

引用格式:李勇齐,薛瑞雷,吴伟,等.X80M管线钢DP-TIG焊接接头的显微组织和力学性能[J].热加工工艺,2026,55(1):118-124.LI Yongqi, XUE Ruilei, WU Wei, et al. Microstructure and Mechanical Properties of DP-TIG Welded Joints of X80M Pipeline Steel [J]. Hot Working Technology, 2026, 55(1): 118-124.  
DOI: 10.14158/j. cnki. 1001-3814. 25031100

# X80M 管线钢 DP-TIG 焊接接头的 显微组织和力学性能

李勇齐<sup>1</sup>, 薛瑞雷<sup>1</sup>, 吴伟<sup>2</sup>, 夏磊<sup>1</sup>, 刘宏胜<sup>1</sup>

(1.新疆大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2.无锡美科勒自动化设备有限公司, 江苏 无锡 214142)

**摘要:**为优化 X80M 管线钢在深熔钨弧焊接方法 (deep penetration tungsten inert gas welding, DP-TIG) 工艺下的焊接参数, 采用平板对接 (母材自熔) 方式对 DP-TIG 焊接工艺过程中的焊接电流与焊接速度参数进行正交试验, 分析 DP-TIG 焊接工艺对管线钢接头正反面成型效果、显微组织、力学性能的影响, 从而获得最优的焊接工艺参数。结果表明: 在 DP-TIG 焊接工艺下, 获得无缺陷、成型良好的焊接接头。由于热输入较高, 且冷却梯度较大, 所以焊缝熔合线清晰可见, 接头组织主要由铁素体和贝氏体组成, 焊缝区、粗晶区和细晶区的平均晶粒尺寸分别为 7.6、13.6 和 8.1  $\mu\text{m}$ 。该接头的抗拉强度、屈服强度分别为 697、627 MPa, 拉伸试件断口位于母材位置。焊缝与热影响区冲击吸收能量为 184 J 和 203 J。

**关键词:** X80M 管线钢; DP-TIG 焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG444<sup>+</sup>.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)01-0118-07

## Microstructure and Mechanical Properties of DP-TIG Welded Joints of X80M Pipeline Steel

LI Yongqi<sup>1</sup>, XUE Ruilei<sup>1</sup>, WU Wei<sup>2</sup>, XIA Lei<sup>1</sup>, LIU Hongsheng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Wuxi Meikele Automation Equipment Co., Ltd., Wuxi 214142, China)

**Abstract:** In order to optimize the welding parameters of X80M pipeline steel under the deep penetration tungsten inert gas welding (DP-TIG) process, an orthogonal experiment was conducted on the welding current and welding speed parameters during the DP-TIG welding process using flat plate butt welding (base metal self melting). The influence of DP-TIG welding process on the forming effect, microstructure and mechanical properties of pipeline steel joints on both sides was analyzed, and the optimal welding process parameters were obtained. The results show that under the DP-TIG welding process, defect free and well formed welding joints are obtained. Due to the high heat input and large cooling gradient, the fusion line of the weld is clearly visible, and the joint structure is mainly composed of ferrite and bainite. The average grain size of the weld zone, coarse grain zone and fine grain zone is 7.6  $\mu\text{m}$ , 13.6  $\mu\text{m}$  and 8.1  $\mu\text{m}$ . The tensile strength and yield strength are 697 MPa and 627 MPa, respectively, and the fracture surface of the tensile specimen is located at the position of the base metal. The impact absorbed energy of the weld seam and heat affected zone is 184 J and 203 J, respectively.

**Key words:** X80M pipeline steel; DP-TIG welding; microstructure; mechanical properties

随着油气资源的不断开发, 油气资源的调配成为一大难点。管线钢是一种具有高强度、高冲击韧

性、低韧脆转变温度、良好焊接性能以及经济性和环保性著称的特殊钢材, 被广泛应用于油气输送管道工程中。而焊接作为一种永久性的连接方式, 焊接的安全性至关重要<sup>[1-4]</sup>。

从连接的安全性和焊接效率出发, 不同的学者提出了不同的焊接工艺, 研究了焊接工艺对 X80 管线钢对接接头显微组织和力学性能的影响。侯阳等<sup>[5]</sup>采用正交试验, 通过模拟仿真的方式对金属惰性气体保护焊 (metal inert gas welding, MIG) 工艺进行优化, 结

收稿日期: 2025-03-18 修回日期: 2025-05-18

基金项目: 天山英才培养计划项目 (2022TSYCLJ0044)

作者简介: 李勇齐, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计制造及其自动化; E-mail: 1450854204@qq.com

通讯作者: 薛瑞雷, 男, 副教授, 高级工程师, 研究方向为长输管道自动化焊接、机器视觉图像处理、人工智能;

E-mail: 1981907557@qq.com

果表明焊接速度对焊接接头应力峰值产生重大影响。石晓松等<sup>[6]</sup>采用激光-MAG复合焊接(laser-metal active gas welding, L-MAG)的焊接方式,在不同预热温度下对 X80 管线钢的接头硬度进行研究,发现适当的预热温度可以使焊缝接头硬度分布得到改善,提升焊接接头的力学性能,并优化焊接接头的组织结构,进而提高焊接效率和经济性。姚宗湘等<sup>[7]</sup>采用钨丝惰性气体保护焊(tungsten inert gas welding, TIG)的焊接方式研究,发现焊接接头的抗拉强度均值为 643 MPa,焊缝区主要为韧脆混合断裂,而热影响区(heat affected zone, HAZ)主要为脆性断裂。黄松涛等<sup>[8]</sup>首次将超音脉冲 TIG 焊技术应用于 X80 管线钢的焊接中,通过自制超音直流脉冲 TIG 焊电源,研究了超音频率和占空比对焊缝成形的影响,包括熔深、熔宽和成形系数,实现了对 X80 管线钢的高质量焊接。李泽宇等<sup>[9]</sup>将激光扫描-电弧复合焊(OLAHW)技术应用于 X80 管线钢的填充焊接中,与传统的熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)进行了对比研究。结果表明:激光扫描在焊接过程中对熔池的搅拌作用和对异质形核的促进作用细化了焊缝和热影响区的晶粒,提高了焊接接头的冲击韧性。

为进一步提高焊接效率,刘自刚等<sup>[10-12]</sup>提出深熔氩弧焊接方法。该方法即保留了传统 TIG 焊高品质焊接、电弧稳定性好、焊接效率高和环保性好的优点,又得到了挺度高、能量密度大的电弧,从而实现穿孔形式的焊接,达到增大焊缝焊接熔深的目的。对 DP-TIG 焊接方法进行了研究,使用 X80 管线钢平板对接进行试验,充分利用 DP-TIG 焊、单面焊和双面成型的焊接工艺,对 12 mm 以下管线钢平板不用开坡口,焊接时不添加金属的优点,采用母材自熔的方式。从而研究该工艺对 X80 管线钢对接接头的显微组织和力学性能的影响,寻找最佳焊接工艺参数,为 DP-TIG 焊技术的实际焊接应用提供可行性方案。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

对于 X80 管线钢的平板对接试验,试验材料为高级别管线钢(热轧钢板),型号为 X80M,规格为 10mm×1500mm×6000mm。焊丝为 CHW-80GX3,该焊丝采用富氩气体保护气。试验材料、焊丝的主要成分与力学性能分别见表 1、2。

图 1 为焊接平台,其中包括试验型材坡口方案,

表 1 母材与焊丝的主要成分(质量分数,%)  
Tab.1 Main components of base metal and welding wire (wt%)

类别	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Ti	Cu	Mo	Nb	Al	V	Fe
X80M	0.049	1.70	0.25	0.001	0.011	0.25	0.13	0.014	0.03	0.10	0.043	0.03	0.002	余量
CHW-80GX3	0.09	1.52	0.68	0.012	0.0085	0.026	0.95	0.065	0.14	-	-	-	-	余量

表 2 X80M 与焊丝的主要性能  
Tab.2 Main performance of X80M and welding wire

类别	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	KV(-20℃)/J
X80M710	710	565	≥281
CHW-80GX3	624	547	206

焊接工件尺寸为 250mm×150mm×10mm,工件之间的焊缝为 I 型坡口,坡口间隙为 0~0.5mm。焊接电源为 Tetrrix\_1002\_DC,水冷设备为 CW-6200 工业水冷机,焊接保护气为纯度 99.99% 的氩气,焊接控制机构为 PLC 电气控制柜。焊枪为 DP-TIG 焊枪,焊接工件正面时焊枪保护气体流量为 15 L/min,焊接工件背面时保护气流量为 20 L/min。钨棒直径为 6.4 mm、钨极锥角为 30°、焊炬高度为 2~3 mm。

### 1.2 试验方法

刘自刚等<sup>[13]</sup>采用 DP-TIG 焊接工艺对 8、10、12mm 厚度的不锈钢进行焊接,其焊接电流为 440、500、

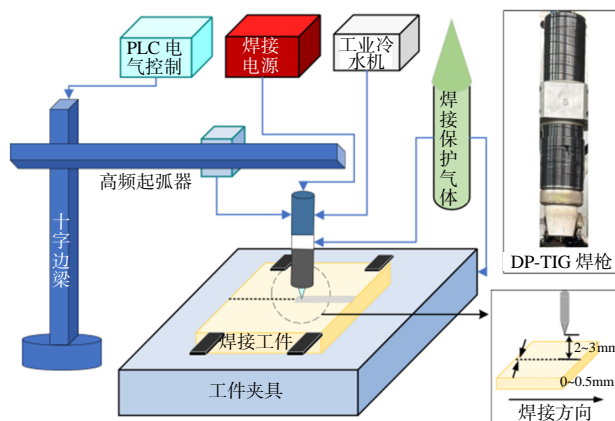


图 1 DP-TIG 试验平台  
Fig.1 Experimental platform of DP-TIG

550 A,焊接速度为 250、230、180 mm/min,钨极锥角为 45°。Zhang 等<sup>[14]</sup>采用 DP-TIG 焊接工艺对 8mm 的 Q345 钢板 T 型接头进行研究,其焊接电流为 465 A、焊接速度为 4 mm/s、焊炬高度为 2 mm、钨极锥角为

60°。根据以上试验方法,对 10mm 厚 X80M 管线钢进行研究,将焊接电流的范围控制在 480~560 A,焊接速度为 180~250 mm/min,采用正交试验法,试验分为 60 组,控制焊接电流与焊接速度。通过参考文献中的数据,为试验做初步的判断,以减少焊接次数。通过不断观察并调整焊接参数对宏观形貌的影响<sup>[15]</sup>,并使用超声波探伤,确认焊道内部没有缺陷,得到的焊接工艺参数如表 3 所示。图 2 为焊缝成型效果图。在焊接时,当电流过小且焊接速度较快则会导致熔池较浅,未完全熔合等缺陷;当电流过大且焊接速度较慢时则导致热输入过大,产生熔池塌陷。

表 3 焊接工艺参数  
Tab.3 Welding process parameters

类别	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度 V/(mm·s <sup>-1</sup> )	送丝速度 V/(cm·s <sup>-1</sup> )	横摆幅度 /mm	摆动频率 /Hz
自熔打底	530	18.4	205	-	-	-
填丝盖面	260	14.1	80	1200	8	0.5

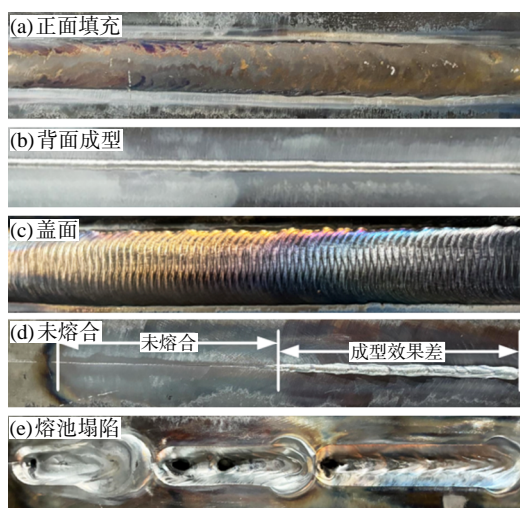


图 2 焊缝成型效果图

Fig.2 Welding seam forming effect

对焊接工艺试验完成后,截取焊接接头区域试样,包括金相显微组织分析试样、电子背散射衍射取向成像试样、单轴拉伸力学性能试样、维氏硬度梯度分布表征试样、夏比 V 型缺口冲击韧性试样。通过金相显微组织分析焊接热循环引起的组织异变,评估热影响区软化或脆化风险,从而优化热输入控制,防止焊接接头因组织劣化而失效。通过电子背散射衍射取向成像分析焊接区域的各向异性,预测裂纹开裂走向,验证 X80 管线钢焊接后是否保留母材的韧性主导结构,保障 X80 管线钢在复杂环境中的抗疲劳性能。通过单轴拉伸力学性能分析接头力学性能,确保焊缝强度 $\geq$ 母材(X80 管线钢的屈服强度 $\geq$

555 MPa),检测热影响区是否因为再次结晶成为应力集中环节,从而满足 API5L 标准对高强管线钢的强度要求。通过维氏硬度分析焊缝、热影响区和母材的硬度差异,评估焊接工艺对材料性能的影响,从而避免硬度不均引发氢致开裂风险。通过夏比 V 型缺口冲击韧性评估接头低温韧性(-20℃下 KV $\geq$ 80J),验证 V 型缺口吸收冲击功能量是否满足 $\geq$ 80J 的要求,从而确保寒冷地区管线钢的抗脆断能力。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊接接头宏观形貌

X80M 对接接头宏观形貌如图 3 所示。其中,X80 管线钢 DP-TIG 焊接工艺接头宏观形貌如图 3(a)所示。整个焊缝区分为上下两部分,上半部分为摆动送丝盖面,下半部分为母材自熔打底。熔池宽度约为 12 mm、熔池深度约为 11 mm、盖面高度约为 1.5 mm。DP-TIG 焊接工艺使用直流焊接,稳定的热输入,使得熔合线形态呈“平滑抛物线”状,反映出焊接过程中 DP-TIG 焊接工艺的电弧形态以及热输入的动态变化。焊接接头的热影响区如图 3(b)部分所示,整个部分主要由母材区(base material, BM)、临界晶区(intercritically heat affected zone, ICHAZ)、细晶区(fine grained heat affected zone, FGHAZ)和粗晶区(coarse grained heat affected zone, CGHAZ)组成。HAZ 区域与母材致密的金属组织形态相比,HAZ 区域宏观可见轻微的粗糙感,这是由晶粒在高温下粗化导致的。图 3(a)下方凸起部分为焊缝背面的成型形态,主要是

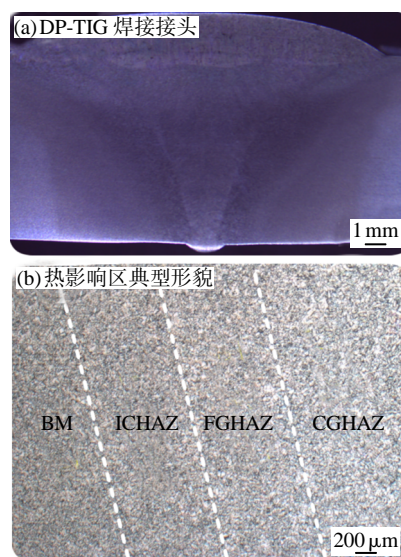


图 3 X80M 对接接头宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of X80M butt joint

高能量电弧穿透形成的锁孔与熔池动态控制协同作用的结果。

## 2.2 焊接接头的微观组织

在 DP-TIG 焊接工艺下, 由于产生较高的热输入和冷却率使得母材自熔后的接头微观组织与熔化极活性气体保护电弧焊、激光扫描-电弧复合焊、熔化极惰性气体保护焊和热丝氩弧焊的不同。焊缝中心区域组织如图 4(a)所示, 由于焊接过程中温度梯度的变化较大, 导致产生晶粒的不规则形状和晶粒大小差异的变化, 焊缝区的树状结构, 是在金属冷却过程中产生的晶粒, 表明焊缝区的金属经历了快速的冷却, 从而产生大量针状铁素体和粒状贝氏体, 这种形态通常出现在高速冷却速率的焊接工艺中。熔合区组织如图 4(b)所示, 熔合线附近因为热输入量不足, 或者说受热影响较小, 晶粒没有完全转化, 从而形成了粗晶区。粗晶区组织如图 4(c)所示, 组织显示出颗粒状的形态, 晶粒边界较为清晰。晶粒大小不均匀, 部分区域的晶粒显得较细小, 而另一些区域则显示出较大的晶粒。这些晶粒形态可能指向贝氏体或马氏体结构, 尤其是较细的晶粒可能与较快的冷却速率有关。贝氏体通常呈现出颗粒状或片状, 在扫描图像中可能呈现出细小的条纹状结构。在 X80M 管线钢中, 经过适当控制冷却速率, 贝氏体组织往往具有较好的力学性能, 包括较高的强度和韧性。马氏体则通常表现为更细密的颗粒。细晶区组织如图 4(d)所示, 细晶区由于受热相对于粗晶区温度较低, 冷却速率适中, 产生多边形铁素体为主要特征, 伴随着高强度和高韧性的优势。细晶区的晶粒尺寸相对于母材区和粗晶区而言较低, 晶界密度高, 对裂纹的

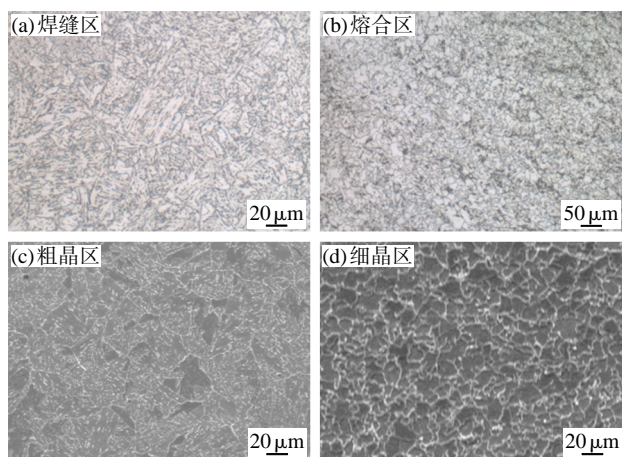


图 4 X80M 对接接头的显微组织  
Fig.4 Microstructure of X80M butt joint

扩展有着抵抗作用。

## 2.3 焊接接头的力学性能

### 2.3.1 拉伸性能

拉伸试验依据国家标准 GB/T 228.1—2021 进行。通过图 5 可以看到 DP-TIG 焊接接头与母材的拉伸试验结果, 其中母材的抗拉强度和屈服强度分别为 726、662 MPa, 断裂于拉伸试件的中心位置。而 DP-TIG 工艺下焊接接头的抗拉强度和屈服强度分别为 697、627 MPa, 断裂位于拉伸试件的母材位置。其中抗拉强度约为母材的 96%, 屈服强度约为母材的 94.7%。

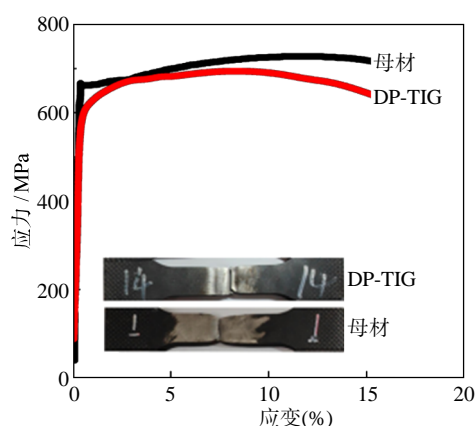


图 5 X80M 对接接头的拉伸试验结果  
Fig.5 Tensile test results of X80M butt joint

### 2.3.2 冲击性能

冲击试验依据国家标准 GB/T2650—2022 进行。在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  下模拟在北方寒冷地区发生因动力载荷或冲击环境下的脆性断裂, 其母材区、DP-TIG 焊接接头焊缝区和热影响区的冲击性能如图 6 所示。母材区的冲击功吸收能量明显大于焊缝区和热影响区, 冲击功所吸收的能量值大于 294 J, 而 DP-TIG 焊接工艺下的焊缝区与热影响区的冲击功吸收能量分别为 184、203 J。这是由于母材在焊接过程中产生的热

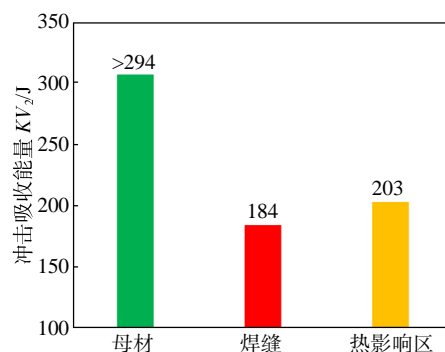


图 6 X80M 对接接头的冲击试验结果  
Fig.6 Impact test results of X80M butt joint

输入会使焊缝和热影响区晶粒粗化,使得母材本身的组织发生变化,由焊缝区的铁素体转化为粒状贝氏体,快速冷却会产生韧性较低的马氏体。而热影响区在热循环的作用下,晶粒变得粗大,极易产生局部脆性区域,从而导致冲击功的显著降低。

图 7 (a) 为冲击功吸收能量最薄弱的焊缝区 (184J) 冲击断口形貌特征。断口表面分布着尺寸均匀的等轴韧窝和显著拉长的剪切韧窝,其中连续均匀的韧窝结构形成较深的坑洞特征,表明材料在断裂过程中经历了充分的塑性流动和能量耗散。这种均匀的韧窝分布形态与较高的冲击吸收能量相对应,反映出材料具备优异的均匀塑性变形能力。断口上拉长剪切韧窝的形态特征显示,材料在断裂过程中承受了较大的拉伸应力作用,属于典型的滑移流变断裂机制。该区域在微观尺度表现为晶体滑移面受高应力分离形成的波纹状花样,最终扩展为尺寸较大的平直断裂区域。这种断裂形貌组合特征(等轴韧窝+剪切韧窝)在管线钢焊接接头中属于优质断口类型,符合高强度焊缝的韧性要求。该断口形貌分析表明焊缝区具备优异的强韧性匹配,其高冲击吸收能量(184 J)与抗拉强度(697 MPa)、屈服强度(621 MPa)共同验证了焊接接头的结构可靠性。而图 7(b)为吸收冲击功能量显著偏低的断口形貌特征,该区域主要呈现为脆性断裂和准解理断裂。脆性断裂通常会表现为表面平滑、没有明显的延展痕迹,断口平面非常整齐光滑,且没有明显的塑性变形,可以判断这一部分属于脆性断裂。局部区域可观察到准解理断裂的过渡特征,它是材料断裂的一种中间形式,介于脆性解理断裂和韧性断裂之间,是解理与微孔集合的混合型断裂,撕裂棱多,撕裂棱结构周围分布着细小韧窝,形成解理台阶与微孔聚合的混合断裂形貌,局部有韧窝。这种特征代表着试件屈服强度较小,观察拉伸试验位移-应力曲线发现,试样具有明显脆性断

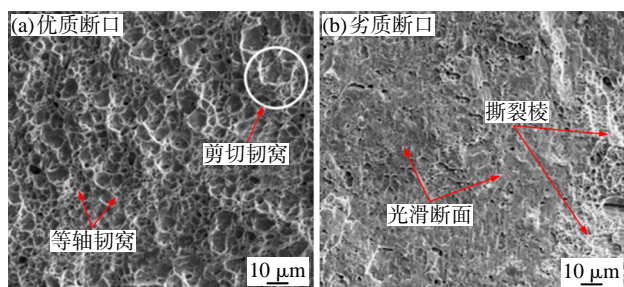


图 7 X80M 对接接头冲击断口的微观形貌  
Fig.7 Microscopic morphologies of impact fracture surface of X80M butt joint

裂特征,符合断口形貌特征分析。断口形貌与拉伸试验的脆性断裂特征相吻合,表现为没有明显的屈服平台和较低的断后伸长率,这种脆性断裂和准解理断裂的混合断裂形貌组合在工程应用中属于高风险失效模式。

### 2.3.3 显微硬度

测试维氏硬度的点距离焊缝接头上表面约 2 mm, 加载量 10kg, 加载时间 10s。通过图 8 可以看出,整体呈“M”状,在焊缝中心区域由于 DP-TIG 热输入较大,焊缝中心熔池宽度大约 12 mm,热影响区单边大约 3 mm,高热量的热输入得到较大的熔池深度,使得晶粒快速冷却,晶粒粗化严重,从而硬度有所下降。热影响区硬度值起伏比较大,由于热传导效应,产生粗晶区、细晶区和临界晶区;由于晶粒细化,晶界的减少,阻碍了位错运动,使得材料的微观结构更加均匀和致密,所以强度、硬度高,同时塑性和韧性也明显增强。临界晶区的晶粒粗大且组织不均匀,以多边形铁素体这种较软组织较多,此类组织硬度低于贝氏体和马氏体,从而导致硬度降低,故临界晶区的硬度最低。

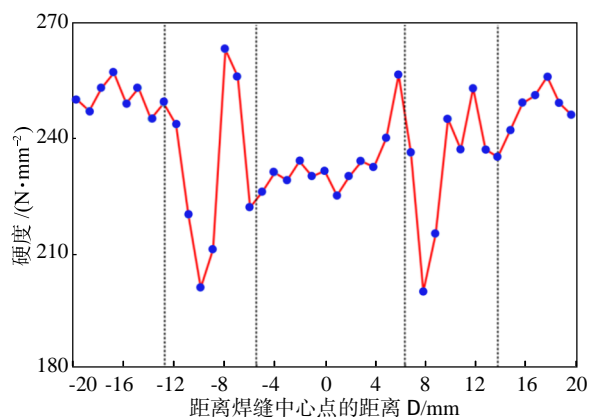


图 8 X80M 对接接头显微硬度试验结果  
Fig.8 Microhardness test results of X80M butt joint

### 2.4 EBSD 分析

在 EBSD(电子背散射衍射)技术中,KAM(kernel average misorientation, KAM)和 IPF(inverse pole figure, IPF)是两个重要的概念和工具,它们在材料微观结构的分析中发挥着关键作用。其中 IPF 是反极图,是 EBSD 技术中用于表示晶体取向的一种图形表示方法。它通过将晶体坐标系与样品坐标系相关联,以不同的颜色表示不同的晶体取向,从而直观地展示晶粒的取向信息。它的作用是展示晶粒取向、分析晶粒尺寸和晶粒形状,能够快速获取和分析材料的晶

体取向信息,深入分析材料的微观结构和性能特征。图9为X80M管线钢在DP-TIG焊接工艺下不同区域的晶粒尺寸与晶界角度变化中焊接热力学与微观组织演变的复杂关联。如图9(a)所示,粗晶区的平均晶粒尺寸为 $13.6\mu\text{m}$ ,且小角度晶界( $2^\circ\sim 15^\circ$ )占主导( $40.2\%\sim 59.8\%$ )。由于DP-TIG焊接热输入较高,冷却速率较慢,使晶粒有更多的时间生长所致。如图9(b)所示,焊缝区的平均晶粒尺寸为 $7.6\mu\text{m}$ ,

大角度晶界占比高达 $82.7\%$ , 归因于熔池快速凝固和动态再结晶, 高冷却速率抑制晶粒长大并提升强度,增强抗裂纹扩展能力。如图9(c)所示,细晶区的平均晶粒尺寸为 $8.1\mu\text{m}$ ,接近焊缝区晶粒尺寸,大角度晶界占比 $86.0\%$ 表明动态再结晶的充分完成。图9(d)为反极图着色,不同颜色对应晶体相对于样品坐标系的法线取向,垂直于样品表面方向。图9(e)为平均晶粒尺寸统计图。

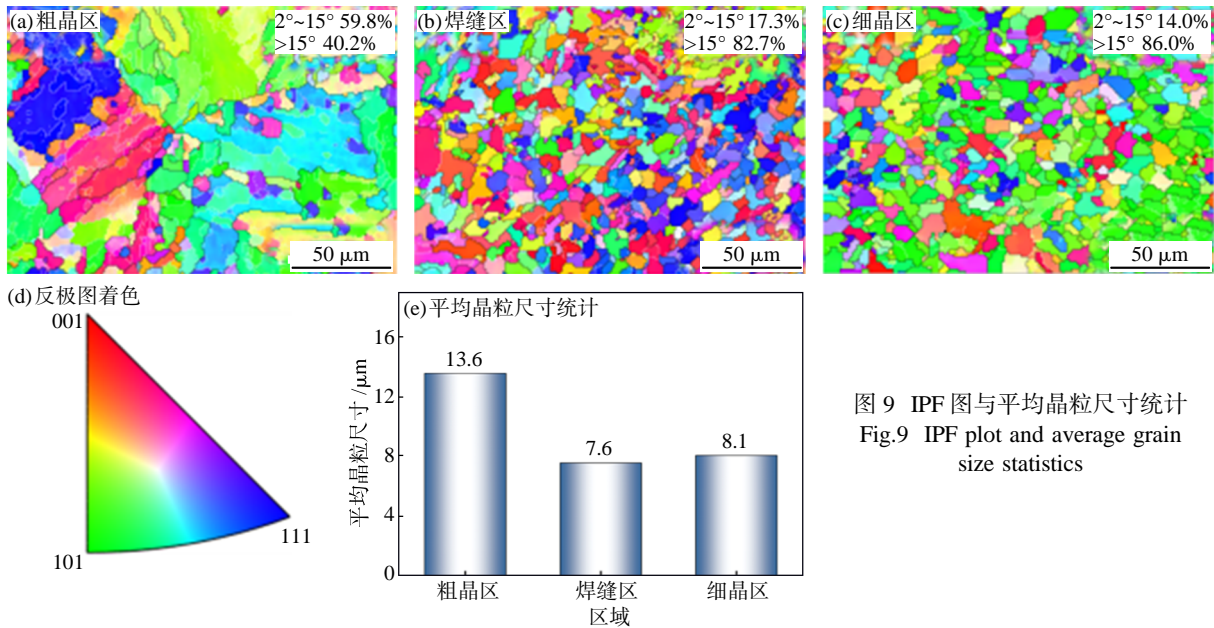


图9 IPF图与平均晶粒尺寸统计  
Fig.9 IPF plot and average grain size statistics

而KAM是核平均错位角,是EBSD数据分析中一种表征局部错配角的方法。它的主要作用是分析材料中的应变情况和计算几何必须位错密度,更深入了解材料的微观结构和性能,从而为材料的设计和优化提供依据。图10反映了X80M管线钢在DP-TIG焊接工艺下位错密度与KAM统计结果,整体来看,各区域位错密度与KAM值呈复杂关联。在图10(a)中,粗晶区的KAM值为 $0.6^\circ$ ,位错密度略低,更高热输入引发部分再结晶,位错重组产生更多取向差。在图10(b)中,焊缝区的KAM值为 $0.3^\circ$ ,位

错密度值为 $42.1\%$ , 由于快速冷却与动态再结晶协同作用,位错部分消除,但残余应力导致局部晶格畸变。在图10(c),细晶区的KAM值为 $0.3^\circ$ ,位错密度值为 $43.3\%$ ,因充分动态再结晶,位错有效重组,晶粒细小限制位错运动,取向差小。图10(d)中,在焊接初期,热输入的增加导致位错增加,KAM值逐渐上升,后续随着冷却和再结晶进行,位错开始湮灭,KAM值逐渐下降。经典位错理论认为,位错密度升高会导致局部晶格畸变加剧,取向差应同步增加。而焊缝区和细晶区呈现高位错密度与极低KAM值共存,原因可能为快速冷却与动态再结晶的协同作用,形成细小等轴晶或亚结构,位错通过晶界迁移和重组被封装在亚晶粒内部,导致取向差分布均匀化。

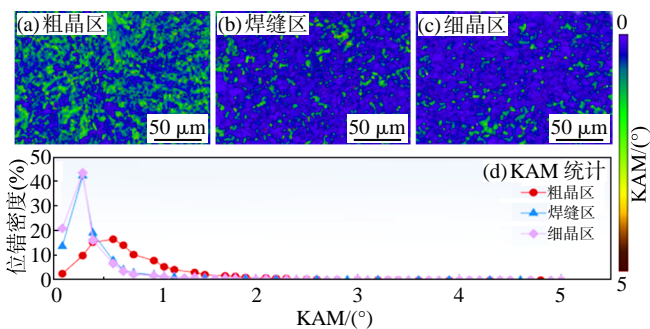


图10 位错密度与KAM统计  
Fig.10 Dislocation density and KAM statistics

### 3 结论

(1) 在DP-TIG较大的熔深和热输入焊接工艺下,熔合线清晰可见,焊缝区的组织主要由铁素体和贝氏体组成,X80M焊接接头的抗拉强度、屈服强度分别为 $697$ 、 $627\text{MPa}$ ,拉伸试件断裂于母材位置。焊

缝区、热影响区的冲击吸收能量分别为184、203 J,冲击断口形貌以等轴韧窝和剪切韧窝的微孔聚集型断裂为主,属于韧性断裂。

(2) 在 DP-TIG 工艺下,焊缝区的硬度从高到低依次为细晶区、焊缝区、粗晶区。焊缝区、粗晶区、细晶区的平均晶粒尺寸为 7.6、13.6 和 8.1  $\mu\text{m}$ ;焊缝区、粗晶区、细晶区的平均取向差分别为 0.3°、0.6°和 0.3°。

(3) DP-TIG 焊接工艺为中厚管、板对接提供一个可行的焊接方法。DP-TIG 焊接工艺可实现 10 mm 不开坡口的组对焊接,单面焊、双面成型,即拥有等离子焊的穿透效果,又保留了传统氩弧焊的盖面效果。

(4) 焊接时 DP-TIG 的热输入较大,引起工件热变形严重,导致结构性能受损。未来将结合 DP-TIG 焊接工艺、“V”型坡口提取算法和焊缝跟踪算法,集成焊接控制系统,实现管、板焊接的自动化生产。

#### 参考文献:

- [1] 徐景涛. X80 管线钢在长输管道中的应用及展望[J]. 中国冶金,2016,26(8):1-7.
  - [2] 孔令然. X80 管线钢的研究与应用[J]. 科技情报开发与经济,2011,21(36):120-124.
  - [3] Xia L, Xue R L, Zhou J P, et al. Real-time control of torch height in NG-GMAW process based on passive vision sensing technology[J]. Journal of Process Control,2024,141:103279.
  - [4] Xia L, Zhou J P, Xue R L, et al. Real-time seam tracking during narrow gap GMAW process based on the wide dynamic vision sensing method [J]. Journal of Manufacturing Processes,2023,101:820-834.
  - [5] 侯阳,李雪芝,周建平,等. 基于正交试验的 X80 管线钢 MIG 焊工艺优化[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2021,38(4):507-512.
  - [6] 石晓松,朱生旗,皮亚东,等. 激光-MAG 复合焊接 X80 管线钢的接头硬度控制[J]. 焊接技术,2018,47(4):34-37.
  - [7] 姚宗湘,李东,王刚,等. X80 管线钢热丝 TIG 焊接接头显微组织和力学性能[J]. 电焊机,2017,47(8):15-18.
  - [8] 黄松涛,杨建伟,王冠东,等. X80 管线钢超音频脉冲 TIG 焊接头的组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺,2022,51(9):22-25.
  - [9] 李泽宇,徐连勇,郝康达,等. MAG 和激光扫描-电弧复合焊 X80 钢接头组织和性能[J]. 焊接学报,2022,43(5):36-42.
  - [10] 刘自刚,梅亚泽,张建峰,等. 深熔 TIG 焊研究现状与展望[J]. 热加工工艺,2023,52(1):6-11.
  - [11] 刘自刚,陈飞,唐海鸿,等. DP-TIG 高速焊接工艺研究[J]. 兰州理工大学学报,2020,46(6):33-37.
  - [12] 刘自刚,瞿怀宇,曹瑞昌,等. DP-TIG 焊接方法工艺研究[J]. 焊接,2017(3):61-65.
  - [13] 刘自刚,唐海鸿,刘云华,等. 不锈钢 DP-TIG 焊接接头组织与性能[J]. 材料导报,2020,34(S2):1462-1464.
  - [14] Zhang Y X, Yu C Z, Dong J W, et al. Microstructure and mechanical properties of T-joints in mid-thick Q345 steel plates welded using deep penetration tungsten inert gas welding [J]. Materials Letters,2024,354:135401.
  - [15] 肖鹄璐,朱加雷,李伟,等. 激光深熔 TIG 复合焊接参数对焊缝形貌的影响[J]. 应用激光,2019,39(3):423-428. 
- 
- (上接第 117 页)
- [6] Chamarithi S, Reddy N S, Elipey M K, et al. Investigation analysis of plasma arc cutting parameters on the unevenness surface of hardox-400 material [J]. Procedia Engineering,2013,64:854-861.
  - [7] Salonitis K, Vatousianos S. Experimental investigation of the plasma arc cutting process[J]. Procedia Cirp,2012,3:287-292.
  - [8] 于浩楠,王尊策,赵松柏,等. 核电管道用 316LN 不锈钢等离子切割工艺参数优化研究[J]. 材料科学与工艺,2022,30(6):27-35.
  - [9] 王海波,张岚,孟庆鑫,等. 水下金刚石绳锯机切割管道特性参数研究[J]. 机床与液压,2018,46(11):115-118.
  - [10] Gajdos M, Kristofic T, Jankovic S, et al. Use of plasma-based tool for plug and abandonment [C]//SPE offshore Europe conference and Exhibition. Aberdeen,Scotland,UK,2015.
  - [11] 陈林柯. 环境压力对等离子切割电弧的影响研究[D]. 北京:北京石油化工学院,2020.
  - [12] 李茂盛,黄增好,庞世炫,等. 钢/铝线冲击焊电流参数对引弧和飞溅的影响[J]. 热加工工艺,2023,52(9):130-135.
  - [13] 陆冬妹. 基于数字化控制的高频引弧电路设计研究[J]. 科学技术创新,2019(3):167-168.
  - [14] 李刚. 基于正交试验的中硬材料镗孔工艺研究[J]. 机械工程与自动化,2023(1):141-142.
  - [15] 吴跃翔,康正阳,苏小平. 基于正交试验与信噪比分析的铝合金钳体支架压铸工艺参数优化[J]. 热加工工艺,2023,52(1):67-70.
  - [16] 杨新华,王艳芳,宋丽平. 等离子切割质量控制[J]. 电焊机,2017,47(2):110-112.
  - [17] Andjela L, Dragoljub L. Effects of plasma arc cutting process parameters on the cutting speed optimization based on the required cut quality [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,2022,38:836-843. 