

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200083

LF 两步造渣工艺对 C82DA 钢中硫和铝的影响

刘宗辉¹, 秦凤婷², 任建忠³, 朱苗勇¹

(1. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 济源职业技术学院冶金化工系, 河南 济源 459000;
3. 河南济源钢铁(集团)有限公司科技管理处, 河南 济源 459000)

摘 要: 为了研究工艺对 C82DA 钢中硫和铝的影响,对帘线钢在 LF 精炼过程脱硫控铝进行了研究。结果表明,随着精炼碱度的降低脱硫率越来越低,碱度约为 1.6 时,渣中 $w((\text{Fe}_2\text{O})+(\text{MnO}))$ 约为 1%,基本达到脱硫的临界值;碱度约为 1.2 时,随着精炼的进行开始回硫,钢液中 $w([\text{Al}_s])$ 随着碱度的降低逐渐降低;碱度约为 2.2 时, $w([\text{Al}_s])$ 降幅显著;碱度小于 1.6 时,对铝的影响不明显。精炼炉采取两步造渣工艺,精炼前期高碱度渣系脱硫,精炼后期降低碱度,钢液中铝含量降低。当碱度从 2.2 降低至 1.2 时,钢液中 $w([\text{S}])$ 和 $w([\text{Al}_s])$ 分别控制在 0.011% 和 0.001 6%。
关键词: 两步造渣; 碱度; 帘线钢; 夹杂物塑性化
文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2020)07-0078-07

Effect of two-step slag making refining on sulfur and aluminum in C82DA steel

LIU Zong-hui¹, QIN Feng-ting², REN Jian-zhong³, ZHU Miao-yong¹

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Department of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000, Henan, China; 3. Technology Management Department, Henan Jiyuan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Jiyuan 459000, Henan, China)

Abstract: In order to study the effect of technology on sulfur and aluminum in C82DA steel. The process of desulfurization and aluminum control of cord steel in LF was studied. The results show that with the decrease of refining basicity, the desulfurization rate becomeslower. When basicity is about 1.6, $w((\text{Fe}_2\text{O})+(\text{MnO}))$ in slag is about 1%, basically reaching the critical value of desulfurization. When basicity is about 1.2, sulfur recovery begins with refining time. The decrease of $w([\text{Al}_s])$ in molten steel gradually decreases with the decrease of basicity. When basicity is greater than 2.2, the decrease of $w([\text{Al}_s])$ is significant. When basicity is less than 1.6, the effect on $w([\text{Al}_s])$ is no longer obvious. The LF adopts two-step slag making process, high basicity desulfurization in the early stage and low basicity aluminum reduction in the later stage. When basicity is reduced from 2.2 to about 1.2, $w([\text{S}])$ and $w([\text{Al}_s])$ are controlled at the lower level of 0.011% and 0.001 6% respectively.
Key words: two-step slag making process; basicity;tire cord steel; inclusions modification

硬线钢主要应用在预应力钢丝、斜拉悬索、钢丝绳、胶管钢丝、轮胎子午线等。经过拉拔工艺,产生加工硬化从而提高其强度。为了在拉拔过程中不断丝,对钢中夹杂物要求较高,尤其是对脆性夹杂物的控制更加严格。另外,由于硫元素容易在晶界偏析,降低晶界结合强度,所以也要严格控制。随着行业的轻量化要求,单丝直径要求更细、强度要求更高。并且,为了提高生产效率、降低制造成本,有时会简化过程热处理工序、减少拉拔道次,这无疑是对硬线钢热轧材提出了更高的要求。

比较普遍的控制硬线钢材中夹杂物的方法是夹杂物塑性化方法^[1-8]。该控制方法重点是要严格

控制原料和脱氧剂中的铝含量,夹杂物中的 Al_2O_3 质量分数控制在 20% 以内^[9-11]。文献^[12]指出,炉渣二元碱度 R 对酸溶铝含量的影响很大,随着顶渣碱度的增大, SiO_2 的活度快速下降,酸溶铝含量将会升高。YANG H L 等^[13]通过将渣处于低熔点区域和控制钢中氧、铝、硫的质量分数来确定最优渣组成,炉渣碱度控制在 1.0~1.19,实现了弹簧钢的高洁净度及夹杂物塑性化。Park J S 等^[14]研究了炉渣成分对硅脱氧钢中夹杂物的影响,发现炉渣碱度从 0.7 提高到 2.1 时,夹杂物中 Al_2O_3 的质量分数从 10% 增至 40%。REN Y 等^[15]试验表明:精炼渣碱度的降低会使夹杂物中 Al_2O_3 和 MgO 的质量分数

降低,除此之外,夹杂物的熔点也会随着精炼渣碱度的下降而降低。

但降低碱度对脱硫反应不利。张奚东等^[16]提出:脱硫速度随炉渣碱度增大而提高,炉渣的最佳碱度为 3.5~4.5,此时能取得较高的硫分配比。炉渣氧化性是影响炉渣脱硫效果的主要因素^[17]。沢村信奉等^[18]将 LF 脱氧过程分为向体系外排氧和向体系内供氧两个环节。研究表明,炉渣氧势对脱氧过程影响很大,降低炉渣中 $w((\text{Fe}_t\text{O})+(\text{MnO}))$ 及提高碱度可降低氧势,加速炉渣脱硫脱氧反应的进行。

从前对硬线钢控铝和脱硫尤其是对铝镇静钢的脱硫的研究较多,但在硬线钢的研究中把两者融合在一起进行探讨的较少。所以,有必要找到一种合

适的精炼造渣工艺,既能满足钢液脱硫要求又能控制钢中酸溶铝含量,从而达到促进夹杂物塑性化的目的。

1 研究方法

工艺研究及试验在某钢铁公司进行,主要装备为:120 t KR 脱硫,120 t 转炉,120 t LF 精炼炉,8 机 8 流 150 mm×150 mm 小方坯,钢坯修磨探伤,美国摩根高线生产线。根据试验目的不同,设计不同的炼钢工艺路线。为了提高不同试验炉次的可比性,没有通过 KR 脱硫工艺,铁水条件尽量一致。钢水取样器为贺利氏专用吊桶取样器、试验钢种为 C82DA 钢,成分控制要求见表 1。

表 1 帘线钢 C82DA 成分内控要求(质量分数)
Table 1 Compositions of tire cord steel C82DA

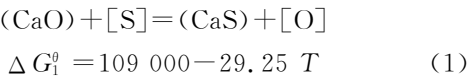
项目	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Ti	As
标准	0.79~0.84	0.15~0.30	0.45~0.60	≤0.100	≤0.008	≤0.005	≤0.004 0	≤0.001 0	≤0.006
内控	0.81~0.83	0.18~0.22	0.50~0.54	≤0.015	≤0.012	≤0.005	≤0.005 0	0.002 0	≤0.008

利用 S4PIONEER 荧光仪对渣样成分进行分析,利用 OBLF 光谱仪对钢样成分分析,其中钢中 Al₂ 使用美国利曼 Prodigy Plus ICP 分析,利用 ELTRA CS800 碳硫仪对硫进行分析,利用 ZEISS EVO18 扫描电镜、OXFORD Inca X-Max20 能谱对夹杂物进行分析。

2 试验结果及分析

2.1 精炼渣碱度对硫的影响

采用 CaO 基炉渣对钢水进行脱硫,其脱硫反应见式(1)^[19]。



式中:ΔG₁⁰ 为标准自由能变化;T 为热力学温度。

由式(1)可知,提高渣中 CaO 活度和降低钢中氧活度,有利于式(1)反应进行,提高脱硫率。精炼渣的脱硫效率主要由渣的碱度和氧化性决定,降低氧化性主要是指降低渣中不稳定氧化物 Fe_tO 和 MnO 的质量分数,一般要求 $w((\text{Fe}_t\text{O})+(\text{MnO}))$ 小于 1%。提高熔渣的碱度,渣中自由 CaO 的活度增加,使脱硫朝着易于发生反应的方向发展。钢水的氧位也是影响脱硫的因素之一,随着钢中氧质量分数的提高,钢中的氧将抑制脱硫反应的进行。当炉渣氧化性较高时炉渣会向钢中供氧,增加钢液中

的溶解氧^[20],进而影响脱硫效果。

文献^[21]指出:当精炼渣碱度约为 1.8, $w((\text{Al}_2\text{O}_3))$ 约为 10.0%时,精炼脱硫渣的硫容量和硫分配比($L_s=w((\text{S}))/w([\text{S}])$)分别为 0.002 7 和 10.05,硫分配比越高说明炉渣的脱硫能力越好。对生产中精炼渣碱度约为 1.8 的炉次进行相关分析,所取炉次炉渣中 $w((\text{Al}_2\text{O}_3))$ 均小于 3%,脱硫情况见表 2。生产时为了保证炉渣充分熔化,使用部分萤石化渣,炉渣流动性好,从而增加脱硫效果。由表 2 可知,碱度约为 1.8 时,渣中不稳定氧化物 $w((\text{Fe}_t\text{O})+(\text{MnO}))$ 小于 1%,脱硫效果相对较好,与文献^[15]的结果相符,硫分配比比文献中计算的大,与渣中的 Al₂O₃ 质量分数有关。在帘线钢生产过程中,精炼碱度 R 控制在 1.8 左右时,渣中不稳定氧化物 $w((\text{Fe}_t\text{O})+(\text{MnO}))$ 的平均值为 0.61%,精炼过程脱硫率平均值为 46.9%。

2.2 精炼渣碱度对钢液中铝的影响

在 LF 炉精炼过程中,钢水和精炼渣之间反应^[22-24]见式(2)~式(5)。

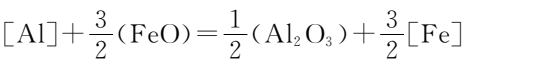
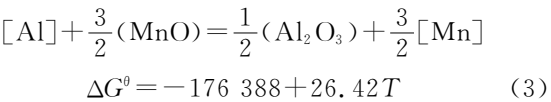
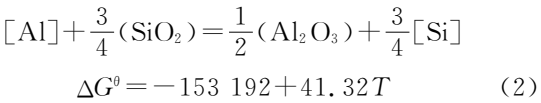
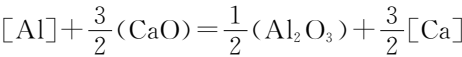


表 2 精炼碱度约为 1.8 时脱硫情况

Table 2 Desulfurization during refining when slag basicity is about 1.8

炉次	$w([S])/%$		LF 精炼渣指标				R
	氩站	中间包	$w((Fe_tO)+(MnO))/%$	$w((S))/%$	L_s	脱硫率/%	
1	0.019	0.010	0.64	0.42	69.2	47.4	1.8
2	0.018	0.011	0.59	0.33	56.7	38.9	1.8
3	0.021	0.012	0.59	0.56	69.8	42.3	1.9
4	0.015	0.009	0.72	0.52	58.0	40.0	1.8
5	0.024	0.013	0.67	0.53	59.0	45.9	1.8
6	0.020	0.011	0.62	0.44	54.8	45.0	1.9
7	0.027	0.012	0.47	0.64	80.5	55.6	1.9
8	0.031	0.011	0.60	0.56	62.6	64.5	1.9
9	0.015	0.010	0.62	0.28	40.6	33.3	1.7
10	0.021	0.009	0.60	0.35	39.1	57.1	1.7
平均值	0.021	0.012	0.61	0.46	66.3	46.9	1.8

$$\Delta G^0 = -431\,235.48 + 139.29T \tag{4}$$

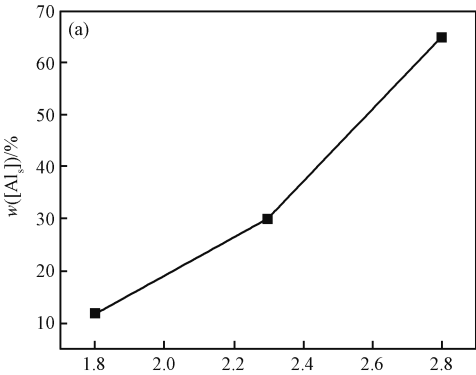


$$\Delta G^0 = -124\,133.4 - 1.93T \tag{5}$$

式(2)~式(5)反应都是以氧化反应的方式进行的,其逆反应为 Al₂O₃ 的还原反应。如果自由能变为负值,则氧化反应发生,如果自由能变化值为正,则还原反应发生,自由能变化为零时达到平衡。

由式(2)和式(4)得到反应式(6)。当该反应的自由能变化为零时,铝与精炼渣之间的反应处于相对平衡状态。

$$[Al] + \frac{3}{8}(SiO_2) + \frac{3}{4}(FeO) = \frac{1}{2}(Al_2O_3) + \frac{3}{8}[Si] + \frac{3}{4}[Fe]$$
$$\Delta G^0 = -292\,213.74 + 90.305T \tag{6}$$



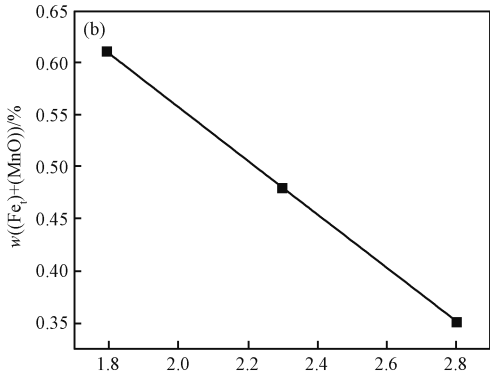
式(6)的反应平衡常数 K 为

$$K = \frac{a_{Al_2O_3}^{1/2} a_{Si}^{3/8}}{a_{FeO}^{3/4} a_{SiO_2}^{3/8} a_{Al}} \tag{7}$$

式中: a_{Al} 、 a_{Si} 分别为铝和硅的活度; a_{FeO} 、 $a_{Al_2O_3}$ 、 a_{SiO_2} 分别为 FeO、Al₂O₃、SiO₂ 的活度。

根据式(6),与精炼渣中 $w((Al_2O_3))$ 和温度成正比,与 $w((SiO_2))$ 和 $w((Fe_tO))$ 呈反比。

从生产实践来看,钢液中的铝质量分数随碱度的增加而增加,渣中的不稳定氧化物随着碱度的增加而减少,如图 1 所示。尤其是碱度大于 2.2 时,铝质量分数增加更加明显,如果使钢水中 $w([Al_s])$ 小于 0.005 0%,精炼渣碱度必须控制在 2.5 以内。碱度约为 1.6 时,渣中 $w((Fe_tO)+(MnO))$ 约为 1.0%,基本不具备脱硫的条件。所以,精炼过程既要保证钢液中铝 $w([Al_s])$ 小于 0.005%,又要具备脱硫条件,精炼渣碱度 R 必须控制在 1.8~2.5。



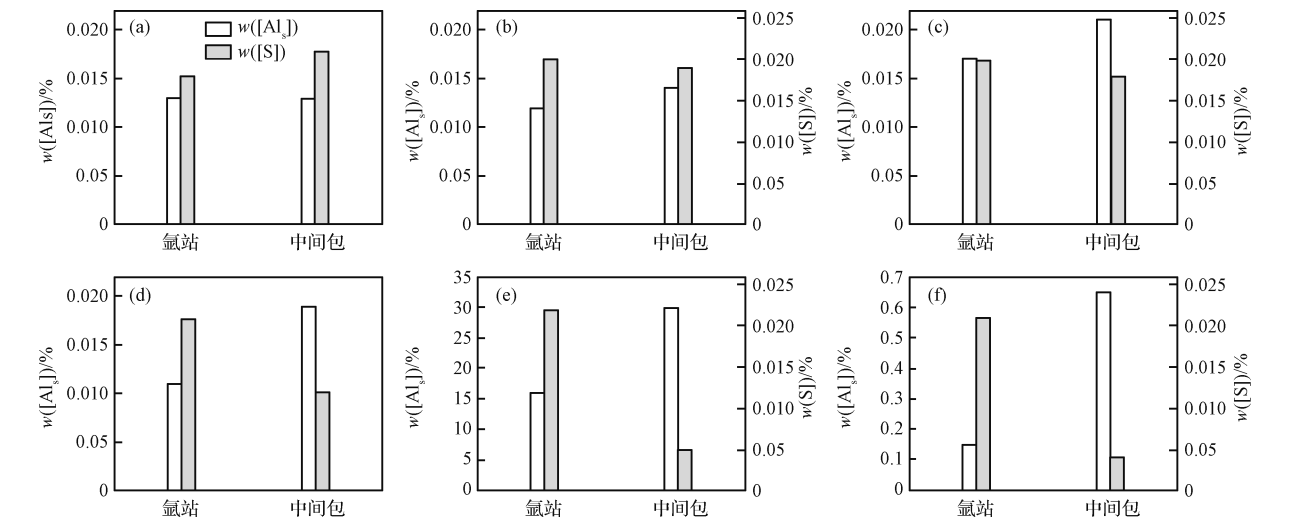
(a) $w([Al_s])$; (b) $w((Fe_tO)+(MnO))$ 。

图 1 精炼过程 $w([Al_s])$ 和 $w((Fe_tO)+(MnO))$ 与碱度的关系

Fig. 1 Relationship between $w([Al_s])$, $w((Fe_tO)+(MnO))$ and R during LF refining

2.3 精炼渣碱度对钢液硫和铝的影响

分别在不同的炉次上进行了不同碱度的试验,分 别在转炉出钢后氩站、中间包取样,研究钢液中 $w([S])$ 和 $w([Al_s])$ 在精炼过程的变化情况,如图 2 所示。



(a) $R=0.9$; (b) $R=1.2$; (c) $R=1.6$; (d) $R=1.8$; (e) $R=2.2$; (f) $R=2.8$ 。
图 2 不同碱度时 $w([S])$ 和 $w([Al_s])$ 的变化情况
Fig. 2 Changes of $w([S])$ and $w([Al_s])$ at different R

由图 2 可知,从 6 种不同的碱度试验工艺看,精炼碱度 R 约为 1.6 是增铝和脱硫的大致拐点,超过该值钢液增铝变得明显,同时脱硫率增加得也很明显。所以,可根据对产品质量的需求采用不同碱度的工艺制度。

2.4 两步造渣法工艺试验

理论结果显示^[25],AOD 炉渣碱度为 1.4~2.4 时, α_{CaO} 与碱度呈线性关系,得出了不同条件下精炼渣最低理论碱度。由于低碱度渣脱硫效果较差,提出在 AOD 高碱度精炼渣脱硫、LF 低碱度精炼渣使夹杂物

塑性化的工艺。借鉴上述思路,在帘线钢生产中,在 LF 前期造高碱度渣进行脱硫,LF 精炼后期碱度降低,把钢液中 $w([Al_s])$ 降下来,达到夹杂物塑性化的目的。

2.4.1 碱度从 2.2 降至 1.6 试验

分别在两个不同炉次上进行了两步造渣法试验,把精炼碱度从 2.2 降低至 1.6,工艺路线为:LF 精炼前期碱度控制约为 2.2,精炼 30 min 后使用石英砂降低碱度至约为 1.6,精炼 15 min 离站软吹,软吹 40 min 上钢浇铸,开浇 15 min 在中间包取样分析。具体结果见表 3。

炉次		LF 精炼过程			
		氩站	变渣前	变渣 15 min 后	中间包
11904011	精炼渣碱度		2.25	1.61	1.60
	$w((Fe_sO)+(MnO)) / \%$		0.625	1.00	1.002
	$w([S]) / \%$	0.023	0.006	0.008	0.009
	$w([Al_s]) / \%$	0.001 1	0.002 8	0.002 2	0.002 1
11904013	精炼渣碱度		2.20	1.60	1.61
	$w((Fe_sO)+(MnO)) / \%$		0.591	0.739	0.801
	$w([S]) / \%$	0.022	0.007	0.01	0.01
	$w([Al_s]) / \%$	0.001 4	0.003 0	0.002 2	0.002 2

由表 3 可知,碱度从 2.2 降低至 1.6,渣中氧性增加明显,钢液发生回硫, $w([Al_s])$ 降低。两个炉次变渣前脱硫率分别为 73.4%、68.1%,增铝率分别为 154.5%、114.3%;变渣后至中间包回硫率分别

为 50.0%、57.1%，铝降低率分别为 25.0%、26.7%；整个精炼过程脱硫率分别为 60.9%、54.5%，增铝率分别为 90.9%、57.1%。所以，钢液虽然在变渣后发生回硫现象，但整个过程脱硫率仍然较高，

$w([Al_s])$ 也得到有效降低。
2.4.2 精炼碱度从 2.2 降低至 1.2 试验
工艺路线与 2.4.1 一致，把精炼碱度从 2.2 降低至 1.2，具体结果见表 4。

表 4 碱度为 1.2 时 $w([S])$ 、 $w([Al_s])$ 和 $w((Fe_sO)+(MnO))$ 变化情况
Table 4 Changes of $w([S])$, $w([Al_s])$ and $w((Fe_sO)+(MnO))$ when R is 1.2

炉次	检测项目	LF 精炼过程			
		氩站	变渣前	变渣系 15 min 后	中间包
21901056	精炼渣碱度		2.24	1.19	1.19
	$w((Fe_sO)+(MnO))/\%$		0.537	2.449	2.448
	$w([S])/\%$	0.023	0.007	0.01	0.011
	$w([Al_s])/\%$	0.001 2	0.003 0	0.001 7	0.001 6

由表 4 可知，精炼渣碱度从 2.2 左右降低至 1.2 左右，渣中 $w((Fe_sO)+(MnO))$ 增加更加明显，超过了 2%。变渣前脱硫率为 69.6%，增铝率为 150.0%；变渣后中间包回硫率为 57.1%，铝降低率为 46.7%；整个精炼过程脱硫率为 52.2%，增铝率为 33.3%。

2.5 夹杂物分析
分别对精炼过程中碱度为 1.2 和两步造渣法碱度从 2.2 降低至 1.2 的炉次，在钢坯上取样进行大样电解和夹杂物能谱分析，结果见表 5，两步造渣法工艺典型夹杂物照片如图 3 所示，能谱成分见表 6。

表 5 大样电解大型氧化物分析结果
Table 5 Analysis results of large oxide in bulk sample electrolysis

试样	原样质量/kg	剩余样质量/kg	电解样质量/kg	夹杂物		不同粒度夹杂物质量/mg	
				质量/mg	总量/(mg · kg ⁻¹)	140~300 μm	>300 μm
1 号	2.732	0.905	1.827	0.62	0.339	0.30	0.30
2 号	2.515	0.512	2.003	0.73	0.364	0.30	0.45

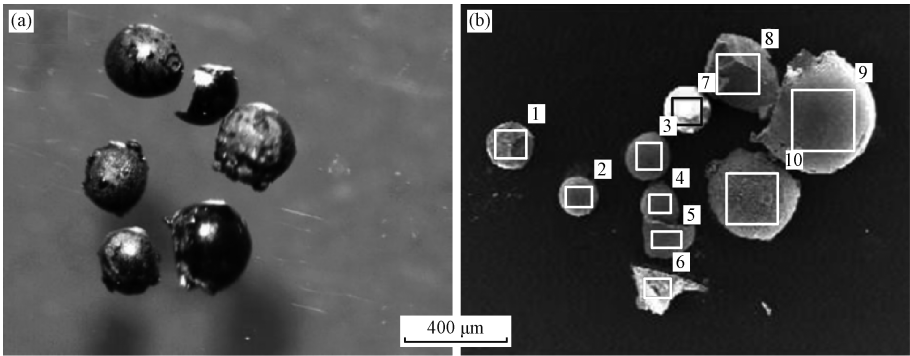


图 3 典型大颗粒夹杂物形貌
Fig.3 Morphology of typical large inclusions

由表 5 可知，精炼过程中碱度为 1.2 和两步造渣法碱度从 2.2 降低至 1.2，钢液整体洁净度水平相当。由表 6 可知，复合夹杂物中 $w(Al_2O_3)$ 在 8 点最高，为 21.0%，接近夹杂物 $w(Al_2O_3)$ 控制在 20% 以内的要求，其余点 $w(Al_2O_3)$ 均在 20% 以内。

效果明显，碱度降低后钢液 $w([Al_s])$ 降低较多，虽然发生钢液回硫现象，但回硫率不足以抵消前期的脱硫率，整个精炼过程取得了较好的脱硫效果。尤其把碱度降低至 1.2 时，钢液中 $w([S])$ 、 $w([Al_s])$ 分别达到 0.011% 和 0.001 6%，可以达到铁水在不经 KR 处理的情况下，钢液中 $w([S])$ 小于

综上所述，精炼两步造渣工艺前期高碱度脱硫

0.012%的内控要求,同时 $w([Al_s])$ 控制在较低的范围。

表 6 图 3(b)中夹杂物能谱分析结果

Table 6 Results of inclusion EDS in Fig. 3

谱图	$w((Al_2O_3))$	$w((SiO_2))$	$w((MnO))$	$w((CaO))$	$w((MgO))$
1	13.8	59.5	12.5	7.7	6.5
2	16.4	50.4	19.3	9.7	4.2
3	14.3	39.3	33.8	9.4	5.2
4	14.4	45.0	26.1	11.2	4.3
5	15.8	40.9	23.9	14.9	5.5
6	10.5	47.1	34.2	8.2	0
7	10.0	68.6	7.7	10.0	3.7
8	21.0	39.1	21.7	11.3	6.9
9	14.3	49.5	18.3	10.7	7.2
10	0	76.8	12.4	8.7	2.1

3 结论

(1)钢中 $w([Al_s])$ 随精炼碱度的降低而降低,碱度大于 2.2 时降低的幅度较大,碱度小于 1.6 后影响变得平缓,如果钢液中 $w([Al_s])$ 小于 0.005%,精炼碱度必须控制在 2.5 以内。

(2)渣中 $w((Fe_2O_3)+(MnO))$ 随碱度的降低而升高,碱度为 1.6 时,渣中 $w((Fe_2O_3)+(MnO))$ 为 1%,基本不具备脱硫条件。

(3)精炼两步造渣工艺,精炼前期高碱度脱硫效果明显,碱度降低后 $w([Al_s])$ 降低较多,虽然发生钢液回硫现象,但回硫不足以抵消前期的脱硫。把碱度从 2.2 降至 1.2,钢液中 $w([S])$ 、 $w([Al_s])$ 分别可控制在 0.011%和 0.0016%。

参考文献:

[1] Minamideia T, Hiraga N, Shibata T. Developments in steel cord wire rods[J]. Kobe Steel Engineering Reports, 2000, 50(3):31.

[2] 汤伟, 杨俊, 刘青, 等. 高品质弹簧钢精炼过程氧化物夹杂的控制[J]. 中国冶金, 2020, 30(5): 17. (TANG Wei, YANG Jun, LIU Qing, et al. Control of oxide inclusions in high quality spring steel during refining process[J]. China Metallurgy, 2020, 30(5): 17.)

[3] 王丙兴, 朱伏先, 王超, 等. 氧化物冶金在大线能量焊接用钢中的应用[J]. 钢铁, 2019, 54(9): 12. (WANG Bing-xing, ZHU Fu-xian, WANG Chao, et al. Application of oxide metallurgy in high heat input welding steels[J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 12.)

[4] 李西德, 邓深, 杨跃标, 等. SWRH82B 硬线钢 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系夹杂物塑性化控制的生产实践[J]. 中国冶金, 2018,

28(2): 61. (LI Xi-de, DENG Shen, YANG Yue-biao, et al. Productive practice of plastic deformation control of CaO-Al₂O₃-SiO₂ inclusions in SWRH82B hard wire steel[J]. China Metallurgy, 2018, 28(2): 61.)

[5] Ujije Y, Kimura H. Production technology for steel bars and wire rods[J]. Nippon teel Technical Report, 1999, 80(7): 1.

[6] Bernard G, Ribound P V, Urbain G. Oxide inclusions plasticity [C]//La Revue de Metallurgie CTT. Mai: [s. n.], 1981: 421.

[7] 辛彩萍, 岳峰, 蒋晨旭, 等. 顶渣对帘线钢中夹杂物塑性化的控制[J]. 中国冶金, 2015, 25(4): 33. (XIN Cai-ping, YUE Feng, JIANG Chen-xu, et al. Controlling the plastic inclusions in tire cord steel by top slag[J]. China Metallurgy, 2015, 25(4): 33.)

[8] Shinsho Y, Nozaki T, Sorimachi K I, et al. Inference of secondary steelmaking on occurrence of nonmetallic inclusions in high-carbon steel for tire cord[J]. Wire Journal International, 1998(9): 145.

[9] 薛正良, 胡会军, 于学斌, 等. 帘线钢 82B 精炼过程中的酸溶铝控制[J]. 炼钢, 2003(2): 22. (XUE Zheng-liang, HU Hui-jun, YU Xue-bin, et al. Acid soluble Al control during refining of high carbon steel for tire cord[J]. Steelmaking, 2003(2): 22.)

[10] 何肖飞, 王新华, 陈书浩, 等. 低碱度低氧化铝精炼渣对帘线钢夹杂物控制[J]. 钢铁, 2014, 49(6): 30. (HE Xiao-fei, WANG Xin-hua, CHEGN Shu-hao, et al. Inclusion control of tire cord steel based on refining slag of low basicity and low alumina content[J]. Iron and Steel, 2014, 49(6): 30.)

[11] 陈书浩, 王新华, 何肖飞, 等. 帘线钢种酸溶铝含量的变化及其对夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2011, 46(10): 42. (CHEN Shu-hao, WANG Xin-hua, HE Xiao-fei, et al. Effect of acid-soluble aluminum on inclusions in tyre cord steel[J]. Iron and Steel, 2011, 46(10): 42.)

[12] Gatellier G, Gaye H. Inclusions control in low-aluminum

steel[J]. La Revue de Metallurgie-CIT,1992,89(4):361.

[13] YANG H L, YE J, WU X, et al. Optimum composition of CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO slag for spring steel deoxidized by Si and Mn in production[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2):1435.

[14] Park J S, Park J H. Effect of slag composition on the concentration of Al₂O₃ in the inclusions in Si-Mn-killed steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(3): 953.

[15] REN Y, ZHANG L, FANG W, et al. Effect of slag composition on inclusions in Si-deoxidized 18Cr-8Ni stainless steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2): 1024.

[16] 张奚东, 孙洞. LF 钢包脱硫试验[J]. 上海金属, 1997, 19(3):5. (ZHANG Xi-dong, SUN Jiong. The research on desulphurization in LF[J]. Shanghai Metals, 1997, 19(3):5.)

[17] 川本正幸ほか. 高速连铸用パウダの特性设计[J]. 鉄鋼, 1994,80(3): 219.

[18] 沢村信奉, 大西泰, 石光国男, ほか. Ca“フテッスイソソエクシヨソ法”による溶鋼処理技術[J]. 鉄鋼, 1978, 64(4): 116.

[19] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2002. (HUANG Xi-hu, Principles of Steel Metallurgy[M]. 3 rd. Beijing: Metallurgical Industry Press,2002)

[20] Rachev I P. Solubility of BaS in BaO-BaF₂ slag and the influence of FeO_x, SiO₂, Cr₂O₃, BaCl₂, CaO and MgO on the sulfide capacities of this system[J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23B(4): 175.

[21] 张明博. 低钛高炉渣制备 LF 精炼渣及其脱硫性能与实验研究[J]. 北方钒钛,2018(3):5. (ZHANG Ming-bo. Preparation of LF refining slag from low titanium blast furnace slag and its desulfurization performance and experimental study[J]. Northern Vanadium Titanium, 2018(3):5.)

[22] Mapelli C, Nicodemi W. Control of inclusion in a resulphurised steel[J]. Steel Research, 2000,71(5):161.

[23] 陈家祥. 钢铁冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. (CHEN Jia-xiang. Iron and Steel Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1990.)

[24] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998. (CHEN Jia-xiang. Data Manual of Steel Making Charts[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1998.)

[25] 韩少伟, 郭靖, 陈兴润, 等. 低碱度渣冶炼 304 不锈钢脱硫热力学和工业试验[J]. 钢铁, 2016, 53(6):47. (HAN Shao-wei, GUO Jing, CHEN Xing-run, et al. Thermodynamics of desulfurization of 304 stainless steel with low basicity slag [J]. Iron and Steel,2016,53(6):47.)



(上接第 40 页)

[18] MA Kai-hui, XU Jian, DENG Jun-yi, et al. Transient interaction between reduction and slagging reactions of wustite in simulated cohesive zone of blast furnace[J]. Metallurgical and Materials Transactions: B, 2018, 49(5): 2308.

[19] 李向伟, 陈令坤, 王炜. 球团矿富氢还原的动力学研究[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(4): 241. (LI Xiang-wei, CHEN Ling-kun, WANG Wei. Kinetics of hydrogen-rich reduction in pellets[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2013, 12(4): 241.)

[20] 沈峰满, 姜鑫, 魏国, 等. 富氢还原对烧结矿还原性及还原粉化的影响[J]. 中国冶金, 2014, 24(1): 2. (SHEN Feng-man, JIANG Xin, WEI Guo, et al. Effect of hydrogen reduction on reduction and reduction pulverization of sinter[J]. China Metallurgy, 2014, 24(1): 2.)

[21] 杨广庆, 国宏伟, 王春苗, 等. 酸性球团还原过程中微观结构变化研究[J]. 烧结球团, 2015, 40(2): 20. (YANG Guang-qing, GUO Hong-wei, WANG Chun-miao, et al. Study on microstructure changes during acid pellet reduction[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(2): 20.)

[22] 李胜, 何志军, 李云飞, 等. 不同球团矿和块矿配加条件下炉料冶金性能[J]. 钢铁, 2020, 55(1): 6. (LI Sheng, HE Zhi-jun, LI Yun-fei, et al. Metallurgical properties of furnace charge under different conditions of pellet ore and block ore addition[J]. Iron and Steel, 2020, 55(1): 6.)

[23] 牛乐乐, 刘征建, 张建良, 等. 铁矿粉矿物组成对烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(9): 27. (NIU Le-le, LIU Zheng-jian, ZHANG Jian-liang, et al. Effect of mineral composition of iron ore on metallurgical properties of sinter[J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 27.)