

目 录

Exergy-ORC 离心径流式单透平双压力循环技术的应用介绍.....	黄华生 侯俊学 (1)
采用 (ORC) 循环回收精馏塔顶馏出物余热发电的效果.....	
.....朱延军 凌达新 叶亚东 周群龙 王太宇 吴植仁 (8)	
低温余热资源的回收再利用.....	周保东 武勇 许卫国 (12)
钢铁企业环保热电工程及建设模式介绍.....	熊全军 (18)
论高炉液态炉渣余热回收	邱润强 许征鹏 (22)
高校洗浴废水利用热泵余热回收应用的理论探讨.....	张超甫 张丽娜 (27)
浅析构建钢铁企业节能减排新体系.....	李林林 郑祖强 (30)
河钢邯钢 5、6 焦炉荒煤气余热回收技术的应用总结.....	韩培 马庆磊 邵有辉 (34)
回转空预器漏风控制研究.....	王大军 (38)
碱回收多效蒸发热力系统的研究.....	阎尔平 罗正芳 张晓弟 (43)
可回收汽轮机排汽余热资源的燃气蒸汽联合循环与低温多效海水淡化耦合式生产在钢铁行业中的应用探讨.....	王 涛 王铁民 陈素君 陈赞华 (46)
某引进型饱和蒸汽汽轮机的结构分析.....	王开拓 李娉 洪晓麦 张云群 (51)
青特钢高炉冲渣水余热应用于海水淡化的探讨.....	王东 周扬民 仪垂杰 (54)
实现天然气热能全利用——烟气源热泵供热节能技术简介.....	李崇兴 (57)
陶瓷窑炉余热通过“呼吸系统”完全回收利用案例分析.....	温千鸿 简润桐 (64)
新型锅炉余热利用暖风器的研究及应用.....	黄举福 林琪超 谢庆亮 程小峰 (69)
蓄热式高温燃烧技术在火化机上的节能应用.....	孟浩 郭婵 (74)
以 EMC 模式和技术创新推动中国余热发电产业持续健康发展.....	史庆玺 (78)
有机朗肯循环发电技术应用研究现状.....	谢飞博 朱彤 (84)
与空气轮机发电系统相匹配的高温热管空气预热器.....	宿新天 (91)

第十五届全国余热回收再利用技术与产业发展高峰论坛

真空相变换热技术在高炉冲渣水余热集中供热项目中的应用.....	
.....	师文龙 李雪梅 李伟 徐国伟 (95)
转炉一次烟气的余热回收利用技术研究.....	魏久鸿 刘晨 (100)
船用柴油机余热利用系统研究.....	张文平 侯胜亚 曾子威 (103)
利用工业余热的闪蒸-双工质联合发电系统的焓经济分析与优化.....	
.....	陈桂兵 赵军 安青松 王永真 骆超 陈玉涛 张明蕊 (113)
论烧结球团用链板机的应用.....	张经纬 (122)
热管技术在化工余热回收中的应用.....	马永锡 (125)
烧结余热发电工程设计优化措施.....	刘美丽 邓丹 靳忠孝 窦艳杰 (129)
低压饱和蒸汽发电技术在抚顺新钢铁的成功应用.....	张明忱 (134)
乏汽回收装置在热电厂的应用.....	刘颖 吴建伟 (137)
某污泥厂余热回收机组节能方案项目经济性比较及应用.....	张明忱 (139)

Exergy-ORC 离心径流式单透平双压力循环技术的应用介绍

施托克能源（中国）有限公司 黄华生 侯俊学

摘要：本文介绍了离心径流式 ORC 多压力级单透平的特点，详细介绍了该透平的机械和流体力学方面特点，同时提及双循环系统普遍使用的悬臂式轴流透平。

通过机组运行情况比较分析，多压力级离心透平在结构和效率上具有很大的优越性和更高效率。同时，对电厂在占地，基建和设备投资方面也具有明显优势。

径流离心式 ORC 透平相对于轴流透平可以有得到更高的系统热效率，结构布置上更加紧凑，合理，轴系振动小，轴承冲击小寿命长，适合低温余热热源不稳定场合。

关键词： 双循环地热电厂，多压级有机透平，单轮盘多级透平

摘要：

在过去十年中，意大利 Exergy（意能）公司将新的透平技术运用于地热能开发，已经研发，设计，生产和投运了多台有机工质径流式透平。如：

- 意大利 Bagnore 地热发电 1MWe （地热温度 150℃，水冷冷却）
- 土耳其 Pamukoren 地热发电 4 X 22.5MWe （地热温度 178℃，空冷）
- 土耳其 Kipas Holding 地热发电 2 X 25MWe；
- 土耳其 Sultanhisar 地热发电 2 X 14MWe；
- 土耳其 Umurlu 地热发电 2 X 12MWe （地热温度 145℃，空冷）
- 土耳其 AKCA ENERJİ 地热发电 3.5MWe （地热温度 105℃，空冷）

径流出式透平有几个特有的特性，在地热运用上具有革命性的优点，因为它与地热有机工质二元电站工艺条件匹配得非常理想。为了表彰 Exergy 公司近年在地热发电领域的革新性贡献，先后在 2011 年于土耳其获得“最佳地热解决方案”奖、2013 年在荷兰世界地热能源大会上获“2013 年最具创新性技术供应商”奖、2014 年初获“欧洲地热能协会创新奖”。

本文目的是分析在地热行业首次安装的径流出式透平的性能，该有机工质透平安装在 ENEL 绿色电力集团的 Bagnore 地热电厂。并且为目前和将来研发多级循环该型有机透平。

1. 介绍

轴流悬臂式透平传统选型设计大多在双循环地热电厂采用。事实上，市场上还有其它推荐机组配置，比如向心透平。

在地热行业，悬臂轴流透平是参考配置，并且已经发展了 50 多年，代表了现在最为普通的透平技术（Di Pippo, 2005）。

该技术事实上在 20 世纪早期，由 Ljungstrom（反向旋转）和 Parsons 研发用于蒸汽膨胀发电（Dixon, 1998）。

图 1 显示了径向流出式透平中工质蒸气膨胀情况：工质从轴向进入透平轮盘，由中心向外径向膨胀流经轮盘上的多个级。在轮盘出口，工质流经出口螺旋槽进入扩压器，随后进入回热器和系统的冷凝器中。

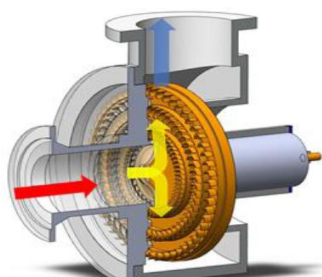


图 1，径流出式透平三维横截面图

为了更好的理解径流出式透平的特点，具备一些透平机械流体动力学和热力学是必须的。

最有名的是涡轮机械的一般欧拉方程，忽略微小的损失，给出了单级比功计算公式(Dixon, 1998 - Lakshminarayana, 1986)：

$$l = u_1 c_{t1} - u_2 c_{t2} \quad (1)$$

式中：u 是圆周速度

c_t 是绝对速度的切向分量。

1 是透平的入口处

2 是透平的出口处

方程(1)的结果，为了最大化单级的比功，公式的第一项要明显的大于第二项：假设透平的 C_{t1} 大于 C_{t2} ，单级的最高比功可以采用向心透平得到，它本身具有较高入口圆周速度，和较低的出口圆周速度。

而径流式透平反而每级的比功较小，这是由于蒸气膨胀时圆周速度是减小的 ($U_1 < U_2$)。

而且，从热力学上知道，膨胀工质是小分子量，比如水蒸汽特别适合电力生产，它具有高焓降，高体积流和高容积比特性 (Poling et al., 2000)。

因此，径流出式透平用于水蒸汽面临一系列的限制。级的数量是强制性的，为了将焓降完全转换为机械功，级数是强制要求的。由于这样，Ljungrom 研发了他的反向旋转径流式透平，通过增加级的比功来减少级的数量。

而且，由于进出截面上的体积流量和膨胀比较大（按蒸汽考虑），透平叶片将必须是大叶高，即使是小功率透平也是如此。

因此，叶轮必须非常大来适应所有要求的级和长叶片要求。当用蒸汽时，径流式透平配置限制是严重的，并且可以认为并不是合适的方案。

这些问题意味着该型透平没有太大的发展前景，并逐步被轴流透平所淘汰。

2. Exergy 公司的径流式透平

在地热发电方面，径流式透平的运行条件非常突出，与蒸汽比较，工质采用大分子量的有机工质，明显地降低了焓降，体积流和膨胀比 (Poling et al., 2000)：这让 Exergy 重新考虑径流式透平用于地热双循环发电厂。因为这种技术内在的限制就没有了。

如果与传统的有机工质透平相比较，即悬臂式轴流透平，Exergy 的径流式透平证明在机械和流体动力学多处不同，总结如下：

机械方面分析

轴流透平特征很明显，一个轮盘安装一级叶片（以后，称为单轮盘/单级配置。这样布置在悬臂的轴流透平上级数将受到限制，由于转子动力学的原因，级数不能超过 3 级。

而径流式透平事实上，允许有多个级（最多 7 级）安装在一个轮盘上。

单轮盘/多级配置很具有优势，由于减小了轮盘重心和轴承间距，最小化振动和轴承上的动载荷。这些既减少维护工作，又延长了转动部件的使用寿命（见图 2）。

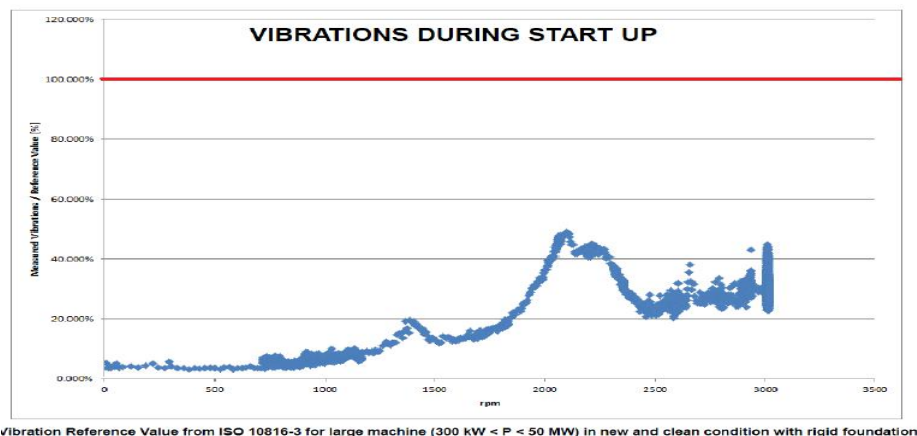


图 2 启动时的振动

而且，圆周速度在级的叶高跨度上是个常量，速度三角形不变，并且叶片可以采用棱柱形而不

是复杂的弯扭形叶片。

流体动力学分析

径流式透平的膨胀截面在半径方向上按比例增加，比起轴流透平，更好的匹配体积流动，而轴流透平通常要求较高的展开角。

这意味着径流式透平末级可以用短一点的叶片，具有明显的机械方面的优势。而在第一级可以用高一点的叶片，从而减小次级和泄漏损失。

基于这个原因，径流式透平起初的几个级有比较好的长宽比，不需要局部进气，避免由于长宽比引起的附加损失。

因此，径流式透平可以管理更高的体积流量比，允许在透平入口有更高的压力，而凝结器压力保持不变，从而可以提高热力循环效率。

最后，由于焓降分配在多个级上（单轮盘多个级），做功系数较小，非额定工况时，径流式透平都具有更高的流体动力学效率（见 图 3）。

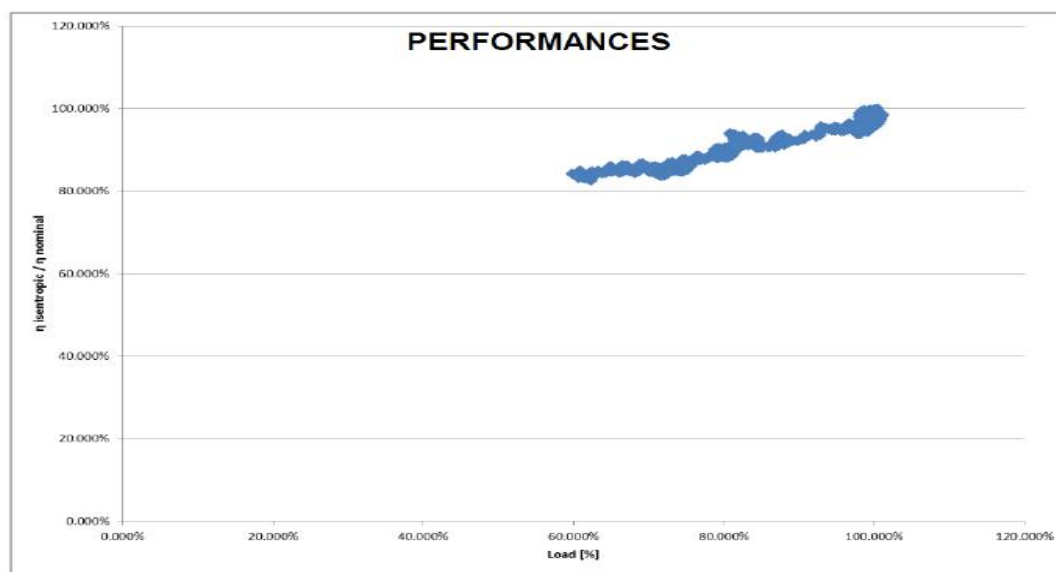


图 3 现场测量性能情况

这些理论上的优势在首台地热有机径流式透平上得到确认。Bagnore 地热电厂双循环电厂后期的设备安装，还将采用多压力级循环系统，并有更大发展。

3. BAGNORE 电厂的有机工质径流出透平

BAGNORE 地热电厂安装了 Exergy 的径流式透平机组，该机组已于 2013 年早期投入运行（Di Pippo, 2005）。该透平提交给 ENEL 绿色能与集团，并安装在 Tuscany 大区米亚塔市的 Bagnore 地热电厂。

Bagnore 地热场属于米亚塔地热储层，该储热层是典型的水为主体的高温高压地热场[5]。该地热场在过去已经被开发过，通过闪蒸地热流体，得到的蒸汽提供给 Bagnore1 号和 2#蒸汽透平，膨胀做功的总功率为 40MW，闪蒸后的热盐水送到小区供暖。

而采用径流式透平，该技术灵活足够适应地热资源周期性的变化。双循环技术被公认是最优方案。

ORC 双循环机组与汽轮机组并列安装，利用的蒸汽温度是 150℃。为了最大化从蒸汽中回收地热能，因此必须最小化不可逆换热。

径流式透平的单压力级循环工质选用的是戊烷，是最合适的工作工质。此外，冷凝系统采用水冷，并且没有回热器，这是因为有机工质膨胀后，能回收的热量已经很少了。

Bagnore、双循环电厂流程图见图示所示。

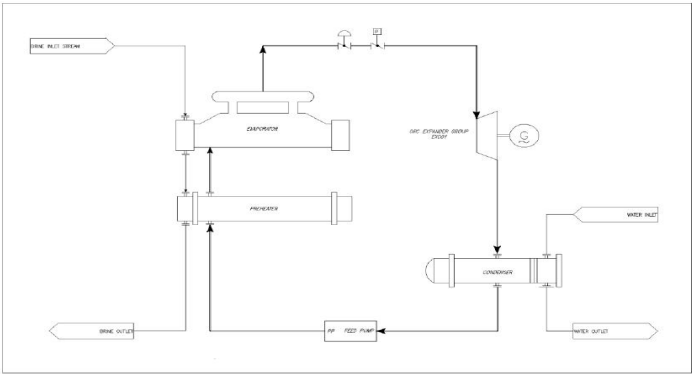


图4 Bagnore 双循环地热电厂流程图

Bagnore 地热电厂如图 5 所示，图中给出是主要部件。



图5 Bagnore 双循环电厂

按照上面的工作条件，我们对轴流透平和径流式透平期望的设计效率进行了比较。主要影响是设计的热力参数，优化后的循环见下表 1。

表 1 Bagnore 电厂双循环设计主要参数

参数	单位	数值
输入蒸汽	—	1.00
质量流量	[kg/s]	18.6
输入温度	[°C]	115.6
输入压力	[bar a]	8.0
排气静压	[bar a]	1.1
等熵焓降	[kJ/kg]	75.4
膨胀率	—	7.7
压比	—	7.27

基于表 1 输入，主要优化的轴流和径流式的机械参数，悬臂布置如表 2 所示。

表 2 优化轴流和径流式透平主要的机械参数

参数	单位	轴流透平	径流透平
转速	[rpm]	3000	3000
级数	—	2	4
轴长度	[mm]	940	800
轮盘直径	[mm]	886-910	740
叶片高度	[mm]	最小 13;最大 44	最小 36;最大 54

上述两种透平期望设计效率见下表 3。

表 3 轴流透平和径流式透平优化后的设计效率

参数	单位	轴流透平	径流式透平
期望设计效率	—	80%	84.5%[6]

设计期望效率径流式透平较高，非常适合于 Bagnore 地热电厂运行。

4. Exergy 公司的多压力级有机工质径流出透平

据文献，地热电厂的双循环系统可能会发展为多压力循环系统，并用于多种地热资源，多压力级循环系统明显地增加功率的输出。与单压力循环比较（Di Pippo, 2005），这些多压力级循环系统事实上能够回收更多的地热能，通过多个压力下汽化有机工质，常常会减少换热的不可逆损失，增加循环效率。该概念让人回想起（GT）蒸汽-燃气联合循环。

如图 6 和图 7 所示，单压力循环系统相对于多压力系统本身比较简单，价格比较便宜。然而，后者的效率优势对投资回收期更有利，因此，在地热行业应优先采用。

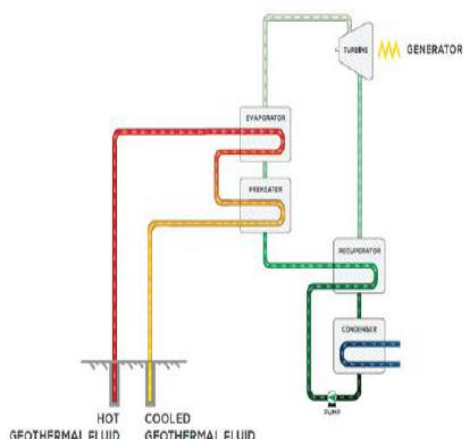


图 6 单压力循环流程图

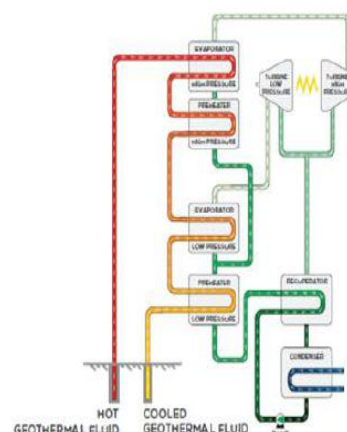


图 7 双压力循环流程图

以目前的加工工艺水平，技术上领先的多压力级地热双循环系统，要求最少每个压力级需要一个透平用于有机工质膨胀，这些透平通常是悬臂布置（Di Pippo, 2005）。

径流式透平给出了完全不同的技术方案的可能性。事实上，在轴流透平中膨胀多个压力工质流，必须增大轮盘间的空间，允许二次流进入与一次流体相混合；混合流然后在剩余的级中膨胀做功。

结果，轴流透平的轴长度必须增加，对悬臂布置结构，在转子动力学上会引起许多技术问题，因为轮盘重心到轴承的距离会相应地增大。

事实上，对于轴流透平，通常在设计上是不可能的。

同时，对于单轮盘单级配置，向心透平不允许多个压力流进入。

然而，径流出式透平给出了不同的方案：它独特的单轮盘多叶片级配置，可以实现级间加大空间的可能（见图 8）。允许低压流体进入透平，同时保持透平依然为悬臂布置，而不会对转子动力特性有过多的负面影响。

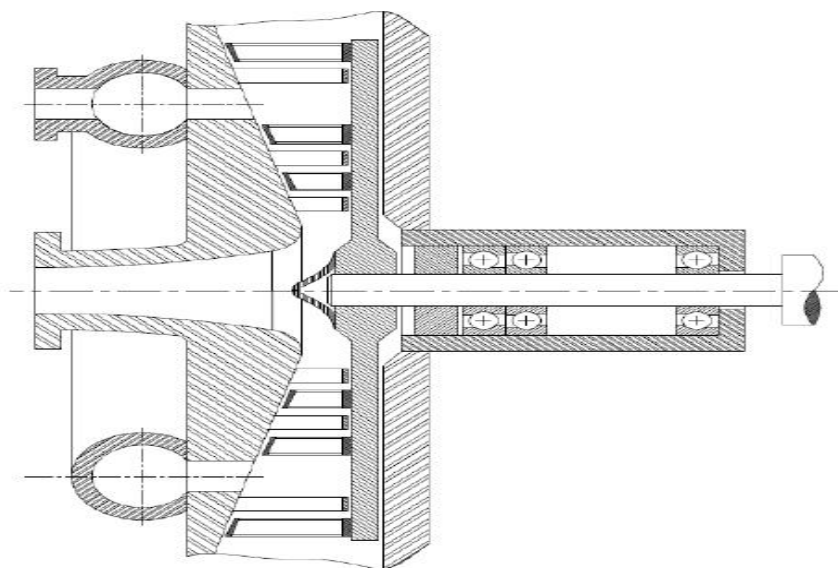


图 8 多压力级径流式透平草图

径流式透平因此允许多压力级循环在单台透平中膨胀做功。该种配置的主要优点是技术经济性

好，减少了每个电厂的透平安装数量，降低电厂的总体成本。同时，减少了电厂的旋转设备数量，备品备件和维护工作等。

此外，电厂的布置更加紧凑。也降低了基础工作量，控制装置和控制复杂性。

4.1 Denizli 多压力有机工质径流出透平

Exergy 公司将该机组运用于土耳其的 Akca Enerji 的 Deniali-Tosunlar 地热场，该地热场以热水为主：

- 门口井地热水流量 350 ton/hr
- 地热流体温度 105℃
- 地热流体回注温度 60℃
- 冷却水入口温度 15℃
- 冷却水出口温度 20℃
- 生产和回注井数量 4

为了评估不同组合的热力循环和有机工质的性能，基于上面的条件进行了热力学分析进行了 4 个不同组合的研究。

单压力循环采用异丁烷和 R134a 为工质；

双压力循环采用异戊烷和 R245fa 为工质。

比较时，考虑的前提条件如下表 4 所示。

表 4 Denlizli-Tosunlar ORC 双循环电站热力学比较前提条件

参数	单位	数据
地热流 ORC 模块入口温度	[℃]	105
地热流 ORC 模块再注入温度	[℃]	≥60
夹点温度	[℃]	5.0
透平机械效率	—	82%
有机工质泵机械效率	—	70%
发电机效率	—	97%
工质泵电机效率	—	95%

分析结果见下表 5 所示，比较了 4 种组合的输出功率，并以输出功率最差的作为基准，因此以单压力循环异丁烷为工质为基准。

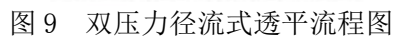
表 5 Deninli tosunlar 地热电厂 4 种不同的循环和工质的组合输出功率

工作循环方式	工质	毛功率	净功率
单压力循环	异丁烷	1.00	1.00
	R134a	1.08	1.03
双压力循环	异戊烷	1.18	1.15
	R245fa	1.19	1.17

在上述情况下，双压力级优化系统输出的功率比优化的饱和或过热单压力系统效率高 20%。多出的功率是由于明显的减小了地热源和有机工质间换热的不可逆损失得到的。

如流程图 9 所示，Exergy 设计的 Denzli-Tosunlar ORC 双循环地热电站，开发地热资源，是一个饱和的双压力循环系统，采用水冷却方式，冷却水来自门德里斯河。由于有机工质 R245fa 膨胀后的可回收热量太少，所以没有安装回热器。

Denzli-Tosunlar 电站优异的性能得益于所采用的径流式透平，该透平是典型的双压单透平力循环系统。



Exergy 公司设计的多压力级径流出式透平，用于膨胀两股不同压力的工质流，主要特性参数如

- 轴功率 4.00MW
- 总级数 3
- 高压级 1
- 低压级 2
- 转速 1500rpm
- 轮盘直径 1450mm

5. 结论

本文展示了 Exergy 的径流式透平技术用于地热能开发：该技术方案由 Exergy 公司提出并实施。详细介绍了悬臂式径流式透平的机械和流体动力学优点，并与悬臂式轴流透平进行了比较分析，该型透平是地热双循环电站的应用广泛。

多压力级单透平机组的优点，已经在地热行业安装的 ORC 径流出透平中得到验证。该台机组安装在 ENEL 绿色能源集团的 Bagnore 电厂，期望的设计效率比通常的双循环透平高 4.5%。并已经模块化设计。ORC 径流式透平将多压力循环的技术投入实际运行，优势明显。

多压径流式透平用于地热行业是非常合适的，特别是小规模低温和地热能的运用，比如 5MW 以下，热源温度低于 120℃，因为其体积流量和焓降是有限的。

综上所述，关于 Exergy 公司的径流式透平情况总结如下：

1. Exergy 径流式透平与传统有机工质透平相比较, 具有较高的效率。
2. Exergy 的径流式透平参照 ISO 标准, 被证明振动非常小。
3. Exergy 径流式透平独特的单轮盘多级设计, 使得在单机上实现多压力级流量成为可能。

采用(ORC)循环回收精馏塔顶馏出物 余热发电的效果

朱延军 凌达新 叶亚东 周群龙 王太宇 吴植仁

[1] 淮安华电环保机械制造有限公司, [2] 宁波互联聚能环保技术有限公司

Zhu Yan-Jun[1], Ling Da-xin[1], Ye Ya-To,[1], Zhou Qun-long [2], Wang Tai-yu, [2] Wu Zhi-Ren [2]

[1] Huaian huadian environmental protection machinery manufacturing co., LTD

[2] Ningbo HULIAN JUNENG environmental protection technical limited company

内容提要: 石油炼制过程中大量 150℃ 以下的低温热能未能利用, 回收利用这部分低温位热能, 可降低的炼油能耗超过 300 MJ/t。塔顶馏出物温度虽低, 但焓较大, 供应稳定, 更利于采用(ORC)循环回收用来余热发电。本文以 300 万吨 / 年重整催化装置精馏塔塔顶馏出物为例, 采用(ORC)循环, 在热源温度: 117℃, 冷源温度: 32℃。蒸发温度 110℃, 过热度 2℃, 冷凝温度 35℃, 过冷度 0.5℃ 工况下, 对比了用 R123, R600a, R600, R290 四种介质的发电效果, 计算结果显示, 利用塔顶馏出物的余热发电, 可发电 3377-3930KW, 年增收电费 2702-3144 万元, 达到年节煤 0.94-1.1 万 T, 年 CO₂ 减排 2.25-2.6 万 T, 减排废热 1.99-3.28×10⁷kJ / h。

关键词: 低温介质发电 有机朗肯循环(ORC) 精馏塔塔顶馏出物 效果

Abstract: In the process of petroleum refining the failed to use low temperature heat under 150 °C, recycling this part of low temperature heat, can reduce the energy consumption of refining of more than 300 MJ/t. The tower distillate temperature is low, but the enthalpy value is bigger, supply stability, more conducive to adopt (ORC) recycling used for waste heat power generation. Based on the 3 million tons/year reforming catalytic device rectification tower tower distillate, for example, Uses the (ORC) cycle, the heat source temperature: 117 °C, the temperature of the cold source: 32 °C. Evaporating temperature 105 °C, super-heating degree 2 °C, the condensing temperature 35 °C, super-cooling degree 0.5 °C condition. Compared with R123, R600a R600, R290 effect of four medium, The calculation results show that the tower distillate of waste heat power generation, Can generate 3377-3930 kw, Increasing electricity 2702-3144?00⁴ yuan/year, Coal can reach at 9456-11000T ,CO₂ to reduce emissions of 22466-26140T, waste heat to reduce emissions of 1.99-3.28

Key words: low medium power screw organic Lang Ken cycle (ORC) distillation tower distillate effect

一. 概述

石油炼制过程中大量 150℃ 以下的低温热能多数未能利用。调研数据显示, 炼化企业的低温余热主要分布于常减压蒸馏、催化裂化、延迟焦化、临氢装置, 这四部分的低温余热约占生产过程中占全厂低温余热总量的 60%—80%^[1, 2]。

未被利用的低温余热最终会以各种形式排放到环境中, 成为废弃热能, 主要通过以下四种途径排放: 空冷器排弃、中间产品罐排弃、烟气系统排弃和循环水冷却系统排弃。其中循环水冷却系统排弃的低温余热约占全厂低温余热的 80%

这种现状既造成了能源的重复浪费, 又对环境产生了热污染。因此研究分析低温余热的回收利用, 意义重大。

回收利用这部分低温位热能, 可降低的炼油能耗超过 300 MJ/t^[3]。

虽然炼油企业低温热资源较多, 由于缺乏热阱, 导致大量低温热能无法回收, 只能采用循环水冷却废弃。此外, 低温热作为一种能源, 本身也具有的一些不足, 如品质较低, 利用难度大。

精馏是混合物精细分离的一个最重要化工操作单元, 它是在精馏塔中完成的, 是石化工业中最重要的静设备。按成品的沸点高低, 精馏塔底产物为重馏份, 塔中产物为中馏份(它们都呈液态),

它们焓值不大，且多数已经换热器与入塔原料换热，而塔顶馏出物为轻馏份（呈汽态）。温位虽低，由于是汽态，故焓值很大，工艺上又需用换热面很庞大的大型换热器将其冷凝冷却到入罐温度，供应稳定，因此，更利于采用(ORC)循环回收用来余热发电。

传统的精馏塔馏出物换热工艺是：离塔热液态（中、重）馏份在换热器中预热入塔原料，再在后水冷器中冷却到入罐温度。由于塔顶汽态产物温度低（通常低于 200℃），国内外精馏过程对这部分热能都没有利用，而要用冷源将热量带出，同时将塔顶馏出物冷凝、冷却到入罐温度，

传统的工艺是将塔顶馏出物先空冷再水冷到入罐温度入罐。

这种馏出物冷凝冷却工艺有很多缺点。仅以塔顶温度较低（只有 117℃）的 300 万吨 / 年重整催化装置精馏塔塔顶馏出物为例^[4]，存在以下缺点：

1. 塔顶馏出物带着出的热（ $Q=1.458 \times 10^8 \text{ kJ/h}$ ）不仅未被利用，还要用空气和循环水带出，排到环境，对环境造成热污染；

2. 设备重（约 882.6T），空冷器总换热面积 4733m²，重 492.4 吨，水冷器 8 台，总换热面积 1760m²，重 144 吨，25kw 风机 36 台，机装容量 900kw；

3. 占地面积大（约 1280m²）；

4. 运行费用高（不计维修和人工费，年运行费约 1420 万元）

如果采用(ORC)循环，将这种余热回收发电，节能减排意义重大。

二. 流程和不同循环介质的对比

新的精馏工艺是将低温发电循环中的蒸发器替代了原工艺中的空冷器和水冷器，其它流程设备完全不变。由精馏塔上升的汽态塔顶馏出物料直接进入发电机组的蒸发器的馏出物侧，本身被冷凝成液态馏出物入罐，同时将有机工质加热，使其蒸发，变为汽态的工质送往拖动发电机的动力机，做功后的乏汽进入冷凝器，冷凝成为液态有机工质，再由工质循环泵加压进到蒸发器的介质侧，使其蒸发，变为汽态的工质后送往拖动发电机的动力机，完成一个介质循环。

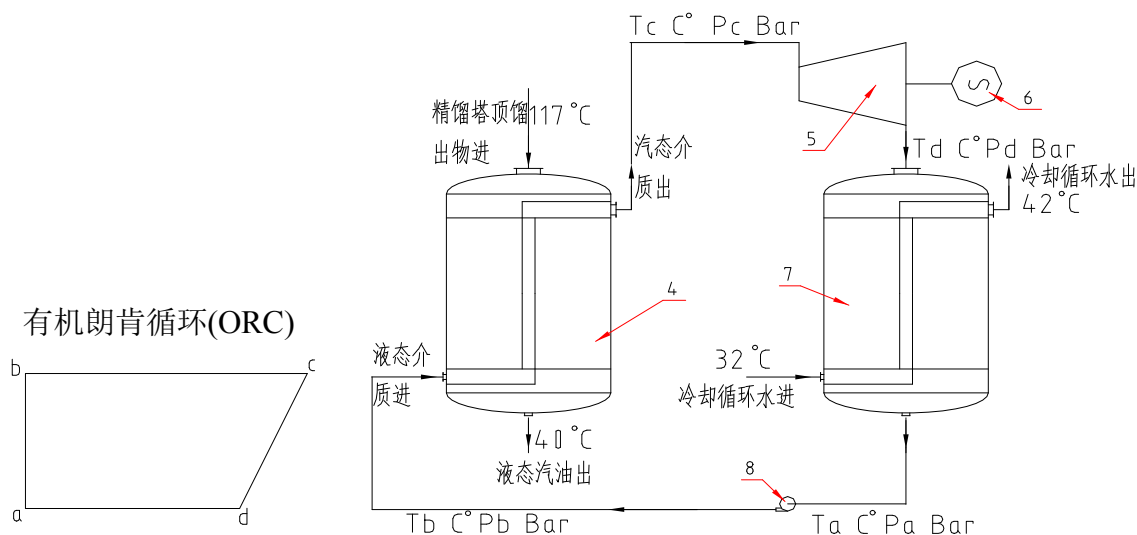


图 1 采用 ORC 循环塔顶馏出物余热回收流程图

图 1 是采用(ORC)循环利用塔顶馏出物余热发电流程图。117℃的精馏塔顶馏出物，在介质蒸发-冷凝器（4）中被冷凝冷却到 40℃ 入罐，同时将介质泵（8）送来的液态 T_a, P_a 的介质升压到 P_b ，送到蒸发器 4 中，蒸发为 T_c, P_c 的介质蒸汽，将此蒸汽送到动力机（5），拖动发电机（6）发电，动力机（5）的排汽以 T_d, P_d 的状态送到介质冷凝器（7）中被冷凝到 T_a, P_a 的状态，用介质泵（8）升压到 P_b ，送往蒸发-冷凝器（4）中被蒸发，完成了介质一次循环。所述动力机（5），可根据低温介质的循环量、蒸汽参数来选用介质汽轮机或螺杆膨胀动力机。

在介质的压-焓图上，读出四种介质的工况的参数记于表 1，将四种介质效果对比的结果记于表 2。

介质	点	T	P	h	做功焓差	Δp	加热负荷	冷凝负荷	备注
		°C	Bar	kJ/kg	kJ/kg	Bar	kJ/kg	kJ/kg	
R123	a	35	1.31	233.1					
	b	110	9.78	233.1					
	c	112	9.78	444.8					
	d	35	1.31	412.2	32.6	8.47	211.7	179.1	
R600	a	35	3.27	282.3					
	b	110	18.4	282.3					
	c	112	18.4	735.1					
	d	35	3.27	663.3	71.8	15.13	452.8	381	
R600a	a	35	4.68	281.4					
	b	110	24.1	281.4					
	c	112	24.1	695.8					
	d	35	4.68	632.2	63.6	19.42	414.4	350.8	
R290	a	35	12.2	277					
	b	95	41.2	277					
	c	110	41.2	688					
	d	35	12.2	632	56	29	411	355	

表 1 四种介质的工况点

表 2 四种介质效果对比

介质	热 负 荷 $Q \times 10^8$ kJ / h	介 质 循 环 量 kg / h	理 想 作 功 焓 差 Δh_s $\times 10^7$ kJ / h	输 出 电 功 Ne KW	年 电 费 万元	%	冷 凝 热 负 荷 $q \times 10^8$ kJ / h	年 节 煤 万 T	年 CO ₂ 减排 万 T	减 排 废 热 $\times 10^7$ kJ / h
R123	1.458	687100	2.2399	3807	3046	100	1.230	1.066	2.53	2.28
R600a	1.458	321996	2.3119	3929.8	3143	103.2	1.2268	1.10	2.614	3.28
R600	1.458	321996	2.3119	3930	3144	103.2	1.226	1.10	2.614	2.32
R290	1.458	354744	1.9865	3377	2702	88.7	1.259	0.94556	2.2466	1.99

注：表 2 中热负荷是已知工艺数据，为 1.458×10^8 kJ / h，其余按下列公式计算：

介质循环量 $W = Q \div \Delta h_{c-b}$ kg / h

发电循环的冷凝热负荷 $q = W \times \Delta h_{d-a}$ kJ / h

等熵绝热理想焓差 $\Delta h_s = W \times \Delta h_{c-d}$ kJ / h

设内效率为 0.7 动力机械效率为 0.93 发电效率为 0.94，

输出电功率 $Ne = \Delta h_s \div 3600 \times 0.7 \times 0.93 \times 0.94$ KW，

设年工作为 8000 小时，年电费为 $Ne \times 8000 \times 1$ 元，

煤耗按 350g/KW.h 计，年节标煤为 $Ne \times 8000 \times 0.35$ T，

减少 CO₂ 排放按 0.8316Kg/KWh 计，年减少 CO₂ 排放为 $Ne \times 8000 \times 0.8316$ T。

三. 问题讨论

1. 由表 1 可见，从表征介质作功效能的做功焓差(kJ/kg)看，氟氯烃低于烷烃，

R600(71.8)>R600a(63.6)>R290(56)>R123(32.6); 表征介质作功能力的动力机进出口压力差 Δp (Bar)看, R290(29)>R600a(19.42)>R600(15.13)>R123(8.47), 氟氯烃也低于烷烃; 考虑到 R123 的价格较高, 石化企业又可自产烷烃, 因此, 烷烃更宜用作石化企业的循环介质。

2. 大型石化企业精馏塔顶馏出物热焓大, 介质循环量很大, 只适宜用汽轮机作为动力机, 建议先从国外引进, 在消化、吸收的基础上国产化。

参考文献

- [1] 宫超. 应用低温热潜力系数快速评价炼油低温热利用潜力[J]. 炼油技术与工程, 2009 39(1):50-53.
- [2] 侯凯锋, 蒋荣兴, 严裤, 等. 大型炼油厂能耗特点分析及节能措施探[J]. 炼油技术与工程, 2009 39(9):46-50.
- [3]. 李立岩. 低温热在炼油行业中的回收利用[J]. 能源研究与利用, 2010. (6):29—32.
- [4]. 李建双, 周睿, 300 万吨/年重催装置分馏塔顶湿空冷改造方案[J]. 化学工程与装备, 2011. (5):51-52

低温余热资源的回收再利用

周保东 武勇 许卫国

哈电发电设备国家工程研究中心有限公司

摘要：低温余热资源的利用，是涉及到世界未来的可持续性发展的问题，是人类面临的共同课题，在开发新能源的同时，怎样利用原有设备浪费掉的余热资源也是当今世界各国的共同话题，本文着重介绍了炼钢厂、水泥厂、电厂余热资源的利用，通过余热锅炉、闪蒸装置和新研制的低参数混压进汽汽轮机发电技术。

关键词：余热锅炉 闪蒸装置 低参数混压进汽汽轮机

前言：

能源利用技术在人类社会发展中占有举足轻重的地位，是现代社会前进的主要动力之一，在一个世纪中，煤炭、石油、天然气等化石能源的开发与利用揭开了大工业时代的序幕，人类总的年能源供应量增长了近 10 倍。然而，无节制的资源开发和低效的能源利用造成了大量的资源浪费与日益严重的生态环境污染，人类的生存空间受到了极大威胁。在新世纪里，能源科学不得不同时面对资源短缺与环境污染的双重压力，因此，人们逐渐将目光转向原来浪费掉的及可再生资源 and 新能源的利用上。

近年来，世界各国都在开发新能源及一些化石能源的替代产品，主要有核能、风能、太阳能、潮汐能、水力发电等，但短期内，还无法取代传统的、技术比较成熟的火力发电。

火力发电及水泥工业是两个能源消耗大户，仅以水泥工业来看，水泥生产几乎完全依靠煤炭、电力及矿产资源，并产生大量的废气，其中 CO_2 的排放量占到了我国 CO_2 总排放量的 20%，其废气带走的余热能源损失十分可观，目前，虽然新型干法水泥生产线已使单位水泥熟料的热耗大幅下降，但其窑头熟料冷却机和窑尾预热器仍排放了大量 350°C 以下的中低温废气，其热量约占水泥熟料烧成系统总热耗量的 30% 以上，可见水泥行业的能源和环保的压力是非常大的，回收其中的低温余热从而进一步降低水泥生产能耗是我国新型干法水泥生产企业目前迫切需要解决的节能、提效、环保的新技术课题。而水泥工业纯低温余热发电技术的应用，既可以逐步满足水泥企业自身用电需要，减少外供电量，节约成本，提高新型干法水泥的竞争力，又可以减少对环境的热污染，并达到节能降耗，保护生态环境的目的。

因此，水泥工业纯低温余热发电技术的应用，是解决制约水泥工业可持续发展的有效途径，也是满足水泥工业可持续发展的需要。不论从外部环境到企业内在需求，纯低温余热发电都具备了快速发展的条件，余热发电已成为水泥行业投资的新热点。如何更进一步充分利用中、低品位的余热是目前国内水泥工业需要解决的重要课题之一。

在我国，随着建设资源节约、环境友好型社会目标的提出，可再生性能源开发利用步伐明显加快，尤其是开发利用中、低品位的余热资源已经成为我国能源战略的重要内容。

1. 国内外余热资源的发展趋势：

二十世纪三十年代日本在中国的华北、东北地区建设了十数条带有余热发电系统的干法中空回转窑（又称中空余热发电窑），这十数条窑的余热发电系统为中国后来开发自己的余热发电技术及设备奠定了技术基础。由于战争的原因，这十数条水泥窑及余热发电系统在四十年代及五十年代初基本上处于停产状态，二十世纪五十年代及六十年代初这十几条水泥窑及余热发电系统相继恢复生产运行，至七十年代后期，由于对这十几条水泥窑及余热发电系统进行改造的需要，中国开始自行开发水泥窑及余热发电系统技术及设备，至二十世纪末，中国自己的余热发电技术及设备已经初具规模。

国内针对新型干法窑的余热利用技术早期主要采用带补燃锅炉的余热发电系统，目前已基本上都采用不带补燃的纯低温余热电站方式。纯低温余热利用由于其卓越的环保效果以及适宜的造价、极低的运行费用、超长的运转率，得到了广泛应用，水泥窑纯余热发电已经被国家有关部委、各地政府列为水泥企业余热利用的首选。目前，水泥窑纯低温余热发电技术无论是热力循环系统还是设

备（国产化）都已成熟可靠，尤其是补汽式汽轮机的研制成功，使我国余热发电技术及装备除了汽轮机本体效率比日本略低外，总体上的技术水平已经接近国际先进工业国家水平。

国外水泥窑纯余热发电系统的应用比例是很高的。20 世纪 80 年代以来，先进工业国家发展很快，如日本 70% 的水泥企业在新型干法生产线上都设置有余热发电系统，水泥工业余热发电量占自身用电量的比例，在 1995 年就已经达到了 43% 以上。

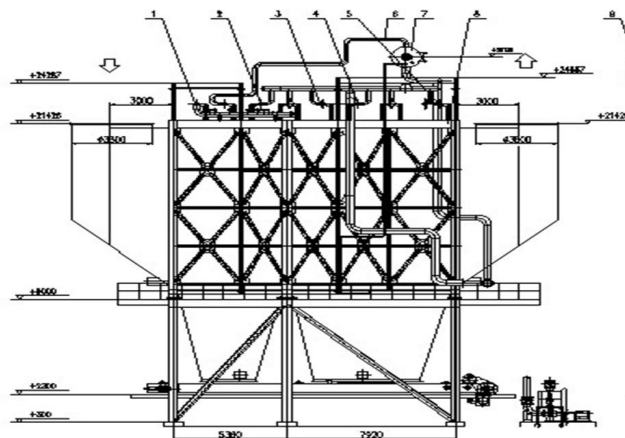
2. 水泥工业余热资源的关键技术开发研究：

这部分研究分如下三个部分：

(1). 余热锅炉关键技术开发研究：

从水泥炉窑低温余热发电机组中带补燃的余热发电设备与不带补燃的余热发电设备的技术比较，就锅炉侧而言，因带补燃技术中炉窑排烟余热锅炉与补燃锅炉烟气侧是相互独立的，只是余热锅炉输出饱和蒸汽与补燃锅炉产生的饱和蒸汽相互混合，在补燃锅炉中过热后再进入汽轮机，其主要优点在于利用补燃来提高新蒸汽参数以适应发电用汽轮机的参数要求，同时也可以避免因水泥炉窑排烟量及排烟温度的波动而造成余热炉内工质参数波动影响汽轮机的进汽参数。可见，带补燃余热发电技术中的余热锅炉与“不带补燃锅炉的纯中、低温余热发电技术开发”中的余热锅炉有一定的差别。前者余热锅炉中没有过热器，过热蒸汽参数由补燃锅炉确定；后者余热锅炉中有过热器，过热蒸汽参数由水泥生产中的中、低温余热确定，需要做好系统参数匹配、设备成套工作。

我公司与华效资源公司合作，在充分吸取日本川崎重工、中船重工第 703 研究院、哈尔滨锅炉厂有限责任公司的设计开发经验的基础上，研制开发的水泥窑中低温余热发电设备为“不带补燃的纯中、低温余热发电技术”，在每条水泥生产线上设置两台余热锅炉，分别为设置于窑尾预热器后的 SP 锅炉（见图一）和窑头空气冷却机后的 AQC 锅炉（见图二）。SP 锅炉采用强制循环的卧式结构，烟气废气流经过热器、蒸发器、省煤器后，废气温度降至 92℃ 左右，然后再进入熟料冷却机原有的电收尘器并经风机排入大气，每级受热面上均设置机械振打除灰装置。AQC 锅炉采用立式结构，整个锅炉分两个压力单元，1.15MPa 为主汽段，0.13MPa 为补汽段，省煤器出水分别供给 SP 锅炉蒸发器和 AQC 锅炉高、低压蒸发器。锅炉每段受热面为管箱式结构可整体出厂，其受热面采用鳍片管。



图一 SP 锅炉

SP 锅炉是应用于水泥窑余热发电系统中回收水泥窑废气余热的关键设备，其安装部位为：水泥窑窑尾预热器废气出口至窑尾高温风机入口的废气管道上，该锅炉设计入口废气温度（水泥窑窑尾预热器出口废气温度）325℃，废气流经过热器和蒸发器后温度降至 210℃ 左右，然后经窑尾高温风机排出后水泥生产系统再利用其余热。。

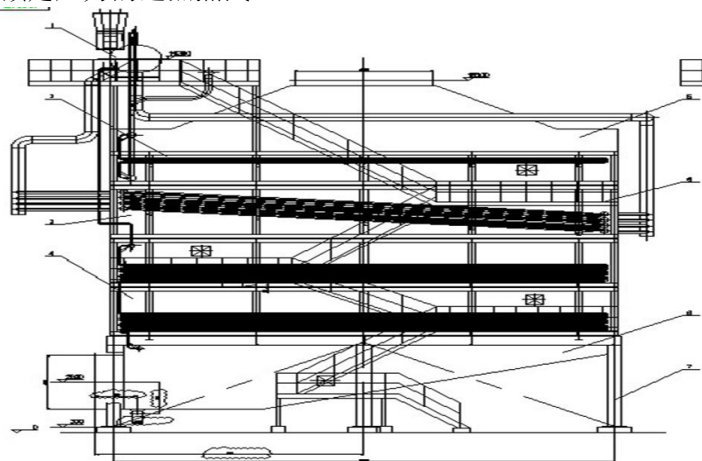
SP 锅炉卧式布置，强制循环。由 AQC 炉省煤器分配来的 186℃ 热水引入锅筒，通过下降管流入蒸发器，在这里被加热后的汽水混合物再引回锅筒，而后从锅筒引出饱和蒸汽进入过热器，在过热器中被加热后生成额定压力的过热蒸汽进入发电系统。

SP 锅炉的热源来自水泥窑窑尾预热器排出的废气，其废气温度较低（325℃），粉尘含量较大（80g/Nm³），运行中受热面的积灰较严重。为了防止积灰，提高锅炉热效率，实现锅炉安全、稳定运行的目的，锅炉结合实际运行情况及其具体结构特点，采用机械振打装置予以清灰。锅炉炉墙采

用轻型护板加外保温结构，为降低锅炉漏风系数，从而不影响水泥生产和稳定发电，炉墙人孔、穿墙管、炉墙护板接缝、炉外集箱处的密封等均进行了精心设计。

AQC 余热锅炉为水泥窑余热发电系统中回收水泥窑废气余热的重要设备，安装于水泥窑熟料冷却机废气出口至收尘器间的管道上，因此其简称“AQC”余热锅炉。该锅炉设计入口废气温度 360°C ，废气流经过热器、蒸发器、省煤器后温度降至 92°C 左右，然后再进入熟料冷却机原有的电收尘器并经引风机排入大气。

AQC 锅炉立式布置，自然循环。给水（水温 48°C ）引入省煤器，工质在省煤器中被加热到 186°C 后从出口集箱引出至给水操纵台，由给水操纵台分配热水引入锅筒，然后自锅筒引出，经下降管流入蒸发器，在这里被加热后的汽水混合物再引回锅筒，而后从锅筒引出饱和蒸汽进入过热器，在过热器中被加热后生成额定压力的过热蒸汽。

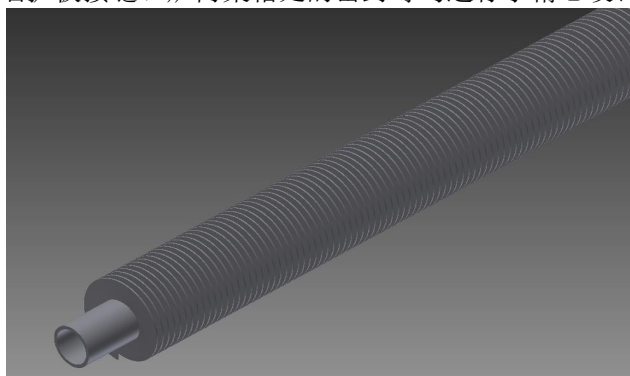


图二 AQC 锅炉

AQC 锅炉的热源来自水泥窑窑头熟料冷却机排出的废气，其废气温度较低（ 360°C ），粉尘含量一般（ $30\text{g}/\text{Nm}^3$ ），运行中受热面的磨损较严重。

针对这个矛盾，同时为了提高锅炉热效率，实现锅炉安全、稳定运行的目的，本锅炉结合实际运行情况，及其具体结构特点，在整个布置和设计中采取相应有效措施：锅炉过热器、蒸发器、省煤器受热面采用螺旋翅片管（见图三），从而可以组织起更为有效的废气流场，加强换热，并且能在较大程度上减轻磨损，延长检修周期，保证锅炉有较长的使用年限。受热面全部采用错列布置形式，经计算，合理地安排管组的间距，从而保证有合理的烟气速度，达到所要求的换热效果。

锅炉炉墙采用轻型护板加外保温结构，为降低锅炉漏风系数，从而不影响水泥生产和稳定发电，炉墙人孔、穿墙管、炉墙护板接缝、炉内集箱处的密封等均进行了精心设计。



图三 鳍片管

(2). 多级低参数混压进汽汽轮机关键技术的研究：

对于低参数混压进汽的汽轮机来说，由于副进汽（二次进汽）温度偏低，存在末几级叶片的水蚀问题。应该说现有的汽轮机末两级都采用了较好的除湿措施，尽管汽轮机经常在部分负荷工况下运行，但都没有发生严重的水蚀问题。

近几年来,由于新技术、新材料和新工艺的发展,金属表面有很多的强化技术和工艺,国外有的汽轮机公司其叶片也采用了表面强化技术,使叶片的强度和抗振性能、耐高温性能和表面耐腐蚀性能都得到大大提高,国内也有了一些金属材料表面处理技术,在叶片强度、耐高温和抗磨蚀等方面已有应用,通过进一步研究,可以用于解决汽轮机后面叶片的抗水蚀问题,而且对于小容量的汽轮机,末级叶片不长,比较容易实现采用新的工艺方法。

纯低温余热发电的汽轮机采用低压、冲动单缸、双汽源凝汽式汽轮机,冲动式设计。整体设计上材质的选用保证能在主汽温度达到 400℃ 时长期稳定运行。

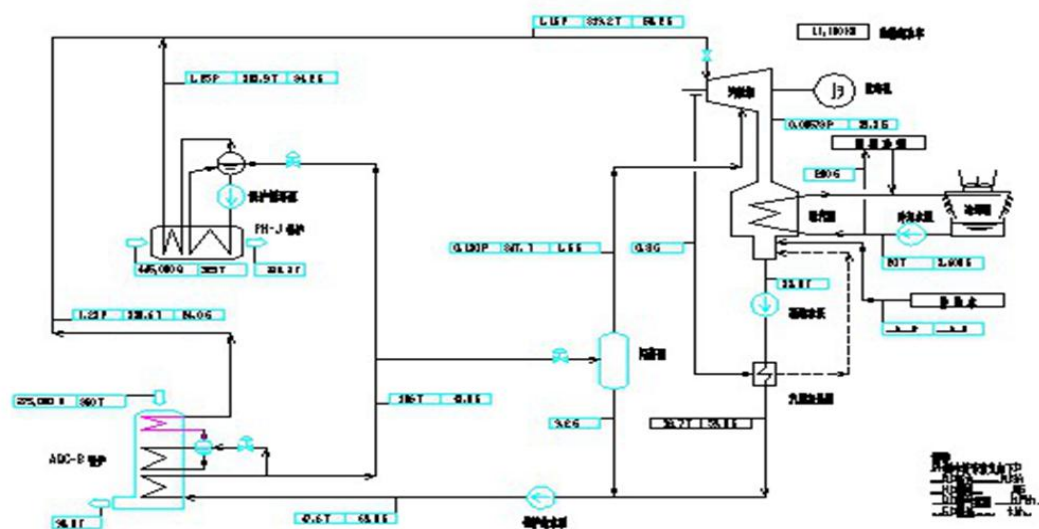
全部叶片采用先进的、现代化的全三维技术设计,其叶片型线全部采用具有万向自由回转度的数控机床加工,保证具有较高加工质量和效率。全部隔板采用焊接式隔板。

末级动叶进汽边焊整条司太利合金片,次末级电火花强化,以便有效地防止水蚀现象。末级叶片根部的反动度控制在 25% 左右,以提高机组调峰性能,提高末级的安全性和经济性。

在设计中提高并将特别校核位于低压进汽前、后级的叶栅和动叶的强度及抗振性能。

(3). 水泥厂低温余热发电系统整体性能优化研究:

由于水泥厂低温余热发电技术中具有余热锅炉传热温压低、不带补燃余热锅炉排气量与排气参数受炉窑排气状况影响较大、多级低参数混压进汽小型汽轮机需灵活随余热锅炉参数的变动进行调节等特殊的问题,因此,不带补燃余热发电技术对机组系统的整体协调性能及专用汽轮机的“机跟炉”运行调节性能将提出更高的要求。需要从余热发电整体系统(见图四)角度来考虑各主机之间的参数匹配及系统整体性能的优化问题。



图四 余热发电系统图

3. 技术的创新点:

(1). 窑尾余热锅炉的积灰和清灰问题:

水泥窑排烟中所含的粉尘与燃煤锅炉的排烟粉尘相比有其特殊性,这类粉尘粘性较强、磨损性也较强,因此受热面磨损、积灰、沾污等问题比较突出;而设计中考虑到提高传热效率,一般余热锅炉受热面都要采用翅片管,这样堵灰、沾污问题将更为突出,因此有效地吹灰、防堵灰、防磨损或在余热炉前先对烟气进行适当的净化处理是此类余热锅炉技术优化所面临的关键课题。

窑尾余热锅炉的受热面管束采用立式蛇形管结构,受热面在长度方向上柔性比较好,在振打过程中能够消除振打过程中冲击受热面应力变形,保证锅炉受热面管子的寿命。用连续振打清灰的同时避免了瞬间清灰量过大,对窑尾高温引风机的影响。

窑头锅炉按烟气流动方向采用立式布置,设计选用合理的烟速,排烟中所含的粉尘在重力和烟气自吹灰双重作用下,正常情况下一般不会发生堵灰现象。

(2). 窑尾余热锅炉的漏风问题:

对主要漏风点的各种门孔、穿墙管束及锅炉清灰振打装置的采取二次焊接密封结构予以处理。

锅炉炉墙采用轻型护板加外保温结构，为降低锅炉漏风系数，不影响水泥生产和稳定发电，炉墙人孔、穿墙管、炉墙护板接缝、炉外集箱处的密封等均进行了精心设计。

(3). 锅炉水循环方式：

窑尾余热锅炉采用热水循环泵强制循环，在锅筒和蒸发受热面之间作为循环的动力，采用强制循环能够提高过热蒸汽的品质，水循环安全可靠。

窑头锅炉采用自然循环，循环动力来自汽水之间的密度差，对于低压力参数的热力系统，自然循环运行成本低，水循环能实现安全可靠运行。

(4). 闪蒸发电技术：

闪蒸发电技术主要以200℃~500℃的低温废气作为热源，通过余热锅炉将低品位低温热能生产出过热蒸汽和一定量的饱和水，与过热蒸汽一起进入多参数汽轮机做功发电，从而增加余热发电功率，可比常规技术多发电10~30%左右。

增加的闪蒸回路，使得该系统具有平衡和吸收不稳定热源发生的参数变化，保证发电系统安全、稳定、高效的运行。

下面简要介绍一下闪蒸蒸汽工作原理：

A. 闪蒸蒸汽产生原理：

水的沸点与压力一一对应，压力越高，对应的沸点越高，压力越低，沸点也越低。高压热水或高压饱和水突然扩容或降压，则有一部分水会汽化成蒸汽，其加热热源来自水中的汽化潜热。

如果以高压水为工质，在余热回收用的换热器内水吸热升温后并不汽化，然后在闪蒸器中扩容降压，产生一定压力的蒸汽，再让蒸汽通过汽轮机膨胀对外做功，发出电能，这就是“闪蒸发电系统”。

应当注意到：只有保持一定的压降，高压热水才能通过扩容产生蒸汽，并且只有一小部分水可以闪蒸成蒸汽。

闪蒸器的工作及运行参数对热能的利用有直接的影响。扩容压力越低，产生的蒸汽量增加，但低压蒸汽的做功能力却降低了。只有在闪蒸蒸汽量D与闪蒸蒸汽在透平中膨胀做功时的焓降 Δh 的乘积($D\Delta h$)最大时，热水的利用程度越高，此时，相对应的闪蒸蒸汽参数是最佳蒸汽参数。

闪蒸时必须降压，因此有一定的 κ 损失。因此，就循环而言，闪蒸发电系统的热效率低于一般的蒸汽循环系统。所以，为充分利用高温热水，减少闪蒸不可逆过程造成的 κ 损失，提高循环效率，采用多级闪蒸系统，使各级的温差相等，获得最好的热水利用效果。至于闪蒸系统级数的设定需按上述原则进行综合考虑。

闪蒸技术在世界范围内已得到了广泛应用，技术相当成熟可靠。目前已了解到的应用领域包括：

- 企业冷凝水回收余热利用，通过闪蒸从冷凝水中产生蒸汽用于给水加热和热交换；
- 锅炉排污余热利用，通过闪蒸从锅炉排污水中产生蒸汽用于给水加热和/或热交换；
- 冶金、水泥行业排放的中低温废气余热综合利用，通过余热锅炉加热给水，然后通过闪蒸产生蒸汽用于发电；
- 闪蒸发电厂，利用地热温泉闪蒸产生蒸汽用于发电。

B. 闪蒸蒸汽计算公式：

$$D = \phi \frac{D_{in}(\eta h_{in} - h_2)}{(h_1 - h_2)\chi} \quad V = \frac{KDv}{r}$$

式中： D 闪蒸蒸汽量，kg/h

ϕ 富裕系数

D_{in} 入口高温热水/饱和水/冷凝水量，kg/h

η 散热系数

h_{in} 入口高温热水/饱和水/冷凝水的焓，kJ/kg

h_1 闪蒸器工作压力下饱和蒸汽焓，kJ/kg

h_2 闪蒸器工作压力下饱和水焓，kJ/kg

x 闪蒸蒸汽干度

V 闪蒸器/罐推荐最小容积， m^3

K 闪蒸器/罐容积富裕系数

v 闪蒸器工作压力下饱和蒸汽比容积， m^3/kg

r 蒸汽容积负荷 $m^3/(m^3h)$

C. 需进一步研究问题:

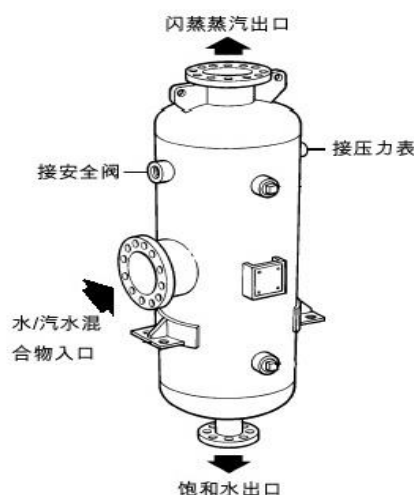
● 闪蒸器/罐的散热损失、闪蒸蒸汽干度、蒸汽容积负荷这几项将影响闪蒸蒸汽的产生量和闪蒸器/罐体的容积, 需在实际应用中考核和验证。

● 闪蒸蒸汽热平衡计算优化及多级闪蒸的设置闪蒸蒸汽量D与闪蒸蒸汽在透平中膨胀做功时的焓降 Δh 的乘积($D\Delta h$)最大, 热水的综合利用率越高。

图

五 闪蒸装置

● 闪蒸技术的应用应尽可能提高热水的综合利用率, 提高整个系统的热效率, 减少 Δh 损失, 因此应关注多级闪蒸的应用条件。



4. 经济效益和社会效益:

(1). 经济效益分析:

水泥窑纯低温余热发电的经济效益十分可观, 以 2500t/d 余热发电机组为例: 其热损失达 $2844 \times 10^4 \times 4.187 \text{ KJ/h}$; 相当于 4.06t/h 标煤的热值。

窑头和窑尾余热发电能利用的余热两项合计: $109.6 \times 4.187 \text{ KJ/Kg}$, 用于发电的热量占预热器出口和熟料篦冷机废气带走热的百分比:

$$\frac{109.6 \times 2500 \times 1000}{24 \times 2844 \times 10000} \times 100\% = 40.15\%$$

由此推算, 2500t/d 生产线年余热发电量可折实物煤 1.21 万吨, 价值 289.6 万元。按其配套的纯余热发电的发电量约 3000 KWh~3300 KWh (按 3000 KWh 计), 电价以 0.5 元/ KWh 计, 每年 (按 310 天计) 的发电收益可达 1116 万元, 经济效益十分可观。

(2). 社会效益分析:

水泥窑纯低温余热发电, 无需消耗燃料, 即可产生相当可观的经济效益。对于水泥生产企业来说, 大大降低水泥生产能耗成本、节约能源; 并可避免水泥窑废气余热直接排入大气造成的热岛现象; 同时由于减少了其它发电厂的燃料消耗, 可减少 CO_2 等燃烧废物的排放而有利于保护环境。

在已投产运行和新建的新型干法窑生产在线, 加设纯低温余热发电装置, 充分利用余热发电, 回收能源, 将会成为我国水泥工业节能的一项重大举措。

积极开发利用水泥窑余热资源已经成为我国能源发展战略的重要内容, 在全球低碳经济与新能源革命的大趋势下, 水泥窑余热发电有可能成为我国未来能源结构中份额最重要的补充能源之一。

5. 结束语:

在未来的世界, 无论是开发核能、风能、太阳能、潮汐能、水力发电等新能源, 还是开发一些化石能源的替代产品或可再生资源, 都离不开余热资源的回收再利用, 因为这不仅关系到环境保护问题, 也关系到人类社会的可持续发展问题。因为资源短缺已经制约了人类的文明与进步, 在开发出终极能源之前, 余热资源的回收再利用是不可或缺的一个重要步骤, 它会缓解资源枯竭的提前到来!

钢铁企业环保热电工程及建设模式介绍

武汉都市环保工程技术股份有限公司 熊全军

摘要: 通过对钢铁企业煤气综合利用电厂、低压饱和蒸汽发电厂、烧结合余热利用发电以及燃气-蒸汽联合循环发电工程实例介绍,说明了钢铁企业环保热电和余热利用方式的多样化和灵活化,同时也介绍了工程建设模式的多种选择。

关键词: 环保热电 余热利用 工程建设模式

Abstract: This article introduces environmental protection energy-saving thermal power plants, steam reheat turbo-generating, sintering waste-heat generating, and combined cycle power plant, to illustrate the different types of power plants in iron and steel corporations. This article also introduces the different choices of project construction mode.

Keywords: environmental protection energy-saving thermal power plant, waste-heat generating, projection construction mode

1. 引言

近几年,我国经济快速增长,各项建设取得巨大成就,但也付出了很大的资源和环境代价,经济发展与资源环境的矛盾日趋尖锐,需要调整经济结构、转变增长方式。

电力、钢铁、有色、建材、石油加工、化工等行业,占了全社会能源消耗和污染排放量的近 70%。如何在这些高能耗企业开展节能工作,减少能耗,减少污染物排放,对节能减排的推进和最后所能取得的成效显得尤为重要。

钢铁工业是国民经济的基础产业,也是我国能源资源消耗和污染排放的重点行业。2009 年,全国粗钢产量突破 5.6 亿吨,占全球的 46%^[1]。钢铁行业能源消耗约占全国总能耗的 16.1%,工业总能耗的 23%。近年来,钢铁工业节能减排不断取得进步。2008 年,重点大中型钢铁企业总能耗 2.43 亿吨标准煤,吨钢综合能耗 626.92 千克标准煤。但是,钢铁工业节能减排仍然面临一些突出问题,能源利用效率与国际先进水平相比仍有差距。同口径相比,吨钢综合能耗高于国际先进水平约 15%。重点大中型企业按照工序能耗计算,48.6%的烧结工序、37.8%的炼铁工序、76%的转炉工序、38.7%的电炉工序能耗高于《粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额》国家强制性标准中的参考限定值,13%的焦化工序能耗高于《焦炭单位产品能源消耗限额》国家强制性标准中的参考限定值(电力折标系数按当量值计算)。高炉、转炉煤气放散率分别达到 6%和 10%,余热资源回收利用率不足 40%;先进节能减排技术的推广应用力度不够,重点大中型企业高炉干式炉顶压差发电(TRT),干熄焦及配套的余热发电配备率仅 30%和 52%^[1]。

2. 钢铁企业环保热电分类

就目前钢铁企业环保热电的建设型式和利用方式,大致可以分为煤气综合利用电厂、低压饱和蒸汽发电厂(SRT 发电)、余热利用电厂(包括烧结合余热发电、干熄焦发电等)和燃气-蒸汽联合循环发电(CCPP)等。

2.1 煤气综合利用电厂

钢铁企业在生产中伴生大量的煤气,扣除钢铁企业生产自用及少量漏损煤气量后,经过全厂煤气平衡,一般会剩余大量的煤气可供用户燃用。钢铁厂的煤气一般分为高炉煤气和焦炉煤气。高炉煤气的主要成分为 CO、CO₂、N₂、H₂和 CH₄等。其中可燃成分 CO 含量约占 25%左右, H₂、CH₄的含量很少, CO₂、N₂的含量分别占 15%、55%,热值仅为 3500kJ/m³左右。焦炉煤气,又称焦炉气,是炼焦工业的副产品。其主要成分为氢气(55%~60%)和甲烷(23%~27%),另外还含有少量的一氧化碳、不饱和烃、二氧化碳、氧气和氮气。其中氢气、甲烷、一氧化碳、C₂以上不饱和烃为可燃组分,二氧化碳、氮气、氧气为不可燃组分。热值为每标准立方米 17000~19000 kJ/m³。

由于高炉煤气和焦炉煤气组分比例的不同，导致了其热值的差别。钢铁厂煤气发电一般采用焦炉煤气点火，燃烧高炉煤气或混烧焦炉煤气和高炉煤气的方式进行发电。典型的煤气发电工程参数：折合高炉煤气量 ~ 24 万 m^3/h ，配备 1 台 260t/h 高温高压煤气锅炉，1 台 60MW 抽汽凝汽式发电机组及配套公辅设施。小时供电负荷 5.3 万 kW，小时供热量 50t/h，全年供电 0.195 亿 kWh，供热 $6.10 \times 10^5 \text{GJ}$ ，节约标煤 10.39 万吨。



武汉都市环保公司兴建的 2x50MW 煤气发电工程



武汉都市环保公司兴建的 2x50MW 煤气发电工程

2.2 低压饱和蒸汽发电

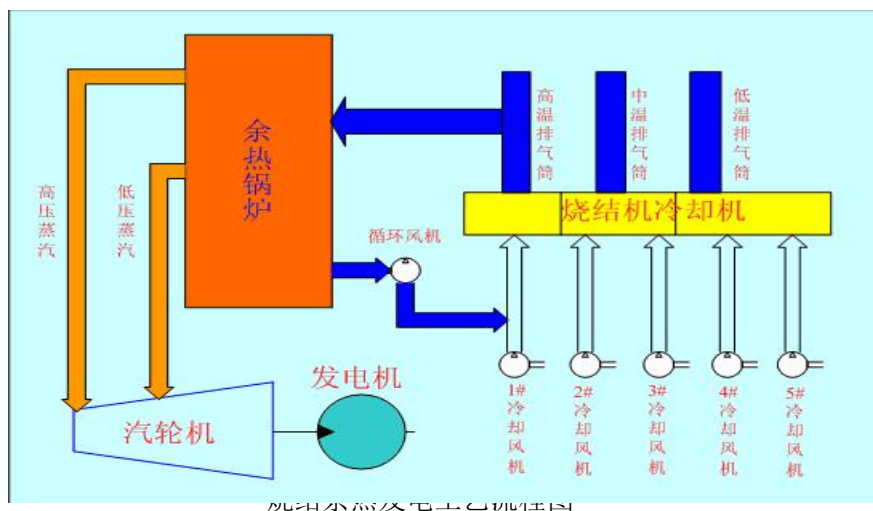
钢铁厂的转炉、电炉、高炉、烧结机、轨钢加（预）热炉以及铁合金冶炼炉等，在生产过程中，用于烟气和设备降温过程中产生的大量饱和蒸汽，将其收集进行余热发电。典型的低压饱和蒸汽发电参数：流量 $55\text{t/h} \sim 70\text{t/h}$ ，压力 $\sim 0.85\text{MPa}$ ，温度 $\sim 180^\circ\text{C}$ 。装机 24MW。



武汉都市环保公司兴建的 2x12MW 饱和蒸汽发电工程

2.3 烧结合余热发电

烧结余热发电是将烧结环冷机的高中温段排放的烟气热能通过余热锅炉换热，将水转化为一定温度和压力的蒸汽，通过蒸汽推动汽轮机做功，带动发电机发电的一个能量转化过程。烧结环冷机低温余热发电技术与火电发电相比，不需要消耗一次能源，不产生额外的废气、废渣、粉尘和其它有害气体。它是当前钢铁工业企业节能和环保要求下的必然趋势和产物，具有充分利用低温废气以达到变废为宝，不仅能获得良好的社会效益和一定的经济效益，同时又能防治环境污染，净化环境的目的，是一举两得的资源综合利用工程。典型的烧结余热发电的参数：2 台 360m²烧结机，各配置一台余热锅炉；主汽压力 1.6MPa，流量 75t/h，补汽压力 0.4MPa，流量 35t/h；汽轮机 22MW，发电机 25MW。



烧结余热发电工艺流程图



武汉都市环保公司兴建的 1x22MW 烧结余热发电工程

2.4 燃气-蒸汽联合循环发电

燃气蒸汽联合循环发电机组，即 Combined Cycle Power Plant，简称 CCGP，是先将高炉煤气、脱硫焦炉煤气混合，经煤气压缩机加压后送至燃烧室与空气混合燃烧，生成高温、高压的气体，经燃气透平机膨胀做功，推动燃气透平带动压缩机和外部负荷高速旋转。从燃气透平中排出的乏气引至余热锅炉，产生高温、高压蒸汽驱动汽轮机，与燃气透平一起带动发电机发电。典型的 CCGP 参数：



2x50MW 煤气-蒸汽联合发电工程施工现场



2x150MW 煤气-蒸汽联合发电工程夜景

3. 工程建设模式分类

钢铁行业环保热电的建设模式较多，有 EPC、BT（建设—转让）、BOT（建设—经营—转让）、BOO（建设—拥有一经营）、BOOT（建设—拥有一经营—转让）等模式可采用。采用较多的方式为 EPC 和 BOT。EMC（合同能源管理）模式在国内开始流行，EMC 是 70 年代在美国发展起来的、目前欧美国家广泛采用的、基于市场的、以赢利为目的的节能新机制。其内涵是：EMC 公司通过与企业签订能源管理合同，为企业提供综合性的节能服务，帮助企业节能降耗，并与企业分享节能效益，以此取得节能服务报酬和合理利润的一种商业运作模式，有点类似 BOT（建设、营运、移交）商业模式。其特点是：企业零投资、零风险、EMC 公司负责运作节能项目，并保证节能率，产生节能效益后，与企业一同分享，以此取得投资回报并滚动发展。2009 年，全国节能服务公司达 502 家，完成总产值 580 多亿元，形成年节能能力 1350 万吨标准煤，对推动节能改造、减少能源消耗、增加社会就业发挥了积极作用^[2]。现在更多的环保公司和投资公司愿意以能源合同管理的型式参与钢铁行业及其它行业的余热利用和节能减排项目中，以此达到双赢，促进发展的目的。

4. 结语

钢铁企业环保热电和余热利用的形式多样，建设模式也可以采取多种方式。业主、节能服务公司（包括具有较强投资能力的环保公司，我公司即是一家具有强大投资能力的环保公司）、电力设计院等各方可以通力合作，采取各种方式建设环保热电和余热利用电厂，促进企业节能减排，走上各方良性发展的共赢之路。

参考文献

- [1]关于钢铁工业节能减排的指导意见工信部节（2010）176 号
- [2]国务院办公厅转发发展改革委等部门关于加快推行合同能源管理促进节能服务产业发展意见的通知，国办发[2010]25 号

论高炉液态炉渣余热回收

邱润强, 许征鹏

(山东富伦钢铁有限公司, 山东 莱芜 271118)

摘要: 文章阐明了高炉冶炼过程中产生的液态炉渣显热回收的必要性, 简要阐述了当前高炉炉渣余热回收技术的发展概况, 并重点描述了微水淬法高炉炉渣余热回收技术, 该技术将绝大部分冷却水蒸发为中压饱和蒸汽进行收集, 然后采用风冷工艺获得热循环空气, 通过余热锅炉再次回收余热, 吨铁可回收热量 257.7 MJ, 综合回收率可达到 87%, 与传统的水淬工艺相比吨渣可节约耗水 7~9 t。

关键词: 高炉渣; 余热回收; 微水淬法

Theory blast liquid furnace slag waste heat recovery

Qiurunqiang, xuzhengpeng

(Foulon Shandong Iron and Steel Co., Ltd. Shandong Laiwu 271118)

Summary: Article illustrates liquid blast furnace slag the sensible heat recover necessity , Briefly describes the current development situation of blast furnace slag waste heat recovery technology, And focused described blast furnace slag waste heat recovery micro-water quenching method. The technology will majority of cooling water evaporated into middle pressure saturated steam collection, Then the cooling process for hot air circulating , again through the waste heat boiler waste heat recovery , Recyclable heat 257.7 MJ/ tons of iron, comprehensive recovery rate can reach 87% , compared with the traditional slag water quenching process can save water consumption 7~9 /tons of iron.

Keywords: blast furnace slag utilization of waste heat micro-water quenching

1 前言

高炉冶炼过程产生的液态炉渣中带有大量的显热, 1 t 生铁平均产出炉渣 300~600 kg 以上, 液态高炉渣温度在 1 400 °C 以上, 高炉炉渣热焓约为 1 700 MJ/t^[1]。目前普遍采用水淬的方式粒化并冷却高温液态高炉渣^[2], 主要工艺有: 底滤法、因巴法、拉萨发、图拉法、明特克法等, 水淬后的高炉渣可用作硅酸盐水泥的部分替代品, 生产普通硅酸盐水泥。此类方法不仅高炉渣的显热无法回收利用, 且造成水资源的大量浪费, 严重污染了大气、水和土壤。

液体高炉炉渣焓热量高, 回收利用潜力较大, 所以一直备受业界人士的关注, 由于高炉液体炉渣的物理性质和高炉出渣不连续性, 以及炉渣余热回收处理后的炉渣要具有优良的综合利用价值和性能为前提, 导致炉渣余热回收困难。目前全国高炉渣热能利用率极低, 所谓的利用就是北方企业冬季用高炉冲渣水取暖, 由于受到供热区域、流量等条件的限制, 以及冲渣水含有大量碱性物质对泵及管道腐蚀等因素, 渣热能利用率极低, 且春、夏、秋三个季节不能使用。因此, 炉渣热能回收利用是十分重要的课题。

2 高炉炉渣余热回收技术的发展概况

2.1 双内冷却滚筒法^[3]

日本钢管公司(NKK)将高炉渣倒在两个反向旋转的滚筒之间, 被转筒内部循环的热媒工质冷却, 然后从热媒介质中回收余热。该方法的主要缺点是必须用刮渣器去除粘在滚筒上的渣膜, 该渣膜形成保温层影响热量的传递, 导致传热效率的急剧下降, 降低了余热回收效率和设备寿命; 冷渣以片状形式排出, 给后续处理带来麻烦。

日本住友金属和石川岛播磨重工业公司在 1982 年建立了能力为 24 t/h 的滚筒—沸腾床法熔渣余热回收系统。熔渣从中间包流出冲击到旋转滚筒表面上时，被破碎并抛至捕集罐进行一次热回收，渣粒经分离器进入冷却器二次热回收后排出。冷却用空气可以预热到 500 ℃，进行热交换产生蒸汽并发电，空气循环使用。

2.2 风淬法

日本新日铁在名古屋制铁所进行熔融高炉渣风淬法实验，工艺见图 1。高炉熔渣被倒入换热器（也称为风洞），风洞的造粒部分由高速气流粉态化。粒子的大部分与风洞内配置的分散板及风洞内壁相碰撞，下落并被从下部吹入空气冷却，从风洞排出。渣粒由震动筛筛出大颗粒后，装入热粒储存仓，再经过二次热交换器的多段流动床被冷却。排出渣的质量由风洞内渣的冷却速度加以保证，回收风洞及二次热交换器冷却空气的余热用来生产蒸汽和发电。该风淬法高炉渣热回收系统的热回收率 > 70%；但由于这一系统的工艺结构复杂成本高，投资回收时间较长，一般约为 5~6 a，制约了其推广和应用。另外，风淬法在粒化过程中动力消耗很大，冷却速度很慢，粒化渣在固结之前容易粘结在设备表面，得到的渣粒直径分布范围宽不利于后续处理。

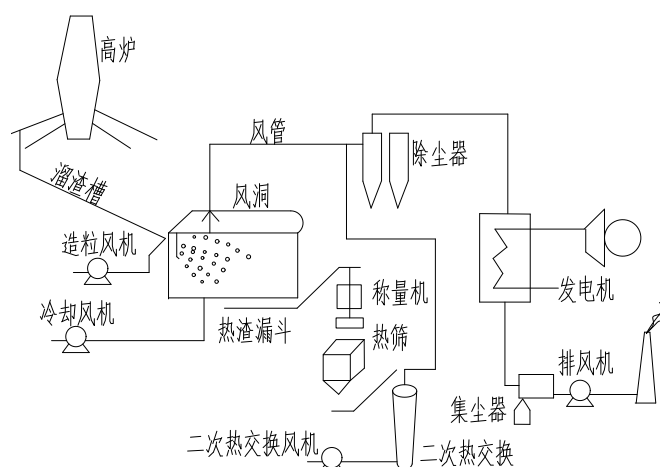


图 1 风淬法工艺流程示意图

2.3 连铸式余热锅炉熔渣热能回收法

连铸式余热锅炉熔渣热能回收工艺见图2。由渣罐车运来的熔渣倒入渣池，熔渣从供渣嘴连续流到水冷平辊和水冷网辊，然后进入链式输送机；在输送机下部通入冷空气，渣的热量传给冷空气和膜式水冷壁，冷却后的渣在碎渣机中破碎；软化水经轧辊流入水箱，经给水泵压入省煤器，然后进入汽包，饱和水经循环泵压入膜式水冷壁，加热气化后回到汽包；从汽包出来的饱和蒸汽进入过热器，成为过热蒸汽。先固化再粒化的工艺，平板状高温渣的导热率和透气性严重影响渣和空气的换热，影响着后续碎渣工序困难、成渣质量差、工序能耗相对加大等问题，因此几乎没有推广应用。

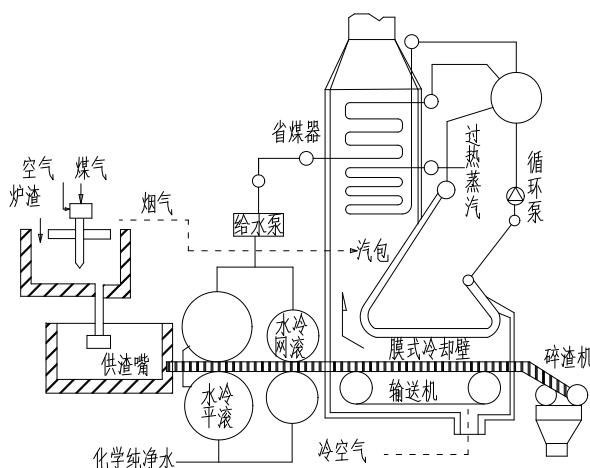


图2 连铸式工艺流程示意图

2.4 机械搅拌法

川崎制铁将液态渣倒入一个搅拌罐中破碎成 $<100\text{ mm}$ 的颗粒，通过辐射与围绕搅拌罐的冷却水管换热。渣从初始温度冷却到 $1\ 273\text{ K}$ ，产生的蒸汽可以达到 $5\times 10^6\text{ Pa}$ ， 723 K ，然后用提升机将破碎的渣送入到气—固换热器中，用空气将其进一步冷却到 523 K ，热空气进入余热锅炉利用。

日本住友金属工业开发的一种机械搅拌造粒装置，熔渣流入造粒装置后，在转动叶片搅拌和挤压的作用下被粒化，并且随着轴的转动被输送到粒化器的外部，水套中的水进行热量的回收。

2.5 离心粒化法^[4]

20世纪80年代，英国钢铁公司提赛德实验室和诺丁汉大学机械工程系研制了转杯一流化床（离心粒化）法处理熔渣，见图3。它采用高速旋转的中心略凹的盘子作为粒化器，液渣通过渣槽注入到盘子中心，由转杯破碎成为液滴，液滴在飞行过程中，与空气和床内水管发生导热、对流和辐射，经过冷却成为固态的颗粒。凝固后的炉渣在底部流化床进一步与空气热交换，空气从设备顶部回收。热回收效率达到60%。

Mizuochi等研究了旋转杯用于熔渣粒化的可行性，考察了不同旋转杯形状和不同转速下的熔渣粒化情况。成功地实现了熔渣的干式成粒并显示转杯转速是影响渣粒大小和形态的关键性参数，证明了液态熔渣的干式成粒技术是可行的，但实际应用还存在着操作工艺要求高、机械磨损严重等缺点，为更实际应用带来一定困难。

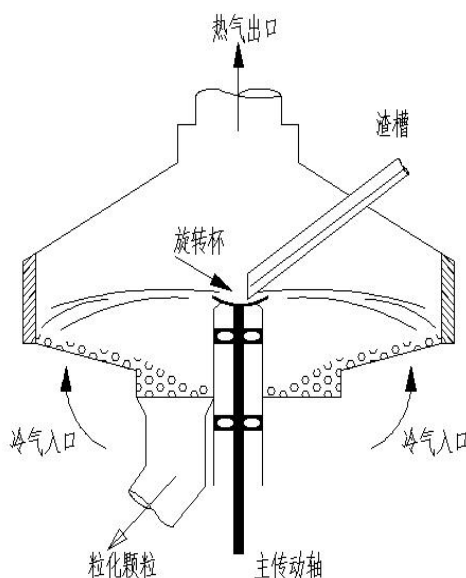


图3 离心粒化法结构示意图

风淬法普遍采用高压、高速的空气作为破碎的介质并提供熔渣破碎的动力，动力消耗很高；机械搅拌法处理熔融炉渣后，渣粒直径大小不均，并且普遍较大，不利于后续の利用，热效率较低；连铸式余热锅炉法是先固化再粒化的工艺，平板状高温渣的导热率和透气性严重影响渣和空气的换热；转筒法处理能力普遍较小，无法和高炉的生产能力相匹配；离心粒化法虽具有单体处理能力大、操作参数少、容易控制等特点，但是占据空间大施工困难，以及同样受到高炉液体炉渣的物理性质困扰。

3 微水淬法渣粒化余热回收技术开发

山东九羊集团有限公司通过总结上述技术的特点，设计出一种新型高炉渣粒化余热回收技术，该技术能够在较大程度上节约水资源的耗用，降低周边环境的污染，能够将绝大多数甚至全部的冷却水变为中压饱和蒸汽得到利用；然后采用风冷工艺获得热循环空气通过余热锅炉再次回收余热。由于继续采用机械破碎和水淬工艺保证了颗粒渣的质量，该技术目前已获得发明专利（专利号为：201210394882.5）和实用新型专利（专利号为：201220525409.1）。

该技术采用的装置（装置结构示意如图4）主要由溜渣口、液渣斗、速冷腔、星形卸渣轮和风

冷腔组成。溜渣口位于该装置的顶部，其进口稍高连接高炉出铁场渣沟，出口稍低位于液渣斗的上方；液渣斗下部连接速冷腔；速冷腔的下部安装星形卸渣轮并连接于底部的风冷腔。速冷腔由上部的粒化轮组部分和下部的淬水部分组成，粒化轮组部分的内部装有两个向外反方向旋转的狼牙棒形滚筒构成的粒化轮，粒化轮的外面为粒化器壁，粒化轮和粒化器壁为空腔水冷结构；粒化轮的传动轴伸出壳体外面连接粒化轮传动组；粒化轮组部分的下方为淬水部分，下部速冷腔外壁两侧正冲粒化轮组部分的落料点方向各安装一排速冷水喷嘴，所有速冷水喷嘴外部均连接于速冷水管，速冷水管通过冷水电控阀连接系统水管。液渣斗的容量根据设备的处理能力与高炉出渣频率确定，要求尽量保证速冷腔的供渣连续性和高炉排渣不能受到制约。喷水量控制在 400 kg/t 铁以内，喷水压力 2~4 MPa，喷水量及喷水压力需根据具体工艺条件作适当调整，其喷水量不宜过多以免影响下一步的热量回收效率，喷水压力根据回收饱和蒸汽压力的 1.15~1.2 倍确定，为确保余热回收效率蒸汽温度一般控制在 200~250 °C。在速冷腔的两端部设置蒸汽收集口，蒸汽收集口汇集连接到蒸汽管道，由于该蒸汽含有灰尘等微量元素，其蒸汽管道不建议直接连接到蒸汽管网，需要通过蒸汽换热器后加以利用。

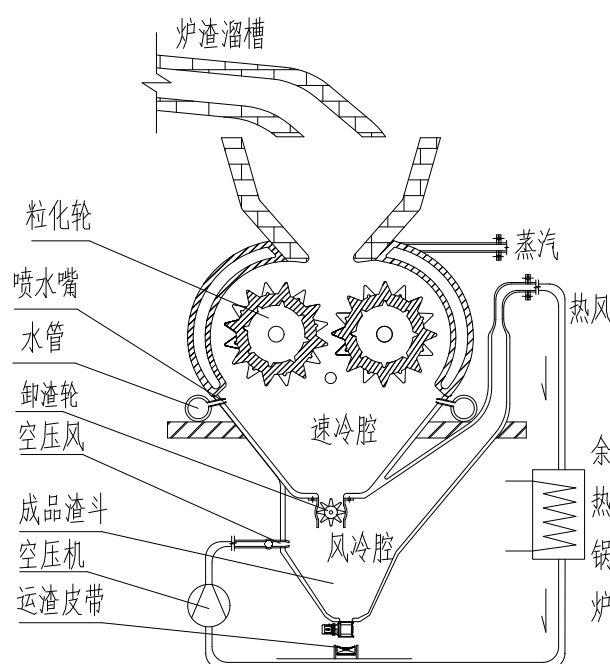


图4 微水淬法结构示意图

当高炉打开渣沟放渣时，同时开启粒化轮传动组使粒化轮组部分开始工作，经过一段延时后（液体渣流到粒化轮组部分时）喷水电控阀打开。液体渣经过高速旋转的粒化轮传动组进行初步破碎成为颗粒状，沿粒化器壁下落，渣粒被冷却水喷在表面后因渣粒内外温差作用产生爆破而进一步粒化，同时喷在渣粒上的水滴受热后蒸发成为蒸汽，并带走部分焓热。粒化完成的渣粒堆落在速冷腔的底部，此时打开卸渣机电源，渣粒通过星形卸渣轮进入风冷腔；蒸汽通过速冷腔的两端部蒸汽收集口进入蒸汽管道后连接到蒸汽系统。粒化轮和喷水电磁阀的运行要与液渣进入装置配合，即液渣未进入装置时粒化轮停止转动或降低运转速度，喷水电磁阀关闭，降低运行能耗，避免降低蒸汽温度。渣粒在速冷腔底部作短暂停留后进入风冷腔，此时的渣粒温度在 700~750 °C，热焓约 863 kJ/kg 渣左右，通过安装在风冷腔腔壁上的压缩风喷嘴对渣粒进行吹风，得到进一步的冷却后的渣粒落入成品渣斗，渣粒在成品渣斗内存放一段时间热量得到充分散发；然后打开卸渣阀，冷却后的成品渣粒通过运渣皮带运往下一道生产工序。风冷腔产生的热风通过风冷腔顶部的锥形管道进入系统热风管，热风中夹带的细小渣粒在锥形管道中由于重力的作用与管壁碰撞后下落至成品渣斗。热风通过热风管进入换热器交换热量后返回到空气压缩机加压后再次进入下一道循环程序。空气压缩机的启停与卸渣电机配合，即没有热渣进入风冷腔时，可停止空气压缩机。

该技术回收高炉炉渣热焓分两步进行，首先通过机械破碎及控制给水量淬水产生 250 °C 以内的饱和蒸汽，吨铁可回收热量 335 MJ 左右，在节约新水耗用的同时避免了冲渣水及水蒸气对周边环境污染；其次，通过余热锅炉回收 150 °C 的热量，吨铁可回收热量 258 MJ 左右，综合回收率可达到 87%。如果适当降低回收率，可以降低第二部余热锅炉的余热回收温度。

4 结语

微水淬法渣粒化余热回收技术具有以下特点：1) 与传统的水淬工艺相比吨渣可节约耗水 7~9 t。2) 与其他余热回收技术相比，由于速冷部分保留了水淬工艺，其成渣产品用于建材原料与传统工艺生产的成渣产品各种结构成分完全相同，不影响后续加工；3) 装置上部的渣斗缓冲了高炉生产中的不连续性。4) 通过两次余热回收，吨铁可回收热量 257.7 MJ，综合回收率可达到 87%。5) 工艺相对简单，磨损系数减少。虽然该技术目前还处于开发试验阶段，某些细微结构上还有待于进一步推敲改进，操作工艺有待于进一步的掌握，但是由于该技术掌握了高炉炉渣余热回收技术的核心切入点，因此具有广泛推广应用的发展潜力。

参考文献：

- [1] 王晓曦、邹汉伟. 液态渣显热回收技术现状及前景分析 [J]. 铁合金, 2007 (5): 34-36.
- [2] 张西鹏、周守航. 高炉炉渣显热回收前景分析 [C]. 第七届中国钢铁年会论文集. 2009.
- [3] 沈成孝. 滚筒法渣处理技术的现状及发展 [J]. 冶金设备, 2003 (03): 1~3, 9
- [4] 闫兆民、周扬民、杨志远, 等. 离心粒化理论与设备 [C]. 第十一届全国 MOCVD 学术会议论文集. 2010.

高校洗浴废水利用热泵余热回收应用的理论探讨

张超甫 张丽娜

北京建筑技术发展有限责任公司

中国建筑科学研究院空调所

摘要: 在建设绿色、低碳校园的过程, 节能问题越来越引起广泛的关注, 高校洗浴废水由于排放温度较高, 有较大的回收和利用价值。本文针对北京某一高校的一个 5000 人的独立公寓楼的集中浴室进行废水余热利用进行探讨, 并就节能量与运行费用进行分析比较。

关键词: 余热回收、水源热泵、经济性

1 前言

能源问题是当代国际性的重大战略问题之一。随着世界人口和经济的迅速增长, 加剧了矿物能源的消耗和枯竭, 导致环境的污染和破坏。提高能效、节约和充分利用现有资源, 挖掘可利用潜力成为科学工作者研究的热点。从热力学第二定律出发, 从质的方面着手研究, 利用低位热源(空气、土壤、水、太阳能、工业废热等)代替一部分高位能源(煤、石油、电能等), 以达到目的节约高位能源的目的。为此, 利用低位能量的热泵技术已引起人们的重视。热泵装置已广泛进入家庭、公共建筑物、厂房, 以提供空调、采暖、热水及热水洗浴供应所需的热量, 而且也已行业中得到应用。

高校公共浴池热水使用量大, 使用时间集中的特点。如果能够利用热泵技术对这部分废水余热进行回收并加以利用, 不仅能够间接节约浴室运行费用, 而且可以减少燃料燃烧气体的排放量, 有利于环保。在注重绿色、低碳校园的理念下, 具有积极现实的意义。

2 洗浴废水资源状况

目前, 绝大部分高校中, 洗浴废水无采用余热回收进行处理, 温度较高的洗浴废水用完后即排入污水系统, 造成热能的浪费。据对某一学校附近的公共浴室的一次测试, 测量时, 淋浴器出水温度为 40℃, 地漏处洗浴废水温度 36℃, 洗浴污水池的温度能达到 29~32℃, 冷水平均温度为 15℃, 洗浴废水没有经过处理, 直接排放到污水系统中。由此可见, 将 14℃的自来水需加热到 40℃才能洗澡, 由于洗浴热水与人体、室内空气、地板、墙体进行了热交换, 损失了一部分热量, 温度从 40℃左右下降到 36℃, 这部分热量只占加热自来水所需热量的 16.7%, 83.3%的热量则被排放掉, 浪费极大^[1]。如果将浪费掉的热量回收再利用将可以节约很大部分的能量。特别是对于大型的浴室, 洗浴废水流量相当大, 回收热能的潜力较大, 效益显著。根据国家污水排放标准规定, 污水排放温度不得高于 30℃, 热水容易破坏水体的生态平衡, 热水排放既浪费了能源, 又污染了水体。因此, 回收利用洗浴废水热能、降低排放温度势在必行。

3 污水源热泵余热回收系统原理及应用

污水源热泵的主要工作原理是借助污水源热泵压缩机系统, 消耗少量电能, 在冬季把存于水中的低位热能“提取”出来, 为用户供热, 夏季则把室内的热量“提取”出来, 释放到水中, 从而降低室温, 达到制冷的效果。其能量流动是利用热泵机组所消耗能量(电能)吸取的全部热能(即电能+吸收的热能)一起排输至高温热源, 而起所消耗能量作用的是使介质压缩至高温高压状态, 从而达到吸收低温热源中热能的作用。

污水源热泵系统由通过水源水管路和冷热水管路的水源系统、热泵系统、末端系统等部分相连接组成。根据原生污水是否直接进热泵机组蒸发器或者冷凝器可以将该系统分为直接利用和间接利用两种方式。直接利用方式是指将污水中的热量通过热泵回收后输送到采暖空调建筑物; 间接利用方式是指污水先通过热交换器进行热交换后, 再把污水中的热量通过热泵进行回收输送到采暖、空调及热水等建筑物中。



某高校 5000 人左右, 按每人次(可以看成每 5d 洗浴一次)洗浴用水量 80L 计算^[2], 浴池开放时间为 16:30~20:30, 4h, 由于浴池长期排放废水温度较高, 有余热回收利用的价值, 拟进行废水余热回收方案进行分析。

Q1 为热泵输出的热水量, kW;

由以上分析计算可知，采用水源热泵回收和利用系统，废水回收换热效率为 80%时，其回收和利用热量为 280kW，相应燃气燃料消耗量减少 40%。

4.2 经济性对比

根据上述方案和计算分析，选用制热量为 350kW 的开利 30XW-0312 中温双转子螺杆水源热泵机组，其电功率 57.6kW。

理论计算采用水源热泵与燃气锅炉与采用燃气锅炉年运行费用(燃料费用和电费,其中燃气费用为 2.8 元/立方，不考虑水费和人员工资费用)的比较如表 1 所示.

表 1 两个方案年运行费用对比

	燃气热水锅炉	热泵	合计
方案 1	30	0	40
方案 2	18	15	7

可知，洗浴锅炉房每年运行费用可以节省

$$\Delta C = C_1 - C_2 = 40 - 35 = 5 \text{ 万元}$$

考虑该系统初期投资费用为 20 万人民币(包括管道改造、机房土建、机组设备投资等费用)，整个废热回收与利用系统的回收期为：

$$T = 20 / 7 = 34 \text{ 个月}$$

若假定设备运行寿命为 15 年，全寿命周期内节约运行费用为

$$T = 7 * (15 * 12 - 34) / 12 = 85 \text{ (万元)}$$

4.3 社会效益分析

某高校采用的燃气锅炉设备，由于对废热进行了回收，并且将回收热量用于对冷水加热，由于水源热泵效率较高（cop 大于 3.0），理论上产生的热量能够满足洗浴要求，使得原锅炉提供的热量相应大大减少（仅仅作为备用部分），容量相应的减少，必然引起燃料燃烧量的减少，在燃烧过程中向大气排放的污染物量同样大大减少，改善了周围空气环境品质，符合环境保护的基本政策。

5 结论

1、经过理论计算分析，采用高校洗浴废水采用热泵余热回收装置后，节约能耗及运行费用，同时大大减少污染物的排放。

2、该方案对于酒店宾馆，大型洗浴中心、工厂浴室等有稳定、规律的废水余热排放场所同样具有借鉴意义。

3、浴室废水的收集及处理对换热器的换热影响因素也不应忽视。

4、由于本案例计算采用的特定燃气价，如果燃气气价不同必然会引起回收期时间的变化。

参考文献

- 1、GB50015 -2003，建筑给水排水设计规范[S] .
- 2、郑晓琴，洗浴废水热回收热泵系统的分析与研究[D], 大连理工大学，2007
- 3、美的空调股份有限公司. 美的水源热泵设计技术手册[R] .美的空调股份有限公司，2009.

浅析构建钢铁企业节能减排新体系

郑祖强 衢州元立金属制品有限公司 衢州市经济开发区金属制品园区
李林林 衢州元立金属制品有限公司 324004

摘要：社会经济高速发展，冶金企业作为能源消耗重点企业，面临越来越严重的资源与环境问题。冶金企业如果要突破资源与环境的两大瓶颈求得更加广泛的发展空间，就必须加快转型升级的步伐大力开发新型、优质、特种钢材和发展循环经济。本文阐述的就是在新的发展条件下，冶金企业如何在节能减排和发展循环经济方面将企业节能与循环经济做的更好。

关键词：资源环境问题、发展、节能与循环经济

Abstract: Social high-speed economic development, metallurgical enterprises as energy consumption key enterprises, face more and more serious resources and environment problems. Metallurgical enterprise, if should break resources and environment of the two major bottleneck obtained more wide development space, it must accelerate the pace of the transformation and upgrade energetically develop new, high quality and special steel, and developing recycling economy. In this paper is that in the new development condition, metallurgical enterprise how in energy conservation and emission reduction and developing recycling economy will enterprise energy saving and circular economy and do better.

在世界经济高度发展的今天，社会资源消耗量不断增加，价格飞涨、冶金企业成本压力与日俱增；环境恶化、气候变暖等问题持续增强。因此，资源和环境是制约冶金企业生存和发展的两大瓶颈。2010 年我国钢铁企业粗钢产量已经突破 6 亿吨，占有世界钢材市场相当的份额，但随着国家人口红利时代的结束和日益严峻的资源环境形势，钢铁企业，尤其是中国钢铁企业只有转变发展思路，开发和采用节能减排新技术、新工艺，才能在未来日益激烈的世界市场竞争中保留一席之地。

中国钢铁企业转变发展主要有两种途径，第一就是转变以粗钢生产为主的产品结构，大力开发新型优钢、特钢产品；第二就是不断开发和采用节能减排新技术、工艺不断发展循环经济，促进企业和社会和谐可持续发展。本文是通过广泛了解国内外钢铁行业所采用节能新技术、工艺的基础上提出的，针对国内钢铁企业构建节能减排新体系提出的几个观点和实用新型技术。

一、中国冶金企业节能减排现状及问题

“十一五”以来，中国冶金企业的节能降耗工作虽然取得了长足的进展，但与世界先进水平相比仍然有较大的差距。我们长期以来只注重工序能耗的下降和过程余热的优化利用，而对系统能效低、创新能源回收的方式与设备的耦合匹配等方面问题则忽视了。能源的高效利用和高效转换的设备和技术是直接涉及资源、能源的，因此其匹配程度和设备性能直接关系到能源的转换效率，因而它也造成过程运行成本高、效率低、污染严重，其本质是资源、能源的流失。

国内冶金企业的能耗主要以煤、焦炭为主，占总能耗的 80%以上。因此，节能减排的关键之一就是要提高煤炭资源的综合利用效率，实现冶金过程的能质转换全价开发，构建以钢铁主流程为核心的产业集群。通过对冶金企业的能源平衡分析，生产过程中消耗的有效能仅占整个消耗的 28.3%，各种余热余能占全部生产能耗的 68.6%，而对这些余热余能利用的程度，调查显示：国内冶金企业余热资源平均回收率为 25.8%，其中产品显热回收率为 50.04%，烟气显热回收率 14.92%，冷却水回收率为 1.90%，各种渣的显热回收率为 1.59%。而国外先进国家对余热余能资源的回收率已经到达 90%以上，如日本达到了 92%。

通过调查，我国吨钢综合能耗高出国外 61.5Kgce/t，按照我国钢产量年 6 亿吨计算，我们消耗的标煤比外国就多出 3690 万吨标准煤，按 600 元/tce 计算，直接经济损失将达到 221.4 亿元。造成这些差距的原因主要就是生产过程中的大量的能源浪费和各种余热余能利用的不充分，只是注重热力学第一定律，注重能量守恒和能源平衡，没有注重到热力学第二定律，没有注重到能量传递是一个耗散的过程、不可逆的过程，不是一个简单的能源平衡的问题。生产实际告诉我们，要注意能源转化及传递质量，即“火用”效率，在这里质量就是数量。只有注重“火用”的价值利用，才能

在工艺过程中实现价值最大化，在能源高效转化中实现节能减排。

二、构建节能减排新体系是构建钢铁企业管理体系的重要部分

质量、环境、安全三体系的建设和发展引领了冶金企业管理体系的发展，精确、高效的生产流程，实现了流程的动态、有序运行和产品质量与技术指标的优化升级，缩小了检查手段和装备技术水平与发达国家的差距，促进了企业观念由成本中心到利润中心的更新，从企业责任到社会责任的转换。但是，冶金企业流程动态运行过程的本质是物质流（主要是铁素流）在能源流（主要是碳素流）的驱动下，按照设定的程序，延着特定的“流程网络”做动态有序运动，是铁素流和碳素流在全过程范围内形态演变的表达。质量、环境、安全三体系的建设，较多的关注了铁素流，它是形成产品的主体，也是企业实现社会价值的载体，但未关注能量流在这个工艺流程中的动力因素。而恰恰这个因素是实现三体系目标、提高三体系运行质量所必须的。因为能耗高、能效低则原材料回收率低，质量不稳定，工艺产品运行成本高，产品竞争力低，能耗高污染重无法履行清洁生产和环境友好的责任。

因此，在三体系中融入能源管理体系才能从根本上优化整合资源、提高体系的针对性和专业性，才能提高各体系的可操作性，更加全面有力的支撑企业卓越绩效规模的建设和提升，使冶金企业管理结构的优化到达新阶段。因此，没有能源管理体系的体系结构是不全面的，没有抓住冶金企业管理的本质要素，管理体系需要能源体系来完善。

三、构建钢铁企业节能减排新体系的方法

节能减排体系的建立对冶金企业能源综合利用效率的提高有决定性的作用，在生产实际中往往一线操作的工人对重点耗能设备操作的时候，很大层面只考虑生产的实际要求，而没有注意到设备的能耗，这样就有了能源资源浪费的源头，本来工艺不需要那么大的风量和水量但设备仍然满负荷运行，对生产过程中的浪费现象也是不闻不问，造成能源资源的白白流失。再者，冶金企业企业无能源产品，且二次能源回收效率低，损失巨大，在国外已实现的“能源转换器”和“废弃物消纳处理器”的功能远未实现，能源管理均处在相对粗放的阶段，生产流程本身还存在着大量结构和配置的不合理，对其过程体系的优化还处于初期阶段。改变落后的用能习惯，创新的用能模式，特别是创新新的能源转化技术和理论非常迫切。在市场竞争日益激烈的今天，企业面临巨大的压力，能源体系的建设对挖掘能源及相关流程的成本潜力，提高能源转换效率、减少污染的意义重大，将直接推动流程结构优化、管理模式创新、提高企业竞争力。

1、通过加强管理，综合高效利用的能源资源。

冶金企业所消耗能源的主要是为冶金生产的化学反应和物理形变创造一个高温条件，并形成产品的质量构成，能源消耗的过程伴随着能源载体的转换，大量能源以过程余热余能的形式耗散。而这些余热余能资源呈载体多样、分布分散、衰变快、不可储存、稳定性差、数量和质量差别大、集中回收利用难度大等特点。并且传统的余热余能回收方式忽视回收能的质量，因而效率低，受能量品质低、不稳定、与用户不匹配等影响，造成回收后又分散，能源利用效率低。另外国内余热余能利用的关键技术开发相对滞后，主要设备要靠高额的费用从国外引进，造成了能源回收的经济效益差。各生产工艺不能及时足量地回收本工序所产生的各种余热，并且对已经回收的余热不能充分的利用的部门也还是放散，部分规模少，产值小的余热项目也得不到重视，因此建立节能管理体系在生产实际中的应用作用非常大，可以提高一线工人的节能积极性，提升整个企业的经济效益和抗风险能力。

2、加强和废弃余热的能源资源化

冶金流是典型的高温化工流程，是清洁气态能源转化器，将炼焦煤、喷吹煤转化为焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气等气态能源，其炼焦烧结、高炉、转炉、轧钢工序都是能源过剩工序，而无自相匹配“热阱”，都需要外界寻求利用配备的“热阱”，如下是某钢铁公司针对各工序的余热余能的回收以及回收利用匹配的“热阱”分析如下：

①冶金企业分布式电站建设

据调查，国内钢铁企业在生产过程中有效使用的能源仅占 31.3%，而过程中

所产生的各种余热余能总计为 9.58GJ/t 钢。如果将煤气的 30%和其他形式的余热余能转化为电能，转换效率按 20%计算，则可以发电 440Kw·h/t 钢，使冶金企业 100%实现电力自供。同时，建设分布式电站，可以将以上提到的工艺用途之外的不同种类的余热余能转化为统一的电能，就近回收、就

近输送、就近使用，使之平衡，能源转化效率高、使用效率高，是冶金企业余热余能高效回收利用的一种有效方式，目前国内做的较好企业的自发电率已经达到 92% 以上。目前国内技术较先进、工艺也比较成熟的余热余压利用技术有：干法熄焦、烧结机带冷（环冷）显热发电、高炉 TRT 压差发电、高炉煤气、转炉煤气联合循环发电或“以气代电”、转炉蒸汽余热利用、加热炉蒸汽利用均可就近建设分布式电站，将余热、余压转换成电力输送到各用户车间和生产线。

②推广节能新技术

1) 将配煤的水分下降 4%，则可以增加发电量 5000 多万度。增加干熄焦项目，每吨焦炭可以发电 160.5 度，年发电量 2 亿多度，节约标煤 7 万多吨。这对于任何一家国内同等规模，产品结果相似的冶金企业，可以实现 50% 以上的电力实现自供。

2) 干熄焦的热导油代替蒸汽技术，同样热量需求用的蒸汽与用热导油的成本相当于 17: 1，按年产 130 万吨焦炭计算可创经济效益 7500 多万元，减少废水排放 46.8 万吨。

3) 煤调湿技术，采用对流传热比传导、辐射传热系数高几十倍至几百倍，使低品质烟气余热利用成为可能，年增加发电量 5000 多万度，减少废水排放 7.9 万吨/年。

4) 炼焦煤中添加塑料

国内废弃的塑料特别是医用塑料处理的方式多为直接填埋，这样即浪费了土地资源而且很有可能给环境造成二次污染。如果在炼焦的原煤中加入这些塑料不仅可以增加炉膛温度而且也可以为社会减轻一部分的环境负担。塑料在 1000 多度的炉膛内，没有有害气体的产生，其热值也很高可以加快炼焦的过程，提高焦炭的各项质量指标。对于企业来讲是多赢的，即可以稳定焦炭质量，减少燃料消耗又可以拿到政府的垃圾处理补贴，对社会来讲减轻了环境压力，真正体现了冶金企业的“能源转换器”和“废弃物消纳处理器”的作用，是中国冶金企业走向成熟的标志。

5) 高炉离心鼓风机防喘放散风能利用：国内高炉鼓风机工艺，在设计高炉风机时，为保证高炉的稳定运行通常会留有一定的富余风量，而当风机正常运行时高炉却不需要这么大的风量，所以必须通过风机的防喘放散阀放散这部分富余的风量。经过研究发现，如果将这部分放散的风能加以利用，可以回收鼓风机 10% 以上的功率。一台 1000m³ 的高炉需要 12000Kw 的风机鼓风，那么可以回收的功率在 1200~1500Kw。

6) 高炉鼓风脱湿

根据调查研究，我国大多数冶金企业的高炉鼓风进口的含湿量为 36g/m³，脱湿后湿度为 9g/m³，可脱去 27 g/m³，每 1 g/m³ 脱湿量可降低焦比 0.8Kg/t~1.2Kg/t 铁，提高风温 6℃，可以控制冷风温度，增加风量，提高高炉铁产量 4.6%。该技术的可以和溴化锂制冷技术有机结合，进一步将富余的地品味的热源加以利用，提高整个企业的能源利用效率。

四、构建节能减排新体系实现过程能质全价开发

过去有关钢铁生产技术主要是涉及铁素物质流和过程供应的保证，对钢铁制造过程中的能质转换技术、二次能源的高效回收及充分利用等方面的技术研究差距很大。因此，要降低生产成本，提高产品竞争力应该从以下几个方面着手：

1) 冶金工艺要趋向紧凑、连续、高效的用能发展，炼钢、铁水一罐到底，

热装热送、连铸连轧。

2) 能源利用集成高效

焦碳厂、干熄焦，烧结矿余热回收、高炉渣、炼钢渣；转炉渣代替白云石；

焦炉煤气分离制氢与转炉煤气 CO 化工合成甲醇，直接还原铁；以余热回收电、蒸汽的方式代替纯蒸汽的方式；炼钢精炼采用真空精炼炉；以热导油替换蒸汽作为载体。

3) 余热余能梯级高效充分利用

过程余能高效梯级利用，建设分布式电站；冶金企业主工序属于重点耗能工序，寻找热阱实现耦合匹配，高效利用高炉水渣用热风炉烟气气流干燥生产微粉；采用焦炉烟气用多效蒸发手段处理焦化蒸氨废水；回收余热用热导油；大力开发尚待开发的余能潜力；停止使用高品质蒸汽做生活供热等低级用途，采用热水、热导油等实现热、冷联供、生活供热。

五、构建节能减排新体系实现生产流程用能耦合匹配

冶金企业制造流程能源网络化高效集成运行是冶金流程在管理和技术上的一次革命，是其运行质量的一次飞跃。她将成为各体系文件的执行体，是符合可靠性、及时性、有效性运行的保证，在

更高层次上实现钢厂三大功能。使新开发干熄焦、TRT、燃气机发电处在精准、高效运行；使过程用能设备高效、低耗运行；使各种能源介质体系处在智能化监控及耦合匹配决策软件优化下可靠运行；使能源管理思想、理念、方法、方案及体系文件得到充分体现并自动执行；使所有工艺系统在最佳能源保证下合理、高效运行；使过程余热余能回收利用处在充分、合理、有效的状态；使过程余热余能及能源介质对环境影响降到最低。

总之，构建钢铁企业节能减排新体系能够使物质流在动力流的推动下，在信息流的管控下，有序、精准运行，实现能源介质优化节能、工艺创新节能、能源结构优化节能、管理优化节能的最佳综合目标；使之成为冶金流程三流（物质流、能量流、信息流）网络化集成运行中心、成为企业管控中心、生产中心、成本中心、社会责任履行中心。使各种能源资源达到合理利用、完全利用、充分利用、优化利用的目的。

河钢邯钢 5、6#焦炉荒煤气余热回收技术的应用总结

韩培 马庆磊 邵有辉

(常州江南冶金科技有限公司 江苏 常州 213125)

摘要: 河钢邯钢焦化厂 5、6#焦炉荒煤气余热利用工程由常州江南冶金科技有限公司研发制造、河钢邯钢焦化厂和河钢邯钢设计院共同完成,具有完全的自主知识产权,5、6#炉上升管余热利用系统分别于 2015 年 11 月 15 日、12 月 15 日一次性投产成功,投产后,项目的各项技术经济指标均达到了设计要求,吨焦回收饱和蒸汽约 100Kg,经济效益、环境效益和社会效益显著,这是荒煤气上升管技术在大型焦炉上的首次工业化应用,具有里程碑意义。

关键词: 上升管 余热利用 节能 荒煤气

1. 前言

从炼焦生产过程热平衡分布看,热损失由 4 部分组成:

从焦炉炭化室推出的 950~1050℃红焦带出的显热(高温余热),占焦炉支出热的 37%;

650~750℃焦炉荒煤气带出热(中温显热),占焦炉支出热的 36%;

180~230℃焦炉烟道废气带出热(低温余热),占焦炉支出热的 17%;

炉体表面热损失占焦炉支出热的 10%。

红焦显热的高温余热,从上世纪末期就已通过干熄焦技术“CDQ”予以回收利用;

废气余热是低温余热,通过热管技术、煤调湿或煤干燥加以回收,是近十年来的事;

炉体表面散热;炉体用海泡石保温、炉顶装煤孔盖节能炉盖,减少散热。

中温显热的余热利用技术一直没有得到应用,常州江南冶金科技有限公司经过多年研发和试验,找到突破口,并在三钢 4.3 米焦炉初步应用的基础上,进一步改进,并申请了多项国家发明和实用新型专利,在邯钢焦化 6 米大型焦炉上的首次工业化应用成功。

2. 项目简介

河钢邯钢焦化厂现有焦炉六座,其中,58 型 42 孔焦炉 1 座, JN43-80 型 42 孔焦炉两座、45 孔焦炉一座,5、6#焦炉为 JN60-6 型 45 孔焦炉。为降低焦化厂能耗,2015 年在 5、6#焦炉建设了上升管余热利用装置一套,5、6#炉上升管余热利用系统,共将原有 90 个上升管全部更换成常州江南冶金科技研发的上升管换热器,同时建立一套汽水系统和电气控制系统,整个系统监控全部纳入 2#干熄焦中控室集中监控。设计改造后达到产生 0.6MPa 的饱和蒸汽,90-100KG/吨焦,同时环保达到达标要求。两座焦炉分别于 2015 年 11 月 15 日、12 月 15 日一次性投产成功,蒸汽并入河钢邯钢蒸汽管网供用户使用。

3. 关键技术

3.1 上升管换热器装置

作为余热系统的核心设备,上升管余热回收换热装置由内、中、外三部分组成,由内至外分别是内壁、套管换热器、外壁,如图 1 所示。

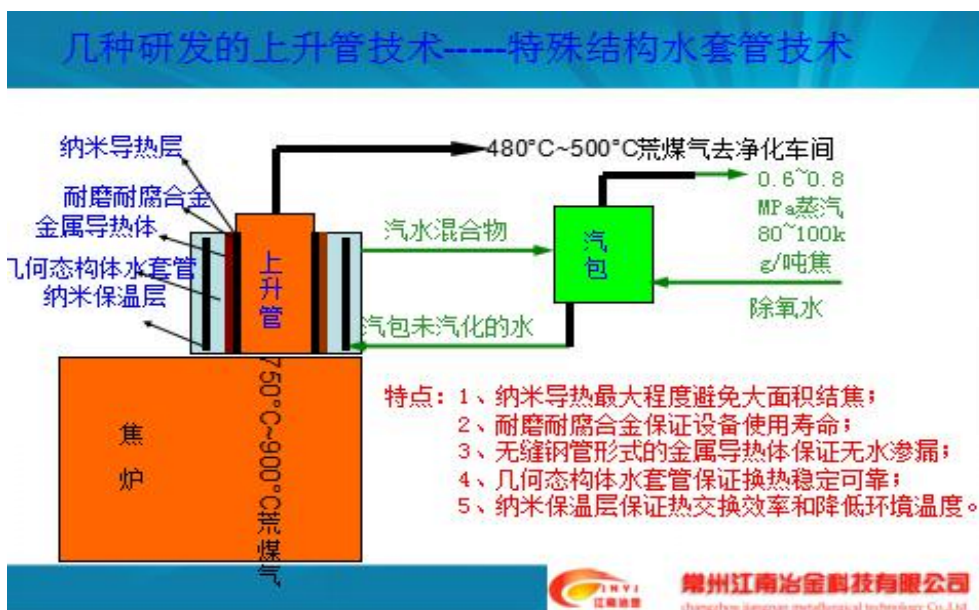


图1 上升管余热回收换热装置结构图

换热器内壁由从内到外分别为纳米导热层、耐高温耐腐蚀合金、金属导热体三部分组成，纳米导热层既可以保证上升管筒体内壁表面的光滑平整，又能将热量快速的向外传递，防止内壁温度持续偏高导致大面积结焦现象的发生；纳米导热层是喷涂在一种耐高温耐腐蚀合金上面，这种合金采用高温抗腐蚀材质，具有较好的抗氧化、渗碳、渗氮特性，可以很好的适应上升管内部这种长期高温及复杂物理化学腐蚀环境，从而有效延长换热器的使用寿命；内壁最外层为金属导热体，这种导热体的特点就是无缝钢管结构，可以将荒煤气的热量快速传递给中间层的水套管换热器，最大限度的降低内壁温度负荷，减轻设备腐蚀，同时其无缝结构，最大限度的保证了水的泄露。

处于套筒中间层位置的套管换热器是余热换热系统的关键部件，是常州江南冶金科技有限公司自身研发的特殊几何态构体结构，除氧水在通过中间夹层过程中与高温荒煤气进行热交换，荒煤气温度由750°C被冷却至450~500°C左右，除氧水最后以气液混合物的形式进入汽包进行分离。

热交换器外壁从内到外由换热器套筒外壁、纳米保温层及不锈钢保护套三部分构成，纳米保温层采用特殊保温材料，不但可以提高热交换效率，而且可以有效控制热量向外扩散，从而显著改善原有上升管存在的表面温度过高的问题；最外层采用的是不锈钢保护套，起到对中间层核心换热装置保护的作用。延长设备的使用寿命。

此种换热器结构形式不同以往任何换热装置，克服了以往换热装置的弊病。换热装置的专利结构形式消除了周期性热应力破坏情况，并且充分考虑了焦炉生产过程中的热量急剧变化所带来的热振现象，中间层和外层保护层的膨胀节结构最大限度的消除了热振应力。

3.2、上升管换热器装置防漏防堵问题的解决方案

上升管换热器装置针对上升管套筒可能发生漏水、内壁结挂大量焦油、使用寿命及换热效果等关键问题进行了技术上的改进与创新，主要有以下几个方面：

3.2.1 上升管筒体漏水问题的解决方案

- 整个换热器为一个整体结构的无缝钢管，内筒内壁为纳米导热层，耐腐蚀耐热，是防止漏水的第一层保护。
- 在纳米导热层的外侧是耐腐蚀耐高温的合金材料，采用自有专利技术的特殊材料，经过2600°C以上高温熔化成型的一种无缝管结构型式，是防止漏水的第二层保护。
- 在合金材料层的外侧是金属导热体材料，也就是无缝钢管，采用自有专利技术的几何态构体的特殊结构，是防止漏水的第三层保护。

水-汽换热在封闭空间内进行，封闭空间在上升管内筒外侧，经过三层保护，水汽不会渗漏至炭化室。

3.2.2、上升管内筒过量结焦问题的解决方案

- 新上升管换热器的内壁采用耐高温进口纳米导热材料，耐热温度为1800°C，经过500°C的高温后内表面形成均匀光滑而又坚固的釉面，无死角，不易造成结焦，即使结焦也不易附着，易于清除。
- 通过进水流量的控制，一定程度上控制了上升管的进出口温度差，从而尽可能的减少了内壁的结焦。采用科学的换热选型和设计，合理的导热系数的选择，减缓石墨的形成、焦油及其他成分的附

积。

C、对荒煤气出口温度的调节控制（大量荒煤气存在的情况下出口温度不小于 450℃），防止了焦油的凝析和吸附。

4. 改造应用效果

三钢焦化的上升管荒煤气余热利用改造从 2014 年 3 月到现在超过 2 年半的时间，安全可靠，没有出现漏水或者结焦等问题，产汽量以及运行的各种数据均达到预期设计要求，得到了业主的认可与好评。

河钢邯钢焦化厂 5、6#焦炉荒煤气余热利用工程分别于 2015 年 11 月 15 日、12 月 15 日一次性投产成功运行将近 1 年，蒸汽并入河钢邯钢蒸汽管网供用户使用。投产后，项目的各项技术经济指标达到了设计要求，吨焦回收饱和蒸汽约 100Kg，经折算，该项目运行每年可回收压力 0.6MPa 的饱和蒸汽 9.08 万 t，扣除自耗电外，折合节约标煤 0.857 万吨，年减排 CO₂ 22.26 万吨，环境效益和社会效益显著，这是焦炉上升管余热回收技术在大型焦炉上的首次工业化应用，具有里程碑意义。

为摸清新上升管的换热情况，使用测温枪对新旧上升管的外壁进行了测量，测量温度情况见表 1。

表 1：上升管温度情况对比表

上升管类型	炉号	上段	下段
新上升管	1	40	51
	6	57	71
	11	54	76
	16	55	75
旧上升管	36	243	276
	41	244	263
	46	279	295
	51	270	294
	56	229	329

此次测量，测温点均在上升管上下两截筒体的中间位置，旧上升管筒体外壁的温度均在 200℃ 以上，新筒体外壁温度由上升管下段底部的 100℃ 左右向上逐渐降低至上段顶部 40-50℃，从外壁温度对比看，换热效果良好。

通过上升管余热回收装置对荒煤气的“预冷却”，有效降低了气态焦油及轻苯等化产品的裂解，提高化产品产率，2016 年焦油、轻苯及硫酸铵收率与 2015 年对比见表。

项目		化产品名称											
		焦油						轻苯					
月份		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
2015 年		3. 11	3. 08	3. 0 2	3. 1 9	3. 1 9	3. 1 1	0. 7 7	0. 81	0. 7 0	0. 75	0. 7 8	0. 7 5
2016 年		3. 06	3. 33	3. 1 7	3. 3 1	3. 2 5	3. 1 3	0. 7 7	0. 85	0. 8 0	0. 76	0. 8	0. 7 7
收率变化	月度	-0. 0 5	0. 25	0. 1 5	0. 1 2	0. 0 6	0. 0 2	0	0. 04	0. 1 0	0. 01	0. 0 2	0. 0 2
	平均	0. 09						0. 03					

表 2：2015 年和 2016 年 1-6 月份同期化产品收率比照表

由上表可见自余热系统投用以来，焦油、轻苯化产品同期收率均有较大提升，其中焦油收率提升明显，2 月份收率提高 0.25%，平均收率提高 0.09%。

另外，由于上升管余热系统对荒煤气的“预冷却”作用，循环氨水喷洒量可减少 10-20%，循环氨水泵电机节约功率减少约 20-30%。

2016 年 6 月底，邯钢集团和常州江南冶金公司在邯钢现场召开专家鉴定会，来自国内数十家钢铁、焦化企业和科研院所的代表参加了会议。与会代表一致认为，邯钢现场应用的焦炉上升管余热回收技术具有取热充分、可靠性高、安全性强等优点，代表了国内领先水平，在焦化行业具有广阔的推广前景。

2016 年 3 月至 5，常州江南冶金科技有限公司利用新研发的第五代的上升管换热器在邯钢邯宝焦化 7 米焦炉进行试验，并取得了成功。

5. 前景展望

邯钢 5、6#焦炉上升管余热回收项目作为全国焦化行业第一家大规模正式投入使用的荒煤气回收系统，是焦化行业在绿色环保、节能减排工作方面的一次大胆尝试，也体现了邯钢集团对环保工作的高度重视和责任担当，在焦化行业值得推广。此后，常州江南冶金科技有限公司分别与安阳钢铁股份有限公司签订了 7、8#6 米焦炉的荒煤气余热改造合同，并正在执行中。同时常州江南冶金科技有限公司分别与邯钢邯宝焦化签订了 1、2、3、4#7 米焦炉的荒煤气余热改造合同，并正在执行中。

炼焦荒煤气余热回收利用的经济效益十分显著，理论中试数据和三钢、邯钢实际使用数据表明：每生产 1 吨红焦的高温荒煤气余热回收后能产生 0.075-0.11 吨 0.6 兆帕蒸汽（焦炉型号不同，产汽量不同）。到 2020 年，以 2015 年全国机焦产量为 4.48 亿吨基数，如果有 50%的焦炉进行了上升管余热回收利用的话，即 2.24 亿吨焦炭产量，平均按照吨焦产生 0.089 吨 0.6MPa 的饱和蒸汽，扣除自耗电后，折合标煤约 185 万吨，年减排 CO₂ 488 万吨。

6. 结语

现全国焦化行业共有焦化厂约 603 家，全国共有大约 1409 台焦炉需要改造。按照 2015 年全国焦炭产能 4.48 亿吨计算，按照每 100 万吨产能的焦炉平均改造费用 2000 万-2500 万元计，市场规模约 90 亿-110 亿元，由此可见，该项目的发展前景是非常好的，值得在行业内推广使用，而且系列延伸产品也是值得期待的。

回转空预器漏风控制研究

王大军

四川省电力工业调整试验所

1. 概述

目前，锅炉系统的节能技术不断得到重视，回转式空预器的减小漏风技术也是其中之一。

随着大容量机组的投运不断增加，漏风问题变得严重，我们有必要对国内外的主要密封技术及使用情况进行总分析、研究。

采用适合空预器运行机理密封技术，来解决转子径向密封表面“蘑菇状”热变形带来的问题，使机组运行在不同负荷下，空气预热器径向密封间隙长期保持不变的工作状态，避免紧急停转防止造成转子非对称变形而损坏，使空气预热器为机组经济运行发挥更大的作用。

根据空预器的运行理论与实践的有机结合，从空气预热器转子热变形原理出发，分析转子热变形的产生原因及不同温度下的变形曲线，变形速度，全盘考虑空预器内部的温度、灰份以及其他系统脱硝、吹灰等对密封系统造成的影响的问题，研发、推广新的密封技术。

2. 回转式空预器结构与计

回转空预器结构存在动静两个部分，根据热空气的类别进行分仓，特别是对需求高压热空气的空预器设计，一般采用多分仓的结构，由低压热空气仓包围，各分仓之间设计有扇形密封区域，其大小与设计单元有关，可以减小漏风量。

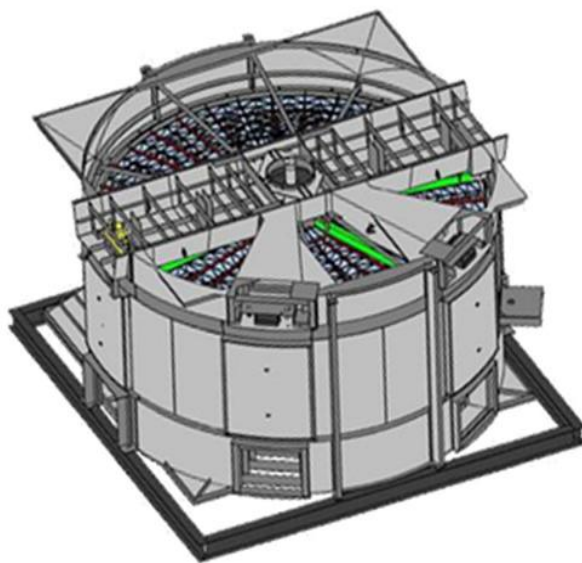


图 1 回转空预器结构

3. 回转式空预器漏风形式研究

回转式预热器存在动静结构，漏风成为固有特点，漏风分类：间隙漏风、携带漏风（与转速有关，一般设计为 1 R/MIN）。

动静间隙分布于转子的径向、轴向、环向，为了控制漏风，一般在有间隙位置设计有密封装置：

径向密封板在转子的每个仓隔上安装并随转子一起转动；

轴向密封在转子的外圆周随转子一起转动；

圆周方向的密封挡板；

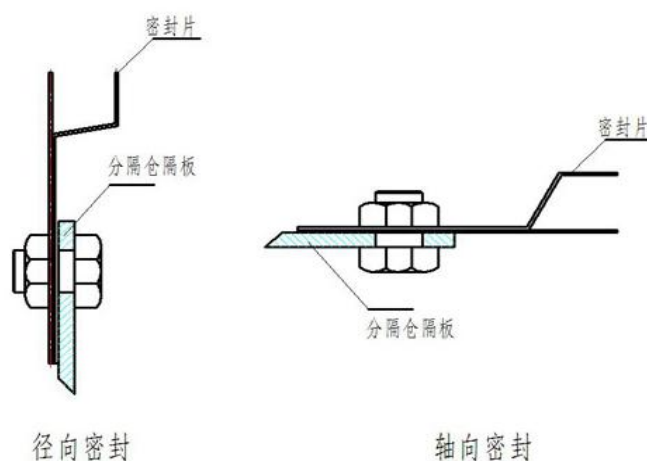


图2 一般的密封结构

在冷热态转换时，热烟气从上向下流动，冷空气从下向上流动，由于转子热端变形，间隙将变大，不同原理的密封装置将试图控制间隙变化，热烟气与热空气、冷烟气与冷风之间的压差，导致泄漏高压侧的空气通过动静间隙向低压侧流动，形成漏风；冷端的压差大、密度高、间隙小，漏风量大，为热端的两倍。

漏向低压侧的带灰的热空气，具有磨损作用，导致动静密封的间隙不断增加，漏风加剧。

4. 热端动静间隙变化

研究发现：所有的直接漏风中，转子的热端径向间隙漏风份额约占 70%左右。转子受热发生蘑菇状变形，转子热端热态时径向间隙随转子直径增加而加大，其变化范围如下：

1. 300MW 机组空预器热端径向间隙：30mm
2. 600MW 机组空预器热端径向间隙：40-50mm
3. 1000MW 机组空预器热端径向间隙：60-70mm

5. 热端间隙控制技术介绍

控制预热器热端径向间隙漏风对控制预热器整体漏风至关重要，不同的设计理念形成了不同的动静密封控制技术，现在我们主要密封技术流派的预热器热端径向间隙控制方法介绍分析如下：

5.1 HOWDENMM 公司径向间隙控制方法

HOWDEN 预热器公司采用 VN 型预热器结构，对转子的热态变形，进行间隙进行结构预控制设计技术。

预热器热端扇形板为固定不可调式布置形式。在设计、安装时，采用预控制变形技术。机组热态运行时，转子热端径向密封片随转子发生较小的蘑菇状变形，密封片与扇形板之间产生三角漏风区域，该公司不单独对该漏风区域做相应处理。

HOWDEN 预热器公司 VN 型预热器结构的优点：

1. 转子变形预控设计理念；
2. 预热器精确安装调试后，不再需要进一步的运行维护，运行安全性高；
3. 扇形板与中心桁架之间用钢板实行焊接密封，消除了该处的附加漏风；
4. 预热器整体漏风率相对稳定；

HOWDEN 预热器公司 VN 型预热器结构的缺点：

预处理转子发生蘑菇状变形量小（适用于 300MW 以下机组），径向密封片与热端扇形板之间产生三角漏风区域在机组大型化后（不适用于 600MW 及以上机组），该处的直接漏风将变得很严重，这是本技术的主要局限。

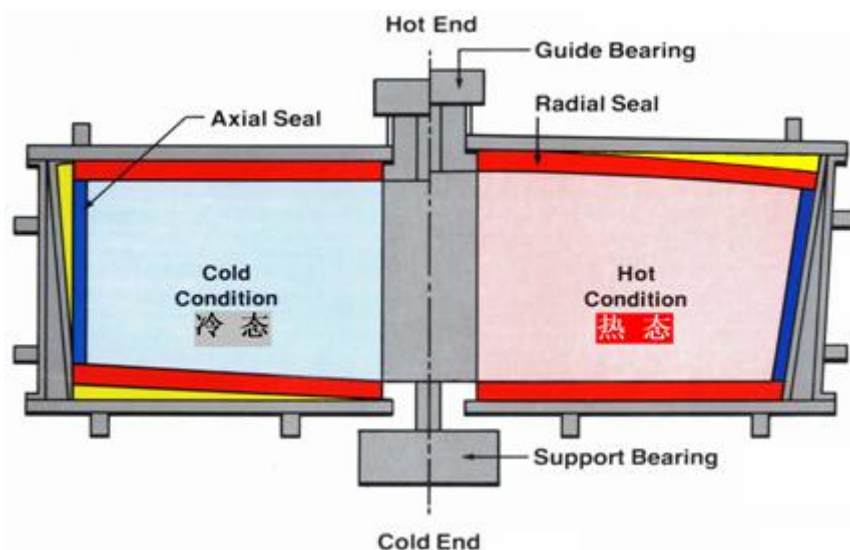


图3 回转空预器结构

5.2 哈锅、上锅、东锅等 API 回转空预器热端径向间隙控制方法

对于大型机组的空气预热器，哈锅、上锅、东锅等预热器公司配置漏风控制系统，利用该系统控制预热器热端扇形板跟踪转子蘑菇状变形，消除密封片与扇形板之间产生的三角漏风区域。

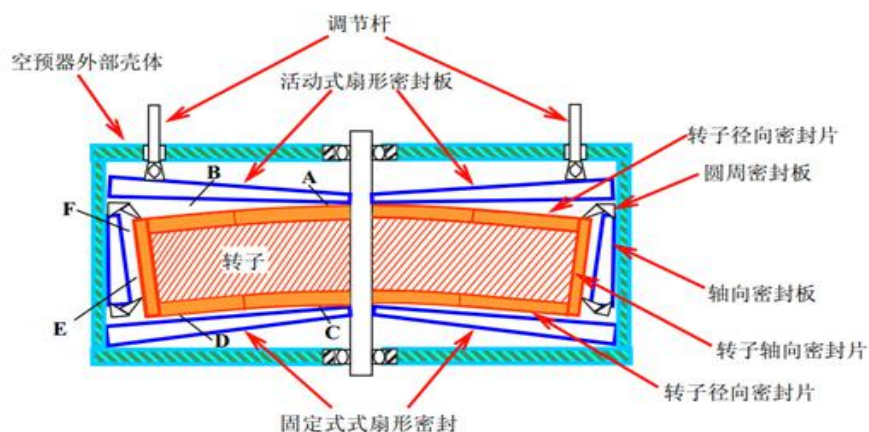


图4 回转空预器间隙控制

引进预热器结构的优点：

1. 漏风控制系统驱动热端扇形板对转子及热端径向密封片的蘑菇状变形形成了有效的跟踪；
2. 理论上消除了转子热变形而引起的密封片与热端扇形板之间的三角漏风区域；

引进预热器结构的缺点：

1. 系统运行控制较复杂，对系统探测部分依赖性极高，如探测失灵，易造成预热器事故性停转，该系统安全隐患较大。
2. 控制、检测部件处于高温、高粉尘的恶劣运行条件，容易损坏，导致漏风量无法控制，后期的运行维护量较大。
3. 扇形板与中心桁架之间采用迷宫式密封形式，形成了该处的附加漏风。预热器整体漏风率不稳定。

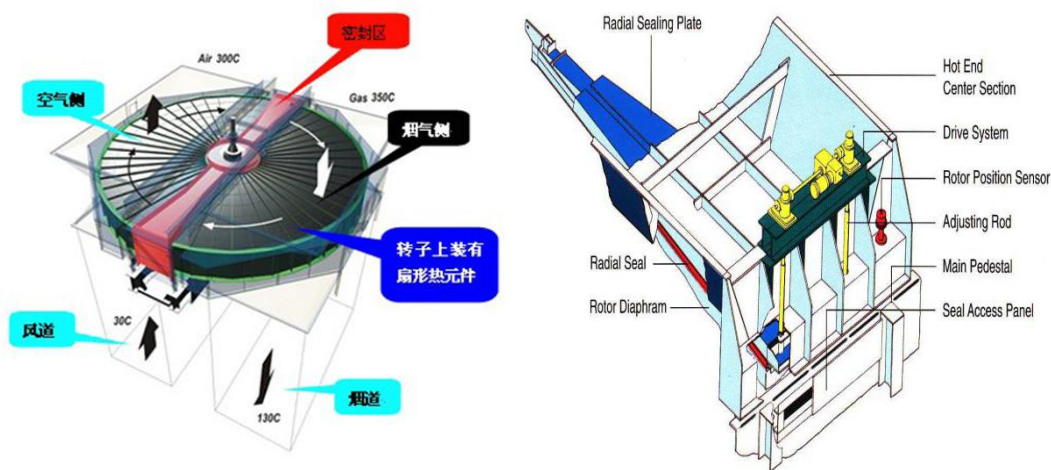


图 5 回转空预器密封结构

技术保证指标：
无法长期有效地保证漏风率控制在 7% 以下。

5.3 预热器热端径向间隙柔性密封控制方法

柔性密封利用单独设计的径向密封片，依靠自身的设计的弹性来补偿机组热态运行时密封片与扇形板之间产生三角漏风区域，进而控制预热器热端径向漏风。

预热器柔性密封结构的优点：

- 1. 运行初期，由于热端径向间隙得到了控制，预热器的漏风率较低；
- 2. 扇形板与中心桁架之间实行焊接密封，消除了该处的附加漏风。

预热器柔性密封结构的缺点：

- 1. 在高温下，结构自身的牢固性较差，弹簧容易损坏、铰链失效，设备有效使用寿命较短；
- 2. 接触式密封必然存在磨损间隙变大；
- 3. 运行维护费用较高，机组运行一段时间后，预热器漏风率提高很快。

技术保证指标：
保证漏风率≤6%，一个大修周期≤7%。

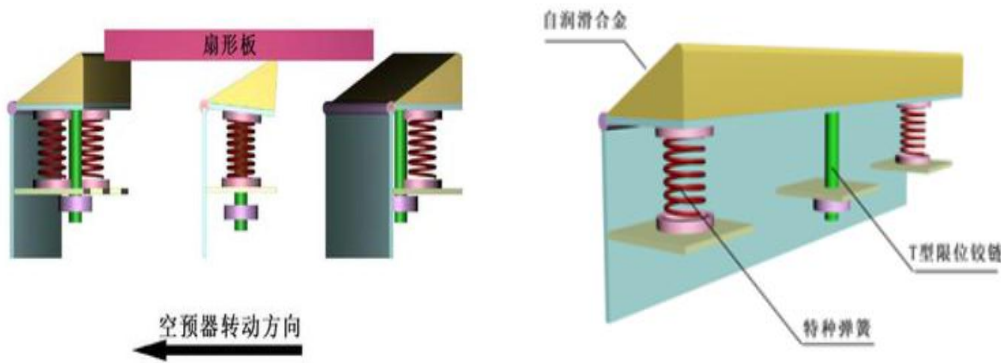


图 6 回转空预器柔性密封结构

5.4 非接触自补偿密封技术

“无蘑菇状变形”自补偿密封的结构及控制原理：组合式结构，上部膨胀密封板与下部的径向隔板为平行组合（可伸缩式结构），动静部分非接触无磨损现象，其间隙基本为固定间隙，漏风量一直不变。

当转子发生热变形时，只有转子下端隔板部分产生蘑菇状变形，而膨胀密封板由于温度恒定且无重力负载，膨胀密封板本身无“蘑菇状”变形，而转子带动径向隔板向下移动，从而保

证了空气预热器在任何温度下，径向密封的动静间隙不变的状态。

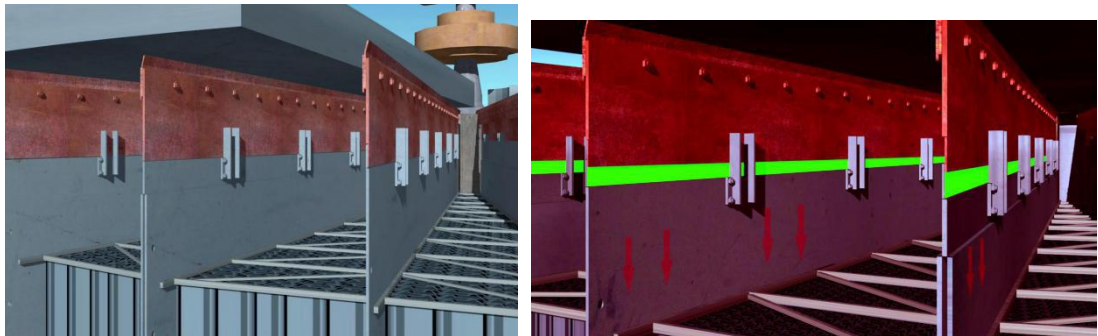


图7 冷态下的密封状态

热态下的密封状态

密封面无蘑菇状变形的自补偿密封技术优点：

1. 密封间隙控制属于非接触结构，不受温度、灰尘、水汽及其他介质的影响，始终长期保持密封不变的状态；
 2. 无外加动力系统，无机械动作；
 3. 采用机械加工的配合方式，无机械磨损，运行免维护，安全可靠；
 4. 工厂机械加工制作，质量保证。精细化装配，现场安装、调整简便；
- 密封面无蘑菇状变形的自补偿密封技术的缺点：

1. 技术简单

技术保证指标：

长期有效地保证漏风率控制在 4%~5%之间。

6. 热端间隙控制技术对比

对现有主要密封技术对比分析，可以指导我们进行新技术开发。

项目	间隙自补偿漏风控制	柔性密封	漏风控制系统	间隙不可调式
热端径向间隙控制	控制	控制	控制	不控制
冷端径向间隙控制	不控制	不控制	不控制	不控制
静密封形式	完全密封	完全密封	迷宫式不完全密封	完全密封
低负荷漏风率	较低	高	高	高
漏风率	较低	较低	较低	高
设备使用寿命	有保障	没保障	没保障	有保障
运行安全性	良好	一般	一般	良好
运行经济性	良好	一般	一般	一般
综合性能指标	良好	一般	一般	一般
维护成本	低	高	高	低

7. 结论

回转式空气预热器的密封技术在同行的努力下，得到长足发展，对于机组容量的加大，空预器变得越来越大，原有的非接触控制技术受到影响，而接触式的密封结构，其磨损和部件失效，导致不能实现长周期、低漏风目标，所以，我们必须对现有的密封结构进行优化。

目前的调查发现：非接触、固定动静间隙的设计思路，可以达到长期的低漏风量、免维护的效果。

我们需要关注正在开发之中的更新动静密封技术，将回转式空预器的漏风降到 2%以下。

碱回收多效蒸发低碳节能热力系统的研究

阎尔平 罗正芳 张晓弟
环境保护部南京环境科学研究所，江苏 南京 210042；

摘要： 本文提出低碳节能热力流程回收各级蒸发系统热源余热，低品位余热按能级匹配，进行稀液预热，改造传统的热力流程。
关键词： 热泵 梯级用热 余热回收

1、传统的热力流程

1.1 热力流程

目前国内、外碱回收多效蒸发的供热系统，仍普遍采用传统的热力流程。由热源供出压力等级较高的新蒸汽，经过减压阀进行节流减压造成能量贬值后，供给一级蒸发器用汽。由蒸发器底部排出的蒸汽冷凝水夹带的二次蒸发汽及疏水器漏汽均没有得到回收利用。

传统的四级多效蒸发碱回收系统，其中的稀碱溶液虽然设有三级预热，一般均分别采用一级、二级及三级分离器排出的较高热能品位的二次蒸汽，进行淡碱溶液预热，四级分离器排出的二次蒸发汽潜热均没有回收利用，全部用真空冷凝器冷凝，能量浪费，冷却水和耗电量大。

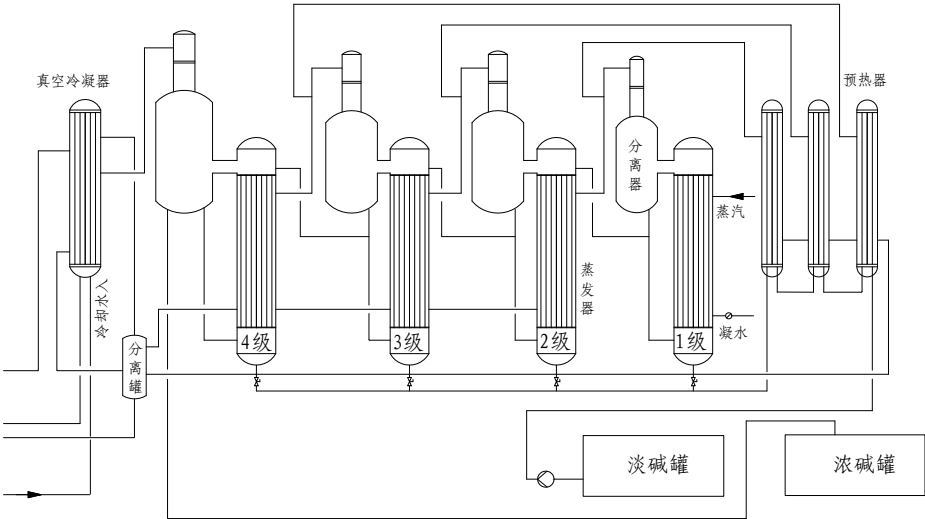


图1、多效蒸发热力流程

由于传统的碱回收蒸发系统普遍存在热力系统设计不够合理，致使存在产量低，汽耗高，冷却水消耗量大等明显缺点，必须进行技术改进。

现用下列淡碱四效蒸发系统为例，主要参数如下：

表 1

		项目	单位	数值
1	一效	蒸发器压力	MPa	0.25
		蒸发器温度	℃	138
		分离器温度	℃	125
2	二效	蒸发器压力	MPa	0.20
		分离器温度	℃	110
3	三效	蒸发器压力	MPa	0.10
		分离器温度	℃	95
4	四效	蒸发器压力	MPa	0.01
		分离器温度	℃	78

5		末端真空冷凝器压力	MPa	-0.05
		末端真空冷凝器温度	℃	69
6	碱液	淡碱流量	m ³ /h	10
		淡碱初始温度	℃	54
		淡碱预热后温度	℃	105

1.2 传统热力流程的缺点

(1) 新蒸汽节流减压造成蒸汽有效能无效贬值

将新蒸汽通过阀门进行节流减压至 0.25MPa，造成蒸汽能量无效贬值，再供一效蒸发器淡碱溶液加热用。

(2) 耗用了高品位二次蒸发汽用于淡碱液预热

分别由一级、二级、三级分离器排出的相对于淡碱溶液预热能级差较高，压力分别为 $P=0.14\text{MPa}$ 、 $P=0.05\text{MPa}$ 及 $P=0.01\text{MPa}$ 二次蒸发汽用于淡碱液预热。

由于采用上述各级分离器引出二次蒸发汽用于淡碱液预热，致使一级、二级、三级蒸发器依序对下级蒸发器供汽量减少，会影响碱回收设备运行产量的提高。

(3) 四级分离器排出的二次蒸发汽热能没有回收利用，全部进入末端绝对压力为 0.05MPa 真空冷凝器，采用冷却水将其二次蒸发汽进行冷凝，冷却水消耗量大。

2、低碳节能热力流程

2.1 热力流程

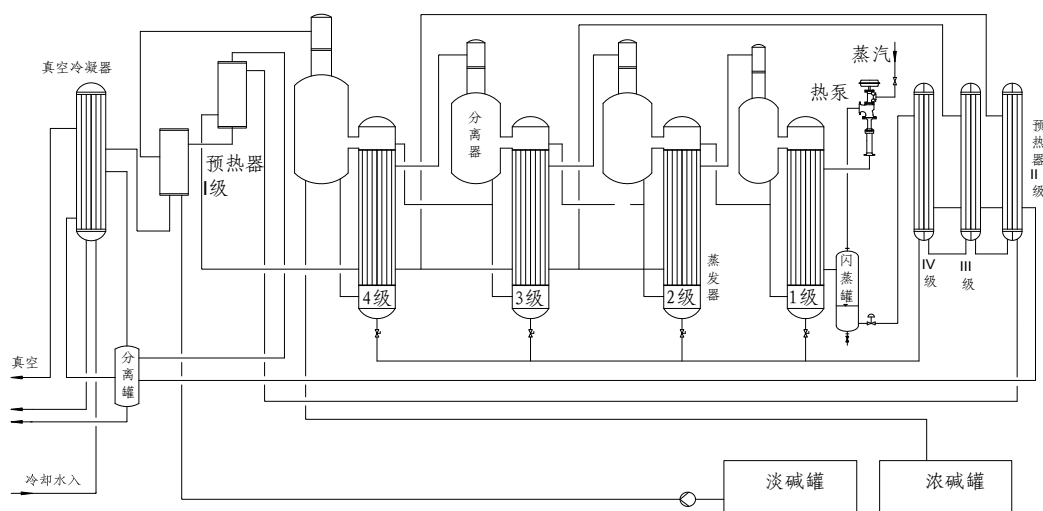


图2、低碳节能热力流程

利用热泵替代蒸汽节流减压，避免了由于节流减压造成的蒸汽能量无效贬值，同时回收蒸汽冷凝水系统产生的二次蒸发汽同新蒸汽一并供一级蒸发器用汽。

由二级、三级蒸发器排出的冷凝液及高效闪蒸罐排出的蒸汽冷凝水分别用于淡碱 II 级、III 级及 IV 级预热。

2.2 低碳节能热力流程技术要点。

(1) 一效供热设置热泵替代蒸汽节流减压

增设高效闪蒸罐一台，由蒸发器底部排出的蒸汽冷凝水进入高效闪蒸罐，产生的二次蒸发汽由专门设计的蒸汽热泵，替代了产生能量贬值的蒸汽节流减压，使蒸汽在在能量转换过程中，克服了能量品位无效贬值，实现能级合理的匹配。

(2) 新蒸汽能量得到充分利用

采用蒸汽热泵（机体配置自动控制装置，专利产品，专利号：ZL2006200735598：）替代蒸汽节流减压、回收二次蒸发汽，同新蒸汽一并供给一级蒸发器用汽，由一级蒸发器排出的蒸汽冷凝水的余热用于淡碱预热。

(3) 利用低品位余热预热淡碱

在本流程设计中，增加用四级蒸发器及分离器的余热预热淡碱溶液，实现 I 级预热，以增加淡碱预热效果。并且四级分离器排放的二次蒸发汽得到回收利用，节省了真空系统的耗电量和耗用的冷却水。

淡碱 II 级预热、III 级预热分别采用三级及四级蒸发器排出的蒸汽冷凝液，由于蒸发器排出的蒸汽冷凝液的热量得到利用，降低了冷凝液的排至分离罐的温度，从而减少了真空系统的负荷和冷却水用量。

IV 级预热采用一级蒸发器排出的蒸汽冷凝水，同时 II 级及 III 级不再采用其分离器产生的较高能量品位的蒸发汽，从而增大了各级分离器产生的蒸汽依序用于下一级蒸发器蒸发碱液用汽量，则有利于蒸发系统产量的提高。

采用上述淡碱预热系统在可能情况下使其预热后的温度接近于 I 级蒸发器的蒸发温度，以淡碱从初始温度 $t_1=54^{\circ}\text{C}$ 预热到 $t_2=105\sim 110^{\circ}\text{C}$ ，其用汽量约占设备耗汽量 20% 左右。

3、效益

3.1 节汽效益

一效蒸发器设置热泵代替蒸汽节流减压回收了二次蒸发汽，同时蒸汽冷凝水用于淡碱溶液预热，由四效蒸发器分离器及蒸发器排出的余热用于淡碱一级预热，两项节省蒸汽用汽量约为 15~20% 以上。

3.2 节省冷却水量。

按四效蒸发器排出蒸汽冷凝液及排出尾汽的余热均得到回收利用，折合节省冷却水 25% 以上。

3.3 由于各效蒸发器用汽量增加，使其设备碱回收产量提高。

3.4 效益明显，一年内就可以收回投资。

可回收汽轮机排汽余热资源的燃气蒸汽联合循环与低温多效海水淡化耦合式生产在钢铁行业中的应用探讨

王 涛, 王铁民, 陈素君, 陈赞华
(首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北, 063200)

摘要: 借鉴 25MW 汽轮发电机组后置低温多效海水淡化装置开发运营经验, 在充分利用钢铁厂高、焦炉煤气的基础上, 发挥 CCGP 发电机组高效率的同时, 建设 CCGP 后置低温多效海水淡化装置, 进一步回收汽轮机排汽余热资源, 降低热法海水淡化生产成本至 4.55 元/吨, 测算整体装置年综合效益为 5419.6 万元。

关键词: 高炉煤气; CCGP; 低温多效; 海水淡化; 余热

Discussion on Application of coupled type production of gas - steam combined cycle and low temperature multi-effect seawater desalination with recoverable steam turbine exhaust heat resource in Iron&Steel Industry

Wang tao, Wang tie min, Chen su jun, Chen zan hua
(He Bei Shougang jingtang Iron&Steel CO,LTD. He Bei Tang shan , 063200,)

Abstract: Based on the development and operation experiences of 25MW steam turbine generator set with low temperature and multi effect seawater desalination plant, and on the basis of full use of BFG and COG in steel plant as well as the high efficiency of CCGP generator unit, construction of CCGP with LT-MED seawater desalination plant was implemented, resulted In the further recycling of steam turbine exhaust heat resources. The production cost of hot water desalination was decreased to ¥4.55 / t, and the annual comprehensive benefit of the whole plant reaches¥54196000.

Key words: BFG(Blast Furnace Gas);CCGP; LT-MED; Seawater Desalination; waste heat

1 前言

大型钢铁联合企业是典型的铁-煤化工过程, 含铁原料经过一系列复杂的物理化学变化从天然资源冶炼成钢铁产品, 含碳能源经高炉、焦炉等能源转换装置转变为高炉煤气、焦炉煤气等二次能源, 其中煤气资源占企业总能耗的比例达 40%左右。

近年来, 中国钢铁工业迅猛发展, 钢铁冶金技术不断进步, 使得钢铁厂副产煤气资源量越来越多。实现煤气的充分回收、合理利用, 对于钢铁厂降低成本、发挥其能源转换作用具有重要的意义。目前, 回收的煤气资源主要作为燃料供焦炉、热风炉、加热炉等工业炉窑加热使用, 这部分占煤气资源量的 50%—80%, 剩余部分供企业自备电厂发电, 方式有全烧(或掺烧)煤气锅炉发电和燃气-蒸汽联合循环发电(CCGP)两种主要方式^{[1][3]}。

自备发电厂燃用公司富余煤气, 提高钢铁厂供电的可靠性, 降低用电成本, 对节能、环保、提高全厂经济效益都起到良好的作用, 首钢京唐钢铁联合有限责任公司建设有国内首套煤粉-煤气混烧发电机组, 机组容量 300MW, 煤气混烧率在 20%以上(热量比), 最高达到 30%, 做为煤气系统的缓冲用户, 其极大的降低了公司煤气放散率水平。但其还是采用常规的锅炉、汽轮发电机组模式, 将蒸汽参数提高至亚临界水平(16.7Mpa, 540℃), 热电转换效率能达到 38%左右。

燃气蒸汽联合循环(Combined Cycle Power Plant)发电机组, 简称 CCGP。电力工业采用的 CCGP 常用天然气、重油等高热值燃料, 钢铁厂 CCGP 以燃高炉煤气为主, 有的工厂有可能掺入少量焦炉煤气, 用于稳定发电的煤气热值。

燃烧低热值高炉煤气的燃气—蒸汽联合循环发电技术(CCPP)一般由高炉煤气供给系统、燃气轮机系统、余热锅炉系统、蒸汽轮机系统和发电轮机系统组成。主要设备有空气压缩机、高炉煤气压缩机、燃气轮机、余热锅炉、发电机和励磁机等。一般分为单轴和多轴布置形式。经除尘加压的高炉煤气与加压的空气混合后进入燃烧室进行燃烧,所产生的高温、高压燃气进入燃气透平机组膨胀做功,燃气轮机带动发电机组发电,同时燃气轮机做功后的排气进入余热锅炉,产生蒸汽后进入蒸汽轮机做功,蒸汽轮机带动发电机组发电。从而形成燃气轮机—蒸汽轮机联合循环发电,发电效率可以达到 58%~60%,一些大型机组甚至可以超过 60%。因为燃气轮机为旋转持续做功,可以利用热值比较低的燃料气体,同时,还具有开、停机快,运行负荷调节幅度大速度快等特点^[4]。

随着环保压力的增大及降低大宗物料运输成本的需求,一些大型钢铁企业开始外迁并沿海布局。首钢京唐公司就是国内第一个从首都北京搬迁至唐山曹妃甸沿海的大型钢铁企业。随后的宝钢湛江项目及武钢防城港项目也都是沿海布局的案例。但沿海布局的一个弊端就是工业用水的供应。一般钢铁行业布局沿海地区,都是选择无人居住的滩涂地区,本就没有淡水资源,再加上钢铁工业用水量巨大,水资源的保供是一个难题。目前,解决的措施就是铺设长距离输送管线供给工业水,导致水价升高,并且存在断供的风险。首钢京唐公司结合沿海优势,独创了采用汽轮机排汽直供热法海水淡化的“汽轮发电机组与低温多效海水淡化耦合技术”,能同时生产电能及高品质除盐水,并降低除盐水产生产成本至 6 元/吨,有效的保证了工厂的用水安全。目前日产水量 5 万吨,占全公司用水量的 50%以上。双轴布置的 CCPP 发电机组汽轮机排汽量约 240 吨/小时,常规做法为进入凝汽器与循环冷却水换热,凝结水送回余热锅炉进行循环。根据首钢京唐公司一期工程汽轮发电机组与低温多效海水淡化耦合技术”,将建设 CCPP 与低温多效海水淡化相耦合的水电共生技术,进一步增大除盐水产量。

2、可行分析

目前,首钢京唐公司成功运营两套 25MW 汽轮发电机组后置低温多效海水淡化装置。整套装置自 2011 年 10 月份投产至今,每年满负荷运行小时数都在 7920 小时以上,每年向公司电网供电 3.2 亿 kWh,向公司水管网供水 800 万吨,整个系统的热效率为 82.23%。

表 1、25MW 汽轮发电机组后置海水淡化装置运行参数表

年份	2012	2013	2014
年运行时间 (h)	8390	8242	8200
年发电量 (万 kWh)	32310	32419	33552
年产水量 (万吨)	807.8	804.7	802.3

3 主要设备及工艺流程

燃气蒸汽联合循环与低温多效海水淡化联合生产系统主要包括燃机系统和海水淡化系统。

3.1 燃机系统

目前,可以利用钢铁厂低热值煤气资源的大型燃机生产厂商主要有两个流派,一个是以 GE 公司为代表的 9E 系列燃机,另一个则是以日本三菱公司为代表的 M251 及 M701DA 系列燃机。两者各有所长。GE 公司燃机以皮实耐用,对燃气品质适应性强做为主打口号,其通过离心式煤气压缩机来进行性能保证,不过是以牺牲效率为前提的。日本三菱公司燃机以对煤气热值适应性见长,M701DA 及 M701DAX 燃机不但可以保证在 1050 大卡热值下的高效率运行,并且能够在纯高炉煤气工况(850 大卡)下高效持续运行,增加了实际运行调整的灵活性。

表 2、GE 与三菱燃机主要指标对比表

供应商	三菱(M701DAX)	GE(9E)
出力	180MW	168
入口温度	1250℃	1150℃
排气温度	556℃	508℃
配置	分轴	分轴

联合循环热效率		47%	43.5%
热耗		7659.6	8275.8
热值	设计点	1050kcal/Nm ³	1050kcal/Nm ³
	适用范围	800-1100kcal/Nm ³	900-1300kcal/Nm ³
煤压机	型式	单缸，轴流，静叶可调	双缸，离心式，
煤压机煤气冷却器	中间冷却器	无	有
	回流冷却器	直接冷却	直接冷却
除尘型式		EP	EP
汽轮机		无抽汽	可抽汽
余热锅炉		产汽量：240 吨 高压 7.6Mpa, 540 度 低压 0.8Mpa 260℃	产汽量：260 吨 高压 8.0Mpa 472 度 低压 0.7Mpa 260 度
启动	方式	发电机+可控硅整流	发电机+可控硅整流
	启动燃料	高热值混合煤气	柴油

3.2 海水淡化系统

海水淡化主体设备主要包括由 7 个相同的效和 1 个末效冷凝器，主要结构均为换热管束。辅助系统主要由海水补给、浓盐水排放、蒸汽减温减压输入、冷凝水输回和产品水排出等分系统。进入系统的海水首先进入末效冷凝器，经预热后由泵送入蒸发器，用于补给蒸发；从蒸汽管网进入的压力在 0.4Mpa 以上的蒸汽经减温减压后进入主体第一效，将补给的海水蒸发，加热蒸汽冷凝放热为常压温度约 40℃的冷凝水后由泵抽出等量送回蒸汽发生源。同时，海水蒸发产生的蒸汽作为二次热源使下一效海水蒸发，同时冷凝成蒸馏水，同样的过程在每效中进行，从而实现每引入 1 吨蒸汽产生近 10 吨的蒸馏水的高造水比（造水比为 1 吨蒸汽能够产生的淡化海水量）。而海水部分蒸发后浓度升高，称之为浓盐水，由泵排出。

热法海水淡化具备三种运行模式：

纯 TVC 模式：仅使用 0.4Mpa，250℃ 低压蒸汽，造水比 9.8。

部分 TVC 模式：使用 0.4Mpa，250℃ 蒸汽及 0.035Mpa，73℃ 蒸汽，造水比 6~9.8。

纯 MED 模式：仅使用 0.035Mpa，73℃ 蒸汽（汽轮机排汽）造水比 6。

正是由于低温多效海水淡化装置具备纯 MED 模式，才实现 CCPP 与海水淡化耦合。

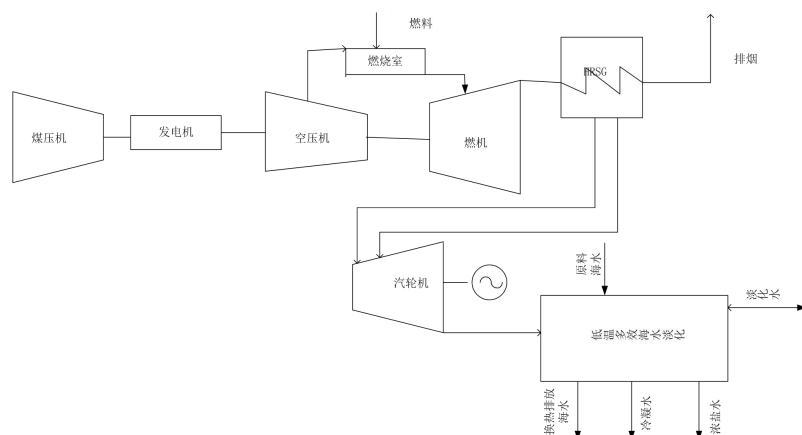


图 1、CCPP 发电机组与海水淡化耦合式生产系统图

4 CCGP 发电机组及海水淡化成本测算

由于分轴式 CCGP 发电机组汽轮机后置海水淡化，需要将汽轮机排汽参数由纯凝工况的 4.5kPa、31℃提高至 35kpa、73℃，实现海水淡化纯 MED 模式运行。与纯凝工况相比，汽轮机背压提高，CCPP 整体发电量减少，减少的发电量与纯凝工况下汽轮机排汽携带的热量共同转移至热法海水淡化内部放热，最终冷凝成 40℃的冷凝水。所以，海水淡化的蒸汽成本将由减少的发电量及电价共同决定（纯凝工况下汽轮机排汽携带的热量价值为零，利用循环冷却水系统排放至大气中，在低温多效海水淡化装置中得到回收利用），而发电价格为 CCGP 纯凝工况下运行的发电电价。

$$w_{fd} = \frac{(h_{fq} - h_{cn}) \times \eta_{qjri} \times \eta_{jx} \times \eta_{dj}}{3.6} \tag{1}$$

$$p_{sj} = w_{fd} \times p_{dj} \div \alpha \times 2 \tag{2}$$

w_{fd} —由于排汽压力升高每吨汽轮机排汽减少的发电量，kWh/吨；

h_{fq} —30kpa，70℃时，汽轮机排汽的焓值（2625），kj/kg；

h_{cn} —4.5kpa，31.5℃时，汽轮机排汽的焓值（2413.3），kj/kg；

η_{qjri} —汽轮机相对内效率 0.88；

η_{jx} —机械效率, 0.98；

η_{dj} —发电机效率，0.99；

p_{sj} —每吨淡化水的全价格，元/吨；

p_{dj} —CCPP 发电机组纯凝工况下的电价，元/kWh；

α —纯 MED 模式下海水淡化的造水比；（根据统计，蒸汽成本占热法海水淡化全成本的 50%以上）；

按表 1 中 CCGP 发电价格，计算海水淡化全成本为 4.55 元/吨。

表 3 CCGP 发电机组主要经济技术指标

（注：表中单价仅供参考）

成本项目	计量单位	单位成本		
		单价	单耗	
产量	KWH		1, 188, 000, 000	
单价	元			0.273
一、动力费				0.170
高炉煤气	kM³	56.2	1.5	0.087
焦炉煤气	kM³	407	0.16	0.064
自用电	kwh	0.42	0.04	0.017
除盐水	M³	6.9	0.00	0.000
工业水	M³	7.3	0.00	0.000
成品压缩空气	M³			0.000
二、制造费用	元			0.103
职工薪酬	元			0.002
折旧	元			0.047
修理费	元			0.034
机物料消耗	元			0.020

5、系统综合效益分析

由于 CCGP 机组后置与海水淡化装置后，汽轮机排汽参数提高，直接导致汽轮发电机组的发电量降低，根据公式（1）得出每吨蒸汽减少发电量为 50kWh。外购电价为 0.435 元/kWh，发电成本为 0.27

元/kWh, CCGP 机组汽轮机排汽量为 240 吨/小时, 则发电侧经济损失为 1568.16 万元。

海水淡化产水水质为 $TDS \leq 5\text{ppm}$, 由渤海湾海水加工至此等级水质, 采用膜法工艺制水成本约 10 元/吨^[2], 采用 0.4MPa 以上等级蒸汽的成本为 11.2 元/吨, 取两者的平均值 10.6 元/吨做为膜法海水淡化成本, 测算系统中海水淡化侧的效益为 6987.75 万元/吨。综合比较, 整个系统的经济收益为 5419.6 万元。

6、结论

1、燃气-蒸汽联合循环 (CCPP) 后置低温多效海水淡化装置可以回收利用汽轮机排汽余热资源, 工艺路线上完全可行。

2、燃气-蒸汽联合循环 (CCPP) 后置低温多效海水淡化装置系统有效降低热法海水淡化产水成本, 综合经济效益较单体分别运行提高 5419.6 万元。

参考文献:

- [1] 彭艺辉. 燃气蒸汽联合循环 (CCPP) 发电技术[J]. 柳钢科技, 2011, 1:57.
- [2] 华维国. 膜法热法海水淡化技术经济分析[D]. 大连海水淡化工程研究中心, 2007. 5
- [3] 杨若仪. 刘文和. 低热值煤气燃气轮机联合循环发电技术在钢铁厂的应用[D]. 钢铁技术, 2004. 2.
- [4]. 张琦. 蔡九菊. 钢铁厂煤气资源的回收与利用[D]. 钢铁, 2009, 12.

某引进型饱和蒸汽汽轮机的结构分析

王开拓 李婷 洪晓麦 张云群
(中国长江动力集团有限公司 汽轮机研究所)

摘要: 本文介绍了某引进型 10MW 饱和蒸汽汽轮机, 并对其结构进行分析, 探讨了饱和蒸汽汽轮机可改进的设计方法。

关键词: 引进型; 饱和蒸汽汽轮机; 结构分析; 改进;

引言

随着发电技术的进步, 低温余热发电技术越来越多的应用于各种行业, 其中在钢铁、铜业、水泥、玻璃等行业已经广泛应用。由于在工业生产中产生大量的饱和蒸汽, 而这些蒸汽可以通过处理后驱动汽轮机发电。饱和蒸汽汽轮机发电技术不仅工艺简单, 而且安全性高、投资少, 越来越多地应用于企业生产中, 不仅节约成本, 而且可以减少大气的污染^[1]。

1. 饱和蒸汽汽轮机的发展现状

目前, 我国在钢铁、冶炼、化工等多个行业已经实现饱和蒸汽发电机组的运行, 且已经产生巨大的经济效益。早在 70 年代中期, 日本、美国、意大利、以色列、德国的一些生产厂家, 就成功地研制出了饱和蒸汽汽轮机, 并投入工业生产。国外生产的机组在我国也有应用, 西藏就曾引进日本产 3000kW 机组及以色列产 1000kW 机组。国内从 1996 年开始研究用于低温余热发电的汽轮发电机组, 各汽轮机制造企业已经掌握了较为成熟的饱和蒸汽汽轮机技术。如国内某公司制造的 BN12-0.8/0.25 型汽轮机, 额定功率 12 MW, 进汽为 0.8MPa 的饱和蒸汽, 补汽为 0.25MPa 的饱和蒸汽, 按照年发电量约 7200 万 kWh 计算, 节约标煤 58259 t/a, 一年即可收回成本。

2. 饱和蒸汽汽轮机的技术特点

2.1 饱和蒸汽汽轮机技术

目前国内在运行的饱和蒸汽汽轮机可分为单级汽轮机和多级汽轮机。单级饱和蒸汽汽轮机最大的特点是由单级组成, 具有结构简单, 占地面积小, 维护和使用费用低, 并且蒸汽使用性广, 不仅适用于过热蒸汽、饱和蒸汽, 甚至适用于任何气体种类、任何余压 (压力 ≥ 0.2 MPa) 可利用的场合。

采用级内除湿再热的多级冲动式汽轮机, 在汽轮机汽缸内的其中一相邻级或者若干相邻的级间设置有级间蒸汽再热器, 由该汽轮机的主汽阀后的主蒸汽管道上引出一股新蒸汽通入蒸汽再热器中, 用于加热汽轮机中膨胀到一定程度的是饱和蒸汽, 降低其湿度, 以保护汽轮机不受水蚀损坏, 叶片采用防水刷措施, 减轻叶片腐蚀^[2]。

2.2 饱和蒸汽汽轮机的技术特点

与常规电站的汽轮机不同, 饱和蒸汽汽轮机的进口蒸汽处于饱和状态, 在多数场合下还存在有一定的游离水, 由于不进行中间再热, 机组的排气湿度可能达到 15%, 这样机组低压部分叶片的水蚀非常严重, 并且降低了机组的效率。

2.2.1 叶片防水蚀问题

常用的减少叶片水蚀的方式主要有: (1)中间再热式, 利用中间再热器去湿; (2)强制疏水式, 将湿蒸汽在流动过程中形成的水滴有效的排出汽轮机; (3)节流调节式, 是将新蒸汽经过节流把饱和蒸汽变成过热蒸汽后送入汽轮机, 但是在节流过程中会有部分能量损失; (4)抗蚀增强式, 增强静叶和动叶材料的抗蚀性能, 在水滴冲刷严重处镶嵌硬质合金或者进行表面硬化处理^[3]。

末级叶片的防水蚀措施可以分为三类: 一是在进汽边局部强化, 例如镶嵌司太立合金、电火花强化、激光熔覆、喷涂等; 二是表面淬硬, 如激光表面淬火、高频感应淬火、火焰淬火强化; 三是结构设计, 如进汽边背弧齿形去湿槽。

2.2.2 机组效率问题

由于饱和蒸汽固有的特点, 在利用饱和蒸汽发电过程中往往机组效率较低, 所以需要采用必要的措施提高机组效率。

常用的提高机组效率方式有减少漏气损失、降低流动损失、优化排汽流动性能、改善叶型设计

(6) 汽轮机内设计了多处疏水和去湿捕水装置,其中背压机在油封、前汽封、第一级后、第二级后、后汽封和后汽缸下半设计了共6处疏水口,凝汽机在汽缸下半共设计2处疏水口。

3.3 机组其他特点

3.3.1 前压调节系统

由于余热量的不稳定,决定了余热锅炉的蒸发量也是不稳定的,如果汽轮机无法对这种不稳定性做出响应,势必会造成新汽压力的溃败或过高排空,从而影响汽轮机的正常运行。该套机组配备了前压调节系统,通过Woodward505调节阀来实现前压调节。调节时只需将进汽压力转换成电信号,在DCS中与设定值作比较后输出电信号至调节器即可,调节器中的辅助控制模块将该输入值作为负荷的控制参数来调节调节汽阀的开度,也就是说,当蒸汽压力增大时,调阀会自动开大,负荷也同步增大,蒸汽压力则回到设定值,从而最大限度地利用余热。

3.3.2 集中供油系统

机组的供油装置集成了油系统中的所有部套,包括油箱、电动泵、冷油器、滤油器、控制阀等,并在出厂前调试,现场安装简单快捷。由齿轮箱内置的主油泵出来的压力油经过冷油器冷却后,通过滤油器后送往各轴承,轴承回油直接回至底盘油箱。冷油器和滤油器均为双联式,可互相切换。油系统装有就地指示仪表监视油压和油温,通过设置的压力开关和压力变送器可联锁报警及启动辅助油泵和事故油泵,以避免汽轮发电机组由于断油而损坏。调节控制用液压系统与润滑油系统合为一体,其不同的压力等级通过节流阀来调整。

该引进型饱和蒸汽汽轮机组以余热利用最大化为出发点,以完善的通流结构设计及先进的调节控制技术为基础,保障了机组高效、稳定、安全的运行。

4. 饱和蒸汽汽轮机改进设计

通过以上分析,国产的饱和蒸汽汽轮机在结构设计中可从以下方面进行改进:

(1) 采用级间汽水分离结构,即饱和蒸汽在高压缸做功后抽出,经汽水分离器后进入低压缸继续做功,可有效提高排汽干度。该结构可设计为单机、单缸、单轴型式,使得机组简单紧凑。

(2) 进汽采用节流调节,将饱和蒸汽经过一定的节流之后引入汽轮机中做功,可减小排汽的湿度,同时便于阀门布置,简化整机结构。

(3) 饱和蒸汽在汽轮机膨胀过程中产生的水分多,必须考虑汽轮机低压叶片的防水蚀和除湿措施,如大量采用硬质合金和疏水结构。

(4) 为了避免汽轮机在失去负荷时因为汽轮机中存在的冷凝水出现闪蒸而出现汽轮机危险加速,通常在低压缸进口处装设快速切断的阀门,减少进入低压缸的蒸汽量。

5. 结语

目前,饱和蒸汽发电主要集中在钢铁、水泥、冶炼等行业,但是仍然有很多行业和领域的余热资源没有被开发利用,其中一个重要的原因就是技术不成熟,饱和蒸汽汽轮机发电技术作为一种低品位能源的利用技术,有着巨大的发展潜力。本文通过介绍分析在运行的某引进型饱和蒸汽汽轮机的结构,提出了一些饱和蒸汽汽轮机在今后设计改进中的思路。

参考文献

- [1]. 黄生琪,周菊华. 我国节能减排的意义、现状和措施[J]. 节能技术, 2008. 26(2):172-175.
- [2]. 王政伟, 张争光, 韩三飞. 饱和蒸汽发电技术应用现状分析[J]. 节能技术, 2013. 31(4):326-330.
- [3]. 韩建峰, 宫栋杰. 饱和蒸汽发电在东岭锌品厂的应用[J]. 实用科技, 2009. 17(8):288.

青特钢高炉冲渣水余热应用于海水淡化的探讨

王东 周扬民 仪垂杰

1、青岛特殊钢铁有限公司 2、青岛理工大学

摘要：分析了当前钢铁企业夏季冲渣水余热难以得到利用以及我国淡水资源短缺的现状，以青岛特钢董家口新区为背景，提出了将高炉冲渣水余热利用与海水淡化相结合的创新性思路，并以青岛特钢年产 500 万吨钢材为例分析对该方法进行了可行性和成本计算。结果显示将高炉冲渣水余热应用于海水淡化后完全可以实现生产的自给自足，而生产成本仅为 3 元/吨，前景可观。

关键字：高炉，冲渣水，海水淡化，多效蒸馏，余热

中国是一个严重缺水的国家，海洋是中国最大的淡水资源，青岛市的黄岛新区和海洋战略融入到了国家的“一路一带”的愿景规划。目前全国已建成海水淡化工程总数达到了 103 个，工程总规模达到日产 90.08 万吨。总投资 170 亿元的曹妃甸海水淡化进京项目已取得河北省发改委的批准，通过管线直接输送到北京。

国内钢铁行业领跑者中，首钢的曹妃甸、宝钢湛江新区、武钢的防城港新区、鞍钢的鲅鱼圈，紧随其后的唐山国丰、山东钢铁、日照钢铁、宁波钢铁等一大批沿海钢铁企业崛起，对中国的钢铁和海水淡化行业发展均有深远影响。本文对青岛特殊钢铁有限公司将高炉冲渣水余热应用于海水淡化的可能性进行了分析，并对其成本进行了计算。

1 青特钢高炉冲渣水余热简介

钢铁企业是中国基础工业中的耗能大户，吨钢综合能耗达到 605kgce/t，每吨渣约含有 $(1.26 \sim 1.88) \times 10^6 \text{ kJ}$ 的显热，相当于 45~60kg 标准煤的热量。自 1894 年汉阳铁厂的第一座高炉至今，虽然经过百余年的技术进步，水淬法依然是高炉高温熔渣处置的绝对主导工艺。高炉冲渣水余热是低品质热源的最典型代表，其利用率仅能达到 10% 左右。

青岛特钢高炉规划一期工程建设为 $2 \times 1950 \text{ m}^3$ ，分别配备两套热 INBAR 渣处理系统。设计渣比 320kg/t，熔渣温度 $1450^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ ，熔渣的最大流速为 8t/min。单座高炉冲渣用水设计流量 $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ ，水压 0.2MPa，冲渣水温度为 90°C ，系统 24 小时连续作业，没有设置冷却塔。

青岛特钢每座高炉都配套建设了高炉冲渣水余热集中回收设施，换热站的冲渣水直接由高炉渣处理系统供水总管分流，经过滤后接入集中换热站换热后，由水泵组加压后循环使用，实现水和热能的循环利用，如图 1 所示。

冬季全厂采暖总面积约 25 万 m^2 ，同时提供办公区生活热水，还可以供集中水处理中心全年原水加热使用，可提供热水最大流量 $4500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。由此可见，青岛特钢新区高炉冲渣水冬季热量已被有效利用，而夏季冲渣水余热的回收利用还存在很大潜力。

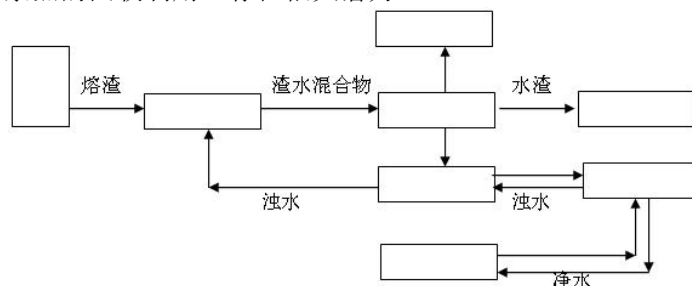


图 1 青特钢高炉冲渣水系统工艺流程示意图

2 低温多效蒸馏工艺特点

当前国内外主流的海水淡化工艺主要有反渗透膜法、多级闪蒸法和低温多效蒸馏法三种。其中，低温多效蒸馏法具有能耗低、海水预处理要求低、淡化产品水品质高等特点，最符合当前国家对工业节能要求的方向。

低温多效海水淡化技术（简称 LT-MED）由于要求海水的最高蒸发温度低于 70°C ，解决了海水结

垢的制约环节。该技术主要是将一系列的水平管喷淋降膜蒸发器串联起来，用一定量的蒸汽输入首效，后面一效的蒸发温度均低于前面一效，然后通过多次的蒸发和冷凝，从而得到多倍于蒸汽量的蒸馏水的淡化过程。

低温多效海水淡化工艺过程中，除了必需的电力消耗外，蒸汽是最大的能源消耗，已经建成的海水淡化项目所需蒸汽全部来自电厂或企业内部的低压蒸汽管网的过热蒸汽，温度 400℃ 左右，压力在 0.4~0.8MPa 左右，必须经 TVC 装置降温降压后，用于低温多效海水淡化，其工艺流程图见图 2 所示。

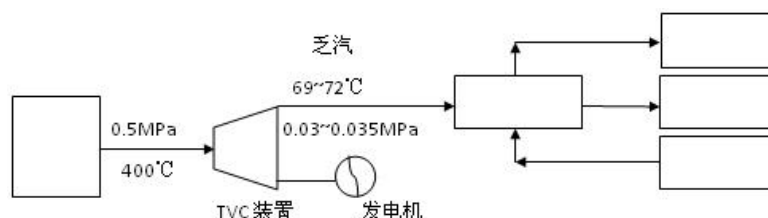


图2 国内常规海水淡化蒸汽供应示意图

汽轮机抽汽成本过高，是直接制约海水淡化成本降低，影响海水淡化工艺推广和进步的限制性环节。LT-MED 的蒸汽耗用量约为 0.1~0.15t/m³，成本约占运行成本的 50% 以上。青岛特钢目前蒸汽价格 120 元/吨，直接使用管网蒸汽进行海水淡化成本过高，是不可行的。因此，得到廉价的低温低压蒸汽是高炉冲渣水余热利用与海水淡化技术的限制性环节。

3、冲渣水余热应用于海水淡化的思路

“十二五节能减排规划”中明确了推动海水淡化技术进步的重要性，并把工业余热利用归属到节能产业的重点领域中。青岛特钢拥有以高炉冲渣水为代表的大量低品质热源，具有优越的地理优势和能源优势。

3.1 冲渣水余热利用流程示意图

高炉冲渣水余热用于海水淡化的工艺流程如图 3 所示。由图可见闪蒸罐是该工艺的核心设备。高压饱和水进入闪蒸罐后，由于压力的突然降低，使得高压饱和水一部分变成闪蒸罐设定压力下的饱和水蒸气和饱和水。其中设定压力下的饱和蒸汽产生率，是把冲渣水余热和海水淡化工艺紧密相连的核心。

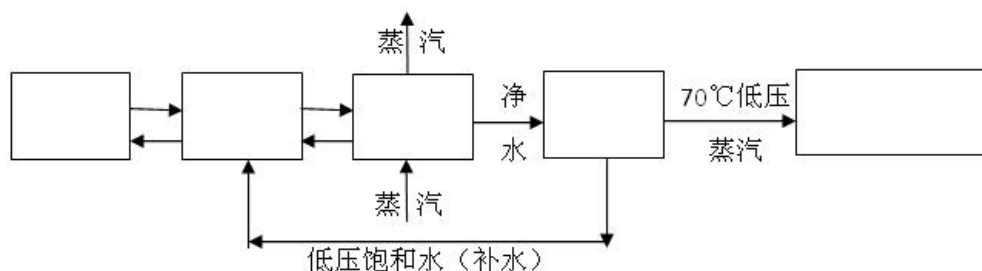


图3 冲渣水余热应用于海水淡化的流程示意图

3.2 闪蒸罐饱和蒸汽产生量的计算

在热 INBAR 渣处理系统中，夏季冲渣水温可达到 90℃，根据冲渣水逆流换热理论和实际工况，可制得压力 0.6MPa，温度 85℃ 的净水；根据 LT-MED 对低温低压蒸汽的要求：压力 0.035MPa、温度 70℃。

计算闪蒸罐的产汽效率如下：

压力 0.035MPa、温度 70℃ 的净水的焓值为 $H_{t,s}=293.53\text{kJ/kg}$ ，该温度下的蒸汽焓值为 $H_{t,q}=2625.3\text{kJ/kg}$ ，

则在闪蒸罐内，饱和水变为饱和蒸汽所需的汽化潜热为：

$$\Delta H = H_{t,q} - H_{t,s} = 2331.77\text{KJ/kg}$$

喷入闪蒸罐中的压力 0.6MPa，温度 85℃ 的净水的焓值为 $H_{t,s}=356.44\text{kJ/kg}$ ，则闪蒸原料净水与闪蒸罐中饱和水的焓值之差为：

$$\Delta H' = 356.44 - 293.53 = 62.91\text{kJ/kg}$$

计算可得到闪蒸观众的蒸汽产生率为：

$$\omega = \Delta H' / \Delta H = 2.698\%$$

即：如果三座高炉正常生产，85℃热水产出量为 4500 吨/h，可产生满足 LT-MED 生产所需蒸汽 121.41 吨/h，按照造水比 10:1 计算，每天可生产高品质淡水量为： $121.41 \times 24 \times 10 = 29138$ 吨。

完全可以满足一个年产能 500 万吨钢铁厂淡水的自给自足。

3.3 海水淡化的成本分析

根据大连海水淡化工程研究中心的华维国老师的研究结果，以 10000 吨/天的海水淡化产量为目标，膜法比 LT-MED 成本高将近 3.972 元/吨，且 LT-MED 的水杂质含量是膜法的 1/30。在热法海水淡化工艺中，能耗成本占到 43.5%。

钢铁企业高炉 24 小时生产，每座高炉两套渣处理系统替换作业，冲渣水的热能品质能够保持 24 小时的相对稳定，在冲渣水余热利用系统全部配套建设齐全的情况下，由热水通过闪蒸罐制得蒸汽的能耗只有电费，可以忽略不计。因此，高炉冲渣水余热应用于 LT-MED，海水淡化成本可以再降低 40%，吨水成本达到 3.5 元左右。

4、结语

1) LT-MED 海水淡化工艺能够充分利用低品质热源，且操作简单、水质好，在钢铁企业具有较好的应用前景。

2) 高炉冲渣水的余热应用于海水淡化不仅大大降低了淡化水的成本，而且促进了企业的节能环保工作。

3) 热水闪蒸工艺技术把高炉冲渣水换热系统和 LT-MED 海水淡化系统紧密地联系在一起，形成了钢铁与淡水资源的新型联产模式，可实现钢铁企业的用水的自给自足，并可将成本控制在 3.5 元/吨。

实现天然气热能全利用—— 烟气源热泵供热节能技术简介

北京浩特沃特节能科技公司

教授级高级工程师 李崇兴

摘 要:目前, 由于燃气锅炉的排烟温度较高, 有 15% 以上的热能通过烟筒排放, 天然气的热利用率较低, 需研究能够将天然气锅炉烟气的热能全部回收的技术。全热回收是指将烟气中的显热和潜热全部回收的节能技术, 是节能领域尚没有解决的问题。烟气源热泵是利用空气源热泵可利用低位热能实现供热的特点, 将燃气锅炉低温烟气的余热作为空气源热泵的热源, 充分利用烟气中的潜热, 实现了全热回收利用。烟气余热泵采用三级降温两级换热的工艺, 将 120℃ 的烟气降到 15℃ 排放, 实现了潜热和显热的全部回收利用。本技术可降低供热和热水加热成本 60% 以上, 并具有节能、降低成本、节水、减排等多种功能和效益。

一、提高天然气热利用率势在必行

为了改善大气质量, 北京市大力推进煤改气工程, 目前, 天然气已基本覆盖六环以内的大部分地区, 北京市每年消耗的天然气从 2004 年的 25 亿立方米到 2014 年已达到 105 亿立方米, 预计在 2020 年前将达到 200 亿立方米。其中冬季采暖消耗的天然气已占到全年消耗量的 60% 以上。作为清洁能源的天然气理应将其热能全部利用, 但是, 天然气热利用率很不尽人意, 由于锅炉排烟温度较高, 有 15%-20% 的热能通过烟筒排放到空中, 不但浪费了宝贵的能源, 而且还对大气环境造成了影响。目前, 燃气锅炉的余热回收较普遍的做法是在锅炉烟筒上安装一级汽水换热器余热回收装置, 仅仅收回燃气热值的 3-5% 的热能, 烟气中还有大量的潜热未被回收利用。因此, 研究能够将天然气锅炉烟气中的显热和潜热全部回收的技术, 提高天然气的热能利用率是当务之急, 势在必行。本文介绍的烟气源热泵节能技术实现了燃气锅炉烟气余热的全热回收。

二、全热回收的概念

目前, 全热回收应用最多的是空调领域, 主要是在室内排风和新风的热交换方面, 在回收和利用排风的冷量(热量)的同时降低(提高)新风的温度达到降低能耗的目的。衡量标准是热能的回收率, 当追求较高的回收率时, 付出的设备的投入增加和运行成本和能耗的增加, 因此一味地追求高效率并不是最佳选择。其全热回收的“全热”并不是真正意义上的全热。在烟气余热回收领域, 普遍认为, 部分热回收和全热回收的分界线是烟气潜热的回收, 当排烟温度低于烟气中水蒸汽的凝结温度时, 产生了冷凝水回收了潜热就是全热回收。所以一些烟气热回收设备在排烟温度达到 60 度时, 仅有部分冷凝水排出就宣称是全热回收的说法是不准确的。包括冷凝锅炉在内的烟气热回收技术只能称为“深度”热回收, 而不是真正的全热回收。

烟气源热泵节能技术所称的“全热回收”是指将燃气锅炉烟气中所含的热量(包括显热和潜热)全部都得到回收利用。所谓全部利用是指天然气燃烧后所产生的热量(天然气的热值)得到全部利用。其计算基点是以天然气进入锅炉的温度为基础, 最终排烟温度与天然气进入锅炉的温度接近或相同时, 则可认为其热量全部利用。天然气在原产地处理后经过长途管道输送到储气站, 然后通过地下管道输送到用户。经过长途的地下管道输送, 天然气温度已接近地层温度, 因此, 天然气进入锅炉的温度一般为 15℃ 左右。以此为准, 只有当燃气锅炉烟气余热回收设备的最终排放温度接近或等于 15℃ 时, 才能称为烟气余热的“全热回收”。由于季节不同天然气进入锅炉的温度也有变化, 因此, 将天然气进入锅炉的温度通称为“常温”, 也就是说, 烟气回收的排烟温度降到常温时才是真正的全热回收。

目前, 在天然气锅炉烟气余热利用过程中, 有一种技术偏见, 认为只要有冷凝水出现, 就是回收了潜热, 实现了所谓的“全热回收”。实际上, 其回收的潜热只是全部潜热的一小部分, 没有实现天然气热能利用最大化的目标, 有相当数量的低品位的潜热在现有技术条件下难以回收而排放到空中, 就连国外先进的冷凝锅炉也是如此。据了解, 现有技术可将天然气锅炉烟气最终排烟温度降

到 40℃（如冷凝锅炉），此时约有总热量的 5% 的潜热不能回收。有关资料显示，排烟温度为 40℃ 时，可回收热量为 4772kJ/Nm³，而排烟温度为 20℃ 时，可回收热量为 6115kJ/Nm³，两者相差 1343kJ，相当于潜热的 30%。烟气源热泵供热节能技术将最终烟气温度降到了低于 15℃。因此真正实现了全热回收。

三、全热回收是节能领域尚没有得到很好解决的问题

天然气是不可再生的化石燃料，在地球上的储量是有限的。因此应当充分加以利用。但是目前燃气锅炉的热效率较高的只能达到 90%。排烟热损失是锅炉热能利用过程中的主要的热损失。成熟的烟气余热回收技术及冷凝式锅炉也只能将烟气降到 40℃ 后排放，仍有部分潜热（特别是低品位热）不能回收。因此，人们一直在进行研究探索，如何回收烟气中的潜热（特别是低品位热）而进一步提高天然气的热能利用效率。当前所谓的烟气“全热回收”并没有真正实现“全热”，而只是回收了部分潜热，其难度就在于烟气中的“低位热能”回收，而低位热能回收的关键就是热交换器没有足够低温的有用工质和低温热能的用途。有的全热回收利用是在特定的条件下实现的，不能实现持续的回收利用，例如在烟气回收过程中，换热器中低温工质可以降低排烟温度，冬季进入换热器的自来水温度在 10 度左右时，其排烟温度可以降到 25 度左右，但是这只是补水状态不可能持续进行。本专利技术的实施真正实现了“全热回收”，烟气最终排放温度达到了 15℃ 以下，而且可以持续运行，已低于天然气进入锅炉的温度，意味着天然气中的热量经过锅炉燃烧和本专利技术的余热回收全部被利用。解决了节能领域长期没有解决的问题。

四、烟气源热泵节能技术研发的背景及原理

（一）本技术研发的背景

本项技术的全称为“燃气锅炉烟气余热（低品位）利用与空气源热泵联合供热节能技术”（简称“烟气源热泵供热节能技术”）是水利部教授级高级工程师李崇兴研究成功。于 2012 年 4 月国家专利局授予发明专利权。

本技术通过燃气锅炉低温烟气余热利用提高空气源热泵热水器的能效比而获取廉价热水，在一定条件下解决了北方地区（黄河以北）空气源热泵热水器在冬季低温结霜和效率低的问题，并有减排和节水的效益。

近年来，为减少锅炉烟气对城市大气的污染，许多城市限制燃煤锅炉，大力发展以天然气为燃料的燃气锅炉。按照锅炉的技术规范，燃气锅炉的排烟温度在 120 度以上。特别是北方的取暖季节，有大量的热能随烟气排入空中而浪费。现有技术采用气-水换热器将烟气热回收利用后，其排烟温度仍在 70℃ 以上。

空气源热泵热水器是当前节能、环保、能效比高的热水器，在我国的长江以南发展迅速。但是，在北方由于冬季低温导致空气源热水器的蒸发器结霜和热水器能效比降低的问题制约了该项技术在北方地区的普及和发展。

鉴于在取暖季节燃气锅炉的烟气排热和空气源热泵热水器的需热，在时空上是一致的，热能供需是互补的。因此本技术的重要特征就是将燃气锅炉的低温烟气排热和空气源热泵热水器的需热结合起来，通过技术手段，使燃气锅炉的排烟的热能转化为空气源热泵热水器的热源，产生低成本的生活热水供应生产所需，不但解决了冬季空气源热泵热水器高效运行的问题，而且回收大量的冷凝水和潜热，同时也减少燃气锅炉向大气中排放的有害气体，有利于环境保护，实现节能减排和节水。

目前，燃气锅炉加热一吨水的燃气成本在 20 元以上，有的高达 40 多元，造成 24 小时供应生活热水的小区物业管理单位不堪重负，甚至停止了热水供应与业主发生纠纷并引发了群体事件。采用本项技术回收利用了烟气余热的低品位热部分热量，配合低谷电价，可较大幅度的降低成本。甚至低到加热一吨热水的成本仅为 3.2 元，比锅炉加热成本降低了 80% 以上。这从根本上解决了居民小区生活热水加热成本高的问题，使生活热水的供应成为物业公司的盈利方式而不是包袱。对于宾馆、学校、医院、泳池等有热水需求的单位，可以大幅度降低热水供热的成本，产生显著的经济效益。

（二）本技术的基本原理

空气源热泵热水器是目前世界上最先进、能效比最高的热水设备之一，它根据逆卡诺循环原理，采用电能驱动，通过传热工质把自然界空气中无法被利用的低品位热能有效吸收，并将吸收回来的热能提升至可用的高品位热能并释放到水中，用来取（供）暖或供应热水。在正常工况下热泵热水机组每消耗 1 千瓦电能就从空气中吸收 4 千瓦的热量，节能效果非常显著。在全球能源供应日趋紧张的

形势下，空气源热泵热水器凭借其高效节能、环保、安全、安装便捷等诸多优势，在市场上迅速得到消费者的认可，并发展成为一个节能环保的新兴产业。但是，冬季低温导致空气源热水器的蒸发器结霜和热水器的能效比降低的问题成为制约这项技术在北方地区普及和发展重要因素。

利用空气源热泵能够吸收利用空气中热能产生热水的特点，将燃气锅炉的烟气通过气-水换热器和混合降温后降到适合空气源热泵高效工作的温度，可将烟气最终排放温度降到接近常温，实现烟气中的热能全热（显热和潜热）回收，所回收的热量可用来加热水或供给取暖系统。有效地解决了空气源热泵冬季运行的难题。在降温过程中，烟气中大部分水蒸气凝结成水，并吸收烟气中的部分氮氧化物，实现了节能减排。

五、全热回收的必要性和可行性

众所周知，化石能源是目前全球消耗的最主要能源，2006年全球消耗的能源中化石能源占比高达87.9%，我国的比例高达93.8%。由于化石能源具有天然的不可再生性，随着人类的不断开采，化石能源的枯竭是不可避免的，大部分化石能源本世纪将被开采殆尽。天然气是最界洁净的化石能源，随着人类的不断开采，也将消耗殆尽。因此，节约能源，转变能源利用方式，提高一次能源的利用率有着重要的意义。

天然气的成分中95-98%是甲烷（CH₄），含有大量的氢，在燃烧的过程中，碳生成一氧化碳和二氧化碳，氢和氧结合生成水，在锅炉燃烧室的高温环境下气化为过热水蒸气。根据计算，一立方米的天然气燃烧后生成1.55公斤的水。这些水冷凝后所释放出的潜热是相当可观的，约占天然气低热值的10%以上。所以，如果能将烟气温度从180℃降到20℃时，其可回收的热能可占到天然气低热值的20%左右，节能潜力是相当大的，以北京为例，冬季供暖消耗的天然气占全部的60%以上，而且消耗量的增速很快，2009年消耗40亿立方米，2010年消耗51.5亿立方米，到2011年已经消耗了70亿立方米。据预测，2020年要消耗120亿立方米。即以2011年为例，总计采暖锅炉的烟气热能回收如果达到10%，可节约天然气7亿立方米。

随着我国能源结构的调整，以天然气为热源的集中供热锅炉和广泛推广的燃气轮机冷、热、电三联供系统所排放的烟气在150℃-200℃左右。因此，进一步回收利用其烟气中的热能的问题也提到节能减排的议事日程中。当前的烟气余热回收技术将烟气降到70℃-80℃已经很成熟，国外先进的冷凝锅炉排烟温度也降到了40℃，但大量在用的锅炉排烟温度仍然很高，急需研发适用于在用锅炉的烟气低品位热能利用技术。

近年来，许多学术界的研究人员和企业的技术人员对燃气锅炉烟气余热回收进行了研究和探讨，也取得了一些成就，但是截至目前，尚没有能够将烟气温度降到20℃以下的技术，也没有真正实现全热回收的技术。

六、烟气源热泵节能技术的工艺流程及适用范围

本技术采用三级降温两级换热工艺，将燃气锅炉中的烟气热能梯级回收利用，特别是利用烟气源热泵吸收低品位热能的特点，将30℃以下的烟气中的潜热回收，回用到供暖和生活、生产热水，实现了烟气中的热能的全热（显热和潜热）回收。

工艺流程：

第一级降温、换热是将120℃的烟气（设计工况）通过气-水换热器降至60℃，水温提升6-7℃；

第二级降温是通过混合降温器将烟气从60℃降到30℃；

第三级降温、换热是通过烟气热泵将烟气降到15℃后排放，水温提升6-7℃，三级降温烟道串联连接，二级换热的热水管道可串联和并联，烟气降温过程中凝结的冷凝水吸收烟气中的部分氮氧化物，实现了节能减排。

主要技术指标及关键技术

1、可将燃气锅炉的排烟温度从120℃降到15±5℃，天然气的热能（显热和潜热）全利用。可回收锅炉负荷的10%以上的热能。

2、在设计工况（烟气温度120℃）时，消耗1度电（860大卡，电费0.89元），可回收相当于7.9度电（6794大卡，电费2.544元）的热能，可以节约0.79立方米天然气（价值2.544元）。

3、设计工况（烟气温度120℃）时，锅炉加热的燃气成本为每吉焦105.84元，烟气源热泵加热的电费成本为每吉焦41.52元，比燃气锅炉加热的成本降低60%。

4、系统能效比：

烟气温度 150℃ 以上，系统能效比为 8 以上；

烟气温度 120℃ 以上，系统能效比为 7 以上；

烟气温度 100℃ 以上，系统能效比 6 以上；

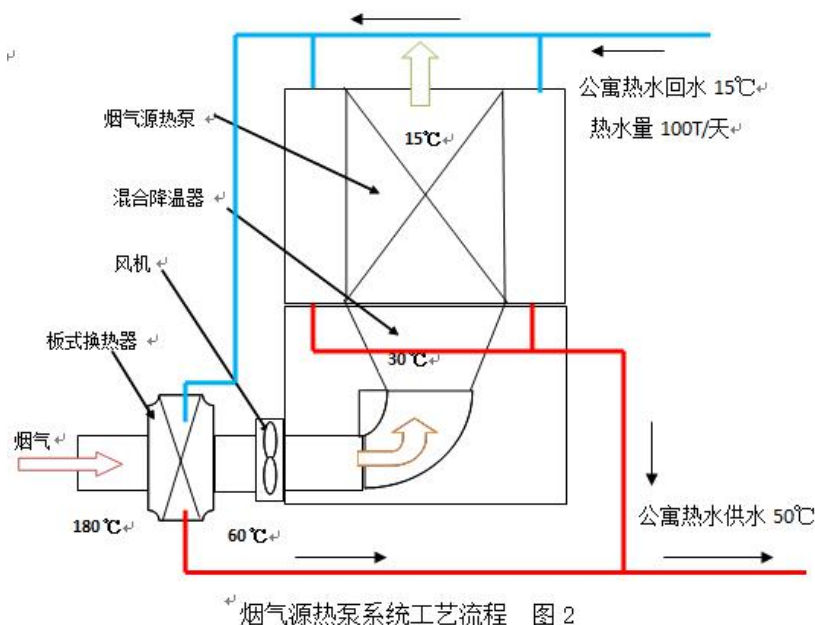
烟气温度 80℃ 以上，系统能效比为 5 以上。

5、关键技术

(1) 烟气源热泵，利用气源热泵吸收低品位热能的特点，将气源热泵引入烟气余热回收领域，将烟气中的低品位热能回收利用，创造了气源热泵的新品种；

(2) 混合降温，利用低温烟气做热能的载体进行换热，使气源热泵获得高效而稳定的运行条件；

(3) 采用整体镀膜技术解决热泵蒸发器在烟气酸性冷凝水中的设备腐蚀问题。



本技术的适用范围：

1、目前，北京地区的居民小区“24 小时供热水”收费较低，成本较高，矛盾突出，有改造和降低热水成本的需求。

2、北方地区由燃气锅炉供热水的医院、学校、宾馆、饭店、写字楼、游泳池、洗浴中心等度存在着热水加热成本高的问题，有降低热水成本的需求。

3、工业生产的食品加工、饮料生产、金属表面处理、汽车涂装生产线等高耗能行业采用本技术可以降低加热成本 50% 以上，采暖季节回收燃气锅炉烟气时，可节约天然气 10% 以上。

4、烟气源热泵系统采用模块化设计，单机输入电功率 11 千瓦，输出 50 千瓦。可以与 1-15 吨燃气锅炉配套。标准机组配置为一个板换、一个混合降温器、4 个烟气源热泵单机，输入电功率 44 千瓦，输出 400 千瓦（烟气温度 120℃），配套锅炉 4-6 吨。

七、烟气源热泵节能技术的主要功能及效益主要功能

1、节能

(1) 将燃气锅炉烟气温度降到 15℃，天然气的热能全部利用，可收回锅炉负荷的 15% 以上的热能，相应的节约天然气耗量，扣除电力消耗，可节约锅炉负荷的 10-15% 的能源。

(2) 设计工况下（烟气 120℃）：一套设备（与 4-6 吨锅炉配套）平均每天运行 16 小时（峰电时段不运行），可节约天然气 560 立方米，耗电 720 度，平均每消耗 1.3 度电（平均电费 0.625 元）可节约 1 方天然气（燃气费 3.22 元），每天可节约 1803 元。

(3) 烟气源热泵冬季供暖采用平+谷电时段运行，可以起到消峰填谷的作用。北京供电系统峰谷差较大，本技术可利用低谷电供热，充分利用低谷电资源。冬季是北京市用气高峰，本技术可以消减 15-20% 天然气消耗量，起到消峰的作用，提高供热保证率。

2、降低供热成本

燃气锅炉产生每吉焦热能的燃气成本为 105 元（只计燃气成本）

烟气源热泵运行成本及比较（只计电费成本）

实测数据：烟气温度的 100℃，系统能效比 6.0，每吉焦耗电 46 度

低谷电时段，热泵每吉焦成本 17.02 元，比锅炉降低 83.2%。

平电时段，热泵每吉焦成本 39.56 元，比锅炉降低 61%。

峰电时段，热泵每吉焦成本 63.48 元。比锅炉降低 37.4%。

每天运行 16 小时（谷+平时段），热泵每吉焦成本 28.29 元，比锅炉降低 72%。

效益分析

1、节能效益

空气源热泵在春夏秋三季的运行 COP（能效比）较高，可以替代燃气锅炉加热生活热水，取得较好的节能效益。冬季取暖锅炉的烟气回用使得空气源热泵得到更好的工作环境，COP 值更高，节能效益更好。由于烟气余热的回收利用，排烟温度可降至常温，锅炉烟气中的显热和潜热全部被回收利用，天然气的热利用效率（以高热值为基准）可达到 110%以上，真正实现天然气烟气的全热回收。根据北京市节能技术监测中心的检测结果，本系统输出功率与输入电功率的比为 7.91。

2、降低生活热水的加热成本 50%以上

由于空气源热泵 COP 值较高，春夏秋冬四季的热水加热成本可以降到燃气锅炉加热水成本的 50%左右。冬季运行时，由于夜间燃气锅炉的负荷大且连续运行，使空气源热泵能够在低谷电时段运行，进一步降低了运行成本（相对于峰电降低 70%，平电降低 57%）。经过汽水换热的烟气回用给热泵降低了热水的加热成本。使系统的热效率进一步提高，特别是在冬季严寒期的加热成本比燃气锅炉加热成本降低 80%以上。

3、解决空气源热泵热水器在冬季运行结霜的问题

空气源热泵在冬季低温和高湿的情况下，其蒸发器会发生结霜的问题。影响热泵的效率和正常运行，频繁化霜会增加运行成本。引入烟气回用技术后，空气源热泵不再发生结霜问题。

4、减排效益

烟气在降温过程中有大量冷凝水凝结，部分二氧化碳和氮氧化物溶到冷凝水中，相应的减少二氧化碳和氮氧化物的排放。监测结果显示，最终排出的烟气中氮氧化物减少了 10%以上，因此，本技术的实施将对北京的取暖季节的空气质量的改善起到一定的作用。

5、节水效益

由于烟气的温度降到常温，烟气中 90%以上的水蒸气将凝结成水。据实测，一吨锅炉每天可以回收 1.2-1.4 吨冷凝水，PH=5.6-6.0，TDS=40-56。这些冷凝水经过中和处理可以代替软化水补充到取暖锅炉的循环系统，可以满足取暖系统的补充水。或者经过深度处理（反渗透）生产高纯度的纯水，用于工业生产。

6、投资回收期短，效益好

经过多项工程方案的比较，本项技术投资的回报率较高，在一般的情况下，按照生活热水的需求选定机型和装机容量，每天供应一吨生活热水所需要的投资大约在 1.2 万左右，设备运行后所节约的燃气费用可以在两年内收回投资。如果仅供应冬季供暖，所节约的燃气费可在 3.5-4 年内收回投资。

八、知识产权、技术鉴定及推荐目录情况

2008 年 12 月，申请发明专利，2012 年 4 月获得专利权；

2011 年 3 月，北京节能环保中心检测报告，系统能效比为 6.53；

2011 年 3 月，北京机械工程学会组织专家鉴定，结论为：该技术实现了多种节能技术的综合运用，集成系统达到了国内领先水平；

2012 年 3 月，北京市节能技术检测中心检测，系统能效比 7.91；

2012 年和 2014 年两次列入北京市发改委等七单位颁布的《北京市节能低碳技术产品推荐目录》；

2014 年 6 月，列入北京市科委公布的《北京地区大气污染防治技术和产品目录》；

2015 年 10 月，列入国管局《公共机构节能节水技术产品参考目录》。

2015 年 10 月，列入国家发改委《国家重点节能低碳技术推广目录》。

实施案例

- 1、 北京交通大学东校区学生浴室热水节能改造
- 2、 某机关采暖锅炉路烟气余热回收节能改造

1、北京交通大学东校区锅炉房节能改造示范工程简介

一、概况

采暖锅炉江苏双良锅炉 4.2 MW （6 吨）3 台（两用一备）

烟气温度 120℃ 供暖面积 12 万平米

洗浴热水加热一台燃气锅炉，额定功率 1000 千瓦（1.5 吨），

日平均供水量 50 吨/日天然气消耗量 300M3/天

锅炉热水成本燃气锅炉供热的燃气成本平均为 3.91 元/万大卡。

浴室锅炉消耗燃气成本为 13.86 元/吨。

二、烟气源热泵供热系统的供热能力

本系统包括一台不锈钢板式换热器、一台混合降温器、一组（四台）输入功率 44 千瓦的烟气源热泵。烟气温度为 120℃ 时，输出功率为 400 千瓦。可以供 2000 平米建筑供热和学生浴室每天 50 吨热水，相当于增加了 0.55 吨锅炉的供热量。

三、烟气源热泵供热系统加热成本

经过 2013 年冬季运行数据统计，采用烟气源热泵系统加热浴室热水的成本为 3.86 元/吨，为燃气锅炉的 28%。

本系统在非采暖季节为空气源工况运行，平均电耗为 12 度/吨水，电费成本为 5.61 元/吨水，为燃气锅炉的 40%。

全年平均电费成本为 5.03 元，为燃气锅炉的 36%。

本系统给北京交通大学出版社 1400 平米的书库供热，供热成本为

1.3 元/万大卡，比燃气锅炉的燃气成本 3.91 元/万大卡低 70%以上。



北京交通大学东校区锅炉房节能改造示范工程

2、国家某机关采暖锅炉房余热回收节能改造效果简介

一、概况

锅炉房有三台 4-6 吨热水锅炉，供热面积 8.6 万平米，排烟温度为 80-110℃。安装一套烟气源热泵余热回收系统，水路接入供热系统的二次循环，给办公楼供热。经过 2014 年采暖季节的运行，节能效果显著，有效运行 75 天，比 2013 年同期节约天然气 5.9 万立方米。

二、实测节能效果:

1、**实测系统能效比:** 锅炉排烟温度 110℃左右时, 热泵系统排烟温度 25℃左右。供回水温差 8-9℃, 回收热能 28 万大卡 (325kw), 系统能效比为 6.5。

2、节约燃气量对比:

(1) 日均燃气消耗量对比: (平均每日运行 12—16 小时)

1 日对比结果: 热泵运行每日可减少燃气消耗 533 立米,

3 日对比结果: 每日减少燃气消耗 630 立方米,

5 日对比结果: 每日可减少燃气消耗 533.6 立米

(2) 日平均气温相同时的燃气消耗量对比

2015 年 1 月 6 日 (热泵运行) 和 13 日 (热泵不运行) 为对比样本。结果: 平均气温差 0.03℃, 燃气消耗量相差 649 立米。

(3) 与去年采暖季同期对比

2014 年度比 2013 年度同期节约天然气 5.9341 万立米 (有效运行 75 天), 节约燃气成本 14.5375 万元。

三、排烟温度及天然气热能利用率

(1) 本系统运行期间实测的平均排烟温度为 19.59℃。

(2) 实测烟气余热回收率为锅炉负荷的 17.38--21.3%。扣除电耗, 热能回收率为锅炉负荷的 15--16%。

四、烟气冷凝水的回收利用

实测每小时可收集冷凝水 200 公斤, 每天可收集冷凝水 4 吨。

五、供热成本及设备投资回收期

(1) 供热成本比较

根据实测结果, 进烟温度 $70 \pm 5^\circ\text{C}$, 排烟温度 17℃, 系统平均能效比为 5 时, 不同电价的热泵系统加热成本与锅炉 (锅炉加热每吉焦燃气成本 101.45 元) 对比如下:

采用谷电时 (0.37 元), 每吉焦成本 20.6 元, 比锅炉低 79.5%。

采用平电时 (0.86 元), 每吉焦成本 47.8 元, 比锅炉低 52.9%。

采用峰电时 (1.38 元), 每吉焦成本 76.73 元。比锅炉降 24.4%。

(2) 本采暖季热泵系统

回收热能 810 吉焦, 耗电 5.3 万度, 每吉焦耗电 65.4 度, 电费 44.17 元, 比锅炉低 55%。

(3) 投资回收期

本项目投资为 54 万元, 3.65 年收回投资。



某机关锅炉房烟气源热泵供热系统图

陶瓷窑炉余热通过“呼吸系统” 完全回收利用案例分析

温千鸿 简润桐（佛山市冠珠陶瓷有限公司）

摘要：本文重点描述建筑陶瓷生产系统中，在不影响生产运作的前提下，如何将“烧成窑炉”的多余烟气，自动应用于粉料制作工序中的“喷雾干燥塔”中。

关键词：陶瓷窑炉余热 呼吸系统 回收利用

前言

在建筑陶瓷传统生产过程中，常见的辊道窑生产瓷质砖的日产量由 80 年代末的日产 1000 平方发展到目前的日产 35000 平方。伴随着设备设计产能爆炸式增长，辊道窑炉排放的热量越来越大。事实上，陶瓷生产中的其他工序（例如喷雾干燥塔）也存在很大的热量需求，但是对于连续式生产的大型设备，由于设备运行参数的不稳定将给生产过程带来很多的不合格产品，而且由于工况比较复杂导致参数智能化控制十分困难。因此，多年以来我国建筑陶瓷窑炉余热回收利用方面，能效很低。

一、“呼吸系统”项目背景

陶瓷生产中，传统的生产模式大体是这样的：①原料破碎～②配料入球磨机～③浆料混合～④喷雾干燥塔制粉～⑤液压成形～⑥半成品烘干～⑦半成品烧成～⑧冷加工（磨边、抛光）～⑨分检入仓。

我公司组织技术中心以及生产团队经过多次论证发现，通过智能化控制手段可以把“⑦半成品烧成”工序中的余热量，全部回收应用于“④喷雾干燥塔制粉”工序。其中，主要是要把握几个关键点：

- 1、回收利用系统任何情况下不能影响“⑦半成品烧成”工序中的排烟风机运行（运行电流、运行压力的稳定性）；
- 2、回收利用系统对于窑炉排烟工况的变化，要具备足够的智能响应手段；
- 3、回收利用系统要能根据各个喷雾干燥塔的需要进行“全开”、“全关”和“开度”自动控制；
- 4、回收利用系统需要建立一种特殊工况的“临时排出功能”；
- 5、在“⑦半成品烧成”工序和“④喷雾干燥塔制粉”工序之间的回收利用系统，需要有足够的在线监控措施。

基于以上原则和设计要求，我们经过检测和讨论认为：“呼吸系统”所具有的自动平衡功能，能够实现把“⑦半成品烧成”工序中的余热量，全部回收应用于“④喷雾干燥塔制粉”工序。于是，在基地总经理简润桐的直接领导下，我们佛山市冠珠陶瓷有限公司项目组就展开了“呼吸系统”余热回收利用项目研究。

二、“呼吸系统”项目思路及设计

根据检测，我们获得了余热回收总量（最大值）数据（如下表）：

序号	项目	符号	单位	数据来源计算或公式	备注	
					1#窑一级 排烟	1#窑二级 排烟
1	大气压力	Pam	Pa	测试数据	99500	99500
2	环境温度	t ₀	℃	测试数据	36	36

3	流量测点温度	t	℃	测试数据	359.0	475.0
4	流量测点静压	P _s	Pa	测试数据	-910.0	-900.0
5	流量测点截面积	A	m ²	测试数据	1.1304	0.5024
6	皮托管修正系数	K		标准 1.0, 背靠 0.841	1.000	1.000
7	流量点动压均方根	$\sqrt{P_{dp}}$		$\sum \sqrt{P_d}/n$	7.07	12.24
8	气体成分	O ₂	%	测试数据	14.40	14.40
9	气体成分	CO ₂	%	测试数据	3.30	3.30
10	气体标准状况密度	ρ_0	kg/m ³	空气 1.29, 烟气按组分计算	1.31	1.31
11	流量点介质密度	ρ_t	kg/m ³	$\rho_0 \frac{273}{t+273} \cdot \frac{P_{atm}+P_s}{101325}$	0.55	0.47
12	流量截面平均流速	v	m/s	$K \cdot 1.414 \sqrt{P_{dp}} / \sqrt{\rho_t}$	13.47	25.37
13	烟气小时流量	V _h	m ³ /h	$v \times A \times 3600$	54826	45892
14	烟气小时标态流量	V _{Nh}	Nm ³ /h	$V_h \times \frac{P_{atm}+P_s}{101325} \times \frac{273}{t+273}$	22891	16191
15	气体比热	C	kJ/Nm ³	$1.3+0.0000745t+0.0595(t/1000)^2$	1.334	1.349
16	气体含热量	Q	MJ/h	$V_{Nh} \times C \times (t-t_0)/1000$	9866	9587
17	两台排烟风机合并风量	V _{Nh} "	Nm ³ /h		39082	
18	两台排烟风机合并热量	Q"	MJ/h		19454	

1、呼吸系统的设计：

余热回收利用系统中最重要的一项工作，是通过中转引风风机，实现窑炉排烟风机出口实际压力接近“0”压力。因此余热回收利用系统中的管道设计和中转引风机型号选择，是设计的关键点。为此，我们还进行了系统模拟分析作为最终设备选型的参考。

根据讨论若将1、2#窑炉一级排烟烟气应用到系统中（由于1、2#窑炉一级排烟风机运行情况几乎相近，则认为2#窑炉一级排烟数据同上表），中途使用中转风机将汇合之后的烟气，抽吸过来之后，加压送到各个喷雾塔使用，剩余的烟气通过另外的管路输送进喷淋塔进行环保处理。需要建立如下模型：

烟气流量： $Q_1=54826 \times 2=109652 \text{ m}^3/\text{h}$ ，

假设1、2#窑炉一级排烟风机烟气汇合后主管直径：1.5m，管道截积： 1.77m^2 ；则主管烟气流速： $V=109652/3600/1.77=17.2\text{m/s}$ ；

经过查表分析，流速在经济流速范围内。因此管径确定为1.5m。

风机选型确定，压力方面弯头消耗1000pa；风机静压消耗1000pa；动压消耗500pa；管路沿程消耗1000pa。总的压力需求： $1000+1000+500+1000=3500\text{pa}$ 故中转风机压力定为 $\geq 4000\text{pa}$ 。

风机流量方面经检测烟气温度为359℃时，一级排烟出风口实际烟气量为

$54826\text{m}^3/\text{h}$ 。故烟气温度为200℃时，实际流量为 $54826 \times (273+200) / (273+359)=41032.8 \text{ m}^3/\text{h}$ ，两台一级排烟风机合计流量为 $82065.5 \text{ m}^3/\text{h}$ （359℃时）。

因中转风机抽 1、2#窑炉一级排烟风机的全部烟气量，若设计预留量为 10%

故流量定为 $82065.5/0.9=91183.9 \text{ m}^3/\text{h}$

综上所述：中转风机选型定为 Y4-68 14D 250kw 流量为 $108645 \text{ m}^3/\text{h}$ ，全压为 3246-4727pa，符合设计要求。

2、相关阀门的设计与型号确定如下：

根据自动控制的要求，我们设计时选用了圆蝶阀（如下）一批：

序号	型号 (内部有效尺寸)	数量	阀门类型	工作方式	备注
1.	Φ400	若干	圆阀	手动	
2.	Φ600	若干	圆阀	手动	
3.	Φ800	若干	圆阀	手动	
4.	Φ1200	若干	圆阀	手动	
5.	Φ1600	若干	圆阀	手动	密封性好，不漏气
6.	Φ1800	若干	圆阀	手动	密封性好，不漏气
7.	Φ800	若干	圆阀	电动执行(30KW)	
8.	Φ900	若干	圆阀	电动执行(30KW)	
9.	Φ1000	若干	圆阀	电动执行(45KW)	
10.	Φ1200	若干	圆阀	电动执行(60KW)	
11.	Φ1300	若干	圆阀	电动执行(60KW)	
12.	Φ1500	若干	圆阀	电动执行(90KW)	

3、自动外排机制的设计：

经过充分讨论项目组确定了如下自控项目：

● 中转风机停机

(1) 中转风机跳闸停机时，窑炉排空阀必须瞬间自动打开，同时在窑炉控制柜或现场控制柜输出紧急声光报警警示；

(2) 中转风机跳闸停机时，露天横管上的气缸式微流量排空阀必须瞬间自动打开，同时在窑炉控制柜或现场控制柜输出紧急声光报警警示；

(3) 中转风机跳闸停机时，各喷雾塔的余热进风管自动进风阀必须瞬间自动关闭、应急冷风进口同时瞬间全部打开，同时在喷雾塔热风炉控制柜输出紧急声光报警警示。

● 呼吸机构压力检测值异常时

正常使用情况下，为了确保窑炉排烟风机出口为 0 压或者微负压，所以中转风机及工作变频必须保证呼吸机构压力检测值为负压（设定值）：

(1) 呼吸机构压力检测值小于标准值（波动幅度现场调试修正）时，中转风机频率逐步降低，直到波动幅度降低到正常波动范围内后，中转风机频率逐步稳定；

(2) 呼吸机构压力检测值大于标准值（波动幅度现场调试修正）时，中转风机频率逐步加大，直到波动幅度降低到正常波动范围内后，中转风机频率逐步稳定；

(3) 呼吸机构压力检测值大于标准值（波动幅度现场调试修正）时，窑炉自动排空阀逐步加大，直到波动幅度降低到正常波动范围内后，窑炉自动排空阀逐步关小直至完全关闭；

(4) 呼吸机构压力检测值大于标准值（波动幅度现场调试修正）时，露天横管上的气缸式排空阀必须瞬间自动打开，直到波动幅度降低到正常波动范围内后，露天横管上的气缸式排空阀自动逐个关闭直至全部关闭。

● 喷雾塔配热管与主管分叉位置必须保持适当正压

(1) 当传感过来该处的压力比较大时，说明该管的出风荷载已经比较大，可能会导致中转风机电流超出工作范围而停机，所以此时末段的 90 千瓦外排风机（进废气处理）逐步开大，直到压力检测值低于设定值，排风机才保持稳定；

(2) 当传感过来该处的压力比较小时，说明该管的流量已经比较大，可能会导致喷雾塔的热风被排风机倒抽，所以此时末段的 90 千瓦外排风机逐步关小，直到压力检测值处于设定值的正常波动范围内，排风机才保持稳定。

● 窑炉风机全部停止运行时

为了预防中转风机抽力损害负压段主风管，此时两条窑炉的自动排空阀要自动打开，同时在窑炉控制柜或现场控制柜输出紧急声光报警警示。

● 另外，冷调试

必须先打开露天横管上的气缸式排空阀，使冷风能够从外界进入主管，以免主风管被中转风机“抽扁”甚至影响窑炉运行。

附：呼吸系统部分电气清单

序	名 称	规 格	单位	数量	备注
1	人机界面	DOP-A10THTD1	台	2	台达
2	PLC(带总线功能)	DVP32EH00T2-L	台	1	台达
3	主站模块	DVP-DNET-SL	块	1	台达
4	从站模块	DVP-DT02-H2	块	11	台达
5	模拟量输入模块	DVP-04AD-H2	块	27	台达
6	模拟量输出模块	DVP-04DA-H2	块	1	台达
7	PLC	DVP32EH00T2	台	若干	台达
8	扩展模块	DVP48HP00T	台	若干	台达
9	温度表	DTV4896C	个	若干	台达
10	转换器	IFD9502	个	若干	台达
11	分线盒	TAP-CN01	个	若干	台达
12	人机界面通讯线		条	若干	台达
13	主干线网络电缆	TAP-CB01M	米	若干	台达
14	子干线网络电缆	TAP-CB02M	米	若干	台达
15	中间继电器座	SJ2S-05B/8A	个	若干	日本和泉
16	中间继电器	RJ2S-CL/24VDC/8A	个	若干	日本和泉
17	熔断器座	RT18-32(X)/32A	个	若干	茗熔
18	光管支架	40W/220VAC	支	若干	佛山照明
19	白色光管	40W/220VAC	支	若干	佛山照明
20	塑料电柜线槽	100*100	条	若干	
21	铝合金导轨	2MM(1米/条)	条	若干	
22	方形铜条	10mm*10mm*1000mm	条	若干	
23	接线排	600A/10位	条	若干	
24	双层接线端子	32A(4MM2)	片	若干	上海尤提乐
25	进口双屏蔽电缆	2*0.5MM2	米	若干	法国和柔
26	电缆	3*1.5MM2	米	若干	大都
27	F型变频器	90KW	台	若干	大都
28	F型变频器	220KW	台	若干	台达
29	模拟量输出卡	VFD-F2DA	个	若干	台达
30	三相四极断路器	C65N-C/63A	台	若干	施耐德
31	单相两极断路器	C65N-C16A	台	若干	施耐德
32	三相三极断路器	630A	台	若干	施耐德
33	差压变送器	CP102-P0	个	若干	法国凯茂
34	高温热电偶		支	若干	
35	电柜		套	若干	
36	单相隔离变压器	DG-1KV.A	台	若干	东一百
37	开关电源	S-100-24	个	若干	台湾明纬
38	多股铜芯电线	0.75MM2	米	若干	大都
39	多股铜芯双色电线	1.5MM2	米	若干	大都
40	铜芯电线	95MM2	米	若干	大都
41	电缆	2*0.5MM2	米	若干	大都
42	黑色尼龙软管	WY-PA6-V0/AD10.0B	米	若干	上海文依
43	电磁阀	4V310-10/24VDC/6W	个	若干	台湾亚德客
44	三联体	GC400-15A	套	若干	台湾亚德客
45	磁感应开关		个	若干	台湾亚德客

46	铜芯电线	185MM2	米	若干	大都
47	电气杂件		批	1	

三、“呼吸系统”应用分析

经过我们项目组的努力，呼吸系统全面投入使用 1 年多证明：本系统对窑炉、喷雾干燥塔运行均无干扰，而且完全能自动应对打雷、停电等突发工况，不但实现了窑炉零排放，还使喷雾干燥塔节约 18%的制粉单耗，创造了可观的经济益 和社会效益。

附专利图及外观图



但是我们在实际应用接近 2 年时间以来发现，我公司行业首创的“呼吸系统”窑炉余热回收利用技术存在以下有待完善的地方：

- 1、设计流速过大，导致风机负载较大；
- 2、个别位置管道保温仍不理想，使自动执行器的电气使用寿命存在隐患；
- 3、蝶阀设计中没有充分考虑烟气的腐蚀性。

四、结束语

撰写本文的目的既希望对建筑陶瓷行业中各位节能减排技术人员起到一定的帮助，也希望对众多陶瓷行业的环保、清洁生产工作有所启发。当然，由于学识所限，本文难免有错漏之处，请各位专家批评指正！

新型锅炉余热利用暖风器的研究及应用

黄举福，林琪超，谢庆亮，程小峰
(福建龙净环保股份有限公司 龙岩市新罗区陵园路 81 号 364000)

摘 要 以华润焦作电厂 660MW 机组为研究对象，分析近年来广泛运用的低温省煤器作为新型暖风器的热源可行性及经济性。应用结果表明：新型暖风器的实际运行效果良好，电除尘器的进口烟温可降至 90℃，实现低低温烟气处理目标的同时减轻空预器腐蚀堵塞，实现较好的环保效益与经济效益。关键词 燃煤锅炉 烟气余热 暖风器 低温省煤器

1. 引言

国内电厂实践证明采用暖风器提高空预器入口空气温度来缓解空预器的低温腐蚀和堵塞问题，提高机组安全性的方法是可靠有效的^[1]。但常规暖风器的热源通常来自于主汽轮机抽汽，这种方式消耗了大量蒸汽，降低了机组经济性。暖风器缓解空预器腐蚀堵塞问题的同时由于空气入口温度提高，空气在空预器内吸热量减少，造成空预器出口烟温升高，排烟热损失加大，并由此带来了烟气体积流量增大，粉尘比电阻提高，电除尘效率下降及脱硫冷却耗水量增加等影响机组经济性一系列问题。如何能够实现通过暖风器来缓解空预器腐蚀和堵塞现象的同时能够解决排烟温度升高的问题就显得迫在眉睫。

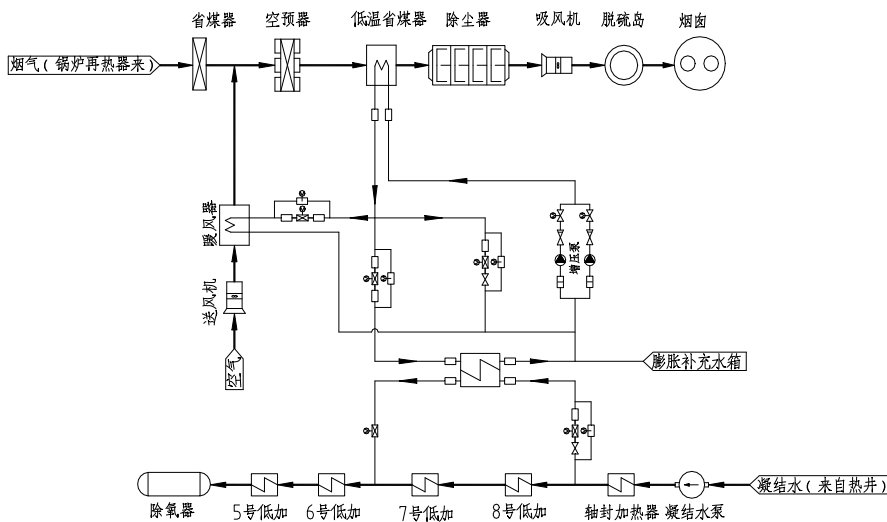
在燃煤锅炉的各项热损失中，排烟热损失是其中最大的一项，一般情况下，排烟温度升高 10℃，排烟热损失约增加 0.6%~1.0%^[2]。近年来烟气余热利用低低温电除尘技术得到了广泛的运用，有效解决了传统锅炉排烟温度高，除尘效率偏离设计效率的问题，取得了较好的经济效益和环保效益。借助烟气余热利用低低温电除尘器技术去解决暖风器带来的排烟温度升高的问题就成了一个值得思考的方向。

本文以华润焦作电厂 660MW 机组为研究对象研究分析将低温省煤器吸收的烟气余热用于空预器冷端防腐保护的新型余热利用暖风器系统可行性及经济性。经过计算，增设暖风器后焦作电厂的排烟温度将高达 140℃，通过低温省煤器将烟温降至 90℃，此部分回收的烟气余热可以保证在不投入暖风器蒸汽的条件下，满足暖风器的设计要求，实现减少空预器低温腐蚀和堵塞问题，同时提高了电除尘器除尘效率、湿法脱硫系统的脱硫效率、降低脱硫水耗。

2. 新型余热利用暖风器系统

新型余热利用暖风器系统的换热形式为烟气—水换热器，并配套闭式循环水系统（包括低温省煤器、水媒暖风器、循环水泵、膨胀水箱等）。华润焦作锅炉余热利用暖风器工艺流程图见图 1。

图 1. 工艺流程图



其中低温省煤器安装在每台锅炉空气预热器后，静电除尘器前的垂直烟道上。一次风暖风器、二次风暖风器分别安装在冷一次风烟道、冷二次风烟道中。新型余热利用暖风器系统利用空预器出口烟气余热加热机组一、二次风，代替常规的蒸汽暖风器。可实现烟气余热代替蒸汽，减少暖风器蒸汽消耗，提高机组经济性。

低温省煤器利用烟气余热加热汽机凝结水、锅炉冷一\二次风，将排烟温度从 145℃降低到 90℃，低温省煤器吸收的烟气余热不仅满足将一、二次风温度由 30℃升高至 60℃，减轻空预器的腐蚀、堵塞，多余的热量还可输送至汽机凝结水系统，实现一定的煤耗节约。

经低温省煤器加热后的循环水一路送至锅炉暖风器加热冷一次风、冷二次风，另一路送至水水换热器加热汽机凝结水系统。凝结水系统从#8 低加入口取水，通过调节阀调节流量，经水水换热器加热后送至#6 低加入口；低温省煤器设有热水再循环系统，低温省煤器出口热水可以通过此系统与低温省煤器入口温度较低的水混合，用于调节低温省煤器入口水温，防止低温省煤器发生低温腐蚀。循环水系统配置 2 台变频升压泵（一用一备）进行系统循环。相关设计参数见表 1。

表 1. 锅炉余热利用暖风器设计参数汇总表

编号	项 目	单位	VWO
1.	低温省煤器烟气量	m ³ /h	3329000
2.	低温省煤器进口烟温	℃	145
3.	低温省煤器出口烟温	℃	90
4.	低温省煤器进口水温	℃	70
5.	低温省煤器出口水温	℃	105
6.	低温省煤器循环水流量	t/h	1110
7.	热水再循环流量	t/h	240
8.	去#6 低加流量	t/h	560
9.	一次风暖风器烟气量	m ³ /h	600000
10.	一次风暖风器进口烟气温度	℃	30
11.	一次风暖风器出口烟气温度	℃	60
12.	一次风暖风器进口水温	℃	105
13.	一次风暖风器出口水温	℃	71
14.	一次风暖风器进水流量	t/h	135
15.	二次风暖风器烟气量	m ³ /h	1800000
16.	二次风暖风器进口烟气温度	℃	30
17.	二次风暖风器出口烟气温度	℃	60
18.	二次风暖风器进口水温	℃	105
19.	二次风暖风器出口水温	℃	71
20.	二次风暖风器进水流量	t/h	405

3. 余热利用暖风器可行性分析

焦作电厂低温省煤器安装在静电除尘器前的垂直烟道上，通过低温省煤器实现燃煤电厂低低温烟气处理工艺。该工艺在日本已经有十多年的运用业绩，效果良好。余热利用暖风器对机组各系统

影响分析如下：

低温省煤器降温后，进入电除尘器的烟气体积流量降低，电场风速降低，电除尘的气流均布发生了变化，做好低温省煤器的气流均布，流场精细化调整是保证除尘器高效工作的前提。

低温省煤器将进入电除尘器的烟气温度降至90℃左右，可实现低低温除尘工艺，减少除尘器处理烟气量，降低粉尘比电阻，提高除尘效率，并高效脱除SO₃，减轻后续烟道的腐蚀。

低低温处理工艺将进入脱硫塔的烟气温度降至90℃左右，此时无需再消耗大量的脱硫减温水将烟气降至最适合脱硫反应的温度，可减少脱硫水耗，提高脱硫效率，同时延长脱硫塔内喷嘴等零部件使用寿命。

低温省煤器烟气侧阻力约为400pa，虽然增加了局部烟气阻力，但由于烟温降低，烟气体积流量减小约14%，可减小除尘器后续烟道等的烟风阻力，烟风系统的整体阻力可大为降低，从而降低部分引风机电耗。同时由于投入锅炉余热利用暖风器，基本可消除空预器腐蚀堵塞问题，保证空预器阻力可在设计值范围内。

新型暖风器节约了汽机蒸汽来加热风机入口的烟气，减少了机组蒸汽耗量，同时由于机组排烟温度较高，烟气余热在满足了暖风器运行后仍有较多多余热量可以加热凝结水将余热输送到原低加系统中，实现排挤汽轮机抽汽，煤耗节约。

锅炉余热利用暖风器采用低温省煤器作为暖风器的热源，低温省煤器和暖风器采用水工质作为换热介质，由此可能带来低温腐蚀，低温省煤器工作在高浓度粉尘的环境中，无法避免存在磨损、积灰等问题。但近年来低温省煤器的大规模运用为解决这些问题提供了宝贵的运用经验。焦作电厂在充分调研后确定了以下技术保障措施。

3.1 防腐蚀技术保障措施

3.1.1 有限腐蚀

采取有限腐蚀理论作为换热管的选型指导。根据苏联1973年版锅炉机组热力计算标准，受热面金属壁温大于水蒸气露点温度25℃左右，小于105℃，受热面金属低温腐蚀速率小于0.2mm/年，这个腐蚀速度是可以接受的，即为有限腐蚀理论。焦作电厂全部换热管采用耐低温腐蚀的ND钢，同时经过详细的计算，华润电厂暖风器出口水温及低温省煤器的进口水温大于70℃时，即可实现有限腐蚀，保证换热元件达到设计寿命。

3.1.2 SO₃脱除

低低温烟气处理工艺可高效脱除SO₃。烟气通过低温省煤器降温至110℃以下时，灰的表面温度同烟温，此时SO₃不光在金属壁冷凝，而且同时在粉尘表面冷凝，并产生粉尘对SO₃的物理吸附和化学吸附。而此处烟气含尘浓度高，一般为15000~25000mg/m³或更高，比表面积可达2700~3500cm²/g，因而粉尘总表面积很大，为SO₃的凝结和吸附提供了良好的条件，这样就减少了对管壁的腐蚀。另外灰中的碱性氧化物也会和SO₃反应生成盐，这也会减少对管壁的腐蚀。

3.2 防磨损的技术保障措施

3.2.1 流场模拟

焦作电厂低温省煤器工作环境较为恶劣，为保证换热管的寿命，选用合适的烟气流速，并采用了CFD仿真模拟及物模验证解决了低温省煤器进出气流分布不均的问题，保证了烟气进、出口端和受热面烟气流场均匀。

3.2.2 结构优化

焦作电厂低温省煤器及水媒暖风器均采用具有结构紧凑，换热效率高，防磨损，不易积灰，且阻力小等特点的H型翅片管。换热管采用厚壁无缝钢管，具有较强的耐磨特性。在低温省煤器迎风面前端设置假管，减轻前端换热管排的磨损。并在第一排换热管顺烟气方向加装合金耐磨罩瓦，进一步减轻前端换热管排的磨损，提高设备可靠性。

3.3 防积灰的技术保障措施

焦作电厂项目充分分析了燃煤特性，进行了大量试验从而确认了低温省煤器的合理烟气流速，在换热元件可承受的磨损范围内使烟气流对换热面保持适度的冲刷，实现一定的自清洁作用。同时采用划小区域多点布置蒸汽吹灰器，实现高效辅助清灰。还配置临时水冲洗装置，停机检修时可辅

以水冲洗，实现彻底清洁。

综上分析，锅炉余热利用暖风器对系统影响小，可实现较好的经济及环保效益，在技术保障方面也较为完善，可行性高。

4. 锅炉余热利用暖风器经济性分析

常规暖风器采用四抽蒸汽作为暖风器热源，采用锅炉余热利用暖风器后，可以利用烟气余热代替四抽蒸汽，降低煤耗_[3]。节能量计算主要结果如表 2：

表 2、锅炉余热利用暖风器系统经济性计算表

序号	项目	单位	参数	备注
1	负荷	MW	660	
2	暖风器吸热量	kJ/s	21450	
3	低温省煤器放热量	kJ/s	45310	
4	凝结水系统吸热量	kJ/s	23860	
5	低压缸排汽焓	kJ/kg	2304.2	
6	四抽汽焓	kJ/kg	3003.2	
7	热再热蒸汽焓	kJ/kg	3666.9	
8	新蒸汽焓	kJ/kg	3493.7	
9	新蒸汽流量	t/h	1820.1	
10	再热蒸汽流量	t/h	1545.13	
11	再热蒸汽份额	/	0.8598	
12	排挤四抽蒸汽量	t/h	25.71	
13	排挤四抽蒸汽降低发电煤耗	g/kwh	1.02	
14	凝结水系统降低发电煤耗	g/kwh	0.88	
15	循环泵功率	KW	160	

综上，采用低温省煤器回收烟气余热作为暖风器热源，在机组额定工况下可降低发电煤耗 1.9g/kwh 左右。部分负荷时，依据烟气的实际温度，节能量约在 1~1.8g/kwh。年平均降低发电煤耗约为 1.5g/kwh_[4]。

锅炉余热利用暖风器可使空预器安全稳定运行，减少因空预器腐蚀堵塞引起的机组降负荷、风机电耗增加和检修成本。预计每年减少企业运行费用 200~1000 万元。

低温省煤器烟气侧阻力约为 400pa，虽然增加了局部烟气阻力，但由于烟温降低，烟气体积流

量减小约 14%，可减小除尘器后续烟道等的烟风阻力，烟风系统的整体阻力可降低，进而降低部分引风机电耗。同时由于暖风器的投用，基本可消除空预器腐蚀堵塞问题，保证空预器阻力可在设计值范围内。

锅炉余热利用暖风器水侧总阻力约为 0.15Mpa，采用热水循环泵进行循环水的循环，循环泵功率约为 160kW。

采用烟气余热加热暖风器和凝结水，年平均降低发电煤耗约 1.5g/kWh，以 500 元/t 的标煤价计算，如机组年等效利用小时为 5500 h，每台机组全年的燃料成本可下降约 248 万元。此外因减少空预器腐蚀堵塞引起的机组降负荷和检修维护，年平均减少企业资金损失约 500 万元。整体投资回收年限约为 2.8 年。

另由于进入脱硫塔的烟气温度从 145℃降低至 90℃左右，可节约脱硫水耗约 30~40%^[5]，同时延长脱硫塔内喷嘴等零部件使用寿命。

5. 结束语

通过研究分析，锅炉余热利用暖风器系统是一种既能实现减轻空预器腐蚀、堵塞又能实现低温烟气处理工艺的节能环保方案。该系统在技术上是安全可靠的，对机组各系统都可产生有益的影响，能够实现较为可观的环保节能收益。

通过对华润焦作电厂的分析计算，采用该系统后，年平均降低发电煤耗约 1.5g/kWh，每台机组全年的燃料成本可下降约 248 万元，减少空预器腐蚀堵塞引起的机组降负荷和检修维护，年平均减少企业资金损失约 500 万元，年减少脱硫水耗约 27.5 万吨。

近年来低温省煤器等烟气余热技术得到了大规模的运用，但余热利用暖风器的运用仍较少，鉴于其对燃烧高硫份煤质的机组的空预器的防腐蚀保护具有普遍适用性，可实现较好的环保效益和节能收益，必将有广泛的运用空间。

参考文献

- [1] 周超, 彭晓军, 牛利权 北方电厂应用暖风器控制空预器低温腐蚀的分析与研究, 华北电力技术, (1), 2012, 46-5
- [2] 王传文, 张生凯 降低锅炉排烟热损失的措施 莱钢科技, (1), 2009, 17-18
- [3] 蔡天水, 李春曦 一次风机暖风器利用锅炉排烟余热的经济性分析, 电力科学与工程, 30(4), 2014, 57-60
- [4] 林万超 火电厂热系统节能理论, 陕西, 西安交通大学出版社, 1994
- [5] 许超, 谭厚章, 张方伟, 等 湿法烟气脱硫系统耗水量影响因素研究, 热力发电, 41(4), 2012, 78-80.

蓄热式高温燃烧技术在火化机上的节能应用

孟浩 郭婵
民政部一零一研究所

摘要：为了从根本上解决燃油式火化机的能耗问题，采用理论计算与现场试验相结合，利用蓄热式烟气余热回收技术对火化机结构装置进行改进。该技术不仅取代了二燃室，而且简化了后处理流程。改进结果表明，遗体火化平均耗油量为 7.61kg/具，低于标准限度的 60%；火化平均时间为 32min，低于传统火化机的火化时间 40~50min；通过国家环境分析测试中心的检测，大气污染物的排放浓度与速率均达到国家规定指标。

关键词：蜂窝蓄热体，火化机，环保，节能

一 引言

我国是一个殡葬大国，推行火葬是我国的一项基本国策。据有关资料统计：2011 年、2012 年全国死亡人口总数分别约为 959.22 万人、966 万人，其中火化率占近 50%，即每年火化遗体的数量约 500 万具。传统火化一具遗体的平均耗油量为 10~25kg，全国每年遗体火化耗油量约 4.68~11.7 万吨。当前国内外能源呈紧缺状，因此火化机节能技术的研究已成为殡葬行业一个亟待关注的焦点。

二 研究内容

（一）实验装置

蓄热式燃油火化系统由火化机、喷淋塔、布袋除尘器、烟囱四部分组成，如图 1 所示，不同于传统火化机后处理的串联连接模式，本文实验系统后处理采用并联方式，连接布袋除尘器和喷淋系统。当烟温过高时，关闭布袋除尘器，采用喷淋系统对烟气进行降温/洗涤处理，避免了高温烟气烧毁布袋。这种连接方式适用范围较广，既避免了北方冬季水冷结冰，又防止了南方夏季产生局部高温。

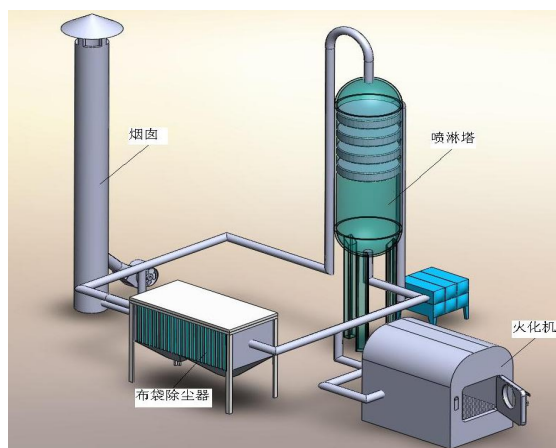


图 1 实验装置总体示意图

蓄热式燃油火化机结构如图 2 所示，炉体中未设二燃室，单独一个主燃室，在主燃室两侧靠下方位置设置气体通道口，每侧布置 6 个，对称布置。和传统燃油式火化机相比，主燃室两侧下方位置设置气体通道口交替作为排烟口或助燃风的进风口，形成下排烟方式。在主燃室炉体两侧保温砖外布置 4 组蜂窝陶瓷蓄热体^[1]，以对角上的两组蓄热体构成一组蓄热体单元，主燃室烟气出口与蓄热体内部的通道都是直接联通的，两组蓄热体单元按周期交替进行排烟蓄热和预热供风^[2]，排烟和供风均由电控气动阀进行程序切换。蓄热式燃油火化机烟气余热回收技术的工作原理如图 3 所示。传统火化机烟气余热大多是通过列管式换热器进行回收，而本蓄热体是通过两组蓄热单元交替切换工作回收烟气中的余热。以蓄热体为媒介物质，当炉膛内点火燃烧时，产生大量高温烟气通过一组

由图 5 可以看出,当炉膛内燃烧 6 分钟后,主燃室温度保持在 1000℃左右,而后逐渐趋近于 800℃。相比传统火化机,蓄热式燃油火化机烟气余热充分利用,使炉膛内温度在短时间内迅速升至 1000℃高温,并且此后燃烧温度趋于平稳,有利于避免炉膛内由于低温助燃空气而产生污染物,更好的控制了主燃室温度与自动燃烧器启停关联控制。

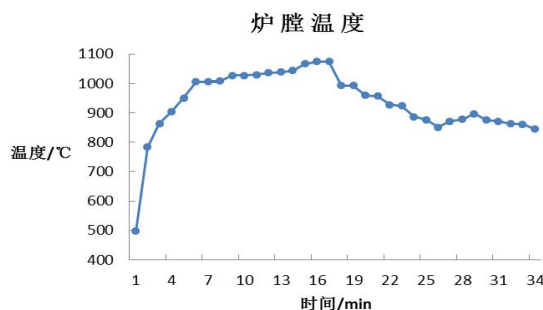


图 5 主燃室温度曲线图

由图 6 可以看出,随着燃烧的不断继续,高温烟气使蓄热砖不断储存热量,排烟温度略有提高,但蓄热式烟气余热回收技术使排烟温度降到了 200℃以下,省去了后处理中的换热系统。

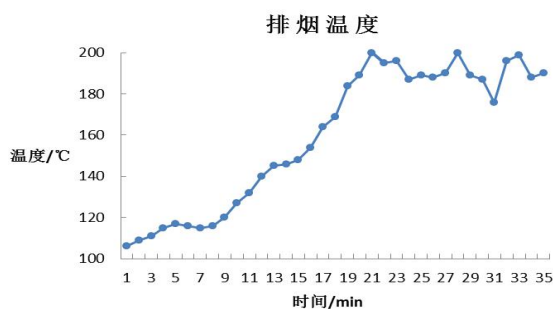


图 6 排烟温度曲线图

由图 7 可以看出,炉膛内燃烧约 5 分钟,经蓄热体的助燃空气上升为近 1000℃,对比图 5 和图 7 可以看出助燃空气温度与炉膛内燃烧温度相近,减少了能耗损失。

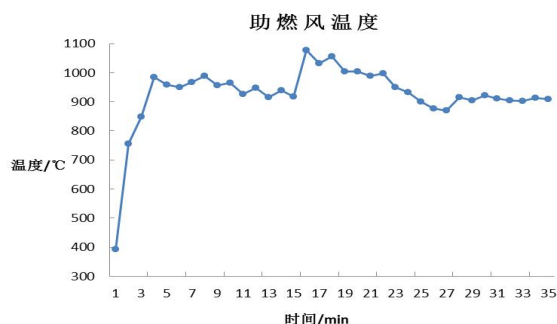


图 7 助燃风温度图

由于遗体火化是一个非稳态、变边界的氧化燃烧过程^[5]。结合图 4~图 7 分析,燃烧过程中燃烧器并非始终喷油。当 1~6 分钟时,打开喷油枪,引燃附在遗体上的纸棺以及遗体皮肤毛发,这些易燃物质瞬间引燃使炉膛升至高温。此刻关闭油枪,炉膛内的高温烟气维持遗体继续燃烧,观察电控屏幕的温度显示,当燃烧 17 分钟左右时,遗体内所含水分开始大量蒸发,炉内温度有所下降,此时打开油枪助燃,直至殆尽。未完全燃烧的污染物随烟气流经多层蓄热砖时,可继续反应,降低了污染物的排出。

本实验装置在现场检测时,先后火化了 4 具遗体(第一具遗体为当天首具),4 具遗体的耗油

量分别为 18kg、7.656kg、7.851kg、7.323kg，火化平均耗油量为 7.61kg/具。火化时间分别为 46min、37min、29min、30min，火化平均时间为 32min。每具遗体的烟气排放指标全部达标（详见附录 1），在排放浓度方面，主要污染物二氧化硫、硫化氢、氨气、氯化氢、汞等全部满足国家一级标准，氮氧化物满足国家二级标准，一氧化碳满足国家三级标准。从烟气指标上，可以看出本项目的炉体燃烧和烟气后处理技术达到了国内先进水平。

三 结论

（一）在燃油式火化机采用蜂窝蓄热式烟气余热回收技术，免去了二燃室，简化了后处理流程，取得了显著的节能减排的实际效果。

（二）结构改进后的燃油式火化机遗体火化平均耗油量为 7.61kg/具，低于标准要求的 60%；火化平均时间为 32min，低于传统火化机的火化时间 40~50min。

（三）通过国家环境分析测试中心的检测，大气污染物排放浓度与速率均达到国家规定指标。

参考文献：

- [1]贾翠,谢志鹏,孙加林,杨东亮,李世良.蜂窝陶瓷蓄热体的研究现状[J].耐火材料,2009:64-68.
- [2]梁春魁,李义科,任雁秋,张胤.蓄热式高温燃烧技术在工业炉领域的应用[J].包头钢铁学院学报,2002,21(3):208-215.
- [3]刘夏丹,于宏,周琦,李赐亮.陶瓷蜂窝体的结构特性及其蓄热燃烧系统的应用[J].冶金能源,1997 18(4):28-31.
- [4]蒋绍坚,曹小玲,汪洋洋,熊家政,李勇,鲁志昂.蜂窝陶瓷蓄热体传热数学模型及传热系数求解[J].工业炉,2001,23(3):50-53.
- [5]尹荔堃,熊程程,邢啸林,鲁琦,陈曦,李大涛等.遗体火化二噁英类污染物减排技术研究[M].中国环境科学学会学术年会论文集,2012,2899-2903.

以 EMC 模式和技术创新推动中国余热发电产业持续健康发展

史庆玺

前言

伴随着可持续发展、循环经济、节能减排以至低碳经济等一个个观念的提出，我国的余热发电行业经历了从无到有、从小到大的发展历程。尤其在“十一五”期间，余热利用、余热发电更是得到国家政策的大力扶持，受到高耗能行业的大力推崇，也带动了余热发电从业机构的积极参与。无论在技术研发、资金投入、项目建设等各方面，均呈现出飞速发展的态势。毋庸置疑，经过众多余热发电从业人员多年的研究和实践，余热发电技术已从初期的探索、研发，发展到推广应用的阶段，覆盖的领域也已拓展到水泥、钢铁、玻璃、有色、化工等多个行业，为我国的节能减排做出了巨大贡献。

面对令人目眩的发展势头，余热发电产业如何才能健康持续地发展，已经成为摆在所有关心余热发电行业的人们面前的重大课题。

要想准确解答这一问题，需要首先了解余热发电产业的特征。

1. 余热发电产业主要特征及发展要求

1) 产业规模大

近些年来，随着人们对余热资源的重视，各高耗能行业及余热发电行业分别从不同角度对已开发的、部分行业的余热发电市场规模进行了一些分析、统计和预测工作。

表 1 已开发的主要行业余热发电规模预测

行业		产能/生产线	余热发电潜力
水泥		截止 2009 年底，全国共有新型干法水泥生产线共 1086 条左右， 预计 2010 年投产的熟料生产线为 189 条左右，	预计新增装机容量 4500MW
玻璃		截至 2010 年 6 月中国大陆有浮法玻璃生产线 216 条，已建和在建的余热发电项目达到近 30 多个，装机从 15MW 到 4.5MW 不等	预计新增装机容量 300MW
钢铁	干熄焦	2010~2013 年建设干熄焦装置 75 套（含在建），总焦炉约 404 座。预期大中型钢铁企业干熄焦率达 90%	2010~2013 年预计 新增装机容量 1200MW。
	烧结	2010~2012 年计划实施烧结余热发电技术的烧结机 82 台预期在钢铁行业推广比例由 4%提高到 20%。300~400m ² 烧结机约 300 台。	2010~2012 年预计 新增装机容量 400MW。 总的市场装机容量 2600MW
	高炉压差发电（干式 TRT）	重点大中型钢铁企业 1000m ³ 以上高炉干式 TRT 配置率由 58%提高到 100%。 我国现有中型高炉 200 多座，在中型高炉上推广干式 TRT 技术，每年可发电约 40 亿 kWh，相当于节省了一座 60 万 kW 装机容量的发电厂	新增装机容量 900MW 预计装机容量 600MW

行业		产能/生产线	余热发电潜力
	转炉、加热炉	2009 年中国产钢 5.68 亿吨, 499 座 (<120t)、52 座 (>120t)	预计装机容量 1200MW
化工	硫酸	2009 全年硫磺制酸产量达到 27958kt, 硫铁矿制酸全年产量为 13846kt, 冶炼烟气制酸产量达到 17785kt	预计装机容量 1000MW 预计装机容量 500MW 预计装机容量 700MW
	合成氨	2009 年, 全国分别累计完成合成氨、尿素产量 5135.5 万吨和 2932.4 万吨	预计装机容量 100MW
	纯碱、烧碱	2009 年我国烧碱产量为 1891 万 t	预计装机容量 500MW
	独立焦化厂 焦化炉干熄焦	全国焦化企业数量在 1000 家左右, 目前干熄焦锅炉配置比例约 20%。2010 2013 年焦化行业干熄焦率 40%以上	预计总的市场装机容量 1000MW
有色		2009 年中国精炼铜产量 411 万吨, 2009 年我国镍产量为 216,363 吨	预计新增装机容量 1200MW

上表预测数据未考虑伴生可燃性气体发电及未被开发的余热资源的发电潜力

按现有存量计算, 对目前已开发的、部分行业、领域的发电潜力的统计, 余热发电产业的新增发电装机容量可达 16000MW 以上。除此之外, 还有更多的、未被开发的余热发电潜力。根据我国主要高耗能企业年能源消耗量及节能潜力计算, 中国余热发电市场规模在 50000MW 以上。

2) 涉及行业、领域广

首先, 余热资源来源广泛, 可回收利用的工业余能包括余热、余压及伴生可燃性气体, 这些工业余能资源来自不同的工业领域, 包括钢铁、有色、水泥、玻璃、石化、化工、轻工、煤炭等, 同时, 在每个行业又涉及多个领域或工艺环节, 比如在钢铁行业, 包括焦炉煤气、高炉煤气、高炉炉顶压差、转炉煤气、转炉饱和蒸汽、烧结烟气、烧结冷却余热、轧钢余热等。余能种类包括中温、低温的热能、压力能和化学能等。

其次, 余热发电还涉及到与传统热力发电相关的行业、领域, 包括装备制造行业、电站运行管理行业及发电技术领域等。

3) 余热资源特性复杂

余热发电的热源来自于各高耗能工业企业生产过程中产生的废气、废渣等, 其种类繁多, 特性复杂。在热源品位上有高温余热、中低温余热和低温余热, 废气成分多种多样, 有成分稳定的热空气, 也有具有较强腐蚀性甚至有毒成分的废气, 其所含灰尘特性复杂, 有的具有磨蚀性、粘附性, 而且其腐蚀性、粘附性等又会随着废气温度的变化而变化, 有的废气具有连续性, 有的具有间歇性等。

由于这些余热资源均为主工艺生产过程中的废气, 在主工艺生产中一般是不予管理和控制的, 因而经常会表现出较大的波动性。这些复杂的特性给余热利用、余热发电到来了许多必须要解决的技术问题。

4) 余热发电技术专业性强

显然, 余热发电技术完全不同于各高耗能工业技术, 同时也与传统的热力发电技术有一定差别。这种差别主要是由于余热热源的复杂性、波动性和不可控性引起的。余热发电技术是以热力发电技术为核心的、与各高耗能行业主工艺技术密切相关的综合性技术。

与传统的热力发电技术相比, 余热发电的技术特点及难点主要体现在两个方面

➤ 热源方面:

- 与主工艺生产密切相关, 需对主生产工艺及工艺参数非常了解;
- 余热参数不可控, 准确性难以把握, 余热品位低, 成份复杂

➤ 发电系统方面

- 热源参数和热力系统参数都是非标的, 在余热发电技术研发和项目设计时, 不仅要关注余

热利用率，更应关注热——电转换效率；

- 余热发电系统将主要在非设计工况下运行。

5) 余热电站需要长期专业的运行管理

余热电站设计寿命一般为 30 年，或者至少与主工艺生产系统具有相同的寿命。同时，由于余热发电具有较强的专业技术特性，运行管理好一个余热电站也必须具备相应的技术能力。

总体来讲，余热发电产业的主要特征可归纳为：总体规模大、余热资源分散、单个电站容量小、专业技术性强。

工业余能是宝贵的资源，余热发电应重视对余热资源的高效利用，倡导科学用能，避免二次浪费，走可持续发展之路。

2. 以 EMC 模式助推余热发电产业健康持续发展

对于绝大多数传统工业行业中的高耗能企业来讲，余热发电是一个全新的事物，具有较强的专业技术特性，无论是项目投资、建设还是运行管理均需要有相应的技术支撑。余热发电是一个技术密集型和资金密集型产业。投资建设一个余热发电项目必须解决以下三个问题

1) 资金问题

以建设一个装机 9 MW 的余热电站项目为例，包括工程直接投资、接入系统、生产准备等在内的工程全部投资一般不少于 5000 万元。按现有余热资源存量，如果将这些余热资源全部回收发电，所需工程建设资金不少于 3000 亿元。尤其对于大多数中小企业而言，面临着主业发展资金紧张和融资渠道有限的双重压力，如何解决发展余热发电这个副业的资金问题，是摆在余热发电项目建设企业面前的首要问题。

2) 技术问题

正如前文所述，余热发电是一项与传统工业完全不同的生产工艺，其技术原理、工艺流程、主机装备及运行管理等均具有较强的专业技术特性，也是绝大多数传统工业企业所不熟悉的。这就必然带来项目投资决策、项目建设和运行管理等方面专业技术能力不足的问题。导致的结果是项目建成后的实际运行指标与设计指标有不小的差距，实际投资回报率远不是投资测算那样乐观。这一问题已带有一定的行业普遍性。

3) 长期运行管理问题

余热电站能否长期安全稳定高效运行是每个建设余热发电项目的企业所关心的根本问题。虽然余热电站的生产工艺与传统热力电站基本相同，但由于余热热源与传统化石燃料能源有很大不同，如何做好余热资源管理、如何根据热源的变化科学地调整电站运行参数等，将直接影响余热电站能否实现高效运行，对从事传统发电行业的人员来讲这这也是一个全新课题，因为它与发电从业人员所不熟悉的高耗能企业的主工艺生产密切相关。同时，对高耗能企业来讲，余热发电是全新的生产工艺，其运行、维修均需要专业技术、技能和设备，需要满足电力行业的众多标准、规范，实现专业化运行管理，对绝大多数中小企业而言是一个难以解决的问题。目前，在我国一些特大型企业集团，由于其余热发电可以形成足够的规模，因而可以实现余热电站的规模化、专业化运行管理，电站的效益也有相应的保证，而对众多中小企业而言，专业化、规模化运营是难以实现的，必将影响余热电站的收益。也必将成为影响余热发电产业长期健康发展的制约因素。

采用国际上先进的合同能源管理（EMC）模式是解决上述问题的有效方法。

4) 天壕公司 EMC 模式的成功实践

天壕节能科技股份有限公司率先在余热发电行业采用 EMC 模式，公司自 2007 年 7 月成立以来，已签约 EMC 模式的余热发电项目合同 28 个，总装机容量达到 240MW。其中已投产项目 9 个，在建项目 13 个，正在进行规划设计的项目 6 个。涉及行业、领域包括水泥、玻璃、钢铁、冶金等。已完成投资额约 13 亿元。是目前国内最大的采用 EMC 模式的余热发电连锁运营商。

在这一模式中，天壕公司负责余热发电项目的投资、设计、建设、运行管理及项目各项手续的办理等工作，合作企业提供建设场地和余热资源，所发电力由合作企业使用，项目收益由双方长期共享。对合作企业来讲，无需投资，不需要承担任何风险，不需要考虑电站的运行管理等问题，余热资源得以开发利用，既实现了节能减排，又获得了相应的经济回报。天壕公司通过专业化、规模化投资、建设和运营余热电站，使余热资源得到更高效的利用，同样也获得了相应的投资回报。

为推广 EMC 模式在余热发电行业的更广泛应用，天壕公司已建成了投资管理中心、技术研发中心、系统集成设计中心、关键装备研发制造基地、项目建设基地、电站维修基地和电站运行管理中

心,实现了整个产业链的完整配套。具备了专业化、规模化投资、建设、运营余热电站的能力。

合同能源管理(EMC)是国际上一种先进的能源管理模式,其核心是节能服务公司通过先进的节能技术为客户实现节能目标,并通过节约的能源获得投资收益。在一些发达国家,超过30%的节能项目都是通过EMC模式建造与营运的,而目前国内,这种先进与专业的管理模式才刚刚起步,国家和地方政府对EMC模式高度重视,出台了多项优惠政策予以扶植。特别是,2010年4月2日,国务院办公厅转发国家发展改革委、财政部、人民银行、税务总局《关于加快推行合同能源管理促进节能服务产业发展的意见》中强调,加快推行合同能源管理,积极发展节能服务产业,是利用市场机制促进节能减排、减缓温室气体排放的有力措施,是培育战略性新兴产业、形成新的经济增长点的迫切要求,是建设资源节约型和环境友好型社会的客观需求。在相关政策方面将予以大力扶持,在发展目标方面,“到2012年,扶持培育一批专业化节能服务公司,发展壮大一批综合性大型节能服务公司”等。该意见的出台将加快推动合同能源管理业务的持续健康发展。

EMC模式也非常适合余热发电产业,它不仅解决了节能资金投入问题,更能将广泛分布于为数众多的高耗能企业的余热资源加以集中回收利用,将分散的、单个项目规模很小的余热电站进行集中管理,实现对余热资源的专业化、规模化和高效化的开发和利用,实现国家、能耗企业和节能服务公司共赢的局面。促进我国余热发电产业持续健康发展。

3. 以技术创新为余热发电产业发展提供支撑

作为一个新兴产业,持续的技术创新是不可或缺的重要支撑。

余热发电的出现在我国已有很长的历史了,至少可以追溯到上世纪三十年代。国家在“八五”期间还专门组织建材行业和发电设备制造行业联合进行余热发电技术攻关。但余热发电技术得到大规模的推广应用却始于“十五”末期,并在整个“十一五”期间获得了飞速发展。这与国家相关政策的引导有关,也与余热发电技术的逐步成熟密切相关。

经过国内众多余热发电技术研发机构的持续努力,我国的余热发电技术已经具备了工业化推广应用的条件,在水泥、钢铁、玻璃等行业也陆续建成投运了一大批余热电站,为节能减排、提高能源利用率做出了重要贡献。但从促进余热发电产业持续健康发展的角度看,余热发电技术仍有很多亟待提升的空间。主要表现在:

1) 余热发电技术应用领域还需进一步拓宽

由于不同行业、领域的余热资源特性有很大不同,主生产工艺对余热发电系统的要求也不尽相同,这就要求针对不同的行业、领域,应有不同的余热发电技术解决方案。虽然余热发电已在水泥、钢铁、玻璃、化工等行业有了很多的应用,但仍有很多行业、领域的余热资源没有被开发。同时,目前已开发、应用的多是一些品味较高、成分相对简单、稳定性较好、易于回收发电的余热资源,还有很多技术要求较高或投资收益不是很好的余热资源没有被开发利用。

2) 余热发电技术水平还需进一步提高

毫无疑问,我国已建成投运的一大批余热电站绝大多数都实现了连续稳定发电,有的余热电站还实现了很高的余热发电指标。但在余热发电效率方面,无论从设计层面看,还是从设计指标与实际运行指标的对比看,都有较大提升空间。主要表现在:

➤ 如何进一步减少能量转换过程中作功能力的损失

余热发电是一个热——功转换过程,这一过程中将会经历余热资源分类选取、余热锅炉中的热——热转换、汽轮机中的热——功转换三个能量组合、转换过程,也是作功能力损失较大的三个环节,如何进一步减少这些环节上的作功能力损失还应进行深入的研究。

➤ 如何提高系统及主要装备的变工况性能

众所周知,余热废气参数是难以把握准确的,同时,在主工艺生产过程中,由于受原料、燃料、产品品种、操作习惯等诸多因素的影响,余热废气参数也经常会发生较大波动。这就导致余热电站几乎不可能在设计工况下运行,或者说余热电站几乎始终处于非设计工况下运行。这就要求余热电站的系统技术和主机装备必须要有很好的变工况性能,尤其是在运行工况偏离设计工况时,效率不应有较大幅度的降低。目前国内在这方面的研究还不够重视。

➤ 如何进一步提高主机装备的效率

影响余热发电效率的主机装备主要是余热锅炉和汽轮机。对余热锅炉而言,应针对不同的废气参数、成分以及含灰特性等,开发出相应的余热锅炉。目前我国有些企业已在这方面取得了很好的成绩,但长期运行的效率情况仍有待观察。

在提高余热发电汽轮机的效率方面所做工作还较少。由于余热资源品味、数量千差万别，导致进入汽轮机的蒸汽参数各不相同，更与基于火力发电设计的标准参数的汽轮机的进汽参数大不相同，尽管发电功率可能一样或接近，但由于进汽参数不同而导致汽轮机的内效率（通流效率）降低。对汽轮机厂来讲，目前只能根据具体项目的蒸汽参数对标准系列的汽轮机通流部分进行些许调整，还难以提供针对余热发电的标准化、系列化、高效率的汽轮机装备。

➤ 如何进一步提高运行管理水平

总体来讲，和传统火力发电站的运行管理水平相比，我国余热电站的运行管理水平是有很大的差距的。这一方面是因为余热电站多数是由非发电行业的工业企业在运行管理，而这些企业对发电技术并不十分了解，另一方面，单个余热电站容量小、又分属不同的利益主体，难以在运行人员的技术水平、管理水平和先进的运行管理工具等方面进行有效投入。更重要的是，余热电站的热源是受主工艺生产影响的，余热电站是难以控制的，在这种情况下，余热电站如何科学的管理热源、如何根据热源的变化科学地调整系统运行参数，是余热电站所面临的全新课题，也是影响余热电站运行效率的重要因素。

3) 天壕公司的技术创新工作

余热发电行业的持续健康发展离不开持续的技术创新。余热发电行业的发展一定程度上反映着、也依靠着余热发电技术的发展。天壕公司有幸和国内众多余热发电从业机构一起，经历了余热发电行业由小到大的过程，并取得了一些成绩。

天壕公司技术团队核心成员主要来自发电行业，并均有丰富的发电行业技术工作经验，也是我国较早一批从事余热发电行业技术研发工作的人员。目前，已发展到拥有二十多人的专业余热发电技术研发团队，研究领域横跨水泥、玻璃、钢铁、化工、铁合金等多个行业，是目前国内跨行业研发能力较强的技术团队。三年来，完成了多项技术研发成果，形成了多项专利技术和专有技术，大部分技术成果处于国内领先水平，多项技术属国内首创。主要研发成果包括：

2004~2005年，在天壕公司成立前，公司核心技术人员参与开发了国内第一个采用闪蒸系统技术、采用国产装备、应用于2500t/d+5000t/d大型新型干法水泥熟料生产线、装机容量达13.2MW的水泥窑纯低温余热发电系统技术，并成功建成发电；

2006~2007年，成功开发出国内乃至国际上第一套大容量玻璃熔窑余热发电成套系统技术，包括：为确保玻璃熔窑正常生产而开发的烟风系统技术、为适应玻璃熔窑余热资源特点并具有先进热电转换效率的热力系统技术——单压低参数回热余热发电系统，应用此项技术，配合公司研发的闪蒸除氧专利技术，与采用传统除氧方式相比，可使余热发电效率提高5%以上（9MW及以上规模提高5%以上，3MW规模可提高10%以上），国内首套适合玻璃熔窑废气特点的玻璃熔窑余热锅炉、适合玻璃熔窑余热锅炉清灰要求并具有很好效果的玻璃熔窑余热锅炉组合式清灰技术等玻璃熔窑余热发电的关键技术和装备，形成了多项专利技术和专有技术，并均已获得成功应用；

2008年，开发出钢铁行业转炉余热饱和蒸汽发电系统成套技术，其中的关键技术——蒸汽储存及调节系统技术已获得实用新型专利；

2008年，开发出钢铁行业烧结余热发电成套系统技术；

2009年，成功开发出化工行业黄磷余热发电成套系统技术，此项技术为国内首创；

2010年，开发出铁合金、镍铁合金隧道窑等余热发电成套系统技术

2010年，开发出全氧燃烧玻璃熔窑余热发电成套系统技术

经过多年的开发、积累，形成了“工业废气余热资源分析计算系统”和“余热发电参数优化设计系统”等多个先进、实用的余热发电研发、设计软件。

为加大技术研发力度，天壕公司成立了天壕低碳技术研究院，致力于工业余热（余热、余压、伴生可燃性气体）发电技术的创新、研发工作，力争将余热发电技术向更多的行业、更广阔的领域推广，将我国余热发电的技术水平进一步提高。

天壕低碳技术研究院近期的主要研发方向包括：

➤ 横向：在已有水泥、玻璃、烧结、转炉余热、磷化工、镍铁合金等行业余热发电技术的基础上，进一步向有色、化工、石化等行业拓展；

➤ 纵向：以余热发电6大关键技术（1）主工艺及余热资源分析、处理技术，2）热源选取及烟风系统技术，3）热力系统技术，4）关键装备设计制造技术，5）变工况设计技术，6）运行管理技术）为重点，逐步提高余热发电综合技术经济指标和技术水平，实现对余热资源的高效利用。

➤ 行业方面：将联合余热发电行业和各高耗能行业的力量，开展中国余热资源普查、分析工作，并对余热资源从余热利用的角度进行科学分类，用以指导余热发电行业规划、技术研发、装备

研发工作。推动余热发电行业相关技术标准的建立，促进余热发电关键设备的标准化、系列化工作。

4. 结束语

余热发电是实现节能减排、发展低碳经济的重要手段。

一直以来，余热发电都是被看做高耗能企业的副产品或一种节能手段，分属于不同的高耗能行业，这种分散的状态制约着余热发电产业的发展。

正如前文所述，余热发电具有较强的专业技术特性和足够大的产业规模，因此，余热发电已经具备了成为一个独立行业的内在条件，应该提升到行业的高度来看待，并从行业的高度进行规划和规范。特别是余热发电进入高速发展阶段的今天，这种行业规划、行业规范、行业自律就显得非常重要了。

天壕公司愿与各高耗能行业、企业、余热发电从业机构一道，站在余热发电行业的高度，通过持续的技术创新，推动我国余热发电行业的技术进步。以采用 EMC 模式为主、提供“系统集成设计和关键装备”等工程建设服务为辅的方式，共同推动我国余热发电产业的持续健康发展。

有机朗肯循环发电技术应用研究现状

谢飞博, 朱彤

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 有机朗肯循环发电技术被认为是目前最具发展潜力的中低温热能资源发电技术之一, 也是目前很多研究机构和学者研究的热点。广大的研究者在探索有机朗肯循环发电技术的应用领域方面做了大量的研究工作。本文就有朗肯循环发电技术的发展趋势和应用领域等方面做了总结和归纳, 为今后该技术的进一步发展提供借鉴。另外, 本文还对本课题组针对有机朗肯循环发电技术的研究工作作了介绍。

关键词: 低温热能; 有机朗肯循环; 热功转换; 应用领域

Research status on Organic Rankine Cycle

ZHU Tong

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Organic Rankine Cycle is regarded as

Key words: low grade thermal energy; Organic Rankine Cycle;

在可再生能源领域, 太阳能($<120^{\circ}\text{C}$)、地热能($60\sim 150^{\circ}\text{C}$)、生物质能等热能资源的温度都比较低, 需要有效手段合理转换利用。另外, 大量的工业余热利用和环境危机也对中低温热能的品位提升技术提出了新的要求。目前, 有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)发电技术被认为是最有发展潜力的一项中低温热能发电技术^[1-3]。ORC是以低沸点有机物(如R123、R245fa、R600a)作为循环工质的朗肯动力循环。ORC的研究最早始于1924年, 有人以二苯醚作为ORC循环工质进行了研究^[4]。七十年代石油危机的爆发, 使得人们意识到了能源的重要性, 由于ORC在利用低品位热能方面的优势, 再次获得人们的重视, 从理论^[5,6]和实验^[7]两方面进行了研究。

截止目前, 虽然国内外研究ORC的机构和学者在探索新的应用领域做了很多工作, 也积累了很多经验, 但是ORC发电技术, 尤其是中小型ORC, 尚未完全成熟, 未得到广泛的应用。因此, 本文针对ORC发电技术的发展趋势和应用领域等方面做了总结和归纳, 为今后该技术的进一步发展和实际应用提供借鉴。

1 有机朗肯循环原理

ORC发电系统流程如图1所示。ORC主要由膨胀机械、蒸发器、冷凝器、工质泵等主要四大部件构成。ORC发电原理如下: 低压低温的液态有机工质经工质泵增压进入蒸发器; 吸收中低温热能后, 工质在蒸发器中蒸发, 变成高温高压的蒸气; 然后高温高压的蒸气进入膨胀机械推动膨胀机械做功, 将热力学能转化为机械能, 膨胀机械输出轴功带动发电机转动, 将机械能转变为电能; 膨胀机械出口的低压气态工质进入冷凝器, 向低温热源放热, 冷凝, 又变成低压低温的液态, 如此往复循环。

自从上世纪七十年代, 第一座商业ORC电站投入运营开始, 尤其是进入2000年以后, ORC技术从装机容量和发电站数量来看发展呈现指数增长的态势^[3]。从上个世纪八十年代开始, 国外就有公司开始致力于ORC发电技术的商业应用研究, 能够提供满足客户需求的全套应用方案。目前, 有越来越多的公司致力于ORC发电技术的研发, 见表1。其中就装机容量和电站数量而言, 美国的ORMAT, 意大利的Turboden, 德国的Maxxtec三个公司占据绝对的优势。其中ORMAT公司在MW级大型地热电站的方面的技术比较领先, 装机份额占大多数^[3]。另外, 从表1还可以看出, 只有极个别公司掌握了大型ORC发电技术, 剩下的很多公司都集中在几十到几百千瓦的规模。

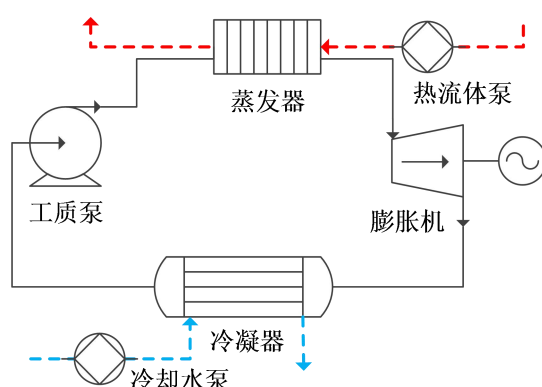


图 1 ORC 发电系统流程示意图

表 1 ORC 主要制造商及其技术特点

厂家	应用领域	功率范围 (kW)	热源温 度 (°C)	技术
ORMAT, 美国	地热, 工业余热, 太阳能	200-70000	150-300	工质: n-pentane 或其他, 两级轴透平, 同步发电机
Turboden, 意大利	生物质-CHP, 电池, 地热	200-2000	100-300	工质: OMTS, Solkatherm, 两级轴透平
Adoratec/Maxxtec, 德国	生物质-CHP	315-1600	300	工质: OMTS
Opcon, 瑞典	工业余热	350-800	<120	工质: 氨, 林氏透平
GMK, 德国	工业余热, 地热	50-5000	120-350	3000 转多级轴透平 (KKK)
Bosch KWK, 德国	工业余热	65-325	120-150	工质: R245fa
Turboden PureCycle, 美国	工业余热, 地热	280	91-149	径流透平, 工质: R245fa
GE CleanCycle	工业余热	125	>121	单级径流透平, 3000 转, 工质: R245fa
Cryostar, 法国	工业余热, 地热	n/a	100-400	径流透平, 工质: R245fa, R134a
Tri-o-gen, 荷兰	工业余热	160	>350	径向透平膨胀机, 工质: Toluene
Electratherm, 美国	工业余热, 太阳能	50	>93	双螺杆膨胀机, 工质: R245fa

在国内, ORC 发电技术的应用研究起步较晚, 目前虽然研究机构和学者数量也是日益增加, 但是对低温热能资源的商业应用方面还非常少。近年来, 西安交大、天津大学、华北电力大学、同济大学等科研院所在 ORC 系统工质筛选^[7]、性能优化^[8,9]、膨胀机研究^[10]等方面做了部分的理论和实验工作, 并积累了一定的经验。但都还是停留在实验室水平, 离 ORC 发电技术的实际应用有待时日。

2 有机朗肯循环的应用研究

近年来, ORC 针对工业余热和可再生能源的应用研究引起了世界各国的普遍重视。众多科研

单位的学者与工程技术人员针对 ORC 发电技术的应用做了大量的研究，大大拓展了其应用领域。目前，国内外 ORC 发电技术应用领域探索研究主要集中在地热^[1, 2, 11, 12]，工业余热^[1, 2, 13]等领域，见图 2。

地热在地球上蕴含非常丰富，预估高达 $4 \times 10^{13} \text{W}$ ，是目前全世界能源消费总量的三倍^[14]。而用于地热的 ORC 发电技术也已经比较成熟。目前全世界有 504 座 ORC 发电系统应用于地热，分布在 27 个国家，总装机容量约为 10 GW^[11, 15]。

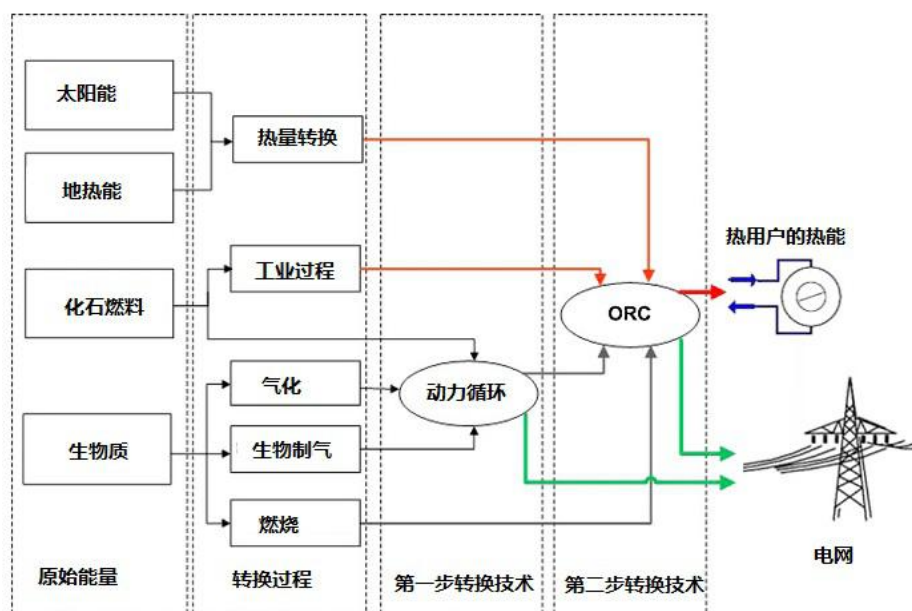


图 2 ORC 发电技术的应用领域

地热资源的温度范围非常大，从几十度到超过 300°C 。根据研究结果，地热高于 100°C 以上才有经济效益。对于低于 80°C 的地热而言，由于系统效率非常低，使得地热电站经济效益较低。通常地热发电的热效率在 5-15% 之间^[15]，因此地热 ORC 发电技术还有很大的提升空间。DiPippo^[15] 比较了五个地热电站的性能，这些电站都是利用 ORC 将地热能转换为电能。通过对这些实际的地热电站数据的分析，DiPippo 证明这些低品位热能电站的第一定律效率仅在 8%~12% 之间。

通常地热电站的采用双循环模式。根据当地的地热资源情况，钻采出水井和回灌井，井深从几十米到几千米不等。然后利用水泵将地热水从出水井抽出与 ORC 热交换后，再由回灌井注入地下。在地热电站的投资中，钻井的费用会占非常大的比例，有时会超过 70%^[16]。另外，地热电站中，泵的耗功非常大，通常会占到系统输出功的 30% 以上，甚至会高达 50%^[17]。这主要是由于地热水泵要将热水从地下深处抽出，然后又注入地下，这个环节的耗功非常大。另外，当地热温度较低时，ORC 系统的蒸发温度较低，工质泵的耗功占比也会占较大的比例^[3]。

电站	热源温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热源质量流量	工质	总 / 净 功 (MW)	热 效 率 (%)
Altheim, 德国	106	861/s	-	-/1.0	-
Otake, 日本	130	14.661kg/s	Isobutane	-/1.0	12.9
Nigorikawa, 日本	140	50kg/s	R-114	-/1.0	9.81
Reno, NV, 美国	158	556kg/s	Isobutane	27/21.744	10.2

表 2 国外部分地热型 ORC 发电站

在国内,我国西藏那曲地热电站,采用的 ORC 技术是由以色列 ORMAT 公司提供,于 1993 年建成发电。该系统以异丁烷作为工质,输出功率 1MW^[18]。

工业余热的分布也非常广泛,大量存在于各大钢铁、冶金、石油炼化等企业,然而并未得到充分利用。通常对于 350℃ 以上的余热利用比较多,而且技术也比较成熟,而对于 350℃ 以下的余热,通常采用 ORC 发电技术进行回收。

Legmann 等^[19]和 Baatz 等^[20]介绍了 1999 年德国海德堡水泥公司在所属的 Lengfurt 水泥厂,采用以色列 ORMAT 公司 1500kW ORC 发电系统作为工艺冷却系统,同时进行发电。该 ORC 发电系统回收水泥工业中排放的 300℃ 以下的余热,是世界首座用于水泥厂的 ORC 中低温余热发电站。该 ORC 发电系统每年可减少 CO₂ 排放 7600t,其减排量占到整个工厂 CO₂ 年排放量的 29.1%,输出的电能占到整个水泥厂电能消耗的 12%。

另外 ORC 发电机技术的应用领域已经拓展到太阳能^[21-23]、生物质 CHP^[24,25]、内燃机底层循环^[26-31]、海洋温差能^[32,33]以及海水淡化^[34-36]等。

总之,ORC 发电技术目前在地热、工业余热、生物质 CHP 等领域的应用现状,表明中低温热源品位提升方面 ORC 技术是一项切实可行和具有很大发展潜力的解决方案。ORC 发电系统标准化的模块生产对于降低投资成本以及提高其普及率具有巨大的促进作用。

3 实验研究现状

目前国内外有一些学者采用实验的方法对 ORC 发电技术做了研究。其中采用的工质主要是 R123、R245fa、R134a、R600a 等。膨胀机选用的以涡旋膨胀机为主。发电功率一般在 2kW 以下。对大于 2kW 的研究还比较少。

目前本课题组搭建了以 R123 为工质,采用涡旋膨胀机,设计发电功率为 3kW 的 ORC 发电系统,系统图和实物图分别见图 3 和图 4。实验系统热源采用高温烟气模拟中低温工业余热。目前实验系统连续变工况运行 8 小时以上,在实验工况范围内输出功最高可达到 2.5kW 以上,基本达到设计目标,见图 5。

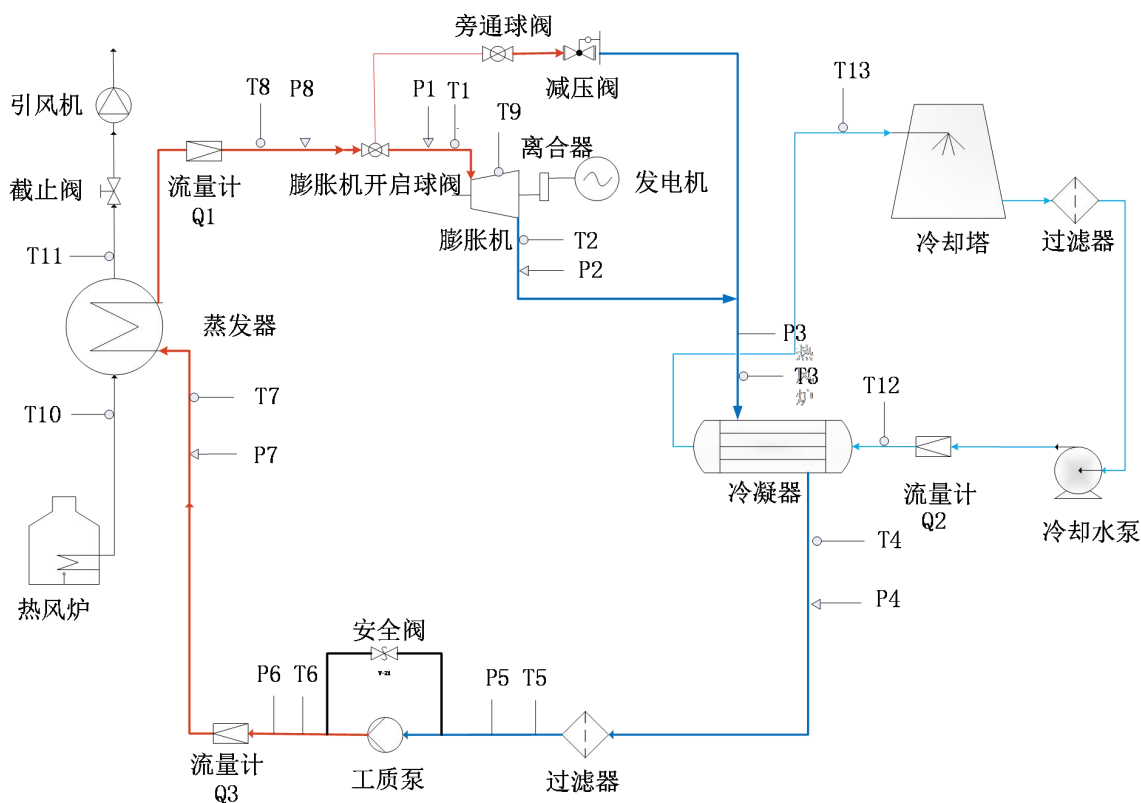


图 3 ORC 发电实验系统流程图

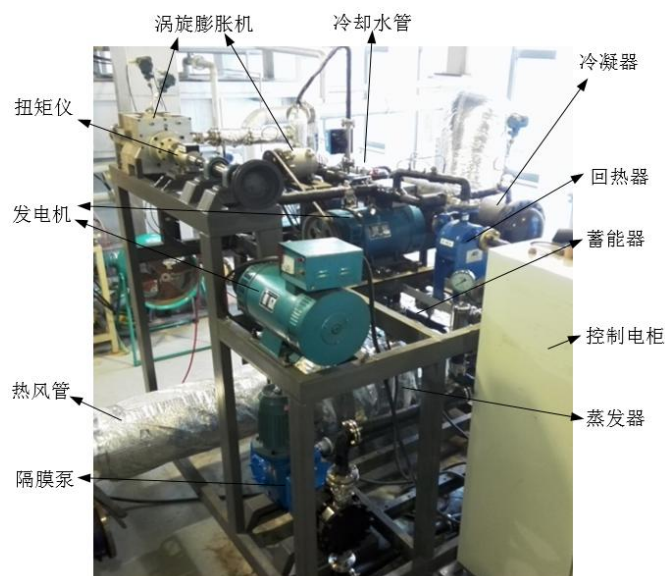


图 4 ORC 实验台实物图

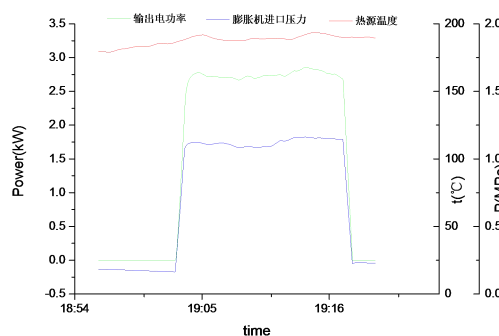


图 5 ORC 发电实验系统的热源温度、输出电功率和膨胀机进口压力随时间变化

同时,课题组以 Matlab 为平台,结合 REFPROP 8.0 工质物性数据库开发了 ORC 发电系统热力性能计算程序^[37]。该程序包括工质筛选系统循环设计系统部件设计文件以及帮助 5 个模块。该程序主要的功能包括工质筛选、循环热力计算以及主要设备选型等。

同时,课题组还在工质筛选^[38]、涡旋膨胀机性能测试和模拟方面^[39]做了研究。

4 结论

本文从 ORC 发电技术的发展现状和应用领域研究等方面做了总结和归纳,为今后的 ORC 发电技术的进一步发展提供参考。目前 ORC 发电应用主要集中在地热、工业余热、生物质 CHP 利用方面,而且近年来更是呈现飞速发展的态势。根据对这些领域运行的系统分析,结果表明该技术对中低温热源的品位提升是一项切实可行和较为成熟的技术。另外 ORC 发电技术已经拓展到了太阳能、发动机底层循环、海洋温差、海水淡化等其他领域。要进一步提高 ORC 发电系统的效率和经济性,需要从工质筛选、膨胀机、换热设备等方面深入研究,实现系统设备的标准化和模块化设计和生产。

参考文献:

- [1] Tchanche BF, et al. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—a review of various applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15:3963 – 79.
- [2] Ve´lez F, et al. A technical, economical and market review of Organic Rankine Cycles for the conversion of low-grade heat for power generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 6:4175 – 89.

- [3] Sylvain Quoilin, et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 22:168 - 186.
- [4] 顾伟, 翁一武, 曹广益, 翁史烈. 低温热能发电的研究现状和发展趋势[J]. 热能动力工程, 2007, 22(2): 115-119.
- [5] Davidson, Thomas A. Design and analysis of a 1 KW Rankine power cycle employing a multi-vane expander for use with a low temperature solar collector[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [6] Probert, S. D. et al. Design optimization of a solar-energy harnessing system for stimulating an irrigation pump[J]. Applied Energy, 1983, 15(4):299-321.
- [7] 黄晓燕, 吴家正, 王海鹰, 朱彤. 中低温工业余热 ORC 回收装置的工质发展与应用[J]. 节能技术, 2012, 30(1):
- [8] Dai YP, Wang JF, Lin G. Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle(ORC) for low grade waste heat recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3) :576-582.
- [9] 顾伟, 低品位热能有机物朗肯动力循环机理研究和实验验证[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [10] 潘利生, 低温发电有机朗肯循环优化及辐流式汽轮机性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [11] DiPippo R. Geothermal power plants: principles, applications case studies and environmental impact [M]. Elsevier: 2008.
- [12] Bertani R. World geothermal power generation in the period 2001 - 2005[J]. Geothermics, 2005, 34:651 - 90.
- [13] Walsh C, Thornley P. Cost effective greenhouse gas reductions in the steel industry from an organic Rankine cycle[J]. Chemical Engineering Transactions, 2011, 25:905 - 10.
- [14] Barbier E. Geothermal energy technology and current status: an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6:3-65.
- [15] R. DiPippo. Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids[J]. Geothermics, 2004, 33(5):565-586.
- [16] Kranz S. Market Survey—Germany, Low-Bin project, 2007. Available from: <<http://www.lowbin.eu/documentation.php>>.
- [17] Frick S. Design Approach for Geothermal Binary Power Plants, Low-Bin project, 2009. Available from: <<http://www.lowbin.eu/documentation.php>>.
- [18] 王恒, 黄文春. 双工质循环机组在地热电厂的运用[J]. 四川电力技术, 1995, 4: 20-24.
- [19] Legmann H. Recovery of industrial heat in the cement industry by means of the ORC process [C]. IEEE Cement Industry Technical Conference (Paper), 2002: 29-35.
- [20] Baatz E., Heidt G. First waste heat power generating plant using the Organic Rankine Cycle Process for utilizing residual clinker cooler exhaust air[J]. ZKG International, 2000, 53(8): 425-436.
- [21] S. Quoilin, et al. Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation[J]. Solar Energy, 2011, 85:955-966.
- [22] Kohlenbach P., et al. Novel parabolic trough collectors driving a small-scale organic rankine cycle system[C]. Proceedings of the Energy Sustainability Conference 2007, 2007: 995-1004.
- [23] Swift A. H. P., Reid R. L., Sewell M. P., Boegli W. J. Operational results for a 3355m² solar pond in El Paso, Texas[C]. Solar Engineering, 1987: 287-293.
- [24] Chinese D., Meneghetti A., Nardin G. Diffused introduction of Organic Rankine Cycle for biomass-based power generation in an industrial district: A systems analysis[J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(11): 1003-1021.
- [25] Obernberger I., Biedermann F., Thonhofer P., Gaia M., Bini R. New small scale

Organic Rankine Cycle (ORC) technology (200 kw electrical) for decentralized biomass power and heat coupling facility[J]. VDI Berichte, 2008, 20(44): 133-149.

[26] M. Bianchi, et al. Bottoming cycles for electric energy generation: Parametric investigation of available and innovative solutions for the exploitation of low and medium temperature heat sources[J]. Applied Energy, 2011, 88: 1500-1509.

[27] Dimitrios T. Hountalas, et al. Improvement of bottoming cycle efficiency and heat rejection for HD truck applications by utilization of EGR and CAC heat[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 53:19-32.

[28] Iacopo Vaja, et al. Internal Combustion Engine (ICE) bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs) [J]. Energy, 2010, 35:1084-1093.

[29] Kalyan K. Srinivasan, et al. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle[J]. Energy, 2010, 35 :2387-2399.

[30] Chacartegui R., Sanchez D., Munoz J. M., Sanchez T. Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants[J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2162-2170.

[31] Invernizzi C., Iora P., Silva P. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 100-110.

[32] Kamogawa H. OTEC research in Japan[J]. Energy, 1980, 5(6): 481-492.

[33] Uehara H. History and the future of OTEC[J]. Renewable Energy, Japan, 2006.

[34] Agustín M. et al. Preliminary design of seawater and brackish water reverse osmosis desalination systems driven by low-temperature solar organic Rankine cycles (ORC) [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 2913-2920.

[35] Agustín M. Delgado-Torres, et al. Double cascade organic Rankine cycle for solar-driven reverse osmosis desalination[J]. Desalination, 2007, 216: 306-313.

[36] Delgado-Torres A. M., Garcia-Rodriguez L. Preliminary assessment of solar Organic Rankine cycles for driving a desalination system[J]. Desalination, 2007, 216(1-3): 252-275.

[37] 张丽娜, 朱彤, 王海鹰, 黄晓艳. ORC 系统热力性能计算程序开发[J]. 热能动力工程, 2014, 29(1):41-45.

[38] 黄晓艳, 吴家正, 王海鹰, 朱彤. 中低温工业余热 ORC 回收装置的工质发展和应用[J]. 节能技术, 2012, 30(1):34-38.

[39] 潘登, 高乃平, 谢飞博, 安巍, 王海鹰, 王海, 朱彤. 有机朗肯循环涡旋膨胀机性能试验研究[J]. 流体机械, 2014, 42(5):10-14.

与空气轮机发电系统相匹配的高温 热管空气预热器

宿新天

(保定市金能换热设备有限公司, 河北省保定市前卫路 398-95 号, 河北 保定 071000)

(联系电话: 0312-5077195, E-mail: bdsuxt@126.com)

摘要: 高温热管换热器是一种新型高效换热器, 已经广泛地应用于航天、石油化工等行业加热和冷却生产工艺和废热回收过程中。空气轮机发电系统要求将空气预热到 700℃ 用来驱动气轮机叶片, 换热器性能要稳定可靠。高温热管换热器是各种换热器优选方案。本文阐述了高温空气预热器设计及结构特点。

关键词: 高温热管; 空气预热器; 发电; 空气轮机

1 前言

目前我国火电占到全国总发电量的 80.76%, 大量煤炭的燃烧不仅产生大量的 CO_2 、 NO_x 等污染物, 而且成为温室效应气体的主要来源。如果发电效率能够提高 1%, 那么全国每年将节电 340 亿千瓦时以上, 节约标准煤 1100 万吨以上, 减少 CO_2 排放达到 2500 万吨以上。电厂所发电量中大约 3~10% 的部分被自身所消耗, 如果能够降低这部分厂用电率, 就相当于提高了供电效率。利用锅炉燃煤释放出来的热量来加热燃气轮机内的空气, 高温高压的空气推动涡轮做功, 乏气作用为二次风的一部分, 这是降低厂用电的一个有效措施^[1]。

对于大型发电机组来说, 降低厂用电的主要方式是利用小汽轮机驱动给水泵或者风机等。机组中增加空气轮机系统, 主汽轮机发电功率不变, 同时锅炉排烟温度不变。空气轮机的输出功全部用来驱动给水泵, 空气轮机的排气替代了一部分锅炉用风, 但总折算还是降低了电耗。该系统与锅炉机组耦合运行时, 在机组运行期间可以不受机组负荷率的影响而实现满负荷运行, 年可增加上网电量为 518.3 万 kWh, 同时节约标煤为 2.85 万 t。

2 高温空气预热器的设计

2.1 高温热管的确定

空气轮机发电系统技术的关键是高温空气换热器的可靠性和寿命, 要求进入高温换热器的烟气温度 850℃, 出口温度 700℃, 质量流量为 41kg/s; 空气出口温度 700℃, 入口温度 500℃, 压力 0.6~0.7MPa。

2.1.1 热管管壳材质的选用

管壳选用 0Cr25Ni20 奥氏体耐热钢, 钢中加入 Ni、Cr、Nb 等元素, 经时效处理后, 钢中可析出 $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$ 类的金属化合物形成第二硬质相。这些第二相很难长大, 在钢中呈弥散分布, 有效地提高了钢的持久强度。0Cr25Ni20 耐热钢为奥氏体型钢, 合金晶粒粗化, 减少了晶界, 在高温下晶界强度低于晶内强度, 合金的断裂常沿晶界发生, 减少晶界就相当于减少了破断的可能性, 从而提高了高温强度。该种耐热钢最高使用温可达到 1200℃, 其韧性、可焊性较好, 连续最高使用温度为 1150℃, 间歇使用最高温度为 1050~1100℃。它与金属钠有良好的相容性, 热管工作时不会发生失效问题。

2.1.2 热管工作介质的选用

工质选择金属钠, 沸点 882℃、凝固点 98℃、临界温度 2327℃、密度 930kg/m³、气化潜热 4222kJ/kg、启动温度约 350℃, 热管的工作温度在 597~1197℃ 范围内。在高温下液态钠热管的壳体几乎不承受内压, 工质回流时只有小质量流率便可传递较高的热量。

本课题选用纯度为 99.7% 的工业钠作用为工质, 因为钠和水易发生激烈反应, 处理钠时要在干燥的环境下进行, 要绝对避免与水接触。这里采用一种简捷高效的碱金属充装工艺“碱金属非蒸馏充装方法,” 工艺过程如下: (1) 钠在惰性气体保护下在透明室中操作; (2) 在透明室中采用天平对钠量进行计量; (3) 对钠工质进行过滤提纯; (4) 采用封口钳封口, 再精确称量定量; (5)

采用加热带对钠进行熔化控制，并提高热管充钠前的真空度；（6）可一次充装一根或多根热管。高温钠热管的整个制造工艺过程复杂，只有保证准确无误，才能保证热管的可靠性和寿命。

2.2 主要热工计算结果

烟气侧：

质量流量 41kg/s，流速 9.74m/s，翅化比 4.6

翅化效率 0.668，对流和辐射给热系数 128W/（m²·℃）

空气侧：

质量流量 32kg/s，流速 8.02m/s，翅化比 10

翅化效率 0.90，对流给热系数 139W/（m²·℃）

空气预热器总热系数 50W/（m²·℃），

对数平均温差 173.8℃

其它参数见下表

表 1 空气预热器性能参数表

序号	项目	单位	介质名称	设计工况
1	质量流量	t/s	烟气	41
			空气	32
2	进口温度	℃	烟气	850
			空气	500
3	出口温度	℃	烟气	700
			空气	700
4	阻力降	Pa	烟气	258
			空气	347
5	最高壁温	℃		806
6	最低壁温	℃		624
7	回收热量	kW		7800

2.3 主要结构参数

烟气侧：

管径 Φ38mm，壁厚 3.5mm，管长 2600mm，肋片高度 20mm，纵向肋片长度 2570mm，厚度 3mm。

空气侧：

管径 Φ38mm，壁厚 3.5mm，管长 1800mm，翅片高度 20mm，螺距 5 mm，厚度 1.2mm。

管束布置：错排，等边三角形横向节距 92mm，纵向节距 80mm。

高温热管空气预热器结外形图见下图。

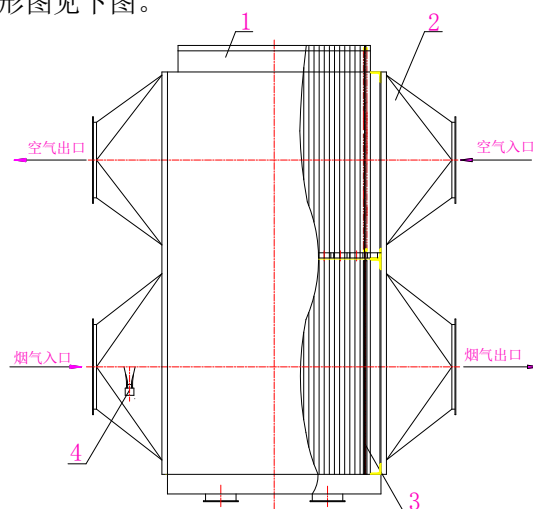


图 1 高温钠热管空气预热器外形图

- 1 换热器壳体和构架
- 2 方园管道
- 3 金属钠热管
- 4 激波发生器（清灰装置）

3.4 清灰措施

由于烟气中含有一定量灰尘，设备长期运行会使烟气侧受热面积灰，从而影响设备的传热性能。该项目采用激波清灰器进行清灰。气源为压缩空气，这种清灰器对于干性积灰具有较好的清灰效果，而且气量消耗少，日常检修量也少。

在含灰量大的烟气换热过程中，遇到最大的挑战是积灰和磨损，该方案中高温热管的加热段烟气侧热管采取高频焊接纵向肋片，厚度为 3mm，以便热管更有能力应对积灰和磨损的应用环境；在冷却段空气侧采取高频焊接螺旋翅片，这样就能充分发挥热管的高效传热特性和延长了它的使用寿命。

通过调节热管冷热段表面扩展受热面的大小来调节管壁温度，使附着在热管外表面的积灰呈干燥疏松状态，清灰容易脱落，换热器的烟气流速设定为 8~10m/s，这样可避免堵灰，并且使磨损大为降低。

激波清灰器的工作原理是将一定强度的激波送入运行中的换热器体内可能积灰结渣的空间区域，通过激波能量的作用，使这些区域中的空气分子与粉尘颗粒产生振荡，破坏和阻止粉尘粒子在换热器表面或粒子之间的结合，始终处于悬浮流化状态，以便在烟气和重力作用下将其带走。

3 各种高温气—气式换热器之比较

针对降低燃煤空气轮机发电项目的关键问题是高温空气换热器的性能和寿命，要求空气出口温度 700℃，压力为 0.6~0.7MPa。合适气—气式高温换热器有如下几种：

3.1 列管式换热器

气—气式列管换热器结构复杂，大流量气体流过管内，必须选择大尺寸管径，体积大，所耗钢材量大；增大管内扩展面的措施很难实现，故气体换热系数很低并且阻力较大，消耗动力大，增加了换热器的运行成本。

3.2 管翅式换热器

管翅式换热器用途上，适用于当一端的流路处于高压状态或者换热系数比另一端的流路大得多场合，才适宜使用这类换热器，故在气—液换热中广泛得到应用。本项目为烟气—空气换热就无优势可言。

3.3 板翅式换热器

板翅式换热器用于气—气式换热，虽然表面密度较大，但通常用于低压场所。但在有污垢的场所，没有任何容易的方法清洁这类换热器，该换热器不适用于烟气—空气换热。

3.4 高温钠热管换热器

金属钠作为工作介质，汽化潜热高，热流密度大，故换热效率高。烟气和空气的换热均在热管外表面进行，该换热器的特点如下：

3.4.1 有很高的导热性和传热系数^[2]

把传统空气预热器的交叉流改为纯逆流流动，增大传热温差；其次把烟气的管内流动改为管外流动，使得换热系数得到提高，传热性能优越。

3.4.2 热流体烟气和冷流体空气互不接触

可以很方便地调整冷热侧换热面积比，通过表面翅化扩展换热面积，翅化率可高达 8~10，这就克服了气体换热量小的缺点，所需的传热管数目会大大减少，从而减小了换热器的体积和制造成本；

3.4.3 结构简单 换热效率高

在传递相同热量的条件下，热管换热器的金属耗量少于其它类型的换热器，其体积小，结构紧凑。降低钢材用量。

3.4.4 压力损失小

换热流体通过换热器时的压力损失比其它换热器小，因而动力消耗也就小，减少了运行成本。

3.4.5 使用寿命长

高温热管工作可靠，使用寿命长。连续工作时，寿命在 8~10 年以上^[3]。

3.4.6 无漏风漏灰现象

冷热流体间用隔板隔开，使烟气与空气之间无泄漏，同时每根热管完全独立，即使某根或几根损坏或失效，都不会影响其它热管的工作。

4 结论

利用空气轮机替代部分电厂用电的关键技术是制造出合适的高温换热器，而高温钠热管空气预热器是各种气—气式换热器最优选的一种。热管管材选择 0Cr25Ni20 奥氏体耐热钢对排烟温度在 850℃ 范围具有良好的抗氧化性和抗高温蠕变性；热管工作介质钠的汽化潜热高，工作时管内压却很低，几乎不承受压力。高温钠热管换热器具有换热效率高、寿命长、经济效益显著的特点，在电厂气—气式高温换热领域具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 降低燃煤发电厂专利技术介绍，中国电力企业联合会开发服务中心，2011.09
- [2] 张红，杨峻，庄骏 编著. 热管节能技术，化学工业出版社, 2009.
- [3] 李德估, 郁翔, 王育, 利用热管代替电加热多级煤粉直接点火燃烧器的可行性研究，第八届全国热管会议论文集，2002 作者简介：
宿新天（1943—），男，高级工程师，主要从事热处理工艺设计、热管技术、干燥技术、热工设备的研发和推广应用工作，已发表论文 40 余篇。

真空相变换热技术在高炉冲渣水余热集中供热项目中的应用

师文龙 李雪梅 邯郸市热力公司
李伟 徐国伟 哈尔滨工大金涛科技股份有限公司

摘要:真空相变换热技术是根据水的沸点随压力变化而变化的特性,通过降低环境的压力,使得水在低压环境下转化为蒸汽,来提取工业余热。本文针对真空相变技术在邯郸钢厂高炉冲渣水余热集中供热项目上的应用,对余热资源和水质进行了分析。针对冲渣水这一特殊的水质,易造成析晶结垢的特性,选取直热机进行换热。经实地检测,该设备运行状况良好,换热量、传热温差等各项主要指标均达到设计要求,渣水侧未发现明显析晶、结垢以及腐蚀迹象。

关键词: 真空相变 工业余热 高炉冲渣水余热利用 集中供热

前言:城市集中供热是城市的基础设施之一,也是改善城市人居环境、改善城市大气质量、提高城市现代化水平的重要措施。但目前我国集中供热所用能源仍以煤炭为主,据不完全统计,北方地区冬季供暖能源消耗约折合 1.7 亿吨标煤。我国近年来频繁出现的大面积雾霾天气与供热燃煤不无关系。

我国目前一次能源及各种余热资源利用水平较低,根据有关统计,我国工业能源消费量占总消费量的 70%以上,而能源利用率仅为 30%,而余热资源回收率仅 34.9%,大量余热以各种形式被排放到大气中,仅在 4 个月供暖期内的排放量就折合标煤约 1 亿吨。如果这些低品位工业余热都得到科学有效的开发利用,对我国集中供热能耗模式将起到极大的优化和改善。

邯郸市热力公司作为一家国有大型供热公司,在新能源、新技术领域一直进行积极的探索和尝试,2014 年为进一步提高邯郸市集中供热的技术水平、节约能源、改善大气质量、提高供热品质,结合邯郸工业余热和集中供热管网现状,与邯郸钢铁集团达成余热开发协议,采用该集团的高炉冲渣水作为低位热源,为邯钢周边约 600 万 m^2 既有供热建筑进行热源改造。

2014 年实施一期工程,利用邯钢高炉冲渣水余热实现 100 万 m^2 供热面积的热源及管网改造,其中 4、5 号高炉冲渣水采用了哈尔滨工大金涛科技股份有限公司自主研发的真空相变换热设备——“直热机”作为冲渣水余热的热能采集设备。该设备采用真空相变原理,使水质比较复杂的冲渣水在真空环境下闪蒸,以相对清洁的水蒸气进入常规换热设备进行汽水换热,从而有效的避免了高炉冲渣水在热能采集过程中容易出现的结垢、析晶以及腐蚀现象。为冶金、化工、造纸等行业产生的水质复杂的各类工业废水以及工艺循环水的余热开发提供了一个有效解决途径。

本文重点对邯郸钢厂高炉冲渣水余热集中供热项目的技术方案以及应用情况进行一个简单的论述。

一、余热资源分析

邯钢 4、5 号高炉共用一个渣池,采用底滤法冲渣工艺,补水水源为污水处理厂二级排放水及部分焦化废水。冲渣水原冷却工艺为:4 台额定流量 1120 m^3/h (三用一备)和 3 台额定流量 755 m^3/h (两用一备)的渣水泵将冲渣后的高温冲渣水送至冷却塔,冷却后进入凉水池,由另一套循环泵送至淬渣室再度进行冲渣。上塔水温约 70 $^{\circ}\text{C}$ 左右,下塔水温约为 60 $^{\circ}\text{C}$ 左右。



具体参数如下：

序号	项目	单位	4#高炉	5#高炉
1	高炉炉容	m ³	1000	2000
2	高炉数量	座	1	1
3	利用系数	t/(m ³ ·d)	2.65	2.5
4	出渣次数	次/d	13	15
5	渣铁比	t/t	0.34	0.35
6	产铁量	t/d	2650	5000
7	产渣量	t/d	901	1750
8	冲渣方式	—	底滤法	底滤法
9	冲渣水量	m ³ /h	2300	2600
10	冲渣水池温度	℃	70	70

冷却塔上散掉的热量即是可以回收的热量，则根据上表提供的数据分析，可回收利用的热量分别计算如下：

4#高炉冲渣水余热量：

$Q_{\text{冲渣水 4\#}} = 2300000 \times 4.2 \times 10 / 3600 = 26800 \text{ kW} = 26.8 \text{ MW}$

5#高炉冲渣水余热量：

$Q_{\text{冲渣水 5\#}} = 2600000 \times 4.2 \times 10 / 3600 = 30300 \text{ kW} = 30.3 \text{ MW}$

4、5号高炉冲渣水共计可提取余热量为 57.1MW，为安全起见，渣水余热的提取量按照 50MW 设计。

二、水质分析

由于高炉渣的主要成分为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等物质，1400℃ 左右熔融状态的高炉渣在水淬的过程中其主要成分必然会有部分溶解于水中，而冲渣水属多次重复利用的循环冷却水，其年复一年的冲渣过程，实际上是冲渣水被不断浓缩的过程，高炉渣中可溶于水的物质必然达到了一个饱和状态。热能提取过程实际是对冲渣水的一个强制降温过程，溶解在冲渣水中的高炉渣成分必然会由于渣水温度的降低而出现过饱和，从而析出并附着在换热壁表面，造成换热器传热系数降低，甚至造成堵塞。

根据邯钢提供的水质报告及现场提取水样检验结果显示，此处冲渣水水质比较复杂，主要指标如下：碱度 (CaCO_3)：43mg/L；氯化物：485mg/L；溶解性总固体：3274mg/L；电导率：4040 $\mu\text{S/cm}$ ；

硫酸盐：2064mg/L；另外还含有少量的油、铁和亚硫酸盐；PH 值：8.28。

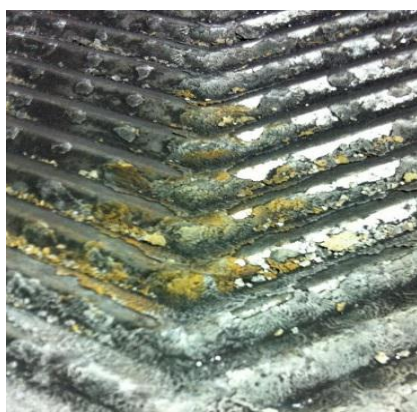
通过上述数据分析，该冲渣水由于氯化物和硫酸盐含量较高，对不锈钢和碳钢等常用金属有较强的腐蚀性，因此在换热设备选择上必须注意防腐问题。

虽然报告中给出的溶解性总固体、电导率等指标已经较高，但我们分析认为该数据明显要低于实际换热工况时的水质指标，因为水样送至检测中心时温度已经降至环境温度，部分溶解于水中的可溶解固体随着水温的降低已经析出，因此检测结果中缺少析出部分的固体含量。即便如此，上述数据仍可断定该水必然存在比较严重的析晶、结垢现象。因此在热能采集设备的选择上必须要考虑防止换热壁面的污染和堵塞问题。

三、项目论证

项目论证过程中，通过水质分析以及其他钢厂类似项目的实地调研，发现以往很多采用板式、壳管式、螺旋板式等常规的换热设备的冲渣水余热利用项目的换热设备都出现了不同程度的污染甚至堵塞现象，另外大多存在比较严重的腐蚀情况。

虽然有些类似项目中也采用了纤维过滤器等前置过滤措施，但由于高炉冲渣水的堵塞并非由易沉固体、悬浮物等可见的固体污染物造成的，而是在热能提取过程中，渣水温度降低导致过饱和，



从而产生析晶、结垢现象造成的，因此常规的物理过滤措施效果不佳。

另外近些年在市场上新出现的污水专用换热器，由于其污水侧通道较宽大，具备较强的抗堵性能，在城市污水等固体杂物含量较高的水质下效果较好，但在高炉冲渣水项目上应用效果不佳，无法彻底避免换热壁面的污染与堵塞问题。或许采用特殊的防污材料或其他能够阻止析晶、结垢现象发生的技术措施可能有效。类似的方法邯郸市热力公司在 2014 年也进行了尝试，但具体效果还有待观察。

为有效应对本项目冲渣水在热能提取过程中可能发生的析晶、结垢现象造成的换热器堵塞和腐蚀等问题，在常规条件下，必须避免废水与换热面直接接触，但传统的换热设备难以实现。



哈工大金涛公司当时提交的采用“真空相变技术”进行热能采集的方案满足了这一要求。利用水在负压环境下沸点降低的特性，人为制造一个负压环境，使冲渣水在负压容器内沸点降低，从而实现无需加热，使部分冲渣水闪蒸、汽化，以清洁的水蒸气携带大量汽化潜热与清水进行换热，从而实现清洁、高效提取冲渣水热能的目的。

依据该方法研制成功的工业废水热能提取设备——“直热机”，无需对废水进行过滤及二次加热，仅需要消耗极小的电能维持一个负压环境，从废水中提取出大量热能。从而彻底解决热能提取过程中换热装置的换热壁面结晶、挂垢、腐蚀等问题。

四、设备选型

通过冲渣水余热资源分析，邯钢 4、5 号高炉冲渣水可利用热量为 57.1MW，为安全起见，渣水余热的提取量按照 50MW 设计。按照热负荷 50W/m² 计算，冬季可为大约 100 万 m² 建筑进行供暖。

充分考虑系统安全及供热调节能力，本项目共计选取 10 台单机换热量为 5MW 的 JTZH-5.0-500-0.1/0.1-01 型直热机，即可单独运行又可并联运行，10 台设备互为备用。

单台直热机运行参数

机组型号		JTZH-5.0-500-0.1/0.1-01	
名义制热量		kW	5000
		kCal/h	4290000
泵组输入功率		kW	37.5
控制系统		微电脑全自动控制, PID 调节	
热源水侧	进出口温度	℃	70℃-52℃
	流量	m ³ / h	240
	接口尺寸	mm	200
循环水侧	进出口温度	℃	65℃-45℃
	流量	m ³ / h	215
	接口尺寸	mm	200
外形尺寸		mm	4700*5300*12500

整个热源站占地面积约 450 平方米，冲渣水设计最大用量 2400m³/h，渣水温降 18℃。制出流量为 215m³/h，进出水温度为 65/45℃ 的采暖水，单台直热机包含一台渣水排水泵 30kW；真空泵 7.5kW；冷凝水排水泵 2kW，单机总输入功率 37.5kW。

冲渣水给水利用邯钢原有冲渣水循环泵，提热后由机组自身配备的排水泵送至邯钢原有的凉水池。系统水循环系统等附属设备属常规配置，这里不再赘述。



五、运行情况分析

该系统设计供热能力 50MW，约可满足 100 万平米建筑采暖需求，由于本项目系该产品首次大规模投入使用，充分考虑供热安全，本采暖季实际并网面积约 65 万 m²，根据需要开机台数一般在 4-6 台。自 2014 年 11 月中旬投入运行以来，截至笔者截稿之日起系统已安全运行 60 余天，供暖效果良好。

经实地检测，该设备的换热量、传热温差等各项主要指标均达到设计要求，渣水侧未发现明显析晶、结垢以及腐蚀迹象。根据目前情况判断该设备一个采暖期内无需清洗维护，该系统完全可以满足 100 万平米的供热需求。

为验证系统运行能耗是否达标，于 2015 年元月 16 日 9:50 分开始，随机进行了一次为期 72 小时的数据统计分析，该系统 72 小时累计输出热量：4843.1GJ；累计耗电量：21768kW.h（包含采暖系统水泵、补水泵及照明等日常用电总量）；平均单位热量能耗为：4.49 kW.h/GJ，优于原设计要求，是非常经济、高效的热能采集设备。

六、总结

本项目热能采集设备一直热机，采用真空相变原理，热能的提取与释放在两个容器内分别进行，冲渣水侧没有换热壁面，溶解于水中的大量无机盐类等易结晶物质无处附着，从而彻底杜绝了传统间壁式换热器在换热过程中换热壁面结晶挂垢问题，同时也便于与冲渣水接触的蒸发器内部进行防腐处理，且不影响传热；同时采用逐级蒸发、分段冷凝的专利结构设计，既保证了大温差提热，又最大限度的缩小了传热温差，从而充分利用了冲渣水较高的热品位。

该技术为我国工业废水余热开发利用提供了一套全新的有效解决方案，该项目的成功运行是邯郸市热力公司勇于创新、积极探索的又一成功案例，为我国供热行业改善能耗模式、提高经济效益开辟了一条新途径，必将起到良好的引领示范作用。

转炉一次烟气的余热回收利用技术研究

魏久鸿 刘晨

(1 辽宁基伊能源科技有限公司 2 斯普瑞喷雾系统(上海)有限公司)

摘要: 本文介绍转炉一次烟气余热回收存在的问题和解决思路、利用途径有关的研究进展。

Possible Solutions of BOF off Gas Heat Recovery

Jiuhong Wei Morris Liu

(Liaojing Jet Engineering Energy Technology Co. Ltd, Spraying Systems (China) Co., Ltd.)

Abstract: Possible problems, solutions and re-uses of BOF off gas heat are presented in this paper.

1、前言

全球转炉钢产量为 60%，中国则超过 90%、年产约 6 亿吨转炉钢。转炉一次烟气余热 $\sim 4\text{--}6\text{kgce/t}$ ，影响吨钢成本 4–6 元。转炉一次烟气长期以来一直采用汽化冷却烟道式余热锅炉回收蒸汽后从 $\sim 1500^\circ\text{C}$ 间接冷却到 $700\text{--}1000^\circ\text{C}$ ，进入一次除尘后的各种湿法、干法、半干法都是采用喷水冷却进行冷却和粗除尘，余热不仅没有得到利用，还要大量消耗能源，特别是湿法除尘循环水处理耗电 $4\text{--}5\text{kwh/t}$ 钢，是一个很大的浪费。本文介绍我们在转炉一次烟气余热回收利用方面的应用结果与解决方案。

2、现有冷却方法

离开汽化冷却尾部烟道的高温烟气目前有湿法、干法、半干法三类冷却方法。最浪费的是湿法，采用喷水冷却，在一文或饱和器中喷水，比如 300 吨转炉冷却喷水量高达 840t/h ，通过喷水使高温烟气温度从 $700\text{--}1000^\circ\text{C}$ 冷却到饱和温度 $\sim 73\text{--}75^\circ\text{C}$ ，喷水则从 $\sim 35^\circ\text{C}$ 升温到 $\sim 60^\circ\text{C}$ ，烟气中的 90% 的粉尘也部分洗涤到排水中，大部分以潜热形式保留在烟气中，排热水上塔冷却、净化后循环使用。废水处理系统投资多、占地多、运行成本高成为湿法必须尽量淘汰的首要因素。

干法利用喷水变成蒸汽的相变潜热进行烟气的第一级冷却，从 $700\text{--}1000^\circ\text{C}$ 冷却到 $250\text{--}300^\circ\text{C}$ ，通过控制出口温度使喷水 100%蒸发实现干除尘，剩余的粉尘通过干式静电除尘器去除，从而实现了 100%干收尘，省去了湿法水处理系统，这是一大进步。干法静电除尘器出口温度 $150\text{--}200^\circ\text{C}$ ，煤气进柜前采用循环水饱和冷却，比如 120 吨转炉煤气冷却器循环水量 $\sim 150\text{t/h}$ ，也得过滤、上塔冷却。

半干法与干法相同也用蒸发冷却，不同的是，半干法采用极限蒸发，也就是通过蒸发冷却到极限饱和温度，并且通过蒸发冷却器设计改进，干除尘比例从干法可达 60–80%，并且大部分石灰等碱性颗粒不进排水，供排水的 PH 值不变，具备了不用传统转炉湿法除尘水处理系统的条件。

现有的冷却工艺共同的问题是都没有实现余热回收利用。

3、转炉一次烟气余热利用的难点

转炉一次烟气余热回收利用有三个难点：工艺间隙性、粉尘粘结性和烟气易爆。转炉吹炼工艺的间隙性导致烟气温度在 $\sim 30\text{--}40$ 分钟周期内频繁在 $700\text{--}1000$ 与 150°C 波动，大温差、频繁急冷急热成为转炉余热回收的最大障碍。转炉粉尘中有 $\sim 10\%$ 的生石灰粉，遇到空气中的水分都会活化，与烟气中的 CO_2 反应形成石灰石，转炉投入工业应用初期，曾发现在高温下收集的粉尘送试验室的途中就已经结壳。采用未燃法除尘时主要成分为 CO ，同时还有氧，每 30 分钟左右的冶炼内，系统从空气、烟气、煤气周期性改变，很难避免煤气与空气混合爆炸。自转炉问世到如今，国内外几十家研究机构、企业都在研究回收转炉一次烟气余热的技术方案，我国专利局网站上可以检索到几十项相关专利，也分别在 40 吨转炉、80 吨转炉上进行了采用余热锅炉回收蒸汽的工艺试验，由于存在不同问题，没有实现正常应用。

4 回收利用途径

为实现转炉一次烟气余热回收利用，研究了多种工艺方案：有方案在尝试，在汽化冷却烟道内增加补燃，不吹氧时通过外供煤气燃烧产生高温烟气，替换非吹炼期的低温、高氧烟气，这应该是一个可行方案，对于转炉炼钢来说，相当于增加一套间隙作业的锅炉系统，运行、管理上比较麻烦，需要投资和设备改造量也比较多。我们经过多年深入研究分析，提出两个转炉一次烟气回收利用途径：一是用于焦化等有机、有毒、高含盐废水处理，二回收利用饱和蒸汽。

4. 1 处理和利用焦化废水等有机、有毒、高含盐废水

炼焦煤在碳化室内间接加热到 900—1000° C 过程中，煤中水份、可燃挥发份析出进入焦炉煤气，在冷却净化过程中形成焦化废水。焦化废水中含有 70 多种污染成分，包括多种巨毒有机、无机污染成分。一方面，目前世界上没有任何一种水处理工艺能将污染物全部去除，另一方面现有的以生化、膜处理为主的处理方法投资和运行成本都高，吨废水处理成本高达 20—30 元。我国钢企焦化废水多经两级处理后用于高炉水冲渣或湿熄焦。这是污染物的转移，环保部已经出台新规，焦化废水回用则必须进行深度膜处理才可以再利用，但深度处理投资巨大，还增加废水处理成本。

研究和国外成功经验都表明，利用高温烟气（750—1000° C）热解、焚烧也是处理和利用焦化废水等有机、有毒、含盐废水彻底无害化的深度处理技术之一，而如果采用外供燃料热解、焚烧，也存在处理投资和费用过高问题，除需建设焚烧系统外，还要配备余热回收利用、急冷、除尘、脱硝、脱硫等设备，而这些设备功能在转炉现有的烟气冷却净化系统都具备，可以节省投资，特别是利用高温烟气的余热可以减少燃料成本。转炉一次除尘高温烟气处理焦化废水首先是焚烧，存在如下反应[3]：

- 1) 酚： $C_6H_6O + 7O_2 = 6CO_2 \uparrow + 3H_2O + \Delta Q$
- 2) 苯： $C_6H_6 + 15/2 O_2 = 6 CO_2 \uparrow + 3 H_2O + \Delta Q$
- 3) 氨： $2NH_3 + 7/2 O_2 = 2NO_2 \uparrow + 3 H_2O + \Delta Q$
- 4) 硫化氢： $2H_2S + 3O_2 = 2SO_2 \uparrow + 3 H_2O + \Delta Q$
- 5) 氰化氢： $2HCN + 9/2 O_2 = 2CO_2 \uparrow + 2NO_2 + 3 H_2O + \Delta Q$

前两个反应可以确定彻底实现焦化废水的无害化，有研究表明，反应式 3) 和 5) 的主要部分产物是氮气。后两个反应虽然可能产生酸性腐蚀性气体，喷水洗涤后会被炼钢粉尘中的氧化钙等碱性成分吸收变成盐而去除。其次是热解，焦化废水中的有机有毒成分在高温作业下，会分解成无害成分。对于废水中的溶解盐，因为在干式高温蒸发过程中，溶解盐会首先以干盐形式进入灰中，实现与水的分离，类似洒盐原理，不同的是蒸发是在瞬间完成的。

焦化废水被喷入高温转炉烟气后，污染成分有三个主要去向：一是放散烟气，二是煤气，三是干灰、污水和污泥。干灰、污水、污泥都是在钢铁企业内部循环不外排，在后步冶炼工艺中都有高温处理过程。放散烟气和回收煤气都进行一级、或多级洗涤吸收，回收煤气残留少量有害成分会在后步燃烧中去除，放散烟气中的污染成分可以实现烟气达标排放，并且一定比焦化废水用于高炉水冲渣和焦碳熄火少。

利用转炉一次烟气余热处理和利用焦化废水，也给炼钢厂的带来效益：冶炼期转炉煤气中氧含量接近为 0，不仅可以根除卸爆隐患，回收煤气量增加，新水消耗降低。目前已经有三个钢厂开始在转炉除尘中利用和处理焦化废水，分别简要介绍如下：

四川威威钢铁公司[1]

川钢利用中科院的研究成果和技术，将焦化废水不经稀释、进行蒸氨等物化处理后，用做转炉湿法除尘的排水，于 2004 年开始运行，检测结果放散烟气和除尘排水中的污染成分达标，除尘系统喷嘴、设备未见腐蚀、堵塞，焦化废水处理成本降低。

山东莱钢

莱钢在三座 120 吨转炉干法、两座 80 吨转炉半干法和几座小转炉的湿法除尘系统中，均处理和利用蒸氨后焦化废水，采取了研发的催化剂和防腐剂，经检测，在无催化剂的情况下，可分解消纳焦化废水 60%，在有催化剂的情况下可达 97% 以上。

唐山经安钢铁公司

唐山经安钢铁公司于 2014 年 1 月起,在 60 吨转炉半干法除尘系统中尝试处理和利用剩余氨水,焦化废水不经稀释、未经蒸氨,直接喷入转炉蒸发冷却器 700-1000° C 的高温烟气中,控制出口温度在~300° C,实现焦化废水中有害成分的热解、焚烧,然后在湿法洗涤中吸收有害成分。经检测:全用剩余氨水(COD3000-5000mg/L)时,除尘排水中没有检测出 COD 成分,50%剩余氨水+50%脱硫废液(COD 含量几万 mg/L)的情况下,除尘排水 COD 含量也只有 100mg/L,因为除尘水内部循环使用也不存外部污染,每座转炉吹炼期处理焦化废水量 10-12 吨/时。转炉除尘利用焦化废水对企业生产、设备、岗位条件没有影响,企业正在准备委托权威检测鉴定,计划在企业推广使用,全部处理和利用焦化废水,同时降低焦化废水处理成本。

2014 年 6 月 20 日,中国金属学会组织专家进行了研讨,对在利用转炉余热消纳焦化废水思路和技术给予肯定,认为该项技术为废水零排放提供了途径,支持企业完善该项技术[2]。

4. 2 全干法除尘和余热回收利用

我国目前已经分别有一座 40 吨、一座 80 吨转炉分别进行了在汽化冷却烟道后采用余热锅炉回收蒸汽的工业试验,40 吨转炉的工艺是余热锅炉+布袋除尘,80 吨转炉的工艺是余热锅炉+湿法除尘,都取得了初步成果,有待尽快实现正常运行。我们在研究相关技术,以实现转炉一次全干法除尘和余热回收利用,主要内容包括

➤ 采用相变蓄热换热技术:解决烟气的大温差、频繁急冷急热问题,吹氧期高温烟气的温度从最高 700-1000° C 降低并稳定在~600° C,非吹氧期从~150° C 升温到~400° C,温差只有~200° C,这样锅炉就会在相当稳定的入口温度下运行,解决急冷急热对锅炉设备可能产生的损坏,回收的蒸汽流量和压力也会比较稳定。在蒸发冷却器系统采用的相变蓄热换热技术证明,能简单有效解决内壁积灰难题,也为余热回收利用创造了条件。

➤ 用相同方法,使锅炉管表面温度始终保持远在露点温度以上,也有利于防积灰。辅助采取干式除尘和成熟的清灰技术,就可以解决转炉粉尘粘结问题

➤ 汽化烟道系统采取有效的除氧和烟气、空气、煤气隔绝工艺措施,可以预防 CO 煤气爆炸。

结语

➤ 现有转炉一次除尘干法、半干法、湿法都没有回收余热,特别是湿法还要消耗大量循环水,是一个很大浪费

➤ 现在已经具备转炉一次除尘回收利用余热的技术条件,至于是用于处理焦化废水等有机有毒废水,还是通过锅炉回收蒸汽,企业可以结合自身情况和经济效益比较选择

➤ 处理利用焦化废水等有机有毒废水已经使转炉一次除尘具备废水处理厂的功能,是一种简单易行、经济有效、低成本高效益的解决方案

2014 年 8 月 21 日于上海

参考文献

- [1] 操卫平等,利用炼钢转炉烟气治理焦化废水,工业水处理,2005,Nov. 11, P74
- [2] 王寅生,中国金属学会,转炉除尘器消纳利用焦化废水技术座谈会纪要
- [3] 孟令和,焦化废水无公害焚烧处理技术的探讨,冶金环境保护,2006 年 5 期, P69
- [4] 光辉,王建超,承钢焦化废水无害化利用技术研究,世界金属导报,2011 年 11 月 1 日,第 22 版
- [5] 张笑冰,焦化厂废水回用于转炉除尘水系统的可行性研究,中国精细化工协会第五届水处理化学品行业年会论文集,2009 年 7 月
- [6] 丑明等,以煤气为热源的焚烧法处理焦化污水工艺方法及焚烧装置,中国发明专利申请公开说明书,申请号: 01114013.5

船用柴油机余热利用系统研究

张文平, 侯胜亚, 曾子威

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨, 150001)

(0451-82518264, zhangwenping@hrbeu.edu.cn)

摘要: 船用柴油机余热利用系统可以充分利用主机废气和冷却介质中的能量, 是一种先进的船舶节能措施。对该系统进行了热平衡分析, 针对 6S50MC-C8.2 型柴油机得出该船用柴油机余热利用潜力, 并根据该型号的柴油机设计合理的余热利用方案图。对该余热利用系统所涉及的各分系统进行详细的设计及计算。最后对该系统进行经济性分析, 论证船用柴油机余热回收发电系统的应用可行性。

关键词: 船舶柴油机; 余热回收发电; 余热锅炉; 汽轮机; 有机工质朗肯发电

引言

石油价格的攀升使得燃油费占船舶运输成本的比例逐年提高。海上运输业的目的在于提高收益, 因此要降低成本, 降低成本的有效途径是降低燃油消耗, 从而减少船舶运营成本^[1]。这对船舶生产行业提出了新的要求。目前船舶多采用二冲程低速柴油机作为主推进动力装置, 在近几十年柴油机在船用动力装置中还将处于主导地位^[2]。

柴油机的热效率已接近 50%, 仍有 50% 的能量被废气、冷却介质带走, 如果能够充分利用这部分余热, 可以明显提高主机热效率, 降低船舶运营成本。而且随国际海事组织 EEDI 法规生效, 将推动主机余热利用系统的装船率。因此有必要研制出适合船用柴油机的余热利用装置。

1 船舶余热利用系统国内外研究现状

目前, 国外对船舶余热利用开展了广泛的研究, ABB、MAN、Wartsila、三菱等公司都分别提出了各自的余热利用系统。

1) ABB 公司首先提出了大型船舶柴油机排气能量回收技术, 其主要采用动力涡轮和汽轮机联合循环的方式, 单独使用动力涡轮, 最大可回收主机功率 5%, 而结合汽轮机, 采用联合方式, 最大可回收主机功率 10%^[3]。

2) 瓦锡兰公司开发出一种总热回收装置 (Total Heat Recovery Plant), 该装置包括一个双压力余热锅炉、一个多级双压力汽轮机、一个动力涡轮、一个给水预热系统和两个驱动电机系统, 并进行了优化布置^[4]。

3) Siemens 公司开发了一种带有余热利用系统的推进装置—SISHIP^{CIS} BOOST。该装置可以回收船舶主机的余热能量, 并将其输送到船舶能量供应网络中, 从而明显提高船舶系统的推进性能和电力性能。

国内受限于船舶配套设备研发的落后现状, 大型船用柴油机主机还没有自己的产品, 国内主机、动力装置市场也完全被国外厂商垄断。国内对船舶柴油机动力系统余热利用的研究很少。

1) 2008 年大连船用柴油机有限公司生产了国内第一台带废热回收系统的 7RTA84TD 柴油机, 利用废气余热锅炉蒸汽发电或供船舶使用, 该系统采用双压余热锅炉, 包括低压蒸发器、高压蒸发器和高压过热器三部分^[5]。

2) 哈尔滨工程大学对船舶余热利用系统提出了一套设计模型和计算方法, 针对船舶余热利用系统搭建了试验台进行试验, 掌握了船用柴油机余热利用系统的规律方法, 初步实现可装船的目标。

综上所述, 船舶余热回收技术已经成为船舶节能减排的关键技术之一。国外船舶余热利用系统已经进入商用阶段, 而国内相应技术发展较慢。随着世界航运市场竞争日趋激烈, 进一步搞好船舶节能工作, 开发船舶节能的新途径是降低船舶营运成本的必经之路, 而船舶主机余热回收技术也将进一步得到发展。

2 船用柴油机的热平衡

在柴油机气缸中燃料燃烧所释放的热量只有不到 50% 能量转变为有用的轴功, 其余主要通过尾

气排出、空冷器、缸套冷却水、滑油冷却、热辐射和表面散热等耗散掉。通过消化 MAN6S50ME/MC 船用主柴油机资料，初步整理计算的各项具体热损所占比率详见下面的图 1。

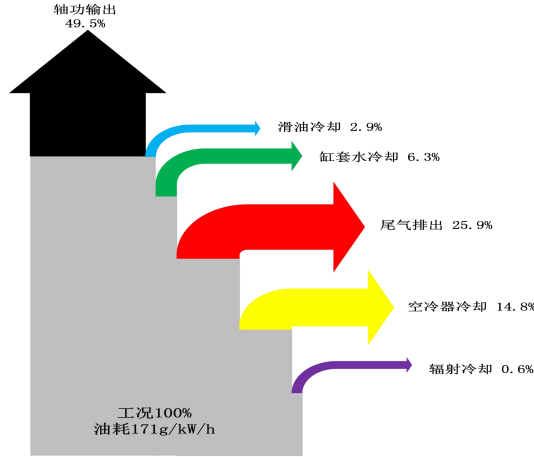


图 1 MAN6S50ME/MC 柴油机能量利用图

MAN6S50ME/MC 柴油机余热中滑油冷却的余热量主要存在机体内部且其所占比值相对较小，热回收潜力小不予考虑；同样热辐射带走的余热量属于不可控余热且其量同样较小，所以也不予考虑。所以针对于本研究课题所涉及的柴油机热平衡中的余热部分，主要关注柴油机尾气、缸套冷却水，空气中冷器中的余热利用潜力，三者合起来的热利用潜力接近燃料热值的 45%，热回收潜力已相当可观。

2.1 船用柴油机的热平衡计算

根据热平衡的理论，船用柴油机的热平衡方程可以通过下式表示^[6,7]：

$$Q_{rl} = P_e + Q_{wq} + Q_{kl} + Q_{gl} + Q_{hy} + Q_{fs} \quad (2-1)$$

式中： Q_{rl} ——通过燃料燃烧产生的总能量，kW； P_e ——转化为柴油机轴功的能量（轴功），kW； Q_{wq} ——柴油机尾气所带走的能量，kW； Q_{kl} ——柴油机空冷器空气冷却所带走的能量，kW； Q_{gl} ——柴油机缸套冷却水冷却所带走的能量，kW； Q_{hy} ——柴油机滑油冷却所带走的能量，kW； Q_{fs} ——柴油机热辐射等所带走的能量，kW；

式 2-1 中的各部分可以通过以下各式来进行计算，kW。

(1) 燃料燃烧所产生的总热量 Q_{rl} 通过下式计算

$$Q_{rl} = P_e \times t \times m_{rl} \times h_{rl} \quad (2-2)$$

式中： m_{rl} ——柴油机油耗，g/kW/h； h_{rl} ——燃料的热值/kJ/kg； t ——柴油机工作时间 h；

(2) 通过下式计算尾气带走的热量 Q_{wq}

$$Q_{wq} = m_{wq} \times (c_{p_{wqj}} \times T_{wqj} - c_{p_{wqc}} \times T_{wqc}) \quad (2-3)$$

式中： m_{wq} ——柴油机尾气的质量流量，kg/h； $c_{p_{wqj}}$ ， $c_{p_{wqc}}$ ——尾气进出口的定压比热，kJ/kg/°C； T_{wqj} ， T_{wqc} ——尾气进出口的温度，°C；

(3) 柴油机缸套冷却水冷却所带走的能量 Q_{gl} 通过下式计算

$$Q_{gl} = m_{gl} \times c_{p_{gl}} (T_{glj} - T_{glc}) \quad (2-4)$$

m_{gl} ——缸套冷却水的质量流量，kg/h； $c_{p_{gl}}$ ——缸套冷却水的定压比热，kJ/kg/°C； T_{glj} ， T_{glc} ——缸套冷却水进出口的温度，°C；

(4) 柴油机空气冷却器冷却所带走的能量 Q_{kl} 通过下式计算

$$Q_{kl} = m_{kl} \times (c_{p_{klj}} \times T_{klj} - c_{p_{klc}} \times T_{klc}) \quad (2-5)$$

式中： m_{kl} ——空冷器中空气的质量流量，kg/h； $c_{p_{klj}}$ ， $c_{p_{klc}}$ ——空冷器中空气进出口的定压比热，

$\text{kJ/kg/}^{\circ}\text{C}$; T_{klj} , T_{klc} ——空冷器中空气进出口的温度, $^{\circ}\text{C}$;

(5) 余热系统总发电比通过下式计算

$$\eta_1 = \frac{P}{W}$$

式中: P ——余热系统发电功率, kW , W ——主机功率, kW ;

(6) 余热系统总体热效率通过下式计算

$$\eta_2 = \eta_1 \eta'$$

式中: η' ——主机调制后的效率;

(7) 余热系统总体热效率通过下式计算

$$\eta_3 = 1 - \frac{W \xi_2}{(W + P) \xi_1}$$

式中: ξ_1 ——主机调制前的油耗, $\text{g/kW} \cdot \text{h}$, ξ_2 ——主机调制前的油耗, $\text{g/kW} \cdot \text{h}$ 。

2.2 船舶柴油机调制后余热回收系统输入数据

对于船用大型低速二冲程柴油机而言, 由于其热效率较高, 使得排气的温度较低。一般为 $230 \sim 250^{\circ}\text{C}$, 如果直接将排气通入余热锅炉中, 由于温度较低, 不利于余热锅炉对排气能量的利用, 因此就需要将排气温度提高到 290°C 以上, 以提高余热锅炉的工作效率。

在目前余热调制的各种方案中, 为了提高排气温度, 通常采取排气旁通的方法来减少柴油机的空气流量。但是空气流量降低之后, 柴油机缸内过量空气系数也随之降低。而过量空气系数的降低会对柴油机的性能产生一定的影响, 例如燃油消耗率增加、热负荷增大等。因此, 这就需要额外采取一些措施来保证柴油机的动力性和经济性等要求。因此, 柴油机余热调制一般有两种方法, 一种是通过调整柴油机, 主要是调整柴油机定时以及其排气旁通; 另一种则是通过调整涡轮增压器及其排气旁通。

通过调制的相关研究^[8], 分别采用调整柴油机和调整涡轮增压器这两种方法分别来对柴油机进行余热调制, 能保证将排气温度提升到 290°C 以上, 同时燃油消耗率升高不超过 2%, 下表 1 为调制后的柴油机输入计算参考值, 主要根据 MAN 公司 6S50MC-C8.2-TII-MET60MB^[9]和 WHR-6S50ME-C8.2-case-155358-2012^[10]技术说明书整理。

表 1 25°C ISO 条件下调制后的柴油机输入计算参考值

项目	单位	数值	数值	数值	数值
主机负荷	%	100	75	50	35
主机功率	kW	9960	7470	4980	3486
主机调制后的效率	%	49.10	50.15	49.45	49.86
主机转速	r/min	127	115.4	100.8	89.5
主机油耗	$\text{g/kW} \cdot \text{h}$	171	168.1	170.5	169.1
主机排气量	kg/h	73900	59308	43520	37032
主机排气温度	$^{\circ}\text{C}$	293.5	272.4	247.7	211.5
动力涡轮的进气压力	MPa	0.44	0.33	0.24	0.21
动力涡轮的进气温度	$^{\circ}\text{C}$	478.3	420.1	377.0	289.5
中央冷却水压力	MPa	0.30	0.30	0.30	0.30
冷却器进口水温	$^{\circ}\text{C}$	25	25	25	25
缸套水的热潜力	kW	1280.00	1040	810	660

3 船用柴油机余热利用系统模型

3.1 系统总体方案图

6S50ME-C8.2 船舶主机余热利用系统总体方案简图如图 2 所示。主机余热利用系统主要由四部分组成: 回收主机排气废热的超低温排烟余热锅炉系统; 利用排气能量以及蒸汽和高温热水能量来做功的动力涡轮、汽轮机和有机工质汽轮机发电系统; 柴油机高温冷却水利用换热设备; 余热利用

系统控制与能量管理系统。前三者利用管路连接起来，工质在其间循环流动，构成了整个主机动力系统余热能量的传递和转换过程。

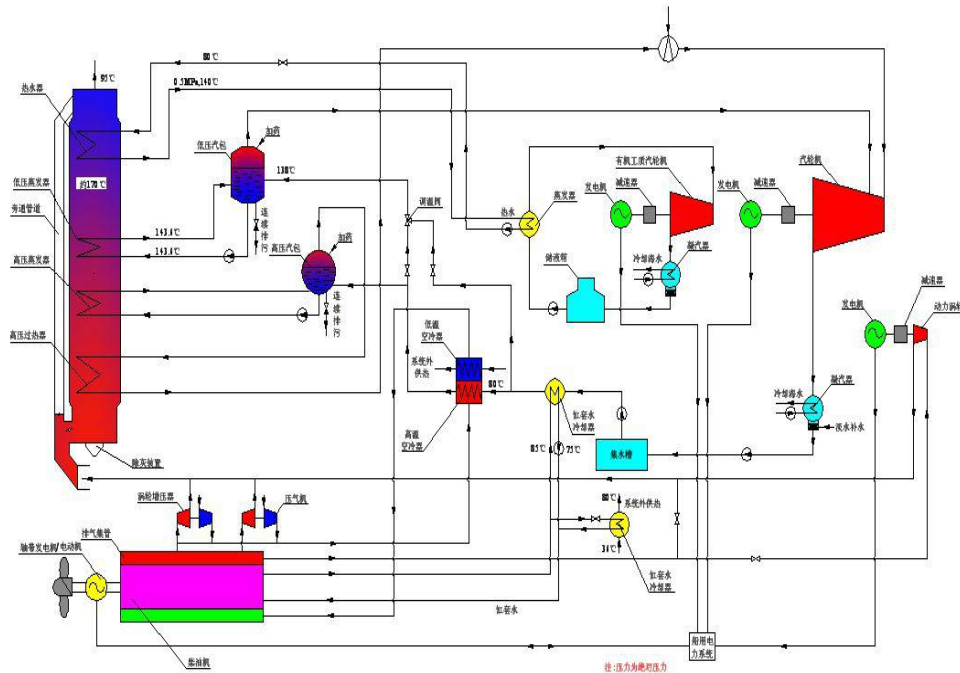


图 2 船舶主机余热利用系统总体方案简图

超低温排烟余热锅炉形式：在立式烟道内沿烟气流动方向依次水平布置具有强化换热作用的常规段(包括高压过热器、高压蒸发器和低压蒸发器)和超低温排烟段热水器组成的，并具有烟气旁通功能的水管式强制循环立式锅炉。

余热做功方式：采用动力涡轮、汽轮机与有机工质汽轮机发电单元，以发电的形式回收柴油机排气、蒸汽和高温热水能量。

柴油机冷却水利用：利用缸套冷却水、增压空气的热量，余热锅炉给水采用分段加热技术。先由柴油机缸套冷却水加热锅炉给水。将柴油机增压空气冷却器重新设计为高温和低温两段式空气冷却器，空气冷却器高温段用于锅炉给水预热，多余热水则向系统外供给。

余热利用综合电控系统：采用模块化与分层设计方法，余热利用系统主要部件采用分层集散控制方式，并与舰桥、驾驶室、机舱柴油机控制系统、船上用电系统共同构建两层网络系统，并满足民船通讯协议标准。

在总体方案简图 3.1 中，经调整后的柴油机排气分别流经涡轮增压器和动力涡轮，两部分排气混合后，依次流经余热锅炉高压过热器、高压蒸发器、低压蒸发器和热水器，并经锅炉出口烟道排入大气。循环水分三路，一路经给水泵升压后流至余热锅炉超低温排烟段热水器，产生高温热水作为有机工质汽轮机的热源，经换热器加热有机工质形成高压蒸汽，进入有机工质汽轮机发电做功，乏汽经冷凝器冷凝成液体流回到有机工质储罐，而高温热水经换热后直接进入集水槽形成循环；第二路经高压给水泵的升压后，通过缸套水换热器和空气冷却器将温度升至 160℃ 左右后，分成两路，一路进入高压锅筒，经高压热水循环泵升压后，进入高压蒸发器和高压过热器被加热成过热蒸汽，经第一路高温热水减温后进入汽轮机做功。第三路从缸套水换热器将温度升至 80℃ 左右后分流出来与第二路部分 160℃ 左右热水混合受热后进入低压锅筒，并由低压热水循环泵升压后流至低压蒸发器被加热成饱和汽水混合物，然后流至低压锅筒内，经低压锅筒汽水分离出来的饱和蒸汽，供汽轮机做功。做功后的乏汽进入凝汽器，被凝结后由凝结水泵升压至集水槽。

4 船用柴油机余热利用分系统研究

针对上一节对余热回收系统的描述，接下来对系统中所涉及到的各部分进行详细的设计和性能研究：

4.1 船用柴油机余热锅炉性能研究

余热锅炉是柴油机—蒸汽联合循环中的一个重要换热设备，它通过吸收柴油机的排气能量来产

生蒸汽，推动蒸汽轮机做功发电。余热锅炉的性能指标的高低直接影响整个循环系统的效率，所以针对余热锅炉的性能研究至关重要。受热面排数由吸热量决定，本次设计中采用 $\Phi 25 \times 2.5$ 的小管径，为了增大换热面积，本次设计所以受热面全部采用错列布置，这样就能使余热锅炉本体重量和尺寸大大减小。在完成热力计算后，根据各受热面烟气出入口温度以及工质进出口温度绘制余热锅炉换热示意图如图3所示。

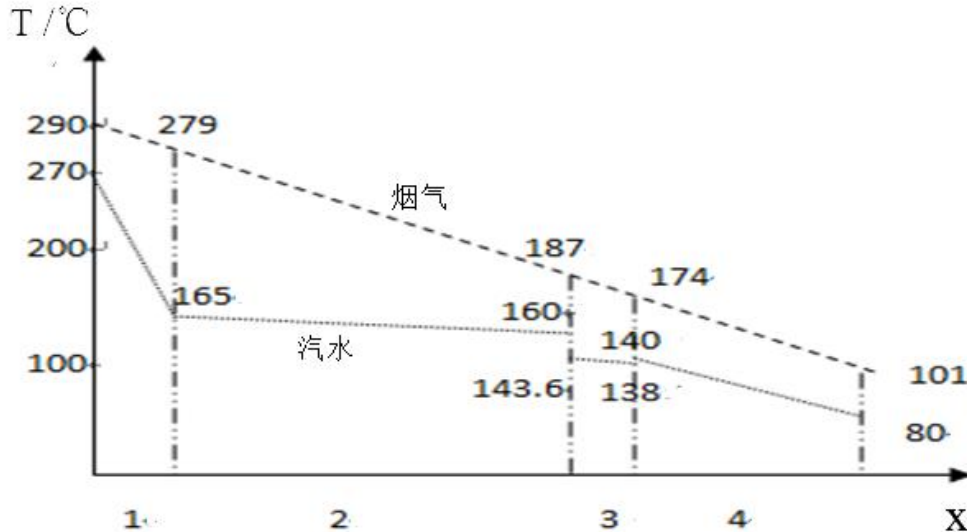


图3 双压方案换热示意图

1-高压过热器，2-高压蒸发器，3-低压蒸发器，4-热水器

从上图可以看出，常规燃煤锅炉排烟温度一般在 170°C 左右，那么 170°C 以下的能量会被浪费掉，本系统设计的余热锅炉增加了热水器受热面，用来加热有机工质所需循环水，充分利用了 $174^{\circ}\text{C} \sim 101^{\circ}\text{C}$ 之间的烟气能量，降低了排烟温度，增大了能量利用范围。

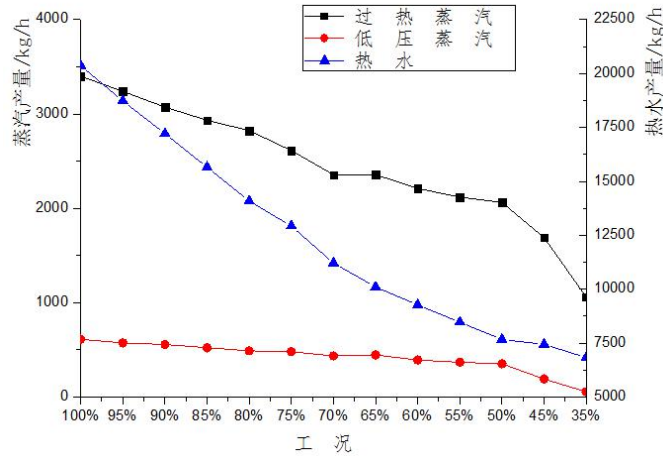
表2 双压方案本体结构参数

序号	名称	单位	过热器	高压蒸发器	低压蒸发器	热水器
1	管子规格	mm	25×2.5	25×2.5	25×2.5	25×2.5
2	排列形式	/	错列	错列	错列	错列
3	管子材料	/	20	20	20	ND
4	翅片材料	/	08AL	08AL	08AL	NS
5	翅片高度	mm	12.5	12.5	12.5	12.5
6	翅片厚度	mm	1	1	1	1
7	翅片节距	mm	5.4	5.4	5.4	5.4
8	横向节距	mm	63	63	63	63
9	纵向节距	mm	54.6	54.6	54.6	54.6
10	每排管数	/	26	26	26	26
11	管子排数	/	4	16	5	24
12	管子总数	/	104	416	130	624
13	烟道宽度	m	1.68	1.68	1.68	1.68
14	管子计算长度	m	2.8	2.8	2.8	2.8
15	管束受热面	m^2	186.11	744.45	232.64	1116.68
16	烟气流通截面	m^2	2.5472	2.5472	2.5472	2.5472

由上表可以看出，本系统双压方案余热锅炉热水器受热面选用ND钢材，翅片管材料选用NS钢材，增加了耐腐蚀能力。横向节距选取63 mm，纵向节距选取54.6 mm，这样就保证管束剖面之间两两之间都能构成等边三角形，保证传热效果。

因为在船舶动力余热利用系统中，由于柴油机排气背压的限制，对余热锅炉的烟气阻力提出了要求，所以在完成热力计算后，必须保证烟气阻力在要求范围内，通过烟气阻力计算结果得出烟气阻力 ≤ 1800 pa，符合系统要求。

根据热平衡计算得出余热锅炉产出量如图 4 所示：



(a) 环境温度 25°C

(b) 环境温度 45°C

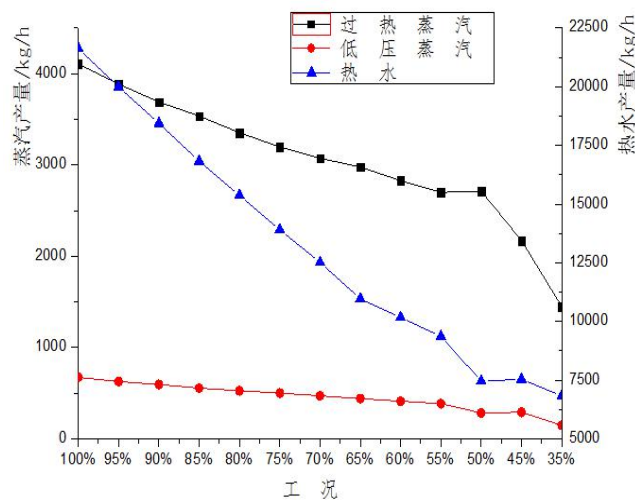


图 4 锅炉产量图

由图 2 可得出以下结论：随着主机负荷的下降，余热锅炉产出过热蒸汽流量、饱和蒸汽流量、热水器流量都基本呈线性下降，环境温度 45°C 时余热锅炉产生的过热蒸汽的量多于环境温度 25°C 时余热锅炉的产出量，但热水的流量以及饱和蒸汽的流量要低于 25°C 时余热锅炉的产出量。

4.2 船用柴油机余热蒸汽轮机性能研究

船用汽轮机的工作环境和条件与电站汽轮机不同。它安装在易变形的船体基座上，还经常受到船体摇摆、冲击的影响。它的正常运转直接关系到全船的安全，因而对可靠性要求更高。它的体积、重量也受到船体的严格限制。因此，在设计船舶柴油机余热发电汽轮机时，在保证发电功率的情况下，要尽量的减少汽轮机的尺寸，这也就对汽轮机的通流结构类型提出了要求，而通流结构的确定依据于余热锅炉的产汽参数。

4.2.1 双压汽轮机通流结构

船舶在进出港口或执行任务时需要经常变速航行，所以柴油机主机排气参数、余热锅炉产汽参数随之变化，要求汽轮机必须适应船舶主机的变负荷运行，即要根据余热锅炉的产汽变化调节汽轮机的进汽量，保证机组正常运行，所以本系统汽轮机设有调节级，调节级又分双列速度调节级和单列速度调节级，双列速度调节级相比单列速度调节级具有良好的变工况适应特性，并能承担较大的焓降，整机尺寸较小。本次研究选定双压汽轮机通流结构为双列速度调节级+五个压力级。

4.2.2 补汽点的选定

余热锅炉产生的低压饱和蒸汽从汽轮机的中间级进入与主蒸汽汇合一起做功，因为补汽会使蒸汽流量增加，为了追求更大的发电功率，所以尽可能把补汽点前移，本系统双压汽轮机设置有双列速度调节级，所以补汽点选定在调节级后，第一个压力级之前。

4.2.3 排汽压力的选定

本发电单元汽轮机为凝汽式，所以要在汽轮机末级排汽口建立并维持规定的真空。凝汽器内的真空是通过蒸汽凝结过程形成的，当汽轮机末级排汽进入凝汽器后，受到冷却水的冷却而凝结成凝结水，放出汽化潜热，由于蒸汽凝结成水的过程中，体积骤然缩小，这样就在凝汽器容积内形成了高度真空。其压力为凝汽器内温度对应的饱和温度，温度越低，真空越高，所以要求排汽压力尽可能的降低，从而使蒸汽在汽轮机中的可用焓降达到最大，以提高汽轮机的循环热效率。综合以上因素，本发电单元选定汽轮机排汽压力为 0.007 MPa。

4.2.4 汽轮机热力设计

通过以上分析，综合余热锅炉产汽参数，给定汽轮机设计参数如表 3 所示：

表 3 汽轮机设计参数

名称	数值
调节级类型	双列调节级
级数	6
机械效率	0.95
发电效率	0.96
汽轮机转速/ $r \cdot \min^{-1}$	9000
排汽压力/MPa	0.007

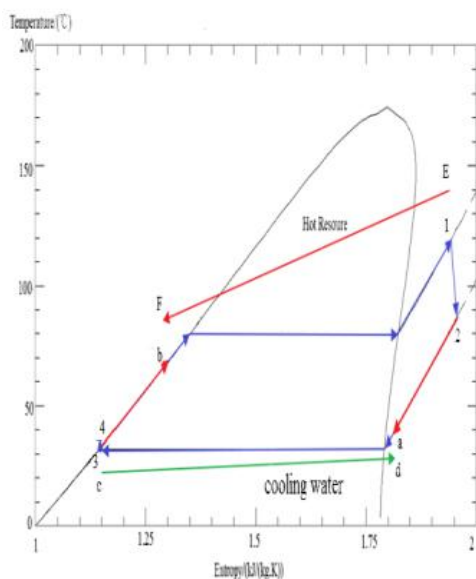
通过给定汽轮机热力参数，根据汽轮机原理，对本发电单元汽轮机进行热力计算。根据汽轮机通流结构确定整机焓降的分配，在调节级焓降的分配上要考虑到与补汽参数的匹配问题，压力级焓降选取采用“平均分配，逐级增加”原则。采用速度三角形法对静、动叶之间能量转换进行计算，根据各级几何特性确定级内损失，结合顺算法与逆算法相互校对，得出 100%设计工况下整机热力参数。

表 4 汽轮机热力参数汇总

级号	第一级	第二级	第三级	第四级	第五级	第六级
进口焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2998	2825	2766	2707	2636	2559
出口焓/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	2825	2766	2707	2636	2559	2459
入口压力/MPa	0.65	0.18	0.13	0.08	0.05	0.02
出口压力/MPa	0.18	0.13	0.08	0.05	0.02	0.007
入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	270	171	130	95	80	64
出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	171	130	95	80	64	40
等熵焓降/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	300	82	90	95	102	120
有效焓降/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	173	59	59	71	77	100
级流量/ $\text{Kg} \cdot \text{h}^{-1}$	3400	3950	3950	3950	3950	3950
内功率/kW	163	60	63	75	83	107
总功率/kW	551					
轴端功率/kW	524					
发电功率/kW	503					

4.3 船用柴油机余热 ORC 系统性能研究

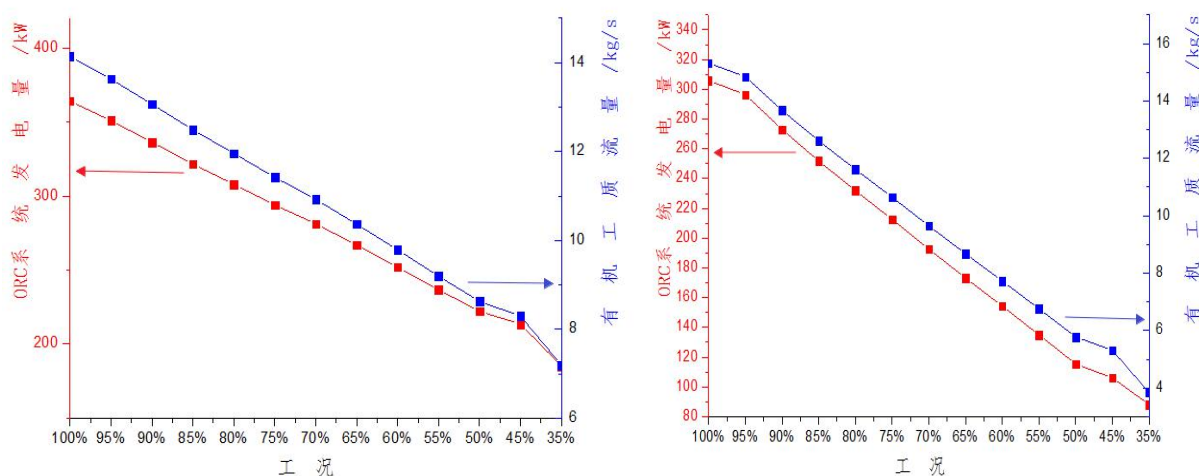
有机工质朗肯循环（简称 ORC）系统，其中的有机工质换热器、膨胀机、冷凝器和工质加压泵是循环中的基本设备。最简单的有机动力循环是利用这四个基本设备实现的朗肯循环。图 5 是有机朗肯循环的 T-S 图，表 5 是优化后的物性参数值。

图5 ORC的 T - S 图

状态参数	状态点	温度/°C	压力/kPa
膨胀机入口	1	90	1006
膨胀机出口	2	47.1	184.2
泵进口	3	31	184.20
泵出口	4	31.4	1006
回热器高温端出口	a	36.40	184
回热器低温端出口	b	39.14	1006
热源入口	E	140	500
热源出口	F	80	500
冷源入口	c	25	100
冷源出口	d	32	100
循环效率		11.8	

表5 优化 ORC 参数

对于所设计的 ORC 循环系统采用 R245fa 作为循环工质，其循环发电量和 R245fa 的流量根据环境温度的不同列于下图 6 中，通过图 11 可以看出，额定工况下，环境温度 25℃时 ORC 系统发电量 364kW。额定工况下，环境温度 45℃时 ORC 系统发电量 305kW。发电量和循环工质流量随柴油机负荷



的降低而减少。

(a) 环境温度 25℃

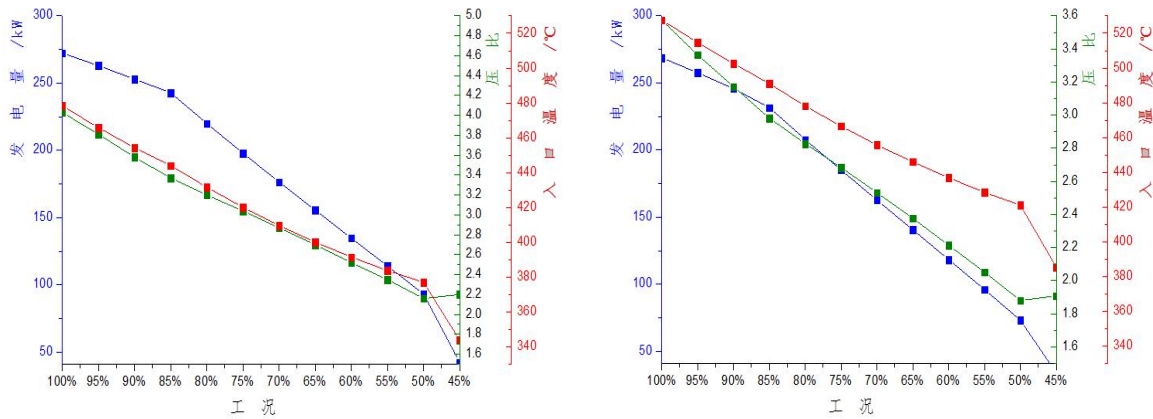
(b) 环境温度 45℃

图6 ORC 系统性能随工况的变化图

4.4 船用柴油机余热动力涡轮性能研究

涡轮发电系统主要由动力涡轮和电机组成。动力涡轮将排气能量的热能转换为机械能，通过转轴带动电机旋转，再由电机将机械能转变为易于转换和储存的电能。

如图 7 所示，(a) 图为环境温度为 25℃时，动力涡轮系统性能随工况的变化图，(b) 图为环境温度为 45℃，动力涡轮系统性能随工况的变化图，通过该图可以看出，额定工况下，环境温度 25℃时发电量为 272.3kW，环境温度 45℃时发电量为 268.8kW。发电量、压比、温度随着柴油机负荷的降低而减小



(a) 环境温度 25℃

(b) 环境温度 45℃

图 7 动力涡轮系统性能随工况的变化

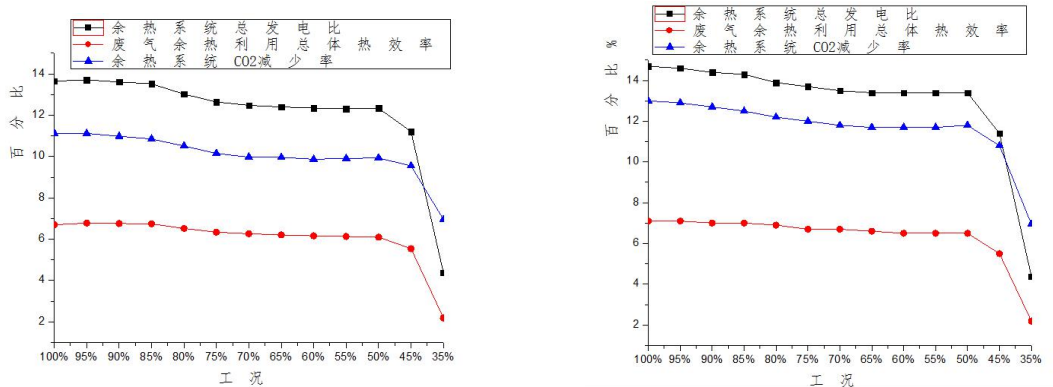
4.5 船用柴油机余热利用系统热力性能汇总

在设计计算完各分系统性能后,得出柴油机余热利用系统热力性能汇总如图 8 所示,额定工况下,环境温度 25℃,余热系统总发电比为 13.65%,废气余热利用总体热效率为 6.7%,余热系统二氧化碳减少率为 11.3%;额定工况下,环境温度 45℃,余热系统总发电比为 14.7%,废气余热利用总体热效率为 7.1%,余热系统二氧化碳减少率为 13%。由此可见柴油机余热利用系统达到了预期节能减排的效果,适合装船应用。

(a) 环境温度 25℃

(b) 环境温度 45℃

图 8 动力涡轮系统性能随工况的变化



5 柴油机余热利用系统经济性分析

通过对柴油机余热利用试验系统的计算分析,得出汽轮机发电功率、动力涡轮发电功率、有机工质汽轮机发电功率。通过热平衡计算得出发电比及热效率计算,环境温度 45℃时的发电比高于 25℃时的发电比,且当主机负荷为 80%时,发电比最高,余热利用的总体热效率最高,当主机负荷低于 50%时,余热利用总体热效率急剧下降。

以环境温度为 45 度、主机负荷 90%时,进行经济性分析:余热利用发电各系统发出 $W_1=525\text{kW}$ 的电力,相当于主机功率 $W=1902\text{kW}$ 的 27%,余热利用系统热效率提高 13%。

余热回收系统投资回报时间不应超过五年。以上述计算结果为依据,对柴油机余热利用系统进行经济性分析。设年运行天数 $t=280$ 天,燃油消耗率 $\theta=171\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$,重油价格为 $C=4500$ 元/吨,每年节省的燃油费用为 A :

$$A = 240W_1tC \quad (1)$$

由公式 1 得出每年节省的燃油费用 $A=2698920$ 元

根据本系统的设计方案,该余热回收发电系统主要包括一套低温余热锅炉、一套双压汽轮机发电系统、一套有机工质汽轮机发电系统、一套动力涡轮发电系统,以及相对应的配套设备,价格按

市场价 $P=700$ 万元算, 投资年利息按 $\&=6\%$, 投资回收期为:

$$n = \frac{\lg(\frac{A}{A-P\&})}{\lg(1+\&)} \quad (2)$$

由公式2得出投资回收期 $n=3$ 年 <5 年, 因此船舶配备余热回收发电系统虽然增加了最初的投资, 但经计算得出每年船舶的营运费可节省269余万元, 在3年内即可收回成本, 所以船用柴油机回收发电系统具有很大的经济效益。

6 结论

国外该技术已经成熟, 但国内该技术仍处于研究阶段, 研究柴油机余热系统的意义重大。为了合理的利用柴油机余热, 采用了动力涡轮系统、ORC 系统、双压蒸汽发电系统联合回收余热, 分别设计了余热锅炉、汽轮机、有机工质汽轮机、动力涡轮系统, 分析了各系统的设计原则、方法及结果。通过船用柴油机余热利用系统热力性能汇总可以看出, 船用柴油机余热利用系统可以有效地节省燃油, 减少二氧化碳的排放, 效果显著。

通过对船用柴油机余热回收发电系统的经济性分析, 得出柴油机余热发电系统虽然增加了初投资, 但每年通过节省的燃油费, 使得配备该系统的船舶在3年内可收回成本, 具有很大的经济效益。

参考文献

- [1] 罗莉萍. 船舶动力装置节能新途径的探讨[J]. 中国修船. 2000. 1: 15-16P.
- [2] 杨承参, 施润华. 船舶动力装置[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996:5-10P.
- [3] MAN. How to influence CO2[R]. MAN. 2011:3-4P.
- [4] Wartsila. Waste-heat-recovery[R]. Wartsila. 2011:2-6P.
- [5] 刘新芳. 国内首台 7RTA84TD 船机交付 [N]. 中国船舶报, 2009:1P.
- [6] 俞小莉, 李婷. 发动机热平衡范镇研究现状与发展趋势, 2005 (5): 1-5
- [7] 姚寿广. 船舶热力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003:55-103P.
- [8] 高阳. 船舶余热利用系统主柴油机性能仿真优化[D]. 硕士, 哈尔滨工程大学. 2012.
- [9] MAN Data (2012). The WHR Main Engine Data 6S50ME-C8.2. for HHM and Main Engine Room Data6S50MC-C8.2-TII IMO-NOx Tier II with 1 x MET60MB, 2010. 04.
- [10] MAN, The WHR_6S50ME-C8.2_Case_8691-2015 For Waste Heat Recovery 2012. 04.

利用工业余热的闪蒸-双工质联合发电系统的 炯经济分析与优化

陈桂兵^{[1]a}, 赵军^{*}, 安青松^a, 王永真^a, 骆超^b, 陈玉涛^a, 张明蕊^a

(a 天津大学机械工程学院, 中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300350

b 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)

摘要: 工业生产中大量中低品位余热的直接排放造成能量利用水平低和城市热岛效应等环境问题, 本文提出利用闪蒸-双工质联合发电系统对工业生产过程中的热水型余热进行回收利用。首先对联合系统进行了热力学和经济学分析, 对系统闪蒸压力、蒸发温度等关键参数进行优化, 得出当余热水温度为 135℃ 时, 以单位发电成本最佳时对应的闪蒸压力和蒸发温度分别为 195kPa 和 85℃。同时, 在最优工况下, 分析比较系统关键设备的炯损失、炯损失成本、炯经济系数, 对设备进行优化。最后, 对应不同的工业工艺, 对单位热水炯成本对联合系统的火用经济性能存在较大的影响。

关键词: 工业余热; 炯经济学; 闪蒸-双工质联合发电系统; 发电

Abstract: In order to solve the problem of energy waste and environmental damage caused by the direct emission of medium and low grade waste heat in industrial production, Flash-binary combined power generation system is used for waste heat recovery of hot water in industrial process in this paper. From the view of thermal-economics, the thermodynamic and economic analysis of the combined system is carried out, and also the key parameters flashing pressure and evaporating temperature are optimized. When the hot water temperature is 135℃, the optimal flashing pressure and evaporating temperature are 195kPa and 85℃, respectively. At the same time, under the optimal operating condition, exergy destruction, exergy destruction cost ratio and the exergoeconomic factor of the key equipment are analyzed for the equipment optimization. Finally, the sharp influence of cost per exergy unit of hot water on different industrial system is found for different industrial processes.

Key words: industrial waste heat; exergoeconomics; Flash-binary combined power generation system; power generation

1 引言

余热回收利用是提高能源利用效率、减少 CO₂ 排放、提高空气品质的有效措施。我国工业能耗占总能耗 70% 以上, 其中至少 50% 转化为工业余热, 而目前我国工业余热资源回收率仅约为 30%, 能源利用效率偏低^[1]。在工业生产中, 蒸汽释放出部分热能后生成的凝结水拥有的热量一般占蒸汽总热量的 20%-30%, 某些设备可高达 40%^[2]。当前, 中国多数工业企业对蒸汽凝结水不够重视, 大多不能被处理回用, 有的企业甚至直接排放, 水资源和热量大大浪费, 并且由于水温高, 给水处理装置带来一定的操作难度。同时, 余热热水直接排放到环境中, 造成热污染, 因此有必要对余热热水进行有效的回收利用。杨宇程等^[3]对凝结水高温回收利用技术进行了探讨, 指出凝结水回收利用的必要性, 并总结凝结水处理技术和发展历程; 张留霞等^[4]结合某医院蒸汽凝结水, 提出其热回收利用方法, 将凝结水作为生活热水的预热热源, 并设计该医院供水系统; 王洪昌等^[2]中提出将蒸汽凝结水闪蒸获得蒸汽后, 将这部分蒸汽为溴化锂制冷机组发生器提供热量的方案, 并对其能耗和经济效益进行分析, 节能效果显著。多数学者对蒸汽凝结水的回收利用研究集中在作为生活热水和补水利用, 发电研究鲜有报道。而热水发电在地热领域已经得以应用, 地热发电循环中最基本的两种方式为闪

^[1] 第一作者: 陈桂兵, 男, 硕士研究生在读, 主要研究方向为中低温余热高效获取及转化技术; Tel: 15022305567, Email: cgb1217@163.com;

通讯作者: 赵军, 男, 教授, 博士生导师, 中低温热能高效利用教育部重点实验室(天津大学)主任, 主要研究领域为中低温热能高效利用、多能互补系统运行优化、中低温相变储能技术及地源热泵技术, Tel: 13502038363, Email: zhao.jun@tju.edu.cn。

蒸发发电循环和双工质循环。闪发电系统具有运行维护方便、系统简单、造价低的优点，但其地热水利用率较低。双工质发电系统具有机组紧凑、易于安装发电、设备不腐蚀以及地水利用率高的优点，适用于中低温地热水发电。进而，根据能量梯级利用的原则，耦合上述两个循环形成的闪蒸-双工质的地热水发电循环能够扩大地热水的利用率和系统输出功，但是系统的经济性能有所降低。

因此有必要针对余热热水闪蒸-双工质发电系统进行优化分析。A. D. Pasek 等^[5]针对 170℃ 地热水从热力学角度对闪蒸-双工质联合系统进行了研究，并分析了闪蒸压力、蒸发温度、夹点温差等参数对最大净功的影响规律，并指出异戊烷能产生最大净功，但未对经济性进行分析，忽略了系统成本的影响。C. Yilmaz 等^[6]分析了利用闪蒸-双工质中高温地热水发电制氢系统的焓成本进行了评估，通过焓分析和经济计算，得到系统发电焓效率为 46.6%，单位发电成本为 0.0400\$/kWh，制氢成本为 3.14\$/kg H₂，但未分析系统运行参数对系统焓效率和经济性的影响。但是在工业余热的资源品位和经济成本不同于地热水，尚没有学者展开闪蒸-双工质联合发电系统对工业热水型余热的适用性分析。

本文从闪蒸-双工质联合系统的热力学性能和经济性性能两方面出发，对联合系统进行分析，针对闪蒸压力、蒸发温度等参数对系统循环性能进行优化，并对蒸汽凝结水成本对联合系统焓经济性能的影响作敏感性分析。

2 热力学模型

2.1 系统介绍

图 1 中为闪蒸-双工质联合发电系统图，图 2 中为闪蒸循环和双工质循环发电循环 T-S 图。余热热水闪蒸-双工质联合发电循环包括闪蒸循环和双工质循环，按照能量对口、梯级利用的原则，充分利用闪蒸循环和双工质循环的优势，增大余热的利用率和系统产出。流程如下，余热热水 1 经膨胀阀降压后进入闪蒸罐，形成两相流 2，后在闪蒸分离器分离，进而分离后的水蒸气 3 进入膨胀机中膨胀做功，膨胀后的低压水蒸气 5 在冷却塔中冷凝为液体。同时，闪蒸分离器中的饱和热水 4 依次进入蒸发器和预热器，将有机工质加热。有机工质 o5 在预热器和蒸发器中吸收饱和热水 4 的热量后成为有机蒸汽 o1，在膨胀机中膨胀做功进而带动膨胀机发电。膨胀做功后的低压有机蒸汽 o2 经冷凝器冷凝为有机液体 o4，经工质泵增压后流入预热器中进行下一个循环。

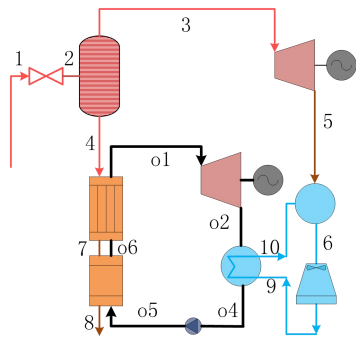


图 1 闪蒸-双工质联合发电系统工作原理图

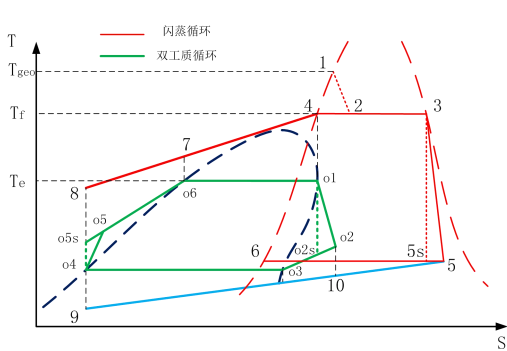


图 2 闪蒸-双工质联合发电系统 T-S 图

2.2 热力学模型

基于热力计算对联合循环做出如下假设：

- (1) 忽略工质的动能势能以及工质泵功消耗，系统处于稳态；
- (2) 系统中各热力设备绝热，环境温度为 20℃；
- (3) 忽略设备和管道系统中的压力损失；
- (4) 双工质系统，冷凝器出口为饱和液，膨胀机入口为饱和气；
- (5) 忽略余热热水中的不凝气体和其他杂质的影响，物性按纯水处理。

根据能量守恒方程和焓平衡方程，得到联合系统各设备的热力学模型如表 1 所示。

表 1 系统各设备的热力学模型

设备	能量方程	焓方程
膨胀阀		
闪蒸器		

膨胀机 1
冷凝器 1
预热器
蒸发器
膨胀机 2
冷凝器 2
工资泵

2.3 热力学性能指标
建立热力学性能指标，以分析各运行参数对系统热力学性能的影响规律。

表 2 热力学性能指标

热力学性能指标	计算公式
系统循环净功	
系统热效率	
烟效率	

3 烟经济学模型

烟分析方法在能量有效利用和节能分析工作中发挥很大的作用，对系统能量和品位进行评价，提供技术支持，但是常常存在节能但不省钱的问题，也就是收到经济的制约而难以实现，因此在进行烟分析和优化时，有必要考虑经济因素对系统运行的影响。

因此，将热力学分析和经济分析相结合，利用烟经济分析方法，以系统所得产品的单位成本最小、经济效益最佳为目标，对系统进行优化设计和运行参数优化。

运用烟经济分析方法时，必然涉及各种烟和烟的单价或价值，因此在除了质量守恒方程和、能量守恒方程和烟平衡方程外还需要烟成本方程，如公式(1)所示^[7]。

(1)

成本方程

(2)

3.1 各个设备的经济学模型

闪蒸-双工质联合发电系统投资成本包括换热器（预热器、蒸发器）、膨胀机、工质泵以及冷凝器、闪蒸器等设备投资成本。本文利用系统的投资评价方程，计算系统各设备投资成本，见表 3。

表 3 各设备成本计算公式^[7]

部件	投资计算公式
换热器	
膨胀机	
冷凝器	
闪蒸器 ^[8]	
工质泵	

表 4 闪蒸器成本公式中的相关系数^[8]

系数						
数值	2. 25	1. 82	1. 0	3. 49	0. 44	0. 10
				74	85	74

其中表示换热器换热面积，表示闪蒸器体积。

将投资成本转化为成本率^[7]：

(3)

其中，N 是年运行小时数，是维护系数，CFR 指投资回收系数，可用式(4)求解^[7]。

(4)

其中，为利率，取 10%，为系统寿命年限，取 20 年。

3.2 系统炯经济方程

当系统中有多个产品时，产品成本就不是唯一的，需要对成本花费进行分摊。根据成本分摊方法可找出各炯流的炯单价之间的关系，从而得到成本计算的辅助方程，使成本计算方程封闭。常用的成本分摊方法有蒸汽成本等价法、产品等价法、蒸汽作为副产品法。本系统所列出的辅助方程见表 5。

(1) 蒸汽成本等价法：若膨胀机组生产的唯一目的是产生轴功带动负载，则轴功应承担全部费用（包括全部固定投资和运行费用）及耗费的蒸汽费用。此时可认为膨胀机进口处于出口处的蒸汽的炯单价相等，这种方法确定的轴功单价偏高。

(2) 产品等价法：将年度化的设备费用和运行费用按产品炯值大小平均分摊的方法，认为各种产品的炯单价相等。

(3) 蒸汽作为副产品法将蒸汽视为可有可无的产品，因而，轴功的单价按照凝汽式透平机组提供的轴功计算。

表 5 系统经济成本方程和辅助方程

设 备	经济成本方程	辅助方程
膨胀阀		已知
闪蒸器		
膨胀机 1		
冷凝器 1		
预热器		
蒸发器		
膨胀机 2		
冷凝器 2		
工质泵		

3.3 炯经济性能指标

在进行炯经济分析时，使用炯经济指标对系统循环性能进行评价。主要炯经济指标见表 6。

表 6 炯经济性能指标

炯经济性能指标	计算公式 ^[7]
单位燃料炯成本	
单位产品炯成本	
炯损失成本率	
炯经济系数	

4 结果与分析

出于工质的热力学性能、环保性以及安全性的考虑，本文双工质循环中选用的有机工质为 R245fa，双工质循环处于亚临界，保证循环的安全性。联合系统已知参数见表 7。

表 7 系统输入参数

系统参数	数值	系统参数	数值
余热热水出口温度	135℃	冷却水进口温度	20℃
发电机效率	95%	工质泵等熵效率	78%
膨胀机等熵效率	80%	冷凝器夹点温差	5℃
蒸发器夹点温差	10℃	冷却水压力	100kPa
闪蒸循环冷凝压力	30kPa	双工质循环冷凝温度	40℃
系统年运行小时数	7500h	系统寿命	20 年

4.1 参数优化

系统运行参数对系统热经济性能和焓经济性能有明显影响，因此本文针对闪蒸压力和蒸发温度两个参数对联合系统运行性能进行优化，闪蒸压力变化范围为 90-300kPa、蒸发温度变化范围为 50-90℃。

4.1.1 闪蒸压力变化对联合系统性能的影响

图 3 显示了当双工质循环蒸发温度恒定时，闪蒸-双工质联合发电系统热力学和焓经济性能随闪蒸压力变化关系。

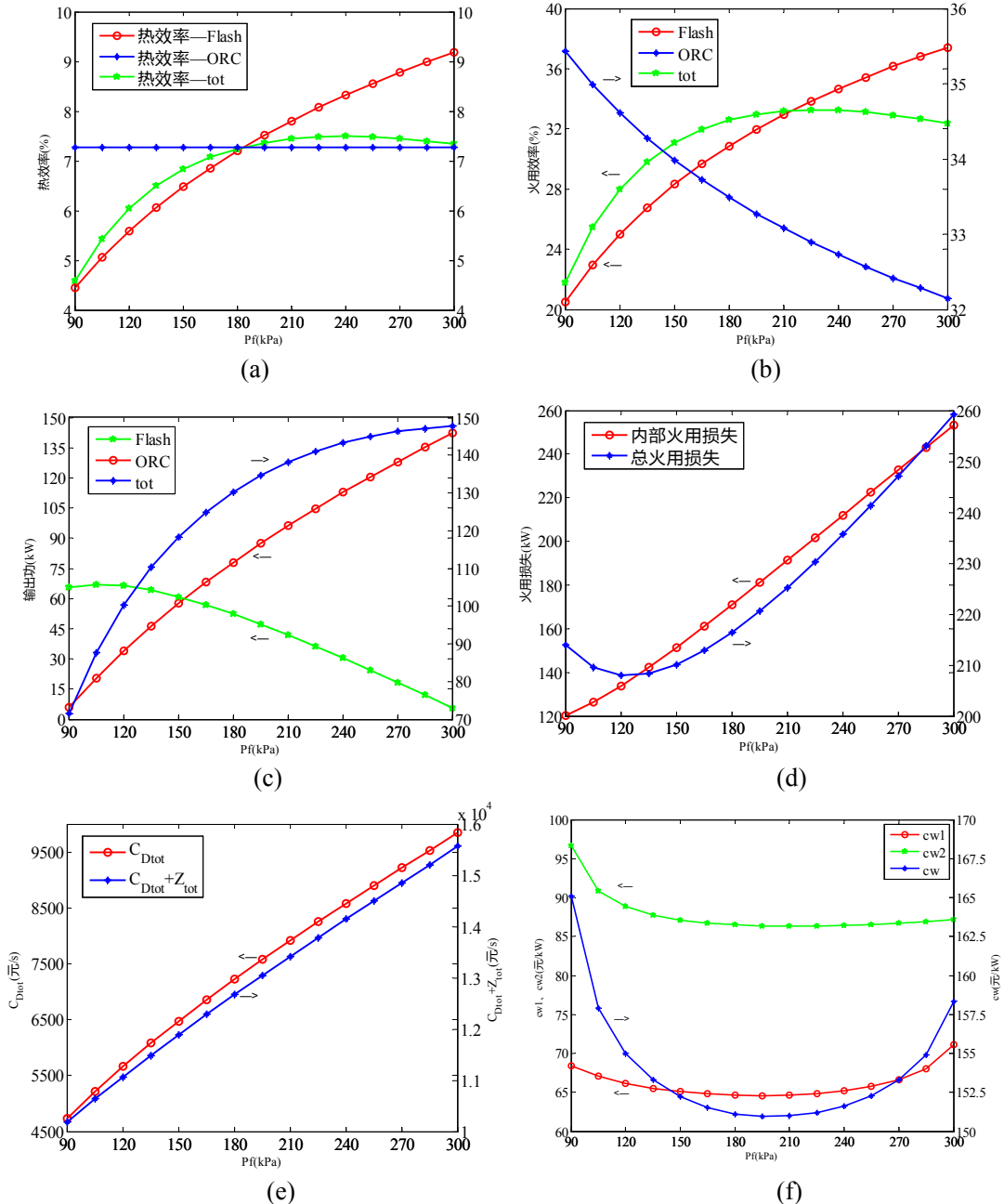


图 3 闪蒸压力对循环性能的影响

由 3-a 图可以看出，在双工质循环确定下，当闪蒸压力从 90kPa 增加到 300kPa 时，闪蒸循环热效率持续增加，但增加速率减小；双工质循环的蒸发温度不变，循环热效率保持不变，为 7.29%；而联合系统热效率出现先增加，后又减小的趋势；同时，可以发现在闪蒸压力约为 185kPa 时，以上三个循环的热效率相等，均为 7.24%。由 3-b 图可以看出，闪蒸循环焓效率与联合系统总焓效率变化规律与对应热效率变化规律相似，但双工质循环焓效率随闪蒸压力的增大有明显的下降。3-c 图显示了各循环输出功随闪蒸压力的变化规律，闪蒸循环输出功随闪蒸压力的增加而减小，主要是因为闪蒸压力升高，闪蒸蒸汽流量减小，循环输出功减小；双工质循环输出功增加；联合系统总输出

功增加,但增加趋势逐渐减小。由 3-d 图可以看出,内部焓损失随着闪蒸压力的增加而基本呈线性增加,系统总焓损失先减小后增大。由 3-e 图可以看出,随着闪蒸压力的增加,联合系统总焓损失成本率与都增大。由 3-f 图可以看出,随着闪蒸压力增加,闪蒸循环单位输出功成本先减小后增大,但整体变化不大,在 10 元/kW 范围内变化;双工质循环单位输出功成本开始时有较为明显的减小,后趋于平稳;联合系统单位输出功成本先减小后增加,当闪蒸压力为 195kPa 时,有最小值为 150.95 元/GJ。

当蒸发温度不变、闪蒸压力变化时,对各个循环的热力学性能和经济学性能有明显影响。从焓经济学角度分析,在本联合系统运行条件下,闪蒸压力为 195kPa 时达到最佳工况。

4.1.2 蒸发温度变化对联合系统性能的影响

图 4 显示了当闪蒸压力不变,闪蒸-双工质联合发电系统热力学和焓经济学参数随蒸发温度变化曲线。

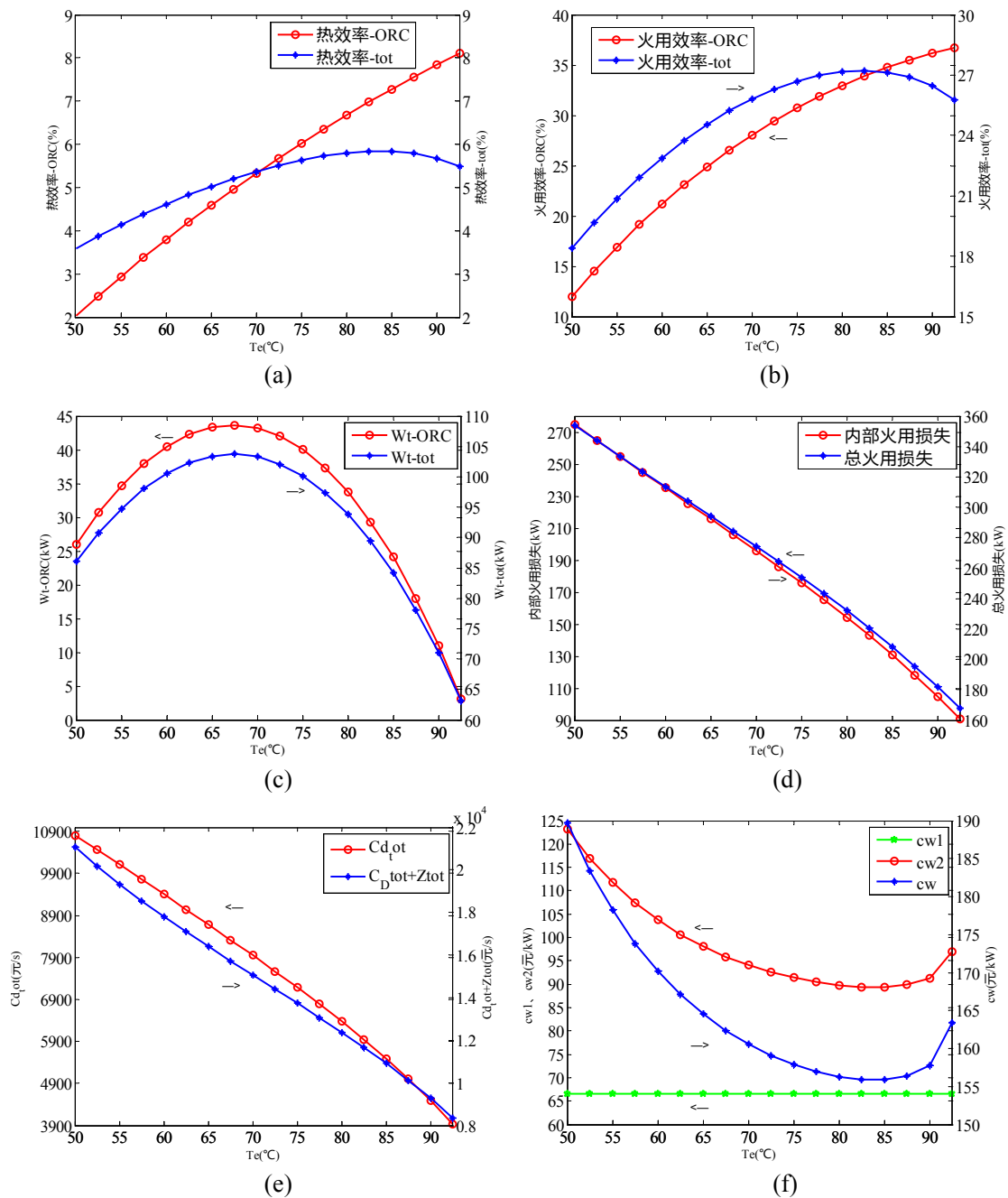


图 4 蒸发温度对循环性能的影响

由 4-a 图可以看出,在闪蒸压力确定下,当蒸发温度从 50 °C 增加到 92.5 °C 时,联合系统热效率出现先增加后减小的趋势,在蒸发温度为 82.5 °C 时,联合系统热效率达到最大,为 5.84%。4-b 图可

可以看出，以上三个循环炯效率变化规律与热效率变化规律相似，同时，发现当蒸发温度为 82.5℃时，联合系统炯效率有最大值，为 27.23%，闪蒸循环炯效率保持不变，为 24.29%。由 4-c 图可以看出，联合系统与双工质循环的净输出功随蒸发温度的变化趋势相同，随蒸发温度的增加，先增大后减小，当蒸发温度为 67.5℃时，联合系统总输出净功有最大值，为 111.24kW，其中闪蒸循环净输出功保持不变，为 66.74kW。4-d 图显示了系统内部炯损失和总炯损失随蒸发温度的变化规律，两者都随蒸发温度的增加而减小。由 4-e 图可以看出，随着蒸发温度的增加，联合系统总炯损失成本率与都增大。由 4-f 图可以看出，随着蒸发温度增加，闪蒸循环单位输出功成本不变，为 66.47 元/kW，双工质循环和联合系统的单位输出功成本和随蒸发温度的升高，先增加后减小，当蒸发温度为 85℃时，和同时拥有最小值，分别为 89.43 元/kW 和 155.90 元/kW。

当闪蒸压力不变，蒸发温度变化时，闪蒸循环的热力学性能和经济学性能几乎不受影响，但对双工质循环的热力学性能和经济学性能有明显影响。从炯经济学角度分析，在本联合系统运行条件下，蒸发温度为 85℃时达到最佳工况。

对联合系统闪蒸压力和蒸发温度两个参数进行优化，当闪蒸温度为 195kPa、蒸发温度为 85℃时为最佳运行参数，此时，联合系统的单位输出功成本最小。

4.2 系统优化分析

在参数优化中，对系统闪蒸压力、蒸发温度等关键参数进行优化，得出最优工况。在闪蒸压力为 195kPa、蒸发温度为 85℃工况下，通过分析比较系统关键设备的炯损失、炯损失成本、炯经济系数，可对设备进行优化设计。

表 8 系统各状态点的热力学参数

状态点	T (oC)	h (kJ/ kg)	s (kJ/(kg · K))	(kJ/k g)		P (kPa)
1	135.00	567.74	1.6872	76.05	528.09	320
2	119.41	567.74	1.6908	74.99	520.78	195
3	119.41	2705.07	7.1353	616.24	129.01	195
4	119.41	501.31	1.5216	58.17	391.78	195
5	69.10	2467.58	7.3088	327.90	68.64	30
6	69.10	289.27	0.9441	15.42	3.23	30
7	95.00	39.09	1.2504	34.44	231.94	320
8	84.44	353.88	1.1286	25.92	174.58	320
o1	85.00	465.02	1.7827	39.80	186.59	892.78
o2	52.60	446.38	1.7971	16.94	79.41	250.46
o4	40.00	252.57	1.1790	4.33	20.30	250.46
o5	40.25	253.19	1.1809	4.37	20.50	892.78
o6	85.00	316.71	1.3686	12.89	60.41	892.78

根据系统热力学模型和炯经济学模型计算系统内各个状态点热力学参数，具体参数值见表 8，图 5 为系统各状态点的炯经济参数。

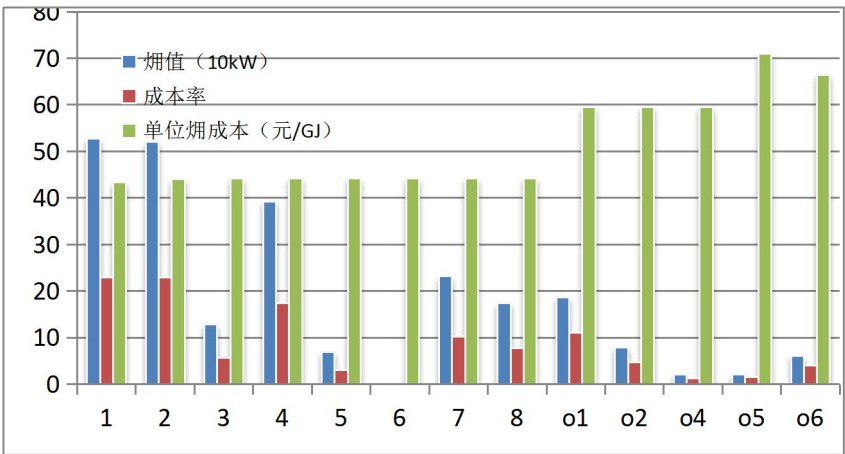


图 5 系统各状态点的主要焓经济参数柱状图
为分析联合系统中各重要设备内热力学性能和焓经济性能，其性能参数如图 6 所示。

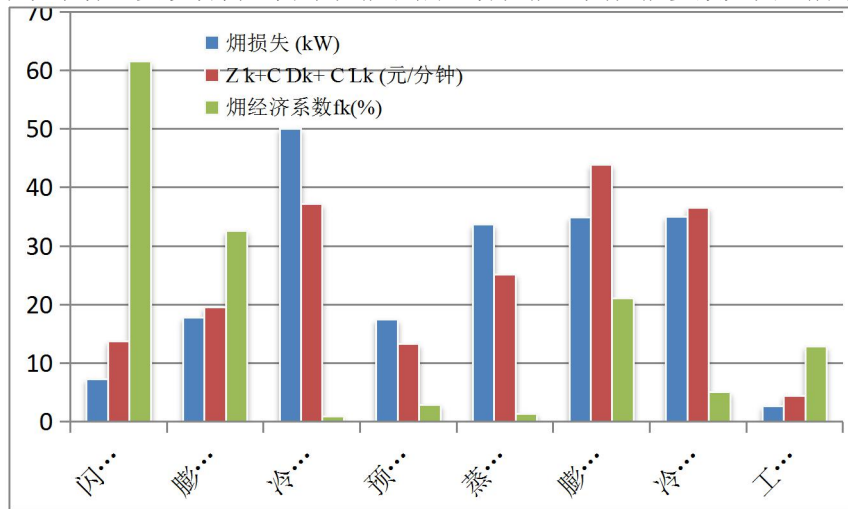


图 6 联合系统各设备的主要性能参数柱状图

在循环中，是重要的焓经济参数，其中在冷凝器和膨胀机 2（双工质循环膨胀机）中数值较大，因此这些设备要考虑对其进行优化设计，以减少其成本。工质泵的值最低，所以工质泵的参数变化对系统焓经济性能影响较小。冷凝器和蒸发器的焓经济系数较小，但其焓损失率较其他设备偏高，说明设备投资成本较低，系统运行焓损失较大，可增加设备投资成本，比如增加换热面积，降低系统运行成本投资。而闪蒸器和膨胀机的焓经济系数较大，说明设备成本投资占主要比重，可从设备投资成本角度进行优化设计。

4.3 敏感性分析

在工业生产过程中，生产工艺不同，蒸汽冷凝水的成本不同，因此有必要分析单位热水焓成本对系统的影响。针对单位余热焓成本对单位输出成本的敏感性分析，分析这一不确定因素对焓经济性能的影响。

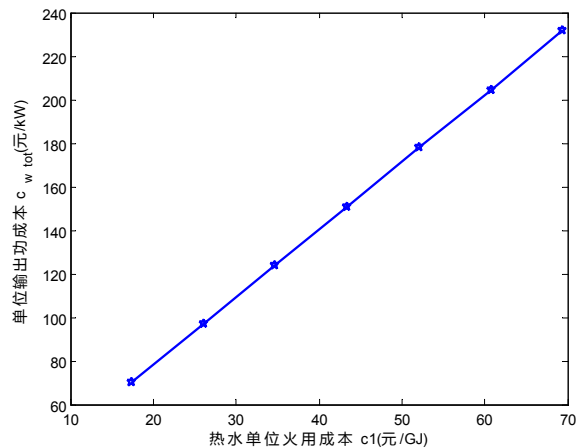


图 7 热水单位焓成本对单位输出功成本的敏感性曲线

图 7 为热水单位焓成本对单位输出功成本的敏感性分析曲线，从图中可以看出，随着给定余热单位焓成本的增加，单位输出功成本呈线性增加。可见，发电成本对余热单位焓成本的变化较为敏感，因此在使用不同生产工艺的余热热水时，要对其成本作准确估量。

5 结论

本文利用闪蒸-双工质联合发电循环回收工业过程热水型余热，通过焓经济方法对联合发电循环进行参数优化与分析形成结论如下：

(1) 在热水进口温度为 135℃、闪蒸循环冷凝压力为 30kPa、双工质循环冷凝温度 40℃工况下，随着闪蒸压力的增加，单位输出功成本先减小后增大，在 195kPa 时存在最小值。随着蒸发温度的升

高, 单位输出功成本先减小后增加, 在 85℃ 时存在最小值。当闪蒸压力为 195kPa, 最佳蒸发温度为 85℃ 时, 联合系统单位输出功成本最低。

(2) 在联合发电系统中冷凝器和双工质循环膨胀机中火用经济投资较大, 可对其进行优化设计。冷凝器和蒸发器的炯经济系数较小, 但其炯损失率较其他设备高, 可优化冷凝器和蒸发器结构, 提高系统热力性能。不同工业工艺余热单位成本对联合发电系统火用经济性能的影响较大, 近似成线性关系。

致谢

感谢国家自然科学基金 (No. 51406212) 和天津市科技支撑项目 (No. 14ZCDGSF00035) 的资助。

参考文献

- [1] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究[J]. 科学通报, 2016, 61(17): 1856-1857.
- [2] 王洪昌, 杨向东. 蒸汽凝结水的回收利用[J]. 山东化工, 2016, 45(9): 142-145.
- [3] 杨宇程, 吴冬蕾. 凝结水高温回收利用技术深探讨[J]. 化工进展, 2011, 30, 增刊: 836-843.
- [4] 张留霞, 李鸿奎. 某医院蒸汽凝结水热回收利用设计探讨[J]. 给水排水, 2011, 37(4): 73-76.
- [5] A. D. Pasek, T. A. Fauzi Soelaiman, C. Gunawan, Thermodynamics study of flash - binary cycle in geothermal power plant. Renewable and Sustainable Energy Reviews [J]. 2011, 15: 5218 - 5223.
- [6] Exergetic cost evaluation of hydrogen production flash-binary geothermal power plant[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40: 14021-14030.
- [7] A. Baghernejad, M. Yaghoubi. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52: 2193 - 2203.
- [8] Yajing Zhao, Jiangfeng Wang. Exergoeconomic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power system[J]. Applied Energy, 2016, 179: 159-170.

论烧结球团用链板机的应用

张经纬^[2]

(三河市北方冶金机械有限公司)

摘要：热链板机是烧结、球团运输红矿的重要设备,其运行状况的好坏直接影响系统作业率。通过生产实践中不断提升设计理念、管控制造质量,在冶金用高温链板机上采用自动调心纠偏、双圆弧迷宫式搭接及高强链条等综合技术,使之更好的适应了各种工况条件,满足生产需求

关键词：链板机 作业率 提升

Abstract: chain plate machine is an important equipment for sintering and pellet transport of red ore, and its operating conditions have a direct impact on the operating rate of the system. Through the production practice and constantly improve the design, manufacturing quality control, in the metallurgical high temperature chain board with automatic correction, maze hook slot and high strength chain lap and other integrated technologies, to better adapt to a variety of working conditions, to meet production needs

Key words: chain plate machine operating rate

1、概况

热链板式输送机是输送机里特殊的一种,广泛用于矿山、冶金和水泥等行业,是原料处理或连续生产过程中不可缺少的设备,对输送大块、尖锐以及高温的物料尤为适宜。一般认为具有结构简单、运行可靠、使用寿命长,安装维修简单等特点。而生产实践中存在的问题一是长期承受脉动载荷和应力集中作用产生疲劳破坏;其次连接销或螺栓松动脱落,销轴易倾斜而未能及时发现修复;三是缺乏有效的润滑措施,尤其高温条件下稀油炭化,以致销轴、滚轮和链板很快磨损。往往链板机处于恶劣工况条件下进行工作,其表现是磨损、卡链、掉道甚至断链等现象。由于链板机对系统作业率影响很大,特别在设备使用中后期。因此,链板机如何适应高节奏生产需求摆在面前。

2、设备设计及制造理念的提升

“三河北方冶金机械有限公司(原河北三河链条总厂)”做为原冶金部定点供应商在热链板机生产制造中,同样也经历成功失败与荣辱。五十余年的历经,促使了设计理念及装备水平的提升。在热链板机制造方面,尤其是冶金高温重型链板承担着恶劣工况条件的高负荷运行,其故障率及维修、维护工作直接影响业主利益和企业品牌。在产品产业化应用中设计及材料、制造装备提升愈发重要。在生产实践中的几点做法也取得明显效果。

三河北方冶金热链板机经历了滚动轮到固定轮而后再回归新型滚轮移动式的过程,一般链板机为“水平+倾斜”布置,整机由头轮装置、运行链板与料斗装配部分、行走轮、尾轮及张紧装置、机架和驱动装置等组成。固定式轮式如图1所示。传统思维上对固定轮上的运行的料斗、链条进行了刚性硬约束,而受脉动载荷、尾部涨紧差异及热膨胀作用,链条与滚轮间产生不同程度的摩擦及偏移,长时间重载运行链条在固定轮运行极易发生跑偏掉道现象,导致频繁停机事故,且易损件多,维护率高。新型滚轮移动运行方式在设计理念进行了提升。一是行走轮位于斗体两侧,料斗隔热固定连接,车轮圆周面采用锥面设计,轨道配合倾斜安装,使之始终存在一定的向心力,实现自动调心纠偏;二是尾部涨紧采用悬空设计,依靠自身重力作用实现自由拉紧与膨胀,消除弹簧涨力对链条的外力作用。当然,新材料及制作精度的提高也是不可缺少的不要条件。

^[2] 作者: 张经纬, 三河市北方冶金机械有限公司 总经理; 电话: 13932619008 15100721888
邮箱: 202.66.66@163.com

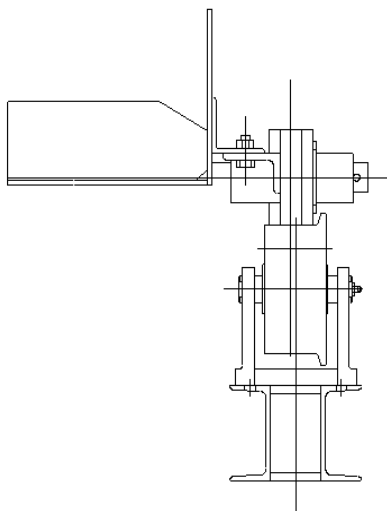


图1 固定式链板机运行方式（一）

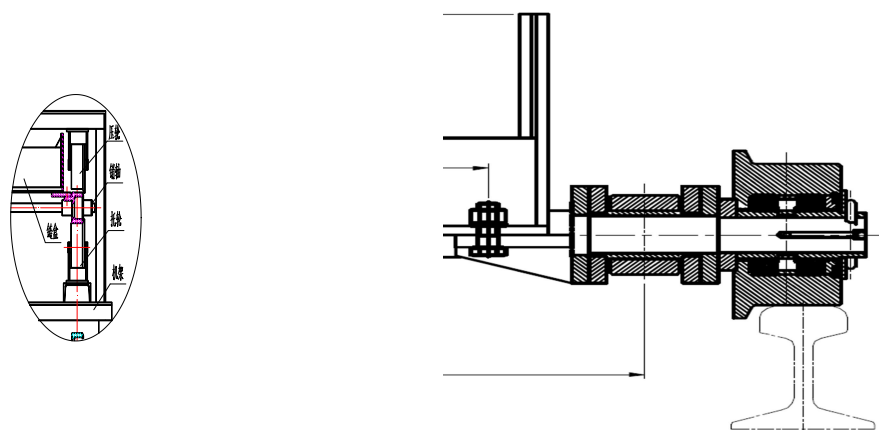


图2 新型热链板机运行结构方式的演变（二）

在现实生产过程中根据现场布置，可设计 0° — 80° 不同角度的热链板机改造工程。该设备可输送 200° — 800° 高温物料。适合在高温等恶劣的工作环境中使用。新型热链板机在使用中链条无磨损，同时维护保养方便。在老式链板机输送料斗支间漏料现象司空见惯。此为新型结构斗体底板采用双圆弧迷宫式搭接设计，行至任何位置不会发生漏料卡料现象。如图3所示。

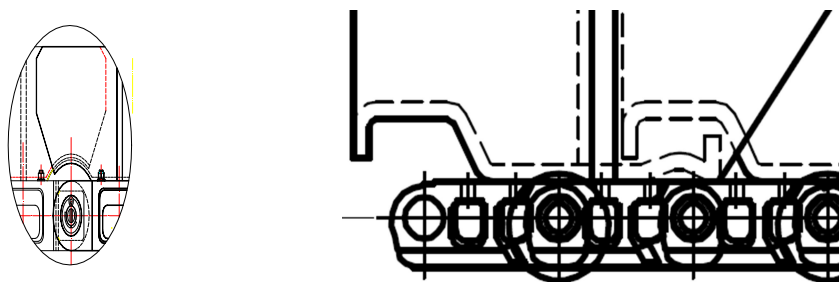


图3 新型热链板机运行结构方式的演变（三）

热链板机的核心工艺在于链条、料斗与传动装置，在实际使用中，损坏形式主要为严重磨损、断裂、拉开，其产生的原因主要为：

- 1)、长期承受脉动载荷，疲劳破坏；
- 2)、连接销或螺栓松动脱落，未能及时发现补充，致使链条受力不均或拉托；
- 3)、对于链条，单边磨损更为严重，如不及时更换，容易发生断裂；
- 4)、卡链后，会产生很大的动载荷和冲击载荷，导致传送链条运动速度的瞬时巨大波动，使传送链条运行不平稳，从而加速接链环磨损或断裂；
- 5)、生产制造质量较差，耐磨性差或韧性差硬度低，或者出现应力集中产生疲劳裂纹，导致强度不足。

热链板输送机的连接环损坏主要是以上五个原因造成的，这要求企业在使用链板输送机时需要定期做好设备的检修工作，发现问题立即进行处理。在生产实践中采用高强度（坦克链），使之位于料斗下方，不与滚轮产生磨损，其具有抗拉强度大，不会拉断、延伸，同时免维护，在重要部位运行中保证零事故率。

传动装置也可采用变频无级调速电机，其传动平稳、可靠，调速方便，用户可根据来料量大小调节转速。也可根据用户要求配变频调速装置，增减电机转速，调节输送量。而合理的动力传输装置可以避免动套、静套及头尾链轮的严重磨损和链节啃头尾轮齿面等现象。为了适应特殊恶劣环境而配套的高强度重载传动用板式链，应采用不同的热处理工艺参数以期提高链板服役寿命。实践中链板材质合金钢制作而成，且经过表面光饰以及内孔挤压修整也取得很好的使用效果。

经过数十年的积累和发展，热板链式输送机做为一种成熟产品广泛应用于矿山、冶金和水泥等行业。

- 1)、用链条为牵引元件，不仅强度大、效率高、工作可靠，且可作为长距离输送，输送能力大，一些裙边、斗槽式输送机的输送能力达每小时1000t以上；
- 2)、与带式输送机相比，承托式输送机可在较大倾角和较小弯曲半径条件下输送物料。板式输送机的倾角可达 $30^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，弯曲半径一般约为 $10m \sim 25m$ ；
- 3)、热链板机适应性强，用于不带粘性的粒状、块状等散装物料的输送，尤其适用于块状较大，且具有锋利棱角，灼热的（如 $200^{\circ} \sim 800^{\circ}$ 烧结矿、水泥熟料等）物料的输送，而且在输送过程中可同时完成冷却、清洗等工艺过程；

3、结论

技术创新使得热链板机输送设备得到更大范围推广应用。当然在生产运行中日常检查和维护与润滑必不可少。设计理念及新材料、制造装备水平提升，使产品更具耐高温、低噪音、高载量、高寿命、低磨损、无扬尘的特点，这样就大幅减少了维护的成本。

热管技术在化工余热回收中的应用

马永锡

拜耳技术工程（上海）有限公司 上海 201507

摘要：本文通过实例介绍了多种热管式换热器在化工领域余热回收中的应用，回收废烟气中的热量来预热空气、水，以及生产蒸汽；分析了热管换热器使用中的问题，并提出了解决方法；此外，还首次提出了利用密闭腔式换热器来回收废液及废蒸汽中低品位热量的可行性。这对于化工企业的节能降耗具有指导意义。

关键词：热管；换热器；余热回收；节能降耗

Heat Pipe Technology Application in Chemical Industry Waste Heat Recovery

MA Yong-Xi

Bayer Technology and Engineering (Shanghai) Co. Ltd, Shanghai, 201507

Abstract: In this paper, several different kinds of heat pipe heat exchangers in waste heat recovery application are described in practical examples. The problems and measures in application are also pointed out. In addition, the sealed chamber heat exchanger has been introduced to recovery the energy in waste liquid and vapor originally. The presented equipment and methods will guild factory to save energy and to lower energy consumption.

Keywords: heat pipe; heat exchanger; waste heat recovery, energy saving

引言

热管技术是一种密闭腔内的相变传热技术^[1]。我国热管的工业应用研究开发始于 1976 年，经过三年的开发研究，首先解决了工业制造技术。即：碳钢—水相容性技术；高真空下的管子充液技术；管子封口技术；冷热气流分隔等技术。1980 年，我国第一台热管换热器在南京投入工业试运行，同年 12 月通过江苏省科委鉴定；1982 年 7 月，我国第一台碳钢—水热管余热锅炉在如东化肥厂运行成功并通过鉴定；同年，我国第一台用于高炉热风炉余热回收的碳钢—水空气预热器在马鞍山第一炼铁厂运行成功，至此奠定了热管技术在我国工业应用中的基础^[2]。

时至今日，热管技术工业化应用及研究发展迅速，可谓遍地开花，航天、核电、新能源的开发、民用节能、电子器件冷却、化工、动力、冶金、陶瓷等行业都能找到其踪影，可参见近几届的全国热管会议论文集及文献[3]。

热管技术的应用分为两大类：一是以热管为单元构成的换热器，二是按热管工作原理运行的整体设备。在化工行业中的应用的最为成功，也最具代表性当属碳钢（不锈钢）—水重力式热管换热器，有整体式和分离式两种主要结构型式，其详细结构型式及设计计算可参见文献[2]。本文将重点介绍热管技术及设备在余热回收方面应用。

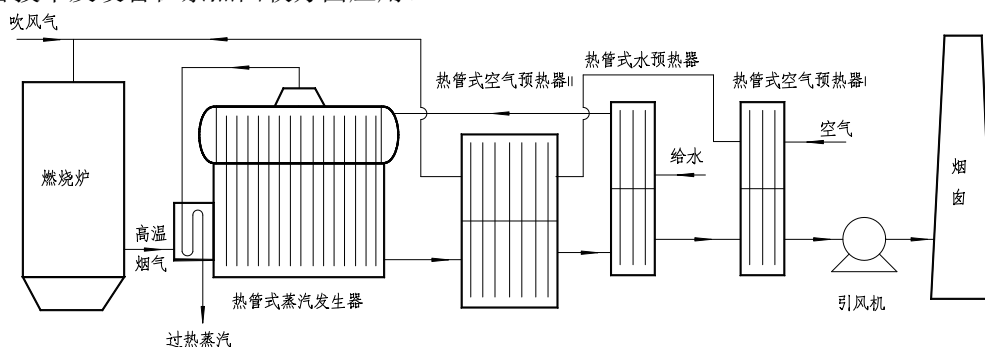


图 1 烟气余热回收流程

在制酸行业中,由于炉气中含有较高浓度的 SO_2 、 SO_3 , 或 HCl , 或 NO_2 气体, 一旦与水或水蒸气接触便具有强烈的腐蚀性。这便对设备提出了特殊的要求, 其必须具有高度的可靠性、安全性和防止低温露点腐蚀的能力。热管式换热器因具有传热效率高、结构紧凑, 不会发生漏风现象, 抗露点腐蚀等优点, 正逐渐替代传统的列管式和回转式换热器。这也是热管式换热器在该领域内应用广泛的一个主要原因。

1.1 空气预热器

一段转化炉是 30 万吨/年大型合成氨厂的关键设备。其排出烟气温度大多在 300°C 左右。烟气体量达 $140000 \sim 240000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。如果将其降温到 140°C 排空, 则回收的热量可达 $8400 \sim 15000 \text{ kW}$ 。回收这部分热量最合理的用途是加热助燃空气。资料表明^[4]: 回转式空气预热器改为热管式空气预热器后有如下优点: 免去了回转式电机的动力消耗; 热回收效率提高了 18.3%; 减少了维修工作量。

图 2 为某厂的热管空气预热器, a 为换热器内部简图, b 为实物照片, 采用的是分离式结构型式, 连接管线达 50m, 实现远程传热。此外该型式换热器还可实现烟气同时与多种气体进行热交换, 除了加热空气外, 还可加热其他工艺气体, 从而实现废热利用的最大化。

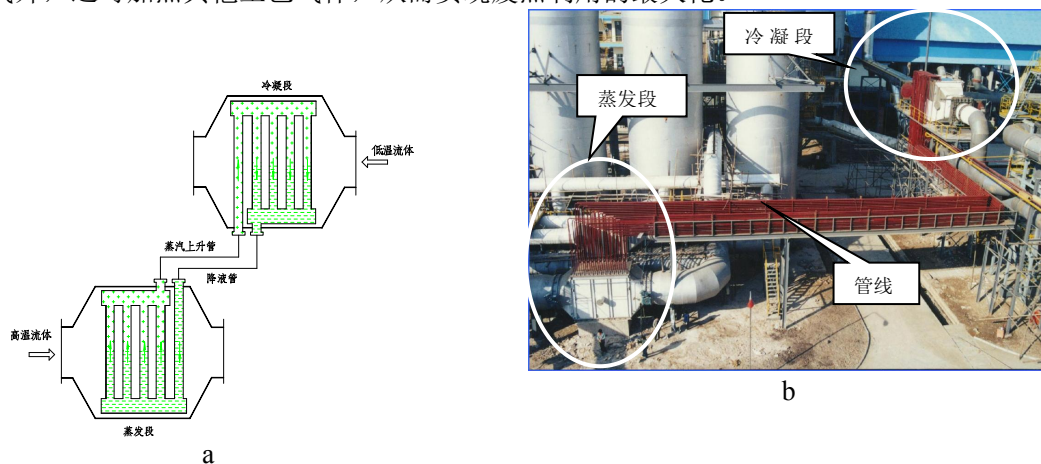


图 2 分离式热管空气预热器

1.2 水预热器

热管水预热器, 或称热管省煤器, 多用于回收低温烟气余热来预热除氧器给水, 或锅炉给水。水侧通常采用套管联箱结构型式, 可以承受较高的工作压力, 如图 3a 所示。图 3b 是为某硫酸厂设计的热管省煤器, 配备于年产 15 万吨硫酸装置, 用于锅炉给水预热。烟气流量为 $37000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 进出口温度 $340/160^\circ\text{C}$, 加水量为 25 吨/小时, 回收热量 2600 kW 。该换热器倾斜安装, 烟气自上而下冲刷热管, 从而避免积灰现象, 同时也不影响热管工作。还有一种常用热管省煤器为水平夹套式结构, 如图 3c 所示, 采用的是径向偏心热管, 其详细结构及应用可参见文献[5]。

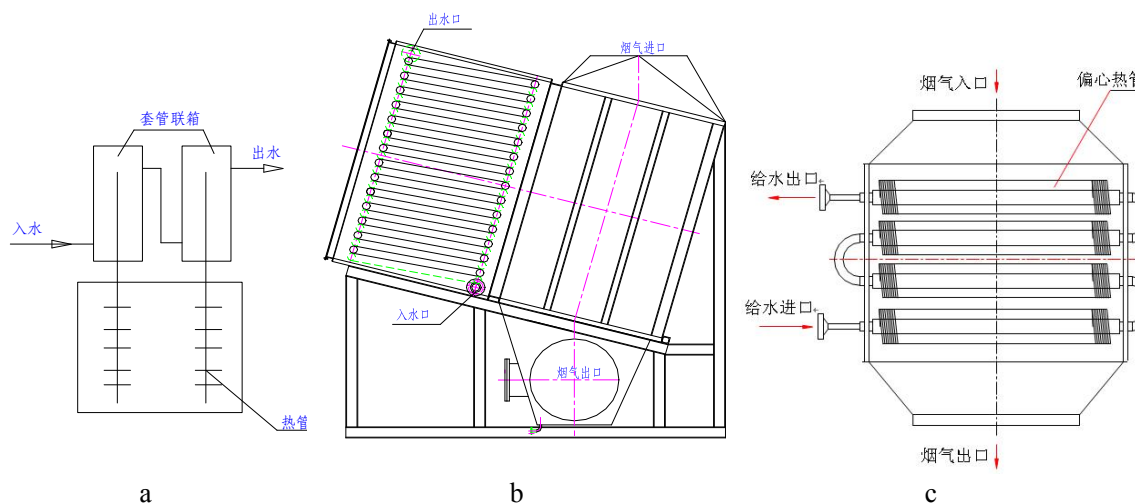


图 3 热管省煤器

1.3 蒸汽发生器

热管蒸汽发生器, 又称热管余热锅炉, 兼有水管锅炉和火管锅炉的优点, 启动迅速。其结构可

以是热管冷端直接插入汽包，也可以是前面介绍的夹套联箱与汽包连通的结构型式，如图 4a 所示。年产 10 万吨硫酸的某硫酸厂，采用了一台热管式蒸汽发生器用以回收 SO_2 炉气余热，产生 2.5MPa，9.50 吨/小时饱和蒸汽，回收热量 6497.5kW，如图 4b 所示。炉气经过热管蒸汽发生器后降为 355℃ 进入电除尘室。图 4a 中隔板的下部为热管的吸热段，焊有螺旋翅片。上部为热管的放热段，采用水夹套结构，经集箱集汽后经上升管与汽包连接。冷热侧由隔板完全分开，即使出现有个别热管磨损破坏，也只是热管内部少量工作流体流入烟道，不会影响正常生产，避免了大量炉水向烟道泄漏而导致停产。各热管通过控制加热段传热面积使管壁温度 $>230^\circ\text{C}$ ，可有效地防止露点腐蚀。如每吨蒸汽按 60 元计，年运行 7200 小时效益可达 430 余万元，设备投资可在一年内收回。

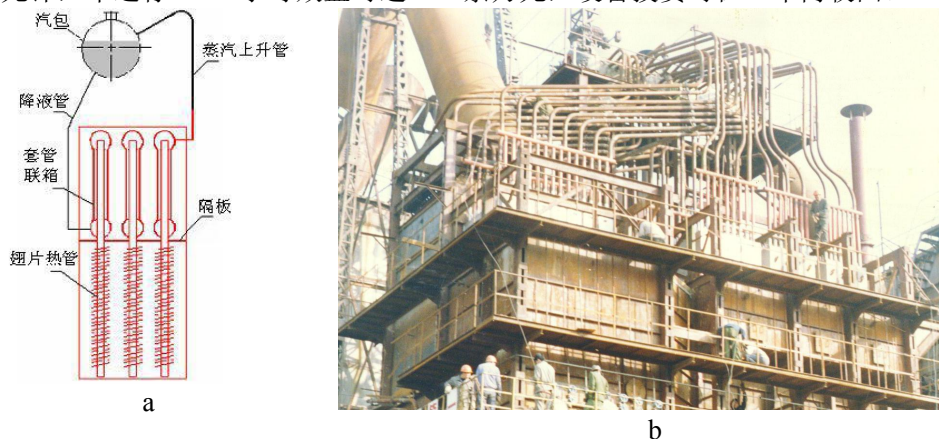


图 4 热管式蒸汽发生器

影响前面提及的热管换热器性能和寿命的因素有：低温酸露点腐蚀、积灰、磨损，以及热管内部产生不凝性气体，低温酸露点腐蚀和产生不凝性气体往往是造成热管换热器失效的主要原因。因此，在热管换热器制造和使用中应注意如下问题：

在高温条件下，碳钢—水热管内部 Fe 与 H_2O 反应会产生不凝性氢气，直接导致热管性能降低。在无防范条件下，通常热管换热器工作一两年后，其性能要下降 30%—50%。为此可采取：热管内表面化学处理形成钝化膜；水中加入缓蚀剂；热管顶部加装排气装置，定期排气；热管内顶部悬挂 H_2 吸收剂等改善措施；

- (1) 减少烟气中酸性气体的含量，降低酸露点温度；
- (2) 提高排烟温度，避开酸露点温度，实践经验表明，排烟温度以高于 140°C 为宜；
- (3) 对烟气除尘；安排合理的烟气流速，流速太低容易积灰，太高又会对热管产生磨损，以 10m/s 为宜；
- (4) 烟气尽量自上而下流动，对于水平流向，应对装置定期除灰，以减少积灰现象；
- (5) 对热管换热器进行定期评估，方法可参见文献[6]。

2 废液/汽余热回收

由于废液及废汽量小、不集中以及热值低等因素，目前在化工企业中通常不回收此类低品位能源。此外，传统的管壳式换热器，由于传热温差较小，效率低下，而无用武之地。

密闭腔式换热器是热管技术衍生的一种新型管壳式换热器，如图 5 所示，其他结构型式参见文献[7]。密闭腔由两端孔板与筒体壳体组成，内没有多余的部件，故而结构简单；同时冷热流体均走管内，可以承受高压而不至于增加壳体厚度，达到节约成本的目的；真空密闭腔内为相变传热，因而冷、热流体管束外侧具有较高的传热系数，通过合理对管箱分程设置冷、热流体的流速，或者采取管子内侧强化传热措施，即可实现整体换热器的高效传热；即使热流体温度在三、四十度，也会使密闭腔内的介质汽化进行工作。工作时，密闭腔内工作介质处于饱和状态，并维持一个稳定的压力和温度，当调整冷热流体任一方的参数，腔内的工作介质的温度和压力回迅速进行相应调整，从而方便控制另一侧的出口温度。总的说来，该换热器具有结构简单、成本低、热相应快、热控方便、易于清洗、传热效率高，节能效果显著等优点。

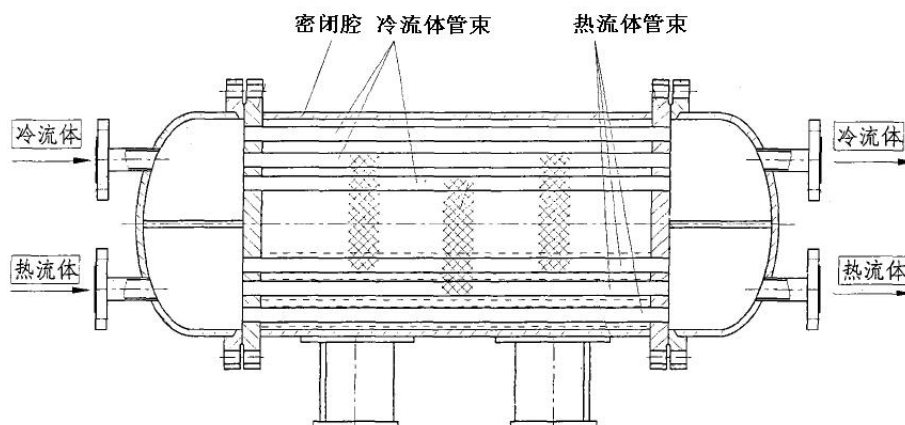


图5 密闭腔式换热器

该换热器结构可大可小，对于小流量废液或废汽，可将其作为小型管道设备来使用，直接加热附近的其它低温流体介质，或者加热水作为伴热用于管道或设备的保温，以及其他用途。对于用于废汽回收，热流体管道可以加粗，内部放置导流片，来增加蒸汽的湍流效果。

该型式换热器还未在工程实践中应用，处于试验和规范设计计算阶段。除了用于废液/汽余热回收外，还可用于：化工单元操作中的液-液换热设备；管式反应器，可以精确地控制反应管内的工作温度；电加热器，以电为热源加热液体介质。

3 结论

通过具体的实例介绍了多种热管换热器在化工废气余热回收中的经典应用，并详细介绍了密闭腔式换热器及其回收废液和废汽中低品位热量的可行性。

在整个社会倡导节能降耗减排的今天，为热管技术及设备的推广应用铺平了道路。在化工领域中，除了应用于余热回收，热管技术还将渗透到化工单元操作中换热、搅拌、反应、分离等多个环节，从根本上提高能源利用率，改善产品质量。

参 考 文 献

- [1]Cotter T P. Theory of heat pipes[R]. Los Alamos Scientific Lab. Report No. LA-3246-MS. 1965
- [2]庄骏，张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京：化学工业出版社，2000. 2-4
- [3]马永锡，张红. 电子器件发热与冷却技术[J]. 化工进展，2006，25(6)：670-674.
- [4]李纲，陈式荣. 热管式空气预热器在我厂的应用[D]. 西南大化肥第5届年会，1994. 10
- [5]牟楷，王虹. 硫磺制酸中的中、低温余热的利用-径向热管省煤器的研究、开发和应用[J]. 磷肥与复肥，2003，18(6)：39-42.
- [6]马永锡，储小燕，张红. 在役热管有效性模糊评估技术的研究[J]. 石油化工设备，2005，34(4)：6-9.
- [7]马永锡，密闭腔式换热器[P]，中国，CN200710039328.4，2008.8.

烧结余热发电或拖动系统工程设计优化措施

刘美丽 邓丹 靳忠孝 窦艳杰

(西安陕鼓动力股份有限公司 工程设计院, 陕西 西安 710075)

摘要: 目前烧结余热回收在钢铁企业全面推广和应用, 使烧结余热发电和拖动技术快速提升, 烧结余热回收工程项目投产后的实际运行效果倍受关注。本文从工程设计角度, 结合多年的工程实践经验, 以最大限度的利用烧结余热、提高的余热发电效率、降低的厂自用电和最低的建设投资为设计优化原则, 总结烧结余热发电工程设计的优化措施。

关键词: 烧结余热发电和拖动、工程设计、优化措施

Measures to optimize the engineering design of the sintering waste heat power generation & drive system

LIU Mei li Deng Dan

(Xi'an Shangu Power Co. Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: At present, With the comprehensive promotion and application of the sintering waste heat recovery and utilization in iron and steel enterprise, the sintering waste heat power generation and drive technology has been rapid, the actual effect of sintering waste heat recovery project after the operation has been getting more attention. In this paper, from the angle of engineering design, combined with years of engineering experience, For the design optimization principle of maximize the use of sintering waste heat,, improve the efficiency of waste heat power generation and reduce the auxiliary power plant. summarizes the measures to optimize the sintering waste heat power generation project design.

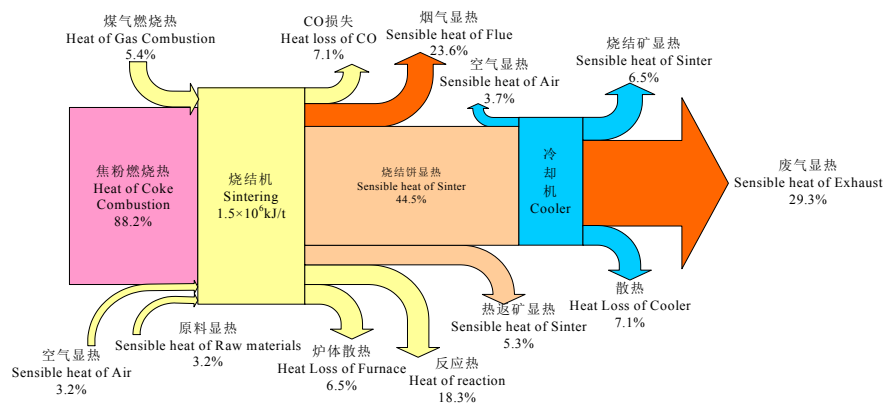
Keyword: Sintering waste heat power generation engineering design optimization measures

前言

钢铁工业的能源消耗量约占全国工业总能耗的 15%, 在钢铁企业中, 烧结工序能耗占吨钢能耗的 10~20%, 仅次于炼铁工序。我国烧结生产的能耗指标和先进国家相比, 差距较大, 每吨烧结矿的平均能耗要高出 20kg 标煤。

从图 1 典型的烧结厂热平衡能流图可以看出, 烧结烟气平均温度一般不超过 150℃, 所含显热约占总热量的 23.6%; 冷却机废气温度在 100℃~400℃之间变化, 其显热约占总热量的 29.3%; 烧结生产放散到大气中的气体显热占烧结总热耗的 50%左右, 所以烧结工序节能潜力很大。

图 1 典型的烧结厂热平衡能流图



马钢在 2004 年引进日本川崎核心技术及关键设备建立了国内第一套烧结环冷机废气余热发电

机组，随后国内其他钢铁企业开展烧结冷却机余热发电技术的探索研究，由于起步晚，工程设计人员对烧结余热特点认识不足，依据小型火力发电站的设计要求与经验进行设计，并没有针对我国烧结余热特点进行优化，有些烧结余热的发电效果很好，有些没有达到预期目标，发电量较低。造成这种现象的原因是多方面的，有设计、安装和运行操作等多种组合因素。本文根据多年余热发电工程设计和总承包经验，针对我国烧结余热特点，总结出以最大程度利用烧结废气余热、提高余热发电系统效率、降低系统自身消耗和最低的建设投资为设计优化原则，对烧结余热回收工程设计应采用的关键技术措施进行了分析和总结，供烧结余热发电工程设计人员借鉴和参考。

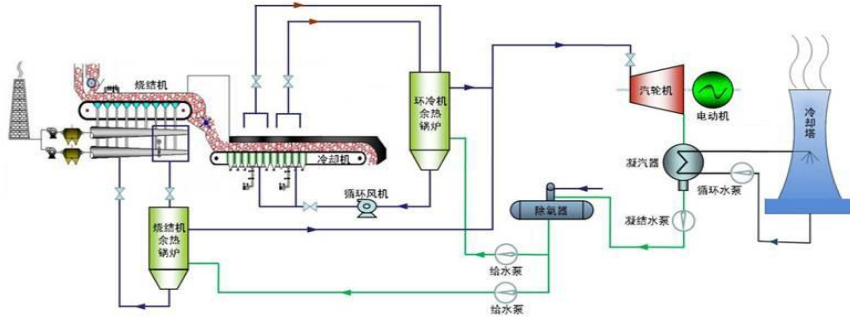


图2 烧结余热发电的系统流程图

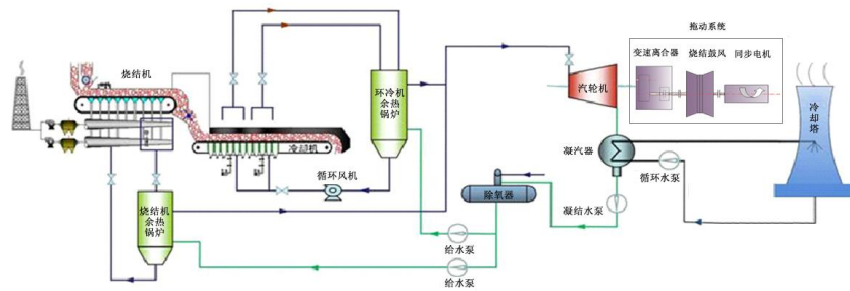


图3 烧结余热拖动的系统流程图

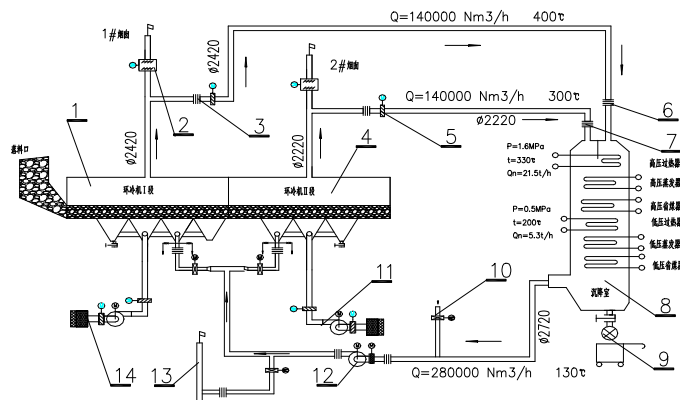


图4 烧结环冷机余热利用烟风流程图

1-环冷机 I 段；2-烟道阀；3-I 段进口阀；4-环冷机 II 段；5- II 段进口阀；6-膨胀节 I；7-膨胀节 II

8-余热锅炉；9-落灰斗；10-补冷风口；11-2#环冷鼓风机；12-循环风机；13-烟囱；14-1#环冷鼓风机

1. 烧结合余热发电或拖动系统流程

烧结合余热发电和拖动系统流程如图 2、图 3，包括环冷机余热利用烟气系统、汽轮发电机组或拖动系统、余热锅炉汽水系统、电气系统、控制系统、循环水系统和化学水处理系统等。下面主要介绍烟气流程和汽水流程。

烟气流程：

烟气流程如图 4，环冷机 I 段的废气温度可达到为 380~420℃，环冷机 II 段的废气温度为 300℃ 左右，这些废热通过双通道废气进气管道分别进入余热锅炉，高温烟气经高温过热器换热后，与低温烟气混合，再流经高温蒸发器、低温过热器、高温省煤器、低温蒸发器和省煤器换热，经过锅炉换热后烟气降到 130℃ 左右，锅炉排出的低温烟气再经过循环风机增压送到环冷机下部的环形风箱，穿过高温的烧结合矿料层，自身吸热后变成高温废气，再次进入余热锅炉换热，形成下一次循环。废气再循环可显著提升环冷机 I 段烟罩、II 段烟罩废气温度，从而提高整个余热锅炉的回收品质和效率，减少含尘烟气直接排空。

汽水流程：

冷却机废气余热锅炉采用双压系统，自带除氧装置。锅炉给水经凝结水泵加压，通过低压锅炉的省煤器加热后，进入低压锅筒，在锅筒内自除氧，除氧后的热水经下降管进入低压蒸发器，在蒸发器内吸热后成为汽水混合物又回到锅筒，在锅筒内进行汽水分离，饱和蒸汽通过引出管到低压过热器，在低压过热器被加热成低压过热蒸汽，作为补汽进入补汽凝汽式汽轮机；同时中压锅炉给水泵从低压锅筒抽水加压，送入中压省煤器加热后，接近饱和温度的水进入中压锅筒，经下降管进入中压蒸发器，在蒸发器内吸热后成为汽水混合物又回到锅筒，在锅筒内进行汽水分离，饱和蒸汽通过引出管到中压过热器，在中压过热器被加热成中压过热蒸汽，作为补汽凝汽式汽轮机主蒸汽；两部分蒸汽在汽轮机做功后，通过冷凝器凝结成水，再经凝结水泵加压，进入下一次循环。

2. 烧结合余热发电或拖动优化设计原则

- 1) 烧结合余热回收系统依附于烧结合主线，余热回收系统任何情况下决不能影响主线的正常生产；
- 2) 应遵循以热定电的原则，烧结合线能够提供多少余热相应发多少电；
- 3) 不能通过增加烧结合矿料焦比，提高烟气温度等方式来提高余热发电量；
- 4) 在不影响主线生产前提下，最大程度利用冷却机余热；
- 5) 以充分利用烧结合余热、提高余热发电系统稳定性和效率、降低余热发电运行成本为技术突破口，采用最优化工艺方案和技术措施；
- 6) 突破原有思路，采用创新措施，充分考虑工程可行性、投资回收等因素，采用先进技术手段降低建设投资，达到多快好省的目的。

3. 最大限度利用烧结合余热措施

1) 选用新型环冷机

国内唐山冶金机械推出了新型环冷机，解决了密封问题。采用小功率小风量的鼓风冷却风机，兼顾了烧结合矿冷却和余热回收，不仅减少了冷却风量，降低了鼓风机能耗，而且提高了环冷机 I 段烟罩的废气温度，温度可达到 380~420℃，II 段烟罩的废气温度为 320℃ 左右，这样提高了进入余热锅炉的烟气温度，保证了余热发电系统稳定运行，最大程度地利用了烧结合矿的余热，对于新建的生产线可以考虑采用新型环冷机。

2) 密封改造

对于鼓风冷却的环冷机漏风主要有四个部位：风箱与台车的交接处；台车侧板与密封罩的交接处；余热利用区段的进出端部；台车本体与台车侧部密封板的交接处。对于这四个重点部位，在余热利用时要进行密封改造。在取热段采用减少缝隙，堵塞漏洞的形式，加强冷却机双侧及轴端动态密封等措施，有效保证烟气系统的漏风率降到 25% 以下。并对余热利用段 I 段烟罩、II 段烟罩的表面及端部进行保温，防止热量损失。

3) 取热保温

对于参与取热的环冷机烟罩及取热废气及废气管道，进行保温处理，可减少散热损失。

4) 烧结合机烟气余热的利用

在烧结合正常生产过程中，除了可以利用环冷机的废气余热外，还可回收烧结合机尾后段的的烟气

余热，即通过控制烧结终点，有效利用大烟道倒数后 1、2、3 风室的烟气余热，烟气平均温度在 380℃ 左右。

4. 提高余热发电系统稳定性和效率的措施

因烧结工艺特性决定了烧结生产的不稳定性，冷却机废气流量和温度波动大，造成余热发电系统运行中存在不稳定性，采用一下措施可提高余热发电系统稳定性和效率：

1) 采用多炉一机的系统方案

对于小于 150 m²烧结至少需要两条以上的烧结线的烟气合并进入一台锅炉或者每条烧结线分别配一台余热锅炉，将多台余热锅炉的蒸汽合并，进入一套汽轮发电机组发电；

2) 采用热风循环

热风循环系统由环冷机、余热锅炉、循环风机组成，循环风机从锅炉尾部抽出的低温废气加压送到环冷机高温段的风箱中，低温废气向上流动，穿过环冷机高温段烧结矿层，变成高温废气，送入锅炉顶部。高温废气在锅炉中由锅炉上部向下流动，依次通过锅炉的过热器、蒸发器、省煤器，将水加热成过热蒸汽，换热后的废气成为低温废风，再次由循环风机加压送到冷却机的下部的风箱里进行下一次循环。

采取热风循环后，冷却机烟气的温度可提高约 40~50℃ 左右，使混合后烟气的温度可达到 380~420℃，提高了余热回收系统的效率。

3) 补燃烟气

在烧结余热锅炉附近建设一台高炉煤气补燃炉，在环冷机废气温度波动时，根据波动曲线，燃烧高炉煤气产生高温烟气，给环冷机废气中补充一部分高温烟气，使废气温度保持在 350℃ 以上，再将其通入余热锅炉产生稳定蒸汽，使汽轮机发电机组正常工作而不解列。

4) 补充蒸汽

从厂区蒸汽管网中接一路备用蒸汽至余热发电主蒸汽管道，当余热锅炉出力不足时，备用蒸汽投入使用，保证汽轮机正常运行。

5) 用补燃炉过热蒸汽

利用厂区平衡的多余高炉煤气，送入补燃炉燃烧，加热烧结余热锅炉来的蒸汽，保证进入汽轮机的蒸汽温度和压力，达到系统能够正常运行的目的，或者用一台补燃炉同时给系统提供过热蒸汽和高温烟气。

6) 提高凝汽器真空度

凝汽器真空度决定了汽轮机排汽压力，蒸汽压力越低排汽焓越低，蒸汽转化为电能的蒸汽焓差越大，系统发电量也就越大。在设计中为提高凝汽器真空度和稳定性，应优先考虑选用射水抽气器，采取的措施主要有：①增加射水抽气器抽干空气量，降低凝汽器中不凝气体的含量，从而提高凝汽器真空度；②采用胶球清洗装置增强凝汽器换热效果，减少换热端差，降低凝汽温度；③设计中选用合理的循环冷却水倍率，增加循环冷却水流量。

7) 合理布局工艺流程

合理布局余热发电系统工艺管道，降低蒸汽沿程的温度、压力损失，提高进入汽轮机蒸汽的品质，从而提高发电量。在设计过程中应合理利用钢铁厂现有场地，将汽轮机主厂房布置在烧结生产线附近，缩短余热锅炉和汽机房的间距。

同时，烟风管道系统的优化设计关系到风机的性能，换热阻力大小。在烟风管道中局部阻力远大于沿程阻力，在设计中优化布置，尽量减少弯头和高阻力系数的异形件，对减少压力损失有明显的作用。采取的措施主要有：①管道尽量简短，采用缓转弯头和断面缓慢变形的变径管；②有分流管时设置导流隔板，减少母管死区，降低涡流损失；③对于大截面的烟道降低内部支撑件阻力等。

8) 管道保温措施

在烧结余热利用系统设计中加强烟气管道、蒸汽管道保温，都可以进一步利用烧结余热，提高余热发电能力。烟气管道保温层厚度采用 100mm，高温蒸汽管道保温层厚度 120mm、低温段蒸汽管道保温层厚度 100mm。

5. 选用高效节能设备，减少余热发电系统厂用电

1) 余热锅炉的选用

冷却机废气余热锅炉采用双压技术、立式布置自然循环锅炉。这种锅炉采用双通道烟气进气系统，高温烟气经高温过热器换热后，与低温烟气混合，再流经高温蒸发器、低温过热器、高温省煤器、低温蒸发器和省煤器换热，充分利用不同品质的烟气，实现烟气余热的梯级利用。

同时高温的烟气产生中压过热蒸汽，作为汽轮机的主蒸汽，利用低温的烟气产生低压过热蒸汽，作为补汽进入补汽凝汽式汽轮机做功发电。一般双压锅炉系统的发电量比单压系统可提高 8%~10%，从而可大幅提高余热发电量。

锅炉带有自除氧装置，无需单独设除氧器及加热蒸汽设备。在余热锅炉冷态启动时，现场无法提供除氧加热蒸汽的情况下，可有效保障余热锅炉正常运行。

2) 汽轮发电机组的选用

烧结余热回收采用补汽凝汽式汽轮发电机组或者补汽凝汽式汽轮拖动主抽风机（SHRT 机组），有利于提高发电效率。余热锅炉产生的中压蒸汽为主汽进入汽轮机做功，低压蒸汽从补汽口进入汽轮机低压段做功。虽然增加了汽轮机末级叶片的高度和制作强度要求，增加了汽轮机的造价，但产生的经济效益更高，发电功率增加 12%左右。

3) 循环风机的选用

选择循环风机时，首先选择循环风机压头，不仅满足克服余热锅炉阻力的需要，将环冷机高、低温烟气有效引入余热锅炉，又要满足冷却环冷机烧结矿料的需要；所选的风机压头应适中，过大时会将大量细碎粉尘引入锅炉烟道，加速烟管磨损，降低余热锅炉使用寿命；同时增加环冷机漏入冷风量，风机能耗增大，不利于烟气的回收利用；风机压头过小时，会造成冷风不能穿过热矿层，影响烧结矿的冷却效果，还可造成烟气不能有效进入余热锅炉进行热交换，使余热锅炉蒸汽量及品质大幅降低。

选择循环风机风量时，不仅要满足额定工况的风量需要，即风量是保证余热锅炉换热量和出力的条件，而且还要满足系统最大工况时风量的需要。

循环风机应采用变频调节，满足风机启动要求，还能随着烧结工艺波动进行调节，并节能电耗。

4) 冷却方式的选用

自然通风冷却塔运行和检修成本低，但占地面积大、初投资成本高。对于装机容量较小的余热发电系统采用机力通风冷却塔更具优势。而当余热发电系统所需循环水量很大，如两条线烧结余热发电系统共用一套循环冷却设备时，采用双曲线自然通风冷却塔比机力通风冷却塔更具优势。对于小型烧结余热发电站，若选用自然通风冷却塔时则存在投资回收期较长或者厂区占地条件限制，这时可选用水轮机冷却塔代替传统机力通风冷却塔以降低厂用电。

5) 采用变频技术

余热利用系统中泵与风机的选型一般按额定工况条件加上一定的安全余量进行选择，但在实际工作过程中余热发电工况条件不断变化，泵与风机所选的额定流量、扬程较大，实际所需较小，需通过阀门节流调节至合适的流量与扬程。而阀门节流存在较大的节流损失，导致电机消耗的电量大于实际所需电量，厂用电率较高。

当使用变频电机时，系统所需流量较小时可通过调节泵与风机转速而调节流量，因此不存在阀门节流损失，功耗较小。根据烧结余热发电运行中经验，当凝结水泵、给水泵、循环水泵和冷却塔风机均采用变频时，厂用电率可降低至 7%左右，大大降低运行成本。

5. 结论

本文旨在提高工程设计人员对烧结余热利用热力系统的认识，余热利用技术也能得到了进一步的提升。总结提高余热发电技术的措施，在设计过程中，可以根据不同的烧结余热情况，合理布局余热发电或拖动工艺、应用先进技术措施进行系统优化，进一步提高烧结余热发电能力、降低工程建设造价和运行成本。多尺度的节能和余热利用与环保、资源工艺、工艺设备、原料等密不可分，所以工程设计工程师要懂工艺、懂装备、懂原料才能深入节能。

参考文献：

- 【1】彭岩. 纯低温余热发电双压技术分析[J]，中国钢铁，2006（6）
- 【2】黄锦涛，彭岩，郝景周等. 纯低温双压余热发电系统性能分析与参数优化[J]. 锅炉技术，2009，40（2）：1-4

低压饱和蒸汽发电技术在抚顺新钢铁的成功应用

张明忱

(抚顺新钢铁有限责任公司 辽宁抚顺 113001)

摘要: 分析了低压饱和蒸汽发电从理论成为现实应用的简要过程, 为新钢铁的节能减排开辟有效途径。

关键词: 词低压饱和蒸汽; 发电; 节能

1 前言

抚顺新钢铁始建于 1958 年, 2005 年由抚顺新抚钢转制为抚顺新钢铁, 拥有烧结、炼铁、炼钢、轧钢中型钢铁企业, 年产铁 300 万吨, 钢 310 万吨, 材 300 万吨, 产品有螺纹钢、棒材、线材、钎钢等多个品种钢材, 是东北地区较有实力的民营控股钢铁企业。对主要生产工艺上的余热进行了回收, 转换为蒸汽后冬季用于采暖。

2 问题的提出

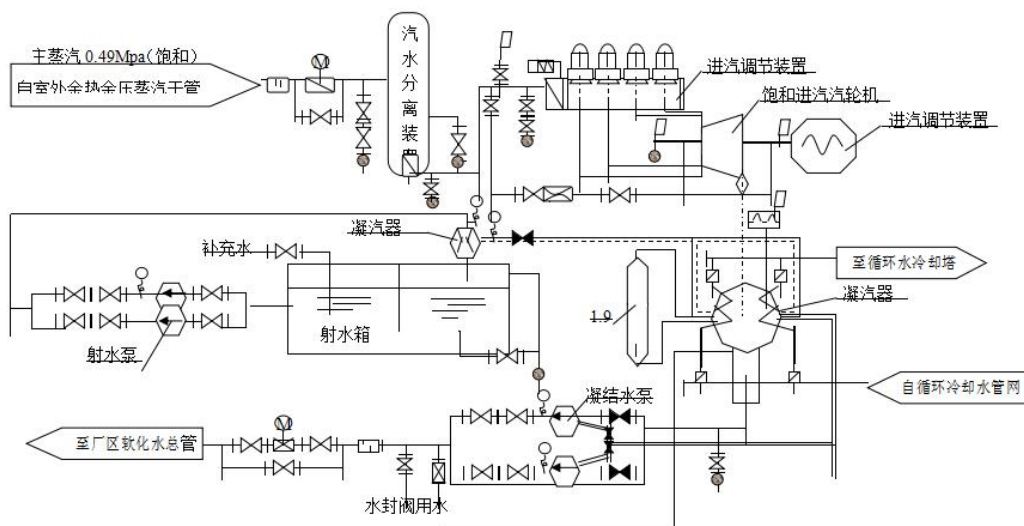
我公司竖炉、烧结机、炼钢转炉、轧钢加热炉均有余热锅炉, 由于这些余热锅炉所产蒸汽均为 0.2~0.5Mpa 低压饱和蒸汽, 没有过热度。我厂区位于辽宁抚顺, 冬季天气寒冷, 这些蒸汽 11 月至次年 3 月均用于采暖, 蒸汽量为 36~50T/h, 4 月至 10 月这些蒸汽全部放空。由于放空造成能源大量浪费, 放空也造成软化水用量大幅度增加, 而且放空造成环境污染。

3 改善设想

2006 年初我公司成立了专门攻关小组, 由公司副总经理牵头就余热蒸汽再利用问题进行攻关。从能源转换思路, 低压饱和蒸汽拖动汽轮机发电理论上可行, 关键是否有合适的汽轮机进行能源转换。因此先后与原水泥工业设计研究院余热利用室和主设备制造厂家杭州中能汽轮动力有限公司, 经过多次磋商研究, 对存在问题一一解决掉, 把整个工艺确定了下来。

4 工艺简介

4.1 在蒸汽管网方面



各余热锅炉所产蒸汽并网→由低压蒸汽管网输送至汽机房→经贮汽罐脱水输送至→汽轮机速关阀→配汽阀→输送至汽机做功→汽水混合物至冷凝器换热成水→凝结水泵→流量调节装置→输送至软化水站→余热锅炉。

4.2 发电主机选择

设计汽机拖动发电机产生 3000r/min 50Hz 6.3kv 电能，负荷大小的调整通过检测输入蒸汽压高低自动调节。

4.3 管网优化

由于蒸汽来源均为余热，锅炉均为不连续生产，所以采用所有余热蒸汽均并入一条蒸汽管网的办法，使至不会因一台或两台余热锅炉停产影响汽机的正常运行，保证流量和压力相对稳定。

4.4 保安措施

由于蒸汽均为饱和蒸汽，而且经过长距离输送，蒸汽带水现象严重，蒸汽在进入汽机前设置一个较大的蒸汽脱水罐，这样既能脱出蒸汽中的一部分水分，还能起到稳压的作用，另在汽机每一级均设有功能较强的脱水装置，以解决蒸汽带水问题。

4.5 汽轮机选择

汽机型号为：N05.5-0.49（杭州中能汽轮机有限公司）

配套发电机型号：WFW-6-Z

5 工程实施

此工程于 2007 年 1 月 4 日土建开始动工，新建汽机主厂房一座，建筑尺寸为：24×18m，轨顶标高 14m，工作层为 7m，循环泵站利旧。土建于 2007 年 5 月 7 日完成，开始进行设备安装。2007 年 7 月 16 日所有设备安装完成。2007 年 7 月 17 日带负荷试车一次成功。国家发改委节能信息传播中心知道试车成功后，于 2007 年 9 月 28 日在抚顺现场召开了国内钢铁、水泥、玻璃等部分企业参加的抚顺新钢铁低压饱和蒸汽余热利用新技术成果发表会。

工程结算实际投资

主体设备（汽机+发电机）：808 万元

土 建：123 万元

电 气：159 万元

仪表及自动化控制：152 万元

设 计 费：56 万元

附属设备采购费：193 万元

原有冷却水墙修复：90 万元

管道及阀门采购：76 万元

安装费：130 万元

工程实际总投资：1787 万元

每 kw 投资为 $1787/6000=0.29783$ 万元/kw

6 结语

该发电系统每年实际运行期为 3 月至 10 月，计 240 天，发电平均负荷为 8500kw（已去除厂用电部分），发电成本为 0.085 元/kwh（人工+设备折旧+维修维护），日节约软化水量 850t/d

年实际创造经济效益为：

$85000 \times 240 \times 0.52 - 85000 \times 240 \times 0.085 + 850 \times 4 \times 240$

$= 887.4 + 81.6 = 969$ 万元

（电价为 0.52 元/kwh，软化水成本为 4 元/T）

此机组于 2007 年 7 月 17 日开始运行，设备运行平稳，安全可靠，蒸汽管网运行压力为

0.15-0.5Mpa, 经济效益非常可观, 既发了电, 又减少了低压饱和蒸汽的大量排放对周围环境的影响, 又节约了大量软化水, 取得了良好的经济效益和社会效益。为抚顺新钢铁节能减排工作探索出了一条新路。

乏汽回收装置在热电企业的应用

刘颖 吴建伟
常熟金陵海虞热电有限公司

摘要：本文以常熟金陵海虞热电有限公司的乏汽回收装置为例，分析该设备在热电企业中的应用，为企业节能减排增加一条新的途径。

关键词：乏汽回收装置 节能降耗 噪音

一、引言：

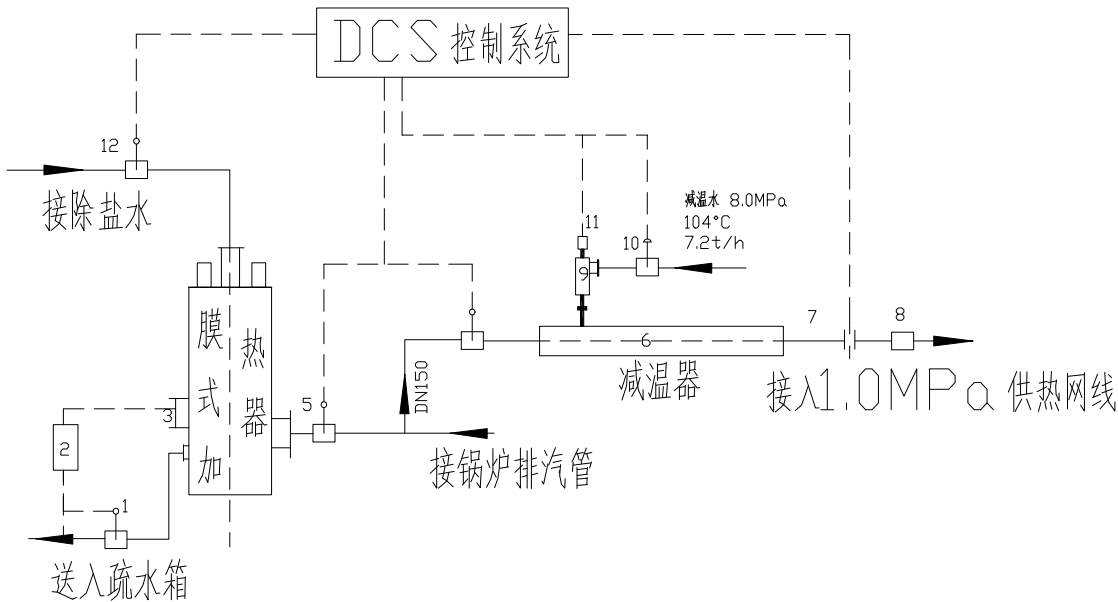
近几年以来，由于煤价节节攀升，电价基本不动，供热量少的热电企业生存很困难，企业想生存，想发展，必须走二条路：一是发展热用户，二是想方设法降低生产成本，通过节能降耗提高企业的盈利能力。

常熟金陵海虞热电有限公司地处常熟市海虞镇，为常熟新材料产业园的配套供热企业。一期工程为3台90t/h单锅筒自然循环煤粉炉和1台15MW抽凝机组及1台12MW背压机组。

运行初期，由于锅炉启动比较频繁，在锅炉并炉前，大量蒸汽通过向空排汽门和疏水，全部排掉了。向空排的噪声比较刺耳，虽然安装了消音器，但是声音仍比较大，对周围的居民有一定的影响。如何降低噪音，回收锅炉启动过程中的大量蒸汽，实现节能降耗的问题摆在我们面前。公司经讨论研究，决定选用沈阳飞鸿达节能设备技术开发有限公司开发的乏汽回收装置。

二、乏汽回收装置的概述和原理：

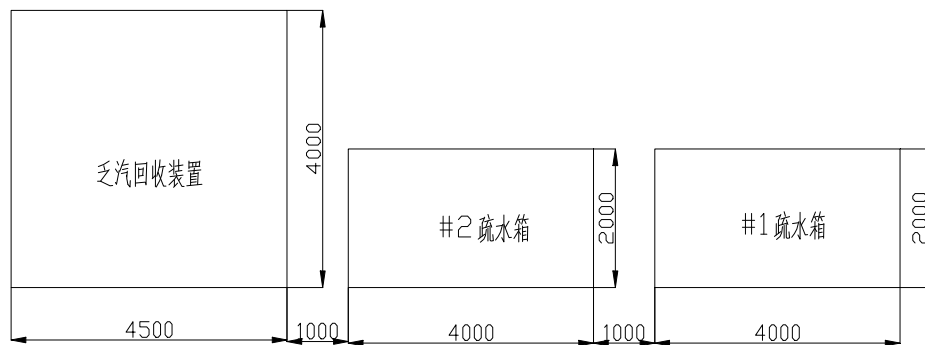
乏汽回收装置共有二个部分组成：分别为膜式加热器和减温器。系统图如下：



工作原理：在锅炉启动过程中，将锅炉汇汽集箱的排汽通过管路引入乏汽回收装置，当汇汽集箱压力低于1.0MPa时，将排汽接入膜式加热器，用除盐水降温，膜式加热器是混合加热器，冷却后的水被送至汽机疏水箱，再用疏水泵打至除氧器循环利用。当汇汽集箱压力高于1.0MPa时通过减温器接入供热网，送入热用户。该乏汽回收装置实现了乏汽全部回收，达到了零排放，消除了噪音。

三、乏汽回收装置的现场布置及控制：

1、乏汽回收装置结构比较简单，体积不大，现场容易布置。我公司利用锅炉房0米二台汽机疏水箱旁的空地，搭建了1个平台，平台高度为3米。平面布置如下：



这样布置的好处是：当锅炉汇汽集箱压力低于 1.0MP 时，锅炉蒸汽经乏汽回收装置处理后的水直接可以用管路连接到汽机的疏水箱，然后利用疏水箱旁的疏水泵直接送到除氧器，循环利用。由于热网供热管道离汽机疏水箱的距离很近，当锅炉汇汽集箱压力高于 1.0MP 时，经过乏汽回收装置降温的蒸汽可以就近接入热网管道。这样布置节省了大量的管材。

膜式加热器本体高约 3 米，在 1.4 米高度处有挂装的构件，将该构件固定在平台上。平台的面积有 18 平方米左右，完全可以布置减温器。我们将减温器安装在平台上，相应的布置相关的配套管道，将调节阀及电动阀的控制箱挂在平台的栏杆上，整个平台布置紧凑有序。

在 3 台锅炉之间布置一根 DN80 的母管，材质为合金钢管，将每台锅炉汇汽集箱的排汽管（排汽管为 DN50 合金钢管）接至该母管，该母管直接接至乏汽回收装置的入口。这样，每台锅炉启动过程中的蒸汽可以全部送到乏汽回收装置。

我公司的机炉热控控制系统采用 DCS 控制系统，为方便运行操作，将乏汽回收装置所有的压力及温度测点接至 DCS 系统，实现系统的自动化控制。系统从 2007 年运行至今，运行正常。

下图是乏汽回收装置现场布置的照片：



四、乏汽回收装置经济分析：

1、公司三台锅炉共用 1 套乏汽回收装置，系统简单，投资少。每次锅炉启动过程中，大概有 50 吨左右的蒸汽会通过该装置送入热用户。每台锅炉每年按启动 2 次计算，三台锅炉启动 6 次，回收蒸汽 300 吨，每吨蒸汽按 200 元，每年可节约 6 万元左右，4 年左右可全部收回投资。很多热电企业由于多种原因，锅炉启动更频繁，这样回收成本的周期会更短，效益更明显。

2、公司机炉控制热控部分采用的是 DCS 控制系统，在不增加投资的情况下，利用 DCS 系统的备用点，将乏汽回收装置系统纳入 DCS 控制系统，运行人员可以在控制室内直接操作。

3、公司投用乏汽回收装置后，消除了噪音，使公司与周边居民的关系更和谐了。实际生产中，锅炉正常运行压力高时，我公司也投用该装置代替向空排电动门。

某污泥厂余热回收机组节能方案项目 经济性比较及应用

辽宁瑞尔工程咨询有限公司 于桂杰

吉林建筑大学 宫闻笛

摘要 通过对比三种方案，得出方案 3：选择单台冬季制热量 800kw 的余热回收机组两台+蓄热水箱年节省运行费用最高，投资回收期最短，所以方案 3 为最佳方案。

关键词 余热回收机组 运行费用 投资回收期

PROJECT PROPOSAL AND ITS APPLICATION OF A SLUDGE PLANT WASTE HEAT RECOVERY UNIT

Abstract By comparing three schemes, the scheme 3: selection two waste heat recovery unit for heat in winter 800KW + heat storage tank can save the highest running cost, the investment recovery period is short, so the scheme 3 is the best scheme.

Keywords waste heat recovery plant running cost investment recovery period

0 引言

某污泥厂有大量的余热和废热直接排掉，而冬天厌氧罐伴热和采暖均采用蒸汽锅炉进行供热，如果将余热和废热加以利用，则可以节约一定的运行成本。

根据现场实际情况选择余热回收机组进行余热和废热的回收利用，现采用三种方案进行测算和比较，每台机组均为双压缩机双回路，两台余热回收机组互为备用，单台余热回收机组的两个机头也互为备用，按需按实际运行负荷进行灵活组合运行，部分负荷运行时也能保证机组高效能运转，节能性高，三种方案分别为：

方案 1：选择单台冬季制热量 550kw 的余热回收机组两台

方案 2：选择单台冬季制热量 550kw 的余热回收机组两台+蓄热水箱

方案 3：选择单台冬季制热量 800kw 的余热回收机组两台+蓄热水箱

1 计算基准

根据现场多次勘查与调研，认真界定了计算参数及计算基础数据依据，现汇总如下：蒸汽消耗量夏天（4-10月），每天消耗 33.6t；冬天（11-3月），每天消耗 83.5t；沼气的热值：5200（kcal/m³），沼气价格：2.47 元/m³；1t 蒸汽需要燃烧沼气 120m³（考虑了锅炉热效率 0.97）；厌氧罐内的液体温度恒定在 33~35 度；污水源至污泥厂锅炉房距离约 200m，高差约 30m；余热回收机组折旧年限按 20 年计（设计年限为 25—30 年），年折旧系数取 0.05；机房维修值班工人增加 4 人，人均工资 3500 元/月（含各种保险费用）；如果新建一个新的锅炉则投资 122 万元左右。热负荷的计算基准见表 1，电价计算基准见表 2，污水温度及工艺需求温度计算基准见表 3。

表 1 热负荷的计算基准

序号	参数名称	夏天（4-10月）	冬天（11-3月）
1	厌氧罐伴热热负荷(kw)	630.00	1225.00
2	厌氧罐伴热能够替代的热负荷(kw)	280.00	1225.00
3	采暖热负荷(kw)		430.00
4	水源热泵能够替代的热负荷小计(kw)	280.00	1655.00

注明：由于脱碳工艺必须需要蒸汽，所以必须保证锅炉的运行，根据工厂现场的实际运行经验，锅炉的最低运行工况为 1t/h，所以夏季厌氧罐伴热 630kw 的热负荷不能完全替代，只能替代 280kw 的热负荷。

表 2 电价计算基准

序号	名称	峰时段	谷时段	平时段
1	电价（元）	0.7587	0.2529	0.5058
2	小时	8	7	9
3	注明	8:00-11:00 17:00-22:00	22:00-5:00	11:00-17:00 5:00-8:00
4	平均电价（元）	0.5163		

表 3 污水温度及工艺需求温度计算基准

参数名称	春天(3-5月)	夏天(6-8月)	秋天(9-11月)	冬天(12-2月)
厌氧罐伴热管进出口水温	52℃/40℃	50℃/38℃	52℃/40℃	54℃/42℃
前处理工作时间(小时)	24			
污水厂的污水量(万吨/日)	2	3	2.5	2.1
污水的温度℃	10-11	18-22	15-23	8-12

2 方案选择及运行经济性分析

三种方案的详细测算如下：

(1) 选择两台小余热回收机组，单台余热回收机组冬季的制热量为 550kw，选择依据为单台机组的单机头（热负荷 354kw）80%负荷点运行就能满足夏季的供热 280kw 的需求，而机组 80%负荷运行属于余热回收机组的高效运行区；冬季两台机组全部运行能替代热负荷约 1100kw，参考行业某知名品牌产品的技术参数，余热回收机组选型粗略估算如下：

	功率	冷凝器			蒸发器			污水水源侧	
	kw	制热量	进出口	流量	制冷量	进出口	流量	进出口水	流量
		kw	水温℃	m3/h	kw	水温℃	m3/h	温℃	m3/h
冬季	151.3	549.32	54/44	47.24	398.02	6.7/3.5	106.58	8.5/6	137.12
夏季	151.4	708.62	50/38	50.67	557.22	15/10.6	106.4	18/14.5	137.11

下面对余热回收机组的运行费用进行分析，详见下表：

序号	参数名称	夏天（4-10月）	冬天（11-3月）
1	运行时间（小时）	5040.00	3720.00
2	运行功率（kw）	126.70	402.60
3	运行费用（万元）	32.97	77.33
4	年运行费用小计（万元）	110.30	
5	考虑设备折旧、设备维护保养及 4 个维修人员的工资费用等（万元）	24.50	
6	机组年运行总成本费用（万元）	134.80	
7	余热回收机组能够替代的热负荷小计（kw）	280.00	1100.00
8	节省的沼气费用（万元）	59.75	173.27
9	节省的沼气费用小计（万元）	233.02	
10	采用余热回收机组年节省费用小计（万元）	98.22	
11	余热回收机组初投资（万元）	400.00	
12	投资回收期	4.07	

(2) 考虑到余热回收机组如果利用夜间谷价进行水箱蓄热的方式可以节省一部分运行成本，即在夏季：晚间一台余热回收机组两个机头都运行，一个机头供给厌氧罐伴热需求，一个机头运行 8 个小时满足水箱蓄热，白天高峰期，余热回收机组停止运行，利用蓄热水箱的热水满足厌氧罐伴热需求，这样削峰填谷可以

节省一部分运行成本；在冬季，同样也利用蓄热水箱夜间谷价蓄热，这样白天也可以节省峰价时的费用，下面就此种方式进行运行费用测算，详见下表：

序号	参数名称	夏天（4-10月）	冬天（11-3月）
1	运行时间（小时）	2520.00	3720.00
2	运行功率（kw）	126.70	402.60
3	运行费用（万元）	16.49	77.33
4	夏季为水箱蓄热的机组运行费（万元）	3.62	
5	冬季蓄热水箱节省的运行电费（万元）	4.55	
6	年运行费用小计（万元）	92.89	
7	考虑设备折旧、设备维护保养及4个维修人员的工资费用等（万元）	24.50	
8	机组年运行总成本费用（万元）	117.39	
9	余热回收机组能够替代的热负荷小计（kw）	280.00	1100.00
10	节省的沼气费用（万元）	59.75	173.27
11	节省的沼气费用小计（万元）	233.02	
12	采用余热回收机组年节省费用小计（万元）	115.63	
13	余热回收机组初投资（万元）	428.00	
14	投资回收期	3.70	

（3）选择单台冬季制热量 800kw 的余热回收机组两台+蓄热水箱，选择依据为，两台机组同时运行能满足冬季的热负荷 1600kw（含冬季采暖热负荷）的需求，由于夏季热负荷与冬季相比差别太大，所以采用蓄热水箱的方式进行弥补冬夏负荷相差悬殊的缺陷，这样，在夏季单台余热回收机组的单机头进行夜间运行，一部分供给厌氧罐伴热，一部分供给蓄热水箱蓄热，白天机组停止运行，蓄热水箱的热水供给工艺使用，节约运行成本；在冬季两台机组同时运行，满足负荷需求，同样也利用蓄热水箱夜间谷价蓄热，这样白天也可以节省一点峰价时的费用，参考行业先进的机组计算，余热回收机组选型粗略估算如下：

	功率	冷凝器			蒸发器			污水水源侧	
	kw	制热量	进出口水温℃	流量	制冷量	进出口水温℃	流量	进出口水温℃	流量
		kw		m3/h	kw		m3/h		m3/h
冬季	214.1	794.91	54/44	68.43	398.02	6.7/3.5	155.56	8.5/6	199.12

夏季	218.9	1019.87	50/38	72.76	823.8	15/10.5	152.91	18/26	196.6
----	-------	---------	-------	-------	-------	---------	--------	-------	-------

下面对余热回收机组的运行费用进行分析，详见下表：

序号	参数名称	夏天（4-10月）	冬天（11-3月）
1	运行时间（小时）	2520.00	3720.00
2	运行功率（kw）	160.00	548.00
3	运行费用（万元）	6.84	105.26
4	冬季蓄热水箱节省的运行电费（万元）	4.55	
5	年运行费用小计（万元）	107.55	
6	考虑设备折旧、设备维护保养及4个维修人员的工资费用等（万元）	26.50	
7	机组年运行总成本费用（万元）	134.05	
8	余热回收机组能够替代的热负荷小计（kw）	280.00	1600.00
9	节省的沼气费用（万元）	59.75	252.02
10	节省的沼气费用小计（万元）	311.78	
11	采用余热回收机组年节省费用小计（万元）	177.73	
12	余热回收机组初投资（万元）	478.00	
13	投资回收期	2.69	

3 结语

综上，三种方案汇总如下表：

名称	方案1	方案2	方案3
年节省的沼气费用（万元）	233.02	233.02	311.78
余热回收机组年运行总成本费用（万元）	134.80	117.39	134.05
年节省费用小计（万元）	98.22	115.63	177.73
初投资（万元）	400	428	478
回收期（年）	4.07	3.70	2.69

由上表可见方案3年节省运行费用最高，投资回收期最短，所以方案3为最佳方案。如果跟新上锅炉相比，新上锅炉初投资根据工厂技术人员所做的概算约为122万元，则方案3的投资回收期为 $(478-122)/177.73=2$ 年。