



电渣重熔过程中渣系对NiCrMoV合金钢 电渣锭洁净度的影响

李健¹, 凌海涛², 柴锋¹, 罗小兵¹, 常立忠²

(1 钢铁研究总院工程用钢研究所, 北京 100081; 2 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243002)

摘要:针对NiCrMoV合金钢电渣重熔过程中Ti元素的烧损严重问题,通过实验室实验和热力学计算研究了不同渣系对电渣锭化学成分及夹杂物数量、成分和尺寸分布的影响规律。结果表明,电渣重熔后电渣锭中总氧含量明显增加,由自耗电电极的 15.1×10^{-6} 增加至 $(31.3 \sim 42.1) \times 10^{-6}$,夹杂物数密度增加至 $6.54 \sim 15.95$ 个/ mm^2 ,而氮含量变化不大;采用渣系70%CaF₂-30%Al₂O₃和55%CaF₂-25%Al₂O₃-17%CaO-3%MgO时,电渣锭中Ti元素的烧损严重,夹杂物以Al₂O₃为主,渣相中添加一定量的TiO₂能较好地控制重熔后Ti的烧损,夹杂物类型主要由Al₂O₃、Al₂O₃-CaO-TiO₂、其他氧化物夹杂组成,且夹杂物中TiO₂含量明显增加;通过热力学计算,揭示了渣相中添加TiO₂对稳定电渣锭中Ti元素含量的作用机理;综合考虑重熔后电渣锭的洁净度水平,确定了合适的电渣重熔渣相成分(50%CaF₂-25%Al₂O₃-17%CaO-3%MgO-5%TiO₂)。

关键词: NiCrMoV合金钢; 电渣重熔; 渣系; 洁净度; 热力学计算

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00014 **中图分类号:** TF744

Effect of Slag System on the Cleanliness of Electroslag Ingots during Electroslag Remelting of NiCrMoV Alloy Steel

Li Jian¹, Ling Haitao², Chai Feng¹, Luo Xiaobing¹, Chang Lizhong²

(1 Division of Engineering Steel, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2 School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: In order to control the serious loss of Ti element during electroslag remelting of NiCrMoV alloy steel, the effect law of different slag systems on the chemical composition of ESR ingot, the number, composition, and size distribution of inclusions in electroslag ingots were investigated through laboratory experiments and thermodynamic calculation. The results showed that the content of total oxygen in ESR ingots obviously increased after electroslag remelting and it was increased from 15.1×10^{-6} in consumable electrode to $(31.3-42.1) \times 10^{-6}$ in ESR ingots. The number density of inclusions was increased to $6.54-15.95$ PCS/ mm^2 . However, the content of nitrogen was almost unchanged. When the slag systems 70%CaF₂-30%Al₂O₃ and 55%CaF₂-25%Al₂O₃-17%CaO-3%MgO were adopted, the Ti loss in ESR ingots became serious and the inclusions were mainly Al₂O₃. Furthermore, the Ti loss in ESR ingots could be controlled when a certain amount of TiO₂ was added to the slag. The types of inclusions were mainly composed of Al₂O₃, Al₂O₃-CaO-TiO₂, and other oxides. The content of TiO₂ in inclusions was obviously increased. Besides, the mechanism of stabilizing Ti content in ESR ingots by adding TiO₂ to the slag was revealed through thermodynamic calculation. Based on the cleanliness of ESR ingots after electroslag remelting, the composition of the appropriate slag system (50%CaF₂-25%Al₂O₃-17%CaO-3%MgO-5%TiO₂) was determined.

Key Words: NiCrMoV Alloy Steel; Electroslag Remelting (ESR); Slag System; Cleanliness; Thermodynamic Calculation

电渣重熔具有改善钢材洁净度和控制凝固组织等功能,已广泛应用于航空航天、能源和工具钢等领域^[1-2]。在电渣重熔过程中,电流经过渣池在渣池内产生大量的焦耳热,渣池温度升高,为各类物理化学反应的进行提供了良好的热力学条件。当自耗电极端部达到其熔化温度时形成金属熔滴,熔

滴在穿过渣池区域时,渣的化学特性可有效去除金属熔滴中非金属夹杂物。在结晶器侧壁强制水冷作用下,金属熔池由下而上逐渐凝固。

电渣重熔过程中渣系的选择对电渣锭的冶金质量、熔炼技术指标等具有重要影响^[3-5]。常用的渣系以CaF₂为基础,通过添加适量的Al₂O₃、CaO、MgO、

基金项目: 国家自然科学基金(52274312),安徽省高校自然科学基金项目(KJ2021A0396)

作者简介: 李健(1985-),男,博士,高级工程师; **E-mail:** shmilylijian@163.com; **收稿日期:** 2023-02-09

通讯作者: 凌海涛(1989-),男,博士,副教授; **E-mail:** linghaitao@ahut.edu.cn

TiO₂等,调整熔渣的熔点、黏度、电导率等物性参数,从而实现对重熔过程中电耗、流动性和精炼效果的控制^[6-7]。基于传统的3:7渣,董艳伍^[8]设计了冷轧辊钢电渣重熔用新渣系,结果表明,采用新渣系大幅降低了电耗,显著提高了电渣锭的探伤合格率。沈中敏等^[9]结合热力学计算,提出了GH4706合金电渣重熔过程中控制Al、Ti元素烧损的渣系成分,并开展了工业实验验证。巨建涛^[10]、刘福斌等^[11]也开展了类似的研究工作。常凯华等^[12]研究了不同渣系和不同气氛下GCr15轴承钢电渣重熔过程,指出在氩气保护下采用CaF₂-CaO渣系重熔的电渣锭中增氧量最低,钢中夹杂物尺寸显著降低,并进一步探讨了钢中氧含量增加机理。赵博等^[13]采用共存理论计算了曲轴钢中CaO-CaF₂-SiO₂-Al₂O₃四元渣系组分的活度,通过对比分析炉渣的熔点、黏度、表面张力以及夹杂物类型等,得出SiO₂含量为6%时能够显著提升炉渣的综合性能。王洪涛等^[14]研究了不同渣系对H13热作模具钢的影响,通过在CaF₂-Al₂O₃-CaO三元渣系的基础上加入3%MgO和5%SiO₂能够有效提高钢的组织性能、表面质量和降低电耗。李宝宽等^[15]综述了现代电渣重熔先进技术特征与演进,指出为了满足不同金属合金种类和冶炼工艺要求,需要综合考虑熔渣各项物理化学性质,选择最为合理的渣系配置。

NiCrMoV合金钢在电渣重熔过程中常常存在Ti元素的烧损问题。为此,通过实验研究不同渣系对电渣锭中元素含量的影响,分析渣系变化对电渣锭中夹杂物数量、成分和尺寸分布的影响,结合热力学计算,揭示电渣重熔过程中渣-金反应作用机理,为实际生产合金钢在电渣重熔过程中渣系的选择提供理论依据。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料及设备

电渣重熔炉示意图如图1所示,实验用主体设备为小型单相单极电渣炉。其中,结晶器为直径100 mm、高度250 mm的固定式水冷铜制结晶器,自耗电极直径为50 mm,直径填充比为0.5,重熔过程中电压可控制范围为28~40 V,最大电流不超过2 500 A,通过自耗电极的上下移动来调整电流。实验所用自耗电极为锻造成Φ50 mm的NiCrMoV合金钢圆棒,该钢种典型化学成分见表1。

1.2 实验方法

实验前使用车床车削去除电极表面的氧化铁

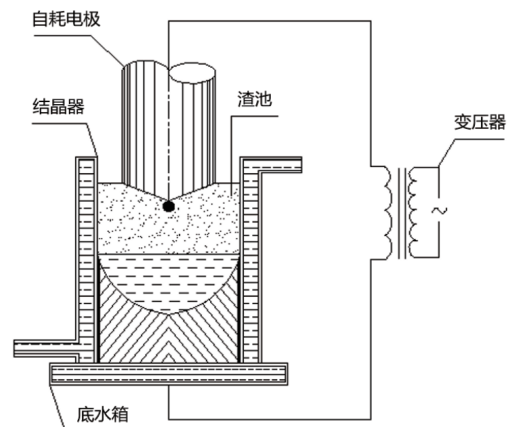


图1 电渣重熔炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electroslag remelting (ESR) furnace

表1 自耗电极NiCrMoV钢化学成分(质量分数)

											%
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Als	
0.080	0.33	0.62	0.002	0.002	7.46	0.50	0.65	0.090	0.018	0.039	

皮,再用砂纸进行打磨,避免氧化铁皮带入对钢中氧含量的影响。实验过程采用热启动,将渣相按照表2中配比混匀,放置在石墨坩埚中,渣相总量约为1.2 kg,然后将石墨坩埚放置于高温管式炉中加热,加热至1 650 °C时进行保温,保证渣相完全熔化。待渣相完全熔化后,迅速倒入结晶器内,自耗电极下降,通入电流开始进行电渣重熔,重熔过程在大气条件下进行且未添加任何脱氧剂。重熔过程中保持电压为34 V,电流为1 400~1 600 A,重熔时间为22~24 min。表2中渣系S1为传统的30%Al₂O₃-70%CaF₂渣系,渣系S2中添加了CaO和少量的MgO,进一步地,渣系S3和S4中添加了TiO₂组分,以期控制重熔过程钢中Ti元素的烧损。

表2 不同渣系成分

实验渣系	渣成分/%					电压/V	电流/A	重熔时间/min
	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂			
1 S1	70	30	-	-	-	34	1 400~1 600	22
2 S2	55	25	17	3	-	34	1 400~1 600	24
3 S3	50	25	17	3	5	34	1 400~1 600	23
4 S4	45	25	17	3	10	34	1 400~1 600	22

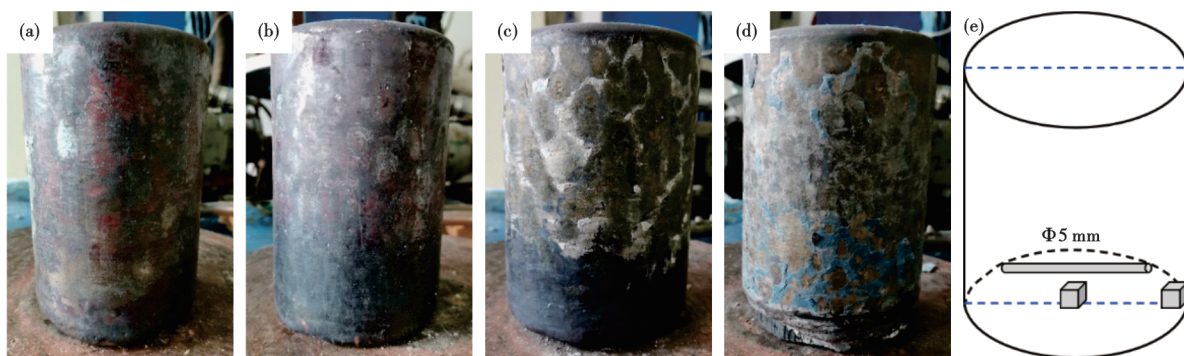


图2 实验后电渣锭及取样:(a) 实验1,(b) 实验2,(c) 实验3,(d) 实验4,(e) 取样

Fig. 2 ESR ingots and taking samples after experiments : (a) Experiment 1, (b) Experiment 2, (c) Experiment 3, (d) Experiment 4, (e) Sample

实验后电渣锭及取样如图2所示。在距离电渣锭底部30 mm处分别取直径为5 mm的氧氮棒和金相样,金相样尺寸为15 mm×15 mm×15 mm,同时取高度为15 mm的1/4半圆试样,采用氧氮氢分析仪检测分析钢中氧氮含量,采用火花直读光谱仪(德国OBLF)检测分析钢中典型元素含量。金相样经磨样和抛光处理后,采用SEM-EDS扫描电镜进行能谱分析,同时采用ASPEX自动扫描电镜检测分析钢中2 μm以上夹杂物数量、成分和尺寸,每个试样对应的扫描面积和夹杂物数量统计见表3。

表3 试样ASPEX检测分析
Table 3 ASPEX analysis of steel samples

试样	ASPEX扫描面积/mm ²	夹杂物数量/个
自耗电极	51.8	266
D1	51.8	826
D2	51.8	589
D3	51.8	339
D4	51.8	460

2 实验结果与讨论

2.1 钢中元素含量变化

表4显示了实验后电渣锭中典型元素含量的变化。与自耗电极相比,电渣锭中酸溶铝(Als)含量存

在不同程度的降低,其降低幅度为0.006%~0.019%;实验1和实验2下电渣锭中Ti元素的烧损严重,其含量由0.018%降低至0.003%~0.004%,而实验3和4下渣相中加入了不同含量的TiO₂,较好地控制了重熔过程电渣锭中Ti的烧损,同时Si元素的含量降低较为明显,其含量由0.33%降低至0.16%~0.17%,其他元素的含量变化不大。

自耗电极及电渣锭中氧氮含量的变化如图3所示。由图3可知,自耗电极中总氧含量较低,仅为15.1×10⁻⁶,采用四组渣系重熔后,总氧含量均升高。实验3下电渣锭中总氧含量增加至31.3×10⁻⁶,采用其他渣系重熔时,电渣锭中总氧含量进一步增加,其值范围为(36.1~42.1)×10⁻⁶。渣系变化对重熔后电渣锭中氮含量的影响不大。

2.2 夹杂物数密度及尺寸变化

自耗电极及电渣锭中夹杂物数密度的变化如图4所示。其中,夹杂物数密度定义为采用ASPEX扫描得到的夹杂物数量除以试样的扫描面积(见表3)。由图4可知,夹杂物数密度的变化与图3中总氧含量的变化规律一致。自耗电极中夹杂物数密度较低,仅为5.14个/mm²,采用不同渣系电渣重熔后,夹杂物数密度明显增加。实验3下电渣锭中夹杂物数密度为6.54个/mm²,采用其他渣系重熔时,夹杂物

表4 实验后电渣锭化学成分(质量分数)
Table 4 Chemical composition of ESR ingots after experiments

试样	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Als
自耗电极	0.080	0.33	0.62	0.002	0.002	7.46	0.50	0.65	0.090	0.018	0.039
D1	0.091	0.27	0.62	0.003	0.002	8.00	0.58	0.65	0.090	0.003	0.023
D2	0.092	0.21	0.64	0.003	0.002	8.07	0.51	0.65	0.092	0.004	0.033
D3	0.093	0.17	0.67	0.003	0.002	8.03	0.58	0.65	0.092	0.020	0.021
D4	0.091	0.16	0.62	0.003	0.002	8.06	0.58	0.65	0.090	0.028	0.020

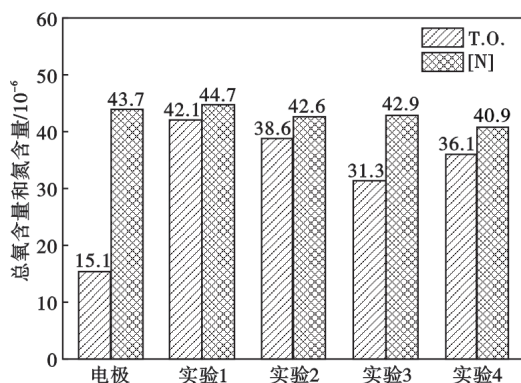


图3 自耗电极及电渣锭中氧氮含量变化

Fig. 3 Variations of oxygen and nitrogen content in consumable electrode and ESR ingots

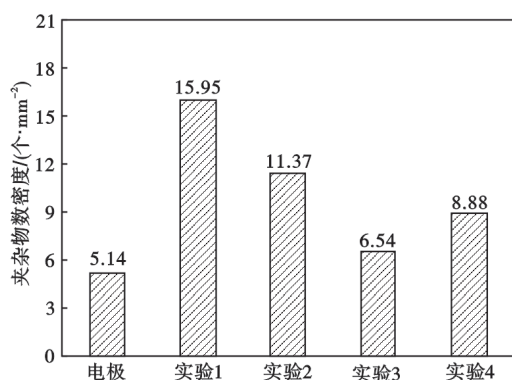


图4 自耗电极及电渣锭中夹杂物数密度变化

Fig. 4 Variation of number density of inclusions in the consumable electrode and ESR ingots

数密度进一步增加至 8.88 ~ 15.95 个/mm²。

钢的质量和性能不仅与夹杂物数密度有关,也与其尺寸密切相关,特别是大尺寸夹杂物。自耗电极及电渣锭中不同尺寸范围夹杂物的数量分布如图 5 所示,试样的扫描面积均为 51.8 mm²。自耗电极中夹杂物尺寸以 ≤10 μm 为主,共有 260 个,占总夹杂物数量的 97.7%,但尺寸 >10 μm 的夹杂物仍有 6 个,最大直径为 18.3 μm。采用四组渣系重熔后,电渣锭中夹杂物尺寸仍以 ≤10 μm 为主,>10 μm 的夹杂物较少或没有,其最大直径均减小,依次为 14.9、7.6、6.8、13.2 μm。研究表明^[16-19],电渣重熔过程自耗电极中的夹杂物可被渣液吸收去除,重熔后电渣锭中的夹杂物多为凝固过程析出生成,对应的夹杂物尺寸减小。

2.3 夹杂物类型及含量变化

表 5 显示了自耗电极中夹杂物类型及比例。由表 5 可知,夹杂物成分主要由 MgO·Al₂O₃、MgO-Al₂O₃-TiO₂、MgO-Al₂O₃-CaO-CaS、MgO-Al₂O₃-CaO-

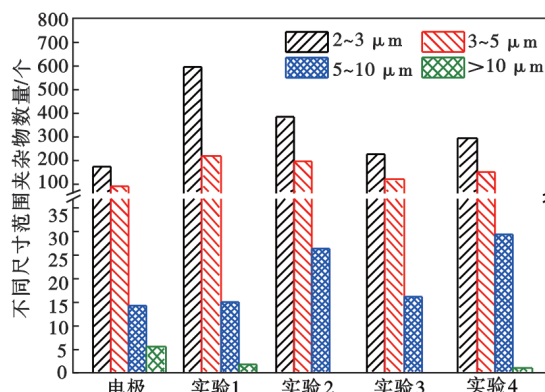


图5 自耗电极及电渣锭中不同尺寸范围夹杂物数量

Fig. 5 Number of inclusions with different size range in the consumable electrode and ESR ingots

表 5 自耗电极中夹杂物类型及比例

Table 5 Types and percentage of inclusions in consumable electrode

类型	比例/%
MgO-Al ₂ O ₃ -CaO-CaS-TiO ₂	56.8
MgO-Al ₂ O ₃ -CaO-CaS	26.3
MgO-Al ₂ O ₃ -TiO ₂	10.5
MgO·Al ₂ O ₃	6.4

CaS-TiO₂ 四类组成。其中, MgO·Al₂O₃ 含量最少, MgO-Al₂O₃-CaO-CaS-TiO₂ 含量最多, 上述四类夹杂物所占比例依次为 6.4%、10.5%、26.3%、56.8%。

重熔后电渣锭中夹杂物成分分布如图 6 所示。实验 1 下电渣锭中夹杂物成分以 Al₂O₃ 为主, 部分含 CaO、MgO 和 TiO₂, 实验 2 下的结果与实验 1 结果类似, 夹杂物典型形貌见图 7(a), (b) 所示; 实验 4 下电渣锭中夹杂物成分仍以 Al₂O₃ 为主, 且 TiO₂ 含量明显增加, CaO 含量略有增加, 实验 3 下的结果与实验 4 结果类似, 夹杂物典型形貌如图 7(c), (d) 所示。实验后电渣锭中典型夹杂物面扫描结果如图 8 所示。

重熔后夹杂物中基本不含 CaS, 其成分主要为 Al₂O₃-CaO-TiO₂-(MgO)。按照如下规则对夹杂物类型进行划分: (1) w(Al₂O₃) > 85% 定义为 Al₂O₃; (2) w(Al₂O₃) < 85%, w(Al₂O₃+CaO+TiO₂) > 85%、w(CaO+TiO₂) > 10% 定义为 Al₂O₃-CaO-TiO₂; 以及其他类型氧化物夹杂。各个类型夹杂物所占比例如图 9 所示。实验 1 和实验 2 下, 夹杂物均以 Al₂O₃ 为主, 所占比例大于 75%, 分别为 90.3%、77.2%。其中, 渣系 S2 中添加了 17%CaO, 夹杂物中 Al₂O₃-CaO-TiO₂ 占比增加至 13.7%。实验 3 和实验 4 下, 电渣锭中 Ti 元素的烧损得到控制(见表 4), 此时夹杂物中 Al₂O₃-CaO-TiO₂ 占比分别增加至 40.1%、35.4%, Al₂O₃ 占比分别降低

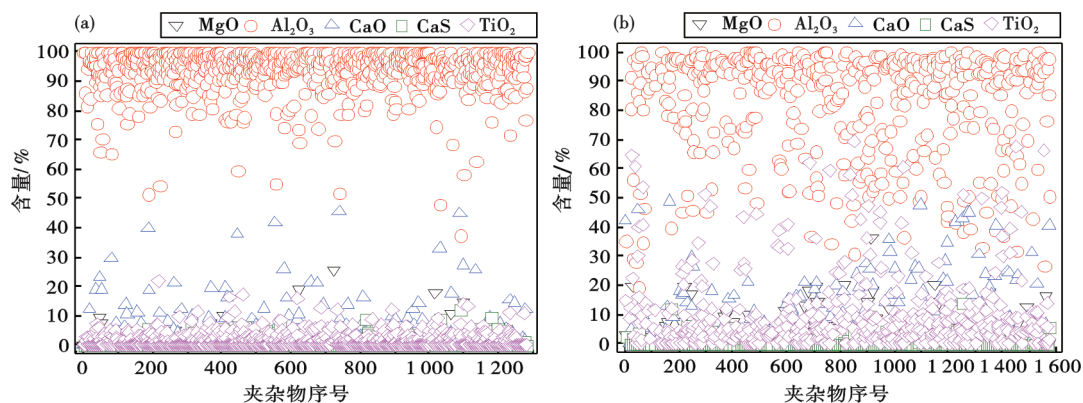


图 6 电渣锭中夹杂物成分分布:(a) 实验 1,(b) 实验 4

Fig. 6 Composition distribution of inclusions in ESR ingots : (a) Experiment 1, (b) Experiment 4

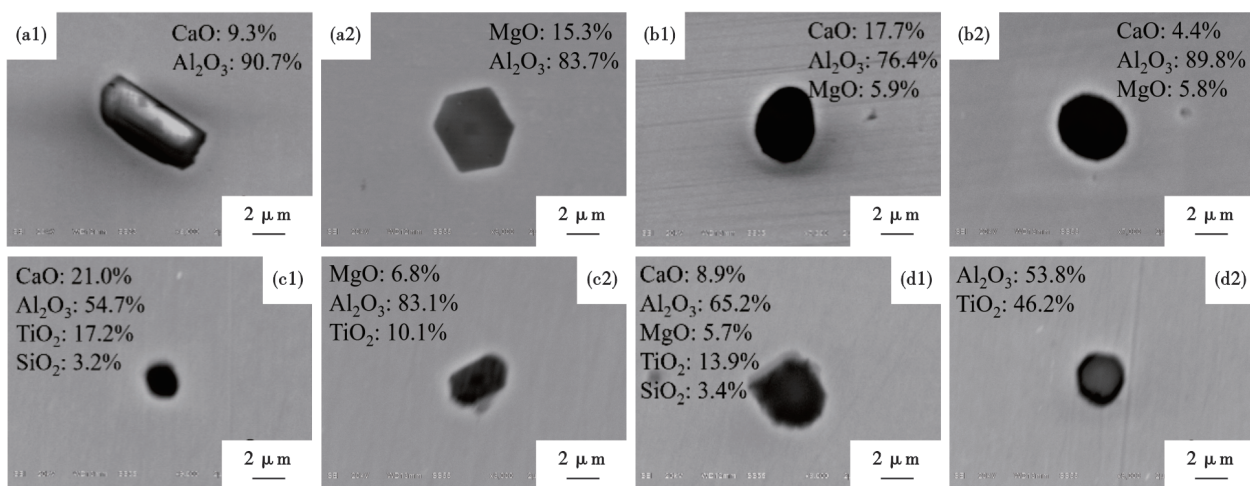


图 7 实验后电渣锭中典型夹杂物成分和形貌:(a) 实验 1,(b) 实验 2,(c) 实验 3,(d) 实验 4

Fig. 7 Composition and morphology of typical inclusions in ESR ingots after experiments : (a) Experiment 1, (b) Experiment 2, (c) Experiment 3, (d) Experiment 4

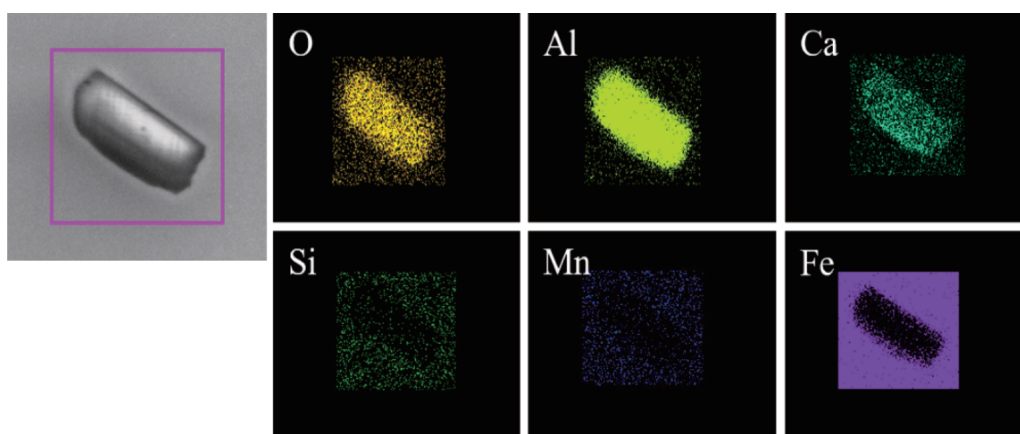


图 8 实验后电渣锭中典型夹杂物面扫描分布

Fig. 8 Element mapping of typical inclusions in ESR ingots after experiments

至 51%、57.6%。进一步分析夹杂物平均成分的变化如图 10 所示,实验 1 和实验 2 下,夹杂物平均成分略有变化;而实验 3 和实验 4 下,夹杂物平均成分中

TiO₂ 含量显著增加至 10.9%、9.8%,对应的 Al₂O₃ 含量降低。

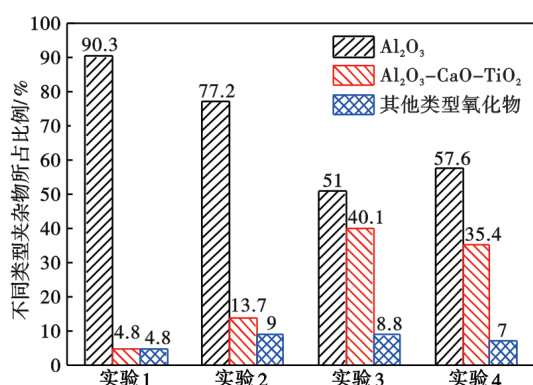


图 9 实验后电渣锭中不同类型夹杂物所占比例

Fig. 9 Percentage of different types of inclusions in ESR ingots after experiments

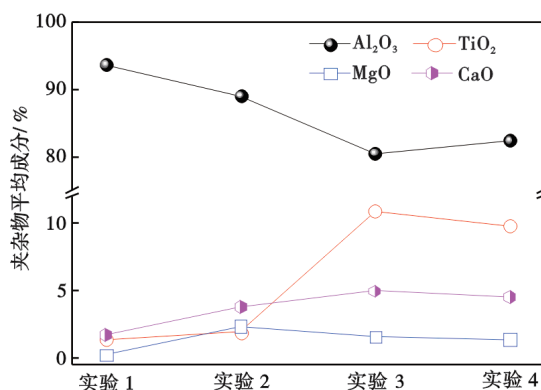


图 10 实验后电渣锭中夹杂物平均成分变化

Fig. 10 Variation of average composition of inclusions in ESR ingots after experiments

2.4 热力学计算及分析

对于重熔后电渣锭中总氧含量的增加,其原因主要为:(1)重熔过程中二次氧化的影响。由表 4 可知,与自耗电极相比,采用渣系 S2 时电渣锭(D2)中 Al_s 含量的降低幅度为 0.006%,采用其他三组渣系时电渣锭中 Al_s 含量降低 40% 以上。同时,重熔实验是在大气条件下进行,渣池表面附近电极受到渣池辐射的影响,温度较高,常存在一定程度的氧化,使得重熔过程中钢液增氧;(2)电渣重熔过程中由于渣池温度较高,渣相中氧化物组分(如 Al₂O₃ 等)会发生分解,进而引起钢中氧含量增加^[20-21]。由表 2 可知,四组渣系中含有 25%~30% Al₂O₃,高温渣池使其变得不稳定,使得钢中氧含量增加。

采用不同的渣系时,重熔后电渣锭中 Al_s、Ti 元素含量发生了较大的变化,进而影响夹杂物成分。为此,对熔渣与金属元素之间反应的可能性进行详细讨论。研究表明^[22],电渣重熔过程中渣池的温度

为 1 800 °C 左右。采用 FactSage 7.2 Equilib 模块,选择 FToxid 数据库,分别计算渣系 S3 和 S4 中 Al₂O₃、TiO₂ 组分的活度,结果见表 6。提高渣相中 TiO₂ 含量时,其活度增加,同时提高了渣相中 Al₂O₃ 组分的活度。

表 6 不同渣系中 Al₂O₃ 和 TiO₂ 各组元的活度

Table 6 Activities of Al₂O₃ and TiO₂ under different slag systems

渣系	$a_{(Al_2O_3)}$	$a_{(TiO_2)}$
S3	0.084	0.0048
S4	0.118	0.0180

对于 TiO₂、Al₂O₃ 的生成,对应的反应表达式为^[23-24]:

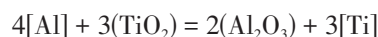


$$\Delta G_{[1]}^0 = -659\,880 + 229T \quad (1)$$



$$\Delta G_{[2]}^0 = -1\,205\,115 + 386.7T \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得:



$$\Delta G_{[3]}^0 = -430\,590 + 86.4T \quad (3)$$

式中: $\Delta G_{[1]}^0$ 、 $\Delta G_{[2]}^0$ 、 $\Delta G_{[3]}^0$ 分别为反应(1)、(2)、(3)式标准吉布斯自由能(J/mol); T 为温度(K)。

对于反应式(3),其吉布斯自由能变化为:

$$\Delta G = -430\,590 + 86.4T + RT \ln \frac{a_{(Al_2O_3)}^2 \cdot a_{[Ti]}^3}{a_{(TiO_2)}^3 \cdot a_{[Al]}^4} \quad (4)$$

式中: $a_{(Al_2O_3)}$ 、 $a_{(TiO_2)}$ 分别为渣相中 Al₂O₃、TiO₂ 的活度; $a_{[Ti]}$ 、 $a_{[Al]}$ 分别为钢液中 Ti、Al 元素的活度,对应的计算表达式为:

$$a_{[i]} = f_{[i]} \cdot [\%i] \quad (5)$$

$$\lg f_{[i]} = \sum_{j=1}^n e'_i \cdot [\%j] \quad (6)$$

式中: $f_{[i]}$ 为活度系数; e'_i 为钢液中元素 i 与 j 之间的相互作用系数; $[\%i]$ 、 $[\%j]$ 分别为钢液中元素 i 、 j 的质量分数。钢液中不同元素间的相互作用系数见表 7^[24-26]。

结合表 4、表 6 和表 7,计算得到 1 800 °C 下反应式(3)吉布斯自由能 ΔG 与渣相中 Al₂O₃、TiO₂ 活度的关系,结果如图 11 所示。当 $\lg \left(\frac{a_{(Al_2O_3)}^2}{a_{(TiO_2)}^3} \right) < 5.102$ 时,反应的 ΔG 小于 0,表明重熔过程中 Al 元素能够将渣相中的 TiO₂ 组分还原。采用渣系 S3 和 S4 时均满足上

表7 钢液中不同元素间的相互作用系数
Table 7 Interaction parameters between different elements in molten steel

e_i^j	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	Al	O	N
Ti	-0.19	-0.025	-0.043	-0.0064	-0.11	0.009	0.028	0.042	0.024	-1.62	-1.8
Al	0.091	0.056	0.035	0.033	0.03	0.008	0.03	0.016	0.043	-1.98	-0.058
O	-0.45	-0.066	-0.037	0.07	-0.133	0.006	-0.032	-0.54	-1.17	-0.17	0.057

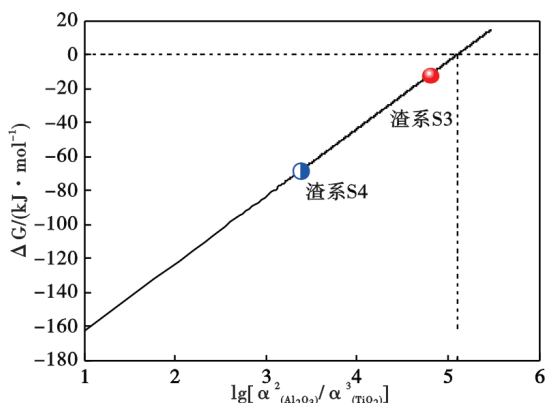


图11 反应(3)吉布斯自由能 ΔG 与渣相中 Al_2O_3 、 TiO_2 活度的关系

Fig. 11 The relationship between Gibbs free energy ΔG of reaction (3) and the activities of Al_2O_3 and TiO_2 in slag system

述条件,随着渣相中 TiO_2 含量增加,反应的 ΔG 减小,有利于反应的进行。因此,采用渣系S3和S4条件下电渣锭中Ti元素的烧损得到了较好的控制;与渣系S3相比,采用渣系S4时,进一步提高了重熔后电渣锭中Ti元素的含量。

电渣重熔过程中,自耗电极端部金属熔滴穿过渣池进入金属熔池内,在此过程中熔滴内的夹杂物一部分会被渣相吸附去除,另一部分会发生分解进入金属熔池。随着温度降低,在随后的凝固过程中

金属熔池内的 $[\text{Al}]$ 、 $[\text{Ti}]$ 等典型元素与 $[\text{O}]$ 反应重新生成氧化物夹杂,其类型不同于自耗电极端中夹杂物成分,尺寸也相对减小。

3 结论

(1)与自耗电极端相比,采用不同渣系电渣重熔后,电渣锭中总氧含量明显增加,其值为 $(31.3 \sim 42.1) \times 10^{-6}$,夹杂物数密度增加至 $6.54 \sim 15.95$ 个/ mm^2 ,而对钢中氮含量的影响不大。

(2)采用渣系70% CaF_2 -30% Al_2O_3 和55% CaF_2 -25% Al_2O_3 -17% CaO -3% MgO 时,重熔后电渣锭中Ti元素的烧损严重,夹杂物成分以 Al_2O_3 为主,渣相中加入一定量的 TiO_2 能够较好地控制重熔后Ti的烧损,夹杂物类型主要由 Al_2O_3 、 Al_2O_3 - CaO - TiO_2 、其他氧化物夹杂组成,且夹杂物中 TiO_2 含量明显增加。

(3)渣相中增加 TiO_2 含量有利于提高 Al_2O_3 、 TiO_2 组分的活度,促进Al还原 TiO_2 反应过程,进而控制重熔后电渣锭中Ti的烧损,重熔后总氧含量增加的原因主要是空气氧化以及渣相中不稳定氧化物分解所致。

(4)综合考虑重熔后电渣锭洁净度水平的变化,适用于NiCrMoV合金钢电渣重熔过程最优的渣系为50% CaF_2 -25% Al_2O_3 -17% CaO -3% MgO -5% TiO_2 。

参考文献

- [1] Kharicha A, Karimi-Sibaki E, Wu M H, et al. Review on modeling and simulation of electroslag remelting [J]. Steel Res. Int., 2018, 89(1): 1-20.
- [2] 肖志霞,李海鹏,冯建航,等.电渣重熔M2高速钢铸锭的组织均匀性[J].钢铁研究学报,2018,30(7):529-535.
- [3] 朱健,周文健,张志豪,等.稀土渣系电渣重熔H13钢铸锭的成分、组织及夹杂物特征[J].钢铁研究学报,2021,33(9):966-978.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 师帅,耿鑫,姜周华,等. TiO_2 含量对于 CaF_2 - Al_2O_3 - CaO - MgO - TiO_2 五元电渣重熔渣系物性参数的影响[J].工程科学学报,2018,40(S1):47-52.
- [7] 赵忠宇,赵俊学,谭泽馨,等.升温速率与预熔过程对含氟渣熔点影响分析[J].钢铁,2020,55(6):123-128.
- [8] 董艳伍.电渣重熔过程凝固数学模拟及新渣系研究[D].沈阳:东北大学,2008.
- [9] 沈中敏,郭靖,段生朝,等.GH4706大尺寸电渣锭铝钛烧损控制的热力学模型[J].钢铁研究学报,2021,33(9):901-910.
- [10] 巨建涛,杨康帅,棘广恒,等.Incoloy 825合金电渣重熔低氟渣系设计的热力学研究[J].工程科学学报,2020,42(S1):119-127.
- [11] 刘福斌,张海宝,高俊哲,等.电渣重熔Inconel 625合金铝钛氧化的热力学分析[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(5):652-659.
- [12] 常凯华,徐涛,朱春丽,等.电渣重熔对GCr15轴承钢中氧含量及夹杂物的影响[J].钢铁钒钛,2021,42(4):175-181.
- [13] 赵博,乔通,吴伟,等.曲轴钢 CaO - CaF_2 - SiO_2 - Al_2O_3 四

元渣系组分活度的热力学计算[J]. 中国冶金, 2022, 32(5): 49-57.

[14] 王洪涛, 韩毅华, 曹立军, 等. H13热作模具钢电渣重熔渣系优化[J]. 钢铁, 2022, 57(8): 111-122.

[15] 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.

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

[17] 张 钊, 刘 昱, 李光强, 等. 70CaF₂-30Al₂O₃渣系电渣重熔Cr13Mn4Mo不锈钢中夹杂物的演变[J]. 特殊钢, 2017, 38(6): 6-10.

[18] 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.

[19] 徐 涛, 王 鹏, 周鹏程, 等. 17-7PH沉淀硬化不锈钢电渣重熔过程洁净度的变化[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 68-73.

[20] Chang L Z, Shi X F, Cong J Q. Study on mechanism of oxygen increase and countermeasure to control oxygen content during electroslag remelting process [J]. Ironmak. Steelmak. , 2014, 41(3): 182-186.

[21] Schneider R S E, Molnar M, Klösch G, et al. Effect of the Al₂O₃ content in the slag on the chemical reactions and nonmetallic inclusions during electroslag remelting [J]. Metall. Mater. Trans. B, 2020, 51(5): 1904-1911.

[22] 常立忠, 杨海森, 李正邦. 电渣重熔过程中的氧行为研究[J]. 炼钢, 2010, 26(5): 46-50.

[23] Park J H, Lee S B, Kim D S, et al. Thermodynamics of titanium oxide in CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO_{satd}-CaF₂ slag equilibrated with Fe-11 mass%Cr melt [J]. ISIJ Int. , 2009, 49(3): 337-342.

[24] Shi C B, Yu W T, Wang H, et al. Simultaneous modification of alumina and MgO·Al₂O₃ inclusions by calcium treatment during electroslag remelting of stainless tool steel [J]. Metall. Mater. Trans. B, 2017, 48(1): 146-161.

[25] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.

[26] Park J H, Lee S B, Gaye H R. Thermodynamics of the formation of MgO-Al₂O₃-TiO_x inclusions in Ti-stabilized 11Cr ferritic stainless steel [J]. Metall. Mater. Trans. B, 2008, 39(6): 853-861.

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9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