

# 高拉速下不锈钢连铸结晶器卷渣控制研究

周乐君\*, 钟小灿, 王万林, 窦坤, 陆静洲, 司先正

中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083

## Research on Control of Slag Entrapment in High Speed Continuous Casting Stainless Steel

Zhou lejun\*, Zhong xiaocan, Wang Wanlin, Dou Kun, Lu Jingzhou, Si xianzheng

School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha, 410083, China

### 1. 前言

不锈钢具有优良的冷、热加工性能, 以及良好的耐蚀性, 因而被广泛应用于装饰、建筑、化工和石油等行业<sup>[1]</sup>。由于不锈钢钢液中镍、铬、钛等合金元素的不同作用及其含量的不同, 使不锈钢钢坯具有不同的凝固特性和高温性能, 导致不锈钢与普碳钢有很大差异, 在连铸过程中铸坯表面极易出现凹陷、裂纹、深振痕及夹渣等缺陷, 这些缺陷增加了铸坯修磨量, 严重降低了不锈钢的成材率<sup>[2-5]</sup>。

当为满足生产需要而加块生产节奏时, 卷渣问题尤其严重, 因此解决因拉速提高而发生卷渣问题变得刻不容缓。控制卷渣的核心是控制界面流速。流速较低, 保护渣熔化不完全, 容易造成结冷钢; 流速过大, 在剪切力作用下, 容易引起卷渣<sup>[6-7]</sup>。根据产生机理不同, 卷渣方式主要分为 3 种: 漩涡卷渣、吹气卷渣及剪切卷渣<sup>[8-9]</sup>。国内外学者通过数值模拟对板坯结晶器的研究报道较多, 浸入式水口 (SEN) 结构和断面、拉速等工艺参数对结晶器内温度场和流场有重要影响<sup>[10-11]</sup>。

本文以国内某钢厂不锈钢连铸过程为研究对象。首先, 对原工艺参数和水口结构进行厚板坯结晶器内钢液流场和渣-金界面特征的数值模拟研究, 进而对模拟结果显示的问题进行水口结构的参数优化, 以实现优化结晶器流场。此外, 保护渣对不锈钢表面质量有直接的影响和明显的作用。不锈钢高温热物性能比较复杂, 对凝固过程收缩应力敏感的不锈钢, 应该保证保护渣渣膜形成后, 结晶层和玻璃层要合理的搭配, 保证良好的渣膜润滑和有效的抑制传热<sup>[12-14]</sup>。基于此, 我们通过对浸入式水口结构进行优化及保护渣性能改善两方面来抑制因提拉速造成的卷渣, 最终达到提高不锈钢连铸坯表面质量的目的。

### 2. 试验材料和方法

#### 2.1. 结晶器流场模拟

本文主要通过 Fluent 软件进行结晶器流场模拟, 其主要步骤流程包括: 运行合适的解算器→导入网格→选择求解方程→制定材料物理性质→制定边界条件→调节解的控制参数→初始化流场→开始计算→检查结果→保存结果。

#### 2.2. 保护渣成分设计

高拉速条件下保护渣要有优异的润滑性能, 减少摩擦力; 且有较强的传热能力, 保证坯壳均匀生长, 避免发生裂纹。一般采取添加适量的  $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{BaO}$ , 高碱度条件下优化炉渣粘度、凝固温度、结晶温度, 保证保护渣的消耗量<sup>[15]</sup>。为适应高拉速下对保护渣性能的要求, 我们在原渣的基础上进行了优化, 具体如表 1 所示。

表 1 原渣及新渣化学成分组成（质量分数，%）

Table 1 Chemical composition of raw and new slag (mass fraction, %)

	F	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub>
原渣	7.20	34.35	33.84	6.25	1.88	1.49	10.85	1.02
新渣	7.20	37.35	33.95	3.00	2.00	1.50	11.00	1.10

## 2.3. 保护渣性能测试方法

### 2.3.1. 熔化性能测试

石英反应器、热电偶控制柜、温度采集系统以及成像系统组成，如图 2 所示<sup>[16]</sup>。保护渣熔化行为测试是采用单丝模式进行。载有保护渣的热电偶以 10°C/s 的升温速率加热至 1500°C，其熔化过程与相对应的温度曲线，可以通过温度采集系统和成像系统实时采集得。

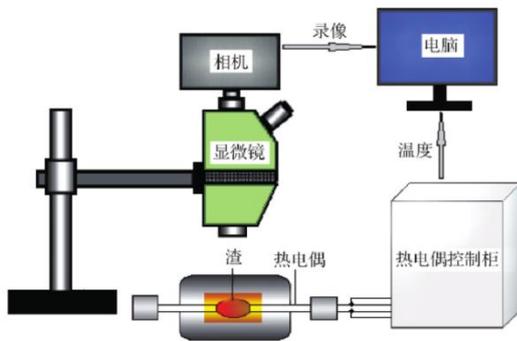


图 1 单丝热电偶技术系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of single wire thermocouple technology system

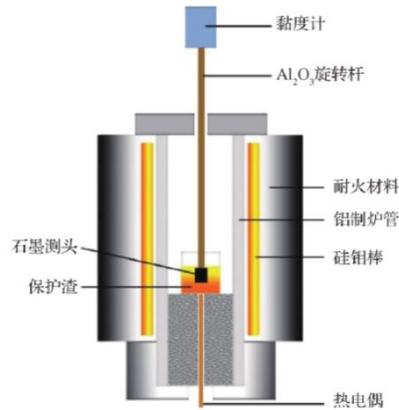


图 2 旋转黏度测试仪

Figure2 Rotational viscometer

### 2.3.2. 流变性能测试

旋转黏度测试仪如图 2 所示，试验前采用蓖麻油对仪器进行校正。黏度测试过程中，首先，将 150g 渣样加入到预热 1300°C 的石墨坩埚中；保温 30min，待其完全熔化并成分均匀后，将探头预热 2min 进行 1300°C 下保护渣的黏度测试；紧接着，将降温速率控制为 5°C/min，随着温度的下降，不断记录各温度下的黏度；最后当黏度达到 5Pa·s 及以上时测试结束。

## 3. 试验结果与分析

### 3.1. 浸入式水口结构优化

原水口中孔孔径为 50±5mm，侧孔倾角为 9±2°。优化后水口中孔孔径为 60±5mm，侧孔向上倾角为 7±2°。将原水口及新水口尺寸代入参数设置界面，计算结晶器钢液面最大流速，得到结果如图 3 所示。从图中不难看出，改进后结晶器钢液面最大流速从 0.347m/s 降到 0.296m/s，降低了 14.7%。

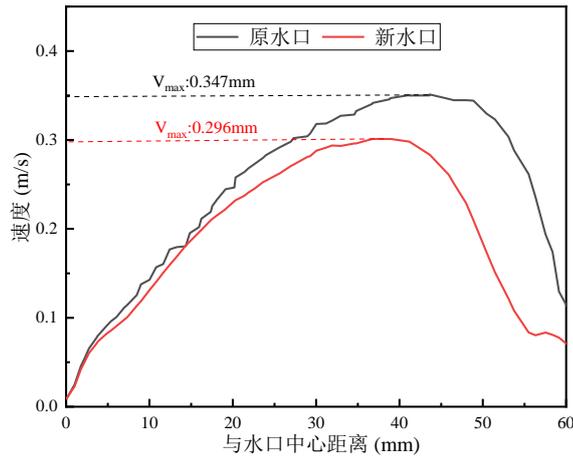


图 3 新旧水口计算结晶器中心液面最大流速图

Figure 3 Calculation of the maximum flow velocity of the central liquid level in the mould for new and old nozzle

### 3.2. 保护渣性能测试结果

原渣及新设计的优化渣熔化及流变性能如图 4 所示。由图 4（a）可知，从熔化性能看，原渣开始熔化温度为 1064.4°C，其熔化时间为 35.7s；与之相比，新设计的优化渣开始熔化温度为 1028.6°C，比原渣降低了 35.8°C，熔化时间为 34.5s，比原渣减少 1.2s。

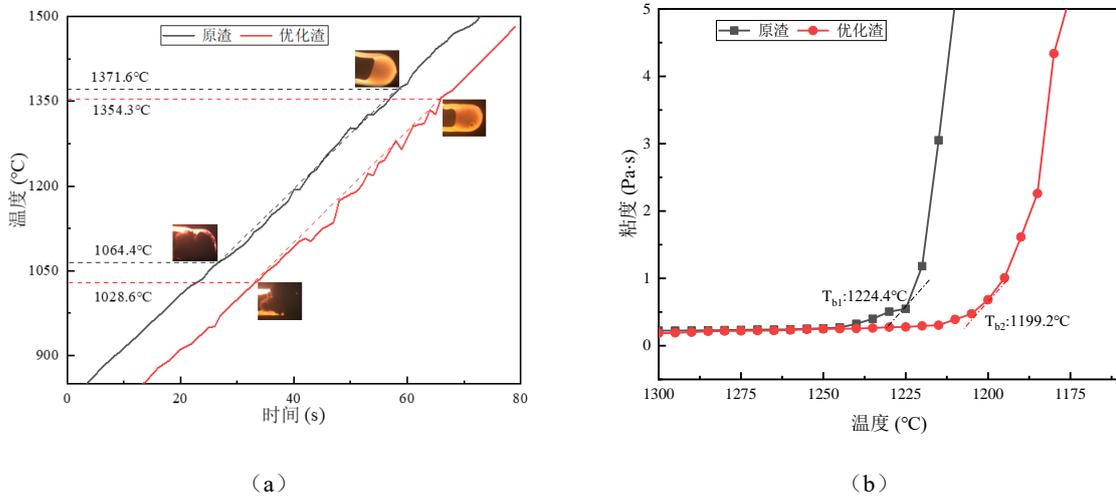


图 4 原渣及优化渣性能对比图 (a) 熔化性能 (b) 流变性能

Figure4 Comparison of Performance between Raw Slag and Optimized Slag

(a) Melting Performance (b) Rheological Performance

原渣及优化渣粘度随温度变化曲线如图 4（b）所示，从流变性能看，原渣在 1300°C 下运动粘度为 0.223 Pa·s，其转折温度为 1224.4°C；而新设计的优化渣在 1300°C 下运动粘度为 0.185 Pa·s，比原渣降低了 0.038 Pa·s，变化幅度为 17.04%，优化渣的转折温度为 1199.2°C，比原渣降低了 25.2°C，这将更有利于渣膜沿着坯壳表面下渗，有效地避免了裂纹的发生。

### 3.3. 现场连铸测试结果

为验证对 SEN 结构及原有保护渣优化的实际效果，我们按照新设计水口结构尺寸结合生产的一批优化成分后的工业保护渣进行现场工业化测试，主要测试参数见表 2。

表 2 现场连铸主要测试参数汇总表

Table 2 Summary of main test parameters for onsite continuous casting

工艺参数	对照组	试验组
拉速/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	1.2	1.2
结晶器窄面尺寸/mm	200	200
浇铸温度/ $^{\circ}\text{C}$	1490~1500	1490~1500
SEN 侧孔倾角/ $^{\circ}$	$9\pm 2^{\circ}$	$7\pm 2^{\circ}$
SEN 中孔开口直径/mm	$50\pm 5$	$60\pm 5$
SEN 插入深度/mm	$150\pm 5$	$150\pm 5$
保护渣型号	原渣	优化渣

由表 2 可知，在控制拉速、断面尺寸及浇铸温度等条件不变的情况下，只改变 SEN 结构及保护渣种类，减少其它因素影响。从测试结果来看，渣耗统计分析数据，原渣吨钢渣耗为  $0.32\text{kg/t}$ ，优化渣吨钢渣耗为  $0.35\text{kg/t}$ ，渣耗增加了 9.38%。进一步分析，之所以渣耗上升，是因为前面通过降低保护渣熔点，进而增加液渣层比例，促进了润滑效果。从卷渣发生率来看，对照组卷渣发生率为 17.65%，试验组卷渣发生率仅为 5.88%，试验组比对照组降低了 11.77%。说明通过改变 SEN 结构及优化保护渣成分，大大降低了不锈钢结晶器卷渣发生率，达到了提拉速并保证铸坯表面质量的要求。

## 4. 结论

本文利用 Fluent 软件进行数值模拟及调整浸入式水口尺寸来优化不锈钢板坯连铸结晶器流场及改进现有保护渣，有效降低了因卷渣而带来的铸坯缺陷，得到主要结论如下：

(1) 对于不锈钢水口中孔开孔孔径由  $50\pm 5\text{mm}$  改为  $60\pm 5\text{mm}$ ，侧孔倾角由向上  $9\pm 2^{\circ}$  降至  $7\pm 2^{\circ}$ ，钢液表面最大流速从  $0.347\text{m/s}$  降低到  $0.296\text{m/s}$ ，降低了 14.7%；

(2) 通过优化原渣成分，针对不锈钢特性改善其理化性能，主要包括将熔点从  $1064.6^{\circ}\text{C}$  降到  $1028.6^{\circ}\text{C}$ ， $1300^{\circ}\text{C}$  下粘度由  $0.223\text{Pa}\cdot\text{s}$  降至  $0.185\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，转折温度由  $1224.4^{\circ}\text{C}$  降为  $1199.2^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 在提拉速后，综合结晶器浸入式水口结构优化进而改善流场，提高相应保护渣的适应性，改善其熔化及高温流变性能，其卷渣发生率由 17.65% 降至 5.88%，达到了预期效果，为进一步提高拉速提供了强有力地保障。

## 参考文献

- [1] 郑花. 先进高强度汽车用钢的研究进展[J]. 价值工程, 2016(1):159.
- [2] 董方, 郗俊懋, 邓浩华. 304 不锈钢连铸坯的高温物理性能研究[J]. 中国冶金, 2014, 24(05):18-20.
- [3] 李强. 304 不锈钢连铸坯表面凹陷与控制工艺实践[J]. 山西冶金, 2022, 45(08):87-88+91.
- [4] 陆海飞, 蒋发立, 徐佳林, 等. 304 不锈钢热轧带钢黑带缺陷分析[J]. 连铸, 2019, 44(06):55-60.
- [5] 郗俊懋. 304 不锈钢高温力学性能及热物理性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2014.
- [6] 李向龙, 冯胜强, 张志霄, 等. 连铸坯拉速对结晶器卷渣现象的影响[J]. 连铸, 2022(02):100-108.
- [7] 郑万, 寇锦荣, 陈小龙, 等. 高速连铸结晶器卷渣缺陷的特征、演变及控制[J]. 炼钢, 2021, 37(04):30-37+84.
- [8] 朱苗勇. 高拉速连铸过程传输行为特征及关键技术探析[J]. 钢铁, 2021, 56(07):1-12.
- [9] 周海忱, 刘国梁, 李海波, 等. 基于数值模拟的结晶器卷渣在线预测方法[J]. 钢铁, 2022, 57(08):103-110.
- [10] 袁静, 时朋召, 徐李军, 等. 250 mm 厚板坯结晶器浸入式水口结构的优化研究[J]. 连铸, 2019, 44(04):19-25.
- [11] 张燕超, 张彩军, 刘毅. 板坯连铸结晶器浸入式水口结构优化[J]. 铸造技术, 2018, 39(11):2548-2553.
- [12] 任磊, 张立峰, 王强强, 赵星. 304 不锈钢连铸过程中结晶器渣圈形成机制[J]. 钢铁, 2016, 51(08):35-40.
- [13] 辛瑞峰. 304 不锈钢连铸结晶器保护渣理化性能研究[D]. 内蒙古科技大学, 2014.
- [14] 程立, 康彦萍. 连铸保护渣对 304 不锈钢表面的影响[J]. 山西冶金, 2015, 38(01):45-48.
- [15] 朱立光, 郭志红. 高速连铸技术研究[J]. 河北冶金, 2021, (06):1-10.
- [16] 翟冰钰, 张磊, 王万林. CSP 包晶钢连铸用保护渣综合理化性能的优化[J]. 连铸, 2020(5):30.