

# TC4 钛/5052 铝异种金属激光点焊工艺特性研究

孙逸铭<sup>1</sup>, 张泽群<sup>1</sup>, 檀财旺<sup>1,2\*</sup>, 赵晓叶<sup>2</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 宋晓国<sup>1,2</sup>, 冯吉才<sup>2</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209;

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 黑龙江 150001

**摘要** 利用波长为 1070 nm, 最高输出功率为 6 kW 的连续式光纤激光器, 采用激光点焊技术, 对 TC4 钛合金/5052 铝合金异种金属连接进行工艺特性研究。结果表明, 相同离焦量条件下, 激光功率较小时, 焊接过程中钛/铝接头会形成双熔池, 焊后下部铝合金出现缩孔, 并有气孔和裂纹产生; 增大激光功率, 钛熔化量增加, 液相钛流入焊缝形成钉扎状结构, 边缘处钛铝相互扩散反应, 生成近钛侧的  $\text{TiAl}_2$  相和近铝侧的  $\text{TiAl}_3$  相; 未流入熔合区的钛/铝界面生成  $\text{TiAl}_3$  金属间化合物层, 且随激光功率的增加, 钛-铝反应层增厚。当离焦量小于 +50 mm 时, 接头强度随激光功率的增大先增大后减小, 最大断裂载荷不足 3000 N; 采用 +50 mm 离焦量时, 随激光功率的变化, 接头强度出现两个峰值, 失效位置分别位于接头界面及铝合金母材处, 断裂形式为准解理断裂和韧性断裂, 最大断裂载荷达到 3571 N。

**关键词** 激光器; 激光焊接; 钛合金; 铝合金; 异种材料

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.031403

## Laser Spot Welding Characteristics of Dissimilar Metals: TC4 Titanium/5052 Aluminum

Sun Yiming<sup>1</sup>, Zhang Zequn<sup>1</sup>, Tan Caiwang<sup>1,2\*</sup>, Zhao Xiaoye<sup>2</sup>, Chen Bo<sup>1</sup>,  
Song Xiaoguo<sup>1,2</sup>, Feng Jikai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** We investigate the characteristics of dissimilar metals, such as TC4 Ti alloy/5052 Al alloy, joined via laser spot welding using a continuous fiber laser device of 1070 nm wavelength and 6 kW maximum power. Results indicate that with the same defocusing distance, two molten pools are formed during welding with a low laser power. Shrinkages, pores, and cracks occurred on the Al base metal. With increasing laser power, a part of the molten Ti flowed into the fusion zone, forming a nail shape, due to which mutual diffusion and reaction occurred between the Ti and Al atoms at the edge.  $\text{TiAl}_2$  and  $\text{TiAl}_3$  phases are produced close to the Ti and Al sides, respectively. A layer of  $\text{TiAl}_3$  intermetallic compound formed at the Ti-Al interface but not in the fusion zone. The  $\text{TiAl}_3$  layer became thicker as the laser power is increased. Joint strength first increases and then decreases with the increasing laser power at defocusing distances is less than +50 mm. The maximum fracture load is less than 3000 N. At the defocusing distance of +50 mm, two peak values of joint strength are observed with a variation of laser power. The fracture locations are distributed at the interface and the Al alloy base metal. Cleavage and ductile fractures are the corresponding forms of fractures. The maximum joint strength reaches 3571 N.

**Key words** lasers; laser welding; Ti alloy; Al alloy; dissimilar metals

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-08-16; 录用日期: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51504074)、国家重点研发计划(2018YFB1107900)、山东省重点研发计划(2017GGX30147, 2017CXGC0811)

\* E-mail: tancaiwang@163.com

# 1 引言

近年来,随着航空航天及原子能等尖端科技的迅猛发展,其所应用的材料提出了更高的要求。从结构轻量化、降低设计与制造成本及特殊使用要求等方面考虑,充分利用不同材料的性能优点,组合使用具有不同特性的材料已成为发展的趋势<sup>[1]</sup>。钛合金具有密度小、比强度高、抗腐蚀及抗断裂韧性强等特点,其在航空航天等诸多领域有非常广泛的应用<sup>[2]</sup>。铝合金具有密度极低、比强度较高、成型工艺成熟、价格低廉等优点<sup>[3-4]</sup>。因能实现铝合金和钛合金之间的优势互补,平衡材料的使用性能和经济效益,所以钛/铝异种材料的复合结构件得到了越来越广泛的关注。然而,钛、铝之间存在的熔点和热膨胀系数等物理特性差异较大、互溶度小,且易产生大量脆性金属间化合物等问题,对二者之间的焊接造成巨大困难。

目前,焊接钛/铝的主要方法为真空钎焊、扩散焊、搅拌摩擦焊及激光熔钎焊。Takemoto等<sup>[5-6]</sup>在纯铝中加入合金元素,研究了金属间化合物成分和厚度的影响。结果表明,钛因化学性质活泼,可以与除银外的任何金属形成硬而脆的金属间化合物,从而使得配置钎料存在很大困难。之后,美国金属协会<sup>[7]</sup>采用在钛上热浸镀铝的方法,使用一般钎料的方法连接钛/铝。李亚江等<sup>[8]</sup>则采用在钛合金表面渗铝及添加铝箔中间层的方法,对TiAl<sub>2</sub>和工业纯铝进行了真空扩散焊。白建红等<sup>[9]</sup>研究了TC4钛合金与LS纯铝的搅拌摩擦焊及其焊后热处理工

艺,结果表明,焊合区无金属间化合物生成,接头强度基本相当于铝母材,经焊后回火处理,接头两侧主要金属元素扩散区宽度增加。以上方法虽然都有效地实现了钛/铝异种金属的连接,但其都具有一定的局限性,如真空钎焊需要真空环境,焊件尺寸受限;扩散焊对工件表面处理要求高,且需要时间较长,难以满足工业高效生产要求;搅拌摩擦焊对接头形式及装配要求严苛等。激光焊接因具有效率高、灵活性强、能量控制精确等特点,近年来已发展为连接异种金属的有效方法<sup>[10-15]</sup>。陈树海等<sup>[16]</sup>通过激光填丝熔钎焊的方法实现了钛/铝连接,但由于钛合金母材过量熔化,导致大量弥散分布的固态金属间化合物在液态金属中生成,促使液态金属黏度增大,气孔直径增加。激光点焊作为一种点焊方式,具有速度快、精度高及变形小等特点,但点焊接头的强度随焊接工艺参数的变化波动较大,极易影响焊接效果。

本文采用激光点焊连接5052铝合金和TC4钛合金,主要考察了不同离焦量及激光功率对接头形貌和性能的影响。

## 2 实验材料及方法

实验所采用材料为5052铝合金和TC4钛合金,焊件尺寸分别为50 mm×10 mm×1.5 mm和50 mm×10 mm×1 mm,其化学成分质量分数分别如表1和表2所示。焊前用丙酮擦拭母材表面去除油污等杂质,钛合金进行酸洗,铝合金依次进行碱洗和酸洗后吹干。

表1 5052铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 5052 aluminum alloy (mass fraction, %)

Composition	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Al
Content	0.25	0.10	2.20~2.80	0.10	0.10	0.15-0.35	0.40	Bal.

表2 TC4钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of TC4 titanium alloy (mass fraction, %)

Composition	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti	Others
Content	5.50-6.80	3.50-4.50	0.30	0.10	0.05	0.01	0.20	Bal.	0.50

钛/铝异种材料的激光点焊过程如图1所示。采用光纤激光器(TLR-6000, IPG公司, 德国), 激光波长为1070 nm, 最大输出功率为6000 W, 聚焦光斑直径为0.2 mm。焊接时激光垂直作用于工件表面, 采用氩气进行45°侧吹保护, 以避免熔池的氧化; 接头形式为工程中常见的搭接接头。由于铝板对激光的反射率较高, 且熔点(660 °C)较低, 故将铝合金作为下板, 钛板作为上板, 使钛合金接受激光辐照并将热量传递给下板, 促使铝合金熔化与钛接触进

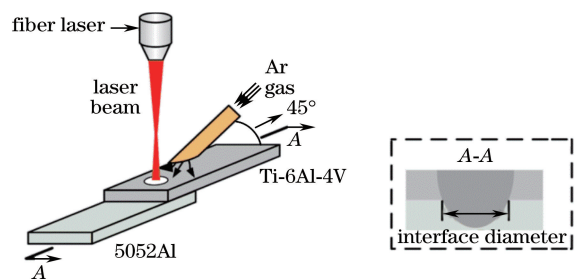


图1 铝/钛异种材料激光点焊过程示意图

Fig. 1 Schematic of laser spot welding process of Al/Ti

行充分反应。为了获得尺寸大小合适、成形良好的接头,必须对焊接过程中的热输入进行精确控制。实验过程主要改变的焊接工艺参数为离焦距和激光功率,具体参数如表 3 所示。焊后采用金相显微镜(OM)、

表 3 实验采用的工艺参数

Table 3 Welding parameters adopted in the experiment

Defocusing distance /mm	Laser power /W	Welding time /s	Flow rate of shielding gas /( $L \cdot \min^{-1}$ )	Gas blow angle /( $^{\circ}$ )
0	1200-2300	1	15	45
+20	2000-3500	1	15	45
+30	3100-3700	1	15	45
+40	3300-3900	1	15	45
+50	3300-4900	1	15	45

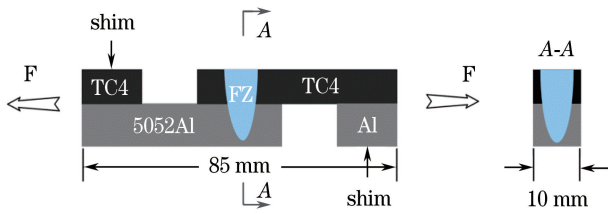


图 2 拉伸试件示意图

Fig. 2 Specimen for tensile-shear test

### 3 结果与讨论

#### 3.1 宏观成形及截面形貌

表 4 为不同焊接参数条件下获得的钛/铝激光点焊焊点宏观成形。依据下板铝合金的熔化情况,将实验所得结果分为热输入不足、热输入适量、热输入过大等情况。观察形貌可知,在同一离焦距下,当热输入不足时,虽然钛合金熔化,但铝合金熔化量少,二者连接不充分;随着激光功率增加,焊点表面形貌更加均匀平滑,铝合金熔化量明显增加;当热输入过大时,接头处出现严重下塌,甚至焊穿。通过纵向比较发现,随离焦距增加,获得最佳表面成形所需激光功率也会增大。

图 3 为表 4 中接头所对应的焊缝横截面形貌。由图 3 可知,当激光束在钛母材表面聚焦时,由于激光能量密度高,即使采用较小功率,上板钛合金仍然与熔化的铝合金反应,生成一定面积的熔合区;但在钛/铝连接界面处,铝合金内出现了缩孔缺陷[图 3(a)],这是由于熔池中的热量通过热传导到达铝合金母材处使母材熔化,并在重力及表面张力的作用下向下流动,使得熔化的铝合金母材无法填充孔隙,

扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)等手段对接头的宏观成形、组织形貌及成分进行观察和分析,并在室温下使用万能材料实验机对接头强度进行测试,拉伸速率为 1 mm/min,接头拉伸件示意图如图 2 所示。

因而形成缩孔。当采用 1500 W 及 2000 W 激光功率时[图 3(b)~(c)],界面温度升高使得铝合金熔化量增加,流动性增强,在表面张力的作用下向焊缝流淌,凝固后焊缝下塌严重,焊点周围出现大量间隙;同时,铝合金的大烧损蒸发会加剧焊接过程的不稳定性,在熔合区残留许多气孔,而钛铝之间的剧烈反应会生成大量脆性金属间化合物,致使接头处应力增加,产生大量裂纹,降低接头的承载能力。

当增加离焦距至 +20 mm,使用 2300 W 及 2900 W 激光功率时,观察焊缝横截面发现,钛合金表面出现波浪形貌,钛/铝界面比较清晰,而下板铝合金出现大面积收缩,说明钛合金上表面在激光辐照作用下发生微熔,铝合金在热传递作用下熔化,从而在焊接过程中形成了两个互不接触的熔池,表明在较低功率时,上部钛合金和下部铝合金分别形成了两个互不接触的熔池。陈树海等<sup>[15]</sup>采用 TIG 熔钎焊接钢/铝异种金属时,也发现了双熔池现象。通过双熔池避免两种金属液相的直接混合,来控制金属间化合物的生成。在图 3(g)和图 3(j)中,双熔池下部的铝板出现收缩,这是由于激光功率较低时,熔化区面积较小,熔池中的液体难以附着在未融化铝合金母材上,发生脱落,因而导致缩孔产生。随着进一步增大激光功率,焊缝中气孔和裂纹缺陷明显增多。当采用 +50 mm 离焦距,4700 W 激光功率时,部分钛熔化并流入焊缝形成钉扎状结构,此时没有观察到明显缺陷,如图 3(k)所示。而当采用更大的激光功率时,出现焊穿现象,如图 3(i)所示。纵向比较发现,在不同的离焦距下,焊缝横截面形貌大体均呈现由双熔池到钉扎状焊缝的变化趋势。

表 4 表不同焊接参数下钛/铝激光点焊接头表面成形

Table 4 Joint appearances of Ti/Al laser spot welding joints with different welding parameters

Defocusing Distance /mm	Insufficient heat input	Appropriate heat input	Excessive heat input
0			
+20			
+40			
+50			

3.2 显微组织形貌及分析

从图 3 可以看出,不同焊接参数下出现两种典型焊缝横截面:1) 存在双熔池时,钛/铝界面熔钎焊

形成连接;2) 钛大量熔化,两种金属液相反应与熔钎焊共同作用形成冶金连接。为了进一步探究功率对界面反应的影响,选取+50 mm 离焦量,3700 W

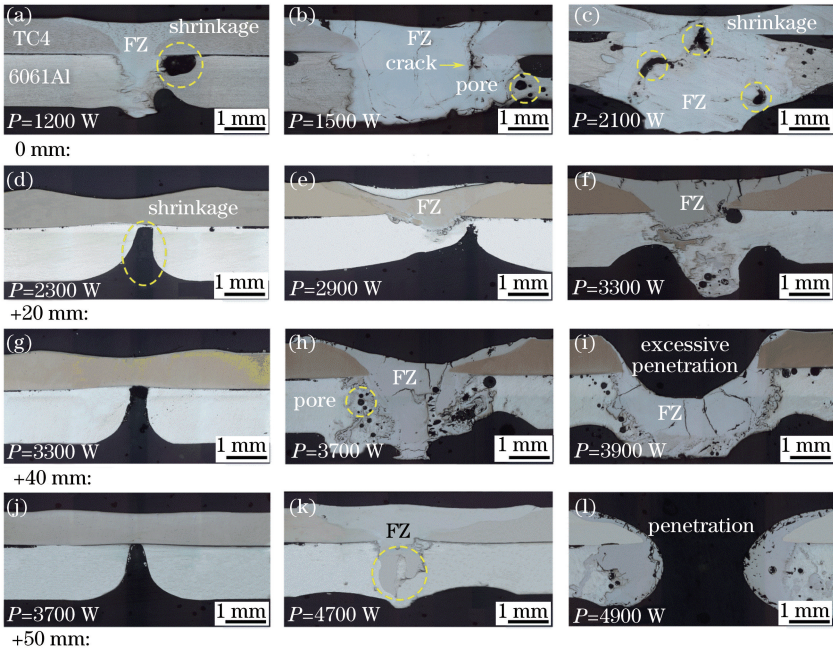


图 3 不同离焦量及功率条件下钛/铝激光点焊接头横截面。(a) 0 mm,1200 W;(b) 0 mm,1500 W;(c) 0 mm,2100 W;(d) +20 mm,2300 W;(e) +20 mm,2900 W;(f) +20 mm,3300 W;(g) +40 mm,3300 W;(h) +40 mm,3700 W;(i) +40 mm,3900 W;(j) +50 mm,3700 W;(k) +50 mm,4700 W;(l) +50 mm,4900 W

Fig. 3 Cross sections of Ti /Al laser spot welding joints with different defocusing distance and power. (a) 0 mm, 1200 W; (b) 0 mm, 1500 W; (c) 0 mm, 2100 W; (d) +20 mm, 2300 W; (e) +20 mm, 2900 W; (f) +20 mm, 3300 W; (g) +40 mm, 3300 W; (h) +40 mm, 3700 W; (i) +40 mm, 3900 W; (j) +50 mm, 3700 W; (k) +50 mm, 4700 W; (l) +50 mm, 4900 W

和 4700 W 激光功率下获得的典型接头截面进行微观组织分析。图 4(b)为采用 3700 W 激光功率时界面[图 4(a)]微观组织形貌。从局部放大图中可以看出,接头界面反应良好,形成了一层呈锯齿状、厚度约为 2 μm 的金属间化合物层,同时观察到具有规则形状的第二相弥散分布在靠近界面的铝合金一侧。随着激光功率增大到 4700 W,上板钛合金大量熔化[图 4(c)],部分流进焊缝,边缘处与液相铝合金充分反应形成明显分层的钉扎状结构[图 4(f)],而从图 4(d)可以观察到,熔合区周围钛/铝仍以钎

焊连接方式为主,界面处反应层厚度增加到 5 μm 左右,铝侧第二相数量增多,尺寸增大并呈针状分布。为了鉴定各反应物的组成,对图 4 中各点进行能谱分析,结果如表 5 所示。 $P_1$ 、 $P_2$  点的 EDS 结果表明,界面处反应层与铝合金侧针状二相为  $TiAl_3$ 。 $P_3$  原子数比例分别为 11.62% Al、87.68% Ti、0.7% V,认定为 Ti(Al)固溶体  $\alpha$ -Ti,成分与钛母材一致,说明该处钎扎状结构为熔化钛流入铝中形成,并未大量扩散,但在边缘处发生了钛铝相互反应,生成了近钛侧的  $TiAl_2$ ( $P_4$  点)和近铝侧的  $TiAl_3$ ( $P_5$  点)。

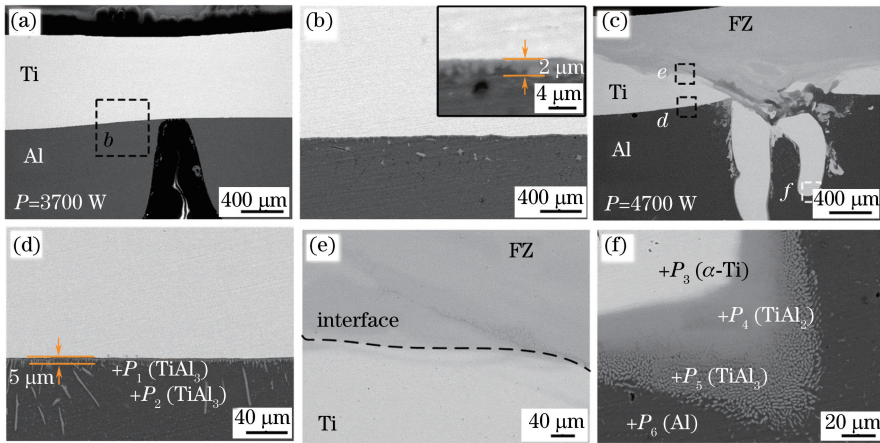


图 4 不同功率下的钛/铝界面组织形貌。(a) 3700 W 界面宏观形貌;(b)区域 B;(c) 4700 W 界面宏观形貌;(d)区域 D;(e)区域 E;(f)区域 F

Fig. 4 Interfacial morphologies of Ti/Al with different laser powers. (a) Interfacial macro-morphology with laser power of 3700 W; (b) zone B; (c) interfacial macro-morphology with laser power of 4700 W; (d) zone D; (e) zone E; (f) zone F

表 5 图 4 中各点能谱分析

Table 5 EDS analysis result of the point shown in Fig. 4

Zone	Composition /%				Possible phase
	Al	Mg	Ti	V	
$P_1$	77.43	0.96	20.87	0.74	$TiAl_3$
$P_2$	76.15	1.44	21.98	0.43	$TiAl_3$
$P_3$	11.62	—	87.68	0.70	$\alpha$ -Ti
$P_4$	65.47	0.96	33.37	0.20	$TiAl_2$
$P_5$	76.84	1.44	21.22	0.50	$TiAl_3$
$P_6$	97.86	2.14	—	—	Al

### 3.3 接头的力学性能

图 5 为不同离焦量下接头的抗拉剪强度随激光功率的变化曲线。接头的强度受结合面积、接头缺陷及金属间化合物分布状态的综合影响,当采用 0、+20 和 +40 mm 离焦量时,接头强度随激光功率的变化均呈现先增大后减小的趋势。在不同离焦量下,当功率较小时,热输入不足,界面结合尺寸小,同时出现了缩孔缺陷,降低了接头强度;随着功率的增大,界面结合尺寸增大,但脆性金属间化合物尺寸也随之增长,使接头中出现大量裂纹,并且在表面张力

和铝合金烧损蒸发的影响下,接头中出现了下榻和气孔等缺陷,限制了接头的承载能力。而当离焦量增加到 +50 mm 时,断裂载荷随功率的变化出现两个峰值,结合对显微组织(图 4)的界面组织演变示意图(图 6)进行解释。如图 6(a)所示,当激光功率较小时,界面钛/铝反应程度较弱, $TiAl_3$  金属间化合物层较薄,致使钛/铝接头强度较低;随着激光功率的增加,界面反应程度加强, $TiAl_3$  金属间化合物层厚度增加并呈锯齿状分布[图 6(b)],虽然  $TiAl_3$  金属间化合物硬度高、脆性大,但相邻锯齿状结构之

间为塑性韧性较好的铝合金,可以释放加热冷却过程中产生的残余应力,因此,连续均匀分布的  $TiAl_3$  金属间化合物反应层能够有效阻碍裂纹扩展,增强界面连接,提高接头强度;界面处  $TiAl_3$  金属间化合物反应层厚度随激光功率的进一步增大而增加[图 6(c)]. 一般来说,反应层过厚会产生大量残余应力,导致焊后产生许多裂纹,因此,需要控制金属间化合物层的厚度;金属间化合物之间韧性较差,拉伸实验中很容易萌生裂纹并沿此开裂,因此,过厚的  $TiAl_3$  金属间化合物反应层会减小接头的承载能力。当激光功率增大到 4700 W 时,接头最大断裂

载荷达到最大值 3571 N,这是由于上板钛合金大量熔化,一方面会形成钉扎状结构,机械性增强接头连接强度;另一方面,液相钛合金与液相铝合金之间反应相对固相钛合金与液相铝合金之间更加剧烈,冶金反应增强,如图 6(d) 所示。但当激光功率超过 4700 W 时,铝合金的过度烧损蒸发,接头的严重下塌均会导致接头强度的下降。而纵向比较发现,当离焦量小于 +50 mm 时[图 5(a)~(c)],由于焊缝中存在的裂纹气孔缺陷相对采用大离焦量(+50 mm)获得的接头焊缝缺陷多,力学性能的提升有限,接头最大断裂载荷不足 3000 N。

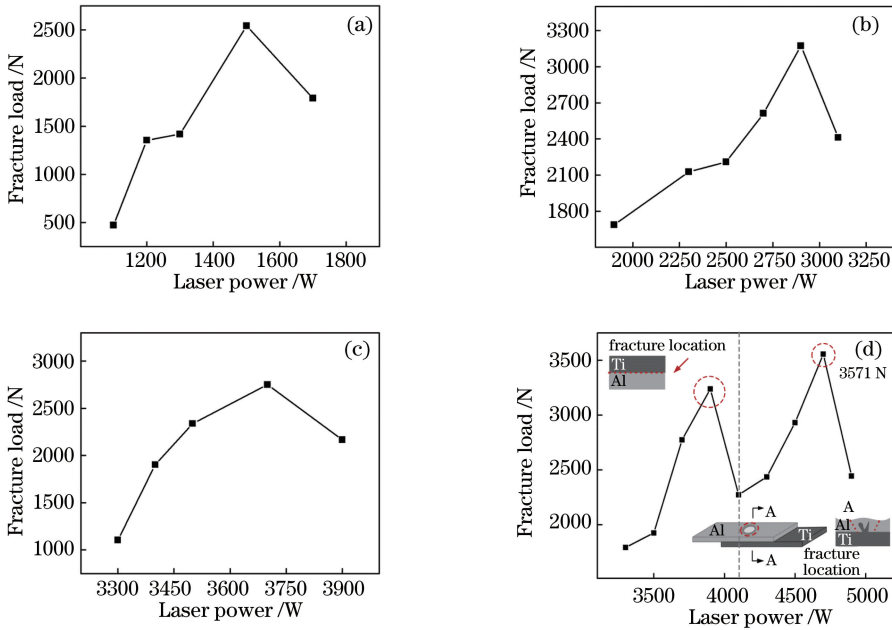


图 5 不同离焦量下条件下功率和接头性能之间关系。(a) 0 mm; (b) +20 mm; (c) +40 mm; (d) +50 mm  
Fig. 5 Relationship between laser power and tensile-shear force with various defocusing distance.

(a) 0 mm; (b) +20 mm; (c) +40 mm; (d) +50 mm

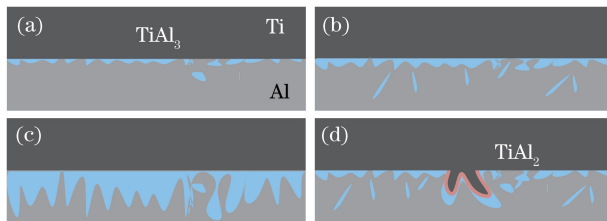


图 6 不同激光功率下钛/铝界面组织演变示意图。(a) 3300 W; (b) 3700 W; (c) 4500 W; (d) 4700 W  
Fig. 6 Schematic of microstructure evolution on the Ti/Al interface with different laser powers.

(a) 3300 W; (b) 3700 W; (c) 4500 W; (d) 4700 W

拉伸实验后获得两种断裂路径:1) 当激光功率较小时,沿钛/铝界面断裂,如图 7(a) 所示;2) 当熔合区形成钉扎状结构时,铝合金沿焊点周围呈纽扣式断裂,如图 7(d) 所示。图 7 为 +50 mm 离焦量下,激光功率分别为 3700 W 和 4700 W、力学性能

为两个峰值时获得的两种典型的断裂路径和断口 SEM 图像,图中相应位置的成分分析测试结果如表 6 所示。在激光功率为 3700 W 时,接头断裂在钛/铝界面处,断口表面局部光滑,局部残留焊缝金属。当接头断裂在界面处时,裂缝沿着两板间隙拓展到

熔化区,断口断裂形式为准解理断裂,在 Al 侧和 Ti 侧的激光直接辐照区可以观察到大量撕裂棱。如图 7(c)所示,放大界面光滑区域可观察到大量细小颗粒。EDS 能谱结果显示, $P_2$  区域主要成分为 Al 和 Ti,原子含量分别为 75.71%和 22.15%,可判定这些颗粒为  $TiAl_3$  相,与图 4(b)界面处反应层的观察结

果一致。随着激光功率的增加,接头断裂在近焊缝处,断口表面可以观察到较多的韧窝和阶梯状撕裂棱[图 7(e)],表现为韧性断裂。能谱结果显示,其主要成分为铝,进一步证实由钛熔化形成的钉扎状结构有利于增强接头强度。

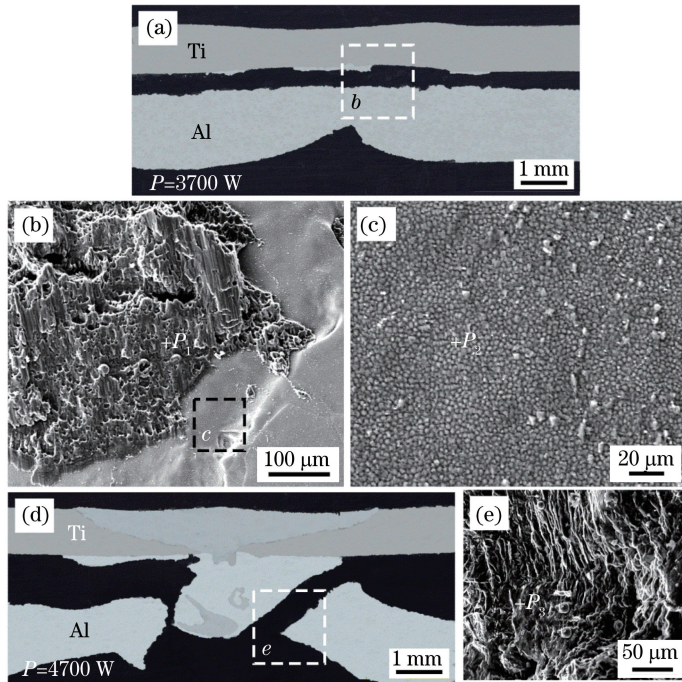


图 7 不同功率下接头断裂路径及断口形貌。(a) 3700 W;(b)区域 B;(c)区域 C;(d) 4700 W;(e)区域 E

Fig. 7 Fracture location and fracture surface with different laser powers. (a) 3700 W; (b) zone B; (c) zone C; (d) 4700 W; (e) zone E

表 6 图 7 中各点能谱分析结果

Table 6 EDS analysis results of the point shown in Fig. 7

Zone	Composition /%					Possible phase
	Al	Mg	Ti	V		
$P_1$	96.52	3.48	—	—		Al
$P_2$	75.71	1.42	22.15	0.73		$TiAl_3$
$P_3$	87.77	9.52	2.72	—		Al

## 4 结 论

采用相同离焦量、低功率时,钛/铝接头在焊接过程中会形成双熔池,焊后下部铝合金出现缩孔现象,并残留大量气孔,有裂纹产生;增大激光功率,钛熔化量增加,液相钛流入焊缝形成钉扎状结构;进一步增加激光功率,钛/铝接头出现下塌甚至烧穿现象。纵向比较表明,随离焦量的增加,获得良好成形焊点所需要的激光功率也增大。

采用相同离焦量时,随激光功率的增加,钛/铝界面  $TiAl_3$  金属间化合物层厚度增加,铝合金侧针

状  $TiAl_3$  金属间化合物数量增多,体积增大;当钛大量熔化形成焊缝钉扎状结构时,钉扎状结构边缘钛铝之间相互扩散反应,生成近钛侧的  $TiAl_2$  和近铝侧的  $TiAl_3$ 。

当离焦量小于+50 mm 时,接头强度随着激光功率的增大呈先增大后减小的趋势,最大断裂载荷不足 3000 N;当采用+50 mm 离焦量时,接头强度随激光功率的变化曲线出现两个峰值,最大断裂载荷达到 3571 N。因此,焊接过程中最好采用较大离焦量,并保证足够的热输入,以确保钛合金熔化及钛铝之间的充分反应,从而提高接头强度。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Z X, Liu K. Technical guide for welding of heterogeneous metals [M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 11-18.  
刘中青, 刘凯. 异种金属焊接技术指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 11-18.
- [2] Xu C, Sheng G M, Cao X Z, *et al.* Evolution of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of ultrasonic assisted welded-brazed Mg/Ti joint[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(12): 1253-1259.
- [3] Chen Y L. Application of aluminum alloys to aircraft [J]. Nonferrous Metals Processing, 2003, 32(2): 11-14, 17.  
陈亚莉. 铝合金在航空领域中的应用[J]. 有色金属加工, 2003, 32(2): 11-14, 17.
- [4] Li Y, Liu N, Huang J K, *et al.* Research status of improving the aluminum steel welded joint mechanical properties[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(2): 102-106.  
李妍, 刘宁, 黄健康, 等. 提高铝钢焊接接头力学性能的研究现状[J]. 电焊机, 2017, 47(2): 102-106.
- [5] Takemoto T, Okamoto I. Intermetallic compounds formed during brazing of titanium with aluminium filler metals[J]. Journal of Materials Science, 1988, 23(4): 1301-1308.
- [6] Takemoto T, Nakamura H, Okamoto I. Vacuum brazing of aluminum/titanium joints with aluminum filler metals[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1986, 36(9): 548-554.
- [7] American Society for Metals. Metal handbook. The 6<sup>th</sup> volume: welding and brazing[M]. 8<sup>th</sup> ed. Beijing: China Machine Press, 1984: 144-158.  
美国金属协会. 金属手册. 第六卷: 焊接与钎焊[M]. 8版. 北京: 机械工业出版社, 1984: 144-158.
- [8] Li Y J, Gerasimov S A, Wang J, *et al.* A study of vacuum diffusion bonding and interface structure of Ti/Al dissimilar materials[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(2): 206-210.  
李亚江, Gerasimov S A, 王娟, 等. Ti/Al异种材料真空扩扩散焊及界面结构研究[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(2): 206-210.
- [9] Bai J H, Fu L, Du S G. Friction welding technology between titanium alloy and pure aluminum [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(11): 50-52.  
白建红, 傅莉, 杜随更. 钛合金/纯铝异种金属摩擦焊接工艺[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 50-52.
- [10] Yu G, Zhao S S, Zhang Y J, *et al.* Research on key issue of laser welding of dissimilar metal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 261-268.  
虞钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261-268.
- [11] Wang T, Zhou D W, Peng Y, *et al.* Steel-to-aluminum fiber laser butt welding with Si powder pre-filling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 303009.  
王涛, 周怙武, 彭艳, 等. 钢/铝异种金属预置 Si 粉的光纤激光焊接[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 303009.
- [12] Tan Z, Liu J S, Zhou D W, *et al.* Microstructure analysis on laser welding joint of steel/magnesium dissimilar metal with the addition of Sn foil [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1206003.  
谭哲, 刘金水, 周怙武, 等. 钢/镁异种金属搭接添加 Sn 箔激光熔焊接头的微观组织分析[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1206003.
- [13] Tan C W, Gong X T, Li L Q, *et al.* Laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals Mg/Ti with Al interlayers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 103002.  
檀财旺, 巩向涛, 李俐群, 等. 镁/钛异种金属预置 Al 夹层光纤激光熔钎焊接特性[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 103002.
- [14] Shi Y, Zhang H, Takehiro W, *et al.* CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 1132-1137.  
石岩, 张宏, 渡部武弘, 等. 连续脉冲双激光束焊接钢铝合金[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1132-1137.
- [15] Chen S H, Ma K, Huang J H, *et al.* Microstructure and mechanical property of joint by TIG welding-brazing with dual weld pools for steel/aluminum dissimilar metals [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(12): 3076-3081.  
陈树海, 马柯, 黄继华, 等. 钢/铝异种金属双熔池 TIG 熔钎焊接头的显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(12): 3076-3081.
- [16] Chen S H, Li L Q, Chen Y B. Formation mechanism of porosity in laser welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(1): 32-36.  
陈树海, 李俐群, 陈彦宾. Ti/Al 异种合金激光熔钎焊过程气孔形成机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(1): 32-36.