

碳纤维复合材料飞机蒙皮表面漆层激光清洗工艺研究

顾军义¹, 李文琴¹, 苏轩^{2*}, 徐杰^{1,2,3}, 郭斌^{1,2,3**}¹哈尔滨工业大学(深圳)材料科学与工程学院, 广东 深圳 518055;²哈尔滨工业大学郑州研究院, 河南 郑州 450046;³哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 激光清洗碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)表面涂层一直面临着形貌破坏与基体过热的风险。为了明晰工艺参数对激光清洗CFRP飞机蒙皮表面油漆的影响规律,探究CFRP表面油漆的激光清洗机理,进行了红外纳秒激光清洗CFRP表面油漆的实验。首先利用田口正交阵列开展了不同参数下的清洗实验。随后采用信噪比(S/N)与方差分析(ANOVA)探讨了激光功率、扫描速度、搭接率与重复频率等工艺参数对油漆清洗深度、表面粗糙度和清洗温度的影响。最后借助红外热成像与高速摄像技术,对激光清洗过程中的温度响应、羽流形成与消逝及漆层动态行为进行了观测。研究表明:搭接率是影响清洗深度、表面粗糙度和清洗温度的最主要参数,扫描速度与激光功率的影响同样显著,而重复频率的影响不显著。CFRP表面油漆的激光去除机制主要以激光热效应造成的热烧蚀、气化为

关键词 激光技术; 激光清洗; 碳纤维增强复合材料; 除漆机理; 清洗工艺

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230927

1 引言

凭借高强度、低重量、耐腐蚀以及良好的抗疲劳特性^[1-2],碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)被广泛应用于飞机工业,CFRP蒙皮表面的漆层清洗尤为重要。传统的油漆清洗工艺如机械打磨、化学试剂、喷砂等存在效率低、污染环境、损伤基体的风险。寻找一种绿色、高效、无损的替代技术是大势所趋。随着激光技术的不断发展,激光清洗技术被应用于文物保护、微电子、轨道交通、航空航天等领域^[3-4]。激光清洗是利用具有高峰值脉冲功率的激光辐照锈层、漆层表面,激光与物质之间复杂的相互作用使锈层、漆层脱离基体表面。与传统除漆手段相比,激光清洗具有不与工件直接接触、减少环境污染以及兼容自动化、智能化设备等优势^[5-7]。

目前,较多研究聚焦于激光清洗工艺,并以金属基体为主。Li等^[8]在飞机铝合金蒙皮的激光清洗中发现,激光能量密度对基体粗糙度有显著影响,扫描速度的影响则不显著。Zhang等^[9]研究发现,粗糙度随着能量密度的增大而增大,随着光斑搭接率的增大先增大后减小。张天刚等^[10]发现,随着搭接率的提高,铝合金表面依次出现底漆残留、氧化膜破坏、基体烧损的现象。李倩靓等^[11]在玻璃钢表面漆层的激光清洗中发

现,脉冲激光适用于定量、逐层去除,连续激光适用于双层涂层清洗。陈亚军等^[12]通过响应面分析法分析了CFRP激光除漆工艺,发现激光功率对纤维暴露百分比的影响最为显著。Yang等^[13]通过有限元法模拟了激光清洗CFRP表面漆层的温度场,结果显示,光斑搭接率会导致CFRP基板温度急剧上升。在机理研究方面:Zhao等^[14]基于形态学分析,指出除漆过程存在燃烧、热应力振动和等离子体冲击等机制;Zhang等^[15]联合数值计算与动态观察,揭示了油漆颜色对激光清洗机制的影响;Zhang等^[16]通过观察等离子体的行为,指出相爆炸和冲击效应导致了氧化物的飞溅和去除。通过简要的回顾可以发现,目前的机理研究主要通过数值模拟、动态行为观察、形态学表征等手段。其中动态行为观察、形态学表征等方法因能提供较为直观的参考而被广泛采用。

需要指出的是,激光清洗CFRP表面油漆的挑战是显而易见的。首先CFRP与油漆之间的物理边界不明显,其次树脂的允许温度非常低。这将带来一系列潜在的损伤风险,如纤维断裂、树脂热解、基体分层等^[17-19]。解决这些问题的关键在于开展足够多的工艺实验,建立可靠的清洗参数-清洗特性关系。清洗深度(H)、表面粗糙度(S_a)、清洗温度(T)是最重要的三个清洗指标, H 代表了清洗效率与有效性, S_a 与再喷漆质

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-07-20; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(U19A2077)、广东省重点领域研发计划(2018B090905003)

通信作者: *suxuanh200@163.com; **guobin@hit.edu.cn

量相关, T 则反映了热损伤倾向。因此, 本文利用红外纳秒激光去除 CFRP 表面油漆, 以激光功率 (P)、扫描速度 (V)、搭接率 (η)、重复频率 (f) 为变量, 对样品形貌、 H 、 S_a 以及 T 进行分析与统计。最后, 借助红外热成像与高速摄像技术观测样品的温度响应、羽流状态与漆层的动态行为, 判断油漆清洗机理。

2 激光清洗实验

2.1 实验材料

实验中 CFRP 基体取自某型号飞机的蒙皮, 厚度约为 1.1 mm, 由环氧树脂与碳纤维两部分异质材料组成。其中碳纤维的质量分数约为 70%, 为平纹编织结构。CFRP 表面涂覆有环氧-聚氨酯油漆, 漆层总厚度约为 75 μm , 呈灰白色。图 1(a)、(b) 分别为实验材料

横截面的宏观与微观形貌。可以看出, CFRP 表面漆层大致可以分为四层, 是多次喷涂而成的。图 1(c) 显示了漆层厚度方向上元素的变化。漆层成分以 C、O、Ti、Si 元素为主, 不同区域的元素含量波动较大。

在之前的研究^[20]中, 本实验样品 (CFRP 基体、油漆) 的热物理性能已经被表征。根据热重分析与差示扫描量热分析结果, 油漆在氮气氛围中的初始分解温度大概为 270 $^{\circ}\text{C}$, 并在 320 $^{\circ}\text{C}$ 和 450 $^{\circ}\text{C}$ 附近剧烈分解。对于 CFRP 基体, 基体树脂在氮气氛围中的初始分解温度大概为 300 $^{\circ}\text{C}$, 并在 400 $^{\circ}\text{C}$ 左右剧烈分解。这表明油漆在激光的作用下, 只有温度达到 270 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 才能实现漆层的有效热分解。此外, 在激光脱漆过程中, CFRP 的基体温度一旦超过 300 $^{\circ}\text{C}$, 将发生实质性的热损伤。

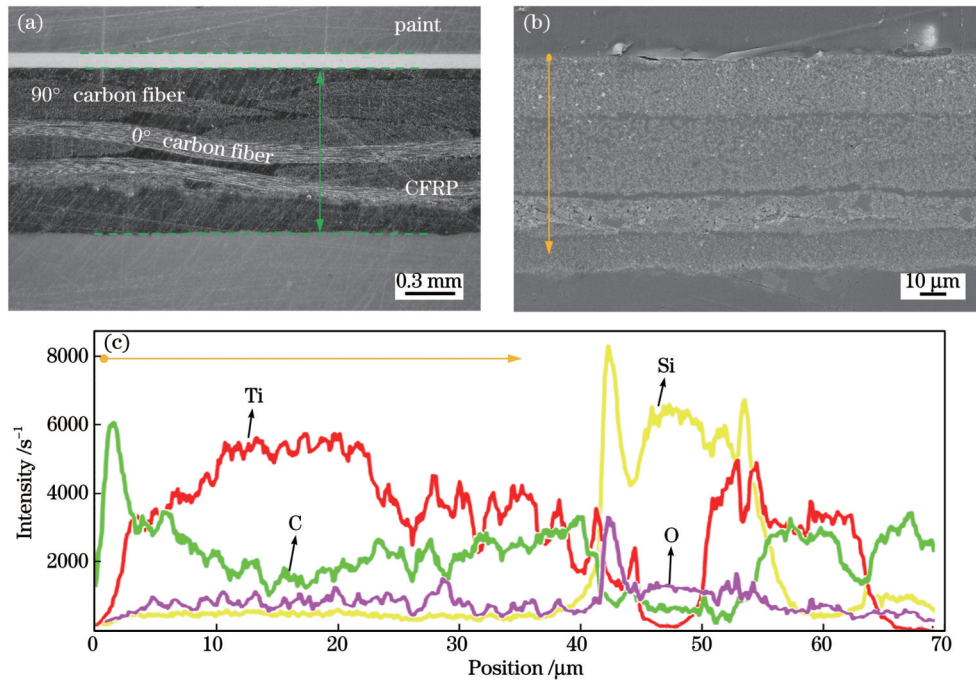


图 1 CFRP 样品形貌及漆层元素组成。(a) CFRP 样品宏观形貌; (b) CFRP 样品微观形貌; (c) 漆层元素组成

Fig. 1 Morphologies of CFRP sample and composition of paint layer elements. (a) Macroscopic morphology of CFRP sample; (b) microscopic morphology of CFRP sample; (c) composition of paint layer elements

2.2 实验设备与方法

漆层清洗由激光清洗系统执行。整个系统如图 2 所示, 包含激光器、二维振镜、机器人、水冷装置、除尘器以及计算机系统等。清洗系统所用激光器为波长 (λ) 为 1064 nm 的光纤脉冲激光器, 激光直径 (D) 约为 1 mm。机器人可以将激光头移至样品上方, 并通过 Z 轴调节焦距。在控制系统中设定光束移动路径, 并由二维振镜实现。本实验将扫描路径设置为“弓”字形, 并在每一行光束扫描路径之间设置一定的搭接率, 以实现 10 mm \times 10 mm 矩形区域的清洗。搭接率 (η) 的计算公式为

$$\eta = \frac{l}{D}, \quad (1)$$

式中: l 为两个光斑之间的重叠长度。

本文开展了一系列田口正交阵列工艺实验, 将激光清洗工艺参数与清洗特性进行关联, 从而完成参数评价。需要说明的是, 本文目标在于研究激光与漆层相互作用期间的参数影响规律与清洗特性, 因此对所用参数进行了控制, 以防止纤维烧损。基于此, 本实验使用了 4 个可控参数, 分别为激光功率、扫描速度、重复频率与搭接率。每组参数下设计了 5 个水平。各组因素的水平值如表 1 所示。4 个因素与 5 个水平组合构成了一个 L25 正交矩阵, 如表 2 所示。之后, 按照表 2 所示内容执行激光清洗实验, 得到 No.1~No.25 共 25 组样品。清洗程序完成后, 分别使用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对清洗后样品的宏观

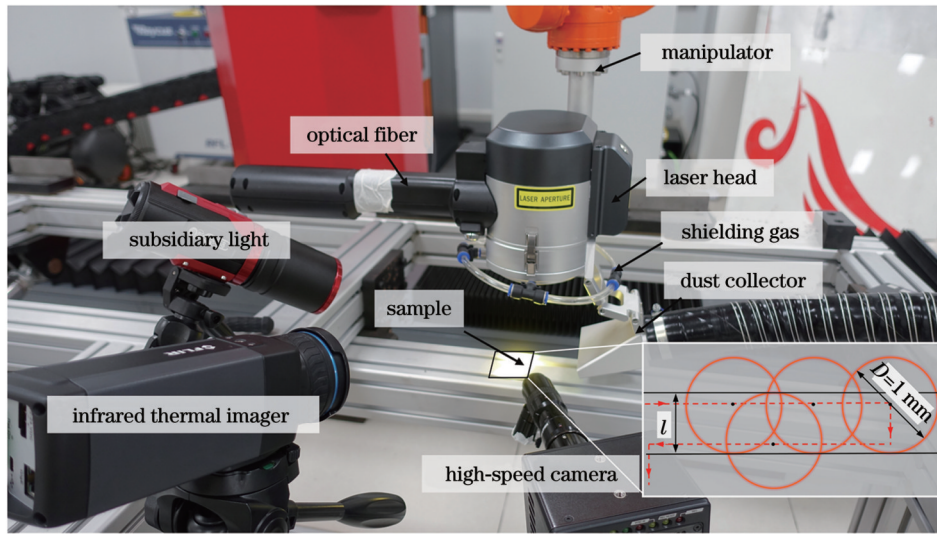


图 2 激光清洗系统

Fig. 2 Laser cleaning system

表 1 实验变量及其相应的水平

Table 1 Experimental variables and levels

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Laser power /W	100	150	200	250	300
Scanning speed /(mm/s)	3000	2500	2000	1500	1000
Repetition frequency /kHz	20	25	30	35	40
Overlap ratio /%	90	80	70	60	50

表 2 正交阵列(L25)

Table 2 Orthogonal array (L25)

Order No.	P/W	$V/(mm/s)$	f/kHz	$\eta/\%$	Order No.	P/W	$V/(mm/s)$	f/kHz	$\eta/\%$
1	100	3000	20	90	14	200	1500	20	70
2	100	2500	25	80	15	200	1000	25	60
3	100	2000	30	70	16	250	3000	35	80
4	100	1500	35	60	17	250	2500	40	70
5	100	1000	40	50	18	250	2000	20	60
6	150	3000	25	70	19	250	1500	25	50
7	150	2500	30	60	20	250	1000	30	90
8	150	2000	35	50	21	300	3000	40	60
9	150	1500	40	90	22	300	2500	20	50
10	150	1000	20	80	23	300	2000	25	90
11	200	3000	30	50	24	300	1500	30	80
12	200	2500	35	90	25	300	1000	35	70
13	200	2000	40	80					

形貌与微观形貌进行观察。同时,如图 3 所示,利用激光共聚焦显微镜对油漆清洗深度与样品表面粗糙度进行测量。最后,分别采用方差分析(ANOVA)和信噪

比(S/N)对所获实验数据进行研究。此外,在清洗过程中,利用红外热成像仪记录实验样品的温度响应,利用高速相机捕捉实验样品的动态行为。

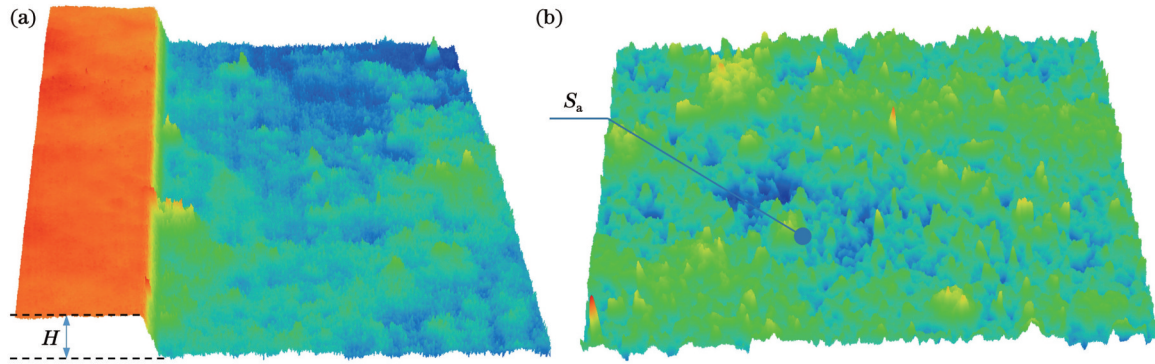


图 3 激光共聚焦显微镜测量内容。(a)激光清洗深度;(b)激光清洗区域的面粗糙度

Fig. 3 Measurement items of laser confocal microscope. (a) Laser cleaning depth; (b) surface roughness of laser cleaning area

3 实验结果

3.1 宏观与微观形貌

图 4 展示了激光清洗后样品表面的宏观形貌。由

于实验对参数进行了控制,所有样品均未出现基体的严重烧损现象,因此比较能真实地反映出激光与漆层的作用规律。总体来看,所有样品表现出两种形态:一种是样品表面部分区域显露出黑色基体,如 No.9、

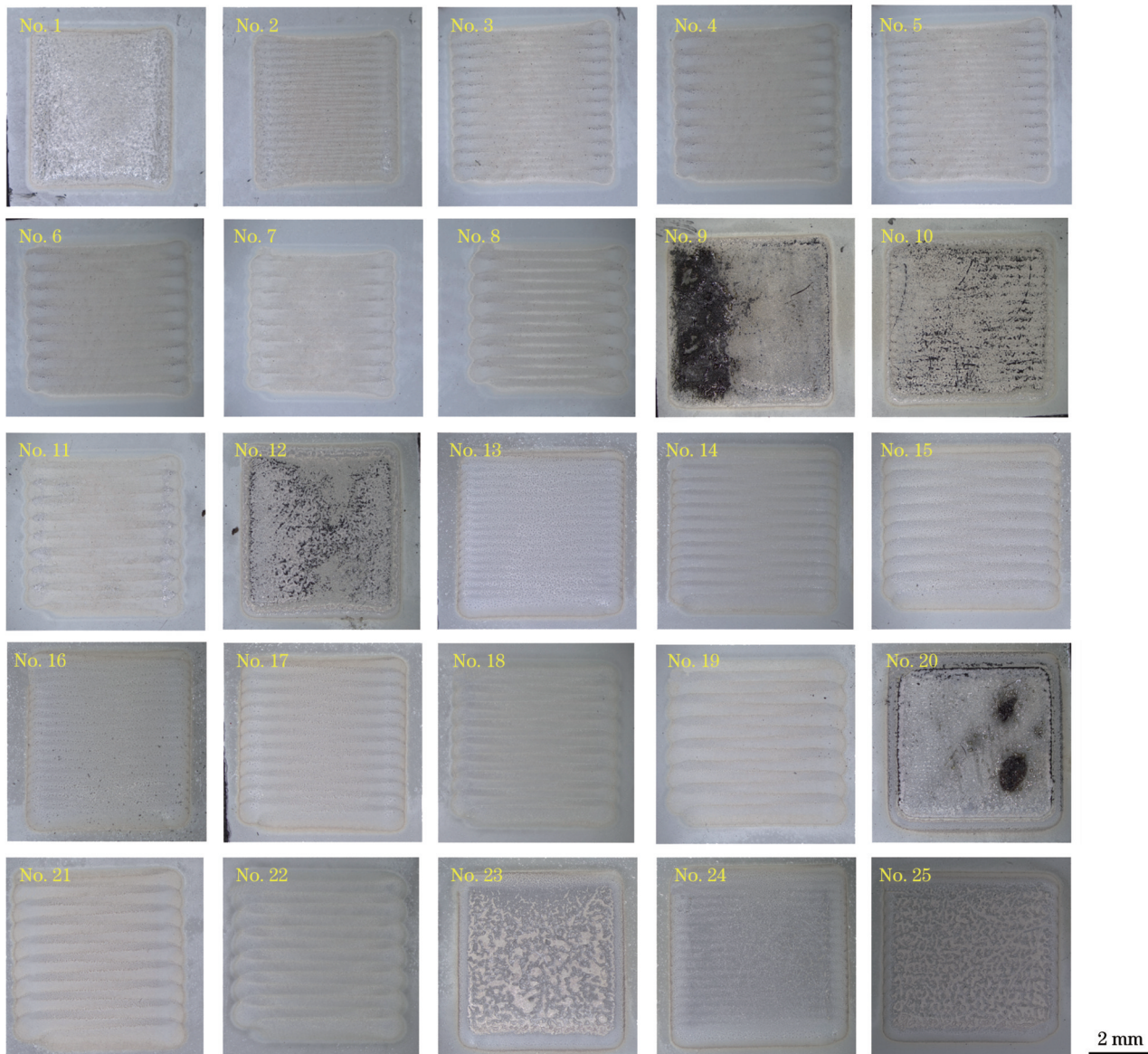


图 4 CFRP 样品激光清洗后宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphologies of CFRP sample after laser cleaning

No.9、No.12、No.20。这四组样品是在较高的搭接率或较低的激光扫描速度下进行激光清洗的,共同点在于激光对油漆存在较高的能量输入。另一种是油漆表层部分被去除,样品表面残留完整的漆层。此外,部分样品的表面粗糙度也有显著变化,如 No.23、No.25。相比于激光作用之前,剩余漆层具有显著的凹凸表面。观察样品 No.8、No.11、No.14、No.15、No.17、No.19、No.21、No.22 可以发现,相比于其他样品,表面遗留有显著的激光搭接痕迹。这类样品的共同点是在较低的搭接率或较高的扫描速度下进行激光清洗的。

图 5(a1)、(a2) 是样品 No.22 的 SEM 图,其更详细展示了低搭接率下的典型样品形貌。相比于非搭接区,光斑搭接区内由于激光的重复扫描,油漆烧蚀痕迹更为明显。同时由于搭接率仅为 50%,光斑之间的重叠较少,搭接区与非搭接区之间的界限较为明显。这意味着较低的光斑搭接率不利于提高油漆清洗的均匀性。

图 5(b1)、(b2) 为样品 No.20 中基体暴露区域(即图 4 中 No.20 的黑色区域)的 SEM 图,其更详细展示了高激光能量输入下的典型样品形貌。样品 No.20 是在 90% 搭接率、1000 mm/s 扫描速度、250 W 激光功率下进行激光清洗的,最高的搭接率、最低的扫描速度与较高的激光功率共同导致了较大的激光热输入。因此,部分油漆被完全清洗,基体顶部树脂也被一并去除,碳纤维暴露。如前文所述,由于参数控制,激光主要作用于油漆,碳纤维仍保持完整的形态。

图 5(c1)、(c2) 为样品 No.25 的 SEM 图,其更详细展示了具有凹凸表面结构的典型样品的形貌。可以看出,残留漆层的凹凸表面上分布着斑点状凸起。根据能谱分析(EDS)检测结果可知,这些凸起物主要由 C、O、Ti 等元素组成,与油漆本身成分相近。此外,相比于平整漆层,这些凸起更为光滑,具有熔化、重凝特征,可以判断这是油漆中的固化剂受热熔化继而凝固形成的。

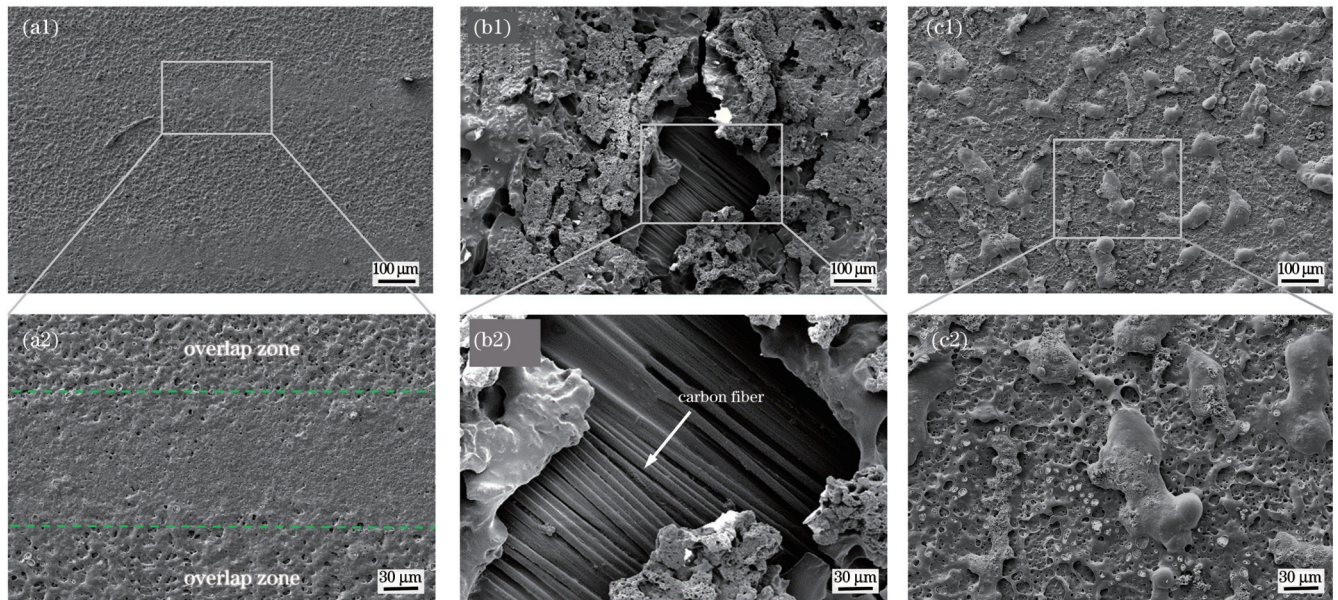


图 5 CFRP 样品在激光清洗后的 SEM 图。(a1)(a2) 样品 No. 22; (b1)(b2) 样品 No. 20; (c1)(c2) 样品 No. 25

Fig. 5 SEM images of CFRP samples after laser cleaning. (a1)(a2) Sample No. 22; (b1)(b2) sample No. 20; (c1)(c2) sample No. 25

3.2 三维轮廓

通过激光共聚焦显微镜对激光清洗后的样品表面的三维轮廓进行观察。图 6 为各组样品激光清洗区域的三维形貌图。可以发现,不同激光清洗参数下的样品表面粗糙度存在较大差异。由于搭接率(50%与 60%)较低,样品 No.15、No.18、No.19、No.21、No.22 表面的搭接痕迹十分突出,并形成谷脊结构。

图 7 为清洗-未清洗分界区域的三维轮廓图,显然清洗深度具有显著的参数依赖性。同样,对各组样品的清洗深度进行了测量。

3.3 羽流观测

图 8 展示了不同清洗参数下拍摄的红外热成像图。需要指出,图 8 展示的是清洗温度达到峰值时的

图像。值得注意的是,由于激光的脉冲频率较大,现有的光电测温技术无法精确捕捉每个激光脉冲下的样品表面温度,但能较为准确地测得样品在红外热成像图像相邻帧之间的常态温度,因此为温度测量提供了较好的参考依据。

由图 8 可以看出,激光清洗过程将在实验样品处及其附近引起两个高温区域。其一是激光作用在基体上的区域。虽然所有样品的漆层均有一定程度的去除,但清洗温度有较大的差异。根据温度监测结果可知,该区域的最低清洗温度为 244 °C,最高清洗温度为 590.4 °C。另外一个高温区域是样品上方的高温羽流区。羽流包括四种物质状态,即固体、液体、气体和等离子体^[21]。根据 Yu 等^[22]的研究可知,

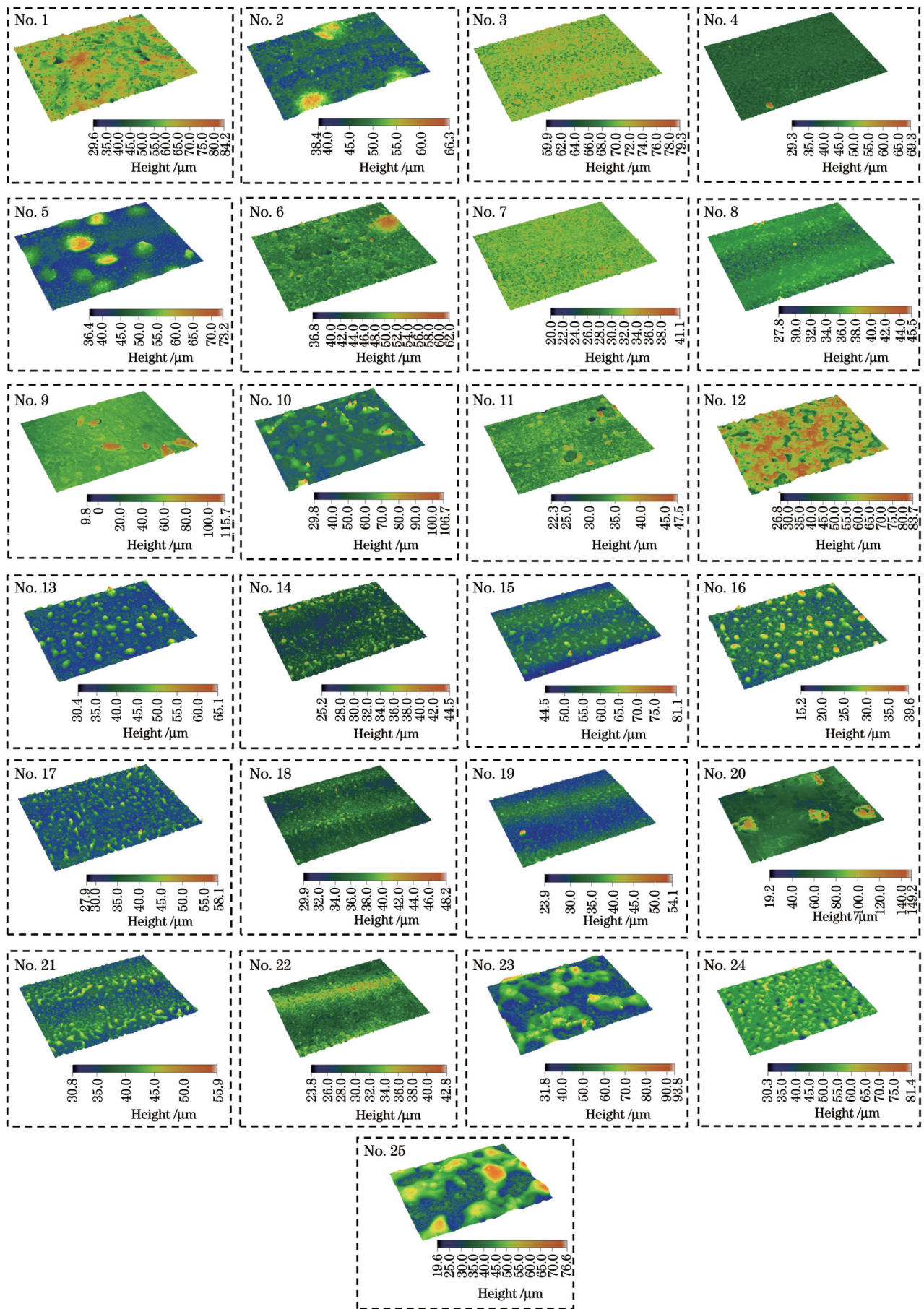


图 6 CFRP 样品激光清洗区域的三维轮廓

Fig. 6 3D profiles of laser cleaning areas of CFRP samples

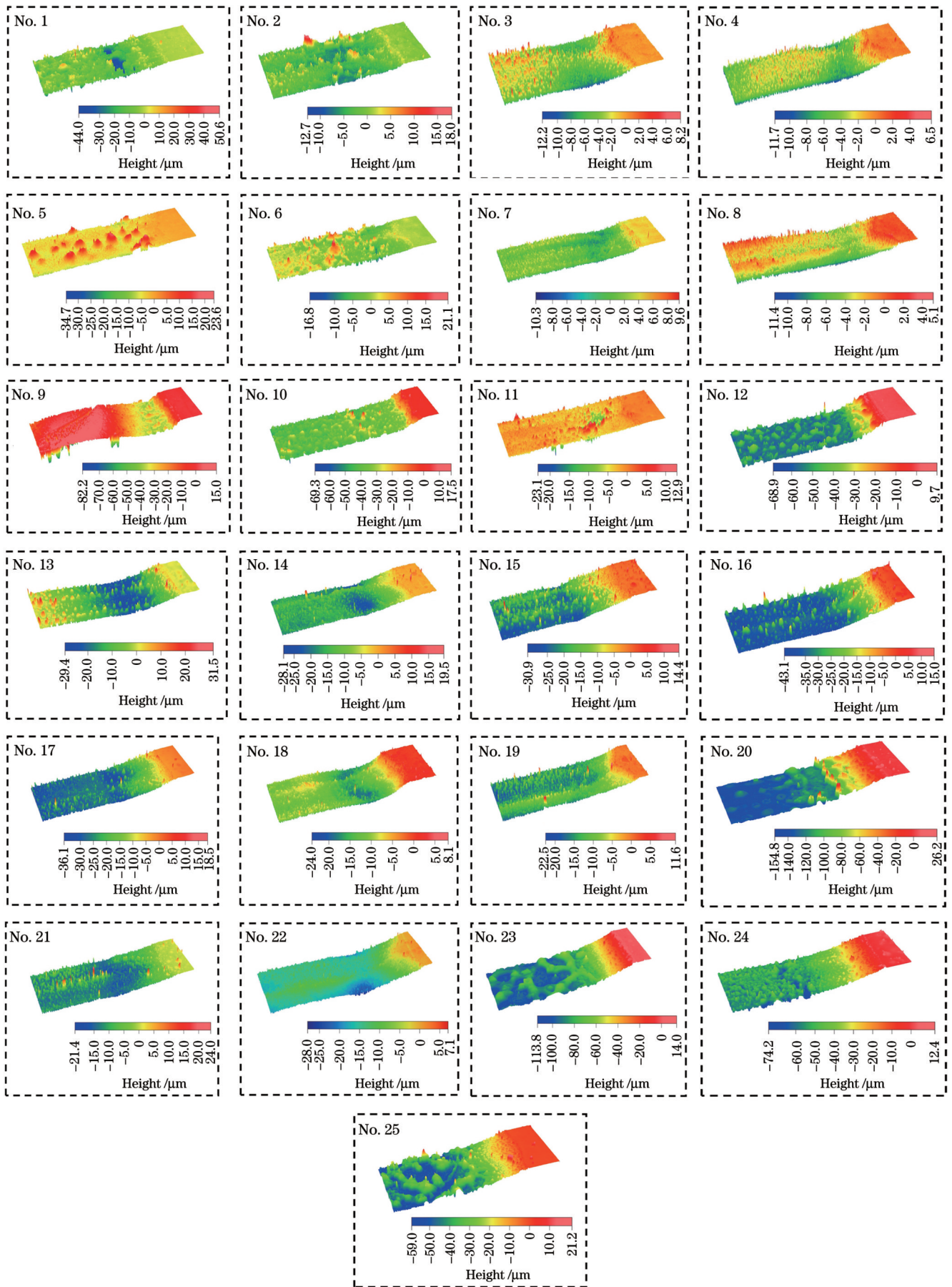


图 7 清洗-未清洗分界区域的三维轮廓

Fig. 7 3D profiles of cleaned-uncleaned boundary areas

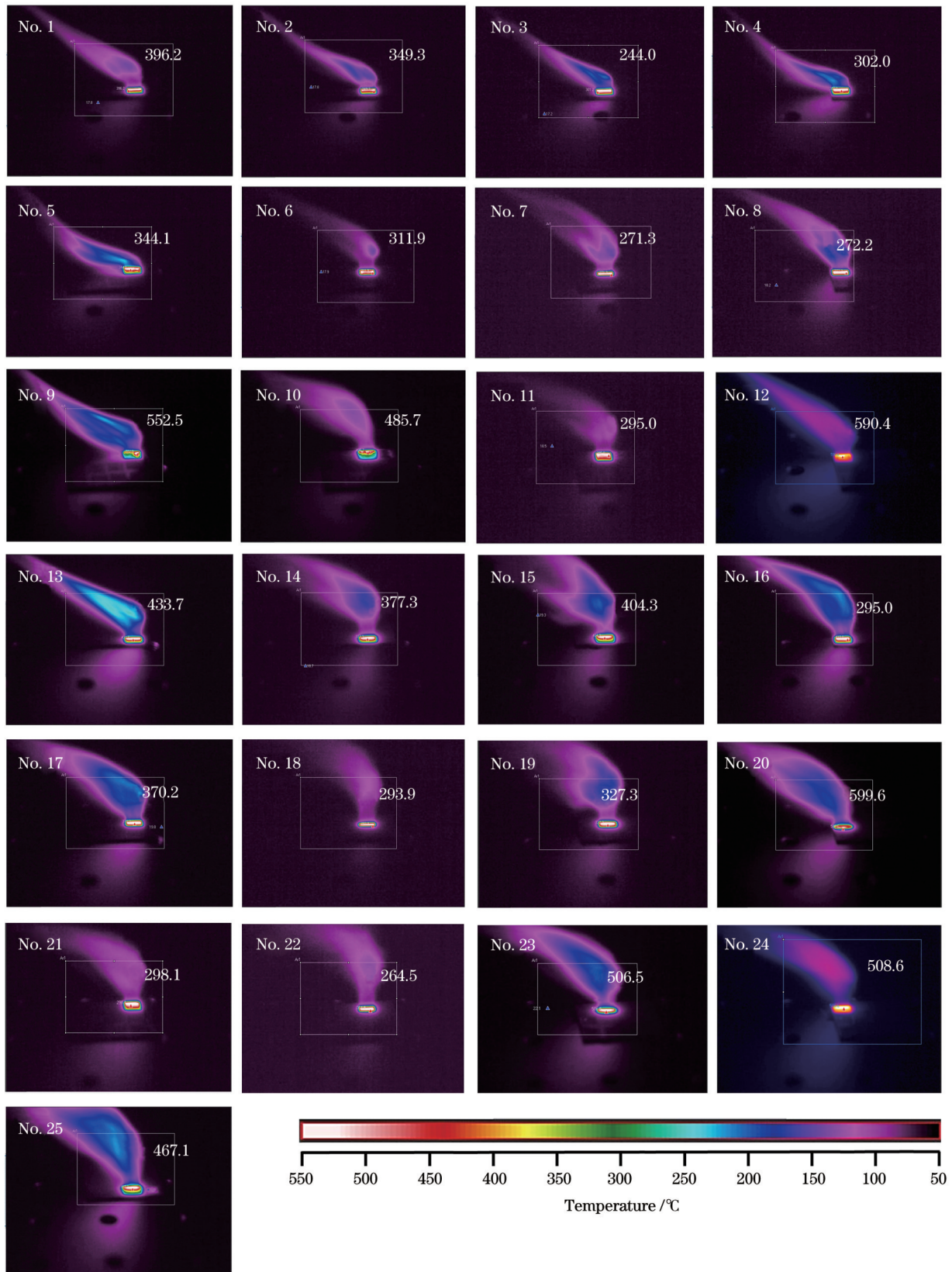


图 8 样品在温度峰值处的红外热成像图

Fig. 8 Infrared thermal imaging patterns of samples at peak temperature

激光脱漆过程中的羽流主要由 CO_2 、 CO 、 H_2O 与有机微颗粒等构成。由于羽流的发射率并不稳定^[23], 因此未对高温羽流温度进行测量, 但根据羽流颜色可以判断其温度的相对大小。羽流体积也反映出激光

清洗的剧烈程度, 因此羽流大小与清洗温度也表现出了一致性。如样品 No.23、No.24、No.25、No.9、No.12、No.13 具有较高的清洗温度与较大的羽流体积。

4 结果讨论

4.1 信噪比分析

对于 S/N , 不同评价指标有着不同的期望。如前文所述, 高清洗效率、高油漆黏附强度与低清洗温度表

征着良好的激光清洗特性与质量。因此较大的清洗深度、较高的样品表面粗糙度与较低的清洗温度是较为理想的清洗目标。本文采用望大、望大与望小特性, 分别计算清洗深度、表面粗糙度、清洗温度的信噪比。表 3 对 25 组参数的 H 、 S_a 、 T 的值与信噪比进行了统计。

表 3 H 、 S_a 、 T 的值与 S/N 统计
Table 3 Values and S/N statistics of H , S_a , and T

Sample No.	H		S_a		T	
	Measured value	S/N	Measured value	S/N	Measured value	S/N
1	6.40 μm	16.12	4.28 μm	12.63	396.2 $^{\circ}\text{C}$	-51.96
2	7.20 μm	17.15	2.33 μm	7.35	349.3 $^{\circ}\text{C}$	-50.86
3	8.80 μm	18.89	1.09 μm	0.75	301.2 $^{\circ}\text{C}$	-49.58
4	3.30 μm	10.37	1.23 μm	1.80	302.0 $^{\circ}\text{C}$	-49.60
5	1.90 μm	5.58	3.40 μm	10.63	344.1 $^{\circ}\text{C}$	-50.73
6	3.00 μm	9.54	1.48 μm	3.41	311.9 $^{\circ}\text{C}$	-49.88
7	2.90 μm	9.25	0.88 μm	-1.11	271.3 $^{\circ}\text{C}$	-48.67
8	2.00 μm	6.02	1.01 μm	0.09	272.2 $^{\circ}\text{C}$	-48.70
9	35.86 μm	31.09	4.35 μm	12.77	552.5 $^{\circ}\text{C}$	-54.85
10	37.97 μm	31.59	4.89 μm	13.79	485.7 $^{\circ}\text{C}$	-53.73
11	2.40 μm	7.60	1.20 μm	1.58	295.0 $^{\circ}\text{C}$	-49.40
12	58.70 μm	35.37	6.27 μm	15.95	590.4 $^{\circ}\text{C}$	-55.42
13	42.90 μm	32.65	2.52 μm	8.03	433.7 $^{\circ}\text{C}$	-52.74
14	16.20 μm	24.19	1.55 μm	3.81	377.3 $^{\circ}\text{C}$	-51.53
15	20.70 μm	26.32	2.43 μm	7.71	404.3 $^{\circ}\text{C}$	-52.13
16	12.20 μm	21.73	2.29 μm	7.20	410.0 $^{\circ}\text{C}$	-52.26
17	15.70 μm	23.92	2.12 μm	6.53	370.2 $^{\circ}\text{C}$	-51.37
18	9.82 μm	19.84	1.19 μm	1.51	293.9 $^{\circ}\text{C}$	-49.36
19	11.70 μm	21.36	1.93 μm	5.71	327.3 $^{\circ}\text{C}$	-50.30
20	140.50 μm	42.95	9.74 μm	19.77	599.6 $^{\circ}\text{C}$	-55.56
21	6.90 μm	16.78	2.11 μm	6.49	298.1 $^{\circ}\text{C}$	-49.49
22	9.90 μm	19.91	1.54 μm	3.75	264.5 $^{\circ}\text{C}$	-48.45
23	70.09 μm	37.01	9.02 μm	19.10	506.5 $^{\circ}\text{C}$	-54.09
24	44.50 μm	32.97	3.16 μm	9.99	508.6 $^{\circ}\text{C}$	-54.13
25	43.40 μm	32.75	7.24 μm	17.19	467.1 $^{\circ}\text{C}$	-53.39

之后进行信噪比分析, 分析结果如表 4 所示, 其中 σ 代表每列数据的极差, $K1\sim K5$ 为响应等级。

表 4 平均 S/N 响应
Table 4 Average S/N response

Level	Average S/N response for H				Average S/N response for S_a				Average S/N response for T			
	P	V	f	η	P	V	f	η	P	V	f	η
K1	13.62	14.35	22.33	32.51	6.63	6.26	7.10	16.04	50.55	50.60	51.01	54.38
K2	17.50	21.12	22.28	27.22	5.79	6.49	8.66	9.27	51.16	50.95	51.45	52.74
K3	25.23	22.88	22.33	21.86	7.42	5.90	6.20	6.34	52.25	50.89	51.47	51.15
K4	25.96	24.00	21.25	16.51	8.14	6.82	8.44	3.28	51.77	52.08	51.87	49.85
K5	27.88	27.84	22.00	12.10	11.31	13.82	8.89	4.35	51.91	53.11	51.84	49.52
σ	14.26	13.48	1.08	20.42	5.52	7.923	2.70	12.77	1.70	2.51	0.87	4.86
Rank	2	3	4	1	3	2	4	1	3	2	4	1

通过对表 4 的分析可知,对于清洗深度 H ,各影响因素按权重由高到低排列,分别为搭接率、激光功率、扫描速度、重复频率;对于表面粗糙度 S_a 与清洗温度 T ,各因素按权重由高到低排列,分别为搭接率、扫描速度、激光功率、重复频率。不难理解,因为激光功率直接决定了激光的输入能量,扫描速度决定了激光与材料的作用时间,所以具有的较大权重。值得注意的是,搭接率在三个评价指标里均具有最高的权重。事实上,高搭接率意味着较多的激光扫描道数与较长

的激光与材料的作用时间,因此搭接率具有最高的权重。

4.2 方差分析

之后采用方差分析方法评价各清洗参数对 H 、 S_a 、 T 的影响显著性,用 95% 置信水平确定。表 5~7 为基于信噪比的方差分析结果。其中,DF 表示自由度,Adj-SS 表示调整后的平方和,Adj-MS 表示调整后的均方, F 值表示 F 分布检验统计量值, P' 表示临界概率。

表 5 H 的方差分析结果
Table 5 Results of variance analysis in H

Source	DF	Adj-SS	Adj-MS	F value	P'	Rate of contribution / %
P	4	755.94	188.99	14.53	0.001	28.72
V	4	490.28	122.57	9.43	0.004	18.62
f	4	4.28	1.07	0.08	0.986	0.16
η	4	1329.64	332.41	25.56	0	50.51
Error	8	104.03	13			1.98
Total	24	2684.17				

表 6 S_a 的方差分析结果
Table 6 Results of variance analysis in S_a

Source	DF	Adj-SS	Adj-MS	F value	P'	Rate of contribution / %
P	4	89.79	22.45	8.5	0.006	10.15
V	4	224.44	56.11	21.24	0	25.36
f	4	26.89	6.72	2.54	0.122	3.04
η	4	522.87	130.72	49.47	0	59.07
Error	8	21.14	2.64			2.39
Total	24	885.13				

表 7 T 的方差分析结果
Table 7 Results of variance analysis in T

Source	DF	Adj-SS	Adj-MS	F value	P'	Rate of contribution / %
P	4	9.07	2.27	9.13	0.004	7.66
V	4	22.01	5.5	22.15	0	18.56
f	4	2.48	0.62	2.49	0.126	2.09
η	4	82.97	20.74	83.48	0	69.09
Error	8	1.99	0.25			1.69
Total	24	118.51				

从上述分析可以看出,对于清洗深度、粗糙度和清洗温度,搭接率、扫描速度和激光功率的 P' 值均小于 0.05。因此,在 95% 的置信水平下,搭接率、扫描速度和激光功率对清洗深度、粗糙度和清洗温度具有统计学上的实质性影响。相较之下,重复频率的贡献率较

低, P' 值大于 0.05,是不太重要的工艺参数。

4.3 清洗机理

对红外热成像拍摄结果进行更深入的详细分析。图 9(a) 是清洗区域的典型红外热成像特征(以样品 No.20 为例)。由于切向与垂直气流的存在,羽流挥

发轨迹发生了偏移。图 9(b)是样品在激光清洗期间的温度响应曲线。可以发现,当激光开始辐照漆层时,漆层表面温度瞬间上升至峰值温度。待清洗完成后,清洗区域温度缓慢降至室温。图 9(c)~(h)展示了样品在清洗过程中的红外热成像图片。图 9(c)~(f)更为详细地记录了温度上升过程。激光辐照至样品表面后,油漆温度骤升,达到 383 °C,随着激光辐照

的进行,最高温依次攀升至 394.8 °C 与 396.2 °C。这种清洗过程中的温度攀升是激光热积累所致。在激光清洗完成后,样品通过热传导、对流和辐射形式降温,样品表面温度依次降至 277.8 °C 和 192.9 °C。同时,羽流体积也迅速减小,如图 9(h)所示。如上文所述,羽流是油漆分解产物的聚集,由固体、气体或等离子体组成。

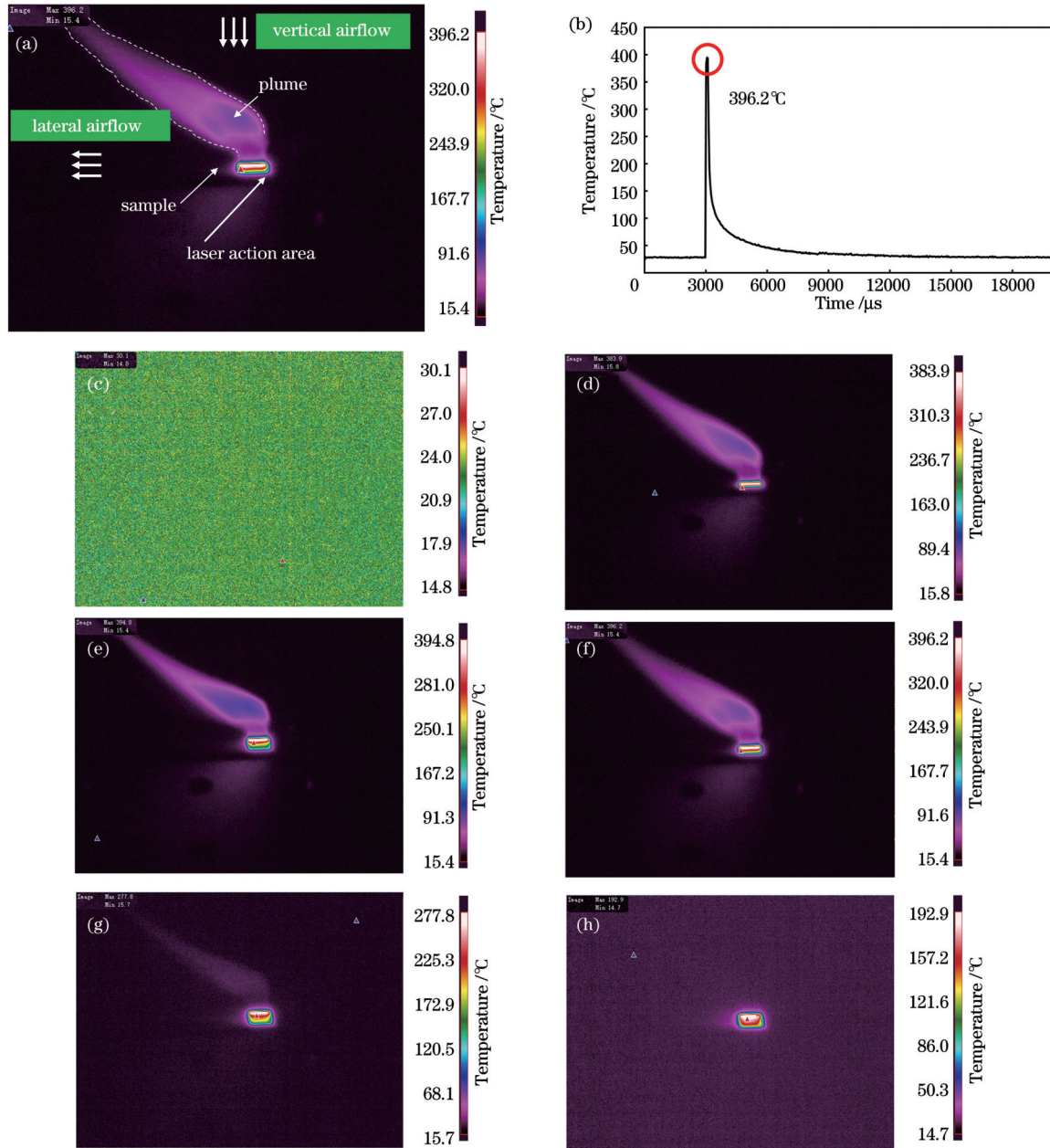


图 9 红外热成像图。(a)清洗区域的典型红外热成像特征;(b)激光清洗期间的温度响应曲线;(c)~(h)样品在清洗过程中不同时刻的红外热成像特征 (间隔 1/25 s)

Fig. 9 Infrared thermal imaging images. (a) Typical infrared thermal imaging feature of cleaning area; (b) temperature response curve during laser cleaning; (c)–(h) infrared thermal imaging characteristics of samples at different moments during cleaning process (interval of 1/25 s)

接下来利用高速摄像技术观测激光除漆过程中的动态行为。图 10 展示了高速摄像机在与样品平面成 45°左右夹角时拍摄到的图片(样品 No.20)。

图 10 共展示了总时长为 8 ms 的激光清洗过程,时间间隔为 1 ms。可以清晰看到,由于激光的作用,漆层发生了剧烈的变化。最明显的现象是产生了高亮等

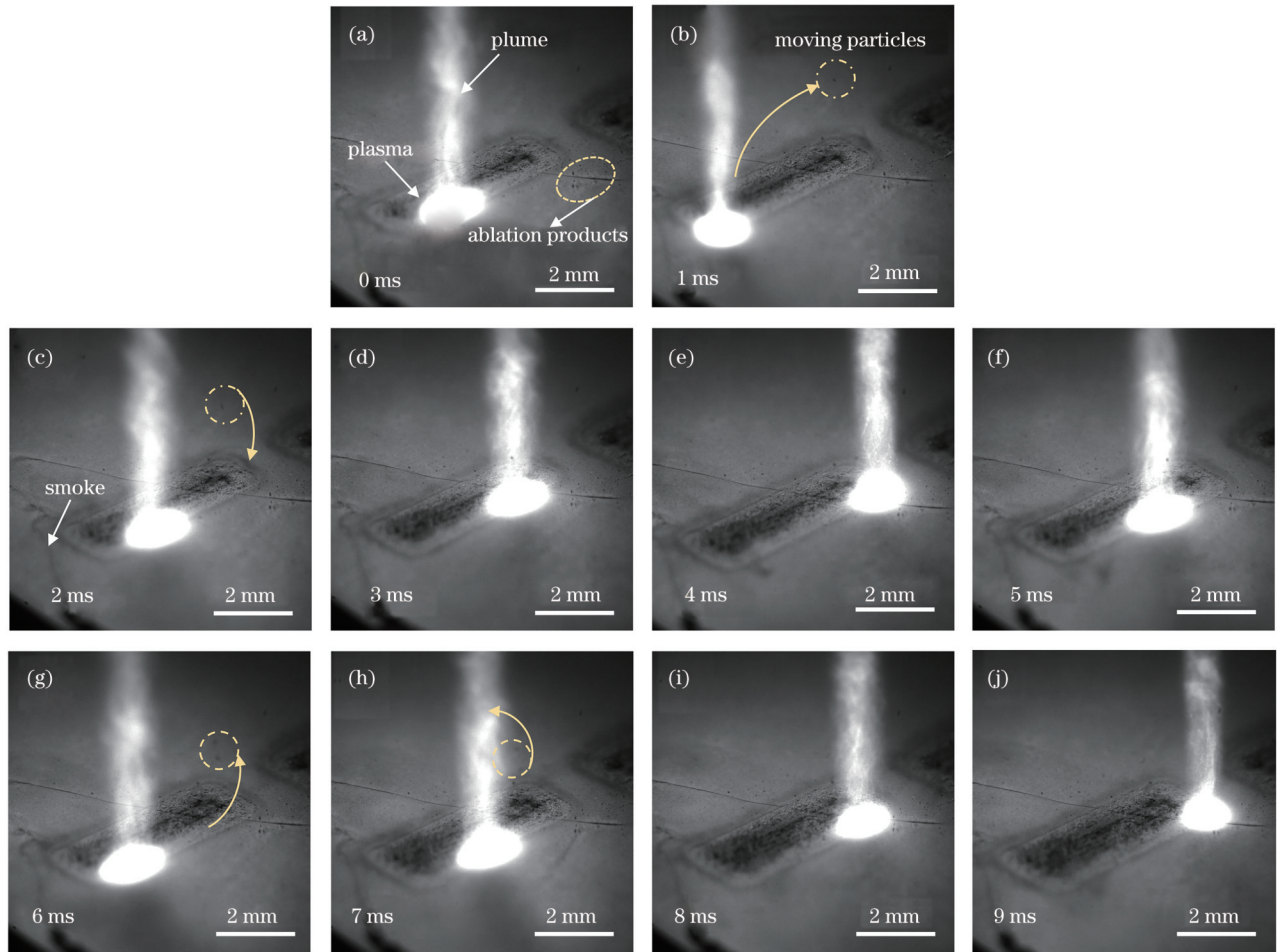


图 10 激光清洗过程中的动态行为

Fig. 10 Dynamic behavior during laser cleaning

离子体并形成了与样品垂直的羽流。在羽流内部可以看到大量混浊态颗粒。此外,从图 10(a)虚线圈标记区可以看到,有大量清洗产物在激光清洗区域边缘处沉积。在图 10(c)中的箭头指示区,可以看到烟尘产生。进一步观察图 10(b)、(c)与图 10(g)、(h)中的虚线圈标记区,可以看到呈漂浮态的微小的颗粒物。这些微颗粒存在时间为 2~3 ms,随后漂移出视野。与以往文献报道^[24-25]不同,没有在高倍摄像中观察到飞溅态颗粒与块状物。这表明在此激光清洗过程中,应力作用的油漆剥离现象并不显著。结合红外热成像,可以判断油漆的去除机理主要是热烧蚀。详细地说,油漆吸收激光能量,温度迅速攀升。在温度超过自身分解温度后,油漆转化为细小颗粒与气体,从而实现油漆的清洗。

5 结 论

重点研究了工艺参数对 CFRP 飞机蒙皮表面油漆激光清洗的影响。对于清洗深度、表面粗糙度和清洗温度,搭接率均是最显著的影响参数,贡献率分别达到 50.51%、59.07%、69.09%。较低的搭接率不利于油漆的均匀去除,而搭接率的增加将显著提高基体的温度。

激光功率和扫描速度对清洗深度、表面粗糙度和清洗温度也有显著影响,而重复频率则没有显著影响。油漆的去除机理以热烧蚀为主。在清洗过程中,漆层表面温度迅速攀升至分解温度,进而油漆转化为细小颗粒与气体,在样品上方形成高温羽流。上述结果将为提升激光除漆效率、改善再喷涂质量以及降低基材热损伤等研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] Pramanik A, Basak A K, Dong Y, et al. Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys-A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 101: 1-29.
- [2] van de Werken N, Tekinalp H, Khanbolouki P, et al. Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: state of the art and perspective[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100962.
- [3] Steen W M, Mazumder J. Laser cleaning[M]//Steen W, Mazumder J. *Laser material processing*. London: Springer, 2010: 417-440.
- [4] Lu Y, Ding Y, Wang M L, et al. An environmentally friendly laser cleaning method to remove oceanic micro-biofoulings from AH36 steel substrate and corrosion protection[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127961.
- [5] Razab M K A A, Noor A M, Jaafar M S, et al. A review of incorporating Nd:YAG laser cleaning principal in automotive industry[J]. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*,

- 2018, 11(4): 393-402.
- [6] Wang Q, Wang F S, Cai C, et al. Laser decontamination of radioactive contaminated metal surface: a review[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(1): 12-24.
- [7] 马玉山, 王鑫林, 何涛, 等. 金属表面腐蚀层及涂层的激光干式清洗研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 124-134.
Ma Y S, Wang X L, He T, et al. Research progress in dry laser cleaning on corrosion and coating layers of metal surfaces[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 124-134.
- [8] Li W Q, Su X A, Gu J Y, et al. Removal mechanisms and microstructure characteristics of laser paint stripping on aircraft skin surface[J]. Photonics, 2023, 10(1): 96.
- [9] Zhang G X, Hua X M, Li F, et al. Effect of laser cleaning process parameters on the surface roughness of 5754-grade aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5): 2481-2490.
- [10] 张天刚, 段俊杰, 刘天翔, 等. y 向搭接率对铝合金表面复合漆层激光清洗的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602204.
Zhang T Z, Duan J J, Liu T X, et al. Effect of y -direction overlap rate on laser cleaning of composite paint layer on aluminum alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602204.
- [11] 李倩靓, 张润华, 何宗泰, 等. 脉冲和连续模式下玻璃纤维复合材料激光脱漆技术研究(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 20220836.
Li Q L, Zhang R H, He Z T, et al. Pulsed and continuous-wave laser paint removal on glass fiber-reinforced polymer composites (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20220836.
- [12] 陈亚军, 鲁文婷, 杨雅婷. 基于响应面分析的碳纤维复合材料基体激光除漆工艺优化[J]. 中国激光, 2023, 50(12): 1202208.
Chen Y J, Lu W T, Yang Y T. Optimization of laser paint removal process for carbon fiber composite substrate based on response surface analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(12): 1202208.
- [13] 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.
- [14] Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Laser cleaning performance and mechanism in stripping of Polyacrylate resin paint[J]. Applied Physics A, 2020, 126(5): 360.
- [15] Zhang D H, Xu J, Li Z C, et al. Removal mechanisms of nanosecond pulsed laser cleaning of blue and red polyurethane paint [J]. Applied Physics A, 2022, 128(2): 170.
- [16] Zhang G X, Hua X M, Huang Y, et al. Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy[J]. Applied Surface Science, 2020, 506: 144666.
- [17] Li W Y, Rong Y M, Huang Y, et al. Effect of thermal damage on dynamic and static mechanical properties of CFRP short pulse laser hole cutting[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 286: 109306.
- [18] Li M J, Gan G C, Zhang Y, et al. Thermal damage of CFRP laminate in fiber laser cutting process and its impact on the mechanical behavior and strain distribution[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19(4): 1511-1522.
- [19] Lü C Y, Zhan R J. Analysis and prediction of interlayer stress and strain of composites such as CFRP irradiated by laser[J]. Materials Today Communications, 2021, 28: 102582.
- [20] Gu J Y, Su X, Jin Y, et al. Towards low-temperature laser paint stripping by photochemical mechanism on CFRP substrates[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 272-280.
- [21] Zhu C Y, Liang L X, Peng G, et al. Explosion plume on the exit surface of fused silica during UV laser-induced damage[J]. Results in Physics, 2022, 32: 105094.
- [22] Yu H J, Zhang Z Y, Wang H Y, et al. Investigation on dynamic behavior of laser paint removal based on high-speed shadow imaging technology[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 163: 109441.
- [23] Madhukar Y K, Mullick S, Shukla D K, et al. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser[J]. Applied Surface Science, 2013, 264: 892-901.
- [24] 毕思源, 雷正龙, 秦立东. 高强度表面海洋生物膜层纳秒脉冲激光清洗质量与脱附行为分析[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602203.
Bi S Y, Lei Z L, Qin L D. Cleaning quality and desorption behavior of marine biofilm layer on high strength steel surface using nanosecond pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(16): 1602203.
- [25] Nie J H, Zhang H, Zhang D H, et al. Removal mechanism of laser cleaning for inorganic thermal control coatings on aluminum alloys [J]. Applied Surface Science, 2023, 633: 157578.

Research on Laser Cleaning Process of Paint Layer on Carbon Fiber Composite Aircraft Skin

Gu Junyi¹, Li Wenqin¹, Su Xuan^{2*}, Xu Jie^{1,2,3}, Guo Bin^{1,2,3**}

¹School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

²Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450046, Henan, China;

³Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing of Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China

Abstract

Objective Resin-based composite material (CFRP) surface coatings have always faced the risk of morphological damage and substrate overheating during laser cleaning. The key for solving these problems lies in the need for sufficient process experiments to establish a reliable relationship between the cleaning parameters and characteristics. Cleaning depth (H), surface roughness (S_a), and cleaning temperature (T) are the three most important cleaning indicators. H represents cleaning efficiency and effectiveness, S_a is related to the quality of re-coating, and T reflects the trend of thermal damage. Therefore, this study uses an infrared nanosecond laser

to remove paint from a CFRP surface and uses laser power (P), scanning speed (V), overlap rate (η), and repetition frequency (f) as variables to study and statistically analyze the H , S_a , and T of the samples. Infrared thermography and high-speed imaging techniques are used to observe the temperature response of the samples, the state of the plume, and the dynamic behavior of the paint layer to determine the cleaning mechanism of the paint layer. This study is expected to provide a basic reference for improving the efficiency of laser paint removal and the quality of respraying and reducing thermal damage to CFRP substrates.

Methods Four controllable parameters are used: laser power, scanning speed, repetition frequency, and overlap rate. Five levels are designed under each group of parameters to form an L25 orthogonal matrix. Then, a laser cleaning experiment is conducted to obtain 25 sets of samples ranging from No.1 to No.25. After the cleaning procedure is completed, the macroscopic and microscopic morphologies of the cleaned samples are observed. At the same time, the paint cleaning depth and sample surface roughness are measured via a laser confocal microscope. Finally, the obtained experimental data are analyzed using the analysis of the variance (ANOVA) and signal to noise ratio (S/N) methods. In addition, an infrared thermographic camera is used to record the temperature response of the experimental samples during the cleaning process, and a high-speed camera is used to capture the dynamic behavior of the samples.

Results and Discussions A signal-to-noise ratio analysis is performed on the cleaning depth, surface roughness, and cleaning temperature using the expected large, large, and small characteristics, respectively. The analysis results (Table 4) indicate that for the cleaning depth, the influencing factors are ranked from high to low by weight, namely, lap rate, laser power, scanning speed, and repetition frequency. For surface roughness and cleaning temperature, the influencing factors are ranked from high to low by weight, namely, lap rate, scanning speed, laser power, and repetition frequency. The ANOVA results (Table 5) indicate that for cleaning depth, roughness, and cleaning temperature, the critical probability (P') values of the overlap rate, scanning speed, and laser power are all less than 0.05. Therefore, at a 95% confidence level, the overlap rate, scanning speed, and laser power have statistically significant effects on cleaning depth, roughness, and cleaning temperature. In contrast, the contribution rate of repetition frequency is relatively low, with a P' value greater than 0.05, making it a less important process parameter. The detection results (Fig. 8) by the infrared thermal imager indicate that the laser cleaning process causes two high-temperature areas. The first is where the laser acts on the substrate. The minimum cleaning temperature in this area is 244 °C, and the maximum cleaning temperature is 590.4 °C. The other high-temperature region is the high-temperature plume region above the sample. The high-speed camera monitoring results (Fig. 11) indicate that the paint layer undergoes drastic changes due to the action of the laser, the most obvious being the generation of bright plasma and the formation of a plume perpendicular to the sample. A large number of turbid particles are observed inside the plume.

Conclusions This study focuses on the influence of process parameters on the laser cleaning of paint layer on the CFRP aircraft skin. For the cleaning depth, surface roughness, and cleaning temperature, the overlap rate is the most significant influencing parameter, with contribution rates of 50.51%, 59.07%, and 69.09%, respectively. A lower overlap rate is not conducive to the uniform removal of paint, and an increase in the overlap rate will significantly increase the temperature of the substrate. Laser power and scanning speed also have a significant influence on cleaning depth, surface roughness, and cleaning temperature, whereas repetition frequency has no significant effect. The removal of paint is mainly based on the thermal erosion mechanism. During the cleaning process, the surface temperature of the paint layer rapidly increases to the decomposition temperature and the paint transforms into small particles and gases, forming a high-temperature plume above the sample. The above results will provide a reference for improving laser paint removal efficiency and respraying quality and reducing substrate thermal damage.

Key words laser technique; laser cleaning; carbon fiber reinforced composite materials; paint removal mechanism; cleaning process