

自耗电电极冶金质量对 G20CrNi2Mo 轴承钢电渣锭洁净度的影响

李世健¹ 成国光¹ 苗志奇¹ 陈 列² 姜新岩²

(1 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;2 西宁特殊钢股份有限公司,西宁 810005)

摘 要 研究了 G20CrNi2Mo 轴承钢电渣重熔过程自耗电电极对电渣锭洁净度的影响。结果表明,电渣锭洁净度与自耗电电极的冶金质量有较大的相关性。随着自耗电电极氧含量的升高,电渣锭氧含量呈升高趋势。通过扫描电镜-能谱仪分析发现,氧含量较高的自耗电电极中低熔点 CaO-MgO-Al₂O₃ 夹杂物数量比低氧含量自耗电电极的要多。由于低熔点夹杂物与钢液的界面能较低,限制了其在电渣重熔过程中的去除效率,从而导致电渣锭氧含量较高。通过电弧炉出钢高拉碳操作,氧含量低于 0.002 0% 的锭子数量占到总量的 90% 以上。

关键词 G20CrNi2Mo 轴承钢 电渣重熔 自耗电电极 夹杂物 氧含量

Effect of Consumable Electrode Metallurgical Quality on Cleanliness of Bearing Steel G20CrNi2Mo ESR Ingot

Li Shijian¹, Cheng Guoguang¹, Miao Zhiqi², Chen Lie² and Jiang Xinyan²

(1 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;
2 Xining Special Steel Co., Ltd, Xining 810005)

Abstract The effect of consumable electrode on ESR ingot cleanliness was investigated during electroslag remelting (ESR) of G20CrNi2Mo bearing steel. The results show that the ingot cleanliness is much correlated with that of electrode. The ingot oxygen content presents a rising trend with increasing electrode oxygen content. The SEM-EDS analysis reveals that the number density of low-melting-point CaO-MgO-Al₂O₃ inclusions in high oxygen-containing electrode is much larger than that in low oxygen-containing electrode. The low interfacial energy between low-melting-point inclusions and steel significantly limits the efficiency of inclusions removal, thus resulting in relatively high ingot oxygen content. With increasing carbon content before EAF tapping, the number of ingots less than 0.002 0% oxygen occupies total more than 90%.

Material Index Bearing Steel G20CrNi2Mo, Electroslag Remelting, Consumable Electrode, Inclusions, Oxygen Content

G20CrNi2Mo 是一种典型的渗碳轴承钢,经表面渗碳及淬、回火处理后,其表面具有相当高的硬度、耐磨性和接触疲劳强度,同时心部还保留良好的韧性,能承受较高的冲击负荷^[1],在国内主要应用于铁路货车滚动轴承上。随着铁路提速及车辆重载化,对其冶金质量也提出了更高的要求。传统的冶炼工艺(BOF/EAF + LF + RH/VD)可以将钢中的氧含量控制到较低水平,但是由于工艺的不稳定性,偶尔会出现一些大尺寸夹杂物,将会较显著降低轴承钢的疲劳使用寿命^[2]。电渣重熔可以较好去除自耗电电极中的大尺寸夹杂物,同时有效改善钢的凝固组织^[3,4]。因此,国内特钢厂均采用此工艺生产 G20CrNi2Mo 轴承钢。

影响电渣锭洁净度的因素有很多,如炉渣成分^[5-8]、渣量^[9]、外界气氛^[10]、脱氧剂的添加^[11]、自耗电电极洁净度^[12]、电极插入深度^[13]等。当自耗电电极氧含量较低时,电渣重熔轴承钢是一个增氧的过程,降低炉渣氧势是防止电渣锭过度增氧行之有效

的方法^[7,14-15]。王昌生^[6]通过实验研究发现,采用低氟五元渣系冶炼的 GCr15 钢氧含量较传统的“三七渣”要低得多。此外,李正邦^[12]的实验室研究结果表明,电渣重熔过程非金属夹杂物的去除受到电极中原始夹杂物成分及尺寸的影响。当采用 Al 脱氧的电极时,精炼效果较差。但到目前为止,关于自耗电电极洁净度对工业电渣重熔精炼效果影响的研究还相对较少。

特钢厂在不同月份生产的 G20CrNi2Mo 钢平均氧含量波动很大。由于电渣重熔工艺相对稳定,氧含量的波动很有可能与自耗电电极的冶金质量有关。从 2017 年 9 月 1 日开始,铁道部要求各生产厂家全面执行关于铁路用电渣轴承钢氧含量低于 0.002 0% 的新标准。因此,保证电渣锭氧含量的稳定性至关重要。基于此,本课题以该厂生产的 G20CrNi2Mo 轴承钢为研究对象,分析了自耗电电极对电渣锭洁净度的影响。

1 工艺流程及研究方法

1.1 工艺流程

G20CrNi2Mo 钢的生产流程为 70 t EAF-70 t LF-70 t VD-连铸-电渣重熔,其工艺控制要点如下:

(1) G20CrNi2Mo 属于低碳轴承钢,标准成品碳含量要求为 0.17% ~ 0.23%。电弧炉出钢前将终点碳含量控制在 0.04% ~ 0.10%。电弧炉出钢后加铝进行预脱氧。

(2) LF 到站后喂铝线进行沉淀脱氧,之后进行 Si、Mn、Cr、Ni、Mo 的合金化。

(3) 进入 VD 脱气,极真空(67 Pa)时间控制在 25 ~ 30 min。VD 过程铝发生一定程度的烧损,冶炼结束后将铝补至 0.040% ~ 0.050%。

(4) 连铸过程采用保护浇注。连铸坯的规格(mm)为 2200 × 250 × 280,用作电渣重熔自耗电电极。

图 1 为工业电渣炉示意图,结晶器高为 2 000 mm,内径为 470 mm。采用石墨电极起弧,造渣时间在 30 ~ 40 min。造渣结束后,将连铸坯转入结晶器,30 min 后进入稳定冶炼阶段。冶炼过程中炉口采用氩气保护,流量为 100 ~ 140 L/min。电流为 7 500 ~ 9 500 A,炉口电压为 50 ~ 60 V。由于厂房高度限制,冶炼过程中间交换一次电极。整个冶炼时间持续 350 ~ 370 min。采用四元系炉渣,各组元成分范围如表 1 所示。G20CrNi2Mo 轴承钢的基本化学成分如表 2 所示。

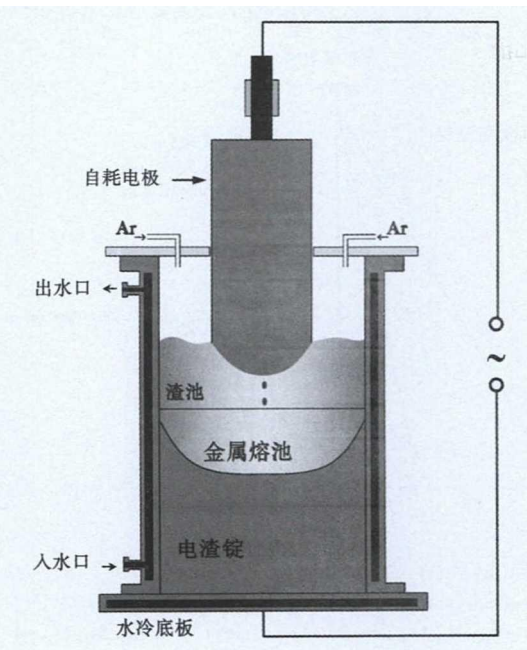


图 1 电渣炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ESR furnace

表 1 电渣重熔用炉渣成分/%

Table 1 Ingredient of slag used for ESR/%

CaF ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
45 ~ 50	10 ~ 15	30 ~ 40	5

表 2 G20CrNi2Mo 钢基本化学成分/%

Table 2 Basic chemical compositions of steel G20CrNi2Mo/%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0.17 ~ 0.23	0.15 ~ 0.35	0.50 ~ 0.70	0.40 ~ 0.60	1.60 ~ 2.00	0.15 ~ 0.30

1.2 研究方法

实际生产过程中,同一个母炉次的连铸坯可以用来生产若干个锭子,选取其中 3 个,测量距离其顶部 50 mm 位置的氧含量。首先对不同母炉次自耗电电极以及对应的 3 个锭子的氧含量进行统计,查明电渣锭氧含量与自耗电电极的关系。之后,从不同氧含量的连铸坯以及对应的电渣锭取规格(mm)为 15 × 15 × 15 的金相样,使用 INCA 对夹杂物进行自动扫描分析,扫描面积为 30 mm × 30 mm,设定最小夹杂物尺寸为 1 μm。依据界面能理论,分析自耗电电极对电渣重熔精炼效果的影响机理,并提出控制自耗电电极冶金质量的措施。

2 试验结果

2.1 电渣锭氧含量与自耗电电极的对应关系

10 个母炉次的连铸坯氧含量以及对应生产的 3 个锭子的平均氧含量如图 2 所示。从图 2 中可以看出,电渣锭氧含量的变化趋势与自耗电电极有很好的 consistency。随着自耗电电极氧含量的增加,电渣锭氧含量也随之增加。

电渣锭的氧包括自耗电电极未被吸收的夹杂物的

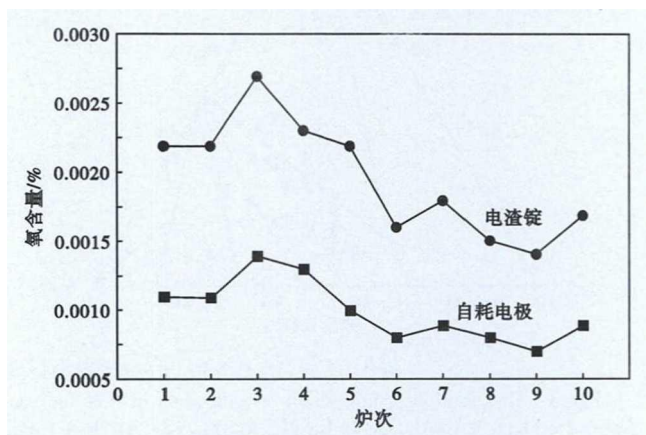


图 2 自耗电电极及对应的电渣锭的氧含量

Fig. 2 Oxygen contents of different electrodes and corresponding ESR ingots

氧,炉渣向钢液传递的溶解氧以及钢渣反应生成的以夹杂物形式的氧。通过对现场的数据统计发现,不同炉次 Al 的氧化程度基本一致,那么自耗电电极夹杂物的去除效率很有可能是影响电渣锭氧含量的一个重要因素。

2.2 电渣锭夹杂物与自耗电电极的对应关系

为了进一步研究自耗电电极对电渣锭洁净度的影响机理,选取 4 和 8 号母炉的自耗电电极及对应的锭子,采用 INCA 对其夹杂物进行自动扫描分析。将夹杂物投影至 FactSage™ 7.0 计算的 1 873 K CaO-MgO-Al₂O₃ 相图上,结果如图 3 所示。区域 1~11 代表的夹杂物见图 3 备注。

从图 3(a)中可以看出,4 号电极中夹杂物均为 CaO-MgO-Al₂O₃ 系,且有很大一部分在液相区(区域 11),这类夹杂物的典型夹杂物形貌如图 4 所示。对应的电渣锭夹杂物为高熔点的 MgO-Al₂O₃,

CaMg₂Al₁₆O₂₇以及 CaAl₄O₇(区域 3,5,6,7 和 9),如图 3(b)所示。8 号电极中除了存在 CaO-MgO-Al₂O₃ 系夹杂物外,还存在一定数量的 MgO-Al₂O₃,如图 3(c)所示;对应的电渣锭夹杂物为高熔点 Al₂O₃,CaAl₁₂O₁₉,Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆以及 MgO-Al₂O₃(区域 1 和 2),如图 3(d)所示。

2 个炉次自耗电电极及电渣锭夹杂物的平均成分如图 4 所示。电渣锭夹杂物 CaO 含量随着自耗电电极夹杂物 CaO 含量的增加而增加,充分说明,在同一渣系冶炼条件下,电渣锭夹杂物与自耗电电极夹杂物有较好的对应性。

3 讨论及改进措施

研究分析可知,电渣锭的氧含量、夹杂物特性与自耗电电极均有密切联系。电渣重熔非金属夹杂物的去除主要发生在电极熔化末端熔滴形成的过程

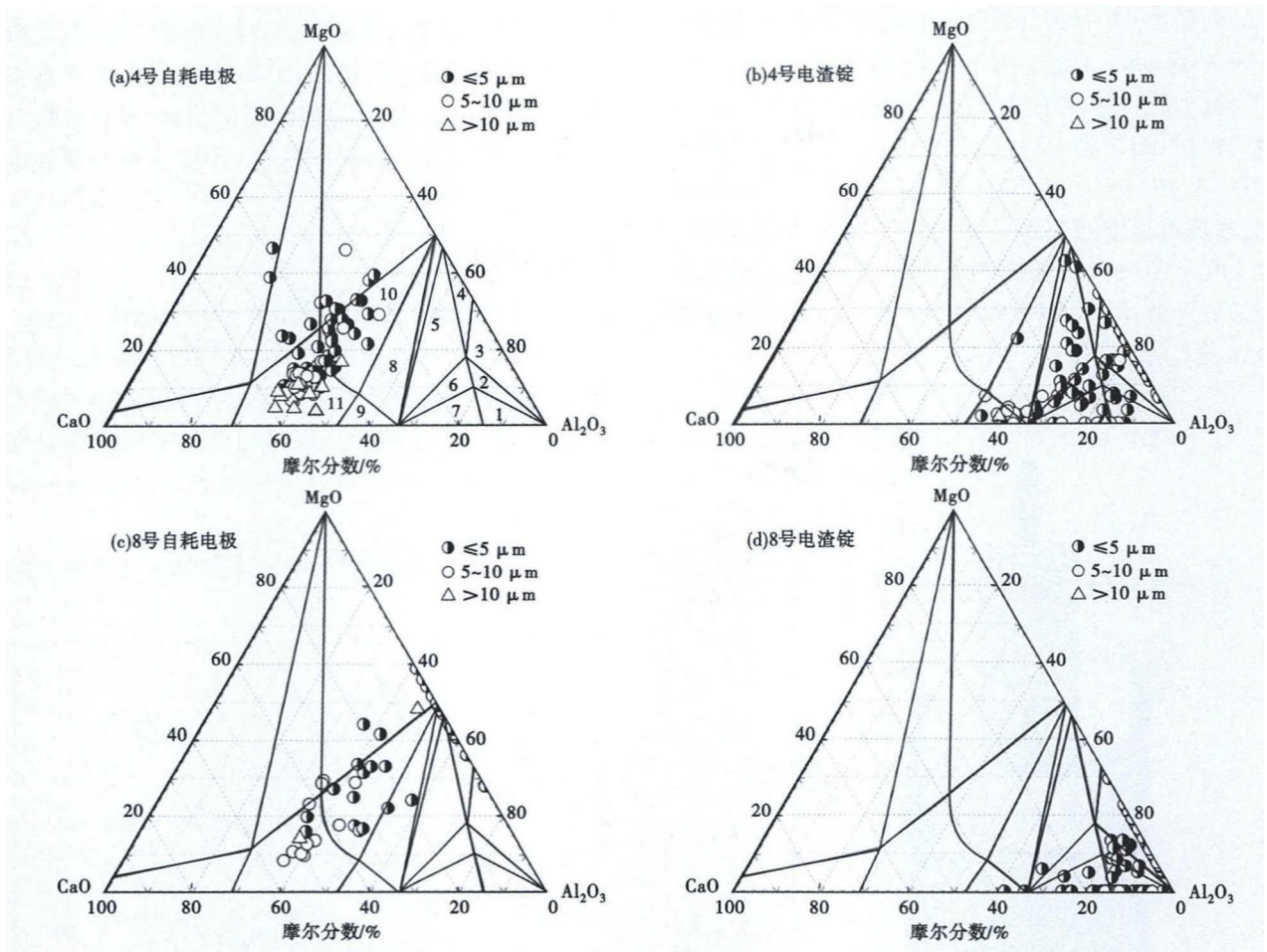


图 3 4 号(a)和 8 号(c)自耗电电极以及对应的电渣锭(b)和(d)夹杂物成分分布

Fig. 3 Distribution of ingredient of inclusions in No4 (a) and No8 (b) electrode and corresponding ESR ingot (b) and (d)
 Note: 1- Al₂O₃ + CaAl₁₂O₁₉ + Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆; 2- Al₂O₃ + CaMg₂Al₁₆O₂₇ + Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆; 3- Al₂O₃ + Spinel + CaMg₂Al₁₆O₂₇; 4- Spinel + CaMg₂Al₁₆O₂₇; 5- Spinel + CaAl₄O₇ + CaMg₂Al₁₆O₂₇; 6- CaAl₄O₇ + CaMg₂Al₁₆O₂₇ + Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆; 7- CaAl₄O₇ + CaAl₁₂O₁₉ + Ca₂Mg₂Al₂₈O₄₆; 8- Liq-slag + Spinel + CaAl₄O₇; 9- Liq-slag + CaAl₄O₇; 10- Liq-slag + Spinel; 11- Liq-slag

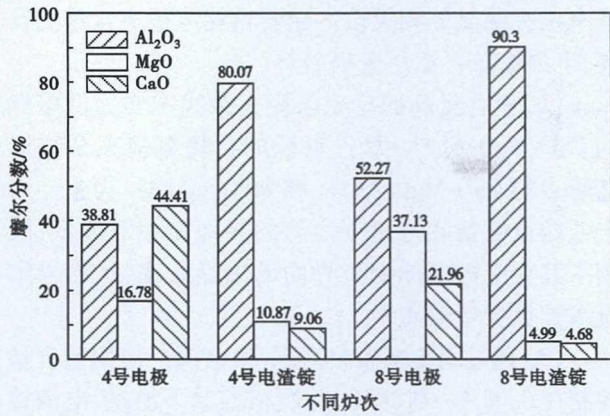


图 4 4 号和 8 号自耗电极以及对应的电渣锭夹杂物平均成分
Fig. 4 Average ingredient of inclusions in No4 and No8 electrode and corresponding ESR ingot

中^[10]。在电渣电阻热的作用下,自耗电极沿表面逐层熔化,沿锥面形成厚度仅为 50 ~ 200 μm^[16]的薄膜,夹杂物由于紊流扩散由钢液内部向钢渣界面扩散,随后被炉渣吸收和溶解。钢-渣-夹杂物之间的界面能^[17-18]在夹杂物吸收过程中起到非常重要的作用。

夹杂物在电极端部钢渣界面的吸附过程如图 5 所示。 R 为夹杂物半径, h 为夹杂物在钢液中的高度。当夹杂物达到钢渣界面时,如图 5(a) 所示,设定时间为 t_0 ;当夹杂物完全进入渣相时,如图 5(b) 所示,设定时间为 t_1 。该过程自发进行需满足的热力学条件如式(1):

$$\Delta G = (\sigma_{渣-夹杂物} - \sigma_{钢-夹杂物}) \cdot 2\pi Rh + \sigma_{钢-渣} \pi r^2 \angle 0 \quad (1)$$

式中: ΔG - 系统变化自由能; $\sigma_{渣-夹杂物}$, $\sigma_{钢-夹杂物}$, $\sigma_{钢-渣}$ 分别为渣-夹杂物,钢-夹杂物,钢-渣之间的界面能。

由公式(1)可以看出, $\sigma_{渣-夹杂物}$ 越小, $\sigma_{钢-夹杂物}$ 越

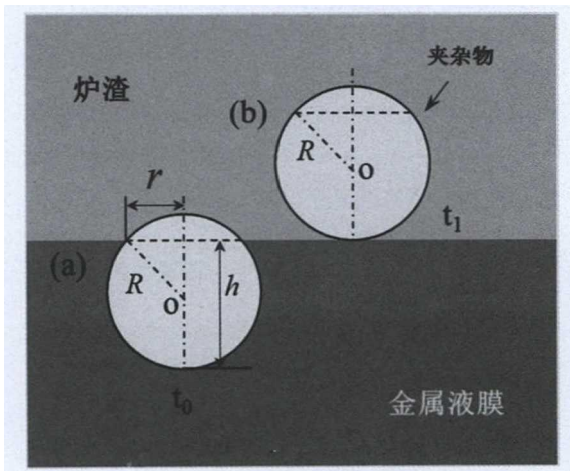


图 5 电极端部渣钢界面夹杂物吸附示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inclusions absorption by molten slag at slag/metal interface

表 3 夹杂物与钢液之间的界面能

Table 3 Interfacial energy between inclusions and steel liquid

夹杂物	界面能/(mJ · m ⁻²)
CaO-Al ₂ O ₃ (液态)	1 600 ^[19]
MgO · Al ₂ O ₃	3 700 ^[20]

大,则夹杂物越容易被去除。4 号自耗电极中夹杂物主要为低熔点的球状 CaO-MgO-Al₂O₃,8 号自耗电极中低熔点夹杂物较少,以高熔点的 CaO-MgO-Al₂O₃ 和 MgO-Al₂O₃ 为主。不同夹杂物与钢液之间的界面能如表 3 所示,可以看出 $\sigma_{钢-液态CaO-Al_2O_3}$ 要远低于 $\sigma_{钢-MgO-Al_2O_3}$,因此 4 号电极中夹杂物的去除难度较 8 号电极要大得多。

为了进一步验证界面能带来的影响,取出冶炼过程中换电极鱼尾料上的金属熔滴,利用 MLA 250 矿相解离分析仪对其进行 SEM-EDS 分析,发现 8 号熔滴几乎没有自耗电极中的残留夹杂物,4 号熔滴发现了一定数量的低熔点球状夹杂物,如图 6 所示。这充分说明自耗电极部分夹杂物未被炉渣吸收。由于液态炉渣的温度很高,甚至可达到 1 800 °C 以上^[21]。这部分夹杂物在熔滴下落过程中会进一步分解,进入金属熔池后,在降温过程重新以新夹杂物析出,从而导致电渣锭氧含量较高。

以上分析可知,自耗电极的洁净度对电渣重熔精炼效果产生了较大影响。结合现场的冶炼记录,发现氧含量高的炉次电弧炉终点碳控制在 0.04% ~ 0.06%,根据碳氧积,钢液中氧含量为 0.040% ~

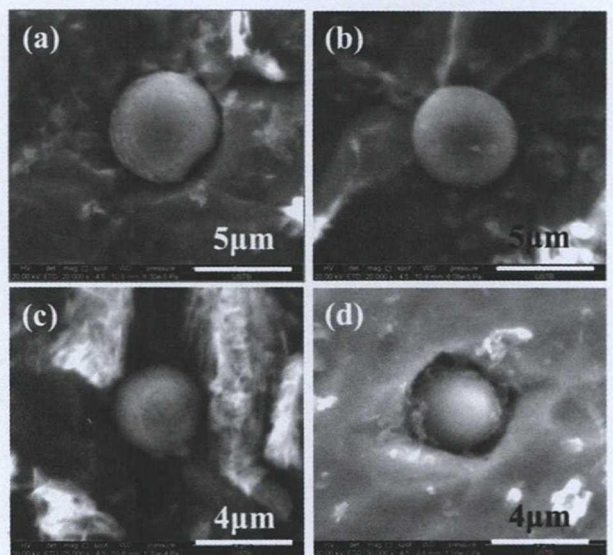


图 6 4 号电极熔滴中典型夹杂物形貌

Fig. 6 Morphology of typical inclusions in droplet of No4 electrode

0.060% ; 氧含量低的炉次电弧炉终点碳含量在 0.08% ~ 0.10% , 对应的钢液中氧含量 0.024% ~ 0.030% 。 出钢时氧含量越高, 则需要加入的金属铝越多, 精炼时间越长, 低熔点的含钙夹杂物越多, 这对电渣重熔过程夹杂物的吸收是不利的。因此, 建议现场固化电弧炉冶炼工艺, 采用高拉碳操作, 将电弧炉终点碳控制在 0.08% ~ 0.10% , 并严格控制出钢下渣量, 使得氧含量低于 0.002 0% 的电渣锭数量占到总量 90% 以上。

4 结论

(1) G20CrNi2Mo 轴承钢电渣锭的洁净度与自

耗电极有明显的相关性。随着自耗电电极氧含量的升高, 电渣锭氧含量呈升高趋势。

(2) 氧含量高的自耗电电极夹杂物主要为低熔点的 CaO-MgO-Al₂O₃ ; 氧含量低的自耗电电极夹杂物以高熔点的 CaO-MgO-Al₂O₃ 和 MgO · Al₂O₃ 为主。由于低熔点夹杂物与钢液之间的界面能相对较低, 限制了其在电极端部钢渣界面的去除效率, 从而导致电渣锭氧含量较高。

(3) 通过固化电弧炉工艺, 将电弧炉出钢碳含量控制在 0.08% ~ 0.10% , 并严格控制下渣量, 电渣锭氧含量 (<0.002 0%) 的合格率达到 90% 以上。

参考文献

- [1] 李中友. G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢生产工艺的探讨[J]. 特钢技术, 2010, 16(64), 10-14.
- [2] Hashimoto K, Fujimatsu T and Tsunekage N, et al. Study of Rolling Contact Fatigue of Bearing Steels in Relation to Various Oxide Inclusions [J]. Materials Design, 2011, 32(3): 1605-1611.
- [3] Weber V, Jardy A and Dussoubs B, et al. A Comprehensive Model of the Electroslag Remelting Process: Description and Validation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, 40(3): 271-280.
- [4] Rückert A and Pfeifer H. Mathematical Modelling of the Flow Field, Temperature Distribution, Melting and Solidification in the Electroslag Remelting Process[J]. Magnetohydrodynamics, 2009, 45(4): 527-533.
- [5] Dong Y W, Jiang Z H and Cao Y L, et al. Effect of Slag on Inclusions during Electroslag Remelting Process of Die Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(4): 1315-1324.
- [6] Jiang Z H, Hou D and Dong Y W, et al. Effect of Slag on Titanium, Silicon, and Aluminum Contents in SuperAlloy during Electroslag Remelting [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2): 1465-1474.
- [7] 王昌生, 刘胜国, 徐明德, 等. 降低电渣重熔 GCr15 钢的氧含量[J]. 特殊钢, 1997, 18(3): 31-35.
- [8] 耿鑫, 姜周华, 刘福斌, 等. 电渣重熔过程中夹杂物的控制[J]. 钢铁, 2009, 44(12): 42-45.
- [9] Du G, Li J and Wang Z B. Effect of Operating Conditions on Inclusion of Die Steel during Electroslag Remelting [J]. ISIJ International, 2018, 58(1): 78-87.
- [10] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [11] Mitchell A, Carmona F R and Samuelsson E. The Oxidation of Low-Alloy Steel Ingots during ESR [J]. Transactions ISIJ, 1984, 24(7): 547-556.
- [12] 李正邦, 周文辉, 王庆和. 自耗电电极原始夹杂物成分对电渣重熔精炼效果的影响[J]. 钢铁, 1983, 18(5): 13-20.
- [13] 曲明磊, 成国光, 李世健, 等. 2.3 t 电渣重熔过程电极插入深度的数学模型和应用[J]. 特殊钢, 2017, 38(3): 5-8.
- [14] Li S J, Cheng G G and Yang L, et al. A Thermodynamic Model to Design the Equilibrium Slag Compositions during Electroslag Remelting Process: Description and Verification [J]. ISIJ International, 2017, 57(4): 713-722.
- [15] Li S J, Cheng G G and Miao Z Q, et al. Kinetic Analysis of Aluminum and Oxygen Variation of G20CrNi2Mo Bearing Steel during Industrial Electroslag Remelting Process [J]. ISIJ International, 2017, 57(12): 2148-2156.
- [16] Fraser M E and Mitchell A. Mass Transfer in the Electroslag Process. Pt. 1. Mass-Transfer Model, Ironmaking Steelmaking [J], 1976, 3(5): 279-287.
- [17] 傅杰. 电渣重熔过程中氧化物夹杂去除机理的探讨[J]. 金属学报, 1979, 15(4): 526-539.
- [18] Wikström J, Nakajima K and Shibata H, et al. In Situ Studies of Agglomeration Between Al₂O₃-CaO inclusions at Metal/Gas, Metal/Slag Interfaces and in Slag [J]. Ironmaking Steelmaking, 2008, 35(8): 589-599.
- [19] Ogino K, Hara S and Miwa T, et al. The Effect of Oxygen Content in Molten Steel on the Interfacial Tension Between Molten Steel and Slag [J]. Tetsu-to-Hagané, 1979, 65(14): 2012-2021.
- [20] Zouvelou N, Mantzouris X and Nikolopoulos P. Interfacial Energies in Oxide/Liquid Metal Systems with Limited Solubility [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27(5): 380-386.
- [21] Mitchell A. Oxide Inclusion Behaviour during Consumable Electrode Remelting [J]. Ironmaking Steelmaking, 1974, 1(3): 172-179.

李世健(1989-), 男, 博士研究生(2018年北京科技大学), 2013年北京科技大学(本科)毕业, 电渣重熔洁净度工艺的研究。E-mail: shijian_li@126.com

收稿日期: 2018-05-20