



LF精炼结束后软吹时间对帘线钢LX82 A 夹杂物控制的影响

赵昊乾^{1,2,3}, 张育明^{1,2,3}, 马博^{1,2,3}, 巩延杰^{1,2,3}, 孟耀青⁴

(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 2 河北邢钢科技有限公司, 邢台 054799; 3 河北省线材技术创新中心, 邢台 054027; 4 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要:针对帘线钢夹杂物控制, 通常选择长时间软吹处理提高钢水洁净度, 但会导致镁碳砖侵蚀加剧。通过工业生产试验, 使用FEI Explorer 4自动扫描电镜, 研究LF精炼结束后软吹时间对帘线钢盘条夹杂物成分、数量的影响; 并采用贝卡标准评分和神户标准Max-T(ave)评分进行盘条夹杂物评价。结果表明, LF精炼结束后软吹时间45 min与软吹时间25 min生产工艺对比, 盘条中尺寸大于3 μm的氧化物夹杂成分基本类似, 夹杂物密度分别为135个/100 mm²、103个/100 mm², LF精炼结束后软吹时间25 min工艺夹杂物数量密度略低。扩大对比试验数量, 盘条贝卡标准评分和神户标准Max-T(ave)评分表明, LF精炼结束后软吹时间20~25 min的夹杂物控制并未变差或略有改善趋势。帘线钢中低熔点夹杂物的控制主要通过控制Al含量、精炼渣等工艺参数, 而导致最终产品失效的夹杂物往往与内生夹杂物类型不一致, 对于帘线钢而言, 可以考虑降低LF精炼结束后软吹时间。

关键词:帘线钢; LF精炼; 软吹时间; 夹杂物; Al₂O₃含量

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00099 **中图分类号:**TF769. 2

Effect of LF Soft Bubbling Time on Inclusions in Tire Cord Steel LX82 A

Zhao Haoqian^{1,2,3}, Zhang Yuming^{1,2,3}, Ma Bo^{1,2,3}, Gong Yanjie^{1,2,3}, Meng Yaoqing⁴

(1 Technology Center of Xingtai Iron and Steel Co., Ltd., Xingtai 054027, China; 2 Hebei Xinggang Technology Co., Ltd., Xingtai 054799, China; 3 Hebei Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027, China; 4 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: For the control of cord steel inclusion, long time soft bubbling treatment is usually chosen to improve the cleanliness of molten steel, but it will lead to the increased erosion of magnesia-carbon bricks. Through the industrial production test, the effects of soft blowing time after LF refining on the composition and quantity of oxide inclusions of cord steel wire rod were studied by means of FEI Explorer 4 automatic scanning electron microscopy. Becca standard score and Kobe Standard Max-T (ave) score were used to evaluate the inclusion of wire rod. The results showed that the composition of oxide inclusions larger than 3 μm in the wire rod was similar to that in the process of soft blowing time of 45 min and 25 min after LF refining, and the density of inclusions was 135/100 mm² and 103/100 mm², respectively. The density of inclusions in the process of soft blowing time of 25 min after LF refining was slightly lower. Expanding the number of comparison tests, the score of Kobe standard Max-T (ave) and Becca standard indicate that the inclusions control of soft bubbling process for 20-25 min did not become worse or slightly improved. The control of low melting point inclusions in cord steel was mainly through controlling Al content, refining slag and other process parameters, and the inclusions that lead to the failure of the final product are often inconsistent with the types of endogenous inclusions. For cord steel, it can be considered to reduce the soft blowing time after LF refining.

Key Words: Tire Cord Steel; LF Refining; Soft Bubbling Time; Inclusion; Al₂O₃ Content

对于高碳硅镇静钢, 例如帘线钢、切割钢丝用钢, 炼钢生产过程的技术关键, 是通过渣钢反应控制夹杂物成分, 减少夹杂物危害^[1-8]。在LF精炼结束后软吹过程中, 钢水中氩气泡分布较弥散, 夹杂物主要以气泡黏附方式上浮去除^[9], 是促进夹杂物上浮去除的主要手段。针对硅脱氧帘线钢夹杂物

控制, 通常选择长时间软吹处理提高钢水洁净度, 但会导致钢水温降大, 钢包镁碳砖侵蚀加剧, 影响生产节奏。本文通过工业生产试验, 使用FEI Explorer 4自动扫描电镜以及神户标准Max-T(ave)评分和贝卡标准评分进行盘条夹杂物评价, 对比研究LF精炼结束后软吹时间对帘线钢LX82 A盘条夹杂物成分、数

量的影响,所得结论对优化软吹时间有参考意义。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

工业生产试验帘线钢 LX82 A 的化学成分见表 1。生产流程:80 t 转炉→80 t LF 精炼→280 mm×325 mm 大方坯连铸→开坯→轧制。冶炼过程对废钢、合金、渣料等严格要求,试验 2 炉不同 LF 精炼结束后,软吹时间分别为 45 min 和 25 min。使用 X 射线荧光分析精炼渣成分见表 2。为减少影响试验结果的干扰因素,不同软吹时间工艺生产的大方坯,采用相同的开坯工艺、轧制工艺及轧制 $\phi 5.5$ mm 规格。

表 1 帘线钢 LX82 A 的化学成分(质量分数)

工艺	C	Si	Mn	P	S	Alt
软吹时间 45 min	0.85	0.21	0.50	0.011	0.008	0.001 5
软吹时间 25 min	0.83	0.21	0.50	0.011	0.006	0.001 2

表 2 LX82 A 钢 LF 精炼渣的化学成分(质量分数)

工艺	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
软吹时间 45 min	33	36	10	8
软吹时间 25 min	37	34	10	8

1.2 分析方法

使用 FEI Explorer 4 自动扫描电镜分析盘条纵截面尺寸大于 3 μm 夹杂物的成分、尺寸等信息。考虑扫描电镜检验面积较小,同时对试验炉次及对比炉次盘条采用基于金相显微镜观察的贝卡标准评分和神户标准 Max-T(ave) 评分进行盘条夹杂物评价^[10]。

2 试验结果

2.1 盘条中氧化物夹杂的成分及数量对比

重点讨论的是氧化物夹杂,在处理夹杂物原始数据时,剔除 MnS>10% 或 TiN>5% 的夹杂物,两种软吹时间工艺对应的盘条夹杂物成分分布,如图 1 所示,可以看出,≥3 μm 的氧化物夹杂物成分分布基本类似,软吹时间 45 min 工艺,盘条夹杂物平均成分为 21% (CaO+MnO+MgO)-72%SiO₂-6%Al₂O₃,软吹时间 25 min 工艺,盘条夹杂物平均成分为 18% (CaO+MnO+MgO)-72%SiO₂-9%Al₂O₃,两种软吹时间工艺对应的夹杂物中 Al₂O₃ 含量略有差异,其他成分基本类似。说明盘条夹杂物平均成分中各组分之和为 99%,其余组分为部分夹杂物含有的少量 MnS 或 TiN。

两种软吹时间工艺对应盘条样品纵截面的扫描面积及不同尺寸夹杂物数量见表 3,单位面积的夹杂物密度对比见表 4,从数据对比可以看出,所检盘条样品的夹杂物密度均较低,软吹时间 45 min 工艺盘条样品夹杂物密度为 135 个/100 mm²,软吹时间 25 min 工艺盘条样品夹杂物密度为 103 个/100 mm²。其中,夹杂物尺寸大于 8 μm 的密度分别为 2 个/100 mm²、1 个/100 mm²。可以看出,LF 精炼结束后软吹时间 25 min 工艺盘条大尺寸夹杂物数量密度略低于 LF 精炼结束后软吹时间 45 min 工艺。

2.2 盘条中最大尺寸夹杂物对比

为验证不同软吹时间工艺对帘线钢夹杂物尺寸、数量的影响,进行了扩大对比试验。软吹时间 ≥40 min,生产 9 炉,软吹时间 20~25 min,生产 3 炉。两种软吹时间工艺对应盘条,每炉各取 12 支样品,进行贝卡标准评分和神户标准 Max-T

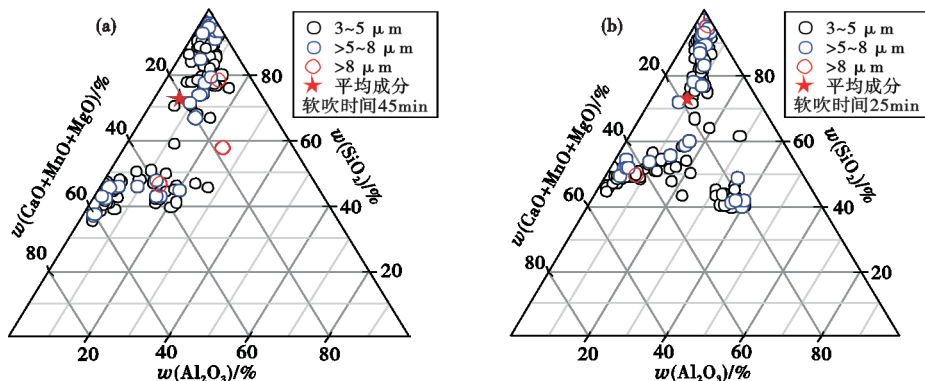


图 1 LX82 A 钢不同软吹时间工艺盘条夹杂物成分分布:(a)45 min,(b)25 min

Fig. 1 Composition distribution of inclusions in different soft blowing times of LX82 A steel wire rod : (a) 45 min, (b) 25 min

表3 LX82 A 钢氧化物夹杂数量对比

Table 3 Comparison of the quantity of oxide inclusions in LX82 A steel

工艺	扫描面积/mm ²	夹杂物数量/个			
		3~5 μm	>5~8 μm	>8 μm	合计
软吹时间 45 min	135.5	150	30	3	183
软吹时间 25 min	176.5	143	37	2	182

表4 LX82 A 钢氧化物夹杂密度对比

Table 4 Comparison of oxide inclusion density in LX82 A steel

工艺	扫描面积/mm ²	夹杂物密度/(个/100 mm ²)			
		3~5 μm	>5~8 μm	>8 μm	合计
软吹时间 45 min	135.5	111	22	2	135
软吹时间 25 min	176.5	81	21	1	103

(ave)评分评价,为了针对性地评价夹杂物,文中的贝卡标准评分,只保留夹杂物的扣分,贝卡标准评分越高或Max-T评分越小,代表夹杂物控制水平相对要好,评价结果如图2所示,可以看出,软吹时间20~25 min工艺夹杂物控制并未变差或略有改善趋势。此外,采用国标法检验盘条最大夹杂物尺寸,软吹时间 ≥ 40 min工艺最大夹杂物尺寸为9~21 μm,均值12.6 μm,软吹时间20~25 min工艺最大夹杂物尺寸为12~16 μm,均值13.3 μm,也可以看出,两种软吹时间工艺对应的盘条最大夹杂物尺寸控制情况基本一致。鉴于钢中夹杂物分布的随机性,通过不同的夹杂物评价方法进行对比,可以看出降低软吹时间并未导致夹杂物的控制变差。

3 结果讨论

针对帘线钢生产工艺,钢中尺寸较大的CaO-SiO₂系夹杂物,主要源自钢包渣的乳化^[11]。而对于大尺寸低熔点夹杂物,其与钢水和氩气泡界面接触角很小,吹氩去除速率急剧下降^[12]。在本文作者前期研究中发现^[10],以帘线钢为代表的硅镇静钢,导致产品失效的夹杂物尺寸集中在10~40 μm,同时夹杂物类型以Al₂O₃或高Al₂O₃为主,在CaO-SiO₂-Al₂O₃系相图中分布在刚玉区域,失效夹杂物的控制与软吹时间工艺的相关性较小。

内生夹杂物的控制主要通过控制Al含量、精炼渣成分、钢包初始状态等工艺参数。精炼渣成分对夹杂物影响较大,工业生产试验对比了不同精炼渣Al₂O₃含量对夹杂物的影响,夹杂物成分分布如图3所示,可以看出,随着精炼渣中Al₂O₃含量的增加

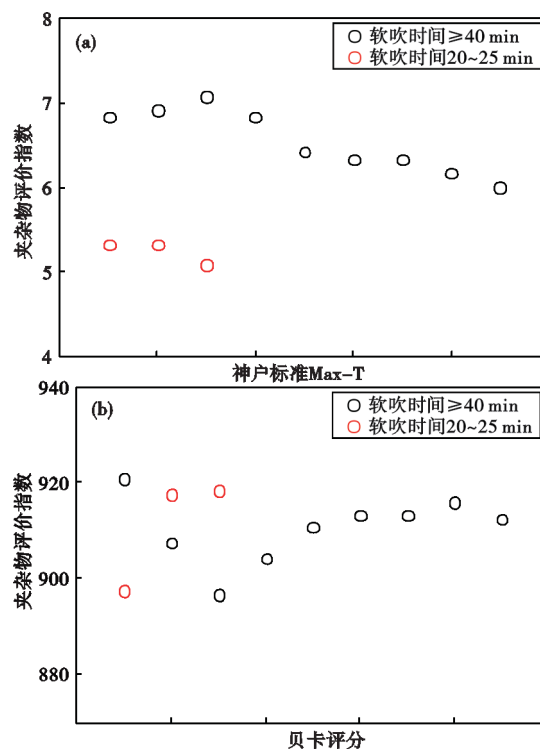


图2 LX82 A 钢盘条夹杂物评价指数:(a)神户标准Max-T (ave), (b)贝卡标准评分

Fig. 2 LX82 A steel rod Inclusion evaluation index : (a) Kobe standard Max-T (ave), (b) Becca standard score

(2.2%、6.5%、13.5%),对应盘条夹杂物平均Al₂O₃含量也随之增加(12.57%、16.42%、24.32%)。

此外,在炉次的浇注前期、后期均存在非稳态,而非稳态钢坯可能存在质量波动,进行稳定段与非稳定段钢坯标记,同时进行轧制和使用跟踪,统计细规格钢帘线断丝率指数如图4所示,可以看出,稳定段钢坯生产细规格钢帘线的断丝率指数明显低于非稳定段。

帘线钢中大尺寸低熔点夹杂物主要源自钢包渣乳化,难以通过精炼过程吹氩上浮去除。低熔点夹杂物的控制主要通过控制Al含量、精炼渣成分、钢包初始状态等工艺参数,而导致最终产品失效的夹杂物往往与内生夹杂物类型不一致。因此,对于硅脱氧帘线钢,可以考虑降低LF精炼结束后软吹时间。

4 结论

(1)对于硅脱氧帘线钢LX82 A,LF精炼结束后软吹时间45 min与软吹时间25 min生产工艺,盘条中尺寸大于3 μm的氧化物夹杂成分基本类似,夹杂物密度分别为135个/100 mm²和103个/100 mm²,其中,夹杂物尺寸大于8 μm的密度分别为2个/100 mm²、

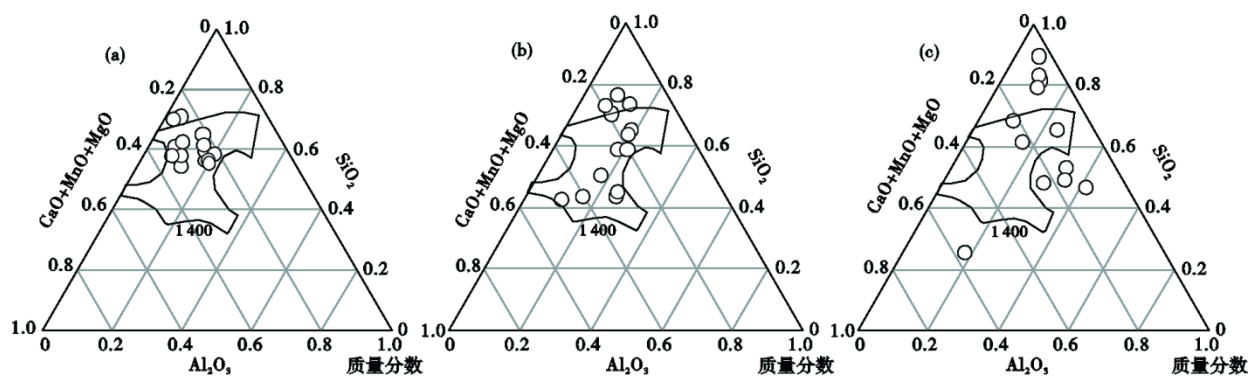


图3 LX82 A 钢精炼渣 Al_2O_3 含量对夹杂物成分的影响:(a)2.2%,(b)6.5%,(c)13.5%

Fig. 3 Influence of Al_2O_3 content in LX82 A steel refining slag on inclusions composition : (a)2.2%, (b)6.5%, (c)13.5%

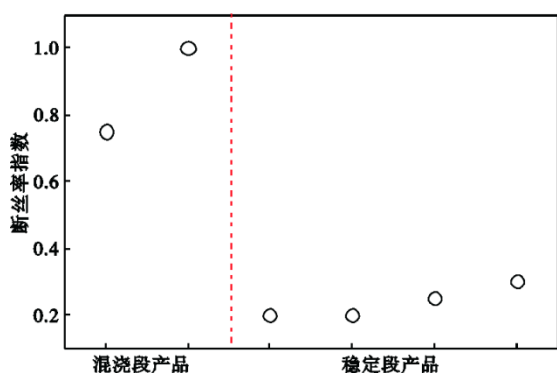


图4 LX82 A 钢细规格钢帘线断丝率指数对比

Fig. 4 Comparison of breaking rate index of LX82 A steel fine gauge steel cord

1个/ 100 mm^2 , LF 精炼结束后软吹时间 25 min 工艺夹杂物数量密度略低。

参考文献

- [1] 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, 48(1): 74-81.
- [2] 来永彪, 赵阳, 左锦中, 等. 钢帘线生产断丝原因分析[J]. 金属制品, 2023, 49(1): 52-55.
- [3] 赵家七, 麻晗, 王德永, 等. 碱金属氧化物对帘线钢中夹杂物的影响[J]. 中国冶金, 2023, 33(3): 68-76.
- [4] 毕胜, 王鑫, 陈修君, 等. C82DA 帘线钢中 TiN 夹杂的控制[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 46-49.
- [5] 叶明在, 邢耀进, 陈军, 等. 钢包耐火材料对帘线钢 82 A 夹杂物的影响和工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 60-63.
- [6] 杨文, 牛凯军, 季莎, 等. 帘线钢脱氧过程中非金属夹杂物生成热力学[J]. 炼钢, 2020, 36(4): 6-11+38.
- [7] 刘宗辉, 秦凤婷. 钢包 MgO-C 砖抗氧化剂对帘线钢酸溶铝的影响[J]. 炼钢, 2020, 36(5): 69-74.
- [8] 李桂英, 李麦麦. 钢帘线用钢 C82D2 盘条拉拔断丝成因分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 30-34.
- [9] 郑淑国, 朱苗勇. 吹氩钢液精炼过程气泡去夹杂机理研究[J]. 钢铁, 2008, 43(6): 25-29.
- [10] 赵昊乾, 吕洪刚, 孟耀青, 等. 高碳硅镇静钢中失效夹杂物检测方法的探讨[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(7): 644-650.
- [11] Wang K P, Jiang M, Wang X H, et al. Study on formation mechanism of CaO-SiO₂-based inclusions in saw wire steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(6): 2961-2969.
- [12] Arai H, Matsumoto K, Shimasaki S I, et al. Model experiment on inclusion removal by bubble flotation accompanied by particle coagulation in turbulent flow[J]. ISIJ International, 2009, 49(7): 965-974.

(2) 扩大对比试验数量, 两种软吹时间工艺对应盘条贝卡标准评分和神户标准 Max-T(ave) 评分表明, LF 精炼结束后软吹时间 20~25 min 的夹杂物控制并未变差或略有改善趋势。采用国标法检验盘条最大夹杂物尺寸, 软吹时间 ≥ 40 min 工艺最大夹杂物尺寸为 9~21 μm , 均值 12.6 μm , 软吹时间 20~25 min 工艺最大夹杂物尺寸为 12~16 μm , 均值 13.3 μm 。

(3) 帘线钢中大尺寸低熔点夹杂物主要源自钢包渣乳化, 难以通过精炼过程吹氩上浮去除。低熔点夹杂物主要通过控制 Al 含量、精炼渣成分、钢包初始状态等工艺参数, 而导致最终产品失效的夹杂物往往与内生夹杂物类型不一致, 对于帘线钢而言, 可以考虑降低 LF 精炼结束后软吹时间。