

ICS XXXXXX
CCS X XXX

团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—20XX

工业天然气锅炉烟气热能利用技术规程

Technical specification for energy utilization of flue gas waste heat
recovery in industrial natural gas boilers

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布

目录

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
5 烟气热能回收系统技术要求	4
6 烟气热能回收系统监测	5
7 施工与质量验收	6
8 运行与维护	7
附录 A	9

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件主要起草单位：杭州市特种设备检测研究院（杭州市特种设备应急处置中心）、大连理工大学、深圳市中金岭南有色金属股份有限公司韶关冶炼厂、绿源能源环境科技集团有限公司、北京建筑大学、岳阳远大热能设备有限公司、中节能城市节能研究院有限公司、北京京诚科林环保科技有限公司、重庆赛迪热工环保工程技术有限公司、山东京博石油化工有限公司、成都杨明双鑫科技有限公司、江西抚州东华理工能源与环境研究院等。

本文件主要起草人：熊伟东、赵辉、刘贵昌、王随林、穆连波、肖元法、姚朝辉、徐雨贤、姜宏、卢卫东、康明红、杜玉吉、姜小祥、周春丽、王治国、李志、唐家毅、王耀伟、鲍学伟、杨启明、邓向辉、陈金堂、周熙雷、王华、刘锦程、肖彬。

工业天然气锅炉烟气热能利用技术规程

1 范围

本文件规定了一般要求、烟气热能回收系统技术要求、烟气热能回收系统监测、施工与质量验收、运行与维护。

本文件适用工业天然气锅炉的烟气热能利用技术应用和运行管理。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1576 工业锅炉水质

GB/T 2589 综合能耗计算通则

GB 4053 固定式钢梯及平台安全要求

GB/T 8175 设备及管道保温设计导则

GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB/T 10180 工业锅炉热工性能试验规程

GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物和气态污染物采样方法

GB 17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则

GB/T 29872 工业企业能源计量数据集中采集终端通用技术条件

GB/T 34912 工业锅炉系统节能设计指南

GB/T 39091 工业余热梯级综合利用导则

GB 50041 锅炉房设计标准

GB/T 50051 烟囱工程技术标准

GB 50242 建筑给水排水及采暖工程施工质量验收规范

GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范

GB 50273 锅炉安装工程施工及验收标准

GB/T 50893 供热系统节能改造技术规范

CJ/T 515 燃气锅炉烟气冷凝热能回收装置

HJ75 固定污染源(SO₂、NO_x、颗粒物)烟气排放连续监测技术规范

DL/T 5054 火力发电厂汽水管设计技术规范

DL 5068 发电厂化学设计规范

DL/T 5121 火力发电厂烟风煤粉管道设计规范

NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第2部分：射线检测

NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第3部分：超声检测

NB/T 47015 压力容器焊接规程

NB/T 47066 冷凝锅炉热工性能试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

工业天然气锅炉烟气热能回收系统 Flue gas waste heat recovery system of industrial natural gas boilers

工业天然气锅炉尾部的烟气热能回收装置本体、烟风系统、汽水系统、热工监测及控制系统等（以下简称烟气热能回收系统）。

3.2

烟气热能回收装置 Flue gas waste heat recovery units

用于回收利用烟气热能的换热设备，根据烟气余热回收程度不同，分为烟气显热回收装置和烟气冷凝热能回收装置。

3.3

被加热介质 Heated medium

在烟气热能回收装置中与烟气换热的流体，如水、空气等。

3.4

有效输出热量 Effective heat output

同一时间内被加热介质经烟气热能回收装置向外提供的热量与被加热介质带入烟气热能回收装置的热量之差。

[来源：CJ/T 515-2018, 3.3]

3.5

燃气利用热效率 Gas utilization thermal efficiency

同一时间内烟气热能回收装置的有效输出热量与工业天然气锅炉所消耗燃气按低位发热量计算的全部热量之比。

3.6

节能量 Energy saving amount

烟气热能回收装置的有效输出热量与回收烟气热能所消耗能量（按发电平均效率折算为一次能源的能量）之差。

3.7

节能率 Energy saving efficiency

同一时间内，烟气热能回收装置的节能量与工业天然气锅炉所消耗的燃气按低位发热量计算的全部热量的比值。

3.8

数据采集终端 Data acquisition terminal unit

指负责对计量表具、传感器进行信号采集，并将采集的信息进行解析、存储、转换、上传的嵌入式装置。

4 一般要求

4.1 原则

4.1.1 工业天然气锅炉烟气热能利用应遵循“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”原则。

4.1.2 工业烟气余热品位分类应符合 GB/T 39091 的相关规定。

4.1.3 工业天然气锅炉烟气热能利用过程中应符合以下方面的要求：

- a) 在保证安全可靠、不降低系统现有性能的前提下，系统分析烟气特点、余热规模和品位，综合考虑企业用能需求与生产工艺，合理制定烟气热能回收利用方案。
- b) 采用国家鼓励的先进技术和工艺，不应使用国家或有关部门发布的淘汰或禁止的技术、工艺与装备。
- c) 在技术经济合理的前提下，最大化的实现烟气余热深度回收和梯级利用。
- d) 采用烟气加热的被加热介质应为非可燃的液体或气体。

4.2 烟气热能回收装置要求

4.2.1 烟气热能回收装置中，与烟气接触的表面和烟气冷凝水管应采用防腐蚀表面改性材料或耐腐蚀材料及防腐蚀加工工艺，且焊接处应采取防腐蚀措施。

4.2.2 烟气热能回收装置的制造和检验应符合 CJ/T 515 的相关要求。

4.2.3 在冷源条件具备条件下，烟气热能回收装置的设计排烟温度宜低于烟气露点温度，并应符合回收烟气潜热和烟气冷凝水、减少雾气排放的要求。

4.2.4 烟气热能回收装置不应影响工业天然气锅炉和后续工艺（若有）正常安全运行，应尽量减少风机和水泵的耗能。

4.2.5 烟气热能回收装置的结构型式应符合 CJ/T 515 附录 A 的相关规定。

4.2.6 烟气与被加热介质流动方向宜采用逆向流动，间壁式烟气热能回收装置中烟气及烟气冷凝水宜采用同向流动。

4.2.7 当被加热介质为液体，且为间壁式烟气热能回收装置时，被加热介质管道的承压能力应大于用热系统的最大工作压力，且不应小于 0.8MPa。

4.2.8 烟气热能回收装置的最高允许工作温度不应低于工业天然气锅炉最高排烟温度。

4.2.9 当间壁式烟气热能回收装置的被加热介质为液体时，不应发生汽化现象，被加热介质的出口温度应小于被加热压力对应的汽化温度 20℃。

4.2.10 底座和支撑材料的预处理应达到 GB/T8923.1 中 St3 级的规定。外表面应涂敷底漆和面漆各 2 道。

烟气热能回收装置支撑结构应满足设备重量、水容量、管道受力等强度和安全要求。

- 4.2.11 烟气热能回收装置的烟气侧进出口应设置密闭检查孔，并应便于观察和清洁。
- 4.2.12 烟气热能回收装置本体、水管和烟气进出口导流段均应进行保温，并应符合 GB50264 的规定。
- 4.2.13 烟气热能回收装置的底部最低处应设置烟气排水口，烟气热能回收装置烟气侧不应有水存留。
- 4.2.14 烟气冷凝水宜回收利用，用于锅炉或系统补水时，水质应符合 GB/T 1576 的要求。烟气冷凝水的排放应符合国家环保排放标准。
- 4.2.15 对新建工业天然气锅炉，其配套的烟气热能回收装置设计寿命应与工业天然气锅炉一致，且不应低于 15 年。
- 4.2.16 对在役工业天然气锅炉节能改造时，烟气热能回收装置的设计寿命不应低于工业天然气锅炉使用年限，且不应低于 10 年。

5 烟气热能回收系统技术要求

- 5.1 烟气热能回收系统中被加热介质种类、温度和压力及流量等技术参数应根据工业天然气锅炉排烟特点、用热品位、排烟余压、安装空间等确定，优先采用成熟、先进、安全、高效、经济的烟气热能回收技术工艺和设备。
- 5.2 应根据设备使用寿命、耐腐蚀性、承压能力、换热性能、烟气与被加热介质阻力等指标，采用耐腐蚀、阻力小、高效换热、结构紧凑的烟气热能回收装置，且便于安装和维护。
- 5.3 烟气热能回收装置宜单台炉配置；当多台工业天然气锅炉共用一台烟气热能回收装置时，烟气热能回收装置宜安装在共用烟道上，且各工业天然气锅炉尾部至烟气热能回收装置之间的烟气流动力均衡，各烟道间夹角应尽可能小，确保各台锅炉烟气流动相不受影响甚至阻碍；每台工业天然气锅炉尾部出口烟道应安装烟道阀，烟道阀应密封可靠，防止烟气回流。
- 5.4 当被加热介质为液体时，烟气冷凝热能回收装置的出口烟温与被加热介质进口温度之差不应大于 5℃，且应比烟气中水蒸气的露点温度低 5℃以上。
- 5.5 在现场条件具备时，优先采用防腐低阻型烟气冷凝热能回收装置将排烟温度降至 40℃以下。
- 5.6 工业天然气锅炉排烟在工艺生产过程中携带烟尘时，应在烟气热能回收装置前应设置除尘或吹灰装置，烟气热能回收装置应考虑防磨蚀措施。
- 5.7 烟气余热宜就地直接回收利用，减少中间转换与储存环节。
- 5.8 烟气热能回收系统中的汽水管道路应符合 DL/T 5054 的相关规定。
- 5.9 烟气热能回收系统中的烟风道设计应符合 DL/T 5121 的相关规定。
- 5.10 烟气热能回收装置的出口烟道应进行防腐处理，避免低温烟气冷凝水腐蚀烟道，烟道防腐应符合 GB 50051 的规定。
- 5.11 冷凝水系统的水箱、设备、管道、阀门及附件的防腐应符合 DL 5068 的规定。
- 5.12 烟气热能回收系统用于加热液体时，间壁式烟气热能回收装置的液体侧不应超压、不汽化。
- 5.13 烟气热能回收装置中被加热水的出口温度高于当地大气压下的饱和温度时，应在出水管路上设置安全阀，保证被加热水工作压力高于汽化压力。
- 5.14 烟气热能回收系统用于预热空气时，换热器（管式空气预热器）内烟气泄漏率应低于 3%。

- 5.15 烟气热能回收系统用于余热发电时，应符合发电系统设计和施工验收的相关标准。
- 5.16 烟气热能回收装置的烟气出口温度低于露点温度时，烟气热能回收装置宜安装在烟道正压或微负压侧，且不应影响烟气冷凝水的正常排除。
- 5.17 烟气热能回收装置安装于烟道高负压区时，烟气冷凝水出口管上应设水封，严禁外界空气渗入烟道。
- 5.18 烟气热能回收系统应设置旁通烟道，确保在烟气热能回收装置维护和维修期间不影响工业天然气锅炉的原有生产工艺正常运行，且烟气热能回收装置的进口、出口烟道和旁通烟道上的烟道阀应密封可靠。
- 5.19 烟气热能回收装置的烟气入口从主烟道引出或烟气出口汇入主烟道时，旁通烟道与主烟道之间应保持小于 45°的夹角，以减小烟气阻力。
- 5.20 烟风道布置和烟气除尘系统的设计应符合 GB/T 34912 的规定，且应合理布置，阻力小，噪声低，振动小。
- 5.21 烟气热能回收系统的烟气侧阀门或挡板的设计应满足介质温度、压力、流量、流向、调节范围以及严密性等要求，且便于操作。
- 5.22 烟气冷凝水管应采用防腐的塑料管或管材，防止烟气冷凝水腐蚀，且在烟气冷凝水出口处应采取水封措施防止烟气泄漏。
- 5.23 当烟气热能回收装置、热力设备和管道在室外露天布置时，其保温层的外保护层应具有防水功能，还应采取防冻、防雨和防晒等防护措施。
- 5.24 大型烟气热能回收装置或烟气热能回收装置安装位置较高时，应设置爬梯和检修平台，并应符合 GB 4053 的规定。
- 5.25 烟气热能回收装置的烟气出口温度低于露点温度时，烟气阻力、被加热介质阻力、烟气冷凝水管管径、燃气利用热效率、节能量和节能率应符合 CJ/T 515 的规定。
- 5.26 燃气利用热效率与节能量及节能率计算方法见附录 A。

6 烟气热能回收系统监测

- 6.1 烟气热能回收系统应对烟气温度和压力，被加热介质温度和压力与流量，烟气余热回收量、主要污染物排放浓度等参数进行实时监测，并配备远传仪表。
- 6.2 烟气热能回收监测系统应满足国家相关规范要求，具有安全、先进、完整的仪表和控制功能。
- 6.3 烟气热能回收监测系统应具备本地显示、数据储存、数据分析、实时远传、远程监测、故障连锁和报警等功能，对烟气热能回收装置等关键设备具有故障联动和切出控制功能。
- 6.4 烟气热能回收监测系统的监测和控制功能应符合 GB 50041 的要求。
- 6.5 烟气热能回收系统中所采集的温度、压力、流量和热量等信号宜通过硬接线接入控制系统。
- 6.6 烟气温度测量宜采用铂电阻温度计，准确度均不应小于 0.5 级；被加热介质进/出温度的测量应采用分辨率为 0.1℃的铂电阻温度计，准确度不应小于 0.5 级；压力表的准确度不得低于 1.5 级；被加热介质为液体的流量测量应采用超声波流量计或涡轮流量计，准确度不低于 1.0 级，流量计宜安装在烟气热能回收装置的被加热介质进口侧，且安装直管段距离应满足流量计工作要求。

- 6.7 烟气热能回收监测系统所采用的电缆架空桥架、地下埋管以及电缆直埋等敷设方式必须排列整齐、美观。
- 6.8 烟气热能利用系统的烟气侧运行阻力超过烟气设计阻力的 1.2 倍时,应对烟气热能回收装置的换热面进行吹灰或清洗。
- 6.9 在额定工况下烟气热能回收系统的实际烟气余热回收量低于烟气余热回收量设计值的 80%时,应对烟气热能回收装置的换热面进行吹灰或清洗。
- 6.10 工业天然气锅炉的使用单位应按 GB/T 16157 规定设置采样孔监测点。当监测点位置较高时,还应配套检测平台,并充分考虑安全性和便利性。
- 6.11 固体污染源烟气(SO₂、NO_x和颗粒物)排放连续监测系统安装位置和相关要求应符合 HJ 75 的规定。
- 6.12 烟气热能回收装置宜在烟道上安装电动调节阀与烟气冷凝水排水口上设电磁阀,并配置相应的控制系统,确保工业天然气锅炉非正常运行工况、烟气热能回收装置出现泄漏、以及吹灰与检修期间能及时关闭。
- 6.13 烟气热能回收系统的运行监测和数据采集由数据采集终端完成,数据采集终端应有本地存储功能,储存数据容量不低于 3 年。
- 6.14 数据采集应采用全时段连续在线采集,且各数据的采集应保持同步。
- 6.15 烟气热能回收监测系统应定期检查和维修,确保采集数据准确可靠。

7 施工与质量验收

7.1 施工与安装

- 7.1.1 烟气热能回收装置应根据安装空间条件及有利于强化传热和减小阻力的要求,结构型式应符合 CJ/T 515 和 GB/T 34912 的规定。
- 7.1.2 烟气热能回收装置的焊接应符合 NB/T 47015 规定。
- 7.1.3 取源部件、仪表、阀门、吹灰器和辅助装置的施工安装应符合 GB 50273 的规定。
- 7.1.4 被加热介质为液体时,烟气热能回收装置被加热介质的进出口管道上应预留安装排气、泄水、超温超压报警等装置的连接管,且宜在被加热介质可能积存气体的部件顶部设置排气阀的连接管。
- 7.1.5 间壁式烟气热能回收装置的底部最低处应设置烟气冷凝水管。
- 7.1.6 除密闭检查孔外,烟气热能回收装置本体、水管和烟道均应进行保温,保温层厚度应符合 GB 50264 和 GB/T 8175 的规定。
- 7.1.7 烟气热能回收装置的安装应符合 GB/T 50893 的规定。

7.2 质量验收

- 7.2.1 烟气热能回收装置的验收分为出厂验收和型式试验,检验项目应按 CJ/T 515 中表 5 的规定执行,检验合格后方可出厂。当全部检验项目符合要求时,则判定为出厂检验合格,否则判定为不合格。检验不合格的项目,应进行返修并应重新进行检验。
- 7.2.2 烟气热能回收装置焊接完成后应进行无损检测,并应符合 NB/T 47013.2 或 NB/T 47013.3 的规定。

- 7.2.3 烟气热能回收装置及其附属设备的施工质量验收应符合 GB 50242 和 GB 50273 的规定。
- 7.2.4 烟气热能回收监控系统的施工质量验收应符合 GB 17167 和 GB/T 29872 的规定。
- 7.2.5 烟气热能回收装置的热工性能检测应符合标准 GB/T 10180 和 NB/T 47066 的规定。

8 运行与维护

8.1 一般规定

- 8.1.1 烟气热能回收装置运行调试应符合 GB/T 50893 的规定，具体调试应按下列步骤进行：
 - a) 烟气侧应进行吹扫，水侧应进行冲洗，水、气管道应畅通。
 - b) 被加热水系统充水后应进行冷态循环，每台烟气冷凝回收装置的被加热水量应达到最低安全值。
 - c) 应进行热态调试，锅炉和被加热水系统的连锁控制应运行正常；启动时，应先开启被加热水系统，后启动锅炉；停炉时，应先停炉，待烟气温度降低后，再停止被加热水系统。
 - d) 进行单机调试时，应校对烟道阻力和背压、调节燃烧器、控制燃气和空气的比例、测试烟气成分。烟气热能回收装置对锅炉燃烧系统、烟风系统的影响应降到最小。
 - e) 单机试运行及调试后，应进行联合试运行及调试，并应达到设计要求。
- 8.1.2 被加热介质为水的烟气热能回收装置进水应加装过滤器，且被加热水水质应符合 GB/T 1576 中给水标准。
- 8.1.3 在运行过程中，应加强对设备、烟道和风道及调整挡板与阀门的检查，和挡板和阀门开关应灵活准确且密封良好。
- 8.1.4 定期检查烟气热能回收装置与烟道的连接部位，烟道排水口处排水应通畅，避免烟气热能回收装置内部和烟道积水。
- 8.1.5 停炉后应检查烟气热能回收装置、烟道、风道等部位的磨损、腐蚀和积水情况，应对缺损部位及时修复，修复部位验收合格后方可投入使用。

8.2 维护保养

- 8.2.1 烟气热能回收装置启动前，应对换热器烟气侧表面进行吹扫和清水冲洗，并确保烟气冷凝水排水管通畅。
- 8.2.2 烟气热能回收装置启动前，系统内部应充满被加热介质（如水或空气），确保流量达到设计要求；启动后观察被加热介质的出口介质温度和压力；当被加热介质为水时，应确保被加热水的出口温度低于汽化温度 20 °C 以上。
- 8.2.3 烟气热能回收装置运行期间，应实时监测被加热介质（液体）温度，严禁汽化；监测被加热介质压力，严禁超压；观察烟气进出口压降，压降超过初始运行的 1.2 倍或烟气系统余压时，应清洗烟气换热管，并检查烟气冷凝水排出口是否堵塞；观察被加热介质进口管路上的过滤器压降，压降超过初始运行的 1.5 倍时，应及时清洗过滤器；经常检查烟气冷凝水排水管是否通畅，并及时清除堵塞物；工业天然气锅炉在相同运行工况下，烟气热能回收装置出口烟气温度升高，应检查原因，若换热器表面有灰尘沉积，应及时清理。
- 8.2.4 烟气热能回收装置停运后，应及时清洗烟气换热管，并关闭烟气热能回收装置的进出口烟阀，若

短时间停用设备，锅炉正常运行，则需即使开启旁路。

- 8.2.5 维修维护人员进入烟气热能回收设备内部清洗或检修时，应踩在换热器上部的检修支架，严禁直接踩踏换热器表面，严禁破坏换热器表面防腐层，以免影响设备使用寿命。
- 8.2.6 被加热介质为水的间壁式烟气热能回收装置，设备不运行期间应采取满水保养措施，降低换热管内氧腐蚀；烟气热能回收装置设置在室外且当室外温度低于 5 °C 时，应采取防冻措施，避免换热管及系统管道冻裂。

8.3 突发事件应急预案

- 8.3.1 考虑工业天然气锅炉运行过程中出现超温、超压、烟气硫含量超标等突发事件会烟气热能回收装置安全运行造成损害时，应迅速开启旁通烟道阀，关闭烟气热能回收装置的进、出口烟阀，将烟气切出至旁通烟道，确保烟气热能回收系统的安全运行。
- 8.3.2 烟气热能回收系统应定期清洗维护，设备漏水和维护检修期间，应关闭烟气热能回收装置的进出口烟阀，将高温烟气切换至旁通烟道，待检修维护完成并验收合格后方可开启，并且检修期间应确保设备和维修人员安全。
- 8.3.3 企业应根据烟气热能回收系统特点制定应急预案，特别是采用烟气热能回收发电系统，应加强员工培训、组织演练，并在组织结构和制度上保证系统发生事故时，应急人员应按照预案要求，及时有效地开展突发事件应急行动。

附录 A

(规范性附录)

燃气利用热效率与节能量及节能率计算

A.1 燃气利用热效率

燃气利用热效率应按式 (A.1) 计算:

$$\eta_h = \frac{Q_h}{B_g \times q_{dw}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

- η_h —— 烟气热能回收装置的燃气利用热效率, %;
- Q_h —— 烟气热能回收装置有效输出热量, 单位为千瓦 (kW);
- B_g —— 工业天然气锅炉的标准状态下燃气流量, 单位为标准立方米每秒 (Nm³/s);
- q_{dw} —— 燃气低位发热量, 单位为千焦每标准立方米 (kJ/Nm³)。

工业天然气锅炉的标准状态下燃气流量应采用准确度不低于 1.0 级燃气流量表或经过标定的孔板流量计测量。燃气的压力和温度应在燃气流量测点附近测量, 宜将实际状态的燃气流量换算到标准状态下的燃气流量。

A.2 烟气热能回收装置有效输出热量

当烟气热能回收装置加热不同温度和流量的被加热介质时, 烟气热能回收装置有效输出热量应分别按式 (A.2) 计算:

$$Q_h = \sum_{m=1}^n G_{rm}(h_{rom} - h_{rim}) \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- Q_h —— 烟气热能回收装置有效输出热量, 单位为千瓦 (kW);
- G_{rm} —— 第 m 种其他被加热介质流量, 单位为千克每秒 (kg/s);
- h_{rom} —— 第 m 种其他被加热介质的出口比焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- h_{rim} —— 第 m 种其他被加热介质的进口比焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg)。

A.3 节能量

节能量应按式 (A.3) 计算:

$$Q_j = Q_h - Q_d \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- Q_j —— 烟气热能回收装置的节能量, 单位为千瓦 (kW);
- Q_h —— 烟气热能回收装置有效输出热量, 单位为千瓦 (kW);
- Q_d —— 回收烟气热能所消耗能量 (按发电平均效率折算为一次能源的能量), 单位为千瓦 (kW)。

当增加风机、水泵等时, 风机、水泵等设备的电耗应采用电表或功率计计量, 准确度不应低于 0.5 级; 回收烟气热能所消耗能量应按发电平均效率折算为一次能源的能量, 其折算方法应符合 GB/T 2589 的规定。

A.4 节能率

节能率应按式（A.4）计算：

$$\eta_j = \frac{Q_j}{B_g \times q_{dw}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

- η_j —— 烟气热能回收装置的节能率，%；
- Q_j —— 烟气热能回收装置的节能量，单位为千瓦（kW）；
- B_g —— 工业天然气锅炉的标准状态下燃气流量，单位为标准立方米每秒（Nm³/s）；
- q_{dw} —— 燃气低位发热量，单位为千焦每标准立方米（kJ/Nm³）。

.....

