

60 t 电渣炉结晶器冷却水流量计算-设计优化和重熔不锈钢的应用

杨传浩¹ 刘仲礼² 姜科¹ 宋道滨¹

(1 烟台台海玛努尔核电设备有限公司电渣厂,烟台 264003;2 烟台大学核装备与核工程学院,烟台 264003)

摘要 采用传热学理论对大型电渣炉结晶器冷却强度的影响因素进行了分析,计算得出直径1 800 mm 结晶器的最佳水流量为 1.2 m/s,并提出了套层厚度为 10 mm 的高速水套型结晶器优化设计方案,经电压 77.5 V,电流 19 kA,熔速 31.6 kg/min,水流 1.2 m/s,重熔60 t 0.030C-17.16Cr-11.80Ni-2.55Mo-0.072N 奥氏体不锈钢电渣锭的生产结果表明,电渣锭成型良好,表面光洁,渣皮分布均匀,改善了电渣锭成型质量。

关键词 60 t 锭电渣重熔 大型结晶器 冷却水流量 奥氏体不锈钢

Cooling Water Flow Rate Calculation-Design Optimization of 60 t ESR Furnace Mold and Application for Remelting Austenite Stainless Steel

Yang Chuanhao¹, Liu Zhongli², Jiang Ke¹ and Song Daobin¹

(1 Electroslag Works, Yantai Taihaimanor Nuclear Engineering Co Ltd, Yantai 264003;

2 School of Nuclear Equipment and Nuclear Engineering, Yantai 264003)

Abstract The effect factors on intensity of cooling of large-scale ESR furnace mold have been analyzed by using heat transfer theory, it is obtained by calculation that the optimum water flow rate for the 1 800 mm diameter mold is 1.2 m/s, and the optimum design scheme for high speed water case type mold with case layer thickness 10 mm is put forward. The production results by remelting 60 t 0.030C-17.10Cr-11.80Ni-2.55Mo-0.072N austenite stainless steel ESR ingot with voltage 77.5 V, current 19 kA, remelting speed 31.6 kg/min and water rate 1.2 m/s show that the formability of ESR ingot is better, and the forming quality of ESR ingot is improved with smooth ingot surface and uniform distribution of slag skim.

Material Index 60 t ESR Ingot, Large-Scale Mold, Cooling Water Flow Rate, Austenite Stainless Steel

电渣重熔钢锭直径超过1 500 mm 时,如何保证电渣锭的内部质量成为了重熔工艺的核心问题^[1]。影响钢锭凝固质量的因素较多,如材料本身性质、钢锭尺寸、冶炼电制度、冷却水流量等^[2]。对于大型电渣炉而言,随着钢锭直径增大,冷却水的水冷效果显得更加重要,影响水冷效果各因素中,水流量是至关重要的一项,高的水流量可以瞬时带走足够多的热量,有利于钢锭的结晶^[3],但过高的水流量不仅增大电渣炉供水系统投资,而且还会增加电耗。

1 结晶器冷却强度影响因素及水流量计算

结晶器参数见表 1。

结晶器的热交换可由式(1)计算:

$$Q = S \cdot \alpha \cdot (t_1 - t_2) \quad (1)$$

式中:Q- 结晶器的冷却强度;S- 结晶器壁的有效面

积; α - 结晶器的散热系数; t_1 - 与结晶器壁接触的钢锭表面的平均温度; t_2 - 冷却水的平均温度。

1.1 结晶器壁表面积与冷却强度的关系

从公式(1)可知,结晶器的冷却强度与其工作壁的有效面积成正比。但是针对某一产品规格而言,钢锭的尺寸是一定的,结晶器的尺寸也是一定的,因此结晶器工作壁的有效面积是一定的。所以此项可以认为是定值^[4]。

1.2 结晶器的散热系数与冷却强度的关系

结晶器的散热系数与冷却强度成正比,散热系数的倒数为热阻,所以结晶器的冷却强度与热阻成反比。结晶器的热阻可由式(2)计算:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (2)$$

式中: α_1 - 钢锭表面对结晶器壁的散热系数,取 430 kcal/(m² · h · °C); δ - 结晶器壁铜板厚度,取 0.03 m; λ - 结晶器壁的导热系数,取 344.5 kcal/(m² · h · °C); α_2 - 冷却水的散热系数。

α_2 可由式(3)计算:

表 1 电渣重熔结晶器参数/mm
Table 1 Parameters of ESR mold /mm

| 直径 | 高度 | 铜板厚度 | 水套厚度 |
|-------|-------|------|------|
| 1 800 | 2 800 | 30 | 30 |

$$\alpha_2 = A\omega^{0.8} \cdot d^{-0.2} \quad (3)$$

式中: A - 取决于水温的系数, 在 20 °C 时取 6.36; ω - 冷却水的重量速度, 对于该结晶器, 水流速 $\nu = 0.3$ m/s, 相当于 $\omega = 300$ kg/(m² · s); d - 当量直径。对于该结晶器, $d = 4 \times \frac{s}{D'} = \frac{4 \times \pi \times 1.8 \times 0.03}{\pi \times (2 \times 1.8 + 0.03)} = 0.06$ m。

综合以上可得, $\frac{1}{\alpha_1} = 0.0023$, $\frac{\delta}{\lambda} = 8.7 \times 10^{-5}$,

$\alpha_2 = 1070.35$ kcal/(m² · h · °C), $\frac{1}{\alpha_2} = 9.34 \times 10^{-4}$,

$\alpha = 301.114$ kcal/(m² · h · °C)。

结晶器的冷却强度还可应用式(4)通过实际测量求得: $Q = Cm\Delta t$ (4)

式中: C - 水的热容; m - 水流量; Δt - 冷却水的温升。

由以上可见, 钢锭表面对结晶器的热阻约占总热阻的 70%, 结晶器壁的热阻占 3%, 冷却水的热阻占 27%。

1.3 钢锭表面对结晶器壁的热阻

该部分热阻又由 3 部分组成:

$$\frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \quad (5)$$

式中: α_0 - 钢锭的导热系数; δ_1 - 渣皮厚度; λ_1 - 渣皮的导热系数; δ_2 - 渣皮与结晶器壁间的气隙层的厚度; λ_2 - 气隙层中气体的导热系数。

实际生产过程中, 钢锭凝固时必然发生体积收缩, 钢锭表面与结晶器壁形成气隙层不可避免, 大钢锭气隙层的厚度可达 5 ~ 10 mm, 此气隙层的形成很大程度上阻碍了钢锭与结晶器的热传递, 而又是不可避免的, 要降低此部分热阻, 困难较大^[5]。

1.4 冷却水散热系数与结晶器散热系数的关系

当结晶器的进水温度不变时, 其水流速 ν 增大 n 倍, 水的散热系数根据公式(3)推导为:

$$\alpha_2^n = K \cdot \alpha_2 \quad (6)$$

系数 K 与 n 成正比, 故 α_2^n 与 n 成正比。

应用公式(2), 假设其他参数不变, 即结晶器的工艺参数不变, 计算水流速 ν 与结晶器散热系数 α 的

关系, 得出水流速的最佳选择范围。

计算结果如表 2 和图 1 所示。

从表 2 及图 1 可以看出, 当水流速较低时, 提高水流速可以较大比例地提高结晶器的散热系数, 图 1 中水流速从 0.3 m/s 提高到 1.2 m/s, 结晶器散热系数成比例提高, 几乎成一直线, 提高了 23%。

表 2 水流速与结晶器散热系数的关系

Table 2 Relation between water flow rate and mold heat transfer coefficient

| n | 水流速(ν)/(m · s ⁻¹) | 散热系数(α) |
|----|-------------------------------------|------------------|
| 1 | 0.3 | 298.788 070 6 |
| 2 | 0.6 | 339.077 370 8 |
| 3 | 0.9 | 357.075 105 4 |
| 4 | 1.2 | 367.542 278 3 |
| 5 | 1.5 | 374.477 267 5 |
| 6 | 1.8 | 379.449 112 7 |
| 8 | 2.4 | 386.161 248 8 |
| 10 | 3.0 | 390.525 473 3 |
| 15 | 4.5 | 396.883 106 1 |
| 20 | 6.0 | 400.380 317 3 |

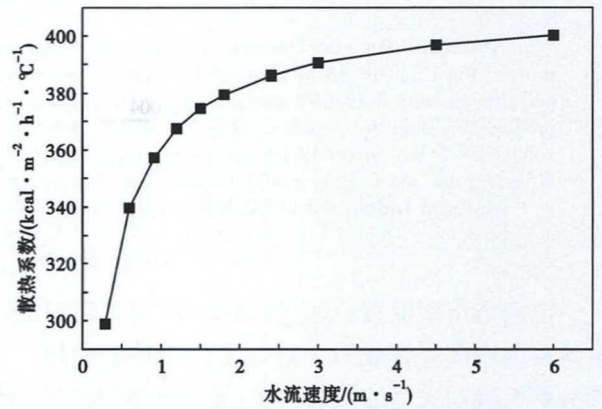


图 1 水流速度对结晶器散热系数的影响

Fig. 1 Effect of water flow rate on mold heat transfer coefficient

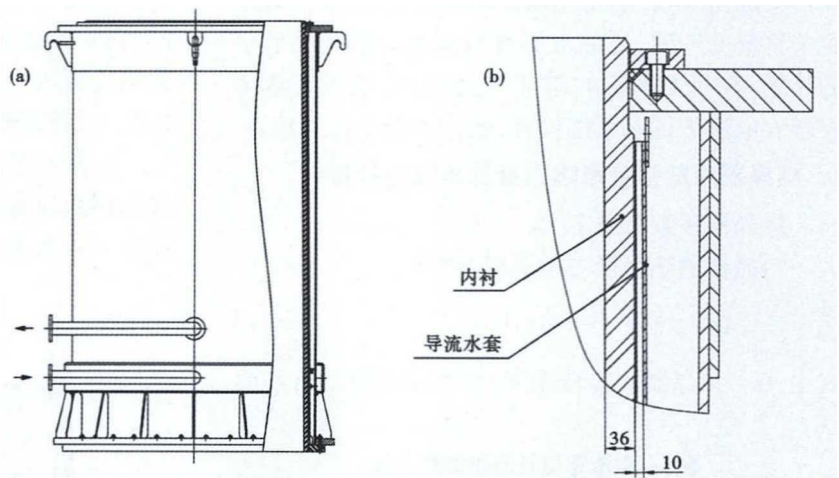


图 2 (a) 高速水套型结晶器设计图; (b) 高速结晶器水套层设计方案

Fig. 2 (a) Design drawing of mold with high-speed water case; (b) Design scheme of high-speed case layer of mold

当水流速提高到 1.2 m/s 后,再提高水流速,散热系数提高的比例越来越小,水流速从 1.2 m/s 提高到 6 m/s,散热系数只提高了 9%,实际上是不经济的。因为水流速提高 5 倍,需要极大地提高水流量及水泵压力,但是对于结晶器的散热系数只是提高了 9%,效果甚微。

因此,针对直径 1 800 mm 的大型结晶器,认为水流速提高至 1.2 m/s 比较合适,可以较大程度地提高结晶器的散热系数,提高冷却水散热效果,再增大水流速对冷却水散热效果的提高幅度较低,从成本角度考虑是不合适的。

2 结晶器的优化设计及生产验证

结晶器水流速的计算公式为:

$$\nu = \frac{q}{\pi \cdot D \cdot d} \quad (7)$$

表 3 X2CrNiMo18-12 钢的化学成分/%
Table 3 Chemical composition of steel X2CrNiMo18-12 / %

| 项目 | C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | Mo | N | Nb + Ta |
|-----|--------|-------|--------|--------|-------|---------------|---------------|-------------|--------|---------|
| 标准 | ≤0.035 | ≤2.00 | ≤0.030 | ≤0.015 | ≤1.00 | 17.00 ~ 18.20 | 11.50 ~ 12.50 | 2.25 ~ 2.75 | ≤0.080 | ≤0.150 |
| 试验钢 | 0.030 | 1.66 | 0.022 | 0.004 | 0.038 | 17.10 | 11.80 | 2.55 | 0.072 | 0.067 |

表 4 电渣重熔生产工艺技术参数

Table 4 Technology parameters of ESR production process

| 结晶器 直径/mm | 钢锭重/ t | 重熔 电压/V | 重熔 电流/kA | 熔速/ (kg·min ⁻¹) | 水流速/ (m·s ⁻¹) |
|--------------|-----------|------------|-------------|--------------------------------|------------------------------|
| 1 800 | 60 | 77.5 | 19 | 31.6 | 1.2 |

式中:q- 水流量;D- 结晶器直径;d- 水套厚度。

水流速要求 1.2 m/s 时,计算得到所需的水流量是 730 m³/h,对于目前的冷却水系统来讲,难度很大,需要大幅度增大投资来进行循环水系统改造。若采取减薄水层厚度的办法,将目前的 30 mm 减薄为 10 mm,也可将水流速提高至 1.2 m/s,因此最合理的方案是高速水套型。大型高速水套型结晶器设计图见图 2(a),水套层设计方案见图 2(b)。

使用该高速水套型结晶器冶炼的 60 t 不锈钢电渣锭见图 3,材料牌号为 X2CrNiMo18-12(控氮)不锈钢,材料成分见表 3,生产工艺技术参数见表 4。

电渣锭成型良好,表面光洁,渣皮厚度 2 ~ 4 mm,且分布均匀,说明在高流速冷却水的作用下,改善了电渣锭的成型质量。该钢锭经锻造成形后,产品应用于我国三代核电技术“华龙一号”主管道设备组件,且经检验合格后已成功交付客户。这表明该高速水套型结晶器的设计方案是合理的、可行的。



图 3 60 t X2CrNiMo18-12 奥氏体不锈钢电渣锭形貌
Fig. 3 Morphology of 60 t ESR ingot of austenite stainless steel X2CrNiMo18-12

3 结论

(1) 确定主要从钢锭表面对结晶器的热阻和冷却水的热阻这两方面来考虑如何提高结晶器的散热系数和水冷强度。

(2) 计算得出针对百吨级电渣炉配套的直径 1 800 mm 的大型结晶器其最佳水流速为 1.2 m/s,再提高水流速不仅要增大设备投资,而且效果甚微。

(3) 提出水套层厚度为 10 mm 的高速水套型结晶器的优化设计方案,经实际生产验证,电渣锭表面良好,说明该方案是科学、合理、可行的。

科技部国家国际合作项目资助(2012DFR70260)

参考文献

- [1] 向大林. 电渣重熔的大型化发展[J]. 大型铸锻件, 1991, 51(1): 55-63.
- [2] 李正邦. 特种冶金新技术[J]. 特殊钢, 2003, 23(6): 1-5.
- [3] 姜周华. 电渣冶金的物理化学及传输现象[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000.
- [4] 李正邦. 电渣熔铸理论与实践[M]. 北京: 高新技术出版社, 1996.
- [5] 董艳伍. 电渣重熔过程凝固数学模型及新渣系研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

杨传浩(1985-),男,硕士(2010年山东科技大学),工程师,2007年山东科技大学(本科)毕业,电渣重熔冶金技术研究。
E-mail: yangch2010@163.com

收稿日期: 2018-06-10