

Q355B厚板表面结疤缺陷分析

甘雯雯¹, 杨治争^{1,2}, 袁勤攀¹, 肖娟^{1,2}, 陈胜潮³, 朱鹏宇³, 洪杰¹

¹柳州钢铁股份有限公司, 科技质量中心, 广西 柳州

²武汉科技大学钢铁冶金及资源利用教育部重点实验室, 湖北 武汉

³广西钢铁集团有限公司, 广西 防城港

收稿日期: 2025年7月29日; 录用日期: 2025年9月2日; 发布日期: 2025年9月10日

摘要

通过金相分析, 确定50 mm以上厚度Q355B钢板表面结疤缺陷出现于精轧环节, 结合相关机理, 确认是对应的400 mm铸坯从分切到热送装入加热炉的时间平均仅为7.4 h, 入炉温度普遍高于550℃, 处于热装裂纹敏感区, 通过延长热送总时间至18 h以上, 铸坯入炉温度降至450℃以上, Q355B表面结疤缺陷发生率从10%左右降至0.2%以下。

关键词

Q355厚板, 结疤, 热装裂纹

Analysis of Surface Scarring Defects on Q355B Thick Plate

Wenwen Gan¹, Zhizheng Yang^{1,2}, Qinpan Yuan¹, Juan Xiao^{1,2}, Shengchao Chen³, Pengyu Zhu³, Jie Hong¹

¹Technology and Quality Center of Liuzhou Iron and Steel Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

²Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology Wuhan, Wuhan Hubei

³Guangxi Iron and Steel Group Co., Ltd., Fangchenggang Guangxi

Received: Jul. 29th, 2025; accepted: Sep. 2nd, 2025; published: Sep. 10th, 2025

Abstract

Through metallographic analysis, it was determined that the surface scarring defects on Q355B steel plates with a thickness of over 50mm occurred during the finishing rolling process. Combined

文章引用: 甘雯雯, 杨治争, 袁勤攀, 肖娟, 陈胜潮, 朱鹏宇, 洪杰. Q355B 厚板表面结疤缺陷分析[J]. 冶金工程, 2025, 12(3): 174-180. DOI: 10.12677/meng.2025.123022

with relevant mechanisms, it was confirmed that the corresponding 400 mm cast billets had an average time of only 7.4 hours from cutting to hot delivery and loading into the heating furnace, with the temperature upon entering the furnace generally being higher than 550°C, which is in the hot charging crack sensitivity zone. By extending the total hot delivery time to over 18 hours, the temperature of the cast billets upon entering the furnace was reduced to above 450°C, and the occurrence rate of surface scarring defects on Q355B decreased from around 10% to below 0.2%.

Keywords

Q355 Heavy Plate, Scarring Defects, Hot Installation Crack

Copyright © 2025 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/>



1. 前言

355 MPa 级别 Q355B 低合金结构钢广泛应用于桥梁、车辆、船舶、建筑、压力容器、特种设备等领域，是国内应用最为广泛、产销量最大的钢种之一。作为普通合金钢，在钢铁企业更加主动节约能源、降低消耗、提高效率的趋势下，铸坯分切后直装和热装入炉是最为普遍的传输方式[1][2]。相关文献表明，边角部裂纹和结疤缺陷是影响 50 mm 以上厚规格 Q355B 钢板最主要的表面缺陷之一[3]，边裂纹缺陷经过切边等措施实施后，钢板仍可改定尺交货，而表面疤状缺陷常出现在钢板靠近中部位置且分布更为广泛，难以通过打磨等消除其不良影响，因此，结疤缺陷是造成钢板表面质量判废的最主要因素之一。某钢厂 50 mm 以上厚度 Q355B 钢板生产轧后钢板成批次地出现下表面广泛性分布的结疤缺陷，且缺陷深度大，无法通过修磨消除，造成钢板判废，但结疤缺陷出现在炉次、班次等因素下无明显规律性，因此，本文针对该类缺陷进行了分析，为该类钢板的表面质量控制提供参考。

2. 生产过程概况

2.1. 工艺路线

Q355B 生产工艺路径如下：转炉冶炼 - LF 精炼 - RH 真空脱气 - 300/400 mm 厚双流宽板坯连铸(典型宽度 2200~2600 mm) - 热坯分切下送 - 板坯入加热炉加热 - 3800 mm 双机架厚板轧机轧制 - 剪切 - 入库。

2.2. 化学成分

Table 1. Chemical composition of Q355B heavy plate
表 1. Q355B 厚板化学成分

牌号	化学成分/wt%							
	C	Si	Mn	P	S	Alt	N	As
Q355B	0.175	0.40	1.48	0.016	0.0036	0.034	0.0053	0.0046

如表 1 所示，50mm 以上厚度规格 Q355B 中 C、Si、Mn 含量均接近上限，未进行微合金化，P、S 含量正常，过真空后 N 含量也处于正常范围。

3. 结疤缺陷分析

3.1. 结疤缺陷分布规律统计

首先从厚度分布上看, 50 mm 及以上厚度 Q355B 钢板轧后钢板下表面结疤缺陷发生率较高。而从炉次和铸坯分布来看, 缺陷钢板在不同炉次不同流次均有分布, 按块数统计的发生率约为 10%, 从钢板对应的铸坯规格来看, 以 400 mm 厚度铸坯轧后钢板缺陷发生率更高, 占比超过 92%, 从上下表面来看, 下表面缺陷发生率占比超过 90%。

3.2. 结疤缺陷宏观特征

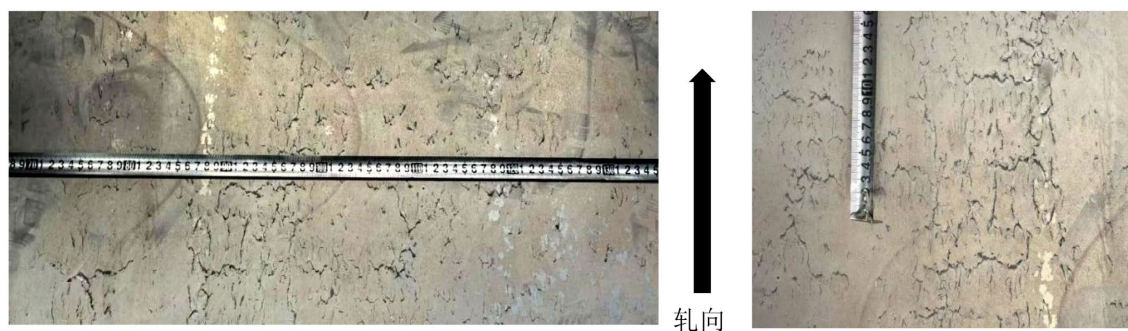


Figure 1. Macroscopic distribution characteristics of scab defects on the lower surface of Q355B steel plate with dimensions of $60 \times 2200 \times 10,500$ mm

图 1. 尺寸为 $60 \times 2200 \times 10,500$ mm 的 Q355B 钢板下表面结疤缺陷宏观分布特征

由于结疤缺陷严重且分布区域较大, 可以从厘米以上级尺度观察, 如图 1 所示, 结疤缺陷总体不规则呈龟裂的疤状广泛分布于钢板下表面, 大部分区域均有明显的垂直于轧制方向的撕裂特征, 不规则撕裂横线之间距离约为 5~10 cm。宽度方向缺陷区域占比超过 50%, 长度方向上占比超过 40%, 且目视可见裂纹深度超过 1 mm, 无法通过修磨去除, 造成钢板直接判废。

3.3. 结疤缺陷金相分析

从钢板上取不同方向的缺陷试样镶嵌、打磨和抛光, 显微镜下观察缺陷部位形貌及氧化特征, 腐蚀后观察组织特征, 结果如图 2~4 所示。

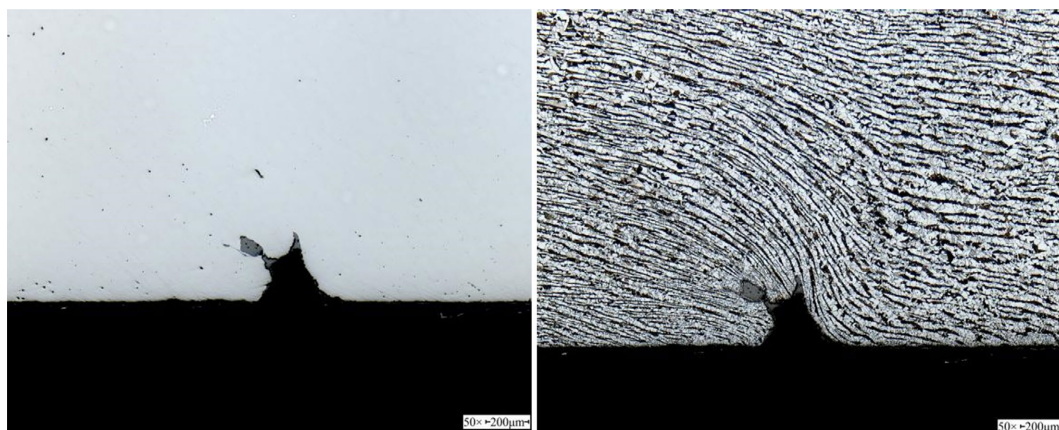


Figure 2. Pits and surrounding rheological characteristics observed in the scar defect area sampled along the rolling direction

图 2. 沿轧制方向取样观察到的结疤缺陷部位凹坑及周围流变特征

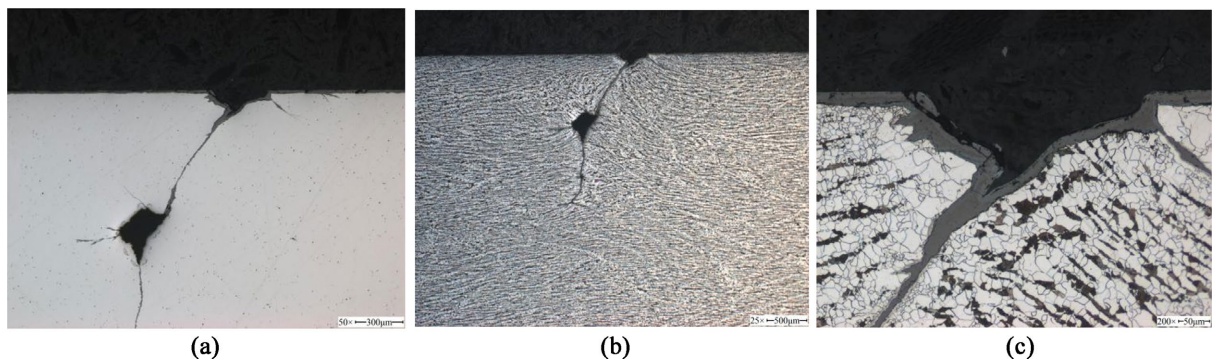


Figure 3. Cracks observed along the rolling direction extending nearly vertically towards the steel matrix and the surrounding microstructural characteristics. (a) Morphology of the defect area after polishing; (b) Morphology of the corroded defective area; (c) Microstructure morphology at the end of the defect area

图 3. 沿轧向取样观察到的裂纹向钢基近垂直延伸及周边组织特征。(a) 缺陷区域抛光后形貌；(b) 缺陷区域腐蚀后形貌；(c) 缺陷区域顶端组织形貌

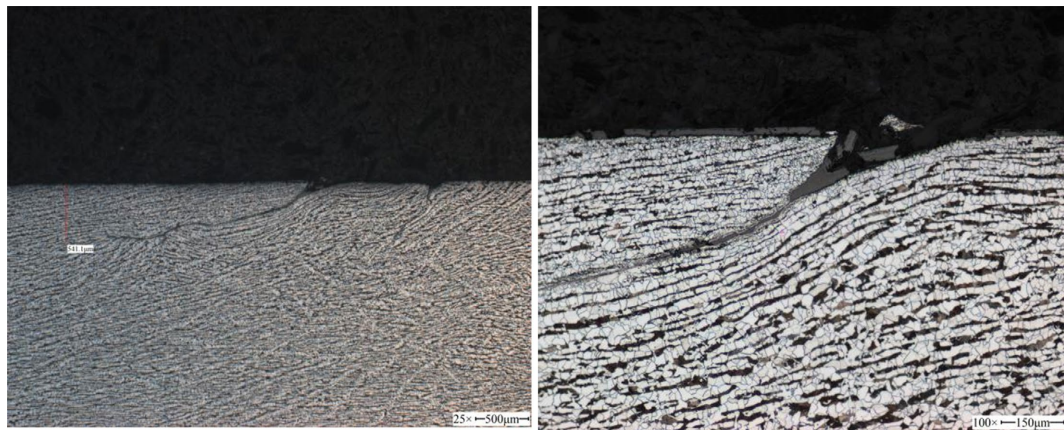


Figure 4. Crack extension along the rolling direction and surrounding microstructural characteristics observed in samples taken along the rolling direction

图 4. 沿轧制方向取样观察到的裂纹沿轧向钢基延展及周边组织特征

从图 2 看出，图 1 中呈撕裂特征的横向裂纹，沿轧制方向取样观察，为开放性的不规则凹坑，深度约 0.4 mm，凹坑两侧无明显的氧化特征，有围绕裂纹而生成的流变特征，周围组织为不均匀的铁素体+珠光体，图 3 显示出部分裂纹近垂直向钢基延伸，深度超过 2 mm，内嵌物未充满，裂纹两侧及毗邻区域均无明显氧化圆点分布，裂纹区域与正常区域也未见明显的组织差异，均为铁素体+珠光体组织。图 4 展示了轧制过程中，裂纹随轧制而向钢基延伸的特征，同样的，裂纹周围未见明显的氧化特征，但裂纹两侧流变特征不完全一致。

从图 2~4 的相关分析可以确认以下结论：

由于不同方式取样的结疤缺陷部位试样，缺陷区域及周围均未出现明显的氧化圆点，也没有呈现明显的组织脱碳特征，说明缺陷不是在高温区长时间停留时就存在的，可以确认钢板表面广泛分布的结疤缺陷基本是在铸坯出加热炉后，即铸坯或钢板轧制过程中出现的。50 mm、60 mm 厚 Q355B 钢板的中间坯厚度为 110~120 mm，初轧结束后表检温度显示为 850℃~920℃，计算温度显示为 900℃~980℃ 的范围，由于中间坯需一定待温时间进入精轧，在此较高温度条件下，如果结疤状裂纹已经出现，则裂纹区域将会发生一定程度的氧化和脱碳现象，而实际图 2~4 中均未出现明显氧化和脱碳现象，视频监控回查也未见中间坯表面有较为明显的缺陷，所以，基本确认上述结疤缺陷出现于精轧阶段。

3.4. 结疤原因分析

由金相分析结论, 钢板表面广泛分布的结疤裂纹不是起源于连铸坯的表面裂纹等缺陷, 但精轧后又大批量出现, 基于上述 Q355B 铸坯均为热装操作, 结合相关文献, 认为可能与铸坯热装过程有关, 如前所示, 铸坯热装是实现节约能源、提高成材率和缩短生产周期的重要操作方法, 但是, 铸坯热装加热并轧制后产生的“热装裂纹”, 是影响热装效率的核心因素。相关研究指出: 铸坯装入加热时表面温度高于 550°C , 轧制后钢板表面出现广泛性裂纹的几率明显增加, 称为“热装裂纹” [4]-[6]。

由于本文所述产线中加热炉炉口测温仪测定的是入炉铸坯端部温度, 尚未进行综合温度理论计算, 因此, 对 Q355B 的入炉表面温度进行了人工跟踪测定, 测得的入炉铸坯下表面温度如图 5 所示。可以看出, 400 mm 厚的 Q355B 铸坯下表面的入炉温度基本都在 550°C 以上, 平均接近 560°C , 加上人工测温受空间距离和稳定性等因素影响, 一般会略低于实际温度, 因此, 可以认为, 上述铸坯入炉表面温度基本均处于 550°C 以上的热装裂纹敏感温度区间, 对应的铸坯从分切到入炉的时间区间为 5.9~9.3 h, 平均为 7.4 h, 铸坯降温规律也与相关文献的实践一致 [1] [4]-[6]。

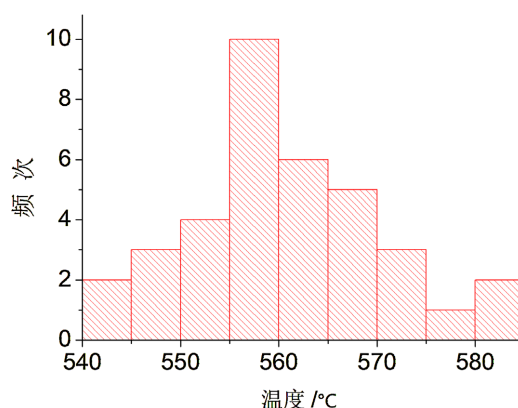


Figure 5. Statistics of the lower surface temperature of 400 mm-thick Q355B cast billets upon entering the furnace
图 5. 400 mm 厚 Q355B 铸坯入炉下表面温度统计

铸坯热装裂纹形成机理如图 6 所示: 铸坯从液态向固态转变的过程中, 组织从奥氏体逐步进入奥氏体-铁素体两相区, 先共析铁素体会优先在自由能较高的奥氏体晶界析出, Q355 等铝镇静钢中的 AlN 等析出物在铁素体内的溶解度远低于奥氏体内, 因此, 此类析出物将大量在奥氏体与铁素体界面富集。如果铸坯从切割到入炉时间短, 入炉温度较高, 则奥氏体向铁素体转变远未彻底完成, 铸坯进入加热炉加热, 原生未相变的奥氏体尺寸将继续长大, 而结晶位置刚析出不久的小块铁素体将重新奥氏体化, 这样就形成了尺寸不均的混晶组织, 而且原奥氏体与铁素体晶界的析出物随着加热回溶, 新奥氏体界面位置会留下回溶后的串状微孔, 使晶界脆化, 这些混晶组织和晶界微孔虽然在铸坯表面不会形成明显的裂纹缺陷和氧化特征, 但在轧制力的作用, 特别是精轧过程中, 钢板表面变形能力下降, 应力集中明显, 很容易出现沿晶界的撕裂, 形成全板面的结疤裂纹。上述 50 mm 以上 Q355B 钢板对应的 400 mm 厚铸坯降温相对较慢, 热送过程组织转变速度更慢, 形成混晶几率更高, 这也是 400 mm 的 Q355B 铸坯比 300 mm 铸坯轧后表面结疤发生率更高的直接原因 [4]-[6]。

4. 结疤缺陷预防措施实施及效果

结合前节相关机理分析结论, 形成如下工艺优化措施:

- 1) 持续提升 Q355B 连铸坯表面质量, 避免铸坯表面裂纹等遗传性缺陷在轧制过程中扩展形成广泛

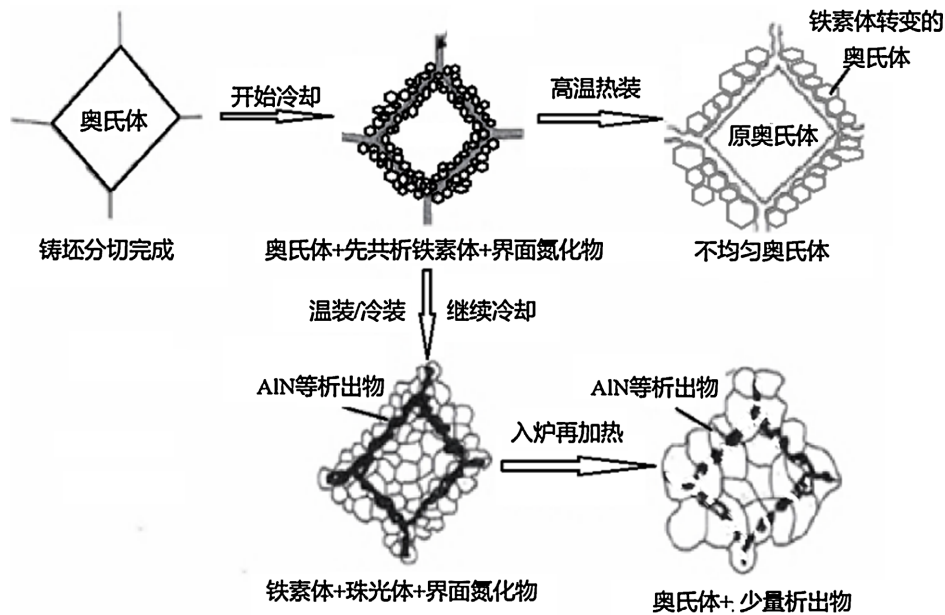


Figure 6. Mechanism of microstructural changes on the hot-charging surface of cast billets
图 6. 铸坯热装表面组织变化机理

性结疤等表面缺陷，影响钢板成材率，同时保持钢水成分、连铸二次冷却参数、拉速等工艺的持续稳定性。

2) 结合生产组织优化，优先以 300 mm 铸坯轧制 50 mm 以上 Q355B 钢板。

3) 开展 400 mm 以上铸坯入炉前传送时间延长试验，传送时间延长至 24 小时，考虑生产效率提升及节能降耗，后续以 2 小时为区间，逐渐减少传送时间，每个方案试验 6 炉钢。

4) 优化精轧工艺，减少精轧第一道次压下量(≤ 10 mm)，促进中间坯温度均匀化的同时，减少轧制撕裂产生表面结疤缺陷的几率。

将 400 mm 的 Q355B 铸坯经堆垛缓冷，传送总时间延长至 24 小时，入炉平均温度降低至 450℃ 以下，轧后表面结疤缺陷发生率按重量计降至 0.13% 以下，降至 18 小时，缺陷发生率为 0.17%，相应的，300 mm 的 Q355B 铸坯总传送时间延长至 15 小时，即可有效避免轧后钢板下表面结疤缺陷的发生，总发生率可降至 0.1% 以下。当然也必须指出，铸坯堆垛缓冷后，吨钢加热能耗增加 5%~6%，约 0.04~0.05 GJ，但与热装质量损失相比，能耗成本增加的成本要低两个数量级。

5. 结论

1) 50 mm 以上厚度 Q355B 钢板表面结疤缺陷出现于精轧工序，由于原奥氏体晶界脆化，精轧过程中钢板表面变形能力下降，应力集中明显，很容易出现沿晶界的撕裂，形成全板面的结疤裂纹。

2) Q355B 表面结疤缺陷起源于铸坯热送环节，铸坯在 550℃ 以上温度入炉，形成混晶，再加热后组织不均，加上析出物回溶形成的串状微孔，造成晶界催化，在精轧过程中形成晶界撕裂，显示为广泛分布的结疤缺陷特征。

3) 通过延长 400 mm 的 Q355B 铸坯入炉总传送时间至 18 h 以上，即可有效降低轧后钢板表面缺陷发生率至 0.17% 以下，验证了该类缺陷原因溯源的科学性和优化措施的有效性。

基金项目

极寒环境用工程机械钢的研发及产业化应用，广西壮族自治区尖峰项目(桂科 AA24206065)。

参考文献

- [1] 余志祥. 连铸坯热送热装技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [2] 张琦, 蔡九菊. 钢铁制造流程系统节能与能效提升[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 32-42.
- [3] 高新军, 郭永谦, 徐刚. 板坯角部横裂纹综述[J]. 河南冶金, 2019, 27(3): 19-21.
- [4] 赵海峰, 龙正民. 连铸坯热送热装工艺技术应用研究[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2011.
- [5] 罗衍昭, 张炯明, 肖超, 等. 热装微合金化中厚板表面裂纹的研究现状[J]. 炼钢, 2011, 27(4): 74-78.
- [6] 林鹏, 颜慧成, 李广敏, 等. Q550D 钢板坯热送热装制度的探讨[J]. 中厚板, 2009, 15(6): 30-34.