



IF钢板坯结晶器电磁搅拌数值模拟与工艺实践

刘启龙¹, 邓勇¹, 李华刚², 韦如军², 曹成虎¹, 张敏¹

(1 马鞍山钢铁股份有限公司第四钢轧总厂, 马鞍山 243011; 2 上海宝信软件股份有限公司智能装备事业部, 上海 201099)

摘要:针对高拉速IF钢铸坯夹杂与气泡缺陷封闭率偏高的问题,通过数值模拟研究了水口浸入深度和拉速对结晶器流场的影响,结果表明,在结晶器电磁搅拌电流为600 A、频率3.5 Hz工况下,随着拉速增高,自由液面活跃指数呈现先增大后减小再增大的趋势,在拉速1.05 m/min附近,最高达0.67,在1.6 m/min附近,最低达0.35,流场均匀性指数略有降低,最佳的自由液面活跃指数为 0.5 ± 0.05 ;当拉速低于1.0 m/min时,随着水口浸入深度的增加,自由液面活跃指数逐步增大至0.40,当拉速大于1.0 m/min时,随着水口浸入深度增加,自由液面活跃指数逐步降低,当拉速大于1.4 m/min时,随着水口浸入深度的增加,自由液面活跃指数大幅下降至0.37;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。

关键词:IF钢;高拉速;结晶器电磁搅拌;数值模拟;结晶器流场;夹杂;气泡

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00119 **中图分类号:**TF777

Numerical Simulation and Process Practice of Mold Electromagnetic Stirring for IF Steel Slab

Liu Qilong¹, Deng Yong¹, Li Huagang², Wei Rujun², Cao Chenghu¹, Zhang Min¹

(1 No.4 Steelmaking and Rolling General Plant of Ma'anshan Iron & Steel Co.,Ltd., Ma'anshan 243011, China; 2 Intelligent Equipment Business Division of Shanghai BAOSIGHT Soft Co.,Ltd., Shanghai 201099, China)

Abstract: In order to solve the problem of high sealing rate of inclusions and bubble defects in IF steel with high drawing speed, the effects of immersion depth and drawing speed on the flow field of mold were studied by numerical simulation. The results show that under condition of the electromagnetic stirring current intensity 600 A and frequency 3.5 Hz, with the casting speed increases, the active index of free liquid level shows a trend of first increasing, then decreasing and then increasing. At the casting speed about 1.05 m/min, max value is up to 0.67, at the casting speed about 1.6 m/min, the minimum value is 0.35, the flow-field uniformity index is slightly reduced, the best free liquid level active index is 0.5 ± 0.05 ; When the casting speed is below 1.0 m/min, with the SEN immersion depth increases, the free liquid surface active index gradually increases to 0.40; When the casting speed is greater than 1.0 m/min, with the SEN immersion depth increases, The free liquid surface active index index gradually decreases; When the casting speed is greater than 1.4 m/min, with the SEN immersion depth increases, the free liquid level active index drops sharply to 0.37; After the optimization of mold electromagnetic stirring process of IF steel, the average sealing rate of inclusions and bubble defects in the casting billet decrease by 4%, and remarkable results are obtained.

Key Words: Interstitial Free Steel; High Casting Speed; Mold Electromagnetic Stirring; Numerical Simulation; Mold Flow Field; Inclusion; Bubble

板坯连铸生产中,结晶器内钢液的流场直接影响初生凝固坯壳的均匀生长,进而影响初生坯壳对夹杂、夹杂、气泡的捕获程度,其程度决定了高端产品铸坯实物质量水平,运用数模与水模方法,冶金工作者对结晶器流场进行了大量的研究,研究表明结晶器流场受水口型式、浸入深度、拉速、吹入氩气、电磁力等多种因素影响^[1-3],近年来随着对汽车轻量化和高效生产的加速推进,对诸如汽车面板等超低碳钢提出了更高的质量要求,结晶器电磁搅拌

作为优化结晶器流场的重要技术之一,在均匀凝固前沿,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^[4],在方坯与圆坯铸机上已成为必备工艺装备之一,李永超等^[5]研究结果表明:综合使用电磁搅拌,生产S55C中碳轴承钢,钢材内部质量满足超声A级,并且经水浸超声探伤无宏观缺陷及大型夹杂物,周开明等^[6]研究结果表明:采用全保护浇注、精确冷却工艺、三段式电磁搅拌、缓冷工艺等技术措施,S355NL大圆坯铸坯中心疏松 ≤ 1.5 级,中

心裂纹 ≤ 1.5 级、缩孔 ≤ 0.5 级,全截面碳含量极差 $\leq 0.07\%$;近年来水平旋转型结晶器电磁搅拌技术在板坯上应用比例逐步增加,张志峰^[7]等研究结果表明:复合电磁场能够有效地抑制结晶器自由液面处金属液波动变形,并改善铸坯的表面质量,卢海彪等^[8]研究结果表明,综合考虑卷渣指数和冻结指数可知,较优的搅拌电流为 600 A,李向龙等^[9]研究结果表明:电磁搅拌加剧了钢液在结晶器中的湍流强度,并促使更多夹杂物聚并上浮至渣金界面。并且,由于水平方向流速较大,钢液射流被限制在了电磁搅拌区域,显著降低了钢液射流深度,有利于夹杂物上浮。此外,由于电磁力的存在加剧了渣金界面波动,容易造成卷渣,张静等^[10]研究结果表明,浸入式水口深度增大时,能改善因拉速过大或电磁搅拌强度过大导致的卷渣现象,减轻水口附近的结晶器液面波动;虽然电磁技术早已应用在板坯连铸机,但水平旋转型结晶器电磁搅拌技术在板坯尤其是较高拉速工况下的应用效果参差不齐,其工艺难点是应用水平旋转型结晶器电磁搅拌时,如何在促进夹杂气泡去除与降低卷渣两方面找到一个最佳点^[11-12],目前板坯水平旋转型结晶器电磁搅拌多数应用在 1.4 m/min 拉速以下,对较高拉速工况下其应用冶金效果研究极少,为满足现场 IF 钢高拉速生产,同时进一步提高 IF 钢质量,降低封闭率,本文通过数值模拟研究了拉速与水口浸入深度对板坯结晶器流场的影响规律,并优化 IF 钢(Interstitial-Free Steel,即无间隙原子钢,也称超低碳钢)结晶器电磁搅拌工艺,经现场实验验证,取得了显著冶金效果。

1 IF 钢板坯生产现状

该厂生产 IF 钢的工艺流程为:铁水预处理(KR) \rightarrow 300 t 顶底复吹转炉 \rightarrow 吹氩站 \rightarrow RH 炉 \rightarrow 230 mm \times (950~2 150)mm 板坯连铸机,板坯连铸机为直弧型,主半径为 9.59 m,配置 M~EMS 电磁搅拌装置;共有 19 个扇形段,其中 1 与 2 段为机械固定式,3~19 段为带位置传感器油缸浮动式,可以依据位置传感器设定值进行压下与抬起,1 段为垂直段,2 段为弯曲段,9 段为矫直段,10~19 段为水平段,冶金长度为 42.6 m^[13];典型 IF 钢的化学成分见表 1,结晶器电磁搅拌装置型式为:单面行波磁场水平旋转流场,克莱姆绕组形式,额定电流 700 A、额定电压 380 V、频率 2~7 Hz、相数 3 相(120° 相位),铁芯高度 150 mm,铁芯中心线距离结晶器铜板上沿为 195 mm。

生产 230 mm \times 1 600 mm 断面时,结晶器电磁搅

表 1 典型 IF 钢化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al _s	Ti
0.001 3	0.002 2	0.12	0.014	0.005	0.045	0.056

拌电流为 600 A、频率为 3.5 Hz,工作拉速为 1.6~1.8 m/min,IF 钢铸坯在冷轧工序因夹杂和气泡等缺陷导致封闭率达 15%,为进一步提高 IF 钢质量,降低缺陷封闭率,进行了 IF 钢电磁搅拌工艺优化实验;实验钢种成分见表 1,浇注断面为 230 mm \times 1 600 mm。

2 几何模型与评价准则

2.1 几何模型

结合连铸机现有板坯结晶器电磁搅拌结构及连铸工艺参数,对电磁搅拌作用下不同拉速和浸入水口深度下的结晶器流场进行计算。基于 Maxwell 方程组和 N-S 方程,建立电磁场~流场单向耦合的数学模型,以计算电磁搅拌条件下结晶器内的电磁场和流场,由于流场模拟软件 ANSYS 不能计算外部磁场,因此,在计算流场前,需要利用磁场计算软件得到外部电磁力,再将外部电磁力文件通过源项导入到流场软件的流体力学模块中,最终得到电磁搅拌作用下的结晶器内流场情况^[14]。根据结晶器电磁搅拌的结构特征,以典型断面(230 mm \times 1 600 mm)铸坯为研究对象,建立如图 1 所示的有限元模型(未显示空气及水口部分),其中除空气之外均采用六面体单元,为了保证出口边界条件对计算结果无影响,将总的计算长度确定为 5 m,计算参数见表 2。

2.2 评价准则

采用下列两个指数对结晶器流场进行评价,自由液面活跃指数(K1):钢水自由液面流速超过临界

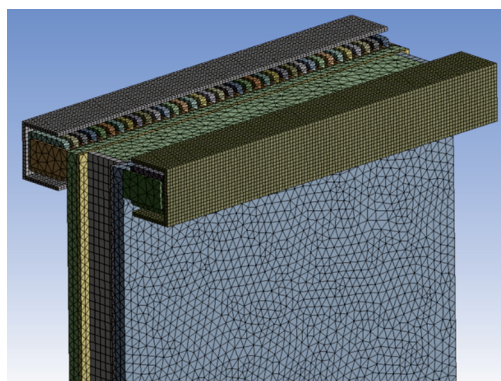


图 1 结晶器电磁搅拌几何模型与网格划分

Fig. 1 Geometric model and grid generation of electromagnetic stirring in mold

表2 电磁搅拌下结晶器内流场模拟采用的主要技术参数
Table 2 The main technical parameters used in the simulation of flow field in mold under electromagnetic stirring

项目	参数
铸坯宽度/mm	1 600
铸坯厚度/mm	230
水口类型及尺寸/(mm×mm)	双侧孔 80×60
水口角度/(°)	15
水口浸入深度/mm	150, 170, 190
结晶器铜板厚度/mm	28(25/30/35)
拉速/(m·min ⁻¹)	0.8~1.8
钢液密度/(kg·m ⁻³)	7 020
钢液黏度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.005 6
通电电流/A	600
通电频率/Hz	3.5
钢液相对磁导率	1
结晶器铜板相对磁导率	1
结晶器铜板电导率/(S·m ⁻¹)	1.78×10 ⁷

流速的区域面积与自由液面总面积之比。在本研究中,临界流速为0.4 m/s。表征结晶器内钢液面的活跃度,当液面活跃指数过大时,结晶器内液面波动会剧烈,造成保护渣卷入到钢液中,并被凝固坯壳捕获从而形成卷渣缺陷,为此,液面活跃指数越大,铸坯生产过程中形成夹渣缺陷的概率就会越高;但也不能过小,否则保护渣熔融效果不好,吸收夹杂物的效果不佳,也容易导致卷渣^[15]。

均匀性指数(K2):在距离结晶器壁20 mm处各点连成一封闭曲线,曲线上各点速度绝对值对曲线积分,曲线上速度最大值对曲线积分,两积分值之比即为流场均匀性指数,其物理意义为封闭曲线上平均流速与最大流速之比。主要用于表征凝固前沿钢水冲刷的均匀性,均匀性指数越大,电磁搅拌作用下的坯壳的凝固前沿就越均匀,铸坯生长也就越均匀^[15]。

3 数值模拟结果与分析

3.1 电磁搅拌对结晶器内流场的影响

有无电磁搅拌条件下的结晶器内流场如图2所示,从图2(a)可以看出,未采用电磁搅拌时,结晶器内的流场为双环流模式,并且在宽度方向上左右两边的流动大致是对称的。当钢水从水口侧孔流出后,射流直冲结晶器窄面,然后分为两部分,一部分向上回流,一部分紧贴结晶器窄边往下部流动。在结晶器厚度方向的中心面上,出口射流流速最大,而在整个厚度方向上,受中心出口射流的影响,形成很明显的上环流结构。从图2(b)可以看出,当搅

拌电流为600 A、频率为3.5 Hz时,两个上环流呈现非对称结构,水口出口的射流转变为往自由表面方向流动,左边的“出口射流”下行方向被电磁力拉平,右边的环流区域被扩大,冲击深度明显减小。

从图2可知,投用电磁搅拌时,无电磁搅拌时典型的双环流场结构发生改变,在水平方向上形成了水平的环流,冲击深度下降,结晶器流场的这一改变有利于减小对窄面坯壳的冲击,同时冲刷铸坯凝固前沿,降低铸坯凝固坯壳对夹杂与气泡的捕获,同时能均匀凝固前沿温度,活跃自由表面,利于夹杂物去除,提高铸坯质量。

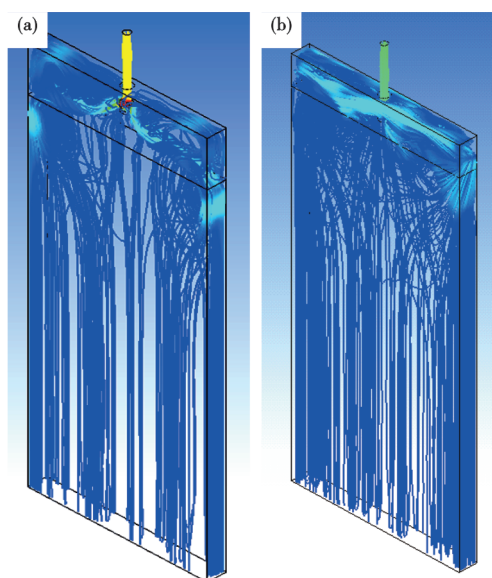


图2 结晶器内流场分布:(a)无电磁搅拌,(b)施加电磁搅拌。

Fig. 2 Flow field distribution in mold : (a) No electromagnetic stirring, (b) With electromagnetic stirring

3.2 电磁搅拌下拉速对结晶器内钢液流场的影响

在水口浸入深度190 mm、电流600 A、频率3.5 Hz时,不同拉速下结晶器液面区域流速分布,如图3所示。从图3(a)可见,拉速较低时,电磁搅拌起主导作用,加速侧速度范围扩大,减速侧抵消。由图3(b)可见,拉速增大,加速侧的速度进一步增大并向减速侧运动,减速侧的速度被逆转。由图3(c)可见,随着拉速继续增大,液面流速以上返流为主,上返流范围扩大。

在搅拌电流强度600 A、频率3.5 Hz时,不同浸入水口深度下拉速对结晶器自由液面活跃指数的影响,如图4所示。由图4可知,随着拉速增高,自由液面活跃指数呈现先增大后减小再增大的趋势,

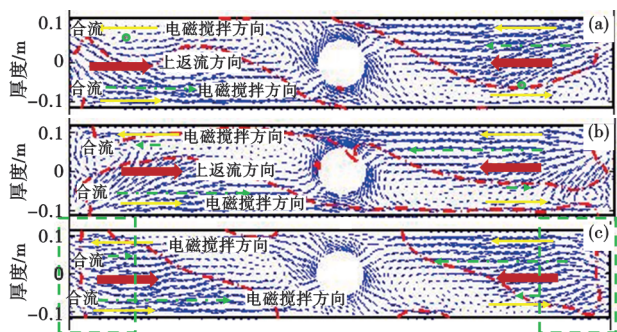


图3 不同拉速下结晶器自由液面流速分布:(a)0.8 m/min, (b)1.0 m/min, (c)1.8 m/min

Fig. 3 The free surface flow velocity distribution of the mold at different drawing speeds: (a) 0.8 m/min , (b) 1.0 m/min , (c) 1.8 m/min

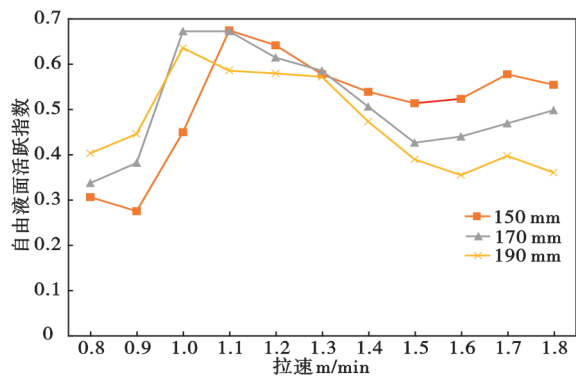


图4 不同浸入水口深度下拉速对结晶器自由液面活跃指数

Fig. 4 Casting speeds on mold free surface activity index at different submergence depths

在 1.05 m/min 附近, K1 最高达 0.67, 在 1.6 m/min 附近, K1 最低达 0.35, 其原因为施加电磁搅拌的情况下, 结晶器内的流动状况主要受到两个因素的耦合作用: 一是水口的出口射流, 二是由电磁搅拌产生的水平方向搅拌力。拉速小于 1.05 m/min 时, 水口出口射流较弱, 电磁搅拌起主导作用, 由水口出口射流的上返流驱动结晶器自由液面所造成的液面活跃指数小, 随着拉速增大至 1.05 m/min 附近时, 水口射流流股撞击结晶器窄面后形成的上回流的速度增大, 但此时加速侧钢液流速无法驱动减速侧钢液流动, 导致自由液面无法形成沿结晶器周向完整的闭合环流, 形成多处流速过大; 随着拉速逐步增大至 1.6 m/min 附近时, 水口射流流股撞击结晶器窄面后形成的上回流的速度逐步增大, 加速侧钢液流速逐步能驱动减速侧钢液流动, 形成沿结晶器周向完整的闭合环流, 但减速侧自由液面流速过低; 此时 K1 达最小值, 也不利于夹杂去除, 随着拉速逐

步增大至 1.8 m/min 附近时, 上回流速度增大, 加速侧带动减速侧钢液流动, K1 逐步小幅增大。K1 指数太大, 钢水液面波动加剧, 保护渣卷入的概率增大, K1 指数过小, 保护渣熔融不充分, 不利于夹杂物的吸附, 综合分析, K1 指数保持在 0.5 ± 0.05 是最优的。

板坯在搅拌电流 600 A、频率 3.5 Hz 时, 不同水口浸入深度下拉速对距自由液面不同高度横截面上流场均匀性指数的影响分别如图 5、图 6 和图 7 所示。由图 5 ~ 图 7 可知, 在电磁搅拌器作用区域 ($35 \text{ mm} < Z < 185 \text{ mm}$), 随着拉速的提高, 流场均匀性指数变化无明显规律, 但在同一高度、不同拉速下其均匀性指数均值变化不大, 在搅拌中心区域即自由液面下约 120 mm 处 K2 指数达到最大值 0.82, 随着离自由液面距离的增加, 均匀性指数逐渐下降。

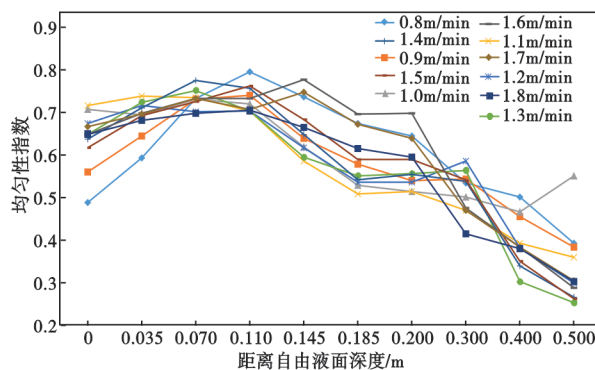


图5 水口浸入深度 150 mm 时不同拉速下的均匀性指数
Fig. 5 Uniformity index under different casting speeds when nozzle is immersed in 150 mm

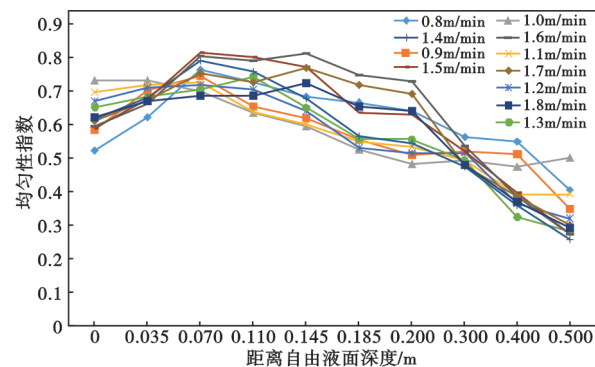


图6 水口浸入深度 170 mm 时不同拉速下的均匀性指数
Fig. 6 Uniformity index under different casting speeds when nozzle is immersed in 170 mm

3.3 电磁搅拌下水口浸入深度对结晶器内流场的影响

板坯在搅拌电流 600 A、频率 3.5 Hz 时, 不同拉

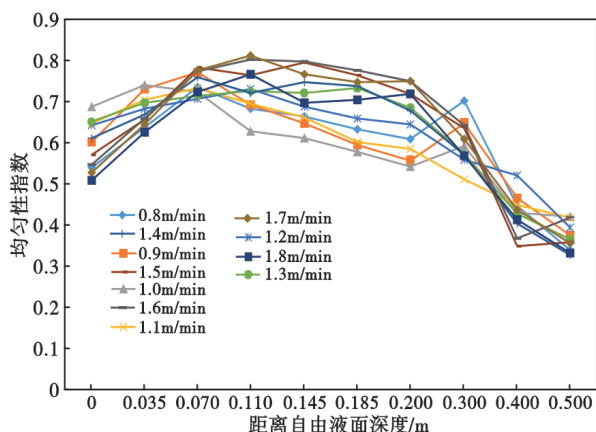


图 7 水口浸入深度 190 mm 时不同拉速下的均匀性指数
Fig. 7 Uniformity index under different casting speeds when nozzle is immersed in 190 mm

速下水口浸入深度对结晶器自由液面活跃指数的影响如图 8 所示。由图 8 可见,当拉速低于 1.0 m/min 时,随着水口浸入深度由 150 mm 增加至 190 mm, K1 指数由 0.27 逐步增大至 0.40, 当拉速大于 1.0 m/min 时,随着水口浸入深度增加, K1 指数逐步降低,尤其是当拉速大于 1.4 m/min 时,随着水口浸入深度由 150 mm → 170 mm → 190 mm 逐步增加, K1 指数均值由 0.55 → 0.46 → 0.37 大幅下降, 上述数据表明,当拉速低于 1.0 m/min 时,电磁力起主导作用,适用 190 mm 及以上的水口浸入深度,此种工艺组合下 K1 指数处于合理区间,当拉速大于 1.0 m/min 小于 1.4 m/min 时,适用 170 ~ 190 mm 的水口浸入深度,此种工艺组合下 K1 指数处于合理区间,当拉速大于 1.4 m/min 时,适用 160 ~ 180 mm 的水口浸入深度,此种工艺组合下 K1 指数处于合理区间。

图 9 对比了 1.4 m/min 拉速下,不同水口浸入深度下均匀性指数在结晶器高度方向上的分布情况,可以看出,在距离自由液面 0 ~ 80 mm,随着水口浸入深度由 150 mm 增至 170 mm,均匀性指数逐渐下降,而当水口浸入深度由 170 mm 增至 190 mm,均匀性指数略有增加。

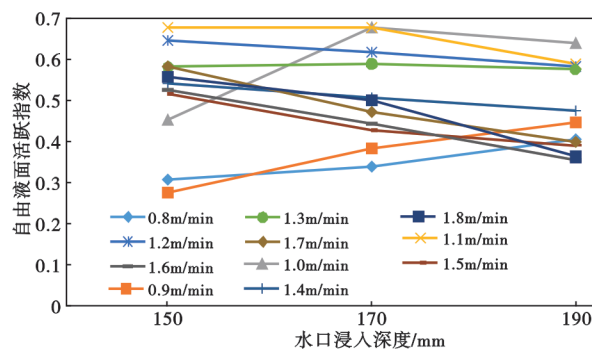


图 8 不同浸入水口深度下的自由液面活跃指数
Fig. 8 Free surface activity index at different submergence depths

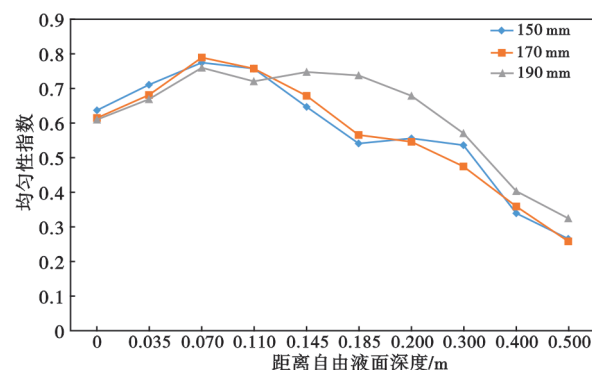


图 9 不同水口浸入深度下的均匀性指数
Fig. 9 Uniformity index under different submergence depths

4 IF 钢现场工业应用

依据上述分析,对 IF 钢结晶器电磁搅拌工艺进行了优化,见表 3。IF 钢结晶器电磁搅拌工艺优化前后,在冷轧工序因夹杂、气泡导致的封闭率见表 4。

表 3 IF 钢结晶器电磁搅拌优化前后工艺
Table 3 IF steel mold electromagnetic stirring before and after optimization process

拉速/ (m·min ⁻¹)	电流/A	频率/Hz	优化前水口浸 入深度/mm	优化后水口浸 入深度/mm
<1.0	500	3.5	200±10	190 ~ 210
≥1.0 ~ 1.4	550	3.5	200±10	170 ~ 190
≥1.4 ~ 1.8	600	3.5	200±10	160 ~ 180

表 4 IF 钢工艺优化前后封闭率对比情况
Table 4 Comparison of the sealing rate before and after IF steel process optimization

拉速/ (m·min ⁻¹)	优化前工艺			优化后工艺			封闭率变化/%
	投料量/t	(夹杂+气泡)/t	封闭率/%	投料量/t	(夹杂+气泡)/t	封闭率/%	
<1.0	649.1	44.62	6.87	654.00	31.45	4.81	↓ 2.06
≥1.0 ~ 1.4	882.4	93.98	10.65	1 228.57	76.35	6.21	↓ 4.44
≥1.4 ~ 1.8	663.0	100.58	15.17	585.00	57.04	9.75	↓ 5.42
合计	2 194.5	239.18	11.00	2 467.57	164.84	7.00	↓ 4.00

从表 3、表 4 可知,影响结晶器电磁搅拌冶金效果的关键因素为水口浸入深度和拉速,当拉速低于 1.0 m/min 时,为避免液面波动过大导致的卷渣,宜采用较深的水口浸入深度;当拉速在 1.0~1.4 m/min 时,此时电磁力与水口侧孔射流冲击力基本平衡,宜采用中等的水口浸入深度;当拉速在 1.4~1.8 m/min 时,为避免自由液面过于平稳,导致结晶器保护渣熔融不良导致的卷渣,宜采用较浅的水口浸入深度;IF 钢结晶器电磁搅拌工艺改进前后的冶金效果与数值模拟结果所述趋势基本一致。

5 结论

(1)未使用结晶器电磁搅拌时,结晶器流场为典型的双环流模式,使用结晶器电磁搅拌后,双环流流场形态发生改变,在水平方向上形成了水平的环流,冲击深度下降。

(2)结晶器电磁搅拌电流 600 A、频率 3.5 Hz 工况下,随着拉速增高,自由液面活跃指数呈现先增大

后减小再增大的趋势,在 1.05 m/min 附近, K1 最高达 0.67,在 1.6 m/min 附近, K1 最低达 0.35,流场均匀性指数略有降低,综合考虑卷渣与保护渣熔融效果,最佳的自由液面活跃指数为 0.5 ± 0.05 。

(3)结晶器电磁搅拌电流 600 A、频率 3.5 Hz 工况下,当拉速低于 1.0 m/min 时,随着水口浸入深度的增加,自由液面活跃指数逐步增大至 0.40,当拉速大于 1.0 m/min 时,随着水口浸入深度增加,自由液面活跃指数逐步降低,当拉速大于 1.4 m/min 时,随着水口浸入深度的增加,自由液面活跃指数大幅下降至 0.37,在距离自由液面 0~80 mm,随着水口浸入深度的增加,均匀性指数逐渐下降。

(4)当拉速低于 1.0 m/min 时,适用 190 mm 及以上的水口浸入深度,当拉速大于 1.0~1.4 m/min 时,适用 170~190 mm 的水口浸入深度,当拉速大于 1.4 m/min 时,适用 160~180 mm 的水口浸入深度,IF 钢结晶器电磁搅拌工艺优化后,其铸坯夹杂与气泡封闭率均值下降 4%。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 吴光辉,唐海燕,程鹏飞,等. 浸入式水口结构对 180 mm×240 mm 断面连铸结晶器内钢液流动行为的影响[J]. 炼钢, 2017, 33(4): 31-38+45.
- [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] 李永超,杨玉丹,卢彩玲,等. 汽车轮毂用 S55C 中碳轴承钢的开发与生产实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 44-47.
- [6] 周开明,董娟. 弧形连铸机生产 S355NL/Q355NE 钢 $\Phi 1200$ mm 连铸圆坯的工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 10-14.
- [7] 张志峰,李廷举,温斌,等. 复合电磁场对连铸结晶器弯月面金属液运动行为及铸坯质量的影响[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(S1): 36-40.
- [8] 卢海彪,张辉琪,钟云波,等. 板坯连铸结晶器电磁搅拌流场模拟[J]. 连铸, 2023, 48(1): 1-9.
- [9] 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, 48(1): 10-17+30.
- [10] 张静,杨龙,吴会平. 电磁搅拌作用下水口深度对液面波动的影响[J]. 钢铁, 2016, 51(3): 32-38.
- [11] Sarkar S, Singh V, Ajmani S K, et al. Effect of double ruler magnetic field in controlling meniscus flow and turbulence intensity distribution in continuous slab casting mold [J]. ISIJ International, 2016, 56(12): 2181-2190.
- [12] Yamamura H, Toh T, Harada H, et al. Mathematical modeling of iron and steel making processes. optimum magnetic flux density in quality control of casts with level DC magnetic field in continuous casting mold [J]. ISIJ International, 2001, 41(10): 1229-1235.
- [13] 刘启龙,曹成虎,邓勇,等. 亚包晶钢板坯高拉速生产实践[J]. 炼钢, 2021, 37(4): 25-29.
- [14] 韦如军. 板坯连铸结晶器分区电磁搅拌物理实验和数值模拟研究[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2022, 34(2): 1-6.
- [15] 金小礼,周月明. 板坯连铸结晶器电磁搅拌参数优化数值模拟研究[J]. 连铸, 2015, 40(1): 27-30.