研究与开发

AGMJ45钢粘渣行为分析及改性

滕行泽[1,2],吕春风[1,2],贾吉祥[1,2],林东盛[3],王海伟[1,2],金喆[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009; 2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009; 3.鞍山钢铁集团有限公司,辽宁 鞍山 114009)

摘要: AGMJ45钢冶炼时钢包粘渣是制约其生产的关键技术问题。采用实验和理论相结合的研究方法对精炼渣熔点和成分进行测定,采用热力学模拟计算软件分析精炼渣液相范围及熔点与流动性的关系。结果表明,精炼渣MgO含量为4%~7%,碱度为4.0~6.0时,Al_2O_3活度最小,CaO活度最大,精炼渣流动性增强,可形成低熔点化合物,钢包粘渣得到有效改善。此外,还对精炼渣进行了改性调整,提出了工业生产优化方案,改性后的精炼渣平均熔点下降了123 ℃,非晶态率大于90%,应用后钢包使用中期平均罐重下降了约9.2%,平均渣厚下降了约23.4%,显著减轻钢包粘渣现象,提高了钢包使用的连续性,从而提高企业的生产效率。

关键词: 精炼渣;钢包粘渣;熔点;物相分析;改性
中图分类号: TF703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)01-0039-06
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.01.005

Analysis and Modification of Slag Sticking Behavior in AGMJ45 Steel

TENG Xingze[1,2], LYU Chunfeng[1,2], JIA Jixiang[1,2], LIN Dongsheng[3], WANG Haiwei[1,2], JIN Zhe[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Anshan Iron Steel Group Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: Slag sticking in ladles during smelting AGMJ45 steel is a key technical problem, which restricts the production of the steel. Experimental and theoretical methods were combined to determine the melting point and compositions of refining slag. Thermodynamic simulation software was used to analyze the liquid phase range of the refining slag and the relationship between its melting point and fluidity. The results showed that when the MgO content of the refining slag was from 4% to 7% and the basicity was from 4.0 to 6.0, the activity of Al_2O_3 was minimized while the activity of CaO was maximized, which enhanced the fluidity of the refining slag, formed the compounds with low melting point, and effectively improved slag sticking in ladles. Furthermore, modifications were made to the refining slag, and an optimized scheme for industrial production was proposed. After modification, the average melting point of the refining slag decreased by 123 ℃, and the amorphous rate exceeded 90%. Upon application, the average ladle weight at mid-campaign decreased by approximately 9.2%, and the average slag thickness decreased by approximately 23.4%. These improvements significantly alleviated slag sticking phenomenon, enhanced the continuity of ladle usage, and thereby increased production efficiency.

Key words: refining slag; slag sticking in ladle; melting point; phase analysis; modification

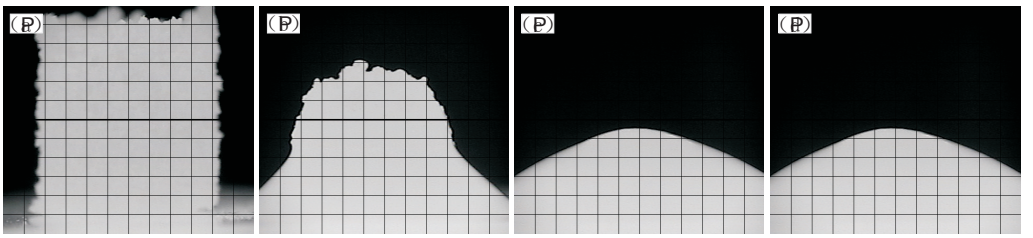
滕行泽,硕士,工程师,2020年毕业于东北大学冶金工程专业。E-mail:694467562@qq.com

AGMJ45钢是用于海洋平台、造船、核电、水电、锅炉容器、桥梁、模具、工程机械、建筑等方面的重要钢材,在国民经济各个领域有着广泛的应用[1-2]。转炉冶炼-连铸的方式生产AGMJ45钢具有生产效率高、长宽规格灵活的特点,成为了备受瞩目的热点方向[3]。然而,AGMJ45钢在冶炼生产时存在钢包粘渣的问题,残渣结壳降低钢包底吹进气,影响连铸自动开浇[4-7];增加脱氧剂消耗,影响包内钢水洁净度;回罐烘烤时间增加,降低循环使用效率,易导致厚板铸机生产的高碳钢铸机降速或断浇[8-11]。国内宝武集团宝山基地和武汉基地等钢企出现钢包粘渣问题的主要原因有钢包周转速度慢、化渣效果不好及钢包内冶炼钢种不固定等[12],在生产过程中采取优化钢包热周转制度、喷涂保护层和修补包壁局部熔损部位、调节钢种等措施减轻钢包粘渣问题[13],但是对钢包粘渣机理以及精炼渣改性理论缺乏深入研究。鉴于此,本文针对某厂钢包粘渣的问题,利用GXⅢ型高温物性测试仪、X射线衍射仪对炉渣的熔点和成分进行了测定,采用热力学模拟计算软件分析了精炼渣的液相范围和炉渣熔点与流动性的关系,对钢包粘渣进行了机理探究,并且结合实际对现有的精炼渣进行改性,取得较好的效果。

1 实验内容

1.1 熔点测量

取部分罐次AGMJ45钢钢包精炼渣样,首先经玛瑙研钵研磨、筛分(颗粒尺寸达到Φ74 μm以下)和干燥,再将其与无水乙醇调和制成Φ3 mm×4 mm圆柱体,最后采用GXⅢ型高温物性测试仪测定渣样的熔化温度(即熔点)[14]。渣样在加热过程中的轮廓变化见图1。



(a)开始;(b)软化;(c)半球;(d)流动

图1 渣样在加热过程中的轮廓变化

Fig. 1 Contour Changes of Slag Samples during Heating

由图1看出,渣样随着温度的升高逐步软化直至流动。当渣样高度为原始高度的50%时,对应的温度为熔渣的熔点。每个渣样重复测定3次,取其平均值作为该渣样的熔点。

1.2 XRD物相分析

将渣样置于$MoSi_2$炉内加热至1 500 ℃,然后在水冷铜板上进行淬火操作,再将淬火后的渣样研磨至Φ74 μm以下。采用荷兰帕纳科公司生产的X'PERT PRO X光衍射仪(Cu靶,管电压40 kV,管电流40 mA)确定渣样为非晶态(无特征峰)后,对其物相组成进行测定分析[15]。

2 实验结果分析

2.1 渣样主要化学成分及熔点

渣样主要化学成分及熔点检测结果见表1。由表1看出,渣样熔点较高,计算得出碱度范围为2.5~3.0,碱度较低,Al_2O_3含量在15%左右,不利于液态炉渣的形成[16]。

表1 渣样主要化学成分及熔点检测结果

Table 1 Main Chemical Compositions and Melting Point Test Results of Slag Samples

渣样	主要化学成分/wt%							熔点/℃
	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	
1#	0.880	20.419	14.535	53.446	9.563	0.342	0.019	1 446
2#	0.642	18.507	15.114	56.594	7.883	0.131	0.004	1 445

渣样高度随温度变化曲线见图2。

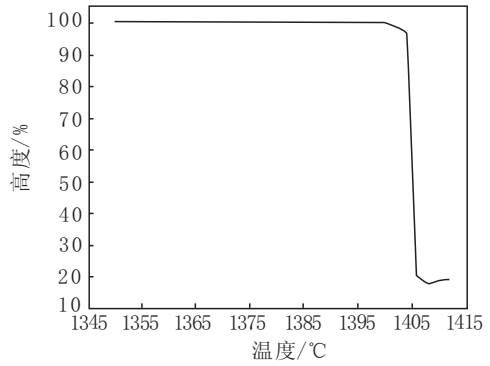


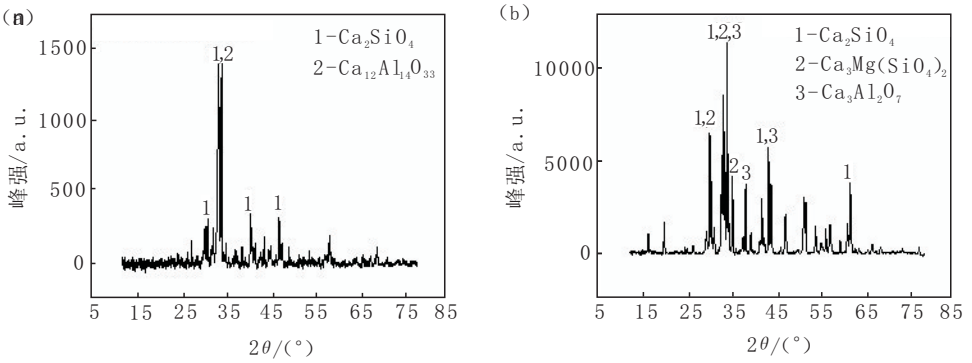
图2 渣样高度随温度变化曲线

Fig. 2 Curves of Slag Sample Height with Temperature Variation

由图2看出，1 405 ℃时，渣样高度从100%快速塌陷至20%以下，说明在精炼过程中，精炼渣出现局部温度不足的情况，精炼渣呈固态，难以熔化，进而导致化渣不好，精炼结束时残余的精炼渣凝固过快。另一方面，该精炼渣熔点过高，熔池化渣不利，部分精炼渣未能完全熔化而附着在钢包壁上，出现钢包粘渣的现象。

2.2 渣样X射线衍射图谱

渣样X射线衍射图谱见图3所示。由图3看出，精炼渣中Al_2O_3含量较高时，大量Al_2O_3呈四次配位，在进入络阴离子团后，与Ca^{2+}离子结合，形成钙铝酸盐网络结构。当精炼渣中SiO_2含量增加时，易形成硅酸盐网络结构，使精炼渣具有一定的玻璃形态，进而有利于改善熔渣的熔化性能[14]。但结合表1中化学分析结果来看，1#、2#渣样SiO_2含量较高，而Al_2O_3含量仅15%左右，在相图中处于高熔点的硅酸盐区域内。热力学数据分析表明，MgO熔点为2 852 ℃，$2CaO·SiO_2$熔点为2 130 ℃，比$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$和$Ca_3Mg(SiO_4)_2$熔点高很多。因此，MgO和$2CaO·SiO_2$先于钙铝酸盐析出。可见，高熔点物质的大量析出，会集结成块，导致渣的流动性降低，精炼渣熔点高，熔化性变差，影响精炼效果。



(a) 1#渣样；(b) 2#渣样

图3 渣样X射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray Diffraction Patterns of Slag Samples

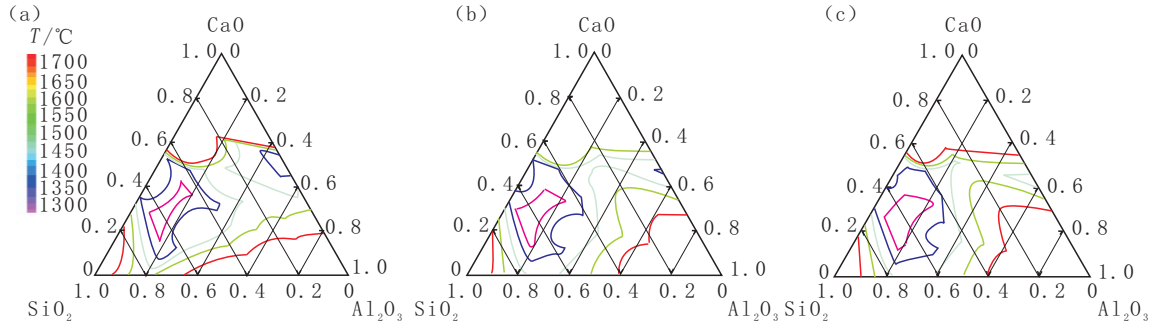
3 粘渣机理研究

3.1 MgO含量的影响

精炼渣熔点直接影响化渣效果，低熔点的精炼渣有利于尽早化渣，渣中MgO的主要作用是防止钢液对炉衬耐火材料的侵蚀[17]。根据热力学模拟计算软件计算渣中MgO含量，MgO含量分别为4%、7%和10%条件下，$CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$相图液相范围见图4。由图4可见，渣中MgO由4%增加到10%，液相范围缩小明显。而实际精炼过程中，钢水温度大部分时间处于1 600 ℃以下，渣中MgO含量增多也会导致镁铝尖晶石相成分增多，使钢渣很容易凝固，这是钢包粘渣的重要原因。研究表明，在炼钢温度下，Al与O的结合能力（亲和力）远强于Mg，钢水内活性元素Al将熔渣中稳定性相对较低的MgO中的Mg置换出来，从而向钢水提供Mg，导致钢水中MgO含量升高。因此应稳定控制精炼渣中MgO含量。MgO理想含量为4%~7%。

3.2 钢中Al_2O_3夹杂吸附与精炼渣碱度对精炼渣的影响

Al_2O_3是钢水中最常见脱氧产物残留的夹杂物，考虑钢渣对Al_2O_3的吸收具有极其重要的意



(a) MgO含量为4%;(b) MgO含量为7%;(c) MgO含量为10%

图4 不同含量MgO条件下的$CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$相图(质量分数)

Fig. 4 Phase Diagrams of $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-MgO$ System at Different MgO Contents (Mass Fraction)

义。采用热力学模拟计算软件计算了$CaO-SiO_2-Al_2O_3-5\%MgO$四元系相图的液相范围,结果见图5所示。

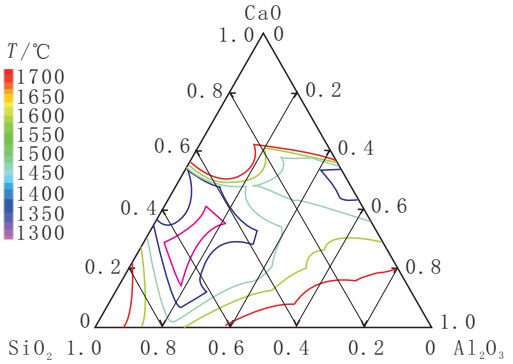


图5 $CaO-SiO_2-Al_2O_3-5\%MgO$相图(质量分数)

Fig. 5 Phase Diagram of $CaO-SiO_2-Al_2O_3-5\%MgO$ System (Mass Fraction)

由图5可见,由于CaO和Al_2O_3之间能够形成多种钙铝酸盐,在Al_2O_3含量相同条件下,随着精炼渣碱度的增加,CaO活度逐渐增加,间接促进了钢中A1-O平衡向生成Al_2O_3的方向进行,即CaO活度增加有利于对Al_2O_3夹杂的吸附,降低了钢中溶解氧含量,从而有利于钢中T.O的降低,渣中FeO+MnO含量随之降低,这对脱硫反应也有利。此外,当碱度在4.0~6.0,Al_2O_3含量在21%~26%条件下时,形成的渣系处于1 500 ℃的熔化区内,精炼渣易形成低熔点的相,有利于精炼渣吸附Al_2O_3,进而提高钢液洁净度。

4 精炼渣改性措施

4.1 调整造渣料用量

对LF造渣料用量进行调整,调整前后对比见表2所示。由表2可见,调整后的造渣料在转炉加料盖罐过程中,助熔渣添加量由280~290 kg/炉调整为200 kg/炉;LF炉加料过程中,白灰的加入量由1 704~1 719 kg/炉调整至895~897 kg/炉,助熔渣添加量由467~474 kg/炉调整至408~413 kg/炉,同时配加147~162 kg/炉的萤石。

表2 造渣料用量调整前后对比 kg/炉

Table 2 Comparison of Slag Forming Material Consumption before and after Adjustment kg/heat

项目	渣样	转炉加料盖罐		LF加料		
		白灰	助熔渣	白灰	助熔渣	萤石
调整前	1#	620	290	1 706	474	
	2#	630	290	1 719	467	
	3#	610	280	1 704	472	
调整后	4#	600	200	895	411	162
	5#	600	200	895	411	150
	6#	600	200	895	413	147
	7#	600	200	897	413	155
	8#	600	200	895	408	159

4.2 改进生产工艺

生产过程采用保护浇注,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[18-20]。保证精炼渣脱硫、脱氧、去气、去夹渣精炼效果的前提下,控制精炼渣成分位于相图中低熔点矿相区内,避免高熔点晶相的大量析出,促进钢渣反应,降低精炼渣结块的可能性,减少钢液吸气,提高钢水的洁净度。

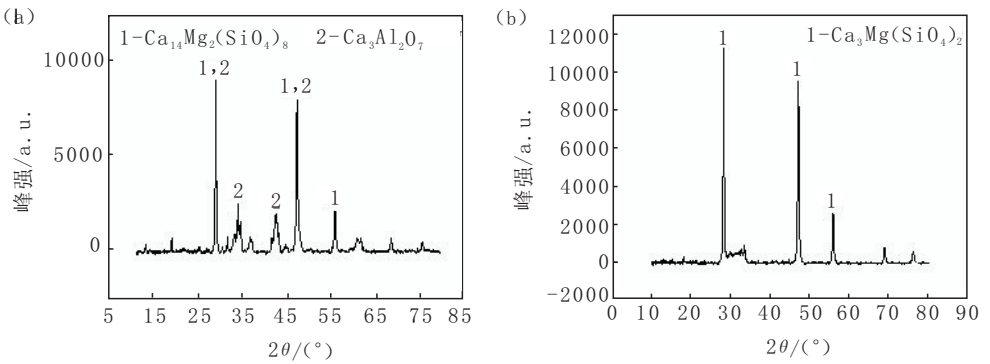
改性后的精炼渣各项指标见表3。由表3可见，改性后的渣样碱度范围提高至4.3~4.8，平均熔点约降至1 323 ℃，下降了123 ℃。精炼渣的稳定性得到了极大的改善，而且熔点降低后能够快速熔化，炉渣流动性好，结块少，能够有效减少钢包在冶炼中期粘渣的问题。

表3 改性后的精炼渣各项指标

Table 3 Performance Indicators of Modified Refining Slag

渣样	主要化学成分/wt%							碱度	熔点/℃
	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P_2O_5		
4#	0.73	11.33	24.35	54.57	8.63	0.16	<0.01	4.8	1 334
5#	0.56	12.46	23.82	53.85	8.63	0.19	<0.01	4.3	1 318
6#	0.53	12.47	24.66	53.30	8.98	0.18	<0.01	4.3	1 323
7#	0.54	12.47	24.37	53.76	8.98	0.17	<0.01	4.3	1 321
8#	0.89	11.75	23.80	54.15	8.60	0.26	<0.01	4.6	1 317

采用X射线衍射检测改性后的LF渣，由于4#~7#渣样主要物相组成相同，X射线衍射图谱也非常接近，故列出5#和8#渣样的X射线衍射图谱见图6。



(a) 5#渣样；(b) 8#渣样

图6 5#和8#渣样的X射线衍射图谱

Fig. 6 X-ray Diffraction Patterns of Slag Samples 5# and 8#

由图6看出，5#渣样的基质相为玻璃相，根据XRD测定结晶率的方法，通过计算晶相的衍射图谱积分面积与总衍射图谱积分面积（晶相积分面积+非晶相积分面积）的比，可得到渣样的结晶率，计算得到5#渣晶相结晶率约为8.8%，8#渣晶相结晶率约为4.8%，两个渣样非晶态含量分别为91.2%和95.2%，均超过90%，非晶态率的升高表明改性后的精炼渣生成了更多低熔点的非晶态相，改性效果良好。

5 应用效果

由于钢包粘渣超重一般发生在钢包使用中期，故对工作衬使用次数在51~55的钢包进行称重测渣厚采样，精炼渣改性前后对钢包罐重及渣厚的影响对比见表4。

表4 精炼渣改性后对钢包罐重及渣厚的影响

Table 4 Influence of Modified Refining Slag on Ladle Weight and Slag Thickness

项目	平均罐重/t	平均渣厚/mm
改性前	130.2	107
改性后	118.2	82

由表4计算得出，精炼渣改性后，钢包使用中期平均罐重下降了约9.2%，平均渣厚下降了约

23.4%，显著改善了AGMJ45钢冶炼时的钢包粘渣问题。实践中，提高了钢包使用的连续性，从而提高企业的生产效率。

6 结论

（1）渣中MgO含量增加，导致镁铝尖晶石相成分增多，液相区域范围缩小，钢渣容易凝固，理想精炼渣中MgO含量应控制在4%~7%。

（2）当碱度为4.0~6.0，Al_2O_3含量为21%~26%时，形成的渣系处于1 500 ℃的熔化区内，有利于精炼渣吸附Al_2O_3，促使精炼渣形成低熔点的相。

（3）对造渣料用量进行调整，白灰加入量为895~897 kg/炉，助熔渣添加量为408~413 kg/炉，同时配加147~162 kg/炉的萤石；生产过程采用保护浇注，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。采取上述措施后，钢包平均罐重下降了约9.2%，平均渣厚下降了约23.4%，钢包粘渣的问题得到了改善。

参考文献

[1] 王定武. 特厚钢板制造技术的新进展[J]. 冶金管理，2009(5)：56-57

[2] 李靖年. 特厚模具用钢板生产技术研究[D]. 沈阳：东北大学，2016.

[3] OKAYAMA Y，KAWAZOE F，YASUI H. Production of high quality extra heavy plates with new casting equipment [J]. Nippon Steel Technical Report，2004(9)：50-56.

[4] SWINNERTON M L，NIGHTINGALE S A，BROOKS G. Steel ladle sidewall buildup [J]. Iron & Steel Technology，2004(1)：108-113.

[5] 单庆林，王崇，钟凯，等. 300 t钢包顶渣结壳的原因分析及控制措施[J]. 中国冶金，2016，26(9)：48-52.

[6] 唐洪乐，孙晓辉，洪建国，等. 梅钢钢包粘渣原因分析[J]. 梅钢科技，2008(4)：25-28.

[7] 唐洪乐，孙晓辉，洪建国，等. 钢包粘渣原因分析及措施[J]. 炼钢，2009，25(4)：24-26，30.

[8] 姚金甫，田守信，牟济宁，等. 钢包粘渣的机理研究[J]. 宝钢技术，2002(6)：59-64.

[9] 邱文冬，王燕群，牟济宁，等. 宝钢300 t钢包粘渣的原因分析及对策[J]. 耐火材料，1999，33(4)：208-210，246.

[10] 陈树林，李勇，寿业红，等. 安钢25t钢包粘渣原因分析[J]. 河南冶金，2006(S2)：149-151.

[11] 姚金甫，田守信. 钢包粘渣与包衬耐火材料[J]. 耐火材料，2003，37(2)：108-110.

[12] 姚金甫. 钢包粘渣超重的分析研究[C]//2018国际耐火材料学术会议论文集. 杭州：中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司、中国金属学会耐火材料分会、耐火材料杂志社、先进耐火材料国家重点实验室，2018：114-118，311-314.

[13] 姚金甫. 国内外钢包的粘渣及其对策[J]. 钢铁，2002，37(2)：70-72.

[14] 许继芳，盛敏奇，万康，等. CaO-5%MgO-Al_2O_3-SiO_2-0.5%FeO体系低SiO_2区域熔化性能[J]. 钢铁，2014，49(2)：24-28.

[15] 石健，严云，胡志华. 二步法制备轻质六铝酸钙的研究[J]. 非金属矿，2016，39(4)：14-16.

[16] 林腾昌，朱荣，曾加庆，等. CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO杂物控制影响因素的多尺度结构[J]. 钢铁，2015，50(6)：21-25.

[17] 张印棠. 特种非晶母合金精炼渣性能基础研究[D]. 唐山：华北理工大学，2020.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

（编辑 许营）
修回日期：2025-04-24