生产实践

厚规格高强度低合金钢板卷制管开裂原因分析与改进

王进臣[1],李学志[2],董洋[1],曲晓东[1]
(1.鞍钢股份有限公司热轧带钢厂,辽宁 鞍山 114021;
2.鞍山钢铁集团有限公司,辽宁 鞍山 114009)

摘要: 针对鞍钢股份有限公司热轧带钢厂厚规格高强度低合金钢板卷在制管后的开裂现象,通过成分、工艺分析,确定夏比冲击低是产生开裂的原因。利用光学显微镜分析、薄膜法分析和复型法对开裂样板进行检测分析,发现板卷中存在粗大的第二相析出,整体微观组织不均匀、晶粒粗大且上下表面不对称,铁素体晶界存在粗大呈链状或网状分布的碳化物(合金渗碳体)。在这些因素的共同影响下,导致板卷在制管受力后产生开裂。通过改进成分设计,优化热制度、轧制温度、冷却温度、轧制变形制度等,批量生产6 000 t厚规格Q345B热轧板卷,冲击功的单值及均值达到了180 J以上,板卷制管后的开裂比例由25%下降到0,彻底解决了板卷制管开裂技术难题。

关键词: 厚规格;低合金钢;板卷;开裂
中图分类号: TG142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)03-0051-06
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.03.009

Analysis of Cracking Causes and Improvement Measures for Thick-gauge HSLA Steel Plate Coil after Tube Making

WANG Jinchen[1], LI Xuezhi[2], DONG Yang[1], QU Xiaodong[1]
(1. Hot Rolled Strip Steel Mill of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China;
2. Anshan Iron & Steel Group Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the cracking phenomenon of thick-gauge HSLA steel plate coils rolled by Hot Rolled Strip Steel Mill of Angang Steel Co., Ltd. after being used for tube making, composition and process analysis were conducted, and it was determined that the low charpy impact test result was the cause of the cracking. Using optical microscopy analysis, thin film analysis and replication method to test and analyze the cracking specimen, it was found that coarse second-phase precipitates existed in the plate coil, the overall microstructure was uneven, the grains were coarse and the upper and lower surfaces were asymmetrical, and there were coarse carbides (alloyized cementite) distributed in a chain-like or network-like pattern at the ferrite grain boundaries. Under the combined influence of these factors, the plate coil cracked after being subjected to tube making stress. By improving the composition design, optimizing the thermal regime, rolling temperature, cooling temperature, rolling deformation regime and so on, through the mass production of 6 000 tons of thick-gauge Q345B hot-rolled steel coils, the individual impact and average impact energy values exceeded 180 J. As a result, the cracking rate of steel coils during pipe manufacturing decreased from 25% to 0, completely resolving the technical challenge of coil cracking in pipe production.

Key words: thick gauge; HSLA steel; plate coil; cracking

王进臣,高级工程师,2004年毕业于东北大学材料成型及控制工程专业。E-mall: agwangjc@163.com

高强度结构用热轧板卷钢广泛应用于建筑、车辆、船舶、桥梁、机械制造、焊接钢结构加工等领域,其产品性能具有一定的强度,较好的塑性、低温韧性以及良好的冲压性能,是钢铁行业的重要产品之一[1-3]。鞍钢股份有限公司热轧带钢厂生产的17.5 mm厚规格高强度低合金Q345B热轧板卷在客户螺旋埋弧焊制管后出现了管体断裂的问题,对应于板卷头部(内圈)20 m范围内,严重影响了客户的使用。

为了确定板卷制管成型开裂的原因,本文对问题钢管的开裂位置取样,对其金相组织、透射电镜组织和析出相等进行分析,并结合现场成分、工艺的生产实际,制定了合适的板卷生产工艺改进方案,并成功解决了该板卷开裂的问题。

1 Q345B钢管开裂缺陷

检验的样品取自于客户在螺旋埋弧焊制管过程中出现裂纹的17.5 mm厚Q345B钢管,对应于板卷的头部2 m处,试样成分见表1,裂纹宏观形貌如图1所示。由图1可知,缺陷在螺旋埋弧焊管的外表面开裂,裂纹呈斜向延伸,与钢板轧制方向成一定角度,是一条具有明显扩展特征的连续的不规则线性缺陷,表面可见张开痕迹,无明显腐蚀或撞击痕迹。

表1 试样成分(质量分数)

Table 1 The Composition of the Specimen (Mass Fraction)　　%

C	Si	Mn	P	S	Als	N	Nb	Ti
0.064	0.17	0.84	0.012	0.006 6	0.024	0.002 9	0.021	0.048

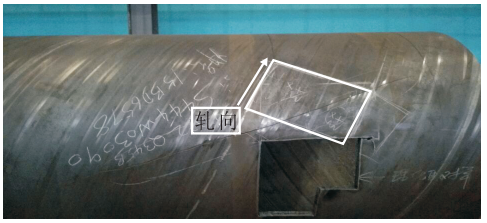


图1 裂纹宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic Morphology of the Crack

2 开裂处性能检测与组织分析

2.1 拉伸性能试验

对所取试样进行拉伸性能测试,试验标准为GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,试验温度20 ℃,试验方向为横向(垂直于板卷轧向),试样拉伸结果见表2。

表2 试样拉伸结果

Table 2 Tensile Test Result of the Specimen

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	A_{50}伸长率/%
试样	455	572	22
标准	≥335	470~630	≥20

结果表明,断裂试样的屈服强度、抗拉强度、伸长率都满足标准要求。其中,屈服强度和抗拉强度富余量较大,说明钢管管体断裂与板卷拉伸性能无明显对应关系。

2.2 冲击性能试验

对所取试样进行夏比冲击性能测试,试验标准为GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》,试验温度20 ℃,试验方向为纵向(平行于板卷轧向),试样夏比冲击结果见表3。

表3 试样夏比冲击结果

Table 3 Charpy Impact Result of the Specimen

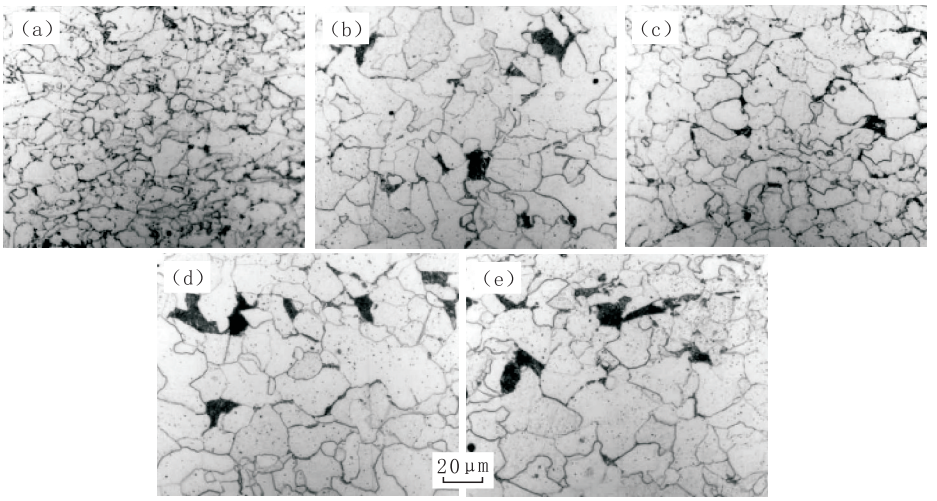
项目	20 ℃夏比冲击功/J				断口形貌	位置
	单值			均值		
试样	6.4	5.2	5.2	5.6	脆性	头部2 m
标准	≥28			≥40	无要求	无要求

结果表明,3个断裂试样的夏比冲击性能均不合格,且断口均为脆性断口,冲击功单值低于标准要求的28 J,均值低于标准要求的40 J,说明钢管管体断裂的诱因是此处板卷冲击韧性差,在制管过程中发生了脆性断裂。

2.3 光学显微镜分析

试样的显微组织如图2所示,由图2可知,试样的金相组织均由铁素体、珠光体及少量渗碳体组成,表面珠光体含量较少,其金相组织不均匀、基体晶粒粗大且上下表面不对称。在该处的金相组织对应的是板卷头部位置,由于板卷规格厚,生产时需采用800 ℃左右的高温进行卷取[4],这导致头部附近板卷

的冷却速度缓慢，使晶粒粗大，在晶界处产生少量渗碳体，同时板卷上下表面冷却水分布不同，造成上下表面晶粒度尺寸差异较大。通过金相组织可以看出，基体组织不均匀且晶粒粗大与板卷开裂密切相关。



(a) 上表面；(b) 下表面；(c) 上表面1/4；(d) 下表面1/4；(e) 板厚1/2处

图2 试样的金相组织

Fig. 2 Microstructure of the Specimen

2.4 透射电镜薄膜法分析

通过透射电镜薄膜法观察发现，试样的显微组织有少量粗大的晶界渗碳体，晶界渗碳体显微组织如图3所示。采用透射电镜高倍数进一步放大观察，试样基体中渗碳体沿铁素体晶界以链条状分布，渗碳体微观形貌如图4所示。

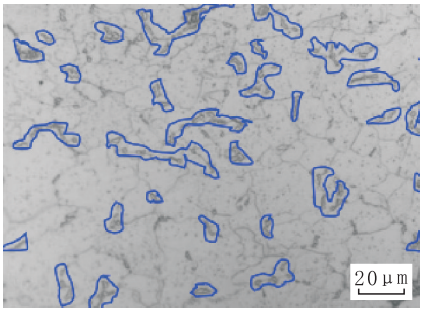


图3 晶界渗碳体显微组织

Fig. 3 Grain Boundary Cementite Microstructure

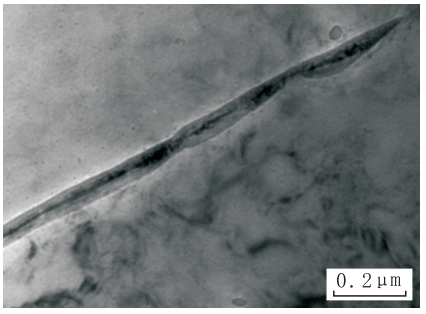


图4 渗碳体微观形貌

Fig. 4 Microscopic Morphology of the Cementite

这种铁素体晶界处存在粗大的呈链条状分布的碳化物(合金渗碳体)，破坏了基体的连续性，直接影响试样冲击韧性，同时沿晶渗碳体为硬脆相，在外力作用下更易成为裂纹源导致板卷开裂。

2.5 透射电镜复型法分析

通过透射电镜复型法观察发现，试样的显微组织中第二相粒子不多且尺寸较大，粒子尺寸多在100~400 nm，少量粒子在100 nm以下，极少量大粒子达1 μm左右，析出的第二相粒子如图5所示。

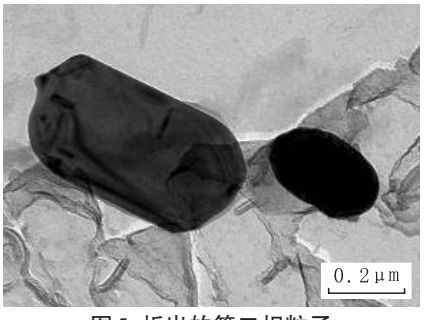


图5 析出的第二相粒子

Fig. 5 Morphology of Precipitated Second-phase Particles

试样的能谱分析如图6所示，由图6可知，粒子成分均为Ti、Nb复合的碳氮化物，Ti含量较高。在V、Ti、Nb这3种常用的微合金元素中，Ti的合金化成本最低，对生产低成本钢板具有明显的优势[2-3]，所以钢厂生产时经常添加较高含量的Ti来提高强度[5-7]。

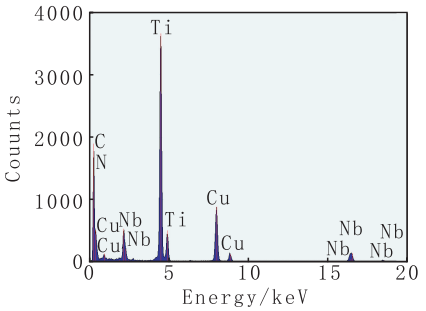


图6 试样的能谱分析

Fig. 6 Energy Dispersive Spectroscopy Analysis of the Specimen

正常情况下,含有Ti、Nb的微合金钢与工艺匹配,细小弥散分布的Ti、Nb复合碳氮化物,能够通过钉扎晶界作用,在连铸坯加热阶段有效抑制奥氏体晶粒的异常长大,同时改善钢材的焊接性能。然而,在本试样中,Ti、Nb复合碳氮化物已呈现粗大化特征(部分尺寸达1 μm)。这些粗大析出相在奥氏体高温阶段在连铸坯中提前析出,对晶界的钉扎效果减弱,导致奥氏体晶粒产生异常粗化,钢材基体的晶界结合力大幅降低,韧性储备严重不足。这些粗大的第二相粒子由有益的强化相转变为有害的应力集中源,在焊接与轧制应力的作用下,成为裂纹萌生与扩展的核心诱因,最终诱发宏观开裂。此外,Ti、Nb复合碳氮化物的非均匀性聚集分布,会破坏基体组织的连续性,形成组织性能薄弱区,为微裂纹的快速扩展提供了通道。为了减少工艺波动对钢材后续制管产生开裂的风险,可以采取适当降低Ti含量,同时保证钢材强度和韧性,适当提高Mn含量。

因此,成分中含有Ti、Nb的微合金钢与工艺参数的匹配性对析出相行为及最终制管开裂风险具有重要影响。为明确异常析出相产生的原因,下文将进一步对连铸坯加热及轧制全流程的工艺参数展开关键参数排查,以揭示粗大Ti、Nb复合碳氮化物的形成机制,并提出针对性的工艺优化方案。

3 板卷开裂产生原因和改进措施

3.1 工艺参数排查

对产生开裂的板卷进行工艺参数排查发现,为避免卷取机发生头部卡钢问题,在厚规格Q345B生产中采用层流让头浇水方式,板卷头部精轧阶段的终轧温度高达910~950 ℃(高于工艺要求温度),板卷头部卷取温度高达810~860 ℃,且高温段过渡到设计要求的卷取温度(620 ℃)长达10~20 m,工艺曲线见图7。这些都给板卷头部冲击韧性不良、后续制管产生开裂带来不利影响。

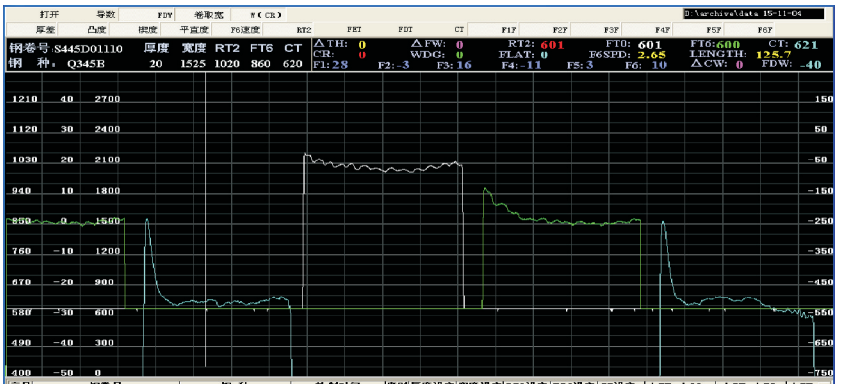


图7 工艺曲线

Fig. 7 Process Curve

3.2 板卷开裂原因

从宏观的力学性能分析,开裂钢管的强度指标(屈服强度、抗拉强度、伸长率)均满足标准要求,且强度的富余量较大,可以排除钢材的强度不足导致的开裂;另一方面,开裂钢管的韧性指标冲击功均低于标准要求,其冲击性能不满足标准要求,且断口呈现典型的脆性断口特征。钢材的韧性指标的不足,使板卷制管过程中无法承受焊接应力、成型应力等外力作用,在韧性脆弱区域萌生裂纹源,并快速发生脆性断裂,最终在钢管外表面产生宏观开裂现象。

从微观的组织层面分析,开裂钢管的显微

组织由铁素体、珠光体及粗大渗碳体组成，钢管的晶粒粗大且上下表面晶粒度不对称，整体金相组织存在明显不均匀。这些组织异常原因主要是生产时采用高温使板卷头部卷取工艺，但板卷头部较厚，其冷却速度缓慢，导致奥氏体晶粒无法得到细化，晶界结合力下降明显；同时板卷冷却时上下表面冷却水分布不均匀，又造成了上下表面微观组织的严重不均匀，形成显著的组织差异和薄弱区域，为裂纹萌生提供了基础条件。

在透射电镜薄膜检测中发现，试样基体中存在大量链条状分布的粗大渗碳体组织，在板厚1/2处表现最为突出。这些粗大渗碳体具有硬脆的特点，直接割裂了金属基体的连续性，容易在晶界处产生应力集中，一旦受到外力作用，极易成为初始裂纹源，并为裂纹的快速扩展提供路径，导致钢材的抗开裂能力大幅度下降。在透射电镜复型检测中发现，试样中的Ti、Nb复合碳氮化物析出相尺寸偏大，主要分布在100~400 nm，部分粒子尺寸甚至达1 μm，且分布不均、存在局部聚集，具有明显的劣化特性。这些析出相在奥氏体高温区提前析出并发生粗化，其晶界钉扎效果大幅减弱甚至完全消失，直接导致奥氏体晶粒异常长大和粗化。粗大且分布不均的析出相粒子较基体组织硬和脆，割裂基体组织连续性，极易引发应力集中，成为裂纹萌生核心，是最终导致制管过程中出现宏观开裂缺陷的关键组织诱因。

经过以上分析认为，Q345B热轧板卷的冲击韧性不足是造成板卷制管过程中和打桩过程中管体开裂[8-10]的直接原因。Ti微合金化Q345B的成分与实际工艺不匹配导致的板卷微观组织异常（晶粒粗大、组织不均匀、晶界存在粗大渗碳体、第二相析出粗大等）是造成板卷制管开裂的本质原因。

3.3 改进措施

通过调整轧制与冷却工艺参数，细化晶粒，改善金相组织均匀性，避免渗碳体的析出。取消易导致温度偏高的层流让头浇水工艺，优化厚规格板卷头部轧制方式。通过设备调试及工艺改进，在避免卡钢问题的同时，将头部精轧终轧温度控制在合理区间。对板卷头部的冷却水量与水流分布实施精准控制，提高头部冷却速度，并保证板卷头部温度上下表面同步，确保板卷头部卷取温度达到设计要求的650 ℃以下，缩短高温过渡段长度，减少头部长时间高温停留对组织与性能的负面影响，抑制奥氏体晶粒异常长大和不均匀，获得细小、均匀的铁素体+珠光体组织，无渗碳体的析出，提升板卷冷却后基体组织的连续性与均匀性，增强晶界结合强度，降低了晶界开裂的风险。

调控Ti析出相尺寸与分布，消除有害粗大相。在保证钢材强度的前提下，Ti含量由0.048%下降到0.013%，避免Ti含量偏高与工艺波动不匹配导致析出粗大第二相的风险。同时Mn含量由0.84%提高到1.20%，通过Mn的固溶强化与晶粒细化作用，弥补Ti含量下降带来钢材强度与韧性的下降部分。主要通过优化连铸坯加热工艺，控制加热温度与保温时间，避免奥氏体化阶段温度过高，防止Ti、Nb复合碳氮化物提前析出，确保析出相呈细小、弥散状分布，恢复其晶界钉扎的有益作用。

针对含Ti、Nb微合金化的Q345B制管用板卷，建立成分设计与轧制、卷取、冷却工艺的协同匹配机制，根据板卷厚度规格和Ti、Nb成分含量制定特定的工艺参数，避免单一追求工艺操作普适性而忽略工艺的适配性，加强生产全流程的工艺参数排查与质量检测。改进前后对比见表4。

表4 改进前后对比

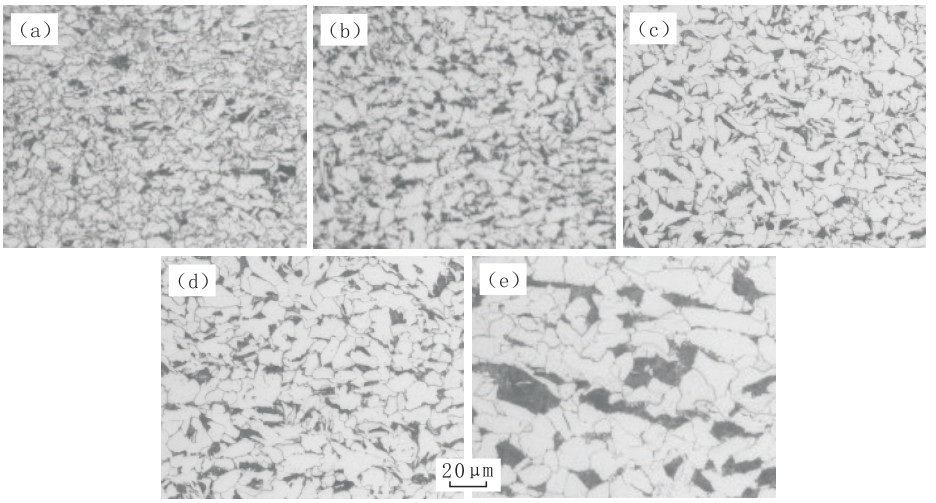
Table 4 Comparison before and after Improvement

项目	ω[Ti]/%	ω[Mn]/%	ω[P]/%	LF	头部CT温度	上下集管水量比
改进前	0.048	0.840	<0.025	Ca处理无喂线速度、净吹氩时间、镇静时间、喂线量要求	无要求	无要求
改进后	0.013	1.200	<0.020	增加Ca处理喂线速度、净吹氩时间、镇静时间、喂线量要求	<700 ℃	1:1.15

3.4 改进效果

钢厂根据改进措施批量生产6 000 t厚规格Q345B热轧板卷，板卷的金相组织如图8所示，由图8可知，板卷金相组织均为铁素体与珠光体，无渗碳体，且组织分布均匀。板卷的冲击功见图9，由图9可知，冲击功的单值及均值大于

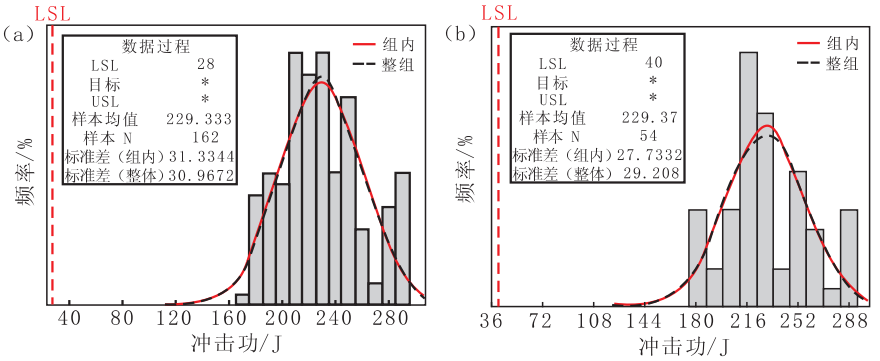
180 J,板卷的冲击韧性得到明显改善,并且在制管后未产生开裂缺陷,开裂比例由原来的25%下降到0,改进后的板卷制成的钢管如图10所示。



(a) 上表面;(b) 下表面;(c) 上表面1/4;(d) 下表面1/4;(e) 板厚1/2处

图8 板卷的金相组织

Fig. 8 Microstructure of the Plate Coil



(a) 冲击功单值;(b) 冲击功均值

图9 板卷的冲击功

Fig. 9 Impact Energy of the Plate Coil



图10 改进后的板卷制成的钢管

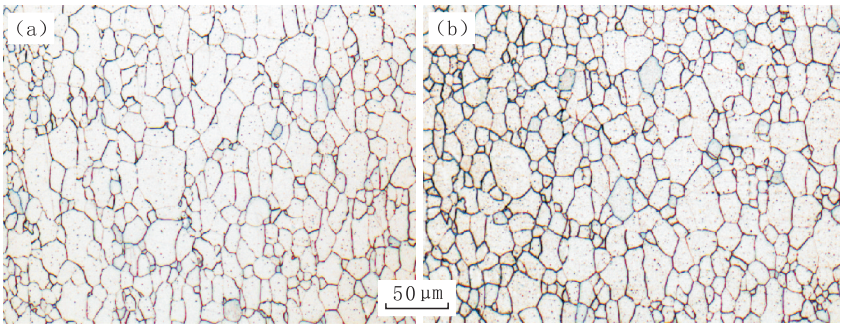
Fig. 10 Steel Tubes Made from Improved Coils

4 结论

(1) 板卷头部位置夏比冲击性能低,是造成板卷制管过程中管体开裂的直接原因;Ti微合金化Q345B的成分与实际工艺不匹配导致的板卷微观组织异常,是造成板卷制管开裂的本质原因。

(2) 通过采取改进成分设计,Ti含量由0.048%下降为0.013%,Mn含量由0.84%提高到1.20%,优化加热制度、轧制温度、冷却温度、轧制变形制度等,特别是头部卷取温度控制在650 ℃以下,批量生产6 000 t厚规格Q345B热轧板卷,冲击韧性得到明显改善,冲击功的单值及均值达到了180 J以上,板卷制管后的开裂比例由原来的25%下降到0,彻底解决了板卷制管开裂问题。

(下转第61页)



(a) 优化前；(b) 优化后

图6 工艺优化前后典型钢卷金相组织

Fig. 6 Metallographic Structure of Typical Steel Coil before and after Process Optimization

晶定向生长，在正常光照下产生镜面反射，缺陷位置比正常位置光亮，大量的点状缺陷汇聚到一起形成了色差带。

（2）电镀锌冷轧基板表层出现粗大混晶晶粒，会使电镀成品镀层呈现片状结晶。经综合分析，热轧卷取温度（750 ℃）高于A_1温度，且卷取过程中助卷辊压力过大，二者共同作用使热轧基板表面形成粗大晶粒；该类晶粒经冷轧退火后难以消除，最终造成冷轧基板表层晶粒异常粗大。

（3）热轧工序采取卷取温度由750 ℃降低至710 ℃，同时调整卷取过程中的助卷辊压力参数，该缺陷得到消除，工艺优化对最终成品组织、性能无明显影响。

参考文献

[1] 王爱华，朱久发. 我国电镀锌板发展趋势的探讨[J]. 轧钢，2008，25(4)：39-42.
[2] 朱国森，韩赟，蒋光锐，等. 汽车车身用新型冷轧薄板研发进展[J]. 工程科学学报，2022，44(9)：1585-1594.
[3] 朱国森，蒋光锐，马家骥，等. 高鲜映性免中涂汽车外板制造关键技术及装备[J]. 中国冶金，2021，31(4)：123-125.
[4] 朱迎五，尹小文，杨鸿智. 根据ECB探讨车身轻量化技术趋势[J]. 汽车工艺师，2024(9)：42-46.
[5] 刘亮，桂洲，马珩嗥，等. 电镀锌板流星状白色亮斑缺陷的研究[J]. 武钢技术，2014，52(4)：22-24.
[6] 詹志东，黄成江，张玉妥，等. 带钢卷取温度与铁素体晶粒长大模拟[J]. 钢铁，2004，39(4)：25-29.
[7] 李朋欢，包燕平，岳峰，等. 异常粗大的奥氏体晶粒对表面晶间裂纹的影响[J]. 北京科技大学学报，2009，31(1)：177-181.
[8] 王玥，冯立明. 电镀工艺学（第二版）[M]. 北京：化学工业出版社，2018：33-37.
[9] 薛俊平，刘李斌，姚舜，等. 热轧低碳钢表层粗晶原因分析及控制[J]. 上海金属，2014，36(3)：6-10.
[10] 李润昌，肖茂元，齐达. 低碳铝镇静钢热镀锌表面粗晶缺陷形成原因及对策[J]. 轧钢，2018，35(4)：42-44.
[11] 李显，杨跃标，叶姜，等. 热轧低碳铝镇静钢表层粗晶缺陷原因分析及控制措施[J]. 轧钢，2020，37(5)：25-29.
[12] 邓凯，孟庆格，郑红星. 铝镇静钢连续退火相变行为与抗应变时效性能[J]. 中国冶金，2022，32(8)：82-88.

（编辑 白璐）

修回日期：2026-03-24

（上接第56页）

参考文献

[1] 刘跃飞. Q345B热轧钢板加工开裂的原因分析田[J]. 金属材料与冶金工程，2015，43(1)：20-23.
[2] 王飞. 高强度结构用钢在海洋工程结构中的应用研究[J]. 中国设备工程，2024(2)：252-254.
[3] 孙匮甫，冯阳，陈振业，等. 一种高强度多功能建筑结构用钢的耐蚀性及耐蚀机理[J]. 材料与冶金学报，2022，21(6)：28-34.
[4] 霍建生，秦红波，郑立康，等. 厚规格热轧带钢卷取温度控制精度研究[J]. 轧钢，2024，41(3)：111-116.
[5] 潘辉，周娜，李飞，等. Ti微合金化高强机械用钢控轧控冷工艺研究[J]. 轧钢，2013，30(3)：25-28.
[6] 蔡宁，鞠新华，邢阳，等. Ti微合金化700MPa级汽车大梁钢的研究[J]. 轧钢，2013，30(5)：5-9.
[7] 张志坚，杨鹏辉，李帅，等. Mn对高Ti低合金高强度钢Q355B组织性能影响[J]. 天津冶金，2021(3)：33-37.
[8] 李锐峰，赵旭，栾晖，等. 油气管道开裂原因[J]. 理化检验-物理分册，2022，58(12)：58-63.
[9] 李亮，黄磊，张鸿博，等. 某L485MB钢级天然气输送管线试压开裂原因分析[J]. 石油管材与仪器，2023，9(2)：81-86.
[10] 王飞，周少坤，王海涛，等. L360N天然气管道弯管的开裂原因分析[J]. 热加工工艺，2022，51(21)：151-154.

（编辑 白璐）

修回日期：2025-06-11