

拉速波动下的挑战：连铸小方坯 粘结漏钢事故分析与控制

Challenges under Fluctuating Casting Speeds: Analysis and Control of Bonding Leakage Accident in Continuous Casting Billets

供稿|谭杜 / TAN Du

内
容
导
读

在钢铁连铸生产中，小方坯的粘结漏钢是一种常见却严重影响生产安全与效率的事故。尤其在拉速频繁波动的工况下，此类事故更易发生。当前，行业内粘结漏钢的产生，主要与结晶器铜管锥度设计、结晶器液面波动控制、结晶器振动参数设置、结晶器保护渣性能匹配等关键因素相关。本文以阳春新钢铁的生产实践为例，系统分析了粘结漏钢的原因，发现其主要与连铸结晶器内使用的保护渣性能、以及结晶器振动参数的设置密切相关。通过跟踪不同拉速下保护渣的消耗、传热情况及不同结晶器振动参数下铸坯表面情况，再对所使用结晶器保护渣理化指标和结晶器振动参数进行优化调整。最终，阳春新钢铁小方坯粘结漏钢事故得到解决，有效节约了生产成本，减少了生产事故的发生。可为同类连铸生产中的工艺优化提供参考。

阳春新钢铁有限责任公司配有3台五机五流连铸机，其铸坯断面为155 mm×155 mm。该连铸机的常规工作拉速为4.5 m/min，最高拉速可达5.73 m/min^[1-2]。但因生产组织模式变化及转炉铁耗不断调整，在铁水装入量不变的前提下，废钢加入量下调，实际每炉钢水量减少，导致同一炉钢水生产时，拉速在2.0~4.6 m/min范围内波动，故需根据实际钢水量对铸机拉速进行调整。

连铸结晶器保护渣作为实现高拉速以及超高拉速的关键材料，在满足基本保温、隔绝氧气、吸收夹杂的条件下，需具有更好的润滑及传热能力^[3-6]。

现阳春新钢铁开发使用的小方坯超高拉速保护渣具有低黏度、低熔点、高熔化速度等特征，能满足小方坯超高拉速连铸使用。然而在生产过程中发现，在4 m/min及以下拉速时使用该超高拉速保护渣，会造成粘结漏钢事故次数明显增加，故以此为突破口开展系统性攻关研究。

研究分析

保护渣对粘结漏钢的影响机理

保护渣加入结晶器后，经熔融流向弯月面，并流入铸坯与结晶器壁之间的缝隙中，在接近低温的

结晶器铜壁侧面迅速冷却凝固,形成固态渣膜;同时,在高温的结晶器钢液面处保持液态,形成液态渣膜。随着拉坯和结晶器振动,保护渣与铸坯被拉出,经水冷后一部分液态渣膜和固态渣膜与铸坯分离,完成保护渣消耗的过程。保护渣液态渣膜的厚度决定了保护渣的润滑性能,李宪奎^[7]研究发现,摩擦力与渣膜厚度满足公式(1):

$$f_L = \eta(V_m - V_c)/d_L \quad (1)$$

式中: f_L 为摩擦力, N; V_m 为结晶器拉速, m/min; V_c 为拉坯速度, m/min; η 为液态保护渣黏度, Pa·s; d_L 为液态保护渣渣膜厚度, m。

由式(1)可知,当结晶器拉速与拉坯速度的差值一定时,摩擦力只受保护渣黏度和液态渣膜厚度影响。当渣膜过薄导致摩擦力增大时,坯壳破裂,钢水在静压力作用下迅速进入裂口,与结晶器铜板接触,并在强冷作用下迅速收缩形成新的坯壳。但由于上方的粘结部分阻碍了保护渣的流入并形成气

隙,坯壳收缩后热通量显著降低,坯壳生长变缓,在下一个振动周期的正滑脱阶段因强度不足而再次被拉断,直至坯壳出结晶器发生漏钢^[8]。

对在拉速 4.0 m/min 下产生粘结漏钢的铸坯(如图 1)进行分析。对其表面进行观察,发现漏钢铸坯表面振痕凌乱且较深,同时铸坯表面有保护渣颗粒附着,且与结晶器铜壁接触发生反应,说明此区域保护渣的润滑作用已失效。结合上述现场实际跟踪情况,可分析得出此粘结漏钢的发生主要有以下 3 点因素:(1)超高拉速保护渣熔化速度过快且黏度较低,当低拉速时在结晶器铜壁与铸坯坯壳之间易形成不均匀的渣膜,或导致部分区域无液态渣填充,从而引发铸坯粘结漏钢。(2)保护渣在使用过程中,形成的渣膜中液态渣层占比较少,导致铸坯润滑不良,进而引发粘结漏钢。(3)不同拉速条件下,结晶器振动参数不合理,导致结晶器脱模效果较差,造成铸坯坯壳与结晶器铜壁粘结。

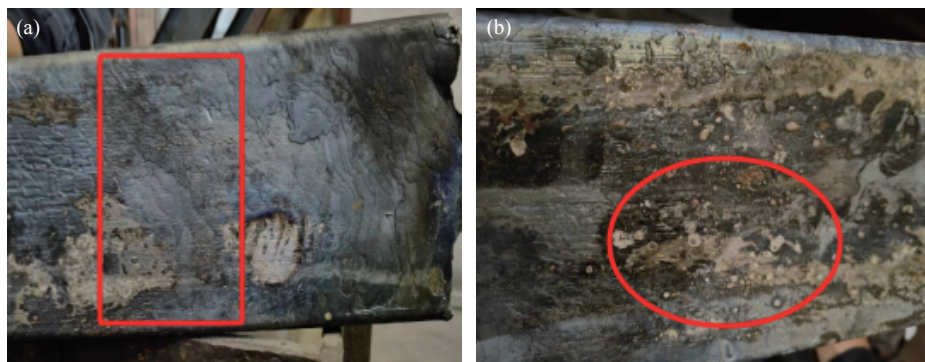


图 1 铸坯表面粘接形态:(a)铸坯表面无振痕;(b)铸坯表面已粘结

保护渣在不同拉速下的消耗与传热

在阳春新钢铁炼钢厂 1#铸机 S2 流,对通宇 0621657 批号超高拉速保护渣进行了测试。将拉速设定为 4.5、4.0 及 3.5 m/min,并测量了保护渣的吨钢消耗以及传热,结果如图 2 所示。

由图 2 可看出,正常情况下,随着拉速增加,保护渣消耗量与拉速成正比,在拉速增加至 4.0 m/min 及以上时,保护渣的消耗呈现降低趋势,这说明结晶器内加入保护渣后形成的渣膜(包含粉渣层、烧结层、液渣层)厚度变薄。Wang 等^[9]研究发现,拉速较高时钢液上方的液态保护渣更不易流入结晶器壁与初始凝固坯壳间隙中,进而导致形成的渣膜变

薄。从图 2 还可看出,拉速增加后传热能力增强。这是因为拉速提高后,铸坯在结晶器内停留的时间

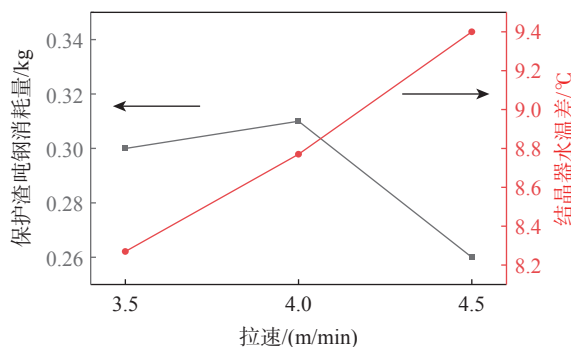


图 2 保护渣在不同拉速下的消耗与传热

缩短,形成的坯壳较薄,导致传输的热量增加。王子超^[10]研究发现,拉速增加后保护渣形成的渣膜厚度虽然降低,但在结晶器铜壁与铸坯坯壳之间的渣膜中,液态渣膜的厚度占比增加。

将2 mm铜丝固定在5 mm铁棒上(由于液态保护渣温度比铜的熔点高,所以铜丝熔化,测量出铜丝熔化的长度即为液渣层厚度),插入结晶器铜管内的保护渣层中,测量不同拉速下的液渣层厚度,结果如图3所示。

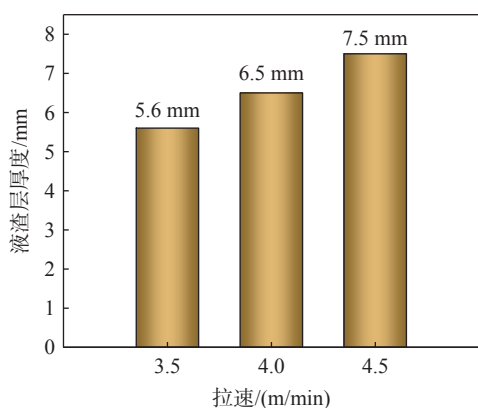


图3 不同拉速下液渣层厚度

从图3可看出,拉速增加后,液渣层厚度随之增加。这是因为保护渣加入结晶器后,受下方钢水加热形成液渣层、半烧结层、烧结层以及未熔化的粉渣层。然而,随着拉速提高,液态保护渣更难进入结晶器铜壁与铸坯坯壳之间,导致熔化的液渣层越来越厚,同时上层烧结层及粉渣层的消耗速度降低。由图3可知,当拉速为从3.5增加至4.0,再增至4.5 m/min时,渣层厚度逐渐增强,一定程度上说明保护渣形成的渣膜中液态渣膜占比提高。因此,在拉速为4.5 m/min时,不需要较高的渣耗量即可满足润滑要求。相比之下,在拉速为3.5及4.0 m/min时,形成的渣膜中固态渣膜占比较高,且由于拉速较低,液态保护渣更容易进入结晶器铜壁与铸坯坯壳之间,但渣分布不均匀,从而导致粘接漏钢。

结晶器振动频率分析

结晶器振动频率增加,使得钢液上方的液态保护渣更不易进入结晶器铜壁与铸坯坯壳之间,从而导致液态保护渣的消耗量减小,润滑效果变差^[9]。阳春新钢铁有限责任公司连铸机主要工艺参数如表1

所示,其结晶器振动频率为正弦振动。振动频率、振幅、负滑脱率、负滑脱时间对铸坯表面质量有明显的影响。

表1 连铸机主要工艺参数

项目	参数
铸机流数/流	5
断面尺寸/(mm×mm)	155×155
铸机型式	全弧型,连续矫直
铸机基本半径/m	9、8
结晶器铜管长度/mm	1000
振动形式	电动缸伺服振动
振动波形	正弦振动

正弦振动的基本参数计算公式如式(2)~(3):

负滑脱率 R_N 计算公式为:

$$R_N = \frac{V_c - v_m}{V_c} = 1 - \frac{4Af}{1000V_c} \quad (2)$$

负滑脱时间 T_N 计算公式为:

$$T_N = \frac{1}{f} - \frac{1}{\pi f} \arcsin\left(\frac{V_c}{16\pi fA}\right) \quad (3)$$

式中: V_c 为拉坯速度, m/min; v_m 为结晶器振动的平均速度, m/min; A 为结晶器振动的振幅, mm; f 为结晶器振动的频率, 次/min。

负滑脱率的取值范围较宽,一般控制在-5%~-80%,而负滑脱时间控制在80~130 ms^[11]。结晶器摩擦阻力是负滑脱时间的增函数^[12],且随着负滑脱时间的增加,铸坯表面振痕深度也会增加。尤其在低拉速条件下,负滑脱时间较长,容易形成较深的振痕,对铸坯表面质量不利,严重时甚至形成沟型振痕。传统的正弦振动模型存在负滑脱率恒定的缺陷,此时将难以同时满足铸坯表面质量和保护渣润滑两个方面的要求。

小方坯粘结漏钢改进措施

合适保护渣的开发

由于阳春新钢铁有限责任公司铸机拉速基本以高拉速为主,因此原设计时保护渣的理化指标均以提升拉速为方向,而现生产主要在低拉速时产生粘结漏钢,所以对保护渣重新研究。开发在低拉速下具有较高黏度、在高拉速下又能够形成较厚液态渣

膜的自适应保护渣,是从根本上解决此问题的方法。如马少晨等^[13]提出能够在满足在不同剪切力下黏度要求的薄板坯保护渣。结果表明,当保护渣中碳化硅质量分数为0.98%时,剪切变稀形质最强、表面张力最大,有利于抑制粘结漏钢事故发生。也可对传统超高拉速保护渣进行改进,熔化速度随炭质材料含碳质量分数变化曲线如图4所示。

由于在低拉速条件下保护渣消耗量更大,所以可以适当降低 Al_2O_3 含量和提高 R_2O (如 Na_2O 、 K_2O 等)的含量,以此优化保护渣的融化速度与铺展性能,有助于保护渣形成均匀的渣膜;此外,增加炭质材料可以降低保护渣的熔化速度,从而减少保护渣的消耗量,控制合适的熔化速度有助于形成

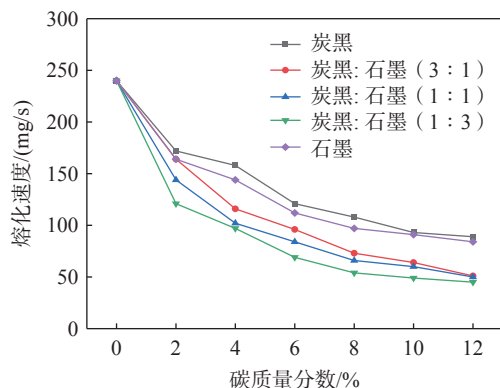


图4 不同炭质材料不同碳质量分数熔化速度的影响^[9](注:图中炭黑与石墨之比为质量比)

稳定、均匀的液态渣膜,具体优化后保护渣理化指标如下(表2)。

表2 保护渣理化指标

质量分数/%										碱度	熔点/°C	熔速/s	密度/(g/mL)	黏度/(Pa·s)
SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	F	S	P	C	H_2O					
30.53	29.11	3.21	1.15	4.53	7.42	0.11	0.02	9.2	0.35	0.95	1048	31	0.57	0.16

注:此处熔速是在1350℃下测量结果。

结晶器振动参数改进

传统结晶器振幅参数 C_2 (表3)取值为2,致使在低拉速时保护渣消耗量过大,造成保护渣液态渣膜分布不均匀。现对结晶器振幅进行调整,在低拉速时,负滑脱时间长,可提高振幅参数 C_2 ,取值2.5,以减少负滑脱时间,实现此拉速区间铸坯最佳脱模效果,同时将振动频率最高设定为200 Hz,控制了高拉速的负滑脱率保证小于-30%。而在低拉速时以提高振幅,保证低拉速负滑脱率均在-30%以下,从而结晶器振动能充分起到铸坯与铜管的脱模效果。

表3 振动参数设计

振动参数	参数范围	改进前	改进后
振幅参数 C_1/mm	1~10	4.5	4.5
振幅参数 C_2/mm	0~5	2	2.5
振频参数 $C_3/(\text{次}/\text{min})$	0~350	50	50
振频参数 $C_4/(\text{次}/\text{min})$	-30~160	50	50

频率(f)计算公式为:

$$f = (C_3 + C_4 \cdot V_c) \cdot (1 - P) \quad (4)$$

振幅(S)计算公式为:

$$S = C_1 + C_2 \cdot V_c \quad (5)$$

式中: C_1 、 C_2 为振幅 S 参数,取值分别为0~10、0~5; C_3 、 C_4 为振频参数,取值分别为0~350、-30~160; P 为偏斜率,取值为0~0.4。

现对1号铸机结晶器振动参数进行设置,对振幅参数 C_2 进行修改,引用式(4)~(5)计算,具体不同拉速条件下振动参数数据如表4,目前滑脱率在-30%到-60%之间,粘结漏钢事故已得到解决。

表4 不同拉速条件下的振动参数

正常浇注速度/(m/min)	正弦振动频率/Hz	正弦振动振幅/mm	正弦振动负滑脱时间/s	正弦振动负滑脱率/%
1.5	125	8.25	0.166	-37.50
1.6	130	8.50	0.160	-38.13
1.7	135	8.75	0.155	-38.97
1.8	140	9.00	0.150	-40.00
1.9	145	9.25	0.145	-41.18
2.0	150	9.50	0.141	-42.50
2.1	155	9.75	0.137	-43.93
2.2	160	10.00	0.133	-45.45
2.3	165	10.25	0.130	-47.07
2.4	170	10.50	0.127	-48.75

续表 4

正常浇注 速度/(m/min)	正弦振动 频率/Hz	正弦振动 振幅/mm	正弦振动 负滑脱时间/s	正弦振动 负滑脱率/%
2.5	175	10.75	0.124	-50.50
2.6	180	11.00	0.121	-52.31
2.7	185	11.25	0.118	-54.17
2.8	190	11.50	0.116	-56.07
2.9	195	11.75	0.113	-58.02
3.0	200	12.00	0.111	-60.00
3.1	200	12.25	0.110	-58.06
3.2	200	12.50	0.110	-56.25
3.3	200	12.75	0.109	-54.55
3.4	200	13.00	0.109	-52.94
3.5	200	13.25	0.109	-51.43
3.6	200	13.50	0.108	-50.00
3.7	200	13.75	0.108	-48.65
3.8	200	14.00	0.107	-47.37
3.9	200	14.25	0.107	-46.15
4.0	200	14.50	0.107	-45.00
4.1	200	14.75	0.106	-43.90
4.2	200	15.00	0.106	-42.86
4.3	200	15.25	0.106	-41.86
4.4	200	15.50	0.105	-40.91
4.5	200	15.75	0.105	-40.00

结束语

(1) 在连铸生产过程中, 使用超高拉速保护渣在低拉速工况下, 由于保护渣黏度低、流动速度过快或者形成较薄液渣层, 导致液态渣难以进入铸坯坯壳与结晶器铜壁之间, 从而导致粘结漏钢。可通过增加 R_2O 含量、降低 Al_2O_3 含量来进一步控制黏度, 同时增加炭质材料以提高界面张力和降低熔化速度, 从而维持液渣层的稳定, 减少粘结漏钢事故的发生。

(2) 优化结晶器振动参数, 通过调整结晶器振幅参数, 在低拉速时振幅参数 C_2 取 2.5, 进而提高振幅, 减少负滑脱时间, 从而实现最佳结晶器振动

脱模效果; 在高拉速时振幅参数 C_2 取 2, 参数值降低振幅及设定最高频率, 以控制保护渣的消耗量和减小铸坯表面振痕, 在整个拉速区间范围内, 建议负滑脱率控制在-30%~-60% 为佳; 经现场试验跟踪, 可明显减少粘结漏钢的发生。

参考文献

- [1] 郭春光, 彭灿锋, 李富帅. 阳春新钢铁连铸高拉速的关键技术研究及应用. 冶金设备, 2020(5): 29
- [2] 谭杜, 彭灿锋. 小方坯超高拉速保护渣研究. 冶金设备, 2021(5): 26
- [3] 谢兵. 连铸结晶器保护渣相关基础理论的研究及其应用实践 [学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2004
- [4] 王子超, 曾杰, 窦坤, 等. 薄板坯中高碳钢保护渣综合理化性能的分析. 连铸, 2023(3): 27
- [5] 袁志鹏, 朱立光, 韩毅华, 等. 碱度对高速薄板坯保护渣结晶性能的影响. 中国冶金, 2023, 33(1): 47
- [6] Kromhout J A. Mould powder development for continuous casting of steel. *Trans Indian Inst Met*, 2013, 66(5): 587
- [7] 李宪奎, 张德明. 连铸结晶器振动技术. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- [8] 王叶婷, 赵洪强, 国兴龙, 等. 连铸粘结漏钢成因机理分析. 连铸, 2011(S1): 134
- [9] Wang W L, Long X K, Zhang H H, et al. Mold simulator study of effect of mold oscillation frequency on heat transfer and lubrication of mold flux. *ISIJ Int*, 2018, 58(9): 1695
- [10] 王子超. 典型钢种连铸保护渣渣膜传热与润滑行为 [学位论文]. 长沙: 中南大学, 2023
- [11] 夏文勇, 陈洪根, 孟庆江. 对三钢厂结晶器振动参数的探讨. 江西冶金, 2001(Z1): 27
- [12] 杨志雄, 朱国军, 张年华, 等. 小方坯结晶器正弦振动参数的优化. 连铸, 2020(6): 74
- [13] 马少晨, 袁志鹏, 张彩军. 高拉速薄板坯保护渣剪切变稀行为和表面性质. 特殊钢, 2024(5): 76

作者简介: 谭杜 (1989—), 男, 湖南省湘潭市人, 本科学历, 高级工程师, 主要研究方向: 炼钢连铸。通信地址: 广东省阳春市潭水镇南山工业园阳春新钢铁有限公司; E-mail: tandu520@vip.qq.com。