

离焦状态对激光清洗CFRP表面涂层的影响及机制研究

李麟 张浩 李道鑫 赵磊 杨永佳 赵万利 王毕艺 蒋勇

Study on the effect and mechanisms of defocusing on laser cleaning of CFRP surface painting

LI Lin, ZHANG Hao, LI Dao-xin, ZHAO Lei, YANG Yong-jia, ZHAO Wan-li, WANG Bi-yi, JIANG Yong

引用本文:

李麟, 张浩, 李道鑫, 赵磊, 杨永佳, 赵万利, 王毕艺, 蒋勇. 离焦状态对激光清洗CFRP表面涂层的影响及机制研究[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0007

LI Lin, ZHANG Hao, LI Dao-xin, ZHAO Lei, YANG Yong-jia, ZHAO Wan-li, WANG Bi-yi, JIANG Yong. Study on the effect and mechanisms of defocusing on laser cleaning of CFRP surface painting[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双波长纳秒激光清洗技术在大理石文物上的应用

Application of dual-wavelength nanosecond laser cleaning technology on stone artifacts

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1050 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0002>

不锈钢表面高质量微陷阱结构的激光辅助水射流加工

Laser-assisted water jet machining of high quality micro-trap structures on stainless steel surfaces

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1476 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0004>

星载二维转台U型架结构轻量化与优化设计

Lightweight and optimized U-frame design for space-borne two-dimensional turntable

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 896 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0227>

激光诱导击穿光谱技术相关物理机制研究进展

Research progress on the related physical mechanism of laser-induced breakdown spectroscopy

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 19 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0019>

面向微光学元件表面形貌测量的涡旋相移数字全息技术

Vortex phase-shifting digital holography for micro-optical element surface topography measurement

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 852 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0180>

应用于高能激光器的XY离焦像差校正方法

An XY defocus aberration correction method for high-energy lasers

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 366 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0142>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-15

离焦状态对激光清洗 CFRP 表面涂层的影响及机制研究

李麟^{1,5}, 张浩³, 李道鑫^{1,5}, 赵磊², 杨永佳^{1,5}, 赵万里⁴, 王毕艺^{4*}, 蒋勇^{1,5*}

1. 西南科技大学 数理学院, 四川 绵阳 621010;
2. 四川中久大光科技有限公司, 四川 绵阳 621024;
3. 西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;
4. 电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300308;
5. 极端条件物质特性学科与技术中心, 四川 绵阳 621010)

摘要:目的: 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)在实际使用中表面常覆盖涂层。为实现 CFRP 表面涂层的无损去除, 提高 CFRP 回收利用率。本文利用红外高重频脉冲激光器在不同离焦距离下对 CFRP 表面涂层的展开清洗效果和机制研究。方法: 首先, 在离焦距离为 40 mm 时, 调控功率和扫描速度对 CFRP 表面涂层进行清洗, 并观察清洗效果, 得到较为优化工艺参数。在此基础上改变离焦距离再对涂层进行处理。最后, 对清洗后样品进行表面形貌、元素成分以及接触角测试分析, 得到不同离焦距离下的清洗效果、接触角变化规律和清洗工艺。结论: 结果表明, 随离焦距离增大, 清洗过程由气化向热积累效应转化, 适当的热量积累有助于涂层和树脂的完全去除。当功率、扫描速度和离焦距离分别为 25 W、720 mm/s 和 40 mm 时, 可以在不损伤碳纤维和有效改善基材表面润湿性的情况下完全去除涂层。

关键词:激光清洗; 离焦距离; 碳纤维复合材料; 表面形貌; 清洗机制

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2026-0007

CSTR: 32171.14.CO.2026-0007

收稿日期: 2026-01-12; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金(No. 12372212, No. 11972313); 电磁空间安全全国重点实验室基金(No. 2022JCJQLB055007)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12372212, No. 11972313), and the Opening Funding of National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security (No. 2022JCJQLB055007)

Study on the effect and mechanisms of defocusing on laser cleaning of CFRP surface painting

LI Lin^{1,5}, ZHANG Hao³, LI Dao-xin^{1,5}, ZHAO Lei², YANG Yong-jia^{1,5},
ZHAO Wan-li⁴, WANG Bi-yi^{4*}, JIANG Yong^{1,5*}

(1. School of Mathematics and Physics, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, China;

2. Sichuan DG Laser Technologies Co, LTD., Mianyang 621024, China;

3. School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, China;

4. National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China;

5. Extreme Condition Material Properties Science and Technology center, Mianyang 621010, China)

* Corresponding author, E-mail: wangbiyi530@163.com; y_jiang@swust.edu.cn

Abstract: Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites are usually covered with paint in practical applications. To achieve the nondestructive removal of the surface paint on CFRP and improve the recycling rate of CFRP, this study investigated the cleaning effect and mechanism of infrared high-repetition-rate pulsed lasers on the surface paint of CFRP under different defocus distances. First, when the defocus distance was 40 mm, the surface paint of CFRP was cleaned by adjusting the power and scanning speed, and the cleaning effect was observed to obtain relatively optimized process parameters. On this basis, the paint was treated by varying the defocus distance. Finally, the cleaned samples were characterized and analyzed in terms of surface morphology, elemental composition and contact angle, so as to obtain the cleaning effect, the contact angle variation law and the cleaning process under different defocus distances. The results show that with an increase in the defocus distance, the cleaning process transforms from vaporization to a heat accumulation effect, and proper heat accumulation contributes to the complete removal of paint and resin. When the power, scanning speed and defocus distance are 25 W, 720 mm/s and 40 mm respectively, the paint can be completely removed without damaging the carbon fibers, while effectively improving the surface wettability of the substrate.

Key words: laser cleaning; defocus distance; carbon fiber composite materials; surface morphology; cleaning mechanism

1 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有轻量化、高强度和抗疲劳等特性^[1-2], CFRP 的比强度大约是铝、钢等传统工程材料的十倍^[3], 在追求轻量化的航空航天领域应用广泛。如在波音 767 到 787 上, CFRP 用于制备机翼、机身和机门等部件, 降低了 20-22% 的油耗^[4]。飞机维护和维修需要定期去除和重新喷涂油漆层^[5], 机械清洗等传

统手段容易导致纤维撕裂、毛刺生成、分层缺陷等问题, 严重制约了其工程应用^[6]。相比之下, 激光清洗凭借其高效、环保、安全及自动化等优势, 逐渐成为一种能够取代传统清洗工艺的理想清洗方式^[7-11]。

近年来, 有关激光清洗复合材料表面涂层或树脂的研究已大量开展。贾宝申等^[12]采用红外脉冲激光清洗和酒精擦拭的方法, 无损去除芳纶纤维增强树脂基复合材料表面环氧类保护漆层; Liu 等^[13]提出了一种湿式激光清洗的方法, 通过

数值模拟分析和湿法激光清洗验证,能在不损坏 CFRP 基底的情况下,有效去除油漆层和基底环氧树脂;Wang 等^[14]利用纳秒激光去除 CFRP 表面环氧树脂和污染物,清洗后的表面具有更高的自由能,提高了 CFRP 与其他材料之间的粘接强度;Xin 等^[15]首次利用紫外飞秒激光去除了 CFRP 基体表面的油漆层,证明烧蚀效应和光化学机理是涂层的清洗机制;Zhao 等^[16]认为烧蚀效应是红外激光清洗 CFRP 表面油漆层的主要机制;Gu 等^[17]指出光热效应和光化学效应的共同作用是紫外激光去除 CFRP 表面涂层的主要机制,而热机械力会导致碳纤维的损伤;顾军义等^[2]利用田口正交实验法设置并进行激光去除 CFRP 表面涂层工艺实验,指出热效应是涂层的主要去除机制;王伟等^[18]改变激光能量密度和扫描速度去除 CFRP 表面树脂,研究发现合理的工艺参数能够有效去除树脂,提升其胶接后的力学性能,树脂去除机制为烧蚀气化和振动效应。综上所述,激光功率和扫描速度等关键工艺参数对激光清洗 CFRP 表面涂层效果的影响和清洗机制得到了广泛研究。然而,当前对不同工艺变量间的协同作用和竞争机制对清洗效果的影响仍然缺乏讨论,这阻碍激光清洗技术在 CFRP 材料上应用推广。

改变离焦距离能够引起光斑直径的变化,而光斑直径与功率密度和重叠率密切相关。因此,在激光功率和扫描速度不变时,改变离焦距离会

引起功率密度和重叠率同时发生改变。本文旨在阐明不同离焦距离下,功率密度和重叠率在激光清洗 CFRP 表面涂层过程中的竞争机制,以及不同离焦距离下清洗机制和清洗效果的变化规律。为了实现这一目标,首先确立了激光功率和扫描速度两者较为优化的参数组合。再改变样品表面与透镜焦点间的距离进行激光清洗工艺研究,实现功率密度和光斑重叠率的协同变化,并获得具有不同纤维损伤程度和清洗残留的代表性样品。采用扫描电子显微镜(SEM)和能量色散光谱仪(EDS)对清洗后试样信息进行评估和表征,综合分析了离焦距离对清洗效果和清洗机制的变化规律。利用接触角测量仪测量不同离焦距离清洗后试样表面接触角变化。研究结果为激光清洗工艺的优化提供了参考。

2 实验条件和方法

2.1 样品材料

实验选用厚度为 2 mm 的碳纤维环氧树脂基增强复合材料(CFRP)作为基底材料。CFRP 由 T300 碳纤维和环氧树脂经过热压复合加工制成,碳纤维和环氧树脂的体积分数分别为 60% 和 40%。碳纤维编织层由 0°和 90°纤维交替排列编织而成,其编织结构示意图如图 1(a)所示,其上层覆盖环氧树脂作为保护层。

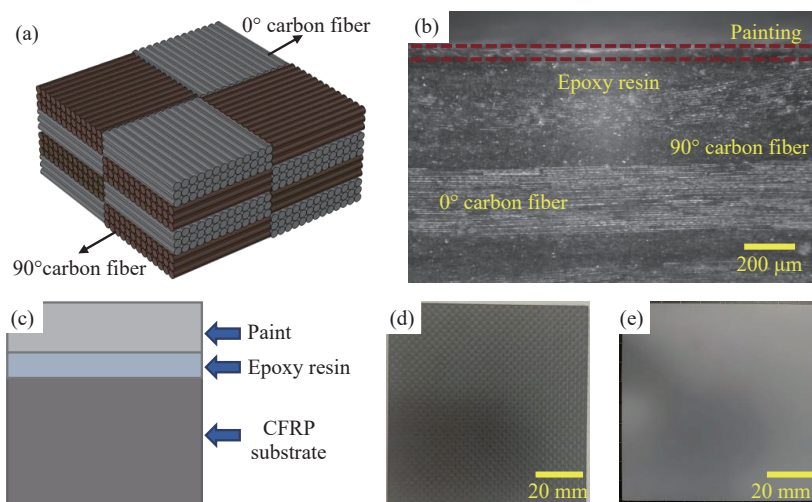


图 1 (a) CFRP 平纹编织结构示意图; (b) 光学显微镜下样品的横截面形貌图; (c) 横截面示意图; (d) 喷漆前样品图像; (e) 喷漆后样品图像

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the plain weave structure of CFRP; (b) Cross-sectional morphology of the sample under an optical microscope; (c) Schematic diagram of the cross-section; (d) Sample image before painting; (e) Sample image after painting

这种平纹编织的碳纤维结构与传统的单向排列结构相比,具有层间断裂韧性更高、机械稳定性更强等优势^[19]。CFRP 表面喷涂厚度约为 40 μm 的灰色丙烯酸聚氨酯漆层,图 1(b) 给出了光学显微镜下试样的截面形貌。为了更加直观地体现不同材料在样品中的分布,图 1(c) 给出了样品的二维横截面示意图。图 1(d) 和图 1(e) 分别展示了喷涂前后的表面形貌。

2.2 实验装置

图 2 展示了激光清洗装置示意图,主要包含激光器、功率计、振镜、三维平移台、尾气处理装置和控制系统等。研究采用最大平均功率为 100 W 的近红外纳秒脉冲激光器,其工作波长为 1064 nm,当脉冲宽度为 200 ns 时,重复频率可调

范围为 75~1000 kHz。YANG 等^[5] 的研究表明高重复频率纳秒脉冲激光清洗具有优异的清洗效率与质量,因此在后续研究中将重复频率设置为 1000 kHz。实验过程中,激光束由分光镜分成两部分,其中约 5% 的激光入射到功率计实现输出功率的实时监控,剩余激光经过扫描振镜后由焦距为 500 mm 的场镜聚焦,用于清洗样品表面涂层,表面清洗区域设定为 10 mm \times 8 mm。同时,样品利用干板夹夹持放置在三维平移台上,通过改变三维平移台的位置可以控制场镜与样品间的距离,实现离焦清洗,激光束经场镜聚焦后在焦点位置的光斑直径约为 30 μm 。为避免清洗过程中的废气对环境 and 人员造成危害,清洗过程中采用尾气处理装置对废气进行收集。

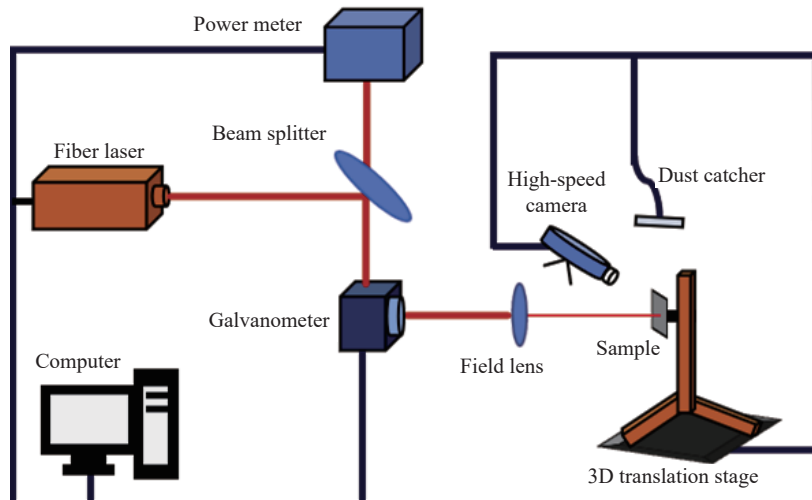


图 2 激光清洗装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the laser cleaning device

2.3 清洗策略

本实验将扫描路径设置为“S”型,WANG 等^[20] 研究表明该扫描路径对应的清洗效果较好。在该扫描路径下,光斑在 x 和 y 方向上都有一定的重叠,能保证激光束清洗到各个区域。为更好理解不同参数下的涂层去除效果, x 和 y 方向上的描述是不一样的。如图 3 所示,其中 l 是扫描方向(x 方向)上两个相邻光斑的重叠长度, h 是清洗方向(y 方向)上两个相邻路径的间隔长度。因此,两个方向上的重叠率可由公式 (1) 和公式 (2) 计算^[17]:

$$\eta_x = \frac{l}{D} = \left(1 - \frac{v}{Df}\right) \times 100\% \quad (1)$$

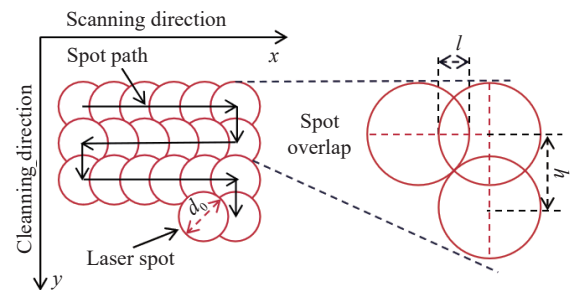


图 3 激光清洗扫描路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the laser cleaning scanning path

$$\eta_y = \left(1 - \frac{h}{D}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中 D 为光斑直径, f 为重复频率, v 为扫描速度。

此外, 激光功率密度 (F) 对于清洗后 CFRP 表面形貌及力学性能产生直接影响, 由激光功率和光斑直径共同决定:

$$F = \frac{4P}{\pi D^2}, \quad (3)$$

式中 P 为激光功率。

前期的探索性实验表明, 当样品处理面位于场镜焦点位置时, 无法在保证纤维完整的前提下

完全去除涂层。通过改变样品与焦点之间的距离, 可以实现光斑直径的变换^[21-22]。根据激光束的焦点与样品待清洗表面的距离, 可分为负离焦、焦点处和正离焦三种情况, 如图 4(a)~(c) 所示。Zhang 等人的研究表明, 相同距离的正负离焦具有相似的处理能力^[21], 因此本文仅对正离焦情况下展开研究。

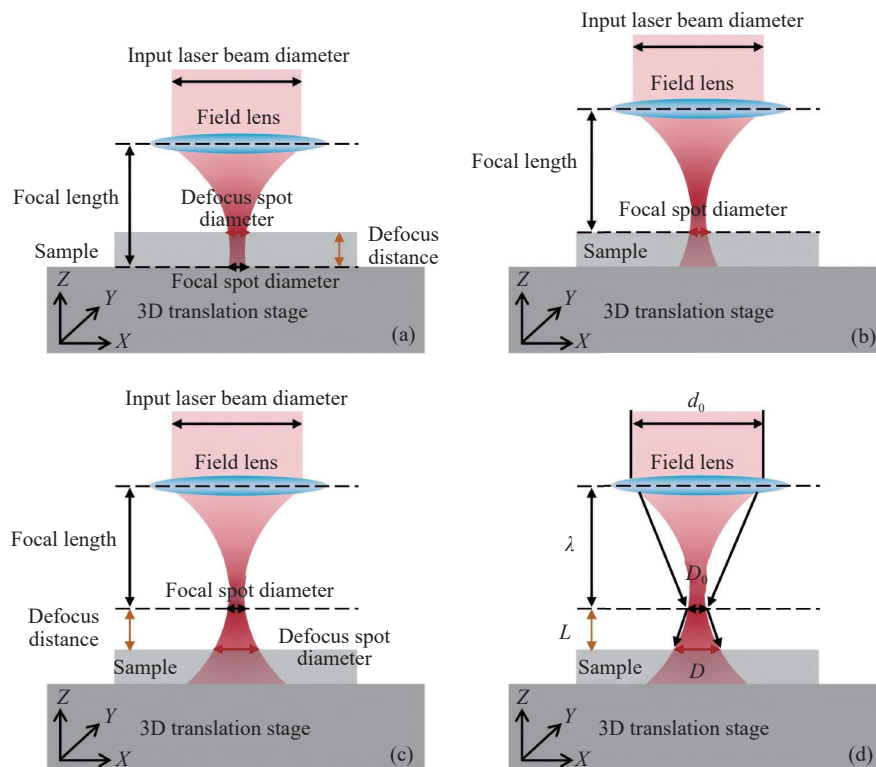


图 4 负离焦 (a)、零离焦 (b)、正离焦 (c) 及光斑直径与离焦距离关系 (d) 的示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of (a) negative defocus; (b) zero defocus; (c) positive defocus; and (d) the relationship between spot diameter and defocus distance

不同离焦距离下光斑直径的变化示意图如图 4(d) 所示, 其光斑直径可通过公式 (4) 计算^[22]:

$$D = \frac{L(d_0 - D_0)}{\lambda} + D_0, \quad (4)$$

其中, d_0 、 D_0 、 L 和 λ 分别为输入光斑直径、焦点光斑直径、离焦距离和场镜的焦距。

公式 (1)~(4) 表明离焦距离的变化会改变光斑直径, 并进一步引起功率密度和重叠率发生改变。因此, 不同离焦距离下的清洗效果是两者的协同作用。为了寻找优化工艺参数组合, 通过调整包括功率、扫描速度和离焦距离等多项参数开展探索性实验, 并结合涂层去除效率与效

果综合评估, 最终确定在脉宽为 200 ns, 重复频率为 1000 kHz 下, 当功率为 25 W, 扫描速度为 720 mm/s, 离焦距离为 40 mm 时为较为优化工艺参数。以此工艺参数组合为参考开展后续工作, 表 1 给出了具体的激光清洗参数。

表 1 激光清洗工艺参数

Tab. 1 Process parameters for laser cleaning

Characteristics	Symbols	Values	Units
Focal length	λ	500	mm
Focal spot diameter	D_0	30	μm
Input laser beam diameter	d_0	2.155	mm

续表 1

Characteristics	Symbols	Values	Units
Pulse width	τ	200	ns
Pulse frequency	f	1000	kHz
Scanning track interval	h	0.05	mm
Cleaning times	N	1	-
Power	P	20-35, step 5	W
Scanning speed	v	600-960, step 120	mm/s
Defocus distance	L	0-100, step 20	mm
Defocus spot diameter	D	30-455, step 85	μm

3 工艺参数对清洗效果的影响

3.1 功率和扫描速度

功率和扫描速度是影响清洗效果的关键变量^[14,23],如公式(1)~(3),二者对清洗效果影响的规律可由功率密度和重叠率进行解释。图5和图6分别给出了离焦距离为40 mm下(光斑直径约为200 μm)时,不同功率和扫描速度清洗后试样表面的显微形貌。

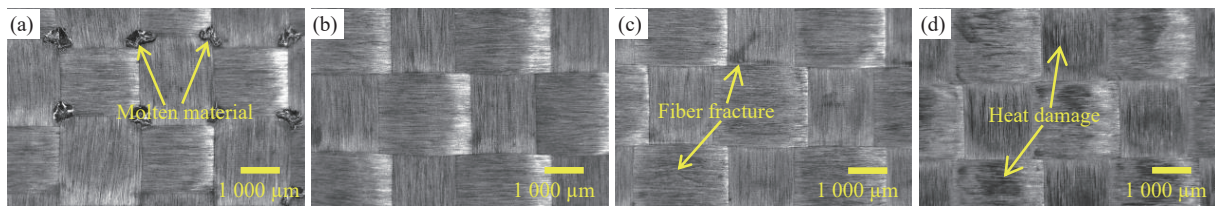


图5 不同功率清洗后 CFRP 表面的显微形貌。(a) 20 W; (b) 25 W; (c) 30 W; (d) 35 W

Fig. 5 Microscopic morphology of CFRP surface after cleaning with different powers. (a) 20 W; (b) 25 W; (c) 30 W; (d) 35 W

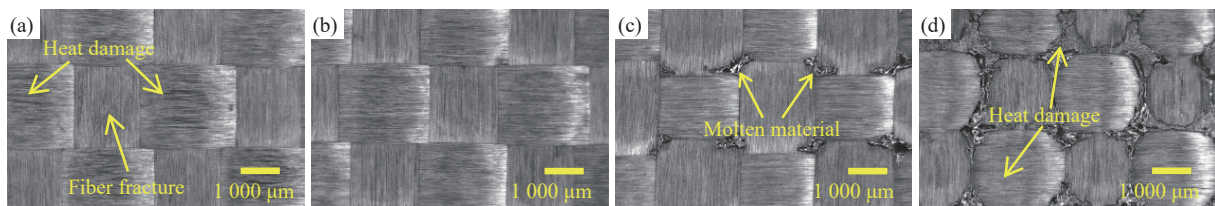


图6 不同扫描速度清洗后 CFRP 表面的显微形貌。(a) 600 mm/s; (b) 720 mm/s; (c) 840 mm/s; (d) 960 mm/s

Fig. 6 Microscopic morphology of CFRP surface after cleaning with different scanning speeds. (a) 600 mm/s; (b) 720 mm/s; (c) 840 mm/s; (d) 960 mm/s

当扫描速度为720 mm/s时,图5给出了不同功率清洗后试样表面的显微形貌。根据公式(1),功率(P)越大,单脉冲激光辐照的功率密度(F)越大,作用在涂层上的能量越高。图5(a)~(d)表明随着功率增加,涂层和树脂清洗程度提升。同时,纤维损伤程度也加剧。当激光功率为20 W时,图5(a)表明试样表面纤维大量露出,但在纤维编织交界处仍存在大量的熔融残留物。这是因为在纤维编织交界处的树脂厚度与其他位置相比更大,因此要完全去除需要更多的激光能量。当功率增至25 W时,图5(b)表明清洗后纤维的尺寸均匀,无明显的热损伤现象,且试样表面无明显的清洗残留。因此,在该功率条件下可以得到好的清洗效果。图5(c)表明当功率为30 W时,尽管

此时试样表面无残留,但出现纤维断裂、挑起等损伤现象。功率进一步增加至35 W时,图5(d)表明清洗后试样表面热出现大量的烧蚀痕迹,纤维层紊乱、碳化等热损伤现象相较于图5(c)进一步加深。因此,在保证纤维完整性的前提下,25 W可以达到完全去除涂层和树脂的效果。

不同扫描速度清洗后试样表面的显微形貌如图6所示。由式(1)可以看出,扫描速度(v)越大,则 x 方向上的重叠率(η_x)越小,激光在相同位置上的辐照时间越短。当速度为600 mm/s时,图6(a)表明试样表面无残留,但纤维出现断裂、碳化等热损伤现象。扫描速度增至720 mm/s时,图6(b)表明试样表面无残留和损伤显现,纤维完整性良好。因此,该扫描速度被认为是一个良好

的参数。随着扫描速度的进一步提升,图 6(c) 和图 6(d) 表明清洗后试样表面开始出现残留, 残留物多聚集在纤维编织交界处, 且随扫描速度的增加而增加。

综上, 功率和扫描速度对 CFRP 表面涂层去除清洗效果具有显著影响, 当功率和扫描速度分别为 25 W 和 720 mm/s 时, 清洗后的试样表面没有观察到残留物和明显的热损伤现象, 可认为是较为优化的参数组合。

3.2 离焦距离

3.1 部分表明当功率和扫描速度分别为 25 W 和 720 mm/s 时, CFRP 表面涂层去除效果良好。将这些参数作为恒定值, 在 0~100 mm 范围内探究离焦距离对 CFRP 表面涂层去除效果的影响。图 7 给出了不同离焦距离清洗后样品的显微形貌, 图 8 是图 7(a) 方框标记区域内的局部放大图。图 9 和图 10 进一步给出了清洗后的 SEM 形貌, 第一和第二行分别为 0°和 90°方向纤维。

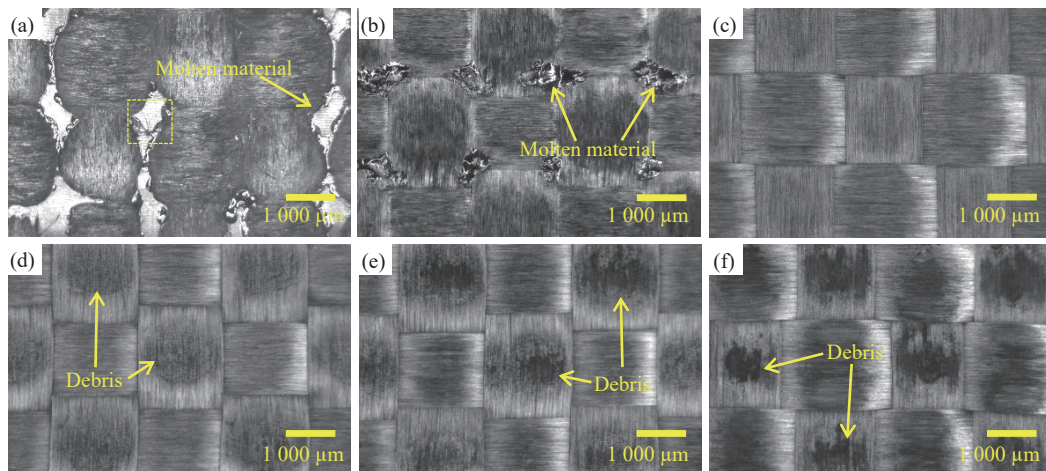


图 7 不同离焦距离下清洗后 CFRP 表面的显微形貌。(a) 0 mm; (b) 20 mm; (c) 40 mm; (d) 60 mm; (e) 80 mm; (f) 100 mm
Fig. 7 Microscopic morphology of CFRP surface after cleaning under different defocus distances. (a) 0 mm; (b) 20 mm; (c) 40 mm; (d) 60 mm; (e) 80 mm; (f) 100 mm

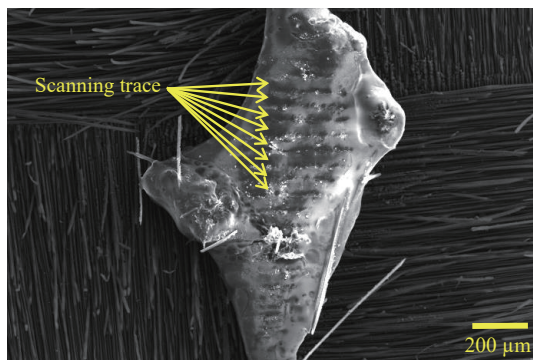


图 8 图 7(a) 中方框所示局部区域的放大视图
Fig. 8 Magnified view of the local area indicated by the square frame in Fig. 7(a)

激光作用产生的热烧蚀效应主要包含两种不同机制^[24]: 一是激光辐照使材料直接气化并去除, 过程中热量积累有限, 该机制可认为是直接气化去除; 二是激光辐照后, 材料未迅速达到气化温度, 而是通过持续的能量输入, 经历先熔化后气化的过程, 该机制常被称为热积累效应。

图 7(a) 给出了离焦距离为 0 mm(即在焦点

处) 清洗后试样表面的光学显微形貌, 试样表面出现大量纤维断裂等热损伤现象, 且在纤维编织交界处仍然存在大量的清洗残留。残留物外侧与纤维接触, 出现熔融再凝固现象, 而在残留物中心区域则无此类现象存在。表明此时气化去除是主要的清洗机制。图 8 表明在该离焦距离清洗后, 残留物表面在相邻激光路径间形成了山脊状的结构。该现象的产生主要包括两个原因: 一方面此时光斑直径约为 30 μm , 而扫描路径间距 (h) 为 50 μm , 根据式 (2), η_y 的值为负, 相邻路径之间不重叠; 另一方面激光能量在空间上呈现高斯分布, 光斑中心处的能量较大, 边缘处的能量较小。图 9(a) 和图 9(b) 表明此时纤维断裂端呈现消融形貌, 纤维间存在未完全气化的环氧树脂, 残留以絮状物形式附着在纤维表面, 没有熔融现象。式 (1)~(3) 表明由于此时光斑直径低, 功率密度较大, 重叠率较小。功率密度越大, 用于材料气化的能量越多, 热传递的能量越少^[25]。另外, 重叠率小

表明清洗过程中热量积累少。因此,在焦点处清洗时,涂层和树脂会以气化形式直接去除。

当离焦距离为 20 mm 时,此时光斑直径约为 115 μm 。相比图 7(a),图 7(b) 表明纤维表面热损伤程度降低,但纤维编织交界处仍然存在大量的清洗残留物。此外,残留物大多呈现透明的熔融

相聚集凝固状,表明残留物主要是环氧树脂组成,清洗机制包含热积累效应^[15]。图 9(c) 和图 9(d) 表明此离焦距离清洗后仍然存在纤维断裂等热损伤现象,但纤维间隙中的树脂残留呈现块状,不具备熔融形貌。因此,此时的去除机制主要为气化和热积累效应。

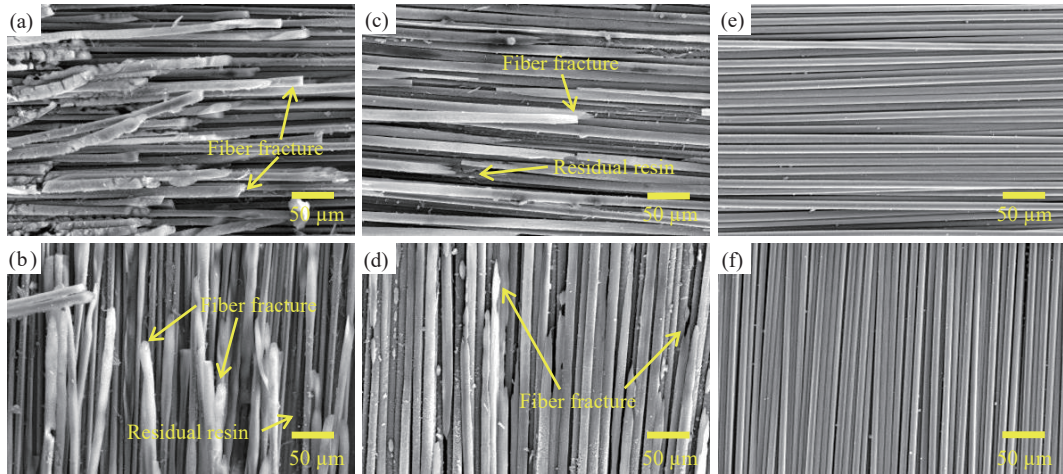


图 9 清洗后试样表面的 SEM 形貌 (离焦距离: 0~40 mm)。 (a) 和 (b) 0 mm; (c) 和 (d) 20 mm; (e) 和 (f) 40 mm。第一和第二行分别为 0°和 90°方向纤维。

Fig. 9 SEM morphology of the cleaned sample surface (Defocus distance: 0~40 mm). (a) and (b) 0 mm; (c) and (d) 20 mm; (e) and (f) 40 mm. The first and second rows are fibers in the 0° and 90° directions, respectively.

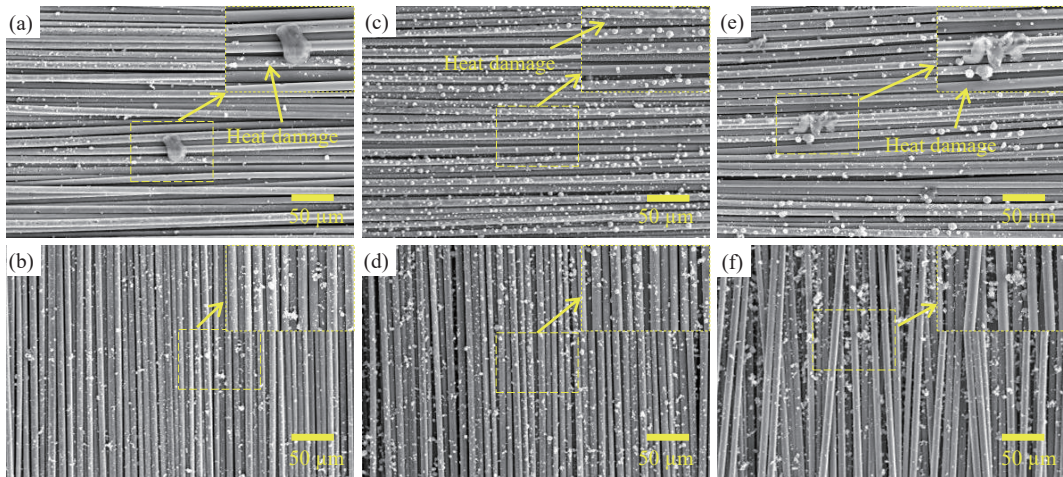


图 10 清洗后试样表面的 SEM 形貌 (离焦距离: 60~100 mm)。 (a) 和 (b) 60 mm; (c) 和 (d) 80 mm; (e) 和 (f) 100 mm。第一和第二行分别为 0°和 90°方向纤维。

Fig. 10 SEM morphology of the cleaned sample surface (Defocus distance: 60-100 mm). (a) and (b) 60 mm; (c) and (d) 80 mm; (e) and (f) 100 mm. The first and second rows are fibers in the 0° and 90° directions, respectively.

当离焦距离增至 40 mm 时,此时光斑直径约为 200 μm 。图 7(c) 表明试样表面无明显的热损伤现象,且在纤维交界处也无清洗残留。图 9(e) 和图 9(f) 进一步表明在此离焦距离下,纤维分布均匀,无明显的损伤现象,纤维整体完整性较好。此外,在纤维表面仅有少量颗粒残留。可认为该

离焦距离下,能够得到好的清洗效果。

当离焦距离进一步增加至 60 mm 时,此时光斑直径约为 285 μm 。图 7(d)、图 10(a) 和图 10(b) 都表明此时纤维表面出现大量未完全气化去除的残留物,且 90°方向上纤维表面的清洗残留物多于 0°方向。此外,图 10(a) 表明清洗后 0°纤维表

面发生质量损失, 出现大量的烧蚀气化坑, 影响纤维完整性, 而图 10(b) 可以看出 90° 方向纤维表面却无该现象。导致这样的差异主要源于沿纤维 (0°) 方向的导热系数为 $50 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ^[20], 而与垂直纤维 (90°) 方向的导热系数仅为 $5 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ^[26]。激光作用于材料时, 材料吸收激光能量并转换为热量。当扫描方向与纤维方向一致时, 热量无法在纤维轴向上有效散逸, 热量积聚导致涂层和树脂的大量去除, 且纤维也更易在热量积累下发生损伤^[27]。当激光垂直纤维方向进行扫描清洗时, 热量沿纤维向两端扩散, 纤维上的热量积累相对较少, 纤维更不易发生损伤, 涂层和树脂的去除同样相对减少。这一发现与 Wang^[20] 和 Xu^[26] 等人的结论一致。

图 7(e) 和图 7(f) 给出了离焦距离分别为 80 mm 和 100 mm 清洗后的显微形貌, 表明当离焦距离超过 60 mm 时, 清洗残留随离焦距离的增加而增加, 图 10(c)~(f) 进一步证实了该现象。对比图 10(c)、图 10(e) 和图 10(d)、图 10(f), 进一步表明扫描方向与纤维方向一致时, 清洗残留较少且纤维更容易发生损伤。此外, 图 10 表明离焦距离大于 60 mm 清洗后, 试样表面残留大多为颗粒状态, 呈现熔融小球状附着在纤维表面, 具有明显的熔化重新凝固的特征。根据公式 (1)~(3), 在长离焦距离下由于光斑直径较大, 此时作用于试

样表面的激光具有低功率密度和高重叠率的特性。低功率密度下无法使涂层和树脂直接气化去除, 高重叠率使得激光作用产生的热量在纤维上快速积累。随着纤维表面温度升高, 涂层和树脂先发生熔化聚集, 再发生气化。由此可以推断出长离焦距离下涂层和树脂主要依靠热积累效应去除。

值得注意的是, 焦点附近清洗时, 由于光斑直径小, 功率密度较高及重叠率较低, 激光能量大多用于涂层和树脂的气化去除, 没有过多的热量积累。然而, 纤维编织交界处的树脂相较于其他位置更厚, 需要更多的能量才能使得其完全去除。因此, 在焦点处清洗时, 纤维编织交界处容易残留更多的树脂残留, 如图 7(a) 和图 7(b) 所示。图 7(e)~(f) 处表明纤维编织交界处的残留较少, 这是因为在长离焦距离下, 由于功率密度较小及重叠率较高, 涂层树脂的去除主要依靠热传递 (热积累效应) 去除, 而清洗过程中 0° 和 90° 纤维都将热量传递到纤维编织界面处。

综上所述, 当功率为 25 W, 扫描速度为 720 mm/s, 离焦距离为 40 mm 时, 能够在保证纤维完整性的前提下完全去除涂层和树脂。另外, 不同离焦距离下的清洗效果是功率密度和光斑重叠率叠加影响所致。随离焦距离的变化, 涂层和树脂的主要去除机制变化如图 11 所示。

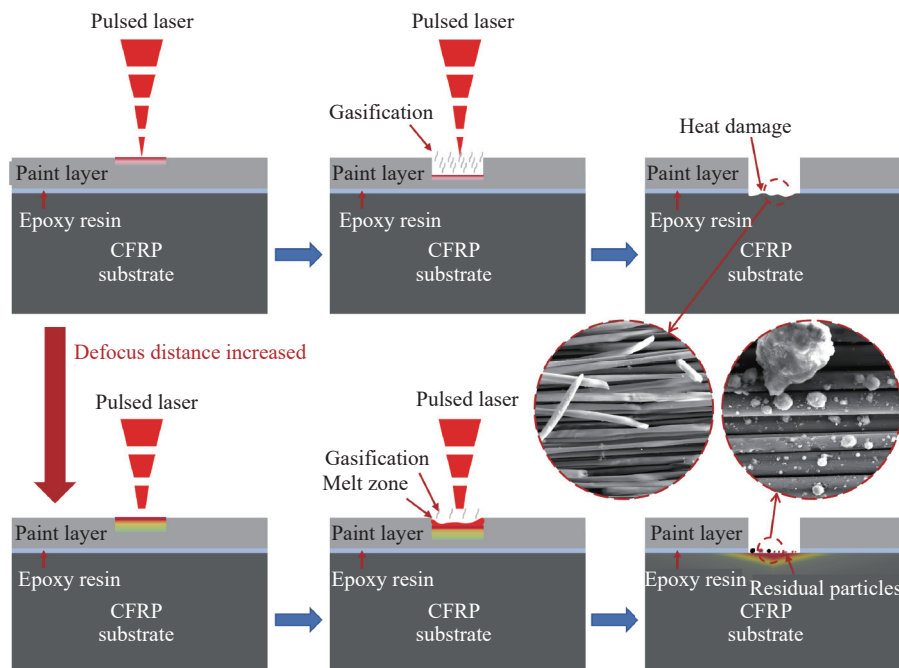


图 11 清洗主要机制随离焦距离的变化

Fig. 11 Variation of the main cleaning mechanism with defocus distance

当离焦距离在 0~20 mm 范围内时,光斑直径小,此时功率密度大和重叠率小,涂层和树脂在激光作用下气化去除。清洗后纤维表面出现大量的断裂等热损伤现象,纤维编织交界处仍存在较多的清洗残留。离焦距离为 40 mm 时,能完全去除涂层,而不会损伤纤维。当离焦距离超过 60 mm 时,清洗残留随离焦距离的增加而增加,呈现熔化重新凝固的颗粒状。涂层和树脂依靠纤维上的热量积累去除,热积累效应是主要的去除机制,纤维上过度的热量积累同样使得纤维发生损伤。考虑到 CFRP 中树脂在纤维交界处含量较多的结构特性,激光作用于纤维上产生适当的热量积累有助于实现树脂的完全去除。因此,可通过调控离焦距离的大小,进而改变激光功率密度和重叠率,达到材料去除和热量积累的动态平衡,实现涂层和树脂的无损去除。

4 清洗机制和质量分析

4.1 元素分析

第 3 部分中不同参数下试样表面形貌表明,当功率、扫描速度和离焦距离分别为 25 W 和 720 mm/s 和 40 mm 时,能在保证纤维完整的前提下,完全去除涂层和树脂。为了进一步分析清洗机制和评估清洗效果,采用 EDS 对残留物的主要成分和不同离焦距离清洗后试样表面元素进行分析。CFRP 的主要由 C、O 和 Si 三种元素组成,且丙烯酸聚氨酯涂层中含有 Ti 元素^[28]。因此,后续 EDS 能谱进行元素表征时,主要分析了这四种元素含量的变化。图 12 分别给出了涂层、环氧树脂和碳纤维的 EDS 能谱图,表 2 给出了三种材料的元素含量,显然 Ti 元素是涂层特征元素。

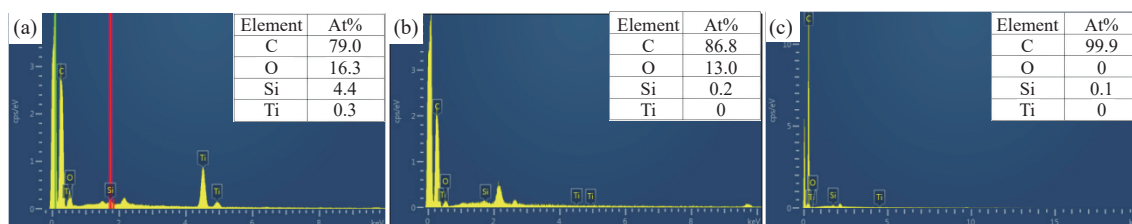


图 12 (a) 涂层; (b) 树脂; 及 (c) 碳纤维的 EDS 能谱图

Fig. 12 EDS spectra of (a) paint; (b) resin; and (c) carbon fibers

表 2 涂层、树脂和碳纤维的元素含量 (at%)

Tab. 2 Elemental content of the paint, resin, and carbon fibers (at%)

Materials	C	O	Si	Ti
Paint	79.0	16.3	0.3	4.4
Epoxy resin	86.8	13.0	0.2	0.0
Carbon fiber	99.9	0.0	0.1	0.0

图 10 表明当离焦距离超过 60 mm 时,清洗后试样表面存在大量的残留颗粒。为了直观观察试样表面的元素构成,图 13 给出了离焦距离分别为 60 mm、80 mm 和 100 mm 清洗后试样表面的元素分布图。图 13(a) 表明在离焦距离为 60 mm 时,清洗后残留物主要由 C、O 和 Si 元素构成,Ti 元素含量较低。证明此时残留物主要由树脂和纤维熔融物构成,仅有少量的涂层残留。随着离焦距离的增加,清洗残留逐渐增加,图 13(b) 和

(c) 表明残留颗粒中 O、Si 和 Ti 元素含量增加,证明涂层的残留随着离焦距离的增大而增加。同时,残留颗粒包含大量的 O 元素,表明该条件下空气中的氧元素在清洗过程中与熔融物发生充分反应。

图 9(a)~(d) 和图 10 表明在不同离焦距离处清洗后的试样表面残留物形貌不同,这表明涂层和树脂去除机制也发生了相应变化。为了进一步分析不同离焦距离下的清洗机制,有必要对这两种典型的残留物成分进行分析。图 14 给出了离焦距离为 0 mm 和 80 mm 清洗后试样表面残留物的 SEM 形貌和 EDS 能谱图。图 14(a) 表明在焦点处清洗后残留物为絮状,主要组成元素为 C,含有少量的 Si、O 和 Ti 元素。说明此时气化是主要的清洗机制。离焦距离大(图 14(b))时,残留物主要由 O 元素组成,且呈现熔融重凝的颗粒状形态,进一步表明离焦距离较大时涂层和树脂主要通过热积累效应去除。

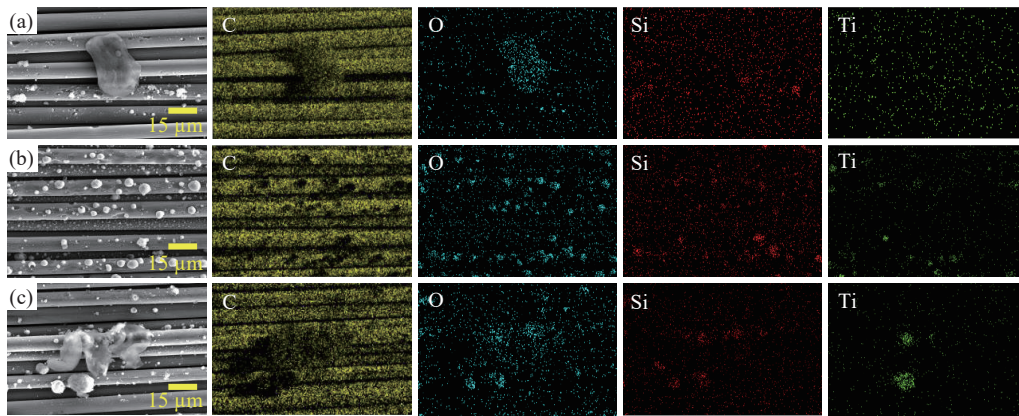


图 13 清洗后试样表面元素分布 (离焦距离: 60~100 mm)。 (a) 60 mm; (b) 80 mm; (c) 100 mm

Fig. 13 Element distribution on the surface of the cleaned sample (Defocus distance: 60-100 mm). (a) 60 mm; (b) 80 mm; (c) 100 mm

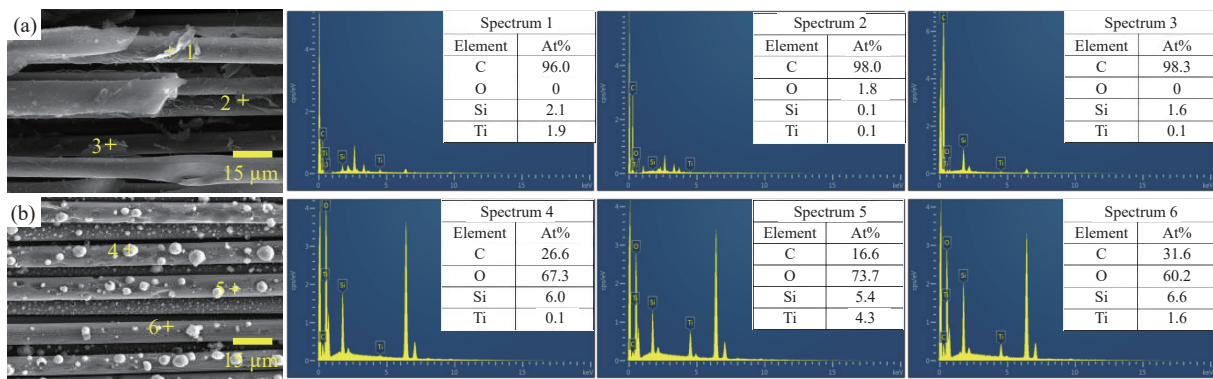


图 14 离焦距离 0 mm(a) 和 80 mm(b) 清洗后试样表面的 SEM 形貌及残留物元素组成

Fig. 14 SEM morphology and residual element composition of the cleaned sample surface at defocus distances of 0 mm (a) and 80 mm (b)

表 3 给出了不同离焦距离清洗后试样表面的元素变化。可以发现当离焦距离为 40 mm 时,清洗后试样表面不含 Ti 元素,且各元素含量与图 12(c) 中纤维元素含量一致,证明在此离焦距离下能够完全去除涂层和树脂并取得好的清洗效果。图 15 为不同离焦距离清洗后试样表面各元素变化趋势。图 15(a) 表明随着离焦距离增加,由于试样表面残留先减少后增加,碳纤维主要成分是 C 元素,因此 C 元素呈现先增加后减少的趋势,而 O 元素变化趋势与 C 正好相反。图 15(b) 表明当离焦距离为 40 mm 时,不含 Ti 元素。此外,当离焦距离范围为 60~100 mm 时, O 和 Ti 元素均呈现上涨趋势。图 10 的微观形貌表明,在此离焦距离范围内,纤维表面均出现热损伤现象,残留物

呈现熔化重凝的颗粒状。进一步证明此时涂层和树脂去除依赖于激光作用于纤维上的热量积累。

表 3 不同离焦距离清洗后试样表面的主要成分 (at%)
Tab. 3 Prominent constituents on the sample surface after cleaning at different defocus distances (at%)

Defocus distance	C	O	Si	Ti
0 mm	83.9	15.6	0.3	0.2
20 mm	98.0	1.8	0.0	0.1
40 mm	99.9	0.0	0.1	0.0
60 mm	92.6	4.5	2.7	0.2
80 mm	87.3	11.9	0.6	0.2
100 mm	81.1	17.7	0.9	0.3

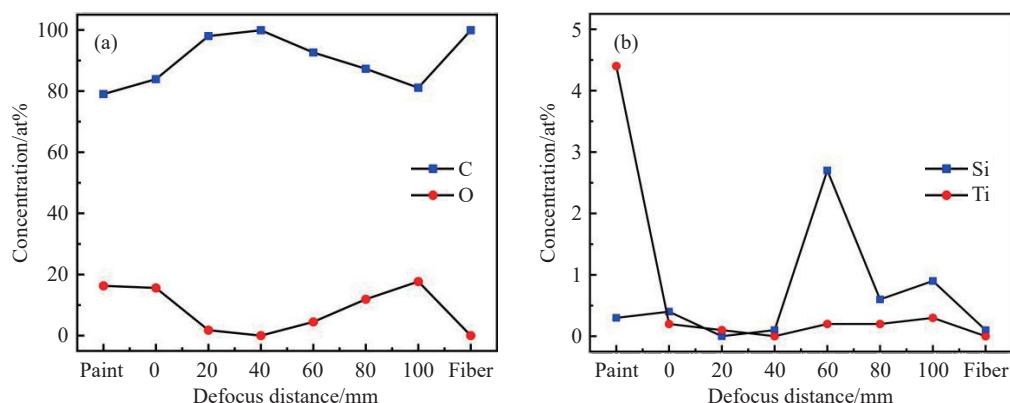


图 15 不同离焦距离清洗后试样表面元素变化趋势。(a) C 和 O 元素; (b) Si 和 Ti 元素

Fig. 15 Variation trends of elements on the surface of the cleaned sample under different defocus distances. (a) C and O elements; (b) Si and Ti elements

4.2 润湿性分析

去除涂层后,表面接触角的变化反映了材料表面的亲疏水性^[29-30],在涂层的重新涂装过程中起关键作用^[31],较好的亲水性有利于涂层的二次喷

涂^[32-33]。对不同离焦距离清洗后的样品进行接触角测试,每个样本测量三组数据,结果如图 16 所示。图 16(a)~(g) 和图 16(h) 分别为不同离焦距离清洗后试样表面的静态接触角和接触角的变化趋势。

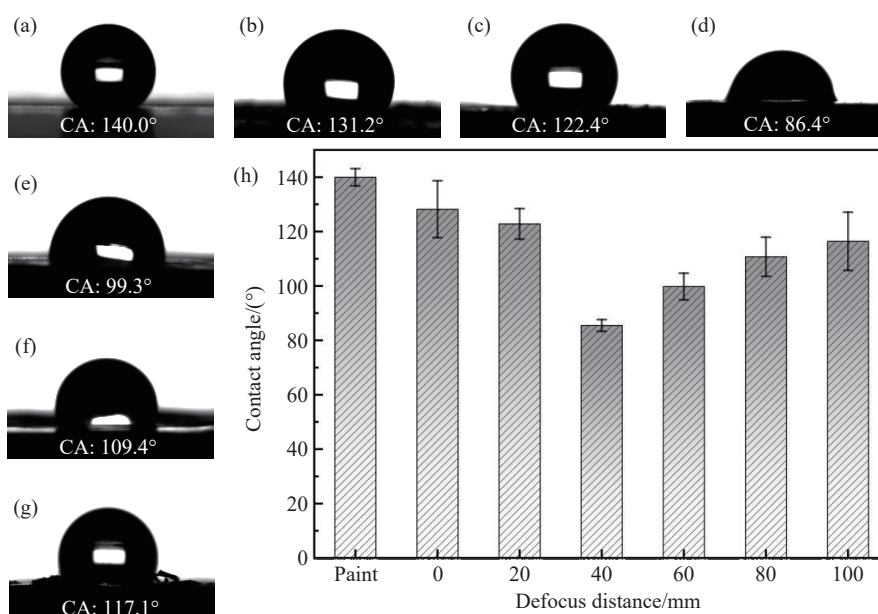


图 16 不同离焦距离清洗后试样表面的接触角。(a) 未清洗; (b) 0 mm; (c) 20 mm; (d) 40 mm; (e) 60 mm; (f) 80 mm; (g) 100 mm; (h) 接触角的变化趋势

Fig. 16 Contact angle of the cleaned sample surface under different defocus distances. (a) Uncleaned; (b) 0 mm; (c) 20 mm; (d) 40 mm; (e) 60 mm; (f) 80 mm; (g) 100 mm; (h) Variation trend of contact angle

图 16(a) 为未清洗的样品表面接触角,此时接触角为 140°,展现出良好的疏水性能(接触角大于 90°呈现疏水性,小于 90°为亲水性)。当离焦距离为 0 mm 和 20 mm 时,即在焦点附近清洗时,图 16(b) 和图 16(c) 表明清洗后试样的接触角分别为 131.2°和 122.4°。尽管与未清洗的样品相比

接触角降低,但仍然呈现出较强的疏水性能。从图 7(a) 和图 7(b) 可以看出,清洗后试样表面纤维编织交界处有大量的残留物。在图 9(a)~(d) 中,纤维间隙中存在未完全去除的树脂残留。这些残留物阻碍了液滴扩张,使得试样呈现疏水性。当离焦距离为 40 mm 时,图 7(c) 和图 9(e)~(f) 表明

样品表面残留较少,纤维间无树脂残留,液滴更容易浸入样品。如图 16(d) 所示,此时接触角进一步下降至 86.4°,试样呈现亲水性。

随离焦距离的进一步增大,图 16(e)~(g) 表明接触角随之增大,清洗后试样疏水性能增加。图 7(d)~(f) 和图 10 表明随离焦距离的增大,纤维表面和间隙中的残留物增加,这些残留物会阻碍液滴扩张,使得试样表面的接触角增大。

综上所述,激光清洗能够有效改善试样的润湿性能,无残留的清洗表面最有利于涂层的二次喷涂。

5 结 论

本文利用近红外纳秒脉冲激光用“S”型扫描路径对 CFRP 表面涂层进行清洗。首先在离焦时讨论了功率和扫描速度对清洗效果的影响,并确立了两者较为优化的参数组合。在优化参数下改变离焦距离进行清洗,通过分析清洗后试样表面形貌、元素组成和表面润湿性变化,综合讨论了不同离焦距离下清洗机制和清洗效果的变化规律。主要结论如下:

参考文献:

- [1] GU J Y, SU X, JIN Y, *et al.*. Research progress and prospects of laser cleaning for CFRP: a review [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 185: 108349.
- [2] 顾军义, 李文琴, 苏轩, 等. 碳纤维复合材料飞机蒙皮表面漆层激光清洗工艺研究 [J]. *中国激光*, 2024, 51(12): 1202201.
GU J Y, LI W Q, SU X, *et al.*. Research on laser cleaning process of paint layer on carbon fiber composite aircraft skin [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(12): 1202201. (in Chinese).
- [3] VIJAYAN D S, SIVASURIYAN A, DEVARAJAN P, *et al.*. Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites in civil engineering application—a comprehensive review [J]. *Buildings*, 2023, 13(6): 1509.
- [4] LIU S J, LI F, ZUO P, *et al.*. Advancements in ultrafast laser processing of carbon fiber reinforced plastics: mechanism, precision drilling, surface modification, and emerging applications [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113902.
- [5] YANG H, LIU H X, GAO R X, *et al.*. Numerical simulation of paint stripping on CFRP by pulsed laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107450.
- [6] SMITH R P, QURESHI Z, SCAIFE R J, *et al.*. Limitations of processing carbon fibre reinforced plastic/polymer material using automated fibre placement technology [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 35(21): 1527-1542.
- [7] WANG W, JIANG Q Y, LIU W J, *et al.*. Effect of laser fluence on the cleaning quality and surface properties of TA15 titanium alloy surface paint layer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 112032.
- [8] 李晨毓, 胡文哲, 张雪雁, 等. 双波长纳秒激光清洗技术在大理石文物上的应用 [J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(5): 1050-1059.
LI CH Y, HU W ZH, ZHANG X Y, *et al.*. Application of dual-wavelength nanosecond laser cleaning technology on stone artifacts [J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1050-1059. (in Chinese).

1. 样品位于焦点处时,由于此时光斑直径最小,功率密度最大,很难在不损伤纤维的前提下完全去除涂层和树脂。当功率、扫描速度和离焦距离分别为 25 W、720 mm/s 和 40 mm 时,清洗后的试样表面无损伤和残留,清洗效果良好;

2. 激光清洗过程中,清洗机制同时受功率密度和重叠率的共同影响。在焦点处清洗时,扫描光斑具有较高的功率密度和较低的重叠率,能量大多用于材料气化去除,因此热量积累少。纤维编织交界处和间隙中残留大量树脂,气化是涂层和树脂的主要去除机制。随离焦距离增大,清洗机制由气化向热积累效应转化,涂层和树脂主要依靠纤维上的热量积累去除,先熔化后再逐渐气化;

3. 焦点附近清洗后试样表面的残留主要由未完全气化的环氧树脂构成。离焦距离增大后,试样表面的残留主要是涂层和树脂与空气中的氧气充分反应后的氧化产物;

4. 通过调控离焦距离能够达到材料去除和热量积累的动态平衡,实现涂层和树脂的无损去除;

5. 激光清洗能够有效改善试样表面的润湿性能,有利于涂层的二次涂覆。

- [9] ZHU G D, XU ZH H, JIN Y, *et al.*. Mechanism and application of laser cleaning: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 157: 107130.
- [10] 杨金芳, 何涛涛, 安浦瑞, 等. 激光清洗技术在芯片封装模具中的应用[J]. 中国光学 (中英文), 2026, 19(1): 49-59.
YANG J F, HE T T, AN P R, *et al.*. Application of laser cleaning technology in chip packaging molds[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(1): 49-59. (in Chinese).
- [11] 宋峰, 陈铭军, 陈晔, 等. 激光清洗研究综述 (特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 20220835.
SONG F, CHEN M J, CHEN X, *et al.*. Review of laser cleaning technology (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20220835. (in Chinese).
- [12] 贾宝申, 唐洪平, 苏春洲, 等. 脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202010.
JIA B SH, TANG H P, SU CH ZH, *et al.*. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202010. (in Chinese).
- [13] LIU H X, PAN W F, CHEN X, *et al.*. Wet laser cleaning of paint layers from the surface of a carbon fibre reinforced polymer (CFRP)[J]. *Lasers in Engineering*, 2023, 56(1-3): 209-224.
- [14] WANG J, YANG Y L, QI J Y, *et al.*. Thermodynamic simulation, surface morphology and bending property of carbon fiber reinforced polymer composite material subjected to laser cleaning[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108099.
- [15] XIN M L, LI SH, GU J Y, *et al.*. Non-destructive UV femtosecond laser cleaning of primer on CFRP surface[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 191: 113382.
- [16] ZHAO Z J, LIU X, YANG J X, *et al.*. Shape evolution and characteristics of carbon fiber reinforced polymer surface in laser ablation[J]. *Vacuum*, 2023, 217: 112572.
- [17] GU J Y, SU X, LI W Q, *et al.*. Process and mechanism of paint stripping on CFRP by UV nanosecond laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 171: 110461.
- [18] 王伟, 王蔚, 姚天昊, 等. 激光去除碳纤维复合材料表面树脂工艺试验及胶接性能研究[J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(6): 20240556.
WANG W, WANG W, YAO T H, *et al.*. Experimental study on laser removal of surface resin in carbon fiber composites and adhesive bonding performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(6): 20240556. (in Chinese).
- [19] HOU Y Z, BAI J X, WANG F, *et al.*. Performance and mechanisms of ultraviolet laser ablation of plain-woven CFRP composites[J]. *Composite Structures*, 2024, 328: 117744.
- [20] WANG P, ZHANG ZH, HAO B, *et al.*. Investigation on heat transfer and ablation mechanism of CFRP by different laser scanning directions[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 262: 110827.
- [21] ZHANG X H, CHEN X X, CHEN T, *et al.*. Influence of pulse energy and defocus amount on the mechanism and surface characteristics of femtosecond laser polishing of SiC ceramics[J]. *Micromachines*, 2022, 13(7): 1118.
- [22] ZHENG ZH, WANG CH F, HUANG G, *et al.*. Effect of defocused nanosecond laser paint removal on mild steel substrate in ambient atmosphere[J]. *Materials*, 2021, 14(20): 5969.
- [23] ZHANG T G, LIU T X, BAN G Y, *et al.*. Effect of scanning speed on laser cleaning of composite paint layer on aluminum alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 171: 110470.
- [24] ZHANG D H, XU J, LI ZH CH, *et al.*. Removal mechanism of blue paint on aluminum alloy substrate during surface cleaning using nanosecond pulsed laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107882.
- [25] LI Y H, LI J Y, ZHANG W, *et al.*. Application of pulsed laser ablation thermal model in nanosecond pulsed laser removal of the epoxy resin paint film[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110806.
- [26] XU L Y, LU J R, LI K M, *et al.*. Removal mechanism of CFRP by laser multi direction interaction[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107281.
- [27] TENG ZH, LI Z H, YANG W F, *et al.*. The effect of laser scanning direction on the bonding properties of unidirectional CFRP[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 190: 113199.
- [28] RAUH B, KRELING S, KOLB M, *et al.*. UV-laser cleaning and surface characterization of an aerospace carbon fibre reinforced polymer[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 82: 50-59.
- [29] 王智文, 屈发进, 赵雅文, 等. 氧敏感膜聚合物基质材料对荧光猝灭性能的影响研究[J]. *分析化学*, 2023, 51(12): 1907-1914.

- WANG ZH W, QU F J, ZHAO Y W, *et al.*. Influence of polymer matrix materials for oxygen sensors based on fluorescence quenching by molecular oxygen[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(12): 1907-1914. (in Chinese).
- [30] 刘晨宇, 尹加文, 韩蕴哲, 等. 基于疏水固态接触层的高稳定性铵离子选择电极的制备及性能测试[J]. *分析化学*, 2025, 53(5): 774-784.
- LIU CH Y, YIN J W, HAN Y ZH, *et al.*. Preparation and performance test of highly stable ammonium ion selective electrode based on hydrophobic solid contact layer[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2025, 53(5): 774-784. (in Chinese).
- [31] SONG Y P, WANG S J, PAN Y K, *et al.*. Comparative study of infrared nanosecond laser surface paint removal for carbon fiber reinforced polymer and glass fiber reinforced polymer[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 451: 142061.
- [32] JOTHI V, ADESINA A Y, KUMAR A M, *et al.*. Influence of an anodized layer on the adhesion and surface protective performance of organic coatings on AA2024 aerospace Al alloy[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 138: 105396.
- [33] SEE T L, LIU ZH, CHEETHAM S, *et al.*. Laser abrading of carbon fibre reinforced composite for improving paint adhesion[J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(3): 1045-1054.

作者简介:



王毕艺(1983—),男,湖南湘潭人,硕士,高级工程师,2008年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事强激光与光电材料作用效应理论与实验研究。E-mail: wangbiyi530@163.com



蒋 勇(1982—),男,四川仁寿人,博士,教授,博士生导师,2012年于电子科技大学获得博士学位,主要从事强激光与物质相互作用的理论与实验方面的研究工作。E-mail: y_jiang@swust.edu.cn