



1Cr13 不锈钢连铸保护渣成分设计

朱立光^{1,2}, 宋磊¹, 王杏娟¹, 曲硕³, 袁志鹏¹

(1 华北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063210; 2 河北科技大学材料与工程学院, 石家庄 050000;

3 河钢集团唐钢公司热轧事业部, 唐山 063600)

摘要: 在生产 1Cr13 不锈钢的过程中, 铸坯出现了严重的纵裂漏钢及横向凹陷。利用 FactSage8.2 热力学软件计算三元以及四元相图对保护渣成分进行设计, 同时, 计算 1Cr13 不锈钢的凝固特性, 由于该钢属于包晶钢, 在凝固过程中会产生急剧的体积收缩, 从而在坯壳薄弱处产生纵裂。为了避免初生坯壳不均匀引起的凹陷和纵裂, 应适当提高保护渣碱度、改善保护渣结晶性能, 并提升保护渣控制传热能力。新型保护渣碱度为 1.5, 渣成分为 $w[\text{MgO}]6\%$, $w[\text{Li}_2\text{O}]2\%$, $w[\text{Al}_2\text{O}_3]16\%$, $w[\text{Na}_2\text{O}]8\%$, $w[\text{B}_2\text{O}_3]3\%$, $w[\text{CaF}_2]10\%$ 。1Cr13 不锈钢原渣熔点为 1 155 °C, 定温黏度为 0.442 Pa·s, 转折温度 1 140 °C, 新型保护渣熔点为 1 120 °C, 黏度为 0.304 Pa·s, 转折温度为 1 171 °C, 结晶温度为 1 270 °C。实际生产后, 铸坯表面质量明显改善。

关键词: 纵向裂纹; 横向凹陷; 1Cr13 不锈钢; 保护渣; 黏度

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00036 **中图分类号:**TF777

Ingredient Design of 1Cr13 Stainless Steel Continuous Casting Protective Slag

Zhu Liguang^{1,2}, Song Lei¹, Wang Xinjuan¹, Qu Shuo³, Yuan Zhipeng¹

(1 School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2 College of Materials and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China;

3 Hot Rolling Division, TangSteel Company, Hesteel Group, Tangshan 063600, China)

Abstract: In the process of producing 1Cr13 stainless steel, serious longitudinal cracks breakout and transverse dents appear in the casting billet. FactSage8.2 thermodynamic software was used to calculate ternary and quadruple phase diagrams to design the ingredient of the protective slag. At the same time, the solidification characteristics of 1Cr13 stainless steel were calculated. As this steel is a peritectic steel, it will produce a sharp volume contraction during the solidification process, resulting in longitudinal cracks in the weak part of the blank shell. In order to avoid the dents and longitudinal crack caused by the uneven raw shell, the basicity of the protective slag should be improved, the crystallization property of the protective slag should be improved, and the heat transfer control ability of the protective slag should be improved too. The basicity of the new protective slag is 1.5, the slag is 6% MgO, 2% Li₂O, 16% Al₂O₃, 8% Na₂O, 3% B₂O₃, 10% CaF₂. The melting point of the original slag of 1Cr13 stainless steel is 1 155 °C, the constant temperature viscosity is 0.442 Pa·s, and the transition temperature is 1 140 °C. The melting point of the new protective slag is 1 120 °C, the viscosity is 0.304 Pa·s, the transition temperature is 1 171 °C, and the crystallization temperature is 1 270 °C. After actual production, the surface quality of the casting billet is obviously improved.

Key Words: Longitudinal Crack; Transverse Depression; 1Cr13 Stainless Steel; Protective Slag; Viscosity

1Cr13 不锈钢是一种低碳铬不锈钢, 对应日本的牌号 SUS410 与 SUS40。1Cr13 不锈钢不仅表现出优异的耐腐蚀性能, 而且在潮湿环境下也能保持出色的抗锈特性和优秀的切削加工性能, 还具有良好的韧性、热硬化性和较高的强度, 被用来制作刀具、热裂解抗硫腐蚀设备、轴套和螺栓等^[1-3]。

在连铸生产过程中, 铸坯出现了纵裂漏钢及横

向凹陷, 严重的影响了铸坯质量和生产效率^[4-5]。保护渣对铸坯质量起着非常关键的作用, 尤其是对裂纹敏感性钢种^[6]。根据 1Cr13 不锈钢的凝固特性, 该钢种属于包晶钢范畴, 对这类钢必须要控制结晶器的传热, 通过保护渣则很容易实现这一目的, 对于这类钢设计符合性能的保护渣显得尤为重要^[7]。朱立光等^[8]研究发现, Q195 钢在连铸生产中, 铸坯

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374335); 国家自然科学基金项目(51974133); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2024057); 唐山市市级科技计划项目(22130229H); 唐山市市级科技计划项目(23130204E)

作者简介: 朱立光(1965—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** zhuliguang@ncst.edu.cn; **收稿日期:** 2024-02-23

通信作者: 王杏娟(1978—), 女, 博士, 教授; **E-mail:** wxingjuan@ncst.edu.cn

出现凹陷和裂纹等质量缺陷,他提出通过增加保护渣碱度、提高结晶温度、增加析晶率和降低保护渣黏度的方法,以改善铸坯质量,并应用于生产现场,铸坯没有出现质量问题;翁建军^[9]针对宽厚板出现的皮下及表面纵裂,采用提高保护渣碱度和结晶能力,对保护渣进行现场验证,铸坯皮下及表面裂纹缺陷率由20%降低至2%以下,现场生产效果稳定,明显改善了铸坯质量;李玉娣等^[10]针对Q235B、Q345B铸坯出现了大量的纵裂纹,通过将保护渣碱度由1.39提高到1.53,提高析晶率,黏度降低到0.08 Pa·s,经现场应用,纵裂纹发生率由10.58%降到1.85%。根据上述研究,以上钢种与1Cr13不锈钢同属包晶钢范畴,因此,可采用提高保护渣碱度和增加保护渣结晶性能,从而改善坯壳与结晶器之间的传热能力。但是,在提高碱度的同时,会导致保护渣润滑不好,从而导致漏钢的风险,如何协调保护渣的传热和润滑性能是非常重要的工作。

通过分析1Cr13不锈钢铸坯横向凹陷和纵裂漏钢产生的原因,设计开发了一种高碱度高润滑型保护渣,为提高1Cr13不锈钢铸坯质量提供参考。

1 铸坯质量缺陷分析

1.1 铸坯缺陷

1Cr13不锈钢在连铸生产过程中,容易出现严重的纵裂漏钢和横向凹陷等铸坯质量缺陷,严重影响了铸坯质量和生产效率^[11-12],如图1所示。

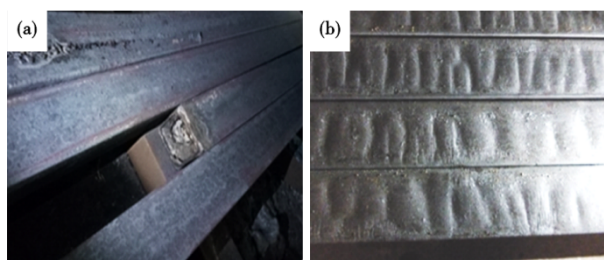


图1 1Cr13不锈钢铸坯质量缺陷:(a)纵裂漏钢,(b)横向凹陷

Fig. 1 Quality defects of 1Cr13 stainless steel casting billet : (a) longitudinal cracks breakout, (b) transverse dents

1.2 1Cr13不锈钢凝固特性分析

1Cr13不锈钢属于裂纹敏感性钢种,其主要化学成分见表1。

利用FactSage8.2热力学软件对1Cr13不锈钢的凝固特性进行计算分析,其结果如图2所示。由图2可知,当碳含量在0.125%时,随着温度的下降其凝

表1 1Cr13不锈钢化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.125	0.35	0.40	0.02	0.01	12.50	0.60

固模式为 $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \gamma + \delta \rightarrow \gamma + \delta \rightarrow \gamma$,属于亚包晶钢范畴,是典型的包晶钢。在1496℃从液相中开始析出铁素体(δ 相),然后在1409℃发生包晶反应,在1407~1149℃发生相变收缩。需要注意的是,铁素体(δ 相)和奥氏体(γ 相)的晶格类型不同,铁素体(δ 相)是属于体心立方结构,则奥氏体(γ 相)是属于面心立方结构,奥氏体和铁素体的密度有着明显差异^[13]。所以,在凝固过程中,铁素体(δ 相)向奥氏体(γ 相)转变时,会产生急剧的体积收缩,在坯壳薄弱处产生裂纹,裂纹扩展后在铸坯表面形成凹陷与纵裂^[14-16]。

坯壳在凝固初期保证均匀的传热是非常重要的,这样可以使渣膜在结晶器方向上更加均匀。控制传热同时还要保证其润滑,这样才可以更好的改善铸坯纵向裂纹和横向凹陷^[17-19]。

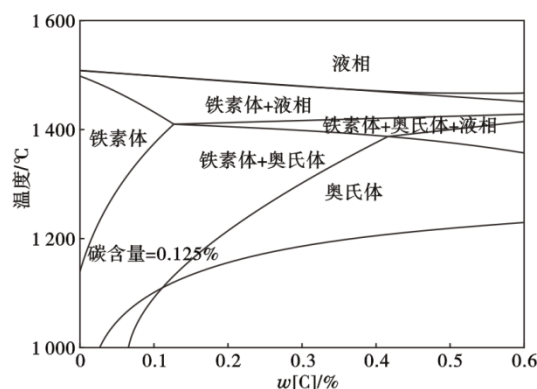


图2 1Cr13不锈钢铁碳相图

Fig. 2 Iron-carbon phase diagram of 1Cr13 stainless steel

1.3 保护渣对铸坯质量缺陷的影响

某钢厂使用的1Cr13不锈钢保护渣主要成分见表2。由表2可知,该型保护渣的碱度R,即 $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ 为0.8。

利用全自动熔点熔速测试仪和Brookfield旋转黏度计对保护渣熔点和黏度测量,测量结果为多次测量取其平均值,保护渣半球点温度为1155℃,定温黏度为0.442 Pa·s、转折温度1140℃。从测试结果看出,熔化温度和黏度偏高。熔化温度较高,使固态渣膜变厚,造成液态渣膜不均匀,而较薄的液渣层厚度使流入结晶器和铜壁之间稳定渣量失去

表 2 1Cr13 不锈钢保护渣理化指标
Table 2 Physicochemical indexes of Cr 13 stainless steel protective slag

CaO/%	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Na ₂ O/%	MgO/%	K ₂ O/%	MnO ₂ /%	Fe ₂ O ₃ /%	F/%	TC	R
23.10	28.77	4.25	14.93	3.95	0.40	0.22	0.97	10.25	8.61	0.8

保证,造成铸坯凹陷和裂纹等缺陷;黏度过高,导致保护渣的流动性能较差,造成保护渣润滑不好,导致坯壳与结晶器壁之间会发生粘连,进而导致铸坯出现振痕、横裂和凹陷等缺陷。

2 高碱度高润滑型保护渣成分设计

2.1 熔化温度设计

采用 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 三元渣系作为拟定的渣系,针对 1Cr13 不锈钢凝固特性,选择了高碱度保护渣,设计碱度分别为 1.3、1.5。利用 FactSage8.2 计算不同 MgO 含量的液相面积图,如图 3 所示,随着 MgO 含量的增加,1 400 °C 的液相区面积逐渐增加,MgO 在此区间内可以降低熔化温度。初拟定 MgO 含量在 4%~8%。

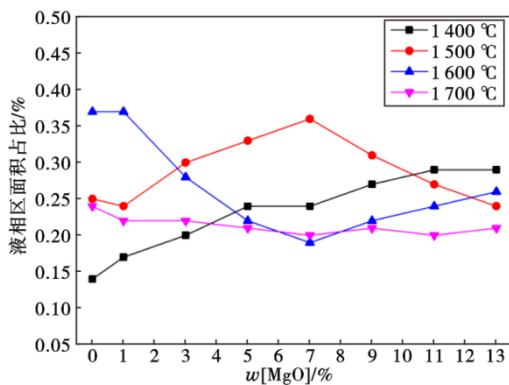


图 3 不同 MgO 含量与不同温度下液相区面积比之间的关系

Fig. 3 The relationship between different MgO content and area ratio of the liquid phase region at different temperatures

利用 FactSage8.2 计算 Na₂O-CaO-SiO₂-Al₂O₃ 四元渣系的等温线相图如图 4(a) 所示,研究 Na₂O 对 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 渣系熔化温度的影响。从图 4(a) 可以看出,随着 Na₂O 含量的逐渐增加,等温线相图温度先下降再升高。Na₂O 含量小于 10%,且 (CaO)/(SiO₂) 比分别为 1.3 和 1.5,沿着该点绘制等含量线,在相图中出现最低温度,分别为 1 400、1 500 °C。通过文献 [20] 指出,Na₂O 对降低熔化温度影响效果明显,故初定 Na₂O 含量为 0~10%。

CaF₂ 作为传统的助熔剂,可以有效的降低保护渣的黏度和熔化温度,但是,一般含量不易过高,否则会引起枪晶石等高熔点物析出,同时, CaF₂ 会对环境、人体和机器造成危害,应尽量减少 CaF₂ 的含量, F 质量分数一般不超过 10% [21], 利用 FactSage8.2 计算 Al₂O₃-SiO₂-CaO-CaF₂ 四元渣系的等温线相图如图 4(b) 所示。图 4(b) 中左侧为高碱度区,温度是随着 Al₂O₃ 的增加先降低后升高, Al₂O₃ 含量在 16% 附近开始出现转折,温度开始逐渐升高。因此,初定 CaF₂ 含量 10%, Al₂O₃ 含量 16%。

利用 FactSage8.2 计算 Li₂O-CaO-SiO₂-Al₂O₃ 四元渣系的等温线相图如图 5(a) 所示,研究 Li₂O 对 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 渣系熔化温度的影响。随着 Li₂O 含量增加,等温线相图温度先下降再增加。Li₂O 含量小于 6%,且 CaO/SiO₂ 比分别为 1.3 和 1.5 时,沿着该点绘制等含量线,在相图中出现低温度,分别为 1 300 ~ 1 400 °C 和 1 400 ~ 1 500 °C。Li₂O 含量一般不易过高,一般在 2% 左右,可以有效的降低熔点和黏

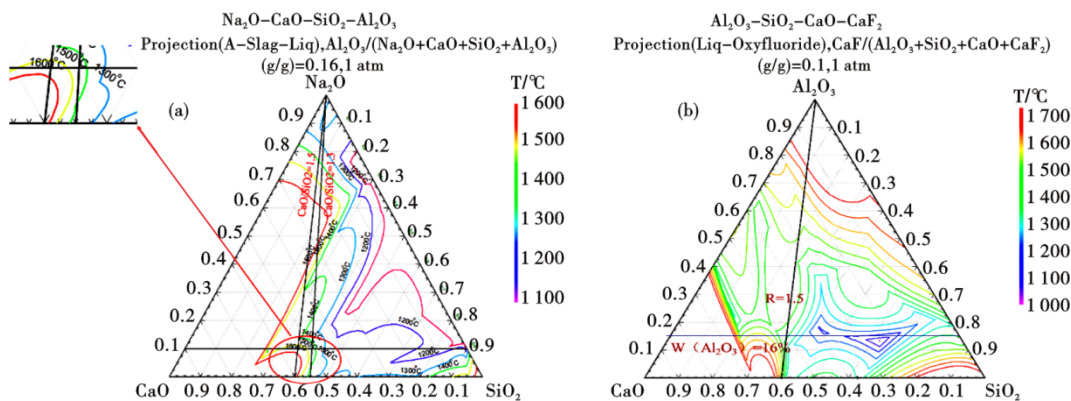


图 4 四元渣系的等温线相图:(a) Na₂O-CaO-SiO₂-Al₂O₃, (b) Al₂O₃-SiO₂-CaO-CaF₂

Fig. 4 Isotherm phase diagram of quaternary slag system: (a) Na₂O-CaO-SiO₂-Al₂O₃, (b) Al₂O₃-SiO₂-CaO-CaF₂

度^[22], 初拟定 Li_2O 含量为 2%。

利用 FactSage8.2 计算 $\text{B}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 四元渣系的等温线相图如图 5(b) 所示, 研究 B_2O_3 对 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系熔化温度的影响。随着 B_2O_3 含量增加, 等温线相图温度先下降再增加。含量控制在 6%, 且 $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ 比分别为 1.3 和 1.5 时, 沿着该点绘制等含量线, 在相图中有最低温度, 分别为 1 200、1 400 $^\circ\text{C}$ 。当 B_2O_3 含量低于 10% 时, 与钢液发生的氧化还原反应较为微弱, 不会导致钢液中硼含量的提高^[23]。所以初拟定 $w[\text{B}_2\text{O}_3]$ 为 0~6%。

2.2 黏度设计

利用 FactSage8.2 黏度模块计算不同含量的 Na_2O 、 MgO 、 CaF_2 、 Li_2O 、 B_2O_3 对保护渣黏度的影响, 然后利用 Origin 对数据进行处理。计算结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, MgO 、 CaF_2 、 Na_2O 和 Li_2O 含量与黏度呈线性关系, 随着组元含量的增加, 黏度逐渐下降, 其中 Li_2O 对黏度影响最大, 初拟定 2% 含量, B_2O_3 对黏度影响较小, 在 0~8% 内黏度变化不大, 拟定含量为 3%, 随 Na_2O 含量的增加, 对保护渣黏度影响逐渐减小, 初选定含量 8%, MgO 含量在 0~8% 对保护渣黏度影响效果逐渐变小, 初拟定含量

为 4%~8%。

综上, 通过 FactSage8.2 计算组元对保护渣熔化温度和黏度的影响, 拟定最终保护渣成分范围。设计 6 组 1Cr13 不锈钢保护渣, 其中 A1~A3 对应的 MgO 分别为 4%、6% 和 8%, 碱度为 1.3; A4~A6 对应的 MgO 分别为 4%、6% 和 8%, 碱度为 1.5, 保护渣成分见表 3, 实验室采用化学纯试剂配制保护渣, 实验渣中的 Na_2O 和 Li_2O 分别用 Na_2CO_3 和 Li_2CO_3 代替。

3 结果与分析

3.1 保护渣熔化温度测试

保护渣熔化特性测试仪原理图如图 7 所示, 对设计的保护渣进行熔化温度测试, 每组测试 3 次, 最终取其平均值见表 4。

试验 6 组保护渣中碱度为 1.3 的保护渣中熔点最高的是 MgO 含量为 4%, 其熔点为 1 136 $^\circ\text{C}$; 碱度为 1.5 的保护渣中熔点最高的也是 MgO 含量为 4%, 其熔点为 1 150 $^\circ\text{C}$, 也是 6 组保护渣中熔点最高的。在 6 组保护渣中, 当碱度分别为 1.3 和 1.5 时, 设计的高碱度高润滑型保护渣每加入 1% 的 MgO 保护渣熔点分别会降低 14.3、9.8 $^\circ\text{C}$ 。当 MgO 含量分别为 4%、6% 和 8% 时, 发现设计的高碱度高润滑型保护渣每

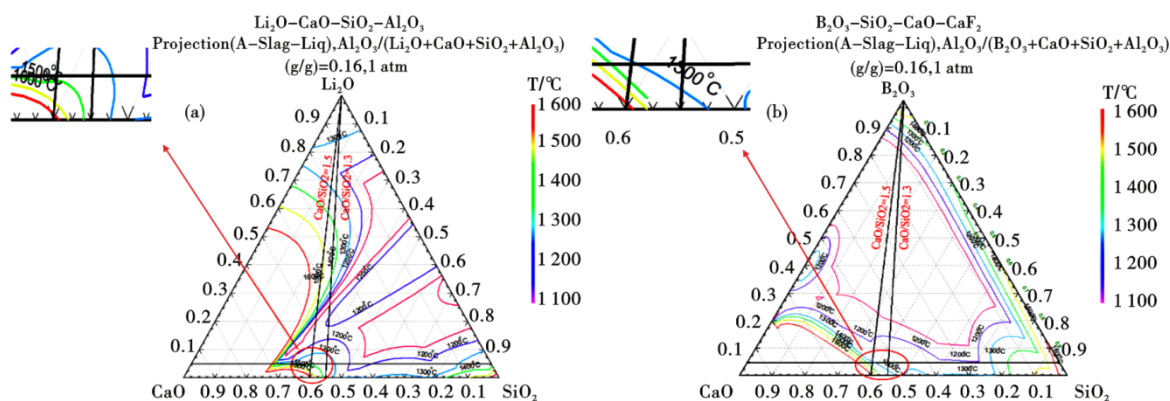


图 5 四元渣系的等温线相图: (a) $\text{Li}_2\text{O-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, (b) $\text{B}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

Fig. 5 Isotherm phase diagram of quaternary slag system: (a) $\text{Li}_2\text{O-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, (b) $\text{B}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

表 3 1Cr13 不锈钢 6 组保护渣试验成分

Table 3 Test ingredients of 6 groups of 1Cr13 stainless steel protective slag

编号	碱度	保护渣成分(质量分数)/%							
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	CaF ₂	Li ₂ O	B ₂ O ₃
A1	1.3	32.2	24.8	16	8	4	10	2	3
A2	1.3	31.1	23.9	16	8	6	10	2	3
A3	1.3	30.0	23.0	16	8	8	10	2	3
A4	1.5	34.2	22.8	16	8	4	10	2	3
A5	1.5	33	22	16	8	6	10	2	3
A6	1.5	31.8	21.2	16	8	8	10	2	3

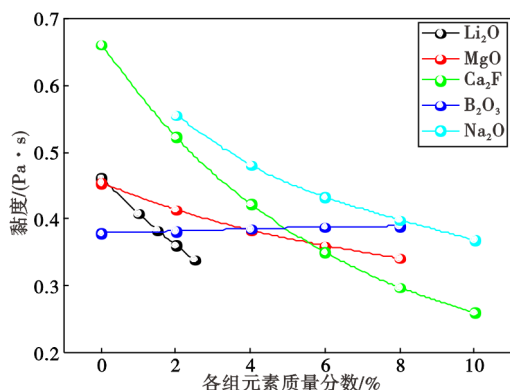


图 6 不同组元含量对保护渣黏度的影响

Fig. 6 Influence of different ingredient contents on viscosity of protective slag

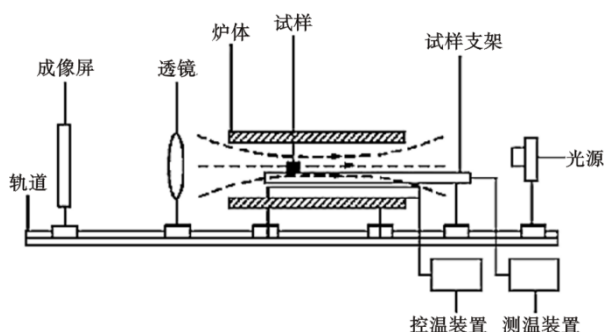


图 7 保护渣熔化特性测试仪原理图

Fig. 7 Schematic diagram of melting characteristic tester for protective slag

表 4 6组试验保护渣熔化温度测试结果

Table 4 Test results of melting temperature of 6 groups of protective slag

编号	开始软化温度/℃	半球点温度/℃	流淌温度/℃
A1	1 129	1 136	1 145
A2	1 080	1 090	1 103
A3	1 070	1 079	1 090
A4	1 143	1 150	1 165
A5	1 110	1 120	1 135
A6	1 103	1 111	1 122

增加 0.1 的碱度, 保护渣熔点分别会增加 7、15、16 °C。

3.2 保护渣黏度测试

利用 Brookfield 旋转黏度计对保护渣进行定温黏度和变温黏度测试, 其原理图如图 8 所示, 对设计的保护渣定温黏度采用每组测试 3 次, 取其平均值, 结果见表 5, 采用蓖麻油进行标定。

试验 6 组保护渣中, 当碱度为 1.3 时, 发现设计的高碱度高润滑型保护渣每加入 1% MgO 保护渣黏度会降低 0.029 Pa·s; 当碱度为 1.5 时, 发现设计的

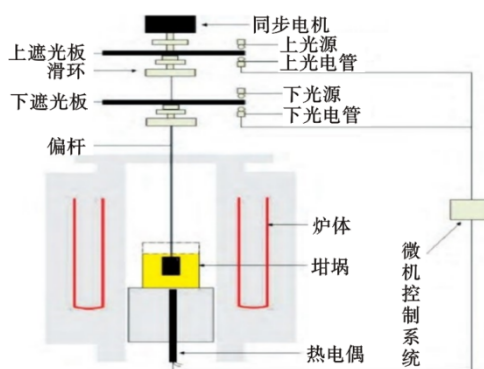


图 8 保护渣黏度特性测试原理图

Fig. 8 Schematic diagram of viscosity characteristic test of protective slag

高碱度高润滑型保护渣每加入 1% MgO 保护渣黏度会降低 0.026 Pa·s。当 MgO 含量分别为 4%、6%、8% 时, 发现设计的高碱度高润滑型保护渣每增加 0.1 的碱度, 保护渣黏度分别会降低 0.015、0.031、0.009 Pa·s。

表 5 6组试验保护渣黏度测试结果

Table 5 Viscosity results of 6 groups of tested protective slag

Pa·s					
A1	A2	A3	A4	A5	A6
0.406	0.366	0.289	0.376	0.305	0.271

利用 Brookfield 旋转黏度计测定保护渣的黏度-温度曲线如图 9 所示。结晶器出口温度经现场测量在 1 220 °C 左右, 设计的保护渣黏度能够保证全液态润滑, 能够达到 1Cr13 不锈钢生产对保护渣润滑效果的要求。

从图 9 的保护渣黏-温曲线图上判断其转折温度, 见表 6。转折温度为 1 107~1 244 °C, 从表中可以

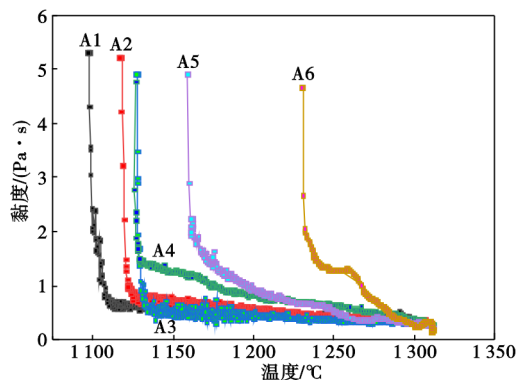


图 9 6组试验保护渣黏度-温度曲线图

Fig. 9 The viscosity - temperature curves of 6 groups of tested protective slag

看出碱度为1.3, MgO含量为4%时, 其转折温度最低, 其温度为1 107 °C; 碱度为1.5, MgO含量为8%时, 其转折温度最高, 其温度为1 244 °C。

表6 试验6组保护渣转折温度

Table 6 The turning temperature of 6 tested groups of protective slag °C

A1	A2	A3	A4	A5	A6
1 107	1 123	1 135	1 129	1 171	1 244

3.3 保护渣结晶性能测试

DHTT-II型熔化结晶温度测试装置原理图如图10所示。

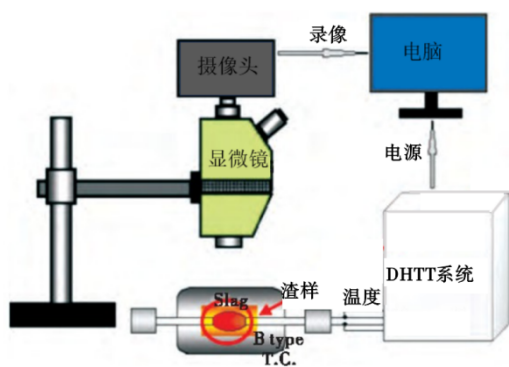


图10 DHTT-II型熔化结晶温度测试装置原理图

Fig. 10 Schematic diagram of DHTT-II melting crystallization temperature measuring device

保护渣结晶温度测试结果见表7。保护渣结晶温度越高, 其晶体越容易析出, 对1Cr13不锈钢来说, 控制传热能力越好, 能够抑制1Cr13不锈钢在连铸中铸坯横向凹陷和纵裂的发生。

表7 6组试验保护渣结晶温度

Table 7 The crystallization temperature of 6 groups of tested protective slag °C

A1	A2	A3	A4	A5	A6
1 203	1 226	1 259	1 238	1 270	1 306

综合对1Cr13不锈钢高碱度高润滑型保护渣冶金性能研究及根据Cr13保护渣理化性能指标表^[24], 见表8。确定A5型保护渣冶金性能较好, 与Cr13保护渣理化性能指标表性能指标接近, 熔化温度为1 120 °C, 转折温度为1 171 °C, 黏度为0.304 Pa·s。能够满足1Cr13不锈钢对保护渣性能的要求。

表8 Cr13不锈钢保护渣理化性能指标

Table 8 Physical and chemical properties indexes of Cr13 stainless steel protective slag

保护渣性能	合适范围	保护渣性能	合适范围
1 300 °C黏度/(Pa·s)	0.3~0.7	转折温度/°C	1 180~1 220
熔化温度/°C	1 120~1 170	渣耗/(kg·t ⁻¹)	0.4~0.6

4 工业试验

综合上文分析结果, 选取编号为A5的保护渣进行工业试验。生产工艺流程为: 高炉铁水→铁水预处理→60 t AOD→LF→4机4流连铸机→缓冷→推检修磨→轧机, 连铸机主要参数见表9。

表9 连铸机主要参数

Table 9 Main parameters of continuous casting machine

连铸机型	弧长半径/m	结晶器长度/mm	冶金长度/m	断面/(mm×mm)	拉速/(m·min ⁻¹)
弧形	9	800	22.2	150×150	1.1~1.5

在国内某钢厂采用4机4流连铸机对1Cr13不锈钢进行生产, 采用多流浇注试用。在生产过程中, 连铸结晶器工况稳定, 铸坯表面横向凹陷和纵裂得到明显改善, 铸坯如图11所示, 成材率显著提高。

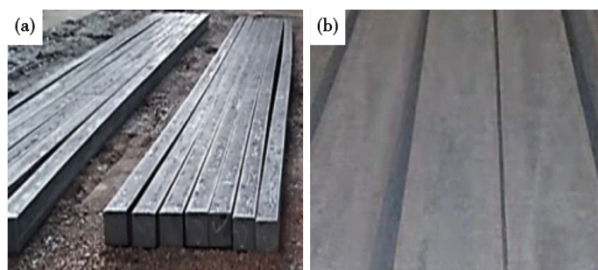


图11 优化后的铸坯试样图

Fig. 11 Sample diagram of optimized casting billet

5 结论

(1)对1Cr13钢原渣冶金性能测试, 熔化温度为1 155 °C, 黏度为0.442 Pa·s、转折温度1 140 °C, 熔化温度与黏度偏高。

(2)最终拟定保护渣质量分数, (CaO)/(SiO₂)为1.5, 配加16% Al₂O₃、8% Na₂O、10% CaF₂、3% B₂O₃、2% Li₂O以及6% MgO。

(3)在试验条件下, 测试保护渣黏度为0.304 Pa·s, 转折温度为1 171 °C, 结晶温度为1 270 °C, 熔化温度1 120 °C, 最终, 经过工业试验生产1Cr13不锈钢铸坯表面横向凹陷和纵裂得到明显改善。

参考文献

[1] 赵昌盛. 不锈钢的应用及热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[2] Wu H L, Huang Y, Huang Z, et al. Experimental research on the abrasive belt grinding turbine blades material 1Cr13 stainless steel [J]. Key Engineering Materials, 2011, 487: 452-456.

[3] 冯为民, 薛井恒, 邢国成, 等. Cr13型马氏体不锈钢方坯连铸保护渣的开发[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 53-58.

[4] 姚 军, 贾育华, 邸永田, 等. 2Cr13A 马氏体不锈钢纵裂漏钢形成机理及控制[C]. 第十七届(2013年)全国炼钢学术会议论文集(B卷). 杭州, 2013: 552-559.

[5] 高宇波, 管蒙寒, 张建斌, 等. 高拉速生产小方坯包晶钢表面质量控制与改善[J]. 炼钢, 2022, 38(2): 49-53.

[6] Ruíz Mondragón J J, Herrera Trejo M, de Jesús Castro Román M, et al. Description of the hypo-peritectic steel solidification under continuous cooling and crack susceptibility[J]. ISIJ International, 2008, 48(4): 454-460.

[7] 王杏娟, 田 阔, 朱立光, 等. 裂纹敏感性钢连铸保护渣应用研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(2): 121-126.

[8] 朱立光, 张彩军, 韩毅华, 等. 包晶钢连铸用保护渣性能优化[J]. 河南冶金, 2012, 20(5): 1-3+6.

[9] 翁建军. 高碱度高润滑性连铸保护渣的研究和应用[J]. 炼钢, 2016, 32(1): 52-54+61.

[10] 李玉娣, 张发斌. 包晶钢板坯纵裂纹分析及保护渣优化[J]. 连铸, 2021, 46(2): 57-60+70.

[11] 胡 浩. 连铸坯表面凹陷分析与控制研究[J]. 海峡科技与产业, 2020(6): 40-41+44.

[12] 李 亮, 李晓冬, 金柱元. Q355B 板坯纵裂缺陷机理研究与控制实践[J]. 山西冶金, 2023, 46(11): 115-117.

[13] 刘洪波. Fe-Mn-C(-Al)系 TWIP 钢冶炼与凝固相关基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.

[14] Korojy B, Nassar H, Fredriksson H. Hot crack formation during peritectic reaction in steels [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2010, 37(1): 63-72.

[15] Presoly P, Pierer R, Bernhard C. Identification of defect prone peritectic steel grades by analyzing high-temperature phase transformations [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(12): 5377-5388.

[16] Dippenaar R, Moon S, Szekeres E. Strand Surface Cracks - The role of abnormally large prior-austenite grains [J]. Iron and Steel Technology, 2007, 4: 105-115.

[17] 朱立光, 张晓仕, 刘增勋, 等. ER70-Ti 钢铸坯表面横向裂纹分析及控制[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 166-171.

[18] Jin H B, Tu L F, Zhang X B, et al. Optimization of mold slag for continuous casting of peritectic steel [J]. Steel Research International, 2023, 94(8): 220868.

[19] Liu T, Long M J, Chen D F, et al. Investigations of the peritectic reaction and transformation in a hypo-peritectic steel: Using high-temperature confocal scanning laser microscopy and differential scanning calorimetry [J]. Materials Characterization, 2019, 156: 109870.

[20] GAO Jin-xing. The influence of NazO on the solidification and crystallization behavior of CaO-SiO₂-Al₂O₃ based moldflux [C]// Proceedings of the 6 th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking (I). Beijing: The Chinese Society for Metals, 2015:604.

[21] 韩文殿, 仇圣桃, 朱果灵. 无氟结晶器保护渣的发展[J]. 钢铁研究, 2003, 31(2): 53-56.

[22] 邱 斌, 袁守谦, 曹余良, 等. MgO 和 Li₂O 对预熔型无氟连铸保护渣渣化温度的影响[J]. 连铸, 2009, 34(2): 44-46.

[23] 王杏娟, 靳贺斌, 朱立光, 等. B₂O₃ 对 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 基连铸保护渣性能及结构的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(8): 1395-1400.

[24] 王文学, 王 雨, 迟景灏, 等. 小方坯不锈钢用保护渣的研制[J]. 炼钢, 2006, 22(6): 45-47+56.

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关行业在《特殊钢》期刊上刊登工艺设备和技术、产品研发宣传广告

联系人: 陈颖 电话: 13812128736