

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.04

钛合金激光深熔焊接研究现状与展望

李志杰^{1,2}, 袁亮文^{1,2*}, 刘万存², 赵佳²

1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024
2. 一重集团大连核电石化有限公司, 辽宁 大连 116113

摘要: 钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性、生物相容性等特点, 广泛应用于航空航天、生物医疗及海洋工程等高端制造领域。激光深熔焊接作为钛合金高效精密连接的重要手段, 具有焊接速度快、热影响区小、焊缝成形质量高等优点。然而, 在焊接过程中仍存在如光致等离子体、金属蒸气羽流、飞溅、匙孔不稳定及气孔等关键问题, 影响焊接质量与接头性能。系统综述了钛合金激光深熔焊接的原理与技术特点, 深入分析了上述缺陷的形成机制, 并总结了当前主流的抑制策略与优化方法。研究表明, 通过光束调控、工艺参数优化、辅助气体控制及真空环境等手段, 可有效提升焊接稳定性与成形质量。最后展望了钛合金激光深熔焊接技术的发展趋势, 指出智能化控制、多物理场耦合建模、绿色制造等方向将成为未来研究的重点, 以推动该技术在高端装备制造领域的应用与推广。

关键词: 钛合金; 激光深熔焊; 等离子体; 匙孔; 焊接飞溅

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0043-14

Current Research Status and Prospect of Laser Deep Penetration Welding of Titanium Alloys

LI Zhijie^{1,2}, YUAN Liangwen^{1,2*}, LIU Wancun², ZHAO Jia²

1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
2. Process Department, CFHI Dalian Nuclear Power and Petrochemical Co., Ltd., Dalian 116113, China

Abstract: Titanium alloys are widely used in high-end manufacturing fields such as aerospace, biomedical engineering, and marine technology due to their excellent specific strength, corrosion resistance, and biocompatibility. As a key technology for high-efficiency and precision joining of titanium alloys, laser deep penetration welding offers advantages including high welding speed, narrow heat-affected zone, and superior weld bead quality. However, several critical issues, such as plasma generation, metal vapor plume, spatter formation, keyhole instability, and porosity, still affect welding quality and joint performance. This paper systematically reviews the fundamental principles and technical characteristics of laser deep penetration welding of titanium alloys, analyzes the formation mechanisms of these welding defects, and summarizes the current mainstream suppression strategies and optimization methods. Research indicates that welding stability and weld formation quality can be significantly improved through beam shaping, process parameter optimization, auxiliary gas control, and vacuum environment techniques. Finally, the future development trends of laser deep penetration welding for titanium alloys are discussed, with an emphasis on intelligent control, multi-physics field coupling modeling, and green manufacturing as key research directions to further promote the application of this technology in advanced manufacturing.

Keywords: titanium alloy; laser deep penetration welding; plasma; keyhole; welding spatter

引用格式: 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.

Citation: LI Zhijie, YUAN Liangwen, LIU Wancun, et al. Current Research Status and Prospect of Laser Deep Penetration Welding of Titanium Alloys[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 43-56.

收稿日期: 2025-04-26 修回日期: 2025-05-30

基金项目: 大连市科技人才创新项目(2024RY034)

作者简介: 李志杰(1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事激光焊接技术方面的研究。

通讯作者: 袁亮文(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事自动化焊接装备研发、压力容器焊接工艺设计、激光焊接技术研究与应用。E-mail: yu-anlw@139.com。

0 引言

钛具有密度小、比强度高、导热系数低、耐高低温性能好、耐腐蚀能力强、生物相容性好等突出特点,最早被应用于航空航天等高科技领域^[1-4],现在其应用领域已向化工冶金、石油、电力、海水工程、建筑、日常生活用具等新型应用领域拓展,被誉为“太空金属”“现代金属”“海洋金属”和“战略金属”^[5-7]。根据激光在焊接过程中是否产生稳定的深熔小孔,可以把激光焊接分为热导焊和深熔焊两种典型的焊接模式^[8],激光深熔焊具有焊接效率高、焊缝深宽比大、节省材料等优势^[9-10]。相关研究表明,在激光深熔焊接过程中仍存在一些缺陷^[11-12],如飞溅、气孔、表面氧化、裂纹等,制约了激光深熔焊接技术的进一步快速发展,这些缺陷与激光导致的金属熔化、蒸发和等离子体流等因素引起的小孔特性行为密切相关^[13-15]。因此,本文将系统性的介绍了钛合金激光深熔焊接原理与技术特点,并对钛合金激光深熔焊接过程中产生的等离子体(或金属蒸气)、飞溅、小孔形貌、气孔的形成原因与抑制措施做了总结与分析,最后对激光深熔焊接技术在钛合金的应用与发展进行了展望,积极推动激光深熔焊接技术在钛合金产品上的快速发展。

1 钛合金激光深熔焊接原理与技术特点

激光焊接具有两种常规的稳定焊接模式,分别是热导焊模式和深熔焊模式,两种稳定焊接模式的激光能量密度阈值不同,激光热导焊模式的激光能量阈值小于 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$,表面金属吸收激光能量,熔化形成熔池;激光深熔焊模式的激光能量阈值大于 10^6 W/cm^2 ,工件表面金属在激光束的作用下熔化、蒸发形成金属蒸气,部分金属蒸气电离形成等离子体,金属蒸气和等离子体以喷发的形式离开熔池,激光直接照射的熔池在金属蒸气反冲压力的作用下凹陷形成小孔,这个充满蒸气的小孔犹如一个黑体,几乎全部吸收入射激光的能量,孔腔内平衡温度达 $25\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,激光深熔焊接原理如

图1所示。激光深熔焊又称激光小孔焊,其本质特征就是存在稳定的小孔效应的激光焊。通过小孔激光束辐射到材料深层,在小孔内完成能量的传递与转换,保持稳定的深熔焊接,最终获得了深而窄的大熔深的焊缝^[8]。此后激光在小孔内部的传播过程中会发生多次反射,在多次反射过程中,第一和第二反射对总能量吸收的影响尤为显著^[16-17],一定程度上提高了材料对激光能量的利用率^[18-19]。激光束继续照射孔底,使得小孔不断延伸,直到小孔内的蒸气压力与液体金属的表面张力和重力平衡为止,焊接过程达到稳定的激光深熔焊接模式,最终形成一个狭窄而均匀的焊缝。除上述稳定的激光深熔焊过程与稳定的激光热导焊过程,同样还存在一种模式不稳定焊接过程,该过程是深熔焊模式与热导焊模式无规则的随机变化,同时,焊缝几何尺寸、声音、金属蒸气颜色瞬时发生变化,每个时刻都会保持不一样^[8],该模式不稳定状态在激光焊接过程中是需要避免发生的。

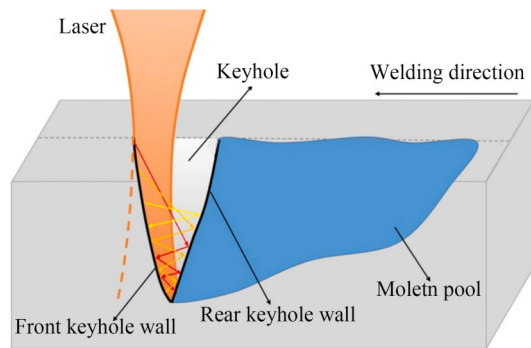


图1 激光深熔焊原理示意图^[16]

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of laser deep penetration welding

为了能够保证稳定的激光深熔焊接模式,刘桐等人^[20]提出了3种典型激光深熔焊和激光热导焊模式判别的方法。①通过等离子体电特征检测系统检测到的电信号初始阶段波形特征进行判别;②通过稳定阶段电信号概率密度进行判别;③通过电信号稳定阶段频率特征进行判别。除此之外,研究还发现激光深熔焊离子体羽电信号波动频率与焊缝熔深存在对应关系,检测信号的波动频率随着熔深的增大而减小。

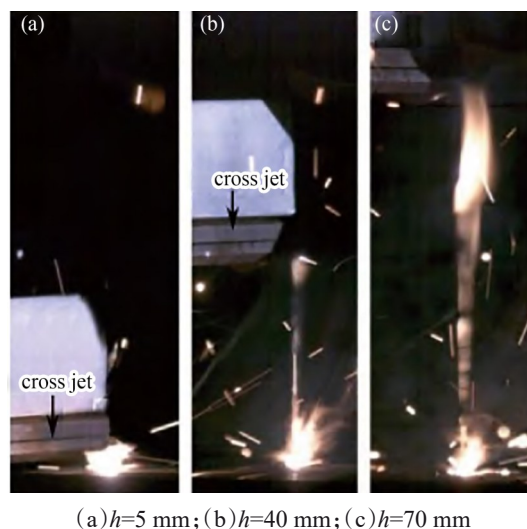
综上所述,激光深熔焊的主要技术特点包括以下几方面。①由于激光深熔焊接方法比常规方法

功率密度高,焊接速度快,焊接热影响区窄,焊接变形极小,可以焊接钛等其余难焊的材料。②因激光束容易传输和控制,又不需要经常更换焊枪、喷嘴;相比电子束焊接,不需要抽真空,焊接效率显著提升。③熔化区受污染少,使得焊缝强度、韧性可超越母体金属性能。④焊接过程中冷却速度快,使得焊缝强度、韧性和综合性能优于传统焊接方法。⑤由于平均热输入低,加工精度高,可减少再加工费用。⑥可以对激光的光束强度和定位进行可编程控制,容易实现与自动化系统的集成,有利于实现自动化焊接。除此之外,激光深熔焊同样也存在一些缺点,如焊接深度有限、工件装配精度要求高、激光焊接系统一次性资金投入高等许多问题,但是,在激光深熔焊接过程中所出现的这些问题,会随着自动化、信息化与人工智能技术的快速发展,在不久的将来会逐步得到解决^[21]。

2 钛合金激光深熔焊接等离子体或羽流的形成与抑制

激光深熔焊接过程中,由于高功率密度的激光束与材料发生剧烈作用,产生激光致等离子、金属蒸气(或羽流),尤其在钛合金激光深熔焊接过程中,光致等离子、金属蒸气(或羽流)的作用要强于其他材料激光深熔焊接。韩雪等人^[22]采用高速摄像机观察了光纤激光深熔焊接羽流的动态行为,分析了羽流的形成原因。试验表明焊接羽流分为底部周期性摆动羽流和类似于激光束聚焦形态的狭长形羽流,在相同的离焦状态下,吹除羽流后,小孔口直径明显减小,焊接熔深则明显增加。邹江林等人^[23]同样利用高速摄像观测羽流的形态,通过超音速气帘在不同高度处抑制羽流的高度,间接用熔宽和熔深反映羽流对激光深熔焊接过程的影响,试验结果显示羽流对激光深熔焊接过程产生了显著的影响,其本质是羽流中存在的微粒对激光束产生了散射、吸收与折射,如图2、图3为不同高度横向气帘对羽流的抑制作用与焊缝截面形貌的影响。

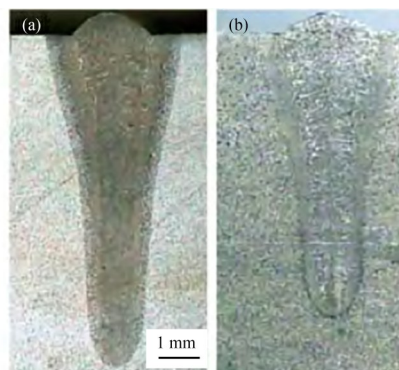
Brinkmeier等人^[24]为了定量的研究激光深熔焊接过程中,金属蒸气形成的羽流对激光束轮廓的影



(a) $h=5$ mm; (b) $h=40$ mm; (c) $h=70$ mm

图2 羽流形态随横向气帘高度的变化关系^[23]

Fig. 2 Variation of plume morphology with the height of the lateral gas curtain



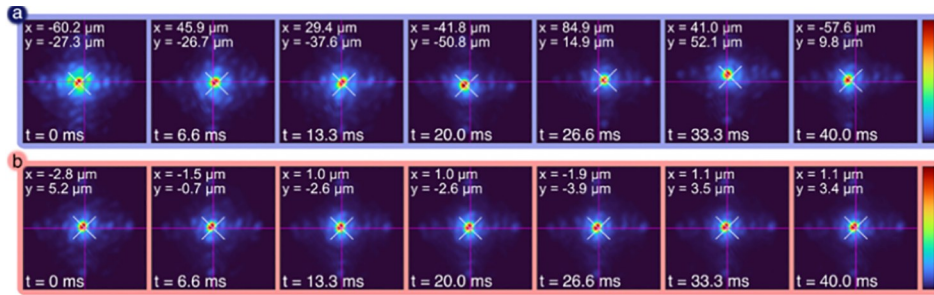
(a) $h=5$ mm; (b) $h=80$ mm

图3 横向气帘作用位置对焊缝横截面形貌的影响^[23]

Fig. 3 Effect of lateral gas curtain position on the cross-sectional morphology of the weld

响规律与不同类型光束轮廓焊接过程中激光束与蒸气羽流之间的相互作用,建立了高功率激光束轮廓检测系统,结果表明,羽流对激光束位置和形态的干扰显著,尤其在动态光束整形技术下,羽流对X与Y方向的光束偏移影响显著,如图4为焊接过程羽流对激光束轮廓的影响;同时,配置蒸气羽流抑制技术后,可以有效缓解光束位置偏移和形态失真显示,蒸气羽流的减少可以显著降低位置偏差,保证光束质量与激光深熔焊接过程的稳定性。

Schneider等人^[25]利用侧吹辅助气体将激光诱导等离子体吹出激光与材料相互作用区,有效控制了大功率钛合金激光深熔焊接过程中等离子体羽流现象。研究发现,适当的控制侧吹气体流量可以



(a)羽流影响的光束轮廓;(b)参考光束轮廓

图4 焊接过程羽流对激光束轮廓的影响

Fig. 4 Influence of the plume on the laser beam profile during welding

增强激光深熔焊接过程中焊接小孔的稳定性,抑制气泡产生、提高焊缝成形。经过合理的调节侧吹气体流量后,当侧吹气体流量设置为30 L/min时,实现了16 mm厚TC4钛合金的单面焊双面成形,接头性能优越。同样,孔华等人^[26-27]针对激光深熔焊接过程中产生的两种类型的羽流也提出了一种高速气流抑制羽流的方法,并研究了高速气流对焊接过程的飞溅、熔深、熔宽以及焊缝成形等方面产生的影响规律,建设性的指出在钛合金激光深熔焊接过程中,底部摆动羽流喷发状态与布置保护气时的气体流向有相关性。

钛合金激光深熔焊接过程中,等离子体喷发与小孔的行为密切相关,而小孔的行为又决定着焊缝成形与焊接质量,等离子体羽流的热力学行为与焊接过程也是息息相关的^[28-29],贾晨鹏等人^[30]利用激光焊接等离子体光电信号同步检测系统进行了等离子体的统计分布规律,试验结果表明,等离子体的喷发速度主要分布在6~70 m/s范围内,随着焊接热输入的增加,最大概率的等离子体喷发速度分布范围无明显变化。杨立军等人^[31]利用无源双探针结合高速摄像的光电信号同步检测系统,对TC4钛合金激光深熔焊接过程中等离子体羽流的喷发过程进行了研究,图5为焊接试验系统。试验结果表明,等离子体喷发过程分为初期、中期和后期,其中,中期等离子体喷发最剧烈,后期最弱,初期适中。

Jia等人^[32]对钛合金激光深熔焊接过程中激光诱导等离子体行为对焊接质量进行了研究,认为等离子体羽流喷发速度与温度分布是表征其热力学行为的两大关键数据,提出一种无源双探针装置用于等离子体喷发速度实时测量,并通过试验验证该方

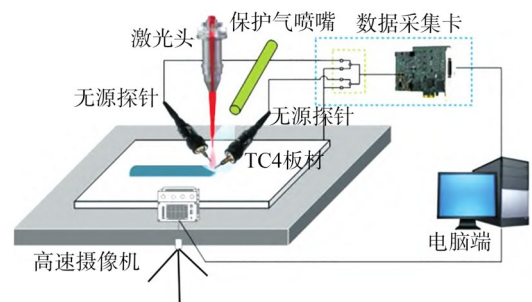


图5 焊接试验系统示意^[31]

Fig. 5 Schematic diagram of the welding experimental system

法的可行性,该方法的提出为今后钛合金激光深熔焊接过程中光致等离子、金属蒸气(或羽流)过程监控提供了新的诊断方法,被动式双探针试验系统如图6所示。

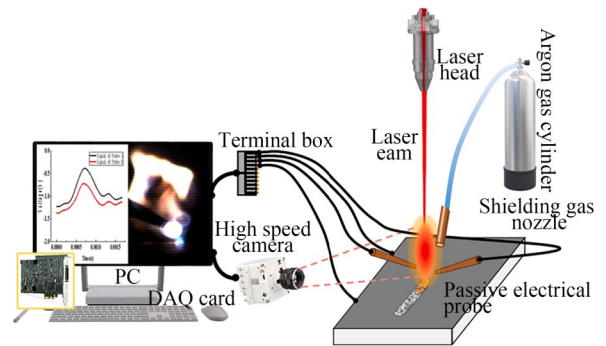


图6 无源双探针试验系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the passive dual-probe experimental system

3 钛合金激光深熔焊接飞溅的形成与抑制策略

激光深熔焊接过程中,尤其钛合金激光深熔焊接时,焊接飞溅是不可避免的缺陷之一,飞溅主要

是激光深熔焊接过程中的匙孔(深熔小孔)坍塌导致的。张高磊等人^[10]通过熔池原位光学观察和板材质量亏损计算,研究了高功率激光深熔焊接过程中的飞溅行为以及离焦量对飞溅的影响。试验结果表明,飞溅的形成可分为熔池凸起,凸起部位拉长形成液体柱,液体柱克服表面张力断裂形成飞溅,其直径主要分布在 $>50\sim 100\ \mu\text{m}$;进一步的研究表明,离焦量增大会减小前壁的倾斜角和熔池表面张力,同时增加前壁的激光致蒸发蒸气对小孔后壁上沿的冲击效果,熔深相对于增加,激光与匙孔(小孔)内部的作用增强,使得飞溅更易于产生,如图7为金属蒸气与飞溅之间的关系。

董金枋等人^[33]对激光焊接飞溅的机理原因进行了数值模拟分析,同样也认为飞溅主要是由激光深熔焊接过程中的匙孔坍塌导致的。研究人员利用可调环模式(ARM)激光方法对飞溅进行抑制,其原理是利用外环激光扩大匙孔开口,避免匙孔内部的混合高压气体直接作用于匙孔开口周围的熔池;同时,还可以通过合理的内外环激光功率搭配扩大

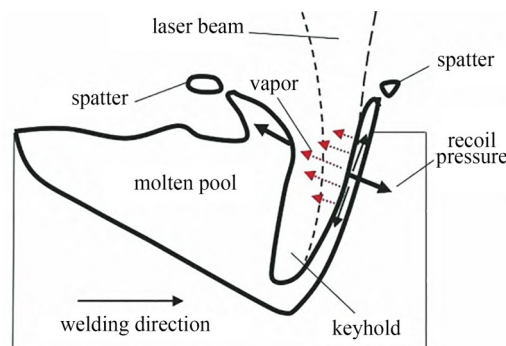
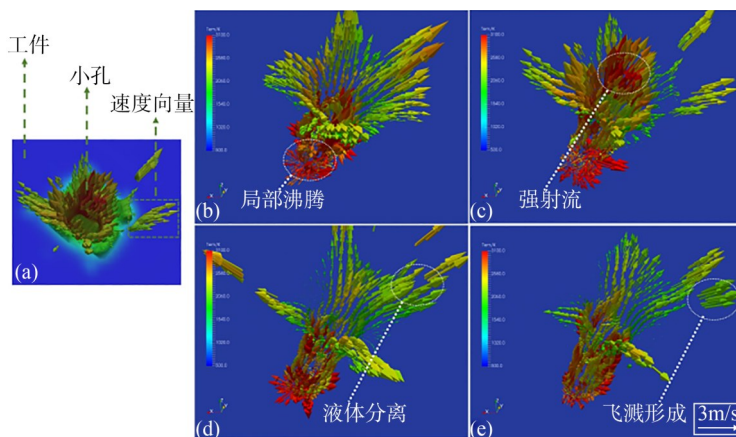


图7 金属蒸气与飞溅之间的关系^[10]

Fig. 7 Relationship between metal vapor and spatter

熔池,减少熔池波动导致的匙孔坍塌现象,进一步降低飞溅的发生概率。刘童童^[34]等人建立了可用于高功率光纤激光焊接的三维数学模型,对金属羽流气体和飞溅的三维温度、喷出角度、运动速度随时间的演化行为进行分析,定量的研究了匙孔(小孔)与飞溅的反冲压力、表明张力、重力等之间的交互作用机制。同时,研究人员成功推导了判断局部沸腾导致飞溅的形成条件,图8为飞溅形成过程中不同时刻温度与速度特性演变过程。



(a)温度和速度分布的俯视图;(b)13.016 ms;(c)13.975 ms;(d)15.675 ms;(e)15.988 ms

图8 飞溅形成过程中不同时刻的温度和速度特性^[34]

Fig. 8 Evolution of temperature and velocity characteristics during spatter formation at different time points

Nakamura等人^[35]研究发现,由于钛合金的表面张力高,黏度性低等材料特性,在激光深熔焊接过程中,钛合金比其他金属材料更容易产生较大的飞溅。Wang等人^[36]的研究发现,双光束激光的耦合同样可以有效改善焊缝成形,稳定焊接过程,匙孔保持的稳定,进而降低激光深熔焊接过程中的飞溅。Wang等人^[37]研究发现,采用双光束叠加复合的激光光源有助于提高激光焊接过程中匙孔的稳

定性,降低气孔率,改善焊接接头的力学性能。Shen等人^[38]研究了单光束激光和双光束激光对钛合金焊接接头的影响,结果表明,相较于单光束激光焊接,双光束激光焊接改善了焊接接头的成形和气孔率,提高了焊接接头的力学性能。彭进等人^[39]借助有限元建立了激光热-流耦合模型,研究了激光深熔焊接过程中的匙孔、焊接飞溅及熔池流动之间的关系。数值模拟结果表明,激光深熔焊接中匙

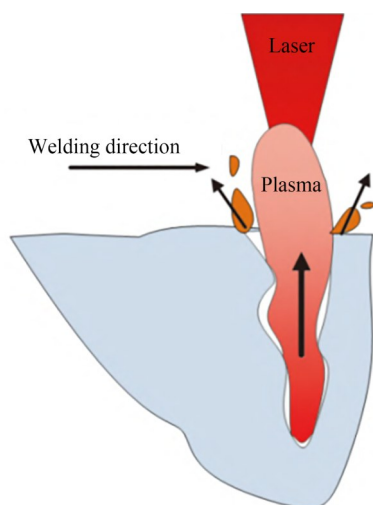
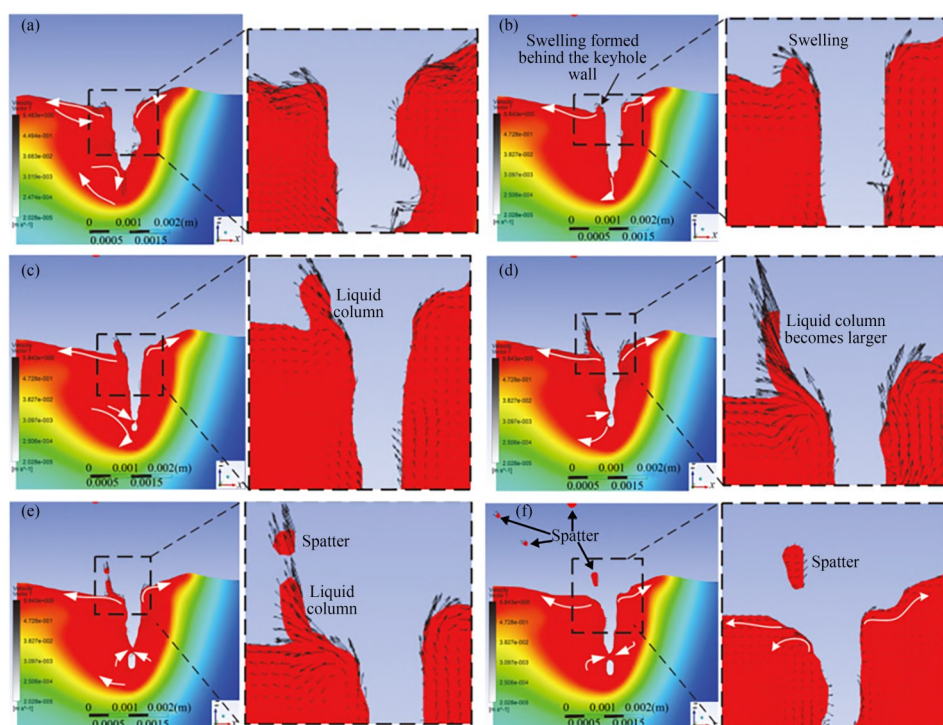
图9 激光深熔焊金属飞溅示意^[39]

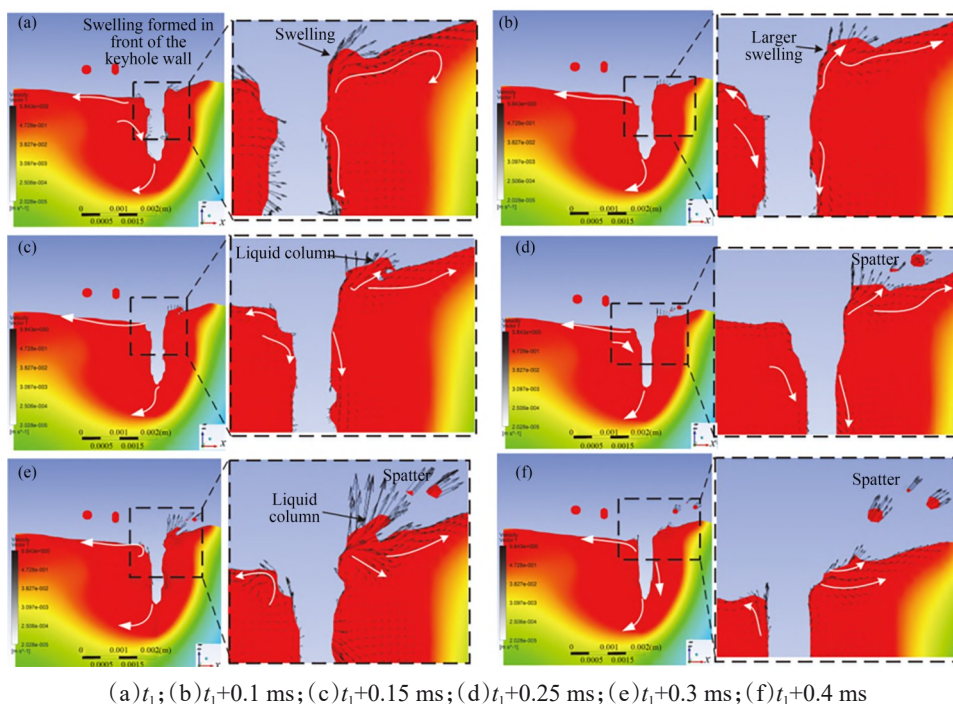
Fig. 9 Schematic diagram of metal spatter during laser deep penetration welding

匙孔壁前与壁后都会产生焊接飞溅,匙孔前、后壁的熔池表面形成液柱的液态金属最终需要摆脱表面张力、重力的束缚,在这个液柱摆脱两种力的作用过程中,形成焊接飞溅。匙孔前方产生的焊接飞溅的速度明显大于匙孔后方产生的焊接飞溅的速度。综合分析这个焊接飞溅的过程,焊接飞溅的过程主

要分为四个经历,第一,熔池表面小尺寸液态金属的隆起,第二,液柱形成,第三,液柱快速长大,第四,液柱在表面张力与重力作用下发生分离,第五,最终形成飞溅。如图9为激光深熔焊金属飞溅示意图,图10、图11为匙孔壁后方焊接飞溅行为的熔池流与匙孔壁前方焊接飞溅行为的熔池流。

Zhang 等人^[40]利用柔性环模(FRM)激光技术调节内外环的功率比产生不同的复合输出功率,可调柔性环模可以降低焊接过程中的飞溅,其原理是通过降低温度梯度和扩大匙孔尺寸,可调柔性环模激光焊接时熔池表面的液态凸起的高度更低、形成次数更少,这是能抑制飞溅的根本原因。Hu 等人^[41]利用高速摄像对焊缝底部熔池的流动状态进行捕捉,揭示了焊缝成形特征与工艺参数之间的关系,试验结果表明,在低功率低焊接速度下,难以形成稳定的小孔,导致底部积聚熔融金属。在大功率和低焊接速度下,大量熔融金属以飞溅的形式离开熔池,导致底部与上部的飞溅增多,在保证激光深熔焊接过程中熔透的情况,合理选择激光深熔焊接过程的工艺参数可以在一定程度上抑制部分飞溅的产生。

(a) t ; (b) $t+4.4$ ms; (c) $t+4.5$ ms; (d) $t+4.6$ ms; (e) $t+4.65$ ms; (f) $t+9.3$ ms图10 匙孔壁后方焊接飞溅行为的熔池流^[39]Fig. 10 Melt pool flow behavior during spatter formation behind the keyhole wall^[39]

图 11 匙孔壁前方焊接飞溅行为的熔池流^[39]Fig. 11 Melt pool flow behavior during spatter formation in front of the keyhole wall^[39]

4 钛合金激光深熔焊接小孔形貌的形成与理论计算

激光深熔焊接过程中激光能量集中,母材迅速加热到蒸发温度以上,并在熔池内部形成一个充满金属蒸气 and 等离子体的小孔。剧烈的焊接过程中,小孔内部热力学状态复杂,小孔形态不断的变化,引起小孔内外的等离子体波动,这些不稳定的波动最终会反应在小孔形貌上。相关研究利用试验验证与数值模拟的方法对激光深熔过程中的匙孔形成、光致等离子体行为、小孔形貌、熔池形态进行了深入的理论计算,对激光深熔焊接过程中焊缝形貌进行控制。Zhu 等人^[42]运用理论与试验相结合的方法研究了激光深熔焊接过程中的小孔三维形貌,理论估算了小孔的孔径轮廓,同时用原位光学观察和熔池快速凝固法对小孔的形貌进行了试验的验证,激光深熔焊接的小孔孔径可分为激光直接加热形成的小孔孔径区和激光诱导小孔前壁蒸气喷发形成的小孔孔径区。为了明确焊接小孔形貌、几何特征与外部参数的影响规律,更具体的对激光深熔焊接时,小孔前后壁的状态与焊接速度进行了相关研

究,图 12 为不同焊接速度时激光深熔焊接小孔的形态。当焊接速度较小时,激光能量输入较高,小孔内的前壁孔壁倾角较小,接近于垂直,前壁近小孔

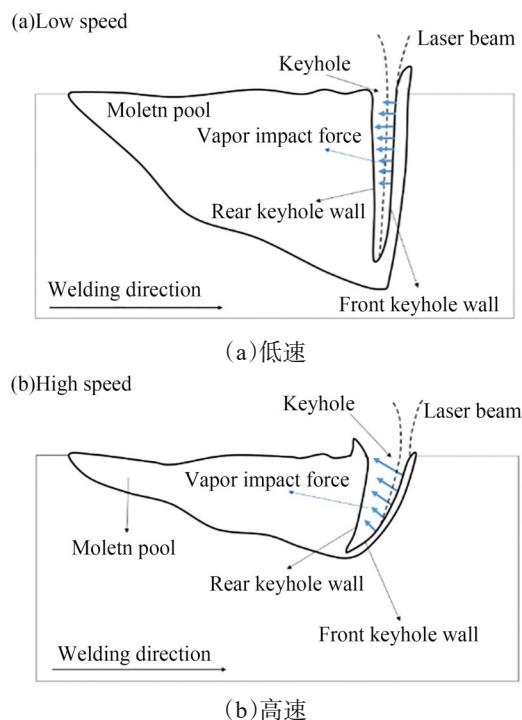
图 12 激光深熔焊接示意图^[42]

Fig. 12 Schematic diagram of laser deep penetration welding

顶部的蒸气主要作用于小孔孔径的后部和端部,整体推动熔池流动;随着焊接速度的增加,间接改变了前壁的倾斜角度,导致蒸气作用的方向发生变化,进而会导致小孔孔径形态的变化趋势。

当改变焊接速度使前孔壁倾角变小时,激光诱导蒸气在前孔壁表面喷发时对后孔壁的冲击作用增强,从而形成由激光形成的区域,诱导蒸气从小孔前壁喷发逐渐明显,小孔孔径形态演变为椭圆形或葫芦形,图 13 为小孔孔径形貌与几何特征与焊接速度的关系。

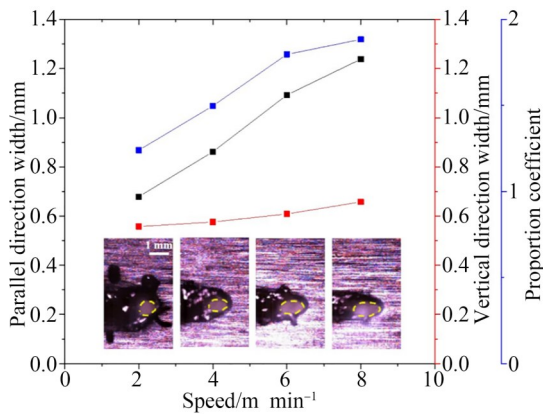


图 13 小孔孔径的形貌和几何特征与焊接速度的关系^[42]

Fig. 13 Relationship between keyhole aperture morphology, geometric characteristics, and welding speed

Zhu 等人^[16]建立了激光深熔焊缝横截面形貌预测模型,图 14 为计算模型示意,该计算中考虑了激光小孔内的多次反射与吸收,以及小孔中心截面在垂直于焊接方向上的能量平衡,最终得到了焊缝截面与小孔边界之间的数学关系。

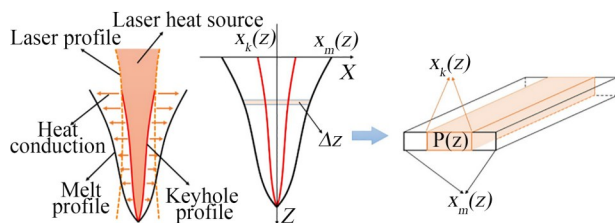
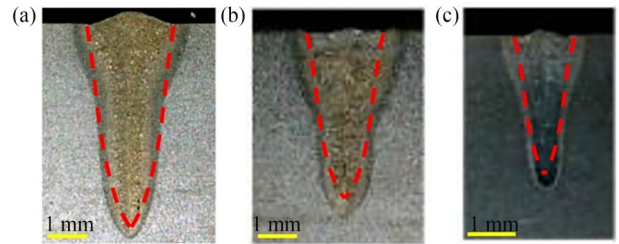


图 14 计算模型示意图^[16]

Fig. 14 Schematic diagram of the computational model

计算结果与实验结果仍存在差异,焊缝截面形貌主要有 V 形和“酒杯”形两种,焊缝宽度和焊缝深度的数值模拟计算结果均小于实际焊接试验结果。这些差异主要是数值计算由于忽略了熔池上部温度梯度引起的马兰戈尼效应、反冲压力的影响、小

孔底部熔体的聚集和凝固以及熔池表面附近羽流的加热效应等因素造成的,如图 13 为焊缝截面形态的理论计算和实验结果的比较。



(a) 功率 5 kW; (b) 功率 3 kW, 焊速 2 m/min; (c) 功率 3 kW, 焊速 4 m/min

图 15 焊缝截面形态的理论计算和实验结果的比较^[16]

Fig. 15 Comparison between theoretical calculation and experimental results

5 钛合金激光深熔焊接气孔的形成与气孔率的控制

激光深熔焊接过程中,在金属反冲压力、表面张力等作用下,匙孔处于实时波动状态。一旦匙孔倒塌后,则产生焊接气泡,气泡在快速冷却的焊缝中被俘获后,最终就会形成焊接气孔。关于钛合金激光深熔焊接过程中,相关研究通过试验与数值模拟的方法对焊接过程中产生的气孔进行了机理研究。Huang 等人^[43]对钛合金激光深熔焊接过程中的气孔形成的缺陷机理进行研究,研究结果表明,在激光深熔焊接过程中,由于焊接熔池表面与高能量密度的激光作用,极短时间内,材料表面与内部的金属发生强烈蒸发,使得金属蒸气对熔池产生反冲力,熔池发生凹陷,紧接着产生匙孔。激光能量继续作用于匙孔内壁与底部,在这个激烈的过程中熔池、匙孔等受力不均匀,使得匙孔不稳定,导致熔池在快速凝固过程后匙孔坍塌,形成气泡,最终将气泡留在焊缝金属中形成气孔,如图 14 为激光深熔焊接气孔形成原理示意图。目前,常见的高功率激光器在焊接过程输出的热源基本都是具有能量很高的高斯光束,很容易导致熔池的不稳定性,焊接过程中熔池产生剧烈的流动,进而导致钛合金激光深熔焊接过程中气孔和飞溅的产生^[44-45]。

针对激光深熔焊接过程中的气孔问题,大部分

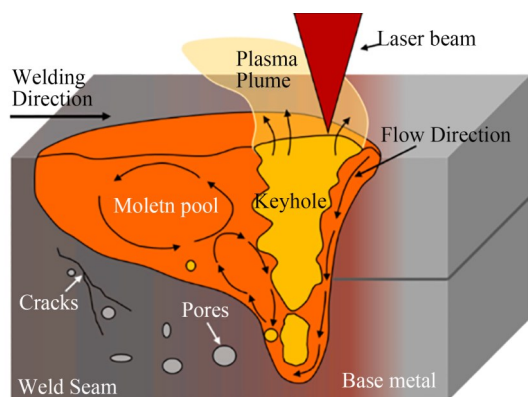
图 16 激光深熔焊接气孔形成原理示意图^[17]

Fig. 16 Schematic diagram of porosity formation mechanism in laser deep penetration welding

的研究是通过摆动激光的方式来抑制气孔^[46],相关研究表明,圆形摆动和垂直摆动皆可有效抑制气孔产生,摆动激光束可以加强对熔池的搅拌,使得气泡更加容易的从熔池焊缝内部溢出,最终改善组织,提高焊接接头的综合力学性能。Li等人^[47]搭建了振荡激光束焊接实验平台,对钛合金激光深熔焊接过程中出现的气孔率进行了研究。结果表明,振荡激光束圆轨迹焊接可以获得高质量的TC4接头,进一步研究了具体的激光光束摆动参数研究分析,当振幅 $A=1\text{ mm}$,振荡频率 $f=80\text{ Hz}$,焊缝孔隙率达到了0.13%,为所有工艺试验过程中的最低孔隙率。武震东等人^[48]根据船舶结构设计特殊,研究了摆动参数对单道焊道成形及气孔的影响规律,分析发现,摆动激光抑制窄间隙激光横焊过程中气孔缺陷的主要原因是频率增加导致能量分布峰值降低,熔宽增加使气泡逃逸路径增加,熔深降低使得逃逸路程降低,因此,深宽比小的焊道可以有效避免气孔的产生,通过该工艺方法的控制,为窄间隙激光焊接过程中降低气孔率提供了一种新的思路。徐楷昕等人^[49]研究了光束摆动对钛合金窄间隙激光填丝焊缝成形和气孔率的影响规律,在圆形摆动下,能够得到成形良好且气孔率极低的焊道。方乃文等人^[50]采用自主研发的Ti-Al-V-Mo系钛合金药芯焊丝为填充金属,进行TC4钛合金板窄间隙激光填丝焊接工艺实验,研究关键工艺参数对焊缝成形的影响规律,最终实现了20 mm厚TC4钛合金板窄间隙激光填丝焊接接头组织性能良好。李坤等人^[51]采用光谱仪和高速摄像机采集等离子体的光谱、图像

及小孔的图像,分析了摆动焊接抑制小孔型气孔的原因,结果表明,摆动光束对抑制钛合金焊接过程中的小孔型气孔具有显著的作用,当采用摆动光束进行焊接时,焊接小孔的稳定性也大大增加;当采用合适的焊接工艺参数,可以实现8 mm厚钛合金板的无气孔焊接,分析其能完全抑制小孔型气孔产生的原因是光束摆动提高了光束与熔池液面的接触面积,金属蒸发增强,驱动小孔张开的径向力和轴向力得以增加,使得进入匙孔内的气体能够快速、稳定的从小孔中溢出。Shi等人^[52]采用数值模拟的方法,结合锁孔动力学和熔体流动,研究了振荡激光束焊接锁孔诱导气孔的抑制机理,并通过相应的实验结果验证了所建立的数值计算模型。试验与数值模拟的结果表明,较大的锁孔和熔池能量均衡有助于减少激光深熔焊接过程中气孔的产生,但工艺参数存在阈值范围。同时,阐明了振荡激光束抑制气孔的机制,振荡光束的搅拌作用使气泡迁移速度在与凝固速度的竞争中处于优势地位,当小孔移动速度达到504.6 mm/s时,气泡能够被动态锁孔及时吸收,空隙被完全抑制,图15为不同振荡参数下焊缝中心部分气泡的演变过程。

通过以上相关试验与数值模拟结果研究发现,光束摆动可以有效抑制钛合金激光深熔焊接过程中的气孔。但在大气和真空环境下钛合金的焊接也会发生不同,孟盛昊等人^[53]通过对比大气中和真空中钛合金激光深熔焊的焊缝,结果表明,真空中钛合金激光焊的焊缝表面成形更好,焊缝熔深明显提高,焊缝中的气孔得到有效抑制,焊接过程中的飞溅与气孔缺陷降低至极低。在亚真空环境下,为近无缺陷的产生的钛合金激光深熔焊接技术的研究提供一种新的思路,有利于激光深熔焊接技术在钛合金焊接领域的快速发展与应用。邹吉鹏等人^[54]探究厚壁钛合金在不同环境压力下的激光焊接特性,采用低真空激光焊接技术对钛合金进行非熔透焊接试验研究,分析了亚气氛环境压力对钛合金万瓦级激光焊接焊缝成形、焊接气孔、等离子体羽、熔池及匙孔的影响规律,最终分析了造成这种现象的可能原因之一是等离子体羽的突变,亚气氛环境激光焊接等离子体羽被明显抑制,对激光束能量传输的干扰效应降低所致。

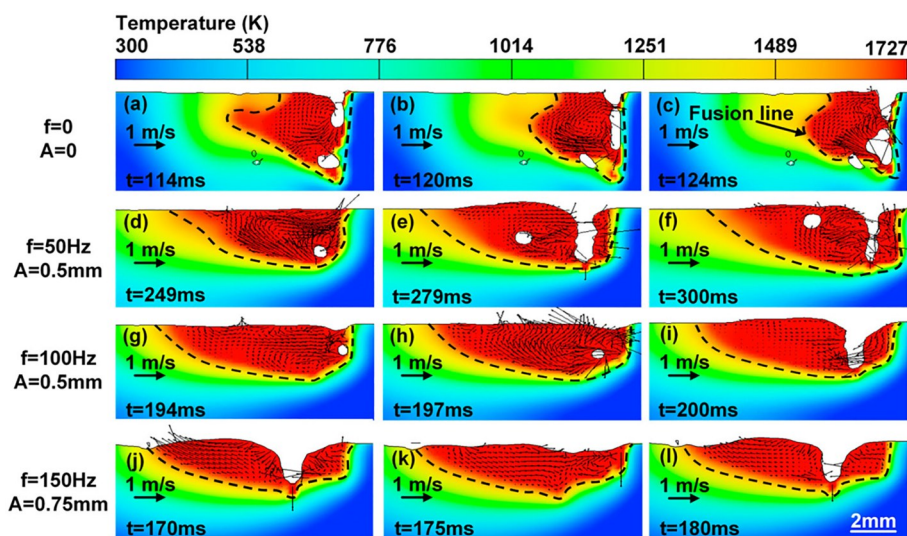


图 17 不同振荡参数下焊缝中心部分气泡的演变过程^[52]

Fig. 17 Evolution of bubbles in the center of the weld under different oscillation parameters

6 钛合金激光深熔焊接技术应用与发展展望

激光深熔焊接技术凭借其高能量密度、低热输入和优异成形能力,已成为钛合金精密制造的核心工艺之一。随着航空航天、生物医疗等领域对钛合金构件性能要求的持续升级,该技术正朝着高精度调控、智能化集成、绿色可持续发展的方向纵深发展,其未来发展可概括为以下几方面。

6.1 基础理论研究与工艺机理突破

开发基于超高速成像($>10^6$ fps)与多光谱诊断的激光深熔焊接的匙孔稳定性监测系统,结合机器学习算法建立“工艺参数-匙孔形貌-缺陷生成”的实时算法模型,实现气孔、飞溅、表面氧化、裂纹等缺陷的闭环控制。建立流体动力学、传热学、等离子体的耦合数值模型,揭示气孔产生原因与小孔形态的内在联系,为揭示钛合金激光深熔焊接过程中缺陷形成的影响机理奠定基础。

6.2 智能化集成系统开发

集成工业互联网与数字孪生技术,通过虚拟仿真实时优化焊接路径与实时调整工艺参数。基于深度学习算法开发激光深熔焊接过程中的工艺参数自主决策系统,利用历史焊接数据(如焊缝形貌成形尺寸、熔池振荡频率、等离子体发射光谱、熔池熔透参数)动态调整激光功率、扫描速度、扫描幅

值、焊接速度等关键工艺参数。采用同轴视觉监测与声发射传感技术,建立焊缝缺陷识别-反馈机制。采用机器学习算法开发激光深熔焊接的过程监测评估系统,同时可以借助热力耦合数值模型分析成形机理与演化规律^[17,21]。

6.3 绿色可持续发展路径

通过光谱匹配技术将激光波长精准调谐至钛合金特征吸收峰(约 980 nm),使能量利用率大大提高,助力碳中和目标达成。在太空探索、深海开发、智慧医疗等新兴领域需求牵引下,钛合金激光深熔焊接技术有望在 2030 年前实现高精度控制、工艺自优化、零缺陷制造,持续巩固其作为高端装备制造技术的核心地位。

6.4 钛合金新的焊接方法

局部真空激光焊接在钛合金厚板领域已实现工程应用,但机理研究和装备适应性仍需深化;红蓝光复合焊接(尤其是激光-电弧复合)在效率和质量上优势显著,但需解决过程稳定性与异种材料兼容性问题。两者均为钛合金焊接的重要发展方向,未来可能通过技术融合(如真空环境下的复合焊接)实现更大突破

7 结论

(1)根据激光能量阈值的差异,将激光焊接模

式分为两种常规的稳定焊接模式,分别是热导焊模式和深熔焊模式。除稳定的激光深熔焊过程与稳定的激光热导焊过程,同样还存在一种模式不稳定焊接过程,该过程是深熔焊模式与热导焊模式无规则的随机变化,同时,焊缝几何尺寸、声音、金属蒸气(羽流)颜色瞬时发生变化,每个时刻都会保持不一样。

(2)对钛合金激光深熔焊接过程中出现的光致等离子体、金属蒸气(羽流)、焊接飞溅、匙孔(焊接小孔)形成、气孔的形成问题做了系统性总结与分析,这些焊接缺陷的产生都不是单一作用的结果。归结到底是激光与材料相互激烈的作用,导致焊接过程的稳定性降低,很难保证连续性,最终出现了飞溅、匙孔以及焊缝中气孔的出现。

(3)激光深熔焊接技术凭借其高能量密度、低热输入和优异成形能力,已成为钛合金精密制造的核心工艺之一。随着航空航天、生物医疗等领域对钛合金构件性能要求的持续升级,该技术正朝着高精度调控、智能化集成、绿色可持续发展的方向纵深发展,发展前景广阔,能快速推动激光深熔焊接技术在钛合金产品制造中的应用与发展。

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] Mei L, Chen G, Jin X, et al. Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets[J]. Optics and lasers in engineering, 2009, 47(11): 1117–1124.
- [3] 符成学,雷小伟,贾晓飞,等. 钛合金激光增材制造技术研究与应用进展[J]. 焊管, 2023, 46(8): 11–18+24.
FU C X, LEI X W, JIA X F, et al. Research and Application Progress of Titanium Alloy Laser Additive Manufacturing Technology[J]. Welded Pipe and Tube, 2023, 46(8): 11–18+24.
- [4] 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(z1): 346–351.
LIU Z G, DAI F X, LU G, et al. Research Status and Prospect of Laser Welding of Titanium Alloy[J]. Materials Reports, 2023, 37(z1): 346–351.
- [5] 王建忠,敖庆波,荆鹏,等. 多孔钛的制备及应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(5): 1907–1918.
WANG J Z, AO Q B, JING P, et al. Preparation and Application of Porous Titanium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(5): 1907–1918.
- [6] 樊永霞,林彦,敖庆波,等. 增材制造 Ti-6Al-4V 点阵材料的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(10): 3630–3639.
FAN Y X, LIN Y, AO Q B, et al. Research Progress on Additive Manufactured Ti-6Al-4V Lattice Materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(10): 3630–3639.
- [7] Dong Z, Tian Y, Zhang L, et al. Research status of high efficiency deep penetration welding of medium-thick plate titanium alloy: A review[J]. Defence Technology, 2025, 45: 178–202.
- [8] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [9] 蒋宝,黄瑞生,李琳琳,等. 万瓦级光纤激光焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2021, 51(10): 8–14.
JIANG B, HUANG R S, LI L L, et al. Study on 10 kW fiber laser welding process[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(10): 8–14.
- [10] 张高磊,孔华,邹江林,等. 高功率光纤激光深熔焊接飞溅特性以及离焦量对飞溅的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 73–80.
ZHANG G L, KONG H, ZOU J L, et al. Spatter Characteristics of High-Power Fibre Laser Deep Penetration Welding and Effect of Defocus on Spatter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 73–80.
- [11] 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.
- [12] Auwal S T, Ramesh S, Yusof F, et al. A review on laser beam welding of titanium alloys[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1–4): 1071–1098.
- [13] 赵乐,韩雪,邹江林,等. 光纤激光深熔焊接小孔形成过程的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 219–225.
ZHAO L, HAN X, ZOU J L, et al. Research on Formation Process of Keyhole During Fiber Laser Deep Penetration Welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 219–225.

- [14] Schmidt L, Schrick K, Bergmann J P, et al. Effect of Local Gas Flow in Full Penetration Laser Beam Welding with High Welding Speeds[J]. Applied Sciences, 2020, 10(5):1867.
- [15] Li S, Chen G, Zhang M, et al. Dynamic keyhole profile during high-power deep-penetration laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3):565-570.
- [16] Zhu B, Yang W, Zou J, et al. A predictive model of weld bead cross-section morphology during laser deep penetration welding considering energy coupling law in keyhole[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133:1342-1351.
- [17] Lu R, Lou M, Xia Y, et al. Machine learning-based in-process monitoring for laser deep penetration welding: A survey[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 137:109059.
- [18] 应业勇. TC4 钛合金激光焊接变形与光致等离子体的行为研究[D]. 湖南:湖南大学, 2016.
YING Y Y. Study on Deformation and Plasma Behavior of TC4 Titanium Alloy during Laser Welding[D]. Hunan: Hunan University, 2020.
- [19] 李亚江. 激光焊接切割熔覆技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2019.
- [20] 刘桐. 激光深熔焊小孔/等离子体行为及检测的研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
LIU T. Keyhole/Plasma Behavior and Detection during Keyhole Mode Laser Welding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [21] Cai W, Shu L, Geng S, et al. Real-time tracking method for motion spatter in high-power laser welding of stainless steel plate based on a lightweight deep learning model[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 254:124386.
- [22] 韩雪, 赵宇, 邹江林, 等. 基于可视化观察的光纤激光深熔焊接羽辉形成原因分析[J]. 中国激光, 2020, 47(6):131-137.
HAN X, ZHAO Y, ZOU J L, et al. Analysis of Plume Formation Reasons in Laser Deep Penetration Welding Based on Visual Observation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6):131-137.
- [23] 邹江林, 李飞, 牛建强, 等. 高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(06):80-84.
ZOU J L, LI F, NIU J Q, et al. Effect of Laser-Induced Plume on Welding Process During High Power Fiber Laser Welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(06):80-84.
- [24] Brinkmeier D, Wagner J, Sawannia M, et al. Influence of the laser-plume interaction on the beam profile during deep-penetration welding with coherent beam shaping[J]. Optics express, 2025, 33(2):2702.
- [25] Schneider A, Gumenyuk A, Lammers M, et al. Laser Beam Welding of Thick Titanium Sheets in the Field of Marine Technology[J]. Physics procedia, 2014, 56:582-590.
- [26] 孔华, 杨武雄, 邹江林, 等. 高速保护气流对光纤激光深熔焊接羽辉的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8):14-20.
KONG H, YANG W X, ZOU J L, et al. Influence of flow direction of high-speed shielding gas on plume in fiber laser deep penetration welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(8):14-20.
- [27] 孔华, 赵振家, 邹江林, 等. 匙孔内光纤激光致喷发蒸汽对焊接过程的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(5):20-26.
KONG H, ZHAO Z J, ZOU J L, et al. The influence of laser-induced plume in the keyhole on the welding process[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(5):20-26.
- [28] Tenner F, Brock C, Klämpfl F, et al. Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 64:32-41.
- [29] Arita T, Sato Y, Kurita Y, et al. In situ observation of dynamics of keyhole and molten pool in laser welding for development of spatter suppression[J]. Journal of laser applications, 2022, 34(3).
- [30] 贾晨鹏, 黄一鸣, 赵圣斌, 等. TC4 钛合金激光深熔焊等离子体羽流热力学行为研究[J]. 中国激光, 2023, 50(20):59-65.
JIA C P, HUANG Y M, ZHAO S B, et al. Plasma Plume Thermodynamic Behavior During Laser Deep-Penetration Welding of TC4 Titanium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(20):59-65.
- [31] 杨立军, 谢燕, 贾晨鹏, 等. TC4 钛合金激光深熔焊等离子体羽流喷发过程研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(09):967-973.
YANG L J, XIE Y, JIA C P, et al. Plasma Plume Eruption During Laser Deep-Penetration Welding of TC4 Titanium Alloy[J]. Journal of Tianjin University: Sci-

- ence and Technology, 2024, 57(09):967-973.
- [32] Jia C, Huang Y, Zhao S, et al. Statistical analysis of plasma thermodynamic behavior based on laser deep penetration welding of TC4 titanium alloy[J]. Measurement; Journal of the International Measurement Confederation, 2024, 225:114004.
- [33] 董金枋, 杨方毅, 吴頔, 等. 可调环模激光焊接飞溅抑制机理及工艺优化研究[J]. 中国激光, 2024, 51(12): 32-40.
- DONG J F, YANG G Y, WU D, et al. Spatter Suppression Mechanism and Process Optimization of Adjustable Ring-Mode Laser Welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(12):32-40.
- [34] 刘童童. 高功率光纤激光焊接中羽辉气体和飞溅动力学行为研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2020.
- LIU T T. Study on the dynamic behavior of vapor plume and spatter during high-power fiber laser welding [D]. Hubei: Huazhong University of Science & Technology, 2020.
- [35] Nakamura H, Kawahito Y, Nishimoto K, et al. Elucidation of melt flows and spatter formation mechanisms during high power laser welding of pure titanium [J]. Journal of laser applications, 2015, 27(3):4922383.
- [36] Wang Z, Jiang M, Chen X, et al. Mitigating spatters in keyhole-mode laser welding by superimposing additional ring-shaped beam [J]. Optics and laser technology, 2024, 168:109869.
- [37] Wang L, Gao X, Kong F. Keyhole dynamic status and spatter behavior during welding of stainless steel with adjustable-ring mode laser beam [J]. Journal of manufacturing processes, 2022, 74:201-219.
- [38] Shen J, Li B, Hu S, et al. Comparison of single-beam and dual-beam laser welding of Ti-22Al-25Nb/TA15 dissimilar titanium alloys [J]. Optics and laser technology, 2017, 93:118-126.
- [39] 彭进, 许红巧, 王星星, 等. 激光深熔焊匙孔及焊接飞溅行为的数值模拟 [J]. 材料导报, 2025, 39(03): 231-235.
- PENG J, XU H Q, WANG X X, et al. Numerical Simulation of Keyhole and Welding Spatter Behavior in Laser Deep Penetration Welding [J]. Materials Reports, 2025, 39(03):231-235.
- [40] Zhang Y, Chen J, Zhang W, et al. Study of spatter net forming mechanism and penetration mode under flexible ring mode laser welding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24:2213-2225.
- [41] Hu Y, Zhang X, Liu Z, et al. Investigation on the formation mechanism of collapse defects microstructural evolution and mechanical properties in full penetration laser welding of thick-section [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 118:341-356.
- [42] Zhu B, Yang W, Zou J, et al. Theoretical calculation of keyhole aperture morphology in laser deep penetration welding [J]. Optics and Laser Technology, 2025, 182: 112219.
- [43] Huang L, Liu P, Zhu S, et al. Experimental research on formation mechanism of porosity in magnetic field assisted laser welding of steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50:596-602.
- [44] Cheng H, Zhou L, Li Q, et al. Effect of welding parameters on spatter formation in full-penetration laser welding of titanium alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15:5516-5525.
- [45] Powell J, Ilar T, Frostevarg J, et al. Weld root instabilities in fiber laser welding [J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(S2):9008.
- [46] 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 and Laser Technology, 2024, 174: 110569.
- [47] 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.
- [48] 武震东, 黄瑞生, 曹浩, 等. 光束摆动对窄间隙激光横焊焊缝成形及气孔的影响 [J]. 焊接, 2025(01):8-16.
- WU Z D, HUANG R S, CAO H, et al. Effect of beam oscillating on formation and porosity of weld by narrow gap laser horizontal welding [J]. Welding & Joining, 2025(01):8-16.
- [49] 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):137-145.
- 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):137-145.
- [50] 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):186-193.
- FANG N W, HUANG R S, WU P B, et al. Study on

- Welding Process and Microstructure and Properties of Titanium Alloy Narrow Gap Laser Filler Wire[J]. Materials Reports, 2023, 37(10): 186–193.
- [51] 李坤, 王威, 单际国, 等. TC4 钛合金光纤激光摆动焊抑制小孔型气孔的原因分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 43–46.
- LI K, WANG W, SHAN J G, et al. Analysis of keyhole-type pore suppressing in fiber laser welded TC4 titanium alloy with beam weaving[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2016, 37(11): 43–46.
- [52] Shi L, Li X, Jiang L, et al. Numerical study of keyhole-induced porosity suppression mechanism in laser welding with beam oscillation[J]. Science and technology of welding and joining, 2021, 26(5): 349–355.
- [53] 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(08): 40–47.
- MENG S H, SI C J, REN Y Q, et al. Study on laser welding characteristics of thick wall TC4 titanium alloy in vacuum environment[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2021, 42(08): 40–47.
- [54] 邹吉鹏, 黄瑞生, 武鹏博, 等. TC4 钛合金低真空 20kW 激光焊接特性研究[J]. 电焊机, 2023, 53(08): 28–35.
- ZOU J P, HUANG R S, WU P B, et al. Study on Low Vacuum 20 kW Laser Welding Characteristics of TC4 Titanium Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(08): 28–35.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 42 页

- facturing Technology, 2015(2): 57–60.
- [5] BHUJANGRAO T, VEIGA F, SUÁREZ A, et al. High-temperature mechanical properties of IN718 alloy: Comparison of additive manufactured and wrought samples[J]. Crystals, 2020, 10(8): 689.
- [6] CHEN F, CAI X, DONG B, et al. Effect of process modes on microstructure and mechanical properties of CMT wire arc additive manufactured WE43 magnesium alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 2089–2101.
- [7] 张志强, 李涵茜, 贺世伟, 等. 激光与 CMT-P 电弧复合增材构件的微观组织特征研究[J]. 材料保护, 2023, 56(10): 74–82.
- ZHANG Z Q, LI H Q, HE S W, et al. Study on Microstructure Characterization by Laser and CMT-P Arc Hybrid Additive Components[J]. Materials Protection, 2023, 56(10): 74–82.
- [8] XU X, DING J, GANGULY S, et al. Investigation of process factors affecting mechanical properties of INCONEL 718 superalloy in wire + arc additive manufacture process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 201–209.
- [9] 齐欢. INCONEL 718(GH4169)高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程, 2012(08): 92–100.
- QI H. Review of INCONEL 718 Alloy: Its History, Properties, Processing and Developing Substitutes[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(08): 92–100.
- [10] 赵玉珍. 焊接熔池的流体动力学行为及凝固组织模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
- ZHAO Y Z. The fluid dynamics behavior and solidification structure simulation of welding pool[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004.
- [11] 林鑫, 杨海欧, 陈静, 等. 激光快速成形过程中 316L 不锈钢显微组织的演变[J]. 金属学报, 2006, 42(4): 361–368.
- LIN X, YANG H O, CHEN J, et al. Microstructure Evolution of 316L Stainless Steel During Laser Rapid Forming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(4): 361–368.
- [12] LIU K, YAN Z, WANG F, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of Inconel GH4169 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing with arc oscillation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 952: 170070.
- [13] HONGMAO C, FENCHENG L, GUANG Y, et al. Microstructure and Tensile Property of Electromagnetic Stirring Assisted Laser Repaired Inconel718 Superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(10): 2949–2956.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>