激光表面处理对铝-铝粘接接头剪切强度的影响

于贵申[1,2],陈 鑫[2],唐 悦[2],赵春晖[1],牛艾佳[1],柴 辉[1],那景新[2]

(1.中国北方车辆研究所 系统总体技术部,北京 100072;2.吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,长春 130022)

摘 要:激光烧蚀处理是提高接头胶接性能的有效界面处理方法,但其对粘接接头剪切强度的影响机制尚不明确。为此,本研究针对薄板拉伸剪切过程中的面外弯曲,开发了一种粘接接头剪切强度的测试夹具,并通过界面微结构、界面润湿性及粘接接头的断裂机制,阐明了激光表面处理工艺对铝-铝粘接接头剪切强度的影响。结果表明:粘接接头的剪切强度受到界面粗糙度和表面润湿性的共同作用;采用激光能量密度为82.6 J/cm^2、45°+135°的形貌、激光重叠率为-25%的工艺参数,可获得最高的剪切强度(24.51 MPa),相较于轧制表面(11.74 MPa)提升了108.7%。

关键词:车辆工程;铝合金连接;粘接接头;剪切强度;浸润性;粗糙度

中图分类号:U463.82 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2025)08-2555-15

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231227

Effect of laser surface treatment on the shear strength of aluminum-aluminum bonding joints

YU Gui-shen[1,2], CHEN Xin[2], TANG Yue[2], ZHAO Chun-hui[1], NIU Ai-jia[1], CHAI Hui[1], NA Jing-xin[2]

(1. *Department of System Overall Technology, North China Vehicle Research Institute, Beijing* 100072, *China*; 2. *State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun* 130012, *China*)

Abstract: Laser ablation is an effective interfacial treatment to improve the joint bonding performance, whereas the effect mechanism of the laser treatment process on the shear strength of bonded joints is not clear. This study developed a test fixture for the shear strength of bonded joints which addressed the out-of-plane bending during the tensile shear of thin plates. The effect of laser surface treatment process on the shear strength of aluminum bonded joints was elucidated through the interfacial microstructure, wettability, and fracture mechanism. The results show that the shear strength of bonded joints is affected by the combination of interfacial roughness and surface wettability. The highest shear strength (24.51 MPa) was obtained using a laser energy density of 82.6 J/cm^2, a 45°+135° morphology, and overlap rate of -25%.

收稿日期:2023-11-08.

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB250350-3);吉林省校合作项目(SXGJSF2017-2-1-5);吉林大学研究生创新研究计划项目(101832020CX128).

作者简介:于贵申(1992-),男,博士研究生.研究方向:汽车车身结构轻量化连接.E-mail:yugs18@mails.jlu.edu.cn

通信作者:陈鑫(1974-),男,教授,博士.研究方向:汽车轻量化及NVH控制.E-mail:cx@jlu.edu.cn

Compared to the rolled surface (11.74 MPa), the shear strength of the laser-machined joints increased by 108.7%.

Key words: vehicle engineering; aluminum alloy joints; adhesive joints; shear strength; wettability; roughness

0 引 言

新能源汽车的推广和应用对汽车轻量化设计提出了更高要求,车身轻量化已成为研究热点。采用铝合金等轻质材料是实现汽车轻量化的有效途径[1]。铝合金材料在车身结构中的成功应用不仅取决于先进的成型工艺,还依赖于可靠的连接技术。相较于焊接、铆接等传统连接工艺,胶接技术凭借其均匀的载荷分布特性,在汽车、高铁、飞机等先进结构中得到了广泛应用[2]。

粘接接头的表面处理是施胶前的重要工序[3]。传统铝合金表面处理方法以喷砂为主,虽能提高铝合金接头的结合强度,但处理后残留的粉尘污染物会降低母材的剪切强度[4]。为提高铝合金表面的附着力,近年来发展了化学蚀刻、电镀等表面预处理方法。例如,Guo等[5]通过磷酸阳极氧化工艺有效改善了2A12-T4钢板粘接接头的拉剪力学性能。研究表明,喷砂的物理作用虽然可以显著改变表面形貌、增加粗糙度,但并不总是有利于改善润湿性和界面结合强度。Rudauska等[6]在研究中发现,采用阳极氧化与振动喷丸相结合的复合表面处理技术,可以提高Ti6Al4V钛合金薄板胶接接头的强度。然而,上述方法仍存在劳动力成本高、工艺复杂和化学污染等问题。相比之下,激光表面处理技术作为一种非接触、环境友好型的表面处理技术,在工业产品中具有广阔的应用前景。

激光处理能够在基体表面形成微纳表面形貌,增加界面粗糙度。该技术通过扩大表面接触面积,增强了胶粘剂与基体的结合强度[7]。同时,激光处理能够有效去除表面污染物并形成新的表面氧化层,有助于改善激光烧蚀表面的润湿性,进一步增强胶粘剂与基体的结合强度。研究表明,激光处理后铝合金表面的剪切强度与化学腐蚀和电镀处理的剪切强度相当[4]。此外,一些学者也通过改变激光参数提升接头的连接强度。例如,Wan等[8]通过改变纳秒激光光斑重叠率提高纳秒脉冲激光加工铝合金粘接接头的结合强度。结果表明,在激光点阵的重叠率从-49%提高到63%的过程中,接头的剪切强度提升6%。Xie等[9]探究了激光工艺参数对碳纤维复合材料拉剪力学性能的影响。结果表明,交叉沟槽的粘接接头比平行沟槽和光滑表面的胶接接头具有更好的剪切强度。在此基础上,通过激光参数优化,获得最佳工艺参数。与未处理的碳纤维相比,最优参数下激光处理的粘接接头的抗剪强度提高了40.8%。尽管现阶段针对激光工艺参数对铝-铝粘接接头力学性能的研究已较为广泛,但在其性能提升机制方面仍存在不足。

本文通过粘接棒材的剪切试验,避免了传统板材剪切过程中的面外弯曲问题。通过改变激光能量密度、界面形貌以及激光重叠率等参数,系统地分析了激光表面处理工艺参数对铝-铝粘接接头剪切强度的影响。通过激光参数优化,有效地提高了铝-铝粘接接头的剪切强度。

1 实验方案

1.1 激光表面处理

本研究采用塑性粘接剂(Araldite 2015)研究激光表面处理工艺参数对粘接接头力学性能的影响。激光表面烧蚀处理是一种常用的界面处理工艺,包括金属材料的熔化、汽化和凝固过程。如图1(a)所示,激光束从发射源聚集至金属材料表面,激光脉冲的能量被金属材料吸收。随着激光能量的增加,一部分材料发生汽化,并在激光脉冲的前沿形成等离子体羽流,其内部压力导致母材发生溅射。溅射出的材料落回基体表面,形成重铸层。此外,部分凹坑内的材料俘获激光能量,并通过热传导和热扩散的方式在基体表面形成热影响区。激光表面处理的二次效应主要包括热影响区、重铸层、微裂缝、微孔洞和沉积溢出的表面氧化层造成的表面损伤。图1(b)为激光表面处理的示意图,操作人员通过界面绘制激光加工路径,并通过激光控制器对激光探头的激光参数进行控制。光纤激光探头发射出的激光经过X和Y方向的反射镜并通过聚焦透镜将激光束投射到待加工工件的表面。被加工试件吸收激光能量后,母材发生熔

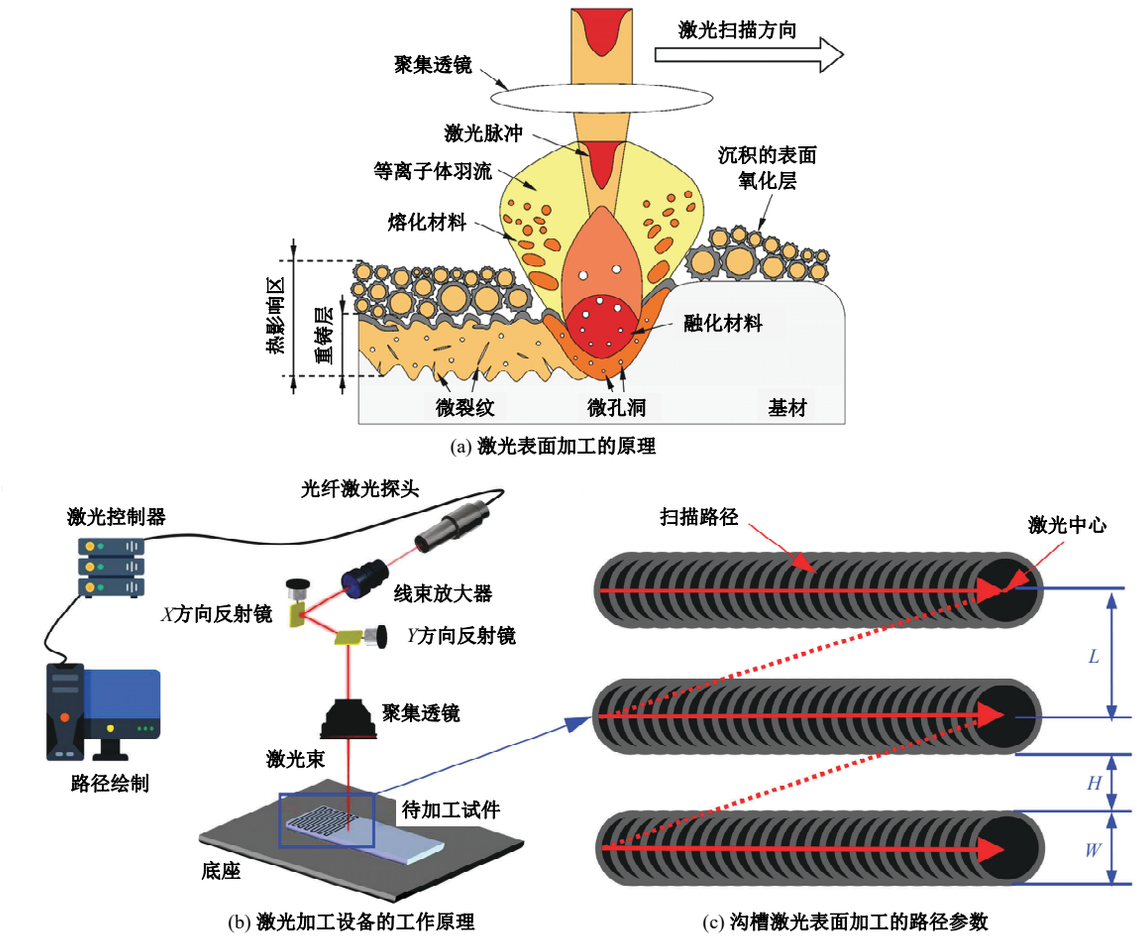


图 1　激光表面处理工艺的示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the laser surface treatment process

化。沟槽激光表面加工的路径参数如图 1(c)所示。激光沟槽表面处理的形状参数包括沟槽中心距离 L、扫描宽度 H 和沟槽直径 W，三者的关系为 $L=H+W$。本研究选用的激光器为北京中科诺斯科技有限公司生产的 ZK-GD-50 激光雕刻机，其参数如表 1 所示(制造商提供)[7]。

表 1　选用雕刻机的激光器参数

Table 1　Laser parameters for the selected engraving machine

激光器参数	数值
峰值功率 P_{max}/W	50
激光波长 λ/nm	1 064
光斑直径 d/μm	50
脉冲频率 f/kHz	20
扫描速度 v/(mm·s^{-1})	0～2 000

1.2　粘接接头的剪切力学性能

传统的薄板搭接剪切力学性能试验在拉伸过程中存在板材的弯曲变形，使得胶层受到的应力状态不是纯剪切应力状态。为此，本研究设计了专用于粘接连接剪切强度试验的夹具，如图 2 所示[10,11]。该夹具包括上、下夹头以及紧固螺栓。在施加拉剪载荷前，将粘接棒通过紧固螺栓固定在剪切夹具上，通过上、下夹头的相对运动，使粘接接头受到纯剪切应力状态。粘接接头的剪切强度通过万能拉伸试验机(WDW-3100，长春科新有限公司)以 2 mm/min 的加载速率进行测量。

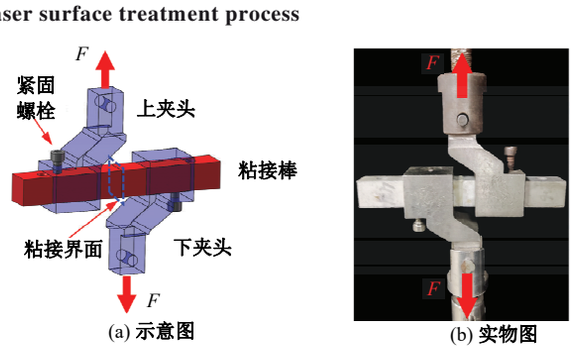


图 2　粘接接头剪切力学性能测试装夹

Fig. 2　Schematic and physical diagrams of the fixture of shear mechanical properties for bonding joints

1.3　粘接界面的润湿性

水滴法是一种应用广泛的表面润湿性测量

方法,该方法通过水滴在不同表面上的形态变化对界面的表面能进行标定。为测量接触角(Contact angle,CA),将样品放置在接触角测量仪(DSA25S,KRUSS,Germany)的测试台上,校准后的水滴沉积在表面,并在横截面处设置摄像机记录水滴的形态。然后,利用专用软件测量液滴与表面的接触角。接触角测量示意图如图3(a)所示,图中θ即为接触角。由于表面能的不同,水滴的形态也会发生变化。每滴4 μL的去离子水通过测量装置精确控制液滴的大小,液滴沉积在每个表面后,连续测量10 s以记录形态变化。当θ=0°时,液体完全浸润固体表面,如图3(b)所示;当0°<θ<90°时,液体可浸润固体表面,如图3(c)所示;θ=90°为润湿与否的分界线;当90°<θ<180°时,液体不浸润固体表面,如图3(d)所示;当θ=180°时,液体完全不浸润固体表面,在固体表面形成小球,如图3(e)所示。在自然界中,存在2种典型的超疏水现象——"荷叶效应"和"玫瑰花效应",具体如图3(f)所示。这2种超疏水表面分别对应超疏水的低黏附态和高黏附态。Barthlott等[12]发现,荷叶表面的微乳头结构与疏水蜡质的协同作用,使得荷叶的水滴接触角保持在160°左右。荷叶表面的微纳双重结构使得水滴容易从荷叶表面滑落,并带走附着在荷叶表面的污垢,即"荷叶效应"。激光处理后的粘接表面疏水性与荷叶表面类似,其表面微结构与液滴间的表面张力使得结构具有疏水性。

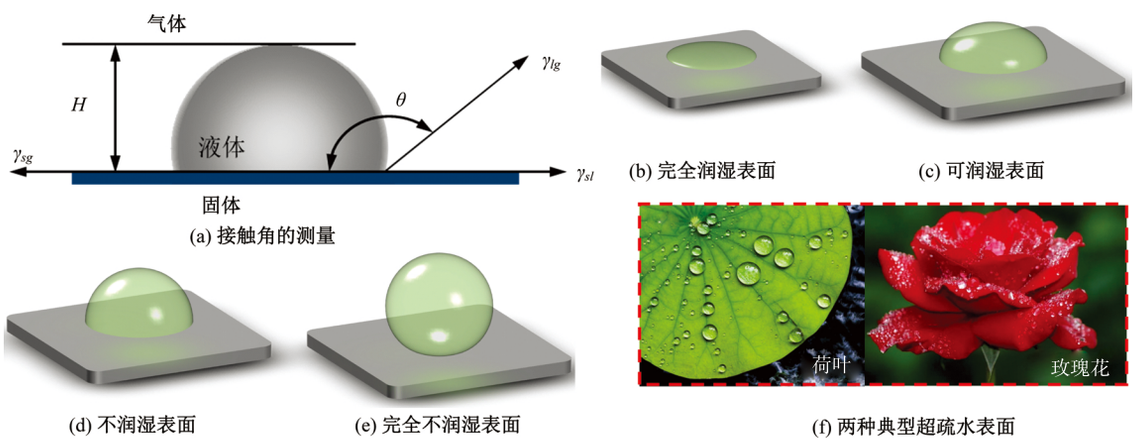


图3 界面接触角模型的示意图

Fig. 3 Schematic representation of the interfacial contact angle model

2 能量密度

使用不同能量密度的激光对粘接区域表面进行处理,并通过棒材剪切试验探究接头表面形貌对粘接接头剪切强度的影响。Andarabi等[13]在针对激光处理7075-T6铝合金界面剪切强度的研究中指出,当激光对界面重复加工6次时,粘接界面获得最大的剪切强度。因此,本研究采用6次重复加工的方式对界面进行激光表面加工。采用激光功率计测量不同激光效率η下的平均功率P_{ave},根据式(1)计算出激光能量密度Φ,实验选取的激光能量密度Φ值如表2所示。

$$\Phi=\frac{4E}{\pi d^2}=\frac{4P_{ave}}{f\pi d^2} \tag{1}$$

式中:E为激光脉冲能量;d为光斑直径;f为激光脉冲频率。

采用X射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy,XPS)分析激光处理前后AA6061的表面元素组成及其化学状态的变化,结果如图4所示。选取能量密度为101.7 J/cm^{2}的激光对表面进行激光处理,并开展元素分析。通过激光处理前后XPS光谱对比可知,母材界面上的主要元素为Al和O。其中,Al元素以氧化物和纯铝的形式存留在母

表2 实验使用的激光能量密度及其对应的功率参数

Table 2 Experimentally used laser energy density and its power parameters

激光效率η/%	平均功率P_{ave}/W	激光能量密度Φ/(J·cm^{-2})
20	8.01	20.4
40	16.37	41.7
60	23.59	60.1
80	32.42	82.6
100	39.92	101.7

材表面；母材上的O元素与Al结合生成Al_2O_3，如图4(a)～(c)所示；而激光处理后的母材表面分布少量的Mg元素，并以氧化物的形式存在于激光处理后的母材表面，如图4(d)～(f)所示。

2.1　微观结构及表面形貌

不同能量密度下激光表面处理的沟槽形貌如图5所示。图5(a)展示了轧制状态(Φ=0)的表面形貌，可见明显的轧制条纹。图5(b)展示了激光能量密度为20.4 J/cm^{2}时的表面形貌，由于激光能量较低，母材表面仅出现了较小的沟槽和溅射物。随着激光能量密度的增加，沟槽形貌逐渐明显，当激光能量密度为41.7 J/cm^{2}时，母材表面出现点阵状

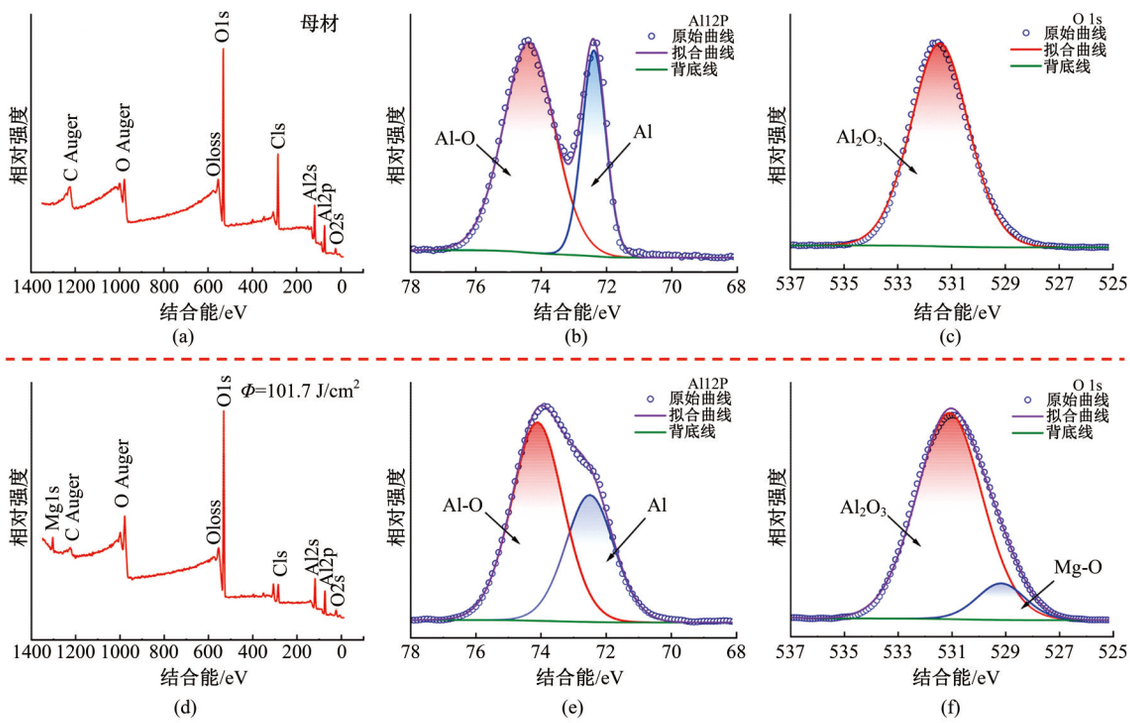


图4　母材(a)~(c)和激光处理后(d)~(f)界面的XPS光谱

Fig. 4　XPS spectra of the interface between the base material (a)~(c) and the laser-treated (d)~(f) interface

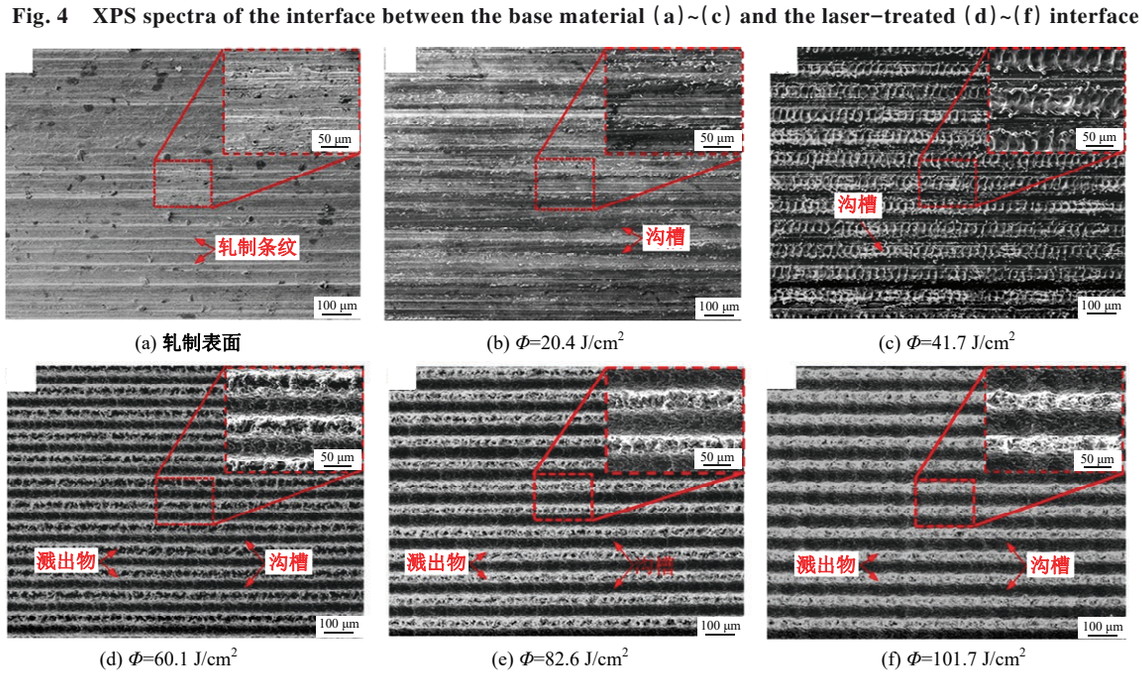


图5　不同激光能量密度加工的表面形貌

Fig. 5　Surface morphology of laser processing with different laser energy densities

的沟槽结构,如图5(c)所示。这些沟槽是由母材局部融化、热对流和表面物质汽化形成的,沟槽边缘区域为Marangoni效应对流形成的"凸起"[14]。随着激光能量密度的进一步增加,材料蒸发引起的等离子体压力增大,熔池变得更不稳定,迫使熔体向外进一步飞溅[15]。当激光能量密度为82.6和101.7 J/cm²时,沟槽的宽度明显大于低水平能量密度激光加工的表面沟槽,如图5(e)(f)所示。为进一步获得激光处理表面的形貌信息,采用白光干涉表面轮廓仪(Zygo,Newview 9000)对表面形貌进行分析,如图6所示。

材料的表面粗糙度R_a是指在表面轮廓曲线上截取长度L,以该长度内中心线为基准,截取长度内各点高度值y_i对截取长度L的积分,除以截取长度的距离,其数学表达式为:

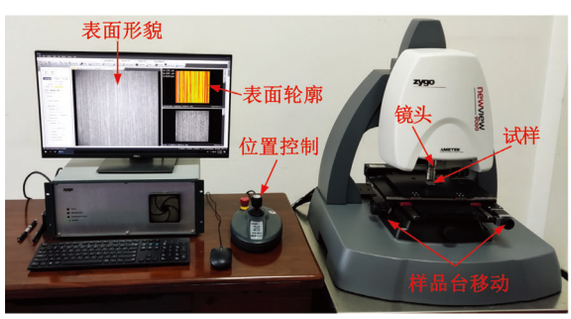


图6 白光干涉表面轮廓仪

Fig. 6 White light interference surface profiler

$$R_a=\frac{1}{L}\int_0^L y_i\,\mathrm{d}L \tag{2}$$

由于通过截取长度的方式测量激光处理的表面粗糙度会存在测量结果随机性,本节采用算数平均高度S_a对母材表面的粗糙度进行定义。S_a是线算术平均高度R_a在截取平面上的扩展,表示相对于基准表面,各点高度差$Z(x,y)$的绝对值的平均值,其数学表达式为:

$$S_a=\frac{1}{A}\iint_A\left|Z(x,y)\right|\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{3}$$

式中:A为测试区域的面积。

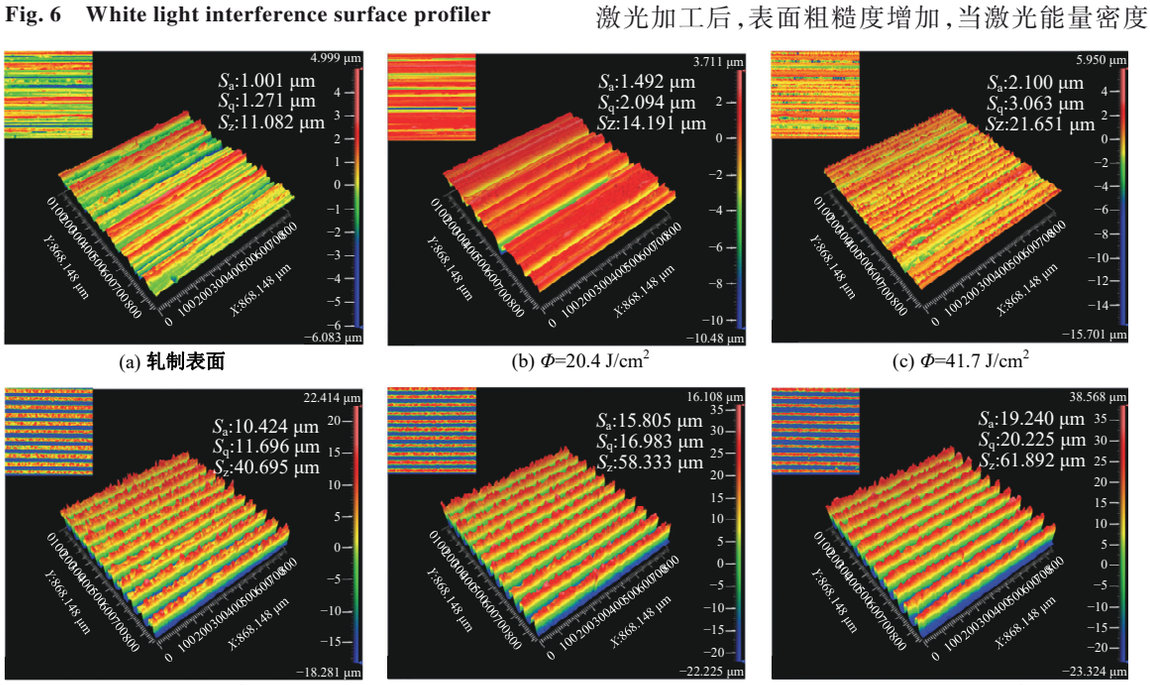
此外,本节采用均方根高度S_q和最大高度S_z对激光处理后表面的高度进行定义。其中,均方根高度S_q定义为测量区域内各点高度的均方根,相当于高度的标准偏差,其计算公式为:

$$S_q=\sqrt{\frac{1}{A}\iint_A\left|Z^2(x,y)\right|\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{4}$$

最大高度S_z定义为测量区域内最大峰高S_p和最大谷深S_v之和,即:

$$S_z=S_p+S_v \tag{5}$$

首先,选择横纹激光加工形貌探究激光能量密度对粘接接头剪切力学性能的影响。不同激光能量密度加工的母材三维形貌如图7所示,可知,轧制表面粗糙度S_a最低(1.001 μm);对表面进行激光加工后,表面粗糙度增加,当激光能量密度为



(a) 轧制表面 (b) Φ=20.4 J/cm² (c) Φ=41.7 J/cm²

(d) Φ=60.1 J/cm² (e) θ (f) Φ=101.7 J/cm²

图7 不同激光能量密度加工表面的三维轮廓

Fig. 7 Three-dimensional profiles of surfaces processed with different laser energy densities

101.7 J/cm²时，表面粗糙度S_a最大(19.240 μm)；随着激光能量密度的增加，表面的均方根高度S_q和峰值高度S_z分别从1.271和11.082 μm增加至20.225和61.892 μm。

2.2　界面浸润性及接头的力学性能

不同激光能量密度下的粘接表面接触角结果如图8(a)所示。轧制表面的接触角最低(68.9°)，随着激光能量密度的增加，界面的接触角逐渐增大。这是由于激光加工的横纹微结构通过“荷叶效应”形成粗糙表面，其与水滴间的界面支撑作用导致接触角增大。当激光能量密度为101.7 J/cm²时，激光处理的表面获得最大的接触角(163.0°)。激光处理表面的接触角与粘接棒材的剪切强度具有一致性，这是因为棒材在轴向预紧力作用下，粘接剂进入激光处理表面的微槽中，表面微结构提供的疏水张力越大，表明激光处理的沟槽深度和宽度越大，进而提升了界面的剪切强度。

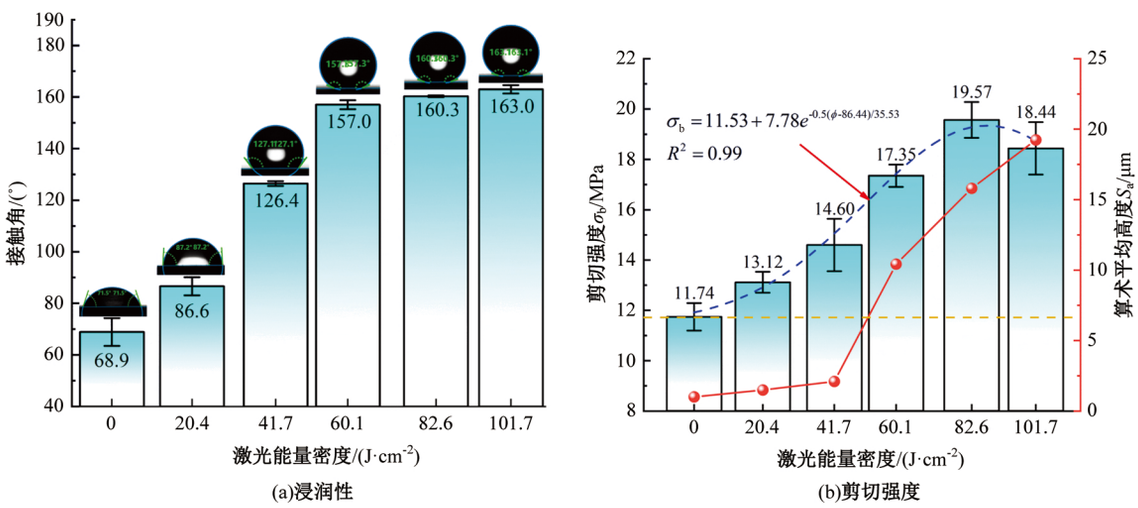


图8　激光能量密度对粘接接头浸润性和剪切强度的影响

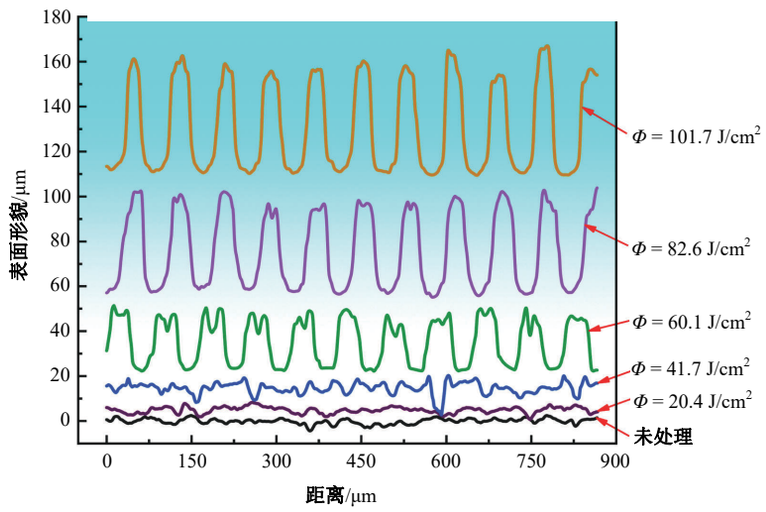
Fig. 8　Effect of laser energy density on the infiltration and shear strength of the bonding joints

为使粘接区域的受力状态为纯剪切应力状态，采用粘接棒材对粘接区域的剪切力学性能进行测试。不同激光能量密度下，粘接接头的失效强度σ_b的结果如图8(b)所示。轧制表面的失效强度最低(11.74 MPa)。随着激光能量密度的升高，粘接区域的剪切强度先升高后降低，最高的剪切强度对应的激光能量密度为82.6 J/cm²。随着激光能量密度的进一步提高，接头的剪切强度出现下降趋势。粘接区域的剪切强度与表面粗糙度存在相似的变化趋势，随着激光能量密度从0增加到101.7 J/cm²，表面粗糙度从1.001 μm增加到19.240 μm。然而，激光能量密度从82.6 J/cm²增加到101.7 J/cm²的过程中，粘接区域的剪切强度从19.57 MPa降低到18.44 MPa，降幅为5.77%。有学者指出，当粘接表面过于粗糙时，胶粘剂的流动性受到抑制，使得接头的粘接强度降低[16]。

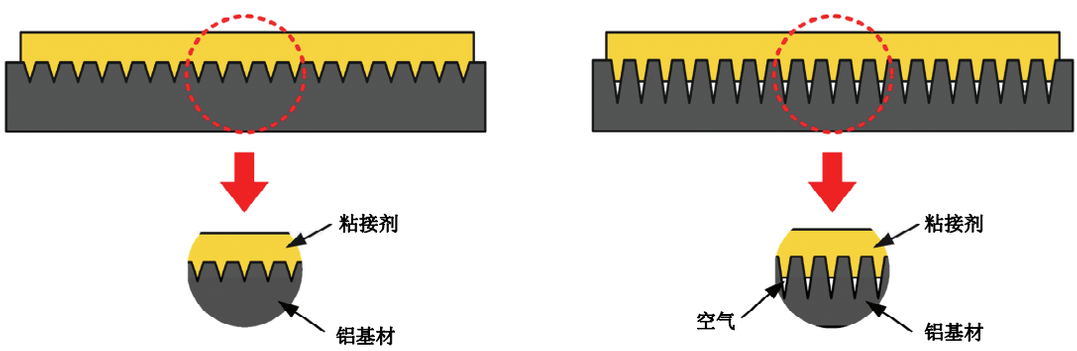
不同激光能量密度下，界面的高度变化如图9(a)所示。随着激光能量密度的增加，界面的均方根高度S_q逐渐增加。在激光能量密度从82.6 J/cm²增加到101.7 J/cm²的过程中，S_q从16.983 μm增加到20.225 μm，增幅为19.09%。相应地，在激光能量密度从82.6 J/cm²升高到101.7 J/cm²的过程中，接头的剪切强度下降了10.9%。图9(b)(c)展示了不同沟槽深度的粘接界面。当沟槽深度较深时，胶层与母材之间会存在空气，进而使得接头的剪切强度降低。因此，在后续的激光表面处理研究中，采用能量密度为82.6 J/cm²的激光对母材界面进行加工。

2.3　接头的断口形貌

不同激光能量密度下，粘接接头的宏观断口形貌如图10所示。轧制表面粗糙度S_a较低(1.001 μm)，接头的剪切断口为混合失效模式，并伴随着大面积的界面失效，如图10(a)所示；相应地，接头的剪切强度约为11.74 MPa，是所有处理组中的最低值。当激光能量密度为60.1 J/cm²时，接头的表面粗糙度S_a提升至1.492 μm(较轧制表面提升49.2%)，这使得激光处理后接头的剪切强度(13.12 MPa)相较于轧制表面提高了



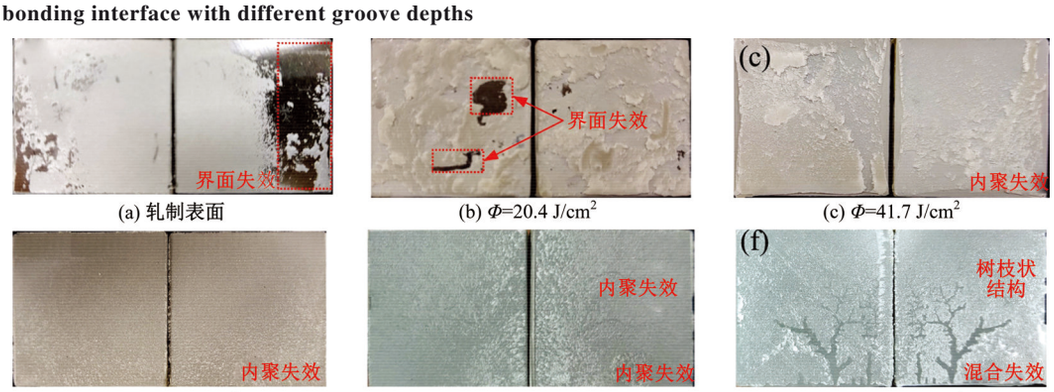
(a) 激光能量密度对粘接接头表面形貌的影响



(b)浅槽 (c)深槽

图9 激光能量密度对粘接接头表面形貌的影响和不同沟槽深度粘接界面的示意图

Fig. 9 Effect of laser energy density on the surface morphology of the bonding joint and a schematic diagram of the bonding interface with different groove depths



(a) 轧制表面 (b) Φ=20.4 J/cm² (c) Φ=41.7 J/cm²

(d) Φ=60.1 J/cm² (e) θ (f) Φ=101.7 J/cm²

图10 不同能量密度下粘接接头的剪切宏观断口形貌

Fig. 10 Shear macroscopic fracture morphology of bonding joints in different energy densities

10.58%;但由于接头的表面粗糙度值仍处于低水平,断口仍呈现混合失效模式,即断口表面出现部分界面失效的情况,如图10(b)所示。随着激光能量密度的增加,粘接剂与母材界面的粘合力增强,使得接头的宏观断裂模式为内聚失效模式,接头的剪切失效强度也显著高于轧制和低水平激光能量密度(Φ = 20.4 J/cm²)的粘接接头,具体宏观断口形貌如图10(c)~(e)所示。随着激光能量密度的进一步提高,胶层的界面流动性降低。当激光能量密度为101.7 J/cm²时,接头再次出现混合失效模式,并在断口中出现树枝状的界面失效区域,如图10(f)所示。

3　界面形貌

本研究还针对界面的表面形貌对粘接接头力学性能的影响开展了相关研究。针对沟槽的取向，设计了 0°、45°、90°、45°＋135°和 0°＋90°的表面形貌。针对前文的激光能量密度对粘接接头力学性能的影响结果，选择激光能量密度为 82.6 J/cm^{2}进行表面形貌的加工，并采用棒材剪切实验探究表面形貌对粘接接头剪切强度的影响机制。不同角度组合界面沟槽加工路径的示意图如图 11 所示。

3.1　微观结构及表面形貌

不同形状激光表面处理的沟槽形貌如图 12 所示。图 12(a)(b)分别为 45°和 90°方向的表面沟槽，界面因 Marangoni 效应形成“凸起”结构。图 12(c)(d)为重叠激光加工的表面形貌，在母材表面激光重叠区域出现了点阵分布的微观结构。

4 种形貌的三维形状如图 13 所示。对于单一沟槽加工表面，随着激光加工角度从 0°增至 45°和 90°，表面粗糙度 S_a 从 15.805 μm 分别降低至 12.851 和 10.697 μm，总体降低 32.3%。交叉激光加工表面的沟槽深度 S_q 和表面粗糙度 S_a 均明显高于单一形状的激光加工表面，其中 45°＋135°加工表面得到了最大的表面粗糙度(24.572 μm)和沟槽均方根深度(约为 31.074 μm)。相较于 0°＋90°加工表面，45°＋135°加工表面的表面粗糙度 S_a 和沟槽均方根高度 S_q 分别提高了 22.1% 和

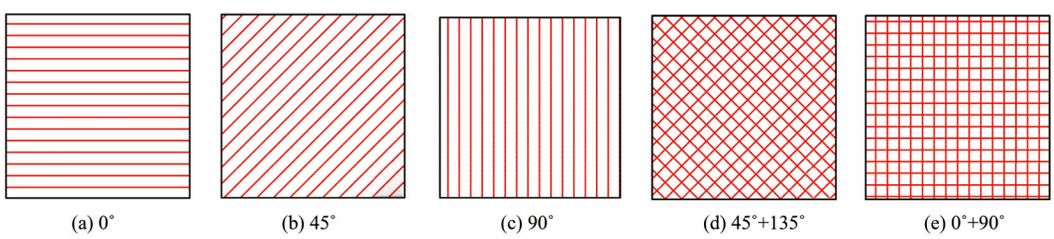


图 11　典型的激光处理表面沟槽加工路径的示意图

Fig. 11　Schematic diagrams of typical laser-treated surface groove processing paths

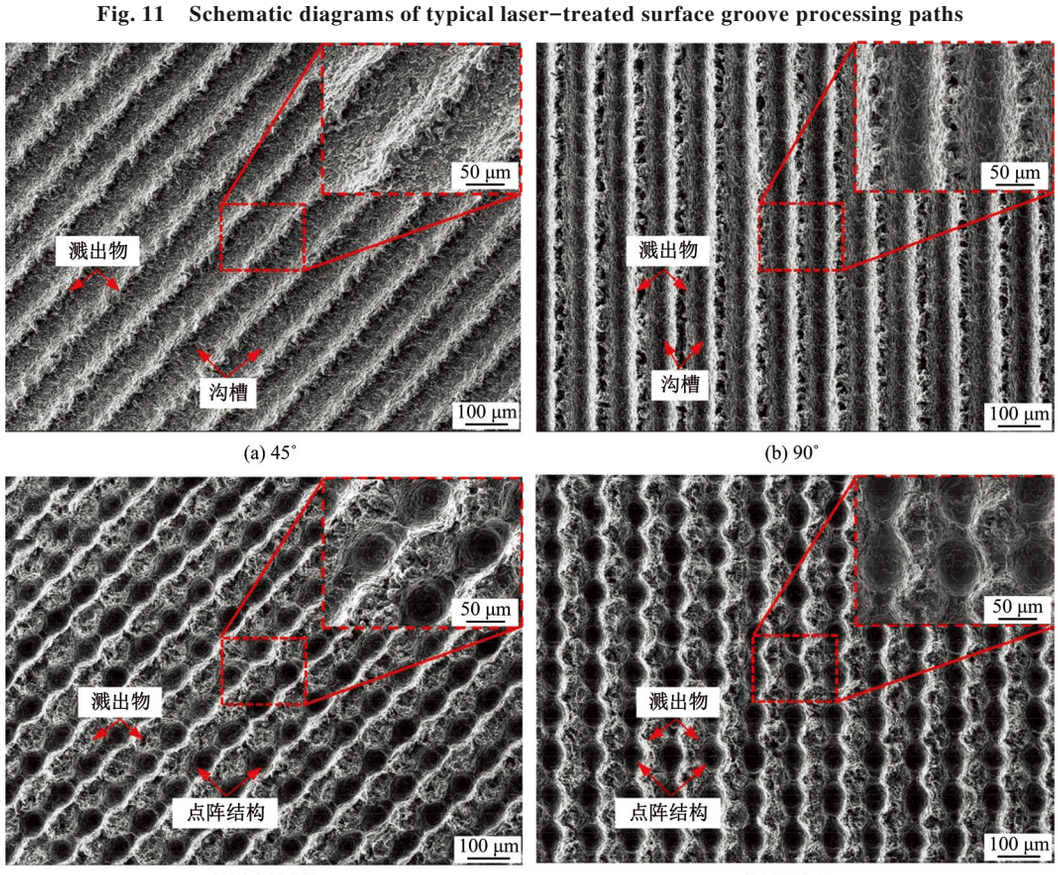


图 12　不同激光沟槽形状加工的表面形貌

Fig. 12　Surface morphology of different laser groove shapes processed

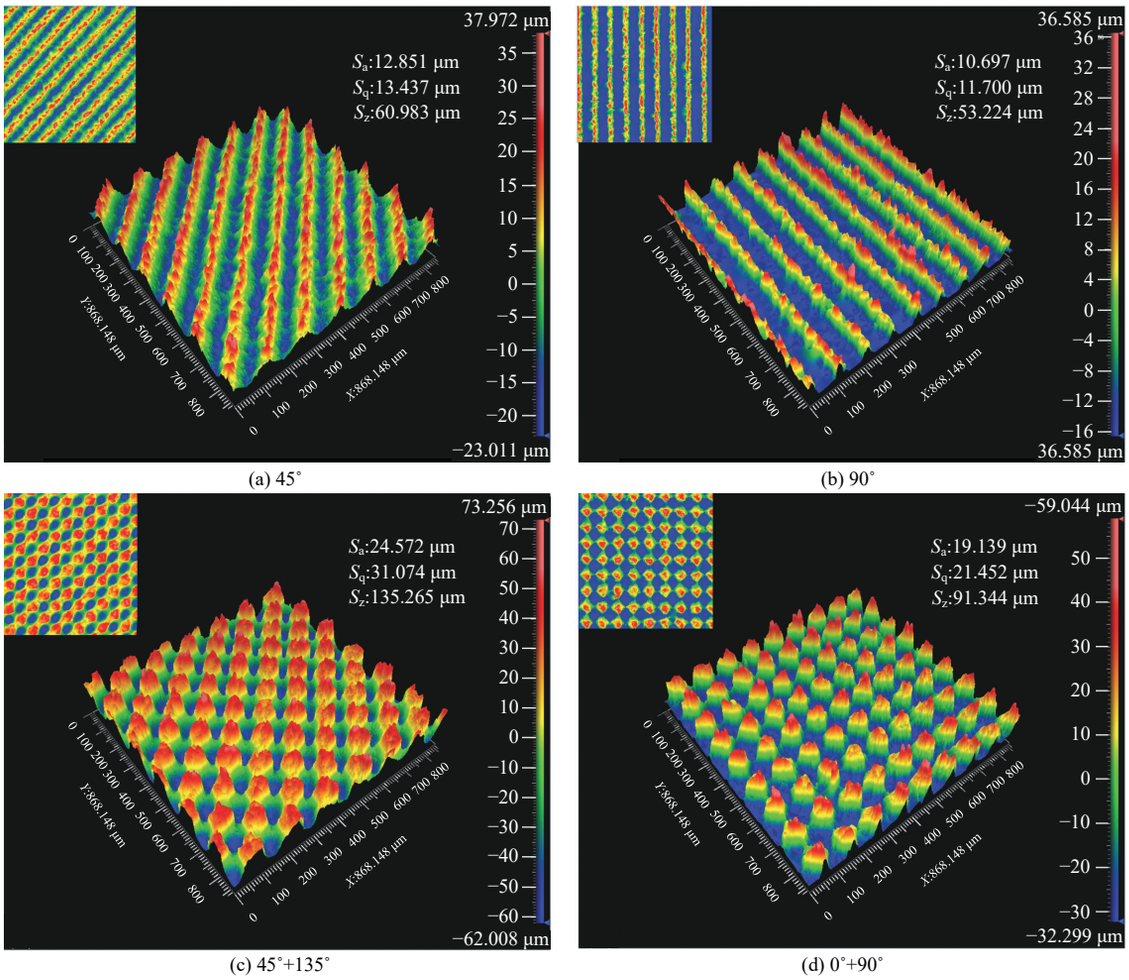


图 13　不同激光沟槽形状加工的表面轮廓

Fig. 13　Surface profiles machined with different laser groove shapes

30.96%。不同形状的激光加工表面的沟槽深度存在差异,这种差异源于不同加工形状的激光加工表面导致母材的温度场分布、材料的溢出和汽化状态的差异。

3.2　界面浸润性及接头的力学性能

5种表面形貌的疏水结果如图 14(a)所示。

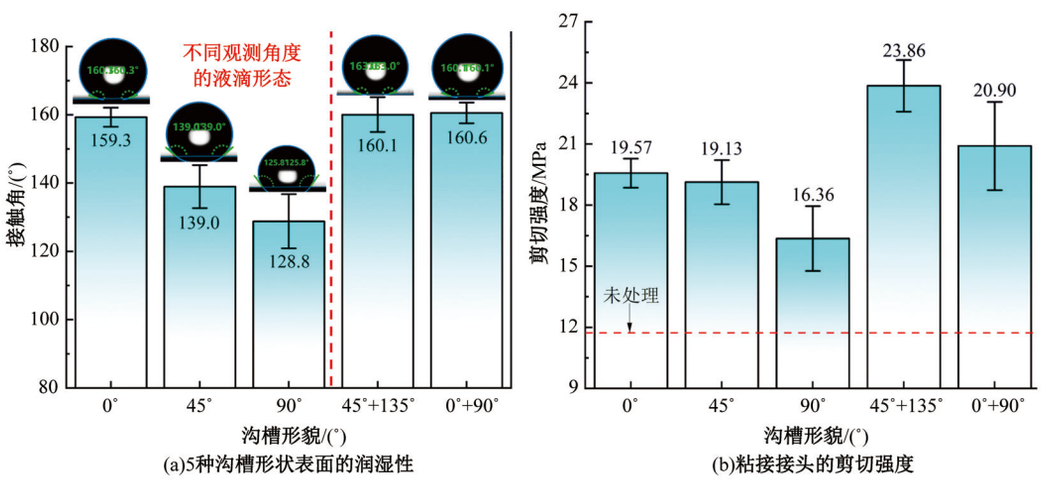


图 14　5种沟槽形状表面的润湿性和粘接接头的剪切强度

Fig. 14　Wettability of surfaces of five groove shapes and shear strength of bonding joints

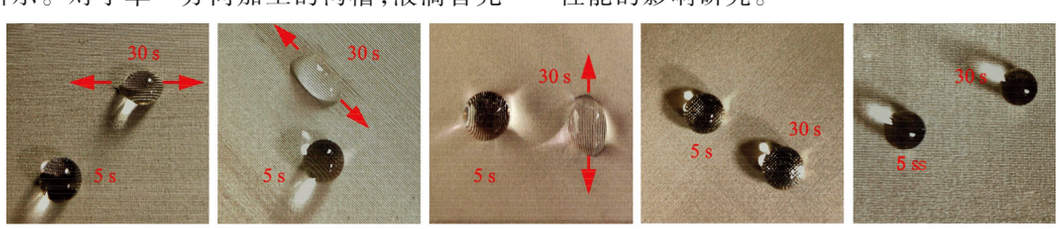
由于液滴沿沟槽方向的浸润性以及观测角度的不同，随着沟槽角度从0增加到45°和90°，界面的接触角从159.3°下降到139.0°和128.8°。此外，45°＋135°和0＋90°界面的接触角接近，分别为160.1°和160.6°。这是由于交叉加工表面的微乳头凸起结构影响了液滴的表面张力，从而维持了疏水性。在45°＋135°和0°＋90°加工的表面中，微乳头结构的取向变化对界面的疏水性能影响较小。不同表面形貌的剪切强度的结果如图14(b)所示。针对单一沟槽的胶层表面形貌，随着沟槽角度从0°增加到90°，接头的剪切强度从19.57 MPa降至16.36 MPa。双向沟槽剪切强度的实验结果表明，随着沟槽角度的增加，接头的剪切强度增大。并且，45°＋135°和0＋90°沟槽的剪切强度分别为23.86 MPa和20.90 MPa。粘接接头的剪切强度与表面粗糙度S_a存在相似的变化趋势，随着沟槽角度的增加，粘接界面的表面粗糙度S_a从15.805 μm降低到10.697 μm。相应地，粘接区域的剪切强度从19.57 MPa降至16.36 MPa，降幅为16.20%。此外，随着界面沟槽加工角度的增加，界面的粗糙度S_a升高。其中，45°＋135°界面对应最高的剪切失效强度(23.86 MPa)，略高于0°＋90°界面的失效强度(20.9 MPa)。

3.3　接头的断口形貌

5种沟槽表面水滴形态随时间的变化结果如图15所示。对于单一方向加工的沟槽，液滴首先在界面形成球状；随着时间的增加，液滴沿着沟槽方扩展，表现出定向浸润性，如图15(a)～(c)所示。两种交叉加工表面的液滴形貌随时间的变化结果如图15(d)(e)所示，由于交叉加工母材表面的微乳头结构，随着时间的增加，液滴仍保持球形。激光处理的母材表面因其微结构而具有疏水性(可以用“荷叶效应”解释)。在轴向压力的作用下，粘接剂进入母材微结构中，界面与粘接剂形成互锁结构，从而增强了接头的承载能力。

不同沟槽形貌下粘接接头承受的剪切载荷及胶层与界面间剪切分量的示意图如图16所示，图中F为粘接区域受到的剪切载荷，F'和F''为胶层与界面间剪切力分量。当沟槽角度为0°时，粘接区域受到的外载荷与胶层和界面的剪切分量相同。随着沟槽角度从0°增加到90°，胶层与界面的剪切分量在外载荷方向上的投影值降低。相应地，粘接接头的剪切强度从19.57 MPa降低到16.36 MPa。交叉加工沟槽的剪切强度相较于单一方向的接头强度升高，其中45°＋135°沟槽的胶层与界面形成合力，其剪切强度相较于0°＋90°接头提高了14.16%。

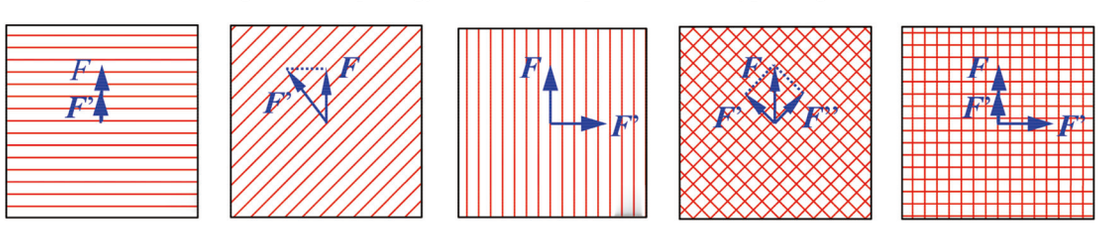
不同沟槽形状粘接区域的宏观断口形貌如图17所示，所有接头断口均表现出内聚失效的断裂模式，表明粘接剂与界面间具有良好的附着性。根据不同沟槽形貌粘接接头的剪切强度，采用45°＋135°界面形貌进行激光重叠率对粘接接头剪切性能的影响研究。



(a) 0°　(b) 45°　(c) 90°　(d) 45°+135°　(e) 0°+90°

图15　5种沟槽表面液滴形态随时间的变化

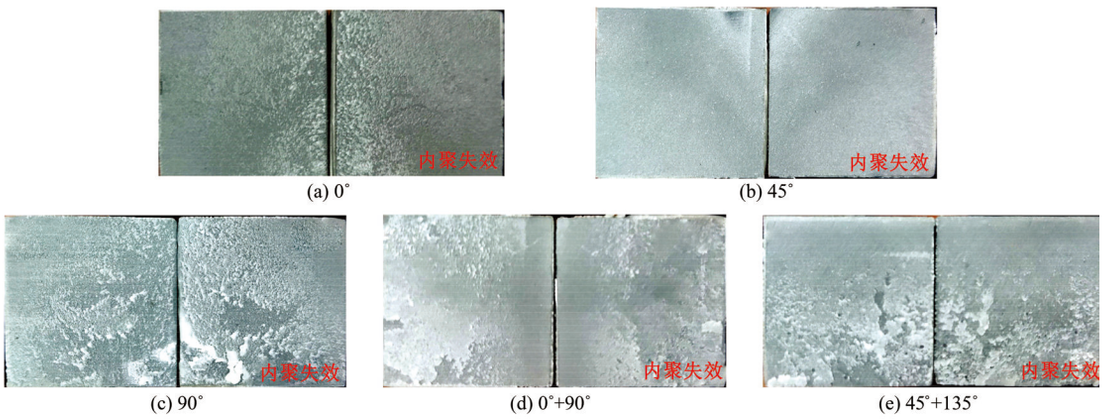
Fig. 15　Morphology of surface droplets with five types of groove



(a) 0°　(b) 45°　(c) 90°　(d) 45°+135°　(e) 0°+90°

图16　剪切载荷下粘接接头的受力分析

Fig. 16　Force analysis of bonding joints under shear loads



(a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 0°+90° (e) 45°+135°

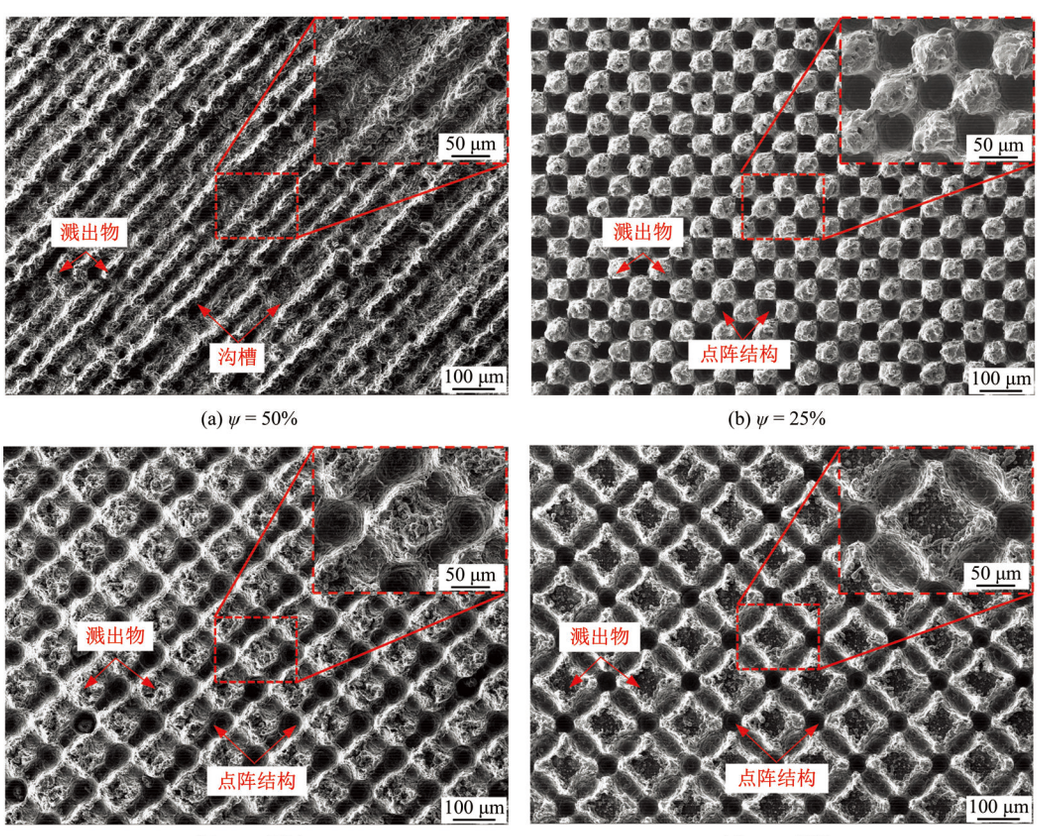
图17 5种表面形状的剪切断口形貌

Fig. 17 Shear fracture morphology for five surface shapes

4 激光重叠率

4.1 微观结构及表面形貌

基于前文的研究结果,本节采用激光能量密度为80.6 J/cm²、45+135°界面形貌,研究激光重叠率ψ对搅拌摩擦粘接接头剪切强度的影响机制。设置激光重叠率分别为50%、25%、0、−25%和−50%,不同激光重叠率下激光处理的表面形貌如图18所示。激光重叠率为50%时,表面形成45°方向上的沟槽结构,如图18(a)所示。当激光重叠率较大时,激光间距较小,形成了激光抛光的效果。此外,界面的三维轮廓也说明了类似的结果:当激光重叠率为50%时,界面的表面粗糙度S_a为10.844 μm,低于其他重叠率。随着激光重叠率的降低,母材表面形成网状分布结构且尺寸逐渐增大。

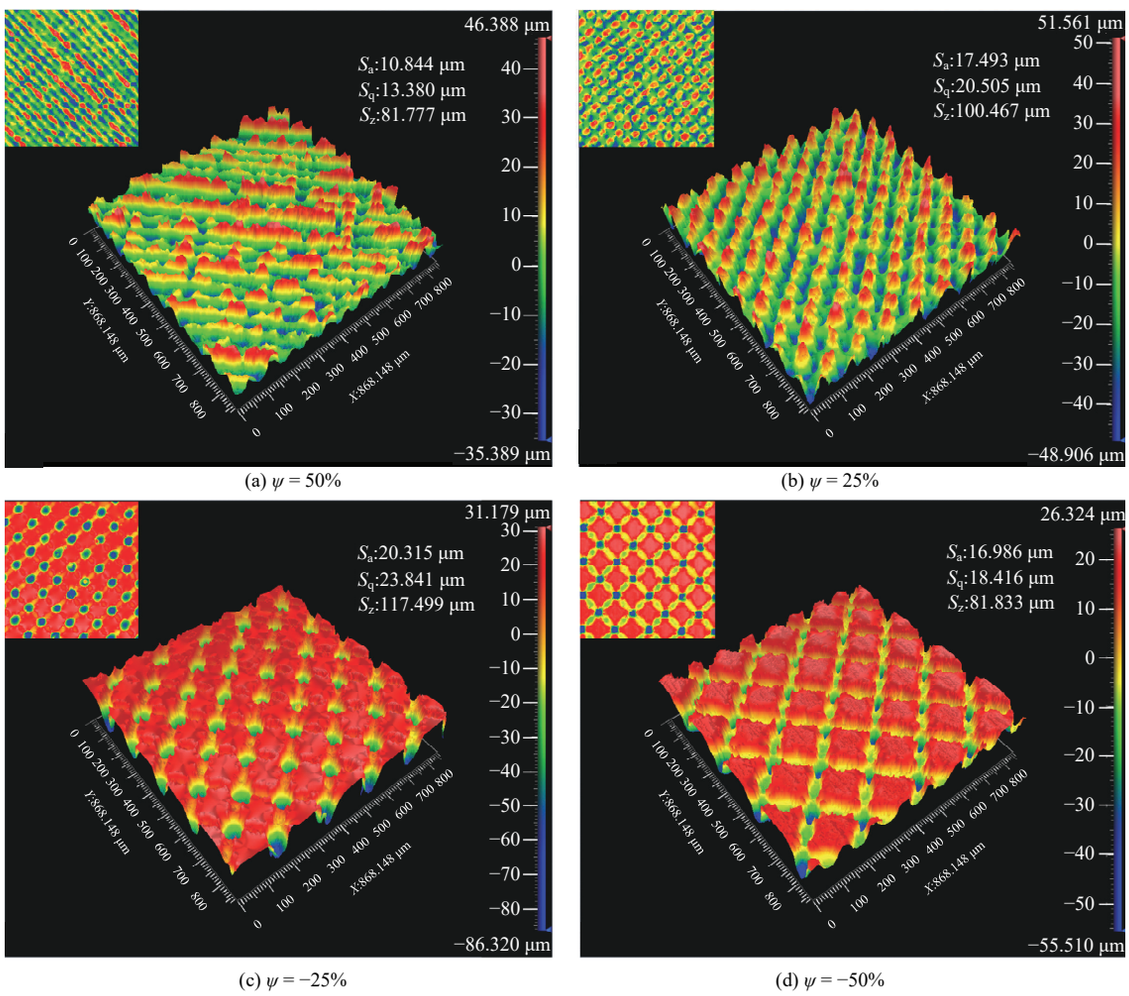


(a) ψ = 50% (b) ψ = 25% (c) ψ = −25% (d) ψ = −50%

图18 4种激光重叠率下粘接接头的表面形貌

Fig. 18 Surface morphology of bonded joints at four laser overlap rates

不同重叠率下界面的表面轮廓如图 19 所示。随着激光重叠率的降低，界面的表面粗糙度 S_a 先增大后减小：当激光重叠率为 0 时，界面的表面粗糙度 S_a 最大（24.572 μm）；随着激光重叠率的进一步降低，界面的粗糙度值下降。这是因为在激光重叠率较低时界面包含大量网格结构，造成界面均方根高度 S_q 下降导致的。



(a) ψ = 50%　(b) ψ = 25%　(c) ψ = −25%　(d) ψ = −50%

图 19　4 种激光重叠率下粘接接头的表面轮廓

Fig. 19　Surface profiles of the bonding joints for four laser overlap rates

4.2　界面浸润性及接头的力学性能

不同激光重叠率下粘接接头界面粘接区域的润湿性和剪切强度如图 20 所示。随着激光重叠率的降低，界面的接触角增加；当激光重叠率为 0 时，进一步降低激光重叠率对界面接触角的影响较小。通过前文的研究可知，激光处理界面具有“荷叶效应”，通过界面微结构与水滴间的表面张力使得界面具有疏水性能，同时轴向载荷使得粘接剂进入激光加工界面的沟槽中，使界面的润湿性能与其剪切强度相关。如图 20(b)所示，在激光重叠率从 50% 降至 −25% 的过程中，界面的剪切强度从 16.02 MPa 升高到 24.51 MPa。这是由于沟槽结构的疏水性能随着激光重叠率的减小而逐渐增强导致的。此外，在激光重叠率从 −25% 降至 −50% 的过程中剪切强度从 24.51 MPa 降至 19.57 MPa，降幅为 20.16%。这通常被认为与界面的均方根高度和界面粗糙度降低有关。

4.3　接头的断口形貌

4 种重叠率下粘接接头的断口形貌如图 21 所示。当激光重叠率为 50% 时，界面的表面粗糙度 S_a 为 10.844 μm，低于其他重叠率水平下的表面粗糙度，接头的宏观断口表现出界面失效的断裂特点，如图 21(a)所示。当激光重叠率为 25% 时，界面的表面粗糙度 S_a 增至 17.493 μm，使得粘接剂与界面的粘合力增强，断口表现出层状分布的

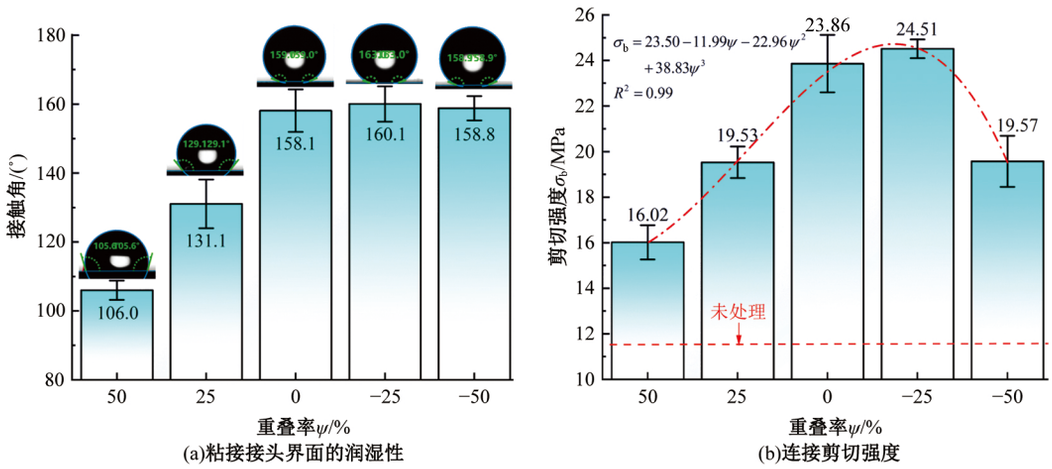


图 20　不同重叠率下粘接接头界面的润湿性和剪切强度

Fig. 20　Wettability and shear strength of the bonding joints at different overlap rates

内聚失效断裂模式,如图 21(b)所示。此当激光重叠率为−25% 和−50% 时,界面处于高水平的表面粗糙度,粘接剂与界面的结合力进一步增强,断口表现出内聚失效断裂模式,如图 21(c)(d)所示。因此,激光重叠率为−25% 和−50% 接头的失效强度明显高于激光重叠率为 25% 和 50% 的接头。

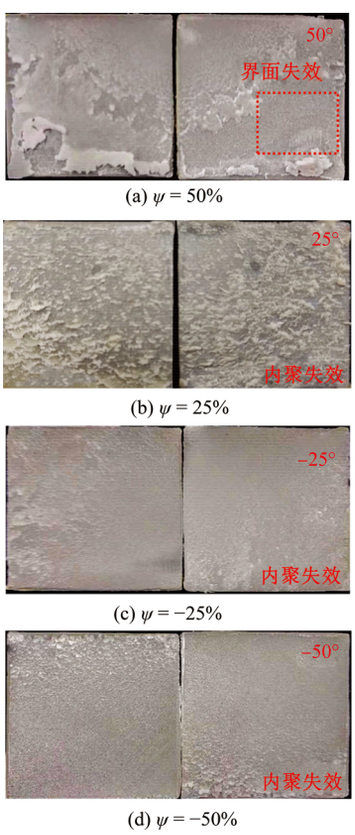


图 21　4种激光重叠率粘接接头的断口形貌

Fig. 21　Fracture morphology of the bonding joints with four overlap rates

5　结　论

(1)粘接接头的剪切强度受到界面表面粗糙度和表面润湿性的共同作用。随着激光能量密度的升高,粘接区域的剪切强度逐渐增大,最高的剪切强度对应的激光能量密度为 82.6 J/cm²;继续提高激光能量密度,会导致粘接界面的表面粗糙度过大,抑制粘接剂的流动,使接头的剪切强度降低。

(2)针对单一沟槽的胶层表面,随着沟槽角度从 0°增加到 90°,接头的剪切强度从 19.57 MPa 降至 16.36 MPa。相较于单一方向的接头,交叉加工沟槽有效地提高了结构的剪切强度,其中 45°+135°沟槽的胶层与界面形成合力,其剪切强度相较于 0°+90° 接头(16.36 MPa)提高了 14.16%。

(3)随着激光重叠率的降低,粘接界面的表面粗糙度增加。在激光重叠率 ψ 从 50% 降至−25% 的过程中,界面的剪切强度从 16.02 MPa 升高到 24.51 MPa。随着激光重叠率的进一步增加,界面粗糙度降低。在激光重叠率 ψ 从−25% 降至−50% 的过程中,剪切强度降低了 20.16%。

(4)针对激光表面处理的铝-铝粘接接头,采用激光能量密度为 82.6 J/cm²、45°+135°的界面形貌、激光重叠率为−25% 的工艺参数获得最高的剪切强度(24.51 MPa),相较于轧制表面(11.74 MPa)提升了 108.7%。

参考文献:

[1] Qbau N, Nam N D, Hien N T, et al. Development

of light weight high strength aluminum alloy for selective laser melting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 14075-14081.

[2] 王登峰, 陈宏利, 那景新, 等. 单双搭接接头经高温老化后的失效对比[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(2): 346-354.
Wang Deng-feng, Chen Hong-li, Na Jing-xin, et al. Failure comparison of single and double lap joints after high temperature aging[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(2): 346-354.

[3] Martínez L V, Vargas I S, Cruz G C E, et al. Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 160-166.

[4] Li G, Lei M, Liang C, et al. Improving adhesive bonding of Al alloy by laser-induced micro&ndash [J]. Nano Structures, 2022, 12(3): 12031199.

[5] Guo L, Liu J, Xia H, et al. Effects of surface treatment and adhesive thickness on the shear strength of precision bonded joints[J]. Polymer Testing, 2021, 94: 107063.

[6] Rudawska A, Zaleski K, Miturska I, et al. Effect of the application of different surface treatment methods on the strength of titanium alloy sheet adhesive lap joints[J]. 2019, 12(24): 12244173.

[7] Min J, Wan H, Carlson B E, et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 128: 106188.

[8] Wan H, Min J, Lin J, et al. Effect of laser spot overlap ratio on surface characteristics and adhesive bonding strength of an Al alloy processed by nanosecond pulsed laser[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 555-565.

[9] Xie Y, Yang B, Lu L, et al. Shear strength of bonded joints of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates enhanced by a two-step laser surface treatment [J]. Composite Structures, 2020, 232: 111559.

[10] Na J X, Mu W L, Qin G F, et al. Effect of temperature on the mechanical properties of adhesively bonded basalt FRP-aluminum alloy joints in the automotive industry[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 85: 138-148.

[11] Qin G, Na J, Mu W, et al. Effect of thermal cycling on the degradation of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy joints for automobiles[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 95: 102439.

[12] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces [J]. Planta, 1997, 202(1): 1-8.

[13] Andarabi A A, Shelesh N K, Chakherlou T N. The effect of laser surface structuring patterns on the interfacial resistance of aluminum joints bonded with epoxy adhesive[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022, 114: 103101.

[14] Fan Z, Wang R, Mei X, et al. Microstructure evolution in yttria stabilized zirconia during laser hybrid induction modification [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 810: 151898.

[15] Guo S, Carlson B, Hector L, et al. Increasing strength and fracture toughness of AA7075-T6 adhesively-bonded joints with laser ablation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 368-379.

[16] Feng Z, Zhao H, Tan C, et al. Nanosecond laser ablation for improving the strength of CFRTP and aluminum alloy adhesively bonded joints[J]. Composite Structures, 2021, 274: 114369.