

Q235B 热轧带钢锯齿边缺陷： 成因分析与控制策略

Serrated Edge Defect in Q235B Hot-rolled Strip: Investigating Causes and Mitigation Strategies

供稿|兰明清¹, 张向东¹, 陈业雄¹, 田鹏¹, 杜明山¹, 田亚强², 马银涛¹ / LAN Mingqing¹,
ZHANG Xiangdong¹, CHEN Yexiong¹, TIAN Peng¹, DU Mingshan¹, TIAN Yaqiang², MA Yintao¹

内容 导 读

在热轧带钢生产中, 批量出现的锯齿边缺陷会对产品质量构成严重威胁。本文聚焦 Q235B 带钢的锯齿边现象, 通过宏观形貌观察、显微组织分析及气体含量测定等手段, 系统研究了缺陷成因。研究发现, 铸坯角部裂纹、三角区裂纹、皮下气泡和针孔是导致锯齿边及伴随边部分层缺陷的关键因素。基于分析结果, 提出以下控制措施: (1) 优化连铸二冷工艺, 确保结晶器均匀冷却, 并精确控制矫直温度以避免钢的脆性区间, 防止角部裂纹产生; (2) 强化钢水纯净度管控, 保证充分脱氧脱气, 严防二次氧化, 严格控制保护渣水分, 优化氩气流量, 避免浇注流量过大, 从源头消除皮下气泡与针孔; (3) 加强铸坯质量监控, 在下线坯料中进行宏观检查与取样检验, 确保铸坯表面质量达标。这些措施为提升 Q235B 热轧带钢边部质量和产品附加值提供了有效途径。

钢铁企业通过对产品加强质量管控、深化产品缺陷分析, 热轧带钢产品质量进步显著^[1], 但是一些常见的起皮、分层、边部开裂等缺陷仍然影响着热轧带钢产品的生产。Q235B 热轧带钢作为典型的碳素结构钢, 在其生产过程中常见锯齿边并伴随着边部分层的质量缺陷, 大幅降低了产品的附加值^[2]。目前, 钢铁行业同质化竞争日趋白热化, 保证产品的高质量无疑会极大地提高产品的市场竞争力^[3]。因此, 分析并控制热轧带钢边部锯齿状缺陷对于提高产品质量显得极为重要。

本文以 Q235B 热轧带钢边部缺陷为研究对象, 采用光学显微镜、电镜、氧氮氢分析仪等手段, 分析缺陷产生的原因并提出可行的控制措施, 为进一步提高热轧带钢产品质量和工艺优化提供理论依据和实践参考。

缺陷宏观形貌

对存在缺陷的钢卷端部进行宏观观察发现, 带钢锯齿边产生于钢卷两侧或单侧的边缘部位, 多见于传动侧。其形貌呈不规则状, 连续或断续分布于

带钢边部，同时伴随边部不同程度的分层缺陷，局部出现“缺肉”现象，如图 1 所示。通过宏观观测，可明确缺陷的形貌、分布和尺寸。初步判断该缺陷与轧制过程的机械划伤无关，因为机械划伤的缺陷连续且不间断，且缺陷形貌近似相同。

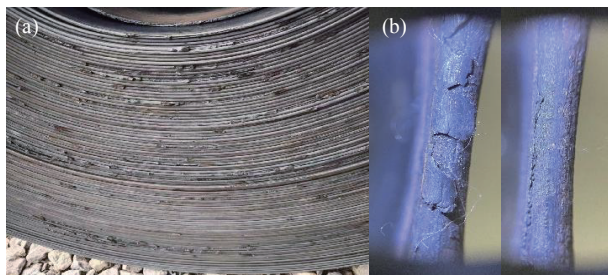


图 1 带钢边部宏观形貌: (a) 端部; (b) 局部

轧制过程

为了排查轧制过程中关键工艺参数是否与带钢边部质量有关，查看热轧带钢产线出现锯齿边和边部分层缺陷的钢卷的生产时段，分析生产过程中的加热炉温度曲线和轧制电流曲线，可知加热炉预热段、加热段和均热段炉顶平均温度分别为 1100、1250 和 1300 °C，精轧各机架的轧制电流为 1000~1300 A。结果表明，生产正常钢卷的加热炉温度控制曲线和轧制电流曲线与生产缺陷钢卷时的相关曲线相同，生产过程的加热和轧机负荷分配稳定，即加热和轧制工艺未出现异常。

金相组织及气体分析

取样位置

在 1#和 2#钢卷尾部的典型缺陷位置共取 2 块试样，再沿带钢边部纵向切分成 1-1、1-2、2-1、2-2 共计 4 块边部试样，试样宽度为 20~40 mm，长度约为 250 mm，厚度为 3.4 mm。在 1-1 和 1-2 钢卷上共取 4 处制备金相试样；在 2-1 和 2-2 钢卷边部共取 5 处金相试样，同时对所取试样进行镶嵌。取样位置和试样镶嵌如图 2 和图 3 所示，取样编号和位置描述见表 1。

金相分析

在显微镜下观察试样抛光后的缺陷形貌和夹

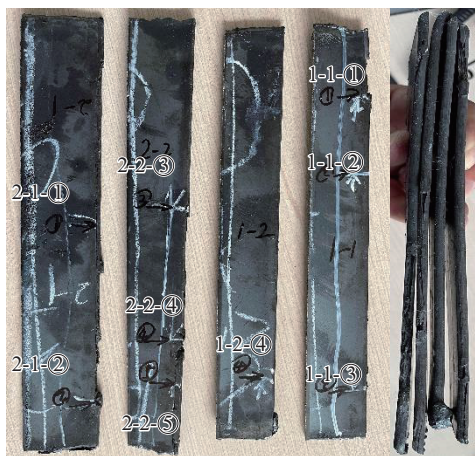


图 2 金相试样的取样位置

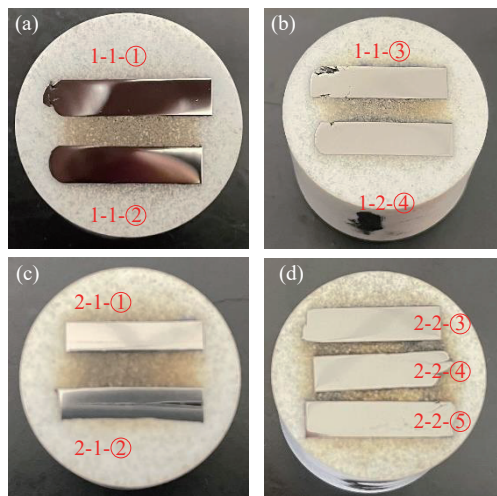


图 3 不同试样对应取样位置的镶样情况: (a) 试样 1; (b) 试样 2; (c) 试样 3; (d) 试样 4

表 1 取样编号和位置描述

试样编号	金相取样位置描述
1-1-①	边部存在明显“缺肉”缺陷
1-1-②	边部无明显“缺肉”缺陷，即正常位置
1-1-③	边部存在明显“缺肉”缺陷
1-2-④	边部存在明显“缺肉”缺陷
2-1-①	边部无明显“缺肉”缺陷，即正常位置
2-1-②	边部存在分层缺陷
2-2-③	边部无明显“缺肉”缺陷，即正常位置
2-2-④	边部存在明显“缺肉”缺陷
2-2-⑤	边部存在“缺肉”缺陷

杂物形态，再经体积分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀后进行金相组织观察。通过观察发现，缺陷形貌、

缺陷处晶粒和脱碳等情况均相似，因此选取编号为 1-1-①、1-1-③和 2-1-②的典型缺陷试样，以及编号为 1-1-②（正常位置）的宏观正常试样作为分析对象。

图 4 为试样 1-1-①的端面抛光形貌和金相组织，可见缺陷包括内部细长裂纹、中心分层长裂纹和孔洞，部分裂纹呈鸡爪状，并伴有不规则空腔；边部缺陷距表面约为 0.6 mm，长度约为 1.6 mm；表面缺陷距边部 0.2~1.6 mm，深度为~0.4mm，裂纹长度为 0.2~0.8 mm，裂纹与带钢轧制方向成 45°；缺陷表层及截面未观察到夹杂物，推断该缺陷在铸坯加

热前已经存在^[4]；缺陷处存在大量氧化铁皮，沿裂纹边缘存在明显的晶粒长大和脱碳现象；组织为铁素体和珠光体。

图 5~7 为试样 1-1-③、1-1-②和 2-1-②的抛光形貌和金相组织。由图 5 可见 1-1-③试样边部存在不规则的大块“掉肉”和孔洞，内部裂纹长度约为 0.6 mm，裂纹与带钢轧制方向呈 45°；表面存在脱碳现象，且无明显粗大晶粒；裂纹内存在氧化铁皮，无明显脱碳和晶粒粗大现象；未出现夹杂物，组织为铁素体和珠光体。

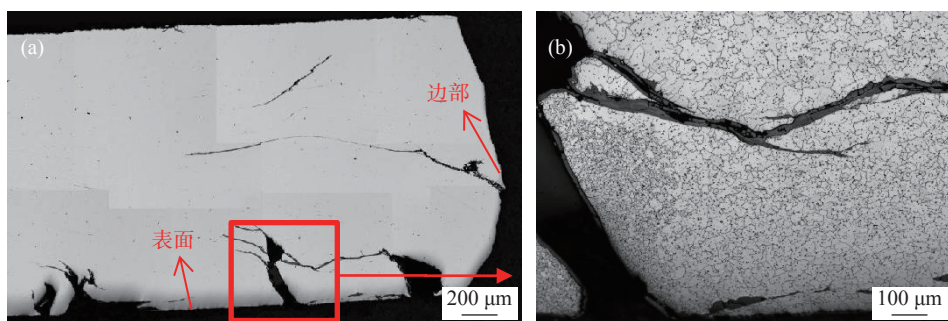


图 4 试样 1-1-①端面形貌和缺陷处金相组织: (a) 整体抛光图; (b) 局部放大金相图

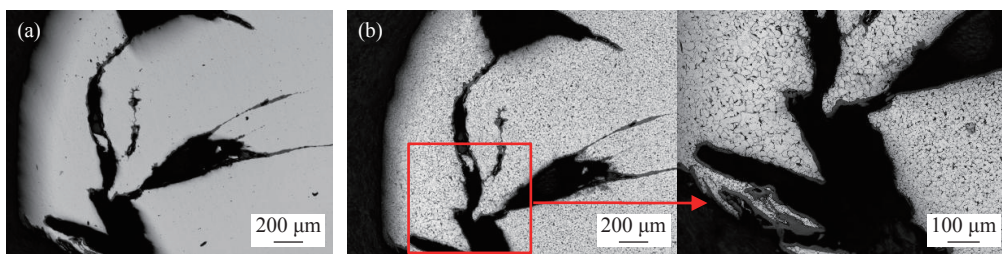


图 5 试样 1-1-③抛光形貌和金相组织: (a) 抛光态; (b) 边部金相组织

由图 6 可见试样 1-1-②表面存在细长裂纹，长度约为 0.7 mm，边部存在微小裂纹或“缺肉”，长度 <0.1 mm，裂纹与带钢轧制方向呈 45°；表层和沿裂纹边缘存在脱碳现象，且无明显粗大晶粒；裂纹内存在氧化铁皮，未出现明显夹杂物；组织为铁素体和珠光体。

试样 2-1-②表面和内部存在细长裂纹，长度约为 0.9 mm，裂纹与带钢轧制方向呈 45°；部分缺陷处表面组织存在明显脱碳和晶粒粗大现象；内部组织中的部分裂纹被轧合，且被轧合的裂纹处存在明显的脱碳现象，裂纹内存在氧化铁皮，未出现明显夹杂物；裂纹根部形貌呈鸡爪状，组织为铁素体和

珠光体。

气体含量分析

在炼钢过程中，若对氧和氮的含量控制不当，将直接影响轧制成品质量。为了验证带钢锯齿边和分层缺陷是否与钢质成分中有害气体含量有关，分别针对试样 1-2 和 2-1 进行气体含量的检测分析，每个试样检测 2 次（检测部位为缺陷附近随机取样），结果见表 2。由表 2 可知，缺陷卷的平均氧气体积分数 > 0.02%，远远高于常规值（0.01% 以下），表明钢中氧含量严重超标，炼钢时脱氧不足^[5]。氮气质量分数 < 0.003%，低于常规值（0.006% 以下），满足炼钢成分的控制标准，说明炼钢对氮

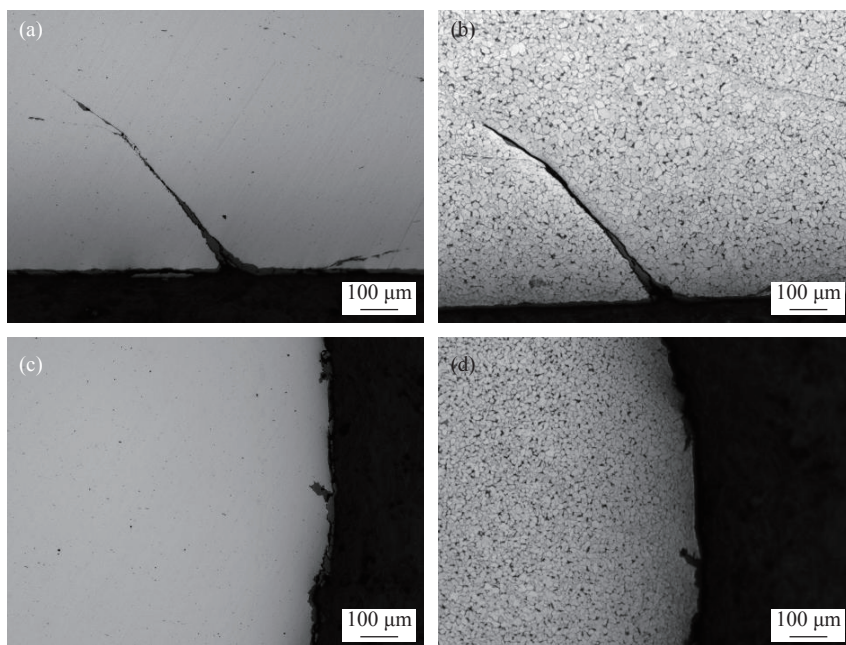


图6 试样 1-1-②抛光形貌和金相组织: (a) 表面抛光形貌; (b) 表面金相组织; (c) 边部抛光形貌; (d) 边部金相组织

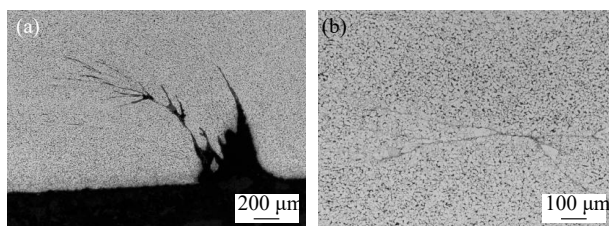


图7 试样 2-1-②缺陷处金相组织: (a) 表面; (b) 内部

表2 不同试样所含气体(质量分数) %

试样	氧气	氮气
1-2	0.0218	0.0028
	0.0220	0.0028
2-1	0.0204	0.0029
	0.0197	0.0029

含量的控制较好。

结果与分析

脱碳

通过观察缺陷试样的组织可知,所有试样均存在裂纹、孔洞和“缺肉”缺陷,沿裂纹边缘和表面均有脱碳现象,且在裂纹内部发现氧化铁皮,表明该缺陷与热轧工序脱碳现象相关,其产生的根源为热轧板缺陷^[6]。进一步分析可知,脱碳是加热炉内裂纹与气氛接触所致,说明钢坯中存在铸坯原始缺陷,

且铸坯表面裂纹缺陷无法在加热炉内去除,Q235B锯齿边缺陷的产生与之相关。

裂纹

根据金相分析,裂纹从前端靠近表面或边部处至裂纹末端,其形态和尺寸特征均相似,结合铸坯缺陷在热轧过程的演变规律(角部裂纹翻平后位于表面距边部15 mm内),以及表面缺陷距边部0.2~5.5 mm的分布范围、裂纹缺陷与带钢轧制方向呈45°夹角等特征,可以确定Q235B分层缺陷由铸坯裂纹造成^[7]。

气泡和针孔

通过检测分析缺陷试样的气体含量可知,缺陷钢卷氧含量超出正常值1倍多,这加速了C-O反应,从而增加了皮下气泡和表面针孔缺陷的生成概率^[8],由于氧含量的控制主要在炼钢工序,可判断转炉炼钢存在脱氧不足的问题^[9]。

控制措施

(1) 通过控制结晶器内钢水的液面流动,确保结晶器均匀冷却,采用合适的二冷温控模式,避开矫直温度在钢的脆性温度区,防止铸坯角部裂纹的产生^[10]。

(2) 在连铸中浇注钢水的过程中,为防止铸坯

出现针孔和铸坯皮下气泡问题,要确保钢水充分脱氧、脱气,避免二次氧化,严格控制保护渣的水分含量,调整氩气流量,同时避免钢水浇注时的流量过大。

(3) 为充分掌握铸坯表面质量与生产工艺参数的关系,在转炉炼钢和连铸工艺参数出现明显变化的情况下,对下线坯料进行宏观检查和取样检验,确保工艺变化后生产的铸坯表面质量符合轧制条件。

结束语

(1) 锯齿边和分层缺陷呈不规则、连续或断续形态分布于带钢两侧边部,局部存在“掉肉”现象,该缺陷与轧制过程机械划伤无关。

(2) 通过加热炉加热曲线和轧制电流曲线可知,加热和轧制工艺未出现异常,即轧钢工序并非带钢锯齿边和分层缺陷产生的主要原因。

(3) 通过金相组织分析可知,带钢缺陷主要为裂纹、孔洞和“掉肉”。裂纹内均存在氧化铁皮,无明显夹杂物;部分缺陷处存在明显的脱碳和晶粒粗大现象;裂纹多有分叉,根部多呈鸡爪状;非缺陷处晶粒正常,组织均为铁素体和珠光体。

(4) 结合试样中氧气、氮气气体含量的检测分析结果,缺陷卷的平均氧气质量分数 $>0.02\%$,说明钢中氧含量严重超标,炼钢时脱氧不足。综上所述,造成 Q235B 热轧带钢锯齿边和边部分层缺陷的原因为铸坯角部或三角区存在裂纹及皮下气泡和针孔。

参考文献

- [1] 于洋,王畅,王林,等.热轧板带生产中氧化的基本特点及麻点缺陷的成因与控制.轧钢,2021,38(5): 1
- [2] 张通,贾军艳,薛强,等.Q235B 热轧钢带成型过程折弯开裂成因分析.金属世界,2024(1): 73
- [3] 陈程,安成钢,李文远.关于热轧宽带钢行业高质量发展的思考和建议.中国冶金,2020,30(11): 1
- [4] 田祥省,胡华东,徐国军,等.热轧带钢结疤缺陷的形成及控制.金属世界,2023(1): 80
- [5] 潘秀兰,李震,王艳红,等.钢中氧的控制及氧化物冶金.鞍钢技术,2007(1): 10
- [6] 宋进英,董双鹏,陈业雄,等.钢板边裂缺陷原因分析及整改措施研究.钢铁钒钛,2012,33(2): 87
- [7] 张贵杰,李昆昆,齐建军,等.连铸坯表面裂纹在轧制过程中演变的研究进展.热加工工艺,2017,46(17): 6
- [8] 高海,张兴利,王琪,等.小方坯凝固过程铸坯表面缺陷形成原因和对轧材影响初探//2012 河北省炼钢连铸生产技术与学术交流论文集.唐山,2012: 135
- [9] 徐国伦.唐钢连铸生产准沸腾碳素焊条钢.炼钢,1997,13(4): 54
- [10] 张炳元.钢坯缺陷产生机理及预防措施.中国金属通报,2017(3): 56

作者简介: 兰明清(1986—),男,辽宁省营口人,工程师,2010年毕业于河北理工大学金属材料专业。主要研究方向:轧钢新工艺、产品质量和新产品研发等。通信地址:河北省唐山市路南区;E-mail: 13363230821@163.com。

通信作者: 田鹏(1976—)男,重庆市酉阳人,正高级工程师,2023年毕业于北京科技大学材料科学与工程专业。主要研究方向:工艺组织性能研究和新产品开发。通信地址:河北省唐山市丰南区;E-mail: tpchbr@163.com。