



帘线钢 XLX72 A 中氧化物夹杂的演变解析与去除

杨建华, 巨银军, 杨俊

(湖南湘潭钢铁有限公司技术中心, 湘潭 411101)

摘要: 针对 $\phi 0.175$ mm 及以下规格细丝帘线钢夹杂物演变控制与去除问题, 通过采用 Si-Mn 脱氧、造碱度为 0.7~1.0 的精炼顶渣和 30 min 以上的软吹等过程工艺, 对帘线钢中的夹杂物进行转变控制和去除的试验研究。试验结果表明, LF 精炼过程钢中夹杂物数量不断增加, 软吹过程中, 夹杂物数量先快速减少, 软吹到 30 min 时减少到了 2~3 个/mm², 继续软吹时夹杂物数量略有增加; 而 LF 精炼和软吹过程钢中的氮含量不断增加, 全氧含量不断下降, 上连铸时钢中的氮含量为 0.003 4%~0.003 8%, 全氧含量为 0.001 2%~0.001 4%, 最终得到夹杂物数量不超过 3 个/mm², 钢水上连铸时氧化物夹杂尺寸 $< 10 \mu\text{m}$, 且没有氮化钛(TiN)夹杂和纯 Al₂O₃ 夹杂或高 Al₂O₃ 含量的夹杂, 完全满足用户的使用要求。

关键词: 帘线钢; 脱氧; 低碱度; 夹杂物; 软吹

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00043 **中图分类号:** TF769.2

The Evolution Analysis and Removal of Oxide Inclusion in Tire Cord Steel XLX72 A

Yang Jianhua, Ju Yinjun, Yang Jun

(Technical Center of Hunan Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd., Xiangtan 411101, China)

Abstract: Aiming at the problem of inclusions evolution control and removal of fine wire cord steel of $\phi 0.175$ mm and below specifications, the transition control and removal of inclusions in cord steel were studied by using the technology of Si-Mn deoxidation, refining top slag with basicity of 0.7-1.0 and soft blowing for more than 30 min. The test results show that the number of inclusions in LF refining increases continuously, and decreases rapidly in soft blowing stage, and decreases to two to three inclusions per square millimeter when the soft blowing time reaches 30 min, and increases slightly when the soft blowing continues. In the process of LF refining and soft blowing, the nitrogen content in the steel increased, the total oxygen content decreased, and the nitrogen content in the steel is 0.003 4%-0.003 8%, the total oxygen is 0.001 2%-0.001 4% before continuous casting. Finally, the molten steel is obtained that the number of inclusions per square millimeter does not exceed 3, oxide inclusion size of molten steel $< 10 \mu\text{m}$ during continuous casting, and also no titanium nitride (TiN) inclusions and pure Al₂O₃ inclusions or high Al₂O₃ content inclusions basically, fully meet the user's requirements.

Key Words: Tire Cord Steel; Deoxide; Low Basicity; Inclusions; Soft Blowing

在绿色、低碳的大背景下, 很多帘线钢加工用户都在尝试在拉丝工艺中减少一道热处理工序, 这使得钢丝在冷加工过程中产生的加工应力无法充分释放, 极易造成拉拔和合股断丝, 特别是对拉拔 $\phi 0.2$ mm 及以下规格的细丝帘线来说更容易发生断丝。刘铁牛等^[1-3]对帘线钢轧制和拉拔过程夹杂物变形能力的研究认为, 帘线钢拉拔和合股断丝大部分是由尺寸较大的脆性氧化物夹杂引起, 因此, 要解决此类断丝问题, 减少夹杂物的数量, 降低夹杂物尺寸, 并且获得变形能力较大的夹杂物是帘线

钢夹杂物控制方向^[4-9]。

王昆鹏等^[10-15]对帘线钢冶炼过程中夹杂物演变规律的研究认为, 钢冶炼过程中, 氧化物夹杂主要产生于转炉出钢脱氧、精炼脱氧、连铸的二次氧化, 同时, 也有因耐材脱落或者过程控制不稳定产生的卷渣进入钢水等。对内生夹杂物而言, 尺寸较大的脆性夹杂物如 Al₂O₃ 夹杂和氮化钛(TiN)夹杂物控制的关键^[16-19]。根据冶炼过程夹杂的演变规律, 制定合理的过程控制工艺, 才能有效得到数量少、尺寸小、变形能力好的夹杂物, 改善拉拔性能。

基金项目: 长株潭国家自主创新示范区专项(2018XK2301)

作者简介: 杨建华(1975—), 男, 本科, 高级工程师; **E-mail:** 201691@mail.hnxc.com.cn; **收稿日期:** 2024-02-29

通信作者: 杨俊(1975—), 男, 博士, 正高级工程师; **E-mail:** 111373@mail.hnxc.com.cn

本研究针对拉拔 $\phi 0.175$ mm及以下规格的细丝帘线钢制定了合适的冶炼过程控制工艺,通过采用专用精炼渣进行造渣,并对钢中残余元素、脱氧等进行精准控制,解决了采用石灰、河沙等配置精炼顶渣的工艺条件下,精炼渣碱度波动较大,夹杂物数量多、尺寸大,且 Al_2O_3 含量高的脆性夹杂物多等问题,获得夹杂物数量少、尺寸小、 Al_2O_3 含量低、拉拔性能优的帘线钢。

1 试验方法

针对拉拔 $\phi 0.175$ mm及以下规格的细丝帘线钢夹杂物控制和去除问题进行了多次生产试验,每次试验在浇次的头3个炉次。试验炉次分别记为No.1、No.2、No.3。采用的工艺路线为:80 t转炉炼钢 \rightarrow LF精炼 \rightarrow 软吹 \rightarrow 150 mm \times 150 mm连铸 \rightarrow $\phi 5.5$ mm规格盘条,LF精炼采用低碱度、低 Al_2O_3 的专用精炼渣进行造渣、硅锰合金进行沉淀脱氧、硅铁粉、碳粉等进行扩散脱氧,并对钢中残余元素、脱氧、软吹等进行精准控制,研究钢中的夹杂物转变和去除规律,开发拉拔细丝的帘线钢。试验时对钢水在LF精炼进站、LF精炼中期、LF精炼结束时刻,各提取一个钢样和渣样,分别记为G1、G2、G3,在软吹10、20、30 min及软吹结束,各提取一个钢样,分别记为RC1、RC2、RC3、RC4,用于分析钢和渣的化学成分,同时,在扫描电镜(SEM)下观察分析钢样中夹杂物的形貌、尺寸,采用能谱仪(EDS)分析钢中的夹杂物成分。

2 试验结果

2.1 精炼过程钢液及炉渣的成分

表1和表2分别是某浇次三炉试验钢精炼过程钢液和炉渣的化学成分。从表1中可看出,冶炼过程钢液中 $w[\text{Ti}]$ 稳定在0.000 5%以下, $w[\text{Als}]$ 在0.001 5%以下;精炼过程 $w[\text{N}]$ 不断增加,基本控制在0.004%以下, $w[\text{T.O}]$ 不断降低,软吹结束时基本控制在0.001 5%以下,其他元素基本稳定。从表2中可看出,精炼过程精炼渣碱度稳定,特别是炉次之间的精炼终渣碱度波动小,另外,渣中的 Al_2O_3 含量低且稳定,但是渣中($\text{MnO}+\text{T.Fe}$)含量偏高,达到5%左右,需要加强造渣过程的扩散脱氧。

2.2 精炼过程钢液中气体含量的变化

图1所示精炼过程钢液中气体含量的变化情况。从图1中可见,钢中全氧含量在精炼过程整体上呈现下降趋势,氮含量在精炼过程中整体上呈现上升趋势,LF结束到软吹10 min时全氧含量降低明显,说明软吹对夹杂物去除效果很好,但因精炼过程操作的波动,使得三炉钢的全氧含量和氮含量在精炼过程的变化有较大不同,但是整体趋势相同。

2.3 精炼过程钢液中典型夹杂物

如图2所示精炼过程钢液中的典型夹杂物形貌和能谱分析结果,图2(a)为LF精炼前钢水试样G1,图2(b)为LF精炼中期试样G2,图2(c)为LF精炼结束试样G3,图2(d)为软吹30 min试样RC3。从图2中可知,LF精炼进站钢水试样中的典型夹杂物主要

表1 精炼过程钢液的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of molten steel during refining process

炉次	取样点	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	N	T.O	其他
No.1	LF进站	0.63	0.13	0.46	0.009 6	0.007 5	0.001 2	0.000 3	0.002 5	0.004 2	0.059 1
	LF中期	0.69	0.18	0.51	0.009 5	0.006 9	0.001 2	0.000 3	0.002 6	0.003 8	0.058 5
	LF结束	0.71	0.19	0.53	0.010 1	0.007 4	0.001 1	0.000 3	0.002 7	0.002 3	0.058 2
	软吹10 min	0.72	0.19	0.53	0.010 2	0.007 5	0.001 3	0.000 3	0.002 8	0.001 7	0.060 0
	软吹结束	0.72	0.19	0.53	0.010 4	0.007 6	0.001 3	0.000 4	0.003 4	0.001 3	0.059 3
No.2	LF进站	0.61	0.12	0.41	0.009 3	0.008 9	0.001 0	0.000 2	0.003 2	0.003 2	0.046 6
	LF中期	0.67	0.18	0.52	0.009 6	0.009 4	0.001 2	0.000 3	0.003 4	0.002 4	0.047 5
	LF结束	0.70	0.19	0.53	0.009 6	0.009 2	0.001 2	0.000 3	0.003 6	0.002 1	0.047 2
	软吹10 min	0.72	0.21	0.54	0.009 3	0.009 2	0.001 5	0.000 3	0.003 7	0.001 8	0.049 6
	软吹结束	0.71	0.21	0.54	0.009 1	0.008 7	0.001 5	0.000 4	0.003 8	0.001 4	0.049 5
No.3	LF进站	0.68	0.13	0.42	0.011 1	0.012 0	0.001 2	0.000 2	0.002 9	0.003 6	0.048 4
	LF中期	0.69	0.17	0.51	0.010 9	0.012 5	0.001 4	0.000 3	0.003 1	0.002 7	0.048 8
	LF结束	0.71	0.2	0.53	0.011 0	0.013 0	0.001 2	0.000 3	0.003 3	0.002 2	0.049 5
	软吹10 min	0.72	0.20	0.54	0.011 4	0.012 7	0.001 2	0.000 3	0.003 2	0.001 6	0.049 1
	软吹结束	0.72	0.20	0.54	0.011 8	0.013 8	0.001 4	0.000 4	0.003 5	0.001 2	0.052 2

表 2 精炼过程炉渣的化学成分(质量分数)和碱度
Table 2 Ingredient of slag during refining process and basicity

炉次	取样点	化学成分/%							碱度 R (CaO/ SiO ₂)
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	T.Fe	其他	
No.1	LF 进站	38.01	47.00	1.06	7.95	3.36	1.86	0.76	0.81
	LF 中期	40.05	45.30	1.10	8.96	2.83	1.05	0.71	0.88
	LF 结束	39.06	44.56	1.11	9.78	2.96	1.80	0.72	0.88
No.2	LF 进站	36.62	47.85	0.98	6.47	3.70	3.62	0.77	0.77
	LF 中期	39.09	44.35	1.36	8.43	3.98	2.00	0.79	0.88
	LF 结束	37.21	44.45	1.20	10.7 4	3.56	2.09	0.75	0.84
No.3	LF 进站	39.56	46.85	1.59	5.71	3.69	1.76	0.84	0.84
	LF 中期	40.38	45.34	1.15	7.88	3.04	1.43	0.78	0.89
	LF 结束	38.90	45.19	1.03	9.05	2.98	2.09	0.77	0.86

为不规则形貌的硅铝锰系夹杂,LF 精炼中期试样中的典型夹杂物主要为球形的硅铝锰系夹杂,LF 精炼结束试样中的典型夹杂物主要为不规则形貌的铝系夹杂,夹杂物尺寸都较小;软吹 30 min 试样中的典型夹杂物主要为尺寸细小的球形硅铝锰系夹杂。因钢中钛和氮含量都比较低,所有夹杂物试样中没有发现钛夹杂。

3 结果分析与讨论

3.1 LF 精炼过程钢中氧化物夹杂变化机理分析

如图 3 所示,精炼过程钢液中夹杂物成分变化情况,从图 3 中可看出,LF 精炼过程夹杂物数量不断增加,且 Al₂O₃ 夹杂的数量增加明显,硅锰类夹杂数量减少;软吹过程中,夹杂物数量明显减少,且到

软吹 20 min 时没有发现 Al₂O₃ 夹杂,而硅锰类夹杂数量先增加后减少。

对硅锰脱氧钢来说,在采用低碱度精炼渣冶炼的条件下,在 LF 精炼前期,钢中主要发生式(1)、式(2)所示的脱氧反应^[20],钢中的脱氧产物主要是 SiO₂、MnO 及其二者的复合物;造渣过程中,由于钢-渣界面发生式(3)所示的化学反应^[21]以及合金加入,钢液中的溶解铝[Al]不断增加;随着钢液中溶解铝[Al]的增加,钢中不断发生式(4)、式(5)所示的化学反应^[22],从而使钢中的 Al₂O₃ 夹杂不断增加,结果如图 3 中的 G1、G2、G3 所示;软吹过程是夹杂物去除的主要过程,从图 3 中可看出,软吹到 10 min 时,钢中的 Al₂O_{3(inclu)} 夹杂明显减少,而低 Al₂O₃ 含量的 SiO₂-MnO-Al₂O₃ 复合夹杂物显著增加,表明软吹的前 10 min 钢中不断发生如式(6)所示的聚合反应;软吹到 20 min 时,钢中的 Al₂O_{3(inclu)} 夹杂已经基本去除或转变成了 SiO₂-MnO-Al₂O₃ 复合夹杂物,而低 Al₂O₃ 含量的 SiO₂-MnO-Al₂O₃ 复合夹杂物也有明显减少;软吹到 30 min 时,夹杂物数量继续减少,且均为低 Al₂O₃ 含量的 SiO₂-MnO-Al₂O₃ 复合夹杂物,说明 30 min 的软吹过程是夹杂物不断去除的过程。炉外精炼过程,钢中氧化物夹杂的转变机理(反应)如下:

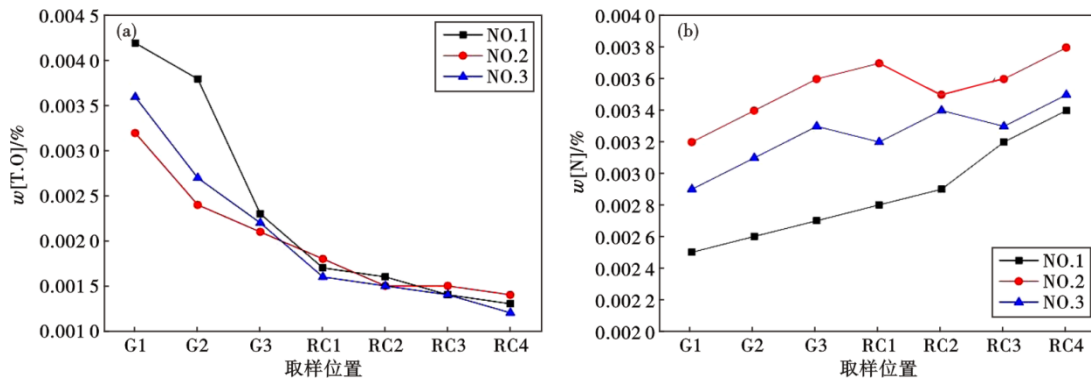
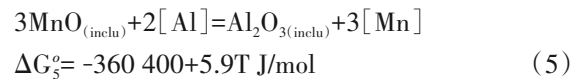
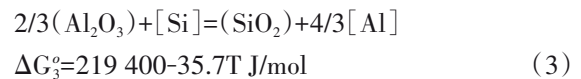
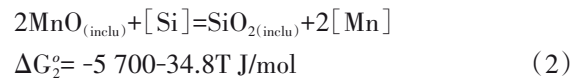
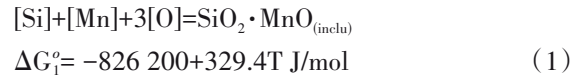


图 1 精炼过程钢液中气体含量的变化情况:(a)w[T·O],(b)w[N]
Fig. 1 Change of total oxygen and nitrogen content in steel during refining process : (a)w[T·O],(b)w[N]

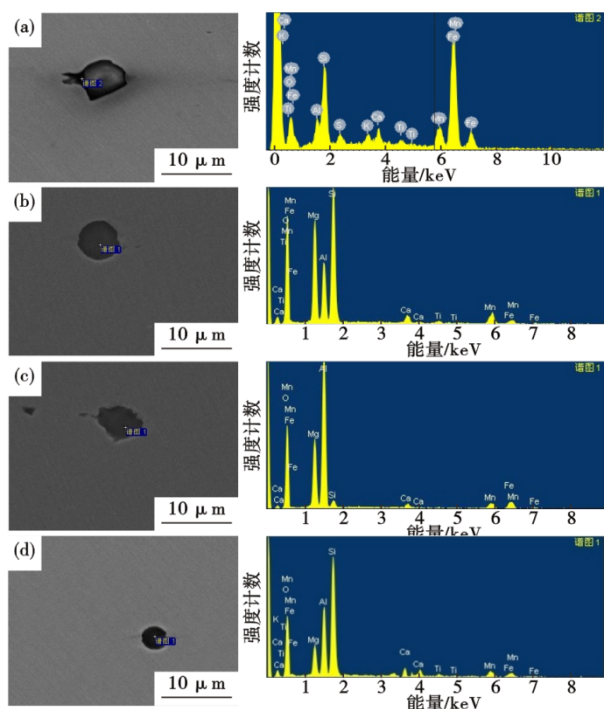
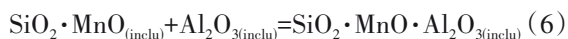


图 2 精炼过程钢液中的典型夹杂物形貌及能谱分析:(a) LF 精炼前,(b)LF 精炼中期,(c)LF 精炼结束,(d)软吹 30 min

Fig. 2 Morphology and energy spectrum analysis of typical inclusions in molten steel during refining process: (a) before LF refining, (b) intermediate of LF refining stage, (c) end of LF refining, (d) soft blow for 30 min



3. 2 钢中氧化物夹杂数量和尺寸变化分析

图 4 所示精炼过程钢液中夹杂物数量和尺寸的

变化情况。从图 4(a)中可知,在本工艺条件下,钢液中单位面积夹杂物数量整体呈现先增加后减少的趋势,先大幅增加是因为 LF 精炼刚开始时大量发生硅锰脱氧反应以及合金带入少量的铝参与脱氧反应,才使得在 LF 精炼过程中主要呈增加趋势,而软吹过程是先快速减少,软吹到 30 min 时夹杂物数量最少,为 2~3 个/mm²,而到钢包上台时略有增加。从图 4(b)(d)可知,试验炉次 No.1、No.3 中,尺寸小于 10 μm 的夹杂物数量在 LF 炉中呈一直增加的趋势,炉次 No.1 尺寸大于 10 μm 的夹杂物数量在 LF 炉则是先增加后减少,炉次 No.3 尺寸大于 10 μm 的数量很少;而软吹过程中,软吹到 30 min 时各尺寸的夹杂物数量减少明显,且此时数量最少,软吹结束(即 RC4)时 5 μm 以下尺寸的夹杂物数量略有增加。从图 4(c)可看到,试验炉次 No.2 中,尺寸小于 10 μm 的夹杂物数量在 LF 炉中前期是增加的,尺寸大于 10 μm 的夹杂物数量在 LF 炉则是先增加后减少,而软吹过程中,软吹到 30 min 时各尺寸的夹杂物数量减少明显,并且,此时数量最少,软吹结束(即 RC4)时 5 μm 以下尺寸的夹杂物数量略有增加,因为夹杂物降低到一定水平后继续软吹使得夹杂物去除速度小于软吹过程钢水氧化生产夹杂物速度。

3. 3 软吹对钢中氧化物夹杂去除机理分析

钢包软吹工艺是在钢包底部向钢包内的钢液中吹入 Ar 气,在钢液中产生 Ar 气泡,夹杂物通过黏

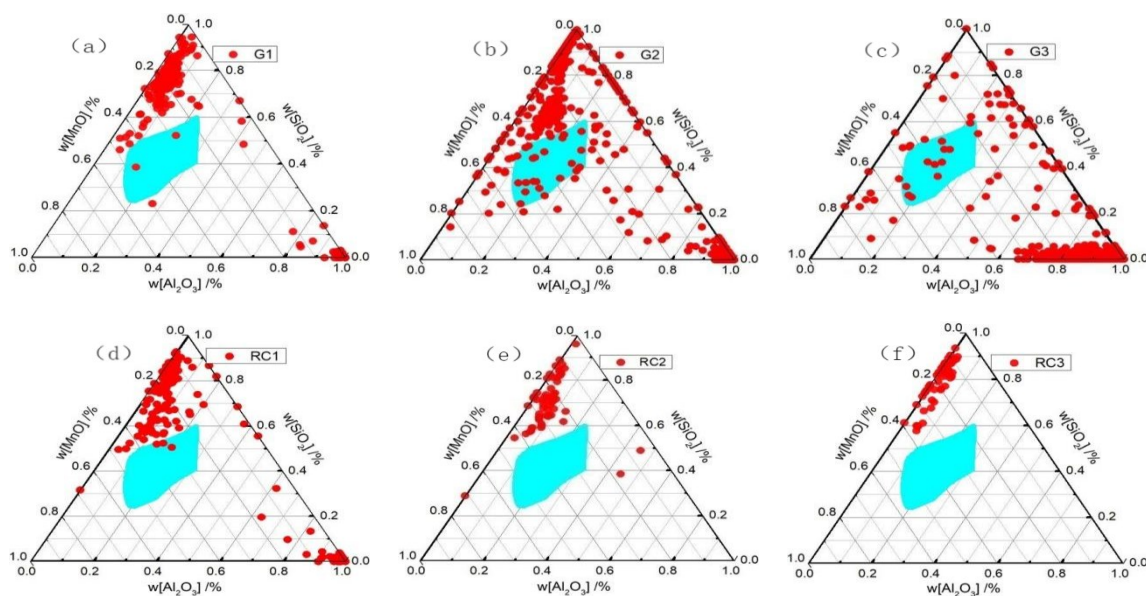


图 3 精炼过程钢液中夹杂物成分变化情况:(a)G1,(b)G2,(c)G3,(d)RC1,(e)RC2,(f)RC3

Fig. 3 Change in composition of inclusions in molten steel during refining process : (a)G1, (b)G2, (c)G3, (d)RC1, (e)RC2, (f)RC3

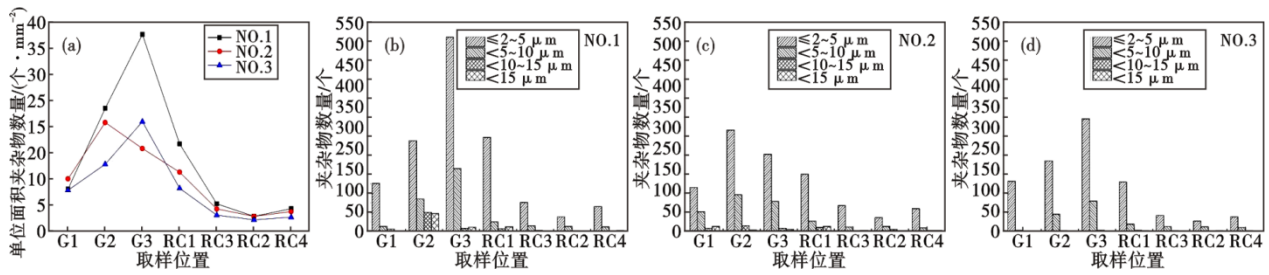


图4 精炼过程钢液中夹杂物数量和尺寸的变化情况:(a)精炼过程,(b)No. 1炉,(c)No. 2炉,(d)No. 3炉

Fig. 4 Change in quantity and size of inclusions in molten steel during refining process : (a)refining process , (b)heat No. 1 , (c)heat No. 2 , (d) heat No. 3.

附在 Ar 气泡上浮去除, Ar 气泡上浮去除夹杂物的效率可表示为式(7)。

$$-\frac{dn_p}{dt} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h \cdot \frac{n_p}{V} \cdot P \cdot m \quad (7)$$

式中, d 为气泡直径, h 为气泡距离钢液表面的距离, $\frac{n_p}{V}$ 为单位体积内夹杂物的个数, P 为夹杂物黏附在气泡表面的概率, m 为单位时间内钢液中产生的气泡数。对式(7)积分得到夹杂物去除数量计算公式见式(8)。

$$n_p = n_{p_0} \exp\left(-\frac{\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot P \cdot m}{4V} \cdot t\right) \quad (8)$$

由式(8)可知, 吹 Ar 搅拌和 VD 真空处理过程中, 气泡直径越小, 处理时间越长越有利于夹杂物的去除。

从图3和图4中可知, 软吹过程中, 夹杂物数量大幅度减少, 软吹到 30 min 时夹杂物数量减少到了 2~3 个/mm², 这和式(8)表示的结果基本符合; 继续软吹时, 从图4中可看到, RC4 样中的夹杂物数量比 RC3 都略有增加, 这和式(8)表示的软吹时间越长越有利于夹杂物的去除不符。说明软吹刚开始时, 钢中夹杂物数量多, 软吹去除夹杂物明显, 当夹杂物

降低到一定水平后, 继续软吹时夹杂物去除速度小于钢水氧化速度, 使得夹杂物数量略有增加。

4 结论

针对拉拔 $\phi 0.175$ mm 及以下规格的细丝帘线钢夹杂物控制和去除问题, 通过在 LF 精炼采用低碱度、低 Al₂O₃ 的专用精炼渣进行造渣, 并对钢中残余元素、脱氧、软吹等进行精准控制, 研究钢中的夹杂物转变和去除规律, 得到如下结论:

(1) LF 精炼及软吹过程, 钢中的氮含量不断增加, 全氧含量不断减少, 到上连铸时, 钢中氮含量为 0.003 4%~0.003 8%, 全氧含量为 0.001 2%~0.001 4%;

(2) LF 精炼过程, 钢液中的夹杂物数量不断增加, 其中硅锰脱氧产物不断减少, 而高 Al₂O₃ 含量的夹杂物不断增加;

(3) 软吹过程中, 夹杂物数量先快速减少, 软吹到 30 min 时减少到了最少, 单位面积夹杂物数量为 2~3 个/mm², 而且已经没有了 Al₂O₃ 夹杂物, 继续软吹到结束时夹杂物数量略有增加, 这说明软吹结束时钢中夹杂物尺寸比软吹 30 min 时的夹杂物小, 钢水上连铸时氧化物夹杂尺寸 <10 μm。

参考文献

- [1] 刘铁牛, 杨文, 张立峰, 等. 帘线钢轧制和拉拔过程中夹杂物变形能力的研究[J]. 炼钢, 2018, 34(2): 73-78.
- [2] Wang K P, Jiang M, Wang X H, et al. Formation mechanism of SiO₂-type inclusions in Si-Mn-killed steel wires containing limited aluminum content[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(5): 2198-2207.
- [3] Suito H, Inoue R. Thermodynamics on control of inclusions composition in ultra-clean steels[J]. ISIJ International, 1996, 36(5): 528-536.
- [4] Guo C B, Ling H T, Zhang L F, et al. Effect of slag basicity adjusting on inclusions in tire cord steels during ladle furnace refining process [J]. Metallurgical Research & Technology, 2017, 114(6): 602.
- [5] Chen S H, Jiang M, He X F, et al. Top slag refining for inclusion composition transform control in tire cord steel [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012, 19(6): 490-498.
- [6] Yang W, Guo C B, Zhang L F, et al. Evolution of oxide inclusions in Si-Mn killed steels during hot-rolling process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(5): 2717-2730.
- [7] Zhang L F, Guo C B, Yang W, et al. Deformability of oxide inclusions in tire cord steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(2): 803-811.
- [8] Maeda S, Soejima T, Saito T. Shape control of inclusions in wire

- rods for high tensile tire cord by refining with synthetic slag [C]. 1989 Steelmaking Conference Proceedings, Chicago: L. S. S. Publication, 1989.
- [9] 高永彬, 李麦麦, 郭洛方, 等. MT级钢帘线用盘条均匀性关键技术及应用[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 19-24.
- [10] 王昆鹏, 姜敏, 赵昊乾, 等. 帘线钢生产过程中氧化物夹杂的演变规律[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 31-37.
- [11] 三村毅. 帘线钢和气门簧钢夹杂物控制[C]. 第182.183次西山纪念技术讲座. 日本:日本钢铁协会, 2005: 138.
- [12] 李永超, 杨玉丹, 卢彩玲, 等. 硅脱氧弹簧钢中夹杂物在轧制过程中的演变行为[J]. 钢铁, 2023, 58(2): 83-89.
- [13] Wang C, Tang W, Zhang J S, et al. Effect of low basicity refining slag on evolution and removal of oxide inclusions in 55SiCrA spring steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30(9): 1755-1768.
- [14] 李小明, 谢昊峰, 邢相栋, 等. B_2O_3 对帘线钢高碱度LF精炼渣助熔作用[J]. 钢铁, 2023, 58(7): 80-88.
- [15] 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.
- [16] 雷家柳, 赵栋楠, 朱航宇, 等. 高强度帘线钢中氮化钛夹杂的固溶行为分析[J]. 中国冶金, 2018, 28(12): 31-35.
- [17] Wang C, Tang W, Zhang J S, et al. Evolution mechanism of $MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - CaO$ inclusions during continuous casting of Si-killed spring steel [J]. Steel Research International, 2023, 94(3): 475-483.
- [18] 李明, 胡志勇, 陈兴华. 南钢转炉流程生产高品质帘线钢的实践[J]. 中国冶金, 2018, 28(4): 40-44.
- [19] 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.
- [20] H. Gaye, C. Gatellier, M. Nadif, P. V. Riboud, J. Saleil and M. Faral. Slag-metal reactions and control of the residual inclusions compositions composition in secondary steelmaking [J]. Revue de Metallurgie-cahiers D Informations Techniques, 1987, 84(11): 759-771.
- [21] S. Maeda, T. Soejima and T. Saitoetal. Shape Control of Inclusions in Wire robs for High Tensile Tire by Refining with Synthetic Slag [C]. 1989 Steelmaking Conference Proceedings, Chicago, 1989, 72:379-385
- [22] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.