

CSP 产线管线钢 L415M 的组织性能研究

王建东¹, 曹 妍², 刘政峰¹, 张 玮¹, 张文凯¹, 亢英利¹, 赵志龙¹, 常 慧³

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢冷轧板材厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 为拓展 CSP 产线品种结构, 突破紧凑式带钢流程生产微合金管线钢的技术瓶颈, 文章以 L415M 为对象, 采用 KR-BOF-LF-CC 冶炼与低 C-Mn-Nb-Ti 微合金体系, 依托 Q355B 搭桥模式开展工业试制。结果表明: 9.75 mm 规格性能满足要求, 7.75 mm 规格头部与 45° 方向存在性能波动。受设备条件限制, 产品晶粒较粗、强度偏低、屈强比偏高。优化成分及工艺可提升薄规格稳定性, 为 CSP 产线管线钢规模化生产提供技术支撑。

关键词: CSP; L415M; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG332

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)03-0045-07

Study on Microstructure and Properties of Pipeline Steel L415M Produced with CSP Production Line

Wang Jiandong¹, Cao Yan², Liu Zhengfeng¹, Zhang Wei¹, Zhang Wenkai¹,
Kang Yingli¹, Zhao Zhilong¹, Chang Hui³

- (1. CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Cold Rolled Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.,
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In order to expand the product type mix of CSP production line and break the technical bottleneck of producing microalloyed pipeline steel with compact process of strip steel, the industrial trial production is carried out based on Q355B bridge mode with smelting of KR (kambara reactor) - BOF (basic oxygen furnace) - LF (ladle furnace) - CC (continuous casting) and low C-Mn-Nb-Ti microalloying system by taking the pipeline steel L415M as the object in this paper. The results showed that the performances of sample with the specification of 9.75 mm could meet the requirements as well as there was performance fluctuation at head and in the direction of 45° for sample with the specification of 7.75 mm. Due to the limit of equipment conditions, the grain is coarser, strength is lower and yield ratio is higher for the product. The stability of product with thin specification could be improved by optimizing the composition and process,

which could provide the technical support for large scale production of pipeline steel with the CSP production line.

Key words: CSP; L415M; microstructure; mechanical properties

管线钢是支撑国家能源战略、保障石油天然气长距离输送安全的核心金属材料。随着能源输送需求持续增长,管线钢向高强度、高韧性、优良焊接性等方向快速发展,对生产流程、成分设计、工艺控制及组织性能调控提出了极为严苛的要求^[1-5]。L415M 作为中强度管线钢的典型代表,具备适中的强度水平、良好的低温韧性与焊接适应性,是低压油气输送、市政管网及普通油气集输工程中用量最大、应用最广的管线钢之一。

传统管线钢多依托厚板产线或 2 250 mm 级宽带钢热轧产线生产,该类产线具备总压下量大、轧制温度区间宽等优势,能够通过大变形诱导铁素体相变、细晶强化与相变强化协同作用,实现管线钢强韧性匹配与组织均匀性控制^[6-10]。CSP(Compact Strip Production, 紧凑型带钢生产)产线作为短流程热轧工艺的典型代表,具有流程紧凑、投资成本低、能耗低、生产效率高和交货周期短等突出优势,但 CSP 产线存在粗轧机架少、精轧道次压下率受限、总压下量不足、出炉温度偏低、再结晶过程不充分等设备与工艺固有点,对微合金元素作用发挥、晶粒细化效果、组织均匀性及性能稳定性带来显著影响,成为制约管线钢等高端品种在 CSP 产线稳定生产的关键技术难题^[11-14]。

本文依托 CSP 产线工业试制 L415M,从力学性能、显微组织深入分析工艺参数与组织性能之间的内在关联机制,明确试制过程中存在的核心问题与制约因素,提出针对性工艺优化方案与下一步工作计划,为 CSP 产线管线钢工业化稳定生产提供理论支撑与技术指导。

1 包钢 CSP 生产线 L415M 的试制

1.1 试制成分设计

本次实验材料为 CSP 产线试制的管线钢 L415M,为适配 CSP 产线设备特性与工况条件,同时兼顾性能达标控制,创新采用低 C + Mn + Nb + Ti 微合金化体系,通过固溶强化与 Nb 元素细晶强化,在保证低温韧性与焊接性能的前提下,有效提升钢材强度。

与传统 2 250 mm 宽带钢产线 L415M 成分体系相比,本次 CSP 试制成分设计要求如表 1,在设计成分范围内,降低 0.1% 的 Mn,减少 Mn 元素偏析带来的带状组织恶化风险;增加 0.01% 的 Nb,充分发挥 Nb 在奥氏体再结晶过程中的 S 抑制作用与相变过程中的细晶强化作用,弥补 CSP 产线压下量不足导致的晶粒粗大问题。

表 1 L415M 化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Alt	Ca	O	N
≤0.12	≤0.35	≤1.6	≤0.018	≤0.008	≤0.05	≤0.03	≤0.03	≤0.006	-	≤0.009

1.2 试制工艺

1.2.1 冶炼与连铸工艺

本次试制采用 KR(Kambara Reactor) BOF(Basic Oxygen Furnace) LF(Ladle Furnace) CC(Continuous Casting)全流程洁净钢生产工艺,确保了钢水纯净度、成分均匀性与铸坯质量稳定。KR 可精准控制钢水原始硫含量,为后续低硫控制奠定基础,保证管线钢抗硫化氢腐蚀性能;BOF 可控制终点碳温双命中,减少磷、硫等有害元素带入,避免过氧化导致的钢水洁净度下降,保证 Nb、Ti 等微合金元素收得率稳定;LF 可实施微合金化成分微调,精准调控 Nb、Ti、Mn 等元素含量,进行钙处理改性夹杂物,将长条状 MnS 夹杂物改性为球形 CaS 夹杂^[15],改善

钢材横向韧性与抗疲劳性能,全程氩气保护,避免二次氧化,提升钢水洁净度;CC 可控制液相线温度 $1\,520 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,过热度稳定在 $15 \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,避免低过热度导致的水口堵塞与高过热度引发的晶粒粗大,保证铸坯凝固均匀、内部质量优良,无中心疏松、偏析等缺陷。

1.2.2 热轧工艺

为充分发挥 Nb、Ti 微合金元素的细晶强化与析出强化作用,结合 CSP 产线设备工况与薄规格轧制特点,制定热轧工艺:高温出炉保证奥氏体充分再结晶、合理压下率实现晶粒细化、精准终轧与卷取温度控制相变组织、前集中冷却保证强韧性匹配、高压除鳞保证表面质量。

合理的出炉与开轧温度,促使微合金元素充分固溶,确保奥氏体未再结晶区轧制。在轧制过程中,严格执行制定的控轧控冷工艺,在轧制过程中达到稳定的压下率,以达到细化奥氏体晶粒作用;在终轧、冷却、卷取过程中,精准控制温度以保证析出相的处于预期相变比。

1.3 性能检测与显微组织分析

管线钢对钢卷头尾部性能具有极高要求,因此现场轧制过程中需针对性设置干头长度,控制头尾部冷却制度,避免因温度波动、冷却不足导致的性能不合格。本次试制选取4块成分稳定板坯,生产两种核心规格:7.75×1 500 mm、9.75×1 500 mm,其中7.75×1 500 mm的两块板坯产出的试验卷的取样记为试样1、试样2,其中9.75×1 500 mm的两块板坯产出的试验卷的取样记为试样3、试样4。

对试制钢卷进行系统力学性能检测,每卷尾部

切除4 m~6 m后取样,7.75 mm规格增设头部5 m、头部10 m位置取样,取样方向为沿轧制方向45°、垂直轧制方向横向,覆盖下游制管不同受力方向,检测项目包括屈服强度 $R_{0.5}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A_{50} 、屈强比、冷弯曲性能、-20℃冲击性能、维氏硬度HV10、-15℃落锤性能。

采用金相显微镜对试制钢卷进行显微组织表征,检测指标包括晶粒度等级、带状组织级别、非金属夹杂物类型与级别。同时,与2 250 mm产线同牌号产品进行组织对比,分析CSP流程与传统流程在组织形态、晶粒尺寸、相组成等方面的差异。

2 组织与性能分析

2.1 力学性能分析

对L415M试制卷力学性能标准范围如表2所示。

标准范围	拉伸				弯曲	-20℃冲击功/J			维氏硬度HV10			-15℃落锤/%	
	$R_{0.5}$	R_m	A_{50}	屈强比		冲击1	冲击2	冲击3	硬度1	硬度2	硬度3	落锤1	落锤2
	455~560	520~650	≥28	≤0.92		≥60	≥60	≥60	≤220	≤220	≤220	≥70	≥70

2.1.1 拉伸性能

拉伸性能是评价管线钢强度、塑性及结构安全

性的核心力学指标,图1为L415M的7.75×1 500 mm两个试验卷拉伸性能图。

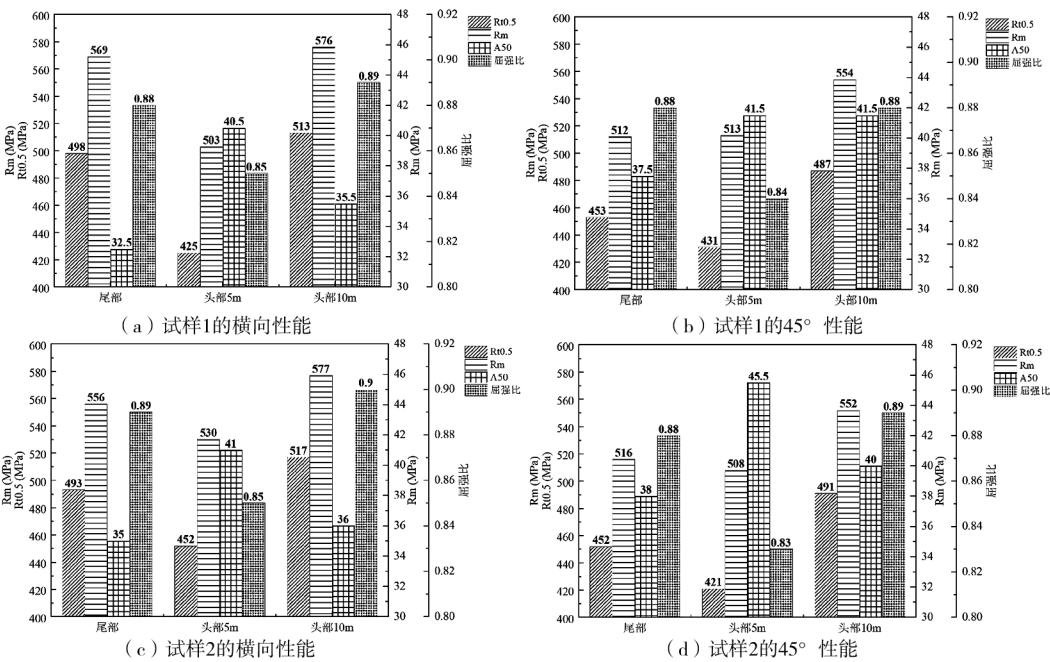


图1 L415M的7.75×1 500 mm拉伸性能

由表 2 与图 1 的数据可以发现,7.75 mm 规格的 L415M 性能表现不佳,横向(头 5 m)的抗拉与屈服强度不合,沿轧向 45°的尾部与头部 5 米的拉伸性能不合格。带钢头部 5 m 区域温降快、终轧与卷取温度波动大,导致相变与再结晶不均,使得横向屈服强度和抗拉强度不达标。同时,头尾温差大造成全长性能差异明显,尾部组织与头部差异显著。沿轧制方向 45°取样对组织各向异性更为敏感,加之带状组织、夹杂物沿轧向分布等因素,进一步加剧该方向拉伸性能不合格。

由表 2 与图 2 的数据可以发现,9.75 mm 规格

的 L415M 沿轧向 45°和横向拉伸性能均满足技术要求,屈服强度 466 MPa ~ 506 MPa、抗拉强度 538 MPa ~ 577 MPa,伸长率 33% ~ 43%,屈强比 0.86 ~ 0.89。9.75 mm 规格的 L415M 厚度适中,轧制过程温度控制稳定,终轧与卷取温度均处于适宜区间,铁素体与珠光体组织均匀细小。Nb、Ti 微合金碳氮化物充分析出,有效强化基体。同时,层流冷却均匀,组织各向异性小,带状组织轻微,经钙处理后夹杂物形貌良好,横向及 45°方向塑性优异,整体强韧性匹配均衡。

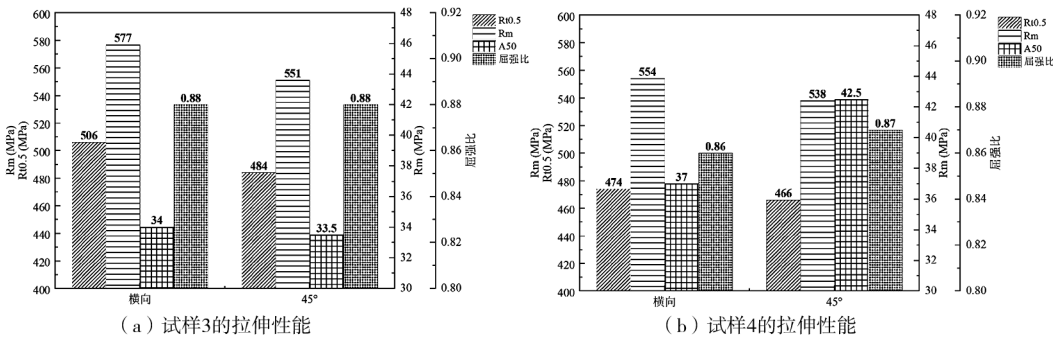


图 2 L415M 的 9.75 × 1 500 mm 拉伸性能

2.1.2 弯曲、-20 ℃冲击性能

对试样的 L415M 试样进行弯曲性能及 -20 ℃冲击性能测试后,由表 2 与图 3 数据可知, -20 ℃冲击功在 110 J ~ 250 J 之间,弯曲后无裂纹产生,满足技术要求。主要在于钢水经过洁净度控制,夹杂物得到有效改性,减少了有害夹杂对冲击韧性的不利影响;同时轧制过程温度制度合理,组织均匀细密,无明显混晶与粗大组织,保证了良好的低温韧性。此外,微合金元素合理匹配,在提升强度的同时未损害塑性与韧性,使得材料在弯曲变形时不开裂、低温冲击下吸收功充足。

2.1.3 维氏硬度、-15 ℃落锤性能

对 L415M 试样进行维氏硬度性能测试,由表 2 与图 4 数据可知,L415M 试样的维氏硬度(189 ~ 194 HV)满足技术要求,主要得益于其均匀的铁素

体-珠光体组织、合理的微合金析出强化及良好的钢水洁净度。稳定的轧制与冷却工艺保证了组织均匀性,Nb、Ti 碳氮化物的析出强化使硬度维持在目标区间,夹杂物改性则消除了局部硬度异常。

对试样进行 -15 ℃落锤性能测试,由表 2 与图 5 数据可知,性能表现在 82% ~ 99% 之间,满足技术要求。钢中通过低硫控制与钙处理改性,消除了长条状硫化物夹杂,减少了应力集中点,使裂纹难以在夹杂物处形核,降低了脆性断裂的倾向;合理的控轧控冷工艺获得了均匀、细小的铁素体组织,晶界的高比例和高角度晶界结构能有效偏转、阻碍裂纹扩展路径,使裂纹扩展消耗更多能量,从而表现为落锤试验中高剪切面积率和良好的止裂能力;低屈强比的组织状态赋予材料充足的塑性变形能力,在裂纹尖端形成钝化效应,进一步延缓了脆性断裂的发生。

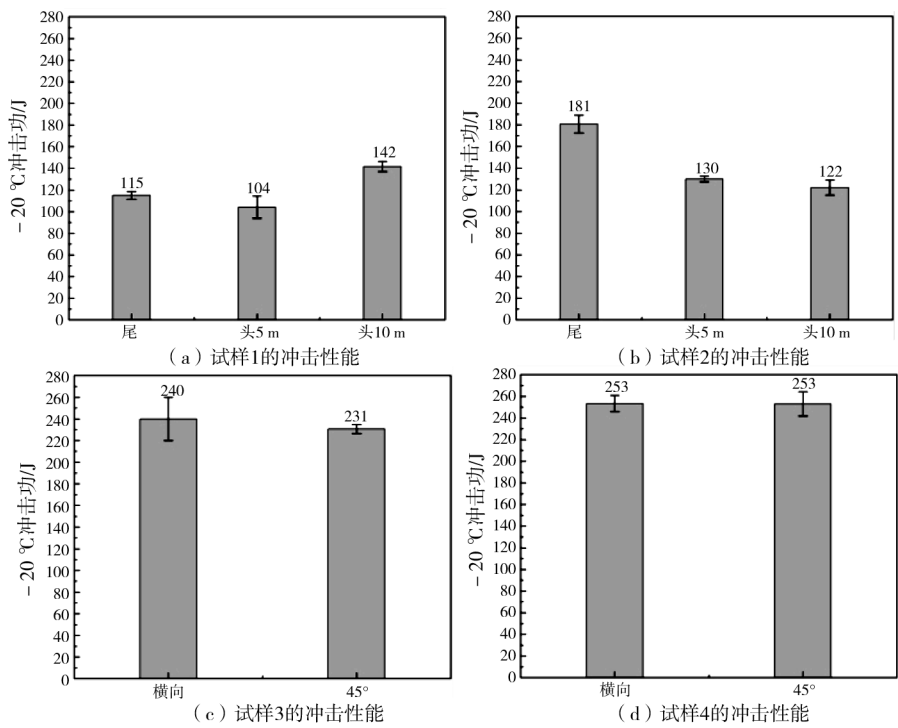


图 3 L415M 的 -20 °C 冲击性能

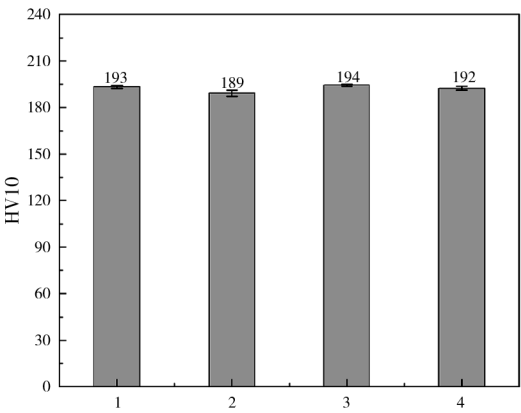


图 4 L415M 的维氏硬度性能

2.2 金相组织分析

L415M 试制卷非金属夹杂、晶粒和带状组织检测结果见表 3。从表中可以看出,试制卷钢中含有 D 类夹杂物 1.0,晶粒度控制在 9 ~ 12 级,带状组织为 1 ~ 1.5 A 级,各类参数满足要求。头部 10 米以内易出现混晶,晶粒度较尾部明显粗大,接近要求下限。

试制卷金相组织及与 2 250 mm 产线 L415M 组织对比见图 6。从图中可以看出,CSP 试制 7.75 mm 组织为多边形铁素体 + 珠光体,有轻微带状; 9.75 mm 组织为铁素体 + 少量珠光体 + 少量贝氏体,无带状。2 250 mm 产线 L415M 组织为多边形铁素体 + 粒状贝氏体且晶粒尺寸较 CSP 明显细小。

表 3 L415M 试制卷金相试验检测结果

序号	取样位置	厚度规格 /mm	晶粒度 ≥9 级	带状组织 ≤3.0 A	非金属夹杂物							
					A 粗 ≤2.0	A 细 ≤2.0	B 粗 ≤2.0	B 细 ≤2.0	C 粗 ≤2.0	C 细 ≤2.0	D 粗 ≤2.0	D 细 ≤2.0
1	尾部	7.75	12	1A	0	0	0	0	0	0	0	1
	头 5 米		10.5									
	头 10 米		9									
2	尾部	7.75	12	1A	0	0	0	0	0	0	0	1
	头 5 米		11 ~ 9									
	头 10 米		9									
3	尾部	9.75	12	1.5A	0	0	0	0	0	0	0	1
4	尾部	9.75	11.5	1A	0	0	0	0	0	0	0	1

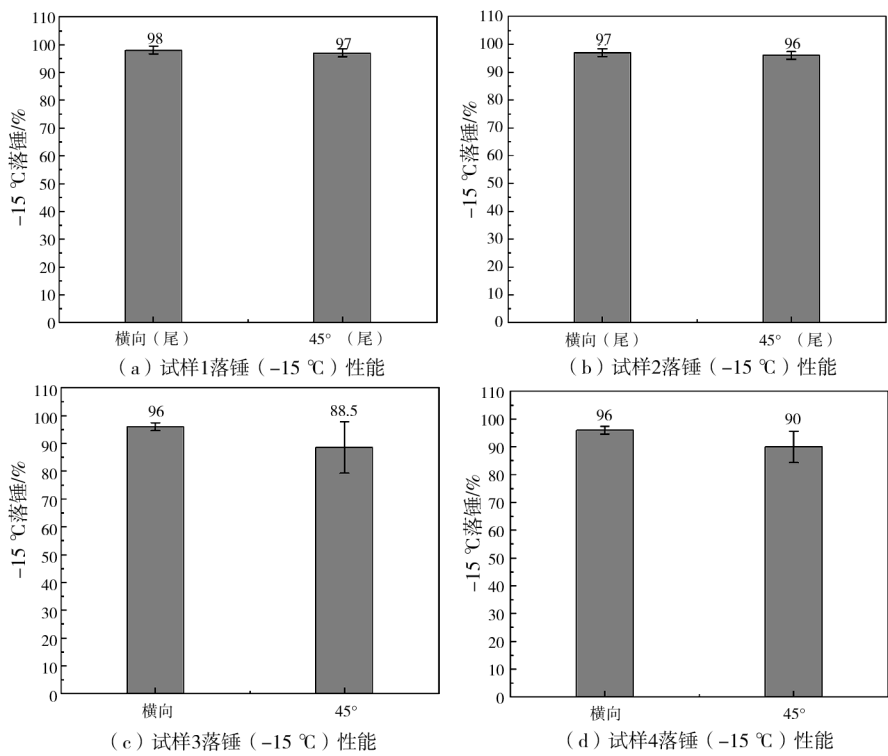


图 5 L415M 的 -15 °C 落锤性能

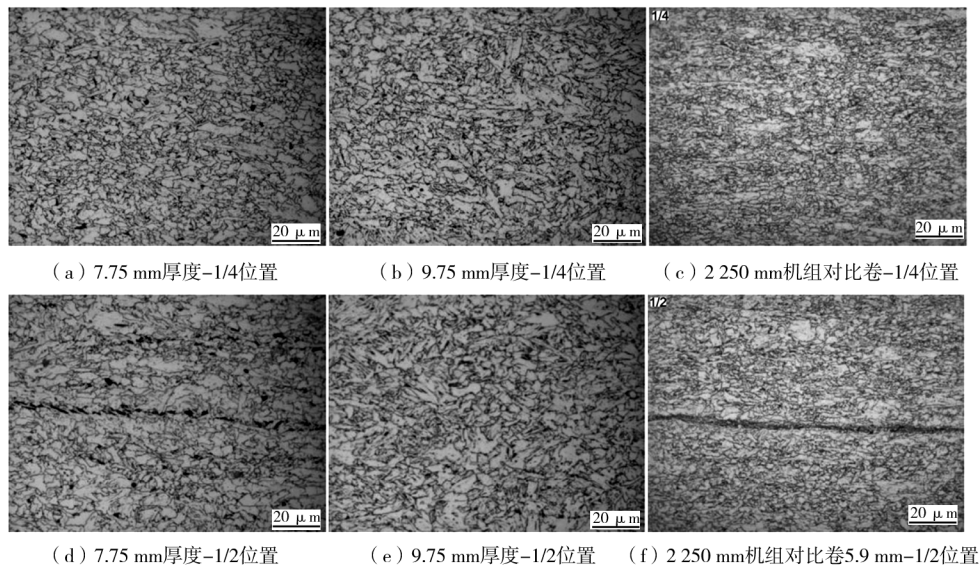


图 6 L415M 试制卷金相组织及与 2 250 mm 产线 L415M 组织对比(500 ×)

3 结论

(1)包钢 CSP 产线采用 KR - BOF - LF - CC 冶炼工艺与低 C - Mn - Nb - Ti 微合金体系, 依托 Q355B 搭桥模式成功完成 L415M 管线钢工业试制。9. 75 mm 规格产品力学性能全面满足标准要求;

7. 75 mm 规格产品头部与 45°方向存在明显性能波动, 头部 5 m 区域强度不达标。

(2)试制产品弯曲、- 20 °C 冲击、维氏硬度、- 15 °C 落锤性能均合格, 低温韧性与抗开裂能力优良; 金相组织以铁素体 + 珠光体为主, 9. 75 mm 含少量贝氏体, 晶粒度 9 ~ 12 级、带状组织 1 ~ 1. 5 A 级,

夹杂物控制达标。

(3)7.75 mm 薄规格头部温降快、终轧、卷取温度波动大,导致相变不均、性能不合格;头部 10 m 内易出现混晶,晶粒度偏粗;45°方向对组织各向异性敏感,叠加带状组织与夹杂物分布影响,加剧性能波动。

(4)未来可通过优化干头长度、调整甩机架策略、精准控制冷却工艺,提升薄规格产品组织均匀性与性能稳定性。本次研究为包钢 CSP 产线 L415M 管线钢规模化、稳定化生产提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 刘阳,刘峻峰,张斌,等.我国长输天然气用管线钢的发展现状与趋势[J].材料热处理学报,2024,45(3):98-112.

[2] 刘宇,张立忠,高维新.管线钢的历史沿革及未来展望[J].油气储运,2022,41(12):1355-1362.

[3] 高建章,韩彬,贾彦杰,等.大坡度 X70 管线钢全自动焊内根焊接头组织与性能[J].焊接,2024(8):61-68.

[4] 杨柯,史显波,严伟,等.新型含 Cu 管线钢——提高管线耐微生物腐蚀性能的新途径[J].金属学报,2020,56(4):385-399.

[5] 宋海辉,张万鹏,薛磊红,等.新版 gb/t 9711 管线用钢管标准解析[J].钢管,2024,53(3):89-94.

[6] 刘干,王进臣,杨博,等.TMCP 工艺对厚规格 X80M 管线钢低温韧性的影响[J].中国冶金,2025,35(9):81-89.

[7] 王学强.基于新一代控轧控冷的高钢级厚规格管线钢组织调控与应用研究[D].东北大学,2022.

[8] 孔祥磊,刘干,王杨,等.基于中薄板坯 x90 管线钢卷板的研发[J].轧钢,2024,41(6):31-36,53.

[9] 蔡绪明,李艳梅,李中平,等.不同冷却方式下 X80 m 管线钢的组织演变[J].轧钢,2023,40(1):41-45.

[10] 李群,田鹏,王志勇,等.坯料厚度及轧制规程对厚规格管线钢落锤撕裂性能的影响[J].轧钢,2015,32(1):19-23.

[11] 王祖滨,付俊岩.Hsla 钢冶金工艺技术的发展[J].特殊钢,2006,27(2):1-5.

[12] Li M. Y, Liu Y. Z, Zhu T., et al. Micro-structure homogenization control of nb - bearing X65 pipeline steel by the CSP process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials,2011,18(1):35-41.

[13] 余泽金,贺景春,王瑞军,等.Ce 对 X65 管线钢显微组织的影响[J].稀土,2012,33(4):29-32.

[14] 何小东,朱丽霞,杨红兵.采用 CSP 工艺生产的 Nb - Ti 复合微合金 X60 钢级管线钢的组织 and 性能[J].钢管,2008,37(6):27-31.

[15] 张彩军,蔡开科,袁伟霞.管线钢硫化物夹杂及钙处理效果研究[J].钢铁,2006,41(8):31-33.

(上接第 37 页)

3 结束语

包钢冷轧厂热镀锌生产线,自热负荷试车以来,在投入使用后,圆盘剪经过多次改进,状态良好、生产顺利、故障率低。

(1)结合圆盘剪设备的工艺特点及剪切参数,以改善边部质量和预防设备故障为目的,通过优化剪切参数及设备工况,最终得到优良的边部质量。

(2)经过剪切参数优化,生产线的剪切工艺稳定性提升明显,产品规格精度均满足客户使用需求,参数可推广使用。

(3)当班操作人员每天至少检查一次废料溜槽

盖板,避免出现刮擦伤。

(4)每年对圆盘剪前后托辊的水平度进行找平,可减少生产线切边事故。

参 考 文 献

[1] 曹新星,贾冬梅.告别毛刺与崩刀:高强度圆盘剪切边工艺研究[J].金属世界,2025,41(5):58-63.

[2] 赵晓曦.唐钢高强汽车板镀锌生产线圆盘剪自动化控制系统[J].现代制造技术与装备,2016(4):158-159.