

## 渣圈对结晶器传热行为的影响

王杏娟<sup>1, 2</sup>, 郭银星<sup>1, 2</sup>, 肖鹏程<sup>1, 2</sup>, 朱立光<sup>2, 3</sup>, 邸天成<sup>1, 2</sup>

- (1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210;  
2. 河北省高品质钢连铸工程技术创新中心, 河北 唐山 063000;  
3. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018)

### Influence mechanism of slag ring on heat transfer behavior of mold

Wang Xingjuan<sup>1, 2</sup>, Guo Yinxing<sup>1, 2</sup>, Xiao Pengcheng<sup>1, 2</sup>, Zhu Liguang<sup>2, 3</sup>, Di Tiancheng<sup>1, 2</sup>

- (1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei Province, China;  
2. Collaborative Innovation Center of High Quality Steel Continuous Casting of Hebei Province, Tangshan 063009, Hebei Province, China;  
3. College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei Province, China)

## 1. 前言

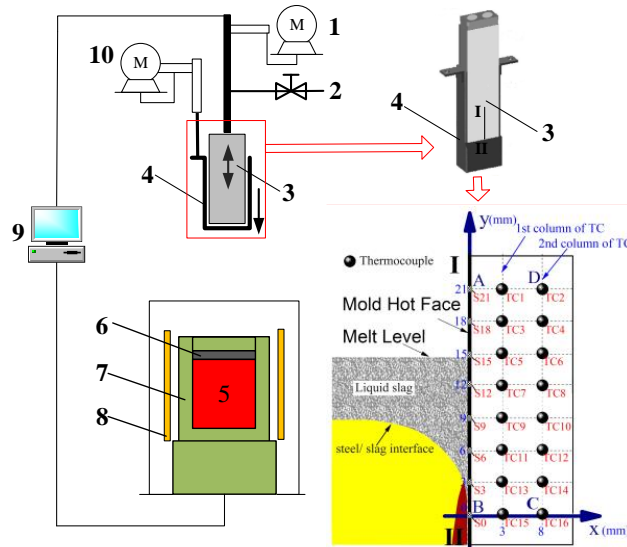
结晶器易结渣圈是造成铸坯产生缺陷的主要原因之一<sup>[1]</sup>。结晶器保护渣技术是连铸生产中的一项重要组成部分, 它对铸坯的质量和产量起至关重要的作用, 连铸生产的顺利进行和产品质量的提高与保护渣的应用密切相关<sup>[2]</sup>。正常的渣圈一旦过分长大, 过大的渣圈会占据保护渣流入结晶器和铸坯间的通道入口, 一旦流入通道的保护渣含量不足, 铸坯与结晶器铜壁之间的摩擦力就会显著增加, 而且当渣膜厚度不足时也难以稳定控制铸坯与结晶器铜壁间的热量交换。一旦初始凝固坯壳的强度不足, 就会使铸坯的表面缺陷增加, 严重时甚至造成漏钢事故<sup>[6]</sup>。因此, 探究渣圈对保护渣流入行为以及结晶器传热行为的影响, 对于指导铸坯顺利生产具有重要意义。

对此, 国内外专家进行了一定的研究, 王欢等人<sup>[7]</sup>设计了非反应性保护渣, 利用热丝法和渣膜热流模拟仪研究了  $\text{Li}_2\text{O}$  含量对其结晶行为和渣膜传热特性的影响; 颜慧成等人<sup>[8]</sup>用自由质点法处理 Voronoi 元, 对连铸结晶器弯月面处保护渣流动行为进行数学模拟, 讨论了渣圈对液渣流动行为的影响; Marschall I 等人<sup>[9]</sup>对两种保护渣形成的渣圈进行了研究, 得出渣圈的形成的取决于保护渣的熔化行为; Ji Junde 等人<sup>[10]</sup>建立了结晶器内熔渣与铜板界面热阻的二维数学模型, 比较了渣圈的形状、壳/模间隙内的渣以及不同涂层下的凝固半月板深度研究了熔渣与铜板界面热阻对结晶器内初始凝固和传热的影响。可见, 虽然前人进行了一定的研究工作, 但由于设备和算法的局限性, 并不能深入探究渣圈对对结晶器传热的影响机制。

基于作者多年来致力于保护渣的不懈研究, 采用了一种实验与数学模型相结合的方法, 高温连铸模拟实验与二维反算模型相结合, 该方法突破了前人研究的局限性。通过实验确定了渣圈与渗渣量的对应关系, 解析了渣圈对保护渣流入行为的影响规律。采用正问题与反问题相结合的算法建立了 2DIHCD 二维反算模型, 通过提取精度极高的结晶器铜模中热电偶记录的温度数据, 精确计算结晶器热面的温度以及热流密度, 探究渣圈对对结晶器传热行为的影响机制。

## 2. 高温连铸模拟实验

本研究采用结晶器凝固模拟装置（mold simulator）来进行高温连铸模拟实验，该装置在美国钢铁研究技术中心的 mold simulator 的基础上进一步的完善和优化。装置如图 1 所示。该设备能够使实验得到更加精准的结果，进而可以准确分析不同工艺参数下渣圈对结晶器传热行为的影响。



1—振动控制器；2—冷却水；3—铜模；4—拉坯器；5—钢液；6—保护渣；7—炉体；  
8—中频感应炉线圈；9—数据采集与控制系统；10—拉坯控制器

图 1 结晶器凝固模拟装置

Fig.1 Mold solidification simulation device

## 2.1. 实验参数的设定

结晶器采用正弦振动，在相同工况条件下分别开展无渣圈和有渣圈两组对比实验，共计 2 组实验。主要工艺参数如表 1 所示。

表 1 高温连铸模拟实验工艺参数

Table 1 Process parameters of high temperature continuous casting simulation experiment

组号	浇注温度/(°C)	拉速/(m·min <sup>-1</sup> )	振频/(Hz)	振幅/(mm)	结晶器水流量/(L·min <sup>-1</sup> )	渣圈
S1	1550	0.5	2	10	7	无
R1	1550	0.5	2	10	7	有

渣圈为某厂不锈钢生产现场提取的渣圈，冶炼该钢种所用保护渣成分如表 2 所示，根据现场对保护渣渣耗量的统计和液渣层深度的测量，保护渣消耗量为 0.40~0.42 kg/t，液渣层深度为 10~11 mm。

表 2 渣圈对应保护渣成分

Table 2 Composition of mold flux corresponding to slag ring

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	C	R
原渣/(wt%)	37.70	34.55	6.35	0.92	3.71	0.04	0.16	11.00	2.87	1.09

为保证实验过程中渣圈位置在弯月面处，在实验前使用直径 0.2 mm 的钼丝将渣圈捆绑在结晶器铜模上对应弯月面处，固定方式如图 2 所示。



图 2 渣圈固定方式

Fig. 2 Fixing method of slag ring

## 2.2. 结晶器内钢液凝固模拟实验过程

实验步骤为：

(1) 首先，准备好 30 kg 的钢块，为加速钢块熔化，将钢切割成 30 mm×50 mm×100 mm 的长条，每 10 kg 为一批分批放入中频电磁感应炉中加热熔化。感应炉按照每 15 min 增大 5 A 电流的幅度进行加热，在电流到达 50 A 时不再继续加大电流。待钢完全熔化后适当降低电流使钢液面稳定下来。

(2) 待钢液面稳定后，加入 200 g 经脱碳处理的保护渣，待保护渣完全熔化后，会在钢液面上生成 8~10 mm 厚的液渣层。此时调低感应炉电流至 30 A 左右，使用测温枪监控炉温，防止因为温度过高导致拉坯器在进入熔池后熔化。

(3) 炉温稳定后，将感应炉推至结晶器模拟系统下方，开启结晶器的循环冷却水，启动热电偶的数据采集与结晶器振动系统。

(4) 系统启动后定位杆开始下降，当定位杆接触到钢液时会通电，此时定位杆停止下降，以此确定钢液面位置。随后结晶器与拉坯器开始下降，过程如图 3 所示：结晶器与拉坯器同时下降到预设位置，此过程对应图 3 中的(a)到(c)；结晶器与拉坯器在钢液中停留几秒以形成一定厚度的初始凝固坯壳，对应图 3 中的(d)；之后拉坯系统启动，带动拉坯器以设置好的拉速与参数进行拉坯，拉坯结束后结晶器振动系统关闭，拉坯过程对应图 3 中的(e)到(f)。拉坯器运动一定时间后，初生坯壳形成，结晶器和拉坯器都停止运动，随后将结晶器和拉坯器一起拉出钢液<sup>[11]</sup>。1 s 后将结晶器、拉坯器与初生坯壳整体拉出熔池，在空气中缓冷，对应图 3 中的(h)到(i)。结晶器和拉坯器离开熔池以后，关闭温度采集系统，完成实验。

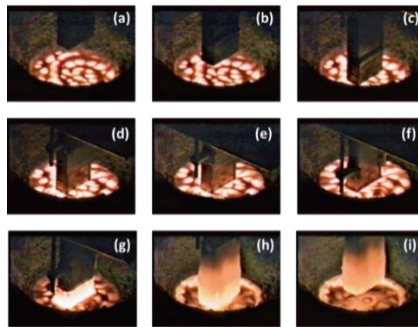


图 3 连铸结晶器内钢液凝固模拟系统实验过程

Fig.3 Experimental process of molten steel solidification simulation system in continuous casting mold

## 3. 渣圈对结晶器传热能力分析

### 3.1. 渣圈对结晶器中保护渣流入的影响

图 4 为 1、2 两组实验中有无渣圈条件下渗渣量的对比。从图中可以看出，实验条件下，无渣圈时渗渣量为 9.314 g，有渣圈时渗渣量为 6.326 g，减少了 32%。

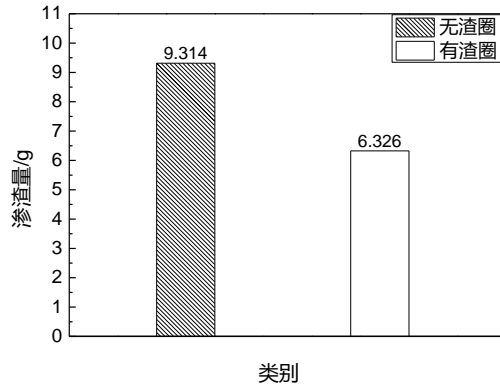


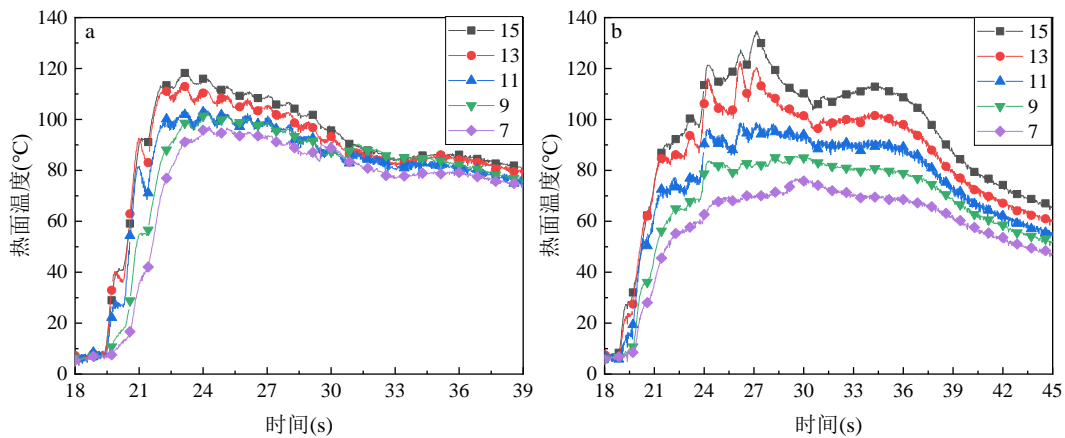
图 4 渣圈对渗渣量影响对比图

Fig.4 Comparison of the influence of the slag ring on the amount of slag infiltration

### 3.2. 渣圈对结晶器热面温度的影响

图 5 为不同实验条件下测量的结晶器热面温度分布图。通过对比实验中的具体的坯壳位置和热电偶排布位置，确定弯月面位置对应 9 号和 11 号热电偶的位置，坯壳最上端位置对应 7 号热电偶的位置。因此结晶器热端温度仅选取 7~14 号热电偶测得的数据绘制结晶器热端温度分布图。

从图中可以看出：在拉速 0.5 m/min 的条件下，无渣圈条件下，结晶器热面温度为 118.24℃；添加渣圈后结晶器热面温度提升至 134.83℃，增加了 14%。有渣圈条件下的结晶器热面温度明显高于无渣圈条件的结晶器热面温度，说明渣圈对于保护渣的流入有阻碍作用，流入结晶器壁与铸坯之间的保护渣量减少，使得结晶器壁更容易受到钢水热量的影响，致使结晶器热面温度升高<sup>[13, 14]</sup>。



a—S1 组热面温度；b—R1 组热面温度

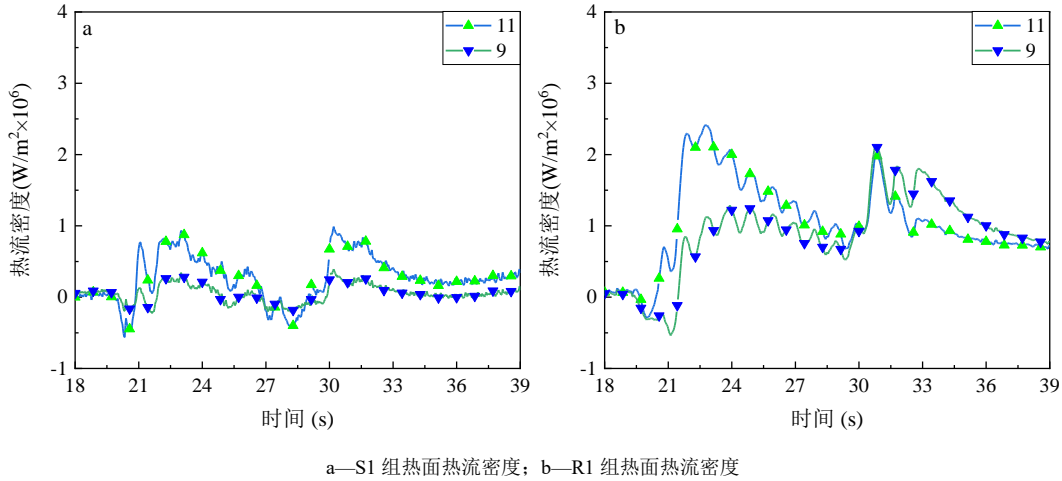
图 5 不同实验条件下结晶器热面温度分布图

Fig.5 Temperature distribution of mold hot surface under different experimental conditions

### 3.3 渣圈对结晶器热流密度的影响

通过二位传热反算法模型（2DIHCP）计算出实验中拉坯结束时的结晶器热面的热流密度，如图 6 所示。此处仅选取 9 号和 11 号热电偶测得的实验数据，这两根热电偶对应模拟实验中弯月面的位置。

可以看出：在拉速为 0.5 m/min，振频 2 Hz，振幅 10 mm 时，无渣圈条件下结晶器最大热流密度为 0.98 MW/m<sup>2</sup>，有渣圈条件下热流密度为 1.95 MW/m<sup>2</sup>，热流密度提高了 99%。结晶器热面热流密度变化规律与结晶器温度保持一致。有渣圈条件下结晶器热面热流密度高于无渣圈条件下结晶器热面温度。



a—S1 组热面热流密度；b—R1 组热面热流密度

图 6 不同实验条件下结晶器热面热流密度分布图

Fig.6 Distribution of heat flux density on the hot surface of the mold under different experimental conditions

## 4. 结论

本研究使用结晶器凝固模拟装置进行高温连铸模拟实验，统计实验所得渣膜的厚度与质量，通过 2DIHCD 二维反算模型计算出结晶器铜模热面的温度和热流密度，探究渣圈结晶器传热行为的影响，得出以下结论：

1) 采用现场的渣圈进行高温连铸模拟实验，开发了新型的 2DIHCD 二维反算模型，通过模拟连铸现场保护渣渣膜的形成过程，以构建的矩形温度场内的热流密度变化为基础，反算出结晶器铜模热面的温度和热流密度。

2) 在拉速为 0.5 m/min，振频 2 Hz，振幅 10 mm 的工况条件下，无渣圈时，保护渣渗流量为 9.314 g、渣膜厚度为 2.1 mm、结晶器热面温度为 118.24℃、结晶器最大热流密度为 0.98 MW/m<sup>2</sup>；存在渣圈时，保护渣渗流量为 6.326 g、渣膜厚度为 1.3 mm、结晶器热面温度为 134.83℃、结晶器最大热流密度为 1.95 MW/m<sup>2</sup>，同时对渣膜内部结构进行观察，渣膜内部晶体形貌完整。

3) 通过数据对比，存在渣圈条件下，渗渣量减少了 32%，渣膜厚度降低了 38%，结晶器热面温度增加了 14%，热流密度提高了 99%。铸坯与结晶器之间的热量传递增加，而渣膜内部晶体仍具完整形貌，表明渣圈是通过限制保护渣的流入，使得铸坯与结晶器之间难以形成厚度足够且分布均匀的渣膜，进而影响结晶器内部的传热行为。

## 致谢

感谢国家自然科学基金资助项目（51974133，51904107）；河北省自然科学基金资助项目（E2019209543，E2020209005，E2021209094）；河北省高等学校科学技术研究项目（BJ2019041）；河北省“三三三人才工程”资助项目（A202102002）；唐山市人才资助项目（A202010004）的支持。

## 参考文献

- [1] 任磊, 张立峰, 王强强, 等. 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.
- [2] 孟祥宁, 汪宁, 朱苗勇. 结晶器渣圈对渣道压力、振痕及渣耗影响的分析[J]. 鞍钢技术, 2015, 19(06): 1-5+19.
- [3] 付达超, 文光华, 刘耀宗, 等. 10B21 冷敏钢连铸小方坯表面异常振痕成因分析及控制[J]. 连铸, 2020, 45(03): 33-37.
- [4] 陈波涛, 王凤康, 曾杰, 等. 帘线钢小方坯 82A 铸坯表面和内部缺陷分析[J]. 连铸, 2021, 46(06): 65-70.
- [5] Devine K M, Vynnycky M, Mitchell S L, et al. Analysis of a model for the formation of fold-type oscillation marks in the continuous casting of steel[J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 2020, 85(3):385-420.
- [6] 王新月, 席常锁, 卢军辉, 等. 影响板坯连铸产生渣圈的因素[J]. 炼钢, 2010, 26(02): 53-56.
- [7] 王欢, 唐萍, 文光华, 于雄.  $\text{Li}_2\text{O}$  对高铝钢保护渣结晶行为及渣膜传热的影响[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(05): 544-549.
- [8] 颜慧成, 郭征, 张孟亭, 等. 连铸结晶器弯月面处保护渣的流动行为[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(03): 10-13.
- [9] Marschall I, Xia G, Klbl N. Slag Rim Formation of two Mould Powders used for Casting of Construction Steel[J]. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2018, 163(1):23-28.
- [10] Ji J, Cui Y, Zhang X, et al. Influence of Interfacial Thermal Resistance on Initial Solidification and Heat Transfer in Continuous Casting Mold of Steel[J]. Steel Research International, 2021, 92(5):9-10.
- [11] 龙旭凯, 王万林, 张海辉. 结晶器振动频率对铜模与坯壳之间传热现象的影响[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 炼钢与连铸, 2017: 747-753.
- [12] 曲硕. 1Cr13 不锈钢连铸保护渣冶金特性研究[D]. 华北理工大学, 2021.
- [13] Wang W. Mold simulator study of effect of mold oscillation frequency on heat transfer and lubrication of mold flux[J]. ISIJ International, 2018, 58(9):1695-1704.
- [14] Zhang H, Wang W. Mold simulator study of heat transfer phenomenon during the initial solidification in continuous casting mold[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2017, 48(2):779-793.
- [15] Wang W, Ying G, Zeng J, et al. Effect of electropulsing treatment on solidification behavior of spring steels in a continuous casting mold simulator[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(6):656-664.
- [16] Park J Y, Sohn I. Evaluating the heat transfer phenomena and the interfacial thermal resistance of mold flux using a copper disc mold simulator[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109(7):1014-1025.
- [17] Lyu P, Wang W, Zhang H. Mold simulator study on the initial solidification of molten steel near the corner of continuous casting mold[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(1):247-259.