

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.2014s179

热轧板带钢超快冷工艺在厚规格管线钢中的开发与应用

袁 国¹, 王学强^{1,2}, 康 健¹, 王国栋¹

(1. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 首钢股份公司迁安钢铁公司, 河北 迁安 064404)

摘 要: 介绍了首钢迁钢热轧带钢超快冷技术概况, 对比分析了传统层流冷却模式下以及基于以超快冷技术为核心的新一代 TMCP 条件下厚规格管线钢微观组织特征, 并对超快冷技术在超厚 25.4 mm 规格 X70 管线钢中的工业化应用情况进行介绍。结果表明, 开发的超快冷技术冷却速度达到层流冷却的 2~5 倍以上, 大幅度提高了轧线冷却能力。利用热轧板带钢轧后超快冷技术所生产的厚规格管线钢组织均匀性良好; 工业化批量生产实践表明, 超快冷下 25.4 mm 规格 X70 管线钢性能稳定, 拉伸性能优良, 落锤性能得到明显改善, 实现了超快冷下超厚规格 X70 管线钢的优质、稳定生产。

关键词: 热轧带钢; 超快冷; 厚规格管线钢; 落锤性能

文献标志码: A

Development and Application of Ultra Fast Cooling Technology for Hot Rolled Strip in Heavy Gauge Pipeline Steel

YUAN Guo¹, WANG Xue-qiang^{1,2}, KANG Jian¹, WANG Guo-dong¹

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819,

Liaoning, China; 2. Shougang Qian'an Iron and Steel Co., Qian'an 064404, Hebei, China)

Abstract: The ultra-fast cooling technology of Qian'an steel was introduced briefly. The microstructure characteristics of heavy gauge pipeline steel under traditional cooling method and new generation of TMCP technology based on ultra-fast cooling were compared, and the industrial application of ultra-fast cooling technology on 25.4 mm X70 pipeline steel was further introduced. Results indicate that the ultra-fast cooling technology can improve the cooling ability of hot-rolled strip production line sharply. And the cooling rate is two to five times faster than that in traditional cooling method. The microstructures of heavy gauge pipeline steel undergoing ultra-fast cooling are homogeneous. Industrial application results show that the mechanical properties of 25.4 mm X70 pipeline steel are stable. The tensile properties are excellent, and DWTT properties are improved remarkably. The big thickness pipeline steel can be produced with high quality and stability under ultra-fast cooling technology.

Key words: hot rolled strip; ultra fast cooling; heavy gauge pipeline steel; DWTT

管道运输是长距离输送石油、天然气的重要方式之一。随着国民经济对天然气清洁能源需求的增加, 天然气长输管道的单管输送量要求也越来越高。增大管道直径, 提高输送压力是提高管道输送效率的主要途径, 增加壁厚以增大承压能力是实现低成本大输量输送的主要途径之一^[1]。在相同压力下, 增大管径导致钢管壁厚成比例增加, 因此在板材生产方便带来一定挑战, 最为突出的是要满足低温韧性和纵向大应变性能要求, 即随钢板厚度的增加, 轧制压缩比及钢板心部的冷却速率显著降低, 传统 TMCP 工艺满足这些要求更加困难。如对于厚度规格产品, 如热连轧生产线生产的 21.4 mm 规格 X80 螺旋焊管用管线钢, 其 -20 °C 的 DWTT 剪切面积平均值要达到 85%, 实际

应用最突出的就是如何满足 DWTT 剪切面积的需求^[2]。

解决 DWTT 不合格的关键在于对材料组织的微观特征调控。管线钢抗动态撕裂能力影响因素众多, 包含: 晶粒尺寸与均匀度、晶粒取向、夹杂物、M-A 组元、析出相、位错等, 目前传统 TMCP 工艺由于冷却能力的限制, 难以解决这样复杂的组织调控问题, 因此有必要开拓一种可控路径更加灵活、具有更高控制精度的生产新工艺。目前超快速冷却技术已在国内得到了广泛的推广和应用^[3-4]。在超快速冷却条件下, 可以对材料的显微结构进行更灵活的控制, 实现合金元素、轧制制度、冷却路径 3 者的最优匹配。

本文结合首钢迁钢 2 160 生产线热轧板带钢超快冷工艺技术应用, 利用超快速冷却系统, 在提

高和改善 25.4 mm 规格 X70 高钢级特厚规格管线钢的 DWTT 性能方面体现出良好的工艺效果, 为开发具有良好低温韧性的低成本高性能大壁厚螺旋焊管提供了新的工艺技术路线。

1 首钢迁钢 2 160 热轧超快冷技术概况

迁钢 2 160 热轧生产线是中国重要的高级别管

线钢开发生产的依托产线。为更好地满足产品开发需要, 2012 年, 轧线完成超快速冷却技术改造, 通过拆除原有前 4 组层流冷却集管, 安装 3 组超快冷集管, 如图 1 所示。改造后轧线冷却能力大幅度得到提高, 形成了具有迁钢特色的超快冷板卷工艺生产技术, 为高级别厚规格管线钢产品的开发及稳顺生产奠定了良好基础。

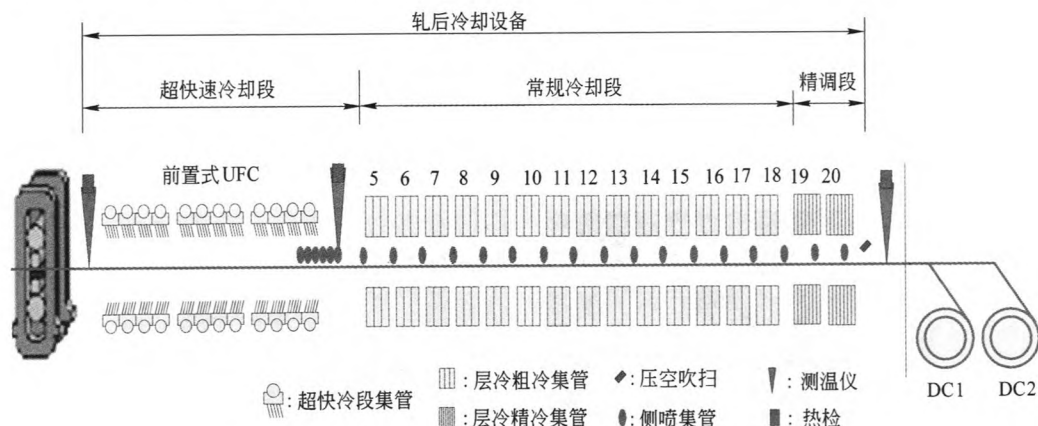


图 1 首钢迁钢 2 160 热轧生产线超快冷系统布置示意图

新增超快冷设备的设备能力工艺水量 7 000 m³/h, 最大为 8 000 m³/h, 配置了具有高强度均匀化冷却能力的狭缝式喷嘴和高密快冷喷嘴, 使开发的超快冷设备冷却速度达到常规层流冷却的 3~5 倍, 加密冷却形式的加强型设备 1.5~2 倍以上, 如图 2 所示。

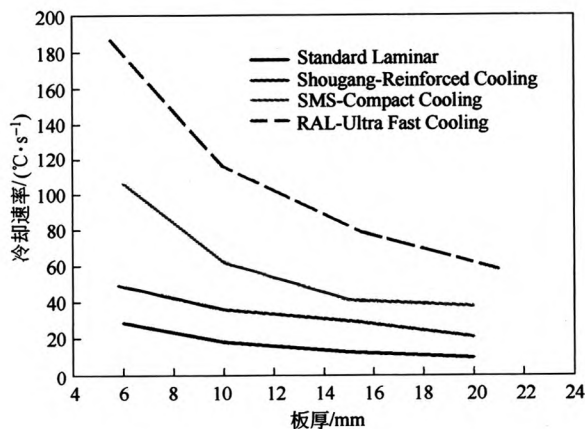


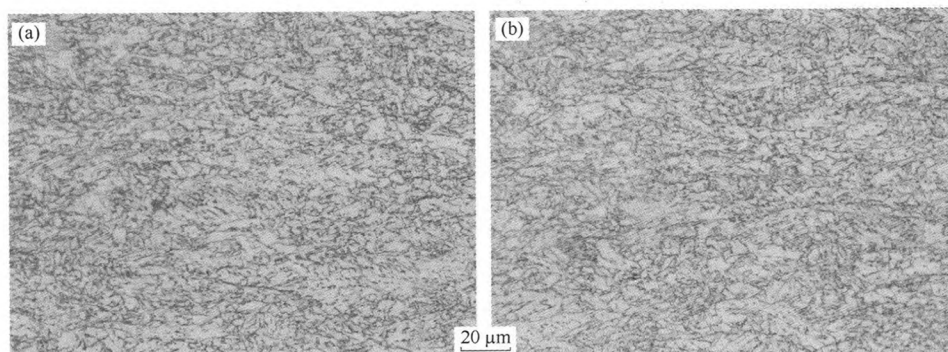
图 2 不同冷却方式冷却速率对比示意图

2 超快冷工艺对 25.4 mm 规格 X70 管线钢显微组织的影响

依托首钢迁钢 2 160 热连轧生产线, 常规层流冷却条件下生产的 25.4 mm 厚度规格 X70 管线钢

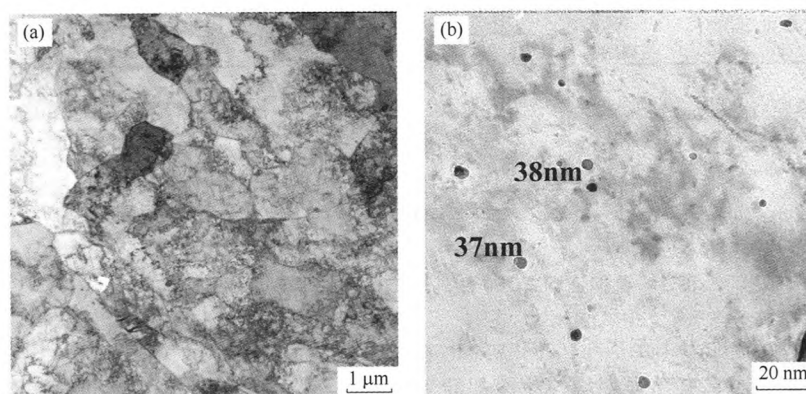
为典型的针状铁素体管线钢, 其显微组织如图 3 所示。组织中含有较为细小的多边形铁素体及准多边形铁素体, 其中 M-A 组元呈圆粒状及细小的狭长岛状分布于基体上。厚度方向 1/2 处多边形铁素体呈长大趋势, 所占比例有所增加。TEM 观察如图 4 所示, 针状铁素体内具有细小的亚结构和较高密度的可动位错 (图 4 (a)), 使得针状铁素体具有良好的强韧性。同时基体上弥散分布着一定数量微合金碳氮化物析出相, 析出粒子尺寸约为 30~40 nm 左右, 见图 4 (b)。

以超快冷为核心的新一代控轧控冷技术近年来已应用于高等级钢铁产品的生产实践中, 首钢迁钢 2160 生产线轧后超快速冷却技术升级改造完成后, 超快速冷却技术的应用使得 25.4 mm 规格的 X70 管线钢 DWTT 性能得到明显改善。在超快速冷却条件下, 25.4 mm 规格 X70 管线钢的典型显微组织如图 5 所示。由图可见, 组织均匀性良好, 带钢厚度 1/4 及 1/2 处针状铁素体组织进一步细化, 尤其在 1/2 处多边形铁素体含量及尺寸呈减小趋势。TEM 图像如图 6 所示, 针状铁素体板条以相互交叉形式互锁在一起, 且针状铁素体基体上存在较高密度位错。针状铁素体组织的“互锁”特点对裂纹扩展起到阻碍作用, 而高密度位错亚



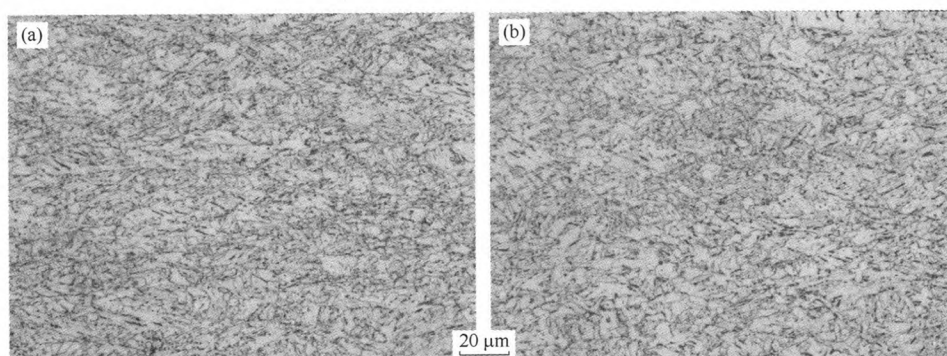
(a) 厚度 1/4 处; (b) 厚度 1/2 处。

图 3 层流冷却下 25.4 mm X70 管线钢 OM 照片



(a) 针状铁素体组织; (b) 析出相。

图 4 层流冷却条件下 25.4 mm 厚度规格 X70 管线钢 TEM 图像

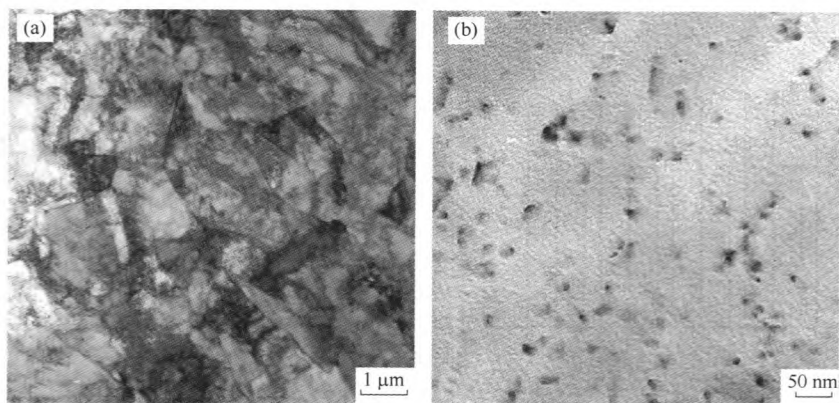


(a) 厚度 1/4 处; (b) 厚度 1/2 处。

图 5 超快冷条件下 25.4 mm 规格 X70 管线钢 OM 照片

结构保证了管线钢具有较高强度^[5]。另外, 由图 6 (b) 可知, 在铁素体基体上析出了大量弥散分布的纳米尺寸碳氮化物, 碳氮化物尺寸为 10 nm 左右。对 25.4 mm 规格 X70 管线钢厚度 1/4 处进行 EBSD 观察, 所得检测结果如图 7 所示, 由图可知, 针状铁素体板条间边界主要为大角度晶界

(大于 15°), 板条内亚晶为小角度晶界。组织中大角度晶界比例对材料低温冲击韧性具有显著影响, 在冲击载荷作用条件下, 当裂纹萌生并扩展至大角度晶界处时, 由于晶界的阻碍作用, 裂纹会发生偏转并消耗一定能量, 进而保证材料具有良好冲击韧性及抗裂纹扩展性能^[6]。



(a) 针状铁素体组织；(b) 析出相。

图 6 超快冷条件下 25.4 mm 厚度规格 X70 管线钢 TEM 图像

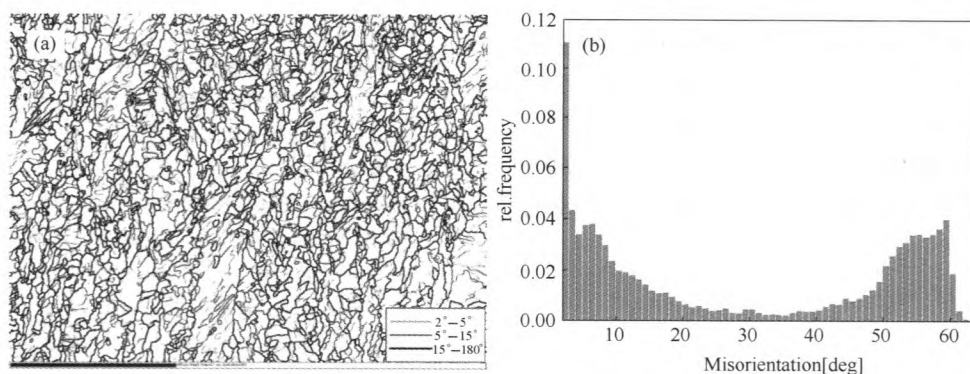


图 7 超快冷条件下 25.4 mm 规格 X70 管线钢厚度 1/4 处 EBSD 图像

超快冷条件下 25.4 mm 规格 X70 管线钢表现出的优良力学性能取决于其微观组织及亚结构特征。钢坯经粗轧及精轧两阶段控制轧制后，其组织为累积有一定变形能的形变奥氏体，在随后的冷却过程中，超快冷较强的冷却能力使形变奥氏体中存在的变形带、位错、空位、孪晶等晶体缺陷更多的保留至相变温度，为相变提供更多数量形核位置，与此同时，较大的过冷度为针状铁素体相变提供了足够的相变激活能，超快冷下形成的针状铁素体亚结构组织更加细小，细晶强化效果显著。

3 工业化生产应用效果

基于前期超快冷控制模型调试攻关及合金成分体系、轧制工艺的不断优化，在迁钢 2 160 mm 热连轧生产线上（配置有前置式超快速冷却系统）进行了 25.4 mm 厚度规格 X70 管线钢 500 t 订单批量生产。

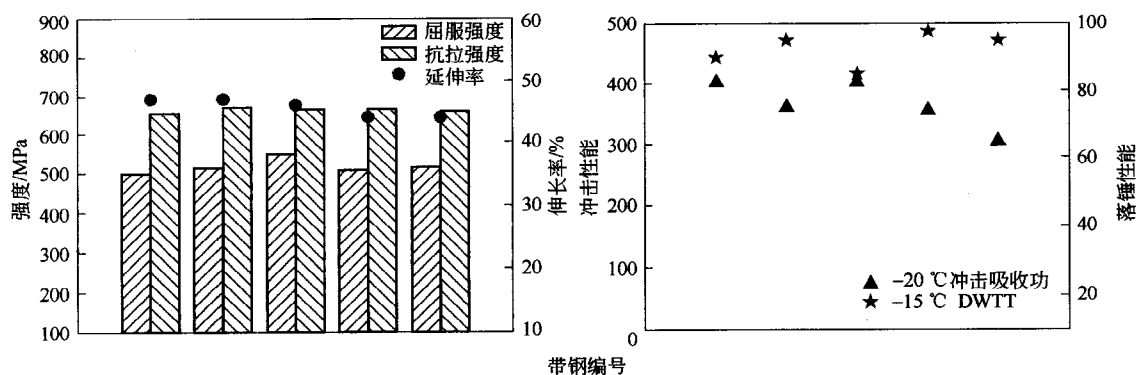
超快冷条件下批量生产的 25.4 mm 规格 X70 管

线钢典型力学性能如图 8 所示。由图可知，批量生产的 25.4 mm 规格 X70 管线钢拉伸及冲击力学性能稳定，均满足 API X70 性能标准。其中，屈服强度分布在 500~550 MPa，抗拉强度分布在 655~670 MPa，断后伸长率分布在 44%~47%，-20℃夏比冲击吸收功分布在 305~404 J。另外，超快冷条件下 25.4 mm 规格 X70 管线钢落锤性能得到明显改善，其 -15℃下 DWTT 达到 85% 以上。

4 结论

(1) 开发的热轧带钢超快速冷却技术其冷却速率为常规层流冷却的 3~5 倍，是加密冷却形式的加强型设备的 1.5~2 倍以上，可实现从层流冷却强度至直接淬火冷却速度的无级可调，为更为灵活的冷却策略控制提供了装备基础。

(2) 采用超快冷工艺，利于对全厚度方向针状铁素体亚结构的细化，所生产的 25.4 mm 规格 X70 管线钢组织均匀性良好。应用于工业化批量生产中，产品性能稳定，落锤性能得到明显改善，



(a) 强度, 伸长率; (b) 冲击性能, 落锤性能。

图 8 500 t 批量生产的 25.4 mm X70 管线钢抽检性能

实现了超厚规格 X70 管线钢的优质、稳定生产。

(3) 超快冷工艺对材料的显微结构可以进行更灵活的控制, 实现合金元素、轧制制度、冷却路径三者的最优匹配, 为满足高平直度综合性能良好的高级别厚规格管线钢开发生产奠定了基础, 为国内能源领域管线钢的开发生产提供了有效的工艺手段。

参考文献:

- [1] 王晓香. 浅谈石油天然气管道建设对管线钢的技术需求[J]. 世界金属导报, 2014, 15: 1.

- [2] 王晓香. 当前管线钢管研发的几个热点问题[J]. 焊管, 2014, 37(4): 5.
- [3] 王国栋. 新一代控制轧制和控制冷却技术与创新的热轧过程[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(7): 913.
- [4] 王国栋. 以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 技术[J]. 上海金属, 2008, 30(2): 1.
- [5] Ming-chun ZHAO, Ke YANG, Yi-yin SHAN. Comparison on Strength and Toughness Behaviors of Microalloyed Pipeline Steels With Acicular Ferrite and Ultrafine Ferrite [J]. Materials Letters, 2003(57): 1496.
- [6] Rodriguez-Ibabe J M. The Role of Microstructure in Toughness Behaviour of Microalloyed Steels[J]. Materials Science Forum, 1998(284/286): 51.