

含硫 45 钢铸坯缺陷分析与工艺优化

林 鹏 张洪才 印传磊 翟万里 许光乐

(江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司技术中心, 淮安 223002)

摘 要 含硫 45 钢($\% : 0.42 \sim 0.50\text{C}, 0.17 \sim 0.37\text{Si}, 0.50 \sim 0.80\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, 0.035 \sim 0.045\text{S}$)的 $\Phi 44$ mm 轧材探伤合格率低, 轧材表面存在裂纹缺陷, 通过分析是由 150 mm \times 150 mm 铸坯缺陷导致的。对铸坯表面酸洗发现裂纹缺陷, 采用金相显微镜对裂纹进行分析。分析认为是由结晶器铜管 R 角太小、角部冷却太强、保护渣熔化不好、传热和润滑效果差以及二次冷却不均匀导致的。通过对结晶器铜管、保护渣及二次冷却水量进行工艺优化, 改善结晶器冷却传热和二段段喷淋冷却效果, 提高铸坯冷却均匀性, 使得铸坯缺陷明显改善, 轧材合格率大幅提高。

关键词 含硫 45 钢 铸坯 表面裂纹 结晶器铜管 保护渣 二次冷却

Analysis on Defects of Casting Billet of 0.45C Steel Bearing Sulfur and Process Optimization

Lin Peng, Zhang Hongcai, Yin Chuanlei, Zhai Wanli and Xu Guangle

(Technology Center, Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huaian 223002)

Abstract Facing the quality problems of low pass rate and crack defects on the surface of the $\Phi 44$ mm metal rolling 45 with sulfur($\% : 0.42 \sim 0.50\text{C}, 0.17 \sim 0.37\text{Si}, 0.50 \sim 0.80\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, 0.035 \sim 0.045\text{S}$), the analysis is that the defects are caused by defects in the 150 mm \times 150 mm casting billet. The crack defects are found on the surface of the slab and analyzed by metallographic microscope. The result indicates that the defect is caused by the strong cooling of the small R of crystallizer copper tube and the poor heat transfer and lubrication effect of the shielding flux and the asymmetrical secondary cooling. The process optimization of the crystallizer copper tube and the shielding flux and the second cooling is carried out. It improves the cooling heat transfer of the mold and the cooling effect of the secondary cooling section and the cooling uniformity of casting billet. The result shows the defects of casting billet have been effective controlled and the qualified rate of rolled material has been greatly improved.

Material Index 0.45C Steel Bearing Sulfur, Casting Billet, Surface Crack, Crystallizer Copper Tube, Mold Shielding Flux, Secondary Cooling

随着钢铁行业的不断发展, 对钢材的质量要求越来越严格, 铸坯的表面裂纹缺陷已成为质量提升的瓶颈, 在后续轧制过程中不易被消除, 成为轧材探伤合格率低的一个主要原因。

1 含硫 45 钢工艺流程和质量现状

含硫 45 钢主要用于传动轴的制造, 必须具有良好的切削加工性。工艺流程为: 铁水预处理 \rightarrow 90 t 顶底复吹转炉 \rightarrow LF 精炼 \rightarrow 真空脱气 \rightarrow 连铸(150 mm \times 150 mm 方形连铸坯) \rightarrow 连轧, 化学成分见表 1。连铸机弧形半径为 10 m, 连铸过程采用保护浇注, 中间包过热度控制在(20 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$), 结晶器采用加硫钢专用保护渣, 结晶器电磁搅拌为 250 A、2.0 Hz, 末端电磁搅拌为 150 A、7.0 Hz, 结晶器水量为 2 000 L/min, 拉速 1.8 m/min。

铸坯在轧制成 $\Phi 44$ mm 后轧材探伤合格率低, 对轧材缺陷处检查发现表面裂纹, 如图 1(a) 所示, 影响钢材的探伤合格率。对轧材横向裂纹用 4% 硝酸酒精进行腐蚀, 如图 1(b) 所示, 从高倍金相分析

表 1 含硫 45 钢的化学成分/ $\%$

Table 1 Chemical composition of 0.45C steel bearing sulfur / $\%$

C	Si	Mn	P	S
0.42 ~ 0.50	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤ 0.035	0.035 ~ 0.045

看裂纹处存在严重的脱碳现象, 这主要是由于铸坯表面存在缺陷造成的^[1]。为进一步确认裂纹源对应铸坯的具体位置, 对试样进行苦味酸腐蚀, 结果如图 1(c) 所示, 从枝晶形貌上看该处裂纹所在位置对应方坯的角部。

对铸坯取样进行表面酸洗, 如图 2 所示, 发现表面存在通长的纵向裂纹, 分布不规则, 铸坯表面中心和角部附近位置都有, 裂纹处有凹陷且无振痕, 周围有保护渣残余, 同时铸坯表面存在振痕不规则现象。为此, 通过对铸坯裂纹产生的原因进行分析, 提出相应的改进措施。

2 铸坯裂纹原因分析

对铸坯不同位置裂纹各取一块试样进行高倍金

相分析,如图 3(a)所示,裂纹最大深度在 0.7 mm 左右,对高倍金相进行苦味酸腐蚀,显现出枝晶形貌,如图 3(b)所示,裂纹顺着枝晶生长方向,沿着晶界处扩展和延伸,根据裂纹的位置特点和表面情况,分析认为裂纹主要是由结晶器铜管、结晶器用保护渣和二次冷却等三方面原因造成的。

2.1 结晶器铜管

连铸生产过程中连铸坯柱状晶基本上是垂直于坯壳面方向生长的,生长过程中会使一些在晶间聚集,凝固前沿的低熔点化合物最终会在对角线交界处附近汇聚,促使对角线和晶间塑性和强度都大大降低^[2]。目前使用的结晶器铜管的 R 角为 8 mm,角度偏小造成铸坯角部受两面的冷却较快,与表面中心区域冷却强度不同,导致铸坯表面整体冷却不均匀,产生热应力,塑性和强度较低的晶间因此形成裂纹^[3],如图 4(a)所示。裂纹处伴随着坯壳凹陷产生,凹陷处涌入大量保护渣,传热冷却效果较差,会导致坯壳晶粒粗化^[4],当受到热应力作用时容易沿着晶界产生细微裂纹,当固液相变在晶界处受到热应力作用时裂纹就会沿着晶界和塑性及强度较低的晶间扩展延伸。

由于结晶器铜管锥度为 1.6 mm,整体偏小,部分铸坯冷却收缩后结晶器固定支撑铸坯作用不够,造成了铸坯脱方^[5],使得铸坯产生内应力,促使铸坯的缺陷进一步扩大。

2.2 结晶器保护渣

从铸坯表面宏观观察发现裂纹处无振痕,周围残余保护渣,保护渣熔化效果不好,起不到较好的润滑和传热作用,加硫钢保护渣主要成分和性能指标如表 2 所示,其中 R₂O 为碱性氧化物。

该钢种生产浇注时所使用的保护渣液渣层厚度在 12 mm 左右,渣耗在 0.40 kg/t 左右,根据生产实践及其它钢种生产过程保护渣使用情况,认为生产该钢种时保

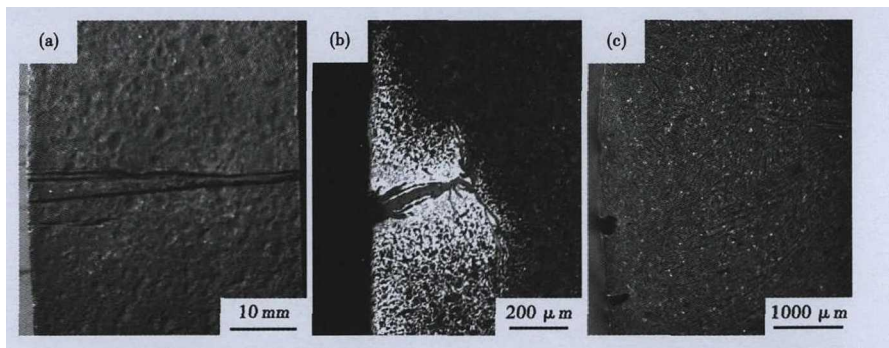


图 1 (a) 轧材表面裂纹形貌;横截面表面裂纹形貌:(b) 硝酸腐蚀,(c) 苦味酸腐蚀
Fig.1 Surface crack of rolled product (a), morphology of surface crack at cross section of rolled product by nitric acid etched (b) and picric etched (c)

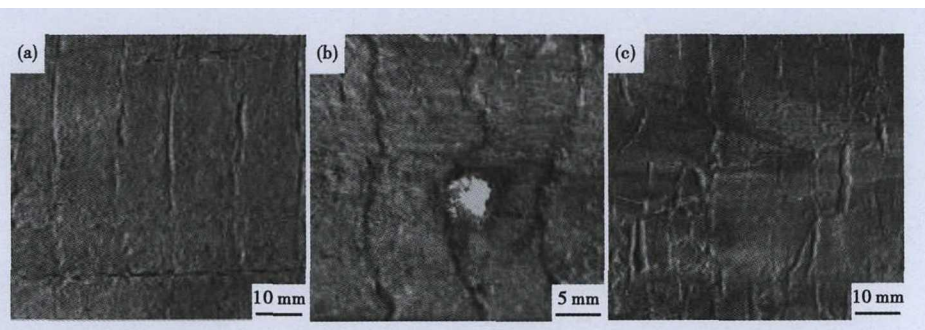


图 2 铸坯表面缺陷:(a) 表面裂纹;(b) 残余保护渣;(c) 不规则振痕
Fig.2 Defect of casting billet surface: (a) surface cracking, (b) residual shielding flux, (c) irregular vibration mark

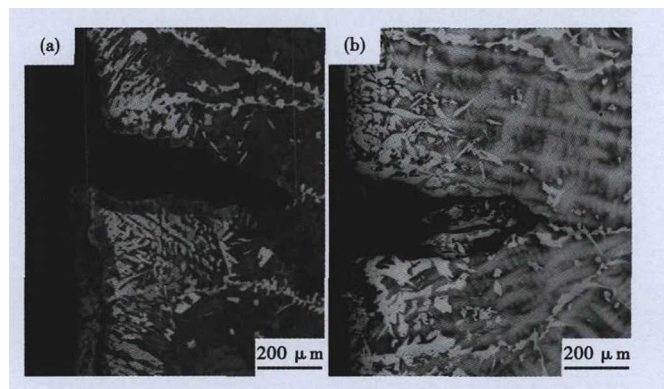


图 3 铸坯表面裂纹:深度测定(a);苦味酸腐蚀(b)
Fig.3 Surface crack of casting billet:(a) depth measurement, (b) crack dendrite, picric etched

表 2 含硫 45 钢保护渣主要成分和物理性能指标(均值)

Table 2 Main ingredient and index of physical performance for 0.45C steel bearing sulfur (average value)

指标	成分/%					碱度 (R)	粘度 1 300 ℃/ (Pa · s)	1 350 ℃ 熔速/s	熔点/ ℃
	SiO ₂	CaO	R ₂ O ⁽¹⁾	F	C _固				
均值	35.25	25.65	4.59	1.81	0.73	16.52	0.79	40	1 081

注:(1)R₂O- 碱性氧化物

护渣液渣层厚度和渣耗较高。从保护渣性能指标及使用效果看,保护渣使用对产生裂纹的影响主要是

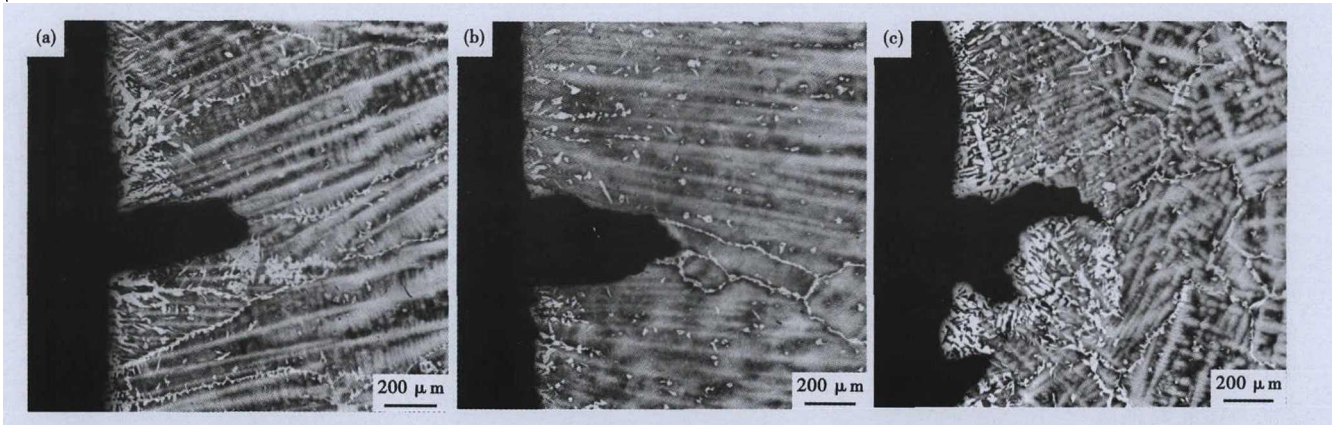


图 4 铸坯角部表面裂纹(a);铸坯中间纵向表面裂纹(b);铸坯近边部表面裂纹(c)

Fig. 4 Surface crack at corner of casting billet (a), longitudinal surface crack at middle of casting billet (b), surface crack near side of casting billet (c)

由粘度太小以及熔化温度偏低熔化速度较快造成的^[6]。粘度太小会造成渣膜过厚,使润滑和传热不良。保护渣的熔化温度过低,熔化速度加快,液体渣层增厚,流入结晶器与铸坯之间的液体保护渣增加。保护渣膜增厚,一方面保护渣膜增厚使得坯壳冷却较慢,晶粒粗大^[4],如图 4(b)所示,铸坯晶界强度降低,另一方面铸坯传热受到影响,铸坯温度升高,坯壳较薄。

当铸坯因方坯角部冷却自身原因及铸坯表面液渣层厚度不均匀导致在结晶器内冷却不均匀,产生应力使得晶界强度较弱位置沿着枝晶方向形成裂纹,硫化物偏析使得晶间强度再次降低,导致裂纹沿着枝晶方向扩展延伸^[3]。裂纹处有凹陷证明保护渣润滑不好,渣厚不均,铸坯下行阻力较大,表面受应力作用,由于表面晶粒粗大强度降低,同样会导致裂纹产生。

2.3 二次冷却

铸坯出结晶器后冷却过程中固液相变,奥氏体向铁素体转变。现场生产过程发现二冷区喷嘴不对中,二冷足辊段水压偏低,水雾化冷却效果不佳,水未能均匀喷到铸坯表面,铸坯表面温度偏高不均匀,如图 5(a)所示,多方面因素使得铸坯在二冷段冷却不均匀。

根据数值模拟结果,铸坯出结晶器存在较大的回温,当铸坯冷却不均匀时,会产生热应力,由于硫化物偏析,晶界塑性和强度较低,裂纹沿着晶界处扩展和长大,如图 4(c)所示,裂纹沿着晶界处进行延伸。

3 改进措施及效果

3.1 扩大结晶器铜管 R 角

铸坯角部受两面冷却,冷却较强,导致铸坯整体冷却不均匀,为提高铸坯角部冷却均匀性,优化铜管设计,将铜管的 R 角由 8 mm 改为 12 mm,使铜管角部和整体传热更均匀。对改进后铜管生产的铸坯表

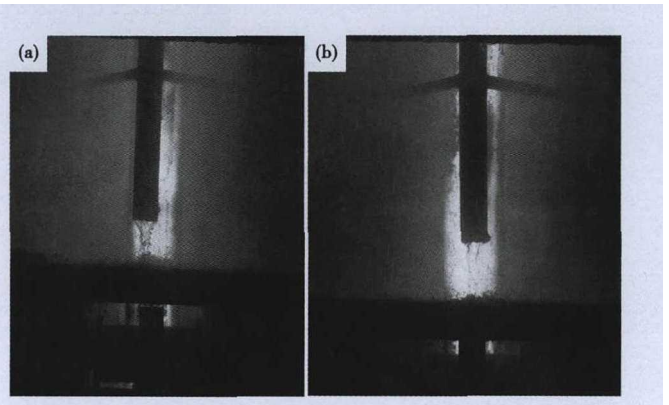


图 5 工艺优化前(a)和二次冷却优化后(b)活动段下口铸坯表面温度情况

Fig. 5 Surface temperature of casting billet at activity down segment before optimization (a) and after optimization of secondary cooling process (b)

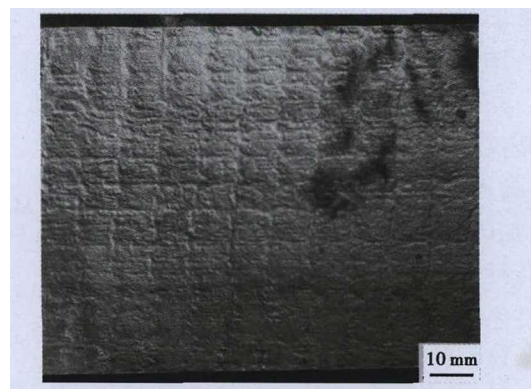


图 6 铸坯表面形貌,结晶器铜管 R 角半径 12 mm

Fig. 6 Morphology of surface of casting billet, crystallizer copper tube R angle radius 12 mm

面进行酸洗,如图6所示,未发现明显的铸坯角部裂纹和凹陷。

3.2 结晶器保护渣优化

为保证保护渣具有较好的润滑和传热效果,对厂家提出相应的要求进行保护渣优化,设计合理的熔化温度、渣量消耗和渣层厚度,优化后的保护渣主要成分和性能指标如表3所示^[7]。

对改进后的保护渣进行试用后未发现铸坯表面有裂纹缺陷和保护渣残余,振痕规则,如图7所示,保护渣起到了良好的润滑和传热作用,渣量消耗和渣层厚度比较合理。

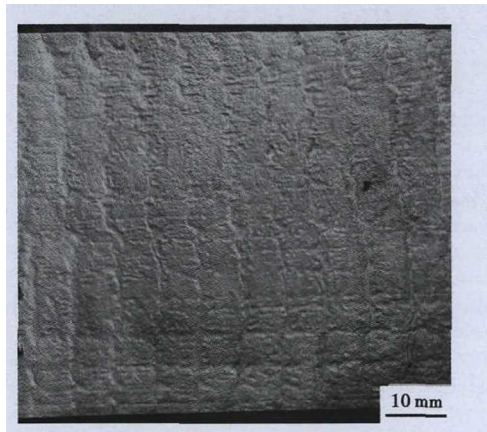


图7 结晶器保护渣优化后铸坯表面低倍

Fig.7 Surface macrostructure of billet after mold shielding flux optimization

3.3 合理的二次冷却工艺

为改善二冷段冷却效果,做好喷淋架对中,喷嘴清理维护工作,将二冷比水量从0.35 L/kg提高到0.45 L/kg。跟踪生产过程,发现足辊压力从原先的0.12 MPa提高到现有0.36 MPa,实际喷淋雾化效果较好,二冷活动段下口铸坯表面情况如图5(b)所示,铸坯温度分布均匀。

3.4 应用效果

通过采用上述工艺改进措施后,铸坯表面质量改善明显,对铸坯检查未发现明显的裂纹缺陷,Φ44 mm含硫45钢轧材探伤合格率同样得到大幅度提高,从之前的65%合格率提高到了93%,提高了生产效益。

表3 优化后加硫45钢保护渣主要成分和物理性能指标(均值)

Table 3 Main ingredient and index of physical performance for steel 45 bearing sulfur after optimization, average value

指标	成分/%					碱度 (R)	粘度1300℃/ (Pa·s)	1350℃ 熔速/s	熔点/ ℃
	SiO ₂	CaO	R ₂ O ⁽¹⁾	F	C _固				
均值	38.08	20.28	6.25	3.34	0.53	14.16	0.62	49	1184

注:(1)R₂O-碱性氧化物

4 结论

(1)结晶器铜管R角偏小,结晶器保护渣润滑效果不好,结晶器及二冷区冷却不均匀是含硫45钢铸坯表面裂纹缺陷的产生原因。

(2)0.45 L/kg二冷水流量能满足150 mm×150 mm方连铸含硫45钢工艺配水要求,足辊水压力明显提升,足辊段冷却效果较好,铸坯表面温度更均匀。

(3)通过对结晶器铜管R角、保护渣和二次冷却优化,含硫45钢铸坯表面裂纹缺陷明显改善。

(4)通过对含硫45钢铸坯表面质量改进,轧材表面缺陷明显减少,探伤合格率从65%提高到93%。

参考文献

- [1] 刘进步,张新文,张庆武.圆坯表面网状裂纹产生原因及控制[J].连铸,2016,41(2):66-70.
- [2] 朱苗勇,杜刚,阎立懿,等.现代冶金学(钢铁冶金卷)[M].北京:冶金工业出版社,2010:344-346.
- [3] 蔡开科.连铸坯质量控制[M].北京:冶金工业出版社,2010:216-217.
- [4] 李殿明.连铸结晶器保护渣应用技术[M].北京:冶金工业出版社,2008.
- [5] 佐祥均,袁钢锦,阎建武.连铸过程中方钢脱方的原因与预防措施的研究[J].连铸,2015,40(5):29-33.
- [6] 米源.结晶器保护渣的性能和使用工艺[J].连铸,2007,4(1):39-42.
- [7] 王杏娟,樊亚鹏,朱立光,等.碱度对连铸保护渣结晶率的影响[J].特殊钢,2017,38(2):6-8.

林 鹏(1988-),男,硕士(2015年江苏科技大学),助理工程师,2012年江苏科技大学(本科)毕业,连铸工艺研究。

E-mail:linpeng969891@163.com

收稿日期:2018-04-23