

·激光物理·

## 基于激光毛化技术的 5052 铝合金粘接试验研究\*

徐艳龙<sup>1</sup>, 李文戈<sup>1</sup>, 喻忠翰<sup>1</sup>, 赵远涛<sup>1</sup>, 高峰<sup>1</sup>, 谢烯炼<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2. 南京康尼机电股份有限公司, 南京 210023)

**摘 要:** 为了提高 5052 铝合金的粘接性能, 利用脉冲光纤激光的短脉冲和高峰值功率的特性, 对铝合金试件进行了激光毛化试验研究。通过正交实验法, 研究了平均功率、扫描速度、脉冲频率和脉冲宽度等工艺参数对激光毛化质量的影响, 以及各工艺参数的影响权重, 并求得最佳工艺参数, 最佳工艺参数为平均功率 90 W、扫描速度 10 mm/s、脉冲频率 1000 kHz、脉冲宽度 200 ns。根据优化后的工艺参数, 加工获得了粗糙度 2.35  $\mu\text{m}$ , 然后对激光毛化后的铝合金试件进行单搭接拉伸试验, 研究发现粘接强度随着粗糙度的增大而增大, 当粗糙度到达一定程度时, 粘接强度反而会随着粗糙度的增大而减小。另外, 粘接强度还跟铝合金表面的微织构的类型及疏密程度都有很大关系。

**关键词:** 激光毛化; 工艺参数; 正交实验; 单搭接拉伸试验

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210283

## Research on bonding test of 5052 aluminum alloy based on laser texturing technology

Xu Yanlong<sup>1</sup>, Li Wenge<sup>1</sup>, Yu Zhonghan<sup>1</sup>, Zhao Yuantao<sup>1</sup>, Gao Feng<sup>1</sup>, Xie Xilian<sup>2</sup>

(1. Merchant Marine College Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Nanjing Kangni Electromechanical Co., Ltd., Nanjing 210023, China)

**Abstract:** To improve the bonding performance of 5052 aluminum alloy, the laser texturing experiment on aluminum alloy specimens was carried out by using the short pulse and high peak power characteristics of pulsed fiber laser. Through the orthogonal experiment method, the effects of process parameters such as the average power, scanning speed, pulse frequency, pulse width and other parameters on the quality of laser texturing, as well as the influence weight of each process parameter, and the best process parameters are obtained. The best process parameters are average power 90 W, scanning speed 10mm/s, pulse frequency 1000 kHz, and pulse width 200 ns. According to the optimized parameters, a good area with roughness 2.35  $\mu\text{m}$  is obtained. Then a single-lap tensile test on the aluminum alloy specimens after laser texturing was carried out. The study found that the bonding strength would increase with the increase of roughness, when the roughness reached a certain level, the bonding strength would decrease with the increase of roughness. In addition, the bonding strength is also closely related to the type and density of the microtexture on the surface of the aluminum alloy.

**Key words:** laser texturing, process parameter, orthogonal experiment, single-lap tensile test

我国提出力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。要实现碳中和的目标, 需要整合现有的新技术、新材料, 包括碳捕获技术、环保技术、节能减排技术等。其中, 汽车轻量化是实现节能减排十分重要的手段之一, 研究表明, 汽车每减重 100 kg, 可节省燃油 0.3~0.5 L/(100 km), 减少 CO<sub>2</sub> 排放 8~11 g/(100 km)<sup>[2]</sup>。汽车轻量化的技术体系包括材料轻量化、结构轻量化及由于新材料和新结构的应用带来的新制造工艺等<sup>[3]</sup>。其中采用轻质材料是结构和工艺优化的基础和前提, 在众多的轻质材料中, 铝合金因具有低密度、加工性能好、抗腐蚀性能强等优点成为轻量化车身制造的主要材料<sup>[4]</sup>。当前, 对铝合金材料的连接主要有机械连接和胶粘剂粘接<sup>[5-6]</sup>。机械连接主

\* 收稿日期: 2021-09-03; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52072236, 52002242)

联系方式: 徐艳龙, lyxu@shmtu.edu.cn.

通信作者: 李文戈, wgli@shmtu.edu.cn.

要包含焊接、铆接等方式,但是单纯使用机械连接容易造成应力集中,且连接处容易出现变形,产生腐蚀等问题。胶接是一种在不破坏连接母材的情况下对同种或异种材料进行连接的一种技术,相比机械连接方式,胶接具有应力分布均匀、耐腐蚀性能和耐疲劳性能好、密封性好的优点<sup>[7]</sup>。

铝合金表面的粗糙度对其粘接性能有比较大的影响,增大被粘接表面的粗糙度可以增大粘接能,进而可以提高粘接界面的性能<sup>[8]</sup>。当前铝合金的毛化方法主要有喷丸毛化、电火花毛化和激光毛化等,喷丸毛化主要存在噪声大、粉尘污染严重、功耗和设备成本较高等问题,并且加工时受材料硬度、喷丸尺寸和冲击速率等因素的影响,毛化坑点分布具有随机性。电火花毛化的形貌均匀性和重复性比喷丸毛化好,但也存在着耗电量大、维修成本高和污染严重的问题<sup>[9]</sup>。为探索一种低能耗、清洁无污染的毛化方案,激光毛化技术引起了人们的关注<sup>[10-12]</sup>。激光毛化技术是采用高能量密度、窄脉冲宽度的脉冲激光辐照材料表面,使材料出现熔化甚至气化等离子体现象<sup>[13]</sup>,在材料表面形成烧蚀坑点,从而改变材料表面形貌及性能的激光加工技术。通过激光毛化的手段改变铝合金表面的粗糙度及性能正受到国内外学者越来越多的关注。2009年,蔡春波等人<sup>[14]</sup>通过激光毛化的手段对3003铝合金板进行不同变形量的冷轧,利用取向分布函数探讨了3003铝合金变形织构随冷轧变形量的变化过程;2019年,陈熾等人<sup>[9]</sup>对3A21铝合金表面进行激光毛化,探究了毛化后的坑点形貌演变规律。2020年,杨文锋等人<sup>[15]</sup>对民用飞机的铝合金蒙皮进行了激光织构化处理,在2024-T3铝合金表面刻蚀出平行线、正方形和菱形这3种织构表面,评价了它们的浸润性,并测试了其表面环氧涂层的附着力。2019年,Seung Jai Won等人<sup>[16]</sup>研究了激光能量密度和激光脉冲数量对铝合金表面形貌和性能的影响;同年,G. V. Kuznetsov等人<sup>[17]</sup>使用纳秒级脉冲激光对铝镁合金表面进行激光毛化,得到有序且各向异性的表面微织构,并证明了接触角滞后不仅决定了接触角与平衡之间的偏差,还决定了液滴与表面之间的粘附力,液滴状态以及润湿性;2020年,Xikang Zhou等人<sup>[18]</sup>对铝合金板选择性激光毛化制备了由非对称向阶梯单元组成的周期性阵列型超疏水表面,首次赋予了四向各向异性液滴的滑移特性。

本文采用脉冲光纤激光对5052铝合金表面进行毛化处理,利用正交试验法分析了不同激光工艺参数下铝合金表面的粗糙度,以及各工艺参数的影响权重,并求得最佳工艺参数。然后对铝合金试件进行了单搭接拉伸试验,并分析了铝合金表面的粗糙度以及微织构与粘接强度之间的关系。

## 1 激光毛化机理

激光毛化是一个快速、非平衡的过程,高能量密度的脉冲激光照射在材料表面后,与表层材料接触的区域会在极短时间内局部受热熔化形成熔池,熔池表面存在很高的温度梯度,因此会产生张力梯度,最终在表面形成具有一定形貌的结构。激光毛化原理如图1所示。

熔池内的热量通过热传导在材料里面扩散,对于各向同性的均质材料,热传导偏微分方程可表示为<sup>[19-20]</sup>

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + Q(x, y, z) \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为材料密度; $c$ 为定压比热容; $T$ 为温度; $t$ 为时间; $\lambda$ 为材料的热导率; $Q$ 为材料单位时间内单位体积的发热量。激光毛化时一般不会有体积热源,即 $Q=0$ 。激光在材料的表层被吸收,是面热源。在 $\lambda$ 为常数、不随温度与位置而变化的情况下,热传导方程可以简化为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为材料的热扩散系数,且 $\alpha = \lambda/\rho c$ 。式(2)按照 $x, y, z$ 可以拆分为

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_x}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} \\ \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_y}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_y}{\partial y^2} \\ \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_z}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} \end{cases} \quad (3)$$

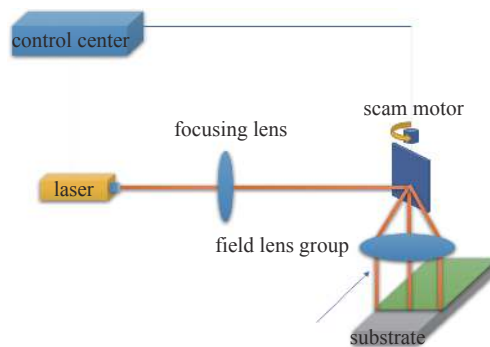


Fig. 1 Schematic diagram of laser texturing

图1 激光毛化原理图

激光进行毛化处理时,激光照射到金属表层材料时,横向受热尺寸要比纵向受热尺寸大,故可以近似看成一维热传导来处理,并可以将表层金属材料看成被均匀加热的无限大物体,则式(3)可简化为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_z}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} \quad (4)$$

在激光毛化过程中,如果忽略激光照射区域因热对流、热辐射导致的能量损失,没有与激光接触的区域表层材料设为绝缘边界,则激光照射区域沿法线方向 $n$ 的温度梯度为

$$\alpha_a P = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5)$$

式中: $P$ 为照射到金属材料的激光功率密度; $\alpha_a$ 为金属表层材料对激光的吸收率。

假设照射到金属表层材料的脉冲激光能量分布保持恒定,且空间上呈现均匀分布状态,则有

$$P(t) = \begin{cases} -P, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

此时,边界条件可表示为

$$\begin{cases} z=0 - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_a P \\ z=\infty, t=0, T=0 \end{cases} \quad (7)$$

式(4),(6)和(7)的解为

$$T(z,t) = \frac{2\alpha_a P \sqrt{\alpha t}}{\lambda} \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (8)$$

式中ierfc为互补误差函数,其中

$$\text{ierfc}(x) = \int_x^0 \text{erfc}(s) ds \quad (9)$$

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-s^2} ds \quad (10)$$

当 $z=0$ 时,此时即为金属表面的温度

$$T(0,t) = \frac{2\alpha_a P}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \quad (11)$$

通过式(11)可以看出激光的功率密度以及辐照时间与材料表面的温度呈正相关。

通过上述的理论分析,可以发现,激光的工艺参数(比如平均功率、扫描速度、脉冲频率、脉冲宽度等)对激光毛化过程有比较大的影响,各参数的影响权重需要做进一步的试验验证。

## 2 激光毛化试验

### 2.1 试验装置

本次试验采用的装置包括脉冲光纤激光器(波长 1064 nm, 功率 100 W)、控制系统、扫描振镜、机械手臂、工作台等。其中,脉冲光纤激光器的最大输出功率为 100 W,脉冲重复频率 1000~2000 kHz,脉冲宽度 10~350 ns,清洗宽度 1~100 mm。激光毛化试验平台如图 2 所示。

### 2.2 正交试验

铝合金试件激光毛化的工艺参数存在多因素水平,对毛化效果的影响程度也不相同,为了确定各个因素的影响主次关系,优化因素的搭配,得到最优的工艺参数组合,本文设计正交试验进行研究。激光毛化的评价指标主要跟试件表面的粗糙度值有关,应考虑激光工艺参数对试件表面的粗糙度

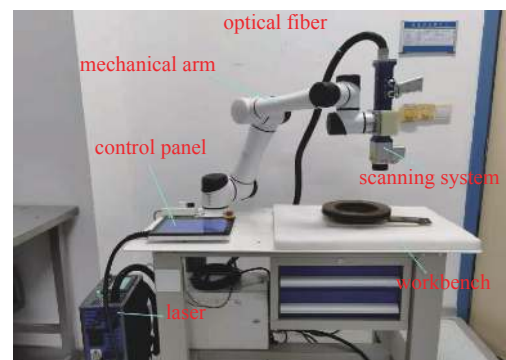


Fig. 2 Laser texturing test platform

图 2 激光毛化试验平台

的影响,得出最优的工艺参数以得到最好的毛化效果。为了不影响激光毛化的试验效果,在激光毛化前将铝合金试件放入丙酮溶液中并使用超声波清洗机清洗 15 min,去除表面的灰尘、铝屑和油渍等污垢以确保铝合金表面能够较好地吸收激光能量,从而使处理后的表面形貌均匀可靠。本试验选择平均功率( $A$ )、扫描速度( $B$ )、脉冲频率( $C$ )和脉冲宽度( $D$ )4个因素,各因素取3个水平,在已有的单因素结论基础上进行4因素3水平正交试验,选用 $L_9(3^4)$ 正交试验表,因素水平如表1所示。

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level table

level	power/W	scan speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	frequency/kHz	pulse width/ns
1	30	10	500	100
2	60	20	1000	200
3	90	30	1500	300

根据表1中的激光工艺参数进行试验,正交试验设计如表2所示,极差分析如表3所示。

表 2 正交试验设计及结果

Table 2 Orthogonal experimental design and results

number	power/W	scan speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	frequency/kHz	pulse width /ns	surface roughness/ $\mu$ m
1	30	10	500	100	0.661
2	30	20	1000	200	0.383
3	30	30	1500	300	0.413
4	60	10	1000	300	1.540
5	60	20	1500	100	0.394
6	60	30	500	200	0.836
7	90	10	1500	200	2.270
8	90	20	500	300	1.221
9	90	30	1000	100	1.810

表 3 极差分析

Table 3 Range analysis

project	surface roughness/ $\mu$ m			
	power $A$	scan speed $B$	frequency $C$	pulse width $D$
K1	0.486	1.490	0.906	0.955
K2	0.923	0.666	1.244	1.163
K3	1.767	1.020	1.026	1.058
range	1.283	0.824	0.338	0.208

根据表3的极差分析结果可以得知,通过各因素的极差值,可以得到这4个因素对表面粗糙度的影响顺序是 $A>B>C>D$ ,即平均功率 $A$ 影响最大,脉冲宽度影响最小。要保证试件的粘接强度,所以表面粗糙度稍大更好,即产生最优的条件是 $A_3B_1C_2D_2$ 。

根据正交试验得到的最优工艺参数为平均功率 90 W、扫描速度 10 mm/s、脉冲频率 1000 kHz、脉冲宽度 200 ns,对铝合金试件进行重复 5 次激光毛化试验,然后测得平均粗糙度为 2.35  $\mu$ m。本试验还对比了未经任何处理的铝合金试件和传统的砂纸打磨方式处理的铝合金试件,打磨时使用的砂纸型号为 80#。三种方式下分别测得平均粗糙度值如表4所示。

### 2.3 微观形貌

利用金相显微镜观察激光毛化后的铝合金试件,在放大 100 倍的观测效果下,其形貌如图3所示。

从图3金相显微镜形貌图可以看到,铝合金试件在激光毛化后会形成很多凹坑,将毛化后的试件跟没有做激光处理的试件对比可知,这些凹坑是由脉冲激光的一个个脉冲造成的。凹坑的深浅和疏密程度跟激光的工艺参数有关。通过测量发现,与未处理时的表面粗糙度值相比,经激光毛化后的铝合金试件表面粗糙度值都有着不同程

表 4 3种方式下的粗糙度值

Table 4 Roughness value of three types

samples	surface roughness/ $\mu$ m
no treatment	0.38
80# sandpaper polishing	3.2
optimal parameter laser texturing	2.35

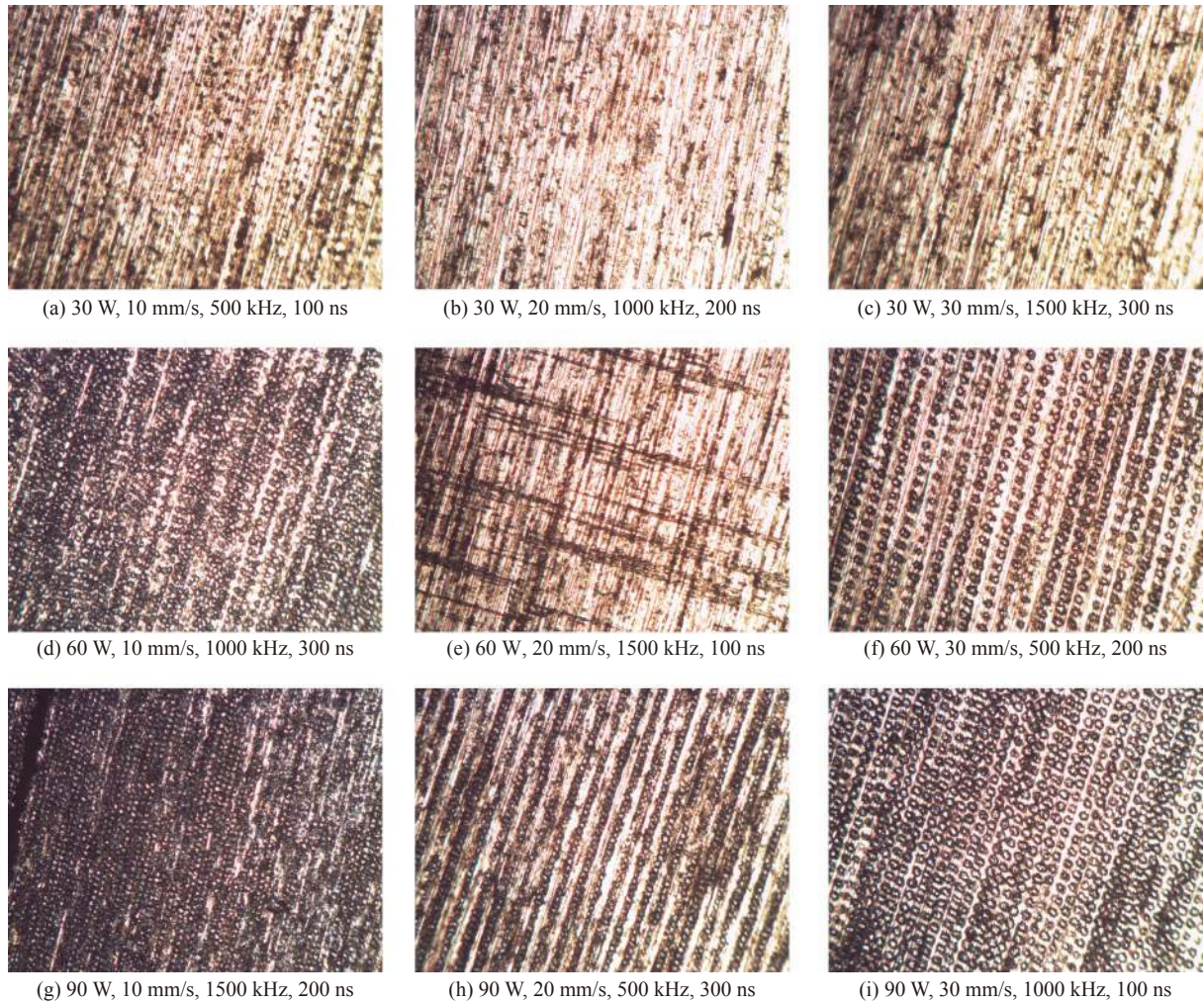


Fig. 3 Topography observed by metallurgical microscope

图 3 金相显微镜形貌图

度的增加。从上图对比可以发现,随着激光功率的增加,凹坑的深度增加、尺寸变大,这是由于激光功率增加之后,作用于铝合金表面的单脉冲能量变大;随着扫描速度的增加,凹坑的密度变得稀疏,这是因为扫描速度变大之后,单位面积上的脉冲数减少了;随着脉冲频率的增加,凹坑的密度变大,这和扫描速度是呈负相关的,脉冲频率增加,单位面积上的脉冲数增加了;而随着脉冲宽度的增加,凹坑的尺寸变大,深度也有所增大,原因是单个脉冲作用的时间增加了,单脉冲的能量变大。所以通过改变激光功率、扫描速率、脉冲频率和脉冲宽度会影响铝合金试件表面的粗糙度。

将利用最优工艺参数激光毛化后的试件放在扫描电镜下观察,如图 4(a)所示。从图中可以看出铝合金表面的氧化膜被去除,而且在铝合金表面留下了明显的轮廓近似为圆形的凹坑,凹坑的四周是凸起的边缘,凹坑的直径大约  $30\ \mu\text{m}$ ,凹坑与凹坑之间有部分搭接。图 4(b)和图 4(c)分别是未经处理的铝合金试件和 80#砂纸打磨后的铝合

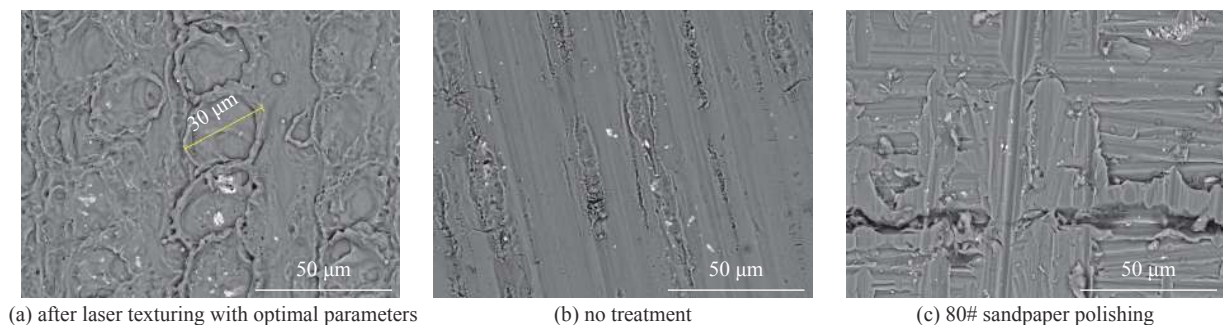


Fig. 4 Micro-topography images observed by SEM

图 4 SEM 微观形貌图

金试件扫描电镜微观形貌图。图 4(b)可以看到未经处理的铝合金试件表面纹理比较平滑,其纹理为铝合金生产过程中形成的拉伸状纹理;图 4(c)为砂纸打磨后的形貌,铝合金表面的氧化膜被破坏,并在其内部结构上留下了很多不规则的沟壑,表面显得凹凸不平,起伏很大。打磨后的表面形貌是毫无规则的,这是打磨处理的一大特征。

### 3 单搭接拉伸试验

#### 3.1 单搭接拉伸试验准备

单搭接拉伸试验是一种常见的力学试验,本试验的单搭接拉伸试件的制备具体步骤为:(1)铝合金试件激光毛化处理;(2)相同工艺参数处理的两块铝合金试件进行粘接;(3)粘接的铝合金试件烘干固化成型。试件的尺寸根据标准 GB/T 7124-2008 确定,具体尺寸和搭接方式如图 5 所示。搭接板件的长度为 100 mm,宽度为 25 mm,厚度为 1.6 mm,胶接区域的长度为 12.5 mm,胶层厚度为 0.2 mm。

本次试验采用的是市场上常见的 5052 铝合金作为单搭接拉伸试件,其力学性能如表 5 所示。

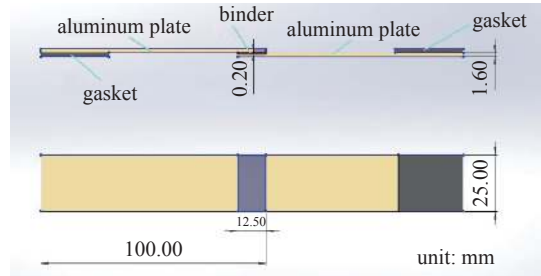


Fig. 5 Size of specimen

图 5 试件尺寸

表 5 5052 铝合金力学性能参数

Table 5 Mechanical properties of 5052 aluminum alloy

density/(g·cm <sup>-3</sup> )	elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	yield strength/MPa
2.68	69	0.32	65

由于中温固化环氧树脂结构胶粘剂相较于其他胶粘剂具有连接强度高和固化时间短的优点,更适用于汽车车身上的连接,因此选用黑龙江石油化工有限公司的 J-69F1 环氧树脂胶膜作为试验用胶粘剂,此款胶膜为高品质的环氧树脂胶,参数如表 6 所示。

表 6 胶粘剂材料参数

Table 6 Material parameters of adhesive

component	curing temperature/°C	density/(kg·m <sup>-3</sup> )	curing time/min	Poisson's ratio
J-69F1 epoxy resin	130	1200	75	0.12

#### 3.2 单搭接拉伸试验结果

分别对未做处理的 5 组试件(A 组)、80#砂纸打磨后的 5 组试件(B 组)和最优激光工艺参数毛化处理的 5 组试件(C 组)进行单搭接拉伸试验,试验得出的数据如表 7 所示。

表 7 拉伸剪切试验

Table 7 Tensile shear test

samples	number	failure load/N	tensile shear strength/MPa	average tensile shear strength/MPa
no treatment	1	6033.89	14.7	14.12
	2	5805.84	14.3	
	3	5869.37	14.2	
	4	5785.77	13.8	
	5	5937.81	13.6	
80# sandpaper polishing	1	7269.78	21.77	20.88
	2	5922.89	19.42	
	3	6877.25	21.16	
	4	7333.92	22.04	
	5	6237.23	20.03	
optimal parameter laser texturing	1	8726.94	24.39	24.72
	2	8108.42	24.94	
	3	8242.04	25.17	
	4	7625.57	23.46	
	5	8363.43	25.62	

图6给出了3组铝合金试件表面粗糙度值与单搭接拉伸剪切强度的对应关系,从图中可以看出,经80#砂纸打磨后的铝合金试件的表面粗糙度最大为 $3.2\ \mu\text{m}$ ,但拉伸剪切强度最高的是经最优激光工艺参数毛化处理的铝合金试件,最大拉伸剪切强度为 $24.72\ \text{MPa}$ 。进一步分析经激光毛化处理的铝合金表面出现了许多凹坑,当液体胶粘剂接触到充满凹坑的铝合金表面时,胶粘剂会渗入到这些凹坑之中,形成“胶钉”,产生锚固作用,使胶层与被粘表面结合得更为牢靠,这有助于提高铝合金表面的粘接强度。使用砂纸打磨后的铝合金表面形成了很多不规则的沟壑,表面显得凹凸不平,虽然其粗糙度值增大了,但是有很多纤细的沟槽,液体的胶粘剂是具有一定粘度的,对于纤细的沟槽是不容易进入的,这就造成了实际粘接面积小于理论粘接面积,反而会使粘接强度下降。

#### 4 结论

本文利用脉冲光纤激光的短脉冲和高峰值功率的特性,对铝合金试件进行了激光毛化试验研究。通过正交试验法得出了最优工艺参数为平均功率 $90\ \text{W}$ 、扫描速度 $10\ \text{mm/s}$ 、脉冲频率 $1000\ \text{kHz}$ 和脉冲宽度 $200\ \text{ns}$ ,利用最优工艺参数,对铝合金试件进行激光毛化试验,测得毛化后的表面粗糙度为 $2.35\ \mu\text{m}$ 。然后分别对未做任何处理的试件、80#砂纸打磨后的试件和最优激光工艺参数毛化处理的试件进行单搭接拉伸试验,试验结果表明增大被粘接表面的粗糙度可以增大粘接强度,当粗糙度到达一定程度时,粘接强度反而会随着粗糙度的增大而减小。另外,粘接强度还跟铝合金表面的微结构的类型以及疏密程度都有很大关系,需要综合分析考虑。

#### 参考文献:

- [1] 朱民. 碳达峰碳中和必将重构中国经济[N]. 联合时报, 2021-05-11(006). (Zhu Min. China's economy will be restructured with carbon peaking and carbon neutraling[N]. United Times, 2021-05-11(006))
- [2] 慕文龙. 湿热-力耦合作用对CFRP/铝合金粘接接头力学性能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2020. (Mu Wenlong. Effect of hygrothermal-loads coupling on the mechanical properties of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy joints[D]. Changchun: Jilin University, 2020)
- [3] Liedl G, Bielak R, Ivanova J, et al. Joining of aluminum and steel in car body manufacturing[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 150-156.
- [4] 石玗, 梁琪, 张刚, 等. 激光毛化对铝/钢电弧熔钎焊接头界面与性能的影响[J]. *焊接学报*, 2020, 41(5): 25-29. (Shi Yu, Liang Qi, Zhang Gang, et al. Effect of laser texturing on the interface and properties of aluminum/steel arc fusion brazed joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(5): 25-29)
- [5] 陈晓辉, 钟志平, 陆辛. 车用铝合金连接技术的研究进展与应用[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(11): 5-8. (Chen Xiaohui, Zhong Zhiping, Lu Xin. Research progress and application of joining technology of aluminum alloy for automobile[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(11): 5-8)
- [6] 李波, 袁挺, 方基永. 车用铝合金结构胶应用研究[J]. *中国胶粘剂*, 2020, 29(11): 52-55. (Li Bo, Yuan Ting, Fang Jiyong. Study on application of structural adhesive for automotive aluminum alloy[J]. *China Adhesives*, 2020, 29(11): 52-55)
- [7] 崔俊佳, 梁伟, 李光耀. AA5182铝合金胶接接头动态剪切性能研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(10): 185-191. (Cui Junjia, Liang Wei, Li Guangyao. Study on dynamic shear properties of AA5182 aluminum alloy adhesive joint[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(10): 185-191)
- [8] 张昱龙. 激光表面处理对金属/复合材料粘接界面的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. (Zhang Yulong. The influences of laser surface treatment on the bonding interface of metal/composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020)
- [9] 陈熾, 王菲, 吴琼, 等. 3A21铝合金表面激光毛化坑点形貌演变规律[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56: 241404. (Chen Xi, Wang Fei, Wu Qiong, et al. Pit morphology evolution law of 3A21 aluminum alloy surface in laser texturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56: 241404)
- [10] Dunn A, Carstensen J V, Wlodarczyk K L, et al. Nanosecond laser texturing for high friction applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 62: 9-16.
- [11] Bonse J, Kirner S V, Griepentrog M, et al. Femtosecond laser texturing of surfaces for tribological applications[J]. *Materials*, 2018, 11: 801.
- [12] Guo J D, Li Y, Lu H L, et al. An effective method of edge deburring for laser surface texturing of Co-Cr-Mo alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(1): 1491-1503.
- [13] 蔡颂, 陈根余, 周聪, 等. 单脉冲激光烧蚀青铜砂轮等离子体物理模型研究[J]. *光学学报*, 2017, 37: 0414001. (Cai Song, Chen Genyu, Zhou Cong, et al. Research of plasma physical model for single pulsed laser ablation of bronze-bond grinding wheel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37: 0414001)
- [14] 蔡春波, 吉泽升, 王国军, 等. 激光毛化对3003铝合金织构及性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(3): 111-114. (Cai Chunbo, Ji Zesheng, Wang Guojun et al. Effect of laser-texturing of cold roll on texture and mechanical properties of 3003 aluminium alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat*

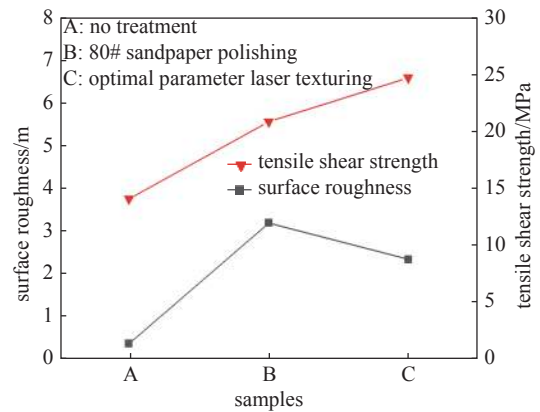


Fig. 6 Comparison diagram of surface roughness and tensile shear strength

图6 表面粗糙度与拉伸剪切强度对照图

- Treatment, 2009, 30(3): 111-114)
- [15] 杨文锋, 侯秋园, 李绍龙, 等. 民机铝合金蒙皮的激光织构化处理[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(8): 492-498. (Yang Wenfeng, Hou Qiuyuan, Li Shaolong, et al. Laser texturing of aluminum alloy used as civil aircraft skin[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(8): 492-498)
- [16] Won S J, Kim H S. Effects of laser parameters on morphological change and surface properties of aluminum alloy in masked laser surface texturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 48: 260-269.
- [17] Kuznetsov G V, Feoktistov D V, Orlova E G, et al. Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 553: 557-566.
- [18] Zhou Xikang, Xue Wei, Liu Wenwen, et al. Quadri-directionally anisotropic droplets sliding surfaces fabricated by selective laser texturing of aluminum alloy plates[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 509: 145406.
- [19] 邹国文. 激光毛化形貌成形机理的数值模拟与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018. (Zou Guowen. Numerical simulation and experimental research on formation mechanism of laser texturing topography[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018)
- [20] 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. (Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics of laser-material interaction[M]. Beijing: China Machine Press, 1996)