DOI:10.20061/j.issn.1673-4807.2026.04.008

Ti80 厚板磁控窄间隙 TIG 焊接头分层组织性能不均匀性研究

邹 豪[1],余 微[2],王飞云[1*],鲁 凯[1],董文宁[3],陈国余[3],邹家生[1]
(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院,镇江 212100)
(2. 南京华中检测有限公司,南京 210031)
(3. 睿信泰智能科技(昆山)有限公司,昆山 215300)

摘 要: 采用磁控窄间隙 TIG 焊接工艺,对厚度为 72 mm 的 Ti80 钛合金双 U 形坡口试件进行焊接. 通过微观组织表征与力学性能测试,系统分析了焊接接头上层、中层及下层的微观结构、显微硬度、拉伸强度及冲击韧性. 结果表明,多层焊接过程导致接头沿厚度方向不同区域呈现显著的组织差异性:下层组织以细密 α′板条为主,而上层组织因热积累效应形成粗化 α′板条. 接头的显微硬度与拉伸强度由上层至下层逐渐递增,而塑性及冲击韧性则呈现明显的反向分层特征,且上层冲击吸收能最高,其断口形貌表现为大而深的等轴韧窝. 磁控窄间隙 TIG 焊接工艺可成功实现厚板 Ti80 钛合金的高质量焊接,但接头性能存在显著的厚度方向不均匀性.

关键词: Ti80;厚板;磁控窄间隙 TIG;微观组织;力学性能
中图分类号: TG456.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4807(2026)04-055-07

On non-uniformity of organizational performance in stratified Ti80 thick-plate joints by magnetically controlled narrow-gap TIG welding

ZOU Hao[1], YU Wei[2], WANG Feiyun[1*], LU Kai[1]
DONG Wenning[3], CHEN Guoyu[3], ZOU Jiasheng[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)
(2. Nanjing Huazhong Testing Co. Ltd., Nanjing 210031, China)
(3. RuixinTai Intelligent Technology (Kunshan) Co. Ltd., Kunshan 215300, China)

Abstract: The 72 mm thick Ti80 titanium alloy test pieces with a double-U-groove configuration were fabricated using magnetically controlled narrow-gap TIG welding. The microstructure and mechanical properties across the upper, middle, and lower layers of the weld joint were systematically analyzed using microscopy, microhardness mapping, tensile tests, and impact toughness tests. The results indicate that the multi-pass welding process induces significant microstructural heterogeneity along the joint thickness. The lower-layer region is predominantly characterized by fine α′ laths, whereas the upper layer develops coarse α′ laths due to cumulative thermal effects. Consequently, the microhardness and tensile strength of the joint exhibit a progressive increase from the upper to the lower layer. Conversely, the plasticity and impact toughness demonstrate a distinct reverse gradient. The upper layer, which possesses the highest impact absorption energy, features a fracture surface dominated by large and deep equiaxed dimples. The magnetron narrow gap TIG welding process can successfully achieve high-quality welding of thick plate Ti80, but there is significant thickness directional non-uniformity in the joint performance. Although high-quality welds in Ti80 thick plate are achieved by magnetically controlled narrow-gap TIG welding, a significant microstructurally-derived anisotropy in mechanical properties exists along the joint thickness.

收稿日期: 2025-11-25
作者简介: 邹豪(2001—),男,硕士研究生,研究方向为窄间隙 TIG 焊接技术. E-mail:17396875892@163.com
*** 通信作者:** 王飞云(1992—),男,博士,讲师,研究方向为海洋工程材料先进焊接技术. E-mail:wangfeiyunmse@126.com
引文格式: 邹豪,余微,王飞云,等. Ti80 厚板磁控窄间隙 TIG 焊接头分层组织性能不均匀性研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2026,40(4):55-61. DOI:10.20061/j.issn.1673-4807.2026.04.008.

Key words: Ti80, thick plate, magnetically controlled narrow-gap TIG, microstructure, mechanical properties

钛合金因其低密度、强耐腐蚀性、良好的焊接性能以及优异的力学性能,在医疗与海洋工程等领域具有广泛的应用前景[1-2]. Ti80 合金是一种近 α 型钛合金,其名义化学成分为 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo[3]. 该合金不仅具备高断裂韧性,同时表现出良好的焊接性能,因而特别适用于海洋工程环境下的结构制造与应用[4].

随着现代工业设备向高性能化与大型化方向持续发展,钛合金厚板焊接的需求日益增长[5]. 窄间隙 TIG 焊接技术作为钛合金厚板焊接的首选工艺,具备过程稳定性高、填充材料消耗少、焊缝质量优良以及可实现全位置焊接等诸多优势[6]. 然而,该工艺目前仍存在侧壁未熔合等缺陷. 为解决这一难题,研究者已提出多种改进方法,如电弧摆动法与大电流工艺等[7-8]. 乌克兰-巴顿焊接研究所将磁场技术引入窄间隙焊接,通过交变磁场驱动电弧在窄间隙坡口内进行周期性摆动,从而增大电弧加热面积,扩展热影响区,有效消除侧壁未熔合缺陷. 文献[9-11]的研究表明,交变磁场能够在一定程度上改善焊接接头的显微组织与力学性能. 磁控窄间隙 TIG 焊接技术已在钛合金焊接领域获得广泛应用[12],该技术对被焊构件的厚度具有良好适应性,并能满足大型复杂结构构件的高质量焊接要求.

在多道次焊接过程中,连续焊接导致不同区域的热循环曲线表现出显著差异,从而引发微观组织的不均匀性,并最终对各焊层的力学性能产生显著影响[13]. 文献[14]针对 20 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金的激光窄间隙多道焊接进行研究,结果表明,减少填充层数对焊缝微观组织与力学性能具有显著影响:针状马氏体的平均晶粒尺寸增大 30%,同时焊接接头的抗拉强度降低 11.2%. 文献[15]研究磁场对 316L 不锈钢激光-MIG 复合窄间隙焊接过程的影响,并重点分析在铁素体-奥氏体(F-A)结晶模式下,多层焊缝中 δ-铁素体与 γ-奥氏体的晶粒尺寸与取向演变. 研究结果显示,施加磁场后,热循环曲线从熔合线到母材的梯度分布趋于平缓,从而降低了热影响区的热积累并缩短了 δ-γ 相变持续时间,最终使得热影响区宽度减小,并促进了 δ 相的形成. 文献[16]对电磁辅助摆动丝焊接在窄间隙焊接中的作用机制进行了研究与验证,并着重分析了该技术对焊缝表面形貌及微观组织演变的影响. 研究表明,该技术通过引发强制对流效应,使焊接区域的元素分布与温度场趋于均匀,进而有效抑制柱状晶的生长并实现晶粒细化.

目前,针对磁控窄间隙 TIG 焊接头的组织与性能已开展了大量基础性研究,然而,对于磁控条件下接头层间组织及力学性能的不均匀性,相关研究尚缺乏深入探讨. 为此,文中采用磁控窄间隙 TIG 焊接技术,对 72 mm 厚的 Ti80 钛合金进行焊接,系统研究沿厚度方向(分层)的组织形貌,并分析硬度、韧性等力学性能的变化规律.

1 试验

母材为 Ti80 钛合金板材,其尺寸为 210 mm×210 mm×72 mm. 焊丝采用与母材同质的 Ti80 钛合金,直径为 2 mm. Ti80 钛合金的化学成分见表 1,其力学性能见表 2. 将厚度为 72 mm 的 Ti80 钛合金板材加工成双面 U 型槽,具体尺寸如图 1.

表 1 Ti80 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Ti80 titanium alloy (mass fraction, %)

Al	Nb	Mo	Zr	Fe	C	Si	H	O	N	Ti
5.6	3.2	1.1	1.8	0.11	0.05	0.08	0.004	0.10	0.02	其余

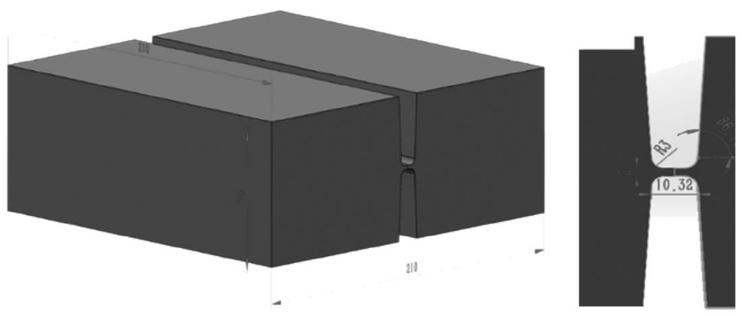
表 2 Ti80 钛合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti80 titanium alloy

抗拉强度	屈服强度	延伸率	断面收缩率	弹性模量	冲击吸收功
≥830 MPa	≥760 MPa	≥10%	≥25%	110~120 GPa	≥25 J

采用磁控窄间隙 TIG 焊接设备对 Ti80 钛合金进行焊接,其工作原理如图 2(a). 在洛伦兹力作用下,电弧发生偏转,并通过调节磁场强度与频率实现周期性摆动,从而确保钢板侧壁充分熔化. 各焊层的具体工艺参数如下:打底焊的焊接电流为 210 A,电压为 11.3 V;填充焊的焊接电流为 300 A,电压为 11.7 V;盖面焊的焊接电流为 290 A,电压为 11.6 V. 焊接速度恒定,为 100 mm/min. 励磁电流与磁场频率分别设定为 6.8 A 和 6 Hz,采用单道多层焊接工艺. 保护气体采用纯度 99.999% 的高纯

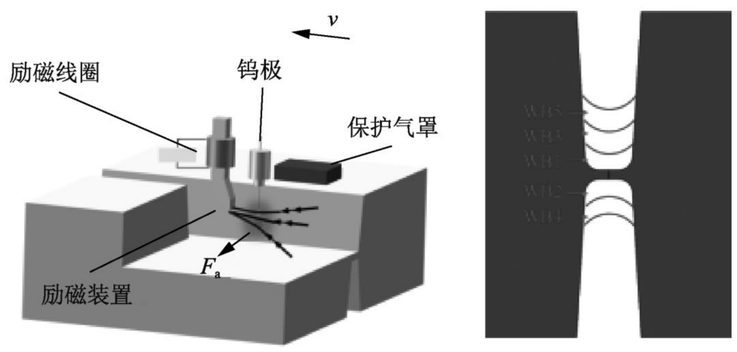
氩气,层间温度控制在 100 °C 以下. 每层熔敷厚度为 3~5 mm,共计焊接 16 道,如图 2(b),对称 U 形坡口采用交替焊接顺序.



(a) 几何外形　　(b) 双U型坡口截面

图 1　72 mm 厚 Ti80 焊接板材几何尺寸

Fig. 1　Geometric dimensions of the 72 mm thick Ti80 plate



(a) 工作原理　　(b) 焊接顺序

图 2　焊接工作原理及焊接顺序

Fig. 2　Welding principles and welding sequence

焊接完成后,对焊接接头不同区域的显微组织及力学性能进行分析. 沿双 U 形接头厚度方向选取 3 个典型区域:上层(upper layer,UL)、中层(middle layer,ML)和下层(bottom layer,BL). 金相试样经过研磨和抛光处理后,采用 Kroll 试剂(2% HF+8% HNO_3+90% H_2O)腐蚀 10 s,随后使用 MR-5000 型光学显微镜(optical microscope,OM)观察接头的典型显微组织. 对焊接接头不同区域的维氏硬度进行测定,测试载荷为 3 kg,测量点间距为 0.5 mm. 拉伸试样与冲击试样的取样位置如图 3.

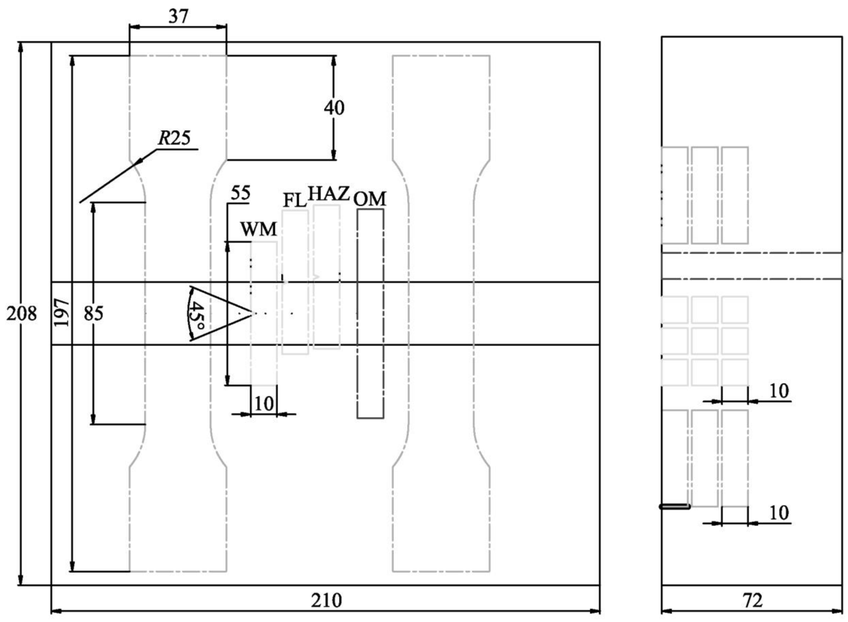


图 3　取样位置及加工图(单位:mm)

Fig. 3　Sampling locations and machining diagram (unit:mm)

采用 CMT5205 型电子万能试验机对 Ti80 钛合金焊接接头进行室温拉伸试验,同时使用 ZBC 2302-D 型冲击试验机对熔合线(fusion line,FL)、热影响区(heat-affected zone,HAZ)及焊缝区(fusion zone,FZ)进行常温冲击试验. 利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)观察拉伸及冲击试样的断口形貌.

2　结果与讨论

2.1　焊接接头宏观形貌

焊接接头宏观形貌如图 4. 接头整体成形质量良好,未观察到未熔合、裂纹、气孔等宏观缺陷. 焊缝与侧壁熔合线平滑且连续(图 4(a)),表明在所采用的磁控窄间隙 TIG 焊接工艺参数下,熔池流动行为与侧壁熔合过程得到了有效调控. 磁控窄间隙 TIG 焊缝的宏观形貌整体较为均匀,宽度保持一致,焊道宽度为 17 mm,热影响区宽度为 2~3 mm,每一层焊道均清晰可见(图 4(b)). 基于焊接热输入沿厚度方向的分布差异,将接头划分为上层、中层和下层 3 个特征区域,如图 4(c).

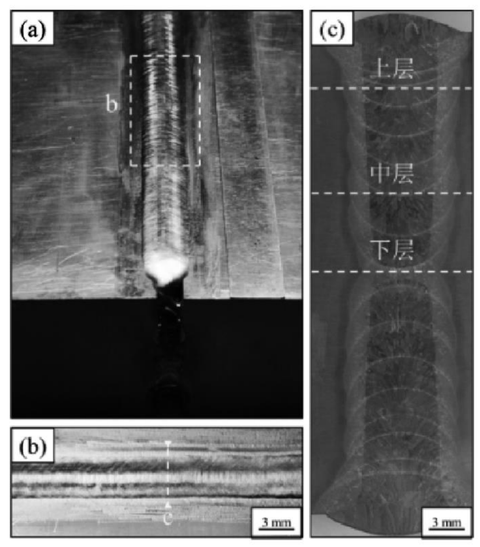


图 4　焊接接头宏观形貌

Fig. 4　Macro-scale formation of welding joints

2.2　焊接接头显微组织

Ti80 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接接头的显微组织如图 5.

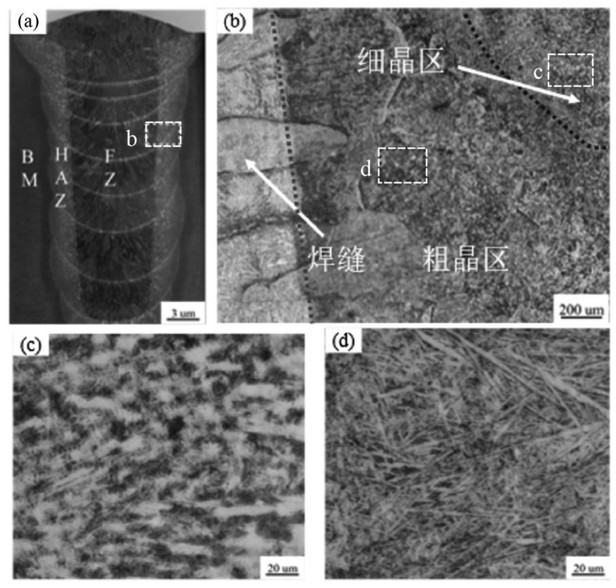


图 5　接头显微组织

Fig. 5　Microstructure of the joint

焊缝区域主要由粗大的柱状晶构成(图 5(b)),热影响区可进一步划分为粗晶区(图 5(c))和细晶区(图 5(d)). 根据柱状晶的生长特性,其

倾向于沿与散热最快方向相反的方向生长,直至与不同取向的晶粒相遇而终止.

上、中、下 3 层熔合线及焊缝中心的显微组织分别为图 6(a~f). 在打底层熔合线区域,Ti80 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊缝中形成了粗大的柱状初生 β 晶粒(图 6(c)). 这些 β 晶粒以外延生长模式从母材向焊缝中心延伸,并在随后的冷却过程中通过马氏体相变完全转变为 α′相,同时完整保留了原始的柱状晶界轮廓.

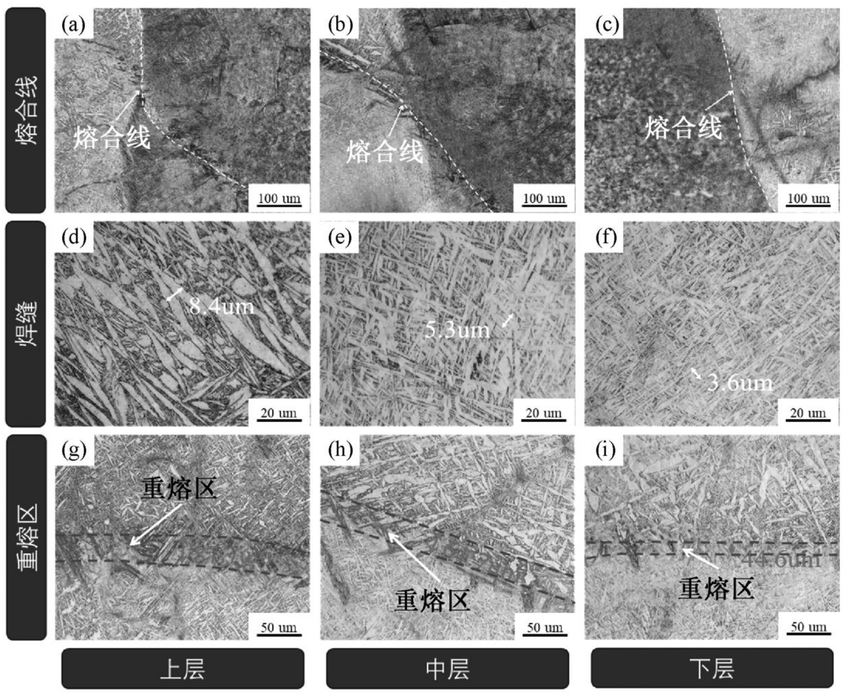


图 6 焊缝显微组织的 OM 图像

Fig. 6 OM images of welding seam microstructure

在打底层焊缝中心区域(图 6(f)),其热输入相较于上层焊道偏低,而冷却速率较高,致使该区域温度梯度减小,形成了相对细化的 β 晶粒. 这些晶粒同样通过非扩散切变机制转变为细密的 α′马氏体板条束,呈现出典型的网篮组织形貌. 从熔合线到焊缝中心,初生 β 晶粒均呈现垂直于熔合线方向生长的趋势,在部分区域可见较长的 β 晶粒主轴贯穿多个晶区. 这种贯穿式的晶体生长形貌在快速冷却条件下被保留至室温 α′相组织中. 在磁控窄间隙 TIG 焊 Ti80 钛合金中间层焊缝中(图 6(b,e)),焊缝区域主要分布有尺寸细化的 β 晶粒,且焊缝中等轴晶区域所占面积大于打底层焊缝中心. 随着填充层数的增加,热积累效应使得冷却速率逐渐降低,这一方面促进了 β 晶粒的进一步粗化,另一方面为 β 相向 α 相的转变提供了更充分的扩散条件. 虽然近 α 型 Ti80 钛合金仍以马氏体转变为主,但冷却速率的降低使得 α′板条尺寸有所增大,板条间界更为清晰. 在磁控窄间隙 TIG 焊 Ti80 钛合金盖面层焊缝中(图 6(a,d)),焊缝区域出现了更多尺寸较大的等轴 β 晶粒. 盖面层中相对较慢的冷却速度减少了熔池凝固界面处的成分过冷程度,同时多层焊接的热积累效应为晶粒粗化提供了条件,导致 β 晶粒尺寸明显增大. 在随后的冷却过程中,这些粗大的 β 晶粒通过马氏体相变转变为 α′相. 由于冷却速率较慢,原子扩散能力增强,形成的 α′板条尺寸较为粗大,板条间界清晰可见,呈现出短而粗大的板条形态.

在 Ti80 钛合金 MCNG-TIG 多层焊接过程中,先前沉积的填充层经受后续焊道的二次热循环作用,诱发局部区域的重熔,随后经历凝固与相变过程. 图 6(g~i)展示了 3 个填充层之间的过渡区域及相邻层的显微组织特征. 观察表明,各层间均存在宽度不一的熔合区,其中原始粗大的柱状 β 晶粒发生重熔,随后凝固形成更为细化的等轴 β 晶粒. 此外,随着填充层数的增加,热积累效应导致重熔区宽度呈逐渐增大的趋势. 测量结果表明,打底层、中间层和盖面层的重熔区宽度分别为 44.6 ,61.7 和 87.7 μm. 尤其在盖面层区域,重熔区宽度较打底层增加了 96.6%,且晶粒沿新的温度梯度方向生长,形成明显不同的晶体学取向.

2.3 力学性能

图 7 为维氏硬度试验的路径选择示意图,共选择了 4 条路径. 硬度测试结果如图 8. 从图 8(a)可以看出,焊缝中心硬度从上层到下层整体呈上升趋势,这一现象与焊接过程热循环条件差异密切相关. 盖面层仅经历单次焊接热循环,但由于焊接时下方焊道已处于高温状态,热积累效应显著,导致其冷却速率最为缓慢. 该缓冷条件促使初生 β 晶粒充分长大,并形成粗大的 α′板条组织,其界面强化效应较弱,因而该区域显微硬度相对较低. 与之相反,打底层直接与冷态母材接触,冷却速率最快,易于形成细密的 α′板条马氏体等亚稳态强化相,从而表现出最高的显微硬度. 尽管外加磁场在整个熔池范围内起到细化晶粒的作用,但难以完全抵消由系统性冷却条件差异所主导的相组成与亚结构演变. 最终,接头硬度在宏观上呈现出自下而上递减的分布特征. 从图 8(b)可以看出,不同层间的横向焊接硬度分布的变化规律相似,对称分布趋势,其中 HAZ 的硬度最高,其次是焊缝中心(weld metal,WM)和母材(base metal,BM). HAZ 的峰值硬度可归因于该区域经历了峰值温度位于 β 相变点附近的苛刻热循环. 在此条件下,母材中的原始 α 相转变为 β 相,随后在后续焊道的快速冷却过程中,分解为细密的 β 转变组织,产生了显著的二次相变强化效应. 焊缝中心的硬度则受凝固组织与磁场搅拌程度的共同控制,而母材则保持了其原始的低硬度状态.

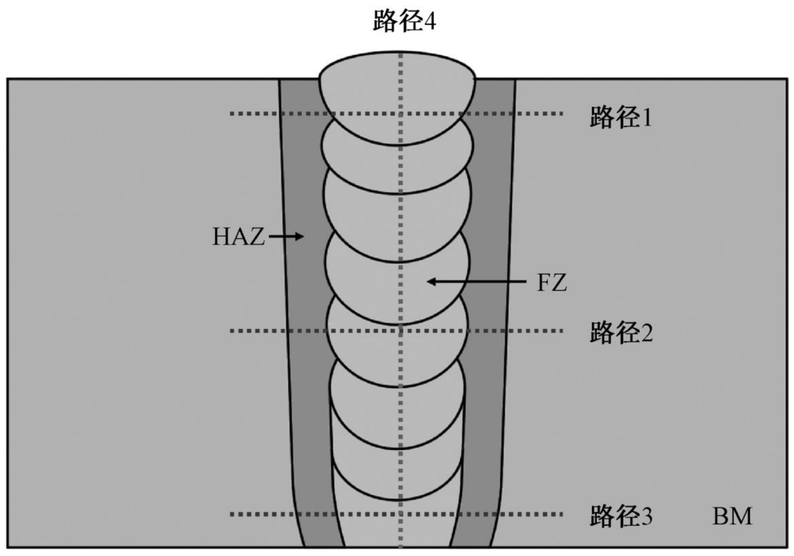


图 7　维氏硬度试验路径

Fig. 7　Vickers hardness test pathways

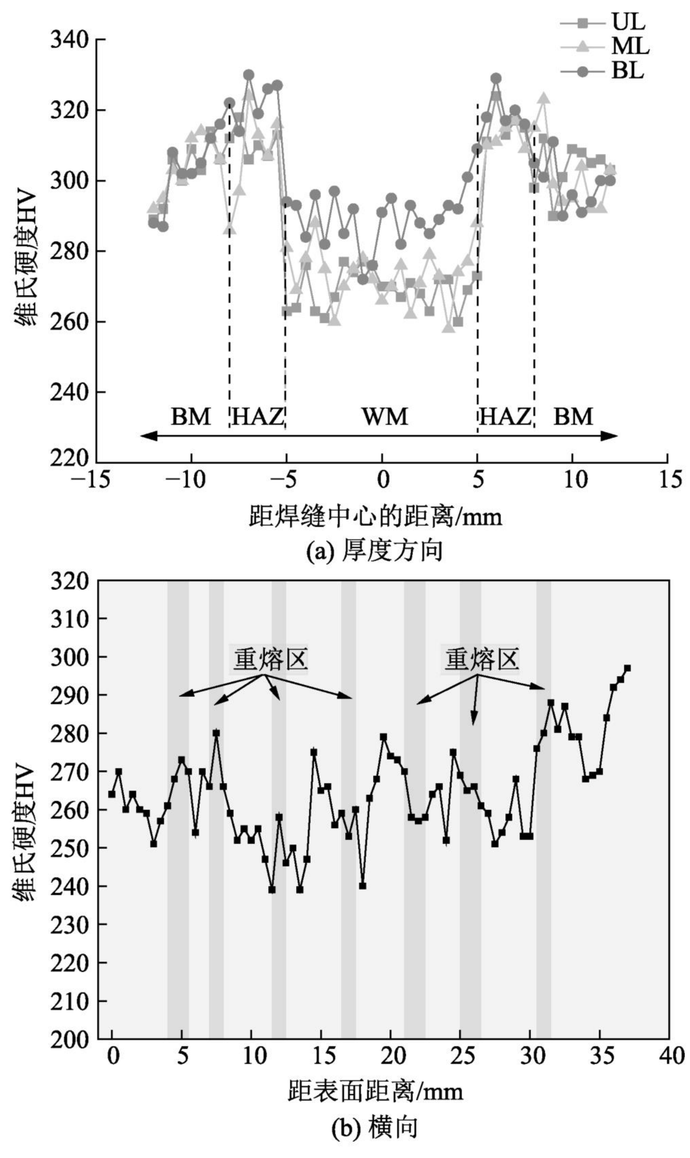


图 8　焊接接头硬度分布

Fig. 8　Hardness distribution of welded joints

图 9(a)为不同层拉伸试样的抗拉强度与延伸率. 上层试样的抗拉强度为 889 MPa,延伸率为 7%;中层试样的抗拉强度为 915 MPa,延伸率为 5.6%;下层试样的抗拉强度为 930 MPa,延伸率为 5%. 该性能差异直接反映了各层焊缝因受多层多道焊接热循环影响而形成的差异化微观组织. 下层作为打底焊道,在经历后续焊道多次热循环作用的同时,其初始凝固阶段因极高的冷却速率已形成细小的原始 β 晶粒. 后续热循环主要作用于已相变的 α′组织,一方面促使 α′板条发生局部回火与轻微粗化,另一方面更关键地引入了高密度的位错及相应亚结构. 细晶组织与高位错密度的耦合,通过显著的位错强化与界面强化效应,赋予该区域最高的强度,但同时也严重制约了其塑性. 上层所经历的焊接热循环较少,其组织形成主要受热积累导致的缓慢冷却过程控制,原始 β 晶粒得以充分长大并转变为粗大的 α′板条. 尽管磁场搅拌可优化熔池对流,但难以改变由热输入所主导的晶粒尺寸演化趋势. 该粗大板条组织的界面密度较低,有利于位错运动,因而在维持较高强度的同时,表现出更优的塑性.

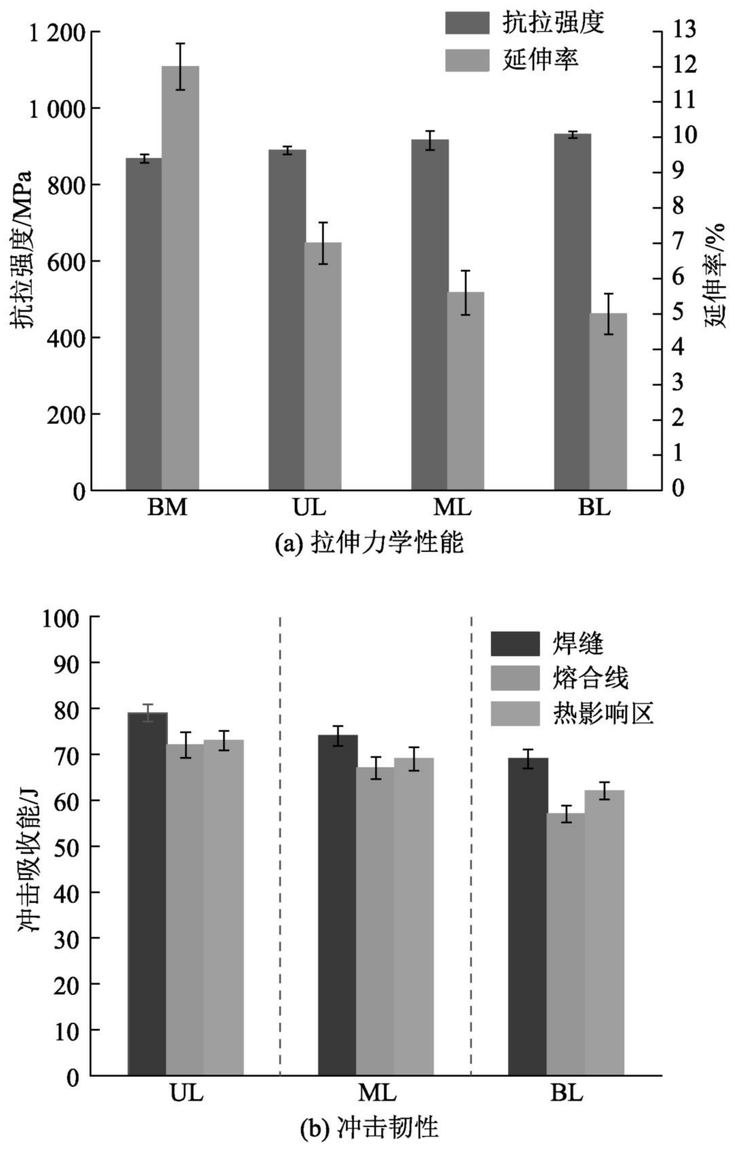


图 9　接头的拉伸力学性能和冲击韧性

Fig. 9　Tensile mechanical properties of the joint and impact toughness

相较于 Ti80 母材(抗拉强度为 867 MPa,延伸率为 12%),焊接接头各层的强度均达到或超越了母材水平,这主要归功于细晶强化、位错强化以及相变强化的协同效应. 所有焊层的延伸率均显著低于母材,这表明焊接过程中的快速冷却与非平衡相变在增强强度的同时,不可避免地导致了塑性的下降. 其中,下层由于组织细密且位错密度最高,其塑性损失最为显著;而上层由于组织相对粗化,塑性保留程度最佳. 这种强度与塑性之间的反向分布关系,是调控焊接接头综合性能时必须权衡的关键问题.

针对接头不同层及区域进行室温冲击试验,其结果见图 9(b). 由图 9(b)可知,熔合线的冲击韧性最低,热影响区次之,而焊缝的冲击韧性最高. 焊缝中心区域呈现出最佳的冲击韧性,这主要归因于其相对细化的 β 晶粒及网篮状 α′板条组织. 在磁控搅拌与成分过冷的共同作用下,焊缝中心形成了

细化的 β 晶粒,相变后获得了细密的 α′马氏体网篮组织. 此种多取向的细小板条束能够有效阻碍裂纹的扩展,迫使裂纹在扩展过程中频繁改变路径,从而吸收更多的冲击能量. 从接头厚度方向分析,上层的冲击韧性普遍优于下层. 这主要归因于上层焊接过程中显著的热积累效应及相对较慢的冷却速率,导致 α′板条尺寸适度粗化,在维持强度的同时提升了塑性储备. 而下层接头则由于快速冷却形成的细密 α′组织以及较高的焊接残余应力,共同导致了其冲击韧性的降低.

对冲击试样的断口形貌进行观察与分析,如图 10,上层断口(图 10(a,b))以规模较大、深度显著且分布均匀的等轴韧窝为主要特征,呈现典型的韧性断裂形貌,充分反映了该区域在断裂过程中所表现出的优异塑性变形能力与能量吸收性能. 该优异性能可归因于上层在焊接过程中经历的热积累效应:相对缓慢的冷却速率促进了 α′板条马氏体的适度粗化,从而在维持材料强度的同时,显著提升了其塑性储备.

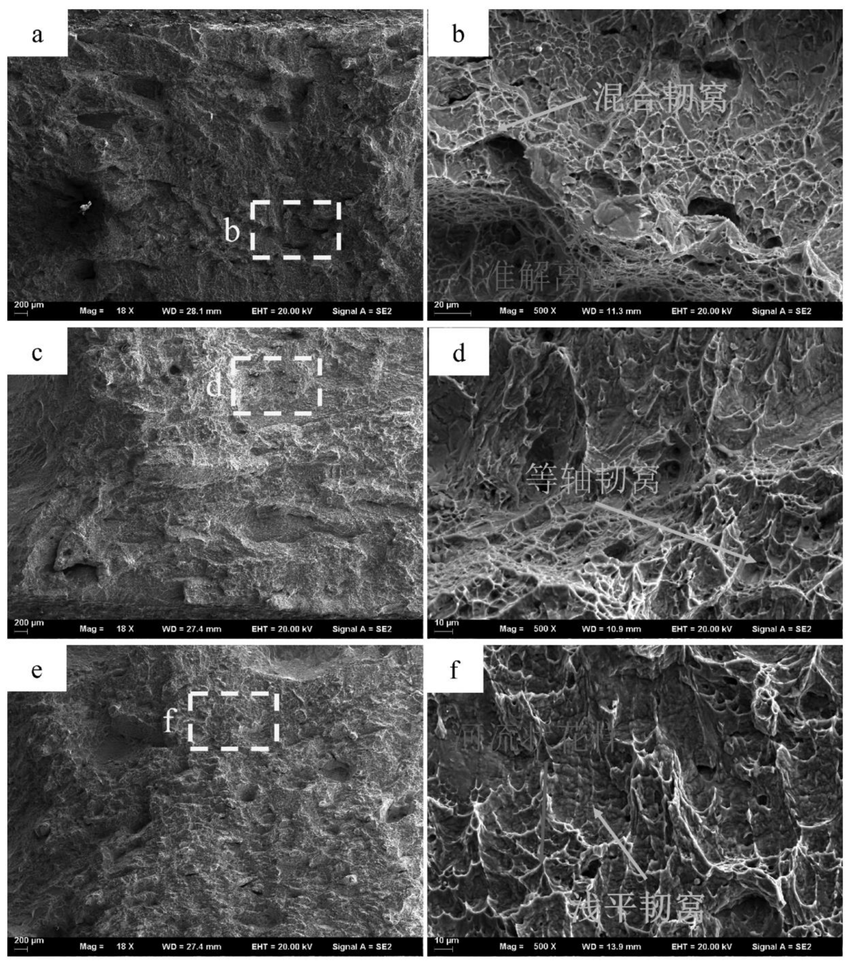


图 10　不同区域的冲击断口 SEM 形貌

Fig. 10　SEM morphology of impact fracture surfaces in different zones

中层断口(图 10(c,d))虽同样呈现韧性断裂特征,但其韧窝尺寸与深度均明显小于上层,表明该区域的塑性变形能力及能量吸收效率相对较低. 这主要源于该区域所经历的复杂热循环:其在细化晶粒的同时,亦在一定程度上加剧了加工硬化效应,从而制约了塑性的进一步改善. 下层断口(图 10(e,f))则以浅平韧窝与河流状解理平台为主要形貌特征,表现出明显的脆性断裂倾向. 此现象主要归因于下层在快速冷却速率下形成的细密 α′组织,叠加该区域因较高拘束度而引入的显著焊接残余应力;二者协同作用,促进了裂纹的萌生与快速扩展,最终导致材料的冲击韧性急剧下降.

3　结论

采用磁控窄间隙 TIG 焊接 72 mm 厚 Ti80 钛合金. 对焊接接头的显微组织和力学性能进行研究,主要结论如下:

(1) 采用电流为 300 A、电压为 11.7 V、焊接速度为 100 mm/min、励磁电流为 6.8 A、磁场频率为 6 Hz 的焊接工艺参数焊接 72 mm 厚的 Ti80 钛合金,成功获得了成形良好、无侧壁未熔合等宏观缺陷的焊接接头.

(2) 接头不同厚度区域呈现出明显的组织不均匀性. 下层经历多次焊接热循环的二次作用,晶粒得到显著细化,主要形成细密的 α′板条组织;而上层受热积累效应影响,冷却速率相对缓慢,α′板条发生明显粗化,晶粒尺寸沿厚度方向自下而上呈现粗化趋势.

(3) 接头的力学性能沿厚度方向呈现显著差异:硬度与抗拉强度沿上层至下层方向依次递增,上层、中层和下层的抗拉强度分别为 889,915 和 930 MPa;在横向分布上,接头硬度呈对称分布特征,表现为热影响区硬度最高,焊缝区次之,母材硬度最低,且此分布规律在不同厚度层间保持一致. 而塑性及冲击韧性则呈相反变化趋势,其中上层的冲击韧性最优,其断口表现为典型的韧性断裂特征.

参考文献(References)

[1] LIU Y J, LIU F L, HE R X, et al. Mechanical behaviors of electron beam welded titanium alloy up to very high cycle fatigue under different process conditions [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802:140685.

[2] ZENG C Y, ZHANG Y P, HU J L, et al. The role of microstructure on corrosion fatigue behavior of thick-plate Ti-6Al-4V joint via vacuum electron beam welding [J]. Vacuum, 2020, 182:109714.

[3] 郝晓博, 李渤渤, 刘茵琪, 等. Ti80 合金中厚板沿厚度方向组织与性能的不均匀分布 [J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 50-53.

[4] XUEFENG X, TAYYEB A, LIN W, et al. Research on dynamic compression properties and deformation mechanism of Ti6321 titanium alloy [J]. Journal of

Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11509-11516.

[5] 安飞鹏,王其红,李士凯,等. 钛合金厚板窄间隙焊接技术的现状[J]. 焊接技术,2014,43(12):1-5.

[6] 张富巨, 郭嘉琳, 张国栋. 三种窄间隙焊接技术的特性比较与应用选择[J]. 电焊机, 2017, 47(6): 23-27.

[7] 吴来军, 刘一搏, 王亚峰, 等. 摆动电弧对铝合金厚板窄间隙焊侧壁熔深的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(13): 72-75,79.

[8] 刘忠杰,马场勇人, 惠良哲生, 等. 厚板单道全焊透的大电流潜弧焊接方法[J]. 金属加工(热加工), 2017 (12): 14-19.

[9] 孙清洁,李文杰,胡海峰,等. 厚板 Ti-6Al-4V 磁控窄间隙 TIG 焊接头性能[J]. 焊接学报,2013,34(2): 9-12,113.

[10] 孙清洁, 郭宁, 胡海峰, 等. 磁场对厚板 Ti-6Al-4V 合金窄间隙 TIG 焊缝组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(10): 2833-2839.

[11] 胡金亮, 胡永俊, 曾才有, 等. 大厚度 TA17 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接头组织和力学性能[J]. 热加工工艺, 2023, 52(9): 42-46,50.

[12] DING L F, QIN B H, GE K K, et al. Microstructures and mechanical properties of thick Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo joint by magnetron-controlled narrow gap TIG welding[J]. Metals and Materials International, 2023, 29(8): 2304-2315.

[13] LI Y, JIANG P, LI Y T, et al. Microstructure evolution and mechanical properties in the depth direction of ultra-high power laser-arc hybrid weld joint of 316L stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 160:109093.

[14] MENG S H, LI L Q, SI C J, et al. Microstructure and mechanical properties of laser narrow-gap multi-pass weld 20 mm-thick Ti-6Al-4V alloy with different filling layers[J]. Crystals, 2022, 12(7):977.

[15] ZHU Z W, MA X Q, WANG C M, et al. Grain refinement and orientation alternation of 10 mm 316L welds prepared by magnetic field assisted narrow gap laser-MIG hybrid welding[J]. Materials Characterization, 2020, 164:110311.

[16] LI J Z, LIU Y B, KANG K X, et al. A novel approach to regulate energy allocation and melt flow in narrow gap laser welding with electromagnetic assisted wire wobbling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 289:116909.

(责任编辑:顾琳)