



不同渣系对 1. 2343 热作模具钢纯净度的影响

蒋海清¹, 田家龙²

(1 江苏宏晟模具材料科技有限公司, 无锡 214000; 2 东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

摘要:针对目前电渣重熔(ESR)1. 2343 热作模具钢中 DS 类夹杂物超标的问题, 提出采用渣系优化的工艺思路, 采用两款新渣系(E40F、E50F)进行工业试验, 借助 FactSage 软件和经验公式计算了渣系的碱度、黏度、导电率、部分组元的活度等渣料的物性参数, 在此基础上制定了电渣重熔工艺。工业试验结果表明: E50F 渣系综合表现最优, 凭借适中的 SiO₂ 含量可将硬质 Al₂O₃ 夹杂改性为低危害球形夹杂, 兼具适中的流动性与 Al₂O₃ 夹杂抑制能力, 是现场生产中成品夹杂物控制的首选; E40F 渣系改性能力较强, 但黏度过高导致夹杂上浮困难, 残留夹杂偏多, 性能次于 E50F; 37 渣系 Al₂O₃ 活度最高, 二次硬质夹杂大量析出且无改性能力, 夹杂物控制性能最差。使用优化后的 E50F 预熔渣冶炼, 极大地改善了 1. 2343 热作模具钢中 DS 夹杂物, 评级级别达到 0. 5 级, 夹杂物尺寸均 ≤ 15 μm, 整体数量较原渣系降低了 27%。E50F 可以更好地去除 1. 2343 热作模具钢夹杂物。

关键词: 1. 2343; 热作模具钢; 电渣重熔; 渣系; 夹杂物; 碱度

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. N260072 **中图分类号:** TF142

Effect of Different Slag Systems on the Cleanliness of 1. 2343 Hot-Work Die Steel

Jiang Haiqing¹, Tian Jialong²

(1 Jiangsu Hongsheng Mold Steel Material Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China;

2 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract : To address the issue of excessive DS-type inclusions in 1. 2343 hot-work die steel produced by electroslag remelting (ESR), a process approach involving slag system optimization was proposed. Two new slag systems (E40F and E50F) were evaluated in industrial trials. Using FactSage software and empirical formulas, key physical properties of the slag systems—such as basicity, viscosity, conductivity, and activity of certain components—were calculated, forming the basis for the ESR process. Industrial trials revealed that the E50F slag system exhibited the best overall performance, with moderate SiO₂ content enabling the modification of hard Al₂O₃ inclusions into low-risk spherical inclusions. It also combined moderate fluidity with Al₂O₃ inclusion suppression capability, making it the preferred choice for inclusion control in the finished product in production. The E40F slag system exhibited strong modification capability but suffered from high viscosity, leading to difficulties in inclusion flotation and higher residual inclusion levels, resulting in inferior performance compared to E50F. The 37 slag system exhibited the highest Al₂O₃ activity, causing significant secondary hard inclusion precipitation without modification capability, yielding the poorest inclusion control performance. Using the optimized E50F pre-melted slag significantly decreased the DS inclusions in 1. 2343 hot-work die steel, achieving a rating level of 0. 5 with all inclusions smaller than 15 μm. The total inclusion count decreased by 27% compared to the original slag system. The E50F slag system is more effective in removing inclusions from 1. 2343 hot-work die steel.

Key Words : 1. 2343; Hot-Work Die Steel; Electroslag Remelting; Slag System; Inclusions; Basicity

1.2343 是典型高合金热作模具钢, 凭借优异的高温强度、抗热疲劳性、韧性与抛光性能, 广泛应用于汽车铝合金/镁合金压铸模具(如缸体、变速箱壳体等精密件)、精密热锻模具(曲轴、连杆等)、高玻纤增强塑料注塑模具及轻金属挤压工具等高端制造领域; 其中, 精密压铸、高端镜面塑料模具等场景对钢材的抛光性能提出了严苛要求。

电渣重熔是一种二次精炼技术, 集钢水二次精

炼与定向凝固为一体的综合冶金过程。其原理是电流通过液态渣池产生渣阻热将金属电极熔化, 熔化的金属汇集成熔滴, 熔滴滴落时穿过渣层进入金属熔池, 然后于水冷结晶器中结晶凝固成钢锭^[1]。电渣重熔是提升 1.2343 钢纯净度、组织均匀性的核心精炼工序, 渣系的成分配比直接决定钢中夹杂物的控制效果, 进而显著影响产品最终抛光性能, 因此渣料的合理选择尤为关键。

作者简介: 蒋海清(1995—), 男, 本科, 助理工程师; **E-mail:** 762739819@qq.com; **收稿日期:** 2026-05-21

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

目前电渣重熔 1.2343 热作模具钢采用传统的 37 渣 (70% CaF₂、30% Al₂O₃) 生产, 普遍存在 DS 类夹杂物超标的问题。在东北大学的指导下设计了两款新的渣系 (E40F、E50F) 用于解决 1.2343 热作模具钢夹杂物超标的问题。

本研究以高抛光性能要求的 1.2343 热作模具钢为研究对象, 选取 3 种不同成分分配比的电渣渣系 (37 渣、E50F 渣、E40F 渣), 系统开展对比研究, 分析不同渣系对电渣重熔后 1.2343 钢纯净度、夹杂物特征的影响规律, 揭示渣系成分与钢材抛光性能的关联机制, 旨在筛选出适配高抛光性能 1.2343 钢的最优电渣渣系, 为该钢种的电渣重熔工艺优化、高端模具用钢的质量升级提供理论支撑与工程实践指导。

1 熔渣与电极的成分

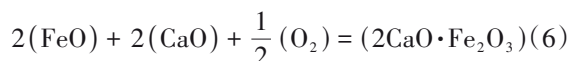
针对目前电渣重熔生产 1.2343 模具钢, 出现部分炉次夹杂物超标的问题, 设计了 E40F、E50F 渣系。借助 FactSage 和经验公式计算了渣系的物性参数。结合已有研究, 拟采用五元渣系进行工业试验, 为改变碱度并减少球状氧化物的形成, 新渣系增加了 CaO、MgO、SiO₂ 组元^[2]。

其中增加了 CaO 目的是提高渣的碱度, 提高渣的脱硫脱氧能力从而降低钢的总氧量最终达到降低夹杂物含量的目的^[3]。

熔渣中碱性氧化物 CaO 在渣中电离释放出脱硫活性的 O²⁻ 和 Ca²⁺, 钢液中 [S] 与渣中活性 O²⁻ 在渣金界面反应, 硫转化为硫离子进入渣相; 渣中 Ca²⁺ 与 S²⁻ 结合形成稳定的 CaS 被渣池捕获从而达到脱硫的目的^[4], 具体反应如式 (1)-(3)。

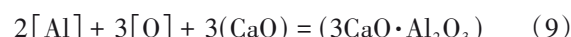
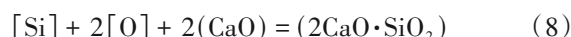
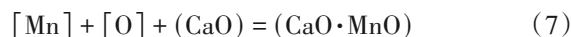


熔渣中 FeO 和电渣过程中金属电极表面生成的 FeO 是钢液主要供氧源^[5]。渣中的 FeO 与 CaO 生成铁酸一钙 (亚铁酸钙), 当外界有氧侵入时 FeO、CaO 和 O₂ 发生反应生成铁酸二钙, 抵御外界氧污染钢液。生成的铁酸一钙和铁酸二钙均易被渣池捕获吸收, 从而抑制熔渣向金属传氧, 具体反应如式 (5)、(6)。



金属液中的 [Mn]、[Si]、[Al] 是电渣体系主要

脱氧元素, 它们先与 [O] 反应生成脱氧产物; 其中, SiO₂、Al₂O₃ 为酸性氧化物, MnO 为弱碱性氧化物。若脱氧产物在渣中积累, 脱氧反应会提前达到平衡, 停止进行。强碱性 CaO 会与这些脱氧产物发生反应, 不断消耗产物, 使脱氧平衡持续正向移动, 深度脱氧, 同时生成的稳定产物 CaO·MnO、2CaO·SiO₂、3CaO·Al₂O₃ 易被渣池捕获吸收, 具体反应如式 (7)-(9)。



其中增加了 SiO₂ 目的是抑制电渣过程中烧硅增铝的反应, 从而降低钢中的总 Al 含量, 最终达到降低夹杂物含量的目的, 具体反应见式 (10)^[6]。同时, SiO₂ 与 CaO 反应生成低熔点的 CaSiO₃, 降低熔渣的熔点, 扩大液相区, 改善熔渣的流动性和稳定性^[6], 具体反应见式 (11)。



其中增加了 MgO 的目的是在电渣冶炼过程中在渣池表层形成半凝固膜, 隔绝大气, 减少渣池吸氧吸氢, 减少热辐射损失。MgO 是超高熔点氧化物 (纯 MgO 熔点 ≈ 2 852 °C), 远高于电渣常规温度, 拓宽熔渣固液凝固区间, 创造半固态温度窗口, 同时, 电渣渣池内部高温、表面低温, 存在较大温度梯度, 表面析出弥散 MgO 固相颗粒, 形成液固复合结构, MgO 提高熔渣黏度, 抑制流动, 让复合渣层停留在表面, 传热与散热平衡, 表面温度稳定在半凝固区间, 最终形成持续存在的半凝固膜^[7]。

工业试验用渣的成分详见表 1, 试验用 1.2343 电极坯的成分详见表 2。

表 1 电渣重熔用熔渣的成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of slags for ESR						%
渣系名称	CaF ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	备注
37	70	30	—	—	—	传统渣系
E40F	40	30	3	20	7	新渣系
E50F	50	30	3	12	5	新渣系

表 2 试验用 1. 2343 电极坯的成分 (质量分数)

Table 2 Chemical composition of 1. 2343 electrode ingots for test									%
C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	V	
0.37	0.45	0.014	0.002	1.08	5.05	1.29	0.13	0.38	

2 熔渣的物性参数

在电渣重熔与凝固阶段,炉渣会与钢液发生渣金反应,熔渣的物性参数对非金属夹杂物的脱除效果、渣金反应速率及分离效率、重熔过程的运行稳定性均起到关键作用,因此,要求熔渣在高温环境下具备适宜黏度、电导率与碱度^[8]。

为了了解熔渣的物性参数,采用FactSage软件计算渣料不同温度下的黏度、半球温度、开始熔化温度、完全熔化温度,基于分子离子共存理论计算1 800℃熔渣中钙离子、氧化铝、二氧化硅的活度,详见图1、表3、表4。按照经验公式(12)和(13)计算各渣系的光学碱度和1 800℃下电导率,详见表5。

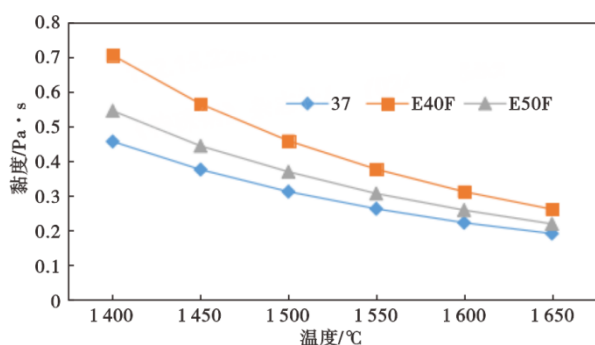


图1 熔渣黏度与温度的关系

Fig. 1 Relationship between slag viscosity and temperature

$$\Lambda = \sum(\lambda_i \cdot X_i) \quad (12)$$

式中, Λ 为光学碱度; λ_i 为纯组元光学碱度(CaF_2 光学碱度为0.430, CaO 光学碱度为1.000, MgO 光学碱度为0.780, Al_2O_3 光学碱度为0.650, SiO_2 光学碱度为0.480); $X_i = \frac{n_i \cdot z_i}{\sum(n_j \cdot z_j)}$ 为阳离子电荷当量分数, n_i

为组元摩尔数, z_i 为阳离子价数, $n_i \cdot z_i$ 为该组元贡献总正电荷(CaF_2 阳离子价数为2, CaO 阳离子价数为2, MgO 阳离子价数为2, Al_2O_3 阳离子价数为3, SiO_2 阳离子价数为4),分母为渣中全部阳离子总电荷和^[9]。

$$\sigma_{1800^\circ\text{C}} = 0.028w(\text{CaF}_2) + 0.015w(\text{CaO}) + 0.008w(\text{MgO}) - 0.012w(\text{Al}_2\text{O}_3) - 0.025(\text{SiO}_2) \quad (13)$$

式中, σ 为1 800℃熔渣电导率,S/cm。

熔渣是电渣重熔工艺的核心部分,在金属的熔化、精炼、凝固过程中起到决定性作用^[10]。为了同时满足技术和经济指标必须综合考虑重熔渣的熔点、黏度、碱度包括组元的活度,才能够选出合理的

表3 熔渣的半球温度、开始熔化温度、完全熔化温度

Table 3 Hemispherical temperature, initial melting temperature and final melting temperature of slags

渣系	半球温度	开始熔化温度	完全熔化温度
37	1 303	1 059	1 546
E40F	1 308	1 188	1 428
E50F	1 306	1 182	1 431

表4 熔渣的钙离子、氧化铝、二氧化硅的活度

Table 4 Activities of calcium ions, alumina and silica in slags

渣系	钙离子活度	氟离子活度	三氧化二铝活度
37	0.008 966 312	0.017 932 625	0.002 942 33
E40F	0.005 176 364	0.009 788 037	0.001 003 941
E50F	0.006 434 5	0.012 574 556	0.001 547 849

表5 熔渣的光学碱度和电导率

Table 5 Optical basicity and electrical conductivity of slags

渣系	光学碱度	电导率 $\sigma_{1800^\circ\text{C}}/\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
37	0.52	1.67
E40F	0.62	1.12
E50F	0.59	0.91

渣系。1.2343热作模具钢熔点1 487℃左右,新渣系熔点低于传统37渣,更接近1.2343热作模具钢的冶炼温度要求;同时新渣系配入了 SiO_2 抑制了 Al_2O_3 的活度,抑制二次夹杂物的析出。适宜的电导率使熔渣产生足够的热量,保证金属熔化、过热及精炼的进行,并提高电渣重熔的电效率,降低电耗,设计的渣系电导率小于4 S/cm,符合生产要求^[1]。

3 现场试验结果及分析

通过中频炉冶炼→精炼→真空脱气→浇注获得 $\phi 750$ mm的1.2343自耗电极。

将五元渣系E40F、E50F用于现场试验,在10 t气氛保护电渣重熔炉中重熔成电渣锭(10 t电渣锭尺寸:上口925 mm×下口875 mm×高2 165 mm),渣量控制为420 kg。各工序时间,工艺参数见表6。

经过锻造后检测6个试验电渣锭冒口端各类夹杂物的级别,检测依据GB/T 10561—2017,检测结果见表7。对37、E40F、E50F渣系试样进行夹杂物ASPEX扫描,每个视场的统计面积为100 mm²,被统计夹杂物的尺寸大于1 μm ,夹杂物个数及尺寸分布见表8。使用37渣电渣重熔后1.2343热作模具钢典型的DS夹杂物的形貌与成分如图2所示,由图2可看出此DS夹杂物本质是钙铝硅酸盐($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}$

表 6 1. 2343 电渣重熔过程工艺参数
Table 6 Process parameters of 1. 2343 steel during ESR

锭号	渣系	电压/V	重熔时间/min	补缩时间/min	总时间/min	熔速/(kg·min ⁻¹)	锭重/kg
A1	37	45-43	790	160	950	10.6-9.2	10 068
A2	37	45-43	802	165	967	10.6-9.2	9 994
A3	E40F	47-44	794	144	938	11.0-9.6	9 976
A4	E40F	47-44	800	150	950	10.0-9.6	10 007
A5	E50F	48-46	824	158	982	10.8-9.4	10 017
A6	E50F	48-46	781	159	940	10.8-9.4	10 060

表 7 不同电渣渣系冶炼 1. 2343ESR 钢夹杂物级别的结果
Table 7 Inclusion rating results for 1. 2343 ESR steel re-smelted with different ESR slag systems

渣系	锭号	A 细	A 粗	B 细	B 粗	C 细	C 粗	D 细	D 粗	DS
37	A1	0	0	0.5	1.0	0	0	1.0	1.0	2.0
	A2	0	0	0.5	0.5	0	0	1.0	0.5	1.5
E40F	A3	0	0	0.5	0.5	0	0	1.0	0.5	1.5
	A4	0	0	0.5	0.5	0	0	1.0	0.5	1.0
E50F	A5	0	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0	0.5
	A6	0	0	0.5	0	0	0	1.0	0.5	0.5

表 8 ASPEX 扫描夹杂物尺寸范围及每 100 mm² 个数
Table 8 Size range of ASPEX-scanned inclusions and number per 100 mm²

试验渣系	炉数/炉	夹杂物总数/个	不同尺寸夹杂物个数/个				
			1~5 μm	>5~10 μm	>10~15 μm	>15~20 μm	>20 μm
37	2	756	614	78	32	20	12
E40F	2	682	543	88	29	15	7
E50F	2	552	503	42	7		

2), 可以通过降低钢中的 [O]、[Al] 减少 DS 夹杂物。

37 渣高比例的 CaF₂ 会与钢中的 [O]、[Si] 发生置换反应生成 CaO 并持续分解向钢液输送活性 Ca²⁺ 具体反应见式 (1)、(14), Ca²⁺ 与钢中 Al₂O₃、SiO₂ 结合形成大尺寸 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 型 DS 夹杂, 且 37 渣本身黏度偏低, 并且对钙铝硅酸盐类夹杂溶解能力弱难以吸附去除这类夹杂, 因此, 钢中 DS 夹杂物在数量与评级上均出现超标。而设计的新渣系降低了 CaF₂ 比例, 同时新渣系中配入了 CaO、Mgo 使得冶炼过程中熔渣内预先存在 CaO·Al₂O₃、MgO·Al₂O₃ 尖晶石相, 大幅度降低了 Ca²⁺ 活度, 并且新渣系配入了 SiO₂ 抑制了钢液中的 [Si] 与熔渣 CaF₂ 反应, 减少 SiF₄ 挥发带来的 CaO 的增加, 极大地抑制 CaF₂ 分解向钢中持续输送 Ca²⁺ 的反应, 从源头减少钙铝硅酸盐夹杂的硅源、钙源^[11]。



不同熔渣生产的模具钢中典型 DS 夹杂物如图 3 所示。由图 3 可看出使用 37 渣电渣后存在超大尺寸不规则 DS 夹杂, 轮廓凹凸、边缘粗糙、内部明暗不均, 这是由于 37 渣碱度低, 吸附外来夹杂能力极弱;

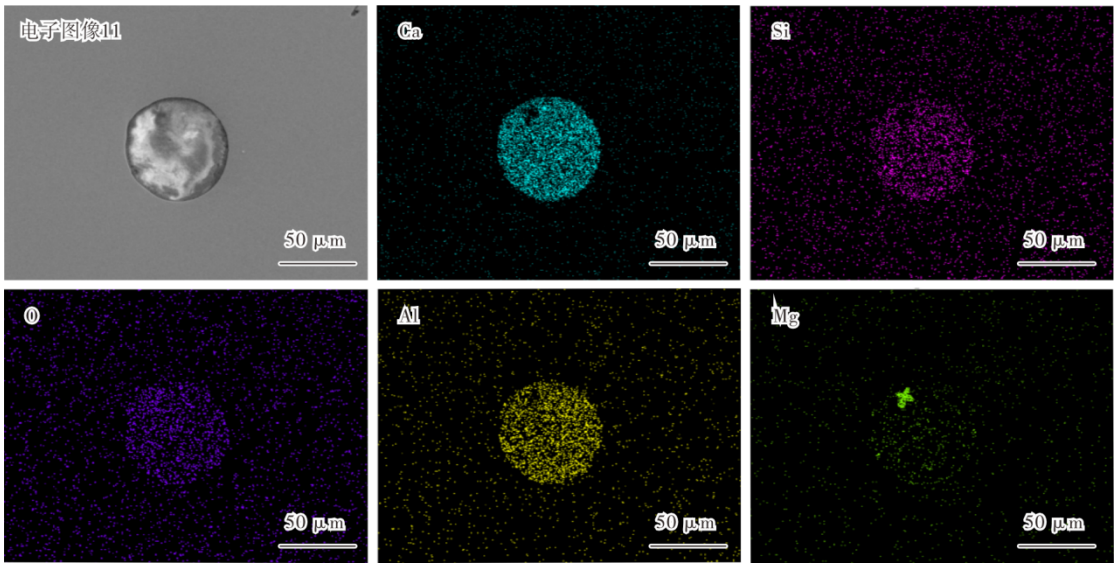


图 2 1. 2343 模具钢中典型 DS 夹杂物的形貌与成分
Fig. 2 Morphology and composition of typical DS inclusions in 1. 2343 Die Steel

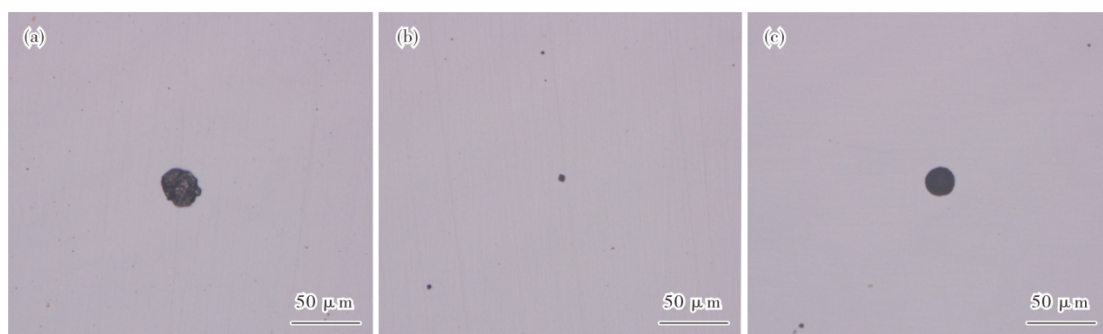


图3 不同熔渣生产的模具钢中典型DS夹杂物:(a) 37, (b) E50F, (c) E40F

Fig. 3 Typical DS inclusions in die steel produced with different slags:(a) 37, (b) E50F, (c) E40F

熔渣对 SiO_2 、 Al_2O_3 类脱氧产物浸润吸附差,脱氧生成的硅酸盐、铝酸盐无法有效溶入熔渣去除,小夹杂不断碰撞聚合,形成大尺寸不规则复合DS夹杂并残留在钢中。使用E40F渣电渣后存在规则球形DS夹杂,尺寸适中,边缘光滑圆润,少量未完全去除的液态钙铝硅酸盐复合夹杂,在高温钢液中依靠表面张力收缩成规则球形,但因无法上浮,最终残留在钢中。使用E50F渣电渣后无大型块状DS夹杂,仅存在零星细小点状夹杂。

结果显示三种渣系的夹杂物主要集中在1~5 μm ,使用E50F渣系的夹杂物从评级和数量来看均优于其他两种渣系,并且无大于15 μm 的夹杂物,极大地改善了1.2343ESR的DS类夹杂物的评级。此结果与渣系设计理念一致,较低的钙离子活度三氧化二铝活度可以减少DS类夹杂的形成,但由于E40F黏度高不利于夹杂物的上浮,故E50F更适合于1.2343ESR钢的电渣冶炼。

4 结论

1)37渣、E40F、E50F三种渣系的物性参数差异

显著,E50F渣系的熔点、黏度、光学碱度及电导率等参数最适配1.2343热作模具钢电渣重熔工艺,新增的 SiO_2 组元可有效降低 Al_2O_3 活度,抑制二次硬质夹杂物析出。

2)E50F渣系能将硬质 Al_2O_3 夹杂改性为低危害球形夹杂,且流动性适中,利于夹杂物上浮去除,夹杂物总数最少、无大于15 μm 的大尺寸夹杂,DS类夹杂物评级最低(0.5级),夹杂物控制效果最优。

3)E40F渣系虽具备较强的夹杂物改性能力,但黏度过高导致夹杂物上浮困难,残留夹杂偏多,纯净度控制效果弱于E50F渣系。

4)传统37渣系为二元渣, Al_2O_3 活度最高,无夹杂物改性能力,易引发二次硬质夹杂大量析出,夹杂物控制性能最差。

5)综合物性参数与现场试验结果,E50F渣系是1.2343热作模具钢电渣重熔生产的首选渣系,可有效解决DS类夹杂物超标问题,提升钢材纯净度与抛光性能,为高端模具用钢质量升级提供工艺支撑。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张保忠,孙国敏,李志伟,等.65Mn钢LF精炼渣系优化及工业试验[J].特殊钢,2023,44(4):65-69.
- [3] 李正邦.电渣冶金理论与实践[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [4] 王飞,牛家振,郭盛琦,等.氩气保护电渣重熔脱硫预测研究[J].有色金属科学与工程,2024,15(4):487-496.
- [5] 黄雪驰,李宝宽,段怡如,等.电渣重熔过程钢中氧含量预测及控制[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(4):524-533+550.
- [6] 孙晓林,钟庆元,王宁霏,等. SiO_2 对电渣重熔H13钢中Al含量及夹杂物的影响[J].钢铁,2025,60(11):83-94.
- [7] 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,2021:220-221.
- [8] 叶玉奎,雷长坤,廖家明,等.不同碱度精炼渣对镁碳耐火材料的侵蚀行为[J].硅酸盐通报,2026,45(2):655-662.
- [9] 耿鑫,姜周华,葛春钰,等.渣系组元对电渣重熔核级316H不锈钢中氢含量的影响[J].特殊钢,2024,45(4):83-88.
- [10] 高小勇,任威旺,张立峰.高温合金电渣重熔过程中Mg元素迁移规律[J].特殊钢,2026,47(1):41-46.
- [11] Wang X J, Li G Q, Chen Y F, et al. Industrial trials on preparation of cerium-treated H13 steel by electroslag remelting with cerium-oxide containing slag[J]. Steel Research International, 2023, 94(6): 2200786.