

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.03

激光焊接工艺与仿真技术的研究现状及发展方向

高欣¹, 胡庆², 胡克佳³, 吕良星^{2,4*}

1. 机械工业哈尔滨焊接技术培训中心, 黑龙江 哈尔滨 150046
2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001
3. 宁波市升力同创科技咨询服务有限公司, 浙江 宁波 315000
4. 哈尔滨工业大学 空间环境与物质科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 激光焊接作为一种先进的焊接工艺,在航空航天、新能源、高端装备制造等领域的应用需求持续攀升,且这些领域对激光焊接构件,特别是异质材料焊接构件的质量与可靠性提出了愈发严苛的要求。然而,激光焊接过程的复杂性使得其机理研究进展缓慢,难以构建较精准的工艺-组织-性能映射关系,制约了其快速发展与应用。本研究首先回顾了激光焊接的原理与关键技术,对比气体、固体(含光纤)、半导体三类激光源的性能指标与适用场景;其次聚焦工艺优化,分析功率密度、离焦量、搭接方式等关键参数对焊缝成形的影响,以及在线监测技术(X射线高速成像、光学相干断层扫描)与信号处理算法(短时傅里叶变换、深度学习)在缺陷识别中的应用进展;重点总结金属材料焊接研究成果,分析缺陷成因及控制,归纳同种材料(特别是异质材料)连接及新工艺的发展,同时梳理用于激光焊接的数值模型及其研究进展。随着过程监测设备的发展,在线监测与数值模拟结合有望突破异质材料与大型构件的激光焊接问题,成为智能制造的重要助力。

关键词: 激光焊接; 缺陷控制; 异质材料; 数值模拟; 在线监测

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)09-0028-19

Progress and Trend on Laser Welding Process and Simulation Technology

GAO Xin¹, HU Qing², HU Kejia³, LV Liangxing^{2,4*}

1. Harbin Welding Training Institute, Harbin 150046, China
2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China
3. Ningbo Shengli Tongchuang Technology Consulting Service Co., Ltd., Ningbo 315000, China
4. Space Environment Simulation Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150028, China

Abstract: Laser welding, as an advanced welding process, is increasingly in demand in fields such as aerospace, new energy, and high-end equipment manufacturing. Moreover, these fields have imposed increasingly stringent requirements on the quality and reliability of laser-welded components, especially those made of heterogeneous materials. However, the complexity of the laser welding process makes its mechanism research progress slowly, making it difficult to construct a precise mapping relationship between process, structure, and properties, which restricts its rapid development and application. This paper first reviews the principles and key technologies of laser welding, and compares the performance indicators and applicable scenarios of three types of laser sources: gas, solid (including fiber), and semiconductor. It then focuses on process optimization, analyzing the effects of key parameters such as power density, defocus amount, and overlapping method on weld formation, as well as the progress in defect identification using online monitoring technology (X-ray high-speed imaging, optical coherence tomography) and signal processing algorithms (short-time Fourier transform, deep learning). It summarizes the research results of metal material welding, analyzes defect causes and controls, and generalizes the development of connecting similar materials (especially heterogeneous materials) and new processes, while also reviewing the numerical mod-

收稿日期: 2024-11-01 修回日期: 2025-01-24

作者简介: 高欣(1980—),男,硕士,高级工程师,国际焊接工程师,主要从事焊接企业国际认证、焊接国际资质培训、激光焊模拟研究等工作。
E-mail: gaowudi@126.com。

通讯作者: 吕良星(1981—),男,博士,研究员,主要从事主要研究方向为3D/4D打印制造过程及组织性能模拟研究、空间环境效应模拟研究和材料组织转变和变形过程模拟研究。E-mail: lvliangxing@hit.edu.cn。

els used for laser welding and their research progress. With the development of process monitoring equipment, the combination of online monitoring and numerical simulation is expected to break through the connection problems of heterogeneous materials and large components, becoming an important part of intelligent manufacturing.

Keywords: laser welding; defect control; heterogeneous materials; numerical simulation; online monitoring

引用格式:高欣,胡庆,胡克佳,等. 激光焊接工艺与仿真技术的研究现状及发展方向[J]. 电焊机, 2025, 55(9): 28-46.

Citation:GAO Xin, HU Qing, HU Kejia, et al. Progress and Trend on Laser Welding Process and Simulation Technology[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 28-46.

0 引言

焊接技术作为现代制造业中材料连接的核心手段,历经百余年发展已构建起完善的技术体系,支撑了航空航天、船舶制造、能源装备等关键领域重大产品的生产制造^[1]。随着现代工业对构件轻量化、高可靠性及复杂结构集成度要求的持续提升,传统焊接方法如电弧焊、电阻焊等存在一些局限性,如焊接速度慢、热影响区大、焊缝质量不稳定等。为了满足这些需求,激光焊接技术应运而生。

激光焊接技术自20世纪60年代伴随激光技术问世而快速发展,其核心优势在于以高能量密度激光束作为热源,可实现焊件局部精准加热至熔化状态,经冷却凝固形成焊缝。相较于传统工艺,激光焊接具有焊接速度快、能量密度高、作用位置易控制,以及焊后冷却速度快等优点。激光焊接技术的出现为现代工业提供了一种高效、高精度、高质量的焊接解决方案,具有重要意义和广泛的应用前景。但随着激光焊接技术的发展,也出现了一些问题,比如:大功率激光焊接由于等离子体羽辉强烈的吸收、散射和折射等损耗效应,即使增大激光功率也难以获得熔深的持续增加;焊接过程中熔池不稳定,易诱发飞溅、气孔、缩孔、表面塌陷等多种焊接缺陷;匙孔的坍塌、振荡导致焊缝成形一致性差。

基于此,本文首先阐述了激光焊接的基本原理与分类,明确不同焊接方式的适用场景;其次总结激光源、工艺参数优化及在线监测等关键技术的研究进展;随后聚焦焊缝缺陷控制、金属材料(尤其是异质材料)连接及新型工艺开发,分析当前研究现状与技术瓶颈;最后结合数值模拟技术的应用前景,对激光焊接技术的发展方向进行展望,为其在智能制造领域的进一步应用提供理论与技术参考。

1 激光焊接的原理和分类

与传统焊接原理相似,激光焊接是通过加热材料使之发生冶金结合的过程,不同之处在于热源由激光束承担。目前被聚焦的激光光束照射到焊件表面的功率密度一般为 $10^4 \sim 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。通常根据功率密度的大小,激光焊接可分为激光热传导焊接和激光深熔焊接两种基本方式,如图1所示,其焊接机制也有所不同。

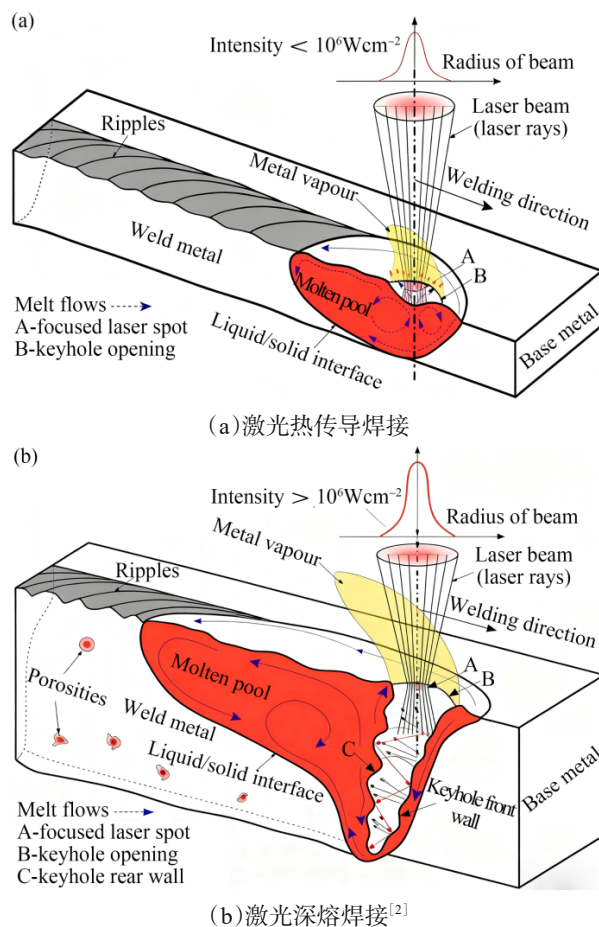


图1 不同激光焊接方式的物理示意

Fig. 1 Physical schematic diagram of different laser welding methods

激光热传导焊接的功率密度相对较低,其能量传递以热传导为主导:当激光束照射在材料表面时,部分激光能量因材料反射而损失,剩余能量被表层材料吸收并转化为热能,使材料表面温度升高至熔化状态;随后,表层的热能通过热传导的方式继续向材料内部传递,最终将两焊件熔接在一起。该焊接方式的热影响区较浅,因此主要用于薄板角接。其优势在于焊后能够产生较光滑的圆角,无需后续加工。

激光深熔焊接的功率密度大,材料被加热至部分汽化,产生大量的金属蒸汽,蒸汽逸出时对熔池液态金属产生反冲压力,将熔化的金属液体向四周排挤,形成一个贯穿熔区的细长凹坑,也就是匙孔。依靠小孔效应,使激光光束的光能传向材料深部,激光功率足够大时,匙孔深度加大。随着激光光束相对于焊件的移动,金属液体凝固形成焊缝,焊缝窄而深,其深宽比可达到12:1。激光深熔焊接可以连接较厚的材料,因此实际生产应用较多。但大的功率密度也容易导致材料内部出现焊接缺陷,需要较好地控制工艺参数。这两种焊接方式需根据实际的材料性质和焊接要求来选择。

除以上两种基本分类外,随着不同工业环境的需要,研究者们也在此基础上开发了新的激光焊接方式,如振荡激光焊接、真空激光焊接、填丝焊接等,但这些工艺的基本原理都是相同的。

2 激光焊接的关键技术

2.1 激光源

激光焊接的激光源是激光焊接系统中的关键组成部分,其功率、谱宽、光束质量及亮度等参数都会直接影响焊接质量、焊接效率和成本。目前,激光源可分为气体、固体以及半导体激光器。

气体激光器采用较多的是二氧化碳(CO_2)激光器,其输出波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$,属于远红外波段,是最早用于激光焊接的激光器之一。它能产生高功率的激光束,适应性强。但由于需要定期更换工作气体,维护困难,且 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的波长对于铜、铝等材料并不适用。

固体激光器则包括Nd:YAG(掺钕钇铝石榴石)

激光器和光纤激光器。Nd:YAG激光器同样具有高功率密度,且能够调整输出波长,在早期应用广泛;然而Nd:YAG激光器的能量转换率相对较低,这不仅增加了能耗成本,还需配套额外的散热系统来降低温度。光纤激光器不仅能够输出高功率、高质量的激光,其转换效率也远高于传统激光器。更重要的是,它可以通过光纤传输激光,使得激光头和主体分离,增强了设备的灵活性,有利于自动化。这些独特优势使其逐渐在激光焊接领域成为主流。

半导体激光器也被称为二极管激光器,具有体积小、效率高、成本低等优点,但功率不高,光束质量较差,主要应用在小型化电子元件的低热输入焊接。

2.2 焊接工艺参数

工艺参数是激光焊接的关键技术之一,其中,功率密度(包括激光功率、焊接速度、光斑直径),离焦量以及搭接方式都会对产品质量产生较大影响。

激光功率是激光焊接技术的首选参数,只有保证了足够的激光功率,才能得到好的焊接效果。不同激光功率下TA5钛合金的熔池纵截面金相照片如图2所示,可以看出,激光功率较小时,虽然也能触发小孔效应,但有时焊接效果不好,焊缝内有气孔;激光功率加大时,焊缝内气孔消失,因此激光深熔焊接时,不要采用“临界小孔功率”。适当加大激光功率,可以提高焊接速度和熔深,只有在功率过大时,才会引起材料过分吸收,使小孔内气体喷溅,或焊缝产生疤痕,甚至使工件焊穿。

焊接速度会影响焊缝的形状和质量。如图3所示,以PHS2000钢焊接为例,过快的焊接速度虽能提升生产效率,但可能导致熔池凝固过快,出现焊缝不连续或气孔;适当降低焊接速度可提高线能量,增加熔深,但速度过低会使熔宽过度增大,此时金属熔化量过多,金属蒸汽压力不足,且等离子体浓度升高会削弱激光能量传递,限制熔深提升。

光斑直径直接决定能量集中程度,进而影响焊缝尺寸与精度。小光斑直径可形成高功率密度,适用于精密焊接,能获得窄焊缝与小热影响区,但对夹具定位精度要求高;大光斑直径则适用于大面积焊接或厚板预热,可降低局部能量密度,减少飞溅缺陷,但会增加熔宽。

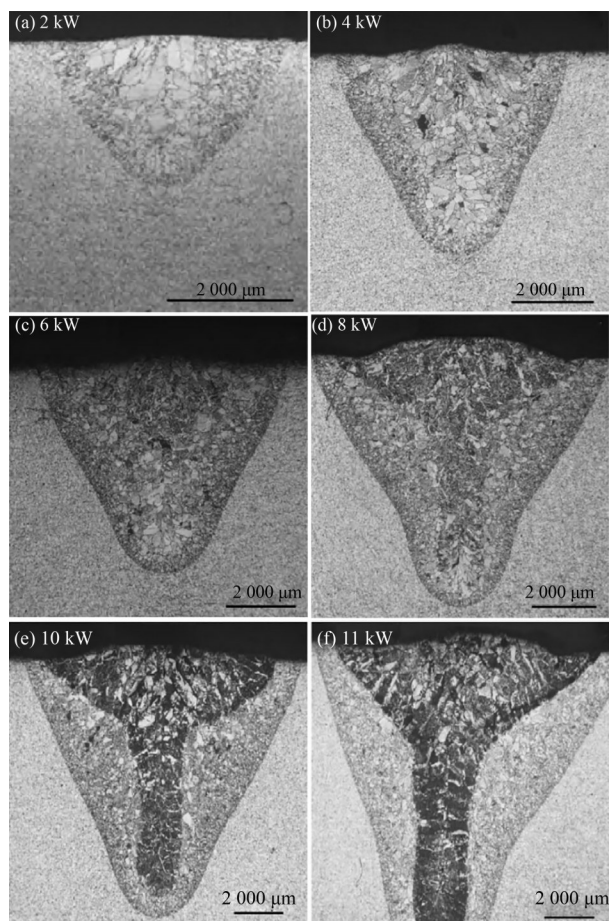


图2 TA5合金在不同激光功率下焊接的熔深形貌^[3]

Fig. 2 Fusion zone morphology of TA5 alloy welded at different laser powers^[3]

以上三个参数共同决定了功率密度。采用较高的功率密度,在微秒时间范围内,表层即可加热至沸点,产生大量汽化。因此,高功率密度对于深熔焊接或材料去除加工(如打孔、切割、雕刻)有利。对于较低功率密度,表层温度达到沸点需要经历数毫秒,在表层汽化前,底层达到熔点,易形成良好的熔融焊接。

除了以上三个关键参数外,离焦量也会对焊接过程产生较大影响。因为激光焦点处光斑中心的功率密度过高,容易蒸发成孔;偏离激光焦点的各平面上,功率密度分布相对均匀。在满足正常焊接需求的激光功率(或脉冲能量)设定下,焦平面处的实际激光功率密度往往已超出焊接所需阈值,在焦点位置焊接,可能会出现金属汽化、熔渣飞溅或是打孔现象,如图4所示,在焦点位置焊接的焊缝表面出现了明显的气孔。正确的焊接技术是使焦平面

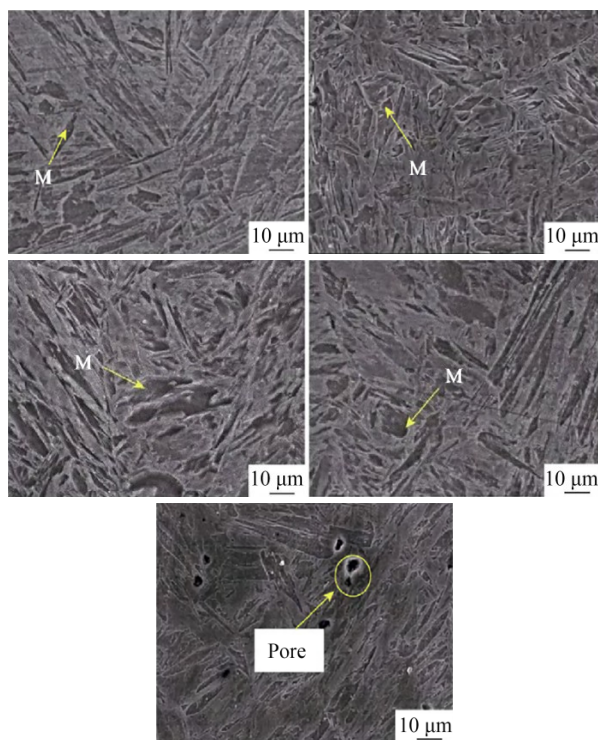


图3 PHS2000钢在不同焊接速率下焊接的SEM形貌^[4]

Fig. 3 SEM morphology of PHS2000 steel welded at different welding speeds^[4]

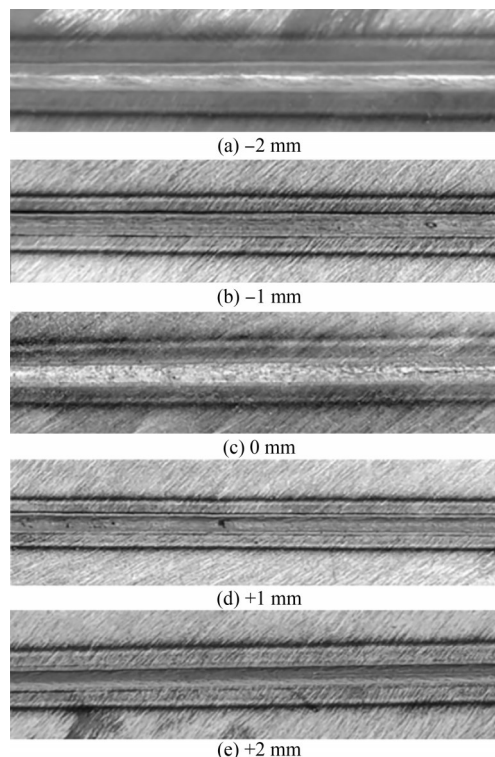


图4 DP780双相钢在不同离焦量下焊接的焊缝形貌^[5]

Fig. 4 Weld morphology of DP780 dual-phase steel welded at different defocus distances^[5]

离开工件表面一小段距离,这个距离称为离焦量。以工件表面为准,焦平面深入工件内部称为负离焦,焦平面在工件之外称为正离焦。一般对熔深要求不高时最好用正离焦,这样很容易获得牢固美观的焊缝。实际焊接过程中经常是激光器各项参数设置完毕后,最后经由微调离焦量,来达到完美的焊接效果。

此外,焊接件的搭接方式改进对于异质材料连接、降低夹具精度有重要意义。比如对于 Al-Cu 异质材料连接,由于两者的激光吸收率差异较大,拼接方式较难焊接,通常采用搭接和叠接方式。

2.3 在线监测和控制

激光焊接过程涉及许多复杂的物理过程,包括金属熔化/凝固、小孔形成和激光-金属相互作用,从而导致非常复杂的流动现象,因此焊缝质量很容易受到一些工艺变量和缺陷的影响。为实现焊缝质量的精准管控、抑制缺陷产生,并深化对焊接过程的认知,开发在线监测与闭环控制技术已成为激光焊接领域的核心研究方向,其核心思路是通过捕捉焊接过程中的特征信号,反向表征过程状态并实时调整工艺参数。

2.3.1 主流监测技术与传感系统

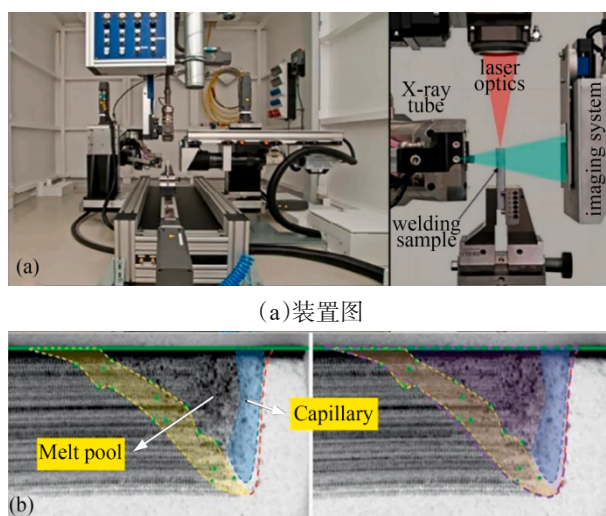
当前在线监测方案的设计核心是利用激光与金属相互作用过程中产生的熔池、匙孔和等离子体羽流等物理现象所伴随的声^[6-7]、电^[8-9]、热辐射^[10]和视觉信号^[11],通过专用传感器实现信号采集,进而反映焊接过程和接头质量。因此,正确使用各种监测传感器和系统对于准确描述激光焊接过程至关重要。例如,声信号监测是通过麦克风或压电元件采集焊接过程中空气声和结构声发射信号;视觉传感器包括电荷耦合器件、互补金属氧化物半导体和带有特殊滤波器的高速摄像机,用于捕捉熔池、羽流和飞溅的图像;光谱仪和光电二极管传感器用于收集包括可见光、红外光和紫外光波长的光信号;近红外摄像机和高温计可用于收集从焊接区发出的热信号^[12]。复杂的监测系统通常由上述传感器组成,将更全面地收集各类焊接信息。

2.3.2 关键技术瓶颈与解决方案

尽管主流传感技术已实现信号的实时采集,但由于激光与金属相互作用的高动态、复杂特性,这

些设备在过程监控中往往存在着极大的限制,如高速摄像机和光谱仪容易受到焊接过程的羽流和飞溅干扰,无法准确快速地提供熔池信息。因此如何在较低信噪比、强金属蒸汽/飞溅环境下实现各类光信号的高质量、快速采集和分析以及在具有多种相互作用因素的时变、非线性过程中准确预测/识别最终焊接质量等成为了监测技术的研究重点。为了解决这些问题,研究者们开始逐步开发原位无损检测系统设备,应用先进的信号处理算法来提取过程特征,并结合深度学习来还原过程的复杂特征。

为了解决传统视觉监测无法穿透等离子体、飞溅、难以观察匙孔内部动态等问题,研究者们提出了新的原位检测手段。德国钢铁工具研究所设计了一套 X 射线高速成像系统^[13],它能够以 10 kHz 的高帧率进行原位观察,如图 5 所示,该装置成功捕捉到焊接中熔池和匙孔的典型形貌。Precitec 公司基于光学相干断层扫描开发了一种在线检测系统^[14],可以实现 70 kHz 的高速匙孔深度测量,轴向精度达 10 μm ,能实时反馈熔深变化。湖南大学开发了一种低成本、灵活的夹层方法^[15],将待焊金属件夹于两片透明玻璃之间,可清晰观察到焊接时的匙孔,如图 6 所示。

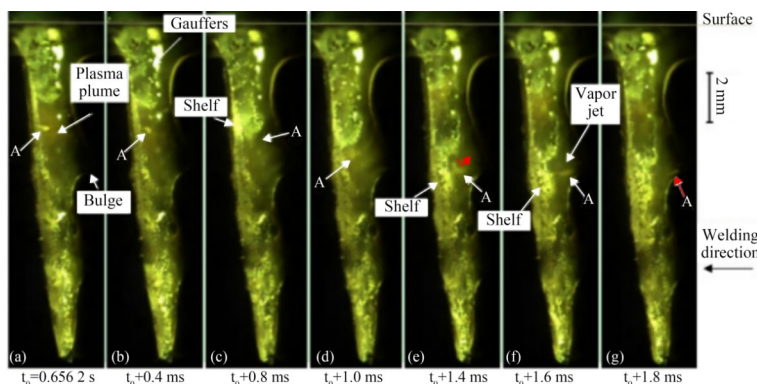


(b) 获取的熔池和匙孔典型形貌

图5 X射线高速成像系统^[13]

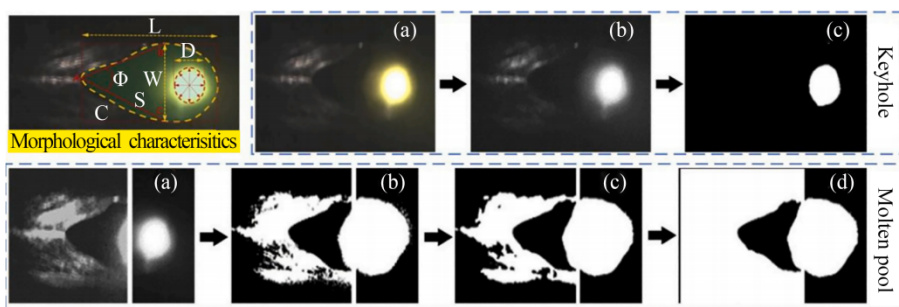
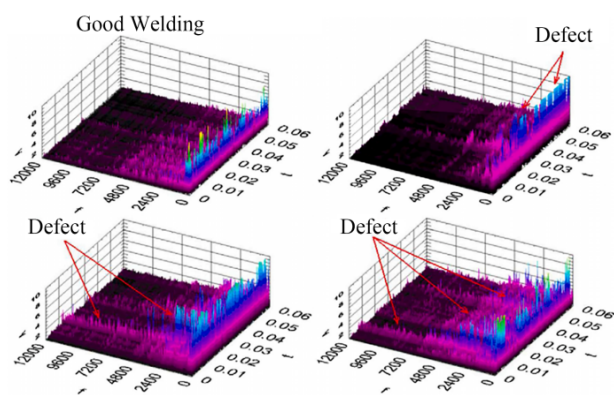
Fig. 5 X-ray high-speed imaging system^[13]

传感器采集的原始信号(如图像、光谱数据)往往包含噪声(如环境光、电磁干扰),需通过先进算法提取有效特征,实现“信号-过程状态”的定量映

图6 金属-玻璃夹层试样直接观察的匙孔形貌^[15]Fig. 6 Directly observed keyhole morphology in a metal-glass sandwich specimen^[15]

射。当前主流算法可分为传统信号处理算法和人工智能辅助算法两类。雷正龙^[16]课题组通过同轴检测系统采集了激光焊接熔池图像,并采用灰度处理和二值化提取熔池的几何特征,如长度、宽度、拖尾角和面积,如图7所示。相比于图像信息,一维的

光信号更为抽象,因此有效的处理算法更为重要。Molino^[17]等人利用短时傅里叶变换方法研究了沿时间轴的频率特性。结果表明,当出现焊接缺陷时,光辐射信号的高频分量大大增加,如图8所示,这可以为缺陷检测和定位提供可靠依据。

图7 熔池及匙孔的图像处理流程^[16]Fig. 7 Image processing procedure for the molten pool and keyhole^[16]图8 激光焊接过程中的时频分析缺陷检测^[17]Fig. 8 Time-frequency analysis for defect detection during laser welding^[17]

激光焊接过程的复杂性使得其产品的质量特征与工艺参数的相关性难以确定,并且增大了实时检测分析的难度。随着人工智能技术的发展,研究者们可以在不深入探究过程机理的情况下快速获

得预测数据。Stadter^[18]等人利用光学相干断层扫描测量深熔焊接过程中匙孔的深度,并开发了人工神经网络来揭示匙孔深度和焊缝质量之间的相关性,成功实现了较好的焊缝质量预测,如图9所示。

尽管在线监测技术已取得显著进展,但仍面临两大核心挑战:一是设备成本高,二是人工智能算法的泛化能力尚待研究。因此开发低成本、高鲁棒性的传感设备,构建新型、准确、即时的监测方法仍有较大的开发空间。

3 激光焊接的研究进展

3.1 焊接接头性能的提升

激光焊接的快速加热-冷却特性虽能提高效率,但易导致接头缺陷(如裂纹、气孔)与微观组织

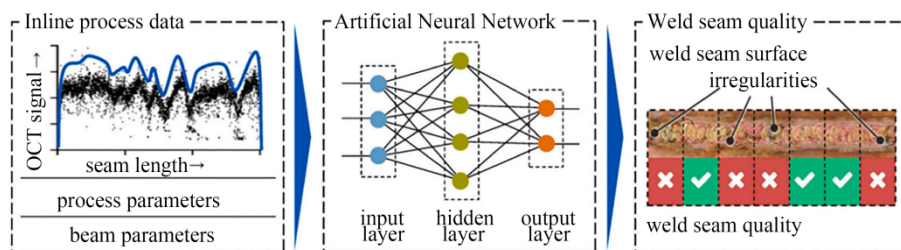


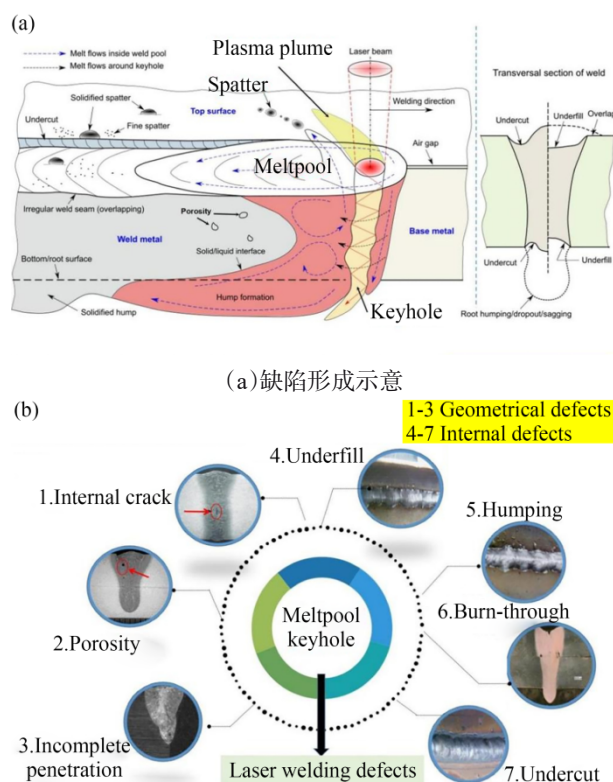
图9 基于光学相干断层扫描数据和人工神经网络模型的焊接质量预测^[18]

Fig. 9 Welding quality prediction based on optical coherence tomography data and artificial neural network models^[18]

劣化,对接头性能产生不利影响。当前研究通过焊接接头的缺陷控制、微观结构、间隙公差和焊接接头的焊后处理等措施,实现接头性能的提升。

3.1.1 焊接缺陷的成因和控制

激光焊接的常见缺陷如图10所示,包括内部裂纹,气孔,飞溅以及其他表面缺陷。



(a)缺陷形成示意

(b)常见缺陷形貌^[2]

图10 激光焊接的常见缺陷

Fig. 10 Common defects in laser welding

接头内部裂纹多源于快速冷却导致的热应力集中,或异质材料/相之间的热膨胀系数差异,常出现在脆性材料焊接以及异种材料焊接接头中。除了使用脉冲激光来控制热源输出以减小热应力外,研究者们通过改进相关工艺来抑制裂纹产生。陈

玉华等^[19]采用低功率脉冲激光,以纯Ni丝作为填充材料来对TiNi合金和不锈钢进行填丝激光焊接,Ni丝的加入降低了焊缝中Fe和Ti的含量,使得焊缝以及不锈钢边界处生成金属间化合物的可能性减小,抑制了裂纹的产生。宋凡等^[20]对比了不锈钢/钼激光焊接中不同能量控制方式时的裂纹产生情况,结果表明,虽然两种材料的熔点相差较大,激光中心偏向钼时能够使两者较均匀熔化,但会生成明显的脆性金属间化合物,从而产生裂纹,因此较好的能量模式为:激光中心对准焊缝,并尽可能减小功率和焊接速度。

气孔缺陷可以分为两类。一类是熔融金属的气体由于温度降低导致其溶解度下降而析出,或者因冶金反应产生的不溶性气体来不及浮出熔池残留在焊缝中形成的气孔。此类气孔在传统的熔焊过程中也大量存在,气孔中气体的主要成分为氢气、氮气、一氧化碳等不溶性气体,一般形状较为规则,气孔表面比较光滑,且尺寸较小,可以通过改善工艺条件的方式来消除。另一类则是在激光深熔焊中产生的气孔,一般出现在焊缝的根部或者中下部,其形状不规则且尺寸较大,此类气孔会存在尖角等。对于高功率激光焊接,其主要产生的气孔的类型为后一种气孔,即工艺性的气孔。Katayama等^[21-22]的研究分析表明由于不同的焊接速度,导致深熔小孔中不同的蒸发强度及不同的蒸发方向,对熔池的流动也造成不同的影响,使得焊速较低时,小孔深处的熔池金属更容易产生紊流而使小孔塌陷产生气泡,焊速较高时则可以减少小孔的塌陷。孙军浩^[23]对比了不同保护气氛下不锈钢的激光焊接气孔情况,结果表明,采用氩气与氮气保护时,气孔无法消除,而在氮气或无保护气时,气孔减少甚至消失。韩潇潇^[24]对比了不同环境压力下铝合金

的激光焊接气孔情况,其实验与模拟结果如图11所示,发现降低环境压力有利于降低气孔率,这归因于低压下激光能量在匙孔各处分布均匀,降低了气泡产生的可能性,同时熔池变小,也减小了气泡被捕获的可能性。

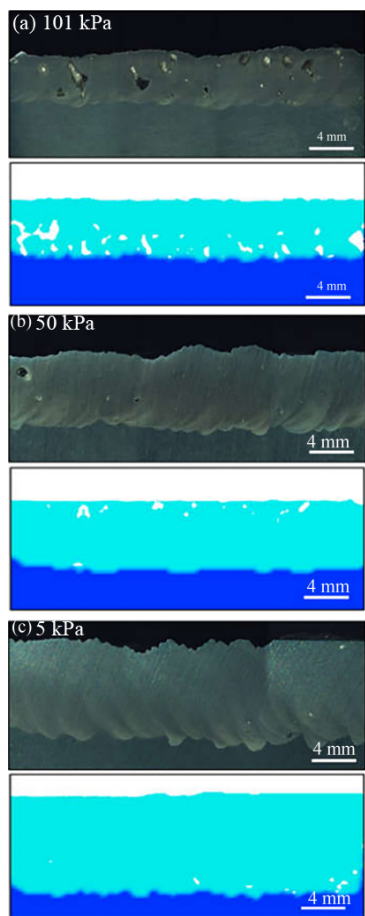


图11 不同环境压力下气孔情况的实验结果与模拟结果^[24]

Fig. 11 Experimental and simulated results of porosity under different ambient pressures^[24]

飞溅是焊接过程中熔池不稳定的表现,严重的飞溅情况容易引起其他表面缺陷。飞溅的产生与激光能量过于集中、不正确的气流流向以及材料本身性质有关。黄晔^[25]基于对飞溅的图像增强和运动轨迹追踪的方法获取了焊接过程中飞溅的运动特征,发现飞溅具有沿焊接方向分别向前和向后运动的倾向性,飞溅从匙孔周围脱离熔池的运动方向与金属蒸汽羽烟的喷射方向具有密切的关联性。黄晔还建立了金属蒸汽流通过动压力和粘滞力对匙孔壁金属熔体运动的作用模型,发现金属蒸汽运动冲击匙孔壁产生的动压力是驱使匙孔壁金属熔

体向上运动并形成飞溅的主要影响因素。随着Mg元素含量的增加,金属蒸汽速度的增大,激光焊接Al-Mg合金过程中形成的飞溅数量增多。

总的来说,目前同种材料激光焊接的常见缺陷能够通过控制相关工艺参数来控制 and 预防,异种材料焊接则需要进一步研究并开发新的工艺。

3.1.2 同种材料的激光焊接

普通碳钢,合金钢,不锈钢相对来说都适合采用激光焊接,这源于其较低的热导率,能够获得深且窄的焊缝。因此,研究者们更倾向于使用激光焊接厚的钢材。Tao等^[26]采用双向光纤激光(激光功率12.5 kW,焊接速度0.9 m/min)实现了20 mm厚度的高强钢连接(如图12所示),但焊缝内部存在大量马氏体且C大量固溶,导致接头强度上升、韧性下降,这可能会导致氢脆开裂。针对过度硬化问题,Zheng等^[27]开发了一种高频电协同激光焊接(HFLW),通过平衡热输入分布,降低冷却速度,减少S690QL钢焊缝马氏体含量,保持了晶粒均匀性和组织均匀性,焊缝处的马氏体含量大大降低。

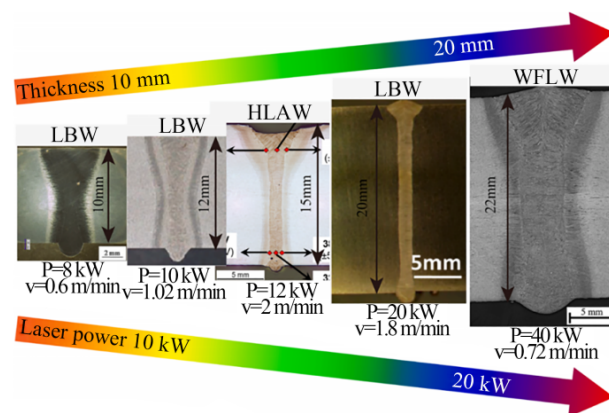


图12 采用双向激光焊接工艺连接的20 mm钢板^[26]

Fig. 12 20 mm steel plates joined by a dual-laser welding process^[26]

钛合金的激光吸收率高,因此焊接性较好,但高冷却速率也使得焊缝出现晶粒粗大、残余应力过大的问题。Sun等^[28]采用低压振荡激光焊接Ti-6Al-4V合金,低压抑制蒸汽压力波动以降低孔隙率,振荡激光减小热梯度、促进晶粒细化。Liu等^[29]利用激光-电弧复合焊实现了40 mm厚Ti-6Al-4V连接,焊缝处大量的马氏体板条以及密集位错可能会导致接头的塑性不均匀性,但丝织构的出现以及几何必要位错密度的增加也提高了晶粒的变形能

力,有利于提高焊接接头的塑性,如图13所示。Sun等^[30]进一步发现,焊接孔隙主要分布在熔合区边界,此处的残余应力高达330 MPa,这抑制了焊件拉伸时熔合区边界断裂的倾向,而消除应力后的焊接表现出脆性断裂特征,合理的残余应力分布可以对接头性能产生有利影响。

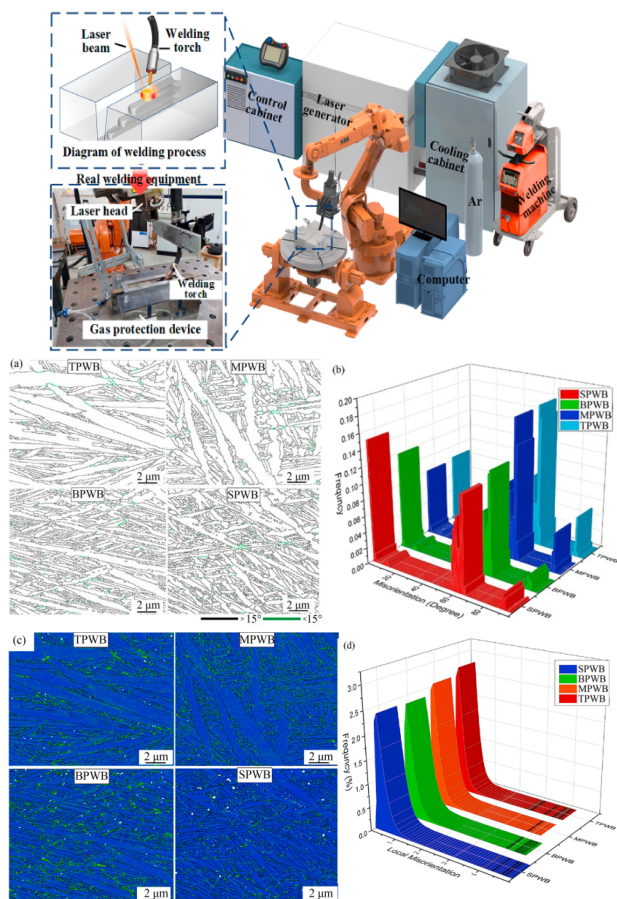


图13 激光-电弧复合焊接设备及Ti-6Al-4V焊缝微观组织^[29]

Fig. 13 Laser-arc hybrid welding equipment and Ti-6Al-4V weld microstructure^[29]

铝合金的激光反射率较高,这使得焊接时需要更高的功率密度输入,但这极易引发熔池失稳与气孔缺陷。因此,稳定熔池是铝合金激光焊接的关键。为此,研究者们开始采用新的焊接工艺。Liu等^[31]研究了较厚的高镁铝合金板材激光焊接过程中不同激光振荡参数和振荡路径对孔隙率的影响,采用∞形的振荡路径可通过对匙孔的强烈搅拌和扩大其运动轨迹,将气孔率降至0.3%。Wang等^[32]采用14 μm单模振荡激光焊接技术实现了2A12铝合金的高质量焊接,该技术凭借其极小的光斑,实现

了0.1 mm小振幅下的高频振荡,有效细化了熔合区晶粒并均匀化了其取向。

由于应用领域的不同,其他材料同质焊接的研究较少。总的来说,同种材料的激光焊接工艺已较为成熟,接头在缺陷基本消除的情况下,需要根据应用情况来调控其微观组织来满足性能需求。

3.1.3 异质材料的激光焊接

异质材料的连接可以最大程度地发挥材料各自的性能,具有良好的应用前景。然而异种材料的物理化学性能差异较大,易导致化学不相容、金属间化合物过量生成、界面受热不均、接头应力过大等难题。为了克服这些问题,学者进行了许多研究,其中不锈钢和Al合金的研究相对较多,如图14所示。本文选择一些目前应用较广的异质材料研究进展进行阐述。

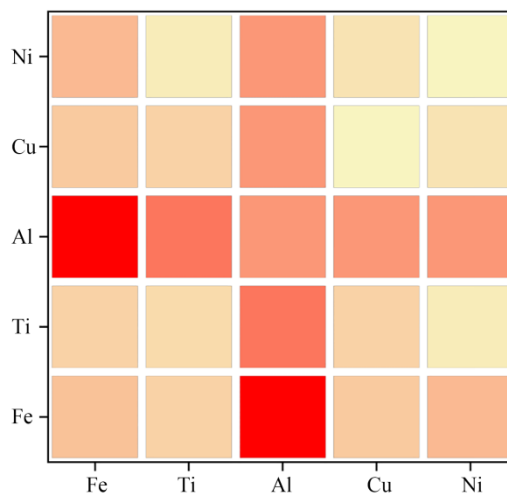


图14 2020-2025年合金的激光焊接文献数量热力图(坐标轴元素代表合金基体元素,数据来源于爱思唯尔)

Fig. 14 Heatmap of the number of publications on laser welding of alloys from 2020 to 2025 (the axis elements represent the base elements of the alloys, data sourced from ELSEVIER)

钢/铝异质焊接件能够满足轻量化和强度的要求,在汽车制造领域有广泛的应用前景,但两者的热物理性能差异大,且固溶度低,导致焊接界面极易生成脆性Fe-Al金属间化合物,成为接头开裂的主要诱因。因此,抑制IMC的形成与生长是获得高质量钢/铝接头的核心。Fan等^[33]对低碳钢与铝合金进行激光束焊接,确定了冷却时间是控制界面IMC厚度的关键因素。Cai等^[34]开发的旋转激光钎焊技术,通过降低界面峰值温度和温度梯度,有效

减薄了IMC夹层并抑制了脆性 θ 相的生成。界面改性则通过引入中间元素来实现。例如,通过表面预置Zn涂层或添加ER4043 Al-Si填料^[35]等来抑制金属间化合物形成。近年来,研究者开始考虑磁场辅助激光焊接。Tse等^[36]的研究表明,低磁场能有效控制等离子体并显著增加焊缝熔深。在此基础上,Li等^[37]利用磁辅助激光焊接连接了Fe/Al异质材料,组织分析结果显示,焊缝内部成分偏析和金属间化合物明显减少,接头强度韧性提高。

钢/钛连接的经济效益显著,但Fe-Ti的IMC问题同样突出。添加中间层是主流解决方案。Tomashchuk等^[38]使用V中间层对Ti-6Al-4V和AISI-316L进行激光焊接,未熔化的V层抑制了Fe-Ti金属间化合物的形成,接头强度达到130 MPa。Ning等^[39]提出了一种在Ti-2Al-Nb和42CrMo钢的激光焊接中加入部分熔化的V中间层的方法,元素分析结果表明,V中间层阻止了Fe-Ti混合区的形成,没

有形成金属间化合物,接头抗拉强度达到572 MPa。Bi等^[40]则采用Monel 400夹层(63%Ni-30%Cu),并在钢与夹层处采用熔焊、钛与夹层处使用热导焊的复合工艺,最终焊接接头最大抗拉强度为216 MPa。

钢/铜异质材料在新兴储能行业,如电子工业和汽车电池中有较广阔的应用前景。但两者的热物理性质差异较大,且Fe-Cu存在混溶间隙,液态Cu会渗透至固态钢晶粒之间,导致热裂纹的扩展,如图15所示。振荡激光焊被证实是抑制此类裂纹的有效手段,其通过促进晶粒细化与溶质均匀分布,形成弥散的 ϵ -Cu析出相^[41]。界面调控是另一重要途径。Chen等^[42]通过在含硅的熔融铜和实心钢之间构建界面铁氧体带,可以防止固体钢的晶间液体铜穿透裂纹。Xiao等^[43]采用填充Cu-Ni焊丝的激光-冷金属(CMT)复合焊接获得了性能良好的Cu/304ss接头。结果表明,使用Ni丝填充可以有效抑制渗透裂纹。

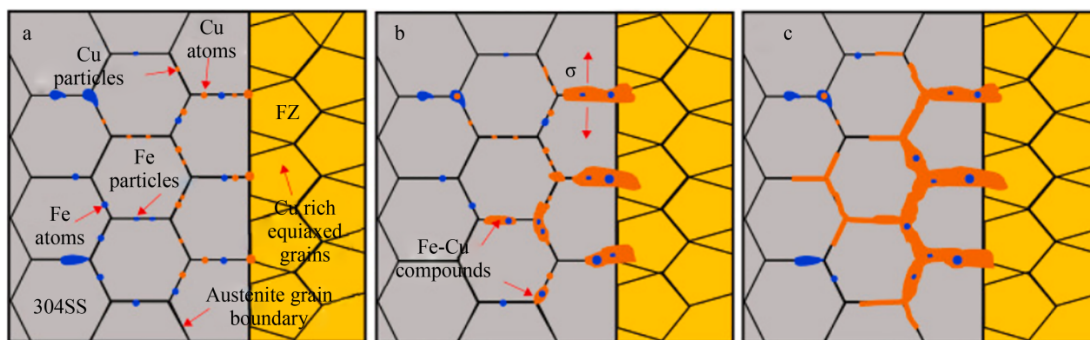


图15 钢铜异质材料焊接的渗透热裂纹形成机理^[43]

Fig. 15 Formation mechanism of penetration hot cracking in steel-copper dissimilar material welding^[43]

钢/镍异质材料能够充分发挥镍基合金防腐蚀性能优异的特点,在内外防腐蚀差异较大的海底管道上得到了应用。由于物理性能差异较大,复合板的焊接质量取决于熔合区,即镍/钢混合区的强度和防腐蚀性能。为了寻求接头强度和防腐蚀性能的平衡,需要减少Fe侧过渡层的厚度,并加入Cr, Ni等防腐蚀的填充元素。为抑制Fe元素向Ni层的扩散,Xu等^[44]开发了一种复合焊接工艺,首先对Ni层进行无填充金属的激光焊接,随后采用钢填充金属进行电弧摆动焊接以形成过渡区,如图16所示。该工艺成功获得了组织均匀的激光焊缝,使其具备较好的耐腐蚀性;过渡焊缝的抗拉强度高达500 MPa,电荷转移电阻为 $756 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$,满足一般海底管道的

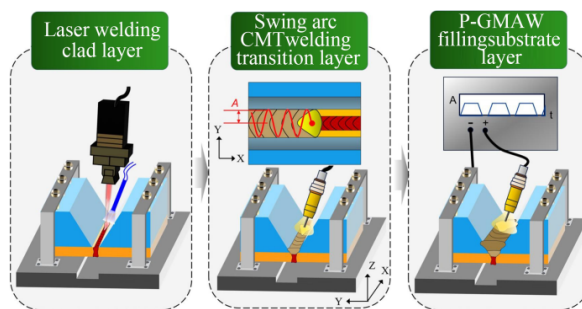


图16 分层焊接工艺示意^[44]

Fig. 16 Layered welding process schematic^[44]

防腐要求。

钛合金与铝合金同作为轻金属,其高强度结合材料是航天领域所亟需的,因此钛/铝异质结合受到了研究者的广泛关注。然而,Ti-Al的固溶度很

低,焊接时金属间化合物的大量形成导致接头塑性极差,严重制约了其应用。为抑制IMCs的形成,To-mashchuk等^[45]发现,激光束偏向Al侧时可有效减小IMC层厚度,而该厚度是影响接头裂纹扩展的关键。Li等^[46-47]采用激光钎焊获得了Ti/Al异种合金接头,随着激光功率的增加,IMC形貌由胞状变为棒状,且IMC之间具有明显的取向关系(OR),Ti/Al界面处金属间化合物的不均匀分布加速了接头的断裂速率。Zhao等^[48]通过建立Ti/Al异种合金激光钎焊宏观传热-流体流动耦合模型,基于此修改焊接参数,成功将IMC层厚度减至5 μm ,从而提升了接头性能。

钛/铜异质材料在航空航天探测器领域有潜在的应用价值,但其同样存在金属间化合物导致的脆性开裂问题,并且由于Ti与Cu对常见的1 060 nm激光的反射率较高,这会导致能源浪费且焊接过程不稳定。因此,研究者们开始采用蓝色短波长激光器连接钛和铜合金。Chen等^[49]利用1 080 nm与455 nm的混合激光源进行了同轴焊接,如图17所示。结果表明,该混合激光源扩大了加热范围,提高了熔池与小孔的稳定性;增加455 nm波长激光的功率比可降低熔池温度梯度,从而获得高质量接头,其最大抗拉强度达245.93 MPa。

钛/镍异质结构件在航空航天领域具有减重降本潜力,但其焊接因热物理性质差异大、固溶度低而易形成有害的金属间化合物相。目前,两者的激光焊接通常需要添加填充夹层来实现。Hu等^[50]通过添加Cu/Ta中间层实现了TC4与In718合金的连接,该方法有效抑制了金属间化合物的生成并提升了接头性能,但其强度仍仅为母材的45%左右。

铝/铜异质连接在新能源汽车电池电极耳等领域应用广泛,但其焊接面临熔点和比热容差异(造成焊接孔洞和裂纹)、低互溶度(生成金属间化合物)及激光高反射率(1 μm 激光波长下,Al、Cu的激光吸收效率分别低于20%和10%)等多重挑战。常规工艺通常使用近红外激光并将Al置于Cu之上进行焊接;而采用蓝色短波长激光源或混合激光源可能对Al-Cu合金的焊接更为有益。在材料方面,Furuya等^[51]证实添加Ni箔可通过形成(Cu,Ni)Al中间层来提升接头强度。此外,Ag、Sn和Si等纯金属

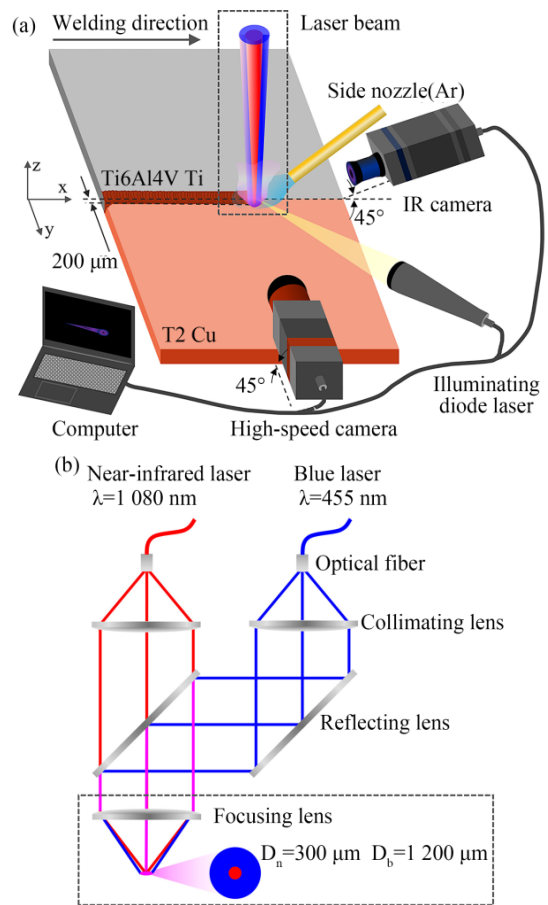


图17 混合激光装置和光源组成^[49]

Fig. 17 Hybrid laser system and light source composition^[49]

及其多元合金因与Al、Cu相容性较好,也被认为是抑制金属间化合物、优化接头性能的潜在候选材料。

Ni/Al异种连接在新能源汽车、电子封装和材料制备领域具有良好的应用潜力,但其焊接时生成的金属间化合物严重制约了接头机械性能。为抑制IMCs形成,Chen等^[52]通过控制激光束偏移实现了5052Al与纯Ni的焊接。研究发现,接头抗拉强度随偏移量增加呈先升后降趋势,最高抗拉强度达136.2 MPa,是5052Al母材强度的80%。

当前,异种材料连接的研究主要围绕激光光源优化、焊接工艺创新及中间层调控等方法展开,但大部分异种材料的开裂和欠熔合问题仍是制约其可靠应用的主要技术瓶颈。

3.2 新型激光焊接工艺的开发

如3.1.3节所述,为了解决部分材料连接困难的问题,研究者们开始开发新的激光焊接工艺。

振荡激光焊接通过使激光束在焊接过程中周期性摆动,可有效增加焊缝的熔宽和熔深,改善焊缝的成形和质量,从而抑制气孔与裂纹等缺陷,提升接头力学性能。Hao等人^[9]研究了激光振荡参数对AZ31B镁合金激光焊接组织的影响,优化振荡参数(如50 Hz频率,0.5 mm的振荡圆半径)可改善焊缝成形,但焊缝区的平均晶粒尺寸会随振荡半径的

增大而粗化。Wang等人^[53]通过数值模拟比较了不同振荡波形的能量输出,圆形、∞形振荡以及高速振荡在实现更均匀的能量分布、复杂的熔体流动和稳定的匙孔方面具有优势,如图18所示。但需要指出的是,振荡激光焊接在扩大焊区的同时也会导致熔深降低,这个现象使振荡激光在精密焊接等特定场景的应用受到限制。

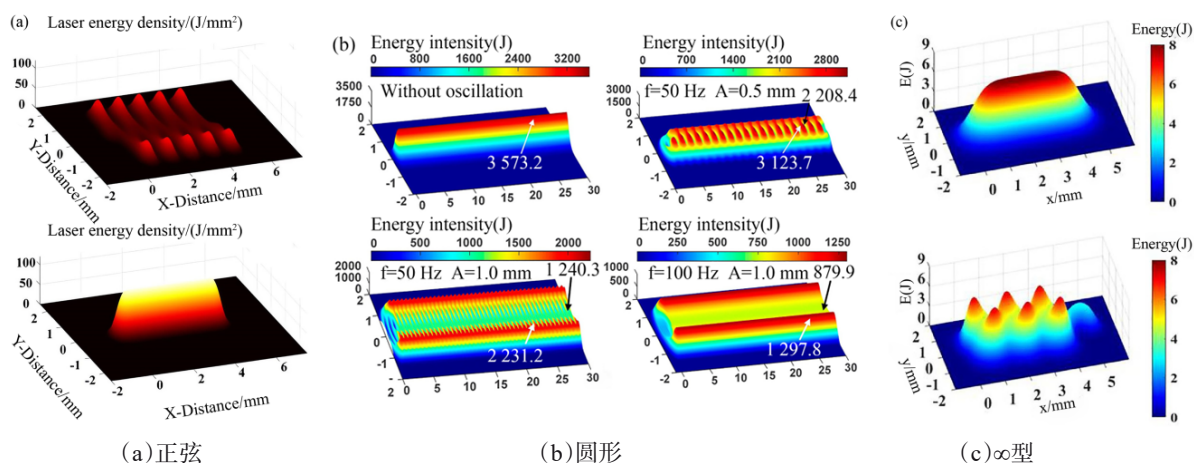


图18 不同振荡波形的能量分布规律

Fig. 18 Energy distribution patterns for different oscillation waveforms

激光填充焊接是在激光焊接的同时,添加其他材料来填充焊缝。这种工艺可以提高焊缝的填充量和强度,适用于厚板焊接和异种材料焊接。Deng等^[54]的研究表明,填充丝中Mg含量的增加会加剧匙孔坍塌,从而诱发更多气孔。Huang等^[55]则系统分析了熔滴过渡行为,发现液桥转移模式因过程稳定、焊缝成形优良而优于会严重扰乱熔池流动的液滴转移模式。在工艺控制方面,大送丝角度会降低填充焊丝吸收率,但低送丝角度由于送丝设备的尺寸问题在实际应用中通常必须避免。送丝角度为45°时可实现最佳能量吸收率,且丝-束相对距离需严格控制在1.5 mm以内,以确保焊接过程的稳定与接头质量。

激光复合焊接则是将激光与其他焊接方法(如电弧焊、等离子焊等)相结合。这种工艺可以充分发挥各种焊接方法的优点,提高焊接效率和质量。通过激光与其他热源的协同作用,增加焊缝熔深、提高焊接速度,同时还可以改善焊缝的冶金性能。Zhen等^[56]对比了16 mm厚的S355J2W+N板的激光-MAG焊焊缝与MAG焊焊缝质量,结果表明,复合

焊虽能获得高质量焊缝,但过渡区的应力集中仍会削弱接头性能,制约其工程应用。Kang等^[57]研究证实,激光-电弧复合焊获得的不锈钢复合钢焊接接头耐腐蚀性能与母材相当,且随激光与电弧距离的增加,激光与电弧热源分离,组织更加均匀。Lei等^[58]对激光-CMT复合焊的熔滴过渡过程进行了研究,由于激光等离子体的作用,短路时间和过渡频率随熔滴体积的变化而变化。加入激光后熔池有所铺展,但同时由于激光等离子体的热效应,焊丝的熔化量增加。其中主要因素是激光-丝距,它影响激光与电弧的耦合。此外,激光功率的增加加速了焊丝的熔化,使熔池扩大。

超快激光焊接是利用皮秒或飞秒级的超短脉冲,凭借其极高的峰值功率和极短的作用时间,实现了高精度、低热输入的焊接,适用于微电子与医疗器械等领域的精细焊接。该技术通过在极短时间内将能量集中于微小区域,有效抑制热扩散,从而避免母材热变形和热损伤。Chatterjee等^[59]通过优化功率成功改善了Al/Cu异种接头的微观组织,抑制了气孔与裂纹。Wang等^[60]研究了纳秒脉冲激

光工艺参数对铝合金表面晶粒结构和织构形成的影响,结果表明,控制激光功率可以获得更好的织构结构和焊缝坡口形貌质量。Wu等^[61]使用纳秒脉冲激光焊接成功连接了AZ31B镁合金和6061铝合金,当激光功率25 W是最佳功率,能实现界面元素分布的均匀分布。

多光束激光焊接通过多束激光协同作用,可提升焊接效率、改善焊缝质量和均匀性,并实现复杂焊缝的一次成形,减少焊接接头的数量,提高焊接结构的可靠性。Li等^[62]采用双光束激光钎焊进行Ti6Al4V/AA7075异种金属搭接焊接。通过双梁焊接工艺的优化和TiC纳米颗粒对焊缝金属微观结构的调控,解决了异种金属焊接接头的裂纹。Lei等^[63]采用窄间隙双光束激光焊接(NGDBLW)研究了20 mm厚的10Ni5CrMoV高强度钢的焊接凝固裂纹抑制效果,发现光束间距会影响两束激光束的能量耦合模式和熔池形态。随着间距的增加,熔池依次呈现增强、膨胀、梯度凝固及焊缝重熔四种模式。熔池增强型对抑制凝固裂纹无效,而后三种模式对抑制裂纹有效。熔池膨胀和梯度凝固模式可以实现熔池自下而上的顺序凝固,并防止少量液态金属在焊缝中心封闭而引起的凝固裂纹。

能场辅助激光焊接技术是在焊接过程中加入不同的能场,如气流场、电磁场、超声场、等,可有效改善焊缝成形、抑制缺陷并提升接头性能。Xu等^[64]研究表明,保护气种类与流量显著影响等离子体特性,氩气作为保护气时的等离子体强度、电子温度和喷射持续时间均高于氦气,而增大气流量可降低等离子体的电子温度,并缩短等离子体喷射持续时间。郭新建^[65]通过两个滚轮向工件通电辅助激光焊接2219铝合金,结果显示,外加电流可消接头气孔,细化焊缝组织,提高接头强度;电流辅助激光焊接时产生的电磁效应可以在熔池凝固时使枝晶破碎。Cao等^[66]在研究磁场辅助激光焊时发现,磁场可以抑制熔池中熔融金属从下部到上部和中心到边缘的流动,减少了匙孔尖端到熔池表面及熔池中心到边界的热传递。Kolubaev等^[67]在超声辅助激光焊接低碳结构钢过程中发现,超声在液态金属中引起的超声空化效应能够降低树枝状偏析的程度并抑制铁素体晶体的生长,从而改变熔池的凝固条

件,提升焊接接头的强度。

以上新型激光焊接工艺的出现对于焊接接头性能的提升有着重大意义,但也在一定程度上增加了设备和工艺的复杂性,同时部分工艺对于焊接过程的影响尚未明晰,仍然需要进一步探索。

3.3 数值模拟和仿真技术的应用

焊接过程的物理现象对于控制焊接质量是十分重要的,然而目前的监测手段成本都较高,这无疑限制了焊接技术的发展。计算机技术的进步和理论理解的成熟使数值模拟成为一种有价值的工具。数值模拟具有成本低、精度高、呈现更直观等优势,因此在研究激光焊接过程时广泛使用,发挥着至关重要的作用,包括工艺参数的细化、以经济的方式减少反复试验、节省劳动力和资源,以及温度梯度、熔体流动和小孔运动等重要焊接现象的可视化。

3.3.1 数值模拟常用的控制方程和物理模型

(1) 流体控制方程。

宏观上,熔池被简化视为不可压缩的牛顿流体,需建立控制方程,包括连续性方程,动量方程和能量方程。

连续性方程可表示为^[68]:

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (1)$$

式中 $\vec{v}$ 是流体的速度矢量。

动量方程可表示为^[69]:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nabla \vec{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) - \nabla p - \frac{\mu}{k} \vec{v} + S_m \quad (2)$$

式中 t 为时间; ρ 为密度; μ 为粘度; p 为压力; K 为各向同性渗透率; S_m 为动量方程的源项。

能量方程为^[70]:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} H) = \nabla(k_h \nabla T) + S_E \quad (3)$$

式中 H 为焓; k_h 为热导率; T 为工件温度; S_E 为能量方程的源项。

(2) 热源模型。

热源模型旨在捕捉激光与焊接材料之间的相互作用,最初的热源模型基于傅里叶传热方程,随着时间推移,研究者们对其进行了许多改进。目前广泛应用于激光焊接的热源模型是高斯热源模型,

可表示为^[68]:

$$Q = \frac{9Ak_s P}{\pi R_0^2 H} \exp \frac{-9(x-x_0)^2}{R_0^2} \exp \frac{-9(y-y_0)^2}{R_0^2} \exp \frac{-9(z-z_0)^2}{H^2} \quad (4)$$

除了体热源外,数值模拟还需要考虑覆盖表面热源。它可以表示为两种形式,即双椭球热源(见式(5)、式(6))^[71]和圆形表面热源(见式(7))^[72],其示意图如图19所示。

$$Q_f = \frac{6\sqrt{3} Ak_f \delta_1 P}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp \left[-3 \left(\frac{(x-x_0)^2}{a_1^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} \right) \right], -c \leq z \leq 0, x \leq x_0 \quad (5)$$

$$Q_f = \frac{6\sqrt{3} Ak_f \delta_2 P}{a_2 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp \left[-3 \left(\frac{(x-x_0)^2}{a_2^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} \right) \right], -c \leq z \leq 0, x \leq x_0 \quad (6)$$

$$Q_f = \frac{9AK_s P}{\pi R^2 H (1-e^{-3})} \exp \left(-9 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{R_0^2} \right) \quad (7)$$

式中 A 为激光吸收率; k_s 为高斯体热源所占激光能量比重(仅高斯体热源时 $k_s=1$); P 为激光功率; R_0 为光斑半径; H 为热源高度; (x_0, y_0, z_0) 为热源中心坐标; k_f 为覆盖层热源所占激光能量比重; δ_1 为双椭球热源前半部分占能量比重; δ_2 为双椭球热源后半部分占能量比重; a_1, a_2, b, c 为定义双椭球尺寸和形状的参数。

在激光焊接传热和流体流动计算中,计算域表面的热对流和热辐射可定义为^[74]:

$$K_h \frac{\partial T}{\partial n} = -h_{\text{conv}}(T - T_0) - \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

式中 h_{conv} 是对流系数; T_0 是环境温度; σ 是 Stefan-Boltzmann 常数; ϵ 是辐射发射率。

(3) 蒸发模型。

焊接过程中,熔池由于激光束的运动而流动,导致熔体流动速度变化和涡流,同时会出现蒸发现象,若考虑蒸发造成的热量、质量和动量损失,则需要引入流体损失方程^[75]:

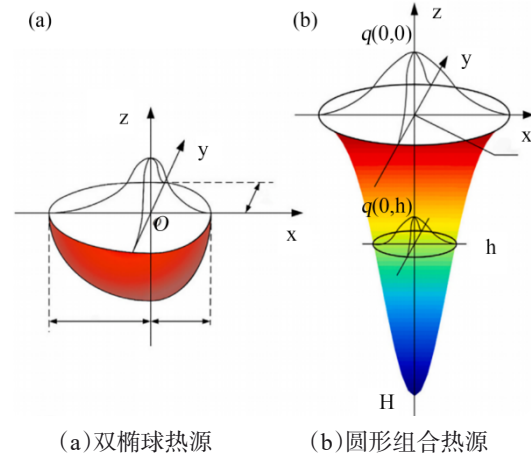


图19 组合热源示意^[73]

Fig. 19 Schematic of combined heat sources^[73]

$$q_{ls} = C_l(T - T_l) + L_v a \quad (9)$$

式中 C_l 为液相比热; T_l 为液相温度; L_v 为蒸发潜热。

质量损失方程为:

$$M_n = R_a \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_{\text{bdy}}}} (P_l^s - P_v) \quad (10)$$

式中 R_a 为调节因子; R 为气体常数; M 为蒸汽分子量; T_{bdy} 为熔融金属表面的平均液体温度; P_v 为蒸汽压力; P_l^s 为根据克劳修斯-克拉珀龙方程计算的局部温度下的饱和压力,可由式(11)得到:

$$P_l^s = P_{v1} \exp \left[- \frac{\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{v1}} \right) L_v}{C_p - C_v} \right] \quad (11)$$

式中 (P_{v1}, T_{v1}) 为饱和曲线上某点的坐标; C_v, C_p 为恒压蒸汽比热; C_v 为恒容蒸汽比热; L_v 为蒸发潜热。

(4) 反冲压力模型。

激光焊接中匙孔的变化十分重要,部分数值模拟研究将其简化,但匙孔的模拟对于焊接缺陷演化十分重要。Semak 等^[76]基于蒸发与熔融液喷发的亚稳定状态及质量能量守恒,利用伯努利方程对溶质流速与反冲压力的关系进行了变换与关联,最终优化得到反冲压力方程为:

$$P_v = \frac{A_0 B_0}{\sqrt{T}} \exp \left(- \frac{m_A L_v}{N_A k_b T} \right) \quad (12)$$

式中 m_A 是材料的原子质量; N_A 是阿伏伽德罗常数; k_b 是玻尔兹曼常数; A_0 是常数(在环境压力下无限接近于 0.55); B_0 是蒸发常数(由 Zhou 等^[77]确定为

1.78×10^{10} 。

(5) 菲涅尔反射吸收模型。

考虑了反冲压力后,激光与等离子体的相互作用导致激光束在匙孔壁上发生多次反射。每次反射都伴随着激光能量的吸收,称为菲涅尔吸收现象,如图20所示。由于激光束的振荡行为增强了能量分布的均匀性,菲涅尔反射吸收的影响不能被忽略。

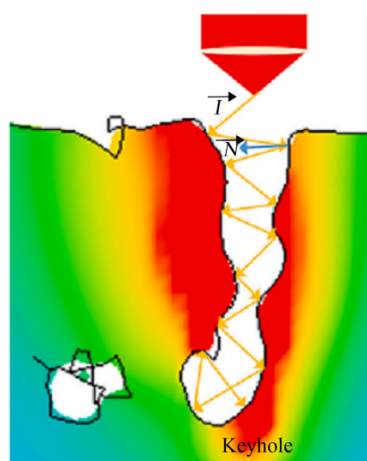


图20 菲涅尔反射吸收模型示意^[53]

Fig. 20 Schematic of the Fresnel reflection and absorption model

这一过程可用下式描述^[78]:

$$\alpha(\phi_{(n)}) = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{1 + (1 - \epsilon \cos \phi_{(n)})^2}{1 + (1 + \epsilon \cos \phi_{(n)})^2} + \frac{\epsilon^2 - 2\epsilon \cos \phi_{(n)} + 2 \cos^2 \phi_{(n)}}{\epsilon^2 + 2\epsilon \cos \phi_{(n)} + 2 \cos^2 \phi_{(n)}} \right] \quad (13)$$

式中 $\phi_{(n)}$ 是第 n 条入射光线与第 n 条表面法线之间的角度; ϵ 由激光类型和材料特性决定。

3.3.2 激光焊接的数值模拟案例

Ma 等^[79]构建了 Ti-6Al-4V 的热流模型来模拟研究不同横向重力条件下扭曲熔池的流动行为和小孔的动态演变,如图21所示,熔池的上部区域受马兰戈尼效应的影响,产生向上流动,而下部区域则因重力而向下运动。此外,随着横向重力角的增加,熔池内最大流速明显降低。

Ke 等^[80]建立了固液气多相数值模型,分析振荡激光焊接中的温度场和熔池。其模拟熔池形貌与实验结果一致性较好,如图22所示。其研究结果还表明,振荡激光焊接能够降低气孔率。

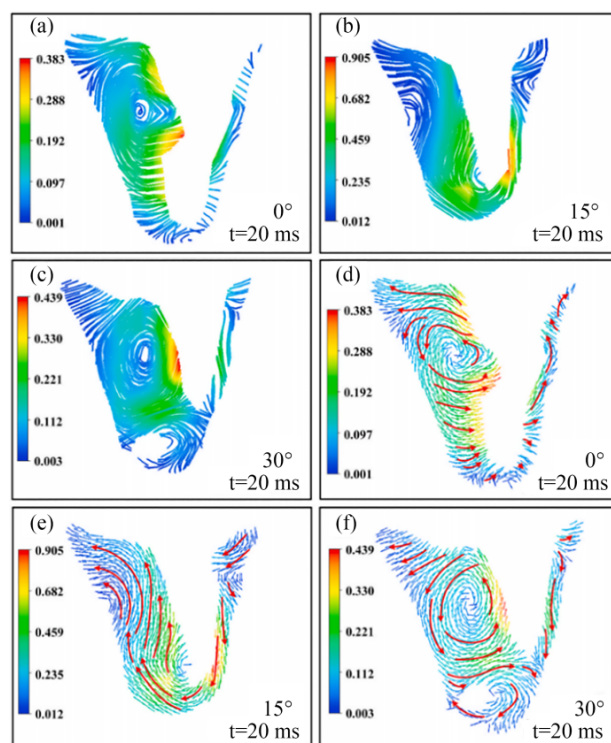


图21 不同角度重力下模拟的焊接熔池流动行为^[79]

Fig. 21 Simulated flow behavior of the welding molten pool under different gravity angles^[79]

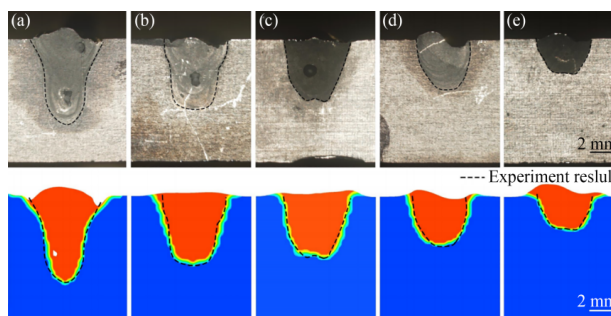


图22 实验焊接熔池和模拟结果的比较^[80]

Fig. 22 Comparison of the experimental and simulated welding molten pools

除了较为宏观的熔池行为模拟以外,Ai 等^[81]还利用微尺度相场模型,建立了考虑瞬态流场的 TC4 钛合金激光焊接熔池凝固过程宏微观耦合模型。结果表明,熔池内瞬态流场对组织形貌和溶质分布有明显的影响,上游侧溶质被流体携带而来,由于瞬态流场的输送作用而在下游侧聚集,下游侧界面前沿溶质浓度始终保持高于上游侧溶质浓度,沿下游侧柱状晶隙长度方向向下,溶质浓度呈振荡状逐渐减小。Didi 等^[82]基于有限元模拟方法获取数据库,引入了 Bayesian 机器学习方法,较为准确地估计了

焊接参数与热影响区宽度,峰值温度和焊缝纵横比的关系。

4 总结与展望

本文简要概述了激光焊接的原理、技术与研究进展,重点阐述了其在焊接缺陷控制、异种金属材料连接及数值模拟等领域的应用成果。当前,激光焊接技术已取得长足发展,并呈现出应用领域扩大、智能化与自动化水平不断提升的趋势。然而,该技术在工程应用中仍面临两大核心挑战:一是对工件装配间隙的公差要求非常高,这导致工装夹具成本较高;二是,异质材料连接过程中的界面控制与性能调控问题尚未得到根本性解决。

展望未来,激光焊接技术的发展将呈现以下趋势:(1)首先,随着数值模拟技术和在线监测技术的进一步发展,焊接过程有望实现“工艺-组织-性能”的全链条调控,为解决异质材料连接难题提供指导和技术支撑;(2)其次,高功率、高光束质量激光器的商业化应用将扩大激光焊接的应用范围;(3)再者,激光焊接技术与其他连接工艺和制造工艺的结合有望实现智能制造。总体而言,激光焊接技术将继续朝着高效、优质、智能和更广泛应用的方向发展,其在推动现代制造业转型升级中扮演越来越重要的角色,为各个行业带来创新和突破。

参考文献:

- [1] Liu S, Wu Z, Zhou W, et al. A review of welding simulation methods for large components [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2023, 33(5): 551-568.
- [2] Bunaziv I, Akselsen O M, Ren X, et al. Laser Beam and Laser-Arc Hybrid Welding of Aluminium Alloys [J]. Metals, 2021, 11(8): 1150.
- [3] 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+151.
JIANG B, HUANG R S, LI L L, et al. Study on the Welding Process of Ten-Kilowatt-Level Fiber Laser [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(10): 8-14+151.
- [4] 张婧珂, 刘岩, 杜安娜, 等. 焊接速度及芯环比对热成形钢双光斑激光焊接接头组织与性能的影响 [J]. 精密成形工程, 2024, 16(08): 155-164.
- [5] ZHANG J K, LIU Y, DU A N, et al. Effect of Welding Speed and Core-Ring Ratio on Microstructure and Properties of Dual-Spot Laser Welded Joints of Hot-Forming Steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(08): 155-164.
- [5] 田佳壮, 陶武, 杨上陆. 超大离焦量对 TRIP800 高强度钢激光焊接接头微观组织与力学性能的影响 [J]. 电焊机, 2023, 53(07): 40-45.
TIAN J Z, TAO W, YANG S L. Effect of Large Defocusing Amount on Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Welded TRIP800 High-Strength Steel Joints [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(07): 40-45.
- [6] Ao S, Luo Z, Feng M, et al. Simulation and experimental analysis of acoustic signal characteristics in laser welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 277-287.
- [7] Huang W, Kovacevic R. Feasibility study of using acoustic signals for online monitoring of the depth of weld in the laser welding of high-strength steels [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(4): 343-361.
- [8] Huang Y, Xu S, Yang L, et al. Defect detection during laser welding using electrical signals and high-speed photography [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 394-403.
- [9] Huang Y, Hou S, Xu S, et al. EMD-PNN based welding defects detection using laser-induced plasma electrical signals [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 642-651.
- [10] Kubiak M, Piekarska W. Comprehensive model of thermal phenomena and phase transformations in laser welding process [J]. Computers & Structures, 2016, 172: 29-39.
- [11] Sibillano T, Ancona A, Berardi V, et al. Optical detection of conduction/keyhole mode transition in laser welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1): 364-367.
- [12] Ancona A, Spagnolo V, Lugarà P M, et al. Optical Sensor for real-time Monitoring of CO₂ Laser Welding Process [J]. Applied Optics, 2001, 40(33): 6019-6025.
- [13] Abt F, Boley M, Weber R, et al. X-ray videography for investigation of capillary and melt pool dynamics in different materials [M]. ICALEO 2011: 30th International Congress on Laser Materials Processing, Laser Micro-

- processing and Nanomanufacturing, 2011: 179–186.
- [14] Mittelstädt C, Mattulat T, Seefeld T, et al. Novel approach for weld depth determination using optical coherence tomography measurement in laser deep penetration welding of aluminum and steel[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31: 022007.
- [15] Zhang M, Chen G, Zhou Y, et al. Direct observation of keyhole characteristics in deep penetration laser welding with a 10 kW fiber laser[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 19997–20004.
- [16] Lei Z, Shen J, Wang Q, et al. Real-time weld geometry prediction based on multi-information using neural network optimized by PCA and GA during thin-plate laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 207–217.
- [17] Molino A, Martina M, Vacca F, et al. FPGA implementation of time-frequency analysis algorithms for laser welding monitoring[J]. Microprocessors and Microsystems, 2009, 33(3): 179–190.
- [18] Stadter C, Schmoeller M, Von Rhein L, et al. Real-time prediction of quality characteristics in laser beam welding using optical coherence tomography and machine learning[J]. Journal of Laser Applications, 2020, 32(2): 022046.
- [19] 陈玉华, 龚伟怀, 倪泉, 等. TiNi 合金/不锈钢激光焊接头裂纹的形成和控制[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3168–3171.
- CHEN Y H, GOGN W H, NI Q, et al. Formation and Control of Cracks in TiNi Alloy/Stainless Steel Laser Welded Joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 3(12): 3168–3171.
- [20] 宋凡, 孟祥毅, 李思贝, 等. 能量控制方式对不锈钢与钽激光焊接头裂纹倾向性的影响规律[J]. 焊接, 2024(04): 40–46.
- SONG F, MENG X Y, LI S B, et al. Influence of Energy Control Methods on the Cracking Susceptibility of Stainless Steel and Tantalum Laser Welded Joints[J]. Welding & Joining, 2024(04): 40–46.
- [21] Katayama S, Kawahito Y, Mizutani M. Latest Progress in Performance and Understanding of Laser Welding[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 8–16.
- [22] Katayama S, Kawahito Y, Mizutani M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 9–17.
- [23] 孙军浩. 不锈钢高功率激光焊接熔深增加与缺陷控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- SUN J H. Research on Penetration Depth Enhancement and Defect Control in High-Power Laser Welding of Stainless Steel[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2018.
- [24] 韩潇潇. 铝合金负压激光焊熔深增强机制与气孔缺陷抑制机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- HAN X X. Study on the Penetration Enhancement Mechanism and Porosity Suppression Mechanism of Aluminum Alloy in Negative Pressure Laser Welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [25] 黄晔. Al-Mg 合金激光小孔焊镁元素蒸发行为及对焊接过程稳定性的影响机制[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
- HUANG Y. Evaporation Behavior of Magnesium and Its Effect on Welding Process Stability in Laser Keyhole Welding of Al-Mg Alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.
- [26] Tao P K, Mi G Y, Wang C M, et al. Formation, microstructure and mechanical properties of double-sided fiber laser welded ultra-high strength steel[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108208.
- [27] Ye Z, Yang B, Wang W, et al. High strength low alloy steel joint fabricated by laser welding with real-time high-frequency resistance heating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 332: 118573.
- [28] Sun H, Xu B, Li R, et al. A comparative study on welding characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V laser welded joints under the sub-atmospheric pressure and beam oscillation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 4245–4255.
- [29] Liu J, Yang T, Zhuang Y, et al. Micro crystallographically revealing the plasticity-evolved behaviors of thick Ti-6Al-4V laser-arc hybrid welded joint[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 459–467.
- [30] Sun W, Niu H Y, Xia Y P, et al. Combined effects of local residual stresses, internal pores, and microstructures on the mechanical properties of laser-welded Ti-6Al-4V sheets[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 216: 178–191.
- [31] Liu M, Shao C D, Zheng Z G, 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.
- [32] Wang L, Ma X, Mi G, et al. Microstructure and proper-

- ties of Al-Cu-Mg alloy welded by 14 μm single-mode laser small oscillation welding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 439–448.
- [33] Fan J, Thomy C, Vollertsen F. Effect of Thermal Cycle on the Formation of Intermetallic Compounds in Laser Welding of Aluminum-Steel Overlap Joints[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 134–141.
- [34] Cai C, Xie J, Wang H, et al. Welding characteristics and mechanical property of rotating laser welding-brazing of aluminum alloy to steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 107989.
- [35] Sun J, Yan Q, Li Z, et al. Effect of bevel angle on microstructure and mechanical property of Al/steel butt joint using laser welding-brazing method[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 468–477.
- [36] Tse H C, Man H C, Yue T M. Effect of magnetic field on plasma control during CO₂ laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, 31(5): 363–368.
- [37] Li F Q, Ding J H, Yan F, et al. Investigation of laser beam welding on lap joints of Al/steel dissimilar materials subjected to alternating magnetic field[J]. *Optik*, 2023, 272: 170372.
- [38] Tomashchuk I, Grevey D, Sallamand P. Dissimilar laser welding of AISI 316L stainless steel to Ti6-Al4-6V alloy via pure vanadium interlayer[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 622: 37–45.
- [39] Ning J, Pan L Z, Zhang L J. Laser-welded butt joints of Ti₂AlNb/42CrMo steel with addition of V interlayer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28: 3422–3434.
- [40] Bi Y, Xu Y, Luo Z. Material characterization and mechanical performance of laser diffusion welded joint between titanium alloy and stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2023, 336: 133927.
- [41] Gao Z M, Yang Y Y, Wang L, et al. Formation Mechanism and Control of Solidification Cracking in Laser-Welded Joints of Steel/Copper Dissimilar Metals[J]. *Metals*, 2022, 12(7): 1147.
- [42] Chen S, Yu X, Huang J, et al. Interfacial ferrite band formation to suppress intergranular liquid copper penetration of solid steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 773: 719–729.
- [43] Xiao P H, Wang L, Tang Y Y, et al. Effect of wire composition on microstructure and penetration crack of laser-cold metal transfer hybrid welded Cu and stainless steel joints[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 299: 127480.
- [44] Xu X, Zhou J, Cui H, et al. A new method for joining Incoloy825/X65 composite plate by laser and CMT welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 129: 11–23.
- [45] Tomashchuk I, Sallamand P, Cicala E, et al. Direct key-hole laser welding of aluminum alloy AA5754 to titanium alloy Ti6Al4V[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 217: 96–104.
- [46] Li P, Lei Z, Zhang X, et al. Effects of laser power on the interfacial intermetallic compounds and mechanical properties of dual-spot laser welded-brazed Ti/Al butt joint[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105987.
- [47] Li P, Lei Z, Zhang X, et al. Influence of Si content on interfacial reactions and mechanical properties of dual-spot laser welded-brazed Ti/Al joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 950–966.
- [48] Zhao J, Geng S, Jiang P, et al. Experimental and numerical research on formation mechanism of intermetallic compounds in laser brazing welding for Ti/Al dissimilar alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 31: 2930–2944.
- [49] Chen C, Jia J, Xu Q, et al. Study on laser welding of Cu/Ti dissimilar materials using a hybrid light source with wavelengths of 455/1080 nm[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 115: 94–107.
- [50] Hu Y, Wu L, Zhou P, et al. Fiber laser welding of Ti-6Al-4V to Inconel 718 bimetallic structure via Cu-Ta multi-interlayer[J]. *Vacuum*, 2021, 192: 110461.
- [51] Furuya H S, Sato Y S, Kokawa H, et al. Improvement of interfacial strength with the addition of Ni in Al/Cu dissimilar joints produced via laser brazing[J]. *Metallurgical And Materials Transactions A-physical Metallurgy And Materials Sci*, 2018, 49A(12): 6215–6223.
- [52] Chen S, Yu G, Li S, et al. Interfacial microstructures and mechanical property of Ni/Al dissimilar butt joint made by laser welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 50: 17–23.
- [53] Wang Z, Gao M. Numerical simulations of oscillating laser welding: A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 119: 744–757.
- [54] Deng A, Chen H, Zhang Y, et al. Effect of filler materials on the porosity formation of aluminum alloy by laser welding with filler wire[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 109000.
- [55] Huang W, Chen S, Xiao J, et al. Investigation of filler

- wire melting and transfer behaviors in laser welding with filler wire[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134:106589.
- [56] Zhen S, Duan Z, Sun D, et al. Study on microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded S355J2W+N steel [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 59:11-18.
- [57] Kang K, Kawahito Y, Gao M, et al. Effects of laser-arc distance on corrosion behavior of single-pass hybrid welded stainless clad steel plate [J]. *Materials & Design*, 2017, 123:80-88.
- [58] Lei Z, Li B, Bi J, et al. Influence of the laser thermal effect on the droplet transfer behavior in laser-CMT welding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120:105728.
- [59] Chatterjee S, Trinh L N, Lee D. Mechanical and microstructural investigation of dissimilar joints of Al-Cu and Cu-Al metals using nanosecond laser [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(8):4205-4211.
- [60] Wang S, Wang W, Xu Y, et al. Effect of nanosecond pulsed laser parameters on texturing formation of metallic surface: Experiment and modelling [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26:7775-7788.
- [61] Wu Z, Wu X L, Zhang Y, et al. Effect of nanosecond pulse laser power on welding interface and mechanical properties of AZ31B Mg/6061 Al [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175:110848.
- [62] Li Y, Tang X, Lu F, et al. Dual beam laser fusion-brazed Ti6Al4V/AA7075 dissimilar lap joint: Crack inhibition via inoculation with TiC nanoparticles [J]. *Materials Characterization*, 2022, 191:112127.
- [63] Lei Z, Cao H, Cui X, et al. Study on the suppression of solidification cracks in narrow gap laser welding of high-strength steel based on dual-beam gradient control weld solidification [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 329:118440.
- [64] Xu J, Luo Y, Zhu L, et al. Effect of shielding gas on the plasma plume in pulsed laser welding [J]. *Measurement*, 2019, 134:25-32.
- [65] 郭新建. 铝合金电流辅助激光焊接组织及性能研究 [D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2011.
- GUO X J. Study on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy in Current-Assisted Laser Welding [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [66] Cao L, Zhou Q, Liu H, et al. Mechanism investigation of the influence of the magnetic field on the molten pool behavior during laser welding of aluminum alloy [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 162:120390.
- [67] Kolubaev A V, Sizova O V, Fortuna S V, et al. Weld structure of low-carbon structural steel formed by ultrasonic-assisted laser welding [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172:106190.
- [68] Duggirala A, Kalvettukaran P, Acherjee B, et al. Numerical simulation of the temperature field, weld profile, and weld pool dynamics in laser welding of aluminium alloy [J]. *Optik*, 2021, 247:167990.
- [69] Ai Y, Liu X, Huang Y, et al. Numerical analysis of the influence of molten pool instability on the weld formation during the high speed fiber laser welding [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160:120103.
- [70] Zhou J, Zhou D, Liu J. Numerical and experimental investigation of magnesium/aluminum laser welding with magnetic field [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(1):545-559.
- [71] Ai Y, Liu X, Huang Y, et al. Investigation of dissimilar fiber laser welding of low carbon steel and stainless steel by numerical simulation [J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33(1):012046.
- [72] 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.
- [73] Li L, Peng G, Wang J, et al. Numerical and experimental study on keyhole and melt flow dynamics during laser welding of aluminium alloys under subatmospheric pressures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 133:812-826.
- [74] Geng S, Jiang P, Shao X, et al. Heat transfer and fluid flow and their effects on the solidification microstructure in full-penetration laser welding of aluminum sheet [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 46:50-63.
- [75] Lin R, Wang H P, Lu F, et al. Numerical study of keyhole dynamics and keyhole-induced porosity formation in remote laser welding of Al alloys [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108:244-256.
- [76] Vladimir S, Akira M. The role of recoil pressure in en-