

中碳结构钢厚板边裂分析与优化

陈曦¹, 杨治争², 黄道昌¹, 黄大军¹

¹宝武集团鄂城钢铁公司, 湖北 鄂州

²宝武中央研究院(青山), 湖北 武汉

Email: yzzai@sina.com

收稿日期: 2021年3月12日; 录用日期: 2021年4月1日; 发布日期: 2021年4月8日

摘要

45号中碳结构钢板边部裂纹属于常见表面缺陷, 对钢板的成材率和效益有直接影响。通过取缺陷试样进行金相分析, 发现钢板表面裂纹区域氧化圆点密布、氧化特征明显, 确定其铸坯进入加热炉之前已经存在裂纹, 而进一步取铸坯缺陷试样分析可知, 裂纹在连铸高温阶段已经出现, 即起源于结晶器内, 针对结晶器一冷水、保护渣等进行了优化改进并持续实施, 使边裂缺陷下降至1%以内, 验证了分析结果的可信和措施的有效性。

关键词

厚板, 边裂, 结晶器, 保护渣

Analysis and Optimizing of Edge Crack of Heavy Medium Carbon Plates

Xi Chen¹, Zhizheng Yang², Daochang Huang¹, Dajun Huang¹

¹Echeng Steel of BaoWu Group, Ezhou Hubei

²Baosteel Central Research Institute (Qingshan), Wuhan Hubei

Email: yzzai@sina.com

Received: Mar. 12th, 2021; accepted: Apr. 1st, 2021; published: Apr. 8th, 2021

Abstract

The edge crack of 45 medium carbon structural steel plate is a common surface defect, which has a direct impact on the yield and benefit of steel plate. Defect samples were analyzed through metallographic methods, and the surface crack of 45 medium carbon structural steel plate with dense oxidation dots and obvious oxidation characteristics was found. It was confirmed that there were

cracks before the slab enters the heating furnace. Further analysis of defect samples showed that the cracks had appeared in the high temperature stage of continuous casting, that is, they originated in the mold. The optimization and improvement for first cooling system and mold powder were carried out, and the edge crack defects were reduced to less than 1%, which verified the reliability of the analysis results and the effectiveness of the measures.

Keywords

Heavy Plates, Edge Crack, Mold, Mold Powder

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

45 号钢属于优质中碳结构钢，具备良好的冷热加工性能和综合机械性能，应用领域十分广泛。鄂钢 4300 mm 宽厚板产线是国内重要的宽厚板生产基地，也是主要的 45 号钢厚板产线之一，主要规格集中于 30~120 mm 厚板，主要应用于机械、模具制造等行业。

表面边部裂纹是厚板常见表面缺陷之一[1] [2]，鄂钢基于 130 t 转炉冶炼 - 炉外精炼 - RH 处理 - 板坯连铸 - 4300 mm 轧机轧制流程生产 45 号钢，过程可控、性能良好，但是，表面质量问题并未完全解决，特别是面边部裂纹缺陷明显且有多发性特点，需要切边交货，对钢板的成材率和生产效率均造成显著影响。针对此类边部，开展了系列取样检测和针对性的优化工作，以提高表面质量控制水平和产品成材率及综合效益。

2. 45 钢厚板边裂现状分析

45 钢均通过鄂钢单流厚板坯铸机生产，实际生产中，200 mm、250 mm、300 mm 厚度等 3 种规格的板坯，轧后钢板表面均出现一定比例的边部裂纹，具体情况如图 1~3 所示：



Figure 1. Morphology of edge defect of 60 mm thickness 45# plate

图 1. 60 mm 厚钢板边部碎裂缺陷形貌



Figure 2. Morphology of irregular crack of 40 mm thickness 45# plate

图 2. 40 mm 厚钢板边部不规则裂纹形貌

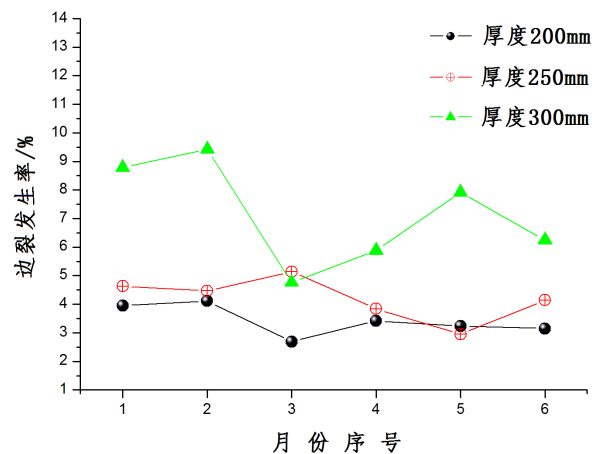


Figure 3. Monthly average defect occurrence rate of different slab sizes after rolling

图 3. 45 号钢不同规格板坯轧后月均缺陷发生率

从图 1、图 2 看出，不规则裂纹分布于距钢板表面 0~5 cm 的范围内，距离边部越近，缺陷越严重，从长度方向上看，单块钢板表面基本是沿轧制方向连续分布。此类缺陷将直接影响钢板的宽度定尺，必须切边交货。

从图 3 的发生率统计可以看出，统计的 6 个月中，不同规格的板坯，轧后裂纹发生率月均基本都在 3% 以上，且随着铸坯厚度增加，缺陷发生率有增加趋势。钢板出现边部裂纹后，成材料明显下降，对钢种和产线的总体效益都产生较明显影响。

3. 边裂缺陷原因分析

3.1. 取样分析

取 45 号钢成品缺陷试样，进行了钢板典型部位、铸坯对应部位取样分析。其中成品钢板缺陷试样 1 件，铸坯试样 3 件，分切、打磨、抛光后，通过金相显微镜(OLYMPUS) BX51M 进行金相分析。

钢板缺陷宏观及金相分析结果如图 4~7 所示：



Figure 4. Macro morphology of corner defects of the plate
图 4. 钢板角部缺陷宏观形貌

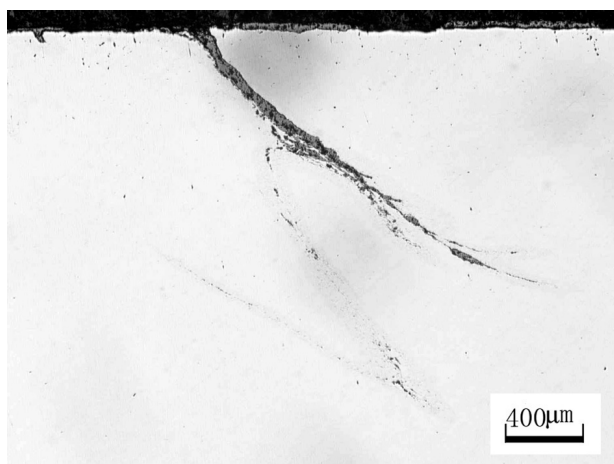


Figure 5. Characteristics of crack extending from edge to interior
图 5. 角裂沿边部向内部的扩展特征

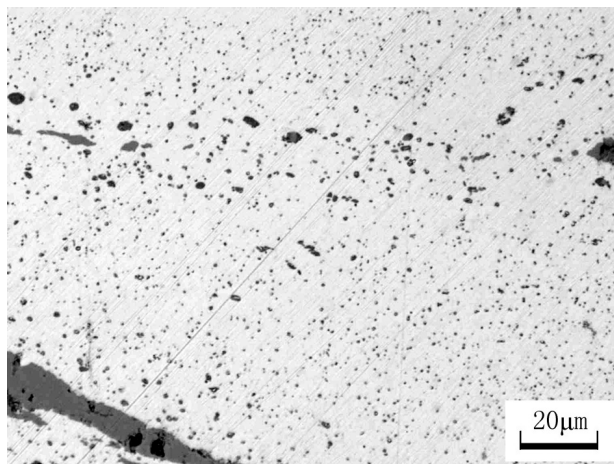


Figure 6. Oxide dots around cracks
图 6. 裂纹周围密布的氧化圆点

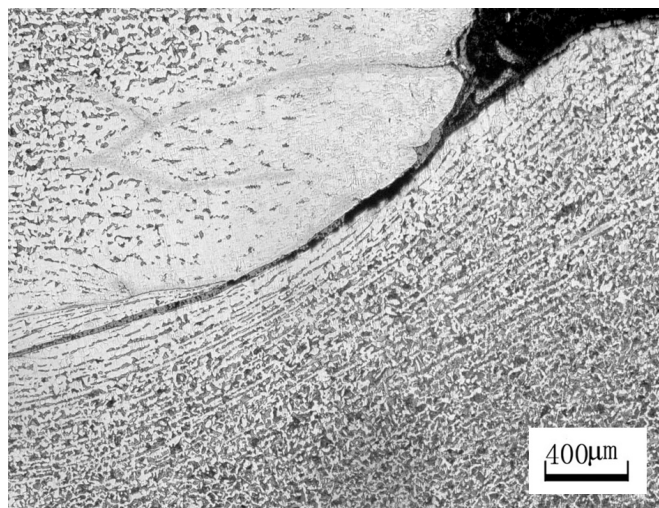


Figure 7. Decarburization characteristics of different parts
图 7. 角裂不同部位的脱碳特征差异

从图 4 看出, 45 号钢缺陷试样裂纹贯穿钢板角部, 打磨后裂纹有沿边部向钢板中部扩展延伸的特征, 无明显方向性, 总体严重程度较强、裂纹尺寸较大。从图 5~7 可以看出, 裂纹内部有连续性的氧化物存在, 紧邻裂纹附近有明显的脱碳特征, 近裂纹区域的组织由正常基体部位的铁素体+珠光体转变为纯铁素体, 裂纹周围区域分布大量的、明显的氧化圆点。

大量、严重的氧化圆点只能在长时间高温过程中出现, 因此, 可以确认裂纹在铸坯进入加热炉之前已经存在, 即连铸工序是裂纹产生的根源[3] [4]。

由于有表面氧化层覆盖, 板坯表面角部裂纹缺陷在生产状态下并不十分明显, 需经过酸洗, 去除表面氧化层后才能显示, 通过去除氧化层并取样打磨、抛光、腐蚀, 获得的板坯的表面缺陷特征如图 8~20 所示:



Figure 8. Macro morphology of cracks on longitudinal Plane of 250 mm slab

图 8. 250 mm 厚板坯窄面裂纹宏观形貌



Figure 9. Macro morphology of cracks on longitudinal Plane of 300 mm slab

图 9. 300 mm 厚板坯窄面裂纹宏观形貌

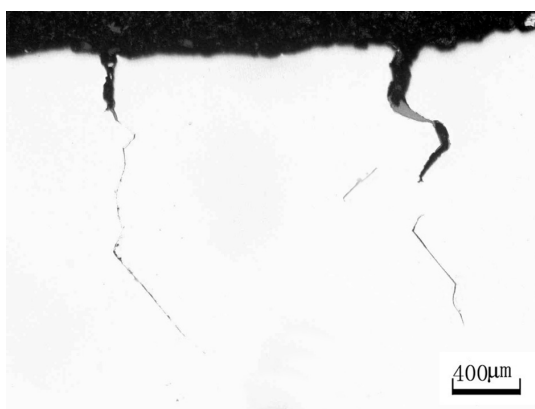


Figure 10. The edge cracks along the original austenite grain boundary of 200 mm slab

图 10. 200 mm 板坯边部沿原奥氏体晶界开裂

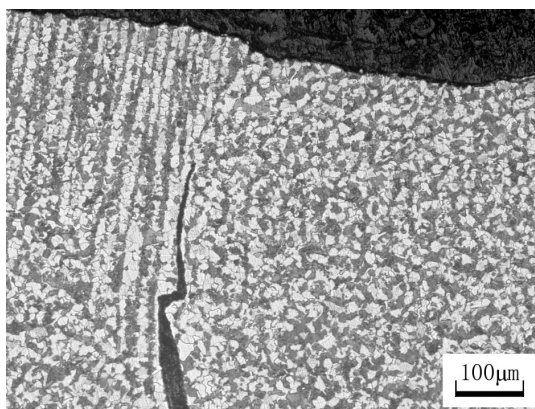


Figure 11. Different crystallization characteristics on both sides of 200 mm slab crack

图 11. 200 mm 板坯裂纹两边不同结晶特征

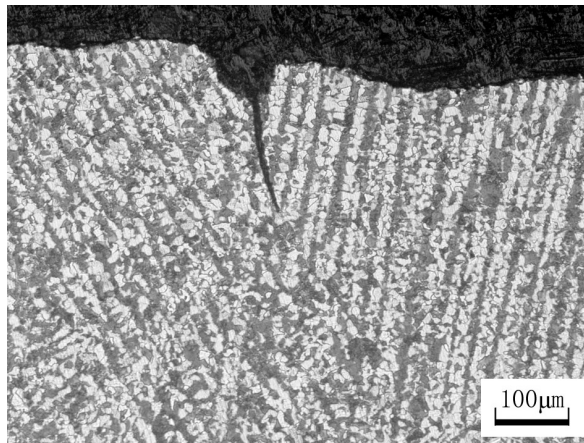


Figure 12. Different crystallization characteristics on both sides of 200 mm slab crack

图 12. 200 mm 板坯裂纹两边不同的结晶特征

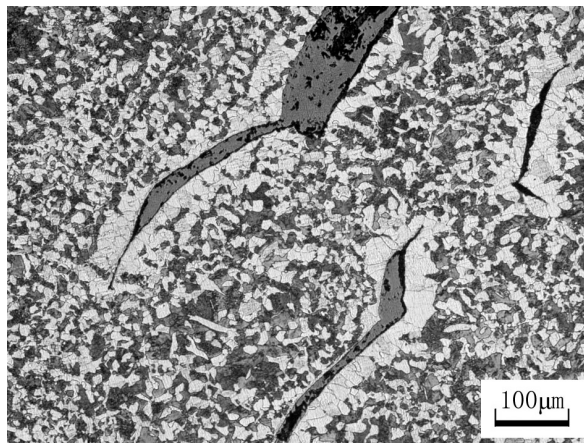


Figure 13. Characteristics of oxidative decarburization in 200 mm slab crack zone

图 13. 200 mm 板坯裂纹区域氧化脱碳特征



Figure 14. The edge cracks along the original austenite grain boundary of 250 mm slab

图 14. 250 mm 板坯边部沿原奥氏体晶界开裂

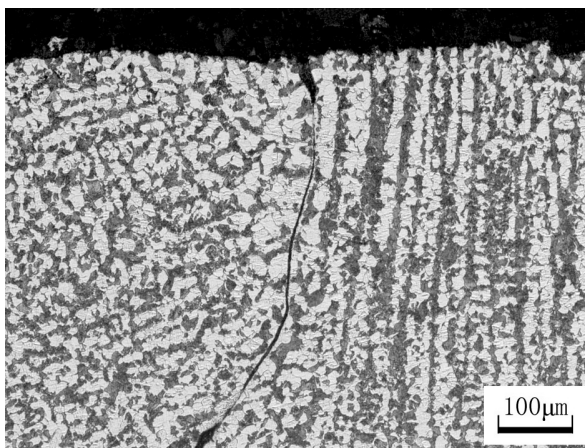


Figure 15. Different crystallization characteristics on both sides of 250 mm slab crack

图 15. 250 mm 板坯裂纹两边不同结晶特征

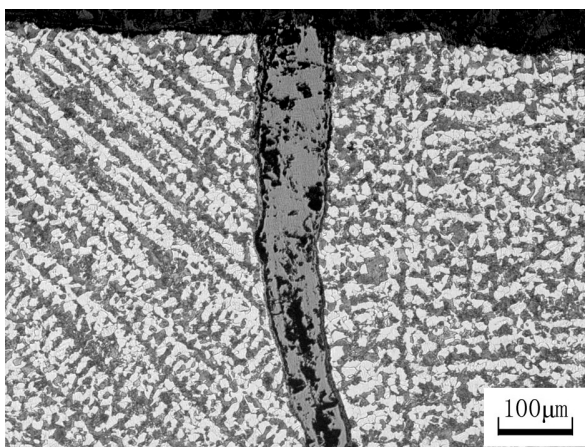


Figure 16. Different crystallization characteristics on both sides of 250 mm slab crack

图 16. 250 mm 板坯裂纹两边不同的结晶特征

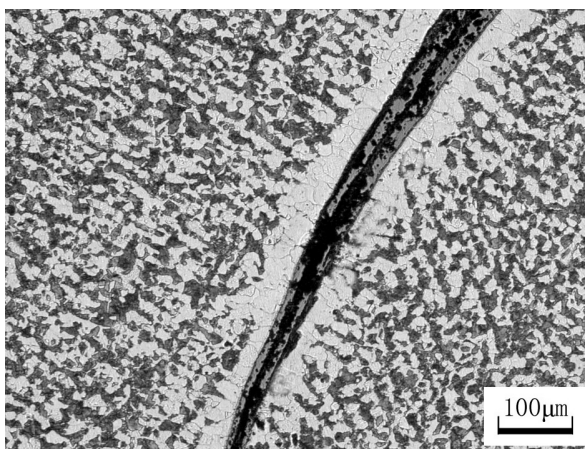


Figure 17. Characteristics of oxidative decarburization in 250 mm slab crack zone

图 17. 250 mm 板坯裂纹区域氧化脱碳特征



Figure 18. The edge cracks along the original austenite grain boundary of 300 mm slab

图 18. 300 mm 板坯边部沿原奥氏体晶界开裂

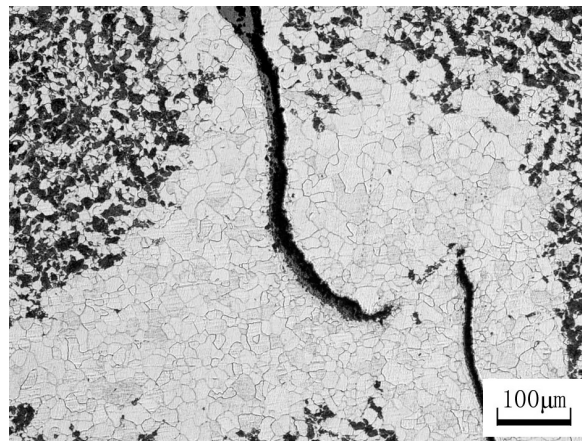


Figure 19. Characteristics of serious oxidative decarburization in 300 mm slab crack zone

图 19. 300 mm 板坯裂纹区域严重氧化脱碳特征

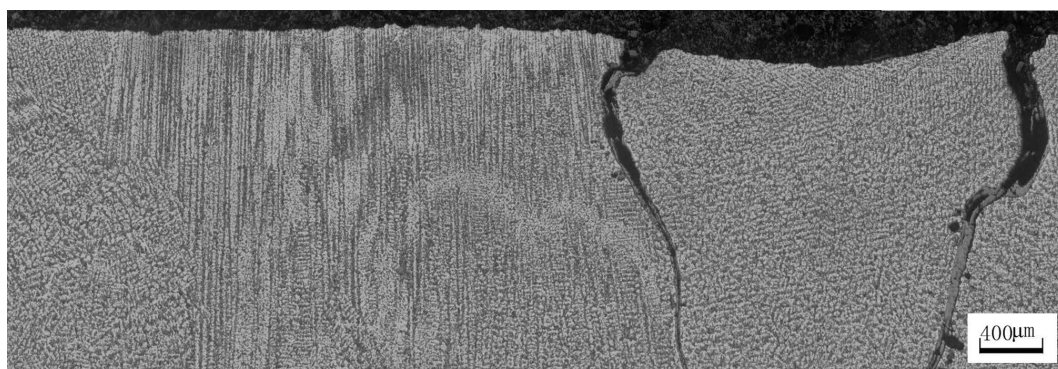


Figure 20. Different regions divided by cracks with different crystallization characteristics of 300 mm slab

图 20. 300 mm 厚板坯由裂纹隔离的不同区域不同结晶特征

从图 8~20，可以看出以下几点：

- 1) 45 号钢成品钢板表面边部裂纹起源于连铸工序，主要分布于板坯窄边。

2) 不同规格连铸坯的裂纹缺陷特征基本一致, 即裂纹沿原奥氏体晶界裂开并扩展。裂纹区域多有脱碳特征, 如果裂纹在最为敏感的二冷矫直区开始出现, 此区域的温度和时间条件, 不足以出现明显的脱碳特征, 可以认为裂纹起源于高温区域, 即结晶器内[3], 而脱碳特征随着板坯厚度增加严重程度也随之递进。

3) 在不同规格铸坯的裂纹两侧或者不同分割区域, 组织结晶特征有明显差异, 说明裂纹应早于等轴晶和柱状晶形成之前已经存在, 即在高温区域内已存在微裂纹, 一冷水和二冷水对裂纹两侧或不同微区域的冷却效果有差异, 造成了区域结晶特征的明显差异, 这再次验证了裂纹起源于结晶器内的结论。

由以上分析得出结论, 45 号钢铸坯裂纹起源于结晶器内的初生坯壳厚薄不均导致的微细裂纹, 在拉矫机的作用下, 坯壳在结晶器内或刚出结晶器时发生撕裂、沿晶界微细裂纹的扩展, 最终形成宏观可见的铸坯表面裂纹。这些裂纹在加热炉中进一步扩展恶化, 经轧制后形成钢板表面边部缺陷。

3.2. 裂纹机理分析

在结晶器中, 影响初生坯壳生成及生长的, 主要是冷却制度、保护渣的物化性能以及结晶器振动参数等, 45 号钢长期的生产实践中, 振动参数都是保持稳定的, 因此, 裂纹缺陷发生率的波动与振动参数关系不大, 则更可能与保护渣性能和一冷制度有关。而保护渣性能与结晶器热流密度直接相关, 宽板坯不同区域的热流密度如表 1 所示:

Table 1. Heat flux in 45# steel mold with different section size

表 1. 不同断面 45#钢结晶器内的热流密度情况

断面/mm	拉速/ m/min	热流密度/MW/m ²
规格 1: 200 × 1550	1.35	宽: 1.1~1.15 窄: 1.15~1.2
规格 2: 250 × 1800	1.05/1.10	宽: 1.15~1.20 窄: 1.25~1.30
规格 3: 250 × 2000	1.0/1.05	宽: 1.10~1.20 窄: 1.30~1.35
规格 4: 300 × 2200	0.8/0.85	宽: 1.05~1.15 窄: 1.30~1.45

从表 1 可见, 结晶器窄面和宽面的热流密度相差较大, 则可知结晶器内不同区域的保护渣层厚度有显著差异, 而且, 随着断面尺寸增加, 热流密度的波动越大, 窄面的保护渣层厚度相对越薄。针对保护渣理化指标, 与行业内同类产线进行对比, 结果如表 2:

Table 2. Performance comparison of mold powder from different production lines

表 2. 不同产线保护渣性能对比

指标项目 \ 类型	现保护渣 LC	现保护渣 XB	对比保护渣 1	对比保护渣 2
碱度/R	0.95	0.97	1.01	0.93
熔点/°C	1137	1110	1020	1054
粘度/Pa·s	0.239	0.224	0.129	0.171

从表 2 可以看出, 鄂钢宽板坯产线生产 45 号钢时, 所使用的两种保护渣熔点和粘度均较同类产线高, 其结果是结晶器内液态渣膜厚度偏大, 渣的流动性较差, 结晶器内的润滑状况不佳、传热不均, 从而引

起初生坯壳不同区域厚度不均，在拉坯过程中产生应力集中，从而产生微裂纹，继而在二冷区发展为窄面的多发性裂纹。

4. 优化措施及实施

如前所述，通过取样分析确定了结晶器是裂纹的起源环节，而保护渣的熔点和粘度等性能指标难以满足要求。因此，基于保护渣性能进行了一定的优化，如表 3 所示：

Table 3. Optimization scheme of mold powder of 45# steel

表 3. 45 号钢板坯保护渣优化方案

指标项目 \ 类型	现保护渣 LC	优化 LC2	现保护渣 XB	优化 XB2
碱度/R	0.95	0.92	0.97	1.03
熔点/°C	1137	1068	1110	1032
粘度/Pa·s	0.239	0.153	0.224	0.122

与保护渣优化同步的优化措施还包括：

- 1) 成品厚度 ≥ 50 mm 的钢液需进行精炼再连铸。
- 2) 提高典拉率，减少拉速波动对结晶器内温度场的影响。
- 3) 加大结晶器窄面冷却水量，减小窄面和大面的热流密度差异，避免角部应力集中，进一步降低裂纹倾向性。
- 4) 将矫直段铸坯表面温度目标值从 900°C 调整至 915°C，减少不同区域温度梯度。

在以上方案的基础上，在 45 号钢连铸生产中以正交试验的方式实施。共进行 4 轮、8 浇次、67 炉钢的试验。

5. 实施效果

经过多轮次正交试验，轧制完成 534 块各规格钢板，总体边部缺陷发生率明显下降，具体如图 21~23 所示：



Figure 21. Overall shape of slabs after optimized of powder

图 21. 保护渣优化后 45#板坯总体形貌



Figure 22. Edge feature of slabs after optimized protection slag
图 22. 保护渣优化后 45#钢板边部形貌

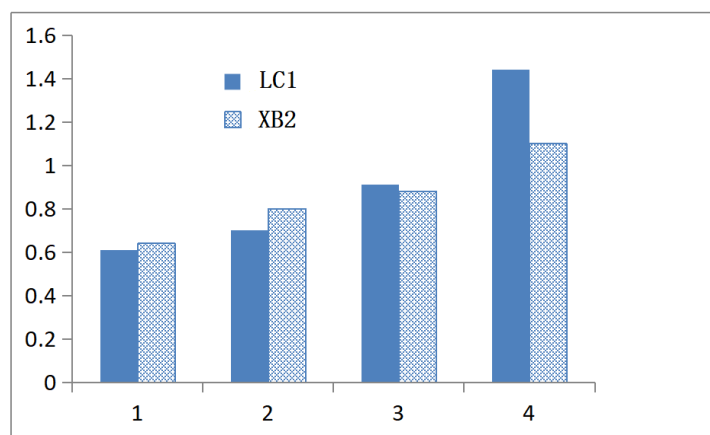


Figure 23. Edge crack rate of finished products corresponding to different specifications of slabs
图 23. 不同规格板坯对应的成品边裂发生率(板坯规格对应表 1)

由图 21, 45 号钢宽板坯总体平整, 窄面无可见裂纹, 取样酸洗后也未见明显裂纹, 如图 22, 轧后钢板边部也未见明显裂纹情况。

由图 23 的裂纹发生率统计, 使用优化后的保护渣, 轧后钢板边部裂纹发生率平均在 1% 以内, 随着铸坯尺寸增加, 裂纹发生率有增加的趋势, 而在 300×2200 mm 最大规格铸坯生产过程中, 虽然裂纹发生率略高, 但使用优化后的 XB2 保护渣, 裂纹发生率也可控制在 1.2% 以内的水平, 在其他规格, 两种保护渣使用效果相当。

6. 结论

- 1) 45 号钢厚板表面边部裂纹起源于连铸工序, 根源在结晶器内。
- 2) 保护渣粘度、熔点过高, 引起结晶器内坯壳生成不均, 进而发生撕裂, 是造成 45 号钢板坯窄面裂、进而形成轧后钢板表面边部裂纹的根本原因。
- 3) 通过降低结晶器保护渣粘度和熔点, 可使成品边部裂纹发生率平均控制在 1% 以内, 且效果稳定。

参考文献

- [1] Yamauci, A., Itoyama, S., Kishimoto, Y., *et al.* (2012) Cooling Behavior and Slab Surface Quality in Continuous Casting with Alloy 718 Mold. *ISIJ International*, **12**, 1094-1102. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1094>
- [2] 刘志远. 板材边裂成因分析及控制[J]. 河北冶金, 2012(10): 58-60.
- [3] 刘小军, 刘丹. 连铸坯横裂纹浅析[J]. 宽厚板, 2012, 18(1): 37-39.
- [4] 杨治争, 周有预, 袁凡成, 等. 连铸窄板坯角部横裂的成因及对策[J]. 钢铁研究, 2007, 35(4): 12-15.