

引文格式: 王红阳, 李涛, 尹海鹏, 等. 脉冲激光参数对Ti-6Al-4V薄板同轴双激光焊缝成形及其组织性能影响研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(14): 14-21.

WANG Hongyang, LI Tao, YIN Haipeng, et al. Effect of pulsed laser parameters on forming of coaxial dual-beam laser weld seam and its microstructure properties of Ti-6Al-4V thin plate[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(14): 14-21.

# 脉冲激光参数对Ti-6Al-4V薄板同轴双激光焊缝成形及其组织性能影响研究\*

王红阳, 李涛, 尹海鹏, 陆连种, 刘黎明

(大连理工大学材料科学与工程学院辽宁省先进焊接与连接技术重点实验室, 大连 116024)

[摘要] 针对钛合金薄板焊接过程中易变形问题, 采用由连续激光和脉冲激光组成的同轴双激光器对1.5 mm厚的Ti-6Al-4V薄板进行焊接试验。研究不同激光功率配比、脉宽和频率对焊缝成形和薄板变形的影响, 确定了Ti-6Al-4V薄板对焊的最佳焊接工艺参数。试验结果表明, 在连续激光功率1.6 kW、脉冲激光功率0.3 kW、脉冲频率25 Hz、脉宽6 ms、焊接速度1000 mm/min的焊接工艺参数下可以获得质量优异的焊缝, 变形角度为0.9°。焊接接头抗拉强度为948 MPa, 达到母材的92.3%; 焊缝表面最大残余压应力为207 MPa, 焊缝区和热影响区显微硬度均高于母材。

关键词: 同轴双激光; Ti-6Al-4V; 薄板变形; 残余应力; 组织性能

中图分类号: V26

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.14.014



王红阳

副教授, 博士, 研究方向为激光复合热源焊接技术。

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好和无磁性等优点, 已经成为航空航天、海洋装备、石油化工、生物医药等领域不可或缺的关键材料<sup>[1-3]</sup>。在各种钛合金中, Ti-6Al-4V以优良的综合成本、高的比强度、好的耐蚀性等优势成为钛合金工业中的王牌合金, 使用量在全部钛合金中占比超过50%<sup>[4-5]</sup>。目前焊接Ti-6Al-4V合金的主要方法有非熔化极气体保护焊(Gas tungsten arc welding, GTAW)、熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)、电子束焊(Electron beam welding, EBW)、激光焊(Laser beam welding, LBW)等<sup>[6-7]</sup>。对于一些复杂结构、高精度工业零部件的焊接及性能强化问题, 传统单一热源焊接方法焊接参数裕度小, 容易产生焊接缺陷及焊接变形, 因此越来越多的

研究人员更加倾向于使用复合热源去获得性能优异的构件。

激光-TIG<sup>[8]</sup>、激光-MIG<sup>[9]</sup>更多应用于中厚板焊接, 而对于薄板或精密零件, 焊接所产生的残余应力会影响零件的形状和尺寸精度<sup>[10-12]</sup>。激光焊接具有热输入低、能量密度高、精密性高、焊接形变小的特点<sup>[13]</sup>, 因此双激光焊接薄板受到广泛重视。Yan等<sup>[14]</sup>采用双激光束双向同步焊制备2 mm厚Ti-6Al-4V T形接头, 结果显示热影响区的抗裂纹扩展能力优于融合区, 双激光焊接有效地抑制裂纹扩展。Ma等<sup>[15]</sup>详细研究了双光束激光焊接过程中不同光束配置对线材熔化和液滴转移行为的影响, 结果表明并排配置双激光具有更稳定的传输行为和适当的流体模式, 从而提高了焊接稳定性。Zhao等<sup>[16]</sup>使用双

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2024YFF0504803); 国家自然科学基金(52375308)。

激光束焊接 1.2 mm 厚 Ti-6Al-4V 搭接接头,结果表明  $\alpha'$ -马氏体的平均长度随着焊接速度的增加而减小,当焊接速度为 15.7 m/min 时,可以获得平均长度为 1.4  $\mu\text{m}$  的精细  $\alpha'$ -马氏体,使得焊接接头拉伸强度提高到 1024 MPa,伸长率为 12.8%。

目前的研究结果表明,双束激光通过优化能量分布能够改善接头的微观组织和提高机械性能<sup>[17-21]</sup>。但双束激光方案多采用同类型激光(如双脉冲激光或双连续激光)不同轴的组合,不同轴的激光束在空间上分离使得能量分布难以精确叠加,导致能量利用效率下降。同时,对于双束激光,须独立调整光路和焦点位置,这种结构设计进一步放大了工件装配精度敏感性。对于双束激光面临的实际问题,本文提出连续激光与脉冲激光的同轴复合模式。通过二者的参数匹配实现协同优化,改善焊缝成形与控制薄板变形,实现对焊接热输入和熔池动态的精准调控。同时双激光同轴模式也使得能量密度集中和热分布均匀,提升了加工效率与精度,适用于高精度焊接场景。在双激光中,连续激光提供稳定的热输入,维持熔池的稳定性,主导熔池的形成与流动状态;脉冲激光具有峰值功率与瞬时能量,通过短时高能冲击和波形设计,可以在低热输入条件下获得稳定的焊接匙孔,并且能够通过调节脉冲频率控制熔池振荡,促进气泡逸出,从而降低焊接试样气孔率。这一能量协同策略突破了双束激光在热输入精度与熔池动态调控方面的固有局限,减小了残余应力梯度,为钛合金薄板的高精度及高性能连接提供了新范式。

基于钛合金在薄板焊接过程中存在的变形问题及实际应用需求,本文使用由连续激光和脉冲激光组合的同轴双激光焊接 Ti-6Al-4V 薄板,改善传统单激光焊接因热输入-散热速率失配导致的变形不可控和缺

陷敏感问题,分析脉冲激光参数对焊缝成形及薄板变形的影响。根据试验结果分析焊接接头显微组织和力学性能,为改善薄板焊接变形问题提供新思路、新方法。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料和试验装置

试验母材为尺寸 100 mm × 50 mm × 1.5 mm 的 Ti-6Al-4V 合金板材,其主要化学成分如表 1 所示。对焊试验前,先用砂纸打磨钛合金薄板的待焊面来除去氧化层,然后使用无水乙

醇擦拭表面以除去残留杂质和油污。

本试验使用的同轴双激光焊接系统由 2000 W 连续激光和 800 W 脉冲激光组成,两束激光同轴输出,原理如图 1 所示。为了防止焊接接头区域氧化,设计制作了拖罩和铜管进行正面和背面保护。试验中将 99.99% 的 Ar 分别以 15 L/min、45 L/min 的流量通入拖罩和铜管。在控制焊接速度不变的情况下,研究不同激光功率配比、脉宽和频率 3 个工艺参数对焊缝成形和薄板变形的影响,焊接过程中的主要参数如表 2 所示。

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V titanium alloy (mass fraction) %

Al	V	O	Fe	C	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	<0.20	<0.30	<0.10	余量

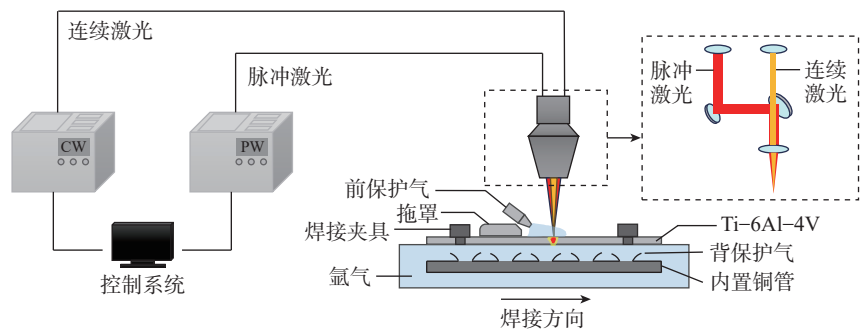


图 1 同轴双激光焊接系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of coaxial dual-beam welding system

表 2 Ti-6Al-4V 同轴双激光焊接工艺参数

Table 2 Parameters of Ti-6Al-4V coaxial dual-beam welding

编号	连续功率 $P_c/\text{kW}$	脉冲功率 $P_p/\text{kW}$	脉宽 $\tau/\text{ms}$	频率 $f/\text{Hz}$	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
S1	1.4	0.5	6	25	1000
S2	1.5	0.4	6	25	1000
S3	1.6	0.3	6	25	1000
S4	1.7	0.2	6	25	1000
S5	1.6	0.3	2	25	1000
S6	1.6	0.3	4	25	1000
S7	1.6	0.3	8	25	1000
S8	1.6	0.3	6	5	1000
S9	1.6	0.3	6	15	1000
S10	1.6	0.3	6	35	1000

## 1.2 焊接接头分析方法

试验完成后采用电火花线切割截取接头分析测试试样。通过使用扫描仪 (EPSON Perfection V9) 观察焊接件正反面的宏观形貌和侧面形貌,并测量焊接件翘曲变形角度  $\alpha_i$  ( $i=1,2,3, \dots, 10$ )。测量时将最大处角变形作为薄板的变形角度,通过 3 组独立重复试验取平均值获取,将其作为薄板整体变形角度评价基准,如图 2 所示。采用 X 射线应力测定仪 (XL-640) 确定薄板焊缝表面的残余应力分布。金相样磨抛后,使用 Kroll 试剂 (2 mL HF+6 mL HNO<sub>3</sub>+92 mL H<sub>2</sub>O) 进行腐蚀,采用 DMi8 金相显微镜对焊缝横截面进行显微组织分析。

根据 GB/T 2651—2023《金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验》将焊接接头加工成图 3 所示的标准拉伸试样。采用 INSTRON 5982 型万能拉伸试验机对接头进行拉伸试验,加载速率设置为 1 mm/min。焊接接头的显微硬度分布采用 TouchVicker 1000Z 显微硬度计进行测试,两测量点间距为 0.15 mm,加载载荷为 500 g,保荷时间为 10 s。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 激光参数对成形及变形的影响

#### 2.1.1 激光功率不同配比对焊接成形的影响

在控制总功率不变的情况下,

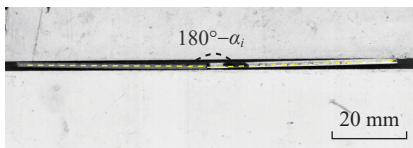


图 2 焊接件变形角度

Fig.2 Deformation angle of welded parts

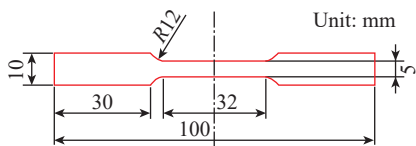


图 3 标准拉伸试样

Fig.3 Standard tensile specimen

调控连续、脉冲激光功率比,得到的接头表面形貌如图 4 所示。在不同功率比条件下, S1 和 S2 均出现焊缝孔洞, S3 表面成形良好, S4 背面熔宽较窄。同时也发现 S1~S4 形变角度均较小,从宏观形貌结果分析,成形最好的一组参数是  $P_c=1.6$  kW、 $P_p=0.3$  kW,在此参数下得到的焊缝呈现出光滑紧密的鱼鳞状。脉冲激光峰值功率的计算公式为

$$W_p = \frac{P_p}{\tau \cdot f} \quad (1)$$

式中,  $W_p$  代表峰值功率;  $\tau$  代表脉宽;  $f$  代表频率。由式 (1) 可知,当脉冲激光平均功率增加,脉宽与频率保持不变时,峰值功率也随之增大。从图 4 发现,脉冲平均功率为 300 W 时,熔融金属在重力与表面张力作用下均匀铺展形成宽而连续的焊缝,背面熔宽达到 1.83 mm,此时形成稳定的匙孔效应,熔池内部金属蒸气反冲压力与液态金属表面张力达到动态平衡,从而避免熔池塌陷或飞溅,确保焊缝表面平整;当脉冲平均功率大

于 300 W 时,峰值功率过高导致焊接 Ti-6Al-4V 时出现了焊穿缺陷,焊缝孔洞使得残余应力释放,所以变形角度较小,但这严重影响焊接接头的力学性能和可靠性;当脉冲平均功率小于 300 W 时,峰值功率减小使得熔深减小,导致背部熔宽减小,熔融金属铺展性减弱,而较小的熔宽会使得局部有高应力状态,降低接头的塑性和韧性,最终导致接头失效。

#### 2.1.2 脉冲激光脉宽和频率对焊接成形的影响

分析激光脉宽变化对焊接成形的影响,调控脉冲激光脉宽,所得到的焊缝表面形貌如图 5 所示。在不同脉宽条件下, S5 ( $\tau=2$  ms) 表面存在少量飞溅且背面熔宽较窄, S6 ( $\tau=4$  ms) 背部熔宽前后不均匀, S7 ( $\tau=8$  ms) 则出现未焊透缺陷,从薄板变形发现 S5~S7 形变角度均较大。当脉宽为 6 ms 时,激光焊接过程达到热输入与能量分布的平衡状态,此时峰值功率与作用时间相匹配,熔融金属能够均匀填充焊缝区域并形成

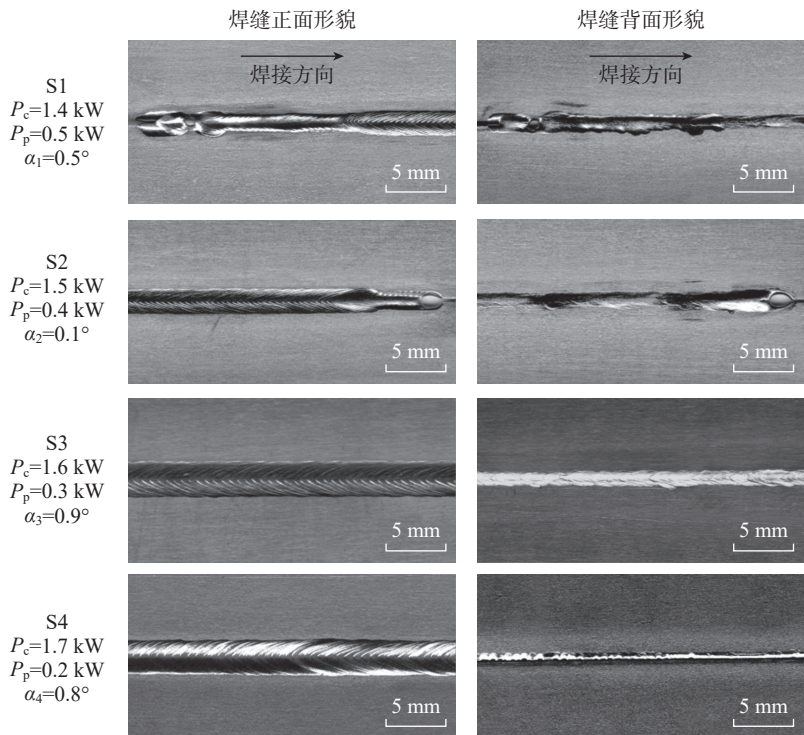


图 4 同轴双激光焊接样品 S1~S4 的表面形貌

Fig.4 Surface morphology of samples S1-S4 welded by coaxial dual-beam laser

连续的熔池；当脉宽小于 6 ms 时，缩短激光作用时间导致熔融金属铺展不充分，背部焊缝因凝固速率过快呈现不连续形态，此时较窄的背部熔宽加剧局部热量聚集，诱发高应力状态，最终引发钛合金薄板的大角度翘曲变形；当脉宽大于 6 ms 时，在平均功率恒定的条件下，脉宽增大直接导致峰值功率降低，难以实现全板厚穿透，造成未焊透缺陷出现，此类缺陷促使焊透区与非焊透区在凝固阶段出现非均匀收缩，由此产生的应力失衡进一步加剧焊接件的整体变形程度。通过双激光协同作用优化脉宽参数，可实现熔池动态平衡，在脉宽 6 ms 时能量输入与热传导达到最佳匹配。

分析激光频率变化对焊接成形的影响，调控同轴双激光脉冲频率所得到的焊缝表面形貌如图 6 所示。在不同脉冲频率下，S8 ( $f=5$  Hz) 焊点稀疏并未有效连接，S9 ( $f=15$  Hz) 焊点整体分布较为分散，S10 ( $f=35$  Hz) 相较于 S9 焊点更加密集，背部熔宽较好，薄板变形结果表明 S8~S10 变形角度均较小。当频率为 25 Hz 时，脉冲频率与熔池凝固时间匹配最佳，形成连续细密均匀的鱼鳞纹结构；当频率小于 25 Hz 时，在平均功率与脉宽恒定时，频率降低会提升峰值功率，致使单脉冲热输入增强，引发板材小角度变形；当频率大于 25 Hz 时，脉冲频率增加导致峰值功率下降，熔池深度减小使得内部热对流强度减弱，同时熔池体积缩小加速凝固过程，熔融金属在背部的铺展时间不足，致使背面熔宽较 25 Hz 工况有所缩减。结果表明，25 Hz 是双激光焊接薄板钛合金的优化频率，在保证低变形角度的同时，实现表面成形致密与背部熔宽最大化。

### 2.1.3 影响焊缝成形及薄板变形的主要因素分析

同轴双激光中连续功率与焊接速度的匹配关系的拟合曲线如图 7

所示，拟合公式为式 (2)，为提升焊缝成形质量与调控热输入提供量化依据。对于焊缝成形优化与平衡热

输入，利用拟合曲线和经验公式确定深熔焊的功率范围，帮助选择连续激光功率与速度组合，同时确保

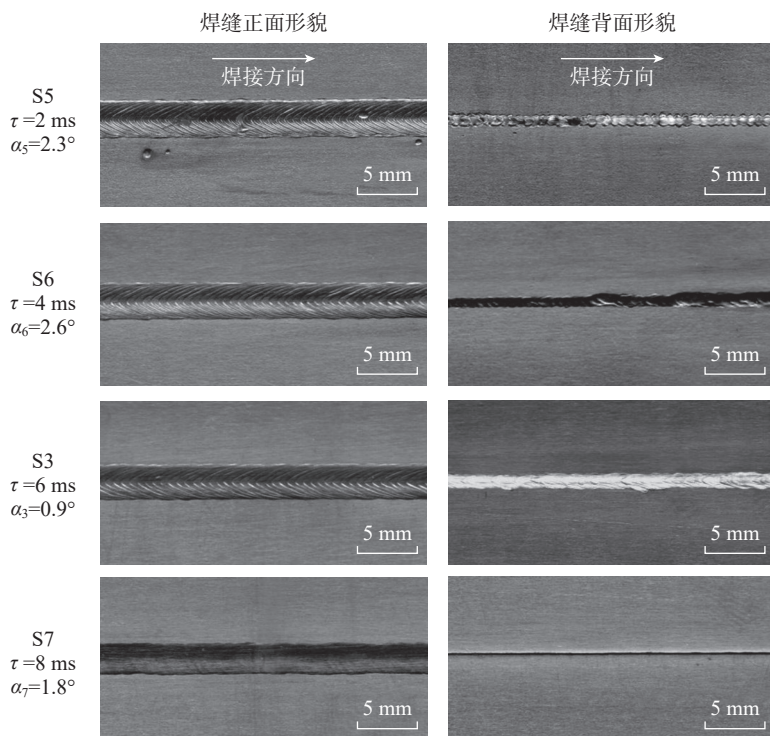


图 5 同轴双激光焊接样品 S5~S7 的表面形貌  
Fig.5 Surface morphology of samples S5~S7 welded by coaxial dual-beam laser

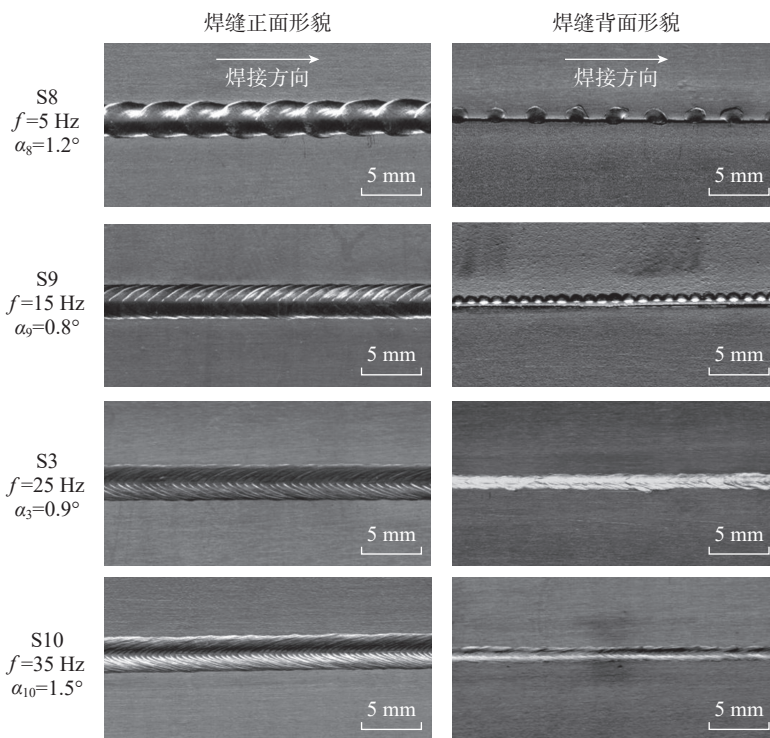


图 6 同轴双激光焊接样品 S8~S10 的表面形貌  
Fig.6 Surface morphology of samples S8~S10 welded by coaxial dual-beam laser

熔深满足设计要求,增强了工艺参数的适配性。

$$v = 9 \times 10^{-4} P^2 - 1.76P + 1435.5 \quad (2)$$

式中,  $v$  代表焊接速度;  $P$  代表连续激光功率。

图 8 显示了不同参数下薄板变形角度。在改变激光平均功率、脉宽和频率试验中发现,影响焊缝成形及变形的是峰值功率。较高的峰值功率能在极短时间内获得高强度能量输入,短时高能冲击使得焊缝金属的熔化状态和熔池的流动特性发生改变,进而对焊缝的熔宽和熔深产生影响。同时这也会在焊接件内部形成不均匀热分布,产生较大热应力,使得焊接件更容易发生变形。通过参数匹配实现变形控制与成形质量的平衡,重构焊接热输入分布和降低局部热积累梯度,从而抑制非均匀收缩导致的变形。从 S1~S10 试验结果发现,脉宽是峰值功率的核心控制参数,直接影响能量密度和熔池动态;频率和功率通过双激光协同作用调节能量输入与热累积,实现熔池动态平衡与高质量焊接。

#### 2.1.4 薄板表面残余应力分布

根据焊接工艺试验结果,当脉冲功率提升至 400 W、500 W 时,短时间内能量密度大幅提升引发焊穿缺陷,导致熔池稳定性下降及残余应力非均匀释放。为避免材料损伤对测试结果产生干扰,故选取脉冲功率为 200 W 与 300 W 的试样进行残余应力分布特性分析,旨在探究薄板焊接残余应力对变形的影响。根据图 9 结果,残余应力峰值集中在焊缝中心及附近热影响区。拟合结果显示,试样正面及背面残余应力呈现先增后减的趋势,当脉冲功率由 200 W 增至 300 W 时,残余拉应力峰值 317 MPa 降低了 25% 至 239 MPa,残余压应力峰值 269 MPa 下降了 23% 至 207 MPa。

试验结果表明,焊缝正面呈现较

高的纵向残余拉应力,这是由于焊接过程中焊缝金属在冷却收缩时受到周围母材的刚性约束,焊缝中心区域

产生拉伸塑性变形,形成拉应力。采用低功率 200 W 时背部熔宽为 0.58 mm,熔池范围较窄导致熔池边缘温

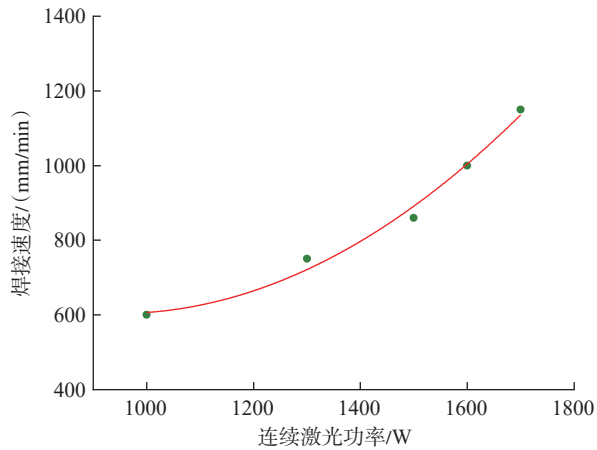


图 7 同轴双激光中连续激光功率与焊接速度拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of continuous laser power and welding speed in coaxial dual-beam laser

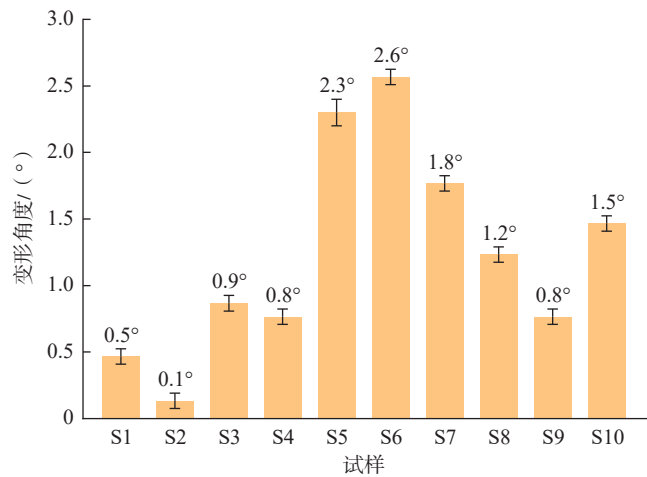


图 8 不同参数下薄板试样变形角度

Fig.8 Deformation angle of thin plate specimen under different parameters

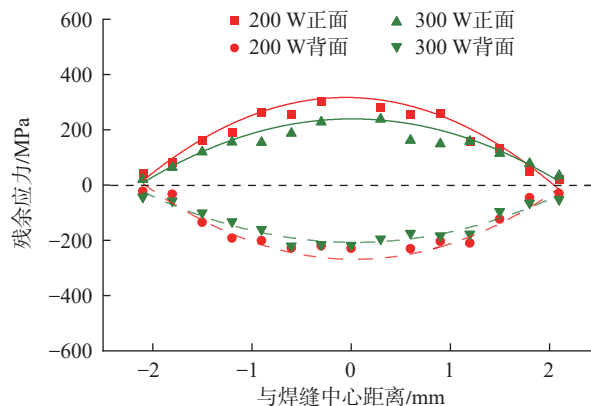


图 9 不同脉冲功率下试样正面、背面残余应力

Fig.9 Residual stress on the front and back of the specimen under different pulse powers

度梯度陡峭,使得局部拉应力集中,残余应力峰值更高。当脉冲激光功率增加至 300 W 时,背部熔宽增加至 1.83 mm,熔池宽度增加使得熔合线附近温度梯度降低,促进残余应力均匀分布,峰值应力降低。Sun 等<sup>[22]</sup>使用连续激光焊接 1 mm 厚 Ti-6Al-4V,测得熔融区附近残余压应力高达 330 MPa。与单激光相比,双激光在控制残余应力方面更具优势。单激光焊接匙孔因能量波动易导致熔池不稳定,进而引发反复的塑性应变积累。而双激光通过能量互补可稳定匙孔形态,减少熔池振荡,从而降低动态应力峰值,使材料塑性变形更均匀,避免了高梯度应力集中。

### 2.2 焊接接头性能

为探究同轴双激光中不同脉冲激光功率对焊接接头抗拉强度的影响,对焊件的拉伸性能进行研究,结果如图 10 所示。S1 和 S2 断裂位置位于焊趾附近, S4 由于未熔合缺陷导致在焊缝处断裂,而 S3 则在母材处断裂。S1 和 S2 焊接过程中峰值功率过高导致焊趾区域组织粗大,这种粗大组织的晶界面积相对较小,位错运动阻力较小,从而导致材料的强度和韧性降低<sup>[23]</sup>。S3 相较于 S1、S2 变形角度较大,这也说明接头处存在较大的残余应力。当残余应力和外部载荷叠加作用时,改变了母材的受力状态,这使得母材提前达

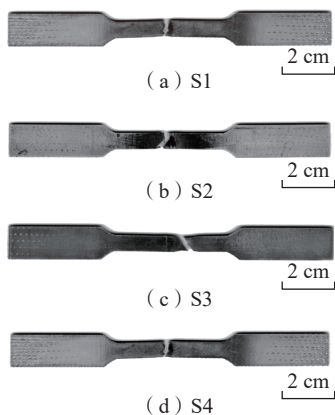


图 10 各试样断裂位置  
Fig.10 Fracture position of each specimen

到断裂极限。图 11 为在不同脉冲功率下各焊接试样拉伸试验结果,当  $P_p=0.3$  kW 时,接头强度达到最大值 948 MPa,达到母材的 92.3%;伸长率为 12.2%,达到母材的 85.9%。从同轴双激光热源试验结果发现,随着脉冲激光功率增加,抗拉强度和伸长率呈现先增大后减小的趋势。

### 2.3 微观组织与显微硬度

图 12 (a) 显示了脉冲功率为 300 W 时焊接接头区域形成的微观组织。研究发现,熔池凝固以  $\beta$  晶

体的外延生长或共晶的形式发生,并且在接头的焊缝区域以大柱状晶粒为主。在固相转变过程中,  $\beta$  晶粒根据连续冷却转变 (CCT) 曲线转变为与冷却行为相关的不同微观结构。 $\beta$  晶体通过扩散转变以相沉积的形式冷却形核演变成  $\alpha$  相,还有一些通过非扩散转变形成过饱和非平衡六方晶格即  $\alpha'$  相,  $\alpha'$ -马氏体截止生长在原始  $\beta$  晶界<sup>[24]</sup>。

图 12 (b) 和 (c) 表明焊缝区由大量  $\alpha'$ -马氏体和针状、片状  $\alpha$  相组

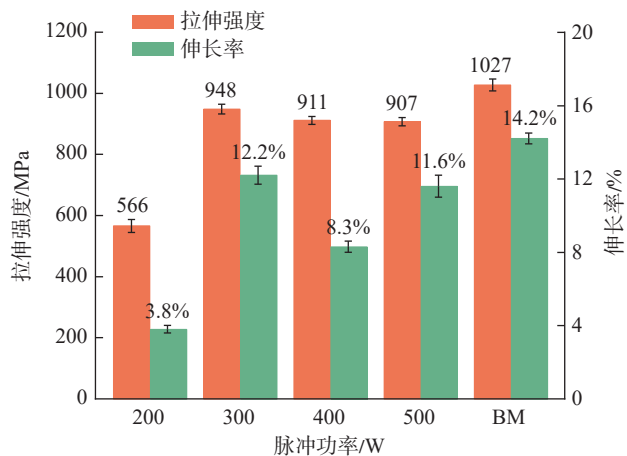


图 11 各试样拉伸强度和断后伸长率  
Fig.11 Tensile strength and elongation at break of each specimen

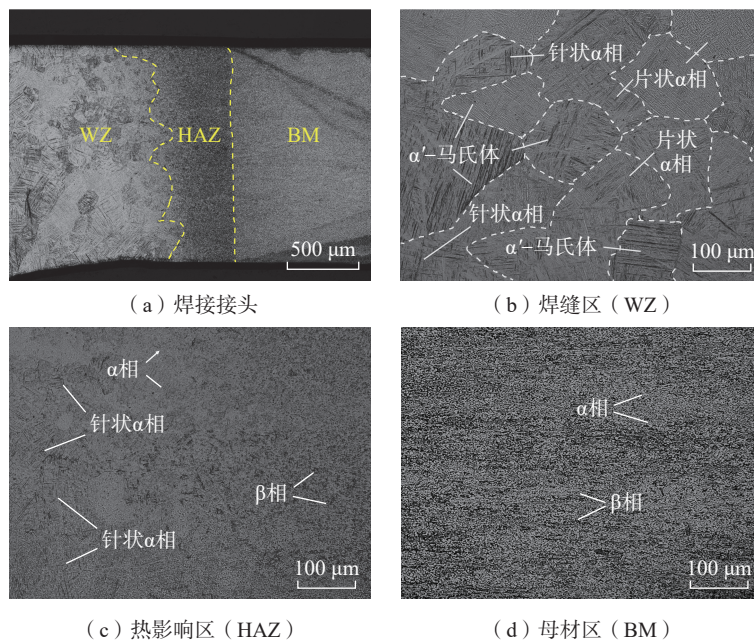


图 12  $P_p=300$  W 时不同区域微观组织  
Fig.12 Microstructure of different zones at  $P_p=300$  W

成,在固态相变中 $\alpha'$ -马氏体快速冷却速率大大超过临界冷却速率,因此密集分布且为主要生成相,并且焊接接头的热影响区较小,晶粒组织较均匀。这是由于熔融金属铺展性较好,增大了冷却速率。较高的冷却速率进一步促进 $\alpha'$ -马氏体的成核速率,同时有助于抑制晶粒生长,使得组织成分均匀<sup>[25]</sup>。图12(d)的母材Ti-6Al-4V由 $\alpha+\beta$ 双相组织组成,在焊接过程中,越靠近焊缝中心区域晶粒组织受热影响越大,热影响区到焊缝区晶粒不断变大,而越靠近母材区域方向的组织则部分保留了原始母材的微观组织特征。

不同激光功率配比作用下焊接接头横截面显微硬度分布如图13所示,可以看出焊缝区和热影响区硬度均高于母材区。在Ti-6Al-4V中, $\alpha$ 相为密排六方结构,原子排列方式紧密,原子间结合力较强; $\beta$ 相是体心立方结构,原子排列相较于 $\alpha$ 相而言不够紧密,原子排列相对疏松,原子间结合力小于 $\alpha$ 相,所以 $\beta$ 相在受到外力载荷时位错更容易移动,硬度通常低于 $\alpha$ 相<sup>[26]</sup>。焊缝中的微观组织包括大量针状、片状 $\alpha$ 相和 $\alpha'$ -马氏体,而HAZ中的微观组织包括 $\alpha'$ -马氏体和初始 $\alpha$ 、 $\beta$ 相,母材由 $\alpha$ 相、 $\beta$ 相双态组织组成。由此可见,这也是

焊缝区和热影响区硬度均高于母材区的原因。

### 3 结论

采用同轴双激光焊接技术实现了Ti-6Al-4V钛合金薄板高性能及高精度焊接制造,研究不同激光功率配比、脉宽和频率对焊缝成形和薄板变形的影响,分析不同参数下焊接接头宏观形貌和微观组织,并测量了焊接接头的拉伸性能。同轴双激光焊接的应用有效控制薄板钛合金的焊接变形,降低焊接应力和优化焊缝表面成形。根据试验结果可以总结出以下结论。

(1)采用同轴双激光焊接Ti-6Al-4V钛合金薄板,焊接接头无明显裂纹、气孔,焊点重叠紧密,呈鱼鳞状分布排列。焊接件翘曲变形角度均较小,在最佳参数下可控制在 $0.9^\circ$ ,焊接接头残余压应力动态控制在240 MPa以内。

(2)焊接接头由大量 $\alpha'$ -马氏体和针状、片状 $\alpha$ 相组成,热影响区小且组织均匀。随着脉冲功率增加, $\beta$ 相晶粒变得更加粗大,同时 $\alpha'$ -马氏体和针状、片状 $\alpha$ 相也不断增加。

(3)焊接件微观组织基本均匀,焊缝区和热影响区显微硬度均高于母材区。在最佳参数下接头强度达

到948 MPa,达到母材的92.3%;伸长率为12.2%,达到母材的85.9%。

### 参考文献

[1] LI Z, ZHAO W, XIAO G C, et al. Impact of microstructure evolution on the corrosion behaviour of the Ti-6Al-4V alloy welded joint using high-frequency pulse wave laser[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 4300-4314.

[2] KIM M, LEE S H, YU J, et al. Enhanced kinetics of microstructural evolution in Ti-6Al-4V through electropulsing treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 8500-8508.

[3] YAN T Y, LIU Y, WANG J F, et al. Bridging microstructure and crystallography with the crack propagation behavior in Ti-6Al-4V alloy fabricated via dual laser beam bilateral synchronous welding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 174: 1-14.

[4] 魏玉顺, 马青军, 武鹏博, 等. TC4钛合金激光焊接技术研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(8): 55-66.

WEI Yushun, MA Qingjun, WU Pengbo, et al. Research progress in laser welding technology of TC4 titanium alloy[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 55-66.

[5] 申晨. 我国钛工业技术进展及趋势[J]. 中国金属通报, 2022(9): 1-3.

SHEN Chen. Technical progress and trend of titanium industry in China[J]. China Metal Bulletin, 2022(9): 1-3.

[6] 孔斌, 杜心伟, 海沁雨, 等. Ti-6Al-4V薄板脉冲激光拼焊焊缝成形及力学性能[J]. 焊接, 2022(9): 10-16.

KONG Bin, DU Xinwei, HAI Qinyu, et al. Formation of weld and mechanical properties of Ti-6Al-4V thin plate by pulse laser welding[J]. Welding & Joining, 2022(9): 10-16.

[7] WANG S G, WU X Q. Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding[J]. Materials & Design, 2012, 36: 663-670.

[8] WU M P, LUO Z, AO S S. A novel welding method for extra-thick high-strength steel: Double-sided narrow gap oscillating laser and oscillating laser-TIG hybrid welding[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 164: 109432.

[9] AQEEL M, GAUTAM J P, SHARIFF S M. Comparative study on autogenous diode laser, CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid and multi-pass TIG welding of 10 mm thick Inconel 617 superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 856:

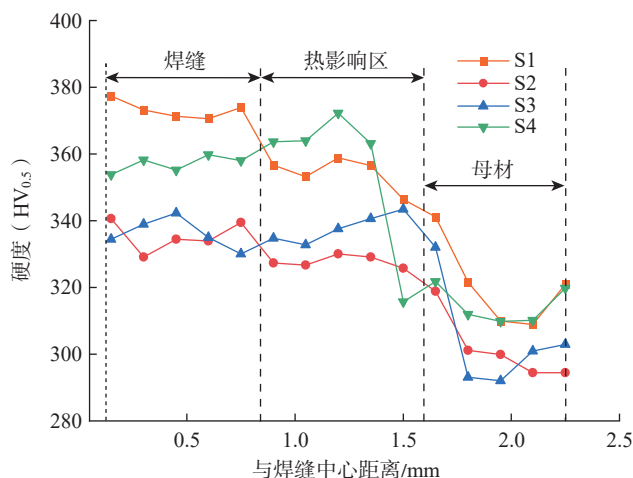


图13 不同激光功率配比下焊接接头横截面显微硬度分布

Fig.13 Cross-sectional microhardness distribution of welded joints at different laser power ratios

143967.

[10] ZHANG L, OUYANG W T, XU Z F, et al. Effect of asynchronized and synchronized laser shock peening on microstructure and mechanical properties of the Ti-6Al-4V laser joint[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 9289-9314.

[11] 樊浩, 崔珊, 陈文静, 等. 激光功率对TC4钛合金激光-TIG复合焊缝成形与组织的影响[J]. *应用激光*, 2023, 43(8): 48-54.

FAN Hao, CUI Shan, CHEN Wenjing, et al. Study on weld formation and microstructure of TC4 titanium alloy laser-TIG hybrid welding[J]. *Applied Laser*, 2023, 43(8): 48-54.

[12] 张婧, 杜伟, 王孟果, 等. 钛合金激光-MIG电弧复合焊接接头组织性能[J]. *金属加工(热加工)*, 2023(4): 10-13, 17.

ZHANG Jing, DU Wei, WANG Mengguo, et al. Microstructure and properties of laser-MIG arc hybrid welding joint of titanium alloy[J]. *MW Metal Forming*, 2023(4): 10-13, 17.

[13] CHEN J T, LI H Z, LIU Y Z, et al. Deformation behavior and microstructure characteristics of the laser-welded Ti-6Al-4V joint under variable amplitude fatigue[J]. *Materials Characterization*, 2023, 196: 112606.

[14] YAN T Y, LIU J Z, HU K, et al. Microstructure and texture evolution of Ti-6Al-4V alloy T-joint fabricated by dual laser beam bilateral synchronous welding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 822: 141426.

[15] MA G L, LI L Q, CHEN Y B. Effects

of beam configurations on wire melting and transfer behaviors in dual beam laser welding with filler wire[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 138-148.

[16] ZHAO J Y, ZHANG J H, GAO Q Y, et al. Research on microstructure evolution and tensile characteristics of Ti-6Al-4V double lap-fillet joints fabricated by dual laser-beam bilateral synchronous welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107472.

[17] GHORBANI H, SARKARI KHORRAMI M, GERANMAYEH A, et al. In-situ synthesis of TiC/Ti alloyed layer via pulsed Nd:YAG laser melting of Ti-6Al-4V titanium with preplaced carbon-based powder[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 172: 107864.

[18] SHI Y, ZHANG H, WATANABE T, et al. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(7-8): 732-736.

[19] LI Z, ZHAO W, ZHANG H, et al. Microstructure and corrosion resistance of fusion zone in Ti-6Al-4V alloy welded using pulsed- and continuous-wave lasers[J]. *Corrosion Science*, 2023, 220: 111269.

[20] WU Y H, MAO Y, FU L, et al. Dual laser-beam synchronous self-fusion welding of Ti-6Al-4V titanium alloys T-joints based on prefabricated welding materials[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 2560-2576.

[21] WANG F B, LIU Y K, TONG Y X, et al. Effect of electropulsing on anisotropy

in strength of laser metal deposited Ti-6Al-4V alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(8): 2578-2586.

[22] 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.

[23] 陈伟, 张宇鹏, 董勇, 等. 激光焊接参数对钛合金薄板组织及力学性能影响[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(5): 100-108.

CHEN Wei, ZHANG Yupeng, DONG Yong, et al. Effect of laser welding parameters on microstructure and mechanical properties of titanium alloy sheet[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(5): 100-108.

[24] AHMED T, RACK H J. Phase transformations during cooling in  $\alpha+\beta$  titanium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 243(1-2): 206-211.

[25] LIU Y, WANG J F, YAN T Y, et al. Effect of synchronous gas cooling method on microstructure and mechanical properties of laser welded joint for Ti6Al4V titanium alloy[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 108779.

[26] ZHANG H, HU S S, SHEN J Q, et al. Effect of laser beam offset on microstructure and mechanical properties of pulsed laser welded BTi-6431S/TA15 dissimilar titanium alloys[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 74: 158-166.

## Effect of Pulsed Laser Parameters on Forming of Coaxial Dual-Beam Laser Weld Seam and Its Microstructure Properties of Ti-6Al-4V Thin Plate

WANG Hongyang, LI Tao, YIN Haipeng, LU Lianzhong, LIU Liming

(Liaoning Key Laboratory of Advanced Welding and Joining Technology, School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the problem of deformation of titanium alloy thin plate welding, a coaxial dual-beam laser composed of continuous laser and pulsed laser was used to test the welding of 1.5 mm thick Ti-6Al-4V thin plate. The effect of different laser power ratios, pulse widths, and frequencies on weld formation and sheet deformation is investigated, and the optimum welding process parameters for butt welding of Ti-6Al-4V sheet are determined. The test results show that the welding process parameters of continuous laser power of 1.6 kW, pulsed laser power of 0.3 kW, pulse frequency of 25 Hz, pulse width of 6 ms, and welding speed of 1000 mm/min can obtain a weld with excellent quality and the deformation angle of  $0.9^\circ$ . The tensile strength of the welded joint is 948 MPa, reaching 92.3% of the base material; the maximum residual compressive stress on the weld surface is 207 MPa, and the microhardness of the weld zone and the heat-affected zone is higher than that of the base material.

**Keywords:** Coaxial dual-beam laser; Ti-6Al-4V; Sheet deformation; Residual stress; Microstructure property

(责编 青燕)