ICS XXXXXX
CCS X XXX

团　体　标　准

T/CIECCPA XXX—20XX

真空感应炉热平衡测试与计算方法

Methods of determination and calculation of heat balance in vacuum induction furnace

（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 次

前 言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语与定义 1
4 热平衡测试 1
4.1 热平衡测试基准 1
4.2 测试准备 1
4.3 测试步骤 2
4.4 测试内容、部位与方法 2
4.4.1 主要测试内容 2
4.4.2 预备性测试 2
5 物料平衡计算 3
5.1 收入物料质量计算 3
5.2 支出物料质量的计算 3
5.3 物料平衡表 4
6 热平衡计算方法 4
6.1 热收入项的计算 4
6.2 热支出计算 5
6.3 平衡表 8
6.4 主要经济技术指标 8
7 热平衡测试报告内容 8
参 考 文 献 10
附录 1 （资料性）设备概况 11
附录 2 （资料性）生产技术指标 122
附录 3 （资料性）主要测试内容 133

前　言

本标准按照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。

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。

本标准由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：上海鑫蓝海自动化科技有限公司

本文件主要起草人：　陈子宏、

真空感应炉热平衡测试与计算方法

1 范围

本文件规定了真空感应炉热平衡测试与计算基准、设备及炉子概况、测试准备、测试步骤、测试内容、部位与方法、物料平衡和热平衡计算方法。

本文件适用于高温熔炼用真空感应炉热平衡测试与计算，其他行业热处理炉可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 34476 转炉热平衡测试与计算方法

GB/T 37428 电弧炉热平衡测试与计算方法

3 术语与定义

GB/T 34476 和 GB/T 37428 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

真空感应炉热平衡 heat balance in vacuum induction furnace

真空感应炉系统中各个部分的温度达到相等或稳定的状况，没有任何热量的传递或转化。

4 热平衡测试

4.1 热平衡测试基准

4.1.1 基准温度

以炉体周围1 m处的温度为基准温度。

4.1.2 热平衡测试范围

根据测试要求，一般做炉膛热平衡。

4.1.3 热平衡计算单位

以每吨入炉物料带出的热量（即 kJ/t）为计算单位。

4.1.4 测试工况与频次

测试在正常生产工况条件下进行，每次测试一个冶炼周期，一个冶炼周期为自开始加热起至完全停止供电，连续测试3个冶炼周期。

4.2 测试准备

4.2.1 设备状况

掌握真空感应炉设备概况及生产技术指标，具体内容见附件表1和附件2。

4.2.2 制定测试方案

根据测试要求制定测试方案，并选择能够代表真空感应炉实际冶炼情况的测试点和测试部位。

4.2.3 组织测试人员

根据测试方案组织测试人员，测试工作由专业技术人员，按工作需求对测试人员进行分工。并根据情况进行必要的技术培训和安全教育。参与测试人员应了解测定目的与要求，熟悉负责测试的内容，熟练掌握测试技术。测试应在指定的专业人员统一指挥下进行。

4.2.4 准备测试仪器、仪表

测试所用仪器、仪表在检定周期内经过有关部门校验校正、满足测试要求。工厂无计量装置时，在测试前应安装符合测试要求的计量装置。

4.2.5 预备性测试

测试所用仪器、仪表在检定周期内经过有关部门校验校正、满足测试要求。工厂无计量装置时，在测试前应安装符合测试要求的计量装置。

4.3 测试步骤

按照测试内容进行测试与记录。采用以测量为主，控制中心记录数据为参考的方法。对所测数据进行分析整理，并按本标准的计算方法进行计算。对测试结果进行分析并提供检测报告。

4.4 测试内容、部位与方法

4.4.1 主要测试内容

主要测试内容见附件3。

4.4.2 预备性测试

4.4.2.1 环境状况

采用温度计测量炉体1m处的温度。

4.4.2.2 用电量的测量

在真空感应炉用变压器一次侧采用三相累积电能表读取。

4.4.2.3 冷却水的测量

4.4.2.3.1 冷却水流量的测量

在冷却水管道采用流量计测量。

4.4.2.3.2 冷却水温度的测量

在冷却水进出水口采用温度计测量。

4.4.2.4 物料的测量

4.4.2.4.1 物料重量的测量

物料重量采用现场称量装置称重，或根据物料的几何尺寸、密度计算。

4.4.2.4.2 物料温度的测量

入炉物料的温度采用半导体温度计测量，出炉物料的温度采用红外测温仪测量。每次检测进行多次测量，去掉最高值和最低值后取剩余测量值。

4.4.2.4.3 物料的化学成分分析

对全部入炉料进行化学成分分析。

4.4.2.5 气体的测量

4.4.2.5.1 气体流量的测量

由安装在管道上气体流量计测量。

4.4.2.5.2 气体温度的测量

气体温度宜取环境温度。

4.4.2.5.3 气体化学成分的测量

在炉气出口采用气体分析仪或气相色谱仪分析气体化学成分。

4.4.2.6 炉膛温度的测量

在炉膛表面采用半导体温度计按每平方米测点不少于4个进行测量，取平均值。

5 物料平衡计算

5.1 收入物料质量计算

5.1.1 收入物料质量总和按式（1）计算:

$$\sum G = G_1+G_2+G_3+G_4+G_5+G_6+G_7+G_8 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（1）$$

式中：

$\sum G$——收入物料质量总和，单位为千克每吨（kg/t）；

G_1——生铁质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G_2——工业纯铁质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G_3——废钢质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G_4——合金质量，单位为千克每吨(kg/t)；

G_5——石灰质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G_6——萤石质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G_7——石英质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G_8——坩埚侵蚀质量，单位为千克每吨（kg/t）。

5.1.2 炉衬侵蚀的质量可用钙镁平衡法计算，也可按金属液的 0.3%计算。

5.2 支出物料质量的计算

5.2.1 支出物料质量总和计算按式（2）计算:

$$\sum G' = G'_1+ G'_2+ G'_3 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（2）$$

式中：

$\sum G'$——支出物料质量总和，单位为千克每吨（kg/t）；

G'_1——出炉金属液质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G'_2——出炉炉渣质量，单位为千克每吨（kg/t）；

G'_3——出炉气体质量，单位为千克每吨（kg/t）。

5.2.2 物料各项收入总和与已测各项支出总和之差即为差值 ΔG，按式（3）计算：

$$\Delta G=\sum G-\sum G' \quad \cdots\cdots (3)$$

差值包括未测出的支出及误差。

物料平衡允许相对误差值为±5%以内，即 $\left|\frac{\Delta G}{\sum G}\times 100\right| \le 5$ 。

5.2.3 出炉炉气质量 G'_3 按式（4）计算:

$$G'_3=\frac{V'_g}{100\times 22.4}\left(28\varphi_{CO}+44\varphi_{CO_2}+60\varphi_{SO_2}\right) \quad \cdots\cdots (4)$$

式中：

V'_g——出炉气体体积，单位为立方米每吨（m^3/t）；

φ_{CO}——出口炉气中 CO 的体积分数，%；

φ_{CO_2}——出口炉气中 CO_2 的体积分数，%；

φ_{SO_2}——出口炉气中 SO_2 的体积分数，%。

5.3 物料平衡表

将各物料平衡收、支项的计算结果记入表1中。

表 1　物料平衡记录表

收入				支出			
符号	项目	kg/t	%	符号	项目	kg/t	%
G_1	生铁质量			G'_1	出炉金属液质量		
G_2	工业纯铁质量			G'_2	出炉炉渣质量		
G_3	废钢质量			G'_3	出炉炉气质量		
G_4	合金质量						
G_5	石灰质量						
G_6	萤石质量						
G_7	石英质量						
G_8	坩埚侵蚀质量			ΔG	差值		
$\sum G$	合计		100	$\sum G'$	合计		100
注 1：百分率精确到小数点后一位。 注 2：质量值取 4 位有效数字。							

6 热平衡计算方法

6.1 热收入项的计算

6.1.1 热量总收入 Q 按式（5）计算：

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4 \quad \cdots\cdots (5)$$

式中：

Q_1——入炉物料的物理热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q_2——元素氧化放出的热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q_3——成渣反应放出的热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q_4——电热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

6.1.2 入炉物料的物理热量 Q_1 按式（6）计算：

$$Q_1=\Sigma B_i(c_i t_i-c_{ie}t_e)\cdots\cdots(6)$$

式中：

B_i——第 i 种入炉物料的质量，单位为千克每吨（kg/t）；

c_i 及 c_{ie}——第 i 种入炉物料在 0 至 t_i 及 t_e 间的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t_i——第 i 种入炉物料的入炉温度，单位为摄氏度（℃）；

t_e——基准温度，单位为摄氏度（℃）。

6.1.3 元素氧化放出的热量 Q_2 按式（7）计算：

$$Q_2=9199.52\times n\cdot G_c+32746.11\times(1-n)\cdot G_c+32169.05\times G_{si}+7004.18\times G_{Mn}+9270.61\times d\cdot G_s+4775.39G_{Fe\text{-}Feo}+7367.98G_{Fe\text{-}Feo} \quad (7)$$

式中：

9199.52 ——C 元素氧化成 CO 的化学反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

n ——C 元素氧化为 CO 的百分率，%；

G_C ——冶炼每吨铸锭 C 元素的氧化量，单位为千克每吨（kg/t）；

32746.11 ——C 元素氧化成 CO_2 的化学反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

32169.05 ——Si 元素氧化的化学反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

G_{si} ——冶炼每吨铸锭 Si 元素的氧化量，单位为千克每吨（kg/t）；

7004.18 ——Mn 元素氧化的化学反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

G_{Mn} ——冶炼每吨铸锭 Mn 元素的氧化量，单位为千克每吨（kg/t）；

9270.61 ——S 元素氧化的化学反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

d ——S 元素氧化为 SO_2 的百分率，%；

G_s ——冶炼每吨铸锭 S 元素的氧化量，单位为千克每吨（kg/t）；

4775.39 ——Fe 元素氧化成 FeO 的化学反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）

$G_{Fe\text{-}Feo}$ ——入炉炉料中 Fe 元素氧化成 FeO 的质量，单位为千克每吨（kg/t）；

7367.98 ——Fe 元素氧化成 Fe_2O_3 的化学反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

6.1.4 成渣反应放出的热量 Q_3 按式（8）计算：

$$Q_3=2103.34G_{si}\frac{60}{28} \quad \cdots\cdots(8)$$

式中：

2103.34——Si 元素氧化反应热，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

6.1.5 电热量 Q_4 按式（9）计算：

$$Q_4=3598.24\times W\cdots\cdots(9)$$

式中：

3598.24——电热当量，单位为千焦每千瓦时[kJ/(kW·h)]；

W ——吨铸锭有功耗电量，单位为千瓦时每吨(kW·h/t)，按式（10）计算：

$$W=\frac{W_1}{G_1'}\cdots\cdots(10)$$

W_1 ——总耗电量，单位为千瓦时（kW·h）；

G'_1 ——每炉总金属液量，单位为吨（t）。

6.2 热支出计算

6.2.1 热量总支出 Q'按式（11）计算:

$$Q'=Q'_1+Q'_2+Q'_3+Q'_4+Q'_5+Q'_6\cdots\cdots(11)$$

式中：

Q'_1 ——金属带出的物理热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q'_2 ——炉渣带出的物理热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q'_3 ——炉气带出的物理热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q'_4 ——冷却水带走的物理热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q'_5 ——炉体表面散发的热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

Q'_6 ——电损失热量，单位为千焦每吨（kJ/t）；

6.2.2 热量各项收入总和与已测各项支出总合的差值ΔQ按式（12）计算：

$$\Delta Q = Q - Q' \cdots\cdots (12)$$

差值包括未测出的支出及误差。

热平衡允许相对误差值为±5%以内，即$\left|\frac{\Delta Q}{Q}\times 100\right| \le 5$。

6.2.3 金属液带出物理热量Q'_1按式（13）计算：

$$Q'_1 = G'_1[c'_1 t'_1 - c_e t_e + 271.28] \cdots\cdots (13)$$

式中：

c'_1 ——出炉金属液在0℃至t_1'间的平均比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t'_1 ——出炉金属液的温度，单位为摄氏度（℃）；

c_e ——出炉金属液在0 ℃至t_e间的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

271.8——金属的熔化潜热，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

6.2.4 炉渣带出物理热量Q'_2按式（14）计算:

$$Q'_2 = G'_2 (c'_2 t'_2 - c'_{2e} t_e + 209.08) \cdots\cdots (14)$$

式中：

c'_2 ——炉渣在0 ℃至t'_2间的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t'_2 ——出炉炉渣的温度，单位为摄氏度（℃）；

c'_{2e} ——炉渣在0℃至t_e间的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

209.08——渣的熔化潜热，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

6.2.5 炉气带出物理热量Q'_3按式（15）计算:

$$Q'_3 = G'_3(c'_3 t'_3 - c'_{3e} t_e) \cdots\cdots (15)$$

式中：

c'_3 ——炉气在0℃至t'_3间的平均比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t'_3 ——炉气温度，单位为摄氏度（℃）；

c'_{3e} ——炉气在0 ℃至t_e间的平均比热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]。

6.2.6 冷却水带走物理热量Q'_4按式（16）计算：

$$Q'_4 = G_s(c'_4 t'_4 - c'_{4e} t_e) \cdots\cdots (16)$$

式中：

G_s ——冷却水的总质量，单位为千克每吨（kg/t）；

c'_4 ——冷却水在0℃至t'_4间的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t'_4 ——冷却水的出水温度，单位为摄氏度（℃）；

c'_{4e} ——冷却水在0℃至t_e间的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t_e ——冷却水的进水温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.7 炉体表面散发的热量Q'_5按式（17）计算:

$$Q_5^{'}=\frac{\tau\sum q_i A_i}{60G_1^{'}} \quad \cdots\cdots (17)$$

式中：

τ ——真空感应炉冶炼周期，单位为分钟（min）；

A_i ——第 i 部分炉体表面散热面积，单位为平方米（m^2）；

q_i ——第 i 部分炉体表面平均面积热流量，单位为千焦每平方米小时[kJ/(m^2·h)]，如不能直接测量，可按式（18）计算：

$$q_i=20.41\varepsilon_i\left|\left(\frac{273+t_b}{100}\right)^4-\left(\frac{273+t_e}{100}\right)^4\right|+\alpha_d\left(t_b-t_e\right) \quad \cdots\cdots (18)$$

式中：

20.41 ——辐射换热系数，单位为千焦每平方米小时[kJ/ (m^2· h)]；

ε_i ——第 i 部分炉体表面黑度；

t_b ——第 i 部分炉体表面平均温度，单位为摄氏度（℃）；

α_d ——对流给热系数，单位为千焦每平方米小时[kJ/(m^2·h)]。

无风时，对流给热系数按式（19）计算：

$$\alpha_d=A\left(t_b-t_e\right)^{1/4} \quad \cdots\cdots (19)$$

式中：

A ——系数，散热面向上时 A=11.7，向下时 A=6.3，垂直时 A=9.2。

当风速 W_f≤5 m/s 时，对流给热系数按式（20）计算：

$$\alpha_d=22.2+15.1W_f \quad \cdots\cdots (20)$$

当风速 W_f>5 m/s 时,对流给热系数按式（21）计算:

$$\alpha_d=27.1W_f^{0.78} \quad \cdots\cdots (21)$$

6.2.8 电损失热量 Q'_6 按式（22）～式（27）计算:

$$Q_6^{'}=3\overline{I}^2R\cdot\frac{\tau}{G}\cdot\frac{3598.24}{1000} \quad \cdots\cdots (22)$$

$$\overline{I}=\overline{P}\times1000/\left(\sqrt{3}\cos\phi\cdot\overline{u}_2\right) \quad \cdots\cdots (23)$$

$$\overline{P}=\frac{W_1}{\tau} \quad \cdots\cdots (24)$$

$$\cos\phi=\frac{W_1}{\sqrt{\left(W_1^2+Q_W^2\right)}} \quad \cdots\cdots (25)$$

$$Q_W=\Delta Q_W\times m \quad \cdots\cdots (26)$$

$$\overline{u}_2=\frac{\sum u_2^{'}\tau^{'}}{\tau} \quad \cdots\cdots (27)$$

式中：

$\overline{I}$ ——平均电流，单位为安培（A）；

R ——相电阻，单位为欧姆（Ω），按式（28）计算；

τ ——全炉总通电时间，单位为小时（h）；

G ——全炉金属液质量，单位为吨（t）；

3598.24——电热当量，单位为千焦每千瓦时[kJ/(kW·h)]；

$\overline{P}$ ——平均功率，单位为千瓦（kW）；

$\cos\phi$ ——功率因数；

u_2 ——二次侧平均电压，单位为伏特（V）；

W_1 ——全炉总电耗（有功），单位为千瓦时（kW·h）；

Q_w ——全炉无功消耗，单位为千瓦时（kW·h）；

ΔQ_w ——无功电度表读数，单位为千伏安每小时（kVA/h）；

m ——无功电度表倍率；

u_2' ——二次各级电压，单位为伏特（V）；

τ' ——各级电压使用时间，单位为小时（h）。

$$R=\overline{R}+R_b \quad \cdots\cdots\cdots\

f) 每吨铸锭电耗；

g) 分析与改进建议；

h) 测定、负责人、报告人、审核人（签字）。

参 考 文 献

[1]《转炉热平衡测试与计算方法》GB/T 34476-2017
[2]《电弧炉热平衡测试与计算方法》GB/T 37428-2019
[3]《热处理炉热平衡测试与计算方法》GB/T 33957-2017
[4]《有色金属加工企业铸锭感应加热炉热平衡测试与计算方法》YS/T 121-5-92
[5]《有色金属加工企业真空电弧炉热平衡测试与计算方法》YS/T 121-9-92
[6]《钢铁行业蓄热式钢包烘烤系统热平衡测试与计算方法》YB/T 4484-2015
[7]《砖瓦工业隧道窑热平衡、热效率测定与计算方法》GB/T 39776-2021
[8]《烧结机热平衡测试与计算方法》GB/T34473-2017
[9]《燃气加热炉热平衡测试与计算》
[10]《十吨工频感应电炉的传热测量与计算》
[11]《重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方法（吹炼转炉）》YS/T 118.15-1992

附件 1

（资料性）

设备概况

炉子名称			
项目	单位	规格	内容或数值
炉子型号			
炉子用途			
同类型炉子台数			
建炉时间			
大修年月			
内衬坩埚材质			
内衬坩埚尺寸			
真空泵功率			
电源功率			
电源频率			
补偿电容器组容量			

附录 2

（资料性）

生产技术指标

项目	单位	内容或数值
全年产量		
主要品种		
主要品种产量		
主要品种规格		
平均冶炼时间		
单位产品电耗		
单位产品水耗		
单位产品气耗		

附录 3

（资料性）

主要测试内容

企业名称及真空感应炉编号 熔炼钢种 测定单位和日期				
项目			单位	内容
废钢	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	其他		kg/t	
	废钢的化学成分	C	%	
		Si	%	
		Mn	%	
		P	%	
		S	%	
		Cr	%	
		Ni	%	
		Al	%	
工业纯铁	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	工业纯铁平均化学成分	C	%	
		P	%	
		S	%	
生铁	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	生铁平均化学成分	C	%	
		Si	%	
		Mn	%	
		P	%	
		S	%	
合金	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	合金平均化学成分	C	%	
		Si	%	
		Mn	%	
		P	%	
		S	%	
石灰	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	石灰平均化学成分	CaO	%	
		MgO	%	
		Al_2O_3	%	
		SiO_2	%	
		CO_2	%	

主要测试内容（续）

企业名称及真空感应炉编号 熔炼钢种 测定单位和日期				
项目			单位	内容
石英	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	石英平均化学成分	MgO	%	
		CaO	%	
		SiO_2	%	
		Al_2O_3	%	
		…	%	
萤石	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	净萤石量		kg/t	
	净萤石平均化学成分	CaF_2	%	
		CaO	%	
		Al_2O_3	%	
		MgO	%	
		…	%	
炉衬	入炉温度		℃	
	吨钢耗量		kg/t	
	炉衬平均化学成分	CaO	%	
		MgO	%	
		SiO_2	%	
		Al_2O_3	%	
		…	%	
钢液	出钢温度		℃	
	钢液量		kg/t	
	钢液平均化学成分	C	%	
		Si	%	
		Mn	%	
		P	%	
		S	%	
		…	%	
炉渣	出渣温度		℃	
	炉渣量		kg/t	
	炉渣平均化学成分	CaO	%	
		SiO_2	%	
		MgO	%	
		MnO	%	
		P_2O_5	%	
		…	%	
炉气	炉气温度		℃	
	炉气量		kg/t	
	炉气平均化学成分	CO	%	
		CO_2	%	
		SO_2	%	

主要测试内容（续）

企业名称及真空感应炉编号 熔炼钢种 测定单位和日期			
项目		单位	内容
炉体散热	散热面积	m^2	
	表面平均温度	℃	
	表面平均面积热流量	kJ/（m^2·h）	
电耗			
有功电度表	初始读数		
	终了读数		
	变化		
	有功消耗	kW·h	
	无功消耗	kvar	
无功电度表	初始读数		
	终了读数		
	变化		
	有功消耗	kW·h	
	无功消耗	kvar	