

首钢板坯铸机高拉速工艺研究

龚 坚 王国年 张 涛 吕勇博 刘 岩

(首钢股份有限公司)

摘 要 本文对首钢二炼钢板坯铸机提高拉速的工艺进行了研究,为适应 1.2~1.3 m/min 拉速条件下稳定正常的生产,对结晶器冷却水量、浸入式水口参数、二冷比水量、振动参数、保护渣性能指标进行了调整。研究了拉速变化对结晶器热流密度的影响、提高拉速后对结晶器铜板温度的影响、矫直区铸坯表面温度变化、保护渣耗量的变化并对 3 个保护渣耗量经验公式进行了评价。通过采取以上措施,与 0.8 m/min 拉速情况对比,铸坯表面纵裂发生率维持在同一水平,含 Nb 的微合金钢种一检合格率显著上升,铸坯内部质量维持在同一水平。板坯双流铸机改为单流铸机后,由于拉速的提高,板坯月产量达到了 9 万 t 的水平,达到了双流铸机的产量水平。

关键词 板坯铸机 高拉速研究 工艺调整

THE RESEARCH AND PRACTICE ON HIGH-SPEED WIDE SLAB CONTINUOUS CASTING

Gong Jian Wang Guonian Zhang Tao Lv Yongbo Liu Yan
(Shougang Corporation Co., Ltd.)

ABSTRACT This paper have researched on high-speed casting practice of conventional slab caster in shougang No.2 steelmaking plant. To meet the requirement of producing sucessfully in casting speed 1.2-1.3m/min, we have adjusted the mould cooling water density, the parameter of submerged entry nozzle, secondary cooling water density, the parameter of vibration, the index of mould powder phsical and chemical properties. The relationship between casting speed and local heat flux mould, the copper plate temperature analysis in different casting speed, the differenc of slab corner temperature in bending segment at different casting speed, the consumption of mould powder difference were analyzed. We also make the assecement of three regressed equation of mould powder consumption. With above development of process practice, the product quality and production effencience was achieved to high level. Comparing with casting speed of 0.8m/min, the surface crack ration of product and the inner quality of slab remain the same level, the product qualification rate of steel grade with Nb increased dramatically. With the casting speed rising, the product yielding receached ninty thousand tons per month under one strand which is the same product yielding under two strands.

KEYWORDS conventional slab caster, high-speed research, process adjustment

1 引言

首钢二炼钢原有一台 2 机 2 流板坯连铸机, 2004 年 2 月原有板坯连铸机整体拆除一流, 由双流铸机改为单流铸机, 为保证铸机产量和炉机匹配, 在工装设备基本未进行改造的条件下, 改为单流铸机后工作拉速由 0.7~0.9 m/min 提高至 1.1~1.3 m/min。为适应铸机提高拉速后正常生产的需要, 我厂技术人员对连铸机各项工艺进行了研究和改进, 保证了提高拉速后单流铸机的稳定生产。

首钢二炼钢现有 2 座铁水脱 S 站, 3 座 210 t 顶底复吹转炉, 钢水经 LF 炉处理, 板坯连铸机为直弧形铸机, 连铸机主要工艺参数见表 1。

表 1 连铸机主要工艺参数

Tab.1 The main casting facility specifications

项 目	参 数
转炉出钢量	200 t
机型	直弧形连铸机
基本弧半径	9.5 m
冶金长度	31.558 m



续表 1

项 目	参 数
结晶器长度	900 mm
直线段长度	2731 mm
矫直方式	12 点渐近矫直
振动方式	短臂四连杆非正弦
浇注厚度	220 mm ,250 mm
浇注宽度	1600 mm ,1800 mm
中间包容量	38 t
中间包液面深度	1000 mm
二冷方式	气雾冷却为主
工作拉速	1.1~1.3 m/min
最大拉速	1.4 m/min

2 高拉速的工艺与实践

2.1 结晶器冷却水量的调整

拉速提高后,为保证坯壳出结晶器下口有足够的厚度,结晶器冷却水量相应做了调整,提高了结晶器宽面和窄面水量。低拉速与高拉速条件下结晶器冷却水量对比见表 2。

表 2 结晶器冷却水量对比

Tab.2 The difference of mold cooling water density

项 目	低拉速 (0.7~0.9 m/min)		高拉速 (1.1~1.3 m/min)	
	铸坯厚度/mm	220	250	220
宽面/L·min ⁻¹	3300 ± 50	3300 ± 50	3800 ± 50	3800 ± 50
窄面/L·min ⁻¹	460 ± 15	520 ± 15	480 ± 15	540 ± 15

测量了出结晶器下口坯壳厚度,出结晶器下口宽面坯壳厚度为 24.7 mm,窄面坯壳厚度为 23.5 mm。说明调整后的冷却水量能满足出结晶器下口坯壳有足够的厚度。

2.2 拉速变化对结晶器热流密度的影响

拉速升高后对结晶器热流密度有较大影响,宽面和窄面进出水温差明显升高,我厂铸坯浇注厚度以 220 mm 厚度为主,在 220 mm 厚度下研究了拉速变化对结晶器热流密度的影响,拉速提高至 1.2 m/min 后,通过调整结晶器水量,保证结晶器冷却水流速为 10~12 m/s,宽面水温升基本控制在 7~9℃。

随拉速的提高结晶器热流密度明显上升,热流密度由公式(1)进行计算:

$$Q = q \times \rho_w \times C_w \times \Delta t / A \text{ (MW/m}^2\text{)} \quad (1)$$

式中, Q 为热流密度 MW/m^2 ; q 为结晶器内/外弧面的水流量 m^3/s ; ρ_w 为水的密度 kg/m^3 ; C_w 为水的比热容 $\text{kcal}/(\text{kg}\cdot\text{℃})$; Δt 为内/外弧面冷却水进、出水

温差 ℃ ; A 为与坯壳接触的结晶器有效面积 m^2 。

将拉速转换为坯壳在结晶器内的停留时间(结晶器长度 900 mm),高碳钢坯壳在结晶器内不同的停留时间与宽面热流密度的关系见图 1,由于不同类型钢种具有不同的凝固特性并相应使用不同类型保护渣,在相同的拉速条件下热流密度会存在一定的差异,图 1 是以 45 号钢为分析对象。从图 1 可以看出,随着坯壳在结晶器内的停留时间越短(拉速越高)结晶器热流密度越大。

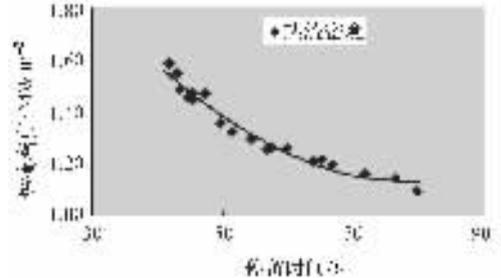


图 1 高碳钢坯壳在结晶器内停留时间与宽面热流密度的关系

Fig.1 Relationship between the local heat flux and the remaining time in a mold of high carbon steel

2.3 提高拉速后对结晶器铜板温度的影响

拉速提高后结晶器铜板温度会上升,在拉速 0.8 m/min 和 1.3 m/min 的情况下,对结晶器铜板进行了热模拟,热模拟结果见表 3。点 1~点 10 为宽面中心起每隔 100 mm 取 1 个点直到宽面边部,点 10~13 为窄面边部起每隔 35 mm 取 1 个点直到窄面中心,其中点 10 为边角部。热模拟结果显示(1)角部为强冷却,角部铜板温度最低(点 9、点 10), (2)当拉速由 0.8m/min 上升到 1.3m/min 时铜板温度平均上升 48℃左右。说明提高拉速后结晶器铜板温度基本在 320℃以内,在结晶器铜板再结晶温度以下。

表 3 结晶器铜板热模拟

Tab.3 The temperature analysis model of mould copper plate

位 置	温度/℃ (0.8 m/min)	温度/℃ (1.3 m/min)	差值/℃
1	263.5	309.0	46.0
2	265.0	312.9	47.9
3	267.3	315.0	47.7
4	264.9	312.9	48.0
5	262.7	309.6	46.9
6	261.0	307.8	46.8
7	260.0	308.3	48.3

续表 3

位 置	温度/℃ (0.8 m/min)	温度/℃ (1.3 m/min)	差值/℃
8	255.6	304.5	48.9
9	229.9	275.0	45.1
10	201.4	239.2	37.8
11	262.8	310.8	48.0
12	265.8	314.6	48.8
13	260.9	318.4	57.5

2.4 振动参数的变化

我厂板坯铸机采用非正弦振动,振频随拉速进行变化,振频与拉速关系见公式(2),振幅为 4 mm,偏斜率: $\alpha = 31\%$ 。振动轨迹偏差要求:沿浇注方向 $\leq \pm 0.2$ mm;垂直于浇注方向 $\leq \pm 0.15$ mm。

$$f = \begin{cases} 40 & V_c \leq 0.5 \\ 80 & 0.5 < V_c \leq 1.7 \\ 136 & V_c > 1.7 \end{cases} \quad (2)$$

随着拉速由 0.8 m/min 上升至 1.2 m/min,振频相应由 64 次/min 提高至 96 次/min,负滑动时间 t_n 由 0.25 s 降低至 0.17 s,振幅仍为 4 mm,由于负滑动时间 t_n 降低,振痕深度有所减轻。

2.5 二冷比水量的调整

铸机二冷区配水大部分采用气雾冷却方式。二冷水共分 14 个调节回路,水、气分别可调。检测回路采用流量、压力、温度检测。一级机配水方式根据断面不同及冷却强弱不同分为 8 个水表号,以此来满足不同钢种、不同的钢水过热度、不同拉速的浇注要求。不同拉速条件下二冷比水量见表 4。低合金类钢种采用 21 水表,普碳类钢种采用 22 水表。采用 21 水表时,0.8 m/min 拉速条件下比水量为 0.8 L/kg; 1.2 m/min 拉速条件下比水量为 1.00 L/kg。拉速提高后液相穴深度相应增加,0.8 m/min 拉速条件下液相穴深度为 14.3 m,1.3 m/min 拉速条件下液相穴深度为 21.5 m,液相穴深度已延长至二冷区 9 段。

2.6 浸入式水口参数的调整

浸入式水口采用铝碳质,浸入式水口侧孔尺寸、倾角与插入深度直接影响结晶器内钢流分布,从而影响板坯坯壳生长均匀性,应综合考虑侧孔尺寸、倾角与插入深度的参数。水口侧孔尺寸如果过大,钢水不能满流流出,在水口周围形成紊流。水口倾角对结晶器内钢水的流场也有直接影响。水口插入太

深,由于从长水口两个侧孔出来的钢流带到钢液面上的热量不足,保护渣不能均匀熔化,影响初生坯壳的均匀性,同时更多的高温钢水进入结晶器下部,影响了凝固壳的生长,使结晶器下口的初生坯壳减薄,不利于高拉速浇注;水口插入太浅,钢流可以将液渣裹入凝固前沿。液面起伏指数 F 值与拉速成正比^[2],随着拉速的增加,液面波动加剧。

原有浸入式水口采用水平角度,侧孔为 40 mm × 80 mm,浸入深度为 280 ~ 320 mm。拉速增加后由于钢液传给结晶器表面的动量增大,液面波动加剧,钢液卷渣倾向增加,原有水平角度浸入式水口已不适应现有拉速。

提高拉速后先后试验 3 种不同参数的浸入式水口,经过现场试验确定了现有浸入式水口参数:下倾 12°角,侧孔 55 mm × 70 mm,浸入深度调整为 260 ~ 300 mm。从现场使用效果来看保护渣能均匀熔化,液面波动较小。

2.7 保护渣的调整及优化

2.7.1 保护渣调整的原则及分钢种保护渣的选择

保证液渣均匀的流入坯壳与结晶器的间隙是保证坯壳具有良好的润滑和保证坯壳与结晶器壁间稳定均匀的传热的关键,而良好的润滑和稳定均匀的传热是避免出现表面纵裂和粘结性漏钢的关键。提高拉速后钢水在结晶器内停留时间缩短,流入坯壳和结晶器壁的保护渣量减少,保护渣膜的稳定性和均匀性下降。因此高速浇注情况下保护渣应具有以下性能:(1)提高拉速后仍能保持一定量的耗量。(2)具有适宜的液渣层厚度,以防止高拉速时熔渣供应不足。(3)坯壳和结晶器壁渣膜厚度适宜,分布均匀,保证均匀传热和良好的润滑。提高拉速后,保护渣指标的调整是保证生产顺行和铸坯质量的关键。

根据公式(3)^[2]可以得出渣膜厚度与保护渣黏度和拉速有关,在拉速一定的条件下,渣膜厚度主要取决于保护渣黏度。

$$e = [\eta \times v / g(\rho_m - \rho_s)]^{1/2} \quad (3)$$

式中, η 为保护渣黏度,Pa·s; v 为拉速,m/min; ρ_m 为钢密度,g/cm³; ρ_s 为渣密度,g/cm³。

拉速提高后,保护渣耗量减少,液渣层厚度降低,必须调整保护渣性能与拉速适应。

保护渣熔点降低、熔化速度上升后可以增加保护渣耗量和增加液渣层厚度,提高拉速后,保护渣熔点相应降低,熔化速度略有上升。

保护渣黏度是决定消耗量和均匀渗入的重要性

能之一,为改善高拉速条件下均匀传热和良好的润滑,保持足够的液渣层厚度和保护渣耗量,应采取降低黏度的措施。但应综合考虑拉速和钢种对保护渣黏度的要求。

保护渣碱度 R 是保护渣的一项重要指标,碱度主要影响保护渣析晶温度进而影响传热特性,应根据各钢种凝固特性调整保护渣碱度。

由于铸机浇注的钢种较多,经过多次试验,充分考虑包晶钢表面纵裂倾向和高碳钢黏结漏钢的倾向,针对各钢种特性调整了相应保护渣的成分、黏度和熔化温度。我厂不同钢种分为四大类,分别为普碳系列、低合金系列、包晶钢和高碳钢。调整前后保护渣见表 5。保护渣调整后铸坯质量良好,铸坯合格率与提高拉速前维持在同一水平。

表 4 调整前后保护渣物性对比

Tab.4 The adjustment of physical properties of mould powder

项目	钢种	型号	碱度	1300℃黏度/泊	熔点/℃
调整前	普碳系列	A	1.4	1.3	1100
	低合金系列	B	1.25	1.6	1180
	包晶钢	C	1.2	1.7	1190
	高碳钢	D	1.15	1.0	1050
调整后	普碳系列	A1	1.25	1.1	1070
	低合金系列	B1	1.4	1.1	1020
	包晶钢	C1	1.3	1.7	1150
	高碳钢	D1	0.9	1.5	1050

表 5 保护渣实际耗量与计算耗量对比

Tab.5 The actual powder consumption in shougang and the powder consumption from regressed equation

保护渣耗量回归公式	拉速/ $m \cdot \min^{-1}$	计算耗量/ $kg \cdot m^{-2}$	实际耗量/ $kg \cdot m^{-2}$
$Q_s = 0.6 / \eta v_c$	0.8	0.47	0.52
	1.15	0.47	0.42
$Q_s = 0.55 / \eta^{0.5} v_c$	0.8	0.544	0.52
	1.15	0.454	0.42
$Q_s = (0.433 / v_c^{0.5}) [1 + (2.83 \times 10^{-2} / \eta v_c^2)]$	0.8	0.50	0.52
	1.15	0.40	0.42

统计了不同拉速下 Q345B 液渣层厚度,在拉速 0.8 m/min 条件下平均液渣层厚度为 10.5 mm;在拉速 1.2 m/min 条件下平均液渣层厚度为 9.9 mm。通过调整保护渣指标,拉速提高后液渣层厚度只是略有下降,仍维持在较好水平。

2.7.2 保护渣耗量的变化及评价

保护渣耗量是评价浇注过程中保护渣润滑情况

的一项重要指标,国内外提出一系列的回归公式,保护渣耗量可以用 Q_t (kg/t 钢)或 Q_s (kg/m²)表示,其转换公式为 $Q_s = 7.6 Q_t / R$, R 为结晶器表面积与体积的比值, $R = [\alpha w + t \gamma wt]$, w 为结晶器宽度 1818 mm, t 为厚度 226 mm, $R = 9.95$ 。

我厂在拉速 0.8 m/min 状态下,统计 4 个浇次 Q345B,保护渣平均耗量 $Q_t = 0.68$ kg/t, $Q_s = 7.6 Q_t / R = 0.52$ kg/m²,保护渣型号为 XLZ—21,黏度为 1.6 泊。

我厂在拉速 1.15 m/min 状态下,统计 4 个浇次 Q345B,保护渣平均耗量 $Q_t = 0.55$ kg/t, $Q_s = 7.6 Q_t / R = 0.42$ kg/m²,保护渣型号为 XX—3D,黏度为 1.1 泊。

在浇注同一钢种的条件下,拉速和保护渣黏度均有较大变化,根据现场保护渣实际耗量对以下三个保护渣耗量经验公式进行了验证。

Wolf 提出的保护渣耗量的经验公式^[3]为

$$Q_s = 0.6 / \eta v_c$$

S.Sridhar 在 Wolf 的基础上提出的保护渣耗量的经验公式^[4]为: $Q_s = 0.55 / \eta^{0.5} v_c$ 。

Jenkins 提出的保护渣耗量的经验公式^[5]为: $Q_s = (0.433 / v_c^{0.5}) [1 + (2.83 \times 10^{-2} / \eta v_c^2)]$

S.Sridhar 和 Jenkins 提出的保护渣耗量经验公式与现场实际基本一致, Wolf 的经验公式与实际存在误差。

为保证坯壳与结晶器壁良好的润滑和稳定均匀的传热,保护渣耗量的下限为 0.3 kg/m²^[6],拉速提高后通过调整保护渣特性,保护渣耗量保持在 0.42 kg/m² 的水平,分钢种使用了不同的保护渣,不同钢种保护渣耗量略有差别,但保护渣耗量仍远大于耗量下限,完全可以满足正常生产的需要。

3 铸机提高拉速后铸坯质量及产量

3.1 拉速提高后铸坯质量情况

3.1.1 控制表面纵裂措施及效果

拉速提高后使结晶器弯月面热流密度增加,铸坯表面纵裂倾向增加,为避免表面纵裂废品(特别是包晶钢的表面纵裂废品),采取了以下措施(1)提高了包晶钢类保护渣的碱度,使保护渣析晶温度升高,使结晶器弯月面附近渣的热阻增大,对初生坯壳实行缓冷。(2)严格控制结晶器液面波动(液面波动范围控制在 ± 5 mm),稳定了弯月面传热。(3)严格控制钢水过热度,避免高温浇注。(4)降低钢水 S

含量,钢水平均S含量达到了0.011%的水平。(5)浇注过程保持拉速稳定,避免其他因素导致的铸机频繁调整拉速。通过采取以上措施,提高拉速后表面纵裂废品发生率仍维持在1%左右的较低水平。

3.1.2 拉速提高前后矫直区坯温变化及效果

拉速提高后矫直区铸坯表面温度明显上升,在拉速0.8 m/min条件下,矫直区铸坯角部温度在700~800℃,在拉速1.2~1.3 m/min条件下,矫直区铸坯角部温度在880~950℃。在拉速1.2 m/min和拉速0.8 m/min浇注情况下测量了2个浇次的矫直区铸坯角部温度,矫直区铸坯角部温度对比见图2。矫直区铸坯角部温度上升至900℃以上避开了矫直脆性区,解决了含Nb微合金钢种铸坯角部横裂问题。

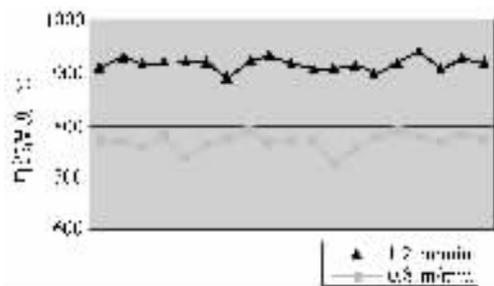


图2 不同拉速情况下矫直区铸坯角部温度

Fig.2 The corner temperature of slab in bending segment at different casting speed

在0.8 m/min拉速条件下,我厂浇注含Nb的微合金钢种(Q460C, X65, Z15)一检合格率在80%左右,拉速提高后此类钢种一检合格率上升至95%。

3.1.3 拉速提高后内部质量状况

1.3 m/min拉速条件下硫印结果见表6,硫印片见图3。从硫印结果可以看出铸坯中心偏析程度较轻,基本在C类1.0以下,中间裂纹在0.5级以下。由于拉速提高后,侧面坯壳厚度减薄,通过增加足辊侧面水量,减轻了侧面鼓肚的发生。与0.8 m/min拉速条件下相比板坯侧面鼓肚发生量略有增加,发生侧面鼓肚的铸坯鼓肚量一般在1~2 mm以内,在可以接受的范围内。

表6 1.3 m/min拉速条件下铸坯评级

Tab.6 Low power microscopic evaluation of the slab in casting speed 1.3 m/min

炉次	钢种	中心偏析	氧化夹杂	角部裂纹	中间裂纹	三角裂纹	针孔气泡
4A1339	Q345B	C类1.0	0.5	0	0.5	0.5	0
4B1516	16MnR	C类0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5
4A1686	A36	C类0.5	0.5	0	0	0.5	0
4B1373	Q460C	C类1.0	0.5	0.5	0.5	0	0



图3 1.3 m/min拉速铸坯硫印

Fig.3 The sulphur print of slab in casting speed 1.3 m/min

3.2 提高拉速后产量与连浇炉数

2004年2月板坯连铸机整体拆除一流后,拉速由0.7~0.9 m/min提高至1.1~1.3 m/min。拉速提高后,铸机产量稳步上升,单流铸机产量5月份已达到了月产9万t,达到了双流铸机的产量水平。

双流铸机时连浇炉数平均为7.5炉,改为单流铸机后,通过改进塞棒材质,同时浸入式水口实现在线快换,单流铸机连浇炉数已达到了6.7炉,为我厂板坯铸机的稳定高产创造了良好的条件。

4 结论

(1)通过对结晶器冷却水量,浸入式水口参数,二冷比水量,振动参数,保护渣性能指标等工艺参数进行调整,首钢二炼钢板坯铸机工作拉速由0.7~0.9 m/min提高至1.1~1.3 m/min。

(2)拉速提高后结晶器热流密度上升,结晶器铜板温度平均上升48℃,矫直区铸坯角部温度提高至880~950℃。保护渣性能指标调整后,保护渣耗量保持在0.42 kg/m²,液渣层厚度为9.9 mm,保持在较好水平。

(3)拉速提高后铸坯表面纵裂发生率维持在同一水平,含Nb的微合金钢种一检合格率由80%上升到95%,铸坯内部质量维持在同一水平。

(4)通过提高拉速和保证连浇炉数,单流铸机产量已达到了低拉速时双流铸机的产量水平。



参 考 文 献

- 1 W.H.Emling Breakout Prevention Ironmaker&Steelmaker ,1994 ,
No.5 50~51
- 2 蔡开科 . 连续铸钢原理与工艺 北京 冶金工业出版社 2002 224~
225 251~252
- 3 M.Wolf. Proc. 2nd European Conf. on Continuous casting June ,
1994
- 4 S.Sridhar. Power consumption and melting rates of continuous cast-
ing fluxes Ironmaking and steelmaking ,2002 ,Vol.29 ,No.3 :194~
198
- 5 M.S.Jenkins. Heat transfer in continuous casting mould PhD the-
sis ,Monash University ,Australia ,1998
- 6 卢盛意 . 板坯连铸拉速提高对铸坯质量的影响 ,连铸 ,2001 ,
No.3 39~41