

板坯连铸提高拉速工艺研究与实践

龚 坚, 王国连, 张 涛, 吕勇博, 刘 岩

(首钢股份有限公司第二炼钢厂, 北京 100041)

摘 要: 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,最高拉速达到了 1.4 m/min。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、保护渣耗量的变化等。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,含铌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 9.5 万 t,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

中图分类号: TF777.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2005)08-0026-04

Research and Practice on High-speed Wide Slab Continuous Casting

GONG Jian, WANG Guo-lian, ZHANG Tao, LÜ Yong-bo, LIU Yan

(No. 2 Steelmaking Plant, Shougang Corporation Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: The high-speed casting practice on slab caster in Shougang No. 2 steelmaking plant was studied. In order to reach a casting speed of 1.2-1.3 m/min, the mould cooling water density, the parameters of submerged entry nozzle, secondary cooling water density, oscillation parameters, the physical and chemical properties of mould powder, were adjusted and the maximum casting speed of 1.4 m/min was reached. The relationship between casting speed and local heat flux in mould, the copper plate temperature at different casting speed, the slab corner temperature in bending segment at different casting speed, the consumption of mould powder were analyzed. After that, the product quality and productivity were improved. Comparing with the product cast at 0.8 m/min, the product qualification rate of steel with Nb increased dramatically. With the increased casting speed, the productivity of this one-strand caster is ninety-five thousand tons per month the same as of the two-strand caster from which the one-strand caster was rebuilt.

Key words: slab caster; high casting speed; research; technology adjustment

首钢第二炼钢厂原有 1 台二机二流板坯连铸机,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,最大拉速达到了 1.4 m/min。为适应铸机提高拉速后正常生产的需要,本厂技术人员对连铸机各项工艺进行了研究和改进。

首钢二炼钢现有 2 座铁水脱硫站,3 座 210 t 顶底复吹转炉,钢水经 LF 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。

1 高拉速的工艺与实践

1.1 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

表 1 连铸机主要工艺参数

Table 1 Main parameters of caster

项目	参数
转炉出钢量/t	200
机型	直弧形连铸机
基本弧半径/m	9.5
冶金长度/m	31.558
结晶器长度/mm	900
直线段长度/mm	2731
矫直方式	12 点渐近矫直
振动方式	短臂四连杆非正弦
浇铸厚度/mm	220,250
浇铸宽度/mm	1600,1800
中间包容量/t	40
中间包液面深度/mm	1000
二冷方式	气雾冷却为主
工作拉速/(m·min ⁻¹)	1.1~1.3
最大拉速/(m·min ⁻¹)	1.4

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。铸坯厚度为 220 mm 规格低拉速与高拉速条件下结晶器冷却水量调整情况,宽面水量由 3300 L/min 调整为 3800 L/min,窄面水量由 460 L/min 调整为 480 L/min。

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。

1.2 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,本厂铸坯浇铸厚度以 220 mm 为主,在此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在 8~10 m/s,宽面水温升基本控制在 7~9 °C。

随拉速的提高结晶器热流密度明显上升,热流密度的计算见文献[1]。

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,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。

1.3 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,结果见表 2。点 1~10 为宽面中心

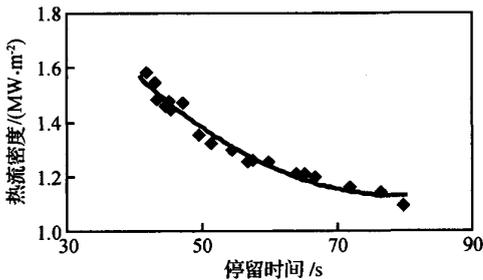


图 1 高碳钢坯壳在结晶器内停留时间与宽面热流密度的关系

Fig.1 Relationship between the wide face heat flux and the residence time of high carbon steel shell in the mold

表 2 结晶器铜板热模拟

Table 2 Results of temperature simulation for copper plate

位置	温度		差值
	(拉速 0.8 m/min)	(拉速 1.3 m/min)	
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
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

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、10);②当拉速由 0.8 m/min 上升到 1.3 m/min 时铜板温度平均上升 48 °C 左右。说明提高拉速后结晶器铜板温度基本在 320 °C 以内,在结晶器铜板再结晶温度以下。

1.4 振动参数的变化

本厂板坯铸机采用非正弦振动,振频随拉速进行变化,振幅为 4 mm,偏斜率 α 为 31%。振动轨迹偏差要求,沿浇铸方向 $\leq \pm 0.20$ mm,垂直于浇铸方向 $\leq \pm 0.15$ mm。

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。

1.5 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、不同钢水过热度、不同拉速的浇铸要求。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 1.0 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。

1.6 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,不利于高拉速浇铸。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了 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°,侧孔 55 mm×70 mm,浸入深度调整为 260~300 mm。从现场使用效果看,保护渣能均匀熔化,液面波动较小。

1.7 保护渣的调整及优化

1.7.1 保护渣调整的原则及分钢种保护渣的选择

保证液渣均匀地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。因此高速浇铸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,调整保护渣指标是保证生产顺行和铸坯质量的关键。

由于铸机浇铸的钢种较多,经过多次试验,充分考虑包晶钢表面纵裂倾向和高碳钢粘结漏钢的倾向,针对各钢种特性调整了相应保护渣的成分、粘度和熔化温度。本厂钢种分为四大类,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

表 3 调整前后保护渣物性对比

Table 3 Adjustment of physical properties of mould powder

项目	钢种	型号	碱度	粘度/(Pa·s)	熔点/℃
调整前	普碳系列	A	1.40	0.13	1100
	低合金系列	B	1.25	0.16	1180
	包晶钢	C	1.20	0.15	1190
	高碳钢	D	1.15	0.10	1050
调整后	普碳系列	A1	1.25	0.13	1070
	低合金系列	B1	1.30	0.12	1020
	包晶钢	C1	1.15	0.13	1150
	高碳钢	D1	0.90	0.14	1050

见表 3。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。

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。

1.7.2 保护渣耗量的变化

保护渣耗量是评价浇铸过程中保护渣润滑情况的一项重要指标。本厂在拉速 0.80 m/min 条件下,统计 4 个浇次 Q345B,保护渣平均耗量为 0.52 kg/m²,保护渣粘度为 0.16 Pa·s。在拉速为 1.15 m/min 条件下,统计 4 个浇次 Q345B,保护渣平均耗量为 0.42 kg/m²,保护渣粘度为 0.12 Pa·s。

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 0.30 kg/m²^[3~6],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。

2 铸机提高拉速后铸坯质量及产量

2.1 拉速提高后铸坯质量情况

2.1.1 控制表面纵裂措施及效果

拉速提高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,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,避免高温浇铸;④降低钢水硫的质量分数,钢水平均硫的质量分数达到了 0.011% 的水平;⑤浇铸过程保持拉速稳定,避免其他因素导致铸机频繁调

表4 1.3 m/min 拉速条件下铸坯评级
Table 4 Quality of the slabs cast at 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

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维持在小于0.5%左右的较低水平。

2.1.2 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为700~800℃,在拉速1.2~1.3 m/min条件下,矫直区铸坯角部温度为880~950℃。在拉速1.2 m/min和0.8 m/min条件下测量了2个浇次的矫直区铸坯角部温度(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,解决了含钕微合金钢种铸坯角部横裂问题。

在拉速0.8 m/min条件下,本厂浇铸含钕微合金钢种一检合格率为85%左右,拉速提高后此类钢种一检合格率上升至97%。

2.1.3 拉速提高后内部质量状况

拉速1.3 m/min条件下铸坯评级见表4。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。与拉速0.8 m/min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。

2.2 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月已达

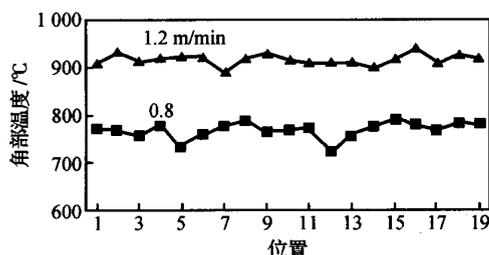


图2 不同拉速情况下矫直区铸坯角部温度
Fig.2 Slab corner temperature in bending segment at different casting speed

到了月产9.5万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6.8炉,为本厂板坯铸机的稳定高产创造了良好的条件。

3 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,拉速最高达到了1.4 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,含钕微合金钢种一检合格率由85%上升到97%,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] Emling W H. Breakout Prevention of Continuous Casting[J]. Iron and Steelmaker, 1994, (5): 50.
- [2] 蔡开科. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 224.
- [3] Wolf M. Fluxes of Slab Continuous Casting[A]. Proceedings of European Conference on Continuous Casting[C]. 1994.
- [4] Sridhar S. Power Consumption and Melting Rates of Continuous Casting Fluxes[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2002, 29 (3): 194.
- [5] Jenkins M S. Heat Transfer in Continuous Casting Mould[D]. Monash University, 1998.
- [6] 卢盛意. 板坯连铸拉速提高对铸坯质量的影响[J]. 连铸, 2001, (3): 39. (LU Sheng-yi. Effect of Casting Speed Increasing of Slab Caster on Slab Quality [J]. Continuous Casting, 2001, (3): 39.)