

IF 钢连铸头坯质量的研究

李 彬, 马 鑫, 段云波, 宿 成

(内蒙古包钢稀土钢板材有限责任公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 针对某钢厂生产的 IF 钢, 对头坯的表面质量、皮下气泡、中心疏松、中心偏析、氧氮含量和夹杂物进行研究, 并对头坯轧制缺陷进行跟踪和采用火焰扒皮处理。研究表明: 头坯表面质量和皮下气泡均随着铸坯长度的增加而逐步改善; 内部质量中心疏松级别在铸坯长度 1 m 处存在超标现象, 而中心偏析未见异常; 氧和氮含量均沿铸坯长度的增加呈降低趋势; 夹杂物主要为 Al_2O_3 、TiN 和 $Al_2O_3 - TiN$ 复合夹杂物, 其数量随着铸坯长度的增加而逐渐减少; 在头坯 1 m 处存在 $Al_2O_3 - MgO - CaO$ 大型复合夹杂物; 头坯轧制缺陷主要为脱氧产物 Al_2O_3 类和结晶器液位波动卷渣类的皮下夹杂缺陷; 火焰扒皮处理可以有效提高头坯质量。

关键词: 超低碳钢; 连铸头坯; 夹杂物; 手工清理; 洁净度

中图分类号: TF777.1

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2022)02 - 0012 - 07

Research on Quality of Continuous Casting Head Slab of Interstitial Free (IF) Steel

Li Bin, Ma Xin, Duan Yun-bo, Su Cheng

(Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Steel Plate Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The surface quality, rimhole, center porosity, center segregation, contents of oxygen and nitrogen and inclusions for the head slab of IF steel produced by a steel mill are studied as well as the rolling defects of head slab are tracked and with the treatment of peeling with flame. The study results showed that the surface quality and rimhole of head slab were improved with the increase of slab length; level of center porosity for internal soundness exceeded the standard at slab length of 1 m, while there was no abnormality seen for center segregation; contents of oxygen and nitrogen tended to decrease with the increase of slab length; number of such inclusions as Al_2O_3 , TiN and complex inclusion of $Al_2O_3 - TiN$ decreased with the increase of slab length; there was large complex inclusion of $Al_2O_3 - MgO - CaO$ at 1 m of head slab; main rolling defects of head slab were such subcutaneous inclusion defects as deoxidation product of Al_2O_3 and slag entrapment of mould level fluctuation; quality of head slab could be effectively improved with the treatment of peeling with flame.

Key words: ultra-low carbon steel; continuous casting head slab; inclusion; manual finishing; cleanliness

IF 钢 (Interstitial Free Steel), 即无间隙原子钢, 是采用 Ti、Nb 等强碳氮化合物形成元素, 将超低碳钢中的 C 和 N 等间隙原子完全固定为碳氮化合物

的洁净铁素体钢。由于钢中没有间隙原子, 使其具有优越的深冲性能, 而广泛应用于汽车面板、家电面板、易拉罐、电动汽车电池壳等领域, 对其深冲性能

及表面质量要求极为苛刻^[1]。

由于连铸生产的连续性,不可避免地出现开浇、停浇、漏钢预报警、换钢包和更换浸入式水口等情况,此类情况下钢水液面、拉速、流场均可能出现波动,进而引起较为严重的卷渣和吸气行为,这将对 IF 钢连铸坯的洁净度产生严重的影响。现今,为保证产品质量稳定,各钢厂通常将非稳态工艺产生的铸坯进行降级或报废的处理,而此方法采用会造成铸坯的“错判”或“漏判”,导致产品成材率下降,影响企业生产成本。作者重点对稀土钢板材公司超低碳钢坯不同长度位置的质量变化规律进行研究,

为后续铸坯质量评级判定、优化切割定尺和相应措施的采取提供了相关的参考依据。

1 工艺条件

稀土钢板材公司的 IF 钢生产流程为:KR 法铁水预处理装置→240 t 顶底复吹转炉→260 t RH 真空精炼炉→连铸。采用立弯式板坯连铸机进行浇注,断面规格为 230 mm × 1 400 mm,正常拉速为 1.2 ~ 1.3 m/min,中间包内钢水过热度为 30 ~ 45 °C。中间包钢水实测熔炼化学成分平均值和企业质量计划内控要求值见表 1。

表 1 IF 钢化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	P	S	Al _l	Ti
平均值	0.002 1	0.026	0.17	0.011	0.004	0.039	0.057
内控值	≤0.003 0	≤0.030	0.12 ~ 0.20	≤0.015	≤0.010	0.025 ~ 0.050	0.052 ~ 0.067

2 取样和分析方法

连铸开浇时,切取 6 m 铸坯下线。如图 1 所示,从头坯头部起,沿拉坯方向每隔 1 m 切取一块 80 mm 低倍坯样,共计取 5 块,另取 1 块正常稳态坯

试样做比对。后续在每块坯样边部、宽度 1/4 处内弧侧 1/4 部位和宽度 1/2 处中心部位分别切取气体样(Φ5 mm × 5 mm 粒状样)和金相样(20 mm × 20 mm × 20 mm),具体取样位置见图 2。

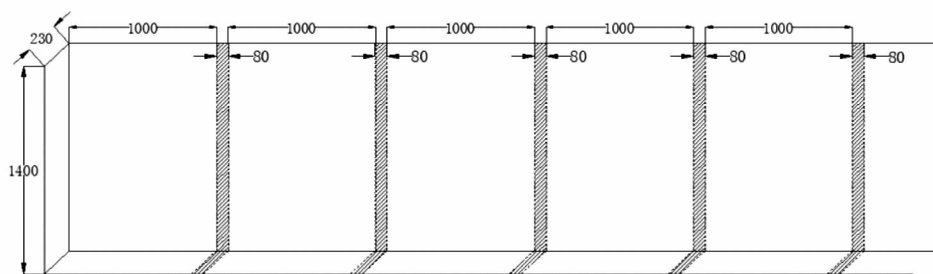


图 1 试样切取位置示意图

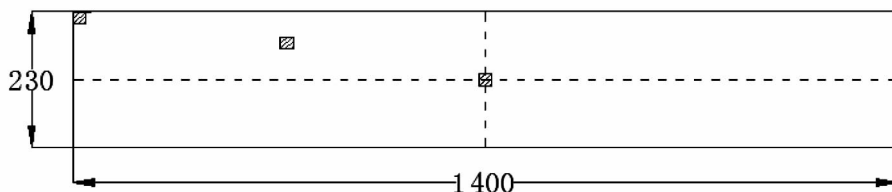


图 2 铸坯样取样示意图

依据 YB/T 2012—2014《连续铸钢板坯》^[2],对分切取样前的头坯表面和皮下质量进行质检判定。利用铣磨一体机床对分切低倍试样进行磨光加工,

为避开切割热影响区,要求加工深度大于 25 mm,检验面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$,经 H-2 冷酸试剂腐蚀后依据 YB/T 4003—2016《连铸钢板坯低倍组织缺陷

评级图》评级^[3]；使用氧氮分析仪对氧、氮含量检测，其中氧含量采用 GB/T 11261—2006^[4] 分析，氮含量检测采用 GB/T 20124—2006^[5]；利用奥林巴斯倒置显微镜，将经过粗磨、细磨（6 道砂纸）和抛光的金相试样进行观察并统计夹杂物的数量和尺寸；采用扫描电镜及能谱分析对夹杂物组成及形态进行检验。

3 试验结果和讨论

3.1 表面质量

经对头坯表面质量检查，发现距头部 0.3 m 内有 3 处表面夹渣缺陷，距头部约 1.6 m 区域内存在紊乱深振痕。通过对头坯表面氧化铁皮进行深度约 0.5 mm 手工火焰清理，观察到除距头部约 1.5 m 内有皮下气泡聚集外（见图 3），其余均为深度小于 3 mm 零星微小皮下针孔缺陷，且此类针孔缺陷在热轧加热过程中绝大部分会伴随产生的氧化铁皮被氧化烧损，对产品质量基本无影响。根据振痕变化规律和皮下气泡分布，分析认为由开浇扰动液位不稳定和拉速波动等造成铸坯卷渣和皮下气泡缺陷的产生。



图 3 皮下气泡缺陷

3.2 低倍分析

因钢种和产品对应的用途不同，所以对连铸坯的中心缺陷提出不同要求。若 IF 钢的中心缺陷不满足使用条件，会使轧材钢带沿着厚度方向力学性能变差，尤其是冲击韧性不合格造成产品冲压开裂。从表 2 可知，除距头部 1 m 试样的心部 1/2 区域有长 120 mm 中心疏松 2.0 级外，其余低倍试样检验结果均满足中心偏析小于 C 类 1.0 级、中心疏松小于 1.0 级内控要求。分析认为首炉钢水过热度高和

开浇头坯相对二冷强度高，造成铸坯表面与凝固前沿温度梯度大，有利于柱状晶生长，容易形成局部搭桥或穿晶结构，导致中心疏松加重。

表 2 低倍检验结果

取样位置	中心偏析	中心疏松	级
1 m	0.5	2.0	
2 m	0.5	0.5	
3 m	0.5	0.5	
4 m	0.5	0.5	
5 m	0.5	0.5	

3.3 氧、氮分析

钢中的氧在固体状态下是以氧化物夹杂的形式存在，因此钢中全氧含量可以作为评价钢水洁净度的一项重要指标。钢中氧含量的变化能反映顶渣传氧、夹杂物上浮、空气氧化、耐火材料污染等各项因素共同作用下对钢水洁净度的影响。钢中氮含量则反映出钢水与空气接触二次氧化的程度。如果钢中氮含量过高，还会影响 IF 钢的深冲性能^[6]。

图 4、图 5 分别为氧氮两种元素沿着头坯拉坯方向和宽度方向的分布情况，其中在宽度方向两种元素分布相对均匀，铸坯边部、宽度 1/4 和中心部位无明显的偏析现象；而在拉坯长度方向两种元素的含量均呈下降趋势，从 4 m 以后逐步接近正常稳态坯检测值，氧含量为 0.001 2%，氮含量为 0.001 0%。综合分析认为，开浇首炉钢水由于受到大气二次氧化、引流砂进入钢中、拉速变化和结晶器液面波动等因素的影响，会造成头坯氧、氮等元素含量升高和夹杂物增加，随着浇注过程的进行，其干扰因素的减少且拉速处于平稳，氧、氮等元素含量相应降低。

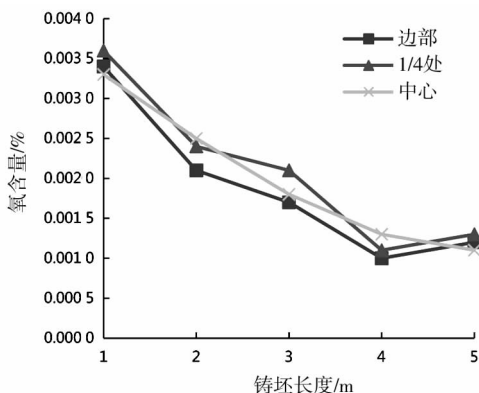


图 4 氧含量分布

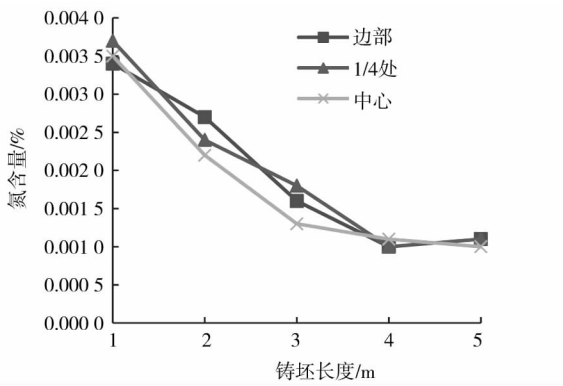


图5 氮含量分布

3.4 金相分析

采用传统“数夹杂”的方法,对6组不同位置共36个金相试样进行观察(含1组正常稳态坯对比样)。每个金相试样在100倍显微镜下观察约650个视场,并统计单位面积每组试样的夹杂物平均数量。

3.4.1 小于50 μm 夹杂物分析

从图6可以看出,头坯中随着铸坯长度的增加,单位面积内尺寸小于50 μm 夹杂物数量逐渐减少,且5 m以后夹杂物数量与正常稳态坯试样检测值

0.21 个/mm² 相近。

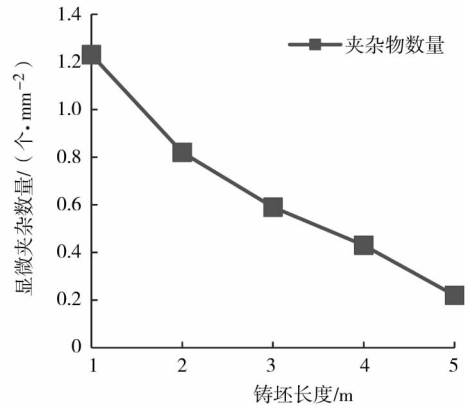


图6 小于50 μm 夹杂物数量分布

通过扫描电镜与能谱检测,发现头坯中夹杂物以 Al₂O₃、TiN 和 Al₂O₃ - TiN 的复合夹杂为主。分析夹杂物来源:

(1)IF 钢为铝镇静钢,Al₂O₃ 夹杂物尺寸较小,一般在10 μm 以内,数量众多,以颗粒状存在,分析认为以钢中未能及时上浮而滞留的脱氧产物为主,见图7。

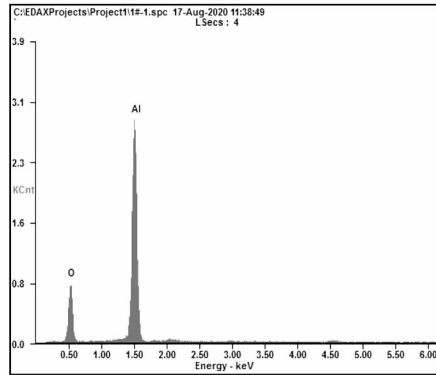
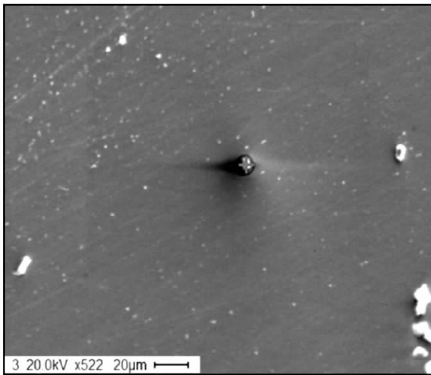


图7 Al₂O₃ 夹杂物组成和形态

(2)TiN 夹杂物尺寸偏小,通常在2~5 μm,基本是以立方体存在,见图8。TiN 夹杂物在钢液中不容易生成,只有在凝固过程中由于温度降低使 TiN 在钢中过饱和度降低,外加 Ti 在凝固前沿的偏析程度加重最终导致直接析出^[7];根据反应式(1)可知^[8],开浇钢水与空气接触过程吸氮严重,会导致钢水凝固过程中正向反应,使 TiN 夹杂物数量增加。



$$\Delta G_0 = -291\,000 + 107.91 T$$

(3)Al₂O₃ - TiN 复合夹杂物一般尺寸较小,多数在5 μm 以下且在钢中大量分布。此类复合型夹杂物心部是细小的 Al₂O₃,外围多是方形 TiN,少数为多边形 TiN,见图9。说明复合夹杂物是以 Al₂O₃ 的异质形核为中心,在 Al₂O₃ 基础上钢中的 Ti 和 N 形成 TiN 并长大。

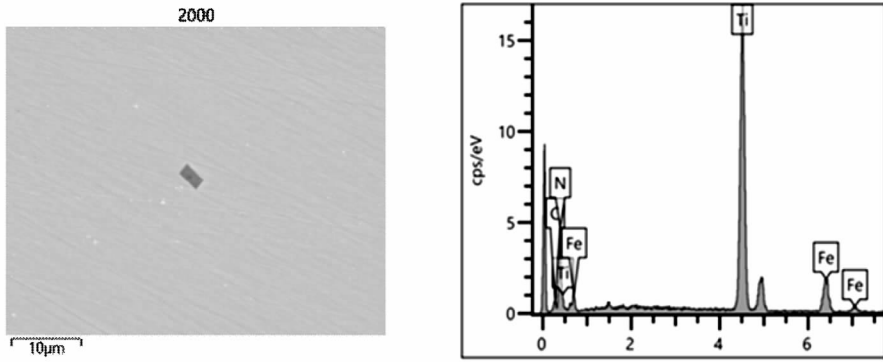
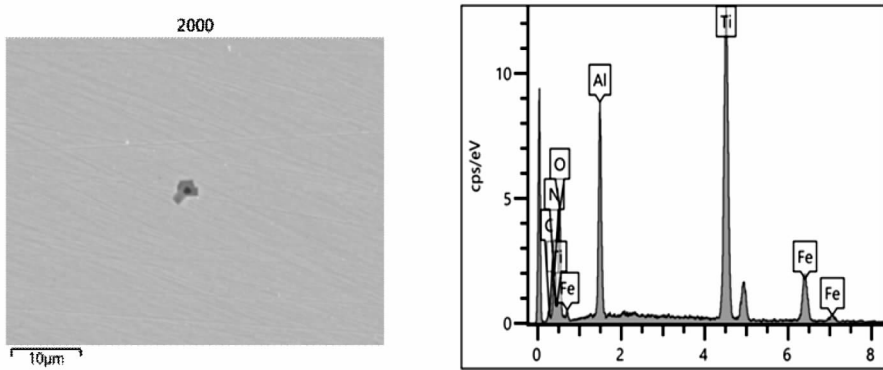


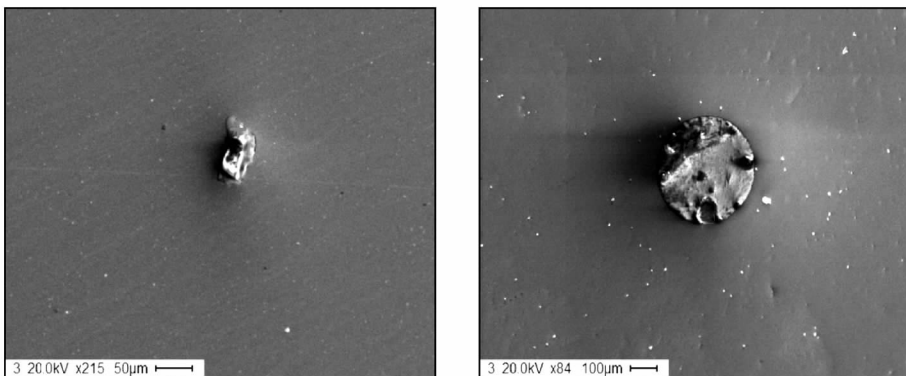
图 8 TiN 夹杂物组成和形态

图 9 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiN}$ 复合夹杂物组成和形态

3.4.2 大型夹杂物分析

大型夹杂物对 IF 钢的深冲性能和表面质量均有很大危害,参考文献[6]认为超深冲汽车钢板铸坯中有害夹杂物“临界尺寸”为 $100\ \mu\text{m}$ 。经金相观

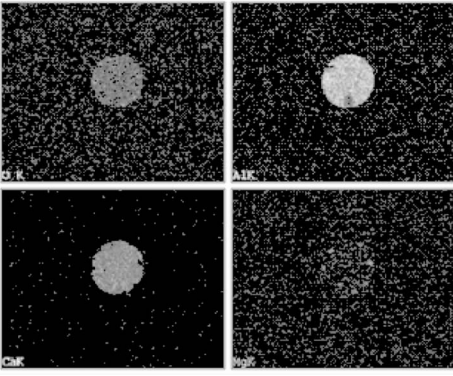
察、扫描电镜与能谱分析,发现铸坯距头部 1 m 的区域存在球状和不规则状的 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{CaO}$ 大型复合夹杂物,最大尺寸约 $300\ \mu\text{m}$,见图 10 和图 11。分析认为可能来源于脱氧产物和耐材的反应产物。



(a) 不规则状

(b) 球状

图 10 不同形貌夹杂物

图 11 球状 $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 复合夹杂物

4 产品缺陷分析

根据实际生产情况,IF 钢头坯在正常投入轧制后容易出现皮下夹杂缺陷并且沿铸坯拉坯方向逐渐减少。经统计,将钢板缺陷位置折算成对应铸坯长度,一般距头部 3.5 m 以外的铸坯质量相对稳定。同时,通过扫描电镜和能谱分析,皮下夹杂缺陷主要来源于脱氧产物 Al_2O_3 类和结晶器液位波动卷渣类,见图 12、图 13。

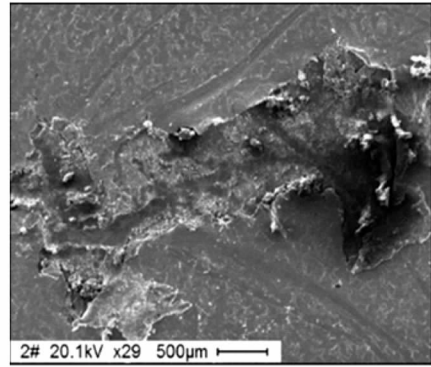
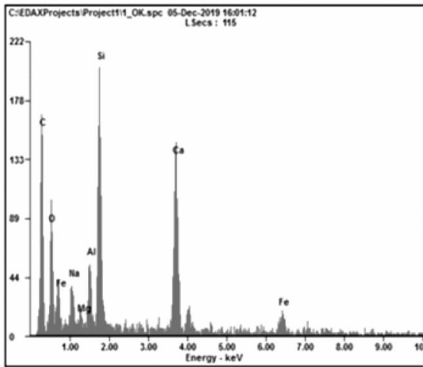
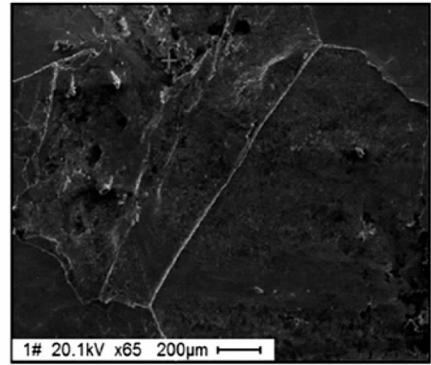
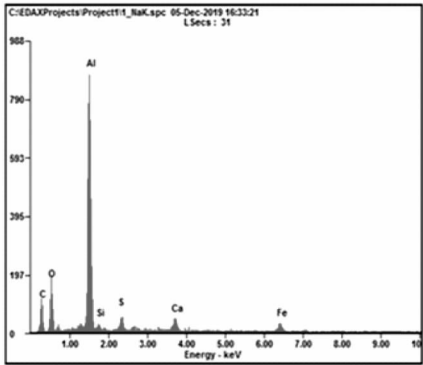


图 12 卷渣类皮下夹杂组成和形态

图 13 Al_2O_3 类皮下夹组成和形态

5 火焰清理工艺实施

依据同行业钢厂经验和参照相关文献资料,皮下夹杂主要分布在铸坯厚度 3 ~ 10 mm 位置,采取手工火焰清理工艺可以大幅减少连铸坯表层夹杂缺陷,有效提高连铸坯轧制钢带质量^[9-10]。对头坯 5 m 区域进行深度 3 ~ 5 mm 四面扒皮手工清理处

置,过程要求多条平行清理,每条宽度控制 30 ~ 50 mm,并且衔接枪位需压枪在上一枪清理条宽的 1/4 ~ 1/2 处;铸坯角部和表面圆滑过渡,每枪之间要衔接良好,不得有陡峭的深坑等。经统计分析 2021 年 1—12 月热卷钢带数据,头坯轧制皮下缺陷率由原先平均 13.14% 下降到 8.55%,降幅约 35%,效果明显。

6 结论

(1) 头坯表面质量和皮下气泡均沿铸坯长度增加逐步改善,当长度大于1.6 m后基本趋于稳定。

(2) 头坯中心疏松级别在铸坯长度1 m处存在超标现象,而中心偏析未见异常。

(3) 头坯中氧、氮含量均沿铸坯长度的增加呈降低趋势,并且长度大于4 m后与正常稳态坯的水平接近。

(4) 头坯中夹杂物数量随着铸坯长度的增加呈减少趋势,并且在长度5 m处达到正常稳态坯的水平;夹杂物组成主要为 Al_2O_3 、TiN和 Al_2O_3 -TiN的复合夹杂物,且在头坯1 m处发现大型 Al_2O_3 -MgO-CaO复合夹杂物,最大尺寸约300 μm 。

(5) 头坯轧制钢板产品缺陷主要为脱氧产物 Al_2O_3 类和结晶器液位波动卷渣类皮下夹杂,一般产生于距铸坯头部3.5 m以内,通过采取人工火焰扒皮清理工艺,可有效改善头坯质量。

参 考 文 献

[1] 陈俊杰,刘建华,刘建飞,等. IF钢连铸坯表层夹杂物[J]. 北京科技大学学报,2011,33(1):

173-178.

[2] YB/T 2012—2014. 连续铸钢板坯[S].

[3] YB/T 4003—2016. 连续铸钢板坯低倍组织缺陷评级图[S].

[4] GB/T 11261—2006. 钢铁氧含量的测定脉冲加热惰性气体熔融—红外线吸收法[S].

[5] GB/T 20124—2006. 钢铁氮含量的测定惰性气体熔融热导法(常规法)[S].

[6] 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):112-116.

[7] 王敏,包燕平,崔衡. IF钢中 Al_2O_3 -TiN复合夹杂生成机理研究[J]. 钢铁研究学报,2010,22(7):29-32.

[8] 傅杰,朱剑,迪林. 微合金钢中TiN的析出规律研究[J]. 金属学报,2000,36(8):801-804.

[9] 严文涛,史永强,陈科. SPHC系列钢种连铸坯表层夹渣缺陷手工清理工艺改进研究[J]. 工艺与技术,2017,(18):98-99.

[10] 逯登尧,王金海,刘蕾. 连铸坯表面夹渣分析及预防措施[J]. 山东冶金,2008,30(1):49-51.

(上接第7页)

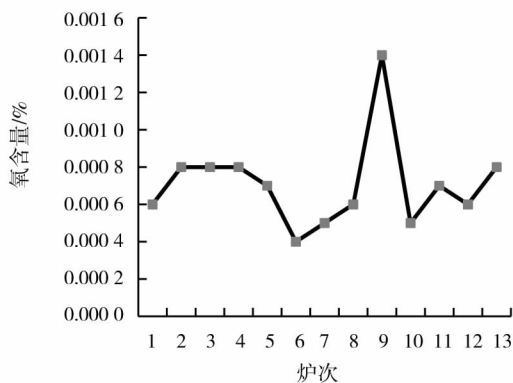


图3 工序过程中间包氧含量控制图

4 结论

(1) 通过优化高磁感取向硅钢转炉、RH炉、铸机全产线工艺,稀土钢板材公司实现了高磁感取向硅钢13炉次稳定连浇,铸坯化学成分稳定,性能良好,满足下游工序轧制需求。

(2) 通过RH炉环流全程采用氮气,同时利用真空环境控制钢水氮含量,钢中氮含量可以控制在

0.007 0%~0.008 3%之间,满足取向硅钢AlN形成所需条件。

(3) 通过RH工序四次微调成分,可以精确调整冶炼过程中钢水多种成分含量在较窄范围内,满足成分设计要求。

参 考 文 献

[1] 杨明波,谭磊,李上民. 高磁感取向硅钢研究开发的关键工艺及其研究进展[J]. 重庆理工大学大学学报(自然科学版),2021,35(4):1-3.

[2] 陈颖,刘静,程朝阳,等. 无取向硅钢RH精炼过程中夹杂物行为研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版),2019,42(1):1-7.

[3] 卢晓禹,王少炳,黄利,等. 取向硅钢热轧钢带BTQ001研制与开发[J]. 特殊钢,2020,41(5):38-41.

[4] 杨丽,孙雅平. 薄板连铸连轧生产取向硅钢100HD的试制研究[J]. 电工钢,2021,3(3):17-20.