



第三代 FC 结晶器控流装置的电磁参数优化

段富春¹, 王玉平¹, 朱志强²

(1 鞍钢集团本钢板材炼钢厂, 本溪 117000; 2 ABB(中国)有限公司, 北京 100015)

摘要: 本钢炼钢厂 8 号连铸机配置了第三代 FC 结晶器控流装置(以下简称 FC MOLD G3)。为了减少板坯夹杂物, 该钢厂利用结晶器液面波动标准差对结晶器的液面波动幅度进行评估, 利用钉板试验检测结晶器钢液面的流动速度, 通过工业化试验, 优化了 FC MOLD G3 的运行参数。优化后, 搅拌+制动的复合模式的参数为上线圈直流电为 68% 满载电流, 上线圈交流电为 26% 满载电流, 下线圈直流电为 48% 满载电流; 高拉速的制动模式的参数为上线圈直流电为 72% 满载电流, 上线圈交流电为 12% 满载电流, 下线圈直流电为 100% 满载电流; 宽断面的搅拌模式的参数为上线圈直流电为 20% 满载电流, 上线圈交流电为 25% 满载电流, 下线圈直流电为 0 A。结果表明, 与不投用 FC MOLD G3 相比, 结晶器液面波动下降了 30%~35%, 在搅拌+制动的复合模式下, 结晶器液位控制在 ± 3 mm 的比例超过 95%, 结晶器弯月面钢液表面流速在 0.2~0.4 m/s 的合理区间的比例达到 80%。而且表面流速标准差也出现了不同程度的下降: 标准的搅拌+制动模式时下降了 64.1%, 高拉速的制动模式时下降了 12.8%, 宽断面的搅拌模式时下降了 40%。电镜扫描的结果显示, 铸坯表层 10 μm 以上的夹杂物的数量密度下降了 26%。生产实践表明, 由夹杂物缺陷导致的冷轧卷降级率也下降了 25%~30%。

关键词: FC MOLD; 结晶器流场; 夹杂物; 表面流速; 液面波动

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00161 **中图分类号:** TF777

Optimization of Electromagnetic Parameters for the 3rd-generation FC MOLD

Duan Fuchun¹, Wang Yuping¹, Zhu Zhiqiang²

(1 Bengang Group Co., Ltd., Benxi 117000, China; 2 ABB(CN), Beijing 100015, China)

Abstract: The No. 8 caster of Benxi Steelmaking Plant is equipped with the 3rd Flow Control Mold (hereafter abbreviated as FC MOLD G3). In order to reduce inclusions in slabs, the steel plant used the standard deviation of liquid level fluctuation in the mold to evaluate the amplitude of liquid level fluctuation, and used nail board test to detect the flow velocity of liquid level. Through industrial experiments, the operating parameters of FC MOLD G3 were optimized. After optimization, the parameters of the combined mode of stirring and braking are: upper DC current is 68% full current of upper coil, upper AC current is 26% full current of upper coil, and lower DC current is 48% full current of lower coil. The parameters for the high-speed braking mode are: upper DC current is 72% full current of upper coil, upper AC current is 12% full current of upper coil, and lower DC current is 100% full current of lower coil. The parameters for the wide section stirring mode are: upper DC current is 20% full current of upper coil, upper AC current is 25% full current of upper coil, and lower DC current is 0 A. The results showed that compared with not using FC MOLD G3, the liquid level fluctuation in mold decreased by 30%-35%. In the compound mode of stirring and braking, the precision of liquid level was controlled within ± 3 mm, exceeding 95%. The reasonable range of surface flow velocity of molten steel in the mold reached 80% in the range of 0.2 m/s-0.4 m/s. Moreover, the standard deviation of surface flow velocity in the mold decreased individually: it decreased by 64.1% in the standard stirring+braking mode, and it decreased by 12.8% in the high speed braking mode, and it decreased by 40% in the wide-section stirring mode. The results of the EM scan showed a 26% decrease in the number density of inclusions above 10 μm in the surface layer of the slab. Industrial production practice shows that the degradation rate of cold rolled coil caused by inclusion defects also decreased by 25%-30%.

Key Words: FC MOLD; Mold Flow Field; Inclusions; Surface Flow Velocity; Level Fluctuations

作为钢的洁净度控制的最后环节, 合理的结晶器流场能促进夹杂物上浮, 从而提高铸坯表面及皮下质量。而连铸浸入式水口结构^[1-2]、塞棒吹氩量^[3]、结晶器的宽度、拉速及浸入式水口插入深度等

工艺参数对结晶器流场有重要影响。结晶器电磁搅拌作为优化结晶器流场的前沿技术之一, 在均匀凝固前沿的温度、促进夹杂物上浮去除、减轻偏析等方面具有显著的冶金效果, 成为近年来冶金工作

作者简介: 段富春(1973—), 男, 高级工程师;

E-mail: dfc_cy@126.com;

收稿日期: 2024-06-24

通信作者: 朱志强(1980—), 男, 硕士, 工程师;

E-mail: 2218388879@qq.com

者的研究热点^[4]。

梅山炼钢厂从ABB公司引进的FC Mold(Flow Control Mold)全幅二段电磁制动技术,可减少弯月面波高达50%以上,使弯月面波高处在适中范围内,使板坯缺陷发生的频度降低,从而有效改善铸坯质量^[5]。朱苗勇^[6]对新一代连铸技术发展的思考中认为,电磁技术已成为高拉速板坯连铸机结晶器控流的重要手段。罗衍昭等^[7]开展了结晶器电磁制动参数优化的高速连铸工艺技术研究,通过开展高拉速下电磁制动对流场的模拟和实际测量研究,制定了合理的电磁制动参数,有效减轻了卷渣及夹杂物上浮困难的问题。崔贺楠等^[8]通过数值模型求解了高拉速条件下薄板坯连铸结晶器内的多相流动行为,并研究了不同水口结构、电磁制动结构以及磁通密度对结晶器内流场分布的影响。王皓等^[9]针对MCCR薄板坯连铸机高拉速生产浸入式水口插入深度变浅时发生整炉卷渣的问题,采用数值模拟方法进行了研究,结果表明,高拉速条件下,采用电磁制动可有效降低弯月面表面流速和钢液面波高,弯月面表面流速可降低至0.3 m/s以内,液面波高可控制在5 mm以内。李学凯等^[10]采用数值模拟手段对不同电磁条件下的结晶器流场进行多物理场的耦合计算,重点揭示了在6 m/min的高拉速条件下,电磁制动参数对薄板坯连铸结晶器内流场特征的影响规律。闫晟昌等^[11]研究了结晶器电磁搅拌M-EMS(Mold-Electromagnetic Stirring)技术在特厚板坯连铸结晶器上的应用效果,结果表明,与无M-EMS时相比,有M-EMS时铸坯表层各尺寸夹杂物质量密度和数量密度均明显减小。刘启龙等^[12]在对IF钢结晶器电磁搅拌工艺优化后,铸坯夹杂与气泡缺陷封闭率均值下降4%,取得了显著的效果。目前,国内成功实现板坯高拉速连铸的企业中,FC Mold应用居多,MM-EMS(Multi-Mode Electromagnetic Stirring)对高拉速连铸的冶金效果和必要性可能因钢种和工况而异,目前报道仍较少^[13]。

本钢炼钢厂于2020年10月份新建投产的8号连铸机,为了稳定生产中高端冷轧产品用坯,配备了ABB公司最新一代控流结晶器设备FC MOLD G3,它能更加灵活地调节整个结晶器内的钢液流动。本钢对这一创新性技术进行了现场应用研究,通过调整FC MOLD G3的电磁参数实现了结晶器流场的优化。

1 控流结晶器设备功能及工艺原理

本钢8号连铸机的铸坯规格为(1 000 ~ 1 900) mm×(230/250) mm,最高拉速为1.8 m/min,其配备的控流结晶器设备FC MOLD G3在国内属于首套应用。

1.1 FC MOLD G3 结构示意图

FC Mold G3布置了上下两个位置的线圈,形成两段磁场。上线圈安装在弯月面附近,分布于结晶器的两个宽边。上线圈前部的结晶器背板内嵌入一定数量的铁芯,上线圈通交流电和直流电,能同时产生行波磁场和静态磁场。下线圈布置在浸入式水口下方,通直流电产生静态磁场。其主要结构如图1所示。

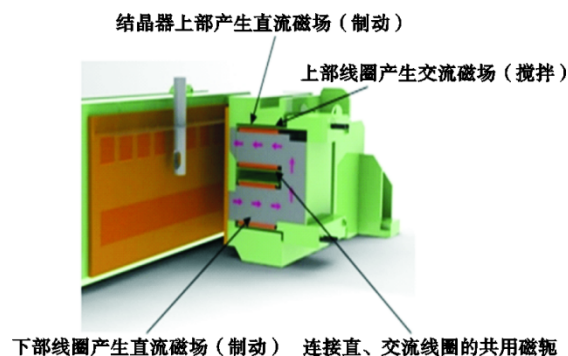


图1 FC MOLD G3结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FC MOLD G3

1.2 FC MOLD G3 工艺原理

根据连铸机拉速和结晶器内钢液湍流程度,FC Mold G3主要有3种工作模式,分别为制动模式、复合模式、搅拌模式。上线圈通交流电形成行波磁场,形成对钢液的搅拌作用。上线圈还能同时通直流电产生静态磁场,而下线圈只通直流电产生静态磁场。钢液在流经静态磁场时,其自身就会因电磁感应产生制动作用。在连铸生产冷轧用坯时,FC MOLD G3主要采用搅拌+制动的复合模式。在该模式下,上线圈既能通过搅拌实现对凝固前沿的冲刷、均匀弯月面的温度,同时,还能通过制动作用,抑制局部过大的结晶器液面波动。而钢液主流股在流经下线圈形成的静态磁场时,该股自身的制动作用会降低钢液冲击深度,从而改善夹杂物的上浮条件。其工艺原理如图2所示。

2 FC MOLD G3 现场应用的初期表现

在FC MOLD G3的投用初期,研究人员发现,在

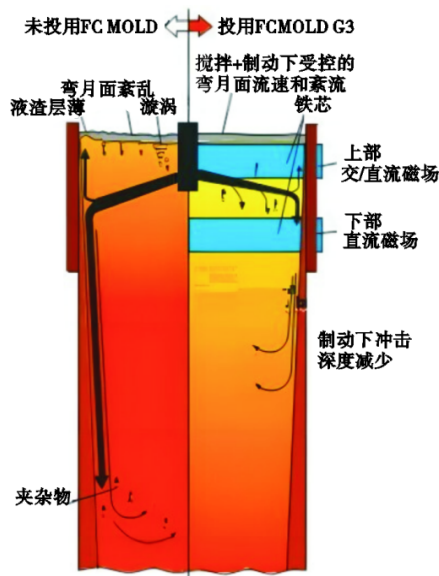


图2 FC MOLD G3工艺原理图

Fig. 2 Process schematic diagram of FC MOLD G3

大部分工况下,结晶器液面波动降低了,但与之相应的铸坯因夹杂物超标导致的降级率,并未如预期的那样,出现明显的下降。通过对结晶器液面波动、钉板测量等结果的分析,确定了结晶器流场存在的问题,优化了FC MOLD G3电磁参数,即对控制磁场强度的上下线圈的交直流电的大小进行重新分配,获得了合理的结晶器流场。

针对投用FC MOLD G3后可能存在的流场异常,通过钉板试验测量了结晶器弯月面的流速,确认FC MOLD G3对结晶器弯月面流速的影响。钉板的制作如图3所示,将钉板垂直插入钢液约60~120 mm,保持2~4 s^[14],然后按经验公式^[15]进行计算表面流速,具体如式(1),如图4、图5所示^[16]。

$$V_{surface} = 0.624 \cdot (\phi_{lump})^{-0.696} \cdot (h_{lump})^{0.567} \quad (1)$$

式中, $V_{surface}$ 为测量点的表面流速, m/s; ϕ_{lump} 为凝钢块的直径, mm; h_{lump} 为凝钢块高度差, mm。

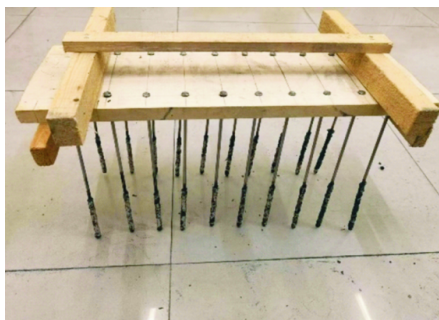


图3 钉板制作示意图

Fig. 3 Figure 3 Schematic diagram of the nail plate fabrication

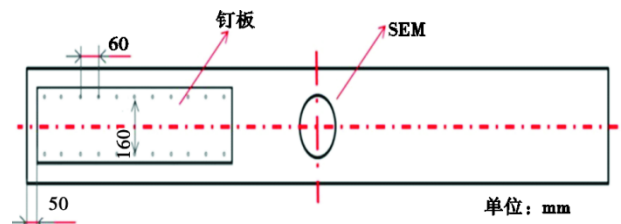


图4 结晶器表面流速测量点分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of distribution of flow velocity measurement points on the surface of mold

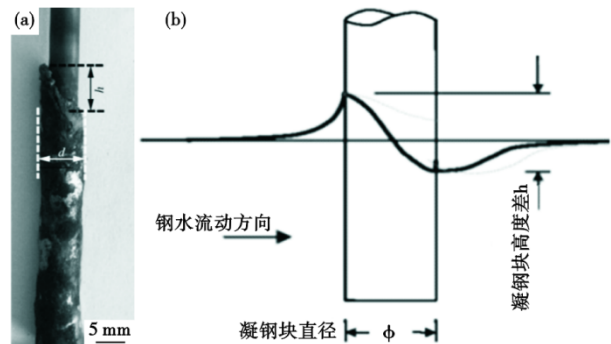


图5 凝钢块测量项目图示:(a)凝钢块实物图,(b)凝钢块示意图

Fig. 5 Diagram of measurement items of lump steel : (a) physical image of lump steel, (b) schematic diagram of lump steel

生产DQ1 J钢1 369 mm×230 mm铸坯对比投用FC MOLD G3(参数未优化)前后结晶器内钢液表面流速的变化,结果如图6所示。其中,对比测试的连铸工艺参数保持相同:拉速为1.3 m/min,浸入式水口插入深度为186 mm。FC MOLD G3的投用参数为:上线圈直流电为45%满电流,上线圈交流电为50%满电流,下线圈直流电为95%满电流。

从图6可以看出,在该工况下,投用未优化参数的FC MOLD G3时,结晶器表面流速反而提高了,平均表面流速从0.38 m/s提高到0.52 m/s,超过了理想

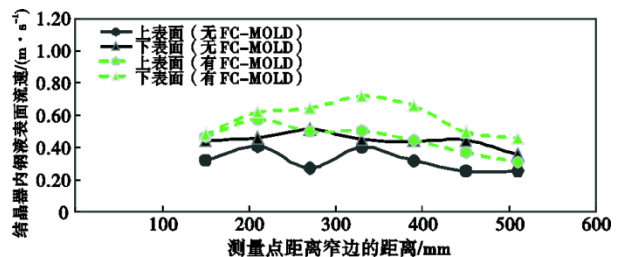


图6 DQ1 J钢1 369 mm×230 mm铸坯投用未优化的FC MOLD G3对结晶器表面流速的影响

Fig. 6 Influence of non-optimized FC MOLD G3 on the surface flow rate of DQ1 J steel 1 369 mm×230 mm casting billet

的表面流速范围(0.2 ~ 0.4 m/s)^[16],研究表明^[17],电磁搅拌在提高内生夹杂物去除率的同时,还会显著加剧渣金界面波动幅度,造成卷渣。因此,分析认为 FC MOLD G3 的上线圈交流电的电流过大而加快了弯月面流动速度,与此同时直流电产生的静态磁场偏小,导致抑制结晶器表面流速的能力不足,最终导致夹杂物控制效果未达预期。

3 优化 FC MOLD G3 电磁参数后的流场特征

针对结晶器流场存在的问题,研究人员采用钉板试验进行了测量,并根据测量结果优化了 FC MOLD G3 的电磁参数,即上下线圈交流电、直流电的电流大小。

结合 FC MOLD G3 的冶金功能,将 FC MOLD G3 的参数优化划分为 3 个工作模式:(1)中低拉速(1.0 m/min ≤ v_c < 1.5 m/min)下,以控制保护渣的卷入、提高内生夹杂物上浮率为目的的标准复合模式;(2)高拉速(v_c ≥ 1.5 m/min)状态下,以抑制结晶器液面波动、减少保护渣卷入为目的的制动模式;(3)宽断面(铸坯宽度 ≥ 1 700 mm)下,以减少结晶器角部冷钢、改善保护渣的熔化效果为主要目的的搅拌模式。优化试验的钢种为 DC04、DC03 等超低碳钢,投用 FC MOLD G3 前后,保持拉速、浸入式水口插入深度等连铸工艺条件不变。参数优化前、优化后,测得的结晶器液面流速如图 7~9 所示。

图 7 为生产 DC04 钢 1 268 mm × 230 mm 铸坯用标准复合模式下的对比测试结果。对比测试的连铸工艺参数保持相同:拉速为 1.3 m/min,浸入式水口插入深度为 125 mm。FC MOLD G3 优化后的投用参数为:上线圈直流电为 68% 满电流,上线圈交流电为 26% 满电流,下线圈直流电为 48% 满电流。

图 8 为生产 DC03 钢 1 470 mm × 230 mm 铸坯投用 FC MOLD G3 制动模式对结晶器表面流速的影响

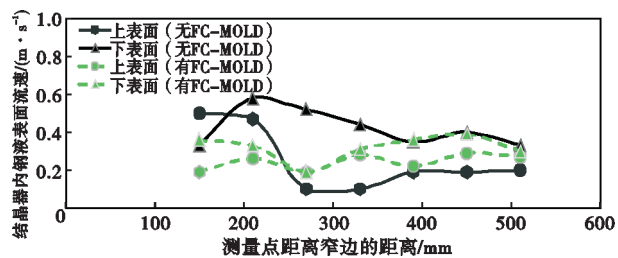


图 7 DC04 钢 1 268 mm × 230 mm 铸坯投用 FC MOLD G3 标准复合模式对结晶器表面流速的影响

Fig. 7 Influence of FC MOLD G3 standard composite mode on the surface flow rate of DC04 steel 1 268 mm × 230 mm casting billet

的测试结果。对比测试的连铸工艺参数保持相同:拉速为 1.5 m/min,浸入式水口插入深度为 186 mm。FC MOLD G3 优化后的投用参数为:上线圈直流电为 72% 满电流,上线圈交流电为 12% 满电流,下线圈直流电为 100% 满电流。

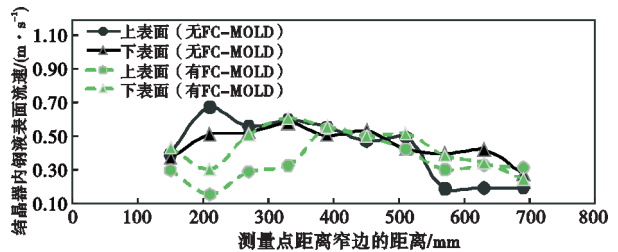


图 8 DC03 钢 1 470 mm × 230 mm 铸坯投用 FC MOLD G3 制动模式对结晶器表面流速的影响

Fig. 8 The influence of FC MOLD G3 brake mode on the surface flow rate of DC03 steel 1 470 mm × 230 mm casting casting billet

图 9 为生产 DC04 钢 1 886 mm × 230 mm 铸坯在搅拌模式下的对比测试结果。对比测试的连铸工艺参数保持相同:拉速为 1.2 m/min,浸入式水口插入深度为 185 mm。FC MOLD G3 优化后的投用参数为:上线圈直流电为 20% 满电流,上线圈交流电为 25% 满电流,下线圈直流电为 0。

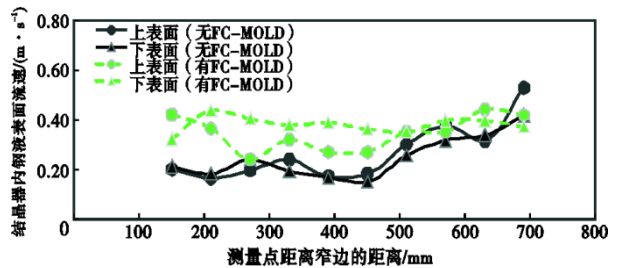


图 9 DC04 钢 1 886 mm × 230 mm 铸坯 投用 FC MOLD G3 搅拌模式对结晶器液面流速的影响

Fig. 9 Effect of mixing mode of FC MOLD G3 on the liquid surface velocity of DC04 steel 1 886 mm × 230 mm casting billet

3.1 标准复合模式的优化效果

在该模式下,上线圈同时通交流电和直流电,下线圈通直流电。相比于原始设定的参数,其优化原理是减少上线圈交流电以降低对弯月面的搅拌,同时,提高上线圈直流电增强静态磁场的制动作用。这样既能抑制局部过快的流动,又能改善局部位置过缓的流动。其具体参数优化结果是上线圈的交流电由 50% 的满载电流下降至 26%,上线圈的直流电由 45% 的满载电流上升至 68% 的满载电流,

下线圈的直流电由 95% 的满载下降至 48% 的满载。下线圈直流电的降低主要是由于浸入式水口插入深度变深了, 下线圈的制动作用过大则会产生冷钢。

如图 7 所示, 在较低的拉速 (1.3 m/min)、较小通钢量的连铸工艺下 (2.65 t/min), 在启动 FC MOLD G3 之前, 结晶器内各位置的表面流速很不均匀 (图 7 中的实线所示), 在靠近结晶器窄边约 210 mm 的位置表面流速最大, 结晶器内的 1/3 表面区域流速超过了 0.4 m/s, 个别位置的流速达到了 0.58 m/s, 存在较大的结晶器保护渣卷入风险。与此同时, 结晶器内也存在流动极不活跃的地方, 几乎测量不出流速。

在启动 FC MOLD G3 之后, 结晶器内的 80% 表面区域流速控制在了 0.2 ~ 0.4 m/s 的较佳区间 (图 7 中的虚线所示), 最低流速也达到了 0.19 m/s。平均流速从启动 FC MOLD 之前的 0.32 m/s 降低到了 0.28 m/s, 最大流速从 0.58 m/s 降低到了 0.36 m/s, 各个位置流速标准差从 0.184 m/s 降低到了 0.066 m/s, 降幅达 64.1%。可见启动 FC MOLD G3 能很好地改善表面流速的不均匀性, 除了能抑制较高的表面流速外, 也能改善局部不活跃的情况。

3.2 高拉速下制动模式的优化效果

在高拉速下, 结晶器内钢液流动剧烈, 钢液无需增加额外搅拌, 但为了防止可能存在的局部流动落差过大, 上线圈仅给少量的交流电, 设为满载电流的 12%。上下线圈直流电尽量大, 保证足够强度的静态磁场, 起制动作用。此时, 上线圈直流电设为 72% 满载电流, 下线圈直流电则按 100% 满载电流设定。

在较高的拉速 (1.5 m/min)、较大通钢量 (3.55 t/min) 的条件下, 如图 8 所示, 启动 FC MOLD G3 之前结晶器内钢液的流动速度快, 约有 70% 的表面区域流速超过了 0.40 m/s, 最大流速达到 0.68 m/s, 同时也有 15% 的表面区域流速低于 0.20 m/s (图 8 中实线所示)。而启动 FC MOLD G3 后, 流速超过 0.40 m/s 的表面区域下降到了 45%, 最大流速下降到了 0.56 m/s, 同时流速低于 0.2 m/s 的表面区域下降到了 5% (图 8 中虚线所示)。整体平均流速从 0.44 m/s 下降到 0.39 m/s, 流速的标准差从 0.141 m/s 下降到 0.123 m/s, 降低 12.8%。

3.3 宽断面下搅拌模式的优化效果

在宽断面下, 主要问题是结晶器两个窄边出现

的冷钢和保护渣化渣不良。所以, 在宽断面下, 应适当增加结晶器弯月面的搅拌。因此, 下线圈的静态磁场停用, 直流电设为 0 A。上线圈以适当增加搅拌为主, 同时施加静态磁场以抑制过大的波动。因此, 上线圈的交流电设为 25% 的满载电流, 上线圈的直流电略低, 设为 20% 的满载电流。

如图 9 所示, 铸坯断面为 1 886 mm×230 mm, 在没有投用 FC MOLD G3 的情况下, 结晶器内表面流速分布特征为: 靠近窄边两侧的流速低, 而靠近浸入式水口附近的流速又较高, 存在明显的不均衡性。实际测得此时表面平均流速为 0.26 m/s, 标准差为 0.10 m/s, 极差为 0.38 m/s。而投用 FC MOLD G3 后, 测得此时表面平均流速为 0.36 m/s, 标准差为 0.06 m/s, 极差为 0.20 m/s。流速标准差下降了 40%。可见, 结晶器内表面流速在整体提高的同时, 其浸入式水口附近和结晶器窄边的流速差异也大幅下降, 流动均匀性得到明显改善。

从上述 FC MOLD G3 的三种工作模式下, 钉板测得的结晶器表面流速的结果可以看出, 在投用 FC MOLD G3 之前, 结晶器内钢液的表面流速存在局部过高、整体流动也不均匀的问题, 而在投用优化参数的 FC MOLD G3 后, 由于其制动和搅拌的共同作用, 更多位置的表面流速处于 0.2 ~ 0.4 m/s 的理想区间, 此时的 FC MOLD G3 既能抑制结晶器内过高的流速, 又能改善局部过低的表面流速。

4 优化 FC MOLD G3 参数后的冶金效果

4.1 减小结晶器液面波动

在拉速、浸入水口插入深度等其他浇铸工艺参数保持不变的情况下, 仅启停 FC MOLD G3, 通过连铸 PDA 记录的数据, 统计分析 FC MOLD G3 对结晶器液面波动产生的影响, 结果见表 1。

从表 1 可以看出, 投用 FC MOLD G3 后, 结晶器液面波动标准差下降约 30% ~ 35%, 最大标准差未超过 0.8 mm, 这对于结晶器液面卷渣的控制是非常重要的。但需要指出的是, 在表 1 中, 在结晶器宽度为 1 847 mm 时, 结晶器的液面波动反而略有增加, 其主要原因应该是, 这个断面下, FC MOLD G3 为搅拌模式。结合图 9 的结晶器液面流速的检测, 宽断面下, 在不投用 FC MOLD G3 时, 结晶器液面流动是不均匀的, 结晶器内大部分位置的流速偏低。对于 FC MOLD G3, 在宽断面下的交流电是大于直流电的, 其目的就是要提高结晶器液面的流动, 避免结晶器内的局部冷钢和保护渣化渣不良。一般来说,

表 1 启动 FC MOLD G3 前后结晶器液面波动的标准差的变化

Table 1 Changes in standard deviation of liquid level fluctuations in the mold before and after starting FC MOLD G3

拉速/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	结晶器宽度/mm	水口插入深度/mm	结晶器液面波动标准差/mm	
			无 FC MOLD G3	有 FC MOLD G3
1.20	1 578	215	0.851	0.687
1.20	1 483	184	1.485	0.575
1.20	1 483	199	0.765	0.428
1.20	1 847	195	0.721	0.736
1.20	1 548	170	0.881	0.571
1.15	1 548	170	0.693	0.476
	平均值		0.899	0.579

结晶器的表面流速提高了,必然会带来液面波动的加剧。但由于 FC MOLD G3 的搅拌+制动的复合作用,尽管表面流速得到明显提高,但结晶器液面波动只有些许的增加,这种波动幅度对于卷渣的控制来讲仍是接受的。

在结晶器宽度为 1 483 mm,未投用 FC MOLD G3 时,浸入式水口插入深度为 199 mm 时的结晶器液面波动明显比插入深度为 184 mm 的液面波动小得多。试验过程除了插入深度的变化影响,未发现人为操作因素影响,其原因可能是偶然发生的偏流、塞棒的异常抖动等。但无论如何,投用 FC MOLD G3 后,结晶器的液面波动都明显下降了。

从现场观察的情况看,投用 FC MOLD G3 后,在搅拌+制动的复合模式下,结晶器内的液面波动明显下降了,如图 10 所示(红色的线即为现场涡流检测采集的结晶器液位)。

众多研究显示,结晶器的液面波动控制在 ± 3 mm 能很好地抑制结晶器保护渣的卷入。在标准差下

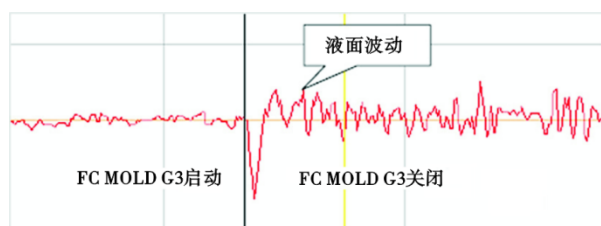


图 10 FC MOLD G3 对结晶器液面波动的影响

Fig. 10 Effect of FC MOLD G3 on liquid level fluctuation in mold

降一半的情况下,其液面波动超过 ± 3 mm 的概率必然将大幅下降。统计数据表明,在不考虑水口结瘤、铸坯鼓肚现象的情况下,稳态浇铸下投用 FC MOLD G3 时,液面波动控制在 ± 3 mm 内的时间大于 95%。

4.2 FC MOLD G3 对冷轧材夹杂缺陷率的改进

4.2.1 冷轧卷夹杂物的主要类型

在本钢炼钢厂 8 号连铸机生产的超低碳钢冷轧材中出现的夹杂物类型,主要为结晶器保护渣的卷入以及内生的氧化铝夹杂。在现场检测分析中,以钢种 DC04 为例,根据夹杂物的形貌和成分,将卷入的结晶器保护渣成分为主的夹杂物命名为夹杂物 1,如图 11 所示、夹杂物各元素的质量分数见表 2。

同样地,以钢种 DC04 为例,以氧化铝成分为主的夹杂物命名为夹杂物 2,如图 12 所示、夹杂物各元素的质量分数见表 3。

统计分析表明,夹杂物 1 和 2 的分配比大约为 8:2,这两种类型的夹杂物占据了各类夹杂物总数的 85% 以上。

4.2.2 FC MOLD G3 对超低碳钢铸坯夹杂物数密度的降低

为了分析 FC MOLD G3 的投用对铸坯夹杂物的

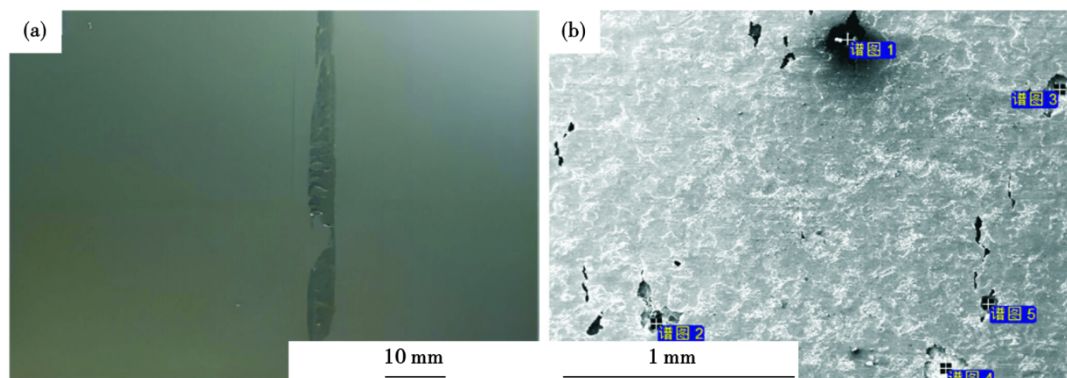


图 11 DC04 钢中夹杂物 1 的形貌:(a)金相形貌,(b)扫描电镜图

Fig. 11 Morphology of inclusion 1 in DC 04 steel: (a) metallographic morphology, (b) SEM images

表 2 DC04 钢中夹杂物 1 的各元素的成分(质量分数)
Table 2 Main chemical components of inclusion 1 in DC04 steel

谱图	O	F	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	总计
谱图 1	36.52	8.09	1.39	1.57	1.88	16.07	-	31.50	0.59	0.35	2.04	100.00
谱图 2	41.71	/	2.38	3.01	3.28	19.87	0.21	22.93	1.37	0.61	4.63	100.00
谱图 3	28.50	10.67	0.79	1.10	1.08	12.47	-	23.46	/	0.35	21.59	100.00
谱图 4	33.05	7.17	2.34	2.16	3.51	13.32	-	14.26	0.49	0.32	23.37	100.00
谱图 5	36.37	9.26	1.49	1.91	1.64	15.28	-	19.89	0.52	0.35	13.29	100.00
最大值	41.71	10.67	2.38	3.01	3.51	19.87	0.21	31.50	1.37	0.61	23.37	-
最小值	28.50	7.17	0.79	1.10	1.08	12.47	0.21	14.26	0.49	0.32	2.04	-

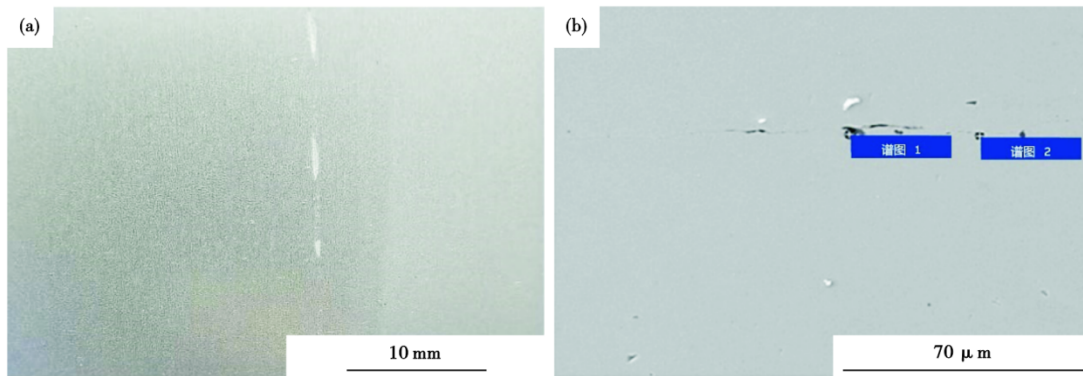


图 12 DC04 钢中夹杂物 2 的形貌:(a)金相形貌,(b)扫描电镜图
Fig. 12 Morphology of inclusion 2 in DC04 steel : (a) metallographic morphology, (b) SEM images

表 3 DC04 钢中夹杂物 2 的各元素的成分(质量分数)
Table 3 The chemical composition of inclusion 2 in DC04 steel

谱图	O	Al	Ti	Fe	总计
谱图 1	53.55	42.00	0.20	4.24	100.00
谱图 2	38.72	33.87	0.18	27.24	100.00
最大值	53.55	42.00	0.20	27.24	-
最小值	38.72	33.87	0.18	4.24	-

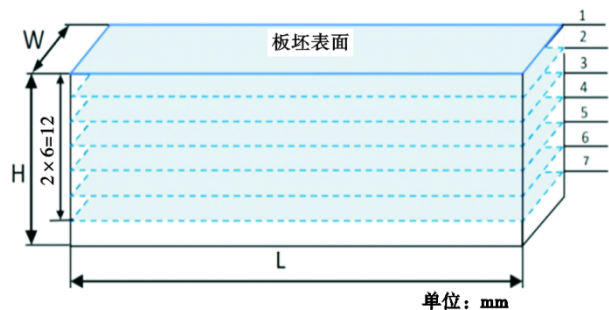


图 13 夹杂物试样检测示意图
Fig. 13 Schematic diagram of inclusion sample detection

影响,在同一炉钢水中,稳态浇铸时,保持拉速、浸入式水口插入深度、塞棒吹氩量等主要工艺参数不变,分别启动和停止 FC MOLD G3,在铸坯宽度的 1/4 处,铸坯的内弧、外弧侧取铸坯样,取样大小约为长 70 mm、宽 50 mm、高 25 mm。对铸坯厚度方向进行夹杂物数量密度分析,每个试样铣磨 6 次,每次 2 mm,每铣磨一次,做一次电镜扫描,从铸坯表面到铣磨 6 次共 12 mm,每个试样检测 7 个视场,如图 13 所示。通过 SEM(扫描电镜)能得到每个面的夹杂物成分、尺寸、数量和分布等综合信息。

表 4 为投用及未投用 FC MOLD G3 时,统计尺寸在 10 μm 以上的夹杂物在铸坯厚度方向上的数量密度分布规律。测试钢种为 DC04,铸坯断面为 1 500 mm×230 mm,拉速为 1.3 m/min,FC MOLD G3

为搅拌+制动的复合模式。

从表 4 的统计分析可以看出,对于尺寸在 10 μm 以上的夹杂物,投用 FC MOLD G3 后,其数量密度从 0.46 个/mm² 下降至 0.34 个/mm²,下降幅度达 26%。

4. 2. 3 FC MOLD G3 参数优化的效果对比

2022 年 8 月以来,FC MOLD G3 的工艺参数经过持续优化后,本钢炼钢厂 8 号连铸机生产超低碳钢冷轧卷的夹杂缺陷降级率下降明显,降幅约 25% ~ 30%。

5 结论

(1) 通过优化 FC MOLD G3 在制动、搅拌及制动+搅拌的复合模式下的上下线圈的电流参数,整

表4 投用FC MOLD G3前后 $>10\ \mu\text{m}$ 夹杂物总密度比较
Table 4 Before and after using FC MOLD G3, the comparison of the total density of inclusions (size $>10\ \mu\text{m}$)

位置	距离铸坯表面的距离/mm	无FC MOLD G3		投FC MOLD G3	
		检测面积/ mm^2	$>10\ \mu\text{m}$ 夹杂物总密度/ $(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$	检测面积/ mm^2	$>10\ \mu\text{m}$ 夹杂物总密度/ $(\text{个}\cdot\text{mm}^{-2})$
内弧侧	0	137.70	0.34	112.10	0.44
	2	108.00	0.27	78.76	0.34
	4	59.75	0.42	122.28	0.38
	6	136.50	0.75	108.10	0.17
	8	95.28	0.57	146.00	0.23
	10	129.80	0.28	107.00	0.34
	12	68.09	0.50	122.70	0.25
外弧侧	0	87.94	0.50	93.79	0.29
	2	52.41	0.44	103.50	0.13
	4	111.20	0.29	108.80	0.30
	6	123.67	0.91	65.71	0.58
	8	109.70	0.49	119.90	0.40
	10	110.40	0.23	132.20	0.56
	12	96.240	0.47	99.85	0.29
平均值		0.461 4		0.335 7	

个结晶器液面的钢液流速变得更加一致、稳定,既能抑制局部位置的过高流速,又能改善局部位置的过缓流动。

(2)在FC MOLD G3优化后,搅拌+制动的复合

模式的参数为上线圈直流电为68%满载电流,上线圈交流电为26%满载电流,下线圈直流电为48%满载电流;高拉速的制动模式的参数为上线圈直流电为72%满载电流,上线圈交流电为12%满载电流,下线圈直流电为100%满载电流;宽断面的搅拌模式的参数为上线圈直流电为20%满载电流,上线圈交流电为25%满载电流,下线圈直流电为0 A。

(3)投用优化参数后的FC MOLD G3,结晶器表面流速更能接近0.2~0.4 m/s的理想范围。不同的流场控制模式下,结晶器内各个位置的流速标准差也不同程度的下降了。标准的搅拌+制动模式下降了64.1%,高拉速的制动模式下降了12.8%,宽断面的搅拌模式下降了40%。

(4)投用优化参数后的FC MOLD G3,结晶器液面波动幅度约降低30%~35%,在稳态浇铸的条件下,采用标准的搅拌+制动的复合模式,结晶器液位精度控制在 $\pm 3\ \text{mm}$ 的比例超过95%。

(5)投用优化参数后的FC MOLD G3,本钢8号连铸机生产的冷轧汽车钢铸坯内 $10\ \mu\text{m}$ 以上的夹杂物的数量密度下降了26%;工业化的生产实践表明,由夹杂缺陷导致的冷轧卷降级率下降约25%~30%。

参考文献

- [1] 马超,何文远,乔焕山,等. 水口倾角大范围变化对宽板坯连铸结晶器流场的影响[J]. 炼钢, 2021, 37(4): 16-24.
- [2] 陈希青,雷琳琳,宋 异,等. 板坯连铸浸入式水口控流的物理和数值模拟[J]. 中国冶金, 2023, 33(12): 42-55.
- [3] 刘启龙,仇圣桃,占树华,等. 气体流量及水口底部形状对板坯结晶器内流场影响的水模型试验[J]. 特殊钢, 2018, 39(2): 1-5.
- [4] 任忠鸣,雷作胜,李传军,等. 电磁冶金技术研究新进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 583-600.
- [5] Song J X, Yang H L, Leng X G, et al. Effects of FC Mold on slab and final product qualities at low throughputs[C]. Pittsburgh Pa: AISTech - Iron and steel technology conference proceedings, 2010: 63-70.
- [6] 朱苗勇. 新一代高效连铸技术发展思考[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 21-36.
- [7] 罗衍昭,何文远,王少军,等. 2.05 m/min高拉速低碳钢FC控流结晶器的应用[J]. 连铸, 2022, 47(4): 72-77.
- [8] 崔贺楠,张江山,季晨曦,等. EMBr对超高速薄板坯连铸结晶器流动行为影响的大涡模拟[J]. 连铸, 2023, 48(3): 33-41.
- [9] 王 皓,王国连,马 硕,等. MCCR产线低碳钢高拉速技术研究与应用[J]. 中国冶金, 2022, 32(12): 88-97.
- [10] 李学凯,张燕超,张彩军,等. 电磁制动对薄板坯结晶器内冶金行为的影响[J]. 钢铁, 2023, 58(6): 72-81.
- [11] 闫晟昌,甄新刚,张炯明,等. 结晶器电磁搅拌对475 mm特厚板坯表层大颗粒夹杂物控制研究[J]. 江西冶金, 2024, 44(2): 116-121.
- [12] 刘启龙,邓 勇,李华刚,等. IF钢板坯结晶器电磁搅拌数值模拟与工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 83-88.
- [13] 兰 鹏,艾宏洲,徐国栋,等. 板坯高拉速连铸结晶器冶金技术研究进展[J/OL]. 钢铁. (2024-04-23) [2024-05-07]. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20240225>.
- [14] Cho S M, Kim S H, Thomas B G. Transient fluid flow during steady continuous casting of steel slabs: Part I. measurements and modeling of two-phase flow[J]. ISIJ International, 2014, 54(4): 845-854.
- [15] Liu R, Thomas B G, Sengupta J, et al. Measurements of molten steel surface velocity and effect of stopper-rod movement on transient multiphase fluid flow in continuous casting[J]. ISIJ International, 2014, 54(10): 2314-2323.
- [16] 邓小旋,季晨曦,安泽秋,等. 宽度对板坯连铸结晶器液面特征影响[J]. 钢铁, 2017, 52(8): 48-54.
- [17] 李向龙,孙 群,屈天鹏,等. 电磁搅拌对液态夹杂物聚并及去除行为的影响规律[J]. 连铸, 2023(1):10-17.