DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.03

# 中厚板钛合金先进连接技术研究进展：熔焊、固相焊与智能化调控

袁亮文，刘万存*，李志杰，段莉蕾，范东亮

一重集团大连核电石化有限公司，辽宁 大连 116113

**摘　要：**中厚板钛合金构件凭借优异的比强度、耐蚀性及高温性能，已成为航空航天、深海探测等高端装备领域的核心基础材料。其制造过程涉及熔焊与固相连接等多种工艺，但受其导热差、化学活性高等固有特性制约，传统焊接工艺易引发晶粒粗大、变形大及气孔等缺陷，严重限制大型复杂构件的制造质量与效率。本文系统综述了中厚板钛合金先进连接技术的研究进展。重点围绕熔焊、固相焊及智能化调控等前沿方向，深入阐述了真空电子束焊（VEBW）、负压激光焊（NPLW）、激光-电弧复合焊（含激光-TIG/MIG/CMT等）、窄间隙摆动激光焊（NGOLW）、等离子弧焊（PAW）以及搅拌摩擦焊（FSW/FSP）等技术的原理与工艺特征。研究表明，上述技术通过精确调控热源能量密度、降低热输入及优化熔池凝固行为，能有效抑制热影响区软化、减小焊接变形并提升接头致密性。目前，这些技术已在航空发动机机匣、深海潜水器载人舱等关键结构中实现工程化应用。最后，文章针对现存技术瓶颈，展望了该领域未来向智能化过程监控、多能场复合化及数字化精准调控的发展趋势，旨在为中厚板钛合金结构的高效、高品质制造提供理论参考与技术支撑。

**关键词：**中厚板钛合金；高效焊接；激光-电弧复合焊接；负压激光；智能化调控

**中图分类号：**TG456.7　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303(2026)07-0017-17

# Recent Advances in Advanced Joining Technologies for Medium-Thick Plate Titanium Alloys: Fusion Welding, Solid-State Welding, and Intelligent Control

YUAN Liangwen, LIU Wancun*, LI Zhijie, DUAN Lilei, FAN Dongliang

CFHI Dalian Nuclear Power and Petrochemical Equipment Co., Ltd., Dalian 116113, China

**Abstract:** Medium-thickness titanium alloy components have become core materials in high-end equipment sectors such as aerospace and deep-sea exploration, owing to their exceptional specific strength, corrosion resistance, and high-temperature performance. Although their manufacturing involves diverse processes including fusion welding and solid-state joining, the inherent characteristics of titanium alloys—such as poor thermal conductivity and high chemical reactivity—render traditional welding processes susceptible to defects like coarse grains, significant deformation, and porosity. These issues significantly compromise the quality and efficiency of manufacturing large, complex structures.This paper systematically reviews recent advances in advanced joining technologies for medium-thickness titanium alloys. Focusing on cutting-edge directions such as fusion welding, solid-state welding, and intelligent control, it elaborates on the principles and process characteristics of key techniques, including Vacuum Beam Welding (VEBW), Negative Pressure Laser Welding (NPLW), laser-arc hybrid welding (e.g., laser-TIG, laser-MIG, and laser-CMT), narrow-gap oscillating laser welding (NGOLW), plasma arc welding (PAW), and friction stir welding/processing (FSW/FSP). Research indicates that by precisely regulating heat source energy

**收稿日期：**2026-05-12　　**修回日期：**2026-05-24

**基金项目：**大连市科技人才创新项目（2024RY034）

**作者简介：**袁亮文（1989—），男，硕士，高级工程师，主要从事激光焊接技术方面的研究。E-mail：yuanlw@139.com。

**通讯作者：**刘万存（1985—），男，硕士，正高级工程师，主要从事激光焊接技术方面的研究。E-mail：willian_85@163.com。

density, reducing heat input, and optimizing molten pool solidification behavior, these technologies effectively suppress heat-affected zone (HAZ) softening, minimize distortion, and enhance joint integrity. Currently, these technologies have achieved engineering applications in critical structures such as aero-engine casings and manned cabins for deep-sea submersibles. Finally, addressing existing technical bottlenecks, this review prospects future development trends toward intelligent process monitoring, multi-energy field hybridization, and digital precision control, aiming to provide theoretical reference and technical support for the high-efficiency, high-quality manufacturing of medium-thickness titanium alloy structures.

**Keywords:** medium-thickness titanium alloy; advanced welding technology; laser-arc hybrid welding; electron beam welding; negative pressure laser; intelligent regulation

**引用格式：**袁亮文，刘万存，李志杰，等. 中厚板钛合金先进连接技术研究进展：熔焊、固相焊与智能化调控[J]. 电焊机，2026，56(7)：17-33.

**Citation:** YUAN Liangwen, LIU Wancun, LI Zhijie, et al. Recent Advances in Advanced Joining Technologies for Medium-Thick Plate Titanium Alloys: Fusion Welding, Solid-State Welding, and Intelligent Control[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 17-33.

## 0 引言

钛合金凭借其高比强度、优异的耐腐蚀性以及在宽温区域内稳定的力学性能，在航空航天、舰船制造和高端装备等领域扮演着不可替代的角色[1-3]。随着对结构件承载能力和轻量化要求的不断提升，厚度通常大于6 mm的中厚板钛合金构件的应用日益广泛。然而，钛合金固有的低热导率、高化学活性（尤其在高温下易与氧、氮、氢等元素反应）以及复杂的相变行为，使得其焊接过程面临诸多挑战，包括焊缝氧化污染、接头脆化、残余应力大、变形严重以及效率低下等问题[1,3,4]。传统钨极惰性气体保护焊（TIG）和熔化极惰性气体保护焊（MIG）虽能保证焊接质量，但受限于较低的能量密度和热输入控制精度，难以满足中厚板高效、高质量先进焊接的需求。因此，发展先进高效的焊接技术成为推动钛合金中厚板工程应用的关键。

## 1 中厚板钛合金的先进焊接技术原理与工艺特征

针对钛合金中厚板焊接在航空航天、海洋工程等领域面临的热影响区难以控制、变形大、缺陷率高及效率低下等长期技术瓶颈，一系列基于复合热源、能量精确调控及动态过程控制的先进焊接技术应运而生。这些技术通过创新的工艺机理，从根本上改善了焊接过程的稳定性、微观组织的均匀性以及接头的综合力学性能，同时，在智能化调控方面也展现出了巨大的潜能。

### 1.1 真空电子束焊接

中厚板钛合金的真空电子束焊接（Vacuum Electron Beam Welding，VEBW）作为高能束精密连接技术的代表，凭借其深宽比大、热输入集中、热影响区窄以及在超高真空环境下可有效隔绝氧氮氢等活性气体污染等优势，已成为航空航天、舰船制造及核工业等领域关键承力构件不可替代的焊接方法。针对厚度范围通常在8~50 mm的α+β型钛合金，VEBW工艺的核心挑战在于如何调控复杂的熔池动力学与非平衡凝固过程，以获得均匀致密、力学性能匹配且缺陷可控的优质接头[5]。

焊接过程中，高能电子束（加速电压通常为50~60 kV，束流10~100 mA）在真空度≤$10^{-3}$ Pa的环境中轰击工件表面，瞬时将材料加热至远超其熔点（>2 500 ℃），形成深度可达数十毫米的“钉状”或“平行状”熔池。这种独特的熔池形态源于电子束极高的能量密度和穿透能力，使得焊接能够实现单道全熔透，避免了多层多道焊带来的复杂性和潜在缺陷累积。然而，快速冷却（冷却速率可达$10^2$~$10^4$ K/s）极易导致焊缝金属（Fusion Zone，FZ）中形成亚稳态的针状α'相，这种硬脆相虽能提供高强度，却会显著牺牲接头的塑性和韧性，成为服役安全的隐患[6-7]。为解决此问题，研究者们发展了多种微观组织调控策略。例如，在焊接近β型钛合金厚板（如30 mm厚的Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe）时，通过引入1 mm厚的Ti-6Al-4V中间层并采用新型锯齿形扫描（Sawtooth Scanning，SS）模式，可以有效调节熔池化学成

分与冷却路径，促进大量细小弥散的α相析出，从而在保证强度的同时大幅提升接头的综合力学性能[8]，如图1为焊接接头典型截面宏观图。此外，焊后热处理（Post-Weld Heat Treatment，PWHT），特别是650~750 ℃范围内的真空退火，被广泛用于分解脆性α'相，使其转变为更平衡的α+β两相组织，并同步释放焊接残余应力[7]。

焊接缺陷的控制是确保接头可靠性的另一关键。气孔是钛合金电子束焊接中最常见的缺陷，主要源于材料内部吸附的水分、油脂或夹杂物在高温下分解产生的氢气。研究表明，严格控制母材及环境中的氢含量（<150 ppm）和氧含量（<50 ppm）是预防气孔的根本措施。另一个值得关注的几何缺陷是“焊根尖端”（weld root tip），即在厚板对接焊时因熔池底部能量不足导致的未完全熔合区域。这种尖锐的几何不连续性会成为应力集中源，严重削弱接头的疲劳性能。通过优化焊接参数（如提高束流、降低焊接速度）或采用双面焊工艺，可以获得近

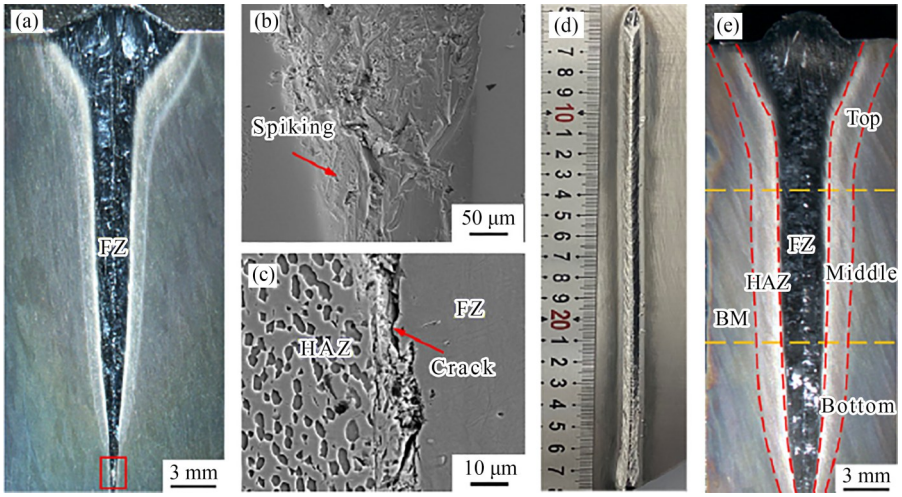



**图1　(a)在58 mA束流下Ti-55511合金接头典型截面宏观形貌；(b-c)图1a焊缝根部红框处的SEM放大显微图；(d)在66 mA束流下的焊缝正面形貌；(e)VEBW接头横截面的典型宏观图[8]**

**Fig. 1　(a)Cross-section of Ti-55511 joint at 58 mA beam current; (b-c)SEM images of the red-boxed area at the weld root in (a); (d)Weld bead appearance at 66 mA beam current; (e)Typical cross-section of the VEBW joint**

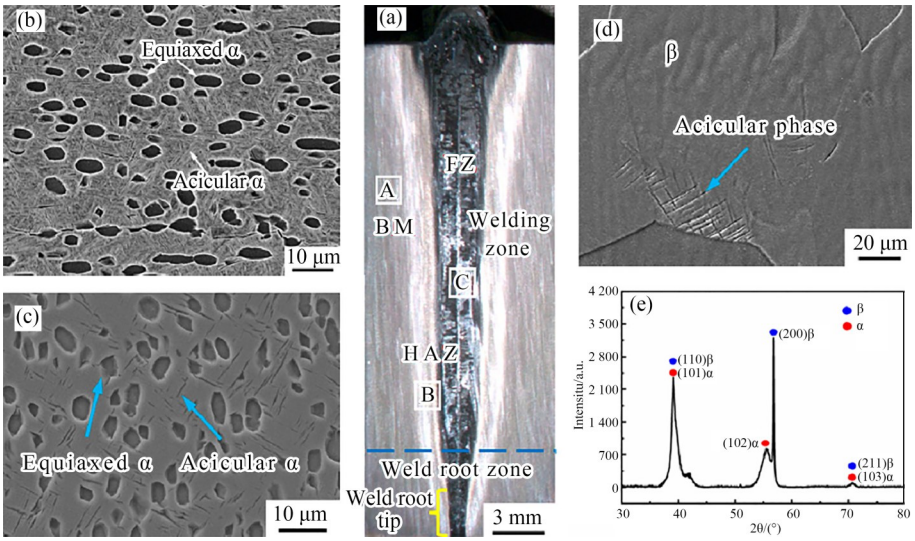



**图2　焊接电流为48 mA时EBW接头的典型横截面宏观图(a)，图2a中(b) A、(c) B、(d) C区域内SEM放大显微图；(e)FZ的XRD谱图[9]**

**Fig. 2　Typical cross-sectional macrostructure of the EBW joint at 48 mA beam current; (b) (c) (d) High-magnification SEM images corresponding to regions A, B, and C indicated in (a); (e)X-ray diffraction (XRD) patterns acquired from the fusion zone (FZ)**

乎平行的焊缝轮廓，消除焊根尖端，从而显著改善接头质量[9]，图2为焊接电流为48 mA时EBW接头的典型横截面宏观形貌。

在力学性能方面，高质量的VEBW接头通常能实现与母材相当的强度水平。对30 mm厚TC4合金接头的研究表明，其低周疲劳性能接近母材，而高周疲劳强度甚至可达到母材的90%以上[10-11]。相比之下，激光焊等其他高能束焊接方法由于保护气氛难以完全隔绝污染，且热循环特性不同，其接头性能往往逊色于VEBW接头[10-11]，如图3为TC4钛合金EBW的BM、WM和LWFW的TEM显微组织图像。

对于超厚板（如130~140 mm）的焊接，采用双面VEBW工艺虽能成功实现连接，但沿板厚方向的微观组织存在明显不均匀性，这对接头的整体性能一致性提出了更高要求。幸运的是，研究表明，即使在如此大的厚度下，各层接头的疲劳极限仍能稳定地超过母材的90%，显示出VEBW工艺在处理极端尺寸构件时的强大潜力[12-14]，如图4为各层接头的疲劳断裂位置。

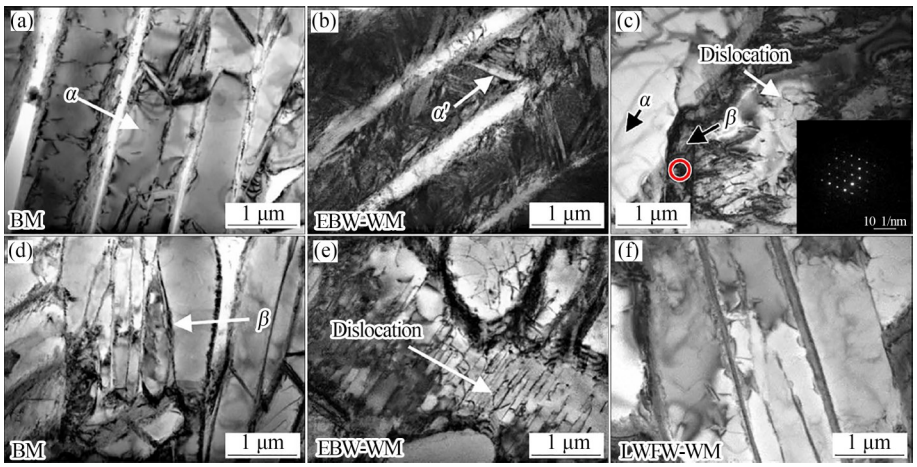



**图3　TC4钛合金EBW的BM、WM和LWFW的TEM显微组织[10]**

**Fig. 3　TEM microstructures of the BM, WM of TC4 titanium alloy EBWed joint, and the LFW joint**

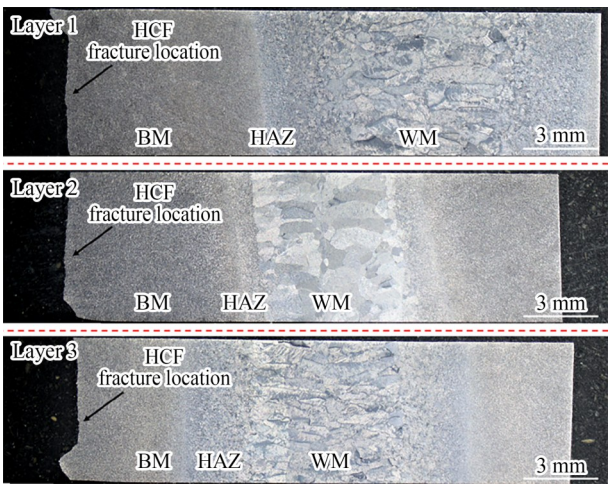



**图4　各层接头的疲劳断裂位置[14]**

**Fig. 4　Fatigue fracture locations of joints with different layers**

综上所述，中厚板钛合金的真空电子束焊接是一项高度集成材料科学、热物理与精密控制的先进制造技术。其未来发展将聚焦于智能化工艺参数优化、原位缺陷监测与抑制、以及与增材制造等新兴技术的融合，以进一步拓展其在高端装备制造领域的应用边界。

### 1.2　负压激光焊接

负压环境通常是指焊接时环境压力低于标准大气压（101.3 kPa）的环境，涵盖低真空、局部负压以及高真空等多种工况，与真空激光焊接所强调的整体高真空环境有所区别。相关研究人员曾提出[15-16]，在负压环境下，等离子体羽辉的亮度和体积显著减小，导致羽辉对激光的吸收与散射作用减弱，增加作用于材料表面的激光能量，从而提高了焊接过程的能量利用率，有助于增加焊缝的熔深与深宽比。中厚板钛合金的负压激光焊接技术代表了先进制造领域的一项关键突破，其核心在于通过创造低于大气压的环境来克服传统激光焊接在处理高活性金属时面临的根本性挑战。

该技术的基本原理是将焊接区域置于一个密闭的真空腔室中，并将环境压力降低至10~1 000 Pa

的范围。在此低压环境下，残余活性气体的分压被大幅削减，从而从根本上抑制了钛熔池的污染。最新研究显示，在 100 Pa 的低真空环境中进行激光焊接，可将 16 mm 厚 Ti–6Al–4V 板材的焊缝熔深提升至 7 mm 以上，这比在常压下获得的熔深高出一倍有余[17]，如图 5 为大气和真空条件下 Ti–6Al–4V 合金 LBW 接头的典型横截面宏观图。更为重要的是，这种环境能显著降低焊缝中杂质气体元素（O、N、H）的含量，从而获得与母材性能更为接近的优质接头。当压力进一步降至极低水平（如 0.3 Pa）时，配合 30kW 的高功率激光器，甚至可以实现 95 mm 级超厚钛合金板的一次性深熔穿透焊接，这在工程应用上具有里程碑式的意义[18]，如图 6 为 Ti–6Al–4V 合金超厚板 VLBW 接头在不同功率下的典型横截面。

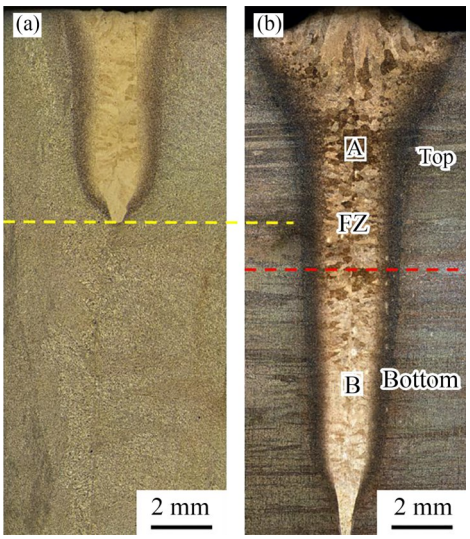



**图 5　(a)大气和(b)真空条件下 Ti6-Al-4V 合金 LBW 接头的典型横截面宏观图[17]**

**Fig. 5　Typical cross-sectional macrographs of Ti-6Al-4V alloy LBW joints performed in (a) air atmosphere and (b) vacuum.**

负压环境对焊接物理过程的影响是多方面的。首先，改变了匙孔（keyhole）的动力学行为。在常压下，高功率激光作用于金属表面会产生大量金属蒸气，这些蒸气在空气中被电离形成等离子体云，后者会吸收和散射后续的激光能量，导致能量耦合效率下降。而在负压条件下，气体分子密度降低，金属蒸气的电离程度减弱，等离子体屏蔽效应被有效抑制，更多的激光能量得以直接作用于工件，从而提高了能量利用效率和熔深稳定性[19]，如图 7 为不同环境压力下小孔行为的 X 射线原位观察结果。其次，低压环境有利于匙孔内气体的逸出。焊接过程中，溶解在熔池中的气体或匙孔壁吸附的气体在熔池凝固前若不能及时排出，便会形成气孔。负压环境降低了气泡形成的临界尺寸，并加速了气泡的上浮和逸出过程，从而显著减少气孔缺陷。实验结

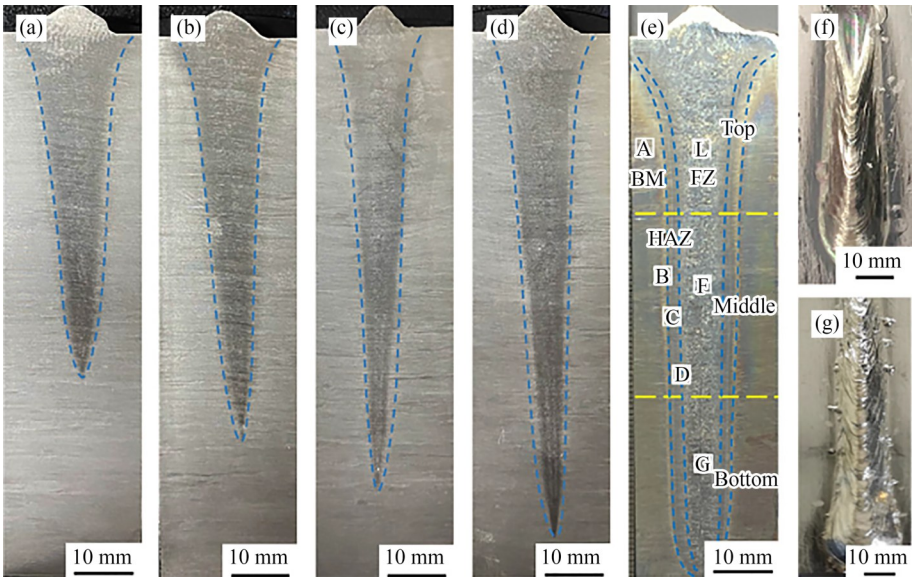



**图 6　Ti-6Al-4V 合金超厚板 VLBW 接头在不同功率下的典型横截面：(a)15 kW，(b)19 kW，(c)23 kW，(d)27 kW，(e)30 kW；焊缝表面宏观形貌：(f)15 kW 和(g)30 kW[18]**

**Fig. 6　Typical cross-sectional macrographs of VLBW joints for Ti-6Al-4V super-thick plates at various laser powers: (a)15 kW, (b)19 kW, (c)23 kW, (d)27 kW, and (e)30 kW. (f,g) Corresponding top surface morphologies of the welds at (f) 15 kW and (g) 30 kW.**

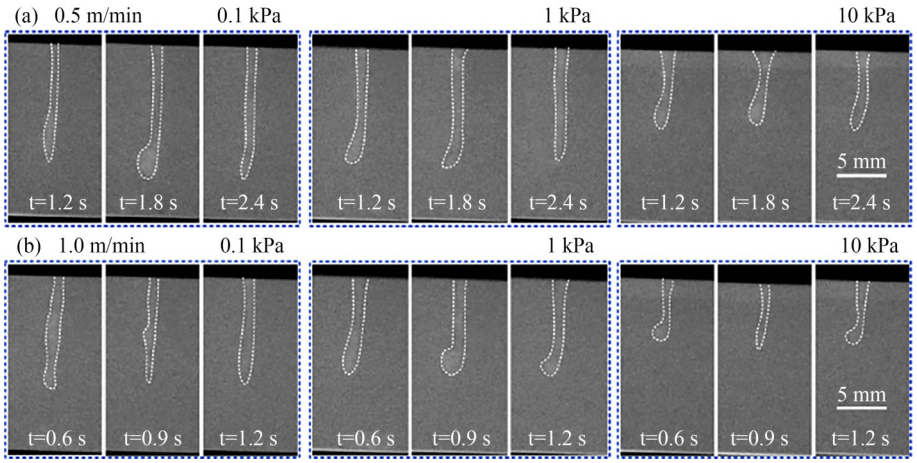



**图7　不同环境压力下小孔行为的X射线原位观察结果**

**Fig. 7　In-situ X-ray observation results of keyhole behavior under different ambient pressures**

果表明，通过优化负压参数，可以将焊缝中的气孔率控制在极低水平，这对于保证结构件的疲劳寿命至关重要[20]。

针对中厚板（通常指厚度在5~25 mm范围内）的焊接，单纯的单道自熔焊往往难以满足要求，因此常需结合窄间隙（Narrow Gap）或多层多道焊接策略。在负压环境中实施窄间隙激光填丝焊或激光-电弧复合焊，能够有效解决厚板焊接中的侧壁熔合不良、残余应力过大等问题。例如，采用低功率脉冲激光与TIG电弧组成的柔性热源，在16 mm厚TC4板材上进行窄间隙焊接，通过精确调控两种热源的空间匹配关系，可以获得成形良好、无裂纹和气孔的优质接头[21]，如图8为焊缝宏观形貌，图9为焊接接头横截面。此外，激光束摆动技术也被证明在负压或常压下均能有效改善熔池流动，细化晶粒，并进一步抑制气孔。一项研究表明，通过优化摆动频率和摆动幅值，可将TC4钛合金接头的气孔率从5.48%大幅降低至0.12%[22]，图10列出了对接接头表面形貌及气孔分布情况。

尽管负压激光焊接优势显著，但其工程化应用

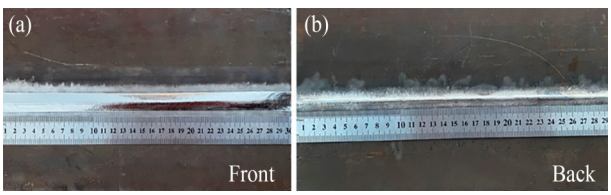



**图8　焊缝宏观形貌：(a)焊缝正面；(b)焊缝背面[21]**

**Fig. 8　Macroscopic appearance of the weld bead: (a) top surface; (b) root side**

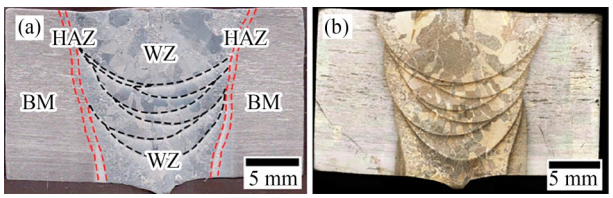



**图9　焊接接头横截面：(a)焊接区域；(b)截面宏观形貌[21]**

**Fig. 9　(a) Schematic diagram of the welded joint zones; (b) cross-sectional macrograph of the joint**

仍面临诸多挑战。首要问题是设备成本高昂且复杂。构建能够容纳大型构件并维持稳定负压的真空腔室，需要强大的真空系统和精密的密封技术，这极大地增加了初始投资和运行维护成本。其次，工艺窗口相对较窄。激光功率、焊接速度、离焦量、保护气体流量（如果使用）以及环境压力等多个参数之间存在复杂的耦合关系，需要通过大量的试验和数值模拟来精确优化。再者，在线监测难度大。由于焊接过程发生在密闭腔室内，常规的视觉监测手段受到限制，亟需发展基于X射线、超声或光谱分析的原位无损检测技术，以实现对匙孔稳定性、熔池形貌和缺陷形成的实时监控[23]。未来的研究方向将聚焦于开发更经济高效的局部负压或动态密封系统，并结合人工智能技术实现焊接过程的智能感知与闭环控制，从而推动该技术在更广泛领域的规模化应用。

### 1.3　激光-电弧复合焊接

中厚板钛合金的激光-电弧复合焊技术是现代高端制造业的一项关键连接工艺。该技术通过将高能量密度的激光束与稳定可控的电弧热源耦合

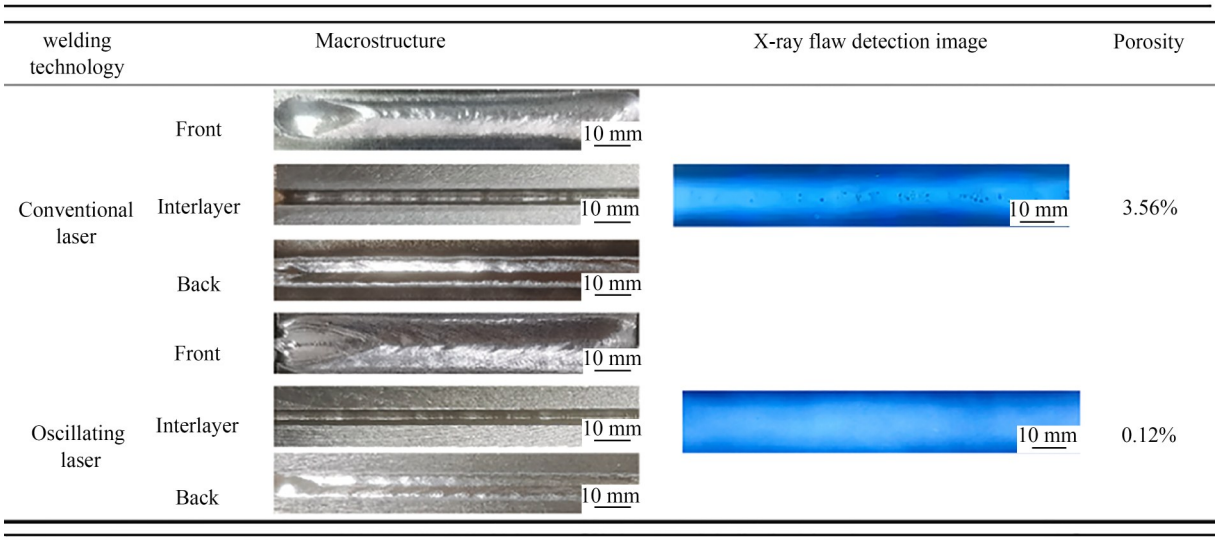



**图 10　对接接头表面形貌及气孔分布[22]**

**Fig. 10　Surface morphology and porosity distribution of butt joints**

于同一熔池，实现了深熔穿透、高焊接效率与优异成形质量的协同优化。在具体的工艺模式选择上，激光–TIG、激光–MIG 和激光–CMT 各有其鲜明的技术特点与适用场景。

激光–TIG 复合焊利用非熔化钨极电弧，其优势在于电弧稳定性极高、熔池扰动小、冶金质量纯净，特别适用于对热输入敏感、要求高洁净度和低氧化风险的薄至中厚板焊接。研究表明，在根部打底焊中，激光–TIG 能有效形成稳定的背面焊道，其机理在于激光诱导产生的匙孔等离子体具有极高的电导率，能强烈吸引并约束 TIG 电弧，使其能量更集中地作用于匙孔区域，从而显著提升熔深和过程稳定性[24]。然而，TIG 工艺本身熔敷率低，对于板厚超过 10 mm 的厚板，多层多道填充效率不足，限制了其在大厚度结构件中的应用。

相比之下，激光–MIG 复合焊凭借其高熔敷率和强大的间隙桥接能力，成为中厚乃至厚板钛合金结构制造的主流选择。MIG 电弧通过连续送丝提供填充金属，不仅补偿了激光焊的收缩，还能有效调控焊缝化学成分和微观组织。研究证实，采用 10kW 级光纤激光与脉冲 MIG 电弧复合，可对 5 mm 厚 TC4 板材实现单道全熔透焊接，接头强度与母材相当；对于 12 mm 厚板，亦可通过优化参数获得成形良好的接头[25]。其焊缝微观组织主要由针状 α'马氏体和少量 β 相构成的篮状组织组成，随着热输入的增加，α'板条会逐渐粗化并发生分解，影响接头的塑性和韧性[26]，如图 11 为激光–MIG 接头显微组织。因此，精确控制激光功率、电弧电流、焊接速度及二者间的能量配比（通常激光占比为 60%~80%）是获得理想组织与性能的关键。

激光–CMT（冷金属过渡）复合焊则代表了该领域的前沿发展方向，尤其在追求极致低热输入和高成形精度的应用中展现出独特优势。CMT 技术通过数字化精确控制熔滴的短路过渡过程，在熔滴与

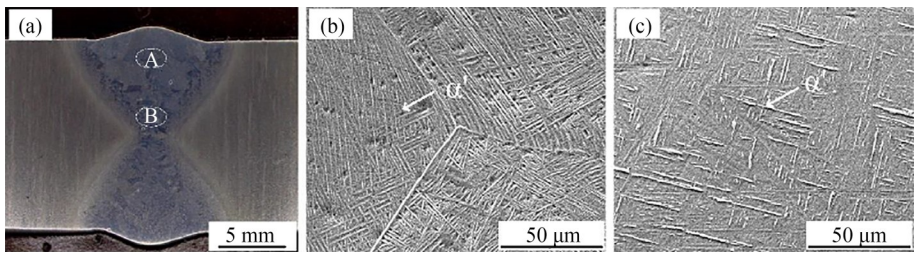



**图 11　激光-MIG 接头显微组织（$E$=3.4×10$^3$ J/cm）：（a）焊缝接头截面轮廓；（b）正面焊缝区；（c）背面焊缝区[26]**

**Fig. 11　Microstructure of the Laser-MIG hybrid welded joint（Energy input $E$=3.4×10$^3$ J/cm）：（a）cross-sectional profile of the weld bead；（b）top weld zone；（c）root weld zone**

熔池接触的瞬间回抽焊丝，实现近乎无飞溅、超低热输入的金属过渡。将其与激光复合，不仅能进一步细化焊缝晶粒、抑制β相晶粒的过度长大，还能显著减少因氢、氧污染导致的气孔和裂纹倾向，从而大幅提升接头的塑性和冲击韧性[27]。

无论采用何种复合模式，工艺成功的核心均依赖于几个共通的关键要素。首先是保护气体系统，必须采用高纯度氩气（或Ar+He混合气）进行全方位、双层（拖罩+背保护）保护，以隔绝空气，防止钛在高温下吸氢、吸氧、吸氮而导致脆化。其次是焊前表面处理，彻底清除母材及焊丝表面的氧化膜和吸附水分至关重要。最后，焊后热处理（如650~750 ℃真空退火）常被用于调控α/β相比例、消除残余应力、恢复塑性，这对于保证构件在服役环境下的长期可靠性不可或缺。综上所述，中厚板钛合金的激光-电弧复合焊是一个多物理场强耦合、多参数精密协同的复杂过程，其技术选型需根据具体板厚、结构形式、性能要求及生产效率进行综合权衡，未来将更加聚焦于智能化过程监控、缺陷在线抑制以及新工艺（如振荡激光、同轴复合）的深度开发。

### 1.4 窄间隙摆动激光焊接

中厚板钛合金的窄间隙摆动激光焊接技术是近年来为应对航空航天、深海装备及高端制造领域对高完整性、低变形厚壁结构件连接需求而发展起来的关键工艺。该技术通过融合窄间隙坡口设计、高能束激光源与动态光束摆动策略，有效解决了传统焊接方法在处理Ti-6Al-4V等典型α+β型钛合金时面临的熔深不足、侧壁未熔合、气孔密集及残余应力过高等核心难题。

窄间隙焊接的核心优势在于其显著缩小的坡口宽度（通常仅为2~6 mm），这直接大幅减少了填充金属用量和总热输入量。对于厚度在10~50 mm范围内的中厚板，这一特性至关重要，因为它从根本上抑制了焊接过程中的热积累，从而将焊接变形和残余应力控制在极低水平。然而，窄小的空间也带来了新的挑战：传统的静态激光束或电弧难以充分润湿并熔化两侧坡口壁，极易产生未熔合缺陷。摆动激光技术正是破解此困境的关键创新。通过控制激光束沿预设轨迹（如圆形、正弦波或“8”字形）进行高速振荡，能量分布得以动态调控。这种周期性扫描不仅扩大了有效热作用区域，确保了熔池对侧壁的充分覆盖，还通过强制对流显著改善了熔池内部的流动性。研究显示，优化后的摆动参数（如频率100~300 Hz，振幅1~3 mm）可将接头的气孔率从常规激光-电弧复合焊的5.48%急剧降低至0.12%[28]。这种气孔抑制机制源于摆动对匙孔稳定性的增强，振荡运动有助于匙孔开口扩张并减少其塌陷频率，为气体逸出提供了更充裕的时间窗口[29]，图12为不同振幅下焊缝沿中心线的纵向截面。

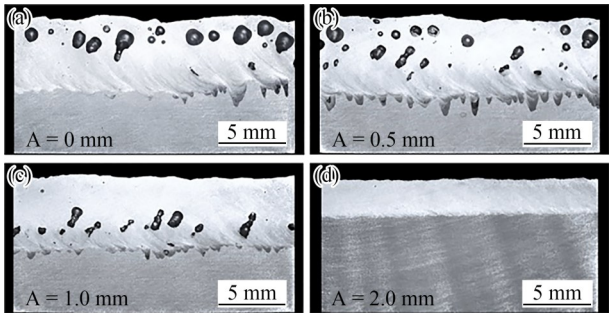



**图12 不同振幅下焊缝沿中心线的纵向截面：(a)*A*=0（无摆动）；(b)*A*=0.5 mm；(c)*A*=1 mm；(d)*A*=2 mm[29]**

**Fig. 12 Longitudinal sections along the weld centerline at different oscillation amplitudes: (a)*A*=0 (no oscillation); (b)*A*=0.5 mm; (c)*A*=1 mm; (d)*A*=2 mm**

针对最具代表性的Ti-6Al-4V（TC4）合金，该工艺已展现出卓越的工程应用潜力。例如，研究人员成功利用窄间隙摆动激光-TIG复合焊技术实现了25 mm乃至50 mm厚板的高质量对接[30]，图13为50 mm厚焊接件及X射线检测结果。该复合工艺巧妙结合了激光的高能量密度与TIG电弧的热稳定性及优异的填丝兼容性。通过精确调控激光、电弧与焊丝三者间的空间位置关系，可以实现对热输入的柔性分配，特别有利于解决厚板焊接中常见的侧壁熔合不均问题[31-32]，图14为焊接接头横截面宏观形貌。微观结构分析表明，经此工艺焊接的接头，其焊缝区主要由细小的针状α'相组成，而热影响区则包含初生α相、魏氏组织及少量残余β相[33]。尽管α'相硬度较高，但通过后续高温退火处理（如850 ℃保温2 h），可以有效调控组织形态，实现强度、塑性和韧性的良好匹配[34]。力学性能测试证实，优化后的接头抗拉强度可达母材的90%以上，满足关键承力构件的服役要求。

工艺的成功实施高度依赖于对多物理场耦合

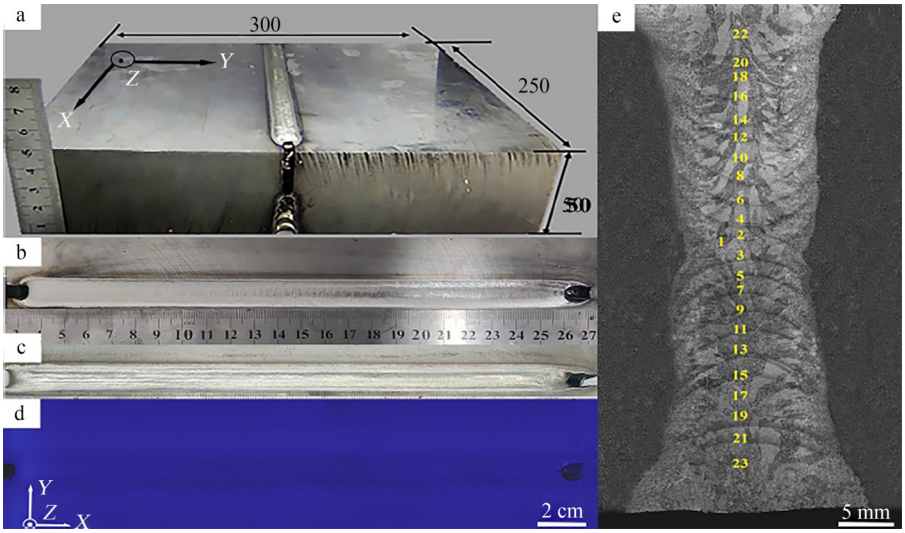



**图 13　50 mm 厚焊接件及 X 射线检测结果：(a)焊接件整体；(b)焊接件焊缝正面；(c)焊接件焊缝背面；(d)焊缝区 X 射线探伤结果；(e)焊接件横截面[30]**

**Fig. 13　50 mm thick welded component and radiographic testing (RT) results: (a) overall view of the welded component; (b) top surface (face side) of the weld; (c) root side (back side) of the weld; (d) radiographic inspection result of the weld zone; (e) cross-section of the welded component**

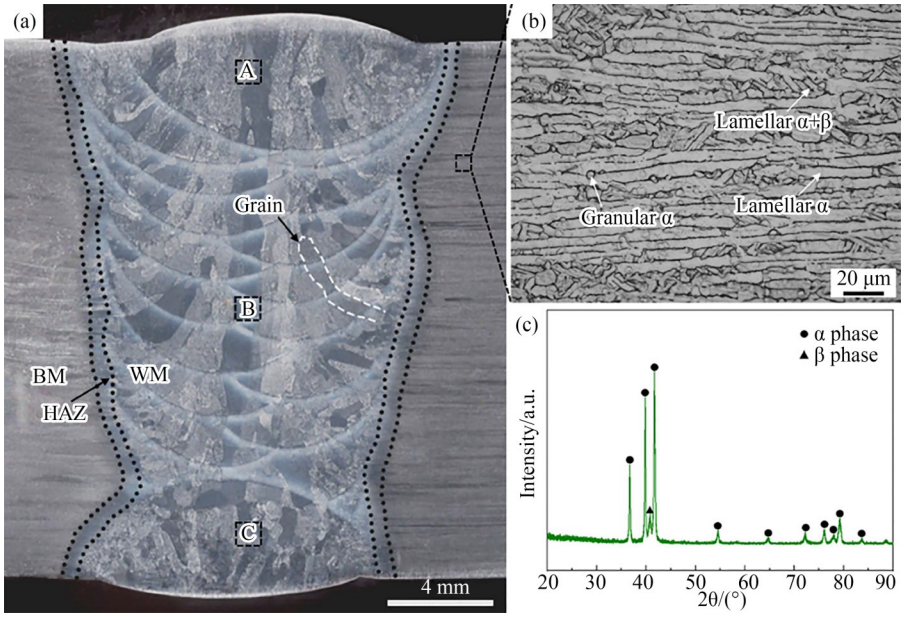



**图 14　(a)焊接接头横截面宏观形貌；(b)母材微观组织；(c)母材 XRD 图谱[31]**

**Fig. 14　(a) Cross-sectional macrograph of the welded joint; (b) microstructure of the base metal (BM); (c) XRD pattern of the base metal**

过程的深刻理解与精确控制，研究人员能够定量分析不同摆动参数对侧壁熔深、温度场演变及残余应力分布的影响规律[35-36]。这些模拟结果为实验参数的优化提供了理论指导，避免了盲目试错。同时，先进的在线监测技术，如基于同轴 CMOS 相机的坡口传感系统，能够实时识别坡口壁位置，并据此动态调整激光摆动中心，确保焊接过程的鲁棒性[37]。此外，对于钛合金这类对氧、氮、氢等间隙元素极度敏感的材料，必须在高纯度氩气保护甚至真空环境下进行焊接，以防止接头脆化。

尽管取得了显著进展，该技术仍面临若干前沿挑战。首先，摆动参数（频率、振幅、轨迹）与激光功率、焊接速度、离焦量等基础参数之间存在复杂的非线性耦合关系，其对最终冶金质量的影响机制尚需更系统的研究。其次，在多层多道焊接中，如何保证各焊道间及焊道与侧壁间的完美熔合，避免层

间未熔合缺陷，是提升超厚板（>50 mm）焊接可靠性的关键。再者，开发更为智能的闭环控制系统，将熔池动态视觉信息、等离子体特征与工艺参数实时联动，是实现该技术在复杂曲面或变厚度构件上稳定应用的必由之路。未来的研究将聚焦于深化摆动–冶金耦合机理、发展多尺度跨物理场仿真平台以及构建自适应智能焊接系统，从而进一步拓展中厚板钛合金窄间隙摆动激光焊接在国家重大工程中的应用边界。

### 1.5 等离子弧焊接

中厚板钛合金的等离子弧焊接（Plasma Arc Welding，PAW）是现代航空航天、船舶制造及高端装备领域中一项至关重要的连接技术。钛合金因其高比强度、优异的耐腐蚀性以及在高低温环境下的稳定力学性能，被广泛应用于关键承力结构件，如飞机起落架、发动机舱体、深海耐压壳体等。然而，厚度在6~25 mm范围内的中厚板钛合金焊接面临热输入控制、变形抑制、微观组织调控与力学性能保障等多重挑战。等离子弧焊凭借其高能量密度、小孔（keyhole）穿透模式及良好的工艺稳定性，成为解决上述难题的有效手段。

等离子弧焊的核心机制源于热等离子体电弧的特殊结构。与传统钨极惰性气体保护焊（GTAW）相比，PAW通过喷嘴对电弧进行二次压缩，显著提高了电弧的挺直度与能量集中度。这种压缩效应源于电流自磁场产生的“箍缩力”与等离子体内部热压力梯度之间的动态平衡，使得电弧温度可达到15 000~30 000 K，远高于GTAW的约8 000K[38]，图15为基于双CCD摄像机的同步传感系统。在中厚板焊接中，当电流超过临界值（通常>100 A），电弧可穿透工件形成贯穿性小孔，实现单面焊双面成形，避免多层多道焊带来的效率低下与冶金缺陷累积问题。研究表明，对于8 mm厚的TA2纯钛板，采用PAW可一次性完成高质量对接焊，无需开坡口，显著节省材料与工时[39]。

焊接过程中的气体保护是确保接头质量的关键，PAW必须采用高纯度氩气（纯度≥99.999%）进行全方位保护，包括正面主气、背面拖罩及尾部延时保护，确保焊缝及热影响区在冷却至400 ℃以下前始终处于惰性气氛中。实验表明，保护不当会导致

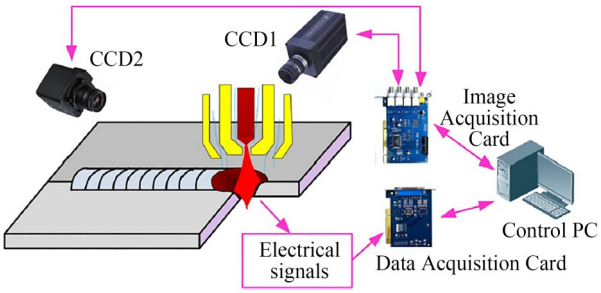
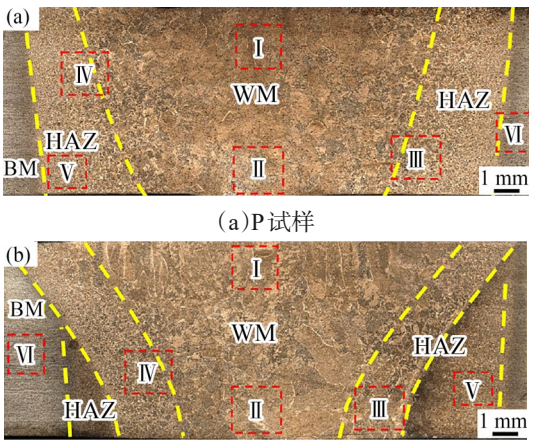



**图15 基于双CCD摄像机的同步传感系统[38]**

**Fig. 15 Synchronous sensing system based on dual CCD cameras.**

焊缝表面氧化变色、内部气孔增多，并显著降低冲击韧性[40]。

微观组织演化直接决定接头的力学性能。TC4（Ti–6Al–4V）等α+β型钛合金在PAW快速冷却条件下，熔合区易形成针状α'相。这种非平衡相虽能提高强度，但会牺牲塑性和断裂韧性[41]。研究显示，通过调控等离子气流量（通常0.5~1.5 L/min）可影响电弧形态与热输入，进而调控冷却速率与相变路径[42]。较低的气流量导致电弧扩散、热输入增大，冷却速率减缓，有利于α相析出；而过高气流量虽增强小孔稳定性，但可能导致过度冷却，促进α'相形成。优化后的PAW接头抗拉强度可达母材的90%以上，延伸率保持在8~10%[43]，图16为焊接接头的宏观图像。




（a）P试样

（b）P+G试样

**图16 焊接接头的宏观图像[43]**

**Fig. 16 Macrographs of welded joints**

为克服单一PAW在厚板焊接中的局限性，复合焊接技术日益受到关注。例如，PAW与GTAW组合焊接（PAW+GTAW）可利用PAW实现深熔透，GTAW则用于修饰焊道表面、细化晶粒并减少残余应力。

对比实验表明，8 mm厚TC4板经PAW+GTAW处理后，接头显微硬度分布更均匀，腐蚀电流密度降低，综合力学性能优于单一PAW接头[44]，图17为P和P+G试样的XRD谱图。

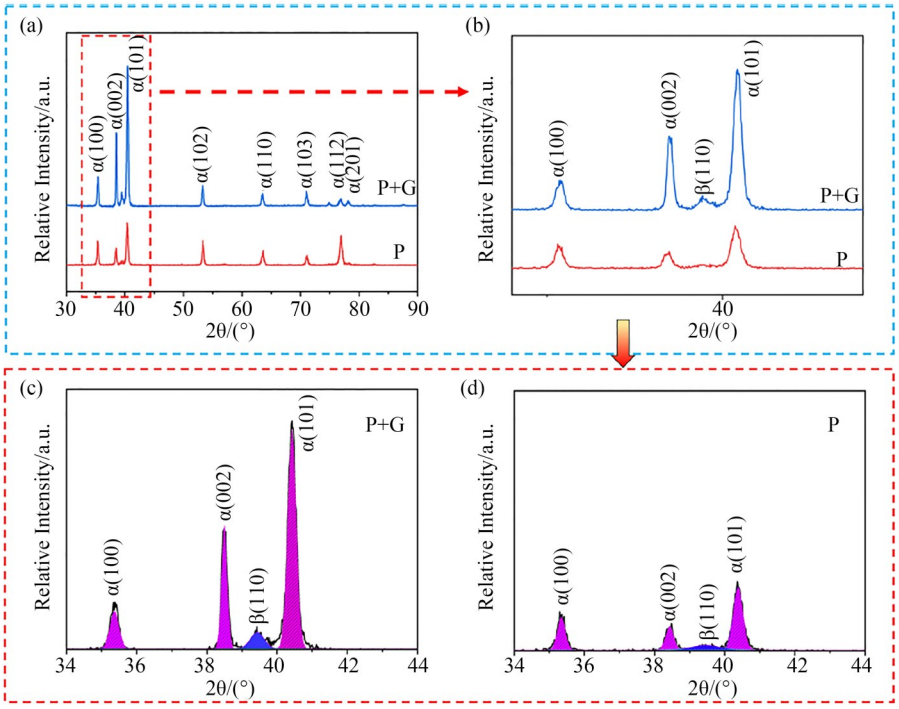



**图17　P和P+G试样的XRD谱图：(a)范围30°~90°；(b)范围33°~43°；(c-d)α相和β相体积；粉红色区域为α相，蓝色区域为β相[44]**

**Fig. 17　XRD patterns of Specimens P and P+G：(a)full scanning range (30°-90°)；(b)magnified view of the diffraction angle range 33°-43°；(c-d)calculated volume fractions of α and β phases，the pink areas represent the α phase，while the blue areas represent theβphase**

焊接变形与残余应力是中厚板结构服役安全的重要隐患。有限元模拟结合实验研究表明，焊接电流、速度及电压共同影响接头的等效应力与Z向变形。通过响应面法优化参数组合，可在保证熔透的前提下将变形量控制在工程允许范围内[45]。同时，焊后真空退火（700~750 ℃/2 h）是消除残余应力、促进α'马氏体分解为平衡α+β组织的有效手段，可恢复接头塑性并提高疲劳寿命。

综上所述，中厚板钛合金的等离子弧焊接是一项高度依赖工艺参数精确控制与全过程保护的先进制造技术。未来发展方向包括：基于高速视觉传感与深度学习模型（如CNN–LSTM）的小孔状态实时预测与闭环调控[46]，如图18、图19所示）；窄间隙PAW与自动化系统的集成以提升厚板焊接效率；以及多物理场耦合模拟指导下的微观组织精准设计，最终实现“零缺陷、高性能、高效率”的焊接目标。

### 1.6　固相摩擦焊接

中厚板钛合金的固相摩擦焊接技术代表了现代高性能连接工艺的重要发展方向，尤其针对Ti–6Al–4V（TC4）等广泛应用的α+β型钛合金。传统熔

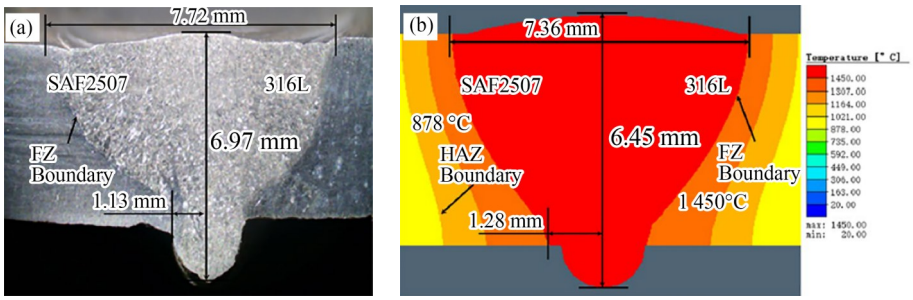



**图18　熔池对比形态：(a)实验，(b)模拟[46]**

**Fig. 18　Comparison of melt pool morphology：(a)experimental result；(b)numerical simulation**

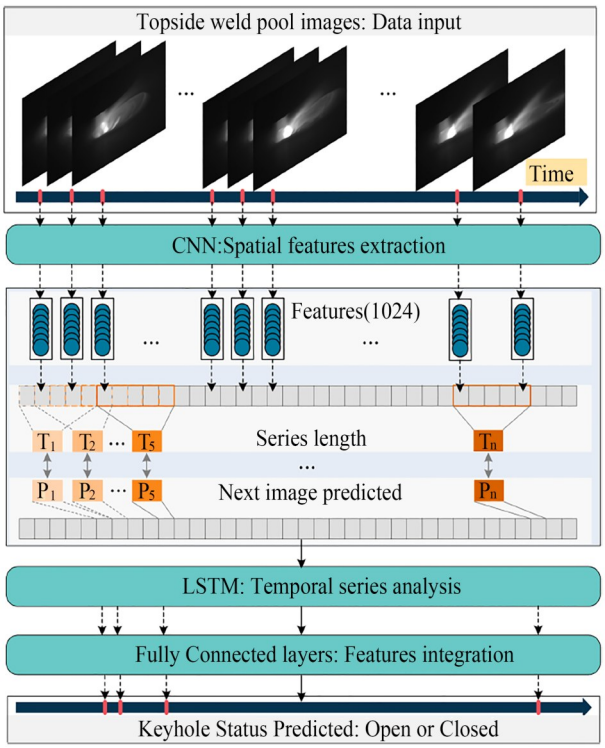



**图19　CNN-LSTM网络架构[46]**

**Fig. 19　Convolutional Neural Network**

焊方法在处理中厚板(通常指6~50 mm厚度)钛合金时,极易引发氧化污染、气孔、凝固裂纹及热影响区脆化等问题,严重制约接头性能。固相摩擦焊接通过避免材料熔化,从根本上规避了上述缺陷,成为实现高质量、高可靠性连接的关键路径。

搅拌摩擦焊(FSW)作为固相摩擦焊接的代表,在中厚板钛合金连接中展现出显著优势。其核心机制在于利用高速旋转的非消耗性工具对工件施加轴向压力,通过工具与材料界面间的摩擦热及剧烈塑性变形,使材料在低于熔点的温度下软化并发生动态再结晶,从而实现冶金结合。研究表明,对于6 mm厚的Ti-6Al-4V板材,采用常规FSW工艺易在焊缝底部形成未焊透或隧道状缺陷,这主要源于热量分布不均和底部塑性流动不足。为解决此问题,开发了动态旋转FSW(DRFSW)和背部加热辅助FSW(BHAFSW)等工艺,通过优化热输入分布和增强材料流动性,成功消除了底部缺陷,获得全截面致密的接头[47],图20为焊接接头EBSD图像。

微观组织演化是决定接头力学性能的核心因

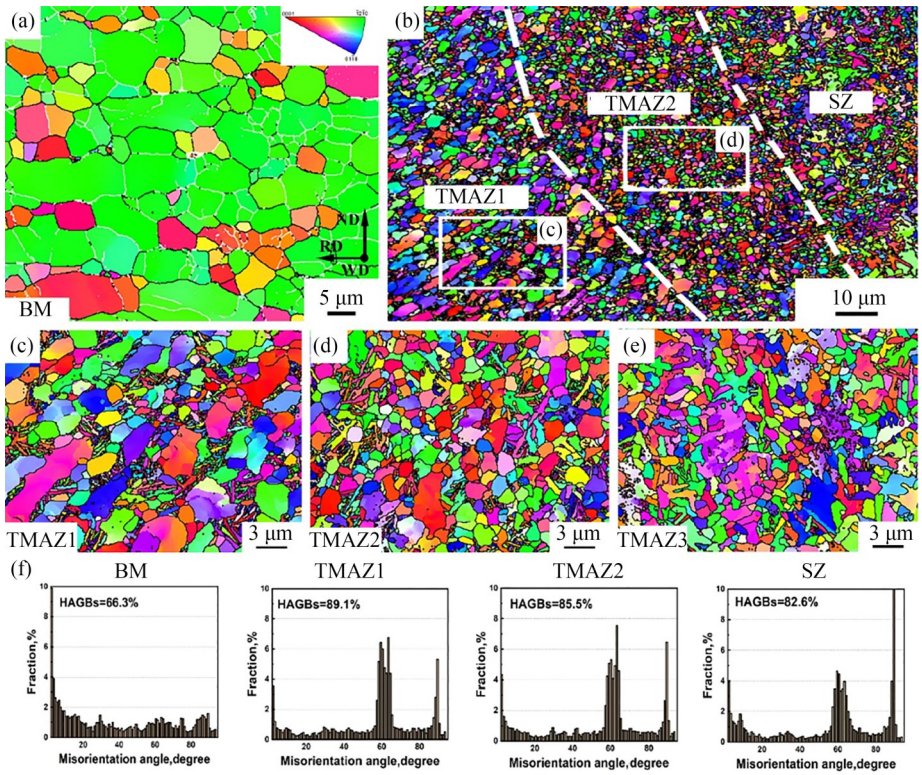



**图20　BHAFSW接头的(a)BM,(b)TMAZ的EBSD图像,(c-e)SZ放大显示;(f)BM、TMAZ和SZ的定向角分布[47]**

**Fig. 20　EBSD characterization of the BHAFSW joint: (a)BM, (b)TMAZ, (c-e)high-mag view of SZ, (f)Orientation angle distributions of BM, TMAZ, and SZ**

素。FSW过程中，焊缝中心的搅拌区（Stir Zone，SZ）经历最高温度和最大应变，通常形成细小的等轴α相晶粒，这是动态再结晶的结果。而热影响区（Heat-Affected Zone，HAZ）则因受热但未经历剧烈塑性变形，其原始片层组织可能发生球化或粗化。对于中厚板而言，由于热传导路径更长，冷却速率相对较慢，导致SZ和HAZ的晶粒尺寸普遍大于薄板焊接接头[48-49]。这种组织差异直接影响接头的强度和韧性。值得注意的是，通过预焊摩擦搅拌处理（Friction Stir Processing，FSP）可预先细化母材晶粒，为后续FSW提供更均匀的初始组织，从而获得超细晶焊缝，显著提升接头综合性能[50]。

工具材料的选择是实现中厚板钛合金FSW的技术瓶颈。钛合金在高温下化学活性极高，极易与常规工具钢发生粘着和扩散磨损。因此，必须采用高硬度、高热稳定性的工具材料，如钨基硬质合金、金属陶瓷或镍基高温合金（如ZhS6U）[51-52]。这些先进工具材料能有效抵抗高温氧化和机械磨损，确保在长时间、高负载的焊接过程中保持几何形状稳定，这对于保证中厚板焊接所需的持续热输入和塑性流动至关重要。

从力学性能角度看，优化后的中厚板钛合金FSW接头强度可达母材的90%以上，且具有优异的疲劳性能。这主要归功于细晶强化效应（遵循Hall-Petch关系）以及避免了脆性相的形成。此外，固相焊接过程产生的残余应力水平远低于熔焊，进一步提升了结构服役可靠性。最新研究还探索了将FSW与后续热处理（如静态退火）相结合的工艺路线，以协调焊缝与母材的超塑性变形能力，为“焊接+超塑成形”一体化制造大型复杂构件铺平道路[53]，图21为搅拌摩擦焊工艺示意图、试样位置和加热过程，图22为退火及变形过程中NZ片层结构的球化过程示意图。

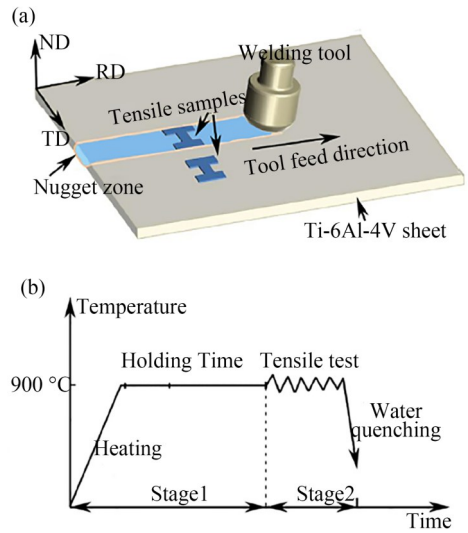



**图21　（a）搅拌摩擦焊工艺示意图及试样位置，（b）超塑性拉伸试验加热过程[53]**

**Fig. 21　(a) Schematic diagram of the friction stir welding (FSW) process and sampling locations; (b) Heating profile of the superplastic tensile test**

综上所述，中厚板钛合金的固相摩擦焊接，特别是FSW及其衍生技术，通过精确控制热-力耦合过程，实现了微观组织的优化调控和缺陷的有效抑制。未来的研究将聚焦于智能化工艺参数调控、新型耐磨损工具开发以及多物理场耦合数值模拟，以进一步提升该技术在极端制造环境下的适用性和

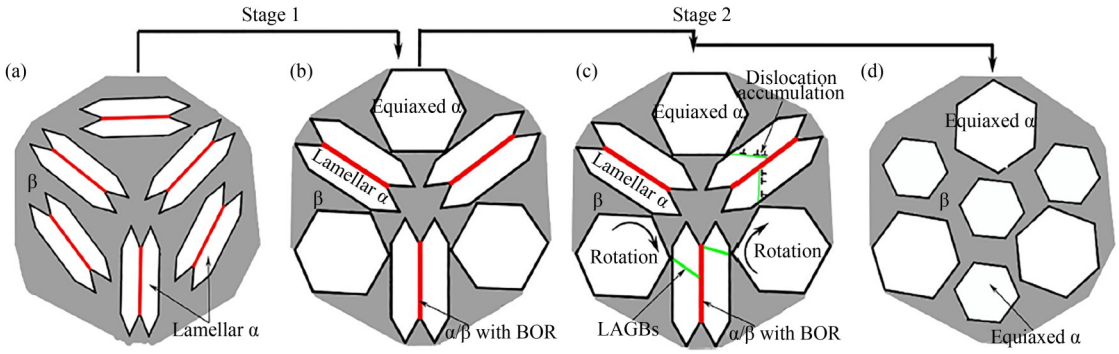



**图22　退火及变形过程中NZ片层结构的球化过程示意图：（a）NZ的全片层结构，（b）静态退火后片层结构的静态球化，（c）片层结构的动态球化过程，（d）变形后的球化晶粒[53]**

**Fig. 22　Schematic of lamellar structure spheroidization in the NZ: (a) as-welded lamellar structure; (b) static spheroidization (annealing); (c) dynamic spheroidization (deformation); (d) resultant equiaxed grains**

经济性。

## 2 中厚板钛合金先进高效焊接技术的应用与展望

中厚板钛合金凭借其高比强度、优异的耐腐蚀性以及良好的高低温力学性能，在航空航天、船舶制造、深海装备及能源工程等高端领域占据着不可替代的地位。然而，钛合金焊接过程面临氧化敏感性强、热导率低、高温下易与气体反应等固有挑战；特别是对于厚度介于5~60 mm的中厚板结构，传统熔焊方法往往难以避免气孔、裂纹、接头脆化及显著变形等缺陷。为此，近年来一系列先进高效焊接技术应运而生，旨在实现高质量、高效率、低缺陷的深熔连接，并推动钛合金结构向更复杂构型与更大尺度方向拓展。

### 2.1 数字化与智能化焊接制造

中厚板钛合金高效焊接技术的发展正朝着高度智能化、数字化与系统集成化方向迈进，主要向智能过程控制与多传感耦合检测方向发展。该领域的核心趋势之一是依托人工智能（AI）实现焊接过程的自适应控制。基于深度学习的系统能够实时解析焊缝形貌、材料特性等关键参数，动态调节电流、焊接速度等工艺变量，实现对热变形的预测与自动补偿，从而显著提升焊接质量的一致性与稳定性。

### 2.2 先进复合焊接工艺的深化

为突破单一焊接方法的局限，复合焊接工艺在中厚板钛合金领域持续深化应用。该技术代表了中厚板钛合金焊接的重要发展方向。通过在窄间隙TIG焊中引入振荡激光，有效扩大了熔池宽度，不仅抑制了气孔缺陷，还显著提高了焊接效率。

低功率脉冲激光诱导双TIG复合焊接是一种新型复合焊接策略，利用激光调控双TIG（L-DTIG）电弧的等离子体行为。研究表明，L-DTIG复合焊接的热输入显著低于传统的激光-TIG（L-TIG）复合焊接，且在针对不同钝边厚度的打底焊中表现出更宽的工艺窗口。在脉冲激光的作用下，L-DTIG的等离子体具有更大的中心导电区域和更高的电子密度，能量更加集中，有利于在降低热输入、提高焊接效率的同时，显著改善接头的整体力学性能。

### 2.3 产业化应用的经济性与市场前景

尽管激光系统等先进设备的初期投入较高，但高效焊接技术带来的生产力显著提升，使其在全生命周期的运营成本上具备较强竞争力。以NG-OL-TIG（窄间隙摆动激光TIG焊）技术为例，其焊接速度较传统NG-TIG焊接（约0.1 m/min）有显著提升，在25 mm厚Ti-6Al-4V板材焊接中可达0.2 m/min，并将角变形控制在小于0.5°的范围内。焊接接头的力学性能同样表现优异，抗拉强度可达约970 MPa，且断裂多发生于母材，表明焊缝强度不低于甚至优于母材。上述技术优势为其大规模产业化应用奠定了坚实基础。

高效深熔焊接技术，特别是激光-电弧复合焊接（如激光-MIG、激光-TIG），能够实现30~60 mm厚钛合金结构件的高质量焊接，在保证足够熔深的同时显著提高焊接速度。而对于80~100 mm的超厚结构（如核电压力容器），等离子-MIG复合焊接等技术则展现出更大的熔深能力与效率优势。

## 3 结论

（1）多元技术体系互补，解决了中厚板焊接的效率与质量矛盾。针对5~60 mm中厚板钛合金的焊接瓶颈，单一的TIG/MIG等传统工艺已难以满足高端制造需求。目前形成了以真空电子束焊（EBW）和负压激光焊为主导的深熔穿透技术，以激光-电弧复合焊（含CMT、双TIG等变种）为核心的高效连接技术。这些技术有效克服了传统方法热输入大、变形严重、易氧化等弊端，实现了从薄板到超厚板（100 mm级）全覆盖的高质量、高效率连接。

（2）微观组织与缺陷的协同调控是提升接头性能的关键机理。先进焊接技术的核心优势在于实现了对焊接物理过程的精确干预。通过激光束摆动、负压环境控制及多能场复合等手段，显著改善了熔池流动与匙孔稳定性，从而将气孔率由常规焊接的5%以上大幅降低至0.12%左右。同时，通过优化热输入与冷却速率，有效抑制了粗大脆性α'相的生成，促进了细小等轴晶及平衡α+β相的形成。

（3）未来发展方向聚焦智能化、复合化与全流

程数字化。面向更大尺度（80~100 mm以上）和更复杂的结构件制造需求，中厚板钛合金焊接正向“数智化”转型。工艺上，窄间隙与振荡激光-TIG等新型复合技术将进一步深化；控制上，基于深度学习与多传感融合的智能监控系统将实现对热变形的实时预测与补偿；制造模式上，数字孪生与仿真技术将指导工艺参数精准预置，推动钛合金焊接从依赖“工匠经验”向基于“数据驱动”的高端智能制造范式转变。

**参考文献：**


[1] Liu Z, Li X, Pan L, et al. Effects of weld penetration modes on laser welding characteristics of a novel ultra-high strength steel for aerospace application[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 90: 111-124.

[2] 李志杰，袁亮文，刘万存，等. 钛合金激光深熔焊接研究现状与展望[J]. 电焊机，2025，55(7)：43-56
LI Z J, YUAN L W, LIU W C, et al. Current Research Status and Prospect of Laser Deep Penetration Welding of Titanium Alloys[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(07): 43-56.

[3] Li T, Wan Y, Bi Z, et al. Weld formation and porosity in TC4 joint by oscillating laser beam welding with circle trajectory model [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 2680-2689.

[4] Dong B, Li Z, Chen B, et al. Effect of oscillation parameters on weld surface morphology during laser beam oscillation welding of stainless steel [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 207: 109339.

[5] Kotlarski G, Kaisheva D, Ormanova M, et al. Electron-Beam Welding of Titanium and Ti6Al4V Alloy[J]. Metals, 2023, 13(6): 1065.

[6] Dai H L, Du R Z, He Y, et al. Microstructure Appearance of TC4 Titanium Alloy Welded Join by Pulsed Electron Beam [J]. Materials Science Forum, 2020, 982: 143-150.

[7] Wencel Z, Wiewiórowska S, Wieczorek P, et al. Electron Beam Welding Process for Ti6Al-4V Titanium Alloy[J]. Materials, 2023, 16(14): 5174.

[8] Li F S, Wu L H, Li H J, et al. Achieving high precipitation phase proportion and mechanical properties of vacuum electron beam oscillation welded joints of near β titanium alloy thick plates by the interlayer addition [J]. Vacuum, 2024, 230: 113725.

[9] Li F S, Wu L H, Zhao H B, et al. Influencing mechanisms of weld root tip on microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints of titanium alloy thick plates[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(9): 1011-1020.

[10] LONG J, ZHANG L, ZHU L, et al. Comparison of low-cycle fatigue properties of two kinds of high energy beam welded joints of TC4 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(11): 3376-3386.

[11] Long J, Zhang L J, Zhang L X, et al. Comparison of fatigue performance of TC4 titanium alloy welded by electron beam welding and laser welding with filler wire[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022, 45(4): 991-1004.

[12] Long J, Zhang L, Ning J, et al. Zoning study on the fatigue crack propagation behaviors of a double-sided electron beam welded joint of TC4 titanium alloy with the thickness of 140 mm[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 146: 106145.

[13] Long J, Zhang L, Liu Y, et al. Initiation and propagation mechanism of fatigue crack in ultra-thick titanium alloy vacuum electron beam welding joint[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163: 108534.

[14] Long J, Jia J, Zhang L, et al. Fatigue inhomogeneity of 140 mm thick TC4 titanium alloy double-sided electron beam welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 165: 107214.

[15] 檀财旺，李睿涵，徐炳孝，等. 负压激光焊接技术的研究现状及展望[J/OL]. 中国激光，1-32[2026-07-13]. https://link.cnki.net/urlid/31.1339.TN.20260425.1433.028.
TAN C W, LI R H, XU B X, et al. Current research status and prospects of laser welding under subatmospheric[J]. Chinese Journal of Lasers, 1-32[2026-07-13]. https://link.cnki.net/urlid/31.1339.TN.20260425.1433.028.

[16] Reisgen U, Olschok S, Jakobs S, et al. Welding with the Laser Beam in Vacuum [J]. Laser Technik Journal, 2015, 12(2): 42-46.

[17] Li F S, Wu L H, Zhao H B, et al. Realizing deep penetration and superior mechanical properties in a titanium alloy thick plate joint via vacuum laser beam welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 2254-2264.

[18] Li F S, Wu L H, Zhao H B, et al. Achieving deep penetration welding of 100 mm level thick titanium alloy

using vacuum laser beam welding[J]. Journal of Materials Science & Technology,2025,236:284–300.

[19] Gao M, Kawahito Y, Kajii S. Observation and understanding in laser welding of pure titanium at subatmospheric pressure[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13539.

[20] Li H G. Analysis of porosity in welding of titanium alloy[C]//2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME).IEEE, 2020:486–489.

[21] Cheng Z, Lang Q, Zhang Z, et al. Study on Microstructure and Stress Distribution of Laser–GTA Narrow Gap Welding Joint of Ti–6Al–4V Titanium Alloy in Medium Plate[J]. Materials,2025,18(13):2937.

[22] Su R, Li H, Chen H, et al. Stability analysis and porosity inhibition mechanism of oscillating laser–arc hybrid welding process for medium–thick plate TC4 titanium alloy[J].Optics&Laser Technology,2024,174:110569.

[23] Tao P, Wang C, Mi G, et al. Effects of solidification on flow dynamics: A novel comprehension of defects formation in laser penetration welding[J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,27:7562–7569.

[24] Shi J, Zhou Y, Liu L. Application of Pulsed Laser–TIG Hybrid Heat Source in Root Welding of Thick Plate Titanium Alloys[J]. Applied Sciences,2017,7(5):527.

[25] Yamamoto N, Liao J, Murakami T, et al. Fundamental Study on Fiber Laser–MIG Arc Hybrid Weldability of Ti–6Al–4V Titanium Alloy[J]. Journal of the Japan Institute of Metals,2013,77(3):94–100.

[26] Su X, Tao W, Chen Y, et al. Microstructure and Tensile Property of the Joint of Laser–MIG Hybrid Welded Thick–Section TC4 Alloy[J]. Metals, 2018, 8(12): 1002.

[27] Patel P, Dutta A, Ghosh A, et al. Advances in welding of titanium and its alloys using CMT, MIG, and laser–MIG hybrid processes: A comprehensive review[J]. Materials Today Communications,2026,53:115264.

[28] Su R, Li H, Chen H, et al. Stability analysis and porosity inhibition mechanism of oscillating laser–arc hybrid welding process for medium–thick plate TC4 titanium alloy[J].Optics&Laser Technology,2024,174:110569.

[29] Liu M, Shao C, Zheng Z, et al. The effect of laser oscillation welding on porosity suppression for medium–thick Al alloy with high Mg content[J]. Optics & Laser Technology,2024,175:110795.

[30] Ruan G, Shen C, Zhang Y, et al. Welding of thick Ti–6Al–4V plate via narrow gap oscillating laser tungsten inert gas (NG–OL–TIG) hybrid welding: microstructure and mechanical properties[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2025, 139(1–2):741–764.

[31] Song G, Xu Z, Lang Q, et al. A Laser–Induced TIG Arc Narrow–Gap Welding Technique for TC4 Titanium Alloy Thick Plates Based on the Spatial Position Control of Laser, Arc and Filler Wire[J]. Metals, 2024, 14(5):510.

[32] Cheng Z, Lang Q, Zhang Z, et al. Study on Microstructure and Stress Distribution of Laser–GTA Narrow Gap Welding Joint of Ti–6Al–4V Titanium Alloy in Medium Plate[J]. Materials,2025,18(13):2937.

[33] Wang M, Fang N, Sun L, et al. Study of the Microstructure and Properties of the Butt Joint of Laser–Welded Titanium Alloy with Flux–Cored Wire[J]. Metals, 2023,13(2):369.

[34] Wang M, Wu P, Xu K, et al. Influence of High–Temperature Annealing on Microstructure and Properties of Welded Joints Using Narrow Gap Laser Welding of TC4 Titanium with Welding Wire[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(18): 9642–9653.

[35] Liang G, Qin G, Cao P, et al. Numerical investigation of sidewall penetration in narrow gap oscillating laser welding process[J]. Optics & Laser Technology,2024, 170:110282.

[36] Liang G, Qin G, Cao P, et al. Evolutions of temperature field and stress field in narrow gap oscillating laser welding process based on equivalent heat source[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28:154–167.

[37] Yamazaki Y, Abe Y, Hioki Y, et al. Development of gap sensing system for narrow gap laser welding[J]. Welding International,2016,30(10):745–754.

[38] Liu X F, Jia C B, Wu C S, et al. Measurement of the keyhole entrance and topside weld pool geometries in keyhole plasma arc welding with dual CCD cameras [J]. Journal of Materials Processing Technology,2017, 248:39–48.

[39] 郝宗斌,李晓泉,范晋楷. 8 mm TA2纯钛厚板等离子弧单面焊双面成形试验研究[J]. 热加工工艺,2017, 46(11)214–217.
HAO Z B, LI X Q, FAN J K. Experimental Research on One–side Welding Both Sides Formation of Plasma

Arc Welding for TA2 Plates with Thickness of 8 mm [J]. Hot Working Technology, 2017,46(11)214–217.

[40] Perumal G, Vasanthkumar P, Dhinakarraj C K, et al. Microstructure and mechanical characterization of weldments of titanium alloy plates joined using different welding techniques [J]. Interactions, 2024, 245 (1):259.

[41] Gao F, Cui Y, Shi H, et al. Fracture Toughness of Ti–6Al–4V Titanium Alloy Welded by Keyhole Gas Tungsten Arc Welding Based on High Current[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(23): 10556–10566.

[42] Pragatheswaran T, Rajakumar S, Balasubramanian V. Influence of Plasma Gas Flow Rate on the Mechanical and Microstructural Aspects of Plasma Arc Welded Titanium Alloy Joints[J]. Journal of Manufacturing Engineering, 2022, 17(3): 80–86.

[43] Pragatheswaran T, Rajakumar S, Balasubramanian V. Optimization of the weld characteristics of plasma–arc welded titanium alloy joints: an experimental study [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2022, 37 (8): 896–907.

[44] Zhang L, Wu Z, Li Y, et al. Mechanical properties and corrosion resistance of TC4 titanium alloy joints by plasma arc welding + gas tungsten arc welding combination welding[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(28): 13234–13250.

[45] Hong X, Huang B, Li T, et al. Optimization of plasma arc welding process parameters of SAF 2507/316L dissimilar steel based on response surface method [J]. Welding in the World, 2023, 67(11): 2493–2509.

[46] Zhou F, Liu X, Jia C, et al. Unified CNN–LSTM for keyhole status prediction in PAW based on spatial–temporal features [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 237: 121425.

[47] Cong S, Li N, Zhu Z, et al. A comparative study of conventional, dynamic rotation and heat–assisted friction stir welding of Ti–6Al–4V plates to reduce welding defects[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 323: 118217.

[48] Edwards P D, Ramulu M. Investigation of microstructure, surface and subsurface characteristics in titanium alloy friction stir welds of varied thicknesses[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14 (5): 476–483.

[49] Edwards P D, Ramulu M. Comparative study of fatigue and fracture in friction stir and electron beam welds of 24 mm thick titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2016, 39(10): 1226–1240.

[50] Rao R N, Rao S S, Vijayan V. Achieving ultra–fine grains in Ti–6Al–4V alloy welds through pre–weld friction stir processing[J]. Results in Engineering, 2024, 24: 103019.

[51] Amirov A, Chumaevskii A, Savchenko N, et al. Features of Permanent Joints of Titanium (α+β)–Alloys Obtained by Friction Stir Welding Using a Nickel Superalloy Tool[J]. Metals, 2023, 13(2): 222.

[52] Amirov A I, Chumaevskii A V, Vorontsov A V. Formation of (α+β) titanium welds by friction stir welding using heat–resistant alloy tool[J].AIP Conference Proceedings, 2020, 2310(1): 6.

[53] Jia C L, Wu L H, Xue P, et al. Effect of static annealing on superplastic behavior of a friction stir welded Ti–6Al–4V alloy joint and microstructural evolution during deformation [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 130: 112–123.

编辑部网址：http://www.71dhj.com