



电渣重熔渣系对高品质耐蚀模具钢 FS136 中夹杂物的影响

张 勇, 孙常亮, 刘宝石, 白宪超, 康 湑, 刘 明, 王海江

(抚顺特殊钢股份有限公司, 抚顺 113000)

摘 要:采用两组不同渣系对耐蚀模具钢 FS136 进行电渣重熔对比试验, 取样分析化学成分和非金属夹杂物来研究电渣重熔渣系对耐蚀模具钢 FS136 中夹杂物的影响。在试验条件相同的情况下, 进行试验的二元渣系($\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$)与四元渣系($\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$)对于 FS136 模具钢中元素烧损无明显差异。经金相分析和扫描电镜分析结果表明, FS136 钢中非金属夹杂物以 D 类夹杂物为主, 其构成为 Al_2O_3 类型的颗粒状夹杂物。采用四元试验渣系的 FS136 钢中该 D 类非金属夹杂物的控制达到 0.5~1.0 级, 与二元试验渣系相比, 四元试验渣系有助于提高熔渣对该 D 类非金属夹杂物的润湿、吸收与去除效果, 可进一步提升耐蚀模具钢 FS136 的纯净度。

关键词:FS136 钢; 耐蚀模具钢; 电渣重熔; D 类非金属夹杂物; 电渣重熔渣系; 烧损

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260085 **中图分类号:**TF744

Effect of Electroslag Remelting Slag Systems on Non-metallic Inclusions in High-Quality Corrosion-Resistant Die Steel FS136

Zhang Yong, Sun Changliang, Liu Baoshi, Bai Xianchao, Kang Tian,

Liu Ming, Wang Haijiang

(Fushun Special Steel Co., Ltd., Fushun 113000, China)

Abstract : Through the analysis of the chemical composition and non-metallic inclusions data of sampling experiments using two groups of different remelting slag systems to investigate the effect of electroslag remelting slag systems on non-metallic inclusion in corrosion-resistant die steel FS136, under identical experimental conditions, experiments with the binary($\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) and the quaternary($\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$) slag systems showed no significant difference in alloying element loss. Metallographic observation and SEM analysis show that the non-metallic inclusions in FS136 steel are mainly Type D inclusions consist of Al_2O_3 -based granular inclusions. In FS136 steel processed with the quaternary experimental slag system, the Type D non-metallic inclusions were controlled to a rating level of 0.5~1.0. Compared with the binary slag system, the quaternary slag system exhibited better performance in wetting, absorption, and removal. The quaternary slag system can further improve the cleanliness of corrosion-resistant die steel FS136.

Key Words : FS136 Steel; Corrosion-resistant Die Steel; Electroslag Remelting; Type D Non-metallic Inclusions; Electroslag Remelting Slag System; Burning loss

FS136 钢是抚顺特钢生产的一种高品质马氏体耐蚀模具钢, 具有良好的耐腐蚀性、耐磨性、高纯净度和优异的抛光性能。该钢广泛用于制造光学仪器、电子产品外壳等对表面质量要求高的模具。为了提升模具钢的纯净度, 一般采用电渣重熔工艺生产^[1-2]。

国外电渣重熔技术研究起步早, 在工模具钢品种的渣系设计与夹杂物控制上成果显著^[3]。国内对 FS136 这类模具钢的研究聚焦于成分优化与热处理工艺, 虽提升了钢的性能, 但在电渣重熔渣系与夹

杂物控制影响研究上存在不足。电渣重熔技术是利用大电流熔化渣料形成渣池并利用渣阻热重熔自耗电极以达到提纯目的, 经电渣重熔后的钢材组织致密、非金属夹杂物得到进一步改善^[4-6]。电渣重熔渣系及其特性对 FS136 钢中非金属夹杂物的改善至关重要, 通过对 FS136 钢进行电渣重熔渣系对比试验, 借助 SEM 扫描电镜及 EDS 等重点研究不同电渣重熔渣系对 FS136 钢中非金属夹杂物的影响。

1 试验材料及方法

1.1 母材选用

电弧炉+LF+VD冶炼的连铸电极棒,试验电极的化学成分见表1。

表1 FS136电极的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of FS136 electrode %										
C	Mn	Si	S	P	V	Ni	Cr	O	Al	
0.387	0.60	1.05	0.003	0.010	0.28	0.22	13.49	0.0024	0.01	

1.2 渣系选择

FS136电渣重熔试验渣系采用 CaF_2 (70%)- Al_2O_3 (30%)的二元预熔渣,电渣重熔试验对比渣系采用 CaF_2 (65%)- Al_2O_3 (20%)- CaO (10%)- MgO (5%)的四元预熔渣。

1.3 电渣重熔条件

试验炉台选用单支臂3 t恒熔速氩气保护气氛电渣炉冶炼。结晶器尺寸为 $\phi 610\text{ mm} \times 2\,200\text{ mm}$,电极规格为 $\phi 450\text{ mm} \times 2\,600\text{ mm}$ 。电渣锭重约为3 t,渣量130 kg。熔速设定7.0~8.0 kg/min。每种渣系试验重熔2支电渣锭,共计4支电渣锭。对电渣

重熔后的FS136电渣锭进行锻造加工,锻制成规格180 mm $\times$ 460 mm的模块扁钢。

1.4 检验方式及分析

对模块扁钢取样(对应电渣锭头、尾部位如图1所示)进行化学成分分析和金相显微镜分析。对试样的非金属夹杂物大小、数量分布进行ASPEX扫描分析并对二元试验渣系试样的非金属夹杂物的形貌和成分进行SEM+EDS扫描电镜能谱分析。

2 试验结果与分析

2.1 化学成分结果与分析

对采用二元试验渣系电渣重熔后成材取样(对应电渣锭头、尾部位)化学成分分析见表2,对采用四元试验渣系电渣重熔后成材取样(对应电渣锭头、尾部位)化学成分分析见表3,两种渣系电渣重熔后化学成分平均值情况见表4。由表2-表4可见,采用二元试验渣系和采用四元试验渣系做电渣对比试验,无论电渣锭头端(补缩端)还是尾端(起弧端)化学成分无明显烧损,成分偏差不明显,即两种试验渣系所重熔的电渣锭头、尾端成分无明显差异。均符合GB/T1299—2014的成分标准要求。

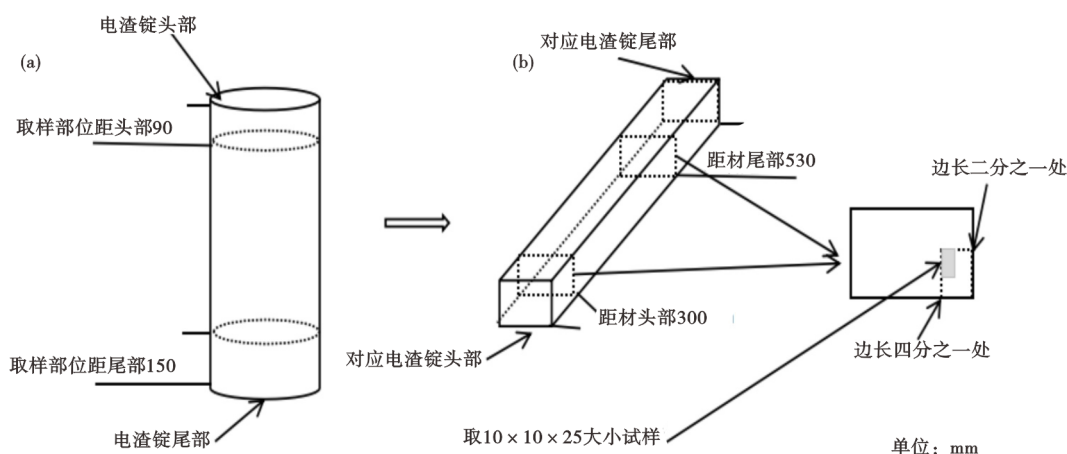


图1 (a)电渣锭取样部位及对应锻材取样部位(b)示意图

Fig. 1 Corresponding sampling location (a) and Forged specimen location (b) of ESR ingots after the experiments

表2 采用二元渣系(CaF_2 - Al_2O_3)重熔后化学成分情况(质量分数)

Table 2 Chemical composition after remelting with the binary slag system (CaF_2 - Al_2O_3)

%

取样位置	C	Mn	Si	S	P	V	Ni	Cr	O	Al
GB/T1299—2014	0.36~0.45	0.40~0.70	0.90~1.20	≤0.003	≤0.010	0.25~0.35	0.15~0.30	13.0~14.0	—	—
电极成分	0.387	0.60	1.05	0.003	0.010	0.28	0.22	13.49	0.002 4	0.01
A-1 锭头部	0.388	0.59	1.00	0.002	0.010	0.27	0.21	13.48	0.002 5	0.01
A-1 锭尾部	0.387	0.57	0.97	0.001	0.010	0.26	0.20	13.43	0.002 6	0.01
A-2 锭头部	0.387	0.58	1.02	0.003	0.009	0.27	0.22	13.42	0.002 5	0.01
A-2 锭尾部	0.386	0.58	0.99	0.002	0.010	0.27	0.21	13.45	0.002 5	0.01

表 3 采用四元渣系(CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO)电渣重熔后化学成分情况(质量分数)

Table 3	Chemical composition after remelting with the quaternary slag system (CaF ₂ -Al ₂ O ₃ -CaO-MgO)									%
取样位置	C	Mn	Si	S	P	V	Ni	Cr	O	Al
GB/T1299-2014	0.36~0.45	0.40~0.70	0.90~1.20	≤0.003	≤0.010	0.25~0.35	0.15~0.30	13.0~14.0	-	-
电极成分	0.387	0.60	1.05	0.003	0.010	0.28	0.22	13.49	0.002 4	0.01
B-1 锭头部	0.387	0.60	1.01	0.002	0.009	0.28	0.22	13.45	0.002 6	0.01
B-1 锭尾部	0.387	0.58	1.00	0.001	0.010	0.27	0.21	13.47	0.002 6	0.01
B-2 锭头部	0.385	0.59	1.03	0.002	0.010	0.27	0.22	13.48	0.002 5	0.01
B-2 锭尾部	0.386	0.59	1.00	0.002	0.010	0.27	0.22	13.48	0.002 6	0.01

表 4 两种渣系电渣重熔后化学成分平均值情况(质量分数)

Table 4	Average chemical composition after remelting with the binary and quaternary slag systems									%
取样位置	C	Mn	Si	S	P	V	Ni	Cr	O	Al
电极成分	0.387 0	0.600	1.050	0.003 0	0.010 0	0.280	0.220	13.490	0.002 40	0.01
A 锭头部平均值	0.387 5	0.585	1.010	0.002 5	0.009 5	0.270	0.215	13.450	0.002 50	0.01
B 锭头部平均值	0.386 0	0.595	1.020	0.002 0	0.009 5	0.275	0.220	13.465	0.002 55	0.01
A 锭尾部平均值	0.386 5	0.575	0.980	0.001 5	0.010 0	0.265	0.205	13.440	0.002 55	0.01
B 锭尾部平均值	0.386 5	0.585	1.000	0.001 5	0.010 0	0.270	0.215	13.475	0.002 60	0.01

2. 2 两种试验渣系电渣重熔后取样非金属夹杂物金相及 ASPEX 扫描结果与电镜能谱分析

对两种试验渣系电渣重熔后的 FS136 电渣锭进行加工,锻制成规格 180 mm×460 mm 的模块扁钢并取片,对应电渣锭头、尾部位检验情况如图 2~3 所示。非金属夹杂物评级情况见表 5。通过对两种试验渣系电渣重熔后的电渣锭加工成材并头尾取片分析结果可知,A、B、C 类非金属夹杂物无明显差异,D 类细系夹杂物差异明显。二元试验渣系电渣重熔后取样头尾 D 类细系夹杂物为 1.0~2.0 级,而四元试验渣系电渣重熔后取样头尾 D 类细系夹杂物呈 0.5~1.0 级,D 类非金属夹杂物评级水

平明显改善。

对两种渣系试验的 FS136 电渣锭进行锻造加工并对头部试样的非金属夹杂物大小及数量进行 ASPEX 扫描,夹杂物尺寸及分布见表 6,通过 ASPEX 扫描结果分析可知非金属夹杂物大小主要集中在 1~10 μm 区间内,占比超过 90%。在各区间分布中,四元试验渣系的非金属夹杂物数量明显少于二元试验渣系的非金属夹杂物数量。

对二元试验渣系 FS136 电渣锭进行锻造加工后的头部试样进行 SEM 扫描电镜分析。在视场内选取两处 D 类夹杂物,图 4 为谱图 1 夹杂物和谱图 2 夹杂物的形貌和成分能谱分析以及谱图 3 基体成分能谱分析。对以上两处夹杂物进行 EDS 分析如图 5 所示。夹杂物及基体成分的能谱分析结果见表 7。由

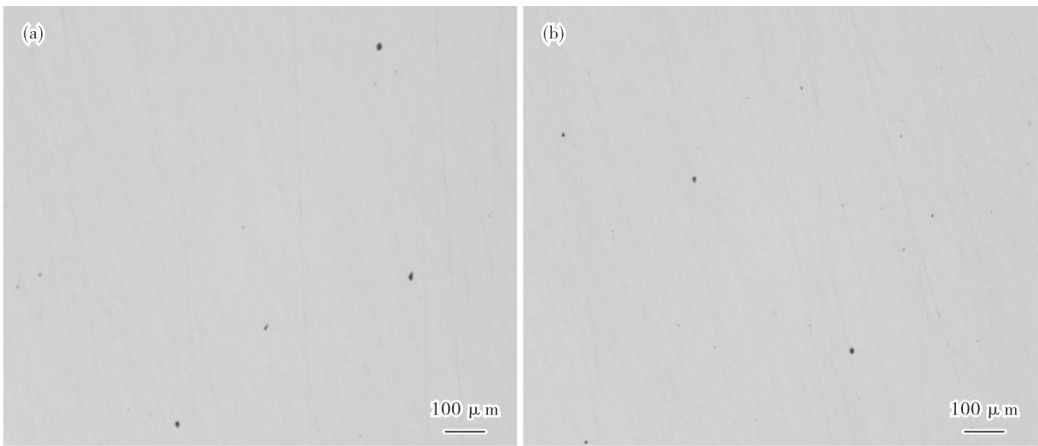


图 2 二元渣系试验后成材取样头部(a)、尾部(b)的 D 类夹杂物情况

Fig. 2 Type D non-metallic inclusions in head(a)and tail(b)of forged specimen for the binary slag system experiments

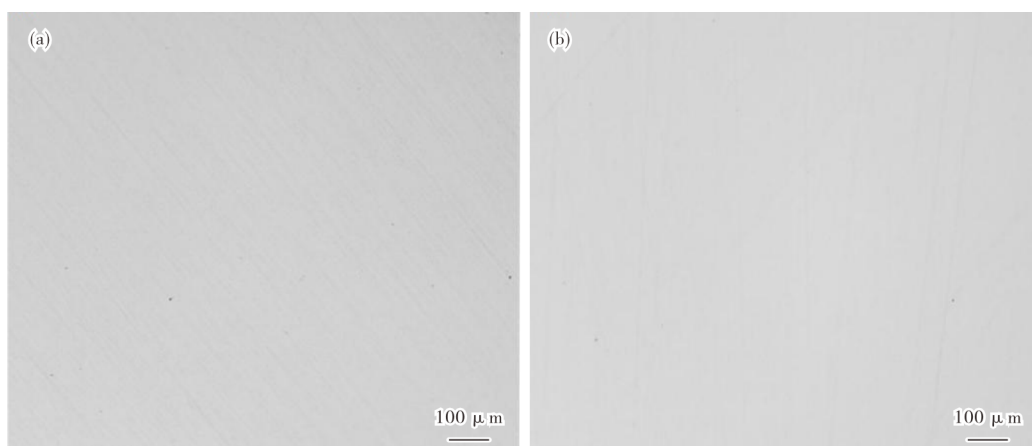


图 3 四元渣系试验后成材取样头部(a)、尾部(b)的 D 类夹杂物情况

Fig. 3 Type D non-metallic inclusions in head (a) and tail (b) of forged specimen for the quaternary slag system experiments

表 5 两种渣系电渣重熔后非金属夹杂物评级情况

Table 5 Non-metallic inclusion ratings after remelting with the binary and quaternary slag systems

级

取样位置	A 细	A 粗	B 细	B 粗	C 细	C 粗	D 细	D 粗	DS
GB/T1299—2014	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤2.0	≤1.5	≤2.0
A-1 取样头部	0	0	0.5	0	0	0	1.5	0	0
A-1 取样尾部	0	0	0.5	0	0	0	1.0	0	0
A-2 取样头部	0	0	0.5	0	0	0	2.0	0	0
A-2 取样尾部	0	0	0.5	0	0	0	1.5	0	0
B-1 取样头部	0	0	0.5	0	0	0	1.0	0	0
B-1 取样尾部	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0
B-2 取样头部	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0	0
B-2 取样尾部	0	0	0.5	0	0	0	1.0	0	0

表 6 ASPEX 扫描非金属夹杂物数量对比

Table 6 Comparison of the number of Non-metallic inclusions by ASPEX scanning

试验渣系	扫描面积/mm ²	夹杂物数量/个					
		1~5 μm	>5~10 μm	>10~20 μm	>20~30 μm	>30~50 μm	>50 μm
二元渣系	168	143	125	21	2	0	0
四元渣系	160	88	31	4	0	0	0

扫描电镜结果可见夹杂物形貌呈现不规则球状颗粒,大小在 4~7 μm 之间。依据能谱分析可知,夹杂物主要以 Al₂O₃ 颗粒状夹杂物为主。

2.3 分析与讨论

电渣重熔最显著的特点是针对钢中非金属夹杂物的有效控制。经电渣重熔后各类非金属夹杂

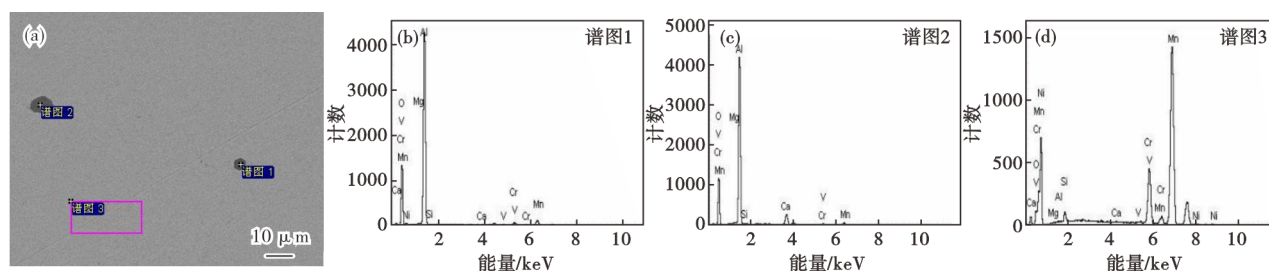


图 4 谱图 1~3(a)-(d)夹杂物及 FS136 基体形貌和成分分析

Fig. 4 Composition analysis and morphology of the Type D non-metallic inclusions and matrix (1-3) spectrograms (a)-(d) for FS136

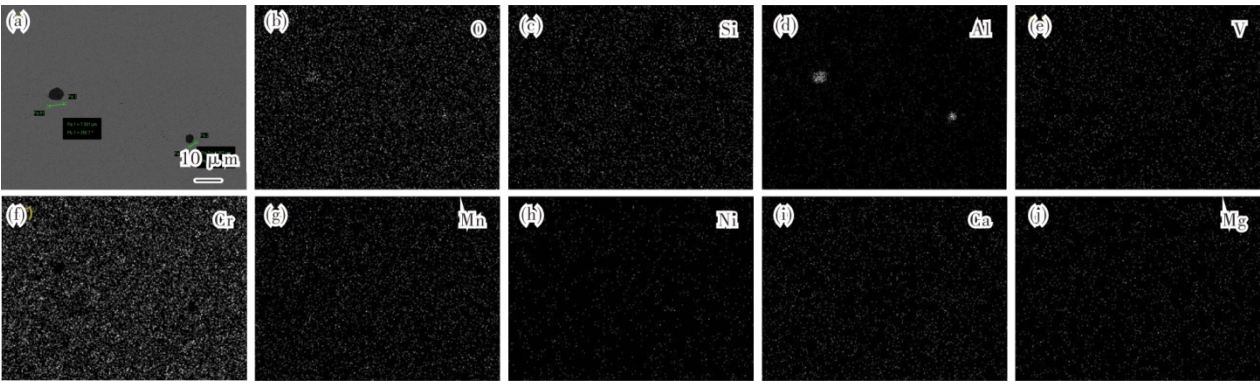


图5 采用两元试验渣系电渣后成材取样D类非金属夹杂物面扫分析(a)–(j)

Fig. 5 Element mapping of Type D non-metallic inclusions (a)–(j)in forged specimen for the binary slag system experiments

表7 谱图1–2的D类夹杂物和谱图3的FS136基体元素的能谱分析(质量分数)

Table 7 EDS analysis of the Type D non-metallic inclusions (Spectra 1–2) and FS136 matrix(spectrogram 3) %

谱图	O	Mg	Al	Si	Ca	V	Cr	Mn	Ni	总和
谱图 1	49.90	0.07	47.07	0.35	−0.01	0.33	2.16	0.03	0.09	100.00
谱图 2	49.69	0.35	43.37	0.06	5.43	0.04	0.70	0.23	0.12	100.00
谱图 3	5.51	0.38	0.50	5.81	−0.33	0.99	79.62	4.28	3.24	100.00
平均	35.03	0.27	30.31	2.08	1.70	0.45	27.49	1.51	1.15	100.00
标准偏差	25.57	0.17	25.88	3.24	3.24	0.48	45.15	2.40	1.81	
最大	49.90	0.38	47.07	5.81	5.43	0.99	79.62	4.28	3.24	
最小	5.51	0.07	0.50	0.06	−0.33	0.04	0.70	0.03	0.09	

物无论大小还是数量均有显著改善且分布更加均匀,金相评级明显降低。夹杂物的来源主要由重熔电极带来的原生夹杂物以及电渣重熔过程中产生的新夹杂物。后者通过在电渣重熔过程中采用氩气保护气氛能有效减少电渣重熔过程的气相传氧,降低熔渣氧势进而有效避免电渣重熔过程中非金属夹杂物的生成^[7]。

相关研究表明,原生夹杂物的去除主要环节发生在电极端头液膜的形成及金属熔滴滴落的过程。此过程主要分为三个阶段:1)在电极端头较高的温度区域内钢中非金属夹杂物呈现分解和扩散状态。2)电极熔化锥头液态薄膜层内非金属夹杂物呈流动状态。3)电极熔化端部和钢渣界面处炉渣对非金属夹杂物的吸附和溶解。在电渣重熔过程中熔速越慢、液态金属层越薄、非金属夹杂物尺寸越大,对去除夹杂物越有利。熔点较低的夹杂物熔化而溶入渣中,熔点较高的固态夹杂物由于界面能的作用被炉渣吸附^[8-9]。图6为电极端部夹杂物去除的示意图。

根据对二元渣系试验后取样D类夹杂物进行SEM+EDS分析并结合相关学者研究可知,在电弧炉冶炼过程中由Al脱氧而生成Al₂O₃为主的夹杂物在

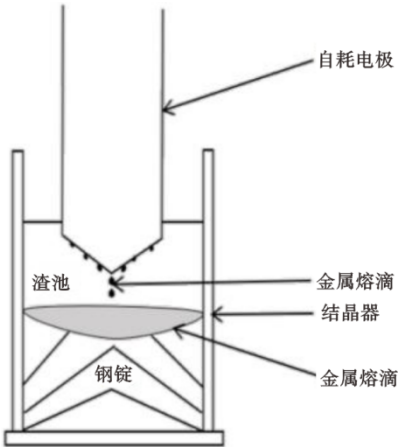
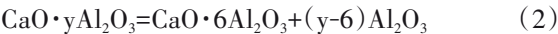


图6 自耗电极端部非金属夹杂物去除示意图

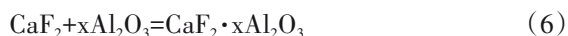
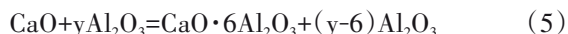
Fig. 6 Schematic diagram of removal of the non-metallic inclusions on consumable electrode tip

电渣重熔过程中演变为xCaO·yAl₂O₃类型夹杂物^[10-11]。

对于二元试验渣系溶解非金属夹杂物主要发生以下化学反应:



对于四元试验渣系溶解非金属夹杂物主要发生以下化学反应:



根据炉渣分子-离子共存理论以及相关反应式的自由能计算,可知以上反映均自发进行^[12]。当金属熔滴逐渐在电极端部汇聚以及穿过渣池过程中都会有非金属夹杂物通过液相界面析出。钢液与夹杂物的界面张力越大,熔渣与夹杂物的界面张力越小,则夹杂物越容易被熔渣吸附。钢液与渣之间的界面张力大,熔渣与钢液之间的浸润性就差,钢液中就不容易出现夹杂情况。钢中非金属夹杂物汇集、析出效果取决于钢、渣和夹杂物三者相互之间的界面张力。其中,夹杂物从钢液到达钢渣界面被吸附需满足式(8)热力学条件。

$$(\sigma_a + \sigma_b) > \sigma_c \quad (8)$$

式中, σ_a 为钢液与夹杂物之间的界面张力; σ_b 为钢液与熔渣之间的表面张力; σ_c 为熔渣与夹杂物之间的表面张力。

夹杂物完全由钢液转移到熔渣中需满足式(9)热力学条件。

$$\sigma_a > (\sigma_c + \sigma_b) \quad (9)$$

相关研究表明,四元试验渣系不仅降低了熔渣的熔点同时也降低了熔渣的黏度,一定程度增加了

熔渣的流动性,这也有利于对钢渣界面上的非金属夹杂物的冲刷以及钢渣的电毛细振动,而且熔渣与夹杂物之间的表面张力也有显著的降低^[13]。这些均增强了熔渣对D类夹杂物的润湿、吸收与去除的效果。

3 结论

1)采用两种试验渣系对FS136钢进行电渣重熔对比试验,重熔后经锻造加工成材取样进行金相分析非金属夹杂物并进行评级,A类、B类、C类评级相同无明显差异。D类非金属夹杂物评级不同存在差异。四元试验渣系电渣重熔的取样金相分析可见视场D类非金属夹杂物的数量低于二元试验渣系电渣重熔后取样D类非金属夹杂物数量,评级差异明显。

2)对锻材头部试样的非金属夹杂物大小、数量分布进行ASPEX扫描分析表明,在各尺寸范围内,四元试验渣系的非金属夹杂物数量均明显少于二元试验渣系的非金属夹杂物数量。四元试验渣系对于非金属夹杂物的去除优于二元试验渣系。通过对二元试验渣系锻材头部试样的非金属夹杂物的形貌和成分进行SEM+EDS扫描电镜能谱分析,二元试验渣系对于吸附和溶解以 Al_2O_3 为主的非金属夹杂物效果有限。而采用四元试验渣系更有助于提高熔渣对D类非金属夹杂物的润湿、吸收与去除的效果,使得非金属夹杂物评级进一步降低。

参考文献

- [1] 刘宝石,牟风,黄艳玲,等.高品质热作模具钢FS438组织及性能研究[J].模具制造,2018,18(3):84-87.
- [2] 李健,凌海涛,柴锋,等.电渣重熔过程中渣系对NiCrMoV合金钢电渣锭纯净度的影响[J].特殊钢,2023,44(4):35-42.
- [3] Brisenmark E. Formation and Evolution of Non-Metallic Inclusions in the Ladle Treatment-Ingot Casting-Electroslag Remelting Process Chain[D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2024.
- [4] 李龙飞,林腾昌,张强,等.电渣重熔渣系对C-HRA-3耐热合金夹杂物的影响[J].特殊钢,2023,44(5):76-82.
- [5] 肖爱平,张洲,李德胜,等.电渣重熔渣系对GCr15轴承钢纯净度的影响[J].特殊钢,2022,43(6):34-37.
- [6] 倪卓文,朱红春,李花兵,等.H13模具钢电渣锭中夹杂物的类型以及分布规律分析[J].特殊钢,2024,45(6):48-52.
- [7] 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+49.
- [8] 李正邦.电渣冶金理论与实践[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [9] Walek J, Kunčická L. Effect of oxide systems on purity of tool steels fabricated by electro slag remelting[J]. Molecules, 2025, 30(6): 1284.
- [10] 于昂.含氟渣系对电渣钢中夹杂物的影响及电渣重熔过程熔滴行为的数值模拟研究[D].沈阳:东北大学,2013.
- [11] Dong Y W, Jiang Z H, Yu A. Dissolution behavior of alumina-based inclusions in $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-SiO}_2$ slag used for the electroslag metallurgy process[J]. Metals, 2016, 6(11): 273.
- [12] 姜周华.高品质特殊钢电渣重熔技术[M].北京:冶金工业出版社,2021.
- [13] Walek J, Odehnalová A, Kocich R. Analysis of thermophysical properties of electro slag remelting and evaluation of metallographic cleanliness of steel[J]. Materials, 2024, 17(18): 4613.