

文章编号: 1671-6620-(2002)02-0115-05

电渣重熔过程中电极熔速的确定

吴远飞, 姜周华*

(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 分析了电渣重熔过程中电极熔化速度对局部凝固时间和钢锭的结晶质量的影响, 同时分析了熔化速度对工艺电耗的影响. 讨论了通过改变熔化速度提高钢锭质量和降低电耗的途径, 并给出了合理熔化速度的评判标准.

关键词: 电渣重熔; 熔化速度; 局部凝固时间; 晶间距; 电耗

中图分类号: TF 744

文献标识码: A

Determination of the Electrode Melting Rate in Electroslag Remelting Process

WU Yuan-fei, J IANG Zhou-hua

(School of Materials and Metallurgy Northeastern University, Shenyang 110004, China)

ABSTRACT The effect of the melting rate on the Local Solidification Time (LST) and ingot quality and power consumption is analyzed. The measures for improving the crystal quality and lowering the power consumption are discussed. The criterion for evaluating the melting rate is provided.

KEY WORDS ESR; melting rate; LST; crystal axial range; power consumption

电渣重熔技术作为冶炼优质钢锭的一种重要手段,在 20 世纪八、九十年代受到炉外处理和真空冶炼的挑战,曾经历了一个低潮.但是近年来的实践结果表明,电渣重熔以其特殊的工艺过程和熔炼结晶方式有其它生产工艺所不能替代的优越性,因而重新受到冶金学界的重视.如何提高重熔钢锭的质量以及在保证质量的前提下如何进一步降低电耗是许多冶金学者一直致力于解决的问题.本文主要从电极熔化速度这个角度对其进行探讨,分别论述了熔速对钢锭结晶质量和电耗的影响.

1 熔速对电渣重熔钢锭结构的影响

与传统的浇铸钢锭组织相比,电渣重熔钢锭具有明显的优越性^[1,2].这主要是由于其传热方

向明显,除在钢锭表面有一层激冷层外,在钢锭中以柱状晶结构为主,而且由于结晶器中底部和侧面强制水冷的作用,使金属的凝固速度加快,在减少偏析的同时,有效地控制结晶方向,所以电渣钢锭以趋于轴向的结晶组织为主.

1.1 熔速与枝晶间距的关系

理论分析表明:决定钢锭性能结构最主要的因素是一次枝晶间距与二次枝晶间距的大小,枝晶间距越小,组织越致密,钢锭发生疏松、缩孔和偏析等凝固缺陷的可能性越小,晶粒度也越细,钢的机械性能也越好.

弗莱明斯总结了在传统铸造钢锭中,局部凝固时间与铸态结构和形态之间的关系,他指出枝晶间距是凝固时间的函数^[3].对于某一给定的合金而言,它的液相线和固相线温度已知,根据热传递方程解出温度分布图,即可求得各点两相区温

* 收稿日期: 2002-04-27

科研项目: 10 吨电渣炉成套技术开发 (No. 2001-01-1-268)

作者简介: 吴远飞,男,24 岁,硕士研究生.

姜周华. 电渣重熔讲义. 内部资料.

度差 T_{LS} , 再除以冷却速度, 即可求得局部凝固时间^[4]:

$$t_{LST} = \frac{T_{LS}}{\quad} \quad (1)$$

$$= GR \quad (2)$$

式中: t_{LST} 为局部凝固时间, min; T_{LS} 为钢液的液相线与固相线的温度差, ; 为冷却速度, min^{-1} ; G 为钢锭局部温度梯度, mm^{-1} ; R 为钢锭局部凝固速度, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

弗莱明斯指出: 枝晶间距 d 和局部冷却速度或凝固时间 t_{LST} 之间存在以下的关系:

$$d = b \cdot n = b(GR)^{-n} \quad (3)$$

$$\lg(d/\mu\text{m}) = k_1 + k_2 \lg(t_{LST}/\text{min}) \quad (4)$$

式中: d 为晶轴间距; b 为常数, 由合金成分决定; n 为系数; k_1, k_2 为常数, 由合金成分决定.

增加熔化速度, 会导致凝固速度增加, 温度梯度减小. 根据(1)式和(2)式, 若温度梯度占主导地位时, 增加熔速会导致局部冷却速度减小, 晶轴间距增加. 若凝固速度占主导地位, 增加熔速会导致局部冷却速度增加, 晶轴间距减小.

1.2 晶轴间距与钢锭结构的关系

局部凝固时间是合金完成凝固过程所消耗的时间, 是评定合金显微结构的重要标志, 它决定合金一次晶轴间距 d , 二次晶轴间距 d , 莱氏体网距 d_L , 碳化物颗粒度以及析出物弥散程度. 而二次晶轴间距是显微偏析标尺, d 越小, 合金越均匀, 显微偏析越小^[4].

Gunji 等人在测定高速钢中晶轴间距之后, 将数据回归得到如下二次晶间距表达式^[5]

$$d = 100 R^{-0.28}$$

Suzuki 等人在实验测定的基础上推导出二次晶间距的另一种表达式^[6]

$$d = 709 R^{-0.386}$$

式中: R 为局部凝固速度.

普遍认为, 枝晶间距与钢锭结构特性之间存在复杂的对应关系, 对于一些单相或镍基合金, 塑性与二次晶间距之间的关系容易获得. Eckstein 与 Holzgruber 的研究结果均证明了这一点^[7,8]. 他们认为塑性主要与枝晶状组织的偏析速率有关. 但是, 对于那些依赖于非热处理的第二相弥散的合金而言, 这种关系就要复杂得多. 如二元合金, 一次晶间距与二次晶间距的值主要在凝固时前 70 % 的时间段内决定, 而碳化物的结构则基本在凝固的最后 5 % 的时间段才确定下来^[9]. 正因为如此, 重熔条件对于这种合金凝固过程中偏析与杂质元素的扩散只起到次要的影响作用. 但这

些合金的组织形状却在相当大的程度上受凝固速率的影响. Bhambri 指出, 在 IN713C 钢中, 即使在它们的化学成分保持不变的情况下, 金属碳化物微粒的形状也随局部凝固速率的变化有极大的变化^[10].

1.3 温度场模型

一般而言, 电渣重熔过程中, 钢锭的温度场直接或间接地影响着晶轴间距, 温度场可以通过建立相应的数学模型推导出来. 根据不同的边界条件与初始条件计算出钢锭的温度场, 则可以明确地知道在凝固两相区的钢锭的温度梯度与凝固速率, 以及局部凝固时间, 然后通过弗莱明斯方程即可求得晶轴间距. 此外, 通过对温度场模型的求解, 可以模拟出钢锭凝固时结晶前沿的形状, 从而获得熔池形状的参数, 如熔池深度, 结晶角等. 因而根据传热学的理论建立相应钢锭凝固时的温度场模型对于预测最终钢锭结构, 以及改进熔炼工艺, 提高钢锭性能具有重要意义.

钢锭中温度场的计算模型较多, 早期的工作由 Ballantyne 等人给出了系统的总结. Jeffers 等人在此基础上又作了进一步研究^[11], 避免了只考虑凝固开始阶段瞬时问题的缺陷, 而是结合巴顿等人计算重熔开始至重熔进入稳定整个阶段熔池形状的方法^[12,13], 提出了如下的数学模型^[11]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{d} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + V \frac{\partial H}{\partial z} \quad (5)$$

式中: H 为单位体积焓; t 为时间; T 为温度; 为热导率; V 为熔化速度; r, z 为柱坐标轴.

求解该数学模型可得到重熔开始阶段和达到稳定后各种不同熔速下的数据.

近年来, 随着电渣重熔技术的不断发展, 冶金学者给出了更多的实用的数学模型. 根据不同的钢锭凝固条件可直接选用或稍加修改即可运用.

1.4 根据钢锭结构确定熔速

由上面的论述可知, 熔化速度是决定钢锭晶轴间距的主要因素, 因而熔化速度选择是否得当, 直接决定了钢锭最终的冶炼质量. 确定熔速可以通过计算钢锭的温度场模型来确定, 各种模型计算的结果均表明, 局部凝固时间与电极熔化速度之间存在着复杂的函数关系, 图 1 显示了电渣重熔 Inconel 718 合金时熔速与局部凝固时间的关系^[4]. 从图中可以看出局部凝固时间与电极熔化速度之间并非存在简单的单调递变关系, 在 AB 段局部凝固时间随熔速增大而减小, 在 BC 段则

随熔速增大而增大. 最小值出现在 B 点, 理论上 B 点即是重熔时选择的最佳局部凝固时间, 对应的熔速即为最佳熔速. 值得指出的是大多数钢种的熔速与局部凝固时间之间均存在类似的曲线关系. Mellberg 指出在自耗电极的电渣重熔过程中, 温度梯度与凝固速度的关系虽然没有传统浇铸钢锭时明显, 但仍可以从纯理论的角度定性地推导出一个对应于最小局部凝固时间的熔化速度.

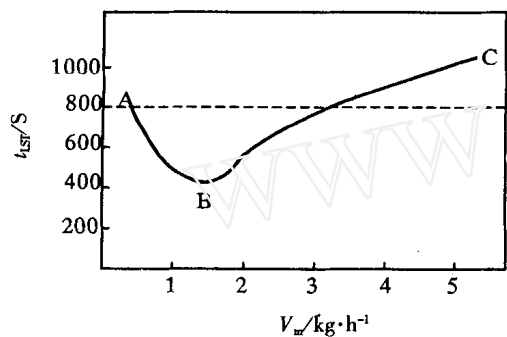


图 1 电渣重熔 Inconel718 合金熔速 V_m 与局部凝固时间的关系($D = 300\text{ mm}$)

Fig. 1 Relation between melting rate and Local solid Time(t_{LST}) in electroslag melting of inconel718 alloy($D = 300\text{ mm}$)

值得说明的是, 虽然在凝固时间较小, 即对应的局部凝固速度最大时易获得高质量的结晶结构, 但是 Shved^[14] 等人指出在小钢锭中这种最小的局部凝固时间却难以获得, 这是由于小钢锭的最小局部凝固时间出现在极小的熔速时. 此外 Goodwin 认为在高速钢的熔炼中, 熔速过低会导致树枝晶粗大.

因此, 实际生产中确定最佳熔速要考虑诸多因素. 实践表明, 最佳熔速主要与锭尺寸有关, 同时也与钢种及工艺因素有一定的关系. 根据理论计算得出的最小局部凝固时间 t_{LST} 所对应的熔速通常偏小, 这不仅导致生产率降低, 电耗增加, 而且熔速过低会使钢锭的表面质量变差. 因而, 只要 t_{LST} 不过大, 钢锭的质量可以接受时可适当增加熔速. 国外有冶金学者推荐适宜的熔速为^{*}

$$V_{ESR} = 0.04\ d\text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$$

(6)

式中: d 为钢锭直径, mm.

熔速的大小直接影响钢锭的熔池形状, 理论研究表明熔池深度与熔化速度之间呈线性增加关系. 为了保证钢锭结晶质量, 需要控制熔池深度在一个合理的范围之内. 英国学者 G. Hoyle 指出理想的金属熔池形状应该是锭中心熔池深度为锭直径的 1/2, 前沿形状为抛物线型, 此时树枝晶以合适的结晶角沿结晶前沿顺序凝固. 基于这一理论,

前人在统计大量生产数据的基础之上, 认为合理的熔化速度与结晶器直径和熔池深度有以下的关系:

$$V_{ESR} = \alpha_0 D_m^{1.23}\text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$$

(7)

式中: α_0 为系数, 与熔池深度有关; D_m 为结晶器直径, mm.

式(6)与式(7)是从不同角度得出的熔速表达式, 实际生产中可以视具体情况选用.

2 熔化速度对电耗的影响

电渣重熔工艺中熔速除了影响钢锭的结构性能以外, 还是影响电耗的重要因素, 因而考察熔速变化与电耗的关系对于优化重熔工艺, 制定合理的冶炼制度具有重要意义.

2.1 熔化速度对电耗的影响

电耗是衡量电渣重熔工艺优劣的一项重要指标, 与众多的工艺参数的设置有关, 如渣系选择、渣皮厚度、电极直径、熔化速度及电流和电压等. 姜兴渭, 李连智等对这些因素的影响给出了具体的分析^{**}, 并提供了电渣重熔工艺参数优化匹配图. 曹洪敏^[15]在此基础上, 结合实际生产数据进行分析肯定了该理论的正确性.

相对于对结晶过程的影响而言, 熔速对电耗的影响要直观得多. 在其它条件不变的情况下增加熔速会使总体熔炼时间减少, 因而缩短了热损失的时间, 使有效功率大幅度提高, 从而提高电能利用率, 降低电耗.

2.2 电耗的计算

姜兴渭等人对大幅度降低电渣炉电耗进行了理论分析, 认为重熔过程中的电效率 η_{ESR} 以及单位电耗 q_{ESR} 分别表示如下:

$$\eta_{ESR} = \frac{24\ V_{ESR}}{P_{ESR}} \times 100\ \%$$

(8)

$$q_{ESR} = \frac{P_{ESR}}{60\ V_{ESR}} \times 10^3\text{ kW} \cdot \text{h/t}$$

(9)

式中 V_{ESR} 为熔化速度, kg/min; $P_{ESR} = U_{ESR} \cdot I_{ESR} \cdot \cos\phi$, kW (渣池输入功率).

曹洪敏给出了如下的计算式^[15]:

$$\eta_{ESR} = \frac{412 + q_{ESR}}{q_{ESR}} \times 100\ \%$$

(10)

$$q_{ESR} = \frac{P_{ESR} + P_H}{60\ V_{ESR}} \times 10^3 + \frac{2.5\ G_1}{G_1}\text{ kW} \cdot \text{h/t}$$

(11)

* 姜周华. 电渣重熔讲义. 内部资料.

** 姜兴渭, 李连智, 季庆复, 等. 大幅度降低电渣炉电耗的理论分析[J]. 电渣冶金文集. 内部资料. 9-18.

式中： $P_H = P_{\text{ESR}} \times 0.02$ kW (变压器本身损耗功率)； G_s 为重熔一支钢锭的总渣量，kg； G_1 为一支钢锭的重量，t。

在 ANF-6 渣系下，重熔直径 360 mm 低合金结构钢时，根据不同的 V_{ESR} 计算出的过程参数列于表 1 中：

表 1 熔速变化与过程参数的关系
Table 1 Relation between melting rate and process parameter

熔化速度 kg·min ⁻¹	热损失 kW	输入渣池功率 kW	单位电耗 kWh t ⁻¹
3.0	148.9	256.9	1 427
3.3	148.9	265.2	1 342
4.1	148.9	287.2	1 168
4.9	148.9	309.9	1 054
5.8	148.9	335	964
6.6	148.9	357.8	904

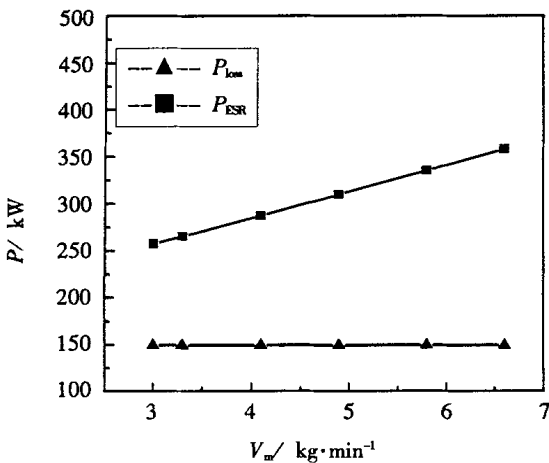


图 2 电极熔速与热损失及渣池输入功率的关系

Fig. 2 Relation among melting rate heat loss and power into the stag pool

2.4 根据电耗调整熔速

虽然增加熔速能够大幅度地降低电耗，而且实际生产中也往往采用这种方法作为节能省耗的主要措施，但需要指出的是，熔速 V_{ESR} 的增加不是无止境的，它受到众多外部因素的限制，只有合理的增加熔速，使其不超过某一熔速上限时才能达到既节电又能确保钢锭质量的效果。

上已述及，随着熔化速度的增加，输入渣池的功率增加，导致熔池深度增加，结晶角迅速减小，其最终结果是使钢锭径向结晶的趋势增加，严重破坏电渣重熔钢锭趋于轴向结晶的有利条件。同时，由于熔池变深，凝固时间增加，偏析、夹杂等凝

2.3 增加熔速的节电效果

从表 1 中可以看出，随着熔速的增加电耗呈逐渐降低的趋势。为了便于分析，根据表中的数据分别作出当电极熔化速度增加时热损失、渣池输入功率以及单位电耗的关系图(图 2 与图 3)。这里所指的热损失主要包括电极热损失、渣池表面辐射热损失、渣池径向热损失以及通过熔池的热消耗四项。

图 2 表明电极熔速的变化对热损失的影响较小，其原因是显而易见的：热损失主要与炉体设计、电极布置、电极填充比等工艺环境有关。图中同时给出了电极熔速增加时，输入渣池的功率的曲线作为参考。可见，输入渣池的功率随熔速的增加而增加。图 3 给出了单位电耗与电极熔速的关系，可见随着自耗电极熔化速度的增加，单位电耗大幅度降低。在本实验条件下，当 V_{ESR} 从 3 kg/min 增大到 6.6 kg/min， q_{ESR} 由 1427 降低到 904 kW·h/t，净节电 523 kW·h/t。

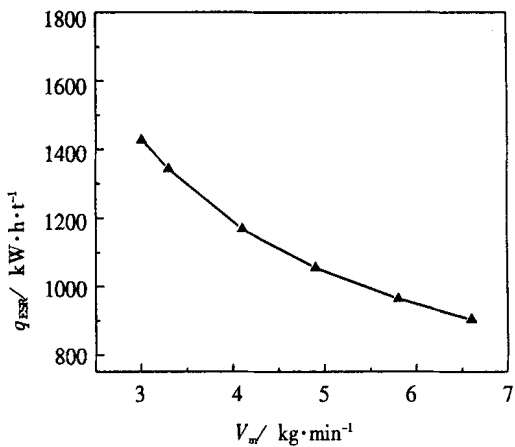


图 3 电极熔速与单位电耗的关系

Fig. 3 Relation between melting rate and power consumption

固缺陷发生的可能性增加，钢锭的表面质量也会变坏。因而找出增加熔化速度上限是必要的。在大量的实践和理论研究的基础上，人们认为，合理的熔化速度应保证合理的熔池形状。具体而言，应该保证结晶角在 70°~110° 之间为宜。所以在增加熔速时，应该保证结晶角不大于 110°，这就是熔速增加的上限。

3 结 论

熔化速度是电渣重熔工艺的重要参数。合理选择熔速不仅能够保证钢锭良好的结晶质量和表

面质量,还能够最大限度地降低电耗,节约能源,实现优质低耗的目标。

合理的熔化速度跟诸多因素有关,针对特定的钢种和熔炼条件选择熔速应从以下几个方面考虑:

- (1) 根据熔池形状初步确定熔速。
- (2) 根据给定熔速建立温度场模型。
- (3) 求解温度场模型,获得晶轴间距的大小,判断是否符合要求。

(4) 根据温度场模型求解的结果,模拟熔池形状,计算结晶角,判断是否符合要求。

(5) 在满足上述条件的情况下,尽量增加熔速,但应保证结晶角小于 110° 。

合理的熔速应该满足如下的特征:

(1) 钢锭熔池形状合适,锭中心熔池深度约等于锭直径的 $1/2$,熔池前沿形状应该是抛物线形。

(2) 金属熔池上部应该出现圆柱段,且圆柱段高度不小于 10 mm。

(3) 钢锭中无缩孔、疏松、偏析等凝固缺陷,钢锭表面光洁。

(4) 吨钢电耗 1 200 kW·h/t。

参考文献

[1] 李正邦,洪彦若,张祖贤,等. 电渣熔铸[M]. 北京:国防工业

出版社,1981. 31-33.

[2] 姜周华. 电渣冶金物理化学及传输现象[M]. 沈阳:东北大学出版社,2000. 1-4.

[3] Flemings MC. Solidification Processing [M]. New York: McGraw Hill. 1974. 45-47.

[4] 李正邦,张家雯,林功文,等. 电渣重熔译文集[M]. 北京:冶金工业出版社,1990. 153-157.

[5] Gunji K. Trans. ISIJ, 1974, 257-266.

[6] Suzuki A, J. Japan Inst. Met. 1968, 1301-1305.

[7] Eckstein H J. ibid. 424.

[8] Holzgruber W. Proc. Int Conf on ESR[C]. Pittsburgh, 1971, 3, 56-58.

[9] Ballantyne A S, Kennedy R J, Mitchell A. The influence of melting rate on structure in VAR and ESR ingots[J]. Proceeding of fifth International conference on Vacuum melting and Electroslag Remelting Process, 1976(2): 181-183.

[10] Bhambri K T, Kattamis Z, Morral J E. Met Trans[J]. 1975 (6): 526-532.

[11] 李正邦,张家雯,林功文,等. 电渣重熔译文集[M]. 北京:冶金工业出版社,1990. 159-160.

[12] Paton B E, Medovar B I, Kozlitin D A, et al. Mathematical Simulation and Predication of Electroslag Refining of Large Forging Ingots[M]. London: ISI, 1973. 16-17.

[13] Modovar B I, Demchenko V F, Bogachenko A G, et al. Temperature Fields of Large ESR Slab Ingots[J]. Proceeding of fifth International conference on Vacuum melting and Electroslag Remelting Process, 1976, 2, 153.

[14] Shevd F I. Stal. 1974, 8. 703-705.

[15] 曹洪敏. 电渣重熔炉电耗的分析和计算[J]. 工业加热, 1994, 3: 20-23