

团 体 标 准

T/CIECCPA 071—2025

保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品能源消耗技术要求

Technical requirements for energy consumption per unit product of electric slag remelting furnace for protective atmosphere smelting

2025 - 05 - 23 发布

2025 - 05 - 26 实施

中 国 工 业 节 能 与 清 洁 生 产 协 会 发 布

CLECCRA

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 技术要求 2

5 统计范围和计算方法 3

 5.1 统计范围 3

 5.2 计算方法 3

6 节能和管理措施 5

 6.1 工艺节能技术 5

 6.2 装备节能技术 5

 6.3 管理措施 5

附录 A（资料性）实例 6

表 1 现有保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗限定值 2

表 2 新建和改扩建保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗准入值 2

表 3 保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗先进值 2

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。

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：宝武特冶航研科技有限公司、通裕重工股份有限公司、上海鑫蓝海自动化科技有限公司、内蒙古北方重工业集团有限公司、北京航空材料研究院股份有限公司、东北大学特殊钢冶金研究所、宝鸡宝钛装备科技有限公司、天津重型装备工程研究有限公司、上海电气上重铸锻有限公司、山东昱锟高合新材料有限公司、北京北冶功能材料有限公司、西部超导材料科技股份有限公司、二重（德阳）重型装备有限公司、湖南华菱湘潭钢铁有限公司、抚顺特殊钢铁股份有限公司、北京低碳绿标信息技术咨询有限公司。

本文件主要起草人：李荣之、熊安君、朱斌、秦士东、杨清、桂大兴、信伟良、施卿、涂明金、贾晓斌、董艳伍、姜周华、孟宇、于昂、武建文、赵辉、高建军、柯飞飞、石佳毅、陈文君、邓向辉、王绍灼、李燕、刘海稳、芦力强、谢传新、和永岗、江海军、赵岐、张建伟、李连龙、曾杰、刘桥云、姚建华、高健、温冬、陈知伟、董君伟、吴建军、王春奕、张文婷、梁晓苏、李成功。

保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品能源消耗技术要求

1 范围

本文件规定了保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品能源消耗技术要求、统计范围和计算方法、节能和管理措施。

本文件适用于保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品能源消耗的统计和单耗的计算,适用于对保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品能源消耗进行评价和考核,为企业加强能源统计、提高能源管理水平、促进企业节能减排提供了自我检测和评价的依据。

2 规范性引用文件

下列文件对于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)适用于本标准。

GB/T 2589 综合能耗计算通则

GB/T 2900.23 电工术语工业电热装置

GB/T 3101 有关量、单位和符号的一般原则

GB/T 3484 企业能量平衡通则

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 10066.1 电热和电磁处理装置的试验方法第1部分:通用部分

GB/T 10066.8 电热和电磁处理装置的试验方法第8部分:电渣重熔炉

GB/T 10067.1 电热和电磁处理装置基本技术条件第1部分:通用部分

GB/T 10067.8 电热装置基本技术条件第8部分:电渣重熔炉

GB 17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则

GB/T 17195 工业炉名词术语

GB/T 30839.1 工业电热装置能耗分等第1部分:通用要求

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

电渣重熔 *electroslag remelting*

以电流通过熔渣产生的电阻热为热源,对自耗电极进行熔化、精炼和凝固成型的精炼过程。

3.2

单位产品能源消耗 *energy consumption for per unit products*

生产一个计量产品所消耗的能量量,是反映企业生产工艺水平和能源利用效率的重要指标。

3.3

电渣重熔渣系 *slag used in electroslag remelting*

以 CaF_2 为基础,匹配适量的 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 和 SiO_2 等组成的渣系,通过改变熔渣的黏度、电导率、熔点、比热容、碱度等物理化学性质,达到调节电耗、流动性和精炼效果。

3.4

渣池 slag pool

电渣重熔工艺的核心部分是熔池。自耗电极从熔池上方浸入渣池一定深度，然后被加热、熔化、精炼和过滤，并且承受振动、搅拌和电化学反应。

3.5

气体保护 gas shield

惰性气体保护电渣炉主要目的是隔离空气与钢液接触，避免空气中的有害气体进入钢液，使钢锭成分产生不可控的结果。惰性气体主要采用高纯氩气，对于含氮钢则采用氮气。

3.6

充填比 filling ratio

自耗电电极的截面积与结晶器的截面积的面积比。

4 技术要求

4.1 现有保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗建议值应符合表 1 的规定。

表 1 现有保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗建议值

公称容量 t	单位产品电耗 kWh/t	单位产品能耗 kgce/t
≤1	≤1600	≤196.6
1~3	≤1500	≤184.4
3~10	≤1450	≤178.2
10~30	≤1400	≤172.1
>30	≤1350	≤165.9

4.2 新建和改扩建保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗推荐值，应符合表 2 的规定。

表 2 新建和改扩建保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗推荐值

公称容量 t	单位产品电耗 kWh/t	单位产品能耗 kgce/t
≤1	≤1500	≤184.4
1~3	≤1450	≤178.2
3~10	≤1400	≤172.1
10~30	≤1350	≤165.9
>30	≤1300	≤159.8

4.3 保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗先进值，应符合表 3 的规定。

表 3 保护气氛电渣重熔炉冶炼单位产品电耗和单位产品能耗先进值

公称容量 t	单位产品电耗 kWh/t	单位产品能耗 kgce/t
≤1	≤1400	≤172.1
1~3	≤1350	≤165.9
3~10	≤1300	≤159.8
10~30	≤1250	≤153.7
>30	≤1250	≤153.7

4.4 在本标准中，针对特殊品种、特殊工艺，允许对上述指标进行偏离。

5 统计范围和计算方法

5.1 统计范围

5.1.1 保护气氛电渣炉冶炼单位产品电耗：

- a) 冶炼电量以炉前变压器的一次侧计量电表数据为准；
- b) 不包括为提高保护气氛电渣炉质量服务的炼渣炉所耗用的冶炼用电。

5.1.2 保护气氛电渣炉冶炼单位产品能源消耗：

- a) 保护气氛电渣炉冶炼单位产品能源消耗；
- b) 保护气氛电渣炉冶炼时氩气或氮气消耗。

5.1.3 企业能源消耗的统计方法应符合 GB/T2589、GB/T3484 的规定。

5.1.4 用于统计的量、单位、符号应符合 GB3101 的规定。

5.2 计算方法

按照《中华人民共和国节约能源法》以及原冶金部颁发《设计节能技术规定》的要求，采用成熟、可靠的工艺、技术和节能型设备，能源消耗指标，达到国际先进电渣设备的消耗水平。

5.2.1 熔炼钢水能源单耗的计算

a) 重熔过程的能耗为以下公式：

$$Q=Q_M+Q_S+Q_W+Q_{St}+Q_R\cdots\cdots\cdots(1)$$

式中：

- Q ——重熔过程总能耗，J；
- Q_M ——电极加热、熔化以及熔滴在渣中需要吸收的能量，J；
- Q_S ——渣熔化、过热和挥发所需能量，J；
- Q_W ——结晶器和底水箱、烟罩冷却水带走的热量，J；
- Q_{St} ——熔炼结束红热铸锭含储存的显热，J；
- Q_R ——系统阻抗消耗电能，J。

b) 电极加热，熔化过热所需能量 Q_M ：

$$Q_M=k_1\{m_e[C_{p,s}(T_s-T_0)+C_{p,m}(T_l-T_s)+\Delta H]\}+k_2\left\{C\Phi\left[\left(\frac{T_{St}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right]\cdot A_{eff}\right\}\cdots\cdots(2)$$

式中：

k_1 ——修正系数;
 m_e ——电极质量, kg;
 $C_{p,s}$ ——电极固相比热容, $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$;
 T_s ——电极固相线温度, K;
 T_0 ——电极初始温度, K;
 $C_{p,m}$ ——电极两相区的比热容, $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$;
 T_l ——电极液相线温度, K;
 ΔH ——100g 电极熔化相变焓, J;
 k_2 ——修正系数;
 C ——辐射系数;
 Φ ——遮掩系数;
 T_{St} ——t 时刻内渣池表面温度, K;
 A_{eff} ——辐射面积, m^2 。

c) 假定电极端面与金属熔池之间的渣池构成导电圆锥, 则辐射面积 A_{eff} :

$$A_{eff} = \pi R_m^2 \sqrt{F} \dots \dots \dots (3)$$

式中:

R_m ——为结晶器半径, m;
 F ——为填充比。

d) 渣熔化、过热所需能量 Q_S :

$$Q_S = k_3 \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(\int_{T_0}^{T_r} C_{pi} dT + L_{ti} + L_{fi} \right) \right] \dots \dots \dots (4)$$

式中:

k_3 ——修正系数;
 m_i ——渣系中第 i 组元的质量, g;
 C_{pi} ——渣系第 i 组元的热容, $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$;
 L_{ti} ——渣系第 i 组元的相变热, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$;
 L_{fi} ——渣系第 i 组元的熔化热, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

e) 结晶器和底水箱等冷却水带走热量 Q_W :

$$Q_W = k_4 \left[\int_0^t c \cdot W_R \rho_w (T_H - T_0) dt \right] \dots \dots \dots (5)$$

式中:

k_4 ——修正系数;
 c ——水的比热容, $\frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{K}}$;
 W_R ——结晶器保证紊流状态的水耗, g/h;
 水的比热容
 ρ_w ——水的密度, $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$;
 T_H ——结晶器出水温度, K;
 T_0 ——系统进水温度, K。

f) 系统阻抗消耗电能 Q_R :

$$U_{Tr} = U_{SR} + \sum \Delta U \dots \dots \dots (6)$$

式中：

U_{Tr} ——变压器二次侧输出电压，V；

U_{SR} ——渣池区域的炉口电压，V；

$\Sigma\Delta U$ ——电渣炉短网阻抗电压总压降，V。

$$Q_R = k_5 \int_0^t \frac{\pi \lambda D^2 \cdot U_{SR} \cdot \Sigma \Delta U}{4 H_S} dt \dots\dots\dots (7)$$

式中：

k_5 ——修正系数；

λ ——为渣系的电导率， $\Omega^{-1}m^{-1}$ ；

D ——结晶器的直径，m；

H_S ——渣池的高度，m。

g) 铸锭储存的显热 Q_{st}

$$Q_{st} = m_e C_{P,S} (T_{ib} - T_{io}) \dots\dots\dots (8)$$

式中：

T_{ib} ——熔炼结束铸锭的平均温度，K；

T_{io} ——室温温度，K。

本项计算为实验室理论计算数据。

6 节能和管理措施

6.1 工艺节能技术

推荐采用以下措施达到工艺节能。

- a) 采用大充填比；
- b) 选择 CaF_2 含量较低的多元节能型渣系；
- c) 选择小渣量，采用浅渣池重熔；
- d) 采用两级计算机（PLC+工控机）自动化控制系统，保证合理的电极插入深度。

6.2 装备节能技术

- a) 采用节能型变压器，减少变压器的铁损和铜损；
- b) 采用同轴导电，短网增加铜排和水冷电缆的导电面积，减少压降损失；
- c) 大电流导体附近的钢结构采取隔磁措施，采用无磁不锈钢材料；
- d) 采用符合国家能耗标准的电机；
- e) 能源介质消耗数据(水、电)实时监控；

6.3 管理措施

- a) 变压器在使用前要进行检测，工作短路电流整定在 3 倍额定电流、持续 6 秒时，变压器各部位应无损伤。
- b) 电磁线选用电阻率 $\leq 0.02 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 的优质无氧铜，硅钢片采用高导磁有取向冷轧硅钢片，应符合 GB 2536 标准的优质变压器油。
- c) 定期对变压器、短网的绝缘及导电接触部分进行检测，使其接触良好，不能因接触点有杂物或者阻值过大而造成个别部位系统发热。
- d) 短网压降与工作电压的比值应小于 20%，系统功率因数要达到 0.85 以上。

附录 A

(资料性)

实例

本实例以结晶器直径 1100mm, 自耗电极直径 800mm, 电极重量 14.6t, 采用 65%CaF₂-25%Al₂O₃-10%CaO 渣系, 渣量 480kg, 电渣重熔 GCr15 钢总重量 14.6t 铸锭, 以上述条件为例开展能耗评估分析, 具体如下:

a) 电极加热, 熔化过热所需能量 Q_M :

$$Q_M = k_1 \{ m_e [C_{p,s}(T_s - T_0) + C_{p,m}(T_l - T_s) + \Delta H] \} + k_2 \left\{ C\Phi \left[\left(\frac{T_{St}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] A_{eff} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

k_1 ——修正系数 1.05;

m_e ——电极质量取 14600kg;

$C_{p,s}$ ——电极固相比热容取 $450 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$;

电极质量 $C_{p,m}$ ——电极液相比热容取 $836 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot \text{K}$;

T_s ——电极固相线温度取 1529K;

电极液相线温度 T_0 ——电极初始温度取 298K;

T_l ——电极液相线温度取 1719K;

ΔH ——100g 电极熔化相变焓取 388799J;

C ——辐射系数取 4.96;

Φ ——遮掩系数取 0.8;

T_{St} ——t 时刻内渣池表面温度取 1873K;

A_{eff} ——辐射面积, m²。

$$A_{eff} = \pi R_m^2 \sqrt{F} = \pi \times (0.55)^2 \times \sqrt{\frac{0.4}{0.55}} = 0.812 \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned} Q_M &= 1.05 \left\{ 14600 [450(1529-298) + 836(1719-1529) + 388799] + 4.96 \times 0.8 \left[\frac{1873^4}{100^4} - \frac{298^4}{100^4} \right] 0.812 \right\} \\ &= 16103198432 \text{ J} = 4472 \text{ kW} \cdot \text{h} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

b) 渣熔化、过热所需能量 Q_S :

$$Q_S = k_3 \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(\int_{T_0}^{T_l} C_{pi} dT + L_{ii} + L_{fi} \right) \right] \dots\dots\dots (12)$$

式中:

k_3 ——修正系数取 1;

m_{CaF_2} ——渣系中第 1 组元的质量取 336kg;

$m_{Al_2O_3}$ ——渣系中第 2 组元的质量取 120kg;

m_{CaO} ——渣系中第 3 组元的质量取 48kg;

T_0 ——电极初始温度取 298K;

C_{CaF_2} ——渣系第 1 组元的热容取 $122.82237 + 2.848T + (-6489901.1)T^{-2} + 72535.453T^{-1} - 4023.1068T^{0.5}$
J·K⁻¹·mol⁻¹;

$C_{Al_2O_3}$ ——渣系第 2 组元的热容取 $-15.73327 + 2.99485T + 4995269.1T^{-2} + 7068.35T^{0.5} - 112109.37T^{-1}$
J·K⁻¹·mol⁻¹;

C_{CaO} ——渣系第 3 组元的热容取 $58.79-1147146 T^{-2}-133.904 T^{-0.5}+1.02978 T^{-3} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$;

L_{CaF_2} ——渣系第 1 组元的相变热取 $4470 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$;

L_{CaF_2} ——渣系第 1 组元的熔化热取 $29706 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$;

$L_{Al_2O_3}$ ——渣系第 2 组元的熔化热 $118407.2 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$;

L_{CaO} ——渣系第 3 组元的熔化热取 $79496 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

$$Q_S = k_3 \left\{ \begin{aligned} & 336000 \left[\left(\int_{298}^{1719} 122.82237 + 2.848T + 6489901.1T^{-2} + 72535.453T^{-1} - 4023.1068T^{-0.5} dT \right) + 4470 + 29706 \right] \\ & + 120000 \left[\left(\int_{298}^{1719} -15.73327 + 2.99485T + 4995269.1T^{-2} + 7068.35T^{-0.5} - 112109.37T^{-1} dT \right) + 118407.2 \right] \\ & + 48000 \left[\left(\int_{298}^{1719} 58.79 - 1147146T^{-2} - 133.904T^{-0.5} + 1.02978T^{-3} dT \right) + 79496 \right] \end{aligned} \right\} \\ = 232,758,403,000 \text{ J} = 64.655 \text{ kW} \cdot \text{h} \dots \dots \dots (13)$$

c) 结晶器和底水箱等冷却水带走热量 Q_W :

$$Q_W = k_4 \left[\int_0^t c \cdot (W_c + W_b) \cdot \rho_w (T_H - T_0) dt \right] \dots \dots \dots (14)$$

式中:

k_4 ——修正系数取 0.85;

c ——水的比热容取 $4.186 \frac{\text{J}}{\text{g}} \cdot \text{K}$;

W_c ——结晶器保证紊流状态的水耗取 $100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, 折合为 100000000 g/h ;

W_b ——底水箱保证紊流状态的水耗取 $30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, 折合为 30000000 g/h ;

水的比热容

ρ_w ——水的密度取 $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$;

T_H ——结晶器出水温度取 289.15 K ;

T_0 ——系统进水温度取 283.15 K ;

$$Q_W = 0.85 \left[\int_0^{17} 4.186 (100000000 + 30000000) 1 (289.15 - 283.15) dt \right] = 63915840000 \text{ J} = 13082.4 \text{ kW} \cdot \text{h} \dots \dots \dots (15)$$

d) 系统阻抗消耗电能 Q_R :

$$Q_R = k_5 \int_0^t \frac{\pi \lambda D^2 \cdot U_{SR} \cdot \Sigma \Delta U}{4 H_S} dt \dots \dots \dots (16)$$

式中:

k_5 ——修正系数取 1;

λ ——为渣系的电导率取 $3.5 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$;

U_{SR} ——渣池区域的炉口电压取 70 V ;

$\Sigma \Delta U$ ——电渣炉短网阻抗电压总压降取 20 V ;

D ——结晶器的直径取 1.1 m ;

H_S ——渣池的高度取 0.183 m 。

$$Q_R = k_5 \int_0^{17} \frac{\pi \times 3.5 \times 1.1 \times 1.1 \times 70 \times 20}{4 \times 0.183} dt = 364,650 \text{ J} = 0.101 \text{ kW} \cdot \text{h} \dots \dots \dots (17)$$

e) 铸锭储存的显热 Q_{st} :

$$Q_{st} = m_e C_{P,S} (T_{ib} - T_{io}) \dots \dots \dots (18)$$

式中:

T_{ib} ——熔炼结束铸锭的平均温度取 1150K;

T_{io} ——室温温度取 298K。

$$Q_{st}=14600\times450\times(1150-298)=5,597,640,000J=1554.9kW\cdot h\cdots\cdots(19)$$

重熔过程的总能耗:

$$Q=Q_M+Q_S+Q_W+Q_{St}+Q_R=4472+64.655+13082.4+0.101+1554.9=19174.056kW\cdot h\cdots\cdots(20)$$

重熔过程的吨钢能耗为 Q_{Δ} :

$$Q_{\Delta}=\frac{Q}{14.6}=1313.2kW\cdot h\cdots\cdots(21)$$