



低频电渣重熔过程电流对电渣锭洁净度的影响

王冰杰, 王 宇, 项森苗, 施晓芳, 常立忠
(安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243002)

摘要: 基于实验室小型低频电渣重熔装置, 以使用 70%CaF₂+30%Al₂O₃ 渣系电渣重熔 304 L 奥氏体不锈钢为研究对象, 详细分析低频条件下不同的重熔电流对电渣锭夹杂物数量、尺寸及类型的影响规律。结果表明, 与工频电渣重熔(50 Hz, 1 800 A)相比, 低频(2 Hz)条件下, 采用不同的电流(1 800、1 400 A)电渣重熔后, 电渣锭中的 $w[O]$ 分别增加了 172.2%、75.5%, $w[N]$ 分别降低了 4%、3.4%。在低频下, 采用不同的电流重熔时, 电渣锭中夹杂物的种类并无改变, 但是夹杂物的数量及各类夹杂物占比有所改变。低频下夹杂物数量随着电流的降低而减少, 但是与工频条件下相比夹杂物数量仍然增高了 173%(1 800 A)与 63.7%(1 400 A), 增加部分基本为 10 μm 以下的细小夹杂物, 大尺寸夹杂物(>10 μm)数量增加较少。

关键词: 电渣重熔; 电流; 低频; 夹杂物; 洁净度

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00046 **中图分类号:**TF744

Effect of Current on the Cleanliness of Electroslag Ingots During Low Frequency Electroslag Remelting

Wang Bingjie, Wang Yu, Xiang Miaomiao, Shi Xiaofang, Chang Lizhong
(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: Based on the laboratory small-scale low-frequency electroslag remelting device, taking 70%CaF₂+30%Al₂O₃ electroslag remelting 304L austenitic stainless steel as the research object, we analyze in detail the influence of different remelting current on the number, size dimension and type of inclusions in the electroslag ingot under low-frequency conditions. The results show that compared with the power frequency electroslag remelting (50 Hz, 1 800 A), the oxygen (O) content in electroslag ingot increased by 172.2% and 75.5% respectively under the condition of low frequency (2 Hz) and different current (1 800 and 1 400 A). Nitrogen (N) content decreased by 4% and 3.4%, respectively. At low frequency, the type of inclusions in the electroslag ingot did not change when remelted with different current, but the number of inclusions and the proportion of each type of inclusions changed. The number of inclusions decreases with the decrease of current intensity at low frequency. However, compared with the power frequency condition, the amount of debris still increased by 173% (1 800 A) and 63.7% (1 400 A), and the increase part was basically small inclusions below 10 μm, and the amount of large-size inclusions (>10 μm) increased less.

Key Words: Electroslag Remelting; Current; Low Frequency; Inclusion; Cleanliness

非金属夹杂物的存在恶化了钢的性能, 降低与改善钢中非金属夹杂物以追求高洁净度钢是冶金行业永恒不变的主题。而电渣重熔作为一项高品质金属材料的生产技术^[1-3], 尤其在高端不锈钢材料的制备过程中起到至关重要的作用。电渣重熔技术能有效地去除钢中的非金属夹杂物, 提高材料的洁净度^[4]。然而, 随着对不锈钢更高质量和制备过程更低能耗的追求, 传统的电渣重熔技术已经难以满足现代高端生产的需求^[5]。近年来, 新发展的低频电渣重熔技术, 因有效缓解了传统技术中存在的低功率因数所导致电能浪费严重以及扰乱电路三

相平衡、产生谐波污染等问题, 在冶金行业内受到关注, 并有研究者开展了一系列低频电渣重熔实验^[6-9]。

Reinhold S.E 等^[10]研究了 4.5 Hz 至 1 Hz 之间频率变化对工具钢电渣重熔过程中重熔行为以及非金属夹杂物分布的影响。结果表明, 非金属夹杂物受频率影响较为显著, O 含量随着重熔频率的降低而有所升高, 但在较低频率下氧化加剧。Karimi Sibaiki E 等^[11]开展了电流频率对电渣重熔过程影响的数值模拟研究, 分析了工频 50 Hz 和低频 0.2 Hz 对重熔过程的影响规律。研究结果表明, 降低频率能

基金项目: 国家自然科学基金(No.52074002);安徽省自然科学基金(No.2208085 J37);安徽省重点研发计划(No.202304a05020024)

作者简介: 王冰杰(1996—), 男, 硕士; **E-mail:** wangbj2022@163.com; **收稿日期:** 2024-03-06

通信作者: 常立忠(1977—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** clz1997@163.com

够改变焦耳热和电磁力分布,在低频电渣重熔下可以略微减小金属熔池深度。余坤等^[6,12]为了研究低频电渣重熔对 NO8367 奥氏体不锈钢电渣锭质量的影响,设计了五组实验,电源频率分别为 50、10、7.5、5、2.5 Hz。实验结果表明,相较于工频 50 Hz,使用低频电源重熔后钢中夹杂物得到有效改善,提高了电渣锭的洁净度;此外,随着电源频率的降低,重熔后电渣锭的塑性会有所提高,但其抗拉强度和硬度呈下降趋势;研究发现在电源频率为 7.5 Hz 下制备的试样夹杂物数量最少,力学性能最佳。梁强等^[13]采用数值模拟的方法模拟了 GH4169 合金电渣重熔凝固过程,分析了电源频率变化对电渣锭凝固过程参数的影响。研究表明,当频率低于 40 Hz 时,频率对二次枝晶间距、局部凝固时间以及 Rayleigh 数影响波动较大;当频率大于 40 Hz 后,其对三个参数影响趋缓。

上述的文献主要聚焦于电源频率对电渣锭质量的影响,特别是研究了较低的供电频率的影响。目前,一些发达国家也已使用 0.5 ~ 5 Hz 的低频电源技术进行电渣重熔^[14],但是,关于低频电渣重熔过程中不同电流对钢中夹杂物分布影响规律的研究报道较少。因此,在前人研究的基础上,采用实验室小型电渣炉,以 304 L 奥氏体不锈钢为研究对象,详细研究了 2 Hz 的电源频率下,不同电流对电渣锭洁净度的影响,并与工频重熔进行对比,这对于进一步澄清低频条件下电渣锭洁净度的变化具有重要的意义。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验采用的自耗电极材质为 304 L 奥氏体不锈钢,经德国 OBLF 型光电火花直读光谱仪检测,其主要成分见表 1。实验所用的自耗电极来自于某特殊钢企业,采用电弧炉 EAF→真空 AOD→精炼 LF→连铸 CC ($\phi 280$ mm 圆坯)→锻造 ($\phi 55$ mm、长度 850 mm)工艺。

实验采用“三七渣”渣系,即使用分析纯 CaF_2 、 Al_2O_3 化学试剂(纯度均高于 98%)调配出总重量为 1 200 g 的渣料,其中 CaF_2 质量占比 70%, Al_2O_3 为 30%。

表 1 304 L 奥氏体不锈钢化学成分(质量分数)

%									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	O	
0.019	0.41	1.18	0.037	0.002 5	8.10	18.27	0.010	0.002 5	

1.2 实验设备

实验所采用的低频电渣重熔装置示意图,如图 1 所示。电渣重熔装置主要参数如下:结晶器为铜制水冷结晶器,其直径 $\phi 100$ mm,高度 h 为 250 mm,单次可熔炼约 12 kg 电渣锭,直径填充比(自耗电电极直径/水冷结晶器直径)为 0.55,冷却水压为 0.2 ~ 0.3 MPa。变压器装机容量为 100 kVA,一次端输入电压为 380 V,二次端输出电压为 28 ~ 40 V,最大电流不超过 2 500 A。将可控变频单元安装至变压器输出端,其工作原理主要是利用单相桥式可控整流电路中的两个晶闸管调节整流电路交替导通时间的长短,使电源频率发生变化,达到本次实验设定值 2 Hz。重熔过程中在电压、频率固定的情况下,通过人工手动调节电机的转速,控制金属自耗电电极埋入渣池的深度,让电流保持在目标值。

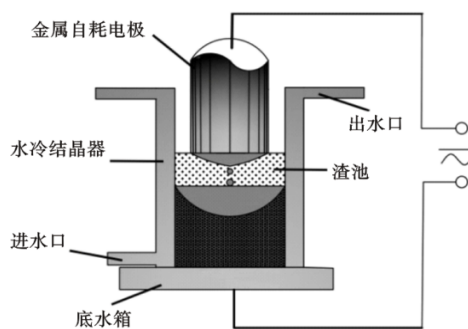


图 1 低频电渣重熔装置

Fig. 1 Low frequency electroslag remelting device

1.3 实验方案及实验过程

实验方案见表 2。根据文献调研发现,不论是工业生产还是实验室研究,主要采用 ≤ 10 Hz 低频供电模式,我国舞阳钢铁建设的国内第一台低频板坯电渣炉换向频率 0 ~ 5 Hz^[15]。因此,设定电源频率为 2 Hz,在低频率下分析电流对电渣锭洁净度的影响。另外,本实验中采用的结晶器直径 $\phi 100$ mm,自耗电电极直径 $\phi 55$ mm,根据相关文献及作者前期的研究数据,重熔电流在 1 200 ~ 2 000 A,重熔过程均可以平稳进行。但是电流过小,电渣锭表面质量变差;电流过大,凝固质量恶化。为此,本实验选定了 1 400、1 800 A 两个较为适宜的重熔电流进行研究。

具体的实验过程如下:(1)重熔前,将自耗电电极表面的氧化铁皮完全去除,防止氧化铁皮对实验结果产生影响,同时打开冷却水,调至 0.2 ~ 0.3 MPa;(2)重熔采用热启动方式,首先将配比好的 1 200 g 渣料

表2 304 L奥氏体不锈钢电渣重熔实验方案

Table 2 Experimental schemes for 304 L austenitic stainless steel electroslag remelting

实验方案	频率/Hz	重熔电流/A	渣系
1	50	1 800	30% Al ₂ O ₃ +70% CaF ₂
2	2	1 800	30% Al ₂ O ₃ +70% CaF ₂
3	2	1 400	30% Al ₂ O ₃ +70% CaF ₂

混匀置于石墨坩埚内,将石墨坩埚放入升温至1 650℃左右的二硅化钼管式炉中加热,待坩埚内的渣料完全熔化后,倒入水冷结晶器中,同时开始控制金属自耗电极下降,逐渐将电流调控到目标值,继而进入稳定重熔阶段;(3)待水冷结晶器内的电渣锭达到一定高度时,控制金属自耗电极上升脱离渣池,然后断电,待渣帽完全凝固后脱模。

1.4 检测方法

重熔结束后,去除渣皮,利用锯床将电渣锭有明显缺陷的头部去除约20 mm,再使用电火花数控线切割机在电渣锭顶部相应位置取样,分别用于测定其O、N含量以及夹杂物分布。为准确检测其中O、N含量,需要将试样制成为直径 $\phi 5$ mm、长度约为6 cm且表面光洁的圆棒,再采用日本Horiba型氧氮联测仪测定。为了分析电渣锭中夹杂物的变化,首先切取15 mm×15 mm×10 mm的试样,用120#~2000#砂纸对其打磨并机械抛光至平滑光亮后,采用美国FEI型ASPEX扫描电镜对选定面积(64 mm²)扫描并对其内的夹杂物进行统计,以提供给定面积里所有夹杂物的信息。为进一步分析电渣锭中的典型夹杂物,采用日本电子JSM-6510 LV型扫描电镜观察夹杂物的形貌,并用其配备的能谱仪分析夹杂物的成分。

2 实验结果与讨论

2.1 不同电流、频率对电渣锭O、N含量的影响

在2 Hz下不同的电流重熔时对电渣锭中O、N含量影响如图2所示。从图2可知,当电源频率由50 Hz降至2 Hz,电流为1 800 A时,电渣锭中 $w[\text{O}]$ 由 43.15×10^{-6} 增至 117.60×10^{-6} ,增加了172.2%。当电源频率固定为2 Hz不变时,随着电流由1 800 A降至1 400 A,电渣锭中 $w[\text{O}]$ 由 117.60×10^{-6} 降低至 75.75×10^{-6} ,降低了35.59%,但相较于工频重熔(1 800 A), $w[\text{O}]$ 仍然增加了75.5%。低频下重熔(1 800、1 400 A)时,与工频重熔(1 800 A)相比, $w[\text{N}]$ 仅出现轻微变化(4%、3.4%)。

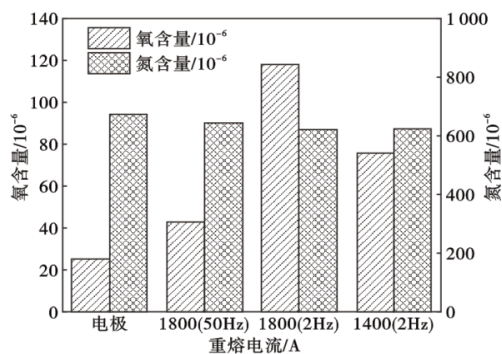


图2 不同电流、频率下电渣锭中O、N含量变化图

Fig. 2 Variation of oxygen and nitrogen content in the electroslag ingot at different current and frequency

2.2 不同电流、频率对夹杂物总量及尺寸的影响

不同电流重熔的电渣锭中夹杂物总量的分布,如图3所示。由图3可知,采用工频且电流为1 800 A重熔时,电渣锭中的夹杂物数量较少,共计757个;当电源频率为2 Hz、电流为1 800 A时,电渣锭中的夹杂物数量为2 067个,相较于工频(1 800 A)夹杂物数量增幅为173%;随着电流降低,夹杂物数量也开始降低。当重熔电流为1 400 A时,夹杂物数量为1 239个,相较于工频(1 800 A)夹杂物数量增幅为63.7%。

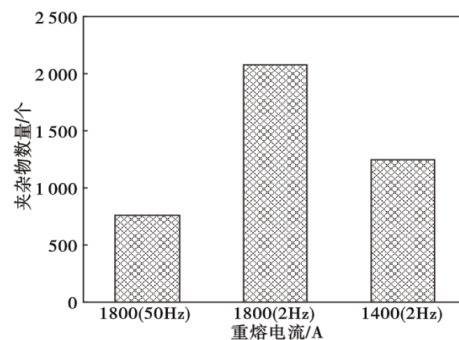


图3 不同电流、频率下夹杂物数量的变化

Fig. 3 Variation of the number of inclusions at different current and frequency

不同电流下电渣锭中夹杂物尺寸变化如图4所示。从图4中可以看出,采用电源频率为2 Hz重熔时,夹杂物主要以小颗粒夹杂物形式存在,电渣锭中夹杂物尺寸绝大多数分布在3~10 μm ,其中,随着电流的减小,分布在3~5 μm 的夹杂物占比逐渐增多,分布在5~10 μm 的夹杂物占比逐渐减小。与工频电流为1 800 A时重熔相比,低频下不论何种重熔电流,10~20 μm 夹杂物的比例略微增加。

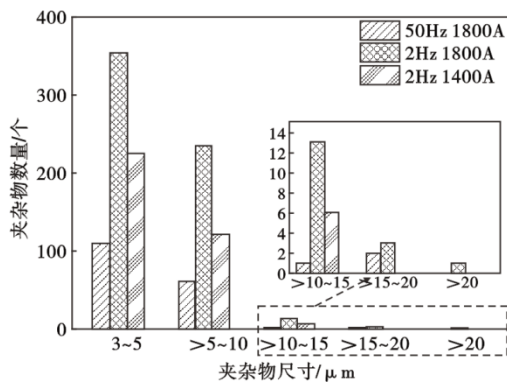


图 4 不同电流、频率对电渣锭中夹杂物尺寸分布的影响
Fig. 4 Effect of current and frequency on the size range of inclusions in electroslag ingots

2.3 不同电流、频率对夹杂物种类及形貌变化的影响

不同工艺条件下重熔的电渣锭中不同成分夹杂物的数量占比情况如图 5 所示。分析发现,不论何种工艺条件,夹杂物均以 Al_2O_3 夹杂为主(超过 65%),其次是其他氧化物夹杂(22%~30%)以及少量的硫化物/硫化物-氧化物夹杂物(低于 6%)。

为了分析电渣锭中其他氧化物夹杂的来源,对其成分进行分析,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,其他氧化物夹杂中 Al 含量最高。因此,可以认为其他氧化物夹杂也是主要由 Al_2O_3 或以 Al 为主的复合夹杂物组成。

电渣锭中典型的 Al_2O_3 夹杂物形貌如图 7 所示。由于电流对夹杂物的种类及形貌几乎没有影响,因此,没有单独列出不同电流下夹杂物的形貌。

2.4 讨论

通过实验结果可知,在电源频率(2 Hz)保持不变时,随着重熔电流增加电渣锭的洁净度下降。一方面,电渣重熔过程中,电流通过电阻极大的渣池时会产生焦耳热,渣池产生的焦耳热与电流呈正相关,故在其他条件不变时,电流的增加势必会使渣池温度相应升高,同时,自耗电极熔化速度加快^[16]。周围温度的升高加重了自耗电极表面氧化,会将更多的 O 带入到电渣锭中,进而导致电渣锭中 O 含量增加,洁净度变差。此外,电渣重熔过程中电极末端熔化、熔滴转移及金属熔池的渣-金反应三个阶段均能起到去除非金属夹杂物效果,其中以电极熔化末端形成金属熔滴阶段效果最为显著^[17-19]。然而,自耗电极熔速加快也会导致在电极末端金属熔滴形成的时间加快,同时金属熔滴尺寸变得更大,金属熔池的渣-金反应时间变短,不利于夹杂物的去除。因此,当重熔频率(2 Hz)保持不变时,随重熔电流增大,电渣锭中 O 含量、夹杂物数量也随之增多。

另一方面,作者团队前期的研究中已经发现,采用 70%CaF₂+30%Al₂O₃ 二元渣系重熔时,随着频率

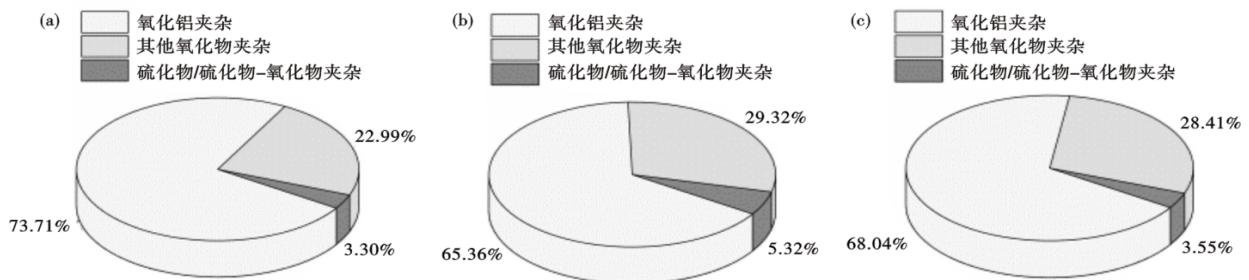


图 5 电渣锭中不同成分夹杂物的数量占比:(a) 50 Hz/1 800 A, (b) 2 Hz/1 800 A, (c) 2 Hz/1 400 A
Fig. 5 The number proportion of inclusions with different compositions in electroslag ingots: (a) 50 Hz/1 800 A, (b) 2 Hz/1 800 A, (c) 2 Hz/1 400 A

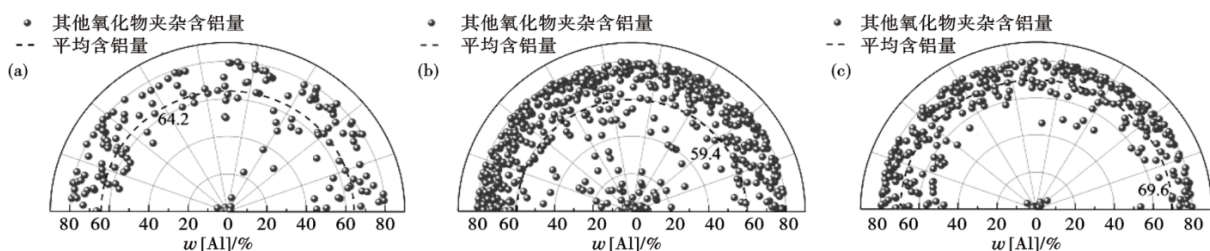


图 6 其他氧化物夹杂中含 Al 量:(a) 50 Hz/1 800 A, (b) 2 Hz/1 800 A, (c) 2 Hz/1 400 A
Fig. 6 Al content in other oxide inclusions: (a) 50 Hz/1 800 A, (b) 2 Hz/1 800 A, (c) 2 Hz/1 400 A

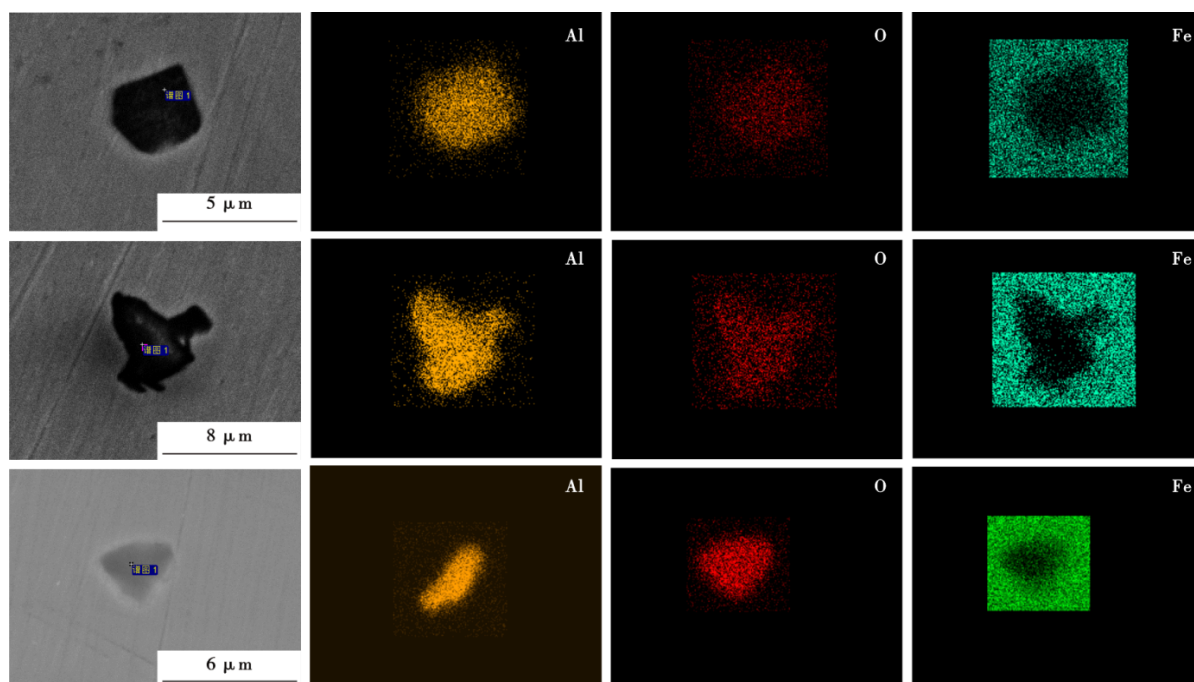


图7 Al-O典型夹杂物的形貌及元素分布图

Fig. 7 Morphology and elemental distribution of typical Al-O inclusions

的降低,钢中的O含量、夹杂物数量逐渐增加,证实是渣系中的 Al_2O_3 电解所致^[7,20]。本研究发现,当采用电源频率2 Hz,渣系为70% CaF_2 +30% Al_2O_3 重熔时,随着电流增加,电渣锭中O含量、夹杂物的数量也增加。其主要原因除了上述的渣温增加导致电极氧化、夹杂物去除动力学变弱以外,大的电流会进一步促进渣池中的 Al_2O_3 的电解从而促进O含量的增加。

电解过程中会将电能转化为化学能,它是由离子和电子相互作用驱动的。在电解过程中,电流决定了离子的运动速度和电子的转移速率,从而影响电解反应的速率。离子运动速度大小如式(1)^[21]。

$$v_B = U_B \cdot \frac{dE}{dl} \quad (1)$$

式中, v_B 为离子B的迁移速度,m/s; U_B 为比例系数, $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$; $\frac{dE}{dl}$ 为单位距离的电场强度,V/m。

电子迁移速率大小如式(2)。

$$v = \frac{I}{n \cdot q \cdot S} \quad (2)$$

式中, v 为自由电子定向移动的速率,m/s; I 为电流,A; n 为单位体积内导电的电子数, m^{-3} ; q 为电子电量, $\text{A}\cdot\text{s}$; S 为横截面积, m^2 。

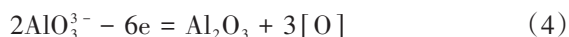
由式(1)可知,当电流增加时,会导致电场强度增加,进而使离子迁移速度增大。由式(2)可知,随

着电流增大,使得自由电子定向移动的速率增大。随着离子迁移速率和自由电子定向移动的速率增大,从而促进电解反应。随着 Al_2O_3 电解趋势的增加,电渣锭中的O含量也随之增加。但是电流对电解反应速率的影响并非线性关系,随着电流的增加,反应速率会逐渐趋于饱和,所以电解过程不会随电流的增加持续增加。

电渣重熔时,渣池的温度高达1 600~1 800℃。根据费道切夫理论, Al_2O_3 在一定程度上会发生分解,如式(3)^[7]。



分解产生的(AlO_3^{3-})在阳极上通过式(4)失去电子,从而造成电渣锭中的O含量的增加。



Al^{3+} 在阴极上通过式(5)得到电子,生成金属Al进入熔池,造成电渣锭Al含量增加。



根据对重熔电渣锭Al含量分析,采用2 Hz、1 800 A供电模式重熔后Al含量增加了0.022%;采用2 Hz、1 400 A供电模式重熔后Al含量增加了0.012%(与工频、1 800 A重熔的电渣锭Al含量相比),进一步证实低频下电解过程确实存在,而且,随着电流增加电解趋势也进一步增加。

但是,在实际的电渣重熔过程中,电流的变化

幅度较大,比如以 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$ 的结晶器为例,正常重熔阶段熔炼电流可从 $16\ 000\sim 21\ 000\ \text{A}$ 变化,变化幅度高达30%,在此情况下,选择合理的重熔电流就比较重要。研究表明,采用低频供电时(2 Hz),在电渣重熔过程平稳、电渣锭表面质量良好的前提下,较低的重熔电流有利于洁净度的改善。值得说明的是,本研究结果是在实验室小型低频电渣重熔炉上所得出的结果。另外,由于本实验样本数较少,仅可以发现随着电流的增加,电渣锭中的O含量及夹杂物数量均有所增加的趋势,而难以取得电流和夹杂物关系的最佳点,后续作者将进一步细化方案,深入研究低频条件下重熔电流与洁净度的关系。

3 结论

(1)当电源频率为2 Hz,电流由1 400 A增加至

1 800 A时,电渣锭中 $w[\text{O}]$ 由 75.75×10^{-6} 增至 117.60×10^{-6} ,均大于电源频率50 Hz、电流1 800 A时电渣锭中 $w[\text{O}]$;无论是改变电源频率还是改变电流,电渣锭中 $w[\text{N}]$ 变化不大。

(2)当电源频率为2 Hz时,随着电流的增加,夹杂物的数量也随之增加,均多于电源频率50 Hz、电流1 800 A时电渣锭中夹杂物的数量,但其夹杂物种类并没有变化。不论低频还是工频,电渣锭中的夹杂物主要以 Al_2O_3 夹杂物或含Al量较高的复合夹杂物为主。

(3)当电源频率为2 Hz时,随着电流的增加,电渣锭洁净度下降。其原因在于渣池中 Al_2O_3 的电解、自耗电极表面的氧化加剧以及渣-金反应时间动力学弱化,都会导致电渣锭中夹杂物数量的增加。

参考文献

- [1] 姜周华,董艳伍,耿鑫,等. 高品质特殊钢电渣重熔技术的开发和应用[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 15-25.
- [2] 常凯华. 电渣重熔过程氧及夹杂物的变化规律研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.
- [3] 王立,郭显胜,王鹏飞,等. 超低碳控氮奥氏体不锈钢电渣重熔工艺实践[J]. 大型铸锻件, 2022(2): 4-6.
- [4] 施晓芳,朱春丽,徐涛,等. 外加磁场对电渣锭洁净度的影响研究[J]. 过程工程学报, 2021, 21(12): 1481-1490.
- [5] 赵黎廷,陈瑞,高云保,等. 中大型钢锭电渣冶金制备技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(10): 1215-1219.
- [6] 余坤. 低频电渣重熔特性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [7] 常立忠,苏云龙,张龙飞,等. 电渣重熔过程电源频率对电渣锭洁净度的影响[J]. 钢铁, 2022, 57(7): 43-53.
- [8] Shi X F, Wang B J, Wang Y, et al. Effect of different power supply modes on inclusion in 304L stainless steel electroslag ingot[J]. Metals, 2023, 13(3): 457.
- [9] Wang B J, Wang Y, Wang M J, et al. Effect of electrical parameters and slag system on macrostructure of electroslag ingot[J]. China Foundry, 2024, 21(1): 44-50.
- [10] Schneider R S E, Mülleder M, Zeller P, et al. Effects of low frequency alternating currents on the electro-slag remelting process[J]. BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte, 2016, 161(1): 20-26.
- [11] Sibaki E K, Kharicha A, Wu M, et al. A numerical study on the influence of the frequency of the applied AC current on the electro-slag remelting process[C]//Krane MJM, Jardy A, Williamson RL, et al. Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting. Cham: Springer, 2013: 13-19.
- [12] 余坤,叶安山,杨湘杰. 低频电渣重熔对NO8367奥氏体不锈钢组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(2): 133-136.
- [13] 梁强,陈希春,任昊,等. 电源频率对GH4169合金电渣重熔凝固过程参数的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(4): 302-306.
- [14] 李宝宽,黄雪驰,刘中秋,等. 现代电渣重熔先进技术特征与演进[J]. 钢铁, 2022, 57(6): 1-11.
- [15] 宋立功,袁喜洋,郭宏磊. 电渣重熔炉低频电源快速熔断器检测装置的开发及应用[J]. 宽厚板, 2021, 27(3): 25-27+48.
- [16] Wang Q, Yan H G, Ren N, et al. Effect of current on solute transport in electroslag remelting dual alloy ingot[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 564-567.
- [17] 郭中华,郭波,王松伟,等. 保护气氛电渣重熔对DZ2高速车轴钢成分及夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 19-24.
- [18] Shi C B, Huang Y, Zhang J X, et al. Review on desulfurization in electroslag remelting[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(1): 18-29.
- [19] 王林,高永亮,李猛,等. 电流强度对电渣重熔GH4169合金冶金质量的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(3): 87-92.
- [20] Chang L Z, Shi X F, Yang H S, et al. Effect of low-frequency AC power supply during electroslag remelting on qualities of alloy steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2009, 16(4): 7-11.
- [21] 杜清枝,杨继舜. 物理化学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003: 222.