

减少 A36 含硼钢板坯角部横裂纹的工艺实践

于学森¹ 彭其春¹ 童志博¹ 曹建新² 刘红军² 周春泉² 杨秀枝² 刘文华²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 湖南华菱涟源钢铁公司, 娄底 417009)

摘要 A36 含硼钢($\% : 0.16 \sim 0.20\text{C}, 0.10 \sim 0.25\text{Si}, 0.20 \sim 0.40\text{Mn}, \leq 0.030\text{P}, \leq 0.015\text{S}, 0.010 \sim 0.030\text{Al}, 0.015 \sim 0.025\text{Ti}, 0.0010 \sim 0.0018\text{B}$) 1 550 mm × 230 mm 板坯的生产流程为铁水预处理-210 t BOF-钢包吹氩-LF-连铸工艺。通过控制 $[\text{C}] \geq 0.16\%$, 结晶器保护渣碱度由 1.23 提高到 1.27, 粘度由 0.165 Pa · s 降至 0.123 Pa · s, 在拉速 1.0 m/min 时负滑动时间由 0.22 s 降至 0.15 s, 降低结晶器和矫直段铸坯边部的冷却水量, 控制铸机对弧精度和辊缝精度, 铸坯表面未发现明显的横裂纹, 铸坯的修磨量由 0.18% 降至 0.03%。

关键词 A36 含硼钢 230 mm 板坯 角部横裂纹 保护渣 结晶器振动 冷却制度

Process Practice for Reducing Corner Transverse Crack of Cast Slab of Steel A36 Bearing B

Yu Xuesen¹, Peng Qichun¹, Tong Zhibo¹, Cao Jianxin², Liu Hongjun², Zhou Chunquan²,
Yang Xiuzhi² and Liu Wenhua²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Hunan Lianyuan Iron & Steel Corporation of Hualing, Loudi 417009)

Abstract Production flow sheet for 1 550 mm × 230 mm slab of steel A36 bearing B ($\% : 0.16 \sim 0.20\text{C}, 0.10 \sim 0.25\text{Si}, 0.20 \sim 0.40\text{Mn}, \leq 0.030\text{P}, \leq 0.015\text{S}, 0.010 \sim 0.030\text{Al}, 0.015 \sim 0.025\text{Ti}, 0.0010 \sim 0.0018\text{B}$) is hot metal pretreatment-210 t BOF-ladle argon blowing-LF-CC process. With the process measures including controlling $[\text{C}] \geq 0.16\%$, increasing basicity of mold powder from 1.23 to 1.27 and decreasing its viscosity from 0.165 pa · s to 0.123 pa · s, decreasing negative shrip time from 0.22 s to 0.15 s as casting speed 1.0 m/min, decreasing mold and cooling water rate of slab edge at straightening zone, improving accuracy of caster arc and roller gap, the corner transverse cracks are effectively reduced and the grinding rate decreases from original 0.18% to 0.03%.

Material Index Steel A36 Bearing B, 230 mm Cast Slab, Corner Transverse Crack, Mold Powder, Mold Oscillation, Cooling Scheme

目前 A36 含硼钢为国内钢厂带来很大的经济效益,但是 A36 含硼钢 100% 发生角部横裂纹,为了保证产品的质量,必须对所有铸坯进行修磨。2011 年 A36 含硼钢铸坯因修磨损失约 470 t,严重降低了铸坯的收得率,增加了生产成本,降低了企业的经济效益。为了减少铸坯角部横裂纹,针对 A36 含硼钢的连铸过程进行调研,优化相关工艺,最终较好地控制了铸坯角部横裂纹的发生。

1 角部横裂纹形貌与产生机理

钢厂有 2 台板坯连铸机, A36 含硼钢主要是在 1[#]铸机进行生产。1[#]铸机机型为圆弧形 1 机 2 流连续弯曲矫直,结晶器长度 900 mm,铸机半径 9.5 m,冶金长度 37.4 m;浇铸断面宽度为 900 ~ 2 150 mm,厚度为 210、230、250 mm,目前主要生产铸坯规格为 1 550 mm × 230 mm;设计拉速为 0 ~ 2 m/min,正常拉速为 0.9 ~ 1.2 m/min;结晶器为偏心正弦垂直振动。

A36 含硼钢的生产工艺为:铁水预处理-210 t BOF 冶炼-氩站-220 t LF 精炼-1[#]铸机浇铸。

A36 含硼钢角部表面横裂纹一般位于振痕波谷处,深度一般在 3 ~ 7 mm,个别的深达 8 mm。轧制后裂纹均存在于钢板距边缘 100 mm 以内,图 1 为轧制后横裂纹的形貌。

在初生坯壳形成过程中,伴随着包晶反应的发

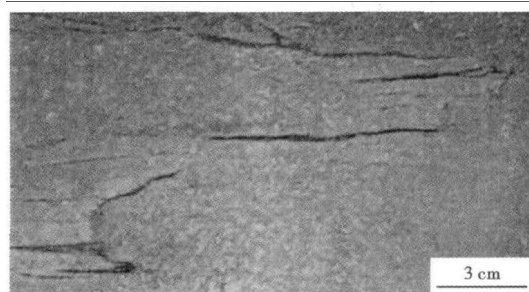


图 1 A36 含硼钢板横裂纹

Fig. 1 Transverse cracks of cast slab of steel A36 bearing B

生,初生坯壳受到结晶器的摩擦力、相变力、热应力、钢水静压力等,由于坯壳生长的不均匀性,上述应力超过凝固前沿钢的临界强度时,在坯壳薄弱处(一般为振痕的波谷处)产生微细裂纹,同时沿奥氏体晶界析出 BN、AlN 等沉淀物,产生晶间断裂;二冷区冷却不均匀或者局部冷却强度过大,或者对弧不准,扩大裂纹;在矫直区,弧形铸坯内弧受到张力,外弧受到压力,由于振痕的缺口效应产生应力集中,加速了横裂纹的形成和扩展,最终在铸坯的角部产生表面横裂纹^[1-3]。

2 横裂纹成因分析、工艺措施和效果

2.1 碳含量

钢厂典型的 A36 含硼钢的内控成分见表 1。根据 Fe-C 相图可以发现,钢水在凝固过程中会发生包晶反应,初生坯壳在弯月面凝固发生 $\delta \rightarrow \gamma$ 相变,体积收缩,导致结晶器初生坯壳脱离铜壁形成气隙,传热减慢,坯壳生长不均匀,坯壳薄弱处成为铸坯产生横裂纹的敏感区^[4];随着碳含量的增加, δ -铁含量减少,体积收缩量减少,且包晶反应后有富余的液相可弥补凝固前沿的收缩,使得铸坯裂纹发生倾向减弱^[5]。A36 含硼钢实际碳含量控制在 0.16% ~ 0.19%,为了减少包晶反应造成的体积收缩,故在生产 A36 含硼钢时,碳含量尽量控制在内控的上限。

表 1 A36 含硼钢内控成分 / %

Table 1 Inside-controlling chemical composition of steel A36 bearing B / %

C	Si	Mn	P	S	Al ₁	Ti	B
0.16 ~ 0.20	0.10 ~ 0.25	0.20 ~ 0.40	≤ 0.030	≤ 0.015	0.010 ~ 0.030	0.015 ~ 0.025	0.001 0 ~ 0.001 8

2.2 保护渣

A36 含硼钢由于包晶反应导致初生坯壳生长不均匀,裂纹发生倾向严重,为了避免裂纹的产生,需要限制结晶器的热通量,增加保护渣的热阻,以实现结晶器的“弱冷却”。通过适当提高保护渣碱度,降低保护渣粘度,可以提高保护渣膜的结晶化率,从而达到增加保护渣热阻的目的^[6-8]。通过钢厂现用的保护渣分析后,将碱度由 1.23 提高到 1.27,并提高熔化温度和融化速度,粘度由 0.165 Pa·s 降低到 0.123 Pa·s,从而提高保护渣热阻,降低结晶器的热通量。具体调整如表 2 所示,表 3 为优化后保护渣的成分。

2.3 结晶器振动

结晶器振动有利于铸坯脱模,但振动也使铸坯

表 2 优化前后保护渣性能

Table 2 Properties of mold powder before and after optimization

工艺	碱度	熔化温度/℃	熔化速度/s	粘度/(Pa·s)
优化前	1.23	1 085	22	0.165
优化后	1.27	1 155	27	0.123

表 3 优化后保护渣的成分 / %

Table 3 Ingredient of optimized mold powder / %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O + Li ₂ O + Na ₂ O	H ₂ O	F	C _{自由}
29.23	3.84	37.28	4.26	5.87	0.35	7.11	4.15

表面产生振痕,但是在振痕深处树枝晶粗大,夹渣、成分偏析严重,当铸坯受到应力作用振痕就成为裂纹的发源地,而且振痕愈深上述情况愈严重^[4]。振痕深度(d)与负滑动时间关系^[9]和负滑动时间(t_N)计算式如式(1)~(2)所示。由式(1)~(2)可知,降低负滑动时间可以降低振痕深度,而通过提高振动频率,降低振幅可以实现降低负滑动时间,因此连铸生产普遍都采用高频率低振幅。目前,结晶器振动频率最高可以达到 400 次/min,而振幅低至 $\pm(1 \sim 2)$ mm^[10]。

$$d = K \frac{t_N}{\sqrt{\eta}} \quad (1)$$

$$t_N = \frac{60}{\pi f} \cos^{-1} \left(\frac{1\ 000 \nu_c}{2\pi f S} \right) \quad (2)$$

$$S = 1.5 + 2 \nu_c \quad (3)$$

$$f = 120 - 25 \nu_c \quad (4)$$

$$S = 1 + 2 \nu_c \quad (5)$$

$$f = 170 - 20 \nu_c \quad (6)$$

式中: t_N -负滑动时间/s; η -保护渣粘度; K -比例系数; ν_c -拉速/(m·min⁻¹); f -振动频率/min⁻¹;S-振幅/mm。

钢厂 1# 铸机结晶器振动采用的是正弦振动方式,振幅(S)和振动频率(f)如式(3)和(4)。在典型拉速 1.0 m/min 的条件下,负滑动时间约为 0.22 s,靠近推荐值(0.1 ~ 0.25 s)^[11]的上限,故认为负滑动时间偏大。根据现场和设备条件,调整振幅(S)和振动频率(f)如式(5)和(6)所示。结晶器振动调整后,在典型拉速 1.0 m/min 条件下,负滑动时间降低到 0.15 s,降幅约为 32%。

2.4 冷却制度

钢中的 B、N 含量较高时,B 很容易和 N 结合生成 BN,并在晶界沉淀。这种沉淀在 γ 晶界上颗粒空间隙十分细小的 BN 有效地锁住晶界,阻碍原生 γ

晶界滑动,应力在晶界处集中而不能消除引起晶粒间断裂,从而降低钢的热塑性,使钢的裂纹敏感性增加^[2,12-13]。通过优化冷却制度,减小冷却强度,促进粗大 BN 沉淀的析出,可以减少原始奥氏体晶界处细小 BN 的析出,另外可以使坯壳均匀生长和铸坯均匀冷却,从而避免含硼钢铸坯上出现角部横裂纹。

2.4.1 结晶器水量

降低结晶器冷却强度,减缓结晶器传热,可以提高结晶器内铸坯坯壳生长的均匀性,从而降低铸坯裂纹发生率。将钢厂 1# 铸机结晶器水量由 4 200/400 L/min 降低到 4 000/380 L/min,铸坯角部横裂纹有明显改善。将结晶器水量由 4 000/380 L/min 降低到 3 800/360 L/min 和 3 600/340 L/min 时,铸坯的角部横裂纹均有不同程度的提升,这可能是由于结晶器水量 3 800/360 L/min 和 3 600/340 L/min 时,冷却强度过弱,铸坯的出结晶器坯壳厚度薄,坯壳强度低,不能够承受拉坯过程中的各种力,最终导致角部横裂纹严重。

2.4.2 二次冷却

由于硼的碳氮化物析出导致铸坯的第 3 脆性区加大加深,同时向高温移动。钢厂 1# 铸机矫直区铸坯表面温度设定为 940 °C,但实际温度为边部 800 ~ 830 °C,1/4 处 910 ~ 940 °C,1/2 处 880 ~ 900 °C,说明铸坯横向表面温度梯度大,角部温度明显小于铸坯 1/4 和 1/2 处,且低于设定温度。为了保证铸坯的均匀冷却,减少角部过冷而产生横裂纹,根据生产实际,将铸机弯曲段水量保持不变,宽面两边最外面的一列喷嘴关闭;其他段边部水量均降低为原来的 50%,中心与中间水量保持不变。另外加强了喷嘴的检查力度与频率,保证喷嘴不堵塞或者分叉喷水。

2.5 铸机设备精度

2.5.1 对弧精度

对弧精度对铸坯质量有很重要的影响,如果对弧差,铸坯通过该处会承受额外的机械应力,有可能造成铸坯边角裂纹和内裂等质量缺陷,严重的甚至会导致漏钢。钢厂 1# 铸机的对弧精度要求控制在 ± 0.5 mm,但是在实际生产中有时控制并不理想。故加强对弧的检测和检修力度,力求将对弧精度控制在 ± 0.5 mm。

2.5.2 辊缝精度

辊缝精度即开口度,开口度对铸坯质量也有重要影响,过大或过小都会使得铸坯通过扇形段时承受额外的机械应力,从而引起铸坯表面质量缺陷。钢厂 1# 铸机辊缝精度控制较差,铸机的辊缝精度要求在 ± 0.5 mm,但是实际生产过程中,辊缝精度在不同段均不时超出控制范围,这对于控制铸坯角部横裂纹是很不利的。为了提高铸坯表面质量,在实际生产中要提升操作水平,尽量将辊缝精度控制在 ± 0.5 mm。

通过上述工艺的改进,铸坯的表面质量得到明显改善:(1)在铸坯表面,肉眼未发现存在明显的横裂纹,振痕深度明显变浅;(2)铸坯的修磨量由 0.18% 降到 0.03%,且铸坯轧制后钢板裂纹出现几率并未提高,钢板质量符合要求。

3 结论

(1)钢厂 1# 铸机按原有工艺生产 A36 含硼钢铸坯角部出现大量横裂纹。

(2)通过提高钢水碳含量、改善保护渣的性能、优化结晶器振动及冷却制度,提高铸机对弧及辊缝精度等措施大幅降低了铸坯角部横裂纹的产生,铸坯修磨量由 0.18% 下降到 0.03%。

参考文献

- 魏 励,杨海滨.连铸含硼钢板坯表面横裂纹原因分析和措施[J].中国冶金,2008,18(12):17-21.
- 田树生,易耀云,杨 勇.45B 含硼钢裂纹成因分析及改进[J].金属材料与冶金工程,2010,38(5):36-48.
- 王宏静,岳尔斌.连铸板坯表面横裂纹成因分析[J].宽厚板,1999,5(6):8-10.
- 蔡开科,林 刚,毛敬华,等.连铸结晶器[M].北京:冶金工业出版社,2008:21-27.
- 高 仲,张兴中,姚书芳.包晶钢连铸裂纹形成机理的实验研究[C].第十五届全国炼钢学术会议文集,厦门.2008:511-516.
- 董 方,王艺慈,王宝峰.CSP 结晶器保护渣固态渣膜结构和矿相的分析[J].特殊钢,2006,27(1):21-23.
- 成泽伟,陈伟庆,李联生,等.保护渣性能对结晶器内传热的影响[J].北京科技大学学报,2003,25(6):525-527.
- 陈宝云,袁凡成.保护渣渣膜结构的分析[J].炼钢,2002,18(6):42-45.
- 张林涛,邓安远,王恩刚,等.连铸坯表面振痕的形成及影响因素[J].炼钢,2006,22(4):37-38.
- 蔡开科.连续铸钢 500 问[M].北京:冶金工业出版社,1997:40.
- 卢盛意.连铸坯质量[M].北京:冶金工业出版社,2003:159.
- 王雅贞.新编连续铸钢工艺及设备[M].北京:冶金工业出版社,2007:343.
- 周 科.日钢中厚板含硼钢边部裂纹机理及工艺改进[J].科技信息,2011,22:228-229.

于学森(1986-),男,硕士研究生,2010 年武汉科技大学毕业,冶金工艺研究。

收稿日期:2012-06-20