

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.06

X80 管线钢 CMT 焊接接头的显微组织和力学性能

尹立孟¹, 宋雨¹, 宋丹妮¹, 邹太勇^{1*}, 王善林², 冯伟^{1*}, 信国松³

1. 重庆科技大学 机械与智能制造学院, 重庆 401331
2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063
3. 聚力新材料科技(日照)有限公司, 山东 日照 276826

摘要: 为解决 X80 管线钢传统焊接中热输入过大导致的组织粗化与性能劣化问题, 采用冷金属过渡焊(cold metal transfer, CMT)对 X80 管线钢进行焊接试验, 系统研究了送丝速度和焊接速度对接头显微组织和力学性能的影响规律。焊接区组织以针状铁素体为主, 热影响区由含贝氏体-马氏体的粗晶区和以多边形铁素体为主的细晶区构成。送丝速度增大导致焊接热输入升高, 焊缝及热影响区组织显著粗化; 焊接速度加快使焊接热输入降低, 组织逐渐细化, 但过快的焊接速度抑制了焊缝中针状铁素体和热影响区贝氏体与马氏体的析出。焊缝区与热影响区因针状铁素体、贝氏体和马氏体等硬相组织的存在, 硬度高于母材, 热影响区粗晶区硬度达峰值。增大送丝速度或加快焊接速度均使接头硬度分布趋于均匀。各接头抗拉强度介于 628~685 MPa 之间, 拉伸断裂均发生于母材, 实现了焊缝与母材的等强匹配。X80 管线钢 CMT 焊接接头的组织演变与性能分布主要受焊接热输入调控, 合理匹配送丝速度与焊接速度可获得组织细小、热影响区窄且硬度分布均匀的焊接接头。

关键词: X80 管线钢; 冷金属过渡焊(CMT); 焊接热输入; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)08-0060-08

Microstructure and Mechanical Properties of CMT-Welded X80 Pipeline Steel Joints

YIN Limeng¹, SONG Yu¹, SONG Danni¹, ZOU Taiyong^{1*}, WANG Shanlin², FENG Wei^{1*}, XIN Guosong³

1. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China
2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China
3. Juli New Material Technology (Rizhao) Co., Ltd., Rizhao 276826, China

Abstract: To address the microstructure coarsening and performance degradation caused by excessive heat input in conventional welding of X80 pipeline steel, 5 mm-thick X80 plates were joined using cold metal transfer (CMT) welding. The effects of wire feed rate and welding speed on the microstructure and mechanical properties of the joints were systematically investigated. The weld zone was predominantly composed of acicular ferrite, while the heat-affected zone (HAZ) consisted of a coarse-grained region containing bainite and martensite, and a fine-grained region dominated by polygonal ferrite. Increasing the wire feed rate elevated the heat input, resulting in significant microstructure coarsening in both the weld zone and HAZ. Increasing the welding speed reduced the heat input and refined the microstructure; however, excessively high welding speed suppressed the formation of acicular ferrite, bainite, and martensite. The weld zone and HAZ exhibited higher hardness than the base metal due to the presence of acicular ferrite, bainite, and martensite, with the peak hardness occurring in the coarse-grained HAZ. Increasing either the wire feed rate or the welding speed resulted in a more uniform hardness distribution across the joint. The tensile strength of all joints ranged from 628 MPa to 685 MPa, with fractures consistently occurring in the base metal, confirming that strength matching between the weld and base metal was achieved. The microstruc-

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-07-13

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合重点基金(U24A20117); 高端装备极端制造技术江西省重点实验室开放课题(EL202480337); 泰山产业领军人才工程(2024001)

作者简介: 尹立孟(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事先进焊接与微连接理论及技术研究。E-mail: yeenlm@163.com。

通讯作者: 邹太勇, E-mail: 2025056@cqust.edu.cn; 冯伟, weifeng@cqust.edu.cn。



ture evolution and property distribution of CMT-welded X80 joints are predominantly governed by the welding heat input. Proper matching of wire feed rate and welding speed enables the production of welded joints with refined microstructure, narrow HAZ, and uniform hardness distribution.

Keywords: X80 pipeline steel; CMT welding; welding heat input; microstructure; mechanical properties

引用格式:尹立孟,宋雨,宋丹妮,等. X80 管线钢 CMT 焊接接头的显微组织和力学性能[J]. 电焊机, 2026, 56(8): 60–67.

Citation: YIN Limeng, SONG Yu, SONG Danni, et al. Microstructure and Mechanical Properties of CMT-Welded X80 Pipeline Steel Joints[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 60–67.

0 引言

随着我国经济持续增长,油气资源需求量日益增加,对油气安全保障提出了更高的要求^[1]。天然气和石油主要依靠管道运输,油气管道的安全性和高效性是降低运营成本、保障能源稳定供给,实现资源优化配置和经济效益最大化的关键^[2-3]。X80 管线钢作为一种高韧性、高抗腐蚀性的低合金高强度钢,被广泛应用于油气管道建设^[4-6]。焊接作为管道建设的核心工序,其质量直接决定管道运输的稳定性和服役寿命,进而影响油气长距离管道运输的安全性。因此,开展先进管道焊接技术研究,获得性能优异的管线钢焊接接头,对油气稳定运输具有重要的工程意义。

近年来,为保障油气管道运输的安全,国内外学者围绕高强度管线钢焊接开展了大量研究。研究表明,焊接热输入是影响管线钢焊接接头组织和力学性能的关键因素^[7]。焊接热输入过高将导致焊缝和热影响区晶粒严重粗化^[8],进而降低接头的强度和韧性,使其易发生脆性断裂^[9-10]。此外,过高的焊接热输入还会使接头残余应力增大、变形加剧。由于管线钢管道长期服役于富硫化氢、氢气等腐蚀性介质的环境中,残余应力将加速接头的腐蚀开裂^[11]。针对上述问题,研究者尝试通过改变焊材成分、焊前预热及采用多道焊工艺等方式加以改善^[12],但这些改进方法普遍面临着成本上升,操作流程复杂,施工条件受限等问题,且难以从根本上克服高焊接热输入带来的负面影响。因此,寻求一

种低热输入、高效能的焊接工艺技术,已迫在眉睫。

冷金属过渡焊接技术(Cold Metal Transfer, CMT)具有热输入低,可以实现近乎无飞溅的低温焊接^[13]。CMT 焊接技术主要通过调节送丝速度和焊接速度大小来控制热输入的大小,能有效细化焊缝晶粒、减小焊接热影响区宽度,为解决传统管线钢焊接热输入过大带来的一系列弊端提供了新的解决途径^[14]。本文将系统研究 CMT 焊接关键工艺参数对 X80 管线钢焊接接头成形、微观组织特征及力学性能的影响规律,旨在明确工艺-组织-性能之间的内在联系,为管线钢高效高性能焊接提供新的工艺方案与理论依据。

1 材料与方法

1.1 焊接材料

试验所用 X80 管线钢板材厚度为 5 mm,其化学成分如表 1 所示。X80 母材的显微组织如图 1b 所示,基体为多边形板条铁素体(PF),伴有针状铁素体和马氏体/奥氏体岛状组织(Martensite-Austenite constituent, M-A)^[15]。焊丝采用直径 1.2 mm 的商用高强度钢 ER80S-G 焊丝,其化学成分如表 2 所示。

1.2 焊接工艺

采用 CMT 焊机(CMT 5000R Advanced)对 X80 管线钢进行对焊连接试验,研究焊接速度和送丝速度对接头显微组织和力学性能的影响。所采用的焊接工艺参数如表 3 所示。焊接前采用电火花线切割机在 X80 板材上切割出 45°单坡口,并依次使用

表 1 X80 管线钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of X80 pipeline steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	Nb	Ti
0.046	0.36	1.74	0.007 9	0.001 6	0.023	0.25	0.23	0.008 2	0.21	0.07	0.08	0.015



表2 ER80S-G焊丝的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of ER80S-G welding wire (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu
0.065	0.56	1.01	0.016	0.019	1.23	0.45	0.28	0.11	0.32

表3 焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters

焊接速度($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	送丝速度($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
2	5
3	6
4	7

240#至1000#砂纸打磨去掉表面氧化层,打磨后采用盐酸酒精溶液进行酸洗处理。

1.3 试样制备与性能测试

焊接完成后,采用线切割从焊接试样上截取接头试样。试样依次经240#至2000#砂纸打磨、抛光及超声清洗。抛光清洗后的金相试样采用4%的硝酸酒精溶液腐蚀3~4 s,用于显微组织观察。

采用电子万能试验机测试接头的室温拉伸性能,每个参数制备3个试样,取其平均值作为该组参数试样的拉伸性能。同时,采用维氏硬度计在金相试样上测试接头不同区域的硬度值。

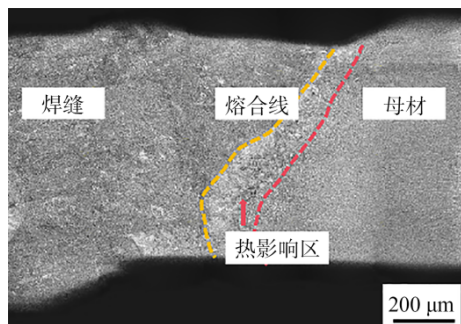
2 结果与讨论

2.1 显微组织

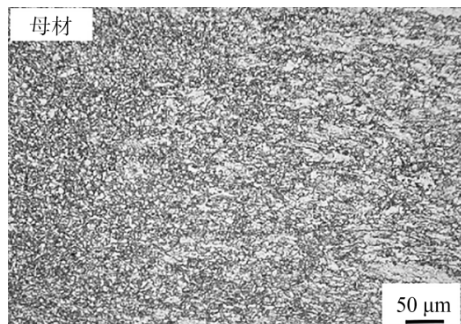
接头的整体显微组织结构如图1a所示,接头由焊缝、热影响区和两侧母材组成。焊缝区的显微组织如图1c所示,主要由ER80S-G焊丝熔化后快速凝固形成。ER80S-G焊丝中较高含量的C、Mn元素促进了焊缝区针状铁素体的形成。针状铁素体组织因其相互交错的板条结构,能够有效阻碍裂纹扩展,被认为是焊缝中最理想、韧性最佳的显微组织^[16]。热影响区由粗晶区和细晶区组成,其中靠近母材附近的热影响区为多边形铁素体组成的细晶区,靠近焊缝区域的热影响区为贝氏体和马氏体组织混合的粗晶区^[17]。

通过对比不同焊接工艺参数下接头的显微组织,焊接速度和送丝速度的变化均对接头焊缝区和热影响区的组织产生显著影响。

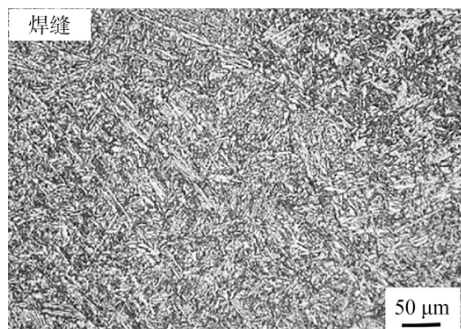
(1)送丝速度对显微组织的影响。图2为焊接速度3 mm/s、送丝速度分别为5、6、7 m/min时接头



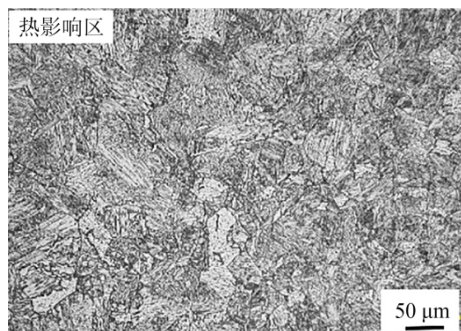
(a)接头整体形貌



(b)母材显微组织



(c)焊缝区显微组织



(d)热影响区显微组织

图1 接头典型显微组织

Fig. 1 Typical microstructure of the joint

的显微组织。随送丝速度从5 m/min增大至7 m/min,焊缝区和热影响区的晶粒逐渐粗化,热影响区宽度相应增加。

CMT焊接热输入 $E(\text{J}/\text{mm})$ 与焊接工艺参数之



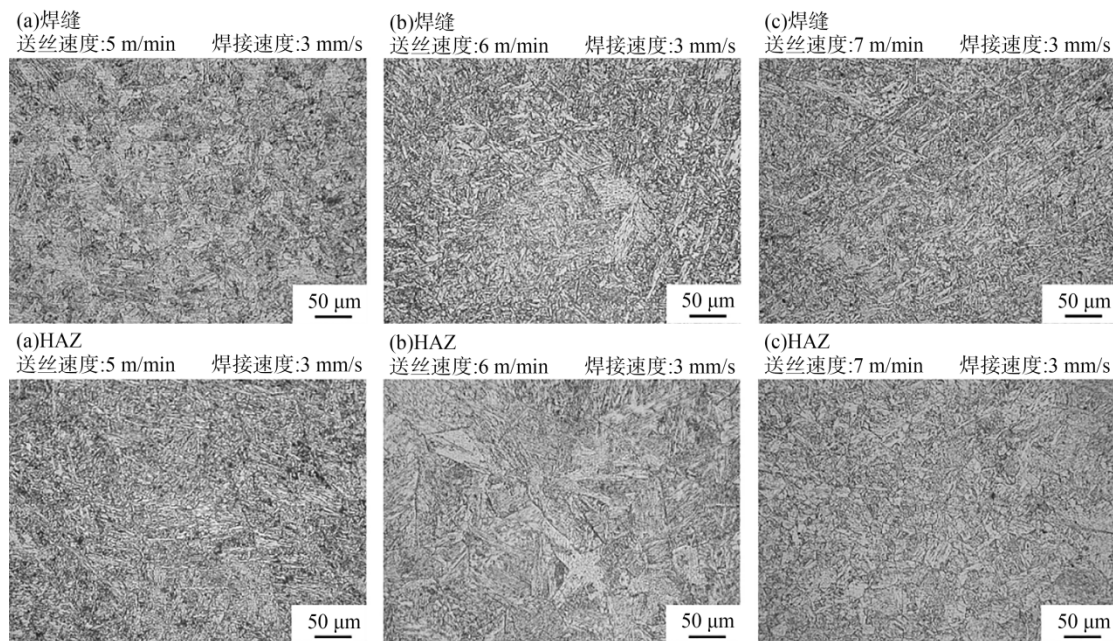


图2 焊接速度为3 mm/s时,送丝速度对接头显微组织结构的影响

Fig. 2 Effect of wire feed speed on the microstructure of the joint at a welding speed of 3 mm/s

间的关系如下^[18-19]:

$$E = \eta \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

式中 η 为热效率,通常取0.8; I 为焊接电流(单位:A); v 为焊接速度(单位:mm/s)。

由式(1)可知,焊接电流越大,热输入越大。在CMT焊接过程中,送丝速度直接决定焊接电流的大小——送丝速度越快,单位时间内送入熔池的焊丝量越多,为提供足够的电弧能量,焊接电流相应增大;在电压相对稳定的条件下,电流增大导致热输入增加。此外,送丝速度决定了CMT焊接“直流-短路-回抽”过程的循环频率。送丝速度较低时,循环频率也较低,电弧燃烧时间较短,热输入较低;当送丝速度较高时,循环频率加快,电弧燃烧时间增加,热输入相应提高。

综上,送丝速度的提高导致焊接热输入增大,使热影响区宽度增加、晶粒尺寸增大,焊缝区的针状铁素体也随之粗化。粗大的针状铁素体组织对位错运动的阻碍作用减弱,其强化和韧化效果不及细小组织。因此,在管线钢CMT焊接中,当焊接速度一定时,送丝速度不宜过高。

(2)焊接速度对显微组织的影响。图3为送丝速度6 m/min、焊接速度分别为2、3、4 mm/s时接头

的显微组织。随焊接速度从2 mm/s增加到4 mm/s,焊缝区和热影响区的晶粒逐渐细化,热影响区宽度变窄。由式(1)可知,焊接速度与热输入呈负相关:焊接速度越快,单位长度焊缝所获得的热输入越小,组织越细小。然而,当焊接速度过快时,热输入不足,焊缝区的针状铁素体以及热影响区的马氏体和贝氏体的析出受到抑制。同时,焊接速度过慢也会导致熔池存在时间过长,热输入过高,易引起晶粒粗化、热影响区扩大等问题;焊接速度过快则促使熔池冷却速率加快,可能导致熔深不足、未熔合等缺陷^[20]。因此,当送丝速度为6 m/min时,在保证良好成形的前提下,选择焊接速度为3 mm/s可获得晶粒细小、热影响区较窄的X80管线钢CMT焊接接头组织。

2.2 力学性能

2.2.1 拉伸性能

不同焊接工艺参数下接头的室温拉伸性能如表4所示。各接头的抗拉强度介于628~685 MPa之间,均高于X80管线钢母材的标准最小抗拉强度(625 MPa),且所有接头的拉伸断裂均发生于母材区域。这是由于焊缝区以相互交错的针状铁素体为主,能有效阻碍位错的运动,具有较高的强度和良好的韧性^[21]。热影响区虽经历了晶粒长大,但同



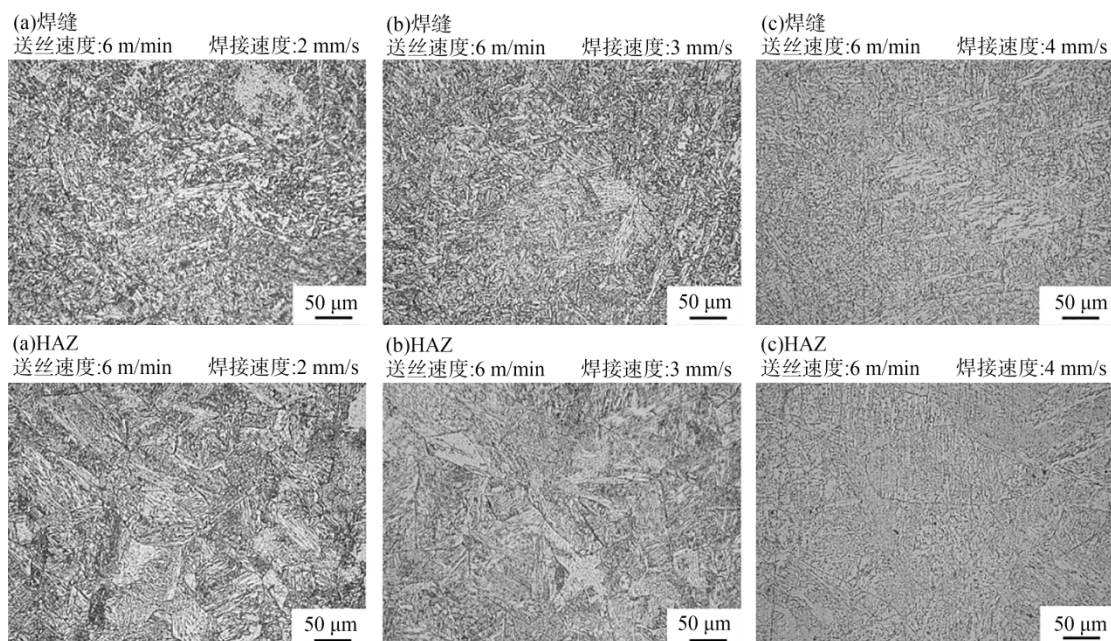


图3 送丝速度为6 m/min时,焊接速度对接头显微组织结构的影响

Fig. 3 Effect of welding speed on the microstructure of the joint at a wire feed speed of 6 m/min

表4 不同工艺参数下接头的抗拉强度与断裂位置

Table 4 Tensile strength and fracture location of joints under different process parameters

送丝速度 /(m·min ⁻¹)	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	抗拉强度 /MPa	断裂 位置
6	2	628	母材
6	3	640	母材
6	4	637	母材
5	3	685	母材
7	3	664	母材

时析出了能阻碍位错运动的贝氏体和马氏体,因此强度也较高。相比之下,母材为多边形铁素体/珠光体组织,强度相对较低。因此,在拉伸载荷作用下,接头首先在强度较低的母材区域发生断裂。该结果表明,所获得的CMT焊接接头强度均达到母材标

准要求,实现了焊缝与母材的等强匹配。

2.2.2 硬度分布

图4为焊接速度3 mm/s、不同送丝速度下接头横截面的维氏硬度分布。各硬度曲线呈现共同特征:母材区域硬度分布平稳,约为270~290 HV;从母材向焊缝中心过渡时,热影响区硬度显著升高并达到峰值;焊缝中心硬度较热影响区有所降低,但仍高于母材。随着送丝速度的增大,热影响区及焊缝中心与母材之间的硬度差明显减小,接头硬度分布曲线趋于平缓。

图5为送丝速度6 m/min、不同焊接速度下接头横截面的维氏硬度分布。随焊接速度从2 mm/s增至4 mm/s,接头硬度分布呈非均匀特征,热影响区硬度显著高于母材及焊缝区域,硬度峰值出现在含

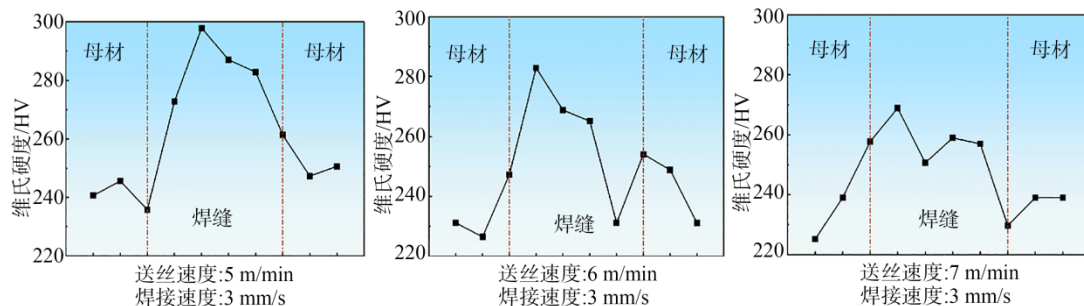


图4 焊接速度为3mm/s时,接头横截面硬度分布

Fig. 4 Hardness distribution across the joint cross-section at a welding speed of 3 mm/s

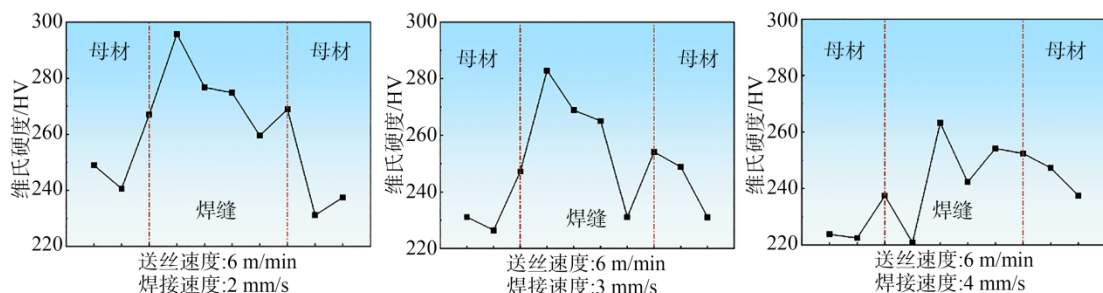


图5 送丝速度为6 m/min时接头横截面硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution across the joint cross-section at a wire feed speed of 6 m/min

贝氏体和马氏体组织的粗晶区。焊接速度的加快促进了硬度分布的均匀化,热影响区及焊缝中心与母材的硬度差不断减小,分布曲线趋于平缓。

2.2.3 显微组织与硬度的关联分析

接头各区域硬度的差异与其显微组织密切相关^[22]。焊缝区主要为焊丝熔化后快速凝固形成的针状铁素体,相互交错的针状铁素体板条能有效阻碍位错运动和裂纹扩展,故其硬度高于母材。热影响区经焊接热循环后虽发生晶粒长大,但析出了细小的贝氏体和马氏体组织,使硬度显著提升。其中,粗晶区因由硬度较高的贝氏体和马氏体组成,使接头硬度在热影响区粗晶区达到峰值。

送丝速度的提高导致热输入增大,焊缝中心和热影响区晶粒粗化。虽然上述区域仍存在硬度较高的针状铁素体、贝氏体和马氏体组织,但晶粒粗化削弱了对位错运动的阻碍作用,故焊缝中心和热影响区的硬度随送丝速度增大而降低。

焊接速度的提高使焊接热输入降低,在抑制晶粒长大的同时,也抑制了焊缝中心针状铁素体和热影响区贝氏体与马氏体的析出,故焊缝中心和热影响区的硬度随焊接速度加快而降低。

综合来看,CMT焊接技术的热输入低、控制精度高,能够有效细化焊缝晶粒、减小热影响区宽度,显著改善焊接接头组织与力学性能的均匀性,是解决高强度管线钢焊接中因热输入过大导致的组织粗化与性能劣化问题的有效途径。在CMT焊接技术中,热输入控制的关键在于送丝速度和焊接速度的匹配。送丝速度增大导致焊接电流升高,热输入增加,促使焊缝与热影响区晶粒粗化、热影响区宽度增大;焊接速度加快则热输入降低,有利于细化晶粒、缩小热影响区范围。在保证良好成型的前提

下,合理调控焊接速度和送丝速度可获得组织细小、热影响区范围小、性能优良的高强度管线钢焊接接头。

3 结论与展望

(1)X80管线钢CMT焊接接头成形良好,焊缝区以针状铁素体为主,热影响区由贝氏体-马氏体粗晶区和多边形铁素体细晶区构成。

(2)焊接接头的拉伸断裂均发生于母材,表明实现了与母材等强度的连接;由于较硬针状铁素体、贝氏体和马氏体的析出,焊缝中心和热影响区的硬度明显高于母材,且热影响区的硬度值最高。

(3)送丝速度的提高导致热输入增大,焊缝及热影响区组织发生过度长大,硬度值降低,接头硬度分布趋于均匀;焊接速度的加快导致热输入降低,减少焊缝及热影响区晶粒长大的同时,抑制了针状铁素体和贝氏体与马氏体的析出,焊缝中心和热影响区硬度值降低,接头硬度分布均匀。

(4)本文仅针对X80管线钢CMT焊接接头的显微组织与基本力学性能进行了研究,尚需从以下方面进一步深入:接头的低温冲击韧性及韧脆转变行为有待系统评价;拉伸断裂行为与断裂机理尚需借助断口分析等手段深入揭示;管线钢在含硫化氢等腐蚀性服役环境中的耐蚀性能需要进一步考察;此外,实际管道施工多采用多道焊工艺,多道焊条件下接头的组织演变规律与力学性能亦有待研究。后续工作将围绕上述方向展开,结合焊接参数的多目标优化,建立更为完善的工艺-组织-性能对应关系,为X80管线钢CMT焊接技术的工程应用提供更为全面的技术支撑。



参考文献:

- [1] 杨清贤. 基于失效模式统计的油气管道检测技术应用探究[J]. 化工管理, 2026(5): 120-124.
YANG Q X. Application of oil and gas pipeline inspection technology based on failure mode statistics [J]. Chemical Enterprise Management, 2026(5): 120-124.
- [2] 姜金星. 低温服役厚壁大口径弯管用X80管线钢板组织调控与力学性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2024.
JIANG J X. Study on microstructure control and mechanical properties of X80 pipeline steel plate for thick-walled large-diameter bends serving at low temperature [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [3] 姚婵, 陈健, 明洪亮, 等. 管线钢氢渗透行为的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(2): 209-219.
YAO C, CHEN J, MING H L, et al. Research progress on hydrogen permeability behavior of pipeline steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(2): 209-219.
- [4] 代文贺, 刘智勇, 王同军. 基于控制轧制工艺技术的X80管线钢低温韧性优化研究[J]. 新疆钢铁, 2023(3): 25-27.
DAI W H, LIU Z Y, WANG T J. Study on optimization of low-temperature toughness of X80 pipeline steel based on controlled rolling technology [J]. Xinjiang Iron and Steel, 2023(3): 25-27.
- [5] 袁良增, 姜金星, 赵丽洋, 等. 加热温度对X80管线钢显微组织和低温韧性的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(4): 77-83.
YUAN L Z, JIANG J X, ZHAO L Y, et al. Effect of heating temperature on microstructure and low-temperature toughness of X80 pipeline steel [J]. Shanghai Metals, 2023, 45(4): 77-83.
- [6] 史家旭, 刘卿. 油气输运管道硫化氢内腐蚀及应对策略探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2026, 46(4): 43-45.
SHI J X, LIU Q. Discussion on hydrogen sulfide internal corrosion of oil and gas transportation pipelines and countermeasures [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2026, 46(4): 43-45.
- [7] 范哲. X80管线钢自动焊热影响区组织性能的热模拟研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2023.
FAN Z. Thermal simulation study on microstructure and properties of heat-affected zone in automatic welding of X80 pipeline steel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [8] YANG F L, ZHANG S C, NIU Z H, et al. Effect of heat input on microstructure and impact toughness of X80 FCAW-S weld joint [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 41: 1727-1739.
- [9] LIU S, BA L Z, LI C N, et al. Comparison of fracture toughness in the coarse-grain heat-affected zone of X80 pipelines girth-welded under conventional and ultra-low heat input [J]. Materials, 2022, 15(21): 7701.
- [10] 代项杰, 裴召华, 黄小光. X80钢高温蠕变特性及焊后热处理残余应力分析[J]. 石油工程建设, 2026, 52(1): 27-35.
DAI X J, PEI Z H, HUANG X G. High-temperature creep property and residual stress analysis after post-weld heat treatment of X80 steel [J]. Petroleum Engineering Construction, 2026, 52(1): 27-35.
- [11] WEI H, SHEN C, XU M, et al. Coupling effect of H₂S and H₂ on the fracture mechanical properties of X80 pipeline steel: Experiment vs DFT [J]. Corrosion Science, 2025, 254: 113056.
- [12] 高雅楠, 李浩男, 杨叠, 等. 基于BP神经网络的X80管线钢GMAW多层焊热响应曲线及特征参数预测[J]. 焊接, 2025(11): 68-73.
GAO Y N, LI H N, YANG D, et al. Prediction of thermal response curves and characteristic parameters of X80 pipeline steel GMAW multi-pass welding based on BP neural network [J]. Welding & Joining, 2025(11): 68-73.
- [13] SRINIVASAN D, SEVVEL P, JOHN SOLOMON I, et al. A review on cold metal transfer (CMT) technology of welding [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 64: 108-115.
- [14] HAN Y D, ZHONG S F, PENG C T, et al. Fatigue behavior of X65 pipeline steel welded joints prepared by CMT/GMAW backing process [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 164: 107156.
- [15] 周磊磊, 熊雪刚, 陈述, 等. 再结晶区变形量对X80管线钢显微组织和织构的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(2): 50-53.
ZHOU L L, XIONG X G, CHEN S, et al. Effect of deformation amount in recrystallization region on microstructure and texture of X80 pipeline steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(2): 50-53.
- [16] 巴凌志, 利成宁, 冯兆龙, 等. 合金元素对X80管线钢熔敷金属组织和性能的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(11): 1187-1194.
BA L Z, LI C N, FENG Z L, et al. Effects of alloying elements on microstructure and properties of deposited



- metal of X80 pipeline steel[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(11): 1187-1194.
- [17] 杜云祥. X80 无缝管线钢热变形行为及微观组织演变规律研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2023.
- DU Y X. Study on Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of X80 Seamless Pipeline Steel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [18] KOLI Y, ARAVINDAN S, RAO P V. Influence of heat input on the evolution of δ -ferrite grain morphology of SS308L fabricated using WAAM-CMT [J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112363.
- [19] ZHAO Y L, CHEN F R, CAO S L, et al. Effect of CMT welding heat input on microstructure and properties of 2A14 aluminum alloy joint[J]. Metals, 2022, 12(12): 2100.
- [20] 陈锴. X80 管线钢临界粗晶区组织与性能研究[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2022.
- CHEN K. Study on microstructure and properties of intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone of X80 pipeline steel [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2022.
- [21] ZHOU X G, LI H, CHEN Q Y, et al. Controlled rolling of X80 pipeline steel in the austenite recrystallization temperature region and its effect on the microstructure and mechanical properties [J]. Steel Research International, 2022, 93(1): 2100331.
- [22] 姜心怡, 严春妍, 周倩雯, 等. X80 管线钢激光-MIG 复合焊焊缝耐腐蚀性分析[J]. 电焊机, 2022, 52(4): 51-57.
- JIANG X Y, YAN C Y, ZHOU Q W, et al. Corrosion resistance analysis of hybrid laser-MIG welded metal of X80 pipeline steel [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(4): 51-57.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第40页

- 力场三维有限元仿真[J]. 焊接技术, 2004, 33(6): 10-12.
- WU H Q, FENG J C, HE J S, et al. Three-dimensional finite element simulation of temperature and stress fields during electron beam welding [J]. Welding Technology, 2004, 33(6): 10-12.
- [8] 邹宏琨. 激光焊接技术的应用与发展[J]. 山东工业技术, 2015(7): 79.
- ZOU H K. Application and development of laser welding technology [J]. Shandong Industrial Technology, 2015(7): 79.
- [9] 雷华东, 余洋, 王亚荣. 激光焊接 HR-2 抗氢不锈钢的性能及组织[J]. 焊接技术, 2012, 41(1): 8-12.
- LEI H D, YU Y, WANG Y R. Properties and microstructure of laser welded HR-2 hydrogen-resistant stainless steel [J]. Welding Technology, 2012, 41(1): 8-12.
- [10] 雷华东, 黄文荣, 郭鹏, 等. 抗氢不锈钢的激光焊接性及气孔成因初探[J]. 焊接技术, 2002, 31(3): 8-10.
- LEI H D, HUANG W R, GUO P, et al. Preliminary study on laser weldability and porosity formation of hydrogen-resistant stainless steel [J]. Welding Technology, 2002, 31(3): 8-10.
- [11] 刘航天, 王群, 雷华东, 等. 05Cr17Ni4Cu4Nb/HR-2 异种钢激光焊接接头组织及力学性能研究[J]. 应用激光, 2024, 44(10): 102-110.
- LIU H T, WANG Q, LEI H D, et al. Microstructure and mechanical properties of 05Cr17Ni4Cu4Nb/HR-2 dissimilar steel laser welded joints [J]. Applied Laser, 2024, 44(10): 102-110.
- [12] 贡一峰, 李敬勇, 林靖宇, 等. 基于正交试验的 TC4 钛合金激光焊工艺优化研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(5): 11-20.
- GONG Y F, LI J Y, LIN J Y, et al. Optimization of laser welding process for TC4 titanium alloy based on orthogonal experiment [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(5): 11-20.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

