

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.06

界面压力调控飞秒激光焊接蓝宝石/钛合金接头 剪切强度的机制研究

左全奇, 龙伟民*, 秦建, 沈元勋

中国机械总院集团郑州机械研究所 高性能新型焊接材料全国重点实验室, 河南 郑州 450001

摘要: 蓝宝石与钛合金(TC4)的激光直接熔焊连接是航空航天、电子封装等领域的重要难题,通过系统研究0~1.75 MPa界面压力对焊接质量的影响,发现压力参数通过调控界面接触、元素扩散和应力分布三重机制显著影响接头性能。结果表明,在0.75 MPa优化界面压力下,实现界面间隙的消除、促进Ti-Al互扩散形成AlTi₃金属间化合物,并有效平衡界面结合与母材完整性,接头剪切强度达到32.0 MPa,断口分析显示该条件下呈现脆性混合断裂特征。而压力过高(≥ 1.25 MPa)会导致蓝宝石母材开裂,压力不足(≤ 0.25 MPa)则产生未焊合缺陷,接头仅为机械连接。该研究成果为蓝宝石和金属异质材料直接熔焊提供了新的解决方案。

关键词: 蓝宝石; TC4钛合金; 飞秒激光焊接; 界面压力; 剪切强度

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0042-12

Enhancement Mechanism of Shear Strength in Sapphire/TC4 Alloy Joints via Femtosecond Laser Welding with Interfacial Pressure

ZUO Quanqi, LONG Weimin*, QIN Jian, SHEN Yuanxun

State Key Laboratory of High Performance & Advanced Welding Materials, China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, 450000, China

Abstract: The laser direct welding connection between sapphire and TC4 alloy was an important challenge in the fields of aerospace, electronic packaging. Through systematic research on the influence of interfacial pressure from 0 MPa to 1.75 MPa on welding quality, it was found that pressure parameters significantly affect joint performance by regulating the triple mechanism of interface contact, element diffusion, and fracture mechanism. Under the action of the optimized interface pressure of 0.75 MPa, even in the practical working conditions where the welded parts are in non-optical contact and the metal surface roughness is as high as Ra 0.8 μm , the elimination of interface gaps, the promotion of Ti-Al interdiffusion to form AlTi₃ intermetallic compounds, and the effective balance between interface bonding and base metal integrity were achieved. The shear strength of the joint reached 32.0 MPa, and fracture analysis showed brittle mixed fracture characteristics under this condition. The research provided a novel solution for direct fusion welding of sapphire-metal heterostructures.

Keywords: sapphire; TC4 alloy; femtosecond laser welding; interfacial pressure; shear strength

引用格式: 左全奇, 龙伟民, 秦建, 等. 界面压力调控飞秒激光焊接蓝宝石/钛合金接头剪切强度的机制研究[J]. 电焊机, 2025, 55(10): 42-53.

Citation: ZUO Quanqi, LONG Weimin, QIN Jian, et al. Enhancement Mechanism of Shear Strength in Sapphire/TC4 Alloy Joints via Femtosecond Laser Welding with Interfacial Pressure[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 42-53.

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 中原科技创新领军人才(244200510023)

作者简介: 左全奇(1997—),男,博士研究生,主要从事激光加工的研究。

通讯作者: 龙伟民, E-mail: longweiminbrazing@163.com。

0 引言

蓝宝石具有高硬度、低热膨胀系数和优异的吸波性能,被广泛应用于电子元器件封装衬底、超高速飞行器整流罩以及光学窗口等领域^[1-5]。在实际应用中,蓝宝石常需与钛合金连接,以形成兼具两者优异性能的复合结构件,例如天线罩部件中的光学窗口即通过蓝宝石/TC4 钛合金焊接成形,其接头可靠性直接影响结构件的使用寿命^[6]。然而,蓝宝石与 TC4 钛合金之间存在显著的热膨胀系数差异(蓝宝石: $4.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, TC4 钛合金: $9.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)和熔点差异(蓝宝石:约 2 050 °C, TC4 钛合金:约 1 650 °C),加之异质材料难以互熔的特性,导致焊接工艺复杂、接头强度低等^[7-10]。

目前,针对蓝宝石/钛合金的连接,主要采用胶接^[11]、铆接^[12]、钎焊^[13]和激光焊^[14]等方法。其中,胶接和铆接由于接头强度不足、耐高温性差且气密性欠佳,难以满足复杂应用环境的需求^[15]。钎焊作为蓝宝石/钛合金连接的常用方法已有诸多研究, Yuan^[16]、Li^[17]、Liu^[18]、Fan^[19]等人通过添加 CuTi+B 复合钎料、AgCuTi 钎料等活性钎料,在 800 °C 左右钎焊温度下实现了蓝宝石/钛合金的连接,焊缝的剪切强度分别达到了 132.2 MPa、29.1 MPa。尽管这些方法能够获得较高强度的接头,但需要密闭空间、添加活性钎料以及整体加热等条件,在电子封装和超高速飞行器领域应用中,高温易损坏电子元器件内部线路损坏或影响芯片性能,从而限制了蓝宝石/钛合金结构件的发展与应用^[20-23]。

近年来,激光技术的快速发展为蓝宝石/钛合金的连接提供了新思路,超快激光焊接凭借高柔性、高能量密度及非接触等特性,展现出显著优势^[24-26]。Pan 等人^[27]在蓝宝石与 Fe-36Ni 合金达到光学接触的条件下,采用超快激光成功实现了焊接,获得 108.3 MPa 的剪切强度,但光学接触条件较为苛刻。为此, Li 等人^[28]在 Fe-36Ni 合金表面粗糙度高达 1.16 μm 的条件下,采用飞秒激光 Burst 模式和单脉冲模式连接蓝宝石与 Fe-36Ni 合金,但连接强度仅为 11 MPa。Yu^[29]、Yang^[30]和 Zuo^[31]进一步优化工艺,通过对金属材料进行磨抛处理(表面粗糙度 $S_a < 150 \text{ nm}$),在非光学接触条件下成功焊接了蓝宝石与 Fe-36Ni 合金、紫

铜、1060 纯铝,获得的剪切强度分别为 115.5 MPa、107.8 MPa 和 128.1 MPa;然而,这些方法对蓝宝石和金属材料的粗糙度和平整度要求严格,增加了焊接前处理难度。现有研究虽然通过控制表面粗糙度或施加夹紧力减小焊件间隙,实现了非光学接触条件下的连接,但未能精准调控界面压力,导致焊接质量稳定性不足。此外,针对蓝宝石/钛合金的超快激光熔焊研究仍较为匮乏。

本研究创新性地采用施加界面压力调控飞秒激光焊接的方法,系统研究不同界面压力下蓝宝石与钛合金界面的结合机制。在焊接前,通过精准调控蓝宝石与钛合金之间的界面压力,显著提高焊缝的剪切强度。该研究不仅丰富了蓝宝石与金属的激光焊接方法体系,为相关理论发展提供科学依据,同时也为工程应用提供了可靠的技术支撑。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

焊接母材为蓝宝石(Al_2O_3)和钛合金(TC4),试样尺寸和形貌如图 1 所示,化学成分如表 1 所示。

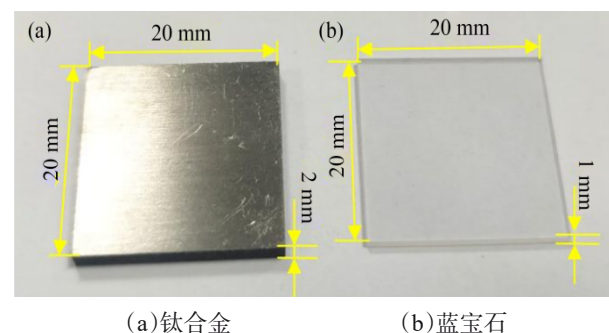


图 1 焊接材料尺寸和形貌

Fig. 1 Dimensions and morphology of welding materials

表 1 蓝宝石和钛合金材料的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of sapphire and TC4 alloy materials (wt. %)

焊接材料	Al	O	Ti	V
蓝宝石	56.6	43.09	0.30	0.02
钛合金	6.44	3.30	87.87	2.39

1.2 焊接方法

如图 2 所示,飞秒激光加工系统由激光器、光路系统、聚焦振镜、计算机、界面压力施加装置组成,其中激光器为华日激光公司的 LumiFemto-P 型号

飞秒激光器,最大输出功率40 W,激光波长1 030 nm、激光重复频率10 MHz、激光脉宽211 fs,聚焦振镜为金橙子公司的G3 Std型号,压力传感器为欧路达公司的AT8106型号,载荷测量范围为50~1 000 N,输出灵敏度为±1.5 mV/V,自主研发设计的界面压力施加装置由夹具体、载荷施加机构、压力传感器、钛合金和蓝宝石组成。焊接准备阶段,通过载荷施加机构预设界面压力,依托压力传感器-计算机闭环控制回路,精准调控压力值;利用Ezcad软件完成激光扫描路径规划,以200条长度10 mm、间距50 μm的线段构建焊接轨迹,经计算机指令驱动聚焦振镜,实现激光束按规划轨迹运动;采用400目砂纸打磨钛合金,使其表面划痕均匀。焊接执行阶段,由计算机触发激光器出光,激光依次经过扩束镜、反射镜、聚焦振镜,透过蓝宝石基材聚焦于蓝宝石-钛合金界面区域。试验采用单因素变量法,焊接工艺参数如图2、表2所示,重点探究界面压力这一变量对焊缝成形特征及接头质量的影响规律,为蓝宝石与钛合金异质材料的飞秒激光焊接工艺优化提供理论与试验支撑。

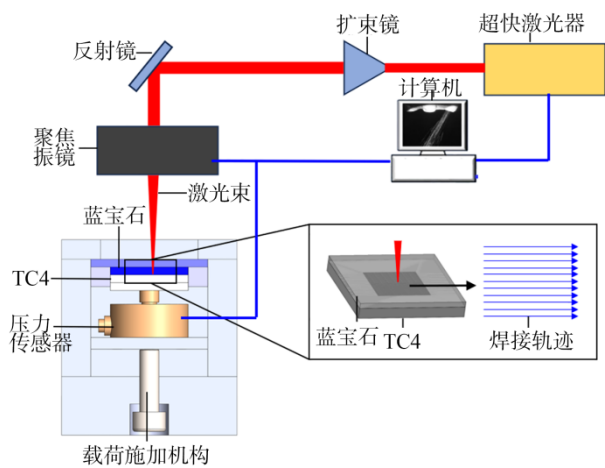


图2 飞秒激光焊接蓝宝石/金属方法示意

Fig. 2 Schematic diagram of femtosecond laser welding method for sapphire/TC4 alloy

表2 飞秒激光焊接蓝宝石与钛合金

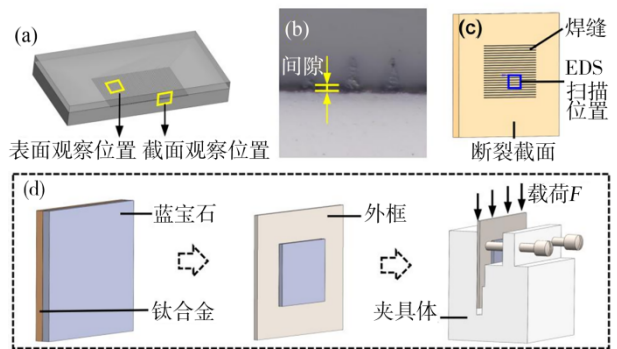
预置界面 压力/MPa	激光 功率 /W	扫描速度 /(mm·s ⁻¹)	激光焦 点位置 /mm	激光 波长 /nm	激光重 复频率 /MHz	激光 脉宽 /fs
0.125、0.25、0.75、 1.25、1.75	4.86	10	+0	1 030	10	211

1.3 表征方法

焊接试验结束后,依照标准金相试样制备流程开展焊件微观组织分析。如图3a所示,首先,将不同焊接参数下的试样浸没于液态树脂并完成固化处理,构建金相分析载体;随后,针对焊缝截面依次进行研磨与抛光工艺,借助蓝宝石对可见光的高透过特性,采用金相光学显微镜对试样的表面及截面微观形貌进行观测;如图3b所示,测量焊接试样的截面间隙;如图3c所示,采用EDS技术扫描焊缝断裂截面;如图3d所示,用万能材料试验机测焊缝剪切强度,把焊后工件装入同尺寸外框,再放自制剪切夹具,通过试验机施压压缩载荷至焊缝断裂,剪切强度(σ_s)为剪切力与焊缝纵向截面积之比,按公式(1)计算:

$$\sigma_s = \frac{F}{n \times W_d \times W_l} \tag{1}$$

式中 σ_s 为剪切强度; F 为断裂最大载荷; n 为焊缝条数; W_l 为焊缝长度; W_d 为焊缝深度。



(a)焊缝形貌测试方法;(b)焊缝间隙测量;(c)焊缝断裂截面元素扫描;(d)焊缝剪切强度测试方法

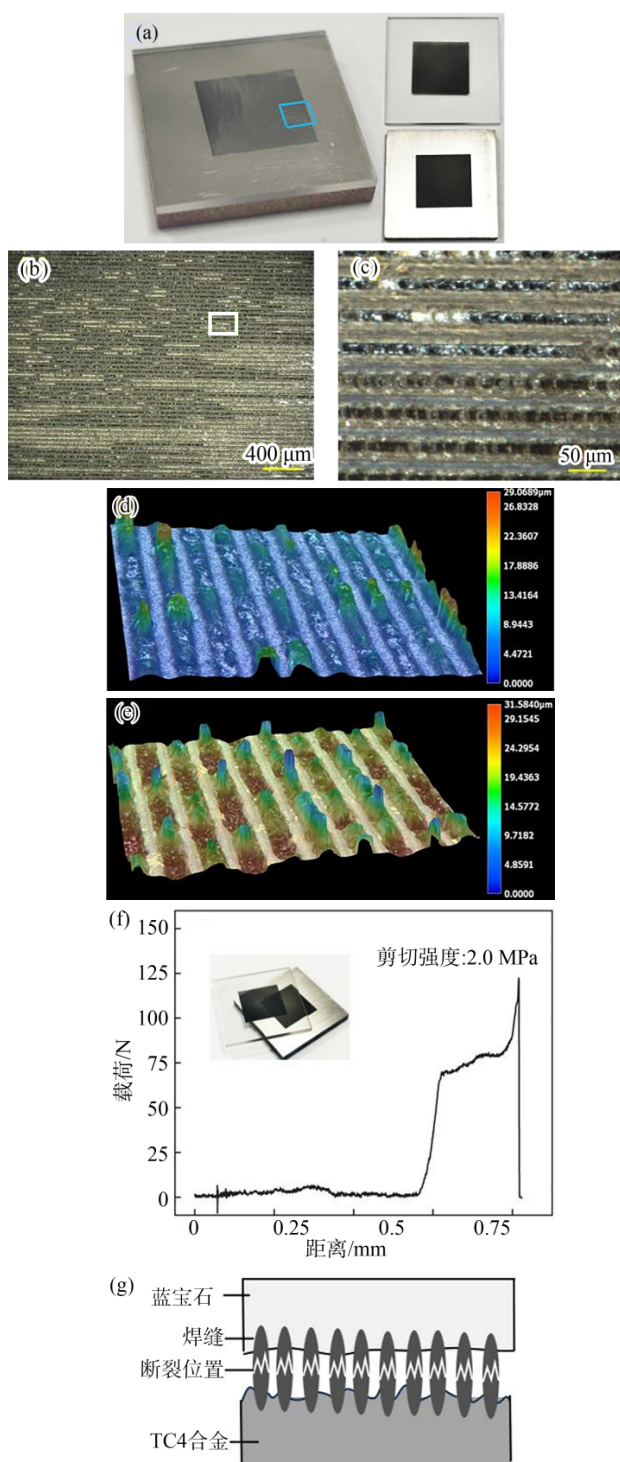
图3 焊缝形貌和性能测试方法

Fig. 3 Methods for weld morphology and performance testing

2 结果和讨论

2.1 不同界面压力下的焊缝形貌

无界面压力时,蓝宝石/钛合金飞秒激光焊接的焊缝及接头性能呈现显著缺陷。如图4a所示,焊缝整体呈黑色,与钛合金、蓝宝石的原始原色均不同,且无气孔和裂纹,焊缝尺寸为10 mm×10 mm,与激光扫描区一致,随机分布的黑色焊缝和灰白色焊缝形成蓝宝石/钛合金连接区域(见图4b)。由于钛合金与



(a) 蓝宝石/钛合金焊接试样; (b) A 区域放大图; (c) B 区域放大图; (d) 钛合金一侧断口三维形貌; (e) 蓝宝石一侧断口三维形貌; (f) 蓝宝石/钛合金剪切强度; (g) 无界面压力蓝宝石/钛合金接头断裂机理

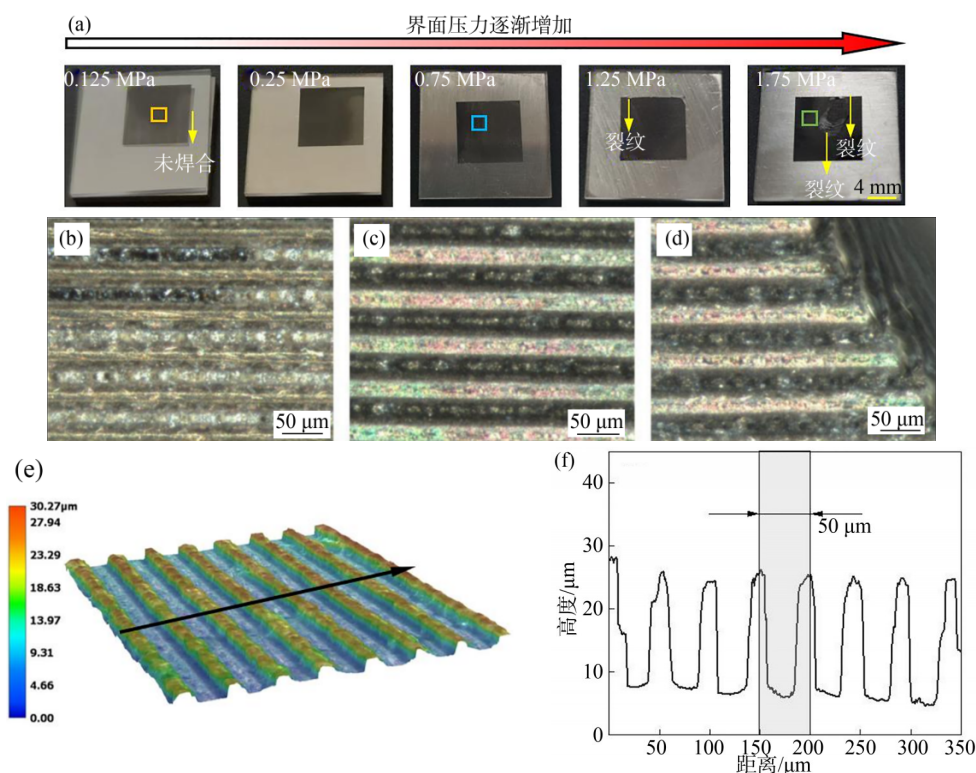
图 4 无界面压力飞秒激光焊接蓝宝石/钛合金

Fig. 4 Femtosecond laser welding of sapphire/TC4 alloy without interfacial pressure

氧气在高温下反应生成黑色 Ti 氧化物, 判断黑色焊缝为焊合区域; 由于蓝宝石 (Al_2O_3) 与氧气高温反应生成的灰白色铝氧化物, 判断灰白色焊缝为未焊合区域 (见图 4c)。如图 4f 所示, 蓝宝石/钛合金接头存在较大界面间隙, 未焊合区域较多, 焊缝仅通过机械咬合实现连接, 未形成有效冶金结合 (见图 4f、4g)。剪切强度测试显示, 接头最大断裂载荷为 125.0 N, 剪切强度仅 2.0 MPa, 断裂均发生于焊缝处, 焊缝强度较低。观察断裂后母材形貌, 蓝宝石和钛合金断口表面均形成高度约为 30 μm 的突起, 未形成整齐的断口形貌 (见图 4d、图 4e)。

施加界面压力后, 焊接区域形貌与结构特征随压力 (0.125~1.75 MPa) 变化呈现明显阶段性规律, 如图 5 所示, 具体如下。如图 5a 所示, 随着界面压力从 0.125 MPa 增加至 1.75 MPa, 焊接区域的颜色由灰白色逐渐过渡至深黑色, 在 0.125 MPa 低压条件下, 界面存在大量离散分布的灰白色未焊合区 (见图 5b)。当压力增加至 0.75 MPa 时, 焊缝完全转变为连续黑色反应层, 并伴随特征性彩色干涉条纹, 这种光学现象的产生机制为: 高温下 Ti 元素与 O 元素反应生成 TiO_2 氧化膜, 并且颜色随着氧化膜厚度变化而变化 (见图 5c)。当压力增至 1.25 MPa 时, 黑色焊缝和彩色干涉条纹均存在, 但蓝宝石表面产生较多裂纹, 随着界面压力从 1.25 MPa 增至 1.75 MPa, 从焊接区域边缘开裂过渡至边缘和中心均开裂 (见图 5d)。如图 5e 所示, 焊接区域是由凸起的条状焊缝组成, 焊缝高度约为 30 μm, 间距约 50 μm, 无重叠区域, 与激光的扫描轨迹相同。

通过金刚石线锯切割与磨抛处理, 对焊缝截面形貌的观测, 研究了界面压力对接头间隙与焊缝结构的影响规律。如图 6a 所示, 焊缝呈现特征性的黑色三角形结构, 且该结构主要分布于蓝宝石基体一侧。这种特殊的焊缝形貌特征主要源于飞秒激光焦点处的能量分布呈现高斯型空间分布, 能量密度从中心向边缘递减, 导致蓝宝石侧熔合区域呈现三角形, 为深入理解该形貌的形成机制, 需要进行能谱扫描进一步分析。随着界面压力从 0.125 MPa 增加至 1.75 MPa, 蓝宝石/钛合金接头间的接头间隙从 28.6 μm 减小至 0 μm, 实现两母材的紧密贴合 (见图 6b~6f)。当压力小于 0.25 MPa 时, 两母材贴合度不



(a)不同界面压力下焊缝形貌;(b)A区域放大;(c)B区域放大;(d)C区域放大;(e)焊缝表面三维形貌;(f)焊缝表面形貌数据

图5 不同界面压力下蓝宝石/钛合金表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of sapphire/TC4 alloy under different interfacial pressures

足,焊接后残留的间隙会降低热量传递效率,减少母材熔化量,同时增大熔化物融合难度,最终影响焊合质量。

综上,界面压力是影响焊缝质量的关键参数。无压力或低压(<0.25 MPa)会导致未焊合与有间隙存在,高压(>1.25 MPa)引发蓝宝石开裂,0.75 MPa时可实现“连续焊缝成形、间隙完全闭合、母材无开裂”,是平衡界面结合与母材完整性的最优压力区间。

2.2 不同界面压力下焊缝的剪切强度

通过系统研究不同界面压力条件下的飞秒激光焊接蓝宝石/钛合金焊缝力学性能,获得了重要的断裂行为特征。如图7a所示,在所有试验参数范围内(0.125~1.75 MPa),蓝宝石/钛合金接头均表现出典型的脆性断裂。当界面压力为0.75 MPa时,随着位移的逐渐增加,初始阶段载荷均快速上升至85 N并维持约0.2 mm的稳定位移,随后载荷迅速上升至最大载荷2 070 N,焊缝断裂后载荷迅速降低至0。如图7b所示,界面压力从0.125 MPa增至0.75 MPa

时,蓝宝石/钛合金焊缝的剪切强度由0.6 MPa增至最大32.0 MPa,当压力继续增至1.75 MPa时,剪切强度逐步下降至最低4.8 MPa;界面压力在0.75~1.75 MPa时,焊缝剪切强度始终保持在较高水平,证明合适的界面压力能够有效增强焊缝的剪切强度。

观察蓝宝石/钛合金接头剪切后的形貌。如图8a所示,当界面压力过大时,在钛合金一侧残留黑色块状物,在蓝宝石一侧母材呈现破碎状态,随着界面压力的逐渐增大,黑色块状物的附着面积逐渐增大,蓝宝石母材的破碎程度逐渐加剧。当界面压力 ≤ 0.25 MPa时,蓝宝石和钛合金完整保留,钛合金一侧形成高度约为12 μm的凸起,蓝宝石一侧形成深度约11 μm的下凹(见图8b、8c);当界面压力为0.75 MPa时,蓝宝石和钛合金完整保留,且表面几乎无凸起和下凹形貌,剪切断裂发生在焊缝与母材的交界处(见图8d、8e);当界面压力为1.25 MPa时,剪切后钛合金母材完整保留且形成42 μm的凸起块状物,蓝宝石母材发生破碎且形成20 μm的下凹形

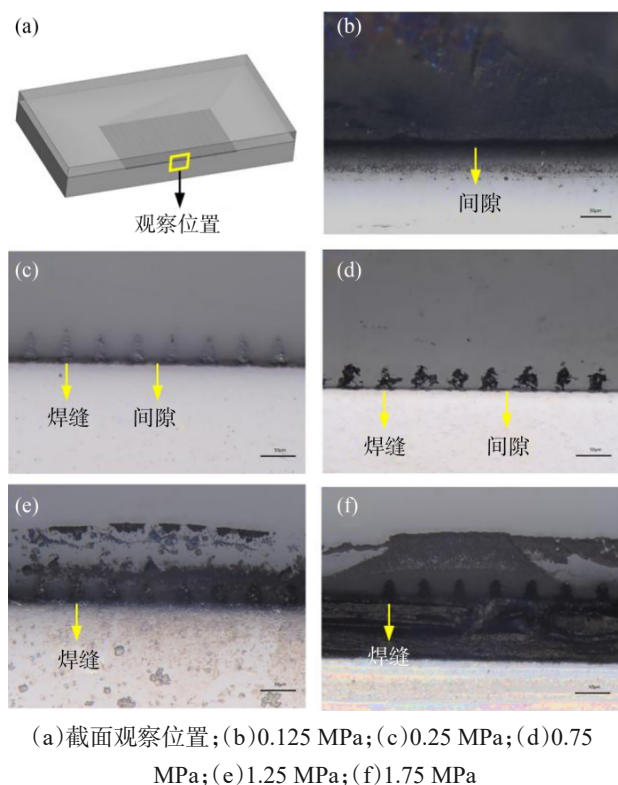


图 6 不同界面压力下蓝宝石/钛合金截面形貌

Fig. 6 Cross-sectional morphologies of sapphire/TC4 alloy under different interfacial pressures

貌。表明界面压力过大, 导致蓝宝石母材内部形成缺陷, 剪切后蓝宝石母材一侧破碎。

综上, 随着界面压力的增大, 剪切强度呈现出先增大后减小的趋势, 断裂位置由机械嵌合处逐步向界面处转移, 最终在蓝宝石一侧断裂。0.75 MPa 界面压力下, 飞秒激光诱导的高温熔池促使钛合金与蓝宝石界面元素充分互扩散, 形成均匀反应层, 断裂模式以界面混合断裂为主, 剪切载荷达 2 070 N 时仍具稳定位移平台。压力不足 (≤ 0.25 MPa) 时, 界面局部熔化导致元素扩散不充分, 形成机械咬合缺陷; 压力过高 (≥ 1.25 MPa) 则使蓝宝石产生微裂纹, 断裂时母材破碎。断口三维形貌显示, 所有条件下接头均呈脆性断裂, 但 0.75 MPa 时断口平整, 界面结合均匀。

2.3 界面压力增强焊缝剪切强度机理分析

合适的界面压力能够显著提升蓝宝石/钛合金焊缝的剪切强度, 但增强机理仍然不明确。本研究通过系统表征焊缝截面、元素扩散、断口形貌及物相组成, 结合剪切强度测试结果, 探明焊缝剪切强

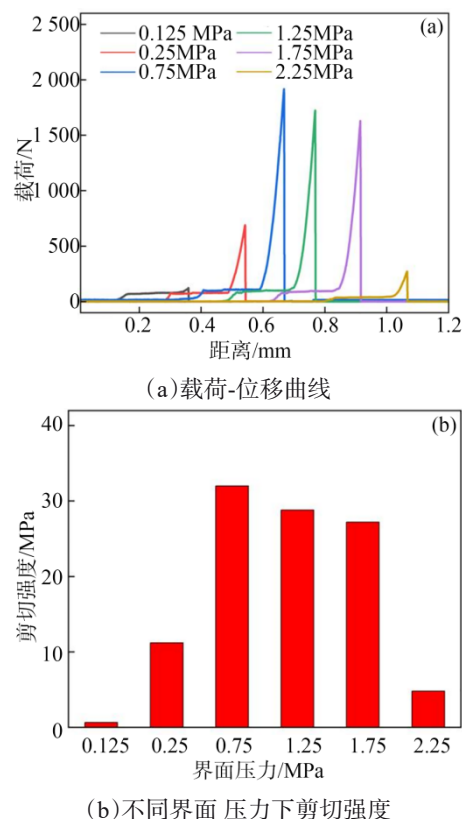


图 7 不同界面压力下蓝宝石/钛合金焊缝力学性能测试

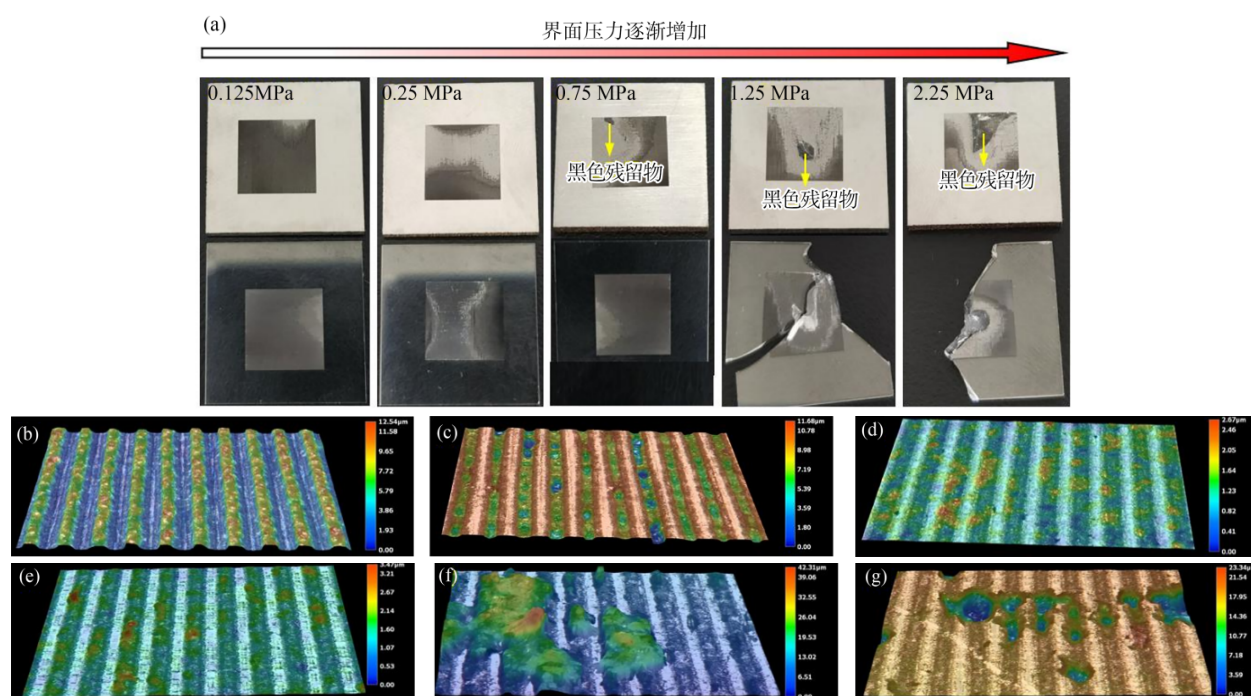
Fig. 7 Mechanical property of sapphire/TC4 alloy welds under different interfacial pressures

度的增强机理。

2.3.1 界面压力对焊缝截面形貌及缺陷的影响

当界面压力为 0.25 MPa 时, 蓝宝石与钛合金未能紧密贴合, 交界处存在明显间隙, 焊缝/母材界面形成大量裂纹, 蓝宝石与钛合金未能形成冶金连接 (见图 9a、图 9d); 当界面压力为 0.75 MPa 时, 蓝宝石与钛合金母材无间隙, 焊缝与母材界面无裂纹, 蓝宝石与钛合金连接处过渡均匀且无裂纹, 焊缝处产生较少的微裂纹 (见图 9b、图 9e); 当界面压力为 1.25 MPa 时, 虽然蓝宝石与钛合金母材无间隙, 焊缝处连接紧密且材料过渡均匀, 但焊缝与蓝宝石母材的交界处严重开裂且母材部分缺失 (见图 9c、图 9f)。

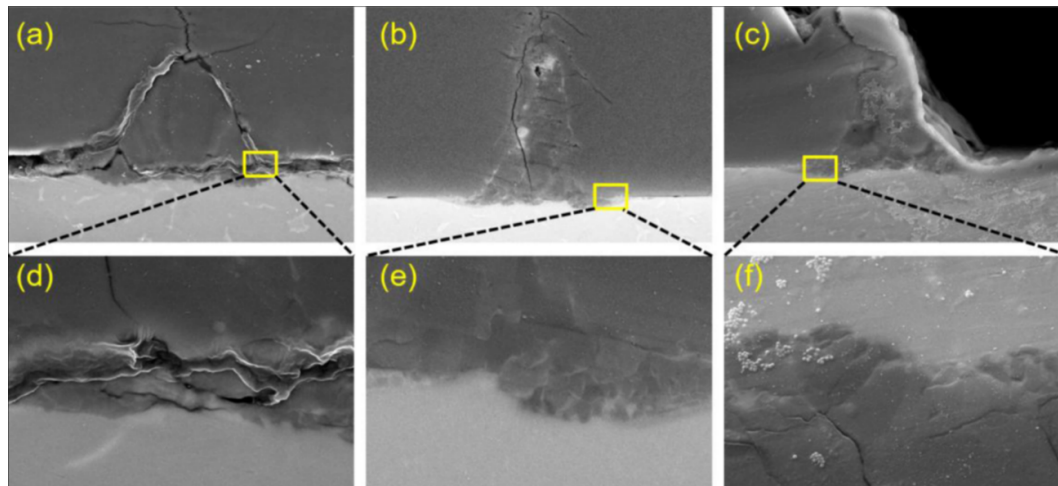
由此可知, 飞秒激光焊接时瞬间的高能量输入使焊缝局部热应力过大, 导致焊缝与母材的界面处形成裂纹, 适当的界面压力 (0.75 MPa) 可通过消除母材间隙和抑制裂纹扩展来提升连接质量; 压力不足会导致热应力集中引发界面开裂; 压力过大会诱



(a)宏观形貌;(b-g)A~F区域三维形貌

图8 不同界面压力下焊缝剪切后形貌

Fig. 8 Morphologies of welds after shearing under different interfacial pressures



(a)0.25 MPa;(b)0.75 MPa;(c)1.25 MPa;(d)、(e)、(f)放大图

图9 不同界面压力下焊缝截面微观形貌

Fig. 9 Microscopic morphologies of weld cross-sections under different interfacial pressures

发新的界面损伤。该发现为优化异质材料激光焊接工艺提供了重要理论依据。

2.3.2 界面压力对元素扩散行为及分布的影响

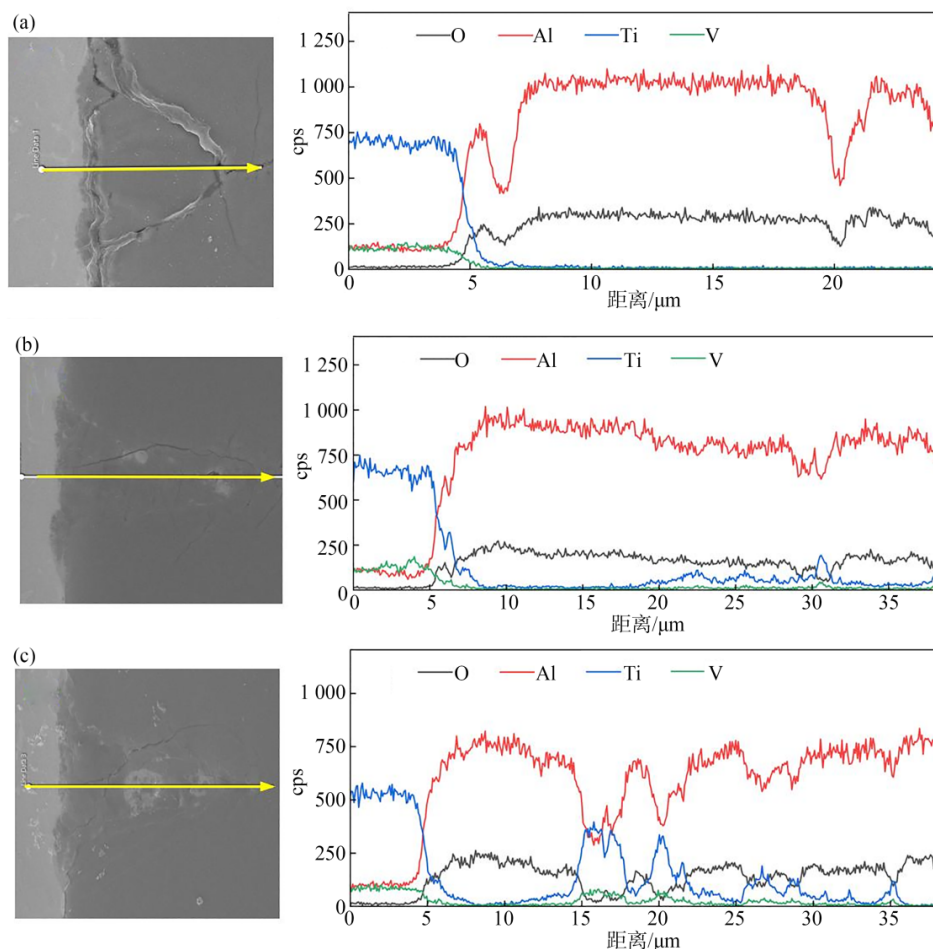
为探究蓝宝石与钛合金焊缝中心的元素分布及冶金结合特性,采用EDS线扫描对不同界面压力下的焊接试样进行表征,扫描路径如图10中黄色箭头所示。线扫描结果显示,所有试样中,O、Al元素

在蓝宝石侧显著富集,Ti、V及极少量O元素在钛合金侧富集,界面处O、Ti等元素存在扩散过渡(见图10)。当界面压力为0.25 MPa时,仅界面处发生O、Al、Ti、V元素扩散,蓝宝石侧元素成分在远离界面后发生剧烈突变,焊缝产生裂纹(见图10b);当界面压力为0.75 MPa时,元素信号无大幅波动,界面处元素均匀扩散,蓝宝石侧距界面15 μm 处出现Ti富

集(见图 10d);当界面压力为 1.25 MPa 时,蓝宝石侧元素信号大幅波动,界面处元素均匀扩散,距界面 10 μm 处出现 Ti、V 富集,且 Al、Ti、V 元素的波动显著(见图 10f)。由此可见,界面压力显著影响蓝宝石与钛合金焊缝的元素扩散行为及分布特征,极端压力(过低或过高)易引发元素分布紊乱、焊缝裂纹缺陷,适中的 0.75 MPa 压力既能保证充分的元素互扩散,又可避免应力诱导的元素分布失稳,是实现高质量连接的关键参数窗口。

为进一步揭示界面压力对元素迁移规律及接头结合本质的影响,对不同工艺参数下的试样开展 EDS 扫描分析,扫描位置如图 11a、11f、11k 所示。结果表明,所有试样中蓝宝石中的 O、Al 元素向钛合金一侧扩散,而钛合金中的 Ti、V 元素仅在界面压力 ≥ 0.75 MPa 时发生向焊缝中心的扩散富集行为(见图

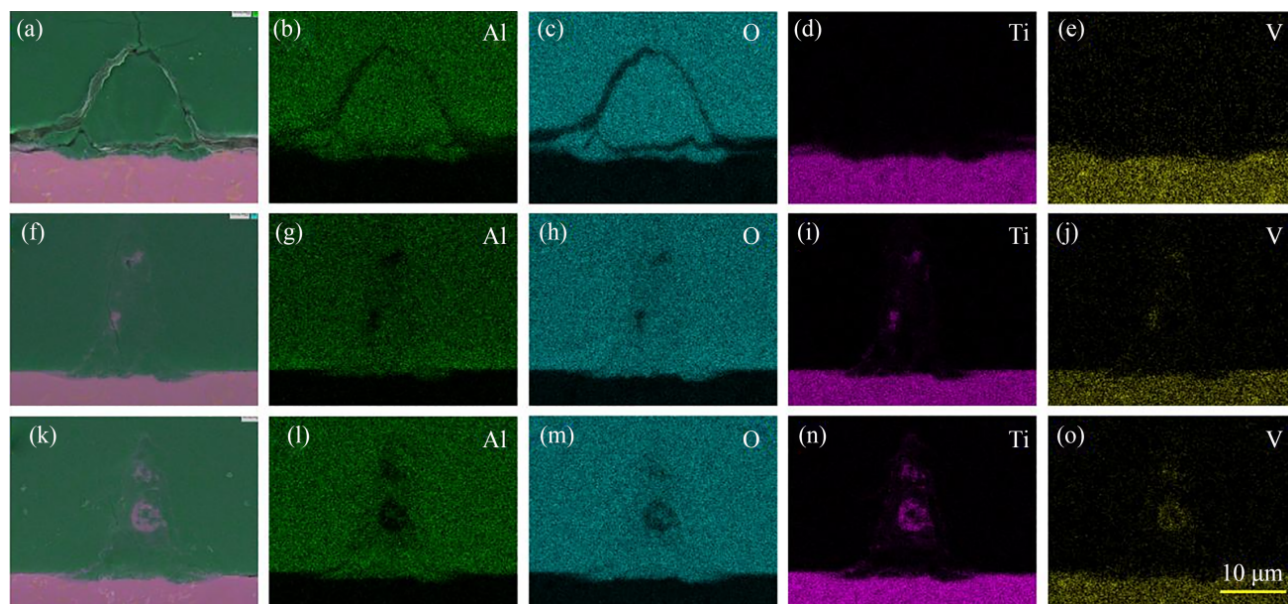
11)。当界面压力为 0.25 MPa 时,蓝宝石一侧焊缝周围出现 Al、O 元素缺失现象(见图 11a~11e);当界面压力为 0.75 MPa 时,各元素分布均匀,少量的 Ti、V 元素以适度含量向焊缝中心扩散(见图 11f~11j);当界面压力为 1.25 MPa 时,Ti、V 元素向焊缝中心大量扩散并富集(见图 11k~11o)。由此可见,界面压力显著影响蓝宝石与钛合金焊缝的元素扩散行为及分布特征,适宜压力(如 0.75 MPa)可促进 Ti、V 元素均匀扩散,促进冶金连接形成,界面压力过低易引发焊缝开裂,并无有效元素扩散,蓝宝石与钛合金仅为机械连接,界面压力过高易导致过量的 Ti、V 元素向焊缝中心扩散并富集,导致焊缝产生大量裂纹。为进一步明晰结合机理,需对焊缝断裂形貌与组织展开分析,以确定是否形成 Ti-O-Al 脆性化合物。



(a)(b)0.25 MPa 界面压力;(c)(d)0.75 MPa 界面压力;(e)(f)1.25 MPa 界面压力

图 10 不同界面压力下焊缝 EDS 扫描位置和数据

Fig. 10 EDS scanning positions and data of welds under different interfacial pressures



(a)~(e) 0.25 MPa; (f)~(j) 0.75 MPa; (k)~(o) 1.25 MPa

图 11 不同界面压力下焊缝 SEM 扫描位置及元素分布

Fig. 11 SEM scanning positions and element distribution of welds under different interfacial 0.75 MPa

2.3.3 界面压力对接头断裂行为及元素分布规律的影响

为探究蓝宝石与钛合金接头断裂行为及元素分布规律,对不同界面压力下的接头断口开展扫描电镜形貌观察与EDS微区成分分析,对比钛合金侧

与蓝宝石侧的断口特征差异,结果如图 12 及表 3 所示。

(1) 钛合金侧。当界面压力为 0.75 MPa 时,钛合金侧断口表面粗糙且具特定起伏形态,Al、Ti 元素分布呈现明显的条带交替特征(见图 12a),其中

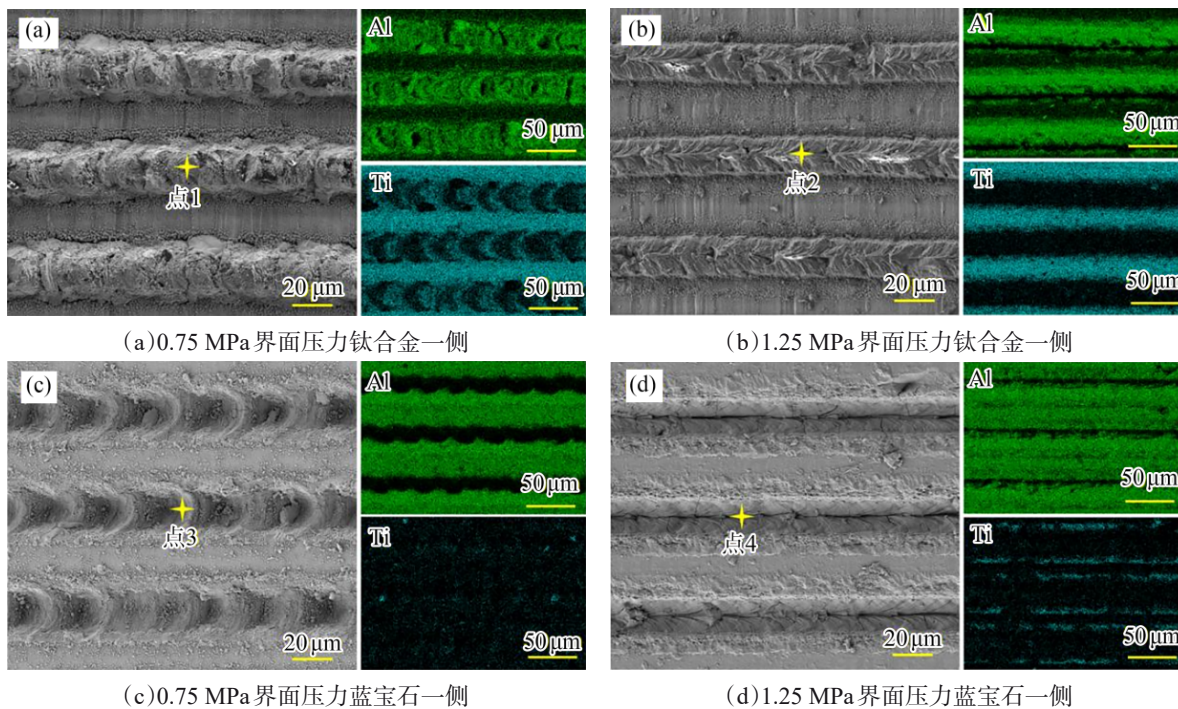


图 12 蓝宝石/钛合金接头断口形貌和元素分布

Fig. 12 Fracture morphology and element distribution of sapphire/TC4 alloy joints

表 3 蓝宝石/钛合金接头断口 EDS 扫描(质量分数, %)

Table 3 EDS scanning results of sapphire/TC4 joint fractures(wt. %)

扫描位置	Al	O	Ti	V
1	37.3	42.7	19.2	0.75
2	56.3	39.8	3.66	0.16
3	26.1	39.5	33.0	1.31
4	58.5	35.7	5.26	0.5

焊缝点 1 处元素含量为 Al(37.3%)、O(42.7%)、Ti(19.2%)、V(0.75%), 表明界面处形成了 Ti-Al-O 多元反应层。当界面压力为 1.25 MPa 时, 断口形貌更趋规整, 元素分布发生显著变化, Al 元素在焊缝处均匀分布, Ti 元素在焊缝处大量缺失, 焊缝点 2 处 Al 含量升至 56.3%, Ti 含量则降至 3.66%, 表明高界面压力条件促进了 Al 元素的扩散。

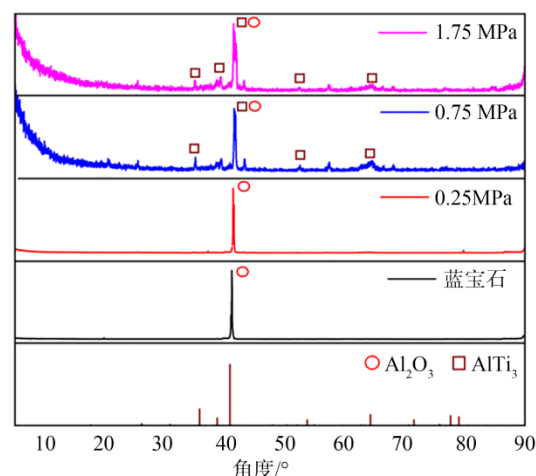
(2) 蓝宝石侧。当界面压力为 0.75 MPa 时, 断口呈现独特的波纹状形貌, 焊缝点 3 处 Ti 含量达 33.0%, 证实钛合金侧 Ti 元素向蓝宝石侧发生了显著的扩散; 当界面压力为 1.25 MPa 时, 断口形貌更加平整, 焊缝点 4 处 Ti 含量降至 5.26%, 但 Al 元素的扩散分布范围明显扩大, 仅形成微弱的 Ti 扩散条带。这一结果与钛合金侧观测规律相呼应, 表明高压条件下元素扩散呈现“Al 富集、Ti 抑制”特征。

由此可以得到, 界面压力显著影响元素扩散行为: 最佳压力(0.75 MPa)促进 Ti-Al 互扩散形成冶金结合, 高压条件(1.25 MPa)增强 Al 元素扩散, 导致界面处主要形成 Al-O 化合物, 这种元素分布的变化直接影响了断裂路径, 使断裂机制从优化压力下的混合断裂转变为以 Al-O 化合物/蓝宝石界面分离为主的脆性断裂模式。

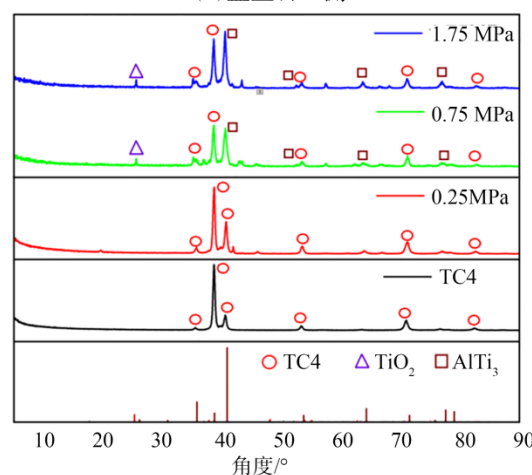
2.3.4 断口成分与冶金结合

为了探明断口处的成分, 采用 X 射线衍射(XRD)测试, 结果如图 13 所示。蓝宝石侧的 XRD 谱图显示, 母材特征峰单一且尖锐, 对应单晶 α - Al_2O_3 组成(见图 13a), 表明焊接过程未改变蓝宝石基体的晶体结构。钛合金侧则呈现典型的钛合金多晶衍射特征(见图 13b)。当界面压力为 0.25 MPa 时, 蓝宝石和钛合金侧断口的 XRD 谱图均未出现新的特征衍射峰, 仅检测到母材自身的物相; 当界面压力 ≥ 0.75 MPa 时, 蓝宝石侧断口处产生少量的 AlTi_3 金属间化合物的特征峰, 对应反应见式(2); 钛合金侧断口处产生

少量的 TiO_2 脆性化合物, 对应反应见式(3)



(a) 蓝宝石一侧



(b) 钛合金一侧

图 13 蓝宝石/钛合金接头断口 XRD

Fig. 13 XRD of sapphire/TC4 alloy joint fractures

综上, 当界面压力较低时, 界面处未发生明显的化学反应, 连接可能主要依赖物理结合, 此时结合强度相对较低且稳定性较差。而当压力达到或超过 0.75 MPa 时, 界面处开始生成 AlTi_3 金属间化合物和 TiO_2 脆性化合物。 AlTi_3 的生成有助于提高界面的结合强度, TiO_2 的存在则由于其脆性本质, 成为裂纹萌生和扩展的源头, 对接头的可靠性产生不利影响。

2.3.5 小结

界面压力通过调控间隙闭合、元素扩散及反应层形成, 从而影响结合强度。如图 14a 所示, 飞秒激光焊接过程中, 施加压力可有效减小界面间隙, 当

间隙较小时,下层的钛合金材料通过激光线性吸收引发材料升温熔化,上层的蓝宝石材料则通过非线性吸收机制吸收激光能量,随后经电子-电子散射、电子-声子散射以及晶格热传导实现能量传递,最终在界面处形成高度约束的等离子体和熔融物质。当材料温度达到热力学临界温度时,熔融区发生相爆炸,产生大量高温高压金属蒸气和熔融物,使焊缝截面呈现特征性的三角形形貌。如图 14b 所示,0.25 MPa 低压下,界面存在明显间隙,飞秒激光热应力导致焊缝/母材界面开裂,元素扩散局限,接头仅为机械连接,剪切强度极低;0.75 MPa 适宜压力下,界面间隙闭合,Ti、Al 元素均匀互扩散,在钛合金和蓝宝石界面处生成 AlTi_3 强化相,焊缝与母材过渡均匀,母材微裂纹抑制,剪切强度达 32.0 MPa;1.25 MPa 高压下,过量 Ti 元素向焊缝中心富集,蓝宝石侧元素分布紊乱, TiO_2 脆性化合物含量增加,导致蓝宝石母材处形成裂纹,剪切强度测试时沿脆性相界面发生断裂,剪切强度骤降至 4.8 MPa。

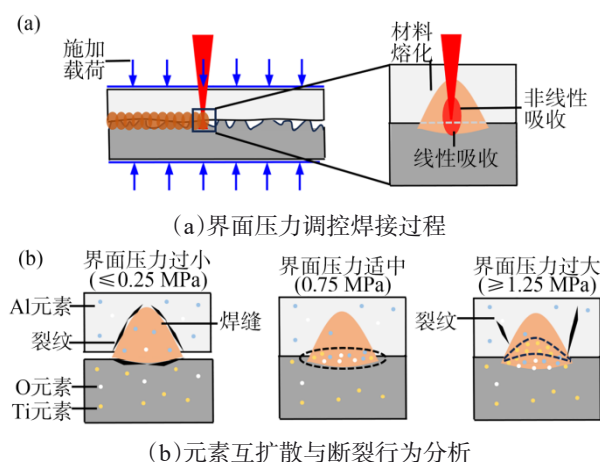


图 14 飞秒激光焊接蓝宝石/TC4 钛合金接头强度增强机理

Fig. 14 Strength enhancement mechanism of femtosecond laser-welded sapphire/TC4 TC4 alloy joints

3 结论

本研究通过界面压力调控实现了蓝宝石/钛合金超快激光焊接,有效解决了传统超快激光焊接对金属表面粗糙度和平整度要求严苛、夹具夹紧力控制不精准的难题,主要创新成果如下:

(1)精准调控焊前界面压力。当界面压力为

0.75 MPa,钛合金表面粗糙度 R_a 为 $0.8 \mu\text{m}$ 时,焊缝剪切强度仍可达最大值 32.0 MPa。

(2)界面压力调控元素扩散与界面结合状态。低压($\leq 0.25 \text{ MPa}$)导致界面间隙与机械结合,高压($\geq 1.25 \text{ MPa}$)引发元素分布紊乱及蓝宝石损伤;0.75 MPa 适宜压力促进 Ti/Al 互扩散,抑制裂纹生成,实现冶金结合。

(3)断裂机制与压力诱导的微观结构密切相关。0.75 MPa 适宜压力时,断口粗糙且元素条带交替分布,界面形成 AlTi_3 金属间化合物,断裂模式以混合断裂为主;1.25 MPa 高压下断口平整且形成 TiO_2 脆性化合物,断裂路径由界面反应层断裂转向蓝宝石母材界面分离。

参考文献:

- [1] Royter Y, Furuta T, Ksdama S, et al. Integrated packaging of over 100 GHz bandwidth uni-traveling-carrier photodiodes [J]. IEEE Electron Device Lett, 2000, 21 (4):158-160.
- [2] Lin K L, Singh M, Asthana R. Interfacial characterization of alumina-to-alumina joints fabricated using silver-copper-titanium interlayers [J]. Mater Charact, 2014(90):40-51.
- [3] Peng X, Shimai S, Sun Y, et al. Wet green-state joining of alumina ceramics without paste [J]. JAm Ceram Soc, 2015, 98(9):2728-2731.
- [4] Trunec, Martin, Jens Klimke, et al. Transparent alumina ceramics densified by a combinational approach of spark plasma sintering and hot isostatic pressing [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36 (16):4333-4337.
- [5] Chen Z, Chang H, Cheng T, et al. Direct growth of nanopatterned graphene on sapphire and its application in light emitting diodes [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(31):2001483.
- [6] Peng X, Shimai S, Sun Y, et al. Wet green-state joining of alumina ceramics without paste [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(9):2728-2731.
- [7] ZHANG Y T. Comparisons of structural and optical properties of ZnO films grown on (0001) sapphire and (011-2) sapphire by low-pressure MOCVD [J]. Optical Materials, 2004, 27.3:399-402.
- [8] He L, Chen C, Li H, et al. Research advances in joining processes of sapphire [J]. The International Journal

- of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(1): 59–81.
- [9] Lu Q, Long W, Zhong S, et al. TZM/graphite interface behavior in high-temperature brazing by Ti-based brazing filler materials[J]. *Welding in the World*, 2020, 64(11):1877–1885.
- [10] Liu Q, Long W, Fu L, et al. Microstructure and mechanical properties of hydrogenated Ti–0.3 Mo–0.8 Ni Alloy Gas tungsten Arc welding joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(2): 1022–1029.
- [11] Dillon S J, Harmer M P. Mechanism of “solid-state” single-crystal conversion in alumina[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(3):993–995.
- [12] Yang J, Oliveira J P, Li Y, et al. Laser techniques for dissimilar joining of aluminum alloys to steels: A critical review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 301:117443.
- [13] MacDonald W, Eagar T W. Transient liquid phase bonding[J]. *Annual Review of Materials Research*, 1992, 22(1):23–46.
- [14] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4):149.
- [15] Liu D, Zhao K, Song Y, et al. Effect of introducing carbon fiber into AgCuTi filler on interfacial microstructure and mechanical property of C/C–TC4 brazed joints [J]. *Materials Characterization*, 2019, 157:109890.
- [16] Yuan H S, Li H, Wang Y Y, et al. Residual Stress Distribution in Sapphire/Ti6Al4V Alloy Joints Brazed with CuTi+ B Composite Fillers[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(15):7638–7651.
- [17] Li C, Si X, Chen L, et al. Non-destructive measurement of residual stress distribution as a function of depth in sapphire/Ti6Al4V brazing joint via Raman spectra [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(3):3284–3289.
- [18] Liu S, Liu H, Zhou L, et al. Specially Structured AgCuTi Foil Enables High-Strength and Defect-Free Brazing of Sapphire and Ti6Al4V Alloys: The Microstructure and Fracture Characteristics [J]. *Materials*, 2024, 17(15):3812.
- [19] Fan Z, Zhang K, Liu J, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy and sapphire joint brazed with graphene–AgCuTi [J]. *Materials Research Express*, 2020, 6(12):1265k4.
- [20] Long W, Lu Q, Zhong S, et al. Research on interface structure and performance of diamond brazed coating based on non-vacuum environment [J]. *Welding in the World*, 2022, 66(5):1043–1052.
- [21] Zhong S, Li Y, Shi Y, et al. Effect of B on microstructure and properties of joints brazed by In-situ Ag–Cu–Zn–Sn filler metal with high Sn content [J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(11):116514.
- [22] Qin J, You M, Si H, et al. Microstructure and properties of diamond/Ni-based alloy composite coatings by induction brazing [J]. *Welding in the World*, 2023, 67(11):2621–2634.
- [23] Hu S, Zhong S, Ma J, et al. Making as-cast (FeCoNi) NbB alloys excellent mechanical and magnetic properties via refined eutectic microstructures [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2023, 34(23):1669.
- [24] Nakata Y, Okada T, Maeda M. Fabrication of dot matrix, comb, and nanowire structures using laser ablation by interfered femtosecond laser beams [J]. *Applied physics letters*, 2002, 81(22):4239–4241.
- [25] Küper S, Stuke M. Ablation of uv-transparent materials with femtosecond uv excimer laser pulses [J]. *Micro-electronic Engineering*, 1989, 9(1–4):475–480.
- [26] Kru J, Kautek W. Femtosecond-pulse visible laser processing of transparent materials [J]. *Applied surface science*, 1996, 96:430–438.
- [27] Pan R, Yang D, Zhou T, et al. Micro-welding of sapphire and metal by femtosecond laser [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(13):21384–21392.
- [28] Li Z, Yi Z, Jia X, et al. Micro-welding of non-optical contact sapphire/metal using Burst femtosecond laser [J]. *Materials Letters*, 2024, 377:137540.
- [29] Yu H, Zhao J X, Zhang L J, et al. Femtosecond laser welding of sapphire–copper using a thin film titanium interlayer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 177:111063.
- [30] Yang M, Jiang Q, Zhang X, et al. Effects of surface roughness on the microstructure and mechanical properties of dissimilar sapphire/Invar36 alloy joints made by ultrashort pulsed laser micro-welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2024, 36(3):032021.
- [31] Zuo X, Lin L, Hu Y, et al. High-strength and impermeable sapphire/aluminum joints fabricated by ultrafast laser microwelding: Microstructures and joining mechanism [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 180:111455.