

· 工艺技术 ·

260 t 转炉-RH 流程 IF 钢 DC06 顶渣改质剂优化生产实践

胡巍¹ 徐斌¹ 黄嘉琦¹ 朱文睿¹ 黎季¹ 李任春² 刘俊山² 成日金^{1,3}

(1 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081;

2 河北钢铁集团邯钢分公司邯宝炼钢厂, 邯郸 056001; 3 河北钢铁集团邯钢分公司技术中心, 邯郸 056001)

摘要 为保证精炼渣有较好的脱氧与吸附夹杂物的能力, 采取 5 种顶渣改质剂对无间隙原子钢(IF 钢)转炉出钢钢包顶渣进行改质工业试验。并采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)对渣成分进行检测, 运用 FactSage 软件对精炼渣粘度进行计算。研究表明, 5 种改质剂改质后, 真空循环脱气(RH)出站时, 5 炉精炼渣中 TFe 含量控制在 6.46%~7.76%, 钙铝比(CaO)/(Al₂O₃)控制在 1.60~1.86, 1600℃时精炼渣粘度在 0.057~0.068 Pa·s, 导致夹杂降级比为 2.10%~12.86%, 3 号改质剂(48.5% Al-10.2% Al₂O₃-18.1% CaO-6.0% SiO₂-8.0% CaF₂)综合性能最合适。采取转炉出钢碳由改进前的 0.032% 增大至 0.045%, 优化改质剂用于生产后, RH 进站精炼渣中全铁(TFe)控制在 7.13%, RH 出站渣中 FeO 控制在 5.52%, 热轧时因顶渣改质造成的废次比为 0.071%, 降低了 20.2%。

关键词 IF 超低碳钢 DC06 RH 改质剂 精炼渣 全铁 废次比

Optimization and Production Practice of Top Slag Modifier for IF Steel DC06 with 260 t BOF-RH Flowsheet

Hu Wei¹, Xu Bin¹, Huang Jiaqi¹, Zhu Wenrui¹, Li Ji¹, Li Renchun², Liu Junshan² and Cheng Rijin^{1,3}
(1 The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 Hanbao Steel making Plant, HBIS Group Hansteel Company, Handan 056001;

3 Technical Center, HBIS Group Hansteel Company, Handan 056001)

Abstract In order to ensure that the refining slag has better deoxidation and absorption ability of inclusions, the five top slag modifiers are used to carry out industrial tests on the top slag of the converter tapping ladle of IF steel. ICP-AES (Induction Coupling Plasma-Atomic Emission Spectroscopy) is used to detect the slag composition and FactSage software is used to calculate the viscosity of refining slag. The results show the vacuum circulation degassing (RH) is out the station, after 5 kinds of modifiers are used, that the content of TFe in the refining slag of 5 heats is controlled at 6.46%~7.76%, the (CaO)/(Al₂O₃) ratio is 1.60~1.86 at 1600℃, the viscosity of refining slag is 0.057~0.068 Pa·s, the degradation ratio of degradation caused by inclusions is 2.10%~12.86%, and No. 3 modifier (48.5% Al-10.2% Al₂O₃-18.1% CaO-6.0% SiO₂-8.0% CaF₂) has the best comprehensive performance. After the carbon content in the steel increases to 0.045% from 0.032% during converter tapping, and the optimized modifier is used in production, the TFe content in slag before RH is controlled at 7.13%, and the FeO content in slag after RH is controlled at 5.52% and during hot rolling, the ratio of off-and sub-quality products with top slag modification is 0.071%, which is reduced by 20.2%.

Material Index IF Ultra Low Carbon Steel DC06, RH, Modifier, Refining Slag, Total Iron, Ratio of off- and Sub-Quality Product

无间隙原子钢(IF 钢)广泛应用于冷轧深冲后汽车面板和家电面板等外覆盖件, 它对夹杂物的控制十分严格^[1]。IF 钢属于超低碳钢, 转炉出钢时必须沸腾出钢, 钢中的 FeO 和 MnO 总含量达 20% 以上, 钢液的氧含量也高达 0.05%~0.07%, 钢包顶渣的氧化程度越高, 它对钢液的二次氧化亦严重。为解决该问题, 对钢包顶渣加入含铝渣进行改质, 降低渣中 FeO 和 MnO, RH 过程总氧逐渐降低, 超低碳

冷轧板表面缺陷也随之降低^[2]。

脱氧工艺对 IF 钢洁净度有影响。马焕珣等采取出钢加铝强脱氧, RH 真空循环处理的工艺 1 和出钢添加部分铝预脱氧, RH 真空循环利用钢中碳脱氧, 后加铝强脱氧的工艺 2 来脱氧, 研究发现工艺 2 比工艺 1 有更好的脱氧及控夹杂能力^[3]。RH 进站渣中 TFe 降低导致钢中 [O] 的降低, TFe 太低的炉次精炼深脱碳时平均吹氧量较大, 使得铝脱氧前钢

通讯作者: 成日金, 博士, 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081
E-mail: chengrijin@wust.edu.cn

中[O]较高。RH 结束渣TFe与夹杂物数量呈线性关系,TFe越低夹杂物数量越少,镇静和浇注过程氧化性顶渣会持续危害钢液洁净度^[4],尤其是精炼结束时炉渣氧化性高时,炉渣向钢中传氧,使中间包钢中Al₂O₃类夹杂物上升^[5-6]。对于IF钢的生产,一般要求RH进站渣中FeO和MnO总含量控制在5%~10%,而RH出站渣中FeO一般不超过RH进站渣中FeO,渣中FeO含量与脱氧改质剂加入量和转炉下渣量关系较大^[7]。故顶渣改质需要选取合适脱氧工艺并控制RH出站渣中TFe。

常用的顶渣改质剂有Al+CaO、Al+CaCO₃、Al+CaO+CaF₂、Al+CaO+Al₂O₃^[2]。美国内陆钢铁公司试验了不同种类改质剂对钢包顶渣改质效果影响,研究发现,含有25%铝粒+65%CaCO₃+10%粘结剂的改质剂处理顶渣时,存在RH终渣FeO含量偏高。采用含25%铝粒+74%CaO改质剂处理顶渣时,虽然改质后RH终渣FeO含量在4%~5%,但反应时间长,铝损大。而采用含50%铝粒+5%CaCO₃+44%Al₂O₃时,改质效果相对较好^[7]。企业目前多采用Al+CaO+Al₂O₃渣系改质剂,适当时候会添加部分CaF₂来改善其流动性。

使用铝质改质剂降低炉渣氧化性,必须加入足量石灰以保证顶渣吸收Al₂O₃能力^[8]。渣中Al₂O₃浓度若偏大,这会影响渣对钢液中Al₂O₃吸收,一般认为,(CaO)/(Al₂O₃)比值(简称为C/A)在1.2~1.8时,渣对Al₂O₃吸附能力最大。刘彭等研究发现,精炼渣中C/A在1.4~1.8时,更有利于吸收夹

杂物^[9]。姜仁波发现,RH脱氧结束后,确保RH结束渣C/A=1.3~1.5,既可以减少钢渣间传氧,又可以确保顶渣吸附夹杂的能力^[10]。Qin与Wang等人研究发现,钢包渣会影响RH出站及静置时刻钢的洁净度,RH结束时钢中全氧与渣中FeO量成线性关系^[11];一定量FeO时,渣中钙铝比C/A在1.5~2.0时钢中全氧比C/A比在1.0~1.4时钢中全氧更低^[12]。因此,研究不同铝含量及钙铝比的改质剂对精炼渣改质效果的影响,对控制钢中氧及夹杂物显得较为重要。

Al+CaO+Al₂O₃渣系对IF钢顶渣改质有良好的效果,本文采取不同厂家的铝粒改质剂,采取出钢添加部分铝渣预脱氧,RH真空循环利用钢中碳脱氧,后加铝强脱氧的工艺来脱氧,研究不同改质剂的改质效果,得到合适改质剂成分,为IF钢生产选择合适改质剂,并验证改质剂工业生产中的效果。

1 实验

1.1 生产工艺流程

实验取牌号为DC06的IF钢,典型成分见表1所示。其工艺流程为:260 t转炉-RH-静置-(900~2150)mm×230 mm板坯连铸。转炉出钢1/3时,向钢包内加入石灰400~600 kg,出钢后再顶渣中加入铝渣脱氧剂680 kg。RH真空处理包括脱碳,然后铝脱氧,接着加入含70%Ti的Ti-Fe合金,保持RH纯循环时间8~10 min。RH处理后,钢水在浇铸前在钢包中保持静置25~45 min。

表1 IF钢DC06化学成分/%

Table 1 Chemical composition of IF steel DC06 /%

C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	B	N
≤0.002 0	≤0.010	0.08~0.14	≤0.012	0.009	0.020~0.050	0.065~0.075	0.000 3~0.000 8	≤0.003

1.2 改质剂与生产试验

实验选择5种铝渣球,高铝含量铝渣球3种,中铝含量铝渣球2种,粒度为25~30 mm,其成分见表2所示。1、3、4号为高铝含量铝渣球,其分别为高、中、高钙铝比;2、5号为中铝含量铝渣球,2号铝渣球不含氟;其他组分均含有4.78%~8.00% CaF₂。每组铝渣球进行预脱氧实验4~5炉,每组渣的成分取平均值。渣样成分采取电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)检测。

1.3 精炼渣粘度值模拟

采用热力学软件FactSage7.3中的“Equilib”模块对精炼渣成分进行平衡计算,得到不同温度下液

表2 改质铝渣球成分/%

Table 2 Ingredient of aluminum shot slag modifier /%

编号	Al	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	CaF ₂	H ₂ O
1	49.19	7.24	26.24	3.29	7.29	1.78
2	37.13	15.11	21.12	4.24	-	<2.00
3	48.50	10.20	18.10	6.00	8.00	1.80
4	49.55	7.98	23.52	2.82	7.38	0.89
5	37.05	15.14	21.95	5.45	4.78	<2.00

注:“-”未检测。

相渣与固态渣的成分与质量分数。再运用“Viscosity”模块计算液态渣不同温度下的粘度,最后根据式(1)求出精炼渣实际粘度。

$$\eta_{(\text{固液混合物})} \approx \eta_{(\text{液体})} \cdot (1 - \text{固相分数})^{-2.5} \quad (1)$$

2 实验结果与分析

2.1 精炼渣成分变化

高钙铝渣球熔化情况观察发现,高钙铝渣球加入前炉渣为氧化渣,钢包车开出炉后平台,熔化情况良好,基本无不熔化现象,连铸浇铸效果良好,浇注液面平稳。

5 种铝渣球用于钢包改质后,渣成分平均值见表 3 所示。从表 3 可知,按照 RH 出站渣中 TFe 含量排名来看,其排名依次为 2 号、3 号、1 号、5 号和 4 号。2 号高钙铝渣球改质后,RH 出站渣中 TFe 为 6.46%,相对较小; $(CaO)/(Al_2O_3)$ 比为 1.70,在 1.2 ~ 1.8。3 号、1 号、5 号和 4 号高钙铝渣球用于顶渣改质后,RH 出站渣中 TFe 依次为 7.09%、7.58%、7.61% 和 7.76%,整体值比 2 号精炼渣的 TFe 值大;且 3 号、1 号、5 号和 4 号这 4 个渣样的 $(CaO)/(Al_2O_3)$ 比分别为 1.60、1.86、1.67 和 1.83,1 号和 4 号渣的 CaO/Al_2O_3 偏大,影响后期夹杂物的吸附。

2.2 改质剂改质效果对比分析

高钙铝渣球改质后,因夹杂物问题导致的铸坯降级的比例见表 4 所示。从表 4 可以看出,1 ~ 5 号高钙铝渣球改质后,因夹杂物导致降级的比例分别为 12.86%、7.62%、2.10%、3.45% 和 2.19%。1 号铝渣球因夹杂物而降级的比例太高,其次是 2 号、4 号。3 号和 5 号渣生产的轧板检测数据中因夹杂降级的比例相对较低。

由表 2 可知,1 号改质剂中的 CaO 和 Al_2O_3 分别为 26.24% 和 7.24,改质剂中钙高铝低,精炼渣的钙铝比 C/A 值为 1.86,在 5 组精炼渣中该值最大,较大的 C/A 值不利于含 Al_2O_3 夹杂物上浮;且渣中 TFe 值为 7.58,相对偏大,容易造成二次氧化,故轧板因夹杂物降级比偏大。2 号渣的 TFe 含量最小,C/A 也较为合适,但夹杂物导致的降级比也偏高。究其原因发现,2 号改质剂是 5 组改质剂中唯一一组不含 CaF_2 的改质剂,无 CaF_2 对精炼渣流动性可能造成影响。5 组渣系的粘度值见图 1 所示。从图 1 可知,2 号精炼渣的粘度值在 1 400 ~ 1 600 °C 始终最大。5 组精炼渣在 1 600 °C 时,粘度值分别为 0.061、0.068、0.059、0.057、0.062 Pa·s。精炼渣较大的粘度不利于传质,影响了 2 号精炼渣去除夹杂

表 3 转炉-RH 精炼渣组成

Table 3 Ingredient of converter- RH refining slag

渣号	工艺	渣的成分 / %						$(CaO)/(Al_2O_3)$	$R = (CaO)/(SiO_2)$
		CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	TFe		
1	转炉	38.98	7.31	11.60	2.08	1.80	20.09		3.36
	RH 进站	42.65	7.416	7.84	16.9	1.28	10.81		5.44
	RH 出站	40.03	7.89	7.09	21.91	1.29	7.58	1.86	5.65
2	转炉	35.93	7.58	11.81	4.10	-	19.87		3.04
	RH 进站	36.68	7.45	7.79	28.10	-	10.17		4.71
	RH 出站	42.29	7.38	7.71	25.48	-	6.46	1.70	5.49
3	转炉	39.42	7.76	11.32	3.22	-	21.25		3.48
	RH 进站	43.70	7.26	7.70	22.12	-	9.70		5.68
	RH 出站	43.86	7.30	7.04	28.23	-	7.09	1.60	6.23
4	转炉	42.58	6.21	12.79	2.96	1.93	20.45		3.33
	RH 进站	44.33	6.46	6.38	23.80	1.82	11.58		6.95
	RH 出站	44.97	6.43	6.42	24.91	1.83	7.76	1.83	7.00
5	转炉	45.97	5.68	10.18	4.79	1.76	20.42		4.52
	RH 进站	50.17	6.45	7.29	23.18	1.55	9.46		6.88
	RH 出站	52.77	4.81	5.44	31.97	1.58	7.61	1.67	9.70

注:“-”表示未检测。

表 4 轧板夹杂物降级比

Table 4 Degradation ratio of inclusion rating of rolled plate

编号	实验产量/t	因夹杂物降级量/t	夹杂导致降级的降级比/%
1	1 382.656	177.759	12.86
2	1 360.298	103.71	7.62
3	1 332.234	28.008	2.10
4	1 050.507	36.204	3.45(异物降级)
5	1 111.406	24.33	2.19

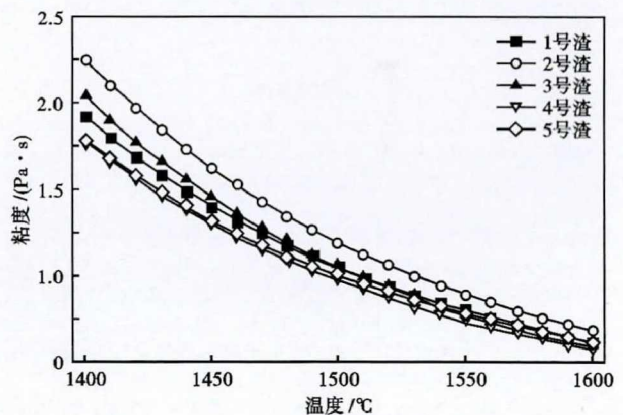


图 1 精炼渣粘度模拟

Fig. 1 Viscosity simulation of refining slag

物的效果。3 号精炼渣渣中 TFe 含量较低,钙铝比也较为合适,渣系在 1 600 °C 时的粘度也较低,因夹杂物导致的降级比也最低,3 号改质剂相对最为合适。4 号精炼渣中 TFe 含量最高,渣对钢液二次氧化相对最大;且 4 号渣的 C/A 值大于 1.80,也不利于 Al_2O_3 的吸附,试验中发现因异物降级比为 3.45%。5 号精炼渣中 TFe 含量相对其他组较高,但渣中 C/A 值为 1.67,该值较为合适,渣中 SiO_2 含

量较低,有利于钢中溶解氧的脱除,轧板因夹杂物导致的降级比为 2.19%,轧板质量相对较好。

从炉渣样分析可以看出:该高钙铝渣球加入后明显改变了炉渣组成,炉渣中的 TFe 含量降低明显,RH 出站平均值均小于 8%,满足实验目的要求。高钙铝渣球在邯宝炼钢厂试用结果表明:该产品具有还原性强、部分高钙炉渣球对钢包渣改质效果满足生产汽车板工艺的要求。3 号改质剂较为合适,其次是 5 号;再次是 4 号渣,但它钙铝比偏高,不利于 Al_2O_3 的上浮吸附;2 号和 1 号因夹杂物降级比偏高,不太适合。

3 工业实践

通过 5 种改质剂改质效果的对比,选取合适改质剂用于生产。由于改进前 RH 进站渣中 TFe 含量在 9.46%~11.58%,RH 进站渣中 TFe 控制不是十分理想,通过采取转炉控碳方式,由改进前转炉出钢碳 0.032% 增大到 0.045%,使得转炉出钢时钢中的氧由 600×10^{-6} 以上降低至 500×10^{-6} 以内。对生产中 RH 进、出站渣中 TFe 含量做了跟踪分析,RH 进站渣中 TFe 比例控制在 7.13%,RH 出站渣中 FeO 控制到 5.52%,渣中 FeO 控制良好。热轧时因顶渣改质原因造成的夹杂物废次比 2017 年~2018 年两年中热轧时因顶渣改质造成的夹杂物废次降比为

0.089%。转炉控碳方式改进后,热轧时因顶渣改质造成的废次比为 0.071%,因顶渣改质造成的废次比比改质前降低了 20.2%。

4 结语

(1) 针对 IF 钢,采取 5 种顶渣改质剂对钢包顶渣进行改质工业试验。5 种改质剂改质后,5 炉精炼渣 RH 出站时 TFe 含量分别控制在 7.58%、6.46%、7.09%、7.76% 和 7.61%,钙铝比 C/A 分别控制在 1.86、1.70、1.60、1.83 和 1.67,1600 °C 时精炼渣粘度分别为 0.061、0.068、0.059、0.057、0.062 Pa·s,夹杂和异物导致降级的降级比分别为 12.86%、7.62%、2.10%、3.45% 和 2.19%。

(2) 3 号改质剂(48.5% Al-10.2% Al_2O_3 -18.1% CaO-6.0% SiO_2 -8.0% CaF_2) 综合性能最合适。优化改质剂后,同时采取转炉出钢控碳,由改进前转炉出钢碳 0.032% 增大至改进后的 0.045%。改进后,RH 进站渣中 TFe 控制在 7.13%,RH 出站渣中 FeO 控制在 5.52%,热轧时因顶渣改质造成的废次比为 0.071%,因顶渣改质造成的废次比比改质前降低了 20.2%。

武汉科技大学大学生创新创业训练计划项目(18ZRA007),耐火材料与冶金国家重点实验室开放基金(2018QN03)资助

参考文献

- [1] Wang M and Bao Y P. Source and Negative Effects of Macro-Inclusions in Titanium Stabilized Ultra Low Carbon Interstitial Free (Ti-IF) Steel[J]. Metals & Materials International,2012,18(1):29-35.
- [2] 邓必荣,张波,周剑丰,等. 210 t RH 精炼参数对 IF 钢洁净度的影响和工艺优化[J]. 特殊钢,2018,39(3):31-34.
- [3] 马焕珣,王新华,黄福祥,等. 脱氧工艺对低碳铝镇静钢洁净度的影响[J]. 钢铁,2016,51(1):19-24.
- [4] 苑鹏,李海波,罗衍昭,等. 超低碳钢顶渣氧化性对钢液洁净度的影响[J]. 工程科学学报,2016,38(12):1702-1710.
- [5] 彭著刚,齐江华,杨成威. 顶渣改质工艺对 IF 钢夹杂物的影响[J]. 工程科学学报,2018,40(S1):177-182.
- [6] Cheng R J, Li R C and Cheng D, et al. Revolution and Control of Fe-Al-(Mg, Ti)-O Oxide Inclusions in IF Steel during 260 t BOF-RH-CC Process[J]. Metals,2020,10(4):528.
- [7] 王睿. 邯钢超低碳 IF 钢冶炼工艺及冷轧板缺陷控制研究[D]. 北京:北京科技大学博士论文,2017.
- [8] 索金亮,王新华,李林平,等. 氧化性炉渣对 IF 钢洁净度的影响[J]. 炼钢,2016,32(6):62-67.
- [9] 刘彭,隋亚飞,徐刚军,等. 低碳钢夹杂物产生原因及控制[J]. 钢铁,2020,55(2):67-74.
- [10] 姜仁波. 减少 IF 钢包渣向钢水中传氧的研究[J]. 炼钢,2019,35(4):28-31.
- [11] Qin Y M, Wang X H and Li L P, et al. Effect of Oxidizing Slag on Cleanliness of IF Steel during Ladle Holding Process[J]. Steel Research International,2015,86(9):1037-1045.
- [12] Wang R, Bao Y P and Li Y H, et al. Effect of Slag Composition on Steel Cleanliness in Interstitial-Free Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2017,24(6):579-585.

胡巍(1998-),男,2020 年武汉科技大学(本科)毕业,钢铁冶金研究。E-mail:2553730111@qq.com

收稿日期:2020-11-02