



不同余钢量对钢水洁净度的影响

任 英¹, 刘中华¹, 王博辰², 路博勋³, 张贺君⁴, 张立峰⁵

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 中冶赛迪工程技术股份有限公司炼铁事业部, 重庆 401122;
3 唐山钢铁集团有限责任公司技术中心, 唐山 063000; 4 唐山钢铁集团有限责任公司炼钢事业部, 唐山 063000;
5 北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘 要: 钢包下渣是钢中大尺寸夹杂物的主要来源之一, 在连铸生产中, 通常通过控制钢包中的残余钢水来避免钢包浇注过程中的涡流卷渣。本文针对钢铁实际生产过程开展不同余钢量浇铸的工业试验, 分析钢中大颗粒夹杂物的特征演变, 研究不同余钢量条件下的钢包下渣情况, 为目标钢种浇铸过程钢包余钢量的合理控制提供参考。试验钢的生产工艺流程为: “转炉→LF 精炼→220 tRH 真空处理→连铸→轧制”, 试验钢中主要夹杂物类型为 Al_2O_3 夹杂物, 冶炼过程中其 Al_2O_3 含量整体呈现上升趋势并在中间包阶段便趋于稳定。随着余钢量的减少, 钢中 T. O 和 T. N 含量会有所提升, 夹杂物的面积分数和数密度变化也符合这一变化规律; 铸坯与轧材中夹杂物的面积分数和数密度越大, 余钢量减小易发生卷渣行为, 余钢 7.4 t 和余钢 9.8 t 时夹杂物分布差距不大, 建议在浇铸过程留钢 7.4 t 左右。在铸坯表层夹杂物主要分布在 2~5 mm 处, 其面积分数和数密度均较高。

关键词: 洁净钢; 夹杂物; 钢包; 余钢量; 浇铸; 铸坯

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00131 **中图分类号:** TF777

Effect of Different Residual Steel Amounts on Molten Steel Cleanliness

Ren Ying¹, Liu Zhonghua¹, Wang Bochen², Lu Boxun³, Zhang Hejun⁴, Zhang Lifeng⁵

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Metallurgical Corporation of China (MCC) CADI Ironmaking Division, Chongqing; 3 Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Research and Development Center, Tangshan 063000, China; 4 Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Steelmaking Division, Tangshan 063000, China; 5 School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Ladle slag carryover is one of the main sources of large-sized inclusions in steel. In continuous casting production, the control of the residual molten steel in the ladle is commonly used to avoid vortex slag entrainment during ladle pouring. This paper conducts industrial trials of casting with different amounts of residual steel in the actual steel production process, analyzes the characteristic evolution of large particle inclusions in steel, and investigates the ladle slag carryover under different residual steel conditions, providing references for the rational control of ladle residual steel during the casting process of target steel grades. For test steel grade xx, the production route is “converter→LF refining→RH vacuum treatment→Continuous casting→Rolling”. The main type of inclusions in the tested steel is Al_2O_3 inclusions, and their Al_2O_3 content shows an overall upward trend during the smelting process and stabilizes in the tundish stage. As the residual steel amount decreases, the T. O and T. N content in steel will increase, and the changes in the area fraction and number density of inclusions are consistent with this change regulation. The larger the area fraction and number density of inclusions in the cast slab and rolled products, the more likely slag entrainment occurs with reduced residual steel. The difference in inclusion distribution is small when the residual steel is 7.4 t and 9.8 t. It is recommended to leave about 7.4 t of steel during the casting process. Inclusions in the surface layer of the cast slab are mainly distributed at 2 mm–5 mm, with relatively high area fraction and number density.

Key Words: Clean Steel; Inclusions; Ladle; Residual Steel Amount; Casting; Cast Slab

随着钢板的逐渐减薄以及冲压变形的增加, 钢中大颗粒夹杂物的存在是导致产品性能降低和缺陷

产生的主要原因之一, 探究钢中大颗粒夹杂物的来源对提升产品质量有重要意义^[1-2]。不少学者针

基金项目: 国家重点研发计划(项目号 2023YFB3709900), 国家自然科学基金资助项目(U22A20171), 中国宝武低碳冶金创新基金(BWLCF202315)

作者简介: 任 英(1989—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** yingren@ustb.edu.cn; **收稿日期:** 2025-05-08

通信作者: 张立峰(1971—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** zhanglifeng@ncut.edu.cn

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

对汽车钢表面缺陷的成因进行了研究,在IF钢缺陷处夹杂物主要为卷渣夹杂物和大颗粒簇状 Al_2O_3 夹杂物。表1总结了不同学者在IF钢表面缺陷处发现的夹杂物类型,并提出了解决措施。大颗粒 Al_2O_3 夹杂物主要生成与脱氧或者钢水二次氧化,卷渣类夹杂物主要来源于精炼渣、中间包覆盖剂和结晶器保护渣的卷渣行为^[3-4]。

钢包下渣是钢中大尺寸夹杂物的主要来源之一,在连铸生产中,通常通过控制钢包中的残余钢水来避免钢包浇注过程中的涡流卷渣^[20]。尽管过量的残余钢水能够确保钢板的表面质量,但钢水的收得率却大幅降低。由于在钢包中发生临界涡流卷渣时残余钢水的量未知,如果残余钢水较少,钢包渣就会流入中间包,少量的钙铝酸盐夹杂物会随着钢水流动进入结晶器,并最终被凝固的坯壳捕获,从而导致钢坯表面出现点状缺陷。在钢坯后续的冲压过程中,这些零星分布且尺寸较大的夹杂物会导致压裂缺陷^[21-22]。因此,有必要研究合适的残余钢水量,并控制钢包浇注过程中的旋涡卷渣量,这对于控制钢水中的大尺寸夹杂物以及提高钢板表面质量具有重要意义。

针对钢铁实际生产过程开展不同余钢量浇铸的工业试验,在不同余钢量条件下取中间包、连铸坯、轧板试样,分析钢中大颗粒夹杂物的特征演变,研究不同余钢量条件下的钢包下渣情况,为目标钢种浇铸过程钢包余钢量的合理控制提供参考。

1 试验步骤及检测方法

试验所取的钢种为IF钢,生产工艺流程为:顶底复吹转炉→220 t LF→RH真空精炼→连铸→轧制。为探究钢包下渣对大颗粒夹杂物生成的影响,针对汽钢展开不同余钢量浇铸的工业试验,钢中 $w[\text{Al}]$ 和 $w[\text{Ti}]$ 分别为0.03%和0.07%,在不同余钢量条件下取中间包、连铸坯试样,分析钢中大颗粒夹杂物的特征演变。针对3炉设置不同余钢量进行试验取样,分别为9.8、7.4、4.4 t。在钢包浇铸末期对钢包重量进行称量,当钢包重量达到预期余钢量时,及时关闭钢包滑板。此外,对于试验炉次的RH、中间包和铸坯进行取样,用于元素含量检测和夹杂物分析。

在RH、中间包过程取得样品均为提桶样,将提桶样下方10 mm高度的圆柱作为金相试样用于夹杂物检测,上方样品用于元素检测,钢中总氧(T.O)和总氮(T.N)的值采用美国LECO公司生产的TCH600氧氮氢分析仪进行检测。对所取的过程样及铸坯样进行切割镶嵌,用全自动扫描电镜分析全流程生产过程中钢中夹杂物的演变规律,设置夹杂物扫描的最小尺寸为5 μm 。利用电镜回位功能寻找卷渣夹杂物,并对其进行拍照和面扫描,单个样品累积扫描面积需达到500 mm^2 以上。

2 全流程洁净度变化

不同余钢量下钢中T.O和T.N的变化趋势如图1所示。可以看出三炉均呈现出先下降后上升的趋势,在余钢量15 t时存在一定的上升趋势,可能是因

表1 汽车缺陷处夹杂物类型及解决措施
Table 1 Types of inclusions in defects and solutions of automobile steels

作者	年份	钢厂	夹杂物类型	措施
Chankraborty ^[5]	1994	-	大颗粒 Al_2O_3 夹杂物	顶渣改质,促进夹杂物上浮
Rocabois ^[6]	2003	-	卷渣夹杂物+ Al_2O_3	增大板坯厚度及保护渣黏度
袁方明 ^[7]	2004	鞍钢	卷渣夹杂物	增大保护渣黏度
王畅 ^[8]	2012	首钢	气泡捕捉夹杂物	优化精炼工艺,优化水口质量
冀云卿 ^[9]	2014	唐钢	卷渣夹杂物+ Al_2O_3	使用FC结晶器,优化水口结构
李向奎 ^[10]	2015	首钢	卷渣夹杂物+ Al_2O_3	延长循环时间,提高保护渣黏度
Yu ^[11]	2015	-	卷渣夹杂物+ Al_2O_3	切割表层,减少夹杂物的影响
陈玉鑫 ^[12]	2016	首钢	大颗粒 Al_2O_3 夹杂物	火焰切割,机清翘皮
邓建军 ^[13]	2017	邯钢	大量小尺寸 Al_2O_3	RH顶渣改制,加强夹杂物上浮
刘小斐 ^[14]	2019	-	卷渣夹杂物	减低连铸速度,增加水口深度
马明胜 ^[15]	2020	酒钢	卷渣夹杂物	降低结晶器液面波动
Deng ^[16]	2020	首钢	卷渣夹杂物+ Al_2O_3	增加围堰结构
Roy ^[17]	2021	塔塔钢铁	卷渣夹杂物	降低浇铸速度,增加控流装置
Deng ^[18]	2022	首钢	簇状 Al_2O_3	稳定钢水温度,减少卷渣行为
Jiang ^[19]	2022	-	卷渣	控制吹氩流量和拉坯速度

为随着浇铸存在部分的渣卷入钢液中。在浇铸过程中,夹杂物持续上浮导致铸坯中的T.O存在一定的下降趋势。从三炉对比来看可以发现在铸坯中,余钢量为4.4 t时钢中T.O是最大的,钢中T.O随着余钢量的增加出现降低的趋势。这是因为余钢量越大越容易在浇铸末期产生卷渣行为,从而导致T.O含量上升。从不同余钢量下钢中T.N含量变化趋势可以看出,不同炉次 $w[T.N]$ 大都稳定在0.001 5%左右,在钢包余钢量220 t时存在一定的二次氧化,导致有一定的T.N含量升高。在铸坯样品中,T.N含量变化趋势和T.O变化趋势相对应,呈现出随着余钢量增加而减少的规律。

不同余钢量下夹杂物中 Al_2O_3 与 TiO_2 含量变化趋势如图2所示。RH阶段夹杂物 $w[Al_2O_3]$ 在70%以上,在中间包浇铸阶段三炉样品夹杂物 $w[Al_2O_3]$ 接近,并上升稳定在93%左右。RH精炼过程中,随着钛铁合金的加入,瞬态生成了一些 TiO_2 夹杂物,随着钛合金的逐渐混匀和钢中铝元素的还原, TiO_2 整体呈现一个下降趋势。而余钢量4.4 t时,连铸坯

的夹杂物中 TiO_2 含量明显低于其他两炉,这是因为余钢量越少,钢液的二次氧化越严重,越容易导致生成更多的 TiO_2 夹杂物。

不同余钢量对夹杂物数量和尺寸的影响如图3所示。由于夹杂物主要为 Al_2O_3 夹杂物,在冶炼过程中随着其上浮行为,整体面积分数及数密度呈现出下降的趋势。从面积分数的变化可以看到,当余钢量为9.8 t时夹杂物的面积分数始终处于一个较低水平,并且在铸坯和轧材样品中是最低的。可以发现夹杂物的面积分数随着余钢量增加而减少,这是因为随着浇铸进行,会有部分渣以卷渣类夹杂物的形式进入钢液,从而增大了夹杂物的面积分数。从数密度变化可以看到其规律与面积分数变化相似,但在铸坯与轧材样品中,余钢量7.4 t时的夹杂物数密度略低于余钢量为9.8 t,结合面积分数的变化规律,可以发现余钢量为9.8 t时夹杂物团簇较弱,大块的 Al_2O_3 夹杂物较少。从最大直径变化可以看到,余钢量越多,夹杂物最大直径越小,夹杂物的团簇行为越弱,并且越不易导致卷渣类夹杂物的出现,

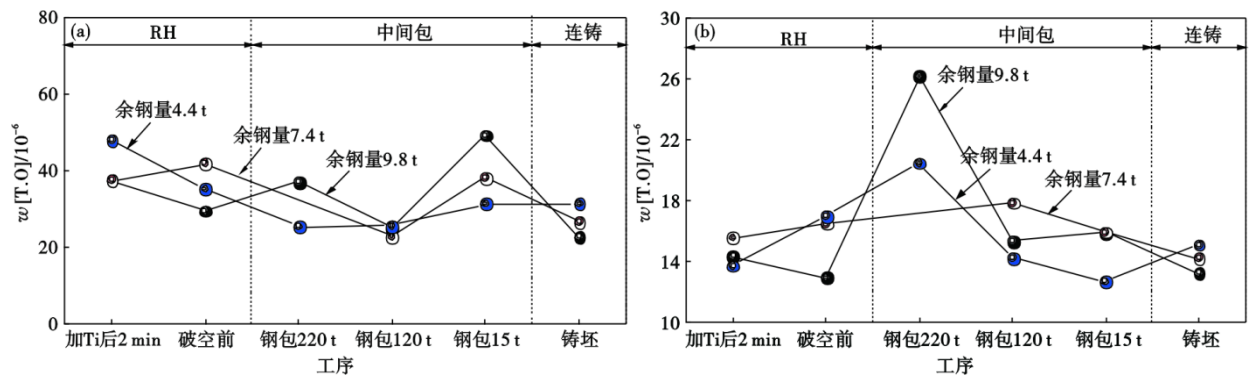


图1 余钢量对钢中T.O和T.N含量的影响:(a) $w[T.O]$, (b) $w[T.N]$
Fig. 1 The effect of residual steel amounts on T. O and T. N contents of steel: (a) $w[T.O]$, (b) $w[T.N]$

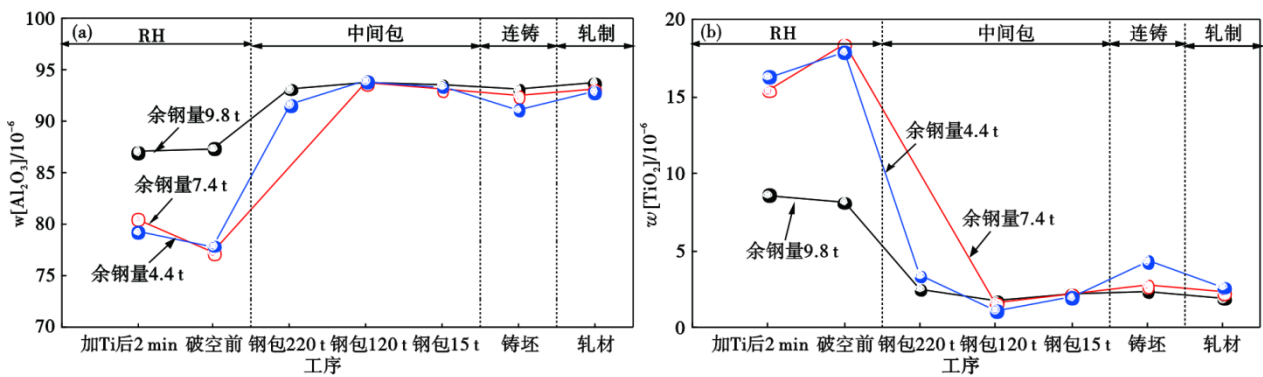


图2 余钢量对全流程夹杂物成分的影响:(a) Al_2O_3 含量, (b) TiO_2 含量

Fig. 2 The effect of residual steel amounts on the composition of inclusions in steel during the entire production process: (a) Al_2O_3 content, (b) TiO_2 content

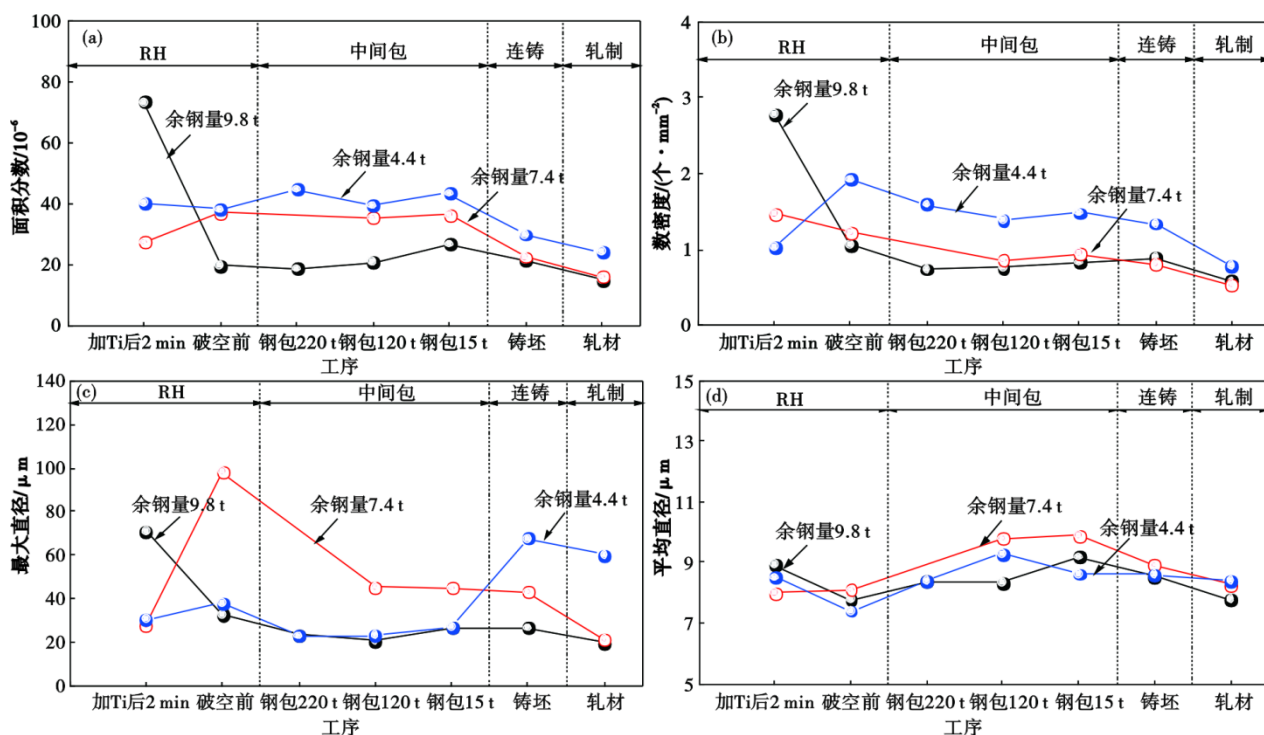


图 3 余钢量对全流程夹杂物数量和尺寸的影响:(a)面积分数,(b)数密度,(c)最大直径,(d)平均直径

Fig. 3 The effect of residual steel amounts on the number and size of inclusions in steel during the entire production process : (a) area fraction, (b) number density, (c) maximum diameter, (d) average diameter

这与数密度和面积分数的变化规律相对应。在铸坯样品中发现较多簇状 Al_2O_3 夹杂物,但其直径随着余钢量的增大,呈现出变小的规律,这也与整体变化规律相互呼应。从平均直径的变化可以看出,夹杂物整体的平均直径变化不大,维持在 $8.5 \mu m$,在冶炼后期,也呈现出轻微的下落趋势。余钢量为 $9.8 t$ 时的夹杂物由于较弱的团簇行为,其平均直径也略低于其他两炉钢中夹杂物的平均直径。

不同余钢量时钢中夹杂物的尺寸分布如图 4 所示。当余钢量为 $4.4 t$ 时,钢中夹杂物的最大直径为 $67.3 \mu m$ 。对比分析发现,余钢 $7.4 t$ 和余钢 $9.8 t$ 时夹杂物分布差距不大,建议在浇铸过程留钢 $7.4 t$ 左右,既能有效避免余钢量过低引发的大量卷渣,又能最大限度减少钢水浪费。

3 连铸坯中夹杂物的分布

铸坯窄面中心位置表层夹杂物数量和尺寸的变化趋势如图 5 所示。图中三角符号代表着取得正常坯所扫描的结果,交接坯处夹杂物数密度始终大于正常坯。三炉交接坯均在距离内弧 $2\sim 5 mm$ 处有较多夹杂物聚集,面积分数和数密度较大。并且在聚集区域随着留钢量的增加,夹杂物的面积分数呈现出减小的趋势,这与先前的规律相吻合。与正常

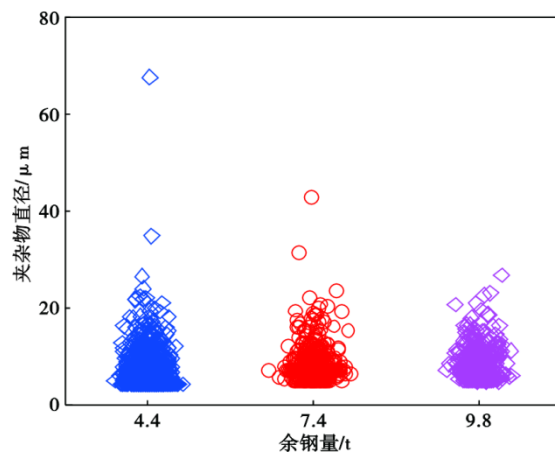


图 4 不同余钢量时钢中夹杂物的尺寸分布

Fig. 4 The size distribution of inclusions with various residual steel amounts

坯相比,在距离内弧 $0\sim 6 mm$ 区域交接坯处夹杂物面积分数较大。并且三炉样品均稳定在 1.0 左右并呈现出缓慢下降的趋势。

铸坯宽面中部位置处表层夹杂物面积分数和数密度的变化趋势如图 6 所示。与正常坯相比,交接坯中夹杂物面积分数明显较高,在 $2\sim 5 mm$ 处夹杂物数密度略高,并且随后呈现出缓慢减少的趋势,与铸坯窄面表层夹杂物规律相似。随着留钢量

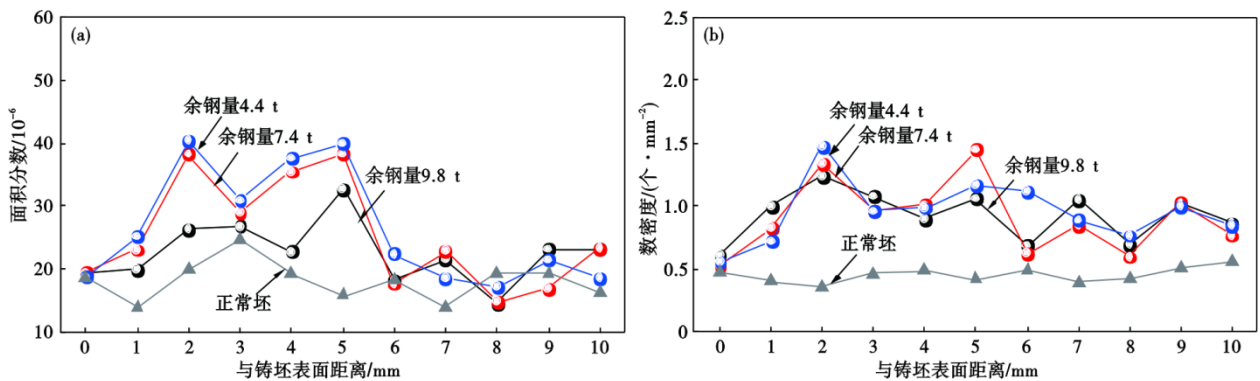


图 5 不同余钢量对铸坯窄面表层夹杂物数量和尺寸的影响:(a)area fraction, (b)number density

Fig. 5 The effect of different residual steel amounts on the number and size of inclusions in the narrow surface of slabs: (a) area fraction, (b) number density

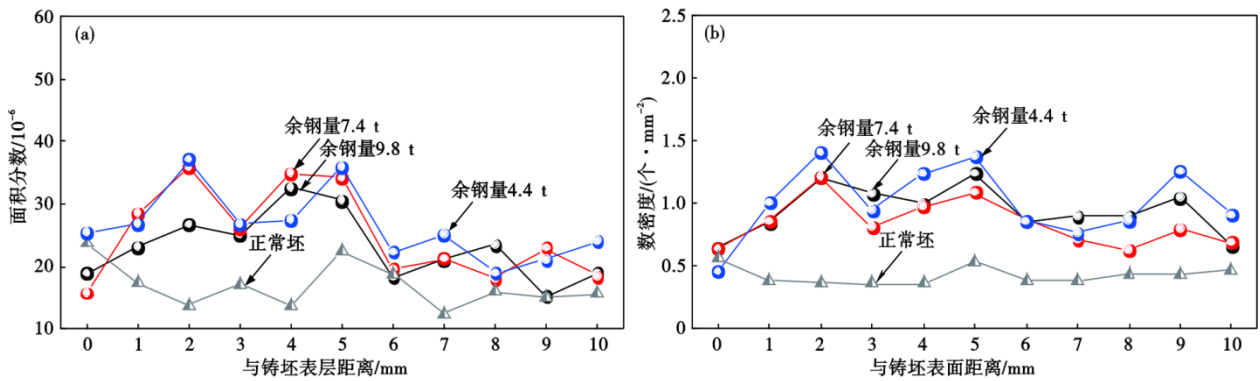


图 6 不同余钢量对铸坯中部夹杂物数量和尺寸的影响:(a)area fraction, (b)number density

Fig. 6 The effect of different residual steel amounts on the number and size of inclusions in the wide surface of slabs: (a) area fraction, (b) number density

降低,夹杂物数密度和面积分数整体呈现逐渐增加的趋势。

通过使用自动扫描电镜对示踪试验中 RH、中间包、铸坯样品进行扫描,对粒径 5 μm 以上的夹杂物进行扫描统计并寻找大颗粒卷渣类夹杂物,使用自动扫描电镜的回位功能进行手动拍摄卷渣类夹杂物形貌,将发射电子得到夹杂物的元素成分转化为氧化物与硫化物的形式。连铸坯表层典型夹杂物形貌和成分如图 7 所示,钢中存在尺寸在 50 μm 以上的夹杂物,夹杂物的主要成分为 CaO 和 Al₂O₃,含有少量的 SiO₂ 和 MgO,成分与钢包渣和中间包覆盖剂接近,说明夹杂物可能来源于精炼渣或中间包覆盖剂卷渣,此类大尺寸夹杂物容易在连铸坯表层分布。

4 结论

1)随着余钢量的减少,钢中 T.O 和 T.N 含量会有所提升,夹杂物的面积分数和数密度变化也符合这一变化规律。当余钢量为 4.4 t 时,铸坯中夹杂物的

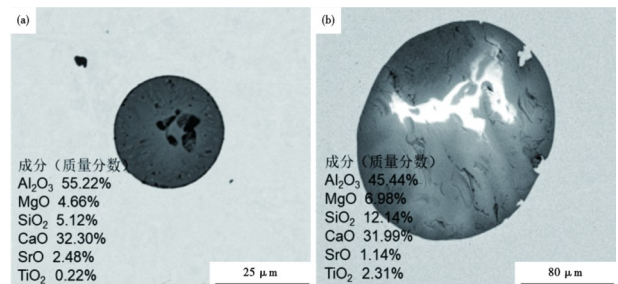


图 7 连铸坯表层典型夹杂物形貌和成分

Fig. 7 Morphology and composition of typical inclusions in the surface of continuous casting slabs

面积分数为 29.9×10⁻⁶,数密度为 1.34 个/mm²,但当余钢量为 9.8 t 时,铸坯中夹杂物的面积分数为 21.6×10⁻⁶,数密度为 0.89 个/mm²。这表明余钢量越小越容易发生卷渣行为,同时,余钢 7.4 t 和余钢 9.8 t 时夹杂物分布差距不大,建议在浇铸过程留钢 7.4 t 左右,既能有效提升钢的产量,又可避免因卷渣导致的钢坯质量缺陷,有效均衡了产品质量和生产成本。

2)随着钛铁合金的加入,钢中瞬态生成了一些TiO₂夹杂物,随着钛合金的逐渐混匀和钢中铝元素的还原,TiO₂整体呈现一个下降趋势。余钢量越少,钢液的二次氧化越严重,越容易导致生成更多的TiO₂夹杂物。

3)在铸坯表层夹杂物主要分布在2~5 mm处,其面积分数和数密度均较高。随着留钢量的增加,夹杂物的面积分数呈现出减小的趋势。与铸坯窄面表层夹杂物相比,铸坯宽面表层夹杂物的数密度与面积分数较高。

参考文献

- [1] 张立峰. 钢中非金属夹杂物[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [2] 张立峰. 钢中非金属夹杂物: 工业实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [3] 张立峰, 李燕龙, 任英. 钢中非金属夹杂物的相关基础研究(1)——非稳态浇铸中的大颗粒夹杂物和钢液中夹杂物的形核长大、运动碰撞、捕捉去除[J]. 钢铁, 2013, 48(11): 1-10.
- [4] 张立峰, 任英. 精炼渣的夹杂物容量的概念及其应用[J]. 钢铁, 2023, 58(2): 47-60.
- [5] Chakraborty S, Hill W. Reduction of alumina slivers at Great Lakes No. 2 CC [A]. Steelmaking Conference [C]. 1994: 389-395.
- [6] Rocabois P, Pontoire J, Delville V, et al. Different slivers type observed in sollar steel plants and improved practice to reduce surface defects on cold roll sheet [A]. Iron and Steel Society International Technology Conference and Exposition [C]. 2003: 995-1006.
- [7] 袁方明, 王新华, 刘秀梅, 等. IF钢连铸板坯表面夹渣缺陷的研究[J]. 连铸, 2004, 29(6): 32-34+31.
- [8] 王畅, 徐海卫, 任群, 等. 冷轧产品表面亮带类缺陷成因及预防措施[J]. 物理测试, 2012, 30(6): 41-45.
- [9] 冀云卿, 王新华, 邓小旋, 等. 冷轧薄板表面缺陷成因研究及控制[J]. 炼钢, 2014, 30(2): 22-25.
- [10] 李向奎, 张丙龙, 陈玉鑫, 等. 冷轧板表面夹杂缺陷成因及控制[J]. 中国冶金, 2015, 25(12): 54-58.
- [11] Yu H X, Ji C X, Chen B, et al. Characteristics and evolution of inclusion induced surface defects of cold rolled IF sheet [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22: 17-23.
- [12] 陈玉鑫, 朱国森, 王莉, 等. FD级镀锌钢卷的表面质量控制[J]. 中国冶金, 2016, 26(6): 28-32.
- [13] 邓建军, 王睿, 郝阳, 等. IF钢冷轧板表面条状缺陷成因及控制[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(2): 156-160.
- [14] 刘小斐, 赵顺利, 盖彦青. 热镀锌IF钢表面线状缺陷形成原因分析[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(3): 152-157.
- [15] 马明胜, 刘佳伟. IF钢冷轧板起皮缺陷原因分析与控制[J]. 河北冶金, 2020(1): 27-33.
- [16] Deng X X, Liu G L, Wang Q Q, et al. Effect of the weir structure in the tundish on the cleanliness of IF steels and elimination of spot-like defects in deep drawing automobile steel sheets [J]. Metallurgical Research & Technology, 117(6): 609.
- [17] Roy T K, Balakrishnan V, Suresh S. A study on the resolution of pin-dent defects in automotive door panels [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021, 21(2): 518-524.
- [18] Deng X X, Li H B, Ji C X, et al. Formation mechanism of point-like defect in IF steel sheet during deep drawing process [J]. Metallurgical Research and Technology, 2022, 119(4): 411-418.
- [19] Jiang D B, Peng X X, Ren Y, et al. Water modeling on slag entrapment in the slab continuous casting mold [J]. Metallurgical Research and Technology, 2022, 119(6): 601-611.
- [20] 宋景凌, 周旋, 李恒华. 石油套管用37 mn5钢全流程洁净度分析及工艺改进[J]. 特殊钢, 2023, 44(4): 58-64.
- [21] 倪有金, 黄福祥, 龚坚, 等. 汽车板线状卷渣缺陷研究及控制实践[J]. 连铸, 2025, 50(2): 109-117.
- [22] 孙昊, 李朝阳, 张丽颖, 等. 薄板坯连铸连轧工艺下SPHC线状缺陷成因分析[J]. 连铸, 2025, 50(2): 22-27.