



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.01

钛合金熔化焊技术研究现状及发展趋势

陈昊睿¹, 罗玖田^{1*}, 冯志强¹, 武鹏博², 黎泉¹, 秦建³, 常云峰³,
方乃文², 陈珺鑫¹

1. 北部湾大学, 广西 钦州 535011

2. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

3. 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001

摘要: 聚焦钛合金熔化焊技术, 系统梳理激光焊、气体保护焊(TIG/MIG)及激光-电弧复合焊等主流工艺的研究进展; 揭示了不同焊接方法中接头脆化、气孔及裂纹的形成机制, 阐明了工艺参数(如激光功率、保护气流量)对焊缝微观组织(α/β 相演变)及力学性能的调控规律; 重点分析了新型工艺的突破, 包括锁孔TIG焊的深熔透机理、真空激光焊的熔深提升效应、激光填丝焊的成分优化策略, 以及激光-电弧复合焊对异种材料连接的适应性。针对当前厚板焊接缺陷控制难、异种材料界面脆性相生成等瓶颈, 提出未来需在智能化缺陷监测、专用药芯焊丝研发及多能场协同焊接等方向突破, 为钛合金构件的高效高质量连接提供理论与技术支撑。

关键词: 钛合金; 熔化焊; 研究现状; 发展趋势; 焊接接头

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)08-0001-23

Research Status and Development Trends of Titanium Alloy Melting Welding Technology

CHEN Haorui¹, LUO Jiutian^{1*}, FENG Zhiqiang¹, WU Pengbo², LI Quan¹, QIN Jian³,
CHANG Yunfeng³, FANG Naiwen², CHEN Xin¹

1. Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China

2. China Academy of Machinery Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China

3. China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China

Abstract: Focusing on the fusion welding technology of titanium alloys, this paper systematically reviews the research progress of mainstream processes such as laser welding, gas shielded welding (TIG/MIG), and laser-arc hybrid welding; it reveals the formation mechanisms of joint brittleness, porosity, and cracks in different welding methods, and clarifies the control rules of process parameters (such as laser power, shielding gas flow rate) on the microstructure (α/β phase evolution) and mechanical properties of the weld; it particularly analyzes the breakthroughs of new processes, including the deep melting mechanism of keyhole TIG welding, the melting depth enhancement effect of vacuum laser welding, the composition optimization strategy of laser filler welding, and the adaptability of laser-arc hybrid welding to dissimilar material connections. In view of the current challenges such as the difficulty in controlling defects in thick plate welding and the formation of

收稿日期: 2024-11-10 修回日期: 2025-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(52261044); 泰山产业领军人才工程(2024001)

作者简介: 陈昊睿(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事船舶与海洋工程的研究。E-mail: 19577048059@163.com。

通讯作者: 罗玖田, E-mail: luojitian@139.com。

brittle phases at the interface of dissimilar materials, it is proposed that future breakthroughs are needed in intelligent defect monitoring, the development of special cored wires, and multi-energy field collaborative welding, providing theoretical and technical support for the efficient and high-quality connection of titanium alloy components.

Keywords: titanium alloy; melting welding; research status; development trend; welding joint

引用格式:陈昊睿,罗玖田,冯志强,等. 钛合金熔化焊技术研究现状及发展趋势[J]. 电焊机, 2025, 55(8): 1-23.

Citation: CHEN Haorui, LUO Jiutian, FENG Zhiqiang, et al. Research Status and Development Trends of Titanium Alloy Melting Welding Technology[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 1-23.

0 引言

钛合金因兼具高比强度、优异耐腐蚀性及良好高温稳定性,在国防军工、航空航天、海洋工程等高端装备领域成为实现结构轻量化与性能跃升的关键材料^[1]。随着装备向大型化、集成化发展,钛合金构件的连接质量已成为制约其工程应用的核心瓶颈,而熔化焊作为钛合金构件制造中最主流的连接技术,其工艺水平直接决定装备的服役可靠性与寿命。目前钛合金熔合焊主要面临的挑战包括:钛合金厚板焊接时气孔与冷裂纹缺陷难以控制,高温下钛合金易与O、H、N等元素发生反应导致接头脆化等,上述缺陷会严重影响钛合金构件的质量和使用寿命,削弱装备的服役可靠性。因此,针对钛合金的可靠、高效焊接工艺研究开发始终是相关学者关注的热点,本文将系统梳理钛合金熔化焊的关键工艺技术的研究现状,分析焊接过程中的组织演化规律与缺陷形成机制,并展望钛合金熔化焊领域未来的发展方向,为钛合金优质高效焊接技术的突破提供理论支撑。

1 钛合金的材料特性与分类

1.1 钛合金的主要化学成分

钛合金以钛(Ti)为基体,通过添加合金元素调控性能,其化学成分体系直接决定材料的相组成与宏观特性。

钛(Ti)是钛合金的基础元素,占比通常超过50%,部分高纯度钛合金中可达90%以上^[2]。

铝(Al)是钛合金中最常用的合金元素之一,主要用于稳定钛合金中的 α 相。在高温条件下,Al元素可以减缓钛合金中的晶粒长大,提高晶界区域的

纯度,从而增强材料的整体力学性能。Al元素在钛合金加工时可以增加材料的可锻性,有利于材料的加工成型和后续处理^[3]。

钒(V)是钛合金中关键的 β 相稳定元素,V元素可以增强钛合金的抗拉强度和硬度,提升钛合金在切削加工与热加工过程中的性能。同时,V元素有细化晶粒的能力,能够优化合金微观组织结构,提高钛合金的耐热性和耐腐蚀性,提升整体性能^[4]。

钼(Mo)在钛合金中也是一种 β 相组成元素,能够显著提高钛合金的抗拉性能、屈服极限和硬度,一定程度上提高钛合金的韧性,提升钛合金在恶劣环境(如高温、强酸、强碱等)下的耐腐蚀性能,增强钛合金的耐磨性能。同时,适当的Mo元素可以提升钛合金的可加工性以及可焊性^[5]。

除了上述几种主要金属元素外,钛合金还含有部分杂质元素,如氧(O)、氮(N)、碳(C)和氢(H)等。这些元素在钛合金中的含量须严格控制,含量超标会导致钛合金的性能降低。例如O和N在 α 相中具有较高的溶解性,能够引起晶格畸变,增强合金的强度,但同时也会削弱合金的韧性^[6]。

1.2 钛合金的特性

(1)高强度。钛合金具备高强度特性,尤其是经过热处理工艺后,其强度能得到进一步增强。这使得钛合金在需要承受高应力或高负载的场合下有着良好的表现。几种常见钛合金的常温力学性能如表1所示。

(2)低密度。钛合金密度约为4.5 g/cm³,仅为钢的60%,但强度接近甚至超过高强钢,因此具有极高的比强度(强度/密度)。这一特性使其成为制造轻质、高强零部件的理想材料。

(3)耐腐蚀性较好。钛合金在多种腐蚀性介质中都能表现出良好的耐腐蚀性,包括海水、氯化物、

表1 几种常见钛合金的常温力学性能^[7-12]

Table 1 Mechanical properties at room temperature of several common titanium alloys

合金牌号	名义化学成分	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
TA7	Ti-5Al-2.5Sn	785	700
TA18	Ti-3Al-2.5V	895	800
TC4	Ti-6Al-4V	895	824
TC11	Ti-6.5Al-1.5Zr-3.5Mo-0.3Si	500	790
TB2	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	1100	875
TB5	Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	1080	900

硝酸、硫酸等。这是由于钛合金表面能形成一层致密的氧化层,该氧化层作为一道防护屏障,能够阻挡并防止腐蚀介质的渗透与浸蚀^[13]。因此在海洋工程、化工设备等领域,钛合金有着大量的应用^[14]。

(4)良好的耐热性。钛合金能在高温下仍能保持稳定的力学性能与化学稳定性,部分耐热钛合金的工作温度可达600~650℃,远高于铝合金等材料。这使得钛合金在航空发动机、航天器等领域具有重要的应用价值^[15]。

1.3 钛合金的分类

钛合金依据其化学成分及含量差异,可以划分为五大类别: α 钛合金、近 α 钛合金、 $\alpha+\beta$ 钛合金、亚稳定 β 钛合金和 β 钛合金^[16]。

α 钛合金和近 α 钛合金:两类合金中 β 相的质量占比小于10%,其成分特点为Al含量较高(2.5%~6.0%),而Mo、V等 β 稳定元素含量极低甚至没有^[3]。这些合金具有优异的高温性能与组织稳定性,不易发生相变,但常温下强度与塑性较差,且无法进行热处理强化^[17]。

亚稳定 β 钛合金和 β 钛合金: β 相质量占比介于10%~50%,成分上显著提高Mo、V等 β 稳定元素含量,部分合金Mo含量可达30%以上,如TB7钛合金,同时保留一定比例的Al以维持强度与组织稳定性。其突出优点是强度更高且可以通过热处理进行强化,但组织稳定性较差,熔炼工艺复杂^[18]。

$\alpha+\beta$ 钛合金:通过合理配比 α 稳定元素(如Al)与 β 稳定元素(如V),实现 α 相与 β 相的协同作用,兼具 α 钛合金的耐热性与 β 钛合金的强韧性,且可通过热处理灵活优化性能。

图1为TA7(α 型)、TB2(β 型)和TC4($\alpha+\beta$ 型)除钛(Ti)以外的合金元素含量图。

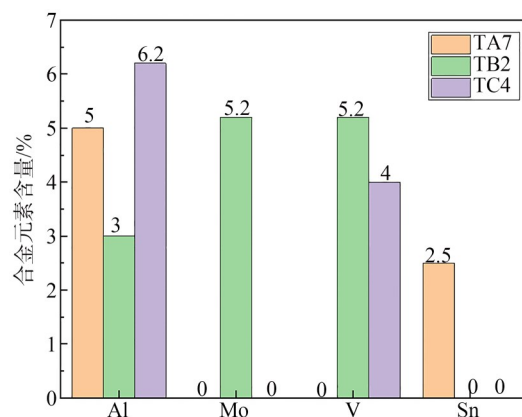


图1 3种钛合金主要元素含量

Fig. 1 Content chart of three main elements in titanium alloys

2 钛合金的焊接性分析

2.1 焊接接头脆化

钛合金在焊接过程中因高温下的化学活性极易引发接头脆化,其核心机制与环境中O、H、N等元素的侵入密切相关。文献[19]的研究表明,防护措施不足时,钛合金会在250℃时吸收O元素,400℃时吸收H元素,600℃时开始吸收N元素,而在540℃左右会发生强烈的氧化反应。随着H元素含量的上升,在焊缝区域内会有更多的TiH₂晶体以片状或针状形态析出。由于TiH₂晶体自身强度较低,这种析出会导致焊接接头的冲击韧性有所下降。而钛合金中固溶的O和N元素会引起钛晶格的畸变,从而增大其变形所需的阻力。这虽然增强了接头的强度和硬度,但相应地也降低了其塑性和韧性,即造成焊接接头脆化。

2.2 气孔

气孔是钛合金焊接过程中最常见的缺陷之一,主要出现在熔合线周围,其形成机制与分布特征因类型不同存在显著差异。文献[20]明确地将钛合金焊接气孔分为冶金型气孔和小孔型气孔(亦称为工艺气孔)。冶金型气孔主要在熔池凝固的最后阶段形成,通常呈现为球形,内壁光滑,直径较小,且数量众多,在焊缝横截面的上部和下部均有分布;冶金型气孔的分布较为分散,且它们的形成基本上不受熔池流动的影响。在激光深熔焊(非穿透型)中工艺气孔是主要的气孔类型,其形状不规则,直

径范围较大,通常在 0.18~0.25 mm 之间。这类气孔主要出现在焊缝的中下部,尤其在结构转角等区域更为集中分布。与冶金型气孔相比,工艺气孔可以通过一系列工艺措施来减少乃至消除,这些措施包括提升钛合金焊接前的清洁质量、控制焊接环境的温度和湿度、对焊缝进行重熔处理等。图 2 为两种气孔的金相显微。

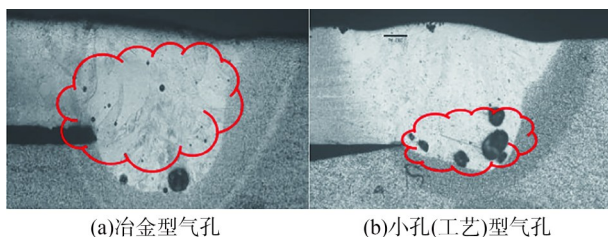


图 2 气孔宏观金相^[20]

Fig. 2 Macroscopic gold phase diagram of pores

2.3 焊接裂纹

焊接裂纹主要热裂纹和冷裂纹两大类。文献[21]指出:钛合金由于 S、P、C 等杂质元素含量较低,且有效结晶温度区间窄小,焊接时难以形成热裂纹;但是在进行厚壁钛合金的多层多道焊接过程中,焊接接头会受到较大的拘束应力作用,导致焊接后常常伴有较高的残余应力水平。这种高水平的残余应力极易诱发冷裂纹的形成。目前常用优化坡口设计的方法消除钛合金接头冷裂纹。

3 钛合金气体保护焊研究现状

钛合金在高温下容易与 O、N、H 等元素发生化学反应,导致焊接接头脆化、产生气孔和裂纹等缺陷,因此在焊接钛合金时需添加惰性气体对焊缝进行保护。钛合金的电弧焊焊接技术目前较为常用的工艺为非熔化极惰性气体保护焊(TIG 焊)和熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊),二者在工艺特性与应用场景上形成互补。

3.1 非熔化极惰性气体保护焊(TIG 焊)

TIG 焊以高熔点钨极为电极产生电弧,通过惰性气体隔绝空气实现熔池保护,熔化填充金属及钛合金工件形成熔池进而完成焊接。因电弧稳定、焊接变形小、焊接飞溅少等优点,TIG 焊被大量用于钛合金的焊接作业中^[22]。

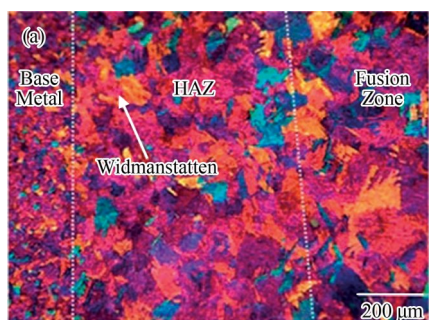
3.1.1 传统 TIG 焊的组织调控与工艺优化

有学者研究了钛合金 TIG 焊的接头组织与性能。文献[23]使用 TIG 自动焊对 α 钛合金 Ti-4Al-2V(牌号 TA17)进行了焊接试验。结果表明,热影响区(HAZ)和熔合区(FZ)由 α' 马氏体、针状 α 和条状 $\alpha+\beta$ 魏氏体组成,比母材(BM)复杂,虽结构强度高于母材(BM),但 FZ 因晶粒粗化导致硬度(200~220 HV1)低于母材(230~250 HV1)^[23]。周秉文^[24]等使用 TIG 焊对 Ti/TiAl₃ 叠层复合材料进行焊接,结果表明,在优化后的参数下,焊接接头没有明显缺陷。接头平均抗拉强度达母材的 90%(343 MPa),平均伸长率则为 6.2%,达到母材的 62%。

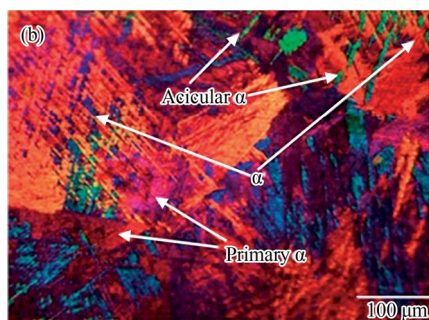
部分学者基于优化填充材料的角度进行了研究。Asim Iltaf^[25]等以 TA7 钛合金为母材,对比了 TC4、TA7 焊丝以及无焊丝 3 种情况下的焊接质量。如图 3 所示,TA7 接头与 TC4 接头在微观组织上存在明显差异:TA7 接头中没有 β 相, α' 马氏体含量也较低;TC4 接头中针状马氏体含量多于 TA7 接头,而 TA7 接头则明显残留有 β 相。这种差异的产生原因在于,TC4 中含有 β 稳定剂,降低了 β 转变温度,使得焊接过程中 TC4 能产生更多的 β 相,冷却后 β 相又转变为 α' 马氏体,所以相较于 TA7 接头,TC4 接头中 α' 马氏体的含量更多。闫文青等^[26]针对 TA7 钛合金,采用含有氟化钛成分的药芯焊丝进行了 TIG 焊接的熔深研究。采用 CaF_2 - BaCl - NaF 系钛药芯焊丝,并依据药芯成分分为三组,分别用 NaAlF_6 、 Na_2SiF_6 、 BaF_2 取代 CaF_2 进行试验。结果显示,相较于 BaF_2 药芯焊丝,其他复合氟化物药芯焊丝能够实现更大的焊接熔深,但焊接工艺性能相对较差;含 BaF_2 的焊丝虽然焊接熔深相对较小,但能形成更好的焊缝外形。

有学者针对钛合金 TIG 焊的坡口形式对焊接质量的影响进行了研究。史倩茹等^[27]探究了 V 形、双 V 形以及 X 形坡口构造对钛/钢复合板接头组织与性能的作用,研究结果显示,双 V 型坡口接头表现出最好的综合力学性能。

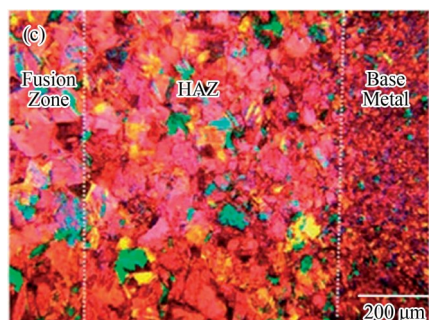
有学者针对保护气流量变化对焊接质量的影响进行了研究。Szwajka^[28]等人研究了保护气流量(氩气 50%)对纯钛 TIG 焊接接头力学性能的影响。由表 2、图 4 可以看出,随着保护气体流量的减少,纯



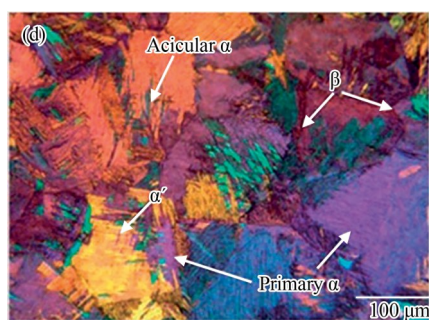
(a) TC4 焊丝接头



(b) TC4 焊丝熔合区



(c) TA7 焊丝接头



(d) TA7 焊丝熔合区

图3 TC4和TA7焊缝光学显微^[25]

Fig. 3 Optical microscope image of TC4 and TA7 welded seam

钛接头抗拉强度从 420 MPa 提升至 481 MPa, 伸长量从 33.9 mm 增至 39.0 mm, 晶粒尺寸随着保护气流量的增加而下降。

综上所述,传统 TIG 可以较好地完成钛合金的焊接。TC4($\alpha+\beta$ 钛合金)焊丝有着更好的焊接质量;

表2 保护气流量与力学性能的关系^[28]

Table 2 Relationship between shielding gas flow rate and mechanical properties

编号	保护气流量/($\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	R_m /MPa	伸长量 ΔL /mm
TIG_1	6	420 $\pm$ 7	33.9 $\pm$ 0.8
TIG_2	8	435 $\pm$ 5	35.3 $\pm$ 0.9
TIG_3	12	443 $\pm$ 10	36.4 $\pm$ 1.0
TIG_4	16	460 $\pm$ 8	37.5 $\pm$ 1.1
TIG_5	18	481 $\pm$ 6	39.0 $\pm$ 1.2

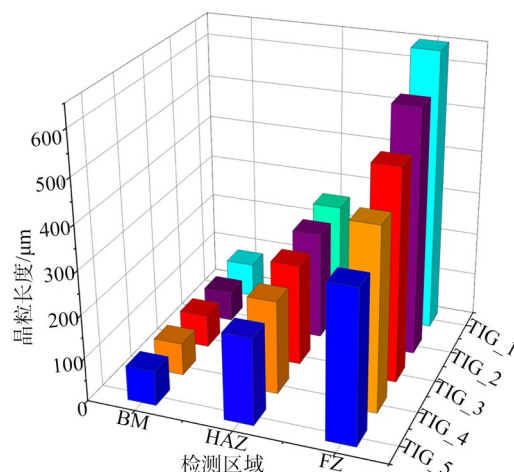
图4 焊接接头中的平均晶粒尺寸^[28]

Fig. 4 Average grain size in the welded joint

含氟焊丝能够有效提升焊接熔深;双 V 型坡口的接口性能优异;保护气(氩气)流量能够明显改变钛合金焊接接头的质量,气流量越高接头的综合力学性能越高。

3.1.2 新型 TIG 焊工艺

为了实现 TIG 焊在钛合金上的大熔深焊接,部分学者使用新型 TIG 焊,如锁孔 TIG、窄间隙 TIG 焊等工艺对钛合金进行了一系列的焊接试验。

(1)K-TIG 焊,即锁孔钨极气体保护焊(Key hole Tungsten Inert Gas welding),是在传统 TIG 焊技术上,利用高强度电流产生的电弧力推开熔池,形成锁孔效应^[29],并结合高效的冷却焊枪技术,从而实现深度熔透的一种先进焊接工艺,具有高能量密度与电弧集中、免开坡口与无需填丝等优点^[30]。6 mm 厚 TC4 焊接试验^[31]表明,热输入增加促进 α' 相生成(α' 相含量越高、长度越长),接头抗拉强度同步提升。文献[32]用 K-TIG 焊对 12 mm 厚的 TC4/TA17 钛合金进行异种母材焊接试验,结果表明,接头的显微硬度由于化学成分和微观结构的差异呈现不

对称分布,顺序为:TC4 HAZ>TC4 BM>FZ>TA17 HAZ>TA17 BM;接头的极限抗拉强度和屈服强度介于两种BM之间;由于TA17的强度最低,其一侧接头在HAZ附近发生韧性断裂,FZ中吸收的冲击能量介于两种BM之间,接近两种BM冲击能量吸收值的平均值。

(2)窄间隙TIG焊因为坡口角度较小,焊缝体积小,焊缝收缩量小,因此焊接变形小,焊后残余应力也相对较小,成为厚板焊接的优选方案^[33]。30 mm厚TC4单层填丝窄间隙TIG焊试验显示(见图5),焊接电流增加可小幅提升熔深与熔宽,为参数优化提供依据^[34]。

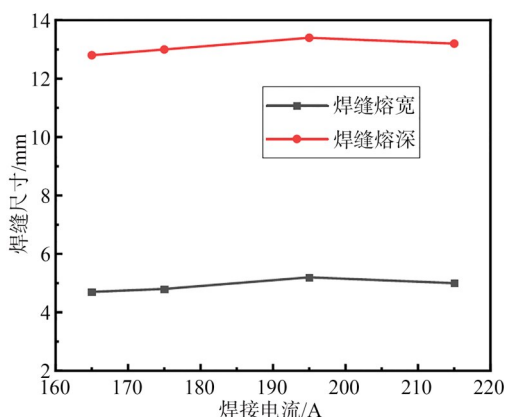


图5 不同焊接电流的焊缝熔深、熔宽^[34]

Fig. 5 Weld penetration depth and weld width at different welding currents

GangSong等^[35]为了解决传统窄间隙焊因电弧在窄接口内沿两壁“爬升”导致的两侧侧壁角热量输入不足进而引发的侧壁熔合不足的问题,采用低功率激光诱导、稳定TIG电弧的方法,对24 mm的TC4钛合金板材进行焊接试验。如图6所示,通过增大激光-电弧的错位,能够实现电弧的稳定偏转,从而导致到邻近激光侧的侧壁获得了增强的热输入,同时其熔合能力也得到了改进。

(3)磁控窄间隙TIG焊是一种通过施加外部交

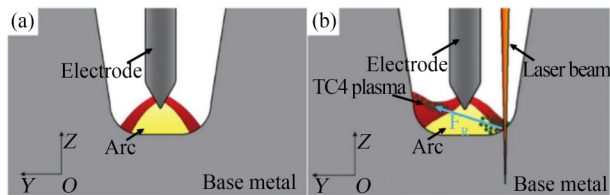


图6 无激光/有激光引导的电弧剖面图^[35]

Fig. 6 Arc profile without/with laser guidance

变磁场来驱动电弧摆动的氩弧焊技术。相比于普通的窄间隙TIG焊,磁控窄间隙TIG焊由于有外加的交变磁场^[36],可以精确控制电弧在窄间隙中的摆动,确保电弧能够充分接触到焊缝的侧壁,从而实现良好的侧壁熔合^[37]。因此,磁控窄间隙TIG焊的焊接质量高于普通窄间隙TIG焊,成为了厚壁钛合金焊接的优选方式之一。

胡金亮^[38]等采用磁控窄间隙TIG焊对120 mm厚TA17钛合金板开展焊接试验,不同区域微观组织如图7所示:拉长的 α 晶粒和沿晶界分布的 β 相主要分布于靠近焊缝的母材区域,粗大的 α 相形成的魏氏组织主要出现在接头的热影响区;熔合区的微观组织主要由细小的 α 片层交错排列构成网篮状结构。在接头竖直方向上,显微组织的差异较小,但在接头上层的熔合区可观察到有少量马氏体片层组织存在。文献^[39]对30 mm厚的Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo(Ti6321)钛合金进行磁控窄间隙TIG焊焊接试验,结果表明,焊接接头的熔合区与热影响区冲击韧性均超过母材,抗拉强度达到了母材强度的95%。

综上所述,新型TIG焊工艺通过能量集中与电弧调控技术,可以实现钛合金的深熔焊接和大厚度焊接。K-TIG利用高电流推开熔池,形成锁孔,从而实现了钛合金的大熔深焊接。在大厚度的钛合金焊接中,当下研究主要聚焦于窄间隙焊,但传统的窄间隙焊存在电弧沿两壁上爬导致的两侧热量不足的问题。因此部分学者展开了对窄间隙焊的改进工作,例如通过增加磁场以控制电弧行为的磁控窄间隙焊;还有学者研究了以低功率激光引导TIG电弧,同样取得了成功。

3.2 熔化极惰性气体保护焊(MIG焊)

MIG焊和TIG焊同属电弧焊,区别在于:MIG焊无需单独的钨极来形成电弧,而是直接将焊丝作为电极来进行焊接^[40]。因此,MIG焊的焊枪结构比TIG焊简单,使用及维护成本更低。

牟刚^[41]等的研究表明,在相同工艺参数条件下,MIG焊的焊接速度相较于TIG焊更快,且其热影响区的晶粒分布更均匀。张龙^[42]针对中厚度为15 mm的低成本TC4钛合金板材的单丝MIG焊试验进一步揭示了工艺参数对焊接质量的影响;未采

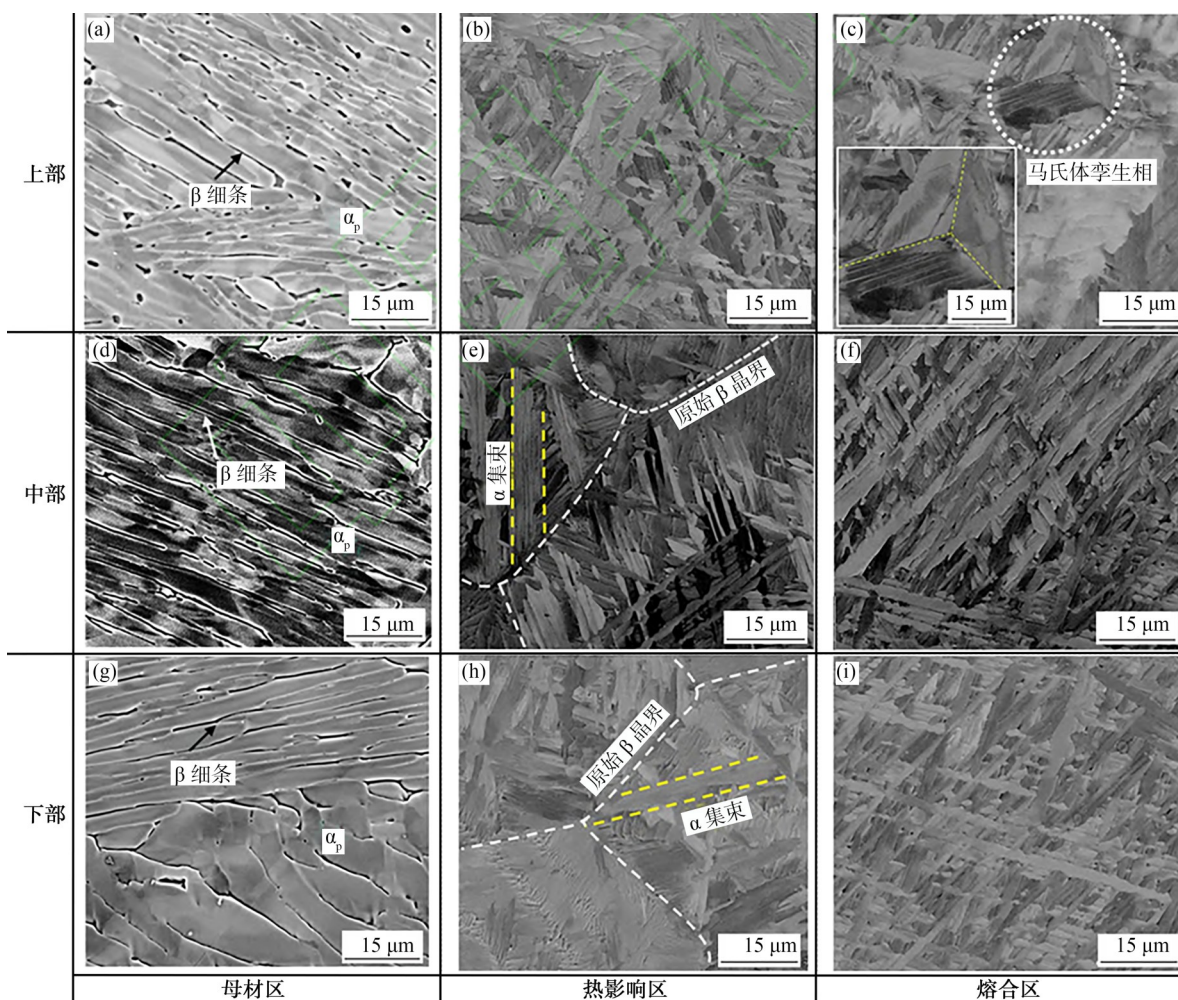
图 7 接头不同区域的显微组织^[39]

Fig. 7 Microstructure of different regions in the welded joint

用保护措施时,接头内部易产生裂纹、气孔等典型缺陷;降低层间温度可显著改善接头的抗拉强度与韧性;焊接过程中,无论接头是否摆动,其拉伸性能基本相同。

文献[43]系统研究了 15 mm 厚 TC4 钛合金板 MIG 焊接头的疲劳性能,母材和焊缝的疲劳试验结果如表 3 所示,随着应力水平的提升,母材与焊接接头寿的疲劳寿命均呈现下降趋势,但焊缝的疲劳寿命长于母材。母材的疲劳起源通常位于试样表面的划痕处,而焊接接头的疲劳则起源于内部气孔。在接头的疲劳扩展区内,可以观察到众多二次裂纹,且该区域的疲劳条带间距小于母材。无论是接头还是母材,在瞬断区都发现了大量的韧窝。

部分学者针对热处理对 MIG 焊接接头的影响展开研究。何逸凡^[44]的研究证实,TC4 钛合金 MIG

表 3 疲劳试验测试结果^[43]

Table 3 Results of fatigue test measurements

样品	应力水平/MPa	疲劳寿命 N/次
母材	422	34 354 900
	506	1 435 500
	548	317 700
	590	118 300
焊缝	425	100 000 000
	510	4 351 100
	552	1 114 700
	595	320 400

焊接头经焊后热处理后,横向与纵向残余应力平均值相较于焊后状态均有所下降。

另有学者研究了焊接电流对钛合金 MIG 焊的影响。文献[45]着重探讨了焊接电流(80~300 A)对熔滴过渡的影响。如图 8 所示,随着焊接电流的增大,熔滴过渡方式由射滴过渡逐渐转变为射流过

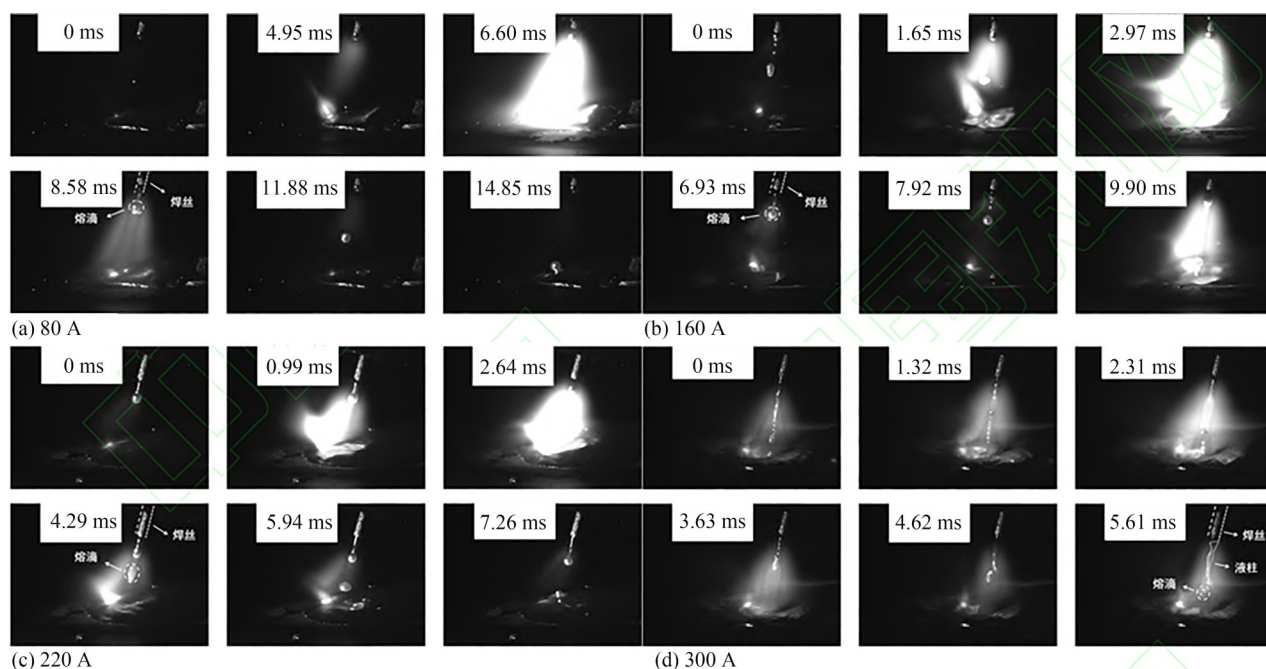
图8 焊接电流对熔滴过渡方式的影响^[45]

Fig. 8 Effect of welding current on droplet transition

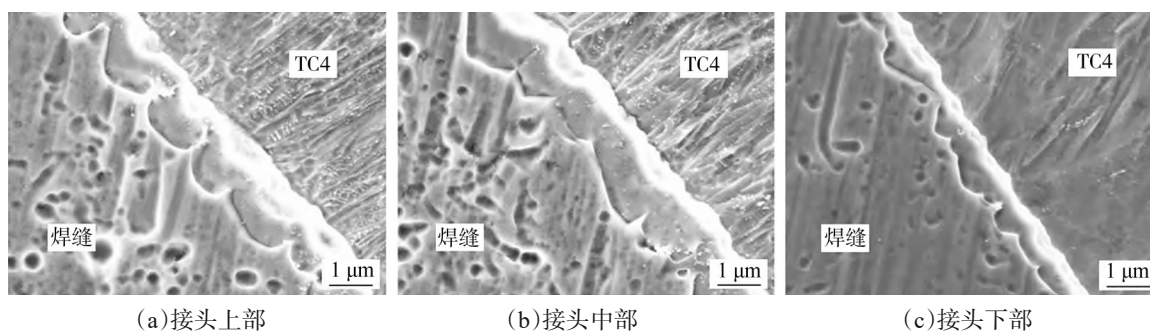
渡,在一个脉冲周期内,熔滴数量由一滴转变为多滴,最终形成液柱。

超威弧 MIG 焊是一种融合超威弧技术与 MIG 的新型焊接工艺。与传统 MIG 焊相比,其采用大功率电子开关组件来精确调控输出的电信号以及瞬时电流变化率 di/dt 。这使得在较低的弧压条件下,即可实现熔滴的超短弧喷射转移,电弧能量高度集中,具有较高的方向性和稳定性。凭借其强大的电弧作用力和熔滴的冲击力,超威弧 MIG 焊能够形成深宽比较大的焊缝,尤其适用于材料的高速焊接。

刘李宾^[46]等用采用高速超威弧 MIG 焊对 TC4 钛合金和 5A06 铝合金进行熔钎焊,分析热输入对焊接接头的影响。结果表明,热输入 $E \leq 0.93$ kJ/cm

时接头根部存在未熔合缺陷;热输入 $E \geq 1.20$ kJ/cm 时,焊缝出现熔穿缺陷。由图9可知,当热输入 E 在 1.02~1.11 kJ/cm 范围内时,焊缝成形良好,TC4/5A06 界面处由下至上形成厚度为 0.7~1.5 μm 的单层 TiAl₃。在不出现成形缺陷的条件下,接头的平均抗拉强度随热输入的增大而逐渐增大。

部分学者针对保护气场变化对钛合金焊接质量的影响展开研究。Jia^[47]等自主研发了同轴双通道气路焊枪,并对 8 mm 厚的 TC4 钛合金板材进行焊接试验,在焊接过程中通过控制内通道气流速 (Q) 和外通道气流速 (q) 深入分析保护气流量对焊缝质量的影响。结果表明: Q 主要影响液滴过渡的变化规律,而过渡期的长短主要受 q 的影响;增加 q

图9 $E=1.11$ kJ/cm 时 TC4/5A06 界面显微组织^[46]Fig. 9 Microstructure of the TC4/5A06 interface at $E=1.11$ kJ/cm

后,电弧长度减小。Q单独作用时表面形貌最差,而加入q后表面平整、均匀。当Q和q共同作用时,钛合金双头焊更易获得稳定的成形。

还有学者将TIG和MIG焊相结合,开展钛合金和异种材料的焊接试验。Zhi Cheng^[48]等采用MIG-TIG双面电弧焊(DSAW)技术,进行了钛合金与不锈钢之间的对接钎焊试验。结果表明,钎焊方式的低线能量和电弧焊接过程的快速冷却速率,使得接头中不存在脆性的Ti-Fe金属间化合物(IMC)。与熔焊接头相比,由于消除了Ti-Fe界面金属间化合物,电弧钎焊接头的抗拉伸力得到了明显的提升。

综上所述,MIG焊具备多项优势,如焊接电流更大,熔敷效率相对较高,焊接填充层数较少,从而有效提升了焊接效率;但是MIG焊的飞溅现象严重、焊缝成形效果不佳、焊接热输入较高以及焊接质量相对较低。为此,学者们开展了大量工艺优化方面的研究。研究表明,保护装置和降低层间温度有助于提升焊接质量;焊后热处理能够减少焊缝残余应力;控制焊接电流可调控焊丝熔滴的形态;双层保护气场有利于改善焊道成形;超威弧MIG焊可实现钛合金的高速焊接;MIG-TIG双面电弧钎焊能够减少脆性化合物的形成,适用于钛合金与异种金属的焊接。

4 钛合金激光焊研究现状

激光焊自20世纪60年代问世以来,历经数十年的发展已日趋成熟,如今已经成为了主要的焊接方法之一。相较于传统的电弧焊技术,激光焊接凭借高能量密度、低热影响区(HAZ)、小焊接变形及大熔深等显著优势,已成为钛合金高质量连接的优选工艺之一^[1]。目前,钛合金激光焊接的主要工艺形式可分为三类:单激光焊、激光填丝焊及激光-电弧复合焊。

4.1 单激光焊接

单激光焊接的特点是无需填充金属,完全依赖母材熔化形成焊缝,因此对工件装配精度要求极高——需严格控制接头间隙与错边量。该工艺主要适用于厚度<6 mm的钛合金薄板,对于厚板对接,易因能量分布不均导致焊缝表面凹陷等缺陷^[49]。

4.1.1 薄板单激光焊接(厚度<6 mm)

针对钛合金薄板的单激光焊接,研究主要聚焦于工艺参数优化、微观组织调控及异种材料连接等方向。

Xu^[50]等采用CO₂小孔模式对TC4钛合金进行激光焊接试验。结果表明:焊接速度通过改变焊缝冷却速率影响相变行为,进而调控接头性能。张颖云^[51]等针对厚度为1.2 mm的TC4钛合金薄板,采用正交试验设计,探究了多种焊接参数对薄板焊缝力学性能的具体影响。通过分析L9(3³)正交试验中所设定的参数组合及其相应的实验结果(见表4)可以明显看出,激光功率是影响焊缝抗拉强度的关键因素,而离焦量与焊接速度对焊缝性能的影响程度则接近且相对较小。

有学者针对表面活性剂对钛合金焊接质量的影响进行研究。侯继军^[52]等在5 mm厚TC4钛合金表面涂覆表面活性剂Na₂SiF₆后发现,焊缝熔深提升0.8%~12%,熔宽减少10%~29%,深宽比显著改善(见图10),且焊缝表面成形质量得到优化。

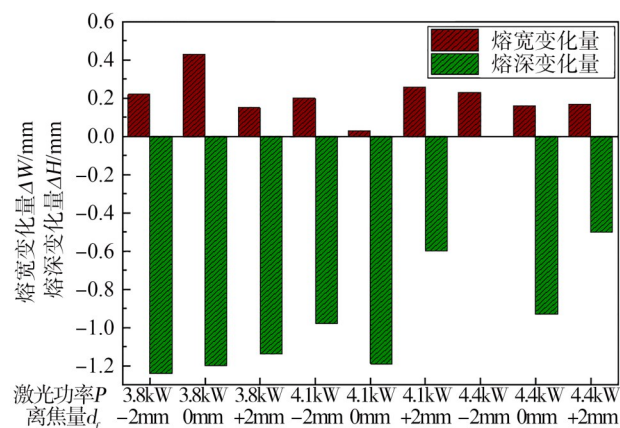


图10 焊缝熔深和熔宽变化量^[52]

Fig. 10 Variations in weld penetration depth and fusion width

有学者研究了激光特殊照射形式对焊缝成形的影响。Jianhui Liang^[53]等使用环形激光对1 mm厚TC4钛合金薄板进行焊接,700 W、800 W、900 W功率下焊缝正反面成形良好,而600 W时因中心能量不足导致焊缝背面未熔透;1 000 W时则因热输入过高产生正面未熔合缺陷,背面则出现了熔穿现象,如图11所示。

有学者研究了预置焊接材料的单激光焊接工艺。Wu^[54]等为了解决TC4钛合金T型接头双激光

表 4 L9(3³)正交实验设计及结果^[51]Table 4 L9 (3³) Orthogonal experimental design and results

试验 编号	离焦量 /mm	激光功率 /kW	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%
母材	—	—	—	1 090	15.10
1	1	1.1	1.3	1 015	8.9
2	1	1.2	1.4	1 051	9.2
3	1	1.3	1.5	1 020	10.2
4	2	1.1	1.4	1 007	7.4
5	2	1.2	1.5	1 032	11.5
6	2	1.3	1.3	1 005	11.4
7	3	1.1	1.5	1 019	13.4
8	3	1.2	1.3	1 030	10.4
9	3	1.3	1.4	1 026	11.6

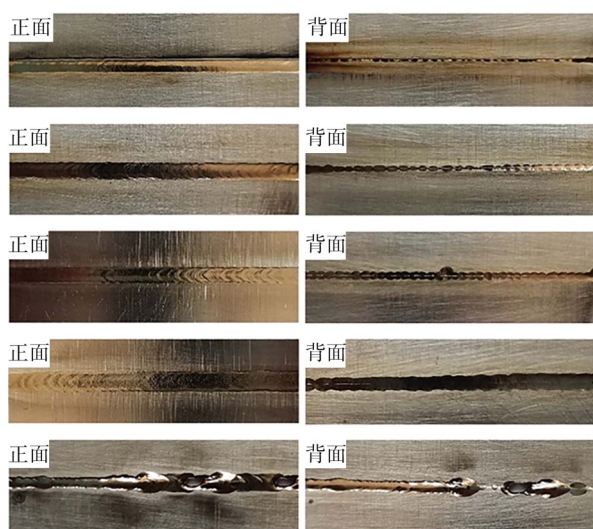
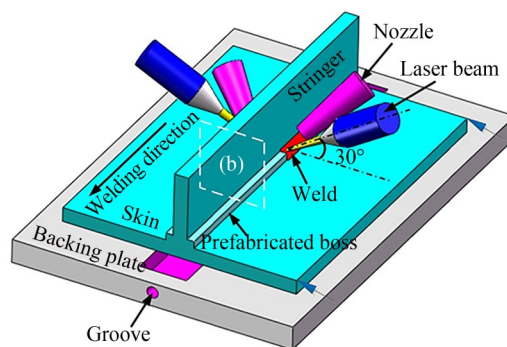
图 11 焊缝外观^[53]

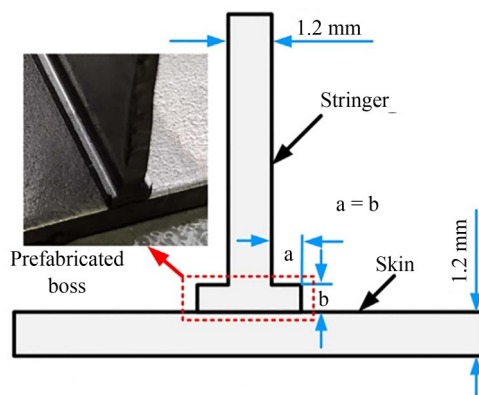
Fig. 11 Weld morphology

束同步焊接(DLSW)中填充焊丝送料困难的问题,开发了基于在纵梁上预制焊接材料的自熔DLSW工艺。试验原理如图12所示,通过在纵梁两侧预制0.8 mm×0.8 mm金属凸台替代填充焊丝,在优化参数下可获得成形良好的接头(见图12),部分替代了激光填丝焊的功能。

有学者研究了不同热输入对于焊接质量的影响。Ren Lina^[55]等对5 mm厚的TC17钛合金板进行了不同激光热输入条件下的焊接试验。结果表明,随着线能量的增加,焊缝形貌由Y形转变为X形。焊缝中气孔缺陷的数量先增加后减少。热影响区由较细的等轴晶组成,由图13可知,随着热输入的增加,α相逐渐细化乃至最终消失,而β相则逐渐粗化并最终成为主要晶相。



(a)整体结构及部分焊接参数



(b)预制凸台示意

图 12 T型接头双激光束同步焊接示意^[54]

Fig. 12 Schematic diagram of synchronous welding with dual laser beams for T-Joint

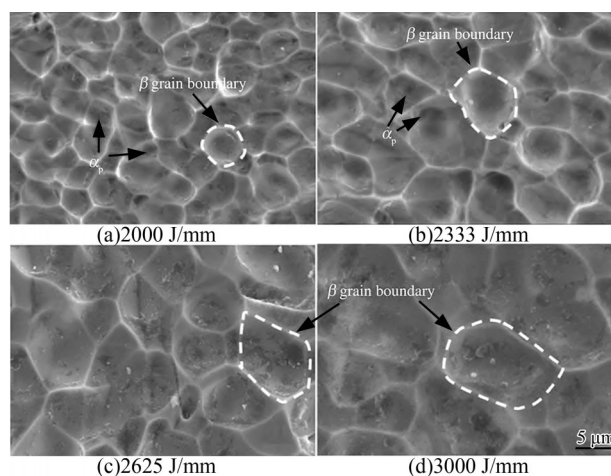
图 13 热输入对热影响区显微组织的影响^[55]

Fig. 13 The effect of laser heat input on the microstructure of the Heat-Affected zone

随着技术发展,制造领域对高性能异种材料连接的需求不断增加,异种材料的焊接技术成为研究的热点。因此有学者研究了异种材料与钛合金的单激光焊接工艺。Chen^[56]等对TC4钛合金和高硼

硅玻璃进行了异种材料单激光叠层焊接试验,研究不同参数下两种材料的焊接性。如图14所示,在两种焊接速度下,焊接结合体的剪切力承受值随焊接功率的增加而提高,其中2 mm/s的剪切力在170 W的功率下达到最大值,3 mm/s则提升至180 W。

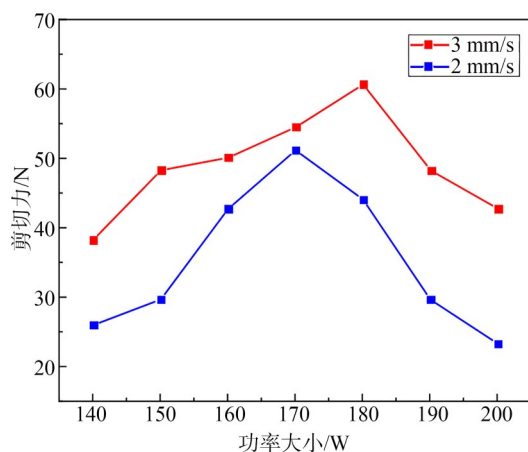


图14 剪切力随功率变化的曲线^[56]

Fig. 14 Curve of Shear Force Varying with Power

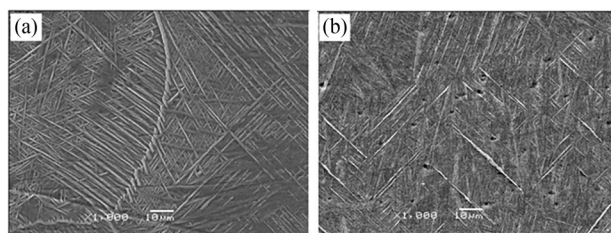
综上所述,针对钛合金薄板的单激光焊接有着大量的研究:化学活性剂能够提高单激光焊接的熔深熔宽;环形激光发生器可以使热量输入更均匀从而改善接头组织性能;预置焊材进行单激光焊接可部分替代激光填丝焊。同时由于激光可透射的特点,也有学者对薄板钛合金与高硼硅玻璃进行了叠层焊接研究并取得了成功。

4.1.2 中厚板单激光焊接

伴随高功率激光器的发展,单激光焊接逐渐突破薄板应用局限,向6 mm以上中厚钛合金板拓展。

田德勇^[57]对8 mm厚TC4钛合金开展激光焊接研究,结果显示:随着热输入的增加,焊缝区域的晶粒度逐渐增大,但热输入对焊缝中部柱状晶的尺寸影响并不明显。如图15所示,焊缝区域呈现出魏氏组织和网篮状组织两种典型的马氏体组织;在焊接缺陷方面,如图16所示,随着焊接热输入的提高,焊缝气孔率总体呈下降趋势;而当焊接速度较快时,几乎不产生工艺气孔。

由于激光束在空气中会出现能量损耗,常规的单激光焊很难实现厚板的大熔深焊接,基于此,学者们展开了在真空环境下单激光中厚板钛合金焊接技术的研究。



(a) 魏氏组织

(b) 网篮状组织

图15 TC4激光焊接焊缝区马氏体组织形态^[57]

Fig. 15 Martensite microstructure in the laser welded zone of TC4 alloy

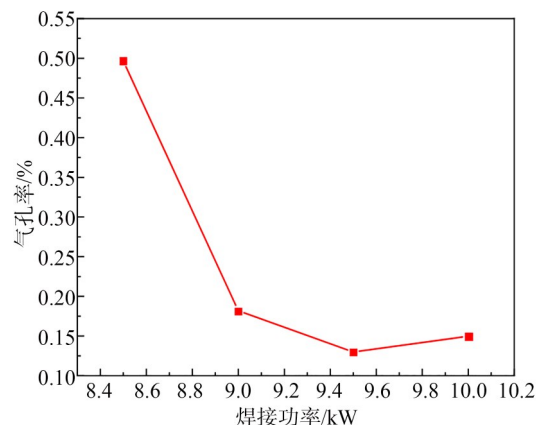
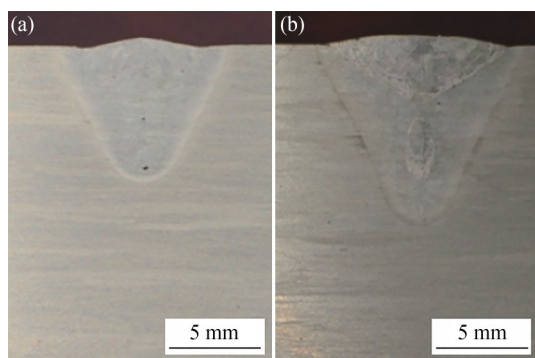


图16 激光功率对焊缝气孔率的影响^[57]

Fig. 16 The effect of laser power on the porosity of the welded seam

孟圣昊^[58]等利用光纤激光器,在大气及真空两种不同的环境下对20 mm TC4钛合金进行了焊接实验,观察并分析这两种环境下钛合金单激光焊接的熔深与熔宽的变化情况。由图17、图18可知,相比于大气环境,真空环境下激光焊接的焊缝成形更为良好,能够显著提高焊缝熔深,增大焊缝深宽比。Li^[59]等人对比了低真空(气压100 Pa)和常规大气压下单激光焊对TC4钛合金的熔深及焊接质量,结果表明真空激光焊(VLBW)接头的熔深(16 mm)大于大气焊接头(7 mm),FZ主要由针状 α' 马氏体组成,其在焊层中分布不均匀,且无明显的择优取向;VLBW接头的硬度高于母材(BM),接头的平均抗拉强度达到1 010 MPa,强度效率为100%,断裂位置在BM。Cong Wang^[60]等研究了钛合金真空激光三种焊后热处理——焊态、850 °C/2 h/FC(FC:炉冷)和980 °C/10 min/FC+720 °C/2 h/FC对接头的影响,由图19可知,热处理后的熔合区(WM)相比焊态显微硬度明显降低;其中850 °C的接头显微硬度整体都低于焊态;980 °C的BM显微硬度与焊态基本一致,热影响区(HAZ)显微硬度低于焊态,而三

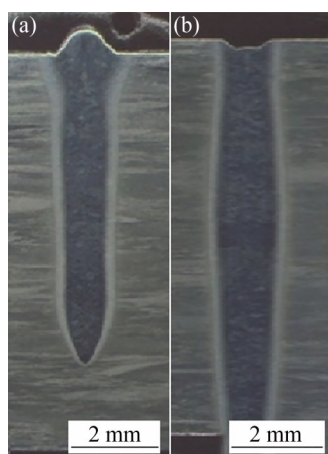


(a) 5 kW

(b) 7 kW

图 17 大气环境下单激光堆焊焊缝宏观形貌

Fig. 17 Macro morphology of single laser surfacing welds in the atmospheric environment



(a) 5 kW

(b) 7 kW

图 18 真空环境下单激光堆焊焊缝宏观形貌^[58]

Fig. 18 Macro morphology of single laser surfacing welds under vacuum

个区域的显微硬度相近。

综上所述,由于单激光焊接的固有缺陷,其对于钛合金中厚板焊接的研究并不是很多。虽然研究表明真空环境可以明显增加激光熔深,但保持真空环境需要专门的设备;且单激光焊接中厚板需要大功率激光器,会增加焊接的成本和复杂性。因此,对于厚度较高的钛合金,使用激光填丝焊接和激光-电弧复合焊接是兼顾焊接质量与成本的更好选择。

4.2 激光填丝焊

激光填丝焊技术通过引入焊丝参与焊接过程,与单激光焊接相比,具备连接更大焊缝间隙的能力,可形成更为饱满的焊缝。通过调整焊丝的化学成分,能够有效调控焊缝熔池的质量、成分及其比

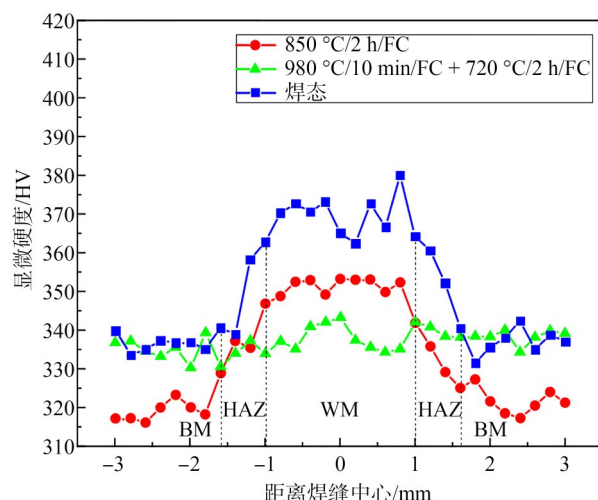
图 19 焊接接头显微硬度^[60]

Fig. 19 Microhardness of the welded joint

例,优化焊缝金属构成,进而精确控制焊缝凝固过程及微观组织形成,提升整体的焊接质量。同时,因焊缝熔池金属增加,可对焊缝接头进行开坡口处理以确保焊缝根部完全熔透;由于有焊丝的持续填充,实现了厚板材料的多道激光填丝焊接^[61]。此外,激光填丝焊还具有低热输入、高能量密度、焊接速度快、热影响区窄、焊接变形微小以及接头质量优良等诸多优势,已成为制造大厚度钛合金结构件不可或缺的关键技术之一^[62]。

4.2.1 填充材料与热处理对焊缝组织及性能的影响

Fang^[63]等自主设计研发了Ti-Al-V系列药芯焊丝,采用激光填丝焊焊接TC4钛合金,并对接头进行850 °C下保温2 h后随炉冷却的退火处理。对比焊态和热处理工艺焊缝区显微组织(见图20、图21)发现:焊态下,焊缝区域呈现网篮状结构特征,主要由长条形的 α' 马氏体贯穿整个柱状晶,其间散布着细小的次生 α' 马氏体;热处理后,焊缝组织由 α_p 相、 α_s 相集束以及点状分布的残留 β 相共同组成,且热处理态接头的后伸长率和室温冲击性能均优于焊态焊接接头及母材。

文献[64]采用TC3实心焊丝和Ti-Al-V-Mo系药芯焊丝为填充材料进行TC4钛合金焊接试验。由表5可知,相同焊接参数下,药芯焊丝焊缝的抗拉强度高于母材及实心焊丝焊缝,其室温冲击性能最佳,但拉伸率略低于母材。Sun^[65]采用Ti-Al-V系药芯焊丝和TC4药芯焊丝焊接20 mm厚TC4厚壁

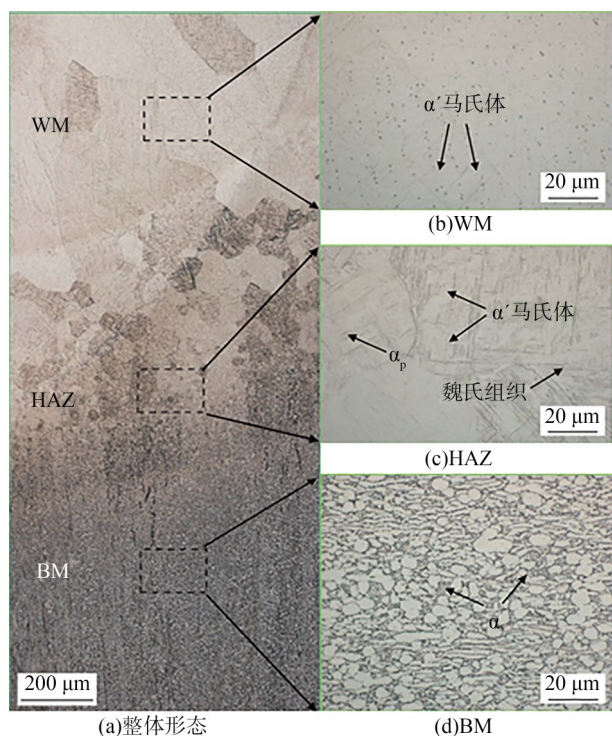
图 20 焊态焊接接头微观组织形貌^[63]

Fig. 20 Microstructure of welded joint without heat treatment

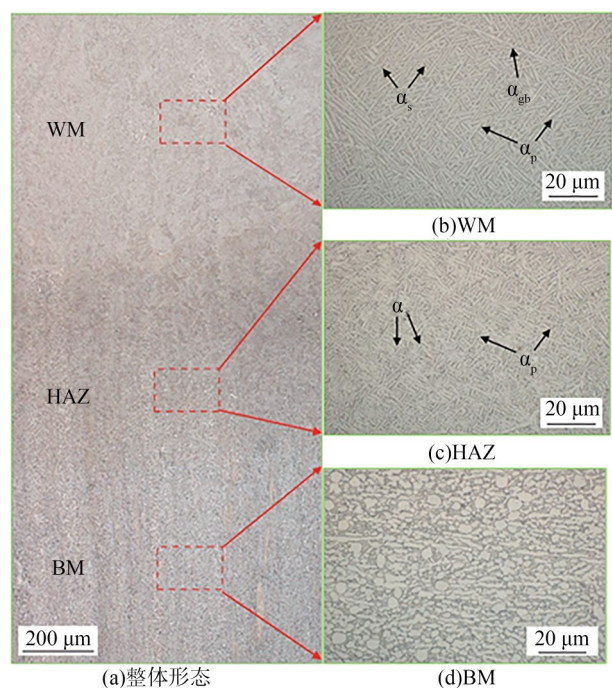
图 21 热处理焊接接头微观组织形貌^[63]

Fig. 21 Microstructure of welded joint with heat treatment

钛合金, 两种焊丝的焊缝显微组织存在差异: Ti-Al-V 药芯焊丝焊接接头的熔合区由大量块状多边形 β 相组成(见图 22a), TC4 药芯焊接接头的熔合区由

众多粗糙且取向各异的柱状枝晶组成(见图 22b)。两种焊丝接头的热影响区均以粗魏氏组织为主, 且 TC4 药芯焊接接头显微组织更粗, 但差异不及熔合区明显, 这主要与焊接过程的热效应有关。

表 5 钛合金母材和焊接接头的力学性能^[64]

Table 5 Mechanical Properties of Titanium Alloy Base Metal and Welded Joints

材料	抗拉强度 /MPa	拉伸率 /%	断裂位置	室温冲击性 /J
TC4	925	13.0	—	20
实心焊丝	924	11.0	焊缝	25
药芯焊丝	932	12.0	母材	28

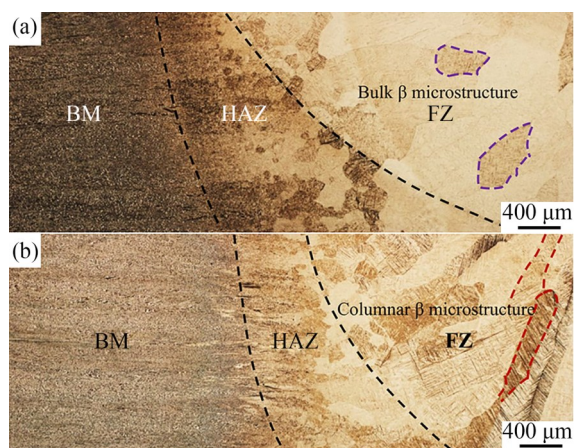
图 22 Ti-Al-V 系药芯焊丝与 TC4 药芯焊丝焊接接头微观结构的比较^[65]

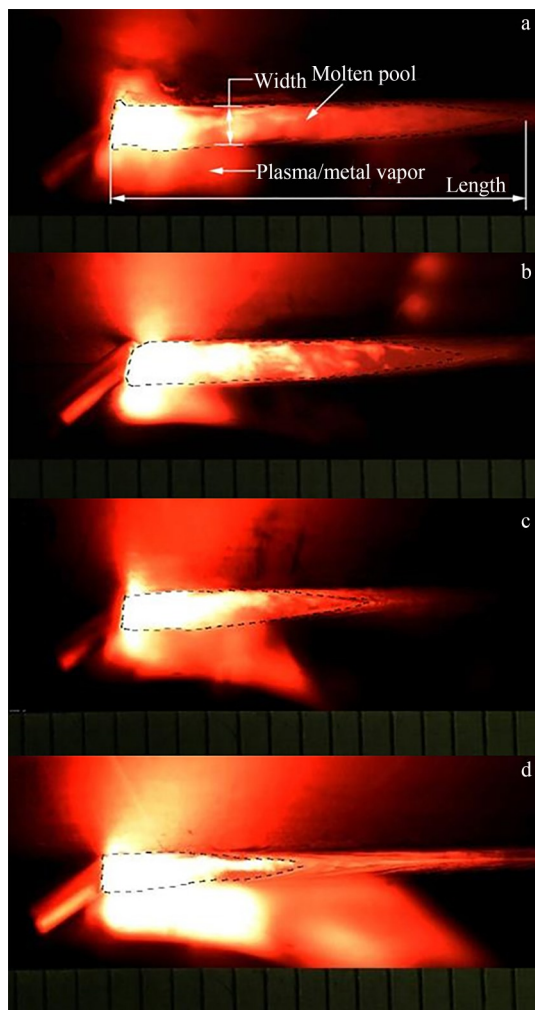
Fig. 22 Microstructure of flux-cored wire and cable wire welding joints comparison

4.2.2 冷却速率与热输入对焊缝组织的影响

文献[66]针对 TC4 钛合金激光填药芯焊丝焊接的研究表明, 焊缝区域分别以 0.5 °C/s、5 °C/s、20 °C/s 和 80 °C/s 的冷却速率冷却至 889.5 °C、864.2 °C、835.5 °C 和 818.9 °C 时, 相界处开始析出新相; 进一步冷却至 725.7 °C、749.3 °C、769.4 °C 和 789.2 °C 时, 新相完成转变。随着冷却速率的加快, 相变温度范围逐渐变窄, 且新相的片层间距随之减小。

部分学者研究了热输入对于钛合金 T 形接头激光填丝焊的影响。武鹏博^[67]等采用摆动激光填丝焊对 2 mm 厚的 TC4 钛合金 T 形接头焊接后发现, 随焊接热输入增加, 相变生成的 α' 马氏体数量增多, 显微硬度随之增大。Ma Xuyi^[68]等 TC4 钛合金 T 型接头双侧同步激光焊的研究显示, 热输入量影响熔池

动态行为和熔滴过渡过程,进而决定接头的成形效果与焊接质量。图23的高速摄影图像表明,热输入减小时,纺锤形熔池的宽度、长度及面积均减小,且长度缩减幅度大于宽度,这与激光功率降低及焊接速度提高相关。



(a) 28 J/mm; (b) 21 J/mm; (c) 16.8 J/mm; (d) 14 J/mm

图23 不同焊接热输入下焊接过程中熔池图像^[68]

Fig. 23 Images of molten pool behavior during welding process with different welding heat inputs

文献[69]使用填丝激光焊接技术对10 mm厚TC4钛合金的研究显示,随着激光焊接热输入逐渐增加,焊缝中心区域等轴晶区的平均晶粒尺寸及宽度逐渐增大;柱状晶区的晶粒倾斜角度逐渐趋于焊缝中心线正交;热影响区的宽度有所增加,但该区域内的晶粒未出现显著粗化。

4.2.3 激光摆动工艺对焊接质量的影响

文献[70]研究了激光摆动对TC4钛合金窄间

隙激光填丝焊缝成形和气孔率的影响,结果表明:光束不摆动时,焊缝表面不平整,横截面相对狭窄;光束摆动后,焊缝表面连续均匀,横截面拓宽;采用垂直或圆形摆动方式时,焊缝气孔数量相对较少,而不摆动或选择无穷形摆动方式时,气孔率相对较高;当摆幅设定为2 mm,摆动频率在100~200 Hz范围内时,焊缝未发现明显气孔。

文献[71]采用自研的Ti-Al-V-Mo系列钛合金药芯焊丝对TC4钛合金板进行窄间隙激光填丝焊接工艺试验,发现在激光功率4.0 kW、圆形摆动、摆动频率100 Hz、摆幅2 mm、焊接速度0.42 m/min、送丝速度0.6 m/min的工艺参数下,焊缝成形质量优异且表面无明显缺陷;当焊丝末端与液态熔池保持0 mm接触距离时,熔化金属通过液桥过渡方式实现向熔池的稳定、有序转移。

4.2.4 厚板钛合金激光填丝焊的应用

徐楷昕^[72]等采用窄间隙激光填丝焊接技术完成40 mm厚TC4钛合金的焊接,结果显示焊缝截面成形良好,未发现明显的未熔合或气孔等缺陷。

李峰^[73]等使用Ti-Al-V系列的钛基金属粉末药芯焊丝,采用激光填丝焊接对Ti64钛合金板材实施窄间隙焊接,研究了接头不同区域的微观组织结构及其形态特征。图24为焊缝区域(WM)的微观组织形态,其中图24a清晰展现了粗大的残余 β 晶界贯穿整个区域,长针状的组织结构密布在残余 β 晶界内部;图24b中存在三种不同的组织形态,即网篮状交织分布的短小 α' 马氏体、呈长针状从残余 β 晶界向外平行扩展生长的魏氏组织,以及在晶界处少量存在的晶界 α_{gb} 组织。

文献[74]对96 mm厚TC4钛合金进行激光填丝超窄间隙焊接,研究表明,焊缝整体形状类似钉子,且未发现气孔、裂纹及侧壁未熔合等焊接缺陷。图25为焊缝组织的透射电子显微镜(TEM)形貌。上部焊缝中,因冷却过程较为缓慢, α' 马氏体开始在邻近高温 β 晶粒边界区域生成并充分生长,形成宽度约0.4~0.5 μm 且相互平行排列的粗大 α' 马氏体束(见图25a);焊缝中部,在中等冷却速度下, α' 马氏体宽度变窄(约0.3~0.4 μm),且观察到少量孪晶结构(见图25b);下部焊缝,在较快冷却速度作用下, α' 马氏体显著细化,宽度范围约0.15~0.20 μm ;图25d中

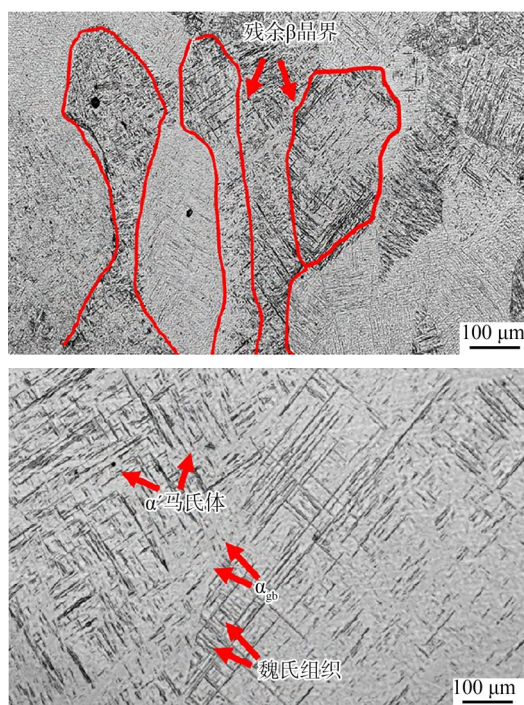
图24 焊缝区微观组织形貌^[73]

Fig. 24 Microstructure morphology of weld zone

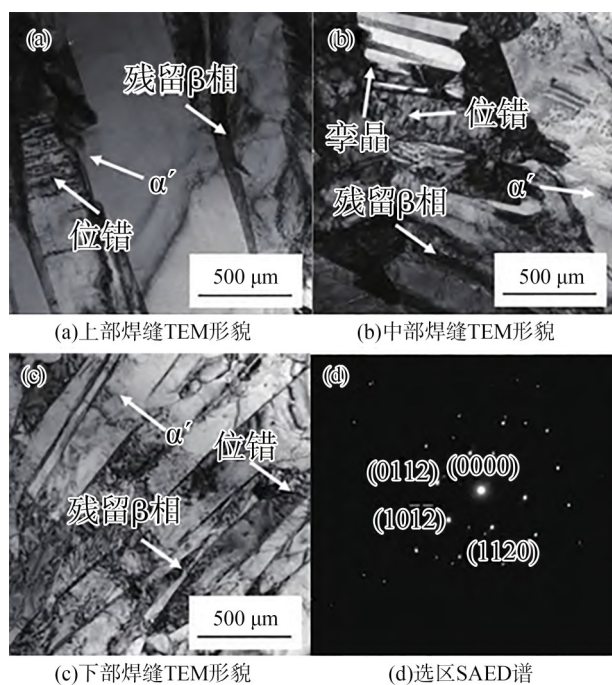
图25 焊缝组织TEM形貌^[74]

Fig. 25 TEM images of welded seam

通过电子衍射(SAED)技术观测到 α' 马氏体组织具有六方密排的结构特征(见图25c)。

综上,钛合金激光填丝焊接的研究表明,热处理可促使焊缝生成更多细小微观组织,提升接头力

学性能;冷却速率会影响接头组织中相的形成;药芯焊丝焊缝相比实心焊丝焊缝力学性能更优,其微观组织中含有更多 β 相;热输入增加会导致接头组织的晶体尺寸及宽度增大;焊接时采用激光束摆动可降低接头气孔率,其中垂直摆动和圆形摆动的气孔率下降更为明显。

4.3 激光-电弧复合焊接

激光-电弧复合焊接通过将激光与电弧两种热源耦合作用于同一熔池,实现了能量互补与工艺协同。依据激光束与电弧的相对位置关系,该技术可分为旁轴复合与同轴复合两大类。激光-电弧复合焊接融合了激光与电弧热源的优点,通过激光等离子体与电弧等离子体间的相互作用,有效弥补了单一热源时可能存在的局限性。相较于激光填丝焊,激光-电弧复合焊接技术对坡口的加工精度、装配的准确度以及焊缝对中的要求相对较低,且坡口间隙桥接能力显著增强。在钛合金焊接领域,激光-电弧复合焊接技术目前主要包括激光-TIG电弧复合焊接和激光-MIG电弧复合焊接两种工艺形式^[75]。图26分别为激光-TIG复合焊与激光-MIG复合焊的原理。

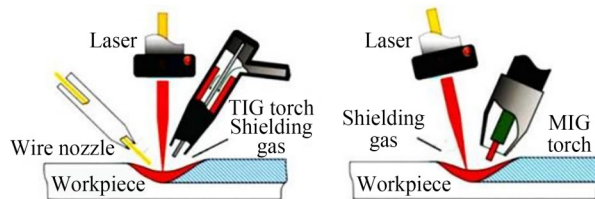
图26 激光-TIG复合焊、激光-MIG复合焊的原理^[70]

Fig. 26 Schematic diagrams of laser-TIG hybrid welding and Laser-MIG hybrid welding

4.3.1 钛合金激光-TIG复合焊接研究

激光-TIG复合焊接技术结合了激光与TIG电弧的优势,使得电弧稳定性得到明显提升,扩大了能量密度和热输入面积,增强了对焊缝间隙的适应性,有效提升了焊接能力;双热源降低了对高功率激光的依赖,从而减少了激光设备的资金投入。同时,激光-TIG复合焊接还提高了焊接效率,有助于降低生产成本^[76]。

许飞^[77]等的研究显示,在复合焊接中,焊接电流主要影响焊缝熔宽,激光功率则对焊缝熔深有明显作用,送丝速度则直接改变焊缝余高与熔深。当

焊接电流达到一个特定阈值时,焊缝表面飞溅得到有效抑制,该阈值与激光焊接的热输入量呈负相关。Hao Fan^[78]等观察到,电弧区熔池会周期性流动,且随电流增大,流动变得更加剧烈,促使电弧区晶粒细化(较激光区更细)并减少气孔。组织分析显示,激光区含较多 α 马氏体和较少 β 相,且 α 马氏体束间距较窄;随着电流的增加, β 相比比例逐渐增多,激光区和电弧区的平均硬度均呈下降趋势,其中激光区平均硬度值略高于电弧区且均匀性更优;接头抗拉强度先增大后减小。

有学者研究了保护气体成分对焊缝成形和性能影响。Shi^[79]等以TA15钛合金为对象,探究了保护气中 CO_2 含量对焊缝的作用。结果显示(见图27),随着电弧保护气体中 CO_2 含量升高,熔池表面氧化层(起保护作用)厚度逐渐增加;当 CO_2 含量超过2%时,氧化层深度不再增加,但氧化程度显著加深。

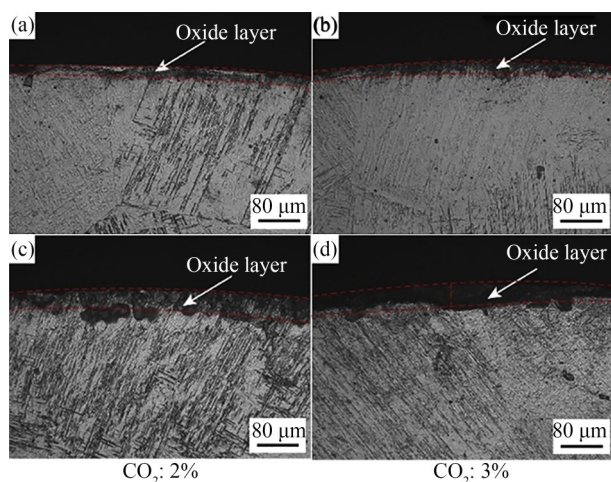
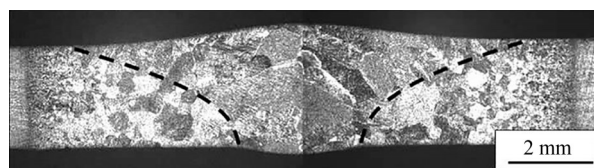


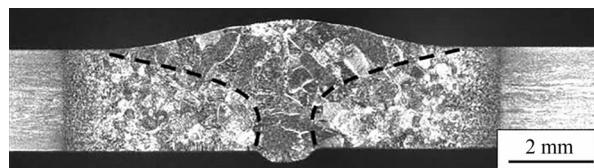
图27 不同 CO_2 含量的接头表面氧化层^[79]

Fig. 27 Oxidation layer on joint surface with different CO_2 additions

有学者探究了钛合金在激光-TIG复合焊接过程中保护状态对焊缝质量的影响。文献[80]对比了2.5 mm厚的TA15钛合金的激光-TIG复合焊与单TIG焊工艺。结果表明:在实现全熔透的前提下,复合焊较单TIG焊具有更高的焊接速度、更低的热输入量,且焊缝及热影响区范围更窄;相同保护条件下,复合焊接头的强度、塑性及抗疲劳性能均优于单TIG焊接头。焊缝横截面形貌对比显示(见图28),复合焊的焊缝宽度显著小于单TIG焊,其焊缝晶粒沿垂直于熔合线方向向焊缝上表面中心延伸,形成柱状晶,而热影响区以等轴晶为主,且复合焊



(a)熔透条件下的TIG焊缝



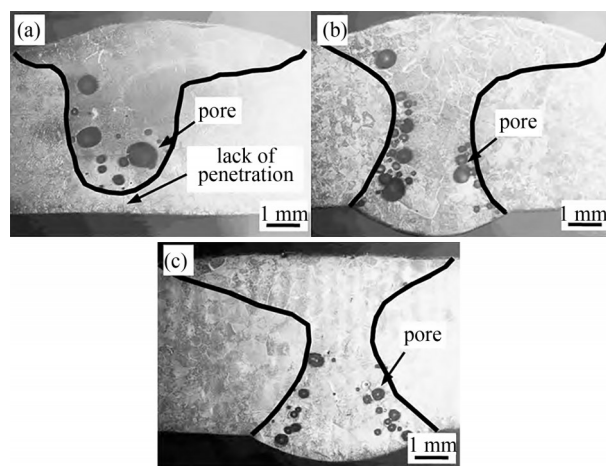
(b)熔透条件下的激光-TIG复合焊缝

图28 焊接接头横截面形貌^[81]

Fig. 28 Cross section of joints

接头的焊缝及热影响区的晶粒尺寸均明显细化。

有学者研究了激光功率对焊接质量的影响。在优化参数下,激光-TIG复合焊可获得表面质量优异、无咬边及焊瘤等明显缺陷的TC4钛合金高质量焊接接头^[81]。如图29所示,随着激光功率的增加,焊缝横截面由“蘑菇形”逐渐转变为“沙漏形”,内部气孔面积减小且集中于焊缝底部;但过高激光功率会导致激光束附近熔池剧烈流动,凝固后易在焊缝



(a) $P=1400\text{ W}$; (b) $P=1500\text{ W}$; (c) $P=1600\text{ W}$

图29 不同激光功率下焊接接头横截面形貌^[81]

Fig. 29 Illustrates the cross-sectional morphology of welded joints under different laser powers

表面中心形成凹坑,影响成形质量。

综上,钛合金激光-TIG复合焊的焊接质量明显好于钛合金单激光或者单TIG焊;保护气中活性气体的成分会明显影响钛合金的焊接质量;激光功率的增加能明显减少气孔率缩减气孔大小,并且还能减小焊缝微观晶体的尺寸。但同时,激光束功率的

增加会导致熔池在激光束周围产生剧烈流动,在凝固后会导致焊缝表面的中心处出现凹坑,影响焊接的质量。

4.3.2 钛合金激光-MIG 复合焊接研究

激光-MIG 复合焊结合了激光高能量密度和 MIG 电弧稳定性的双重优势,相较单激光焊或 MIG 焊,其熔化效率更高,焊接周期更短,且能有效减少焊接缺陷,显著提升焊缝质量^[1]。相关研究主要集中于组织演化、性能优化及工艺参数影响规律等方面。

张婧^[82]对 TC4 钛合金激光-MIG 复合焊接头的微观组织分析显示(见图 30),焊缝区域晶粒尺寸最大,这与焊丝在双热源作用下快速熔化-凝固过程中溶质扩散不充分密切相关;从焊缝到熔合区、热影响区再到母材,晶粒尺寸逐渐下降。拉伸断口形貌(见图 31)显示,可以观察到其周围被众多撕裂唇所环绕,韧窝深且分布均匀,展现出微孔聚集所导致的韧性断裂的典型特征。

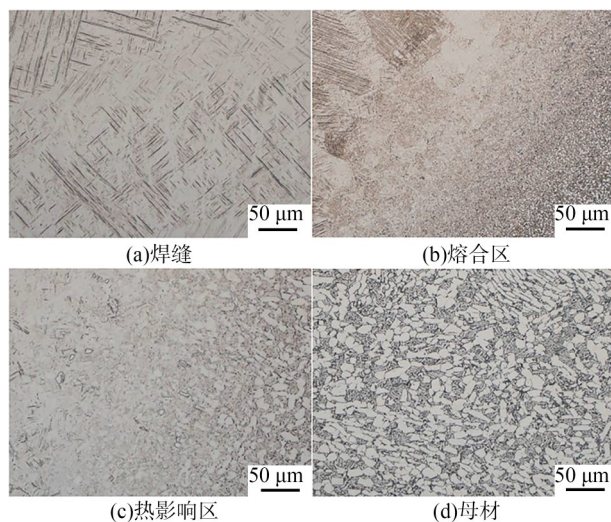


图 30 焊接接头微观组织形貌^[82]

Fig. 30 Microstructural morphology of welded joint

Su^[83]等针对 TC4 钛合金厚板激光-MIG 复合焊的研究表明,焊缝中形成了 α' 相和 β 相。线能量(E)对片状 α' 马氏体的形态影响显著,如图 32 所示,线能量从 2.2×10^3 J/cm 增至 5.5×10^3 J/cm, α' 马氏体在高温相变区的停留时间延长,导致其厚度增加,且 α' 片晶内部出现明显的位错缠结现象。

Luo^[84]等采用激光-MIG 复合焊对 12 mm 厚 TC4 钛合金进行焊接,工艺参数见表 6,发现接头组

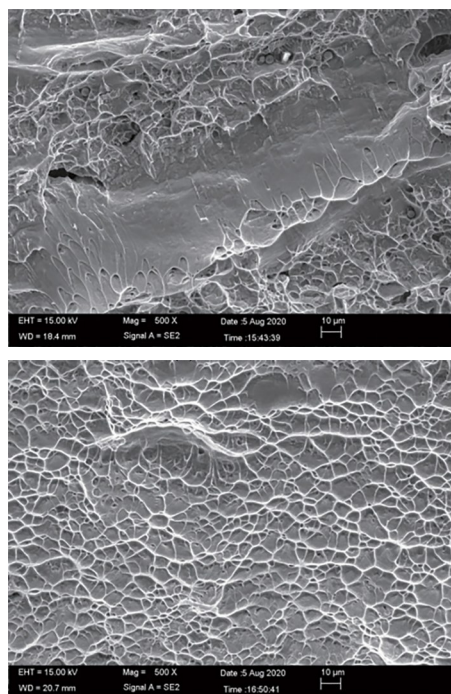
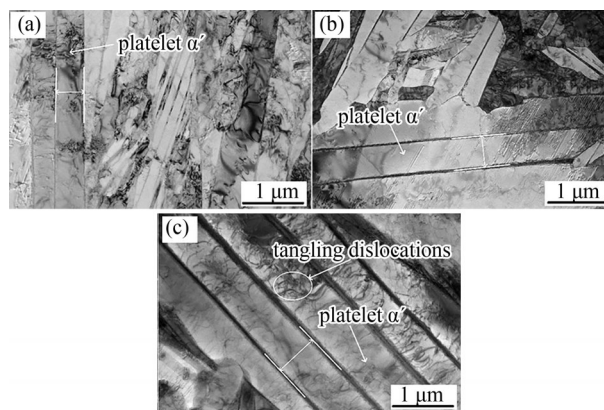


图 31 试样拉伸断口形貌^[82]

Fig. 31 Morphology of tensile fracture surface of the specimen



(a) 2.2×10^3 J/cm; (b) 3.4×10^3 J/cm; (c) 5.5×10^3 J/cm

图 32 不同线能量下片状 α' 马氏体的 TEM 图像^[83]

Fig. 32 TEM bright field images of platelet α' martensite at different heat inputs

织以 α/α' 相为主,其间分布少量 β 相,形成以针状 α' 马氏体为特征的网篮结构。冲击韧性测试结果见表 7,焊缝金属的平均冲击韧性 (30.6 J) 略低于热影响区 (33.3 J) 和母材 (33.5 J),约为母材的 91.3%。

有学者研究了激光束离焦量对钛合金激光复合焊接接头气孔形成机制的影响。Zhenxing He^[85]对 5 mm 厚 TC4 钛合金的研究表明,焊缝气孔主要为工艺性气孔,其形成与小孔稳定性相关。当离焦量为 +2 mm、0 mm、-2 mm 和 -4 mm 时,小孔稳定性

表6 TC4钛合金激光-MIG复合焊接工艺参数^[84]

Table 6 Process parameters for Laser-MIG hybrid welding of TC4 titanium alloy

编号	焊道	激光功率 /kW	焊接速度 /(mm·s ⁻¹)	送丝速度 /(m·min ⁻¹)
1	打底层	4 500	10	10
2	填充层	4 000	10	9
3	盖面层	6 000	16	15

表7 不同位置冲击韧性试验结果(J)^[84]

Table 7 Results of impact toughness tests at different locations (J)

编号	焊缝	热影响区	母材
1	33.1	34.0	34.0
2	31.0	30.7	33.0
3	27.8	35.2	33.5
平均值	30.6	33.3	33.5
偏差	2.18	1.90	0.41

较差;当离焦量为-2 mm时,孔隙率最高(4.21%),且小孔仅在根部出现塌陷现象;当离焦量为+4 mm和-6 mm时,孔隙率降低超过80%,小孔稳定;离焦量为+6 mm时,焊缝中无气孔产生。

有学者研究了激光-电弧复合焊接头在不同区域的疲劳裂纹扩展行为以及微观组织与裂纹扩展之间的相互作用。王洪潇^[86]等对12 mm厚TC4钛合金进行了焊接试验,结果表明,焊缝区裂纹尖端附近具有更高的几何位错密度,位错在马氏体边界聚集,导致裂纹沿晶界发生偏转,阻碍了裂纹的扩展;焊缝区组织间的取向差异较大,导致其裂纹扩展临界值较高,因此焊缝区中存在的大量大角度晶界和高位错密度是焊缝区具有较高裂纹扩展抗性的主要原因。

有学者研究了表面残余应力在激光-MIG复合焊接接头的分布。充文涛^[87]等针对TA12钛合金激光-MIG复合焊接头的残余应力分布研究表明,在接头的纵截面上(距熔合线3 mm处),横向应力整体呈压应力状态,最大值(-767.6 MPa)出现在起弧点;接头中间区域的横向与纵向应力均较稳定,而起弧和收弧区域的应力波动显著。在垂直于焊接方向的横截面上,横向应力和纵向应力均在距离熔合线6 mm处达到压应力峰值,分别为-376.8 MPa和-225.6 MPa;远离焊缝的边缘区域,横向应力则基本维持在零应力状态附近波动,而纵向应力则在-100 MPa压应力范围内波动。

综上所述,由于激光束和MIG电弧的相互作用,激光-MIG复合焊的焊缝成形美观,熔深大且焊接变形小;对钛合金材料的适应性强,可焊接不同厚度、复杂形状的构件,且能适应多种复杂工况;在焊接过程中,激光束和MIG电弧的相互作用能够稳定电弧形态,提升焊接过程稳定性;通过优化激光离焦量等参数可有效降低焊接接头气孔率。此外,该技术成本相对较低,已成为钛合金焊接领域的重要研究方向之一。

5 结论

本文系统梳理了钛合金熔化焊技术的研究现状,重点分析了气体保护焊(TIG焊、MIG焊)与激光焊(单激光焊、激光填丝焊、激光-电弧复合焊)的工艺特性、微观组织及性能优化,主要结论如下:

(1)TIG焊因电弧稳定、焊接变形小、焊接飞溅少的优势,适用于薄壁钛合金构件的精密连接,但熔敷效率较低,在厚板焊接中需依赖窄间隙、磁控等改进工艺;MIG焊因熔敷效率较高、焊接填充层数少、焊接效率高、成本低等优点,和飞溅大、焊缝成形效果差等缺点,更适用于大坡口、大厚度钛合金的焊接;单激光焊接不需要焊丝,节省材料,适用于薄板(<6 mm)的高精度对接,随着大功率激光器的出现以及窄间隙、超窄间隙焊接技术的发展,单激光焊接也开始被用于大厚度钛合金的焊接;激光填丝焊接由于加入了焊丝,可以进行多道焊接,并可通过调控焊材化学成分等优化激光填丝焊接质量,因此激光填丝焊接比单激光焊接有着更多的使用场景;激光-电弧复合焊(激光-TIG、激光-MIG)融合双热源优势,降低了对坡口加工精度、装配精度以及焊缝对中度的严苛要求,并且显著提升了坡口间隙的桥接效能。

(2)钛合金电弧焊及激光焊的发展趋势:①控制与预防焊接缺陷。钛合金焊接过程中易产生气孔、裂纹等缺陷,如何有效控制和预防这些缺陷是未来的研究重点之一。②优化焊接接头性能。通过优化焊接工艺、改进焊接材料等方法,进一步提高钛合金焊接接头的力学性能。③研发新型焊接材料。针对钛合金的焊接难点开发新的焊接材料,

如专用的钛合金焊丝、焊剂等,以减少焊接缺陷的产生。④自动化与智能化:随着人工智能技术的不断发展,钛合金焊接技术将向自动化、智能化方向迈进,进一步提高焊接质量和效率。

参考文献:

- [1] 刘自刚,代锋先,陆刚,等.钛合金激光焊研究现状与展望[J].材料导报,2023,37(S01):346-351.
LIU Z G, DAI F, LU G, et al. Research status and prospects of laser welding of titanium alloys[J]. Materials Review, 2023, 37(S01): 346-351.
- [2] 刘亚光.Ti-Zr-Mo基金属组织及性能研究[D].辽宁:沈阳航空航天大学,2023.
LIU Y G. Study on the microstructure and properties of Ti-Zr-Mo-Based alloys [D]. Liaoning: Shenyang Aerospace University, 2023.
- [3] 姜贯涛,孙建科,杨学东,等.A1、Mo含量对铸造钛合金力学性能的影响[J].材料开发与应用,2003,18(04):32-35.
LOU G T, SUN J K, YANG X D, et al. Effects of Al and Mo on mechanical properties of cast titanium alloys, Dev[J]. Appl. Mater, 2003, 18(4): 32-35.
- [4] 葛鹏,吴欢,赵永庆.Mo、V、Cr对钛合金 β 相的合金化效应[J].中国材料进展,2016,35(10):795-798+794.
GE P, WU H, ZHAO Y Q. Alloying Effects of Mo, V, and Cr on the β phase of titanium alloys[J]. China Materials Progress, 2016, 35(10): 795-798+794.
- [5] 卢金文,葛鹏,赵永庆. Mo对Ti-Mo系合金显微组织的影响及其强化效应[J].材料工程,2013(09):1-5.
LU J W, GE P, ZHAO Y Q. Effect of Mo on the microstructure and strengthening of Ti-Mo alloys[J]. Materials Engineering, 2013(09): 1-5.
- [6] 张捷频,闵新华.杂质元素N、O、Fe对TA15钛合金性能和组织的影响[J].材料开发与应用,2013,28(02):83-86.
ZHANG J P, MIN X H. Effects of impurity elements N, O, and Fe on the properties and microstructure of TA15 titanium alloy[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(02): 83-86.
- [7] Zhihao D, Chunxu W, Qing L, et al. The superplastic forming/diffusion bonding of TA7 titanium alloy for manufacturing hollow structure with stiffeners[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 385-394.
- [8] Cheng Z, Abd El-Aty A, Zhang R, et al. Finite element modeling and experimental investigation on manufacturing TA18 alloy pipes via hot free bending forming technology: Forming characteristics and process optimization[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 5225-5240.
- [9] Cui S, Shi Y, Zhang C. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy K-TIG welded joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 416-425.
- [10] 席明哲,吕超,吴贞号,等.连续点式锻压激光快速成形TC11钛合金的组织力学性能[J].金属学报,2017,53(9):1065-1074.
XI M Z, LV C, WU Z H, et al. Microstructures and mechanical properties of TC11 titanium alloy formed by laser rapid forming and its combination with consecutive point-mode forging[J]. Acta Metall Sin, 2017, 53(9): 1065-1074.
- [11] Qu D, Dan L I U, Wang X, et al. Corrosion and wear properties of TB2 titanium alloy borided by pack boriding with La₂O₃ [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(3): 868-881.
- [12] Chen L, Chen H, Wu C, et al. Experimental and numerical studies on the formability of TB5 titanium sheet in rubber cold forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 2255-2264.
- [13] 隋欣梦,胡记,张林,等.钛合金表面抗高温氧化涂层的研究进展[J].表面技术,2020,49(10):21-38.
SUI X M, HU J, ZHANG L, et al. Research progress on high temperature oxidation resistance coatings on titanium alloy surfaces[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 21-38.
- [14] Song B, Xue Y, Ni J, et al. Role of intermediate phases on microstructures, wear and corrosion resistance in new-developed ($\alpha + \beta$) titanium alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024: 176575.
- [15] Vončina M, Tisu R, Medved J. Oxidation stability of various Ti-alloys [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 129: 117-122.
- [16] 许明方,陈玉华,陈伟,等.Ti-6Al-4V组织相变研究进展[J].精密成形工程,2020,12(2):93-97.
XU M F, CHEN Y H, CHEN W, et al. Research progress of Ti-6Al-4V phase transition [J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2020, 12(2): 93-97.
- [17] 刘田雨,朱智浩,张爽,等.基于 α' 组织设计适于激光立体成形的新型高塑性Ti-4.13Al-9.36V合金[J].材料研究学报,2021,35(10):741-751.
LIU T Y, ZHU Z H, ZHANG S, et al. A Novel Ti-4.13

- Al-9.36 V Alloy of High Ductility Designed on Base of α'' -Microstructure for Laser Solid Forming [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35 (10): 741-751.
- [18] Cotton J D, Briggs R D, Boyer R R, et al. State of the a-rtin beta titanium alloys for airframe applications[J]. Jom, 2015, 67(6): 1281-1303.
- [19] 黄瑞生, 方乃文, 武鹏博, 等. 厚壁钛合金熔化焊接技术研究现状[J]. 电焊机, 2022, 52(6): 10-24.
HUANG R S, FANG N W, WU P B, et al. Research status of thick plate titanium alloy fusion welding technology [J]. Electric Welding Machine, 2022, 6 (52): 10-24.
- [20] 王鹏, 马蕊, 魏永胜, 等. 钛合金结构件激光焊典型焊接缺陷及其控制技术[J]. 焊接技术, 2022, 51(08): 151-155.
WANG P, MA R, WEI Y S, et al. Typical welding defects and Control Techniques for Laser Welding of Titanium Alloy Structural Components [J]. Welding Technology, 2022, 51(08): 151-155.
- [21] 肖伟星. 船用钛合金材料焊接中的常见问题与对策[J]. 中国设备工程, 2019(2): 188-189.
XIAO W X. Common Problems and Countermeasures in Welding of Marine Titanium Alloy Materials [J]. China Plant Engineering, 2019(2): 188-189.
- [22] Wang F, Williams S, Rush M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2011, 57: 597-603.
- [23] Fu C, Wang Y, He S, et al. Microstructural characterization and mechanical properties of TIG weld joint made by forged Ti-4Al-2V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 821: 141604.
- [24] 周秉文, 刘文博, 景栋, 等. Ti/TiAl3 叠层复合材料 TIG 焊接头组织与性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4579-4585.
ZHOU B W, LIU W B, JING D, et al. Microstructure and properties of TIG welding joint of Ti/TiAl3 Laminated Composites [J]. RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING, 2022, 51(12): 4579-4585.
- [25] Iltaf A, Khan F N, Shehbaz T, et al. Influence of filler material on the microstructure, mechanical properties, and residual stresses in tungsten inert gas welded Ti-5Al-2.5 Sn alloy joints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2021, 235 (8): 1952-1966.
- [26] 闫文青, 吕肖元, 杨帅, 等. 氟化物钛药芯焊丝 TIG 焊接熔深研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(5): 134-136.
YAN W Q, LV X Y, YANG S, et al. Study on Penetration Depth of Fluoride-Titanium Flux-Cored TIG Welding Wire [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (5): 134-136.
- [27] 史倩茹, 吴伟刚, 张敏. 坡口形式对钛/钢复合板对接接头组织及性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2019(1): 51-55.
SHI Q R, WU W G, ZHANG M. Influences of groove type on microstructure and properties of butt joints of titanium/steel clad plate Plate Butt Joints [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019(1): 51-55.
- [28] Szwajka K, Zielińska-Szwajka J, Trzepieciński T. The Influence of the Shielding-Gas Flow Rate on the Mechanical Properties of TIG-Welded Butt Joints of Commercially Pure Grade 1 Titanium [J]. Materials, 2024, 17(5): 1217.
- [29] 占爱文. K-TIG 焊接熔池和锁孔视觉检测与熔透状态识别的研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2021.
ZHAN A W. Research on Visual Detection of Molten Pool and Keyhole as well as Penetration State Recognition in K-TIG Welding [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2021.
- [30] Li Y, Li Y B, Liu Q, et al. Development and numerical simulation of heat source for Keyhole tungsten Inert gas (K-TIG) welding of titanium alloy [J]. Rare Metal Material and Engineering, 2024, 53(03): 692-700.
- [31] Du J, Liu H, Wang F, et al. Effects of heat input on microstructure evolution, mechanical and corrosion properties of TC4 alloy by keyhole TIG welding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 5266-5277.
- [32] Ou P, Cao Z, Hai M, et al. Microstructure and mechanical properties of K-TIG welded dissimilar joints between TC4 and TA17 titanium alloys [J]. Materials Characterization, 2023, 196: 112644.
- [33] 郑喜刚, 赵勇, 蒋成禹. 钛合金窄间隙 TIG 焊技术研究[J]. 钛工业进展, 2006, 23(5): 40-43.
ZHEN X G, ZHAO Y, JIANG C Y. Research on narrow g-ap TIG welding technology of titanium alloys [J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(5): 40-43.
- [34] 李双, 李锋, 徐望辉, 等. 焊接电流对 TC4 钛合金窄间

- 隙TIG焊缝成形及组织的影响[J].热加工工艺,2017(23):35-38.
- LI S, LI F, XU W H, et al. Effect of welding current on weld formation and microstructure of TC4 titanium alloy narrow gap TIG weld [J]. Hot Working Technology, 2017(23):35-38.
- [35] 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.
- [36] 姜云禄,余陈,陈静,等.钛合金窄间隙TIG焊试板热处理前后表面残余应力研究[J].航空制造技术,2018,61(08):62-66.
- JIANG Y L, YU C, CHEN J, et al. Study on Surface Residual Stress of Titanium Alloy Narrow Gap TIG Welded Specimens Before and After Heat Treatment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(08):62-66.
- [37] 胡金亮,曾才有,余陈,等.厚板钛合金磁控窄间隙TIG焊接技术发展现状[J].精密成形工程,2020,12(4):10-20.
- HU J L, ZENG C Y, YU C, et al. Progress in Magnetically controlled Narrow-gap TIG Welding of Thick-plate Titanium Alloys [J]. Journal of Net shape Forming Engineering, 2020, 12(4):10-20.
- [38] 胡金亮,胡永俊,曾才有,等.大厚度TA17钛合金磁控窄间隙TIG焊接接头组织和力学性能[J].热加工工艺,2023,52(9):42-46.
- HU J, HU Y, ZENG C, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of TA17 Ti Alloy by Magnetically Controlled Narrow-Gap TIG Welding [J]. Hot Work. Technol., 2023, 52:42-50.
- [39] Ding L, Qin B, Ge 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.
- [40] 杨旭光,廖志谦,刘希林,等.大厚度钛合金焊接技术的现状与发展[J].焊接技术,2024,53(02):5.11.
- YANG X G, LIAO Z Q, LIU X L, et al. Current status and development of welding technology of large thickness titanium alloy [J]. Welding Technology, 2024, 53(02):5-11.
- [41] 牟刚,华学明,徐小波,等.8 mm厚TC4钛合金TIG、MIG焊接工艺及性能对比研究[J].电焊机,2020,50(04):70-74+138-139.
- MOU G, HUA X M. Comparative study on welding procedure and performance of 8 mm thick TC4 titanium alloy with TIG and MIG [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(4):70-74.
- [42] 张龙,陈东高,张迎迎,等.低成本TC4钛合金单丝MIG焊工艺与性能研究[J].兵器材料科学与工程,2021,44(01):93-97.
- ZHANG L, CHEN D G, ZHANG Y Y, et al. Single wire MIG welding technology and properties of low-cost TC4 titanium alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(01):93-97.
- [43] 张龙,李清波,戴宇,等.TC4钛合金单丝MIG接头疲劳损伤行为研究[J].钢铁钒钛,2022,43(02):62-67.
- ZHANG L, LI Q B, DAI Y, et al. A study on fatigue damage behavior of single-wire MIG welding joint for TC4 titanium alloy [J]. Iron & Steel, Vanadium & Titanium, 2022, 43(02):62-67.
- [44] 何逸凡,陈东高,张龙,等.TC4钛合金MIG焊接接头热处理后组织性能研究[J].钢铁钒钛,2021,42(6):164-170.
- HE Y F, CHEN D G, ZHANG L, et al. Research on microstructure and properties of TC4 titanium alloy MIG welded joints after heat treatment [J]. Iron & Steel Vanadium & Titanium, 2021, 42(6):164-170.
- [45] 何逸凡,陈东高,王大锋,等.焊接电流对TC4钛合金MIG焊熔滴过渡的影响[J/OL].钢铁钒钛,1-10 [2024-10-08].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1245.tf.20240731.1829.002.html>.
- HE Y F, CHEN D G, WANG D F, et al. Effect of welding current on droplet transition in MIG welding of TC4 titanium alloy [J/OL]. Iron & Steel Vanadium & Titanium, 1-10 [2024-10-08].
- [46] 刘李宾,魏守征,王建宏,等.高速超威弧MIG焊下TC4/5A06接头界面组织特性[J].焊接学报,2023,44(11):80-87.
- LIU L, WEI S, WANG J, et al. Interfacial microstructure of TC4/5A06 Al joint using high speed force arc MIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(11):80-87.
- [47] Jia C, Sun G, Ren B, et al. The variation law and mechanism of titanium alloy MIG welding process under the synergistic effect of coaxial dual channel gas path [J]. Welding in the World, 2024:1-20.
- [48] Cheng Z, Huang J, Ye Z, et al. Butt brazing of titanium alloys/stainless steel plates by MIG-TIG double-sided

- arc welding process with copper filler metal[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 1566–1570.
- [49] 黄坚, 李铸国, 唐新华. 中厚板的高功率激光焊接[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 26–29.
HUANG J, LI Z G, TANG X H. High-Power Laser Welding of Plate[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(2): 26–29.
- [50] Xu P, Li L, Zhang C S. Microstructure characterization of laser welded Ti–6Al–4V fusion zones[J]. Materials Characterization, 2014, 87: 179–185.
- [51] 张颖云, 朱增辉, 刘江哲, 等. 1.2 mm厚 TC4 钛合金薄板激光焊工艺研究[J]. 应用激光, 2019(4): 596–601.
ZHANG Y Y, ZHU Z, LIU J, et al. Research on laser welding of 1.2 mm thick TC4 titanium alloy[J]. Applied Laser, 2019, 39: 596–601.
- [52] 侯继军, 董俊慧, 白雪宇, 等. Na_2SiF_6 活性激光焊接 TC4 钛合金焊缝成形和组织[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 67–72.
HOU J J, DONG J H, BAI X Y, et al. Weld Formation and Microstructure of TC4 Titanium Alloy by Na_2SiF_6 -Activated Laser Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 67–72.
- [53] Liang J, Liu Z, Li X, et al. Microstructure and mechanical properties of 1 mm thin plate TC4 titanium alloy joint by ring laser welding[J]. Materials Research Express, 2024, 11(9): 096501.
- [54] Wu Y, Mao Y, Fu L, et al. Dual laser-beam synchronous self-fusion welding of Ti–6Al–4V titanium alloys T-joints based on prefabricated welding materials[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 2560–2576.
- [55] Ren L, Zhang Q B, Lei X W, et al. Effect of Laser Heat Input on Microstructure and Fatigue Behavior of TC17 Titanium Alloy Laser Welded Joint[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(07): 1836–1844. DOI: 10.12442/j.issn.1002-185X.20240084.
- [56] Chen C, Li L, Zhang M, et al. Study on laser transmission welding technology of TC4 titanium alloy and high-borosilicate glass[J]. Materials, 2024, 17(17): 4371.
- [57] 田德勇. 中厚板 TC4 钛合金激光焊接微观组织与缺陷研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2020.
TIAN D Y. Study on the microstructure and defect in the laser welded joint of medium thickness TC4 alloy [D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [58] 孟圣昊, 司昌健, 任逸群, 等. 中厚板 TC4 钛合金真空环境激光焊接特性[J]. 焊接学报, 2021, 42(8): 40–47+74.
MENG S H, SI C J, REN Y Q, et al. Characteristics of laser welding of medium-thickness TC4 titanium alloy in vacuum environment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(8): 40–47+74.
- [59] 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.
- [60] Wang C, Xu N, Zhang G, et al. Effect of heat treatment on microstructures and properties of vacuum laser welding Ti–6Al–4V titanium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 6309–6320.
- [61] Nai W F, Rui S H, L W M, et al. Effect of Filler Metal on Microstructure and Properties of Titanium Alloy Laser Welding Joints with Filler Wire[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(5): 1725–1736.
- [62] 周珍珍, 武鹏博, 刘孔丰, 等. 《大厚度钛合金窄间隙激光填丝焊接推荐工艺规范》团体标准制定概述[J]. 电焊机, 2022, 52(09): 45–52.
ZHOU Z Z, WU P B, LIU K F, et al. Overview of “Recommended Process Specification for Narrow-gap Laser Welding with of Large Thickness Titanium Alloy” Group Standards[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(09): 45–52.
- [63] FANG N, HUANG R, WU P, et al. Study on microstructure and properties of laser flux-cored wire joint of titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(3): 61–69.
- [64] 方乃文, 黄瑞生, 龙伟民. 填充金属对 TC4 钛合金激光填丝焊接接头组织性能影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(05): 1725–1736.
FANG N W, HUANG R S, LONG W M, et al. Effect of filler metal on microstructure and properties of titanium alloy laser welding joints with filler wire[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(5): 1725–1736.
- [65] Sun L, Wang M, Huang L, et al. Comparative study on laser welding thick-walled TC4 titanium alloy with flux-cored wire and cable Wire[J]. Materials, 2023, 16(4): 1509.
- [66] 方乃文, 郭二军, 徐锴. 钛合金激光填丝焊缝晶粒生

- 长及相变原位观察[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1665-1672.
- FANG N W, GUO E J, XU K, et al. In-situ observation of grain growth and phase transformation in laser welding of titanium alloy with filler wire[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1665-1672.
- [67] 武鹏博, 徐锴, 黄瑞生, 等. 薄壁钛合金T形接头摆动激光填丝焊组织与性能[J]. 兵工学报, 2023, 44(4): 1015.
- WU P, XU K, HUANG R, et al. Microstructure and properties of laser oscillating welding with filler wire of thin wall titanium alloy T-joints[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(4): 1015.
- [68] Ma X, Gong S, Zhang J, et al. Formation, microstructure and mechanical properties of double-sided laser beam welded Ti-6Al-4V T-joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 729-735.
- [69] Fang N, Guo E, Huang R, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of TC4 titanium alloy ultra-narrow gap welded joint by laser welding with filler wire[J]. Materials Research Express, 2021, 8(1): 016511.
- [70] 徐楷昕, 雷振, 黄瑞生, 等. 摆动工艺对钛合金窄间隙激光填丝焊缝成形及气孔率的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602111.
- XU K X, LEI Z, HUANG R S, et al. Effects of oscillation parameters on weld formation and porosity of titanium alloy narrow-gap laser wire filling welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602111.
- [71] 方乃文, 黄瑞生, 武鹏博, 等. 钛合金窄间隙激光填丝焊接工艺及接头组织性能分析[J]. 材料导报, 2023, 37(10): 22010253-1.
- FANG N W, HUANG R S, WU P B. Study on welding process and microstructure and properties of titanium alloy narrow gap laser filler wire[J]. Mater. Rep, 2023, 816: 152626.
- [72] 徐楷昕, 雷振, 黄瑞生, 等. 40 mm厚TC4钛合金窄间隙激光填丝焊接接头组织及性能[J]. 材料导报, 2022, 36(2): 20120180-6.
- XU K X, LEI Z, HUANG R S, et al. Microstructure and Properties of 40 mm-thick TC4 Titanium Alloy Welded Joint by Narrow-gap Laser Welding with Filler Wire[J]. Materials Review, 2022, 36(2): 20120180-6.
- [73] 李峰, 夏希玮, 杜勇, 等. Ti64钛合金窄间隙激光填丝焊接接头组织性能[J]. 船舶工程, 2023, 45(09): 135-140.
- LI F, XIA X W, DU Y, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti64 titanium alloy narrow gap laser welding with filler wire[J]. Ship Engineering, 2023, 45(09): 135-140.
- [74] FANG N W, HUANG R S, XIE J L. Study on properties and microstructures of large thickness TC4 Titanium alloy welded joint by Ultra-Narrow gap laser welding using filler wire[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(6): 25-34.
- [75] 魏玉顺, 马青军, 武鹏博, 等. TC4钛合金激光焊接技术研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 55-66.
- WEI Y S, MA Q J, WU P B, et al. Research progress in laser welding technology of TC4 titanium alloy[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53: 55-66.
- [76] 熊俊, 付忠奎, 鄢江武, 等. 中厚度TC4激光-TIG复合焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 226-229.
- XIONG J, FU Z K, YAN J W, et al. Study on Laser-TIG Hybrid Welding Process for Medium-thickness TC4 Alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(15): 226-229.
- [77] 许飞, 何恩光, 陈俐, 等. 钛合金扫描振镜激光-TIG复合焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(5): 855-859.
- XU F, HE E G, CHEN L, et al. Research on scanning galvanometer Laser-TIG hybrid welding process of titanium alloy[J]. Applied Laser, 2020, 40(5): 855-859.
- [78] Fan H, Zhou P, Li J, et al. Microstructure and mechanical properties of arc zone and laser zone of TC4 Titanium alloy Laser-TIG hybrid welded joint[J]. Metals, 2022, 12(11): 1854.
- [79] Shi J, Song G, Chi J. Effect of active gas on weld appearance and performance in laser-TIG hybrid welded titanium alloy[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(1): 47-53.
- [80] 史吉鹏, 王红阳, 杨林波, 等. 钛合金激光-TIG复合焊接保护状态对焊缝成形及性能影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 61-65.
- SHI J P, WANG H Y, YANG L B, et al. Effect of protection condition on forming and performance of weld in titanium alloy laser-TIG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 61-65.
- [81] 樊浩, 崔珊, 陈文静, 等. 激光功率对TC4钛合金激光-TIG复合焊焊缝成形与组织的影响[J]. 应用激光, 2023, 43(8): 48-54.
- FAN H, CUI S, CHEN W J, et al. Study on weld formation and microstructure of TC4 titanium alloy Laser-