



65Mn钢LF精炼渣系优化及工业试验

张保忠, 孙国敏, 李志伟, 彭勇生, 刘万善, 朱施利
(宁波钢铁有限公司, 宁波 315807)

摘要:为了研究适合高洁净度高碳钢的LF精炼渣渣系,通过FactSage热力学软件计算精炼渣碱度(R)、 $(CaO)/(Al_2O_3)$ 对精炼渣熔点的影响,得出最合适的精炼渣成分。根据热力学计算的精炼渣成分,降低原有渣系的钙铝比,并将优化的渣系成分用于65Mn钢工业试验。结果表明:优化后的精炼渣系成分质量分数为CaO 52%~58%、 Al_2O_3 28%~33%、 SiO_2 8%~12%、MgO 5%~7%、 $R=4\sim 6$ 、 $(CaO)/(Al_2O_3)=1.5\sim 2$;使用该渣系进行工业试验,LF出站时的 $T.[O]$ 可达 $7\times 10^{-6}\sim 13\times 10^{-6}$,RH出站时的 $T.[O]$ 可达 $6\times 10^{-6}\sim 12\times 10^{-6}$;钢中全氧质量分数基本可控制在 10×10^{-6} 内;65Mn钢卷中的B类细系夹杂均不大于1级,达到高级优质钢要求。

关键词:65Mn钢; LF; 精炼渣系; 全氧; 热力学计算

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00009 **中图分类号:**TF718

LF Refining Slag System Optimization and Industrial Testing for 65Mn Steel

Zhang Baozhong, Sun Guomin, Li Zhiwei, Peng Yongsheng, Liu Wanshan, Zhu Shili
(Ningbo Iron and Steel Co., Ltd., Ningbo 315807, China)

Abstract: In order to study the LF refining slag system suitable for high cleanliness and high carbon steel, the influence of refining slag alkalinity (R), $(CaO)/(Al_2O_3)$ on the melting point of the refined slag was calculated by FactSage thermodynamic software, and the most suitable refining slag composition was obtained. According to the thermodynamically calculated refining slag composition, the calcium-aluminum ratio of the original slag system was reduced, and the optimized slag composition was used for the 65Mn steel industrial test. The results show that the optimized refining slag components mass fraction are CaO 52%-58%, Al_2O_3 28%-33%, SiO_2 8%-12%, MgO 5%-7%, $R=4\sim 6$, $(CaO)/(Al_2O_3)=1.5\sim 2$. Using this slag system for industrial tests, $T.[O]$ can reach $7\times 10^{-6}\sim 13\times 10^{-6}$ after LF process. $T.[O]$ can reach $6\times 10^{-6}\sim 12\times 10^{-6}$ after RH process. The mass fraction of dissolved oxygen in the basically controllable steel is within 10×10^{-6} , The Class B thin inclusion grades in the 65Mn steel coil are not more than 1 grade, which meets the requirement of high quality steel.

Key Words: 65Mn Steel; LF; Refining Slag; Total Oxygen; Thermodynamic Calculation

高碳钢主要用于制造弹簧和耐磨零件,随着市场对高碳钢的质量要求越来越高,对其洁净度提出了更高的要求。正如65Mn钢等高碳钢需要高的强度和硬度、高的弹性极限和疲劳极限,故对钢的洁净度要求较高。钢的洁净度主要与钢水中全氧量和夹杂物尺寸数量有关,钢中非金属夹杂物大多数与钢中氧有关,而非金属夹杂物对弹簧钢等耐磨零件的疲劳性能有较大的影响。LF精炼具有良好的脱氧、去夹杂等功能,被大多数钢厂广泛应用。LF脱氧和控制夹杂物尺寸数量主要通过调整精炼渣系和软吹氩搅拌时间^[1-4]。

为了冶炼高品质高碳钢,国内外众多学者通过热力学计算、工业试验等方法对精炼渣系做了大量

研究。黄永生等^[5]研究发现,GCr15钢冶炼的精炼渣中MgO质量分数为5%~7%时,精炼渣系的低熔点区域较大,有利于改善精炼渣的流动性和脱氧效率。Yoon等^[6]研究发现,当精炼渣中CaO/ Al_2O_3 的质量比为1.7时,精炼钢水中的全氧量最低。Bielefeldt等^[7]研究认为,适当提高精炼渣碱度有利于提高钢水洁净度,减少钢水中氧化物夹杂。朱富强等^[8]研究发现,精炼渣粘度在1.5~2.0 Pa·s时,渣系吸附夹杂物的能力较强,钢水洁净度较高。因此,合适的精炼渣成分对提高钢材洁净度至关重要。某钢厂生产的高碳钢(如65Mn钢)对钢水洁净度要求较高,本文对65Mn钢冶炼过程中LF精炼渣系进行计算并进行工业试验,为后续高碳钢的高品质生产提

基金项目:宁波市重大科技任务攻关项目(2022Z105)

作者简介:张保忠(1969-),男,硕士,高级工程师; **收稿日期:**2023-02-06

通讯作者:孙国敏(1995-),男,硕士,工程师; **E-mail:**1778974253@qq.com

供理论与实践的指导。

1 优化前精炼渣系及渣系优化热力学计算

1.1 优化前精炼渣系

某钢厂生产高碳钢的优化前精炼渣系成分(质量分数)为:CaO49%~57%、Al₂O₃25%~32%、SiO₂9%~14%、MgO3%~7%、TFe+MnO<1.4%、碱度R=4~5。随机抽取5炉优化前的65Mn钢的精炼渣数据,结果见表1。

表1 优化前LF精炼渣成分

Table 1 LF refining slag composition before optimization

炉次	精炼渣成分(质量分数)/%						碱度 (R)	钙铝比
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TFe	MnO		
1	55.75	12.39	25.36	5.42	0.780	0.296	4.50	2.20
2	54.71	11.87	28.09	5.52	0.841	0.514	4.61	1.95
3	53.52	11.57	28.40	4.69	0.863	0.387	4.63	1.88
4	54.00	11.50	27.76	5.39	0.709	0.522	4.70	1.95
5	53.47	11.93	27.89	6.65	0.737	0.267	4.48	1.92
平均	54.30	11.80	27.50	5.50	0.780	0.400	4.60	1.98

由表1可知,优化前LF精炼渣系平均Al₂O₃质量分数为27.5%,5炉Al₂O₃质量分数均小于30%;现有渣系的钙铝比平均为1.98,有一炉钙铝比超过了2,整体钙铝比较大。文献[10]表明,钙铝比为1.5~2时,精炼渣渣系中CaO活度最大,Al₂O₃活度最小,此时,最有利于渣系吸附Al₂O₃夹杂。优化前渣系由于Al₂O₃质量分数较低,导致钙铝比较大,不利于渣系吸附Al₂O₃夹杂。

1.2 精炼渣系热力学计算

高碳钢精炼过程中的精炼渣成分主要为CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO,因此,本文研究的精炼渣系为CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO四元渣系。文献[5]表明,MgO质量

分数为5%~7%时,精炼渣系的低熔点区域较大,有利于改善精炼渣的流动性和脱氧效率,后续采用MgO质量分数为6%进行热力学计算^[8-9]。

通过FactSage热力学软件计算了1300~1600℃的CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO四元渣系的等温相图,结果如图1(a)所示。以SiO₂质量分数等于20%为分界线,将图1(a)中低熔点区域划分为A区域(黑色加粗部分)和B区域,结果如图1(b)所示。LF精炼渣需要满足脱硫和脱氧的条件,需使用高碱度低熔点精炼渣。B区域的SiO₂的质量分数较高,碱度较低,不适合作为精炼渣系成分区域,因此,本文研究的精炼渣系为A区域。A区域渣系成分(质量分数)为:CaO38%~56%,Al₂O₃26%~63%,SiO₂0~20%。该区域渣系熔点均在1500℃以下,这是由于CaO和Al₂O₃的质量分数较高,生成铝酸钙类盐低熔点化合物较多。

在图1(b)的低熔点A区域渣系基础上,探讨计算了精炼渣碱度和(CaO)/(Al₂O₃)对精炼渣系熔点的影响,结果如图2所示。从图2(a)可知,精炼渣碱度在3~4时,碱度变化区域包含的低熔点区域较大,但考虑到LF脱硫需要高碱度低熔点精炼渣,因此,碱度3~4不适合作为精炼渣。

精炼渣碱度在4~6时,碱度变化区域包含上述低熔点区域,面积较大,且碱度较大,这部分区域适合作为精炼渣。精炼渣碱度在6~9时,碱度变化区域所包含的低熔点区域很小,考虑到碱度过大,精炼渣流动性差,不利于钢渣间脱氧,因此,碱度为4~6较为合适。从图2(b)可知,当(CaO)/(Al₂O₃)为1~2时,钙铝比变化区域所包含的低熔点区域最大。当(CaO)/(Al₂O₃)为2~3时,钙铝比变化区域不包含低熔点区域。文献[10]表明,钙铝比

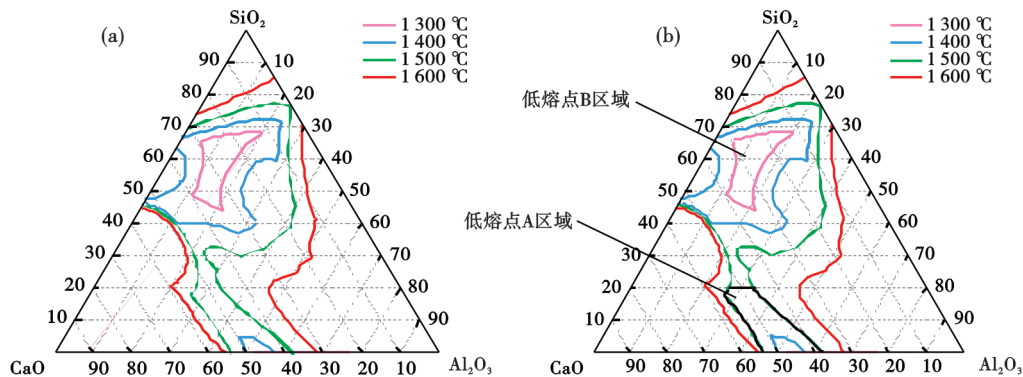


图1 CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO四元渣系等温相图:(a)四元渣系等温相图,(b)低熔点区域

Fig. 1 Isothermic phase diagram of the CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO quaternary slag : (a) quaternary slag system isothermal phase diagram , (b) low melting point region

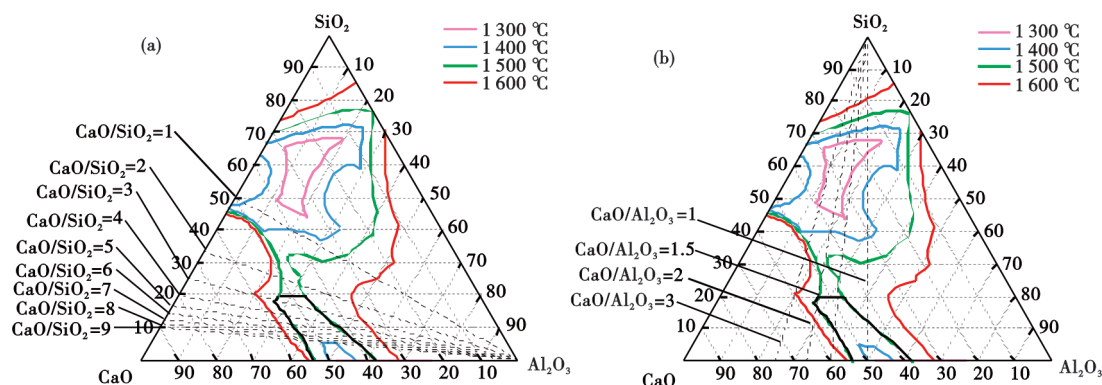


图 2 精炼渣碱度(a)和(CaO)/(Al₂O₃)(b)对精炼渣系熔点的影响

Fig. 2 Alkalinity (a) and (CaO)/(Al₂O₃) (b) of refining slag and their influence on melting point of refining slag

为 1.5 ~ 2 时,精炼渣渣系中 CaO 活度最大, Al₂O₃ 活度最小,此时最有利于渣系吸附 Al₂O₃ 夹杂。因此,钙铝比为 1.5 ~ 2 为合适。

综合精炼渣碱度和(CaO)/(Al₂O₃)对精炼渣系熔点的影响,结合精炼渣碱度为 4 ~ 6 和钙铝比为 1.5 ~ 2 作图,如图 3 所示。从图 3 可知,高碳钢合适的 CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO 四元渣系成分(质量分数)(图 3 中黑色三角形区域)为:CaO51% ~ 55%, Al₂O₃30% ~ 35%, SiO₂10% ~ 14%, MgO4% ~ 6%。

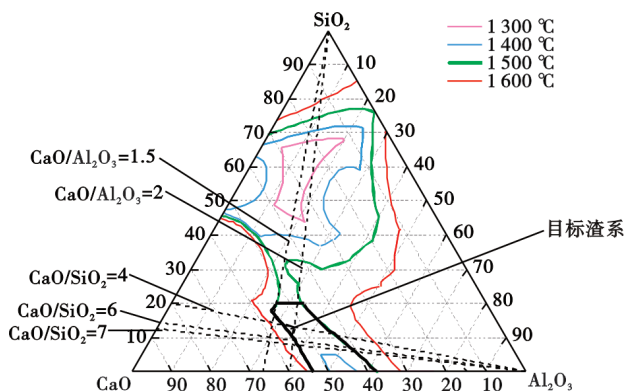


图 3 CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO 四元渣系等温相图中目标渣系

Fig. 3 Target slag system in CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO quaternary slag isothermal phase diagram

2 工业优化试验及结果分析

2.1 试验方案

根据 FactSage 的计算结果进行 20 炉工业试验,

试验钢种为 65Mn 钢,成分见表 2。

高碳钢 65Mn 的生产工艺流程为:180 t 顶底复吹转炉→180 tLF 精炼炉→RH 精炼→连铸(CC)。控制转炉终点 C>0.06%, O<400×10⁻⁶,转炉出钢过程中加入 150 ~ 400 kg 铝铁脱氧,随后加入硅锰等进行合金化,并加入 300 ~ 500 kg 石灰进行渣改质。LF 精炼加 2 400 ~ 3 200 kg 的石灰和 600 ~ 800 kg 的萤石进行造渣,加入 300 ~ 400 kg 铝粒进行脱氧和配酸溶铝,LF 处理结束后钢水中的 Al 控制在 400×10⁻⁶以上,LF 精炼时间>25 min,软吹时间>5 min。

根据热力学计算的精炼渣碱度及钙铝比,对试验的精炼渣系进行调整,每炉的精炼渣增加 50 ~ 150 kg 铝粒和减少 50 ~ 150 kg 石灰。RH 真空处理进行脱气。连铸全程采用保护浇注,长水口和浸入式水口使用氩封保护,中间包采用高碱度覆盖剂,结晶器采用专用高碳钢保护渣^[11-14]。

试验分别在转炉出钢结束、LF 到站、LF 出站取钢样和渣样;RH 精炼在真空处理前后取钢样和渣样;中间包取钢样;经过 1780 热轧机组后生产出 1 300 mm×3 mm 钢卷,并经切割、磨抛、腐蚀等加工后进行低倍检测。采用 X 荧光分析仪、光谱分析法、红外吸收法检测渣样成分、钢样成分和钢样 T.O,在金相显微镜下对夹杂物数量和尺寸进行检测评级^[7-8]。

2.2 精炼渣成分

随机抽取 5 炉试验的精炼渣系,成分见表 3。利用 FactSage 软件将优化前后的精炼渣中 CaO、SiO₂、

表 2 65Mn 钢化学成分(质量分数)
Table 2 Chemical composition of 65Mn steel

C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	O	N
0.64 ~ 0.68	0.18 ~ 0.30	0.95 ~ 1.10	≤0.015	≤0.004	0.012 ~ 0.040	0.08 ~ 0.15	≤0.0030	≤0.0050

表 3 优化后 LF 精炼渣成分
Table 3 Optimized LF refining slag composition

炉次	精炼渣成分(质量分数)/%						碱度 (R)	钙铝比
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TFe	MnO		
1	54.01	10.20	31.37	5.06	0.170	0.160	5.30	1.72
2	52.75	10.50	30.81	5.46	0.449	0.164	5.02	1.71
3	52.40	10.92	32.61	6.60	0.472	0.282	4.80	1.61
4	54.01	9.91	31.37	5.06	0.170	0.160	5.45	1.72
5	52.25	11.25	30.93	4.88	0.490	0.147	4.64	1.69
平均	53.10	10.60	31.40	5.40	0.350	0.180	5.01	1.69

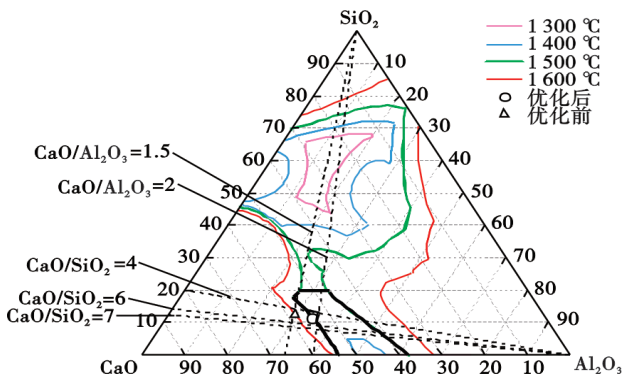


图 4 优化前后的 CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO 四元渣系的等温相图

Fig. 4 Isotherm phase diagram of CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO quaternary slag system before and after optimization

Al₂O₃ 成分的质量分数的平均值在 CaO-SiO₂-Al₂O₃-6%MgO 四元渣系的等温相图中标出,如图 4 所示。由表 3 和图 4 可知,试验的精炼渣成分为 CaO50% ~ 54%、Al₂O₃30% ~ 33%、SiO₂10% ~ 13%、MgO5% ~ 7%、(T.Fe+MnO)<1%、R=4 ~ 6。优化前的精炼渣系不在理论计算的渣系范围内,优化前渣系中 SiO₂ 含量较高,Al₂O₃ 含量偏低,碱度较低,钙铝比较大;优化后试验较为成功,通过增加 50 ~ 150 kg 铝粒和减少 50 ~ 150 kg 石灰的渣系,CaO 含量降低了 0.8% ~ 3.0%,Al₂O₃ 含量提高了 1% ~ 5%,SiO₂ 含量降低了 1% ~ 2%。优化后的渣系成分达到了理论计算的渣系范围,试验中 (CaO)/(Al₂O₃)=1.6 ~ 1.8。这是由于优化试验分批加入脱氧剂,脱氧剂与精炼渣中的 TFe、SiO₂ 的还原反应更充分,脱氧剂的利用率更高,所造的精炼渣还原性更强,渣中 TFe 和 SiO₂ 的质量分数较低。

2.3 各工序精炼全氧质量分数变化

取 5 炉 LF 到站、LF 出站、RH 出站时的全氧量,结果如图 5 所示。从图 5 可知,高碳钢转炉出钢后,由于铝脱氧及底吹氩的作用,LF 到站时钢水中的 T.[O] 降至 20×10⁻⁶ ~ 30×10⁻⁶。LF 精炼过程中通过电

极加热、加铝脱氧剂造白渣、吹氩搅拌等措施,LF 出站时的 T.[O] 降至 7×10⁻⁶ ~ 13×10⁻⁶。RH 精炼过程通过真空处理,T.[O] 量达到 6×10⁻⁶ ~ 12×10⁻⁶,基本可控制钢水中全氧(质量分数)在 10×10⁻⁶ 内,说明 LF 出站的 T.[O] 基本代表了铸坯的 T.[O],试验钢水的洁净度达到国内先进水平。

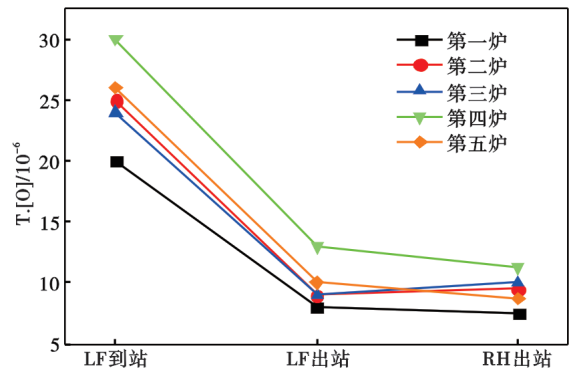


图 5 各工序钢水全氧量变化

Fig. 5 Changes in total oxygen content of molten steel in each process

2.4 夹杂物评级对比

冶炼 65Mn 高碳钢采用铝脱氧,成品钢卷中的夹杂物主要为氧化铝,即 B 类夹杂物。分别取 5 炉工艺优化前后的试验钢卷样进行夹杂等级检测,按 GB/T10561-2005 评定,结果见表 4。由表 4 可知,精炼渣系优化后的钢卷中的 B 类夹杂物等级均不大于 1,达到高级优质钢要求。这是由于优化后的精炼渣系流动性更好,钙铝比为 1.6 ~ 1.8,渣系吸附 Al₂O₃ 夹杂的能力更强。

表 4 工艺优化前后的试验钢卷的 B 类夹杂评级水平/级
Table 4 Class B inclusion rating level of test steel coil before and after process optimization /rating

炉次	优化前		优化后	
	B _细	B _粗	B _细	B _粗
1	1.5	0	0.5	0
2	1	0	1	0
3	0.5	0	0.5	0
4	1	0	0.5	0
5	1.5	0	1	0

3 结论

(1) 根据热力学计算的渣系成分,降低原工艺渣系的钙铝比,并将优化的渣系成分用于 65Mn 钢工业试验,高洁净度高碳钢所用优化后精炼渣的合

理渣系成分(质量分数)为:CaO52%~58%、 Al_2O_3 28%~33%、 SiO_2 8%~12%、MgO5%~7%、 $(TFe+MnO)<1\%$ 、 $R=4\sim 6$ 、 $(CaO)/(Al_2O_3)=1.5\sim 2$ 。

(2)渣系优化后65Mn钢LF出站时的T.[O]可达 $7\times 10^{-6}\sim 13\times 10^{-6}$,RH出站时的T.[O]可达 $6\times 10^{-6}\sim$

12×10^{-6} ,基本可控制钢中全氧质量分数在 10×10^{-6} 内。

(3)精炼渣系优化后的65Mn钢卷中的B类细系夹杂均不大于1级,达到高级优质钢要求。

参考文献

- [1] 黄 华. LF炉精炼渣系冶炼洁净钢工艺实践[J]. 特钢技术, 2017, 23(3): 38-41.
- [2] 王新志, 王三忠, 宋素格. LF快速造白渣工艺分析[J]. 炼钢, 2010, 26(3): 26-29+62.
- [3] Yu H, Xu J, Zhang J, et al. Effect of Al_2O_3 content on metallurgical characteristics of refining slag [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(8): 607-615.
- [4] Yang H L, Ye J S, Wu X L, et al. Optimum Composition of CaO-SiO₂- Al_2O_3 -MgO Slag for Spring Steel Deoxidized by Si and Mn in Production [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2): 1435-1444.
- [5] 黄永生, 孙光涛, 顾 超, 等. 铝脱氧轴承钢GCr15精炼渣最优成分的分析与实践[J]. 中国冶金, 2017, 27(12): 44-48.
- [6] Yoon B H, Heo K H, Kim J S, et al. Improvement of steel cleanliness by controlling slag composition [J]. Ironmaking Steelmaking, 2002, 29(3): 214-217.
- [7] Bielefeldt W V, Vilela A C F. Study of inclusions in high sulfur, Al-killed Ca-treated steel via experiments and thermodynamic calculations [J]. Steel Research International, 2015, 86(4): 375.
- [8] 朱富强, 汪金林, 范鼎东, 等. 20钢管LF精炼渣系优化的工业试验[J]. 特殊钢, 2020, 41(5): 45-47.
- [9] 王 宝, 李任春, 刘俊山, 等. DC06 IF钢精炼渣成分优化及钢-渣中氧的控制[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4): 293-301.
- [10] 赵东伟, 包燕平, 王 敏, 等. 高洁净度铝镇静钢LF精炼渣成分优化[J]. 炼钢, 2013, 29(2): 9-13.
- [11] 赵新凯, 石永生, 刘世义, 等. GCr15轴承钢精炼渣对夹杂物祛除行为的研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 14-20.
- [12] Liu Z H, Song G D, Deng Z Y, et al. Evolution of inclusions in Si-Mn-killed steel during ladle furnace (LF) refining process [J]. Metallurgical And Materials Transaction, 2021, 52(3): 1243-1254.
- [13] 刘辉杰, 万 勇, 赵和明, 等. 100 t LF精炼渣碱度和 Al_2O_3 含量对65Mn钢夹杂变质和去除效果的影响[J]. 特殊钢, 2017, 38(4): 38-42.
- [14] 王 旭, 魏 军, 仇圣桃, 等. 12Mn钢精炼渣CaO/ Al_2O_3 值优化[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 122-127.

《特殊钢》期刊官方投稿网站

www.specialsteeljournal.com

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 咨询电话:15961618632 0714-6297386 0510-80673212

《特殊钢》编辑部邮箱:E-mail:tsghs@sina.com