

· XXXX ·



非稳态浇铸下 51CrV4 弹簧钢带全流程夹杂物 特征演变规律

喻建林¹, 储建华², 常立忠², 戚传辉², 周启航¹, 刘 涛¹, 陈登国¹, 吕瑞国¹, 谢桂强¹

(1 新余钢铁集团有限公司, 新余 338000; 2 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243032)

摘 要: 为提升高品质 51CrV4 弹簧钢带洁净度, 通过系统的工业取样实验、夹杂物分析、氧氮分析研究了非稳态浇铸下全流程夹杂物的特征演变规律, 提出了洁净度的限制性环节和改进措施。结果表明, 铸坯中的夹杂物主要为 CaO-MgO-Al₂O₃、CaO-Al₂O₃、MgO-Al₂O₃ 和 Al₂O₃ 分别与析出物 (MnS、TiN、CaS) 复合的夹杂物。RH 喂钙线及软吹氩过程中钢水均发生二次氧化, 增氮效果明显。此外, 开浇炉次中间包二次氧化严重, 且浇铸前期钢水液面波动大, 钢水吸气较为明显, 造成氧化物和氮化物夹杂物数量增多, 对应铸坯头部夹杂物数量偏高。应调整 RH 喂钙线和软吹氩工艺, 减少钢液裸露。保证开浇时中间包的耐材质量, 延长浇注前吹氩保护时间, 控制浇铸前期钢水液面波动, 开浇炉次头坯距头部 3 m 处应切除使用。

关键词: 51CrV4 弹簧钢; 非稳态浇铸; 夹杂物; 洁净度; 连铸; 氧氮含量

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260049 **中图分类号:** TF704. 7

Evolution of Inclusion Characteristics in 51CrV4 Spring Steel Strip During the Entire Non-Steady Casting Process

Yu Jianlin¹, Chu Jianhua², Chang Lizhong², Qi Chuanhui², Zhou Qihang¹, Liu Tao¹,
Chen Dengguo¹, Lü Ruiguo¹, Xie Guiqiang¹

(1 Xinyu Iron and Steel Group Co., Ltd., Xinyu 338000, China;

2 School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: To improve the cleanliness of high-quality 51CrV4 spring steel strip, this study systematically investigates the evolution characteristics of inclusions throughout the entire non-steady casting process by industrial sampling experiments, inclusion analysis, and oxygen-nitrogen analysis. The limiting factors and improvement measures for cleanliness are proposed. The results indicate that inclusions in the slab are primarily complex inclusions composed of CaO-MgO-Al₂O₃, CaO-Al₂O₃, MgO-Al₂O₃, and Al₂O₃ respectively combined with precipitates (MnS, TiN, and CaS). During RH calcium wire feeding and soft argon blowing, the molten steel experiences both reoxidation and a significant nitrogen pickup. Furthermore, severe reoxidation occurs in the tundish during the first heat, with significant fluctuations in the molten steel level in the early casting stage, leading to noticeable gas absorption and an increase in the number of oxide and nitride inclusions. Consequently, the number of inclusions at the head of the slab formed after casting is relatively high. Adjustments should be made to the RH calcium wire feeding and soft argon blowing processes to reduce molten steel exposure. Ensuring the quality of the tundish refractory material during the first heat, extending the argon blowing time before casting, controlling molten steel level fluctuations in the early casting stage, and cutting off the slab head at 3 m from its beginning are recommended.

Key Words : 51CrV4 Spring Steel; Non-Steady Casting; Inclusions; Cleanliness; Continuous Casting; Oxygen and Nitrogen Content

51CrV4 弹簧热轧钢带在应力作用下具有优异强度、硬度及抗疲劳性能, 被广泛用于汽车膜片弹簧、锯片和刹车片等, 因此, 对铸坯表面及夹杂物等内在质量要求极为苛刻^[1-2]。我国弹簧钢带在洁净度、疲劳寿命落后于西方发达国家, 高端系列的膜片弹簧仍依赖进口, 开发具有市场竞争力的高品质

弹簧带势在必行。钢中夹杂物严重破坏钢基体连续性, 恶化强度和疲劳性能^[3-5]。炼钢连铸过程应当严格控制硬脆性夹杂物产生, 调控夹杂物成分、数量和大小分布, 对洁净度展开系统研究。

非稳定浇铸是指在开浇、换包、更换水口、停浇等其他意外情况发生的连续浇铸过程, 造成钢液二

作者简介: 喻建林(1986—), 男, 硕士, 工程师;

E-mail: yujianlin0612@163.com;

收稿日期: 2026-03-31

通信作者: 储建华(1992—), 男, 博士, 副教授;

E-mail: chujhua@ahut.edu.cn

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

次氧化及卷渣的概率增加^[6-7]。国内部分学者已经对非稳态浇铸过程洁净度的变化进行了研究分析。肖鹏程等^[8]对IF钢非稳态连铸坯洁净度定量分析发现开浇过程钢水二次氧化严重,换包或者水口时卷渣严重,洁净度远低于稳态铸坯。张春杰^[9]对非稳态浇铸DC06钢洁净度进行研究得到了换包过程大型夹杂物主要为含Ti、Zr的 Al_2O_3 -CaO类的夹杂,换水口时为 Al_2O_3 夹杂物,数量高于正常坯。牛帅等^[10]还利用水力学模型模拟分析了非稳态浇铸过程中间包钢/渣界面,研究结果表明加快换包速度、中间包盖吹氩可提高帘线钢的洁净度水平。郎炜昀等^[11]认为减少403不锈钢浇铸过程Al、Mg、Ti、Ca含量和钢水温度波动,可避免造成水口结瘤物结构变化产生大型夹杂物对连浇影响。

尽管很多研究已经证实非稳态浇铸过程对钢水洁净度有影响,但很少有对51CrV4钢非稳态浇铸过程的洁净度变化进行研究,特别是全流程夹杂物的特征规律还没有被系统揭示。利用全流程系统取样实验、夹杂物电镜和统计分析、氧氮分析、渣成分分析,比较了51CrV4钢冶炼过程中开浇、正常和停浇过程的全流程洁净度变化情况,得出了夹杂物

特征变化规律,提出了非稳态浇铸过程洁净度的限制性环节和改进措施,为全面提升高品质51CrV4钢带质量提供依据。

1 工业实验及表征方法

1.1 冶炼工艺及全流程取样方案

51CrV4弹簧钢采用“铁水预处理KR脱硫→210 t转炉炼钢→CAS→LF精炼→RH精炼→板坯连铸-热轧”工艺生产。对开浇炉、正常炉、尾炉(炉号分别为J42-05992A、J42-05993A、J42-05997A)的炼钢、精炼、连铸及轧制过程进行系统取样分析(钢水样、气体样、铸坯样和轧材样)。全流程取样方案及取样编号,每个炉次的轧材样对应着铸坯取样的位置见表1。

1.2 试样加工及样品表征

如图1(a)所示,在提桶样底部位置锯切一个 $\phi 35\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的金相试样,用不同粒度的砂纸打磨并抛光至镜面。在金相试样的锯切面用线切割切取一个 $\phi 4.2\text{ mm}\times 35\text{ mm}$ 的圆棒,用砂纸打磨抛光至 $\phi 4\text{ mm}$ 的氧氮棒。铸坯样的取样方案如图1(b)所示,先垂直于拉坯方向在铸坯上切取一片20 mm

表1 全流程取样方案
Table 1 Whole-process sampling scheme

工序	取样炉次	取样工序/位置	工序	取样炉次	取样位置
KYH	开浇炉	吹氩站出站前	WRH4	尾炉	RH软吹氩结束后
ZYH	正常炉	吹氩站出站前	K-170	开浇炉	钢包剩余钢水170 t
WYH	尾炉	吹氩站出站前	K-130	开浇炉	钢包剩余钢水130 t
KLF1	开浇炉	LF进站	K-190	开浇炉	钢包剩余钢水90 t
KLF2	开浇炉	LF化渣结束	K-50	开浇炉	钢包剩余钢水50 t
KLF3	开浇炉	LF出站	Z-130	正常炉	钢包剩余钢水130 t
ZLF1	正常炉	LF进站	Z-50	正常炉	钢包剩余钢水50 t
ZLF2	正常炉	LF化渣结束	W-50	尾炉	中间包钢水50 t
ZLF3	正常炉	LF出站	W-35	尾炉	中间包钢水35 t
WLF1	尾炉	LF进站	W-15	尾炉	中间包钢水15 t
WLF2	尾炉	LF化渣结束	K1	开浇炉	头坯距头部1 m
WLF3	尾炉	LF出站	K2	开浇炉	头坯距头部2 m
KRH1	开浇炉	RH精炼15 min后	K3	开浇炉	头坯距头部3 m
KRH2	开浇炉	RH破空之后	K12	开浇炉	第二块板坯头部
KRH3	开浇炉	RH喂钙线后	K30	开浇炉	第三块板坯头部
KRH4	开浇炉	RH软吹氩结束后	Z1	正常炉	第二炉第一块板坯头部
ZRH1	正常炉	RH精炼15 min后	W30	尾炉	倒数第二块板坯头部
ZRH2	正常炉	RH破空之后	W12	尾炉	倒数第一块板坯头部
ZRH3	正常炉	RH喂钙线后	W9.8	尾炉	尾坯距尾部9.8 m
ZRH4	正常炉	RH软吹氩结束后	W3	尾炉	尾坯距尾部3 m
WRH1	尾炉	RH精炼15 min后	W2	尾炉	尾坯距尾部2 m
WRH2	尾炉	RH破空之后	W1	尾炉	尾坯距尾部1 m
WRH3	尾炉	RH喂钙线后	-	-	-

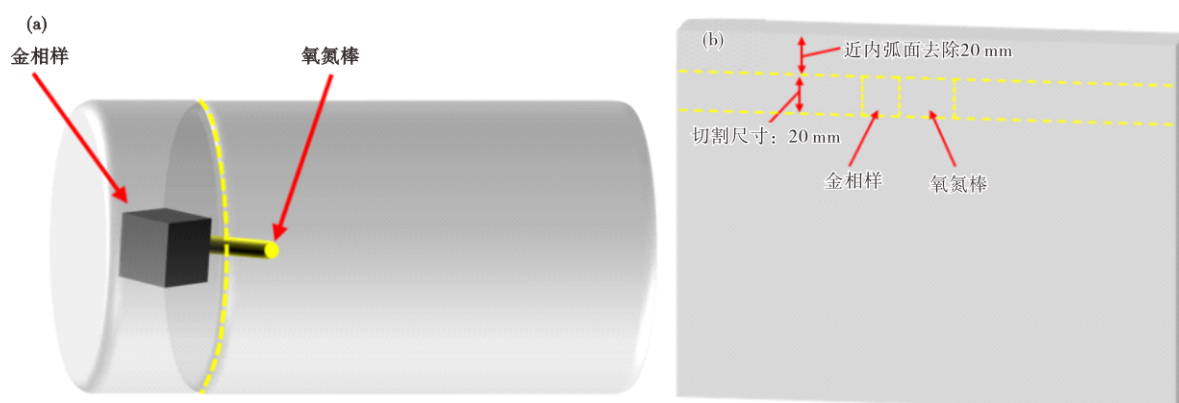


图1 (a)提桶样和(b)铸坯样加工方案

Fig. 1 Processing scheme for (a) ladle samples and (b) slab samples

样品,再去除表面(近内弧)20 mm后,在中间位置切取1个25 mm×25 mm×20 mm(拉坯方向)金相试样。在金相样右边锯切一个尺寸为25 mm×20 mm×40 mm的样条,再用线切割切取一个氧氮棒。在钢板轧材宽度的1/4和1/2中间位置,切割一个厚度为20 mm×20 mm的金相样。通过场发射扫描电子显微镜-能谱(SEM, Sigma300)分析金相样的夹杂物形态、大小和类型。利用夹杂物自动扫描仪(Phenom XL)检测夹杂物的大小、数量和分布,扫描面积为10 mm×10 mm,最小统计粒径2 μm。此外,采用氧氮氢分析仪(LECO ON 836)检测样品中的氮含量。在检测氧氮含量之前,将氧氮棒在丙酮溶液中超声清洗,随后在流动空气中干燥,并切成约2~3 mm长的碎片。对样品中的每种气体成分进行三次表征,并取平均值。

2 结果与讨论

2.1 全流程氧氮含量变化

2.1.1 精炼连铸过程中氧氮含量变化

图2为开浇炉的精炼和连铸过程氧氮变化。LF出站时钢中的 $w[\text{O}]$ 为 36×10^{-6} ,RH精炼结束时降低至 15×10^{-6} , $w[\text{N}]$ 由 58×10^{-6} 降低至 37×10^{-6} ,脱气效果较为明显。在距头坯1 m位置时, $w[\text{O}]$ 升至 53×10^{-6} , $w[\text{N}]$ 升至 127×10^{-6} ,在距头坯2 m位置时,氧氮含量又有进一步增加,表明在中间包浇铸时钢中T.O均有一定程度的增加,同时 $w[\text{N}]$ 显著增加。因此,优化浸入式开浇工艺及防止浇铸过程的二次氧化对于提升高品质钢洁净度水平具有重要意义。在距头坯3 m位置时,氧氮含量又呈降低而后再再次升高。

图3为正常炉精炼和连铸过程中T.O及氮含量的变化情况,与开浇炉类似,也在浇铸过程中发生

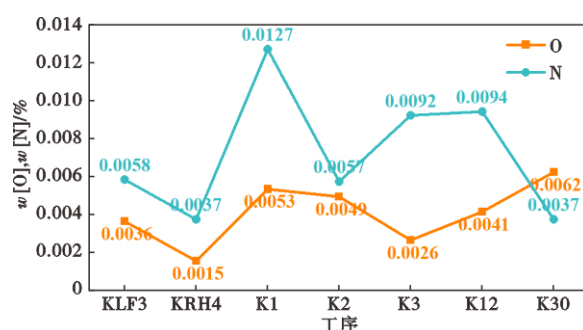


图2 开浇炉全流程全氧和氮含量变化

Fig. 2 Variation of T. O and N contents during the whole process of the initial casting heat

了钢液吸气。图4为尾炉精炼和连铸过程中 $w[\text{O}]$ 及 $w[\text{N}]$ 的变化情况, $w[\text{O}]$ 呈现波动降低的趋势, $w[\text{N}]$ 从精炼到连铸过程中出现上升的趋势。

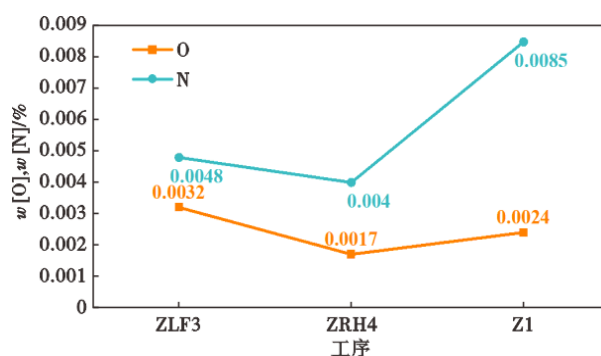


图3 正常炉全流程全氧和氮含量变化

Fig. 3 Variation of T. O and N contents during the whole process of the normal heat

2.1.2 轧材中氧氮含量变化

不同轧材位置的氧、氮含量变化分别如图5(a)(b)所示,可见第一块板坯头部的 $w[\text{O}]$ 较高,达到 39×10^{-6} ,第二块、第三块板坯的头部降低至 18×10^{-6} ,

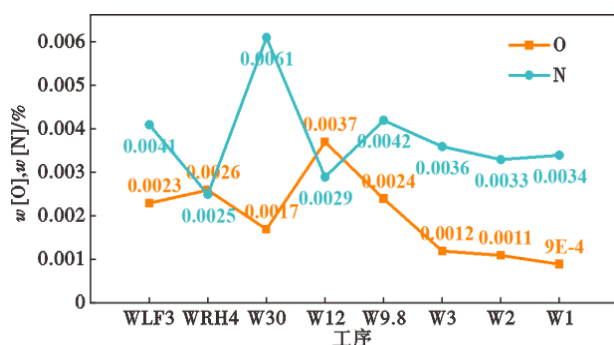


图4 尾炉全流程全氧和氮含量变化

Fig. 4 Variation of T. O and N contents during the whole process of the final heat

正常炉及尾炉的轧材 $w[\text{O}]$ 保持在 $(15\sim 21)\times 10^{-6}$ 波动, 基本与铸坯样中的氧含量保持一致。氮含量与氧含量的变化趋势基本保持一致, 除了第一块板坯头部的 $w[\text{N}]$ 为 49×10^{-6} , 到正常炉轧材氮含量出现衰减趋势, 而尾炉的轧材 $w[\text{N}]$ 在 27×10^{-6} 至 29×10^{-6} 波动。所得开浇炉成品氧氮含量较高, 开浇生产工艺过程需进一步优化改进。

2. 2 全流程夹杂物演变

2. 2. 1 中间包、铸坯及轧材中的典型夹杂物

如图6所示为钢包剩余钢水130 t中间包中的典型夹杂物, 主要有不规则状的 $\text{CaS-MnS-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。不规则状的 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。伴有棱角的不规则状的 TiN 夹杂物, 尺寸为 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 。

如图7所示为头部位置铸坯中典型夹杂物, 主要有不规则状的 $\text{CaS-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。球状的 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。块状的 TiN 夹杂物, 尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。

如图8所示为头坯距头部1 m位置铸坯中典型

夹杂物, 主要有不规则形貌的 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ 复合夹杂物, 尺寸为 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ 。不规则形貌的 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaS}$ 复合夹杂物, 值得注意的是 CaO 分布在一侧, MgO 分布在一侧, Al_2O_3 涵盖整个夹杂物, 点状 MnS 分布在外缘, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。不规则形貌的 $\text{MnS-CaS-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, MnS-CaS 在边缘析出, MgO 含量相对较低, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。不规则形貌的 $\text{MnS-CaS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, Al_2O_3 位于中心, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。

如图9所示为第二块板坯头部位置铸坯中典型夹杂物, 主要有不规则形貌的 $\text{CaS-MnS-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiN}$ 夹杂物, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。长条状的 MnS-TiN 复合夹杂物, 尺寸为 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 。不规则形貌的 $\text{CaS-MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。不规则形貌的 $\text{CaS-MnS-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 类似的 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 为主成分, CaS-MnS 在尖晶石的边缘析出, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。

如图10所示为倒数第一块板坯头部位置的典型夹杂物, 主要有不规则形貌的 $\text{CaS-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。不规则状的 $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。块状的 MnS-TiN 复合夹杂物, 尺寸为 $>3\sim 4\ \mu\text{m}$ 。球状的 $\text{CaS-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$ 复合夹杂物, 尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。

如图11所示为铸坯对应轧材中的典型夹杂物, 主要有不规则状的 $\text{CaS-MnS-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, CaS-MnS 分布在 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 边缘, 尺寸为 $>2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。不规则状的 $\text{CaS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 尺寸为 $>3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。

2. 2. 2 稳态及非稳态过程全流程夹杂物对比分析

图12(a)为开浇炉全流程夹杂物大小分布情

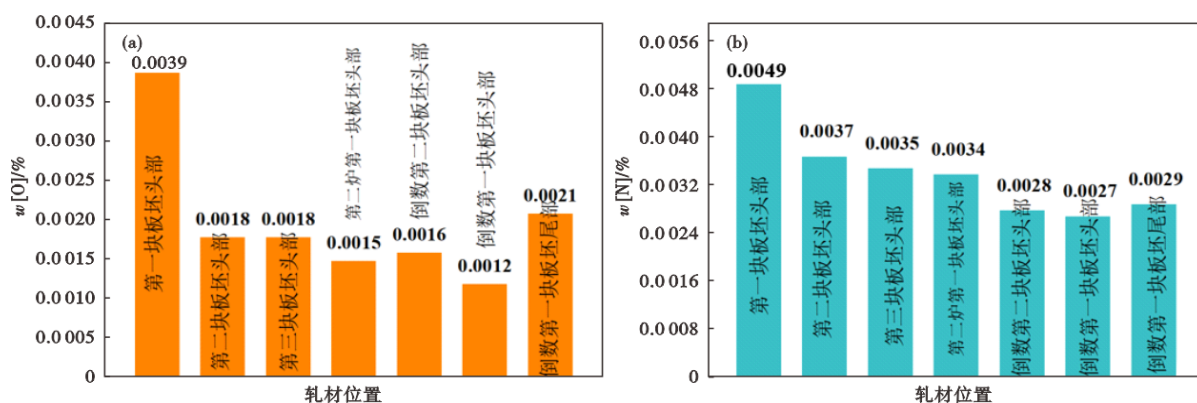


图5 不同轧材位置的(a)全氧和(b)氮含量变化

Fig. 5 Variation of (a) T. O and (b) N contents at different rolled material positions

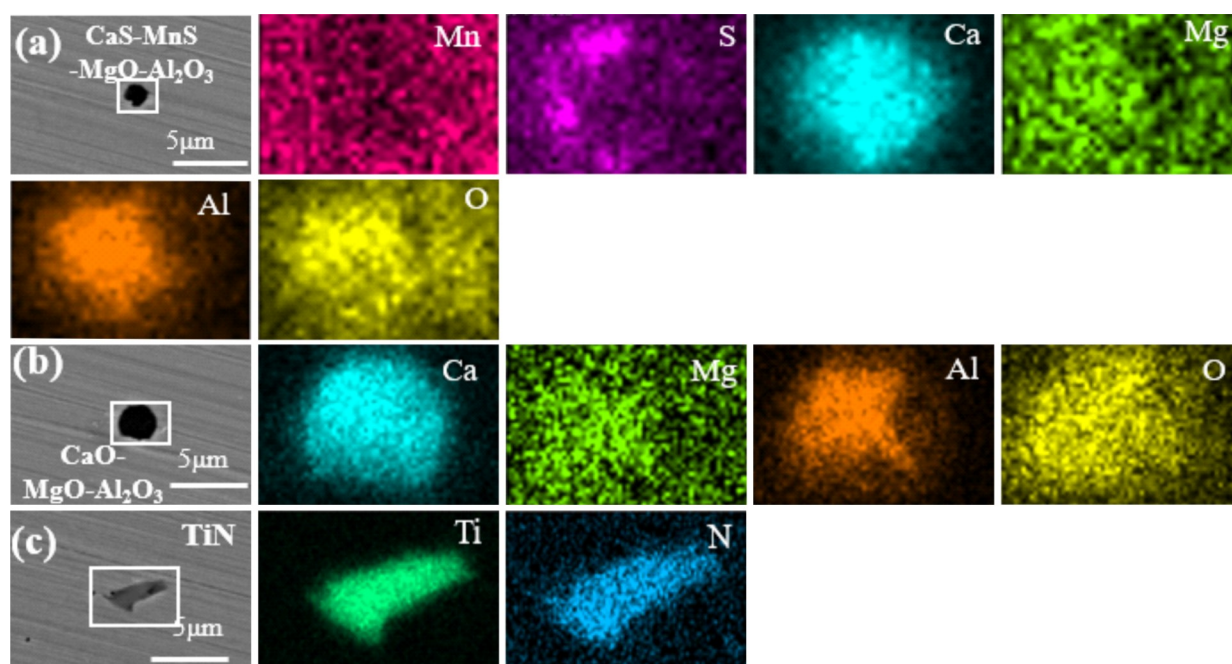


图6 Z-130试样中的(a)CaS-MnS-CaO-MgO-Al₂O₃, (b)CaO-MgO-Al₂O₃, (c)TiN夹杂物及元素分布面扫图

Fig. 6 SEM images and element distribution of (a) CaS-MnS-CaO-MgO-Al₂O₃, (b) CaO-MgO-Al₂O₃, and (c) TiN inclusions in Z-130 sample

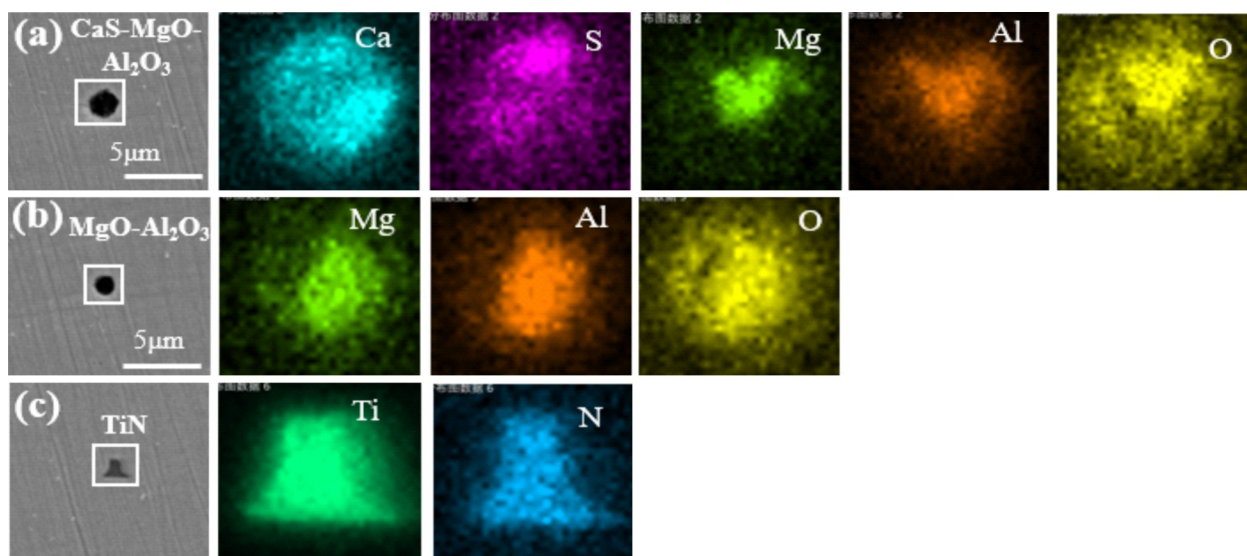


图7 Z1试样中的(a)CaS-MgO-Al₂O₃, (b)MgO-Al₂O₃, (c)TiN夹杂物及元素分布面扫图

Fig. 7 SEM images and element distribution of (a) CaS-MgO-Al₂O₃, (b) MgO-Al₂O₃, (c) TiN inclusions in Z1 sample

况,可以看出夹杂物尺寸大都集中在 $>2\sim5\mu\text{m}$,在RH喂钙线及软吹氩结束后夹杂物变小,尺寸集中在 $0.5\sim2\mu\text{m}$,这是由于钙处理后夹杂物变性效果增强和大型夹杂物上浮去除效果较好。值得注意的是,在RH破空后夹杂物数量激增,这是由于真空室钢液回落至钢包时造成渣/钢界面波动剧烈,钢水面裸露,外部空气卷入,钢液发生二次氧化。此外,界面波动加大了顶渣向钢液传氧的速度,使钢包顶层

钢液的全氧含量上升,夹杂物数量增多。另外顶渣和钢水与耐材的接触面增大,耐材的侵蚀剥落也会造成钢中全氧含量提升。在开浇过程中,中间包钢水液面波动较大,大型夹杂物的去除效果差,因此 $2\sim5\mu\text{m}$ 的夹杂物数量增多,K-130试样中夹杂物的数量密度达到了 $52\text{个}/\text{mm}^2$ 。浇铸末期,液面波动相对稳定,残留在钢液中的夹杂数量和尺寸都减小。同理,延续至铸坯中发现在头坯距头部1、2、

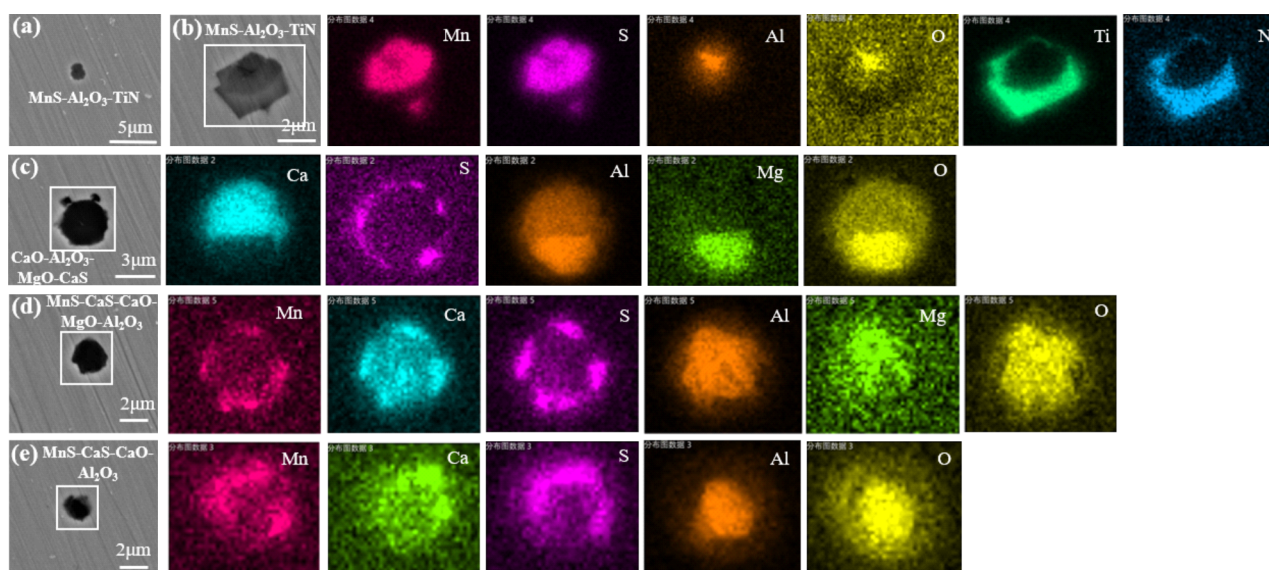


图8 K1试样中的(a,b)MnS-Al₂O₃-TiN, (c)CaO-Al₂O₃-MgO-CaS, (d)MnS-CaS-CaO-MgO-Al₂O₃, (e)MnS-CaS-CaO-Al₂O₃夹杂物及元素分布面扫图

Fig. 8 SEM images and element distribution of (a, b) MnS-Al₂O₃-TiN, (c) CaO-Al₂O₃-MgO-CaS, (d) MnS-CaS-CaO-MgO-Al₂O₃, (e) MnS-CaS-CaO-Al₂O₃ inclusions in K1 sample

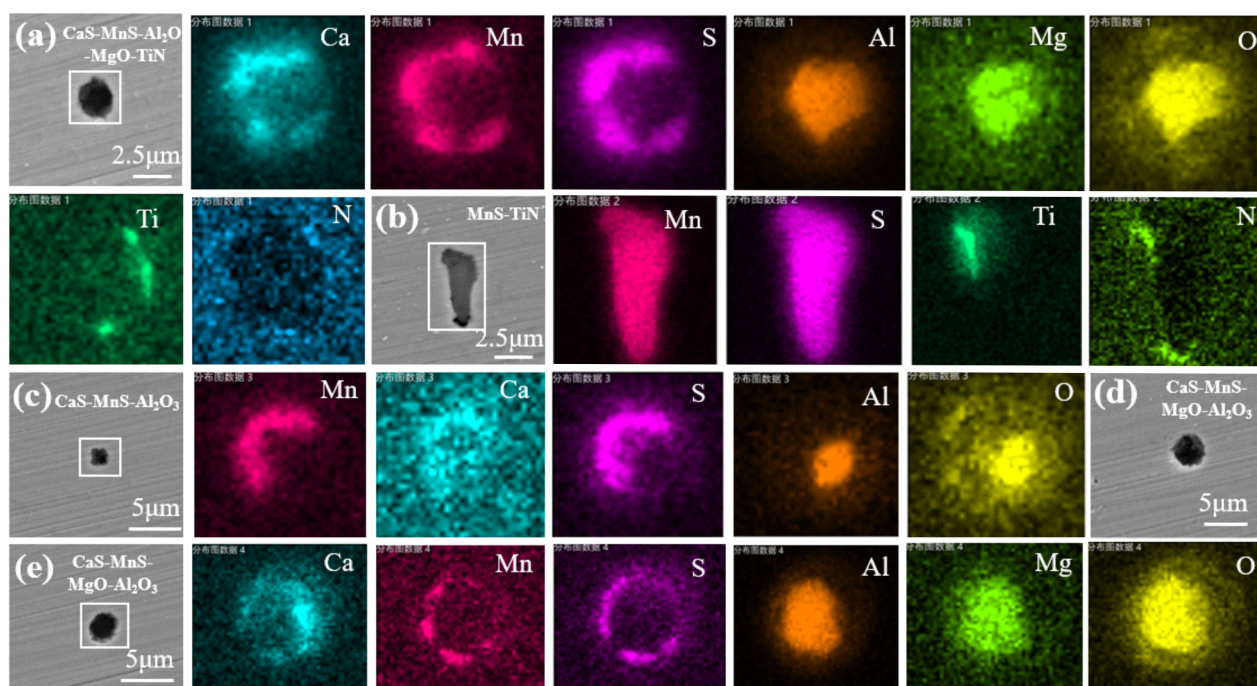


图9 K12试样中的(a)CaS-MnS-Al₂O₃-MgO-TiN, (b)MnS-TiN, (c)CaS-MnS-Al₂O₃, (d,e)CaS-MnS-MgO-Al₂O₃夹杂物及元素分布面扫图

Fig. 9 SEM images and element distribution of (a) CaS-MnS-Al₂O₃-MgO-TiN, (b) MnS-TiN, (c) CaS-MnS-Al₂O₃, (d, e) CaS-MnS-MgO-Al₂O₃ inclusions in K12 sample

3 m 的位置 $>2\sim5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物数量较多,随着浇铸进行第二、三块板坯头部中发现 $>2\sim5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物数量减少, $0.2\sim2\ \mu\text{m}$ 的夹杂物数量增多。轧材中夹杂物集中分布在 $>2\sim5\ \mu\text{m}$, 数量密度仅为 $16\text{个}/\text{mm}^2$, $>5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物几乎没有。

如图 12(b)所示为开浇炉全流程夹杂物数量密度的比较。在吹氩站出站前及 LF 精炼出站时夹杂物的总数量密度最多, 主要类型为 MnS 和 Al₂O₃, MnS 夹杂物占多数。从 LF 化渣结束到出站后, 由于精炼渣对夹杂物的吸附, 夹杂物的总数量密度由

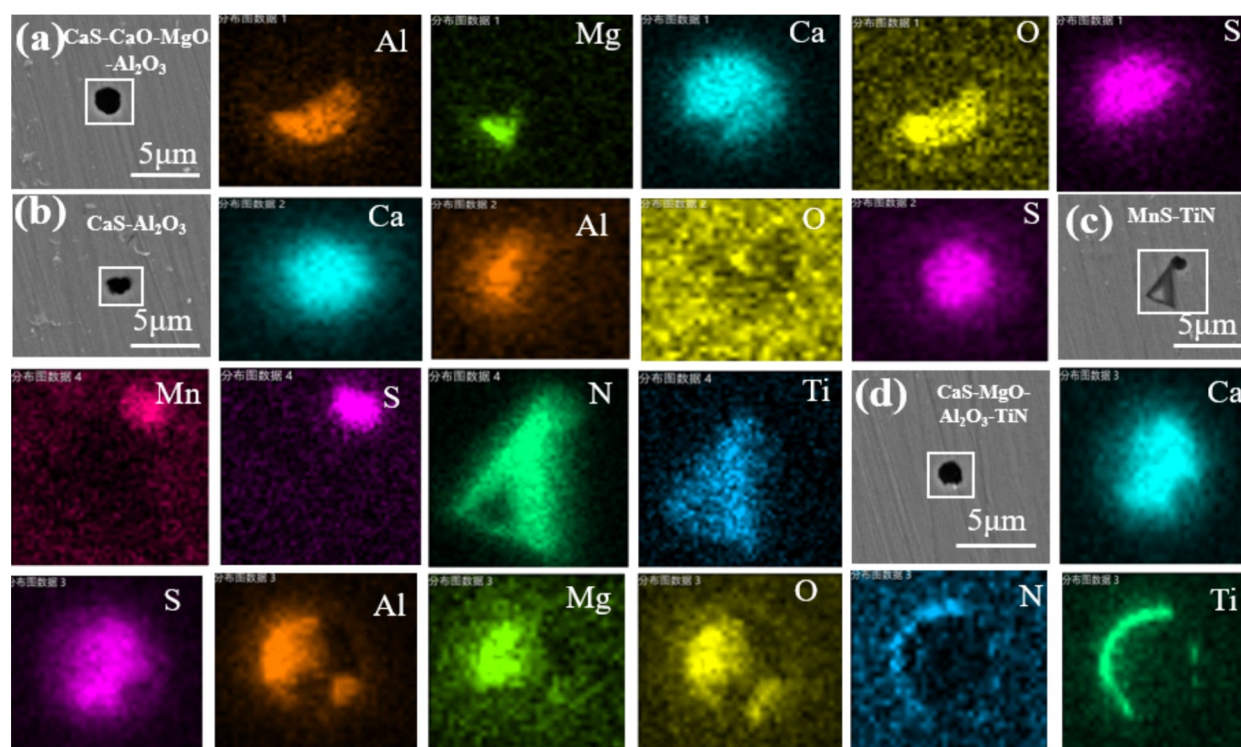


图10 W12试样中的(a)CaS-CaO-MgO-Al₂O₃, (b)CaS-Al₂O₃, (c)MnS-TiN, (d)CaS-MgO-Al₂O₃-TiN夹杂物及元素分布面扫图
Fig. 10 SEM images and element distribution of (a) CaS-CaO-MgO-Al₂O₃, (b) CaS-Al₂O₃, (c) MnS-TiN, (d) CaS-MgO-Al₂O₃-TiN inclusions in W12 sample

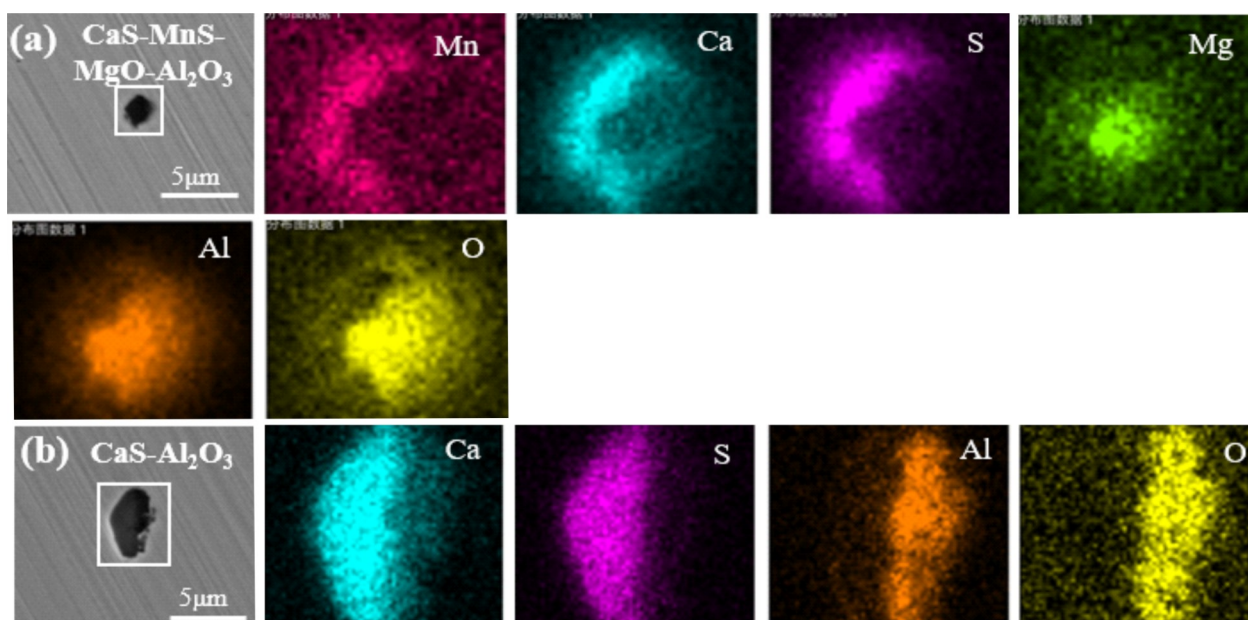


图11 正常炉次与铸坯对应轧材中(a)CaS-MnS-MgO-Al₂O₃, (b)CaS-Al₂O₃夹杂物及元素分布面扫图
Fig. 11 SEM images and element distribution of (a) CaS-MnS-MgO-Al₂O₃, and (b) CaS-Al₂O₃ inclusions in the rolled material corresponding to the normal heat and casting slab

85个/mm²降低至29个/mm²。与耐材的强烈相互作用,大量的MgO-Al₂O₃尖晶石夹杂物及少量析出物(TiN和CaS)伴随生成。RH精炼过程中,夹杂物总数量密度增大,MgO-Al₂O₃尖晶石夹杂物增多,并伴

有钙铝酸盐生成,钢液与耐材和精炼渣作用强烈。特别是RH破空后,MnS夹杂物的数量明显增多。软吹氩结束后,生成的尖晶石夹杂物和CaS数量增多,表明软吹氩过程钢液面裸露,造成钢水二次氧

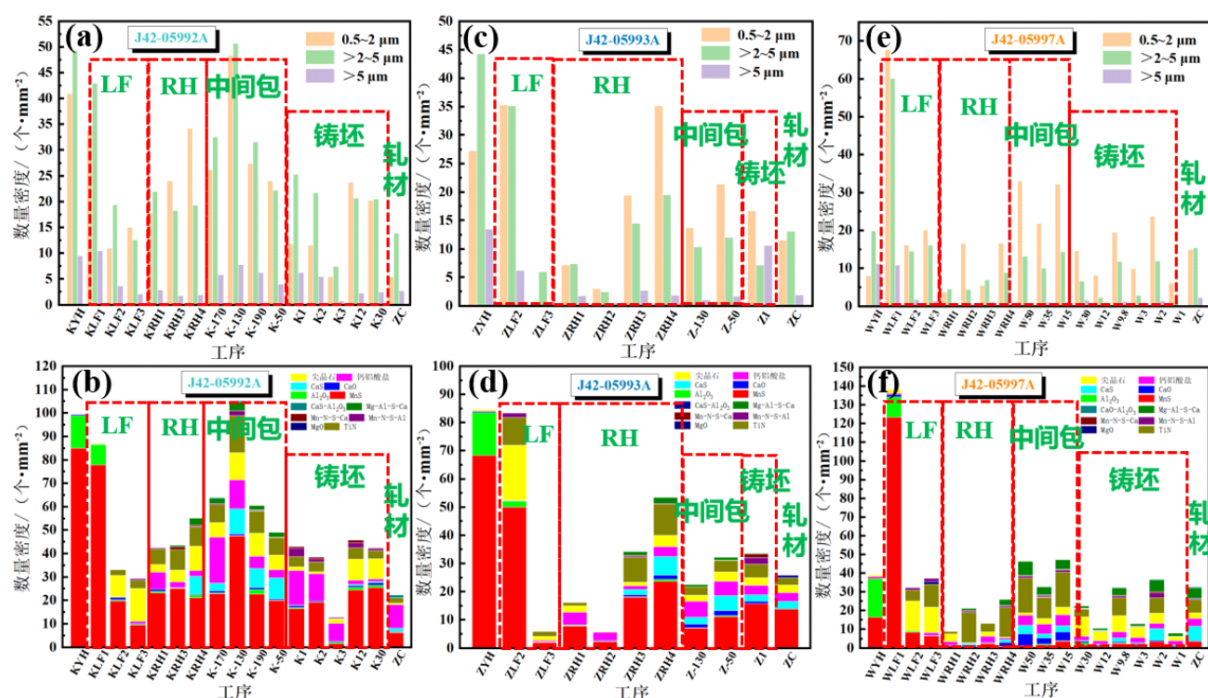


图12 开浇炉(a,b)、正常炉(c,d)和尾炉(e,f)全流程夹杂物大小分布和不同类型夹杂物的数量密度

Fig. 12 Size distribution and number density of different types of inclusions during the whole process of the (a, b) initial casting heat, (c, d) normal heat, and (e, f) final heat

化。开浇时,钙铝酸盐夹杂物数量增多,这与开浇过程钢液与中间包耐材接触有关。随着浇铸的进行,中间包钢水液面波动较大,夹杂物去除效果差使夹杂物数量增多。在钢包剩余钢水130 t时夹杂物的数量达到105个/mm²,氧化物夹杂物数量增大,且以氧化物为形核质点的析出物数量也在增多。到达浇铸后期,中间包钢水波动接近平稳,夹杂物的数量逐渐下降。在头坯距头部1、2、3 m的位置夹杂物数量逐渐减少,第二、三块板坯头部夹杂物数量又逐渐增多,直到轧材中夹杂物数量最少。铸坯中夹杂物的数量密度维持在40个/mm²波动。由此可见,非稳定态浇铸下夹杂物的数量会有所提升。

如图12(c)所示为正常炉全流程夹杂物大小分布。可以发现,在吹氩站出站前及LF精炼过程中夹杂物的尺寸集中在>2~5 μm。而在后续的工艺中,夹杂物的尺寸集中在0.5~2 μm。进一步的,对正常炉全流程夹杂物的数量密度进行了比较。如图12(d)所示,在吹氩站出站前及LF精炼化渣结束后的夹杂物数量最多为82个/mm²,这源自脱氧产物与耐材反应的结果,及析出物的生成。一方面,由于LF精炼渣的吸附夹杂物的作用,LF精炼出站时的夹杂物数量明显减少。另一方面,由于LF精炼渣的脱硫作用使钢液中S含量降低,生成的MnS夹杂物显著

减少。在RH精炼过程中,夹杂物的数量增多。特别是在RH喂钙线和软吹氩结束后,夹杂物增加明显,分别达到了34个/mm²和51个/mm²。且TiN夹杂物也增加明显,这是由于破空后钢液吸氮所致。此外,由于钢水的二次氧化,尖晶石和钙铝酸盐夹杂物数量也在增多,这与开浇炉次夹杂物的结果一致。在中间包时夹杂物数量减少,类型基本不变,一直延续至铸坯(31个/mm²)和轧材中。

如图12(e)所示为尾炉全流程夹杂物大小分布。相比较开浇炉和正常炉,夹杂物较小,尺寸基本集中在0.5~2 μm。如图12(f)所示为尾炉全流程夹杂物数量密度的比较。可以发现,除了在LF精炼进站,MnS夹杂物的数量较大,其余工序夹杂物的数量较低,这可能与加入合金带入的大量硫元素相关。RH过程中MnS夹杂物较少,夹杂物数量比LF少,表明此炉RH硫含量控制较好。破空后夹杂物数量增多至21个/mm²,喂线后夹杂物数量又增多,软吹氩后由于钢液的吸氮作用,TiN夹杂物数量增多。在浇铸末期,中间包中钢水量逐渐减少,夹杂物的数量先减少后增大至45个/mm²,主要的夹杂物为TiN夹杂物。并且在铸坯的不同位置,夹杂物的数量密度呈上下波动(10~38个/mm²)。在铸坯表面发现,尖晶石和钙铝酸盐夹杂物较多,这是由于钢

液凝固过程在液相生成的夹杂物存在一定的上浮行为,这与文献报道的结果是一致的。

2.3 非稳态浇铸条件下全流程洁净度限制性环节

在开浇炉次中,从RH出站至铸坯全氧及氮含量升高,铸坯夹杂物增多,表明浇铸过程中可能发生钢液的吸气和二次氧化。从LF变化至RH, $w[S]$ 由 20×10^{-6} 转变至 31×10^{-6} ,铸坯中 $w[S]$ 达到 31×10^{-6} ,整体硫含量偏高。对应的,LF变化至RH中MnS和CaS夹杂物数量增多。破空结束后,在软吹氩工序中夹杂物数量增加,尖晶石类夹杂物增多,表明在这过程中发生二次氧化。浇铸前中间包夹杂物数量提升,钢水液面波动大,对应的铸坯头部夹杂物数量偏多。

在正常炉次中,从RH出站至铸坯全氧变化较小,氮含量明显增加,表明浇铸过程中也同样可能发生钢液吸气。从LF变化至RH, $w[S]$ 由 12×10^{-6} 转变至 21×10^{-6} ,铸坯中 $w[S]$ 达到 20×10^{-6} ,整体硫含量控制适中。LF变化至RH中MnS和钙铝酸盐夹杂物数量增多。破空结束后,在喂钙线和软吹氩工序中夹杂物数量增加,TiN夹杂物增多,表明在这过程中发生钢水吸气。中间包及结晶器钢水液面趋向稳定,夹杂物能够充分上浮,夹杂物去除效果良好。

在尾炉中从RH出站至铸坯全氧含量降低,氮含量变化较小。从LF至RH, $w[S]$ 由 7×10^{-6} 增加至 9.5×10^{-6} ,铸坯中 $w[S]$ 增加到 10×10^{-6} ,整体硫含量控制较好。相对于开浇和正常炉次,总体夹杂物数量较少。但在RH软吹氩工序及中间包夹杂物数量增加,TiN类夹杂物增多,同样表明在这过程中发生钢水吸气。

3 结论

通过对51CrV4弹簧钢开浇炉、正常炉、尾炉全流程系统取样,解析了弹簧钢带在稳态和非稳态浇铸下洁净度及夹杂物的全流程特征演变规律,找到了洁净度提升的限制性环节。

1)吹氩站出站前及LF精炼入站的夹杂物都为MnS及MnS- Al_2O_3 的复合夹杂物, Al_2O_3 为脱氧产物,MnS在取样过程中凝固析出。LF化渣结束后夹杂物转变为MgO- Al_2O_3 与析出物(MnS、TiN和CaS)复合的夹杂物,MgO- Al_2O_3 为脱氧产物与耐材相互作用的产物。从LF精炼出站至中间包,夹杂物转变为CaO-MgO- Al_2O_3 、CaO- Al_2O_3 、MgO- Al_2O_3 和 Al_2O_3 分别与析出物(MnS、TiN和CaS)复合的夹杂物,CaO为钢渣反应和RH精炼钙处理所生成。遗传至铸坯和轧材中,氧化夹杂物的种类基本没有变化,在氧化物边缘或一侧析出的CaS数量增多,为铸坯在凝固过程中析出。

2)RH喂钙线及软吹氩过程中钢水均发生吸气、二次氧化现象。应调整喂Ca线处理工艺路线,在LF精炼结束后喂Ca线或破空后加入Si-Ca合金,减少或取消喂Ca线处理。此外,精细化调整RH软吹氩氩气流量及时间,以保证不吹开渣面裸露钢水。

3)在非稳态浇铸时开浇炉次中中间包存在二次氧化,且浇铸前期钢水液面波动较大,钢水吸气较为明显,造成氧化物和氮化物夹杂物数量增多。保证开浇时中间包耐材质量,延长浇铸前吹氩时间,浇铸前期控制好钢水液面波动。

4)开浇铸坯头部夹杂物数量偏高,因此开浇炉次头坯距头部3 m处应切除使用。

参考文献

- [1] 喻建林,钟小杰,夏雪生,等.汽车膜片弹簧钢带51CrV4晶界氧化原因分析及改进措施[J].江西冶金,2018,38(2):12-16+20.
- [2] 王清波,张 华,李永超,等.120 t LF精炼渣系对弹簧钢55Si-CrA夹杂物塑性的影响[J].特殊钢,2022,43(1):34-38.
- [3] 孟耀青,郭晓培,赵 垒,等.硅脱氧弹簧钢55SiCr旋转弯曲疲劳断口中外来夹杂物的研究[J].钢铁研究学报,2018,30(12):977-982.
- [4] 宗男夫,费 鹏,刘鸿智,等.轴承钢中夹杂物调控的冶金技术现状及智能化展望[J].铸造技术,2024,45(6):514-522.
- [5] 汪 峥,陈 峰,时 涛,等.不同冶炼工艺GCr15轴承钢中夹杂物致疲劳失效行为的影响[J].特殊钢,2025,46(6):154-164.
- [6] 张立峰,李燕龙,任 英.钢中非金属夹杂物的相关基础研究(I)——非稳态浇铸中的大颗粒夹杂物及夹杂物的形核、长大、运动、去除和捕捉[J].钢铁,2013,48(11):1-10.
- [7] 黄淑媛,杨 健,李广帮,等.薄厚度板坯连铸机非稳态连铸坯中夹杂物分布[J].炼钢,2021,37(5):67-75.
- [8] 肖鹏程,朱立光,刘海春,等.IF钢非稳态连铸坯洁净度定量分析[J].钢铁钒钛,2017,38(3):111-117+139.
- [9] 张春杰.非稳态浇铸对DC06钢种洁净度的影响分析[J].连铸,2017,42(4):21-25.
- [10] 牛 帅,邓 伟,王得炯,等.非稳态浇注对帘线钢洁净度的影响[J].连铸,2023(1):74-81.
- [11] 郎伟昀,王建昌,王 伟,等.连铸非稳态430不锈钢铸坯大型夹杂物分析[J].中国冶金,2024,34(4):118-126.