

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.09

X52 管线钢焊接接头组织与性能的研究

王 纯, 杨 可, 刘建豪, 吴溢凡, 成先明, 赵建华, 蒋雯焱

河海大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213000

摘要: 采用钨极氩弧焊(TIG)打底,并分别以TIG焊和CO₂气保焊两种焊接工艺焊接X52管线钢,对比分析两种焊接工艺接头的微观组织与力学性能。结果表明,两种工艺打底层均形成细小等轴铁素体和片状珠光体;而盖面层组织有所差异:CO₂焊因较高的热输入、较慢的冷却速率以及MG-51T焊丝中较高Mn、Si含量,促进了针状铁素体的生成,而TIG焊则因较快的冷却速率和TIG-50焊丝中Si元素的作用,会促进生成大量多边形铁素体。CO₂焊接接头呈现出更好的抗拉强度和冲击韧性,主要原因是:针状铁素体可通过位错强化与大角度晶界阻碍裂纹扩展,从而提升冲击韧性;同时较高的热输入有助于使热影响区中的带状组织均匀化,进而提高强度。

关键词: 钨极氩弧焊; CO₂气保焊; 焊接接头; 位错强化

中图分类号: TG446 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)02-0083-07

Microstructure and Properties of X52 Pipeline Steel Welded Joint

WANG Chun, YANG Ke, LIU Jianhao, WU Yifan, CHENG Xianming, ZHAO Jianhua, JIANG Wenyan

Hohai University, School of Materials Science and Engineering, Changzhou 213000, China

Abstract: A comparative analysis was conducted on the microstructure and mechanical properties of X52 pipeline steel welded joints produced by two processes: tungsten inert gas (TIG) welding for the root pass, and a combination of TIG welding with CO₂ gas-shielded welding for the subsequent layers. The results indicate that both processes form fine equiaxed ferrite and lamellar pearlite in the root pass. In the capping layer deposited by CO₂ welding, the higher heat input, slower cooling rate, and the elevated Mn and Si content in the MG-51T welding wire promote the formation of acicular ferrite. In contrast, the TIG capping layer, due to its cooling characteristics and the presence of Si in the TIG-50 wire, facilitates the development of a large amount of polygonal ferrite. The CO₂ welded joint exhibits superior tensile strength and impact toughness, primarily attributed to the dislocation strengthening from acicular ferrite and the high-angle grain boundaries that impede crack propagation, thereby enhancing impact toughness. Additionally, the higher heat input in CO₂ welding promotes the homogenization of banded structures in the heat-affected zone, contributing to the improved strength.

Keywords: tungsten inert gas welding; gas metal arc welding; welded joint

引用格式:王纯,杨可,刘建豪,等. X52 管线钢焊接接头组织与性能的研究[J]. 电焊机,2026,56(2):83-89.

Citation:WANG Chun, YANG Ke, LIU Jianhao, et al. Microstructure and Properties of X52 Pipeline Steel Welded Joint[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 83-89.

0 引言

X52 管线钢因其高强度、良好的焊接性和耐腐蚀性,广泛应用于石油、天然气、城市燃气及工业管

道等领域,尤其在恶劣环境中表现优异。强度、韧性、塑性、耐腐蚀性,是今后管线钢研究的主要方向。焊缝作为管道的关键连接部位,其焊接质量直接影响到管道运输的安全性和稳定性^[1]。

收稿日期: 2025-09-04 修回日期: 2025-10-30

基金项目: 河海大学大学生创新创业训练计划项目(X202510294873)

作者简介: 王 纯(2001—),女,硕士研究生,主要从事管线钢焊接工艺研究。E-mail:18130624663@163.com。

为得到性能优异的焊接接头,大量学者对 X52 管线钢的焊接工艺进行了研究。研究不同焊接工艺对焊接接头性能的影响,优化焊接工艺可以有效改善焊缝焊接质量。胡连海^[2]等人分析了激光焊在管道焊接中的优缺点并对 16 mm 厚的 X52 管线钢进行焊接接头分析,得出激光焊可使接头具备优异力学性能。陈延清^[3]等人分析了 X80 热轧板卷在不同焊接热循环下的组织和力学性能变化规律。发现粗晶热影响区冲击韧性较差,由于晶粒的粗化等原因存在严重脆化,且其冲击韧性随着 $t_{8/5}$ 的增加而降低。细晶热影响区是 X80 管线钢焊接热影响区的软化区域,软化程度随着焊接热输入的增加而增加。任伟^[4]等人以 X90 管道环焊接头为研究对象,研究 3 种试件的焊缝区与热影响区的断裂韧性规律。焊缝区试件在试验中极易发生脆断,具有相对较差的抗断裂性能,并且受焊接方法影响较大。刘治文^[5]等人采用热模拟机模拟深海管线钢的粗晶区,发现当二次热循环峰值温度为 800 °C 时,管线钢粗晶区的组织主要为粒状贝氏体,块状 M-A 组元在原奥氏体晶界呈现断续的链状结构,大角度晶界比例较低,表现出明显的脆化现象。当峰值温度为 900 °C 时,组织主要为多边形铁素体和准多边形铁素体,大角度晶界比例较高,韧性最优。李光^[6]等人采用热模拟技术研究了 X100 管线钢粗晶热影响区在不同冷却时间下的组织和冲击韧性,发现冷却时间越长,晶粒尺寸越大,粗晶区的冲击韧性越低。

目前对于氩弧焊与 CO₂ 气体保护焊混合工艺仍存在研究空白。钨极氩弧焊有电弧稳定、焊接成形好、易操作等优点,多应用于小径管和中径管高压管道的焊接^[7-8]。CO₂ 气体保护焊由于生产效率高、适焊材料广、综合成本低等优点,应用越来越广^[9]。将 CO₂ 焊的高效性与 TIG 焊的打底质量优势结合,可兼顾焊缝成形质量与生产效率,获得成形良好且高效的 X52 管线钢焊缝,为大口径管道焊接提供了低成本、高性能的解决方案。本文设计了两种焊接工艺:TIG 焊打底+TIG 焊填充盖面,以及 TIG 焊打底+CO₂ 气体保护焊填充盖面,对焊接接头进行拉伸、冲击、硬度等实验并进行对比分析,探究在这两种工艺下试样的各项性能,为 X52 管线钢在油气运输中的安全应用提供了可靠依据。

1 焊接工艺

1.1 焊接方法及焊接材料

本实验采用的母材为壁厚 10.97 mm 的 X52 管线钢,母材显微组织如图 1 所示。母材基体组织由大量针状铁素体和少量片状珠光体组成^[10],白色基体为针状铁素体,灰黑色块状为片状珠光体。在经过正火处理后,X52 管线钢内部组织由铁素体和珠光体向奥氏体转变并重新转变为铁素体和珠光体,而较快的冷却速率迫使奥氏体在较低温度转变为针状铁素体与片状珠光体^[11]。

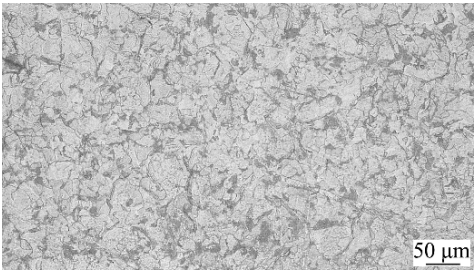


图1 母材显微组织
Fig. 1 Microstructure of the base metal

1.2 焊接参数

焊接工艺评定试验依据 ASME IX 2021 标准要求进行,采用以下两种焊接方法:TIG 焊打底+TIG 焊填充盖面,以及 TIG 焊打底+CO₂ 气体保护焊填充盖面。焊接工艺参数见表 1,焊丝牌号为 TIG-50、MG-51T,化学成分见表 2。焊接前设置单 V 形坡口,焊缝为环焊缝。

试样依次使用 800# 至 2000# 砂纸打磨平整,之

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

	焊接方法		焊丝	直径	焊接电流	焊接电压
				/mm	/A	/V
1	打底	氩弧焊	TIG-50	2	200	22.5
	填充+盖面	氩弧焊	TIG-50	2	220	27.5
2	打底	氩弧焊	TIG-50	2	200	22.5
	填充+盖面	CO ₂ 气保焊	MG-51T	1.2	220	27.5

表 2 母材和焊丝化学成分(质量分数,%)
Table 2 Chemical composition of base metal and welding wire(wt. %)

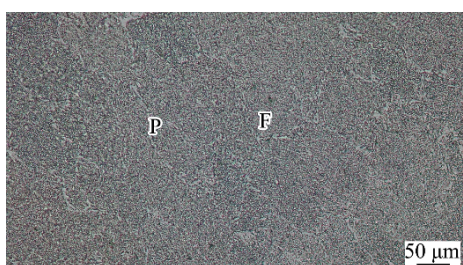
材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V
X52 管线钢	0.28	0.25	1.2	0.03	0.03	0.5	0.05	0.05
TIG-50	0.08	0.6	1.3	0.018	0.015	—	—	0.03
MG-51T	0.11	1.05	1.7	0.011	0.012	—	1.5	—

后用粒度为W2.5的抛光膏进行镜面抛光处理,最后用4%的硝酸酒精溶液进行腐蚀,以便观察显微组织,采用光学金相显微镜对打底层和填充盖面层的焊缝、热影响区、母材等部位进行金相观察。

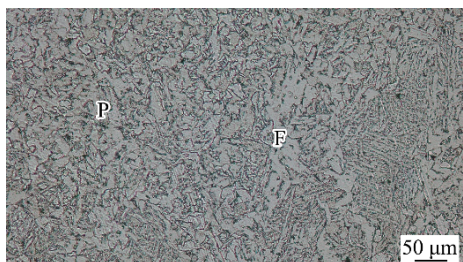
2 试验与分析

2.1 显微组织观察

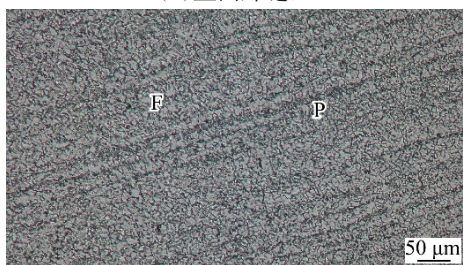
观察结果如图2、图3所示。图2为TIG焊接接头显微组织,图3为CO₂焊接接头显微组织。



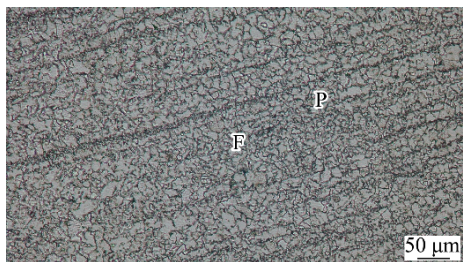
(a)打底层焊缝区



(b)盖面焊缝区



(c)热影响区(靠近母材)

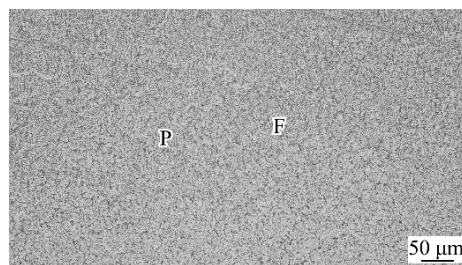


(d)热影响区(靠近熔合线)

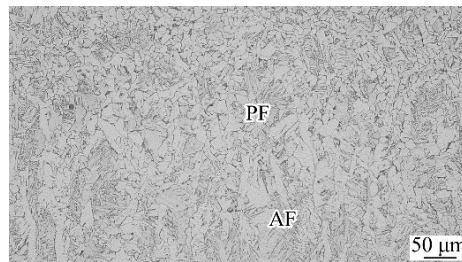
图2 TIG焊接接头显微组织

Fig. 2 Microstructure of TIG welded joint

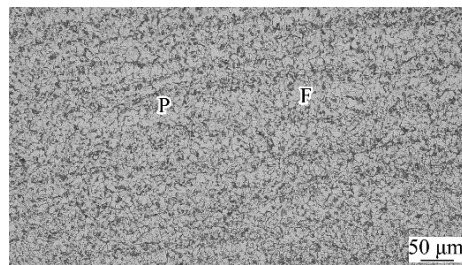
图2a是TIG焊接接头的打底层焊缝区,可看出该区域是由细小等轴晶粒的铁素体和片状珠光体组成。图2b是焊接接头的盖面层焊缝区,该区域由多边形铁素体和细小片状珠光体组成。图2c是焊接接头靠近母材的热影响区,该区域晶粒尺寸相对于母材明显细化,主要为细小的多面体晶粒铁素体和片状珠光体,铁素体和片状珠光体交错带状分布。图2d为焊接接头靠近熔合线的热影响区,由铁素体和片状珠光体组成,晶粒明显较粗大,而粗大的晶粒会导致材料的硬度降低^[7]。



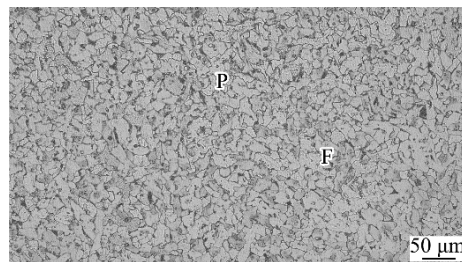
(a)打底层焊缝区



(b)盖面焊缝区



(c)热影响区(靠近母材)



(d)热影响区(靠近熔合线)

图3 CO₂焊接接头显微组织

Fig. 3 Microstructure of GMAW welded joint

图3a是CO₂焊接接头的打底层焊缝区,可看出该区域是由细小等轴晶粒的铁素体和片状珠光体组成。图3b是CO₂焊盖面层焊缝区,可看出CO₂焊盖面焊缝处铁素体晶粒由针状铁素体和不规则形状的多边形铁素体与片状珠光体组成。针状铁素体因大角度晶界可以有效阻碍位错运动,从而提高抗拉强度和冲击韧性。图3c是焊接接头靠近母材的热影响区,该区域晶粒尺寸相较于母材明显细化,主要为细小的多边形铁素体和片状珠光体。图3d为焊接接头靠近熔合线的热影响区,由大量多边形铁素体和少量片状珠光体组成,晶粒较粗大。

图2a、2b和图3a、3b是焊接接头的焊缝区,由于后续焊道会对打底焊缝区进行回火热处理,这种再加热会使原本的组织转变为细小等轴晶粒的铁素体和片状珠光体,因此打底层焊缝区均是由细小等轴晶粒的铁素体和片状珠光体组成。TIG焊盖面层有填充层焊道的预热且焊道较窄导致盖面层冷却速度较慢,从而形成多边形铁素体和细小片状珠光体,CO₂焊盖面焊缝区不仅有多边形铁素体和片状珠光体还有针状铁素体,MG-51T焊丝中较高的Mn和Si含量会稍微提高焊缝金属的淬透性,将奥氏体相变推迟到较低温度进行,进而促进针状铁素体的形成。

图2c、2d和图3c、3d是焊接接头的热影响区,焊接过程中,图2c、3c是焊接接头靠近母材的热影响区。该区域在温度影响下经历了由铁素体+片状珠光体向奥氏体转变又再次由奥氏体转变回铁素体+片状珠光体的过程,铁素体和珠光体片层状交错,呈带状分布。经历了两次相变重结晶,产生晶粒细化现象,对焊接接头的力学性能产生积极影响。图2d、3d是焊接接头靠近熔合线的热影响区,由于在热循环作用下冷却速度较慢,晶粒经过奥氏体相变后有足够的能量长大而粗大。由于MG-51T焊丝直径小,要想完全填充焊道需要多次焊接,因此CO₂焊接接头累积热输入较大,促进热影响区晶粒长大粗化,且由于较高的热输入,CO₂焊接接头靠近熔合线的热影响区带状组织已经完全消除,而TIG焊接接头靠近熔合线的热影响区因热输入较低仍保留带状组织。TIG-50焊丝中含有Ti等强脱氧剂和氮化物形成元素,会在熔池中形成细小稳定的TiN等

高熔点颗粒,晶粒长大受到强烈抑制,最终得到细小的组织。MG-51T焊丝主要依靠Mn和Si进行脱氧生成熔点较低且不稳定的MnO-SiO₂系复合物颗粒,在高温下这些颗粒溶解在奥氏体中,导致奥氏体晶粒在高温下快速长大,冷却后得到粗大的组织。因此CO₂焊热影响区晶粒比TIG焊的晶粒更粗大。

2.2 力学性能试验

制备X52管线钢TIG焊和CO₂焊两种焊接工艺下焊接接头的拉伸试样、冲击试样如图4、图5所示,试样尺寸参照GB/T228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》、GBT229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》^[12]。

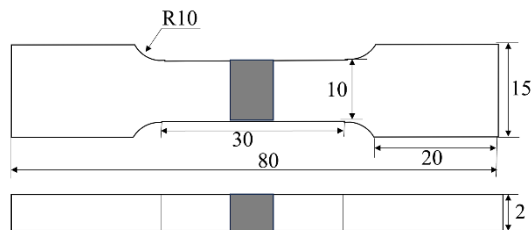


图4 拉伸试样尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of tensile test specimen dimensions (unit:mm)

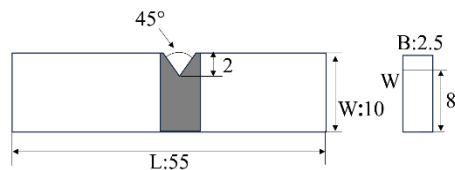


图5 冲击试样尺寸(单位:mm)

Fig. 5 Schematic diagram of impact test specimen dimensions (unit:mm)

X52管线钢TIG焊和CO₂焊两种焊接工艺下焊接接头室温下的应力应变曲线如图6所示。表3为室温下X52管线钢TIG焊和CO₂焊两种焊接工艺下焊接接头的拉伸实验结果^[13-15]。由表3可以看出,TIG焊和CO₂焊接接头抗拉强度分别为508.29 MPa、533.61 MPa,两种焊接接头的拉伸性能均高于X52管线钢母材的465 MPa。根据焊缝强度与晶粒尺寸的负相关性,TIG焊接接头强度本应高于CO₂焊接接头,但试验结果却表明CO₂焊接接头的抗拉强度略高于TIG焊接接头。

CO₂焊接接头热影响区由大量多边形铁素体和片状珠光体组成,靠近熔合线区域的带状组织基本

被消除,组织更加均匀;TIG焊接接头热影响区由多边形铁素体和片状珠光体组成,仍保留带状组织,而带状组织是软硬交替的不均匀组织,性能薄弱,容易产生应力集中和裂纹,带状组织的存在会降低TIG焊接接头热影响区的强度。相对于TIG-50焊丝,MG-51T焊丝中C、Mn元素含量较高,C和Mn都是极强的固溶强化元素,它们融入铁素体晶格中,引起晶格畸变,极大地阻碍位错运动,从而显著提高屈服强度和抗拉强度。同时焊丝中的Si是较强的固溶强化元素,Si元素的大量存在进一步提高了CO₂焊接接头的抗拉强度^[16]。

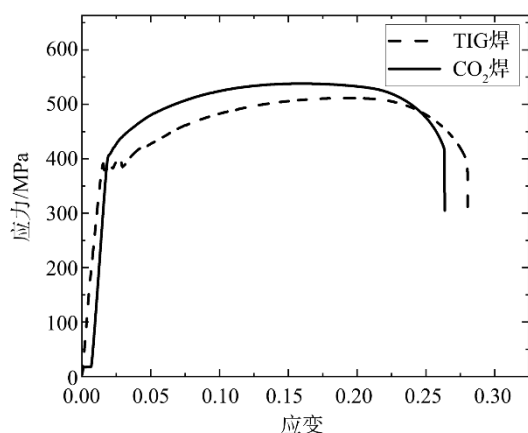


图6 两种焊接工艺焊接接头的应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of welded joints by two welding processes

表3 两种焊接工艺焊接接头的抗拉强度

Table 3 Tensile strength of welded joints by two welding processes			
焊接方法	抗拉强度/MPa	抗拉强度平均值/MPa	断裂位置
TIG 焊	502.92	508.29	热影响区
	511.60		热影响区
	510.36		热影响区
CO ₂ 焊	527.43	533.61	热影响区
	538.13		热影响区
	535.29		热影响区

TIG焊和CO₂焊两种焊接工艺下焊接接头的室温冲击韧性如图7所示。CO₂焊接接头的冲击韧性优于TIG焊接接头,CO₂焊接接头的热影响区带状组织因热输入高有消除趋势,TIG焊接接头的热影响区仍保留有带状组织,组织的不均匀性会增加焊接接头出现裂纹的风险,而裂纹扩展的难易程度直接决定了韧性高低^[17]。

TIG-50焊丝中的Si的存在会促进TIG焊接接头形成大量多边形铁素体(见图2b)。这些多边形

铁素体首先在奥氏体晶界上析出并长大,形成一层包裹着每个奥氏体晶粒的软膜。这个软相网络强度低,无法有效阻碍裂纹。珠光体中的渗碳体片是脆性的,裂纹很容易在渗碳体中萌生并沿其扩展。这个过程消耗的能量很少,因此冲击功非常低。MG-51T焊丝含有Mn等化学成分,有利于提高淬透性,促进针状铁素体的生成(见图3b)。CO₂焊接接头微观组织中的针状铁素体是由众多不同取向、相互交错的细小板条束组成,每个板条束之间是大角度晶界。在裂纹扩展过程中,大角度晶界是有效的障碍物,裂纹要想从一个板条束扩展到相邻的另一个取向不同的板条束,必须消耗额外的能量来改变方向或重新萌生,从而极大地提高了材料的冲击韧性。

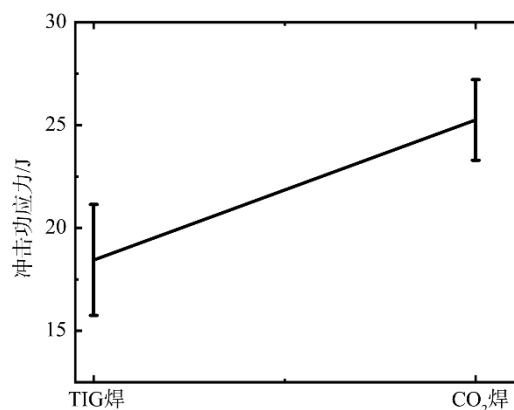


图7 两种焊接工艺焊接接头的冲击功

Fig. 7 Impact energy of welded joints by two welding processes

采用维氏硬度计沿垂直焊缝方向进行硬度测试,获得维氏硬度曲线,如图8所示。焊接接头维氏硬度曲线呈“M”形。其根本原因是焊接热循环导致热影响区局部区域发生了“硬化”和“软化”的交替变化。焊缝中心经历了熔化凝固和固态相变,微观组织由针状铁素体、多边形铁素体和珠光体组成,这些组织的硬度均高于正常态由铁素体和珠光体组成的母材。在热影响区,奥氏体晶粒在高温下发生粗化,随后冷却转变为粗大的多边形铁素体与珠光体,粗大的晶粒会显著提高粗晶区的硬度,并成为整个接头的硬度峰值区。

CO₂焊接接头在焊缝区的显微硬度明显高于TIG焊接接头。TIG焊接接头焊缝处微观组织由多边形铁素体和珠光体组成(见图2b),铁素体在高温

下充分长大,形成连续或半连续的软相基体多边形铁素体。TIG-50焊丝本身的C、Mn元素含量较低。在冷却时,C和Mn元素有充足时间扩散,最终形成的珠光体比例较低,而珠光体的体积分数可以有效决定组织的硬度,从而导致TIG焊接接头的硬度较低。 CO_2 焊接接头焊缝处微观组织由针状铁素体、多边形铁素体和珠光体组成(见图3b)针状铁素体内部位错密度极高,且细小的板条束界阻碍位错运动,故其组织硬度比多边形铁素体高。MG-51T焊丝较高的C、Mn含量确保了即使有针状铁素体形成,仍能有相当数量的珠光体存在来提高组织硬度。此外,其较高的Mn、Si含量也增强了固溶强化效果。高硬度的针状铁素体、更多的珠光体、更强的固溶强化三者叠加导致 CO_2 焊接接头的显微硬度显著高于TIG焊接接头。

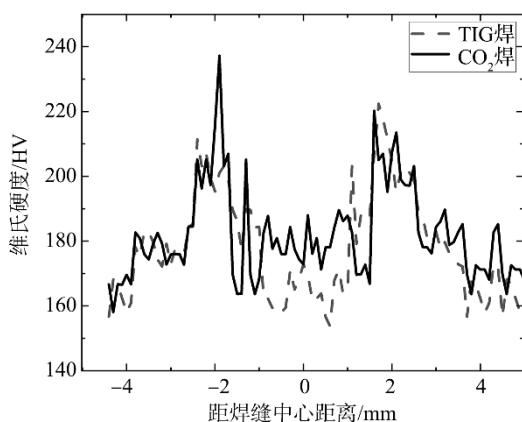


图8 维氏硬度曲线

Fig. 8 Vickers hardness profile

3 结论

(1) TIG焊与 CO_2 焊打底层均因后续焊道的回火作用而形成细小等轴铁素体和片状珠光体组织,但盖面层组织差异显著,TIG焊以强度较低的多边形铁素体为主,热影响区保留有明显的带状组织,而 CO_2 焊因较高热输入、较慢冷却速率以及MG-51T焊丝较高的Mn、Si含量,促进了有益于强韧性的针状铁素体形成。

(2) CO_2 焊接接头的抗拉强度、冲击韧性和显微硬度均显著优于TIG焊接接头。其主要原因是热影响区在焊接热循环后形成了强度低于母材和焊缝

的“软化区”,且TIG焊热影响区中保留的粗大带状组织进一步降低了其强度, CO_2 焊因其较高的热输入,热影响区带状组织基本被细化,组织均匀性更好,表现为更优的强度。其性能提升主要源于 CO_2 焊接接头的针状铁素体的位错强化与大角度晶界对裂纹扩展的阻碍作用,以及MG-51T焊丝中较高的Mn、Si元素带来的固溶强化效应。

参考文献:

- [1] 胡志强,刘润杰. 某X52弯管泄漏失效分析[J]. 焊管, 2024, 47(06): 54-61.
HU Z Q, LIU R J. Failure Analysis of an X52 Elbow Pipe Leakage [J]. Welded Pipe and Tube, 2024, 47(06): 54-61.
- [2] Zhao Y, Ding T, Yang S, et al. Comparison of corrosion behavior of X52 steel in liquid and supercritical CO_2 transport environments with multiple impurities [J]. Corrosion Communications, 2025, 18(02): 44-53.
- [3] 陈延清,杜则裕,许良红. X80管线钢焊接热影响区组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(05): 101-104.
CHEN Y Q, DU Z Y, XU L H. Analysis of Microstructure and Properties in Welded Heat-Affected Zone of X80 Pipeline Steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(05): 101-104.
- [4] 任伟,帅健. 焊接方法对X90管道环焊接头断裂韧性的影响[J]. 焊接学报, 2024, 45(03): 32-42.
REN W, SHUAI J. Effect of Welding Methods on Fracture Toughness of X90 Pipeline Girth Welded Joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(03): 32-42.
- [5] 刘治文,韩鹏彪,张亮,等. 二次热循环对深海管线钢粗晶区组织与韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54(01): 104-108.
LIU Z W, HAN P B, ZHANG L, et al. Effect of Secondary Thermal Cycle on Microstructure and Toughness of Coarse-Grained Heat-Affected Zone in Deep-Sea Pipeline Steel [J]. Hot Working Technology, 2025, 54(01): 104-108.
- [6] 李光,史容睿,董会,等. 利用热模拟技术对X100管线钢热影响区粗晶区的组织和冲击韧性的研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(19): 114-117.
LI G, SHI R R, DONG H, et al. Investigation on Microstructure and Impact Toughness of Coarse-Grained Heat-Affected Zone in X100 Pipeline Steel Using Thermal Simulation Technology [J]. Hot Working Technol-

- ogy, 2022, 51(19): 114–117.
- [7] 罗海龙, 张敏, 慕二龙, 等. Cu基药芯焊丝TIG焊TA1/Q235B接头微观组织和显微硬度[J]. 焊接学报, 2019, 40(01): 141–146.
- LUO H L, ZHANG M, MU E L, et al. Microstructure and Microhardness of TA1/Q235B Joint by Cu-based Flux-cored Wire TIG Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(01): 141–146.
- [8] 王和平, 王磊, 韩学, 等. X52管线钢TIG焊接接头氢脆敏感性研究[J]. 电焊机, 2025, 55(07): 97–105.
- WANG H P, WANG L, HAN X, et al. Hydrogen Embrittlement Susceptibility of TIG Welded Joints in X52 Pipeline Steel[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(07): 97–105.
- [9] 李正敏, 牛伟乾, 赵煜龙, 等. 超临界CO₂输送环境中O₂、SO₂和NO₂杂质对X52钢腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(12): 60–67.
- LI Z M, NIU W Q, ZHAO Y L, et al. Effects of O₂、SO₂ and NO₂ Impurities on Corrosion Behavior of X52 Steel in Supercritical CO₂ Transportation Environment[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(12): 60–67.
- [10] 陈丽娟, 尚峰, 樊学华, 等. 海外油田用X52NS/825冶金复合钢管的开发及性能研究[J]. 钢管, 2020, 49(01): 33–37.
- CHEN L J, SHANG F, FAN X H, et al. Development and Performance Study of X52NS/825 Metallurgical Clad Steel Pipes for Overseas Oilfields[J]. Steel Pipe, 2020, 49(01): 33–37.
- [11] Mendoza O, Vargas B, Mendoza H. Digital Processing of Fractographic Images for Welded Joints on Microalloy Steel API5L–X52 Aged[J]. IEEE Latin America Transactions, 2013, 11(1): 172–176.
- [12] 孙宏, 宗秋丽, 崔明亮. GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》介绍[J]. 焊管, 2021, 44(06): 55–60.
- SUN H, ZONG Q L, CUI M L. Introduction to GB/T 229–2020 "Metallic Materials—Charpy Pendulum Impact Test Method"[J]. Welded Pipe and Tube, 2021, 44(06): 55–60.
- [13] 孙咸. 9%Cr钢焊接材料熔敷金属韧性研究进展[J]. 焊管, 2025, 48(07): 1–12.
- SUN X. Research Progress on Toughness of Deposit Metal for 9%Cr Steel Welding Materials[J]. Welded Pipe and Tube, 2025, 48(07): 1–12.
- [14] 贾瑞雪, 姚熠莹, 秦蕊, 等. 700MPa级高频电阻焊接方矩管焊缝冲击韧性偏低原因分析[J]. 包钢科技, 2025, 51(04): 40–43.
- JIA R X, YAO Y Y, QIN R, et al. Analysis of the Causes for Low Impact Toughness of Welds in 700 MPa Grade High-Frequency Electric Resistance Welded Square and Rectangular Tubes[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2025, 51(04): 40–44.
- [15] 刘洋, 孙健, 陆善平. Mo含量对1000 MPa级高强钢焊缝金属组织和力学性能的影响[J/OL]. 金属学报, 1–21 [2026–02–09]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.TG.20250826.1617.004>.
- LIU Y, SUN J, LU S P. Effect of Mo Content on Microstructure and Mechanical Properties of Weld Metal in 1000 MPa Grade High-Strength Steel[J/OL]. Acta Metallurgica Sinica: 1–21 [2026–02–09]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.TG.20250826.1617.004>.
- [16] 熊俊珍, 杨新岐, 唐文坤, 等. 焊后热处理对X52管线钢水下摩擦塞焊接头断裂韧性的影响[J]. 焊接, 2021(04): 1–7.
- XIONG J Z, YANG X Q, TANG W K, et al. Effect of Post-Weld Heat Treatment on Fracture Toughness of X52 Pipeline Steel Underwater Friction Plug Welded Joints[J]. Welding & Joining, 2021(04): 1–7.
- [17] 李硕, 李永春, 易斐宁, 等. X52管线钢焊缝金属裂纹分析[J]. 石油工程建设, 2022, 48(04): 90–92.
- LI S, LI Y C, YI F N, et al. Analysis of Weld Metal Cracks in X52 Pipeline Steel[J]. Petroleum Engineering Construction, 2022, 48(04): 90–92.