预防中间包尾坯浇注过程中钢液卷渣的数学模拟和工艺优化效果

王卫华 刘 洋 赵新宇 陈 霞
(首钢技术研究院,北京 100043)

摘 要 为降低中间包尾坯判废率,预防中间包尾坯降拉速过程钢液卷渣,应用流体力学软件 FLUENT,对尾坯降拉速过程进行优化,研究尾坯拉坯过程的拉速变化对钢厂 3#板坯连铸机 80 t 中间包钢液紊流卷渣的影响。通过每次降拉速后的停留时间历程的湍动能时间跟踪曲线分析,确定了中间包尾坯降拉速优化方案。该方案在原方案基础上,将 8 t 铸余增加到 10 t,缩短了各拉速下的持续拉坯时间,并将封顶操作从 0.1 m/min提高到 0.2 m/min,可减小尾坯卷渣的可能性和降低了生产成本,节约中间包尾坯降拉速总时间 266.8 s 和节约钢水量 5.08 t。300 mm×2 000 mm 3#板坯连铸机采用优化操作后,每月尾坯废品总量从 576.4 t 降低到 139.1 t。

关键词 80 t 中间包 300 mm 板坯 尾坯 卷渣 数学模拟 优化效果

Mathematical Modelling on Preventing Slag Entrapment of Liquid in Tundish during Tailing Slab Casting and Process Optimized Results

Wang Weihua, Liu Yang, Zhao Xinyu and Chen Xia
(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043)

Abstract In order to reduce the rejection rate of tundish tailing slab, prevent the slag entrapment of liquid in tundish in tailing slab decreasing casting speed process, the effect of casting speed change during tailing slab casting process on turbulence slag entrapment of liquid in a 80 t tundish for No3 slab caster at steelworks has been studied, and the optimization of process of decreasing tailing slab casting speed is carried out by using fluid dynamics software FLUENT. The optimization scheme to decrease the tundish tailing slab casting speed is defined by analysis on the turbulent kinetic energy-time tracking curves in remain time course after each casting deceleration. Based on the original scheme the casting heel increases from 8 t to 10 t, the duration of casting at each casting speed shortens and the final casting closing-up operation increases from 0.1 m/min to 0.2 m/min to reduce the possibility of tailing slab slag entrapment and decrease the production cost, the time of tundish tailing slab casting duration saves by 266.8 s and the amount of saving liquid is 5.08 t. After using the optimized operation at 300 mm×2 000 mm No3 slab caster the total amount of rejected tail slab per month decreases from 576.4 t to 139.1 t.

Material Index 80 t Tundish, 300 mm Slab, Tail Slab, Slag Entrapment, Math Model, Optimized Results

在浇注的最后阶段如果钢液流股控制不好,中间包渣会大量抽吸至结晶器内,使结晶器传热和润滑急速恶化,极易产生漏钢。另一方面,如果降速过程中拉速变化幅度和频率过大,有可能会引起液面剧烈波动,造成钢液卷渣[1-5]。

钢厂在尾坯浇注过程中,由于尾坯在低拉速过程中停留时间过长,导致尾坯质量废品发生量占废品总量的平均比例为 31.3%。

应用流体力学(CFD)计算软件对中间包流场进行数值模拟,成为成本低、速度快、效果好的研究手段[6-9]。本研究以 3#板坯连铸机带稳流器的中间包为研究对象,借助大型流体力学软件 FLUENT,研究尾坯拉坯过程的拉速变化对中间包钢液卷渣的影响。

1 流体动力学方程

假设中间包内钢水的流动为湍流流动,描述钢水流动的基本控制方程[10]见式(1)~(4):

连续性方程:$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0$ (1)

Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{\text{eff}}\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \mu_j}{\partial x_i}\right)\right] \quad (2)$$

湍流动能方程:$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i k-\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)=G-\rho\varepsilon$ (3)

湍动能耗散方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i \varepsilon-\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right)=\frac{C_1\varepsilon G-C_2\rho\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中:$G=u_i\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$

$$\mu_{\text{eff}}=\mu_l+\mu_t$$

$$\mu_t=\frac{C_D\rho k^2}{\varepsilon}$$

式中:$C_1=1.45$;$C_2=1.92$;$C_D=0.09$;$\sigma_k=1.0$;

$\sigma_\varepsilon = 1.3$；G- 质量浓度/%；k- 湍流动能/($m^2 \cdot s^{-2}$)；p- 压力/($N \cdot m^{-2}$)；x_j，x_i- 在坐标方向上的时均速度/($m \cdot s^{-1}$)；ε- 湍流动能耗散率/($m^2 \cdot s^{-2}$)；μ_{eff}- 有效粘性系数/[$kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$]；$\mu_l$- 层流粘性系数[$kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$]；$\mu_t$- 流粘性系数[$kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$]；$\rho$- 密度/($kg \cdot m^{-3}$)。

2 模型假设和条件确定

假设：(1)中间包内钢液流动为恒温粘性不可压缩湍流流动，并忽略温度对液体密度和黏度的影响；(2)忽略钢-渣界面化学反应的影响；(3)计算采用 VOF 模型，并考虑了钢渣间的表面张力大小的影响；(4)湍流模型选择标准 k-ε 双方程，在湍流混合区内，流动满足薄湍流剪切层理论的基本假设。

确定的模型条件为：

(1)入口。由于是中间包尾坯浇注，在入口处，已经没有竖直而下的冲击流股。所以将中间包液渣层与空气的接触面设为压力入口，压力取一个标准大气压，其速度方向垂直于液渣层表面。入口钢液的体积分数设为 0。

(2)固体表面。在邻近固体墙处，采用边界层理论处理，在与固体接触的表面上，采用不滑动的边界条件。

$$u = v = w = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_j} = \frac{\partial v}{\partial x_j} = \frac{\partial w}{\partial x_j} = 0$$

$$K = \varepsilon = 0$$

(3)出口。钢厂 3# 板坯连铸机中间包公称容量为 80 t，上水口内径 100 mm，正常拉坯速度为 0.9 m/min，铸坯断面 300 mm × 2 000 mm，钢包盛钢水容量 100 t。当浇注尾坯时，中间包液面降低到 20 t 左右时(具体吨数依据工人经验而定)，开始施行降拉速操作，降拉速单位为 0.05 m/min，每次降拉速后平均停留时间为 40.87 s(包括封顶操作)。

将上水口设为出口，出口钢液的体积分数设为 1。出口速度按出口流量和面积确定，计算方法根据公式：

$$v = 4\mu S / 60\pi d^2 \quad (5)$$

式中：u- 拉坯速度/($m \cdot min^{-1}$)；d- 上水口内径/mm；S- 拉坯横断面面积/mm^2；v- 出口速度/($m \cdot s^{-1}$)。

计算得出各拉速下的出口速度见表 1。

3 中间包流场模型计算结果及分析

3.1 模型概况

几何模型的建立以出口中心对应的中间包底部为坐标原点，中间包长度方向为 X 轴，宽度方向为 Y

表 1 拉速对钢液的出口流量和速度的影响

Table 1 Effect of casting speed on flow rate and velocity of liquid at outlet

拉速/($m \cdot min^{-1}$)	持续时间/s	该时间段内流出的钢液量/t	出口流量/($kg \cdot s^{-1}$)	模型出口速度/($m \cdot s^{-1}$)
0.90	1.8	0.113	63.0	1.146
0.85	26.4	1.571	59.5	1.083
0.80	18.0	1.008	56.0	1.019
0.75	15.0	0.788	52.5	0.955
0.70	9.0	0.441	49.0	0.892
0.65	12.6	0.573	45.5	0.828
0.60	18.0	0.756	42.0	0.764
0.55	17.4	0.670	38.5	0.701
0.50	16.8	0.588	35.0	0.637
0.45	31.2	0.983	31.5	0.573
0.40	22.8	0.638	28.0	0.510
0.35	25.8	0.632	24.5	0.446
0.30	27.0	0.567	21.0	0.382
0.25	17.4	0.304	17.5	0.318
0.20	69.6	0.974	14.0	0.255
0.15	16.2	0.170	10.5	0.191
0.10	(349.8)	2.449	7.0	0.127

注：末行 349.8 为封顶时间

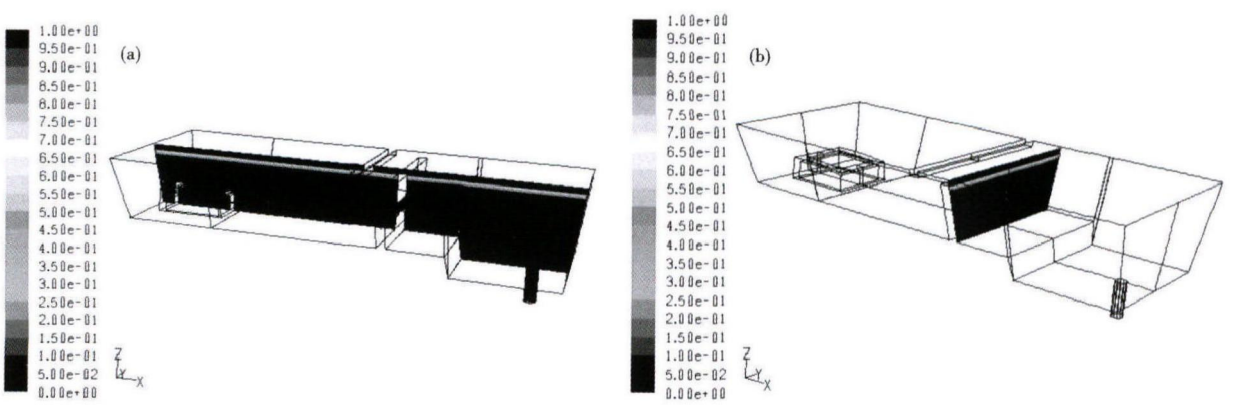

图 1 尾坯浇铸过程中间包体积分数云图：(a)对称面；(b)导流孔出口面

Fig. 1 Cloud diagram of volume integral of tundish during tail slab casting process: (a) symmetric section; (b) section at diversion outlet

轴,高度方向为 Z 轴。图 1 为尾坯浇注过程中间包体积分数云图,利用 Fluent 软件的初始化功能对钢液-液渣两相初始化,定义距中间包顶部 15 mm 截面以内为液渣(图中显示灰色),以下均为钢液(图中显示黑色)。

为了研究降拉速操作对中间包流场的影响,在 1/2中间包模型的出口区取了 3 个典型截面,分别为:(1)导流孔出口截面(截面 1);(2)距坐标原点 Z 向为 0.195 m 的截面(截面 2);(3)距坐标原点 Z 向为 -0.1 m 的截面(截面 3),3 个典型截面见图 2。具体分析降拉速方案在优化前后,3 个截面的流速和湍动能随时间的变化。

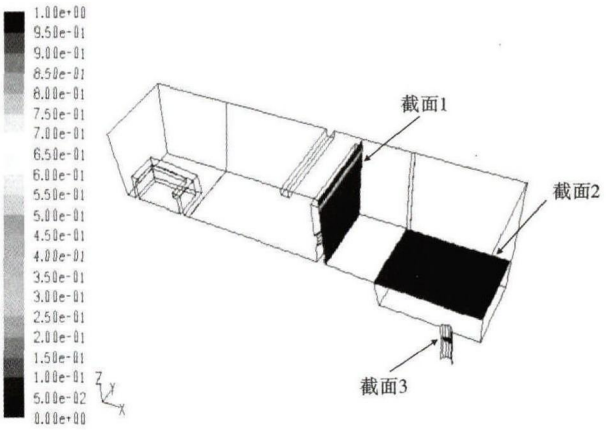

图 2　1/2 中间包 3 个典型截面

Fig. 2　Three typical section of 1/2 tundish

3.2　尾坯降拉速方案的优化

方案 1:保持原方案 8 t 铸余不变,对各拉坯速度下的持续时间进行优化。缩短低拉速下的持续时间,将封顶操作从 0.1 m/min 提高到 0.2 m/min,为了保证封顶操作顺利进行,封顶时间从原方案的 350 s 适当提高到 380 s;方案 2:为了保证尾坯纯净度,预防汇流漩涡,将原方案的 8 t 铸余增加到 10 t,同时对各拉坯速度下的持续时间进行优化,封顶操作同方案 1,从 0.1 m/min 提高到 0.2 m/min,但封顶时间与原方案相同(350 s)。表 2 为方案 1 和方案 2 的持续时间设置。

表 2　方案 1 和方案 2 的持续时间设置

Table 2　Duration setting for scheme 1 and scheme 2

拉速/(m·min^{-1})	持续时间/s		该时间段内流出的钢液量/t		累计吨数/t		已计算的总时间/s		出口速度/(m·s^{-1})
	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	方案 1	方案 2	
0.90	2	2	0.126	0.126	0.126	–	2	2	1.146
0.85	2	2	0.119	0.119	0.245	0.245	4	4	1.083
0.80	5	5	0.280	0.280	0.525	0.525	9	9	1.019
0.75	2	2	0.105	0.105	0.630	0.630	11	11	0.955
0.70	5	5	0.245	0.245	0.875	0.875	16	16	0.892
0.65	2	2	0.091	0.091	0.966	0.966	18	18	0.828
0.60	5	5	0.210	0.210	1.176	1.176	23	23	0.764
0.55	5	5	0.192	0.192	1.368	1.368	28	28	0.701
0.50	15	10	0.525	0.350	1.894	1.718	43	38	0.637
0.45	10	5	0.315	0.158	2.208	1.876	53	43	0.573
0.40	15	10	0.420	0.280	2.628	2.156	68	53	0.509
0.35	10	5	0.245	0.122	2.874	2.279	78	58	0.446
0.30	20	10	0.420	0.210	3.294	2.488	98	68	0.382
0.25	15	10	0.262	0.175	3.556	2.664	113	78	0.318
0.20	(380)	(350)	5.320	4.90	8.876	7.564	493	428	0.255

注:表中末行的 380 和 350 为封顶时间。

3.3　模型计算结果分析

由图 3 可以看出,在导流孔出口面,从导流孔流出的钢液速度较大,虽然速度矢量的方向比较乱,但还是以向上的箭头为主,这说明导流起到了抬升钢液流股,增加流体运动轨迹长度的作用;但在 3 个方案的速度矢量图上可以看出,原方案流速 > 方案 1 流速 > 方案 2 流速。相比方案 2,原方案和方案 1 的速度矢量方向较乱,有一定的卷渣风险。

从图 4 可以看出,原方案的截面 2 上,钢液流速

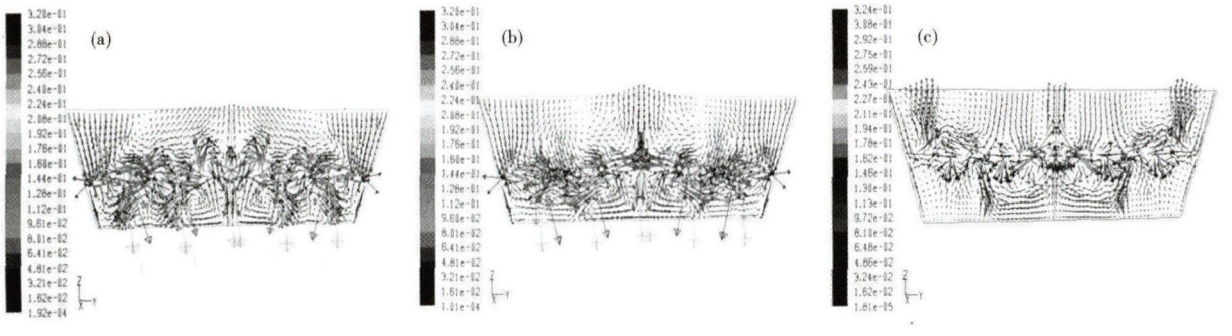

图 3　原方案(a)、方案 1(b)和方案 2(c)在截面 1 的速度矢量图

Fig. 3　Velocity vector diagram of original scheme (a), scheme 1 (b) and scheme 2 (c) at section 1

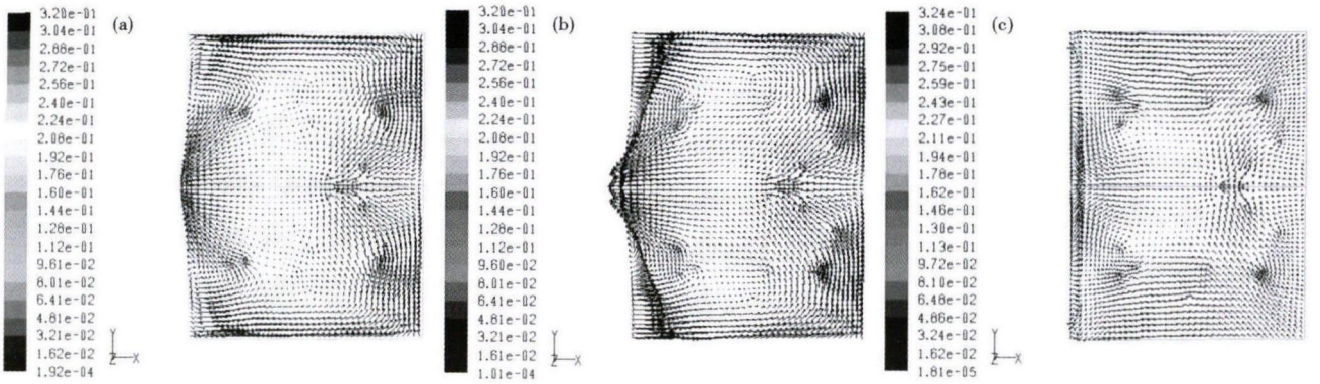

图4 原方案(a)、方案1(b)和方案2(c)在截面2的速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector diagram of original scheme (a), scheme 1 (b) and scheme 2 (c) at section 2

较大的地方主要集中在截面2左侧中部和前后靠近壁面的地方,中心速度较小。在左右两侧,各存在上下对称的、速度矢量相对集中的地方。方案1与原方案在截面2上的矢量图很相似,只是在靠近左侧的速度矢量更加集中。方案2与原方案在截面2的速度矢量也基本相似,但在整个截面上的速度都较小且分布均匀。

从图5可以看出,3种方案下,虽然钢液从导流孔射出后要绕经几个小漩涡,但大部分在流入出口区时,流线均绕流大路径,可以让夹杂物有充分时间上浮去除。相比方案2,方案1的钢液从导流孔射出后比较混乱,且在出口区附近有小部分钢液的路径相对较短;方案2与原方案的流线图很相似,但相比原方案,方案2的流线路径更有规律性,大部分钢液在流入出口区时,流线平缓而悠长,基本都绕流大路径和大漩涡流出,短路流很少,流场更趋合理。

由于中间包降拉速前期钢液卷渣的几率不大,所以只分析了45 s以后各工况湍动能随时间的变化。3个截面的湍动能曲线是在降拉速过程中,分别监测中间包3个截面的面湍动能加权平均值随拉坯时间的变化而得到的。通过图6两种优化方案与原方案在3个截面的湍动能曲线比较,可以发现在截面2和截面3中,方案2比方案1的加权平均湍动能略小,但两种方案的湍动能差别不大。在截面1中,方案2和原方案的湍动能差别不大,但相比原方案和方案2,方案1的湍动能从100 s后就逐渐增大,这显著增加了钢液在此面上卷渣的几率。

3.4 优化方案小结

分析可知,尾坯浇注末期方案1在截面1上的湍动能比原方案大许多,速度矢量方向分布较乱,速度较大,有一定卷渣风险。与原方案相比,方案2在导流孔出口截面(截面1)、距坐标原点Z向0.195 m的截面(截面2)和距坐标原点Z向为-0.1 m的截面(截面3),这3个面上的钢液流动速度和湍动能差别不是很大,钢液在中间包内的流线排列较为均匀整齐,钢液流动平稳,形成的漩涡都不在出口区上部,不仅不会形成涡流卷渣,还有利于夹杂物的上浮排除。同时综合考虑其经济效益,可以将最终优化方案定为方案2。方案2与原方案相比,节约的降拉速总时间见表3。

3.4 优化效果

在3#连铸机浇注过程中实施新的尾坯降拉速操作后,很好的预防了中间包尾坯浇注过程卷渣,保证了尾坯纯净度,同时节约了尾坯降拉速时间和钢

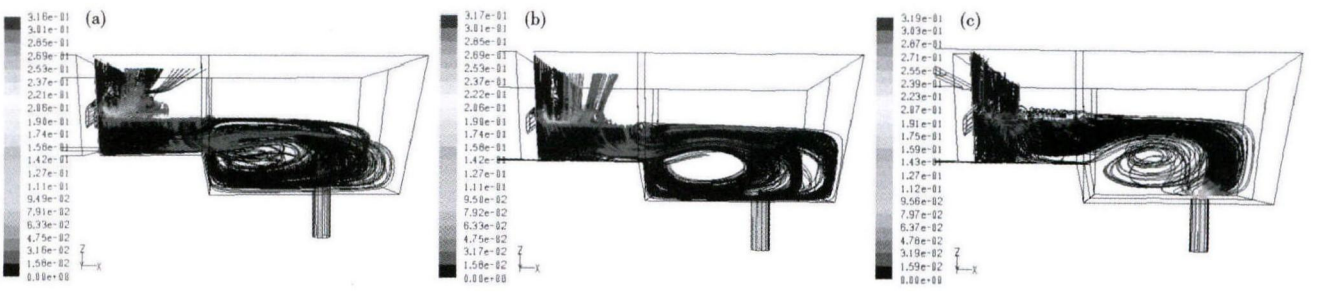

图5 原方案(a)、方案1(b)和方案2(c)在截面1的流线图

Fig. 5 Flow line diagram of original scheme (a), scheme 1 (b) and scheme 2 (c) at section 1

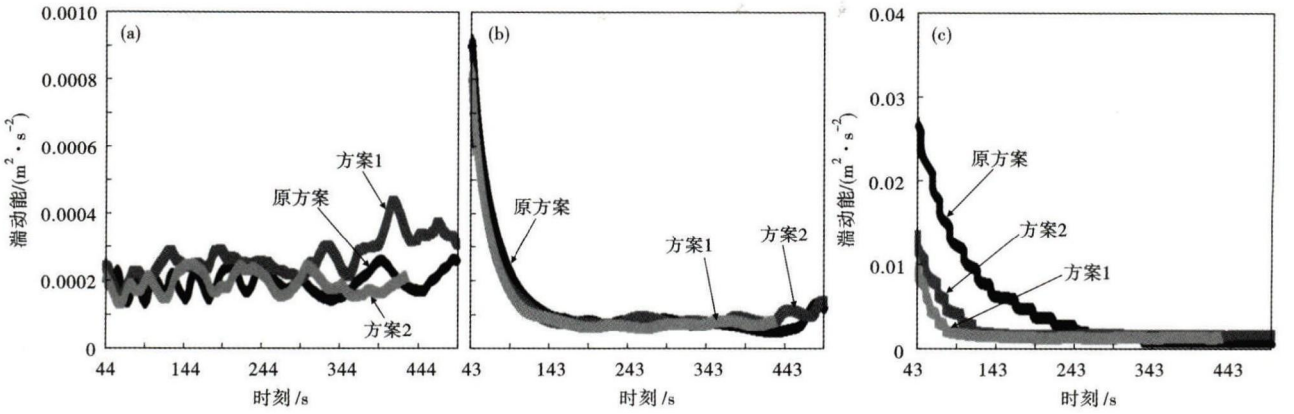

图 6　原方案、方案 1 和方案 2 在截面 1(a),截面 2(b)和截面 3(c)的湍动能随流动时间的变化

Fig. 6　Change of turbulence kinetic energy of original scheme, scheme 1 and scheme 2 at section 1 (a), section 2 (b) and section 3 (c) with casting time

表 3　优化前后方案尾坯浇铸时间对比

Table 3　Comparison of tail slab casting duration between before and after optimization scheme

拉速/(m·min⁻¹)	持续时间/s		节约时间/s
	原方案	优化后方案	
0.90	1.8	2.0	-0.2
0.85	26.4	2.0	24.4
0.80	18.0	5.0	13.0
0.75	15.0	2.0	13.0
0.70	9.0	5.0	4.0
0.65	12.6	2.0	10.6
0.60	18.0	5.0	13.0
0.55	17.4	5.0	12.4
0.50	16.8	10.0	6.8
0.45	31.2	5.0	26.2
0.40	22.8	10.0	12.8
0.35	25.8	5.0	20.8
0.30	27.0	10.0	17.0
0.25	17.4	10.0	7.4
0.20	69.6	350.0(封顶)	0.2
0.15	16.2	-	-
0.10	349.8(封顶)	-	-
铸余/t	8.0	10.0	-
降拉速总时间/s	694.8	428	-
节约总时间/s	-		266.8
节约吨数/t	-		5.08

注:表中节约时间为正值,延长时间为负值,用"-"表示。

水用量,降低了生产成本,有效降低了 3#连铸机尾坯判废率。3#连铸机每月尾坯的废品总量从优化前的 576.4 t 降低至优化后的 139.1 t。

4　结论

(1)为了防止中间包尾坯浇注过程卷渣,保证尾坯纯净度,该方案是在原方案的基础上,将原方案的 8 t 铸余增加到 10 t,并缩短了各个拉速下的持续拉坯时间。为减少尾坯在低拉速下的持续时间,将封顶操作从 0.1 m/min提高 0.2 m/min,但封顶时间与原方案相同(350 s)。该降拉速方案的应用,即减小了尾坯卷渣的可能性,又降低了生产成本,可以节约降拉速总时间和钢水量分别为 266.8 s 和 5.08 t(减去多出的 2 t 铸余后为 3.08 t)。

(2)在 3#连铸机浇注过程中实施新的尾坯降拉速操作后,很好的预防了中间包尾坯浇注过程卷渣,有效降低了 3#连铸机尾坯判废率。3#连铸机每月尾坯的废品总量从优化前的 576.4 t 降低至优化后的 139.1 t。

参考文献

[1] 刘金刚,郝　宁,姜中行,等. 中间包下挡墙溢流卷渣行为[J]. 北京科技大学学报,2010,32(7):850-854.

[2] Liu J G, Yan H C, Liu L, et al. Water Model of Controlling Vortex in Tundish[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(12): 18-22.

[3] 王海奇,包燕平,唐德池,等. 中间包内吹气与卷渣行为的水模拟研究[J]. 钢铁钒钛,2010,31(2):49-52.

[4] 倪修华,江中块,陈志平,等. 二机二流板坯连铸中间包流场的实验研究[J]. 梅山科技,2011(1):26-29.

[5] 薛文辉. 连铸浇次末期工艺的研究. 2005 中国钢铁年会论文集[C]. 北京:冶金工业出版社,2005:380-383.

[6] 陈雪华,袁　杰,张旭东. 不对称中间包内流场的计算机模拟实验[J]. 中国材料科技与设备,2012(3):77-78.

[7] Zhan S H, Ou J P, Xiao Z Q. Numerical Simulation on Gas-Liquid Two Phase Flow in Continuous Casting Tundish With Bottom Gas Blowing[J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 5(3): 232-238.

[8] Zhang C J, Zhao T C, Ai L Q. Mathematical Simulation of Steel Flow and Trajectory of Inclusions in FTSC Tundish[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(11): 1015-1020.

[9] Hou Q F, Yue Q, Wang H Y, et al. Modelling of Inclusion Motion and Flow Patterns in Swirling Flow Tundishes With Symmetrical and Asymmetrical Structures[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 2008, 48(6): 787-792.

[10] 王建强,李俊国,韩志杰. 转炉出钢过程中涡流卷渣的数值模拟研究[J]. 钢铁钒钛,2012,33(3):34-39.

王卫华(1976-),女,硕士(2004 年北京科技大学),工程师,1999 年河北理工学院(本科)毕业,炼钢、连铸工艺和仿真技术研究。

收稿日期:2016-07-03