



电渣重熔渣系对 C-HRA-3 耐热合金夹杂物的影响

李龙飞¹, 林腾昌¹, 张强¹, 何西扣², 陈正宗², 周晓舟¹

(1 钢铁研究总院有限公司冶金工艺研究所, 北京 100081; 2 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081)

摘要: 本文利用 10 kg 级保护气氛电渣重熔炉, 研究了两种电渣重熔渣系对 C-HRA-3 耐热合金电渣锭夹杂物数量、尺寸、分布规律的影响。结果表明, 60%CaF₂-20%Al₂O₃-10%CaO-10%MgO 渣系的液相线温度为 1 417 °C, 新型 50.4%CaF₂-26.1%Al₂O₃-19.5%CaO-4%MgO 渣系的液相线温度为 1 324 °C, 且固液两相区的温度区间较窄, 液态熔渣的电阻率高, 可实现 C-HRA-3 合金电渣重熔的高熔速稳定冶炼。两种渣系冶炼的电渣锭中, 夹杂物主要包括氧化物、碳氮化物和硫化物等类型, 电渣锭边缘位置夹杂物数量与自耗电电极相近, 电渣锭边缘到中心位置夹杂物数量呈现出逐渐减少的趋势。两种渣系冶炼的电渣锭中, 氧化物夹杂的平均尺寸分别为 3.019 μm 和 2.341 μm。新型渣系冶炼的电渣锭中, 沿径向不同位置处, 尺寸 > 3 μm 的氧化物夹杂数量占比均更小, 对 C-HRA-3 合金大尺寸氧化物夹杂具有更显著的去除效果。

关键词: 电渣重熔; 渣系; C-HRA-3 耐热合金; 夹杂物

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00089 **中图分类号:**TF743

Effect of Electroslag Remelting Slag System on Inclusions in C-HRA-3 Heat-Resistant Alloy

Li Longfei¹, Lin Tengchang¹, Zhang Qiang¹, He Xikou², Chen Zhengzong², Zhou Xiaozhou¹

(1 Department of Metallurgical Technology Research, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2 Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, the effects of two types of electroslag remelting slag systems on the content of the quantity, size, and distribution of inclusions in C-HRA-3 heat-resistant alloy electroslag ingots was investigated by using a 10 kg level protective atmosphere electroslag remelting furnace. The results show that the liquidus temperature of 60% CaF₂-20% Al₂O₃-10% CaO-10% MgO based slag system is 1 417 °C, the liquidus temperature of new type 50.4% CaF₂-26.1% Al₂O₃-19.5% CaO-4% MgO based slag system is 1 324 °C and the new type slag system has a narrow temperature range between solidus and liquidus, and the resistivity of liquid slag is high, which can ensure the high melting rate and stable smelting of C-HRA-3 alloy electroslag remelting. The inclusions in the electroslag ingots produced by two slag systems mainly include oxides, carbonitrides, and sulfides. The number of inclusions at the edge of the electroslag ingots is similar to that of the consumable electrode, and the number of inclusions from the edge to the center of the electroslags shows a gradually decreasing trend. Moreover the average size of oxide inclusions in electroslag ingots smelted with two slag systems is respectively 3.019 μm and 2.341 μm. Along different radial positions of the new type slag system smelting electroslag ingot, the proportion of oxide inclusions with size > 3 μm is smaller, which has a more significant removal effect on large-sized oxide inclusions in C-HRA-3 alloy.

Key Words: Electroslag Remelting; Slag System; C-HRA-3 Heat Resistant Alloy; Inclusions

为了积极应对全球气候变化, 中国提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 2060 年前实现碳中和的“双碳”发展目标。在此背景下, 能源作为碳达峰碳中和的重点领域, 不仅要优化产业结构, 推动产业转型升级, 同时也应推动传统火力发电等提升能源利用效率。超超临界电站蒸汽温度和压力的提高可显著降低煤耗以及 CO₂ 排放, 但其对耐热材料的性能也提出极高的要求^[1-2]。钢铁研究总院

团队经过长期的研究及应用探索, 自主设计研发多种可应用于不同超超临界电站环境下的耐热合金和耐热钢材料, 其中 C-HRA-3 耐热合金是一种新型可适用于 700 °C 超超临界电站大口径厚壁锅炉管制造的镍基合金材料^[3-4]。

C-HRA-3 耐热合金因含较高的铬、钴、钼等合金元素及对洁净度的严格要求, 需经真空感应熔炼+气体保护电渣重熔+真空自耗熔炼的三联特种

基金项目: 中央企业自主投入研发专项重大基金(20T61180ZD)

作者简介: 李龙飞(1990—), 男, 博士, 工程师; **E-mail:** aifei_0105@126.com; **收稿日期:** 2023-05-25

冶炼工艺生产制备^[5]。电渣重熔作为中间冶炼环节,可利用其重熔精炼工艺优势,借助高温熔渣与金属熔滴间相互作用及结晶器冷却控制,获得具有低硫含量、高洁净度、良好的表面质量及凝固组织等特征的电渣锭^[6-11]。电渣重熔冶炼特定金属材料时,除了设计合理的用电制度和冷却制度外,电渣重熔渣系的选择也至关重要,其直接影响电渣锭中易烧损元素控制、夹杂物去除效果^[9, 12]。国内外研究人员在电渣重熔渣系开发方面做了大量研究工作。Duan等^[13]将CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO-TiO₂五元渣系中的CaO含量由5%提高到36%,使得电渣重熔Inconel718合金中氧、硫含量大幅下降,夹杂物数量减少、尺寸减小。崔利民等^[14]选用75%CaF₂-15%Al₂O₃-5%CaO-5%TiO₂渣系替代70%CaF₂-30%Al₂O₃渣系冶炼GH2132合金,可将电渣锭中D类细系夹杂物控制在0.5级以下,Ti的烧损量降低至0.19%~0.34%。Radwitz等^[15]的研究发现,渣中MgO含量由2%升高至15%,可提高21CrMoV5-7电渣锭中大尺寸夹杂物的去除效率,增加小尺寸夹杂物的数量比例。高首磊^[16]研究发现,新型预熔渣系50%CaF₂-22%Al₂O₃-20%CaO-5%MgO-3%TiO₂可有效改善GH3128合金电渣锭表面质量,对Ti的烧损有一定的抑制作用。肖爱平等^[17]研究发现,新型55%CaF₂-25%Al₂O₃-15%CaO-5%MgO电渣重熔渣系可使GCr15轴承钢中氧含量大幅降低,有效改善钢中D类夹杂物。但是,C-HRA-3合金作为一种新型镍基耐热合金,对其电渣重熔渣系的研究却鲜有报道。

因此,本研究利用10 kg级电渣重熔炉冶炼C-HRA-3耐热合金,借助夹杂物自动分析系统、SEM扫描电镜等,分析两种不同渣系下冶炼的C-HRA-3耐热合金电渣锭在同一锭身高度的不同径向位置处的夹杂物特征,对比分析60%CaF₂-20%Al₂O₃-10%CaO-10%MgO渣系(以下简称6211渣系)和50.4%CaF₂-26.1%Al₂O₃-19.5%CaO-4%MgO渣系(以下简称新型渣系)下,电渣重熔对C-HRA-3合金夹杂物的去除效率并摸索其夹杂物特征规律,为

工业级电渣重熔冶炼C-HRA-3耐热合金提供理论依据。

1 实验材料及方法

利用中频真空感应炉冶炼1支20 kg的C-HRA-3合金锭,其化学成分(质量分数)见表1。铸锭在特定的工艺下锻造成 $\phi 40$ mm棒材,沿中间切开成两支单重约10 kg的电渣重熔自耗电电极。选用内径为 $\phi 80$ mm的水冷结晶器在实验室小型电渣重熔炉上进行电渣重熔冶炼,所用的两种渣系成分(质量分数)见表2。其中,6211渣系为基础渣系的六元渣,新型渣系为结合C-HRA-3合金物性特点并利用FactSage 7.3软件计算设计的新型渣系^[18]。两种渣系冶炼实验所用渣量均为1 kg,并于冶炼前由分析纯试剂配制混匀,在1 600 °C保温60 min预熔,高温液态渣直接加入电渣炉内,并在渣中加入40 g铝粒。在冶炼时,结晶器内部持续通入氩气保护。由于两种渣系物性不同,冶炼过程的电参数也有微调,其中使用6211渣系冶炼时的电压为28 V,电流为1 300~1 500 A,熔速在0.42~0.52 kg/min内波动,而使用新型渣系冶炼时的电压为34 V,电流为1 400~1 500 A,熔速在0.52~0.62 kg/min内波动。

在热锻态自耗电电极圆棒1/2半径处以及两种不同渣系冶炼的C-HRA-3合金电渣锭的不同部位切取8 mm×8 mm×4 mm的金相样品,其中C-HRA-3合金电渣锭上的取样方式为在距离头部30 mm处切取厚4 mm薄圆片,并分别在圆片的边缘、1/2半径、中心位置取金相样品,电渣锭上取样位置如图1所示。其中,电极上的金相样为0号样品,6211渣系冶炼的电渣锭上从中心到边缘三个样品编号分别为1-1号、1-2号、1-3号,新型渣系冶炼的电渣锭上从中心到边缘三个样品编号分别为2-1号、2-2号、2-3号。利用AZtec夹杂物自动分析系统对金相样品中夹杂物进行统计分析,每个样品的分析面积均为 $2.98 \times 10^7 \mu\text{m}^2$,所分析检测的夹杂物最小有效直径为1 μm 。通过统计结果中各颗粒的化学成分结果筛选出有效夹杂物颗粒,并根据化学成分、尺寸对夹杂物进行统计分析。借助Quanta650feg扫描电

表1 C-HRA-3合金电极化学成分(质量分数)

Table 1 The chemical composition of C-HRA-3 alloy electrode

Table 1 The chemical composition of C-HRA-3 alloy electrode								%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Co	Mo	Fe
0.05	0.041	0.001 3	0.001	0.000 6	22.08	12.01	8.74	0.1
Al	Ti	B	Nb	W	Zr	O	N	Ni
0.98	0.420	0.005 0	0.048	0.66	0.02	0.000 7	0.001 7	Bal.

表 2 两种电渣重熔用渣系各组成成分(质量分数)

Table 2 The chemical composition of two slag systems for electroslag remelting %

渣系	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	ZrO ₂
6211 渣系	59.4	19.8	9.9	9.9	0.5	0.5
新型渣系	50.4	26.1	19.5	3.0	0.5	0.5

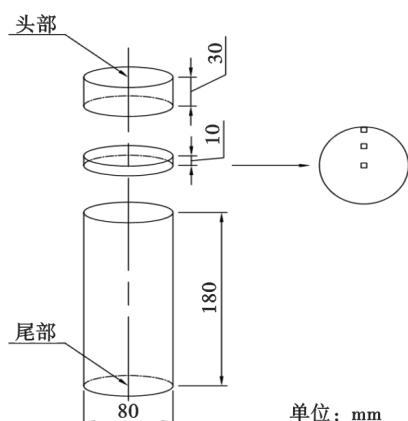


图 1 电渣锭上取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling on the electroslag ingot

镜对 C-HRA-3 合金中典型夹杂物类型进行观察分析。

2 实验结果与讨论

2.1 电渣重熔渣系物性参数分析

电渣重熔渣系的物性参数,对电渣重熔冶炼过程渣-金间化学反应、非金属夹杂物的去除效率、电渣锭的凝固组织等起到决定性作用,在设计新型渣系时应首先对渣系的物性参数进行计算或测试分析。本研究利用 FactSage 7.3 热力学软件,分别计算两种四元基础渣系在 1 000 ~ 1 600 °C 温度范围内各物相随温度变化关系,结果如图 2 所示。由图 2(a)

可知,6211 渣系的熔点为 1 417 °C,熔渣完全转变为固态的温度为 1 270 °C。随着温度的降低,在液态 6211 渣中会先后析出尖晶石相、氧化物相(MeO_A)以及含少量 CaO 的 CaF₂相(CaFh、CaFl)。从图 2(b)中可以看出,相比 6211 渣系,新型渣系的熔点为 1 324 °C,完全转变为固相的温度为 1 269 °C,随温度降低从液态渣中析出的相类型相近。新型渣系的组元配比更加接近于多元相图中的低共晶点,相比于 6211 渣系,其液相线与固相线温度差值更小,电渣重熔冶炼过程中也更为稳定。

同样地,利用 FactSage 软件计算两种渣系在 1 300 ~ 1 700 °C 温度范围内黏度的大小,结果如图 3 所示。其中,在计算过程中考虑到 6211 渣系在 1 300、1 350、1 400 °C 时以及新型渣系在 1 300 °C 时存在固相,利用修正的 Einstein-Roscoe 公式(1)^[19]计算了固液混合熔渣的黏度值。从结果可以看出,在 1 400 °C 以上,两种渣系的黏度均低于 0.05 Pa·s,其中 6211 渣系因含更高的 CaF₂ 组元,其黏度值略低于新型渣系。由于 C-HRA-3 合金的熔点为 1 371 °C,根据李正邦团队早期测试分析^[20],电渣重熔渣池温度为冶炼钢种熔点以上 200 ~ 300 °C,因而本研究中的两种渣系在此熔炼阶段,液态熔渣黏度随温度变化较为平稳,保证了熔炼过程的稳定。

$$\eta = \eta_0(1 - w)^{-2.5} \quad (1)$$

式中: η 为包含固相颗粒的液态渣黏度,Pa·s; η_0 为不含固相颗粒的液态渣黏度,Pa·s; w 为熔渣中固相颗粒的质量分数。

根据董艳伍等^[21-22]总结的经验公式(2)可计算出两种渣系的电导率。

$$\kappa = \exp(1.911 - 1.38x_x - 5.69x_x^2) + 0.0039(T - 1973) \quad (2)$$

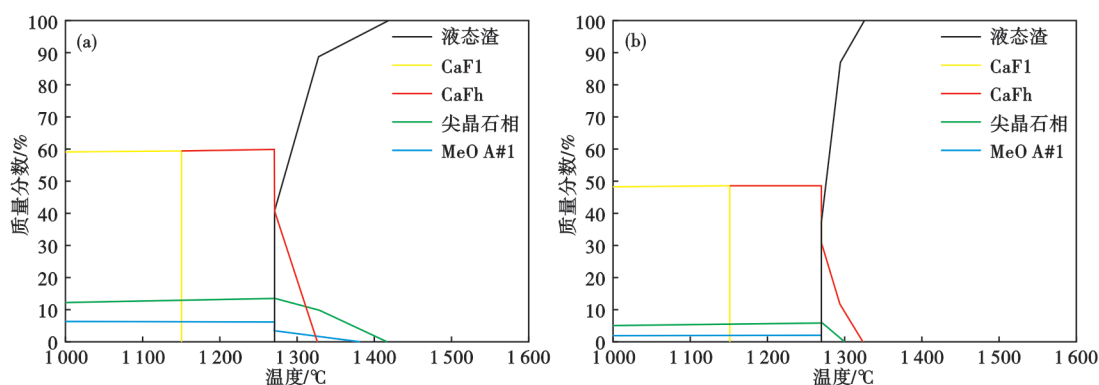


图 2 两种渣系中各相随温度变化关系:(a) 6211 渣系,(b) 新型渣系

Fig. 2 The relationship between the content of each phase and temperature variation in two slags: (a) 6211 slag system, (b) new type slag system

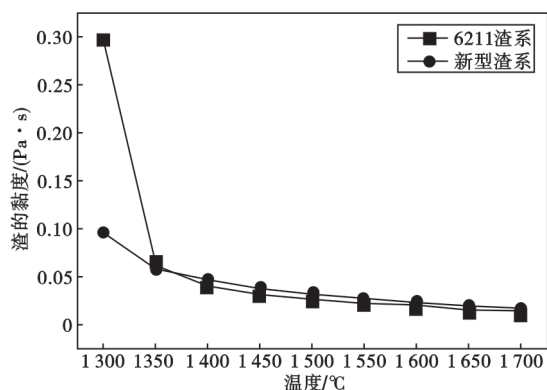


图 3 两种渣系黏度随温度变化关系

Fig. 3 The relationship between viscosity and temperature variation of two slag systems

式中: $x_c = x(\text{Al}_2\text{O}_3) + 0.2x(\text{CaO}) + 0.8x(\text{MgO}) + 0.5[x(\text{TiO}_2) + x(\text{ZrO}_2)]$; 渣系中各氧化物的适用范围为 $x(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0 \sim 0.5$, $x(\text{CaO}) = 0 \sim 0.65$, $x(\text{MgO}) = 0 \sim 0.1$, $x(\text{TiO}_2) = 0 \sim 0.18$, $x(\text{ZrO}_2) = 0 \sim 0.15$; κ 为熔渣电导率, $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$; T 为温度, K; 温度适用范围为 1 823 ~ 2 053 K。

将 6211 渣系和新型渣系的组元含量代入到以上公式中,可分别计算出 6211 渣系和新型渣系的电导率分别为 $2.26 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $1.93 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。新型渣系的电导率更低而电阻率更高,在相同的熔炼电流电压下,新型渣系产生的热量更多,熔速和熔炼效率更高。

2.2 自耗电极与电渣锭中夹杂物类型分析

经 6211 渣系和新型渣系冶炼的电渣锭上取气体棒测量 O、N 元素含量(质量分数),得到两支电渣锭中 O 含量分别为 0.001 0% 和 0.000 9%, N 含量分别为 0.002 3% 和 0.002 1%,均略高于表 1 中 C-HRA-3 合金自耗电极的 O、N 含量,整体上处于同一水平。

从夹杂物自动分析系统对自耗电极及两种电渣锭径向不同位置处夹杂物的类型、数量、尺寸进

行统计。由统计结果中夹杂物组成看,氧化物夹杂主要为含 Al、Mg、Si、Ca 的氧化物,碳氮化物主要是 Ti(C,N)及部分含 Cr、Mo 的碳化物,同时含有少量含 Mg、Ca 的硫化物。利用 SEM 扫描电镜对各样品中的夹杂物进行分析,可以发现电极与两支电渣锭不同位置样品中的夹杂物类型主要包括两类,以经 6211 渣系冶炼的电渣锭中心位置 1-1 号样品为例,该样品中典型夹杂物形貌如图 4 所示。图 4(a)为尺寸在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 近椭圆形的镁铝尖晶石类夹杂物,图 4(b)为两颗带棱角的氮化钛类夹杂物。

2.3 自耗电极与电渣锭中夹杂物数量分析

利用夹杂物自动分析系统,分别对电极和两支电渣锭上不同位置的金相样品中不同种类的尺寸 $\geq 1 \mu\text{m}$ 夹杂物数量进行统计,结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,两支电渣锭边缘位置的夹杂物数量与电极中的夹杂物数量处于同一水平,而在电渣锭同一高度处沿径向从边缘到中心的夹杂物数量逐渐减少。其中,占比最大的氧化物夹杂的数量变化最为明显。与电极相比,1 号电渣锭的中心、1/2 半径处、边缘位置的氧化物夹杂的数量分别为电极中的 85.14%、92.57% 和 1.13 倍,2 号电渣锭中三个位置氧化物夹杂的数量分别为电极中的 73.99%、82.09% 和 1.15 倍。从总体情况看,电极中尺寸 $\geq 1 \mu\text{m}$ 的氧化物夹杂数量密度为 $51.95 \text{ 个}/\text{mm}^2$,1 号电渣锭中尺寸 $\geq 1 \mu\text{m}$ 的氧化物夹杂数量密度为 $50.31 \text{ 个}/\text{mm}^2$,2 号电渣锭中尺寸 $\geq 1 \mu\text{m}$ 的氧化物夹杂数量密度为 $46.91 \text{ 个}/\text{mm}^2$,新型渣系在电渣重熔冶炼 C-HRA-3 耐热合金时具有更高的氧化物夹杂去除效率。碳氮化物和硫化物夹杂的数量在电渣锭上沿径向无单调变化趋势,但在单位面积上的平均个数均低于电极样品。

在电渣重熔冶炼过程中主要是通过两种方式去除金属中的夹杂物,一种是利用渣金之间的界面

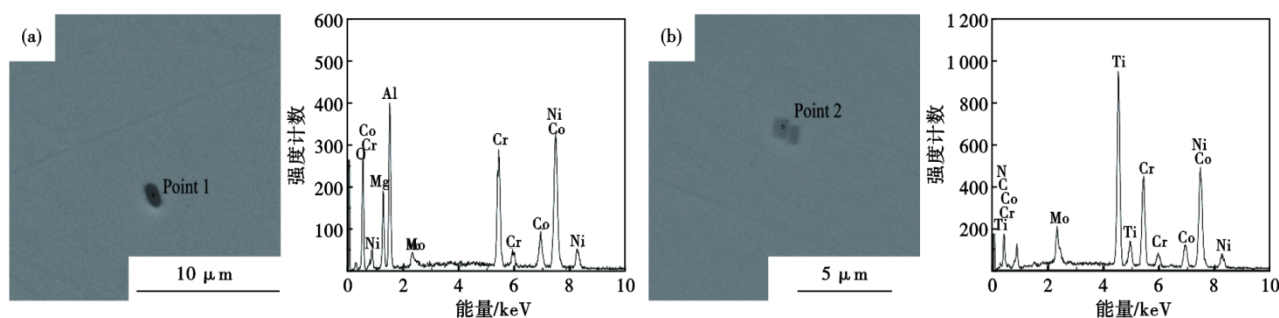


图 4 C-HRA-3 合金电渣锭中典型夹杂物:(a) MgAl_2O_4 类氧化物,(b) Ti(C,N) 类碳氮化物

Fig. 4 The typical inclusions in C-HRA-3 alloy electroslag ingots: (a) the oxide as MgAl_2O_4 , (b) the carbonitride as Ti(C,N)

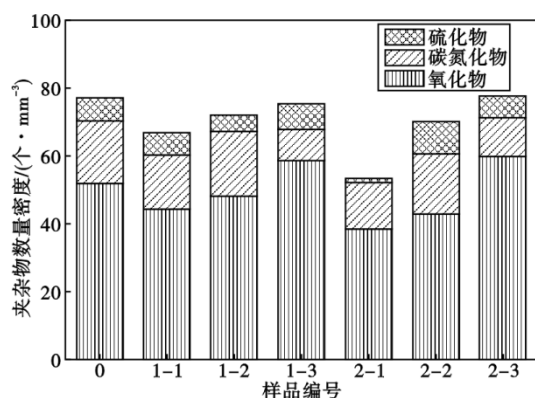


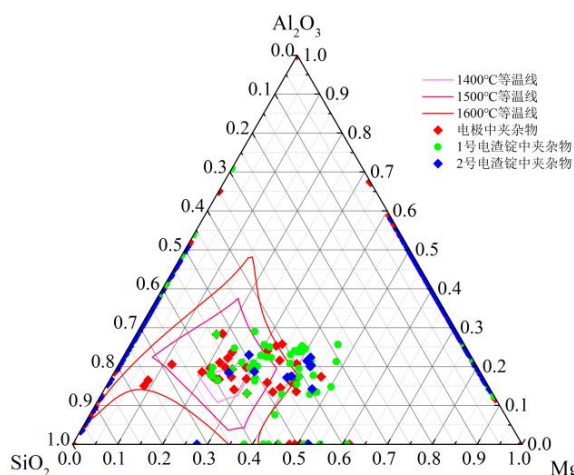
图5 不同试样中各类夹杂物的数量密度

Fig. 5 Quantity density of various inclusions in different samples

能作用对非金属夹杂物的吸附;另一种是夹杂物的溶解^[23]。

从界面能的角度分析,氧化物夹杂被熔渣吸收通常为自发过程^[24],夹杂物去除效率主要受合金液表面更新频率影响。电渣重熔的熔速会影响电极端面熔滴进入渣池的频率,熔速提高可以细化熔滴,增大熔滴与高温熔渣之间的比表面积,有利于夹杂物的快速吸附去除。在本研究中,由2.1部分的分析可知,新型渣系具有更低电导率更高的渣阻,相同渣量下在电渣重熔过程中产生的能量更高熔速更大,在C-HRA-3耐热合金熔滴穿过渣池的过程中更利于夹杂物的吸附去除。

结合夹杂物自动分析结果,氧化物夹杂主要为由 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 单一或复合组成,以及极为少量的单一 CaO 夹杂物。将电极与两支电渣锭中的氧化物夹杂成分统计后绘入至利用FactSage软件计算了带有1400、1500、1600℃三个温度的等温线 Al_2O_3 - MgO - SiO_2 三元图,结果如图6所示。从图6中可以看出,与电极相比,仅在低于1400℃以下的区域内电渣锭中夹杂物数量略有减少,在图中其他区域夹杂物数量变化不大。由于电渣重熔冶炼电极端面金属熔滴形成时其温度通常在电极材料液相线以上30℃左右,本研究中C-HRA-3合金的液相线温度为1371℃(由JMatPro软件计算得到),而非金属夹杂物在电渣重熔过程中的溶解去除大多是发生在电极熔化端面熔滴形成的阶段^[23],因此,低熔点的夹杂物数量有所降低,高熔点夹杂物不具备溶解去除的温度条件。综上分析,本研究中电渣锭中夹杂物的去除主要是熔渣对夹杂物吸附作用引起的,而夹杂物的溶解几率较小。

图6 电极与电渣锭内部氧化物夹杂在 Al_2O_3 - MgO - SiO_2 三元图中的成分分布Fig. 6 Composition distribution of oxide inclusions in the electrode and electroslag ingots on the Al_2O_3 - MgO - SiO_2 phase diagram

氧化物夹杂物在径向上的分布,主要是由于金属熔滴在脱离电极端面进入渣池,在渣池中心部位受流场搅动作用会形成逆时针涡流,而在近结晶器侧渣池区域,因水冷的强作用导致渣池存在温度梯度,熔渣密度随温度降低而增加,因受力差别而形成顺时针涡流^[25]。在金属熔池中,会受热场、溶质场、磁场等因素共同作用,在熔池中产生一个顺时针方向的涡流^[26],受涡流的影响,夹杂物会向外运动,在外侧近结晶器区域的强冷却作用下,夹杂物迅速被捕捉凝固至铸锭表面区域,进一步地,从电渣锭边缘至中心夹杂物数量逐渐减少。然而,碳氮化物夹杂其自身熔点低,在C-HRA-3耐热合金中析出温度均低于液相线温度,电渣锭中的碳氮化物夹杂均为重熔后凝固阶段形成的,且本研究中电渣锭直径较小,元素偏析小,导致碳氮化物夹杂在两支不同渣系冶炼电渣锭的径向方向上无明显变化趋势。

2.4 自耗电极与电渣锭中夹杂物尺寸分析

对电极和两支电渣锭中氧化物和碳氮化物夹杂物的平均有效直径进行统计,结果见表3。可以看出,三种类别的夹杂物均为2号电渣锭夹杂物的平均有效直径最小,特别是氧化物夹杂的平均尺寸降幅最大,与自耗电极相比,新型渣系冶炼的电渣锭中氧化物夹杂的平均尺寸降低了25.40%。这是由于新型渣系冶炼熔速大,且大尺寸氧化物夹杂在熔滴中浮力大存在移动滞后,其与熔渣接触时间长,更易于被吸附去除。两支电渣锭中碳氮化物夹杂及硫化物夹杂的平均有效直径与电极相比变化

表3 自耗电极与电渣锭中氧化物和碳氮化物夹杂平均直径

Table 3 Average diameter of oxide and carbonitride inclusions in the electrode and electroslag ingots

试样编号	氧化物/ μm	碳氮化物/ μm	硫化物/ μm
0号自耗电极	3.138	1.685	1.931
1号电渣锭(6211渣系)	3.019	1.744	1.989
2号电渣锭(新型渣系)	2.341	1.644	1.775

不大,甚至在1号电渣锭中两类夹杂物的尺寸略大于电极。对夹杂物自动分析结果中两支电渣锭中不同位置的氧化物夹杂在不同尺寸范围内的占比进行统计,结果如图7所示。1号电渣锭中氧化物夹杂物在1~5 μm呈现尺寸越大数量比例越小的变化趋势,但是尺寸在5 μm以上的夹杂物数量大于4~5 μm的夹杂物,而2号电渣锭中不同位置氧化物夹杂的数量占比随夹杂物尺寸增大而减小,且尺寸>3 μm的夹杂物数量占比明显低于1号电渣锭。

3 结论

(1) 相比于 60%CaF₂-20%Al₂O₃-10%CaO-10%MgO 渣系,新型 50.4%CaF₂-26.1%Al₂O₃-19.5%CaO-4%MgO 的液相线温度更低,为 1 324 ℃,且固相线与液相线温度区间小,电阻率高,可保证 C-HRA-3 合金电渣重熔的高熔速稳定冶炼。

(2) 经两种不同渣系冶炼的 C-HRA-3 合金电渣锭,边缘位置夹杂物数量与自耗电极相近,在两种渣系冶炼的电渣锭同一高度上从边缘到中心,夹杂物数量均呈现出逐渐减少的趋势。

(3) 经 60%CaF₂-20%Al₂O₃-10%CaO-10%MgO 渣系和新型 50.4%CaF₂-26.1%Al₂O₃-19.5%CaO-4%MgO 冶炼的电渣锭中,氧化物夹杂的平均尺寸分别为 3.019 μm 和 2.341 μm,电渣锭径向不同位置处,新型渣系冶炼电渣锭中尺寸>3 μm 的氧化物夹杂物数量占比均更小,对 C-HRA-3 合金大尺寸氧化物夹杂物具有更显著的去除效果。

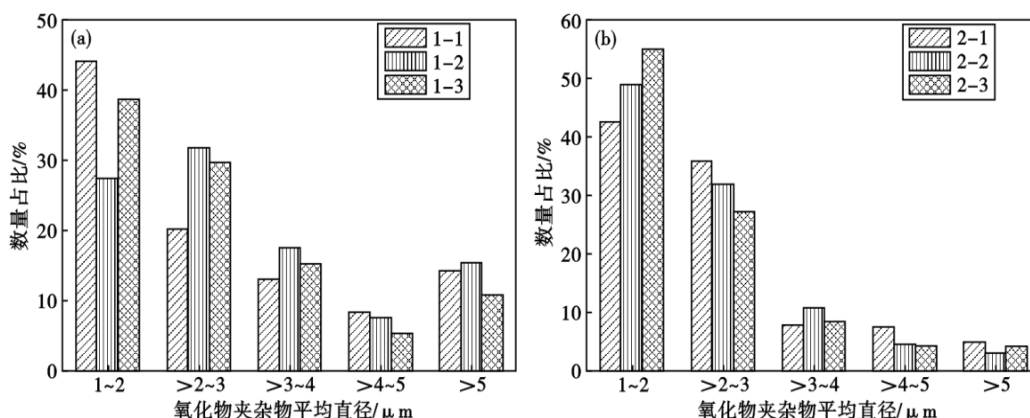


图7 电渣锭中不同尺寸氧化物夹杂数量占比:(a) 1号电渣锭,(b) 2号电渣锭

Fig. 7 Proportion of oxide inclusions of different sizes in the two electroslag ingots: (a) 1# electroslag ingot, (b) 2# electroslag ingot

参考文献

- [1] 何维,朱骅,刘宇钢,等. 超超临界发电技术展望[J]. 能源与环保, 2019, 41(6): 77-81.
- [2] 邢娜,黄宝,何立波. 超临界超超临界锅炉管品种的开发现状[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 17-21.
- [3] 陈正宗,刘正东,董陈,等. C-HRA-3耐热合金 850 ℃持久性能及组织特征[J]. 金属热处理, 2020, 45(1): 135-139.
- [4] 陈正宗,刘正东,包汉生,等. C-HRA-3耐热合金奥氏体晶粒长大动力学[J]. 钢铁, 2017, 52(7): 64-67.
- [5] 刘正东,陈正宗,何西扣,等. 630~700 ℃超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 539-548.
- [6] 陈希春,王飞,史成斌,等. 电渣重熔工艺对GH4169脱硫的影响[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(12): 11-16.
- [7] 刘福斌,臧喜民,姜周华,等. 导电结晶器电渣重熔中非金属夹杂物的去除[J]. 中国冶金, 2010, 20(5): 5-8.
- [8] 杨波锋,刘建华,韩志彪,等. 电渣重熔对FeCrAl不锈钢中夹杂物的影响[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(10): 19-25.
- [9] 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.
- [10] 杨浩,王方军,李采,等. 镍基高温合金的熔炼工艺研究进展[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 1-9.
- [11] 付建辉,刘庭耀,张健,等. GH3128合金“VIM+ESR”和“NVIM+ESR”冶炼过程中的脱气行为及夹杂物研究[J]. 特殊钢, 2020, 41(6): 15-19.
- [12] 李星,耿鑫,姜周华,等. 电渣重熔高温合金渣系对冶金质

量的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(9): 41-46.

[13] Duan S C, Shi X, Zhang M C, et al. Effect of Slag Composition on the Deoxidation and Desulfurization of Inconel 718 Superalloy by ESR Type Slag Without Deoxidizer Addition [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(1): 353-364.

[14] 崔利民, 王忠鑫, 罗保帅, 等. GH2132 合金 2t 电渣锭重熔工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 43-46.

[15] Radwitz S, Scholz H, Friedrich B, et al. Process and Refining Characteristics of ESR using MgO containing Slag Systems [C]. Leoben; International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, 2015.

[16] 高首磊. 新型预熔渣电渣重熔 GH3128 和 GH2132 合金的研究 [J]. 特钢技术, 2014, 20(1): 50-52.

[17] 肖爱平, 张 洲, 李德胜, 等. 电渣重熔渣系对 GCr15 轴承钢洁净度的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 34-37.

[18] 林腾昌, 杨 勇, 李龙飞, 等. 一种用于电渣重熔 C-HRA-3 合金的节电脱硫渣系及其使用方法: 2023105851254 [P]. 2023-5-23.

[19] 张 平, 马文会, 张士举, 等. TiO₂-Ti₂O₃-FeO 三元渣系黏流特性热力学模拟[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1876-1882.

[20] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 46-47.

[21] 梁连科, 杨 怀. 电渣重熔用渣的物理化学及其应用译文集 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1989: 84-88.

[22] 董艳伍, 姜周华, 李花兵. 电渣冶金用含氟渣系电导率计算方法[J]. 材料与冶金学报. 2012, 11(4): 274-277.

[23] 李正邦, 张家雯, 车向前. 电渣重熔钢中非金属夹杂物含量及成分的控制[J]. 钢铁研究学报. 1997, 9(2): 7-12.

[24] 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): 526-530.

[25] 郝 剑, 刘 芳, 杨树林, 等. 熔速对氩气保护 GH4169G 合金电渣锭组织及夹杂物的影响[J]. 材料研究学报. 2022, 36(11): 811-820.

[26] Wang Q, Wang R T, He Z, et al. Numerical analysis of inclusion motion behavior in electroslag remelting process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 1333-1344.

关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》期刊由中信泰富特钢集团股份有限公司主管、大冶特殊钢有限公司主办,由《特殊钢》编辑部负责运营,是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物(双月刊);《特殊钢》期刊于1980年创刊发行,国际标准刊号为ISSN1003-8620,国内统一刊号为CN42-1243/TF。《特殊钢》期刊的宗旨:“构建特钢共享平台,引领行业创新发展。”

编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》期刊的网页,为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的利益,本编辑部郑重声明如下:

(一) www.specialsteeljournal.com 为《特殊钢》期刊的唯一网址,备案号为鄂 ICP 备 2022000839 号,请广大作者、读者使用本网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作。

(二) 除维普、万方、知网、超星为本社授权合作网站,具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权,其余网站皆未经本编辑部授权,无权从事相关内容的刊登、收费阅读,承揽稿件,承接广告等行为,请广大作者、读者提高警惕,注意甄别,谨防受骗,由此造成的一切损失和后果,本编辑部不承担任何经济和法律责任;同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。

(三) 未经授权网站请于2023年11月30日前自行将与《特殊钢》期刊相关的内容撤除,逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人,本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权,必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部