

工艺参数对激光清洗 GFRP 脱模剂层影响研究

韩岳旺^{1,2}, 乔红超^{1,3*}, 赵吉宾^{1,3}, 孙博宇^{1,3},
陆莹^{1,3}, 陈燕², 舒坤^{1,2}, 宋健⁴

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2.辽宁科技大学, 机械工程与自动化学院, 鞍山 114051; 3.中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110016;
4.天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

摘要: **目的** 有效去除 GFRP 表面的脱模剂, 保证对玻璃纤维损害降到最低, 并提高表面粗糙度。**方法** 运用正交试验法, 采用红外脉冲激光对玻璃纤维增强树脂基复合材料 (GFRP) 表面喷覆黑漆层的脱模剂层进行去除试验, 研究激光的平均功率 (15、20、25、30 W)、激光扫描速度 (240、250、255、260 mm/s) 和激光脉冲频率 (70、80、90、100 kHz) 对清洗后试件表面形貌和微观组织的影响规律, 分别探讨不同激光参数下对 GFRP 材料表面粗糙度及胶接强度的影响规律。**结果** 在激光参数为平均功率 $P=25$ W、激光扫描速度 $v=255$ mm/s、激光脉冲频率 $f=100$ kHz 下, 可将脱模剂有效去除, 且保留了玻璃纤维的完整性, 同时表面粗糙度值 S_a 由原来的 $0.684\text{ }\mu\text{m}$ 增加到稳定值 $(4.5\pm 0.3)\text{ }\mu\text{m}$ 。随着平均功率的增大, 试件表面粗糙度值 S_a 逐渐增大, 其胶接强度高于未表面处理的胶接强度。随着扫描速度的增大, 试件表面粗糙度值 S_a 先减小、后增大。随着脉冲频率的增大, 试件表面粗糙度值 S_a 逐渐减小。**结论** 最佳试验制备激光清洗工艺参数为平均功率 $P=25$ W、激光扫描速度 $v=255$ mm/s、激光脉冲频率 $f=100$ kHz, 在此参数下能有效去除脱模剂, 玻璃纤维损害降到最低, 并提高表面粗糙度, 有效保证 GFRP 板材表面质量, 同时还有利于提高复合材料之间的胶接强度。该研究结果可为航空领域复合材料脱模剂的激光清洗提供工艺参数参考。

关键词: 激光清洗; GFRP; 脱模剂; 工艺参数; 表面粗糙度

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)11-0419-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.11.036

Study on the Effect of Different Process Parameters on Laser Cleaning of GFRP Release Agent Layer

HAN Yue-wang¹, QIAO Hong-chao^{2,3*}, ZHAO Ji-bin^{2,3}, SUN Bo-yu^{2,3},
LU Ying^{2,3}, CHEN Yan¹, SHU Kun¹, SONG Jian⁴

(1. Liaoning University of Science and Technology, School of Mechanical Engineering and Automation, Anshan 114051, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Institute for Robotics and Intelligent Manufacturing Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 4. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co., Ltd. Tianjin 300462, China)

收稿日期: 2022-09-07; 修订日期: 2023-03-01

Received: 2022-09-07; Revised: 2023-03-01

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB4601600)

Fund: National Key Development Program (2022YFB4601600)

引文格式: 韩岳旺, 乔红超, 赵吉宾, 等. 工艺参数对激光清洗 GFRP 脱模剂层影响研究[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 419-429.

HAN Yue-wang, QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, et al. Study on the Effect of Different Process Parameters on Laser Cleaning of GFRP Release Agent Layer[J]. Surface Technology, 2023, 52(11): 419-429.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: Laser cleaning is an advanced surface pretreatment technology, which can remove pollutants on the surface of composite materials, such as release agent, with minimal damage to the reinforcement phase in the composite materials. Due to the strong light transmission of the release agent, the laser directly irradiated on the release agent is easy to damage the glass fiber. In this paper, the orthogonal experiment method is used to remove the release agent layer with black paint coating on the surface of glass fiber reinforced resin matrix composite (GFRP) by using infrared pulse laser. The purpose is to effectively remove the release agent on the surface of GFRP, ensure that the damage to glass fiber is minimized and improve the surface roughness. Cutting glass fiber resin matrix composites into 25 mm×15 mm×2 mm rectangular test piece quickly and efficiently using advanced water guided laser machine tools, wiped with absolute ethanol and dried in the air. Before the cleaning test, evenly spray a layer of about 100 μm thick on the surface of the test piece black paint layer and natural drying for 5 min. In the test, a 50 W infrared pulse laser with a focal length of 160 mm and a laser spot diameter of 0.85 mm was used. The laser parameters used are average power (15, 20, 25 and 30 W), laser scanning speed (240, 250, 255 and 260 mm/s) and laser pulse frequency (70, 80, 90 and 100 kHz). Then, the surface morphology of the cleaning layer of each specimen was observed by Caikang microscope (XTL-3400C) and the microstructure of the cleaning layer of each specimen was observed by scanning electron microscope (Zeiss EVO10). Use a white light interferometer (ContourGT-X) to detect the surface roughness values at three positions on the cleaning layer surface of each test piece and calculate the average value as the final surface roughness value. When the laser parameters are average power $P=25$ W, laser scanning speed $v=255$ mm/s, and laser pulse frequency $f=100$ kHz, the release agent can be effectively removed, and the integrity of the glass fiber is retained, and the surface roughness S_a changes from the original 0.684 μm increases to a stable value of (4.5 ± 0.3) μm. With the increase of the average power, the surface roughness S_a of the specimen increases gradually, its bonding strength is higher than that without surface treatment; With the increase of scanning speed, the surface roughness S_a of the specimen decreases first and then increases; With the increase of pulse frequency, the surface roughness S_a of the specimen decreases gradually. The optimal experimental preparation laser cleaning process parameters are average power $P=25$ W, laser scanning speed $v=255$ mm/s, and laser pulse frequency $f=100$ kHz. Under these parameters, the mold release agent can be effectively removed, the damage of glass fiber can be minimized, and the surface roughness can be improved to effectively and ensure the surface quality of GFRP sheets. At the same time, it is also conducive to improving the bonding strength between composite materials. The research results can provide a reference for laser cleaning of composite mold release agent in the aviation field.

KEY WORDS: laser cleaning; GFRP; release agent; process parameters; surface quality

随着我国航空工业的发展,玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)因其比强度高、比刚度高、比弹性模量高、质量轻和良好的可设计性等诸多优点^[1],从而满足飞行器材料轻量化的需求,现大量应用于直升机制造领域。在直升机的关键部件之一的桨叶结构中,玻璃纤维增强树脂基复合材料用量达到70%左右^[2]。在生产制造玻璃纤维增强树脂基复合材料过程中,脱模剂是不可或缺的加工助剂,它作为一种功能性材料,可以使橡胶、塑料、弹性体或其他材料与模具之间不发生粘合^[3]。在固化过程中,脱模剂从模具转移到GFRP材料表面,因此成形的GFRP材料表面附着厚度大约有10 μm的脱模剂层。由于提供飞行升力的桨叶工作在复杂交变的气动环境中,桨叶在使用一段时间后,会出现疲劳载荷,导致材料表面大面积脱黏、内部结构损伤及结构整体刚度下降等有害现象^[4],这些带来了严重的安全隐患。目前,多数情况下其损伤采用胶结的方式进行维护与修复,而修补过程中复合材料表面的脱模剂转变成一种造成黏附失效的污染物^[5]。因此,为了满足表面高胶结强度,需要对复合

材料进行表面预处理,去除脱模剂污染层。被称为“21世纪最具有发展潜力的绿色清洗技术”^[6-10]的激光清洗,因其具有成本低、无接触、无污染、精确可控和清洗效率高等^[11-12]特点,能够取代之前面预处理方法如剥离层法^[13-14]、手动研磨法^[15]、软层法^[16-18]或喷砂法^[19],提高复合材料的清洗质量,保护环境,具有巨大的发展前景。

对该材料表面较薄的脱模剂层进行激光清洗时,由于脱模剂的透光性较强,使用的激光功率高时,容易伤及脱模剂层下面的玻璃纤维,导致玻璃纤维断裂,造成玻璃纤维的不完整,因此合理的激光清洗工艺参数将对提高脱模剂层清洗率及降低玻璃纤维损伤产生重要影响。陈素明等^[20]研究了CO₂激光器对T300碳纤维表面漆层清洗质量的影响规律,结果表明,在激光平均功率为40 W、光斑搭接率为65%、扫描次数为1次的激光工艺参数下,材料表面能达到较好的激光清洗质量,而且不会影响材料本身的力学性能。占小红等^[21]运用最大功率为100 W的光纤脉冲激光器清洗CFRP板材,结果显示,激光功率为

25.9 W 和扫描速度为 9 000 mm/s 时, 对复合材料表面形貌有显著的影响。李绍龙等^[22]利用不同的激光功率参数对 GFRP 基体进行了激光清洗, 发现激光表面处理后的附着力效果要比砂纸手工打磨工艺更显著, 最大功率为 40% 下的附着效果最佳。杨文锋等^[23]运用激光波长为 0.355 μm 的紫外激光对层合板材料进行表面处理, 发现在优化了激光功率、扫描速度和间距后, 材料的表面接触角有所下降, 表面自由能有所上升, 有效提高了胶接的结合强度。Zhan 等^[24]研究了激光参数对碳纤维布表面微观结构的影响, 结果表明, 激光功率密度对表面形貌有显著影响, 能够获得有助粘接的连续且完整的纤维表面。

综上所述, 国内外学者对激光清洗在复合材料领域如何得到良好清洗表面质量方面做了大量的研究, 可见该方法的工艺参数有着举足轻重的地位。脱模剂由于具有一定的透光性, 观察前期做过的激光辐射脱模剂层去除试验后, 发现部分激光透过脱模剂层直接烧断了玻璃纤维。针对以上问题, 本文提出一种解决方法, 即利用波长为 1 064 nm 的红外脉冲光纤激光清洗机对喷有一薄层黑漆的 GFRP 表面脱模剂进行激光清洗, 分析不同激光工艺参数对清洗表面质量产生影响的规律, 采用蔡康光学显微镜 (XTL-3400C)、扫描电子显微镜 (Zeiss EVO10)、金相显微镜及白光干涉仪观察清洗后的表面形貌、微观组织及表面粗糙度, 从而获得较优的工艺参数, 旨在为航空领域复合材料脱模剂的激光清洗提供工艺参数参考。

1 试验

1.1 设备

本文所采用设备为微秒红外脉冲光纤激光清洗机, 试验设备如图 1 所示, 主要包括的红外脉冲光纤激光器 (功率为 50 W, 脉宽为 10 μs , 最大频率为 100 kHz)、激光光纤、激光控制系统、聚焦镜、扫描振镜、吸尘器、加工平台、激光扫描系统及 KUKA 机器手臂。该激光器具有强大的复杂曲面加工功能。机械手臂三爪卡盘固定激光扫描振镜, 其功能可实现 X、Y、Z 三轴方向移动, 控制 160 mm 的焦距使

激光光斑投射到加工表面, 完成控制扫描振镜的移动速度和移动方向, 保证激光清洗全方位覆盖。由激光器发出的激光经过光纤、扩束镜到扫描振镜内部的聚焦镜, 经聚焦后焦点处, 激光光斑直径为 0.85 mm。吸尘器用于收集激光清洗过程中产生漂浮的残渣。本文选定的工艺参数: 平均功率为 15、20、25、30、35 W, 扫描速度为 240、250、255、260 mm/s, 脉冲频率为 70、80、90、100 kHz。剪切力的测试采用深圳万测试验设备有限公司生产的 ETM 504C 电子万能试验机。

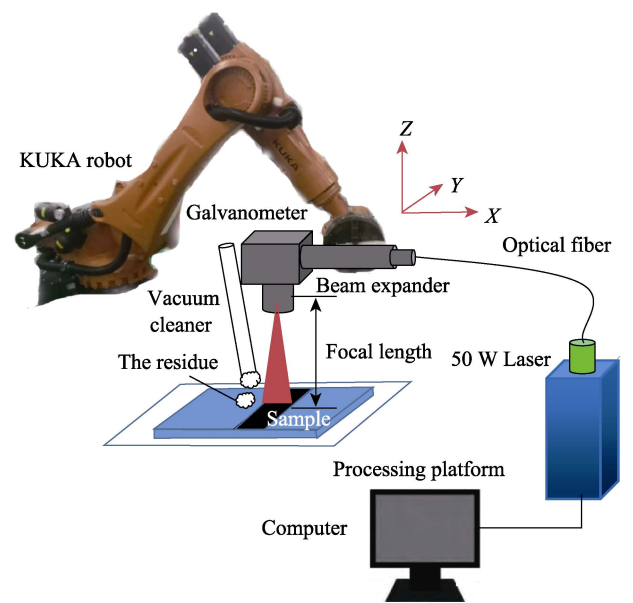


图 1 激光清洗加工设备
Fig.1 Schematic diagram of laser cleaning and processing equipment

1.2 材料

本论文试验所用的试验材料为 GFRP 板材, 由某飞机制造公司提供。用水导激光数控机床切制试件, 尺寸为 25 mm×15 mm×2 mm, 试件外形如图 2a 所示。为了提高测量脱模剂厚度的准确性, 使用树脂热压镶嵌法。将黑色颗粒树脂与竖立的试件混放在一起, 经加热至 130 $^{\circ}\text{C}$, 并施加压力和保温 5 min, 使树脂与试件紧密地粘合一起形成一个圆柱体。接着使用 150 目

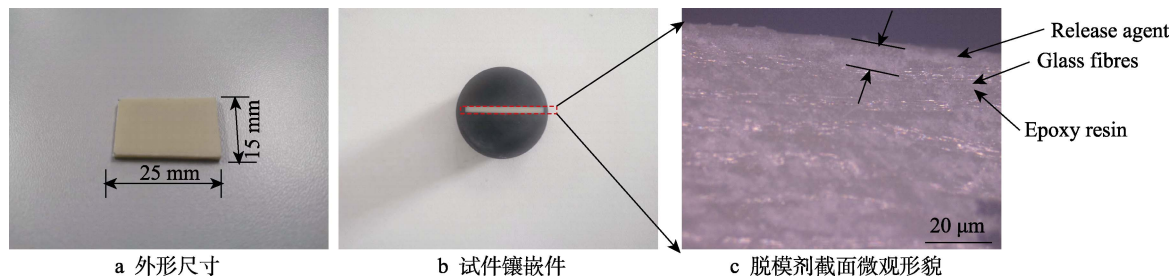


图 2 试件外形与形貌
Fig.2 Shape and appearance of test sample: a) Overall dimensions; b) Test sample insert; c) Micro morphology of release agent section

的砂纸进行研磨,直至露出试件表面,在金相显微镜下观测并测量厚度,如图 2b、c 所示。可以发现,玻璃纤维编织铺设不在同一平面上,脱模剂厚度是不均匀的,而且具有透明性。经测量,脱模剂厚度范围在 5.544~21.827 μm 。所制试件使用无水乙醇擦拭、晾干备用。

1.3 方法及单搭接拉伸剪切试样的制备

为得到均匀黑漆覆盖层,减少试验误差,在清洗试验前对试件进行处理。如图 3 所示,处理过程如下:将试件水平放置,将油漆喷头斜置 45°,距离试件表

面高度 10 cm,使摇匀的油漆充分雾化并覆盖在试件有脱模剂层表面上,生成厚度大约有 30 μm 的油漆覆盖层,然后进行静置自然烘干 5 min。黑漆的作用是增强对红外激光的吸收,减少红外光透射脱模剂层,同时能够吸收激光的能量,瞬间产生高温,间接加热熔化脱模剂。本文选用的激光器中,激光扫描系统是二维激光清洗系统。在激光清洗过程中,激光光束在清洗加工平面上 X 方向的快速扫描移动与在 Y 方向上的“弓”字填充,达到矩形清洗区域内的光斑覆盖。激光清洗过后,用无水乙醇擦拭试件表面,并用超声波清洗 5 min,从而保证检测结果的可靠。

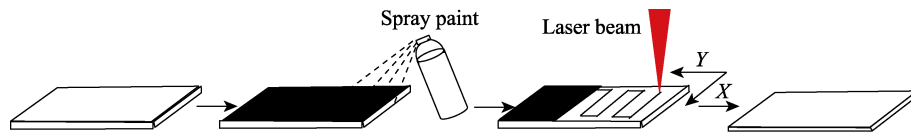


图 3 试件激光清洗过程
Fig.3 Laser cleaning process diagram of test sample

本文试验方法使用正交试验法。影响激光清洗的工艺参数较多,正交试验就是安排多因素试验,以寻求最优参数组合的一种高效率试验设计方法^[25]。激光清洗过程中,主要有 3 个因素会对去除脱模剂效果造成影响,分别为激光平均功率、脉冲频率、激光扫描速度。采用三因素、四水平的正交试验,旨在获得较优的激光清洗的工艺参数,以激光清洗效果为标准。根据 L16 (4³) 三因素四水平正交表设计 16 个试验,试验编号分别为 1~16,其中表 1 的 A、B、C 代表 3 种不同影响因素,1、2、3、4 代表 4 种不同水平,见表 1。表 2 中各列的 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 值分别是各对应因素在第一、第二、第三、第四水平的 4 次试验指标值之和。

在激光清洗后,使用蔡康显微镜 (XTL-3400C) 和扫描电子显微镜 (Zeiss EVO10) 观察表面形貌与微观形貌组织,采用白光干涉仪 (ContourGT-X) 检测试件表面粗糙度,每个编号对应的表面粗糙度值是通过测量 3 个不同位置取得的平均值。综合分析工艺参数对 GFRP 材料表面形貌、微观组织、粗糙度的影响规律,探究能够达到满意的清洗质量下的工艺参数。

表 1 正交试验因素水平
Tab.1 Orthogonal experimental factor level table

	A (average power)/W	B (scanning speed)/(mm·s ⁻¹)	C (pulse frequency) kHz
1	15	240	70
2	20	250	80
3	25	255	90
4	30	260	100

表 2 正交试验结果
Tab.2 Orthogonal experiment result table

No.	A	B	C	$S_a/\mu\text{m}$
1	15	240	70	5.839
2	15	250	80	4.916
3	15	255	90	4.109
4	15	260	100	4.663
5	20	240	80	15.719
6	20	250	70	12.026
7	20	255	100	10.779
8	20	260	90	10.882
9	25	240	90	15.524
10	25	250	100	11.023
11	25	255	70	9.695
12	25	260	80	10.982
13	30	240	100	14.679
14	30	250	90	16.457
15	30	255	80	15.335
16	30	260	70	13.618
K_1	19.527	51.761	41.178	
K_2	49.406	44.422	46.952	
K_3	47.224	39.918	46.972	
K_4	60.089	40.145	41.144	

单搭接拉伸剪切试验的设计根据 GB/T 33334—2016《胶粘剂单搭接剪切性能试验方法(复合材料对复合材料)》^[26]标准进行制定。其原理是通过在基材端部添加垫板,形成几何反对称结构的试样;同时该试样具有用黏接剂粘接固化完毕的搭接区域,在平行于搭接面的轴向拉伸载荷作用下,试件破坏,测出搭接处的剪切应力,然后用式(1)计算剪切强度。制

作单搭接试样步骤: 首先将玻璃纤维复合材料按照图 4 所示尺寸切成单侧试样, 随后按照选定的不同激光工艺参数对胶接区域表面进行处理, 使用无水乙醇清洗激光处理过的表面, 并干燥。然后, 涂敷爱老达 2015 型号 AB 胶水进行胶接, 胶接之前, 将 A、B 胶 1 : 1 混合并搅拌均匀 30 min。将制好未固化的试样

放入真空烤箱中进行固化, 并使用相同厚度垫片控制胶接厚度。在固化过程中, 从室温开始升温, 同时抽真空, 升至 180 ℃ 后进行保温, 并保温 30 min, 最后将固化后的试样在夹持区域使用胶水粘上垫片。基材纤维方向应和试样拉伸载荷方向一致。试样胶接形状尺寸 4 如图所示。

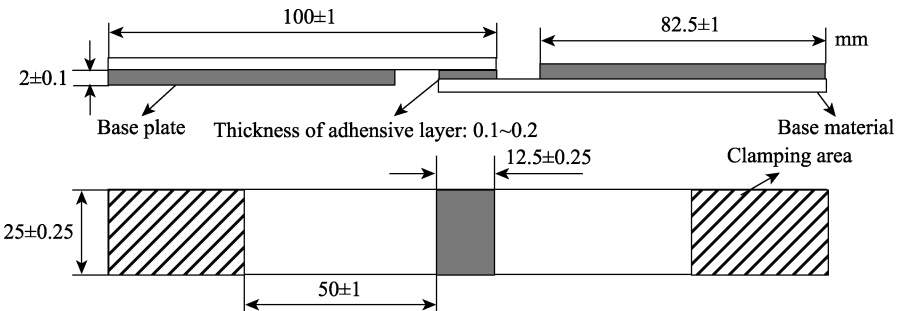


图 4 试样单搭接示意图^[26]
Fig.4 Schematic diagram of single-lap of specimen^[26]

计算拉伸强度 M 的公式如下:

$$M = \frac{F_a}{B \cdot L} \tag{1}$$

式中: M 代表拉伸强度, MPa; F_a 代表试验的最大拉力, N; B 代表粘接区域宽度, mm; L 代表粘接区域长度, mm。

表 3 中编号 B 代表试件无参数表面处理。因为在激光清洗中激光的平均功率影响占主要地位, 所以设计编号 S1~S4 为不同平均功率下进行激光处理。

表 3 单搭接拉伸剪切试验处理参数
Tab.3 Processing parameters of single-lap tensile shear test

No.	Average power/W	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Pulse frequency/kHz	Whether to cleaning
B				No
S1	15	255	100	Yes
S2	20	255	100	Yes
S3	25	255	100	Yes
S4	30	255	100	Yes

2 结果与分析

2.1 激光工艺参数对表面形貌的影响

首先讨论平均功率对清洗效果的影响。计算能量密度公式^[27]如式 (2) 所示。

$$I = \frac{P}{f \cdot A} \tag{2}$$

式中: I 为能量密度; P 为平均功率; f 为脉冲频率; A 为光斑面积。平均功率跟能量密度有关。令激光扫描速度 $v=255$ mm/s, 脉冲频率 $f=100$ kHz, 采用平均功率 15~30 W 进行激光清洗试验, 考察平均功

率对激光清洗的影响, 利用蔡康光学显微镜观察激光清洗后试件表面的形貌, 试验结果如图 5 所示。从式 (2) 可以看出, 平均功率的变化改变了激光的能量密度的大小, 平均功率 P 变小, 能量密度就会减小, 导致试件的表面在单位面积上吸的能量就减少。当采用平均功率为 15 W 对试件进行清洗时, 此时仅有少数裸露玻璃纤维, 脱模剂略显微黄, 氧化程度较少。这主要是因为此时的激光能量太低, 只能烧蚀掉微量脱模剂, 此情况下裸露纤维说明顶部脱模剂层的厚度不同, 脱模剂的清洗效率低。随着平均功率由 15 W 增加到 20 W 时, 能量随之增加, 试件表面玻璃纤维裸露的面积变大, 整体颜色变深, 说明清洗深度在增加, 清洗效率随之提高。图 5d 所示的试样表面玻璃纤维较图 5b, 可清晰看到更多的玻璃纤维, 但颜色变黑, 说明此功率下清洗深度远远超出脱模剂的厚度, 激光能量已经传递到玻璃纤维上, 造成玻璃纤维的完整性遭到破坏, 说明该功率下激光能量太大。反观图 5c, 玻璃纤维不但显露出来, 而且无遭到破坏, 达到了清洗的目的。

其次探究扫描速度、脉冲频率对激光清洗的影响。计算激光光斑搭接率的公式^[28]如式 (3) 所示。

$$K = \left(1 - \frac{v}{D \cdot f}\right) \times 100\% \tag{3}$$

式中: K 为光斑搭接率; v 为扫描速度; f 为激光频率; D 为光斑直径。由式 (3) 可知, 扫描速度和脉冲频率都影响着光斑搭接率的大小, 决定了能量积累, 影响清洗效率。若扫描速度保持不变, 频率越小, 能量积累越少, 而能量密度大。设置平均功率 $P=25$ W, 保持脉冲频率 $f=100$ kHz 不变, 扫描速度分别为 240、250、255、260 mm/s 进行激光清洗试验, 利用蔡康光学显微镜观察激光清洗后试件表面的形貌。从图 6、图 7 可以看出, 不同的扫描速度和频率, 能

量积累有所不同,能量积累严重的,试件表面颜色就越深。与此同时,大部分玻璃纤维显露出来,可以判断脱模剂基本清洗掉,但从图 6a、d、b 和图 7a、b、

d 可以观察到玻璃纤维处有黑斑出现,而且周围颜色比原材料较深,环氧树脂发生老化现象程度深,说明能量密度较大,基体被破坏。图 6c 和图 7c 玻璃纤

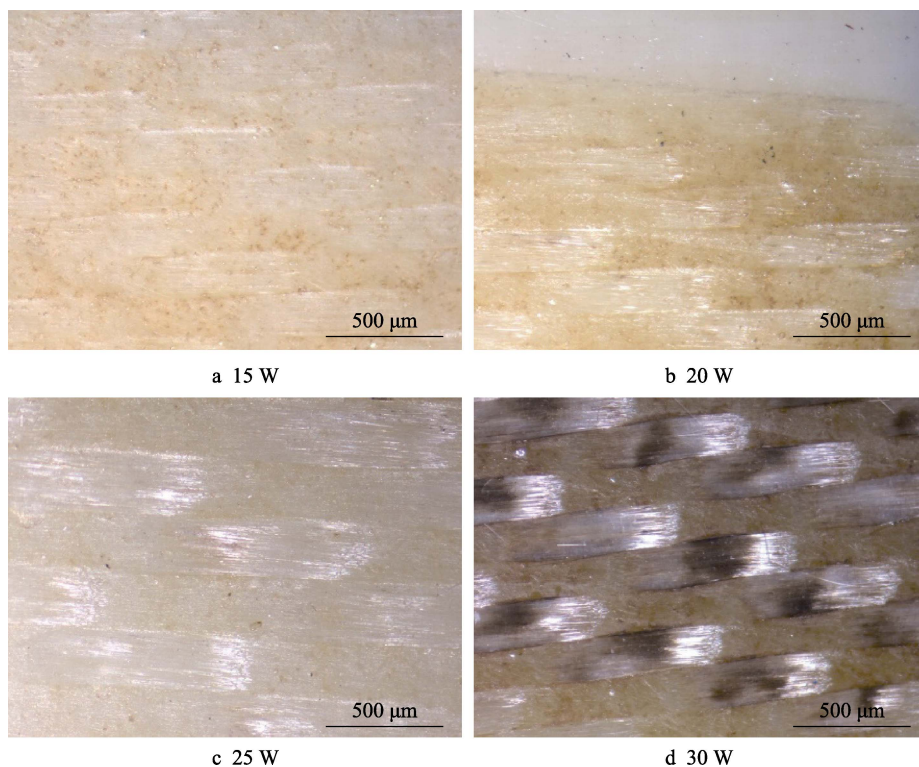


图 5 不同平均功率清洗后试件表面形貌

Fig.5 Surface morphology of specimens after cleaning with different average power

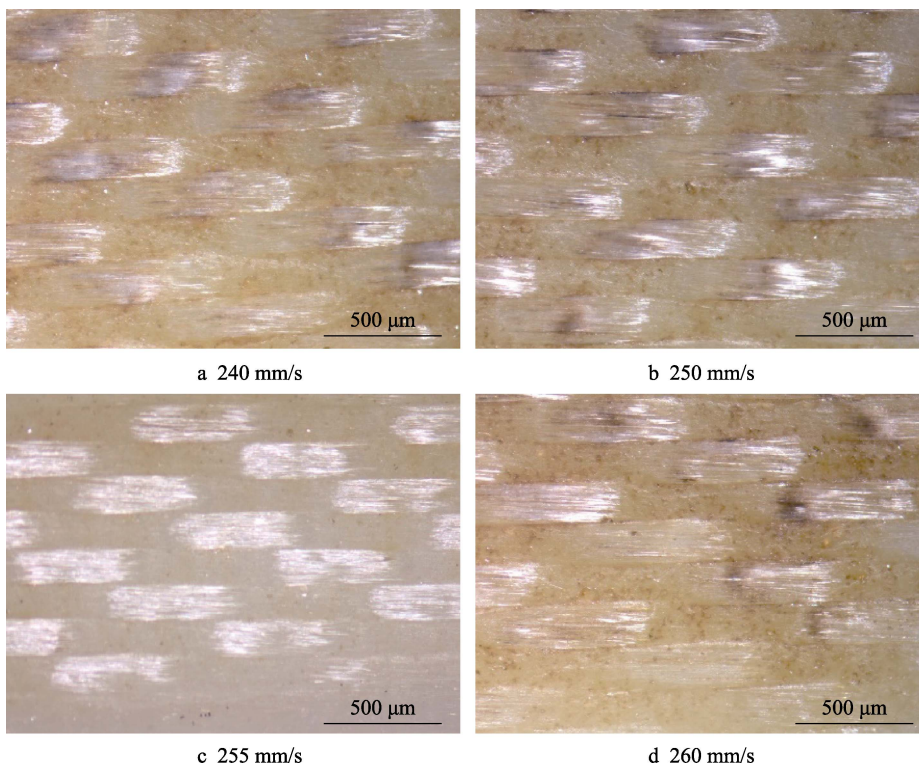


图 6 不同扫描速度清洗后试件表面形貌

Fig.6 Surface morphology of specimens after cleaning with different scanning speeds

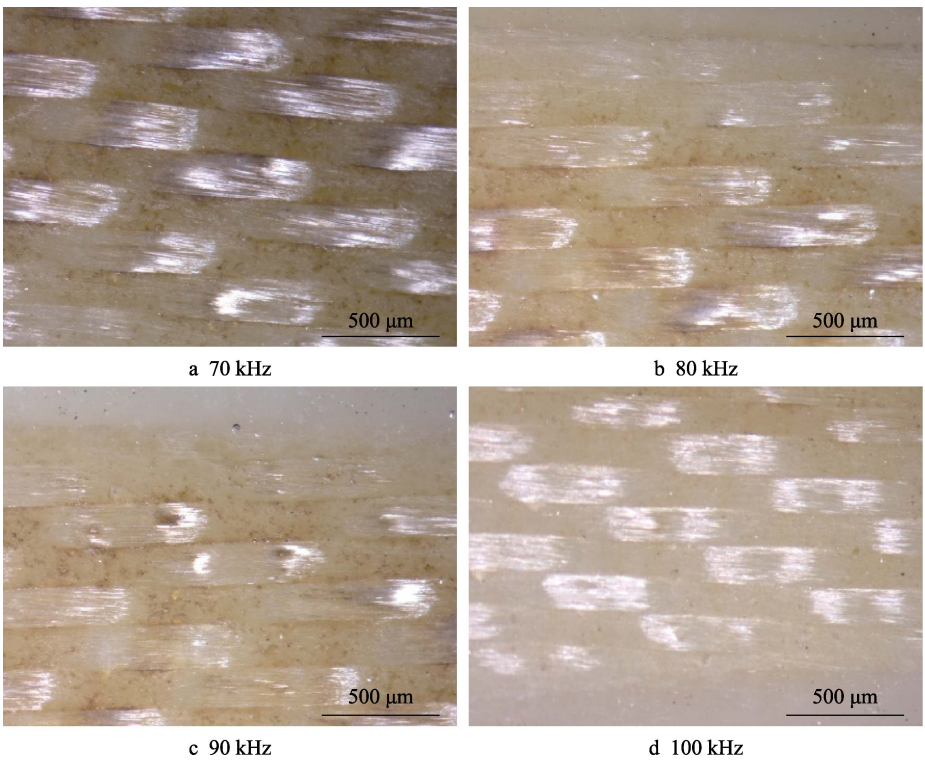


图 7 不同脉冲频率清洗后试件表面形貌
Fig.7 Surface morphology of specimens after cleaning with different pulse frequencies

维未发生损伤,材料表面颜色接近原材料。因此,在激光参数即平均功率 $P=25\text{ W}$ 、扫描速度 $v=255\text{ mm/s}$ 、脉冲频率 $f=100\text{ kHz}$ 下,可以获得很好的表面质量。

2.2 不同激光工艺参数对微观组织的影响

当采用扫描速度 $v=255\text{ mm/s}$, 脉冲频率 $f=$

100 kHz, 不同的平均功率清洗试验后, 玻璃纤维复合材料表面放大 267 倍的玻璃纤维微观组织如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 在激光功率为 15 W 时, 经过激光辐射后, 玻璃纤维不是很光滑, 激光能量传递到玻璃纤维的热影响比较低, 表面残留未去除的脱模剂。图 8b 相对于图 8a 虽然功率增大了, 但经过激光

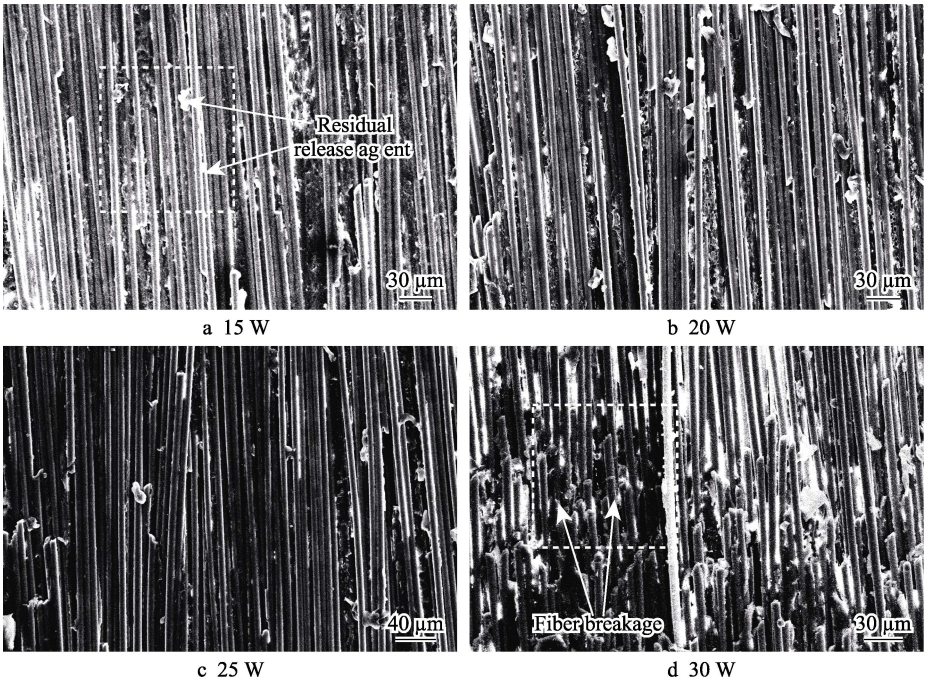


图 8 不同平均功率试验后试件表面的微观形貌
Fig.8 Micro morphology of specimen surface after different average power tests

作用后的材料温度无法达到气化温度。从图 8c 可以看出, 激光功率为 25 W 时, 观察到玻璃纤维光滑, 没有明显的断裂, 不会造成任何损伤, 可以有效地去除材料表面的脱模剂。图 8d 表明, 在平均功率为 30 W 时, 去除脱模剂时, 由于能量过高, 从而导致纤维的断裂, 对玻璃纤维复合材料造成损伤, 这与以上平均功率对表面形貌的影响基本符合。

不同扫描速度试验后玻璃纤维复合材料表面放大 267 倍的玻璃纤维微观组织如图 9 所示。图 9a 是扫描速度为 240 mm/s 的玻璃纤维微观组织图, 玻璃纤维断裂较多, 激光扫描速度越小, 能量积累较多, 材料散热性差, 超过了玻璃纤维的气化温度。相对于图 9c, 图 9b 有少量的胶连情况, 且玻璃纤维粗糙、不光滑。从图 9d 可以发现, 玻璃纤维完整较多, 因为该参数下能量积累较少。从图 9c 得出, 扫描速度为 255 mm/s 时, 表面整体光滑, 可以判定脱模剂去除比较干净, 并且玻璃纤维样条整齐, 没有断裂的痕迹, 这与以上扫描速度对表面形貌的影响基本符合。综上可以得到以下结论, 保持其他两参数恒定, 扫描速度为单一变量时, 扫描速度越大, 被作用的材料吸收的激光能量越少。

激光扫描功率为 25 W, 激光扫描速度为 255 mm/s, 不同激光脉冲频率试验后的玻璃纤维微观组织如图 10 所示。从图 10a 可以看出, 当脉冲频率为 70 kHz 时, 纤维有多处断裂的痕迹。从式 (2) 可以发现, 这主要是因为清洗过程中能量密度过高。相对于图 10a, 图 10b、c 中 GFRP 板材的玻璃纤维由断裂到完整, 而且附着的脱模剂残留也在逐渐变少。从式 (2)、(3) 可以发现, 随着脉冲频率的增大, 到达试件表

面能量密度逐渐减少, 而光斑搭接率逐渐增大, 能量积累变小。从图 10d 可知, 当脉冲频率增大到 100 kHz 时, 玻璃纤维复合材料的纤维都较完整, 而且清晰看见。这说明在该激光参数下不仅能有效地去除材料表面脱模剂, 而且对其玻璃纤维复合材料的纤维损伤降到最低, 保留了玻璃纤维的完整性。因此, 在功率和扫描速度一定的情况下, 单一的改变激光脉冲频率这一参数, 脉冲频率为 100 kHz 是理想的参数。

2.3 表面粗糙度分析

为了保证结果的准确性, 在试件表面选取 3 个不同的位置测量并算出其平均值作为最后的表面粗糙度值。由表 4 (k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 是表 2 中 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别除以 4 得到的平均表面粗糙度) 表面粗糙度极差分析可知, 平均功率对表面粗糙度的影响最大, 扫描速度次之, 频率影响最小。原始表面粗糙度值为 $0.684 \mu\text{m}$ 。不同工艺参数下清洗后的表面粗糙度值如图 11 所示。可以发现, 不同工艺参数下清洗后的表面粗糙度值都比原始表面粗糙度值大数倍, 证明了平均功率、扫描速度和脉冲频率在很大程度上会影响表面粗糙度。图 11a 表明, 随着平均功率的增大, 试件表面粗糙度 S_a 逐渐增大。图 11b 表明, 当扫描速度从 240 mm/s 增大至 260 mm/s 时, 表面粗糙度 S_a 先减小、后增大。从图 11c 可以看出, 脉冲频率从 70 kHz 增大到 100 kHz 时, 试件表面粗糙度 S_a 值逐渐减小。为了避免清洗过度造成玻璃纤维受损, 应按照实际表面质量合理调整清洗参数。经过比较, 采用平均功率 $P=25 \text{ W}$ 、扫描速度 $v=255 \text{ mm/s}$ 、脉冲频率 $f=100 \text{ kHz}$ 的参数时, 试样表面粗糙度 S_a 变化比较平稳, 由原

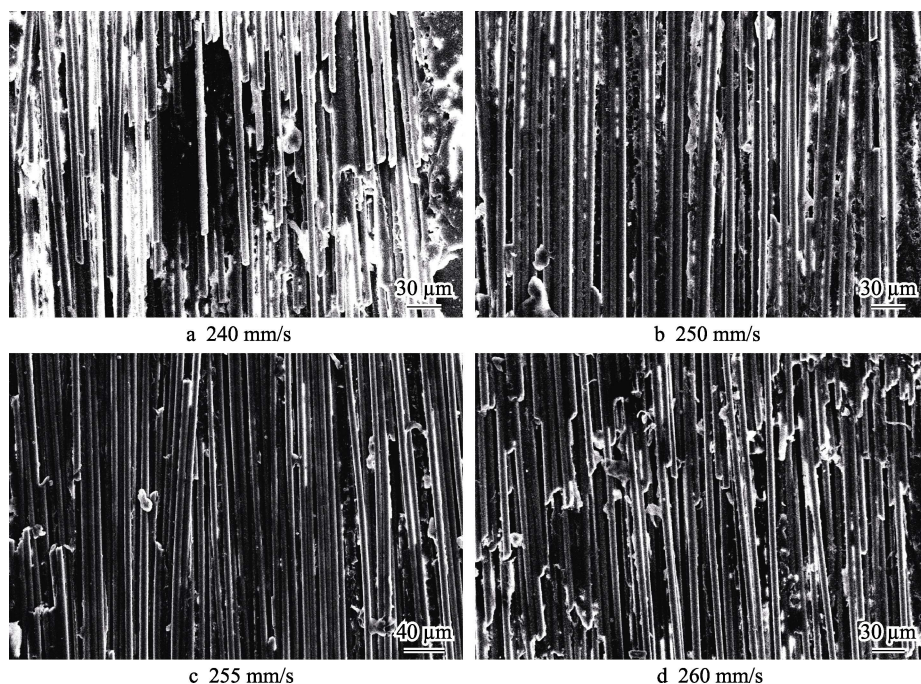


图 9 不同扫描速度试验后试件表面的微观形貌

Fig.9 Micro morphology of specimen surface after different scanning speed tests

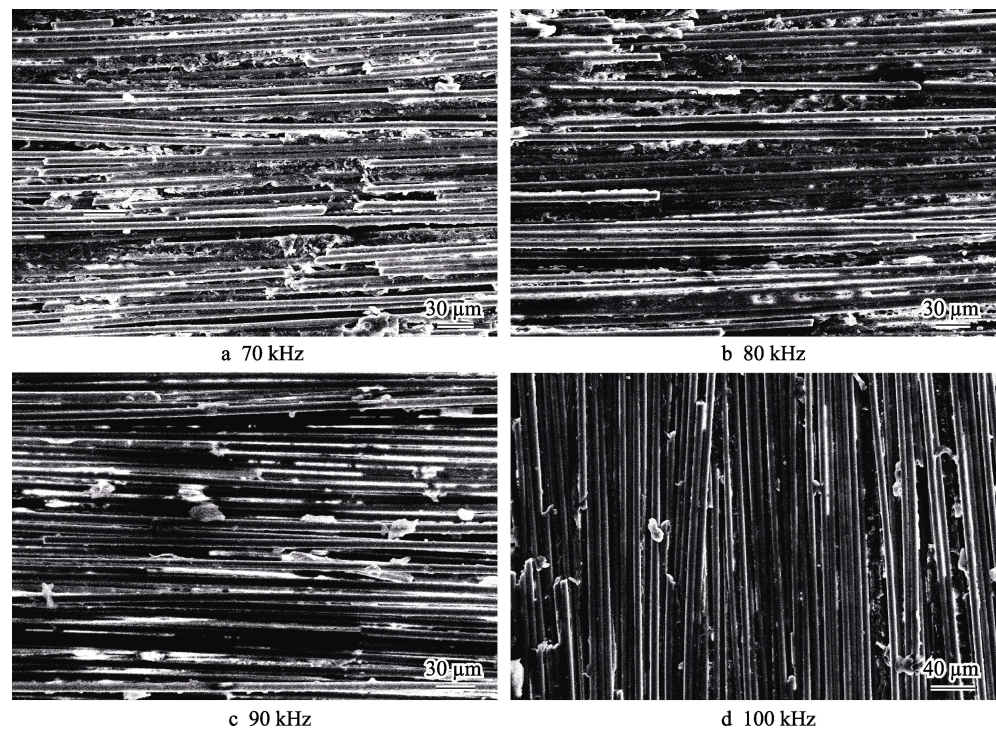


图 10 不同脉冲频率试验后试件表面的微观形貌
Fig. 10 Micro morphology of specimen surface after different pulse frequency tests

表 4 表面粗糙度极差分析
Tab.4 Surface roughness range analysis

	Average power/W	Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Pulse frequency/kHz
k_1	4.882	12.940	10.295
k_2	12.352	11.105	11.738
k_3	11.806	9.978	11.743
k_4	15.022	10.036	10.286
极差 R	10.14	2.962	1.443
影响顺序	$A > B > C$		
优方案	$A_3B_3C_4$		

来的 0.684 μm 增加到稳定值在(4.5±0.3) μm。因此, 在此参数下, 激光清洗后对试样的表面粗糙度影响较小, 可有效保证 GFRP 板材表面胶接质量。

2.4 激光清洗后的胶接强度试验结果分析

由图 12 的结果可知, 不处理的单搭接试样(编号 B)拉伸剪切下的平均胶接强度为 12.850 MPa, 而经过不同激光的平均功率处理后的试样, 相较于不处理试样, 平均胶接强度都有所提升。由图 5 及图 8 可知, 随着平均功率增加, 脱模剂逐渐减少。然而图 12 表明, 激光平均功率的增加有利于复合材料之间胶接强度的提升, 其中编号 S3 的胶接强度达到最大。

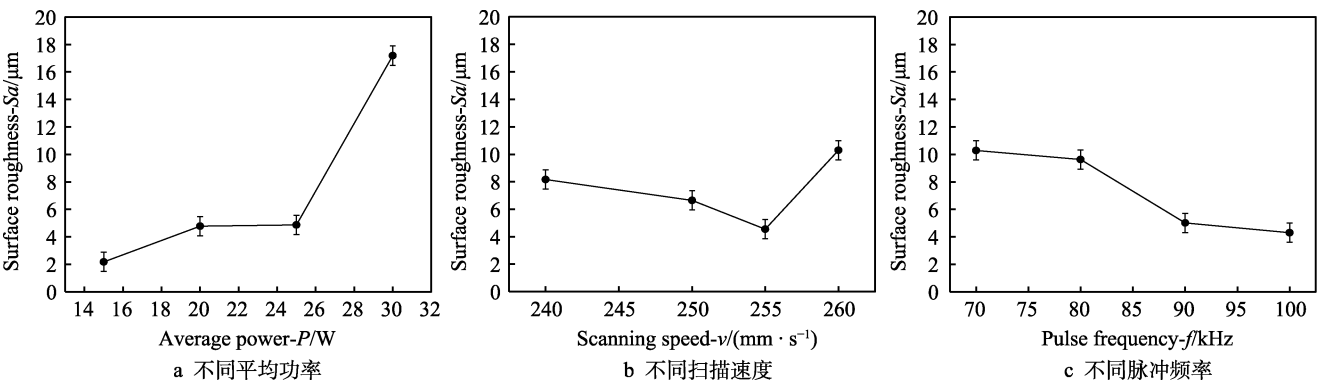


图 11 不同激光工艺参数对表面粗糙度的影响
Fig.11 Influence of different laser processes on surface roughness: a) different average power; b) different scanning speeds; c) different pulse frequency.

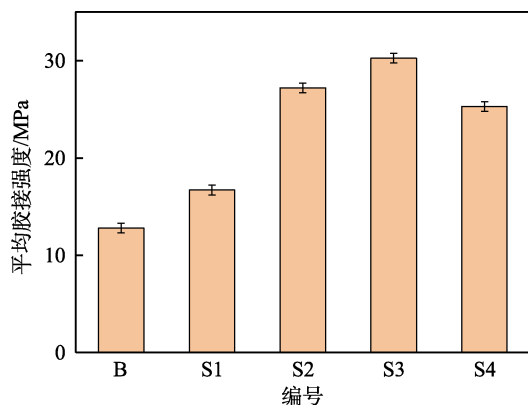


图 12 胶接强度试验结果
Fig.12 Bonding strength test results

2.5 验证实验

参数设置为激光平均功率 25 W, 扫描速度 255 mm/s, 频率 100 kHz, 重新选择激光清洗一块试件, 目的是避免试验的不确定性。清洗后的试件如图 13 所示。观察发现, 表面粗糙度 S_a 值较小, 裸露玻璃纤维束完整, 颜色与原试件基本相同。



图 13 清洗后的试件
Fig.13 Diagram of test piece after cleaning

3 结论

通过对 GFRP 表面脱模剂层进行激光清洗正交试验, 研究了激光清洗平均功率、扫描速度和脉冲频率对材料清洗后的表面形貌、微观组织、表面粗糙度及平均胶接强度的影响, 得出了以下结论:

1) 对比不同试验后试样的表面形貌与微观组织, 获得最佳激光清洗工艺参数为平均功率 $P=25$ W, 激光扫描速度 $v=255$ mm/s, 激光脉冲频率 $f=100$ kHz, 在此参数下能有效去除脱模剂, 且保留了玻璃纤维的完整性。

2) 改变平均功率、扫描速度和脉冲频率参数, 会影响试样的表面粗糙度。随着平均功率的增大, 试件表面粗糙度值逐渐增大; 随着扫描速度的增大, 试

件表面粗糙度值先减小后增大; 随着脉冲频率的增大, 试件表面粗糙度逐渐减小。采用参数为平均功率 $P=25$ W、激光扫描速度 $v=255$ mm/s、激光脉冲频率 $f=100$ kHz 时, 试件表面粗糙度变化比较平稳, 由原来的 $0.684 \mu\text{m}$ 增加到稳定值在 $(4.5 \pm 0.3) \mu\text{m}$, 可有效改善表面质量。

3) 随着平均功率的增加, 复合材料之间的胶接强度也在增加, 编号 S3 下即参数为平均功率 $P=25$ W、激光扫描速度 $v=255$ mm/s、激光脉冲频率 $f=100$ kHz 下, 胶接强度达到最大。

参考文献:

- [1] 程基伟, 王天民. 取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂研究[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 39-46.
CHENG Ji-wei, WANG Tian-min. Stress Corrosion Cracking of Oriented Glass Fibre Reinforced Plastics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 39-46.
- [2] 徐雯婷. 纤维增强树脂基复合材料在直升机的应用现状[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(3): 90-93.
XU Wen-ting. Application Status of Fiber Reinforced Resin Matrix Composites in Helicopters[J]. Fiber Composites, 2021, 38(3): 90-93.
- [3] WU Fu-cheng, GAO Shan-jun, ZENG Ying-ying, et al. Study on Synthesis and Demolding Performance of Polyethylene Glycol Fatty Acid Mold Release Agents[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32(10): 4061-4069.
- [4] 付裕, 刘牧东, 吴堂珍, 等. 直升机复合材料结构疲劳寿命评定技术的研究进展与发展趋势[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 83-88.
FU Yu, LIU Mu-dong, WU Tang-zhen, et al. Development and Trend on Fatigue Life Evaluation of Helicopter Composite Structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 83-88.
- [5] MUND M, LIPPKY K, BLASS D, et al. Influence of Production Based Surface Topography and Release Agent Amount on Bonding Properties of CFRP[J]. Composite Structures, 2019, 216: 104-111.
- [6] 李浩宇, 杨峰, 郭嘉伟, 等. 激光清洗的发展现状与前景[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 654-661.
LI Hao-yu, YANG Feng, GUO Jia-wei, et al. Development Status and Prospect of Laser Cleaning[J]. Laser Technology, 2021, 45(5): 654-661.
- [7] 张鑫, 陈玉华. 各类型激光器在激光清洗技术应用中发展现状及展望[J]. 热加工工艺, 2016, 45(8): 37-40.
ZHANG Xin, CHEN Yu-hua. Research Progress and Prospect of Application of Different Types Laser in Laser Cleaning Technology[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(8): 37-40.
- [8] 宋峰, 刘淑静, 颜博霞. 激光清洗——富有前途的环保型清洗方法[J]. 清洗世界, 2004, 20(5): 43-48.
SONG Feng, LIU Shu-jing, YAN Bo-xia. Laser Cleaning[J]. Cleaning World, 2004, 20(5): 43-48.
- [9] 侯玫, 张传俊. 现代工业中几种先进除锈方法的对比

- 研究[J]. 机械研究与应用, 2007, 20(4): 19-20.
- HOU Mei, ZHANG Chuan-jun. A Comparative Research on Several Advanced Way of Removing Rust in Modern Industry[J]. Mechanical Research & Application, 2007, 20(4): 19-20.
- [10] 施曙东, 李伟, 易三铭, 等. 从激光清洗专利看激光清洗技术的发展[J]. 清洗世界, 2009, 25(9): 26-33.
- SHI Shu-dong, LI Wei, YI San-ming, et al. To See the Development of Laser Cleaning Technology from Laser Cleaning Patents[J]. Cleaning World, 2009, 25(9): 26-33.
- [11] 薛亚飞, 罗子艺, 韩善果, 等. 激光扫描速度对碳钢板表面锈蚀层去除质量的影响[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 240-244.
- XUE Ya-fei, LUO Zi-yi, HAN Shan-guo, et al. Effect of Laser Scanning Speed of the Removal Quality of Rust Layer on Carbon Steel Surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(5): 240-244.
- [12] 王蔚, 李相锦, 刘伟军, 等. 激光清洗 7075 铝合金阳极氧化膜的工艺参数对表面质量的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 189-203.
- WANG Wei, LI Xiang-jin, LIU Wei-jun, et al. Effect of Laser Cleaning Process Parameters on Surface Quality of 7075 Aluminum Alloy Anodic Oxidation Film[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 189-203.
- [13] HOLTMANNSPÖTTER J, CZARNECKI J V, WETZEL M, et al. The Use of Peel Ply as a Method to Create Reproducible but Contaminated Surfaces for Structural Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Plastics[J]. The Journal of Adhesion, 2013, 89(2): 96-110.
- [14] KRELING S, FISCHER F, DELMDAHL R, et al. Analytical Characterization of CFRP Laser Treated by Excimer Laser Radiation[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 282-290.
- [15] BÉNARD Q, FOIS M, GRISEL M. Peel Ply Surface Treatment for Composite Assemblies: Chemistry and Morphology Effects[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(11): 1562-1568.
- [16] LEE D, LEE D G. Electro-Mechanical Properties of the Carbon Fabric Composites with Fibers Exposed on the Surface[J]. Composite Structures, 2016, 140: 77-83.
- [17] LEE D, LIM J W, NAM S, et al. Method for Exposing Carbon Fibers on Composite Bipolar Plates[J]. Composite Structures, 2015, 134: 1-9.
- [18] NAM S, LEE D, LEE D G, et al. Nano Carbon/Fluoroelastomer Composite Bipolar Plate for a Vanadium Redox Flow Battery (VRFB)[J]. Composite Structures, 2017, 159: 220-227.
- [19] WACHINGER G, THUM C, LLOPART L, et al. New Trends in CFRP Treatment and Surface Monitoring for Automated Structural Adhesive Bonding [C]// Proceedings of ICCM-17 17th International Conference on Composite Materials. Edinburgh: [s. n.], 2009.
- [20] 陈素明, 岳珊, 杨蕾, 等. 碳纤维增强复合材料表面漆层激光清洗工艺研究[J]. 应用激光, 2022, 42(4): 119-125.
- CHEN Su-ming, YUE Shan, YANG Lei, et al. Study on Laser Cleaning Technology of Surface Paint Layer of Carbon Fiber Reinforced Composites[J]. Applied Laser, 2022, 42(4): 119-125.
- [21] 占小红, 范喜祥, 高川云, 等. 脉冲激光清洗碳纤维增强树脂基复合材料表面研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(20): 38-42.
- ZHAN Xiao-hong, FAN Xi-xiang, GAO Chuan-yun, et al. Study on the Surface of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites for Pulse Laser Cleaning Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(20): 38-42.
- [22] 李绍龙, 王志兴, 侯秋园, 等. 激光处理对玻璃纤维增强复合材料与涂层间附着力的影响研究[J]. 涂料工业, 2021, 51(9): 9-14.
- LI Shao-long, WANG Zhi-xing, HOU Qiu-yuan, et al. Effect of Laser Treatment on Adhesion between GFRP Substrate and Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2021, 51(9): 9-14.
- [23] 杨文锋, 李俊磊, 曹宇, 等. 激光处理对民机复合材料胶接维修母体表面自由能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(S1): 298-302.
- YANG Wen-feng, LI Jun-lei, CAO Yu, et al. Effect of Laser Processing Treatment on Bonding Repair Parent Surface Free Energy of Civil Aircraft Composites[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(S1): 298-302.
- [24] ZHAN X, GAO C, LIN W, et al. Laser Cleaning Treatment and Its Influence on the Surface Microstructure of CFRP Composite Material[J]. Journal of Powder Metallurgy & Mining, 2017, 6(1): 1-6.
- [25] 陈水宣, 叶少伟, 洪昭斌, 等. 不同工艺参数对激光清洗金属涂层影响研究[J]. 应用激光, 2020, 40(3): 492-496.
- CHEN Shui-xuan, YE Shao-wei, HONG Zhao-bin, et al. Optimization of Process Parameters of Laser Cleaning Metal Coating Based on Orthogonal Experiment[J]. Applied Laser, 2020, 40(3): 492-496.
- [26] GB/T 33334—2016, 胶粘剂单搭接拉伸剪切强度试验方法[S].
- GB/T 3333—2016, Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies (Composite and Composite)[S].
- [27] 丁帅帅, 刘国东, 黎相孟, 等. 纳秒激光对金属清洗着色机理及质量的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 183-190.
- DING Shuai-shuai, LIU Guo-dong, LI Xiang-meng, et al. Study on the Mechanism and Quality of Metal Cleaning and Coloring by Nanosecond Laser[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 183-190.
- [28] 刘振明, 成健, 李子文, 等. CO₂ 激光清洗 2024 铝合金表面复合涂层[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(12): 974-979.
- LIU Zhen-ming, CHENG Jian, LI Zi-wen, et al. Removal of Composite Coating from 2024 Aluminum Alloy Surface by CO₂ Laser Cleaning[J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40(12): 974-979.

责任编辑: 刘世忠