



激光毛化6061铝合金与聚醚醚酮的 搅拌摩擦搭接焊工艺及其接头性能

许嘉焯, 李红军

(浙江理工大学 机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 本研究使用激光毛化技术对铝合金进行表面处理, 通过摩擦搭接焊实现了与6061/聚醚醚酮(PEEK)的高质量连接。采用正交试验研究了旋转速度、焊接速度和下压量对接头拉伸剪切性能的影响, 确定了最佳工艺参数, 并通过观察接头界面微观形貌阐述了连接机理。结果表明: 对于焊接工艺, 旋转速度对焊接接头质量的影响最为显著, 其次是焊接速度, 下压量对铝合金的影响相对较小; 确定了最佳工艺参数组合, 即旋转速度为1000 r/min、焊接速度为70 mm/min、下压量为0.2 mm。在此工艺参数下, 进行拉伸试验, 接头的拉伸剪切力和强度分别可达到3749.10 N和14.99 MPa, 接头在靠近PEEK端断裂, 表明激光毛化接头具有良好的界面强化能力。此外, 通过微观结构分析, 6061/PEEK连接不仅存在机械嵌合, 而且还存在化学键合作用, 生成了新化学键Al—O—C, 有助于提高接头强度。

关键词: 摩擦搭接焊; 6061/聚醚醚酮(PEEK)混合接头; 激光毛化; 正交试验设计; 连接机理

文章编号: 1004-0609(2024)-12-4046-10

中图分类号: TG453.9

引文格式: 许嘉焯, 李红军. 激光毛化6061铝合金与聚醚醚酮的搅拌摩擦搭接焊工艺及其接头性能[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(12): 4046-4055. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2024-44990

XU Jiahe, LI Hongjun. Friction stir lap welding process and joint properties of laser-textured 6061 aluminum alloy and PEEK[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(12): 4046 - 4055. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2024-44990

随着工业化进程的持续推进, 能源消耗与环境质量的问题日益成为全球关注的焦点。轻量化技术因其在减少能源使用、减轻环境负担方面的显著效果而受到重视。铝合金具有质量轻、比强度高、耐腐蚀、加工性能良好等众多显著优点^[1], 是工业领域的优选材料。聚醚醚酮(PEEK)因具有优异的振动阻尼^[2], 高抗冲击强度^[3]、断裂韧性^[4]、良好的焊接性能而受到广泛关注。实现两者的连接是一个重要研究方向, 可以充分发挥两者的优势, 在减轻结构质量的同时, 提高耐腐蚀、耐热、抗震等性能,

显著提高整体的安全性能^[5-6]。

由于铝合金和PEEK之间的热物理特性存在较大差异, 因此, 对其连接方式提出了很高的要求。金属与热塑性材料的传统材料连接方式有胶接^[7]和机械连接^[8]两种。然而均存在局限性, 胶接通常容易在高温下失效, 同时固化时间较长^[9]; 机械连接虽然结构稳定, 但会增加结构质量, 产生应力集中, 影响整体性能^[10]。为了解决传统连接带来的问题, 激光焊接^[11]、超声波焊接^[12]、热压连接^[13]、搅拌摩擦焊^[14]等新型连接方式得到了广泛使用。但有

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFE0106400)

收稿日期: 2024-05-21; 修订日期: 2024-10-22

通信作者: 李红军, 教授, 博士; 电话: 18968041257; E-mail: lihongjun@zstu.edu.cn

些方式也存在一些问题,对于激光焊接,连接区域较窄且产生过多材料热分解引起的气泡,影响焊接的质量^[15];对于超声波焊接,焊接部件存在尺寸限制,限制其在更广泛应用中的潜力;对于热压连接,难以完成大面积连接,制作时间长。而搅拌摩擦焊,通过下压和热量来实现连接,连接区域大,焊接效率高,残余应力小,是一种极具前景的连接方式。XU等^[16]通过摩擦焊技术将6061-T6和ABS实现了连接、ALHATTI等^[17]设计槽销工具摩擦连接了AA5052和聚丙烯(PP),NAGATSUKA等^[18]研究了各种铝合金板与聚酰胺6(PA6)摩擦搭接焊技术连接,NAGARAJAN等^[19]使用搅拌摩擦焊接技术成功连接了AA5052和聚碳酸酯(PC)。

由于铝合金和PEEK之间的连接强度较低,因此,有必要对金属进行喷砂^[20]、激光毛化^[21]、阳极氧化^[22]、硅烷偶联^[23]等表面处理。其中激光毛化,是一种有效的方式,通过激光束作用在金属材料表面形成微织构,大幅增加了表面粗糙度,在金属和热塑性材料连接领域广泛使用^[24-25]。目前,众多学者将激光毛化与摩擦焊技术相结合。HAN等^[26]通过改变激光扫描次数,实现铝合金和聚丙烯摩擦点焊。扫描10次时,拉伸剪切强度最大为29 MPa,接头效率达到100%。WANG等^[27]运用搅拌摩擦加工实现了AA6061和CFRP-PA66的搅拌摩擦搭接焊,最大拉剪强度达到24.48 MPa,与未预处理相比提高了约600%。JIANG等^[28]对AA5052进行激光加工预处理,通过摩擦焊技术与CFRP进行连接,最大拉伸剪切力和强度分别达到了4.06 kN和18.04 MPa,相比于未处理的样品提高了72%。LIU等^[29]采用摩擦搭接焊技术研究了激光毛化参数变化对Al/CFRP高强度连接的影响,剪切强度最大可达25.5 MPa。这些学者都只在于研究简单竖线、交叉排列的毛化沟槽,由于铝合金激光毛化沟槽存在各向异性,而无序毛化可以使其具有各向同性特点,

即在一定微小区域内,激光作用在随机点位上,若干个微小区域组成一个大区域,使得整个合金表现出无序排列特征。然而,有关无序排列的毛化凹坑尚未见研究报道。

本文旨在对6061-T6铝合金板进行表面激光毛化处理,以形成无序排列的微米级凹坑。通过摩擦搭接焊技术,对铝合金施加机械压力,过程中产生的热量通过热传导使界面处PEEK软化融入微织构,从而实现连接。并研究了无序毛化凹坑对材料连接效果的影响,深入探究焊具旋转速度、焊接速度以及下压量工艺参数对连接强度的影响,阐述连接机理。

1 实验

1.1 实验材料

选择广泛使用的PEEK,耐腐蚀性能好、加工性能好的6061-T6铝合金。选用PEEK尺寸为150 mm×80 mm×3 mm,铝合金尺寸为150 mm×80 mm×1.5 mm。6061-T6铝合金的化学成分如表1所示,PEEK和6061-T6性能参数如表2所示。

表1 6061-T6 铝合金化学成分

Table 1 Chemical Composition of 6061-T6 Aluminum Alloy (mass fraction, %)

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
1.2	0.51	0.45	0.24	0.12	0.37	Bal.

1.2 激光毛化

采用激光系统对铝合金板表面进行激光毛化,激光毛化加工系统由纳秒激光器、控制系统、扫描系统、侧吹装置以及三维运动加工平台组成,如图1所示。本文通过激光毛化制备形貌,激光器输出脉冲在透镜、扫描系统的作用下聚焦在试样表面,辅助气体氩气通过侧吹装置对加工试样表面进行吹气,通过控制系统调节激光器和三维运动加工

表2 6061-T6和PEEK性能参数

Table 2 Performance parameters of 6061-T6 and PEEK

Material	Density/ (g·cm ⁻³)	Elastic modulus/GPa	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	Decomposition temperature/°C
6061-T6	2.73	68.9	275	310	12-17	600-650
PEEK	1.3	4.1	100	98	20	343

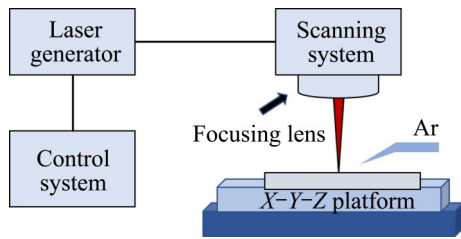


图1 激光毛化加工系统

Fig. 1 Laser texturing processing system

表3 纳秒激光毛化工艺所用激光器的主要参数

Table 3 Main parameters of laser used for nanosecond laser texturing process

Process parameter	Value
Laser power/W	70
Wavelength/nm	1064
Pulse duration/ns	100
Frequency/kHz	30

平台。激光毛化加工工艺所用激光器的主要参数如表3所示。在激光毛化处理后，试样在酒精中超声清洗15 min，随后在清水中清洗15 min，以去除表面杂质。

1.3 摩擦搭接焊

试验采用摩擦搭接焊形式进行焊接，搅拌头采用无针搅拌头，轴肩直径为20 mm，所用的材料为H13钢。试验时以铝合金为上板，PEEK为下板作为搭接接头，材料两侧通过垫片和夹具进行加固夹紧，如图2所示，搭接区域激光毛化尺寸为100 mm×10 mm。在摩擦搭接焊PEEK与激光毛化处理后的试样过程中，高速旋转的焊接工具下压进入焊接位置。焊接工具与铝合金摩擦产生热量，通过传递到达焊接界面。在压力和热量的作用下，熔融的PEEK进入界面毛化凹坑处。当焊接工具移

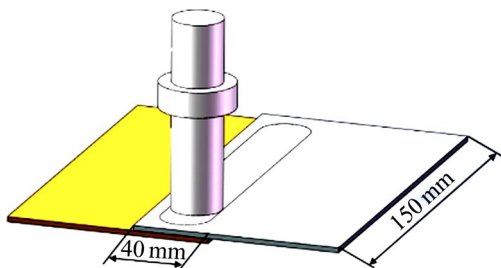


图2 6061/PEEK接头的制备工艺

Fig. 2 Preparation process of 6061/PEEK joint

动出焊接位置时，界面温度下降，PEEK固化与6061铝合金形成6061/PEEK混合连接接头。经过前期的初步试验，选择焊接工艺参数为：旋转速度800 r/min、1000 r/min、1200 r/min，焊接速度70 mm/min、80 mm/min、90 mm/min，下压量0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm。本文采用正交试验法，进行三因素三水平实验设计，因素水平表如表4所示，对实验参数进行合理组合，在保证实验结果可靠性的同时，减少实验次数。

表4 因素水平表

Table 4 Factor levels table

Factor level	Rotation speed, A/(r·min ⁻¹)	Welding speed, B/(mm·min ⁻¹)	Plunge depth, C/mm
1	800	70	0.1
2	1 000	80	0.2
3	1 200	90	0.3

1.4 力学性能测试

焊接试验完成后，将连接两种材料的接头剪力作为接头的性能评定指标，使用微机控制电子式万能试验机(WDW-500)对三个连接试样在相同情况下的室温进行拉伸剪切试验，在试样两端添加垫片，如图3所示。每组试验在焊缝纵向切取三个试样，在材料两端放置与材料厚度相同的垫片，以确保在试验过程中连接构件水平共线。拉剪速度保持在0.5 mm/min，为增加试验准确性，减少误差，每种试验至少测量3次，取平均值作为该工艺参数下的拉伸剪切力并计算误差。通过式(1)计算拉伸剪切强度。

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中： F 为拉伸剪切过程中获得的最大拉伸力； S 为拉伸试验时搭接区域面积； τ 为所求的拉伸剪切强度。

1.5 组织结构观察

采用形状测量激光显微系统(KEYENCE VK-X100)对铝合金激光毛化表面进行三维形貌观察和粗糙度测量。采用光学显微镜(OM)对连接界面的宏观结构和形貌进行观察。使用场发射扫描电子显

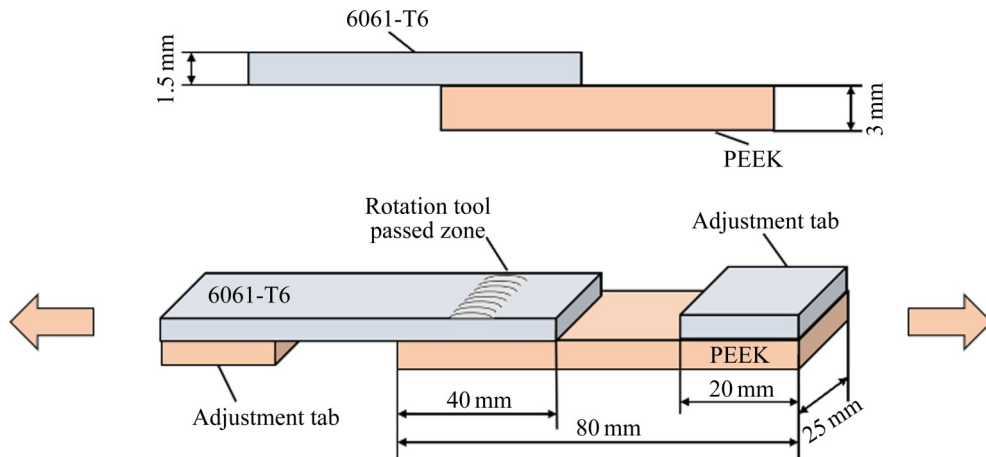


图3 6061/PEEK摩擦焊连接接头拉伸剪切试样

Fig. 3 Tensile-shear specimen of 6061/PEEK friction welded joint

显微镜(SEM)及其装配的能谱仪(EDS)对连接界面进行观察和元素分布分析, 借助X射线光电子能谱仪(XPS)对界面化学键的种类进行表征。

2 结果与讨论

2.1 铝合金激光毛化表面形貌

未经处理的铝合金表面相对光滑, 不存在凹坑, 如图4(a)所示, 而图4(b)显示经过激光毛化处理后的表面出现了大量微小的凹坑。这些凹坑的深度约为 $190\ \mu\text{m}$, 在激光毛化过程中产生的汽化的铝和铝渣会堆积在凹坑周围, 形成微小的凸起。

表面粗糙度是衡量表面形貌的一个重要参数, 通常由 R_a 和 R_z 两个参数来描述。其中, R_a 代表表面粗糙度的平均值, R_z 代表最高峰和最低谷之间的平均值。未经处理的6061铝合金, 其 R_a 和 R_z 分别为 $2.94\ \mu\text{m}$ 和 $18.58\ \mu\text{m}$, 而经过激光毛化处理后形成凹坑表面的 R_a 和 R_z 值分别增加到了 $37.14\ \mu\text{m}$ 和 $151.76\ \mu\text{m}$, 这些数值是通过在表面上选取9个不同位置进行测量后得出的平均值, 以减少误差。相较于未处理的表面, 毛化表面的 R_a 和 R_z 分别提高了12.63和8.17倍。

2.2 焊缝宏观形貌

将未处理的铝合金与PEEK进行摩擦搭接焊试验, 发现两者不能连接, 在连接试验后立即分离。

经过激光毛化处理, 两者实现连接。图5所示为凹坑各组焊接试验参数下的焊接接头宏观形貌。观察发现, 经激光毛化处理后, 铝合金和PEEK都实现了良好的连接, 整体焊接效果较好, 飞边较少。

观察不同焊接工艺参数下得到的焊件, 发现在相同焊接速度下, 图5(a)的试验中搅拌头与材料接触摩擦产热较少, 使得铝合金表面粗糙。图5(b)和(c)的试验相对于图5(a)的下压力增加, 使得焊接过程中存在飞边, 且下压力越大, 飞边产生越多。观察不同旋转速度下焊接的各组焊件, 发现飞边产生与焊接旋转速度有关, 焊接旋转速度越大, 铝合金软化速度越大, 飞边越少, 焊接效果越好, 焊缝表面越光滑。在焊接过程中, 搅拌针逆时针运动, 在轴肩摩擦热的作用下, 铝合金发生软化在后退侧堆积, 焊接开始和结束处焊接相对不稳定, 金属软化程度较大, 飞边主要集中在焊缝后退侧开始和结束处。此外, 观察到在焊接工具的下压力的作用下, 熔化的PEEK溢出连接界面并在室温下凝固。较低的焊接速度增加了局部焊接热输入, 这可能导致熔融PEEK更多的溢出。

2.3 接头连接强度

本研究通过拉伸剪切实验获得载荷和位移之间关系, 分析接头连接质量。试样对应的摩擦搭接焊参数及力学性能如表5所示。对拉伸强度进行极差分析, 确定因素对试验影响的主次关系和最优参数

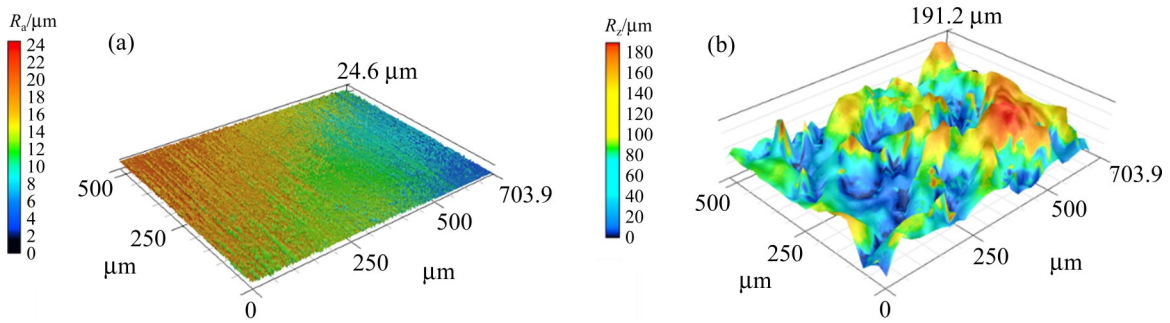


图4 6061 铝合金表面3D形貌

Fig. 4 3D morphologies of 6061 aluminum alloy surface: (a) Untreated; (b) Laser-textured

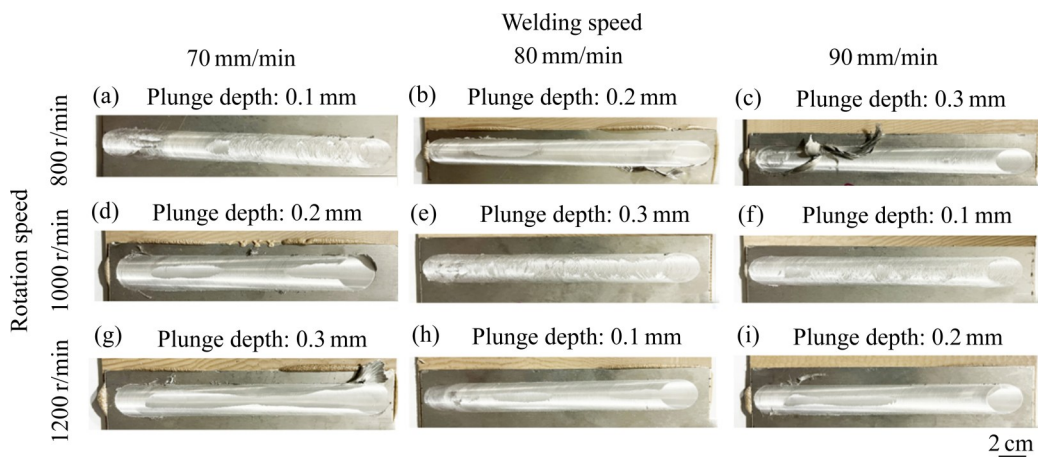


图5 通过正交实验制备的混合接头的宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphologies of hybrid joint prepared by orthogonal experiment

组合。结果表明, 旋转速度对焊接接头力学性能影响最为显著, 其次是焊接速度, 影响最小的是下压力。根据对比每一因素 k_1 、 k_2 、 k_3 值, 选择最大的 k 值为该因素的最优水平。由此获得最优参数组合A2B1C2, 即正交试验中的第四组工艺参数: 旋转速度 1000 r/min, 焊接速度 70 mm/min, 下压力 0.2 mm。在这个参数组合下, 焊接接头的拉伸剪切力和强度分别达到了最大值, 分别为 3749.10 N 和 14.99 MPa。

在拉伸剪切力的作用下, 焊接试样均在毛化边界 PEEK 处发生断裂现象, 其宏观形貌如图 6(a) 所示。主要由于在拉应力和剪切力的作用下, 焊缝激光毛化边缘位置存在应力集中, 导致该区域的应力超过材料的屈服强度。此外, 在焊接过程中, PEEK 受热使其强度性能降低, 在拉伸过程中导致 PEEK 处断裂。图 6(b) 所示为铝侧断口形貌微观形貌, 观察发现 PEEK 有部分黏附在铝合金上, 表明

接头的断裂存在内聚失效, 铝合金与 PEEK 形成了紧密的黏接, 连接界面具有较强的结合强度。

2.4 接头界面形貌及微观结构

借助高清工业电子显微镜观察焊接前铝板断面凹坑形貌和焊接接头界面形貌, 阐释激光毛化对连接强度的影响。激光毛化凹坑均匀分布在每组试样的各个区域, 选取激光毛化 6061/PEEK 连接接头局部区域的典型宏观界面形貌, 焊接前后形貌如图 7(a) 和 (b) 所示, 视野中毛化数量为 13 个, 且每个毛化凹坑形状尺寸相似, 高度在 190 μm 左右, 与三维形貌测量仪测得一致, 凹坑宽约 230 μm 。焊接前, 毛化凹坑表现略微封闭倾向的形貌。对比焊接前后形貌, 在焊接过程中, 观察发现凹坑发生塑性变形, 进一步加强趋向闭合的形式, 这使得熔融的 PEEK 完全填充凹坑并冷却凝固后, 与毛化凹坑产生强有力的机械嵌合形成界面紧密连接。

表 5 试验结果及分析

Table 5 Experimental results and analysis

Experiment No.	Rotation speed, A/(r·min ⁻¹)	Welding speed, B/(mm·min ⁻¹)	Plunge depth, C/mm	Tensile shear force/N	Tensile shear strength/MPa
1	800	70	0.1	3184.80	12.74
2	800	80	0.2	3255.20	13.02
3	800	90	0.3	3421.50	13.68
4	1000	70	0.2	3749.10	14.99
5	1000	80	0.3	3308.00	13.23
6	1000	90	0.1	3370.00	13.48
7	1200	70	0.3	3261.60	13.05
8	1200	80	0.1	3458.90	13.84
9	1200	90	0.2	3103.90	12.42
K_1	13.15	13.59	13.35		
K_2	13.90	13.36	13.48		
K_3	13.10	13.19	13.32		
Average value, k_1	4.38	4.53	4.45		
Average value, k_2	4.63	4.45	4.49		
Average value, k_3	4.37	4.40	4.44		
Range, R	0.26	0.13	0.05		
Factor priority		A>B>C			
Optimal solution		A2B1C2			

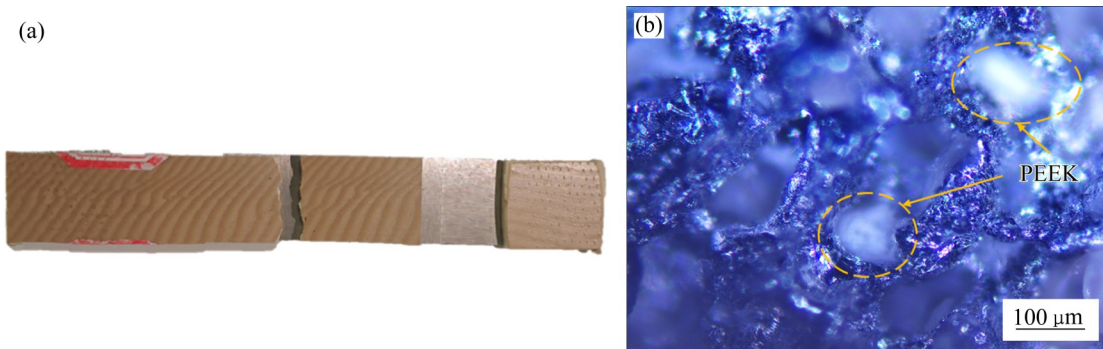


图 6 接头拉伸剪切断面形貌

Fig. 6 Tensile-shear fracture morphologies of joints surfaces: (a) Macroscopic; (b) Microscopic

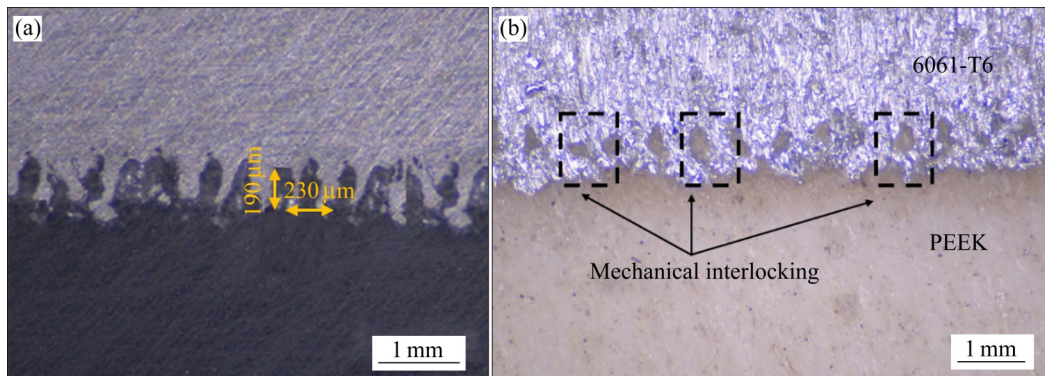


图 7 激光毛化处理后接头的界面形貌

Fig. 7 Interface morphologies of joints after laser texturing treatment: (a) Before welding; (b) Welded joint

在垂直于焊接方向进行切割制备金相试样。采用300#、800#、1500#三种砂纸,对试样焊缝截面进行粗、精磨,抛光。通过光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对抛光后的试样连接界面进行微观观察和分析,判断连接界面是否存在空隙和孔洞,如图8和图9(a)、(b)所示。选取最佳工艺参数下的焊接连接接头进行观察,发现6061/PEEK两者机械嵌合紧密,牢固结合,不存在空隙,只有少量孔洞、气泡。在焊接过程中,热量的效应导致凹坑表面的铝碎片被嵌入PEEK材料之中,形成了明显的铝合金团簇。

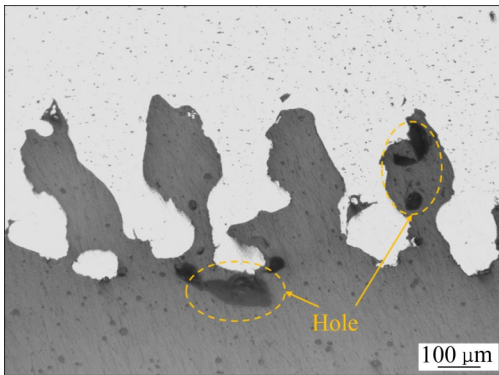


图8 激光织构6061/CFRP混合接头的典型OM像
Fig. 8 Typical OM image of laser-textured 6061/PEEK hybrid joint

金属与热塑性材料的连接界面结合机理分为机械嵌合和化学键合作用两部分。为确定铝合金和PEEK连接过程是否发生化学反应,使用EDS线扫描分析连接界面获得元素分布情况。扫描方向为图9(b)中箭头所指的方向,图9(c)为线扫描结果。由图9(b)和(c)可看出,铝合金和PEEK连接界面之间存在着元素过渡层,厚度为8 μm,表明在两者摩擦搭接焊过程中,界面元素发生了传递。推测Al、C、O元素在连接过程热量的作用下可能发生了化学反应。因此,在连接过程中,不仅有机机械嵌合的作用,还可能有化学键合的作用。

进一步研究连接界面是否生成新化学键,并对其进行分析。将各组焊接试样均进行检测,发现各组化学键的种类均相同。选取一组进行分析,根据图10全谱分析结果显示,在整个XPS元素谱中,C、O、Al元素均在该区域内存在,其中C、O元素来自PEEK,Al元素来自铝合金板,

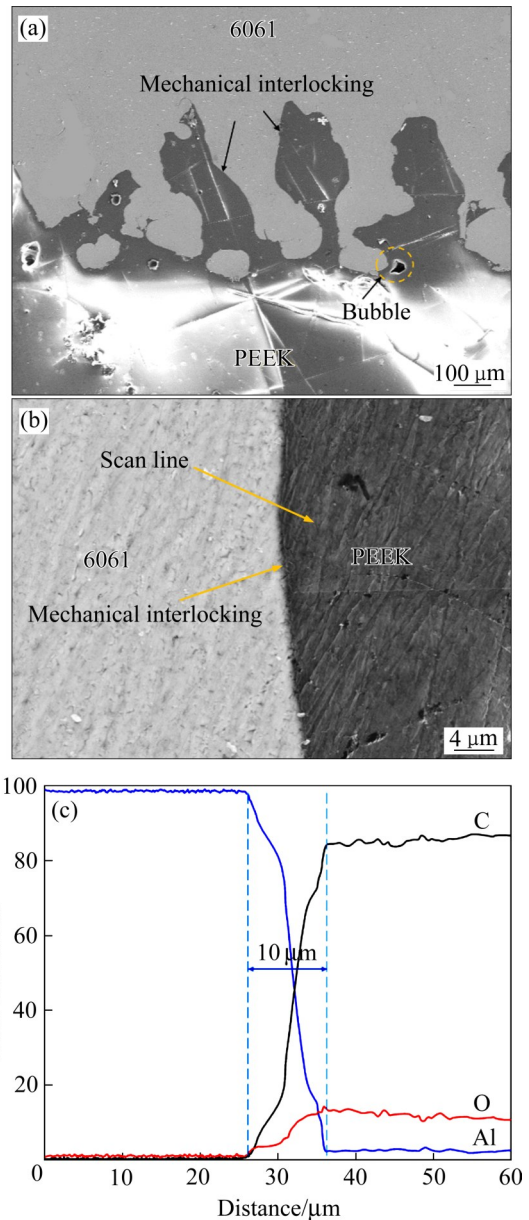


图9 不同工艺参数下6061/PEEK典型SEM像和EDS线扫描结果

Fig. 9 Typical SEM images and EDS line scan results of 6061/PEEK under different process parameters: (a) Bonding interface; (b) Local enlargement; (c) EDS line scan

这与EDS分析结果一致。图11显示了精细光谱结果,其中,图11(a)对应Al 2p轨道,图11(b)对应C 1s轨道。在图11(a)中,Al 2p轨道显示存在Al、Al₂O₃和Al—O—C化学键,它们的结合能分别为72.89 eV、74.79 eV和75.2 eV。仅凭借Al 2p轨道的分析无法精确判断连接界面是否生成新化学键,需要结合C 1s轨道进行综合分析。图11(b)中的结果显示,在结合能力为284 eV时,连接界面处也

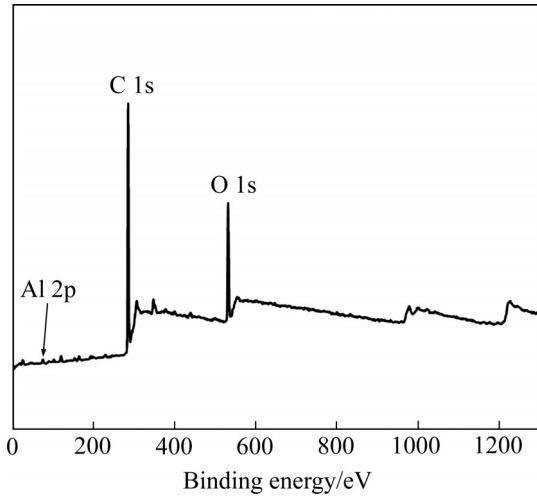


图 10 6061/PEEK 接头典型连接界面 XPS 全谱
Fig. 10 Typical XPS full spectrum of bonding interface of 6061/PEEK joint

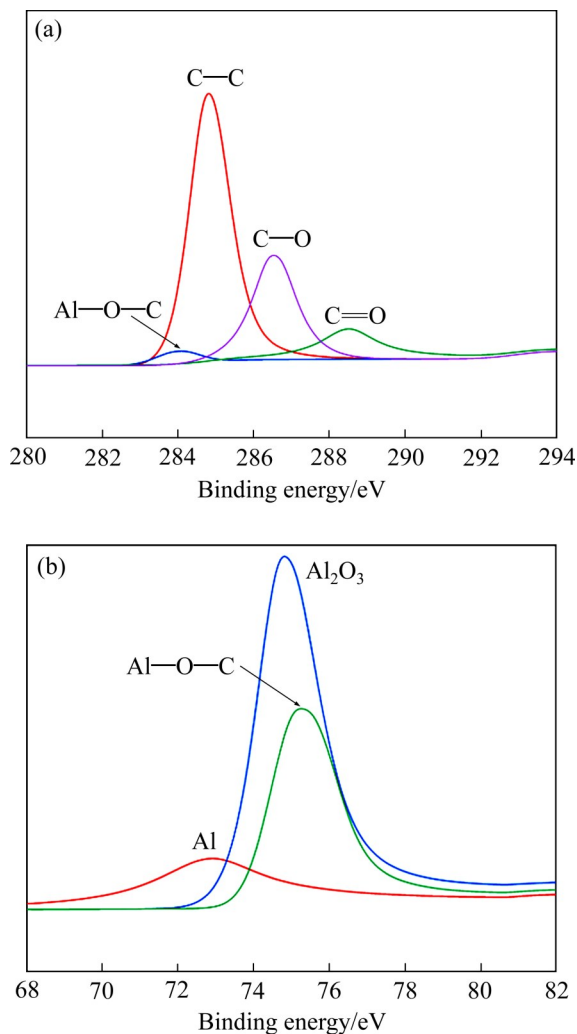


图 11 6061/PEEK 接头典型连接界面 XPS 精细光谱
Fig. 11 Fine XPS spectra of bonding interface of 6061/PEEK joint: (a) Al 2p orbit; (b) C 1s orbit

检测到了 Al—O—C 化学键的形成, 这表明在连接界面处形成了新化学键。表明两者在连接过程中发生了化学反应, 新的化学键的形成可以提高接头的连接强度, 形成高质量的连接接头。

3 结论

1) 铝合金在未经表面处理时, 无法与 PEEK 通过摩擦搭接焊直接实现连接。通过激光毛化处理, 铝合金表面的粗糙度 R_a 和 R_z 分别提高了 12.63 倍和 8.17 倍, 进而与 PEEK 实现了有效连接。

2) 采用正交试验, 研究了旋转速度、焊接速度和下压量对 6061/PEEK 摩擦搭接焊接头力学性能的影响。结果表明, 旋转速度影响焊接接头质量最为显著, 其次是焊接速度, 而下压量的影响最小。在旋转速度 1000 r/min, 焊接速度 70 mm/min, 下压量 0.2 mm 这个组合参数下, 焊接接头的拉伸剪切力和强度分别达到了最大值, 分别为 3749.10 N 和 14.99 MPa。

3) 接头断裂均在铝合金毛化边缘靠 PEEK 处, 经过激光毛化预处理的铝合金与 PEEK 在连接界面处形成紧密的结合, 存在机械嵌合。通过 EDS、XPS 能谱仪检测, 结果证明连接还存在化学键合, 表明焊接过程发生了化学反应, 界面处还存在化学连接, 生成了新化学键 Al—O—C, 有效提高了接头的强度。

REFERENCES

- [1] ZHANG W, XU J. Advanced lightweight materials for Automobiles: A review[J]. Materials & Design, 2022, 221: 110994.
- [2] GOHEL G, BHUDOLIA S K, LEONG K F, et al. On the structural damping response of hollow carbon composite shafts with room temperature curable novel acrylic liquid thermoplastic resin[J]. Composites Communications, 2022, 29: 100990.
- [3] GOHEL G, BHUDOLIA S K, LEONG K F, et al. Understanding the impact properties and damage phenomenon of ultra-lightweight all-thermoplastic composite structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 172: 104405.

- [4] BHUDOLIA S K, PERROTEY P, JOSHI S C. Mode I fracture toughness and fractographic investigation of carbon fibre composites with liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 134: 246–253.
- [5] ADARSH S J, NATARAJAN A. Review on the advancements and relevance of emerging joining techniques for aluminium to polymers/carbon fibre-reinforced polymer lightweight hybrid structures[J]. *Journal of Materials: Design and Applications*, 2022, 236(12): 2394–2435.
- [6] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. *汽车安全与节能学报*, 2014, 5(1): 1–16.
- FAN Z J, GUI L J, SU R Y. Research and development of automotive lightweight technology[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2014, 5(1): 1–16.
- [7] 于贵申, 陈鑫, 唐悦, 等. 激光表面处理对铝-铝粘接接头剪切强度的影响[J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*, <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.2023/227>.
- YU G S, CHEN X, TANG Y, et al. Effect of laser surface treatment on the shear strength of aluminum-aluminum bonding joints[J/OL]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.2023/227>.
- [8] 刘志明, 许昶. 碳纤维增强环氧树脂复合材料与铝板胶螺混合连接接头失效仿真[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2308–2315.
- LIU Z M, XU C. Failure simulation of carbon fiber reinforced epoxy resin composite-aluminum bonded-bolted hybrid joint[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2308–2315.
- [9] MU W, QIN G, NA J, et al. Effect of alternating load on the residual strength of environmentally aged adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 168: 87–97.
- [10] LI S, ZHANG S, LI H, et al. Numerical and experimental investigation of fitting tolerance effects on bearing strength of CFRP/Al single-lap blind riveted joints[J]. *Composite Structures*, 2022, 281: 115022.
- [11] SU J, TAN C, WANG X, et al. Enhanced the bonding reliability of titanium alloy and CFRTP via interfacial multiple modification: Synergy of physical interlocking and chemical interaction[J]. *Composite Structures*, 2023, 310: 116778.
- [12] LIU Z, LI Y, LIU Z, et al. Ultrasonic welding of metal to fiber-reinforced thermoplastic composites: A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 702–712.
- [13] LIU Y, SU J, MA G, et al. Effect of the laser texturing width on hot-pressing joining of AZ31B and CFRTP[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107350.
- [14] LI Y, BI X, XU M, et al. Optimization of friction lap joining parameters and exploration connection mechanism of CFRPA6/6061-T6 aluminum alloy hybrid structures[J]. *Composite Structures*, 2023, 325: 117566.
- [15] JIAO J, ZOU Q, YE Y, et al. Carbon fiber reinforced thermoplastic composites and TC4 alloy laser assisted joining with the metal surface laser plastic-covered method[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 213: 108738.
- [16] XU M, LIU B, ZHAO Y, et al. Direct joining of thermoplastic ABS to aluminium alloy 6061-T6 using friction lap welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2020, 25(5): 391–397.
- [17] ALHATTI A I, SHEIKH-AHMAD J, ALMASKARI F, et al. A Study of the Friction Stir Lap Welding of AA5052 and Polypropylene[J]. *Polymers*, 2023, 15(23): 4481.
- [18] NAGATSUKA K, ONODA T, OKADA T, et al. Direct dissimilar joining of aluminium alloys and polyamide 6 by friction lap joining[J]. *Welding International*, 2017, 31(1): 9–16.
- [19] NAGARAJAN B M, MANOHARAN M. Influence of cooling conditions on tensile lap shear strength and microstructure of friction stir welded aluminum alloy 5052-H32 and polycarbonate light weight hybrid joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 82: 390–402.
- [20] LI J, DONG H, TANG Z, et al. Influence of surface pretreatment on the bonding mechanism and mechanical properties of AA5052/CFRP friction stir spot welded joint[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 105: 112–123.
- [21] WU L H, XIAO B L, NAGATSUKA K, et al. Achieving strong friction lap joints of carbon-fiber reinforced plastic and metals by modifying metal surface structure via laser-processing pretreatment[J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112167.
- [22] ZHANG Z, SHAN J G, TAN X H, et al. Effect of anodizing pretreatment on laser joining CFRP to aluminum alloy A6061[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 2016, 70: 142–151.
- [23] KIMIYAKI N, HIRONOBU T, XIAO B L, et al. Effect of silane coupling on the joint characteristics of friction lap joined Al alloy/CFRP[J]. *Welding International*, 2018, 32(5): 328–337.
- [24] 邹鹏远, 张华, 雷敏, 等. 树脂基CFRP/金属异种材料激光连接工艺研究现状[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(5): 1853–1859.
- ZOU P Y, ZHANG H, LEI M, et al. A review: Prospect on

- laser direct joining of resin-based CFRP/metal[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(5): 1853–1859.
- [25] 刘一凡, 周宝升, 张涛, 等. 基于表面微结构的钛合金与CFRP激光连接研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 36–46.
- LIU Y F, ZHOU B S, ZHANG T, et al. Laser joining of carbon fiber reinforced plastics to titanium alloy via laser texturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 36–46.
- [26] HAN S C, WU L H, JIANG C Y, et al. Achieving a strong polypropylene/aluminum alloy friction spot joint via a surface laser processing pretreatment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 50: 103–114.
- [27] WANG S, XU Y, WANG W, et al. Enhancing interfacial bonding in friction stir lap welding of light metal and carbon fiber reinforced polymer composite[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 83: 729–741.
- [28] JIANG C, WU L, LIU F, et al. Achieving a strong friction-lap joint of continuous carbon-fiber-reinforced plastic/aluminum alloy via a surface laser-processing pretreatment[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(19): 2300034.
- [29] LIU Y, WANG X, ZHOU L, et al. Achievement of high-strength Al/CFRP hybrid joint via high-speed friction stir lap joining and laser texturing pretreatment parameters variation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 199: 111762.

Friction stir lap welding process and joint properties of laser-textured 6061 aluminum alloy and PEEK

XU Jiahe, LI Hongjun

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This study utilized laser texturing technology to treat the surface of aluminum alloy, achieving high-quality bonding with polyetheretherketone(PEEK) through friction-lap welding(FLW). Orthogonal experiments were used to study the effects of rotational speed, welding speed and applied pressure on the tensile shear performance of the joint, and the optimal process parameters were determined. And the connection mechanism were explained by observing the micro-morphology of the joint interface. The results indicate that the rotation speed has the most significant impact on the quality of the joint, followed by welding speed, while the effect of plunge depth is relatively minor. The optimal combination of process parameters is determined as follows: rotation speed of 1000 r/min, welding speed of 70 mm/min and plunge depth of 0.2 mm. Under these process parameters, the tensile-shear force and strength of the joint can reach 3749.10 N and 14.99 MPa, respectively. The joint fractures near the PEEK end, indicating that the laser-textured joint possesses good interfacial strengthening capabilities. Additionally, through microstructural analysis, the connection between 6061/PEEK is not only mechanically interlocked but also chemically bonded, forming new chemical bonds Al—O—C, which contributes to the enhancement of joint strength.

Key words: friction-lap welding; 6061/polyetheretherketone(PEEK) hybrid joint; laser texturing; orthogonal experimental design; joining mechanism

Foundation item: Project(2023YFE0106400) supported by the National Key Research and Development Program of China

Received date: 2024-05-21; **Accepted date:** 2024-10-22

Corresponding author: LI Hongjun; Tel: +86-18968041257; E-mail: lihongjun@zstu.edu.cn

(编辑 李艳红)