

## 电渣连铸锭表面质量的影响因素

刘福斌 臧喜民 姜周华 耿鑫  
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

**摘要** 渣皮的厚度、均匀性和力学性能是影响抽锭电渣钢锭表面质量的主要因素。薄而均匀渣皮是获得良好连铸锭表面质量的关键。文中分析了渣池电流密度分布、结晶器壁附近的热传导条件、渣成分和“高温区”温度变化等因素对渣皮厚度的影响。生产试验表明,通过控制操作温度和渣系成分获得薄而均匀的渣皮,并确保渣系具备长渣形式和适当的高温强度及塑性可得到良好表面质量的电渣连铸锭。

**关键词** 电渣连铸锭 渣皮厚度 表面质量

## Effect Factors on Surface Quality of Electroslag Continuous Casting Ingot

Liu Fubin, Zang Ximin, Jiang Zhouhua and Geng Xin  
(School of Materials and metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

**Abstract** Thickness, uniformity and mechanical properties of slag skin are main factors to influence the surface quality of continuous withdrawing electroslag remelting (ESR) ingot. Thin and homogeneous slag skin is a key to get nice surface quality of ESR continuous casting ingot. The effect of current density distribution in slag bath, heat transferring conditions near mold wall, slag ingredient and factors to influence the change of temperature in “high-temperature region” on thickness of slag skin are analyzed in this paper. Production test results showed that thin and homogeneous slag skin with ensuring to satisfy long slag form and appropriate mechanical properties at high temperature was obtained by controlling operating temperature and slag ingredient in order to get nice surface quality of ESR continuous casting ingot.

**Material Index** ESR Continuous Casting Ingot, Thickness of Slag Skin, Surface Quality

电渣重熔钢锭有时因渣系、工艺等因素而产生表面缺陷<sup>[1]</sup>,在结晶器与铸锭作相对移动的电渣连铸过程中,钢锭的表面质量是较严重的问题<sup>[2]</sup>,影响钢锭表面质量的因素就更为复杂<sup>[3-5]</sup>。本文从渣皮的厚度、形式、力学性质的角度来讨论电渣连铸钢锭表面的质量问题。

### 1 渣皮厚度及其变化对锭表面质量的影响

电渣重熔锭表面质量可以用重熔过程中渣皮厚度的变化来描述。当渣皮厚度保持不变或变化很小时,锭表面则成型较好且光滑;当某一时刻(相当于锭子的某一高度)或同一高度锭表面的某一部分渣皮厚度发生剧变时,则在该高度或该部位发生某些锭表面缺陷。这样表面质量控制(图1)归结为对渣皮厚度的控制(图2)。

与传统固定结晶器式电渣炉不同,电渣连铸过程中,结晶器与铸锭持续作相对移动。不论是抽锭还是抬结晶器,实际上渣平面相对于结晶器要保持恒定。在静止方式中,可能希望凝固锭上头具有液

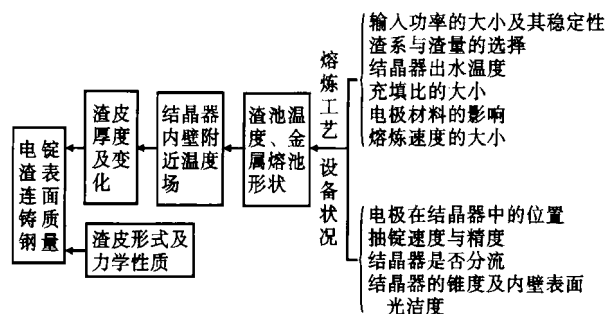


图1 影响电渣锭表面质量的因素

Fig. 1 Factors to influence surface quality of electroslag remelting continuous casting ingot

体金属圆柱,这种操作有利于获得好的表面质量<sup>[6]</sup>。然而在活动结晶器操作中,这是危险的。因为,锭和结晶器之间相对运动明显增加了跑钢危险。在短的活动式结晶器操作中,一旦抽锭开始,锭周围的渣皮或非常薄或没有,并建议渣池操作温度要比静止方式高 25 ℃,而且要用低的充填比<sup>[7]</sup>。

为防止渣液和钢液的突然流出,获得良好的表面质量,电渣连铸时的渣皮厚度比固定结晶器式电

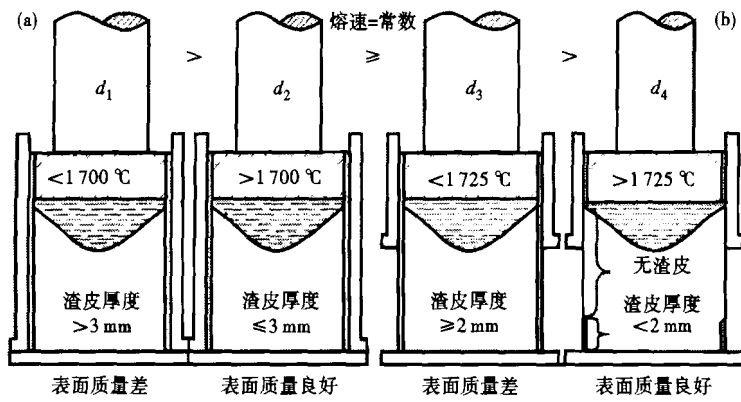


图2 电渣重熔固定式长结晶器(a)和短结晶器(b)电渣炉的渣皮形成<sup>7)</sup>  
Fig.2 Formation of slag skin in long stationary mold (a) and short open mold for ESR<sup>7)</sup>

渣工艺时的渣皮要更薄。

### 1.1 渣皮厚度

金属熔池/渣池界面的温度分布决定了结晶器内壁附近的温度场,进而影响到渣皮厚度。其温度分布可表示为<sup>8,9)</sup>:

$$t = ae^{\frac{B}{d}} \quad (B < 0) \quad (1)$$

式中: $a$ -常数,近似代表“高温区间”的温度; $d$ -从结晶器壁到电极中心方向上的距离; $B$ -常数,反映金属熔池/渣池界面靠结晶器壁处温度的变化率。

显然,渣皮厚度为 $\delta$ ,渣熔化温度为 $tl$ 时,渣皮厚度可表示为:

$$\delta = \frac{B}{\ln tl - \ln a} \quad (2)$$

根据式(2)和图3可知,渣皮厚度 $\delta$ 随 $|B|$ 和 $tl$ 的增加而增加,随着 $a$ 值的增加而降低。分析重熔条件与锭表面质量的关系:

(1)输入功率过低(特别是工作电压过低)、渣阻过小、渣量过大,将导致 $a$ 值过低,使锭下部表面质量恶化,熔炼过程中输入功率的波动,导致 $a$ 值变化,对锭表面质量有较大的影响。

(2)锭底部粘渣、自耗电极不对中或产生电极-渣面-结晶器壁-锭子-底水箱分流时,由于电流密度分布不均匀,同一水平面上不同部位的 $B$ 值不同,导致锭表面局部产生缺陷。采用导电结晶器的方式,由于紧靠渣液面区域有电流通过,渣

面温度要高一些。这时,由于 $|B|$ 值减小,可获得较薄而均匀的渣皮,锭表面质量好。

(3)渣熔化温度 $tl$ 取决于渣成分。选择 $tl$ 较小,且在重熔过程中 $tl$ 变化小的渣系有利于电渣锭表面质量。

### 1.2 渣皮厚度均匀性

电渣连铸渣系应具有适当低的粘度及良好的粘度稳定性。长渣在一定温度范围内保持流动,可能获得薄渣皮,因此可获得好的表面质量,更适合于电渣连铸生产<sup>[10,11]</sup>。

## 2 渣系力学性能对锭表面质量的影响

### 2.1 渣系成分对摩擦力的影响

在结晶器与铸锭相对运动的电渣重熔过程中,钢锭的表面质量与重熔工艺及重熔过程所选用的渣系有关,得出70%  $\text{CaF}_2$  + 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和0~20%  $\text{CaF}_2$  + 40%~45%  $\text{CaO}$  + 40%~55%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  渣系重熔钢锭时,抽锭阻力与时间的关系<sup>[12]</sup>。渣皮与结晶器壁和钢锭表面两方面的摩擦阻力与渣壳在冷却时的收缩率(线膨胀系数)有关。含 $\text{CaF}_2$ 渣系与结晶器间的静摩擦力和动摩擦力测定结果表明,当 $\text{SiO}_2$ 含量增加时,摩擦阻力减少;当 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量增加时,摩擦阻力增大<sup>[13]</sup>。

### 2.2 渣系成分对高温强度和塑性的影响

若假设渣皮与结晶器在钢液面下相接触的长度为 $L$ ,由于结晶器的水冷作用, $L$ 区域很小(图4)。在此区域,渣皮既承受与结晶器的摩擦力,也承受来自铸锭的摩擦阻力,是受力最大的区域。在 $L$ 区域

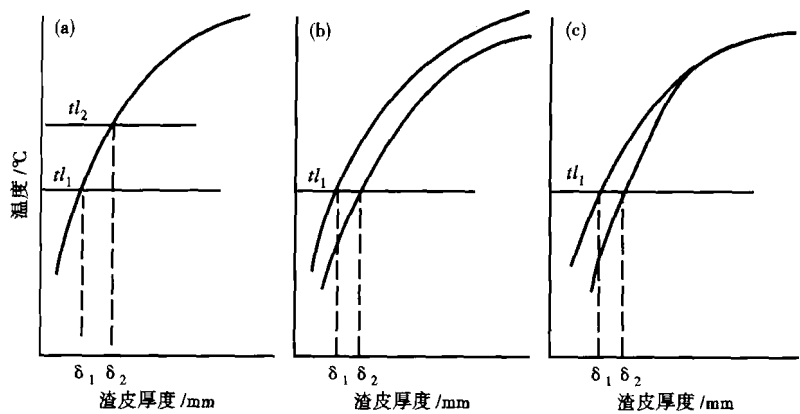


图3 电渣重熔渣皮厚度 $\delta$ 对渣熔化温度 $tl$ 、常数 $a$ 和 $B$ 的影响示意图:(a)  $tl_2 > tl_1, \delta_2 > \delta_1$ ; (b)  $a_1 > a_2, \delta_1 < \delta_2$ ; (c)  $|B_2| > |B_1|, \delta_2 > \delta_1$

Fig.3 Schematic diagram of effect of ESR slag skin  $\delta$  on slag melting temperature  $tl$ , constant  $a$  and  $B$ : (a)  $tl_2 > tl_1, \delta_2 > \delta_1$ ; (b)  $a_1 > a_2, \delta_1 < \delta_2$ ; (c)  $|B_2| > |B_1|, \delta_2 > \delta_1$

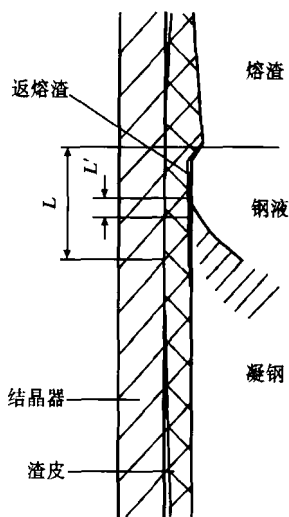


图 4 结晶器壁附近渣-金属形态示意图

Fig.4 Schematic diagram of slag-metal morphology near wall of mold

中部,即钢锭的凝固界面附近是最危险的断裂区,并且此处渣皮也较薄。若在结晶器与铸锭相对移动过程中,渣皮在  $L'$  区域内不被拉断,而渣的高温塑性又足以使渣在此区域内发生足够的塑性变形而顺利通过该区域,不会造成钢液从渣皮流出,便可避免结疤、夹渣等现象,获得光滑的锭表面。

当渣中加入适当的  $Al_2O_3$  和  $MgO$  后,渣中存在有高硬度、高熔点矿相,如尖晶石和黄长石,这类矿物在高温下 ( $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ) 不易变形,可在渣中起强化作用,提高渣的强度;同时,渣中这些强化相均匀分布且尺寸较细小时,才能使渣强度提高。

固态渣在高温下的塑性变形能力取决于渣中易发生塑性变形的矿物、非晶质矿物和低熔物相。当渣中加入  $SiO_2$  时容易生成这些矿物,这些物相在高温应力作用下,容易产生变形或软化,从而提高了渣的塑性。 $SiO_2$  可以抑制其他矿物的长大,使一些高硬度质点的以细小形式弥散分布在基体中,改善了渣的高温强度和塑性。 $CaF_2$ - $CaO$ - $Al_2O_3$  渣系的等强度线图和等塑性线图如图 5 所示。

### 3.4 生产试验

在实验室条件下,进行了高速钢  $W9Mo3Cr4V$  的电渣连铸试验。60 mm × 120 mm 电极两支,重熔

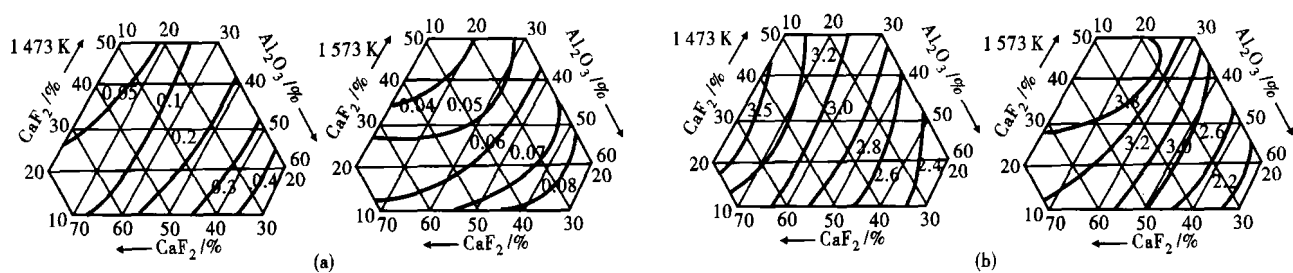


图 5  $CaF_2$ - $CaO$ - $Al_2O_3$  渣系在 1473 K 和 1573 K 等强度 (a) 和等塑性 (b) 图

Fig.5 Contour of fracture strength (a) and plasticity (b) of slag  $CaF_2$ - $CaO$ - $Al_2O_3$  at 1473 K and 1573 K

成 90 mm × 90 mm 方坯。确定了实验的工艺参数为电压 60 V, 电流 3 600 A; 渣系组成为 35% ~ 60%  $CaF_2$ 、20% ~ 25%  $CaO$ 、0 ~ 5%  $MgO$ 、20% ~ 30%  $Al_2O_3$ 、0 ~ 5%  $SiO_2$ 。实验中渣池/金属熔池界面温度为 1 600 ~ 1 650  $^\circ\text{C}$ , 通过操作温度和渣系成分来控制薄而均匀的渣皮, 并确保了渣系应具备长渣形式和适当的高温强度及塑性等力学性质。结果表明, 电渣连铸锭的表面质量良好。

### 4 结论

在抽锭工况下薄而均匀的渣皮是电渣连铸锭表面成型质量的关键; 渣池电流密度分布、结晶器壁附近的热传导条件、渣的成分和影响“高温区”温度的因素的变化均导致渣皮厚度的改变; 渣系应具备长渣形式和适当的高温强度及塑性等力学性质。

### 参考文献

- 1 Hoyle G. Electroslag Processes Principles and Practice. London: Applied Science Publishers, 1981: 138
- 2 Мартын В М, Жаховский В С, Проб. Снед. Электрометаллу

- Ргия, 1980, вып. 13, С. 30
- 3 Yakuskey O S. Electroslag Remelting with Ingot Withdrawal From the Mould. Steel in the USSR, 1971, 1: 40
- 4 Paton В E. The Mechanism of Formation of Ingot Surface in Electroslag Remelting with a Moving Mould. Refining by Remelting, 1975, 2: 49
- 5 Gill L L, Harris K. Electroslag Refining. London: The Iron and Steel Institute, 1973: 89
- 6 Hoyle G. Some Observations on ESR. Electric Furnace Proceedings, 1977, 35: 272
- 7 Schumann R, Ellebrecht C. Metallurgical and Process Problems Related to Electroslag Remelting of Forging Ingot Large than 40 Inch Diameter and 150 Inch Length in Single Electrode Technique. Proc of 5th International Symposium on Electroslag Remelting Technology, Part 1 Pittsburgh; 1974, 180
- 8 Mitchell A. Electroslag Refining. London: The Iron and Steel Institute, 1973, 3
- 9 付杰, 陈恩普, 陈崇禧, 等. 电渣重熔过程中渣池内温度分布对冶金质量的影响. 金属学报, 1981, 17(4): 394
- 10 姜周华. 电渣冶金物理化学及传输现象. 沈阳: 东北大学出版社, 2000
- 11 Eysseev P P. The Physical Properties of Industrial  $CaO$ - $Al_2O_3$ - $CaF_2$  System Slag. Automatic Welding, 1967, 20(11): 42
- 12 Жаховский В С, Мартын В М, Проб. Снед. Электрометаллу Ргия, 1980, вып. 13, 32
- 13 梁连科. 冶金热力学及动力学. 沈阳: 东北大学出版社, 1990

刘福斌 (1978-), 男, 博士研究生, 电渣重熔工艺技术研究。

收稿日期: 2008-11-28