

60Si2Mn 弹簧钢 150 mm × 150 mm 铸坯缺陷分析与工艺优化

林 鹏^{1,2}, 许正周^{1,2}, 印传磊^{1,2}, 张洪才^{1,2}, 翟万里^{1,2}, 许光乐^{1,2}

(1 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司技术中心, 淮安 223002;

2 江苏省轨道交通用特殊钢新材料重点实验室, 淮安 223002)

摘要: 针对 60Si2Mn 弹簧钢($\% : 0.56 \sim 0.64\text{C}, 1.50 \sim 2.00\text{Si}, 0.70 \sim 1.00\text{Mn}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.020\text{S}$) 的 150 mm × 150 mm 连铸坯角部存在横向表面裂纹缺陷问题, 通过采用金相显微镜和扫描电镜对铸坯角部横向表面裂纹缺陷进行分析及试验比对。结果表明: 结晶器铜管锥度过大、拉坯阻力大、保护渣润滑效果差以及二次冷却不均匀导致角部产生横向表面裂纹。通过将结晶器铜管锥度从 2.2 mm 降到 1.6 mm、保护渣熔化温度从 1 182 °C 降到 1 072 °C、粘度从 0.76 Pa · s 降到 0.52 Pa · s 以及二次冷却比水量从 0.45 L/kg 降到 0.32 L/kg 等措施, 降低铸坯在铜管内拉坯阻力, 改善结晶器冷却传热和二冷段喷淋冷却效果, 提高铸坯冷却均匀性, 使得铸坯缺陷得到有效控制, 铸坯表面探伤合格率从 35% 提高到 92%。

关键词: 60Si2Mn 弹簧钢; 150 mm × 150 mm 铸坯; 表面裂纹; 结晶器铜管; 保护渣; 二次冷却

Defects Analysis and Process Optimization of 150 mm × 150 mm Casting Billet of 60Si2Mn Spring Steel

Lin Peng^{1,2}, Xu Zhengzhou^{1,2}, Yin Chuanlei^{1,2},
Zhang Hongcai^{1,2}, Zhai Wanli^{1,2}, Xu Guangle^{1,2}

(1 Technology Center, Huaigang Special Steel Co., Ltd., Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002;

2 Key Laboratory of Special Steel New Materials for Rail Traffic of Jiangsu Province, Huai'an 223002)

Abstract: Facing the quality problems of transverse surface crack at the corner of 150mm × 150mm continuous casting billet of 60Si2Mn spring steel($\% : 0.56 \sim 0.64\text{C}, 1.50 \sim 2.00\text{Si}, 0.70 \sim 1.00\text{Mn}, \leq 0.025\text{P}, \leq 0.020\text{S}$), the transverse surface crack defects at the corner of casting billet are analyzed by metallographic microscope and SEM and it is carrying out test comparison. The result indicates that the defect is caused by the large drag force of the large taper of crystallizer copper tube and the poor lubrication effect of shielding flux and the uneven secondary cooling. By reducing the mold steel tube taper from 2.2 mm to 1.6 mm and the melting temperature of protective slag from 1 182 °C to 1 072 °C and its viscosity from 0.76 Pa · s to 0.52 Pa · s and the secondary specific water from 0.45 L/kg to 0.32 L/kg, to reduce the drag of casting billet in copper tube and improve the cooling heat transfer of the mold, the cooling effect of the secondary cooling section and the cooling uniformity of casting billet, the defects of casting billet have been effective controlled, and the qualified pass rate for casting billet surface defect detection increases from 35% to 92%.

Material Index: 60Si2Mn Spring Steel; 150 mm × 150 mm Casting Billet; Surface Crack; Crystallizer Copper Tube; Mold Shielding Flux; Secondary Cooling

60Si2Mn 弹簧钢广泛应用于铁路、汽车等交通运输领域, 对其力学性能(特别是弹性极限、强度极限、屈强比)、抗弹减性能、抗疲劳性能具有很高的要求^[1-3]。但是在弹簧的加工和使用过程中, 断裂现象偶有发生, 弹簧钢表面裂纹缺陷是造成弹簧发生断裂的主要原因之一^[4]。

目前关于弹簧钢表面质量控制方面的相关研究较少^[5-11]。针对生产 60Si2Mn 弹簧钢时铸坯表面存在角部横向裂纹问题, 通过对其缺陷产生机理及生产过程影响因素进行分析, 提出改进措施, 解决了

60Si2Mn 弹簧钢连铸生产中的质量问题。

1 60Si2Mn 弹簧钢工艺流程和质量现状

60Si2Mn 弹簧钢主要化学成分见表 1, 生产工艺流程为: 铁水 KR 预处理 → 90 t 顶底复吹转炉 → LF → RH → 150 mm × 150 mm 方坯连铸 → 轧制。采用半径为 10.25 m 的全弧形连铸机, 浇注过程采用氩气保护, 中间包钢水过热度控制在 15 ~ 25 °C, 结晶器保护渣为高碳钢专用保护渣, 工艺参数见表 2。

铸坯在轧制成轧材后探伤合格率只有 45% 左

表 1 60Si2Mn 弹簧钢的主要化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 60Si2Mn spring steel/%				
C	Si	Mn	P	S
0.56~0.64	1.50~2.00	0.70~1.00	≤0.025	≤0.020

表 2 60Si2Mn 弹簧钢的连铸工艺参数

Table 2 Continuous casting process parameters of 60Si2Mn spring steel

结晶器电 磁搅拌	结晶器水量/ (m ³ ·h ⁻¹)	二冷比水量/ (L·kg ⁻¹)	拉速/ (m·min ⁻¹)	末端电 磁搅拌
320A/6.0Hz	150	0.45	2.10	250A/7.0Hz

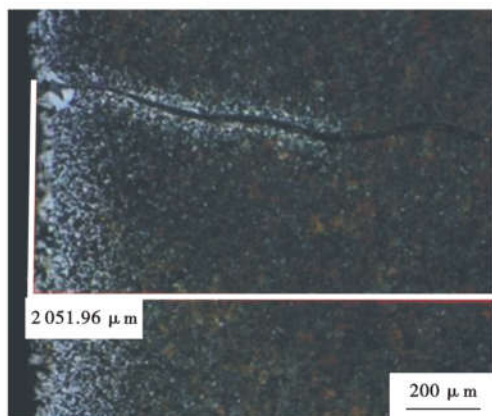


图 1 工艺优化前 60Si2Mn 钢轧材表面裂纹形貌

Fig.1 Surface crack morphology of rolled product of 60Si2Mn steel before process optimization

对 60Si2Mn 钢铸坯进行抛丸、磁粉探伤及取样表面酸洗,结果如图 2 所示,酸洗及探伤均发现铸坯角部存在表面横向裂纹,分布在铸坯内弧侧振痕附近,同时铸坯表面存在不明显振痕的情况。

2 铸坯裂纹原因分析

如图 3 所示,4% 硝酸酒精溶液腐蚀铸坯裂纹深度多数在 0.8 mm 左右,个别超过 2 mm,裂纹两侧脱碳严重,对裂纹进行苦味酸腐蚀观察枝晶生长方向,裂纹上部分为穿晶断裂,下部分为沿晶断裂,向

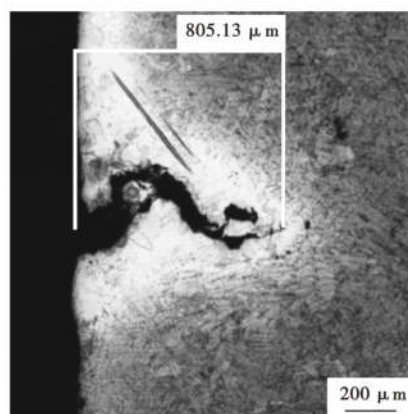


图 3 60Si2Mn 钢铸坯表面裂纹光学显微镜分析

Fig.3 Analysis on surface crack of casting billet of 60Si2Mn steel by optical microscope

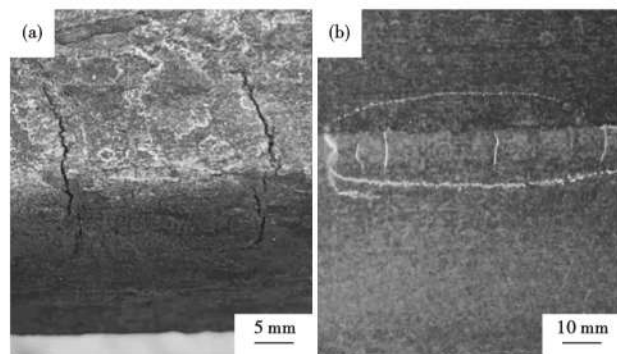


图 2 工艺优化前 60Si2Mn 钢铸坯表面缺陷:(a) 酸洗;(b) 磁粉探伤

Fig.2 Surface cracking of casting billet surface of 60Si2Mn steel before process optimization:(a) acid pickled;(b) magnetic particle tested

右,对轧材缺陷处检查发现表面裂纹,对轧材裂纹进行高倍分析,如图 1 所示,裂纹较深,图中为裂纹上半部分形貌,从 4% 硝酸酒精溶液腐蚀金相结果看,裂纹两侧存在轻微脱碳,有 5 mm 左右的深度,分析认为是因为铸坯表面存在缺陷而导致的^[12];从苦味酸腐蚀金相结果看,枝晶存在明显的交叉形貌,说明该裂纹处于对应方坯的角部位置。

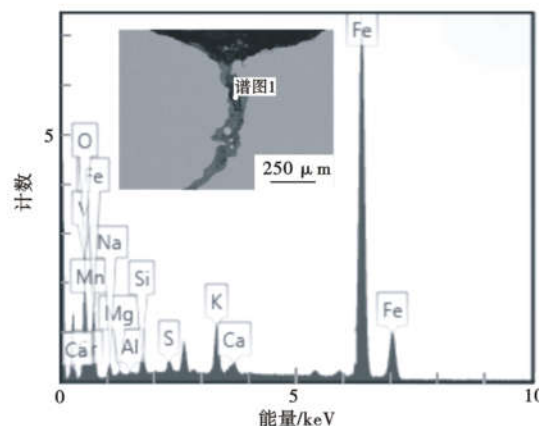


图 4 60Si2Mn 钢铸坯表面裂纹能谱扫描

Fig.4 Energy spectrum scanning of surface cracks on casting billets of 60Si2Mn steel

内部扩展。扫描电镜分析如图 4,裂纹处含有 Na、K 等元素的夹杂物,其质量分数为 Na = 2.19%、K = 3.38%,认为该夹杂物为保护渣所致^[13]。

2.1 结晶器铜管

连铸过程结晶器向上运动速度大于拉速,处于正滑脱期间,气隙中的液渣被挤出到弯月面渣层中,

渣圈突出渣层,结晶器向下运动速度大于铸坯拉速,处于负滑脱期间,液渣被带入到坯壳与结晶器缝隙中起润滑作用,渣圈压力迫使弯月面坯壳向内弯曲形成振痕,渣圈挤压力消失,钢水静压力又把弯月面初生坯壳边缘推向渣圈,这种相互运动一直持续到振动周期结束,从而形成铸坯表面的振痕^[14]。振痕处与铜管壁脱离产生间隙,影响传热效率,冷却效果降低,使坯壳晶粒充分生长粗大,降低了铸坯强度。弹簧钢属于高碳钢,凝固过程体积收缩小,目前使用的结晶器铜管的锥度为 2.2 mm,大锥度使得铸坯在连铸拉坯过程产生较大的阻力,会在坯壳强度最低的地方产生裂纹缺陷,以及沿着结合力较弱的晶界扩展延伸。

对使用后的铜管内表面进行检查,如图 5(a)所示,内弧侧角部镀铬层磨损严重,说明生产过程中铸坯拉坯阻力大,在铸坯强度较低的角部振痕位置产生了表面横向裂纹。

2.2 结晶器保护渣

60Si2Mn 弹簧钢生产时使用的优化前后保护渣主要化学成分和物理性能指标见表 3。优化前对保护渣进行性能检测,液渣层厚度约为 6 mm,统计渣耗量在 0.20 kg/t 左右。从铸坯表面酸洗检查发现振痕不明显,分析认为该钢种生产时使用的保护渣不具有良好的流动性,起不到较好的润滑和传热作用^[15]。由于保护渣粘度太大及熔化温度偏高熔化速度较慢等两方面原因导致铸坯产生裂纹^[16]。

2.3 二次冷却

弹簧钢铸坯出二冷区域后铸坯角部出现发黑现象,如图 6(a)所示,说明铸坯冷却不均,表面存在温度不均匀。对铸坯进行手动测温,铸坯表面中心位置在 1 100 ℃左右,角部位置在 610 ℃左右,温差较大。

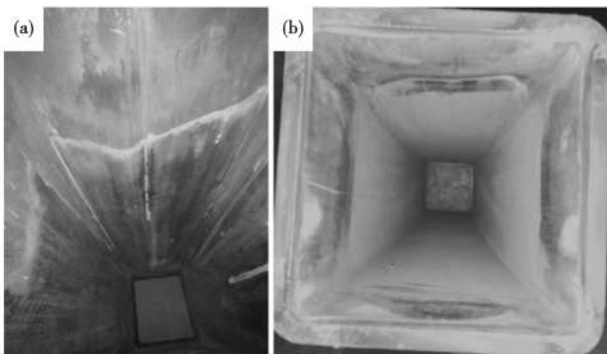


图 5 连铸后结晶器铜管内壁形貌:(a)优化前,锥度 2.2 mm;(b)优化后,锥度 1.6 mm

Fig.5 Morphology of copper tube inner wall of mold after casting:(a) taper 2.2 mm, before optimization;(b) taper 1.6 mm after optimization

表 3 优化前后 60Si2Mn 弹簧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 protective slag for 60Si2Mn spring steel before and after optimization(average value)

工艺	成分/%					1 300 ℃粘度/ (Pa·s)	熔点/ ℃
	SiO ₂	CaO	R ₂ O	F	C _固		
优化前	37.36	25.92	5.51	2.36	7.42	0.76	1 182
优化后	30.59	20.75	8.28	3.99	15.41	0.52	1 072

注:R₂O-碱性氧化物

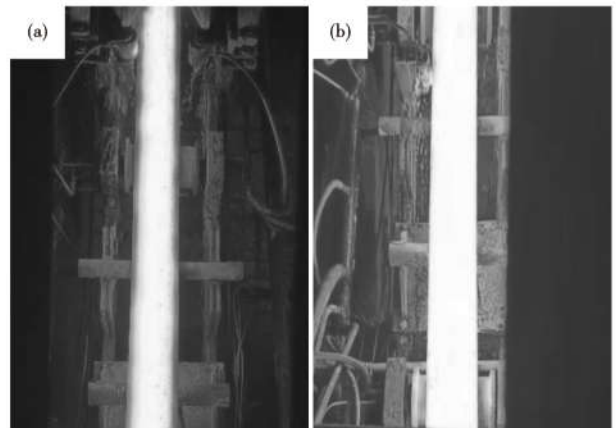


图 6 60Si2Mn 钢二冷后 150 mm × 150 mm 铸坯表面:(a)优化前,二冷水 0.45 L/kg;(b)优化后,二冷水 0.32 L/kg
Fig.6 Surface of 150 mm × 150 mm casting billet of 60Si2Mn steel after secondary cooling:(a) before optimization, secondary cooling water 0.45 L/kg;(b) after optimization, secondary cooling water 0.32 L/kg

铸坯出结晶器后表面温度会有明显的升高,在铸坯受到不均匀冷却时,热应力会随之产生,存在的裂纹在热应力作用下会沿着结合力较弱的晶界发生扩展延伸现象^[17]。

3 改进措施及效果

3.1 缩小结晶器铜管锥度

高碳钢铸坯凝固过程发生的体积收缩较小,将铜管的锥度由 2.2 mm 降到 1.6 mm,使铸坯在拉坯过程中更加顺行。对生产使用后的优化铜管进行内表面检查,如图 5(b)所示,角部镀铬层无明显磨损,基本保持完整。

对铜管优化后生产的弹簧钢铸坯取样进行表面酸洗检查,未发现明显的铸坯表面角部横向裂纹,但振痕依然不太明显,对铸坯进行抛丸、磁粉探伤,一次合格率从原先的 35% 提高到 76%。

3.2 结晶器保护渣优化

通过对保护渣成分的调整设计,提高 Na₂O、Li₂O、F 含量^[18] 和降低 Al₂O₃ 含量,熔化温度由

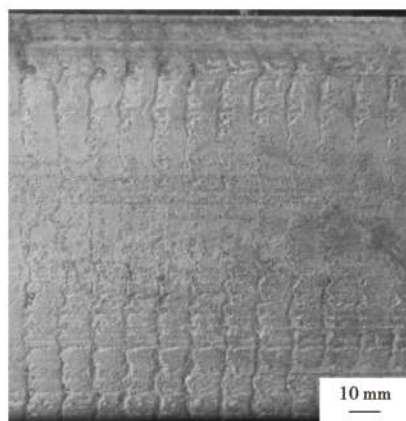


图 7 优化后 60Si2Mn 钢铸坯表面低倍组织

Fig. 7 Surface macrostructure of cast billet of 60Si2Mn steel after optimization

1 182 ℃降低到1 072 ℃,1 300 ℃粘度由 0.76 Pa·s 降低到 0.52 Pa·s,保证该保护渣在生产弹簧钢过程中具有稳定的渣耗量和液渣层厚度,以及良好的润滑效果。

跟踪优化保护渣的使用过程,通过测量得到液渣层厚度在 8 mm 左右,渣耗量在 0.32 kg/t 左右,渣圈较少,保护渣熔化保温效果较好,充分发挥了保护渣的润滑作用。对保护渣优化后生产的铸坯取样进行表面酸洗检查,振痕明显,铸坯磁粉探伤合格率从原先的 35% 提高到 62%。

3.3 二次冷却工艺优化

为避免铸坯角部在二冷段冷却过强和冷却不均,将二冷比水量从 0.45 L/kg 降低到 0.32 L/kg,生产过程中检查二冷段下口铸坯表面情况,如图 6

(b)所示,铸坯角部未有明显发黑现象,铸坯表面中心与角部位置温差在 80 ℃左右。生产前对铸坯导向辊、二冷喷淋架及喷嘴进行检查,避免不对中和堵塞导致的冷却不均匀。

对二次冷却工艺优化后生产的铸坯取样进行表面酸洗检查,角部存在较浅的裂纹缺陷,未沿晶界延伸,铸坯磁粉探伤合格率从原先的 35% 提高到 52%。

通过对以上三种工艺进行优化后,没有发现铸坯角部存在横向表面裂纹缺陷,振痕比较明显且均匀,如图 7 所示。对铸坯进行抛丸、磁粉表面探伤检查,由于角部横向表面裂纹导致的探伤不合格铸坯明显减少,合格率从原先的 35% 提高到了 92%,轧材探伤合格率从原先的 45% 提高到了 96%。

4 结论

(1)60Si2Mn 弹簧钢铸坯表面裂纹缺陷产生的主要原因是由于结晶器铜管锥度偏大和保护渣润滑效果不好导致的拉坯阻力大。

(2)二次冷却过强会导致铸坯角部冷却过快,加大裂纹的扩展和延伸。

(3)通过铸坯角部在二冷段冷却减弱,铸坯角部表面温度更均匀。

(4)将结晶器铜管锥度由 2.2 mm 降到 1.6 mm、保护渣粘度由 0.76 Pa·s 降低到 0.52 Pa·s和二冷比水量由 0.45 L/kg 降低到 0.32 L/kg,通过上述优化措施,铸坯磁粉探伤合格率从之前的 35% 提高到了 92%。

参考文献

- [1] 刘泳,田志强,马超,等. 60Si2Mn 弹簧钢中夹杂物对高周疲劳特性影响研究[J]. 钢铁钒钛,2020,41(6):151-157.
- [2] 李云昆,尉文超,何肖飞,等. 不同冶炼方法对扭杆弹簧钢超高周疲劳性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2020,32(11):1006-1013.
- [3] 周力,左龙飞,马建超,等. 弹簧钢小方坯成分偏析改善实践[J]. 上海金属,2018,40(1):51-56.
- [4] 聂小龙,高加强,孟开仁,等. 60Si2Mn 弹簧钢的断裂失效分析[J]. 金属热处理,2021,46(8):246-250.
- [5] 刘飞,岳峰,刘佳伟,等. 100 t LD-LF-RH-CC 流程冶炼 60Si2Mn 弹簧钢非金属夹杂研究[J]. 特殊钢,2020,41(4):15-18.
- [6] 李小虎,龚志翔,高振波. 精炼渣碱度对弹簧钢夹杂物的影响研究[J]. 炼钢,2020,36(4):70-74.
- [7] 杜广巍,郭汉杰. 80 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 55SiCr 弹簧钢洁净度的研究[J]. 特殊钢,2016,37(4):18-22.
- [8] 刘锦文,铁占鹏,郭路召,等. SiCaBa 合金对 55SiCr 弹簧钢的脱氧脱硫及夹杂物控制研究[J]. 特殊钢,2020,41(3):20-24.
- [9] 王兴宇,韩延申,刘青,等. 末端电磁搅拌对弹簧钢连铸坯内部质量的影响[J]. 钢铁,2020,55(5):59-67.
- [10] 张正林,陈志亮,王向红,等. 汽车稳定杆用高品质弹簧钢 55Cr3 生产工艺实践[J]. 连铸,2018,43(6):7-10.
- [11] 王清波,张华,李永超,等. 120 t LF 精炼渣系对弹簧钢 55SiCrA 夹杂物塑性的影响[J]. 特殊钢,2022,43(1):34-38.
- [12] 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.
- [13] 印传磊,翟万里,蒋栋初,等. 42CrMo 钢大尺寸夹杂物的来源与控制[J]. 中国冶金,2021,31(1):36-41.
- [14] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:209-229.
- [15] 何宇明,何生平. 结晶器保护渣的润滑与传热控制功能剖析[J]. 连铸,2021,46(2):2-6.
- [16] 米源. 结晶器保护渣的性能和使用工艺[J]. 连铸,2007,4(1):39-42.
- [17] 林鹏,张洪才,印传磊,等. 含硫 45 钢铸坯缺陷分析与工艺优化[J]. 特殊钢,2018,39(5):40-43.
- [18] 潘伟杰,李民,朱礼龙,等. Na₂O 对超高碱度连铸保护渣性能的影响[J]. 钢铁,2022,57(1):93-101.