

钢球用钢 $\Phi 380$ mm 连铸圆坯表面裂纹原因分析及工艺改进

张洪才 林 鹏 许正周 印传磊 许光乐
(江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司, 淮安 223002)

摘 要 对 $\Phi 380$ mm 高碳钢球钢连铸圆坯轧成钢材出现的表面裂纹进行了统计分析。结果表明:抛丸检查后的连铸圆坯表面存在纵向裂纹,主要原因是钢液在结晶器中凝固时冷却不均产生的。通过将结晶器铜管锥度由 $0.45\%/m$ 调整为 $0.63\%/m$, $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 保护渣粘度由 $0.60\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 降到 $0.50\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 保护渣熔速由 $36\ \text{s}$ 调整到 $49\ \text{s}$, 二冷比水量由 $0.30\ \text{L}/\text{kg}$ 降到 $0.25\ \text{L}/\text{kg}$, 二冷段四面冷却改为八面冷却等措施,有效降低了大规格钢球钢铸坯及轧材的表面纵裂纹,轧材表面探伤合格率提高到 95% 以上。

关键词 钢球钢 表面裂纹 结晶器 保护渣

Cause Analysis on Surface Crack of Steel Ball Steel $\Phi 380$ mm Continuous Casting Round Bloom and Process Improvement

Zhang Hongcai, Lin Peng, Xu Zhengzhou, Yin Chuanlei and Xu Guangle
(Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002)

Abstract The occurred surface crack of products rolled from $\Phi 380$ mm high carbon steel ball steel continuous casting round bloom has been statistically analyzed. The results show that there is a longitudinal crack on the surface of the continuous casting round bloom after shot peening, which is mainly caused by the uneven cooling of the molten steel in the mold. By adjusting the taper of the crystallizer copper tube from $0.45\%/m$ to $0.63\%/m$, the $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ viscosity of mold slag is reduced from $0.60\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ to $0.50\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, and the flux rate of the mold shield slag at $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ is adjusted from $36\ \text{s}$ to $49\ \text{s}$, secondary cooling water ratio decreasing from $0.30\ \text{L}/\text{kg}$ to $0.25\ \text{L}/\text{kg}$, the four-sided cooling of the second cooling section is changed to eight-sided cooling, the surface longitudinal cracks of the large-size steel ball steel billets and rolled materials are effectively reduced, and the surface inspection qualified rate of the rolled material increases to more than 95% .

Material Index Steel Ball Steel, Surface Crack, Crystallizer, Mold Flux

矿山采矿用的耐磨球用钢,主要是高碳钢,另加入部分 Si、Cr、Mo、V 等成分,热处理后的成品钢球,表面硬度高,韧性好,具有优良的耐磨性能。

江苏钢铁生产厂生产的矿山选矿用的耐磨球用热轧圆钢,供下游用户制造耐磨钢球,用户在生产钢

球过程中发现有约 8.0% 比率的表面翘粗开裂以及细裂纹,如图 1(a,b)所示。

钢球加工工艺为:下料→加热→热剪→翘粗→滚圆→空冷→淬火→回火→检验。在图 1(b)所示钢球表面裂纹部位取一块金相试样,检查裂纹中及

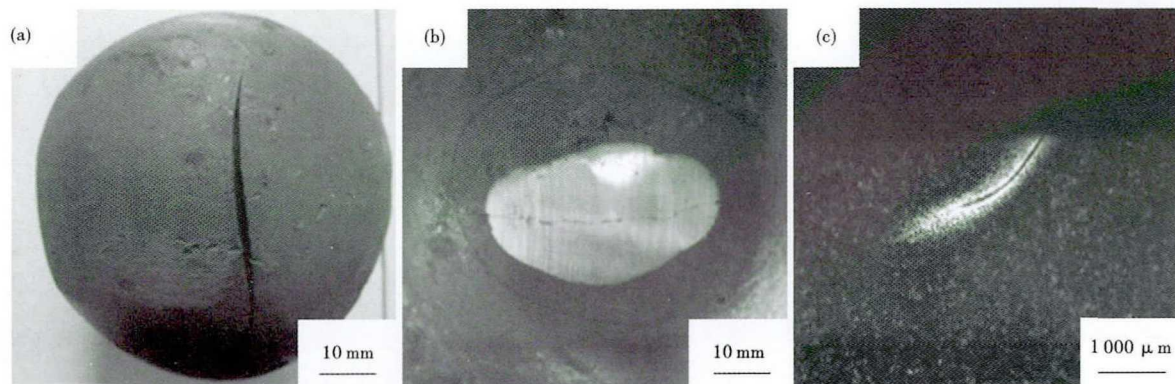


图 1 钢球翘粗开裂(a)和细裂纹(b)宏观形貌;(c)细裂纹微观形貌

Fig. 1 Morphology of steel ball upset crack (a) and micro-crack (b); morphology of micro-crack (c)

表 1 连铸机的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of continuous casting machine

项目	技术参数
铸机类型	弧形
铸坯断面直径 Φ /mm	380/450/500
铸机半径/m	14
二次冷却	水-气雾
电磁搅拌	结晶器+二冷+末端电磁搅拌
电磁搅拌安装方式	外置式
拉速/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.28~0.60
振幅/mm	± 2
拉矫机	5组

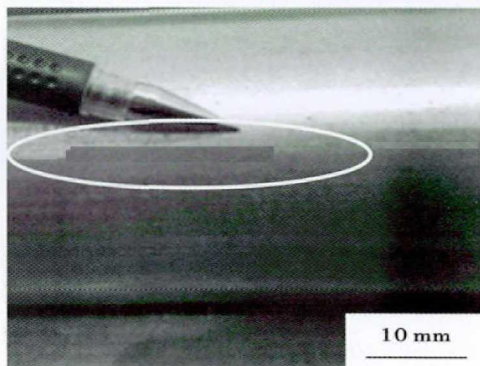


图 2 钢球钢轧材表面裂纹

Fig. 2 Surface crack of rolled product of steel ball steel

其附近夹杂物、金相组织情况,结果在裂纹中及其附近没有发现夹杂物,裂纹两侧都存在明显氧化脱碳现象,金相微观形貌见图 1(c)。由此可见,钢球表面裂纹由原材料热轧圆钢表面裂纹引起的。

1 钢球钢生产工艺及化学成分

钢球钢 $\Phi 380$ mm 连铸圆坯生产工艺流程为:转炉 LD(90 t)→LF 精炼(90 t)→90 t 双工位 RH 真空处理→CCM($\Phi 380$ mm 连铸坯)→热送→加热炉→轧材($\Phi 70 \sim 95$ mm)→入坑缓冷。铸机主要参数见表 1。

钢球钢主要化学成分(%) : 0.60 ~ 0.65C、1.70 ~ 1.85Si、0.70 ~ 0.80Mn、0.85 ~ 1.00Cr、0.30 ~ 0.35Mo、 $\leq 0.020\text{P}$ 、 $\leq 0.015\text{S}$ 。

2 轧材及圆坯裂纹形貌

2.1 轧材表面裂纹宏观形貌

$\Phi 80$ mm 钢球钢轧材经抛丸或扒皮、探伤后发现部分圆钢表面存在纵向裂纹,从裂纹形貌上看,裂纹细长,长度 30 ~ 100 mm,裂纹形貌如图 2 所示。

2.2 轧材表面裂纹微观形貌

在钢球钢轧材裂纹处取横向金相试样观察结果如图 3 所示,裂纹细长,裂纹两侧出现严重脱碳,由



图 3 钢球钢轧材表面裂纹处组织形貌(深度:0.79 mm)

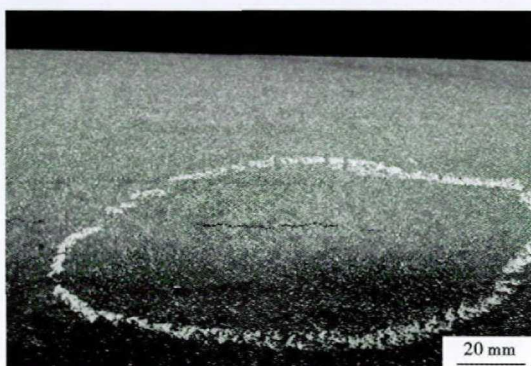
Fig. 3 Morphology of structure at surface crack of steel ball steel rolled product (depth: 0.79 mm)

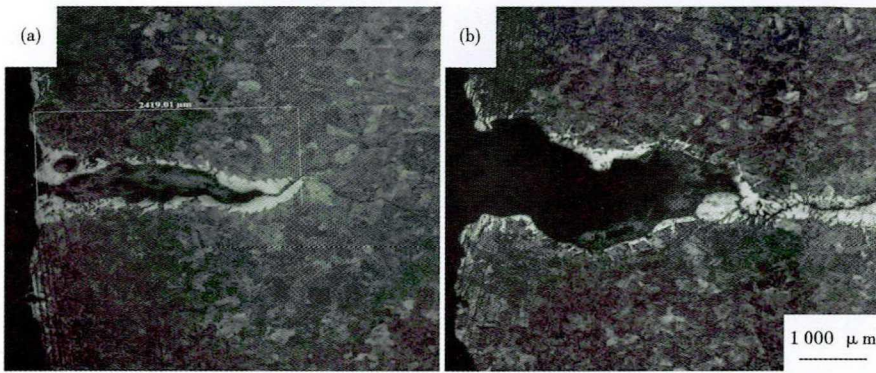
此可判断钢球钢轧材裂纹缺陷来源于连铸圆坯。另对裂纹处使用电镜扫描,未发现大颗粒夹杂物。

2.3 连铸圆坯表面裂纹形貌和微观分析

为确认钢球钢 $\Phi 380$ mm 连铸圆坯是否存在表面缺陷,对采用相同工艺及保护渣生产的连铸圆坯进行抛丸检查,结果发现圆坯表面存在断断续续的纵向裂纹,长度 30 ~ 150 mm;在圆坯横截面上纵向裂纹的开口度最大为 3 mm,裂纹处铸坯轻微凹陷,且裂纹在内弧、外弧和侧弧位置都有出现。钢球钢连铸圆坯裂纹形貌如图 4 所示。

在圆坯裂纹处取金相样,研磨、抛光后用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀,冲洗吹干后在金相显微镜下观察,如图 5 所示。由图 4 可知,裂纹上部开裂较大处深度约 2.4 mm,裂纹底端还存在向中心扩展延伸情况,扩展深度至少 1 mm 以上。裂纹上部两侧明显脱碳,在裂纹底部扩展段,图 5(a) 试样脱碳不明显,图 5(b) 试样存在明显脱碳。因此,可以断定,裂纹在高温区(结晶器中)产生,并在铸坯下行过程中,在应力作用下逐步扩展。

图 4 钢球钢 $\Phi 380$ mm 连铸圆坯表面裂纹形貌Fig. 4 Surface crack morphology of steel ball steel $\Phi 380$ mm continuous casting round bloom

图 5 钢球钢 $\Phi 380$ mm 圆坯表面裂纹微观形貌Fig. 5 Micromorphology of surface crack of steel $\Phi 380$ mm ball steel round bloom

3 钢球钢表面裂纹原因分析

对于连铸坯表面纵裂纹,相关研究表明,由于结晶器弯月面区初生坯壳厚度不均匀,其承受的应力超过了坯壳高温强度,在坯壳薄弱处产生应力集中致使铸坯表面产生纵向裂纹^[1]。

3.1 结晶器铜管锥度

在热量传递过程中,坯壳与铜壁之间产生的气隙,气隙热阻占了 70%~90%,而其他热阻是相当小的^[2]。因此,结晶器铜管采用合理的倒锥度,坯壳表面与铜管内壁良好接触,控制较小的气隙,保证坯壳冷却均匀和良好的传热效果,可以有效避免产生裂纹和发生拉漏。有研究表明,结晶器倒锥度的很小变化,会在坯壳上形成更大的裂纹开口^[3]。该结晶器铜管长度 780 mm,上口尺寸为 394.80 mm,下口为 391.30 mm,上下口尺寸差为 3.50 mm,锥度为 0.45%/m;再结合生产含碳量 $\leq 0.20\%$ 的低碳钢、含碳量 $\geq 0.60\%$ 的弹簧钢、车轮钢时,出现较高的漏钢几率,可以判断锥度存在偏小的问题。

3.2 保护渣

结晶器内保护渣的性能对铸坯表面质量有重要影响,性能合适的保护渣是生产表面无缺陷的高质量连铸圆坯必不可少的条件^[4]。钢球钢为高碳钢,凝固时收缩量相对中低碳钢小,高碳钢球钢保护渣粘度大,熔化速度快,严重影响铸坯表面润滑和坯壳四周冷却均匀性,最终在局部坯壳薄弱处产生纵裂纹,而且在铸坯表面产生渣沟缺陷,见图 6。

为了改善钢球钢连铸圆坯心部质量,杜绝铸坯心部缩孔引起的轧材中心缩孔残余,充分发挥末端电磁搅拌器的作用,拉坯速度由原来的 0.42 m/min 提高到 0.52 m/min。但是拉速提高后,保护渣消耗量减少,从而使结晶器内粘结加重,摩擦阻力增大,

初生坯壳中的张力增加,同时拉速提高后,坯壳厚度相对减薄,因冷却不均产生的局部坯壳薄弱处产生纵裂纹的几率就增加了。所以选择合适的优化保护渣以配合拉速的要求是生产表面质量良好的铸坯的一个关键因素^[5]。原保护渣化学成分和物理性能分别见表 2、表 3。

3.3 二冷冷却均匀性

原工艺连铸二冷段比水量为 0.30 L/kg,水量偏大,而且二冷段是四面冷却,铸坯表面冷却不均现象比较严重,生产时二冷室冷却不均现象如图 7(a)所示。

对连铸圆坯表面纵裂纹产生影响的其他因素,如结晶器液位波动,浸入式水口插入深度等,未发现明显异常。

4 钢球钢表面裂纹改进措施及效果

4.1 改进措施

(1) 采用合适的结晶器铜管锥度

针对原结晶器铜管锥度偏小的情况,将铜管上

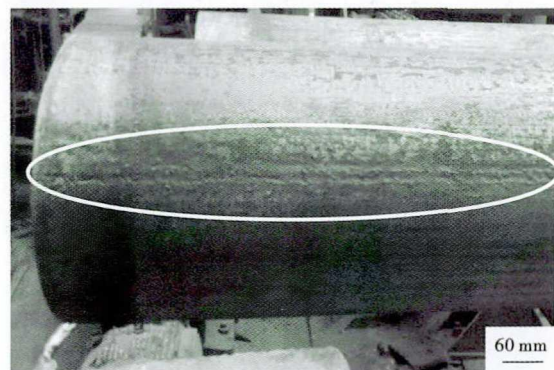
图 6 钢球钢 $\Phi 380$ mm 圆坯表面渣沟Fig. 6 Steel ball steel $\Phi 380$ mm round bloom surface slag ditch

表 2 原连铸保护渣的成分/%

Table 2 Ingredient of original casting shield slag/%								
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	F	C _固	H ₂ O
33 ± 3	24 ± 3	≤ 8	≤ 3.0	≤ 6	8 ± 3	≤ 7	16 ± 3	≤ 0.5

表 3 原连铸保护渣的物理性能

Table 3 Physical properties of original casting shield slag				
1 300 °C 熔速/s	熔点/°C	1 300 °C粘 度/(Pa·s)	0.15~1.0 mm 粒度	密度/ (g·cm ⁻³)
36 ± 10	1 080 ± 30	0.60 ± 0.2	≥ 90%	≤ 0.8

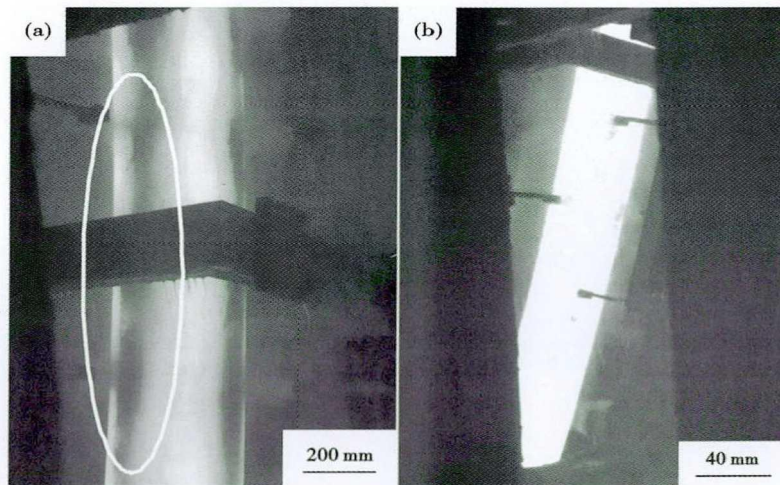


图 7 (a) 工艺改进前钢球钢连铸圆坯二冷冷却不均; (b) 工艺改进后钢球钢连铸圆坯二冷段均匀冷却

Fig. 7 (a) Steel ball steel continuous casting round bloom secondary cooling uneven before process improvement; (b) steel ball steel continuous casting round bloom secondary cooling even after process improvement

表 4 优化保护渣的组成/%

Table 4 Ingredient of optimized shield slag/%

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	F	C _固	H ₂ O
28 ± 5	24 ± 5	6 ± 2	≤ 3	≤ 4	8 ± 3	≤ 6	9.5 ± 3	≤ 0.5

表 5 优化保护渣的物理性能

Table 5 Physical properties of optimized shield slag

1 300 °C 熔速/s	熔点/°C	1 300 °C粘 度/(Pa·s)	0.15~1.0 mm 粒度	密度/ (g·cm ⁻³)
49 ± 10	1 080 ± 30	0.50 ± 0.2	≥ 90%	≤ 0.85

口调整为 396.20 mm, 下口尺寸仍为 391.30 mm, 上下口尺寸差为 4.90 mm, 总锥度优化为 0.63%/m, 特别是弯月面局部适当调大, 保证初生坯壳的均匀冷却和适宜的冷却强度。

(2) 优化保护渣

适当降低保护渣粘度(由 0.60 Pa·s 降到 0.50 Pa·s), 另将 1 300 °C 熔速由 36 s 调整到 49 s, 改善液态保护渣的流动性, 提高高碳钢球钢连铸圆坯保护渣的消耗量, 改善渣膜厚度的均匀性, 保证圆坯坯壳冷却均匀性和润滑性能。优化后的保护渣理化性能见表 4、表 5。

(3) 改进二冷冷却方式。

大规格连铸圆坯采用“弱冷匀冷”, 适当降低二冷水水量, 将比水量由 0.30 L/kg 调整为 0.25 L/kg, 同时在保证二冷二段和三段喷嘴数保持不变的情况,

由四面冷却改为上下两排喷嘴错开 90 度, 达到八面冷却冷却效果, 二冷冷却均匀明显提高, 连铸圆坯表面黑面明显减少, 改进后的钢球钢连铸圆坯二冷冷却情况见图 7(b)。

(4) 稳定过热度在 15 ~ 35 °C, 采取恒拉速浇注, 减少液位波动。

4.2 改进效果

通过优化和措施, 基本消除钢球钢 Φ380 mm 连铸圆坯表面纵裂纹, 轧材表面探伤合格率在 95% 以上, 最后取消了为保证钢球钢轧材表面质量而增加的表面探伤工序。以前时常发生的含碳量 ≤ 0.20% 的低碳钢、含碳量 ≥ 0.60% 的弹簧钢、车轮钢等系列钢种纵裂漏钢问题也得到彻底解决。

5 结论

(1) 热锻钢球开裂由原材料轧材引起, 而轧材的表面裂纹则是由连铸圆坯表面纵裂纹缺陷遗传所致。

(2) 钢球钢 Φ380 mm 连铸圆坯表面纵裂纹的产生主要由于结晶器铜管锥度不合理, 保护渣不匹配引起, 而连铸二冷冷却不均造成了裂纹的扩展。

(3) 通过调大结晶器铜管锥度, 优化高碳钢保护渣, 改进连铸二冷冷却方式, 稳定控制中间包过热度, 彻底解决了钢球钢 Φ380 mm 连铸圆坯表面纵裂纹问题。

参考文献

- [1] 田燕翔. 现代连铸新工艺新技术与铸坯质量控制[M]. 北京: 当代中国出版社, 2004.
- [2] 《中国冶金报》社编. 连铸 500 问[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [3] 田燕翔. 现代连铸新工艺新技术与铸坯质量控制[M]. 北京: 当代中国出版社, 2004.
- [4] 陈伟庆. 保护渣性能对连铸圆坯表面质量的影响[J]. 钢铁, 2002, 37(9): 23-25.
- [5] 张贺林, 朱果灵. 薄板坯连铸用保护渣[J]. 钢铁, 1995, 30(2): 23-27.

张洪才(1974-), 男, 工程师, 华东冶金学院(专科)毕业, 连铸工艺研究和连铸坯质量控制。
E-mail: zhang781237979@163.com

收稿日期: 2019-7-31