

脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层

贾宝申^{**}, 唐洪平, 苏春洲, 蒋一岚^{*}

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 采用红外脉冲激光对芳纶纤维增强树脂基复合材料表面环氧类保护漆层进行去除处理, 详细分析了激光去除的不同机制, 并通过理论计算和实验分析确定了清洗方法。基于计算和实验测试数据得到了激光去除大部分涂层的工艺参数, 然后结合酒精擦拭实现了树脂基复合材料部件表面环氧类保护漆层的有效去除。测试结果表明, 处理后的芳纶纤维增强树脂基复合材料没有损伤, 可以满足工业应用的需求。

关键词 激光技术; 脉冲激光; 环氧树脂; 复合材料; 激光去除

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1202010

Removal of Surface Coating of Resin Matrix Composites by Pulsed Laser

Jia Baoshen^{**}, Tang Hongping, Su Chunzhou, Jiang Yilan^{*}

Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In our study of the removal of the protective epoxy coating from the surface of the aramid-fiber-reinforced resin matrix composites based on the usage of an infrared pulsed laser, we analyze various removal mechanisms using lasers and determine the cleaning methods using theoretical calculation and experimental analysis. From the calculation and test data, we obtain technological parameters for the laser removal of many different coatings; thus, we find that the effective removal of an epoxy protective layer from the surface of the resin matrix composites can be achieved using the laser for initial removal followed by wiping the surface using alcohol. The test results show that the laser-treated aramid-fiber-reinforced resin matrix composites show no damage and can satisfy the industrial application requirements.

Key words laser technology; pulse laser; epoxy resin; composites; laser removal

OCIS codes 140.3390; 140.3330; 140.3510; 140.3533

1 引言

飞机等机电装备在运营期间, 外力、太空辐射和气流冲刷等作用导致表面蒙皮发生脱落、龟裂、老化等损伤, 因此需要对原有涂层进行去除。表面除漆是飞机大修中的一个重要环节。目前国内对飞机等设备部件表面除漆普遍采用化学方法, 即用除漆剂将表面的涂层褪去^[1]。该方法方便快捷, 适合于金属部件表面的除漆。

纤维增强复合材料具有高强度、高比模量等特点, 在航天航空领域得到了广泛应用, 目前正逐步取代黑色金属、有色金属等传统材料成为轻质化结构的主要材料^[2]。先进复合材料在飞机上的应用量

不断增加, 在进行大修时, 如何去除飞机复合材料部件的涂层也就成为必须要解决的问题。化学除漆方法容易造成复合材料本身的损伤, 因此并不适用^[3]。目前基本采用手工打磨的方法去除复合材料表面的涂层, 该方法不仅耗时长、效率低, 而且打磨后的表面质量难以控制。

激光除漆是采用高功率密度的激光束照射待清除涂层, 进而将涂层从基体表面移除的激光应用技术。该技术基于激光与物质相互作用, 具有不需要使用任何化学试剂、非接触和可选择性去除材料表面涂层的优点, 除漆后产生的固体粉末可通过吸尘系统进行处理, 基本不会对环境造成污染^[4-8], 是一种可以取代传统除漆工艺的理想方法。国外在采用

收稿日期: 2019-05-21; 修回日期: 2019-07-02; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102204)

* E-mail: jiangyilan1023@163.com; ** E-mail: jbslaser@126.com

激光技术进行复合材料表面除漆方面的研究和应用较早^[9-13],国内在激光除漆方面也进行了大量研究,但主要针对的是金属基材表面漆层的去除,对于复合材料表面涂层的激光去除研究较少。占小红等^[14]利用脉冲激光对碳纤维增强树脂基复合材料表面的残余树脂进行了去除,没有对基体材料的纤维造成损伤,并获得了优化的工艺参数;周礼君^[15]研究了碳纤维增强树脂基复合材料表面不同厚度树脂的去除工艺,获得了工艺参数。芳纶纤维增强聚合物基复合材料具有比强度高、力学性能优异、耐疲劳和成形工艺性好等优点^[16],已被广泛应用于航空航天、军事、机械等领域^[17],因此开展芳纶纤维增强树脂基复合材料表面涂层去除技术的研究对于该类材料的维修维护具有现实意义。

CO₂激光器体积较大且激光仅能在自由空间传输,这为它的工业应用带来一定困难。1064 nm 激光是目前应用最为广泛的激光,它可在光纤中传输,具有单色性好、输出能量高、发散度小等特点。本文采用平均功率为 200 W 的 1064 nm 脉冲激光对芳纶纤维增强树脂基复合材料表面涂层进行去除,通过观察复合材料的表面和分析材料表面的成分,研究脉冲激光对树脂基复合材料表面的损伤情况。

2 实 验

2.1 实验设备与材料

采用自行研制的激光清洗设备进行实验,采用 Nd:YAG 固态激光器,其输出激光波长为 1064 nm,最大输出平均功率为 200 W,重复频率在 5~100 kHz 范围内可调,脉宽在 60~200 ns 范围内可调。实验样品的基材为芳纶纤维增强树脂基复合材料,涂层为环氧树脂类保护漆,如图 1 所示。

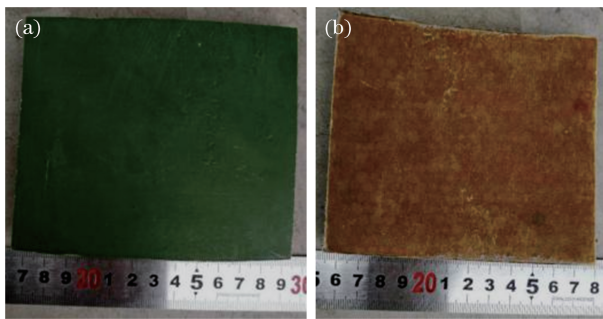


图 1 树脂基复合材料。(a) 涂层;(b) 基体材料

Fig. 1 Resin matrix composites. (a) Coating; (b) substrate

2.2 实验方法

通过理论分析结合工艺实验,以激光清洗烧蚀理论为依据,研究树脂基复合材料表面涂层的激光

去除工艺。采用 Ultra55 扫描电镜分析激光清洗前后样品表面的成分,以表征激光的去除效果。

3 实验结果与分析

3.1 激光去除模式分析

本实验所用样品的结构如图 2 所示,基体为芳纶纤维增强树脂基复合材料,外表面为环氧类保护层。基体材料本身的最外层为固化环氧树脂(II),厚度为 0.3~0.5 mm。与参考文献^[14-15]采用激光去除固化环氧树脂(II)不同,本文的目的是采用激光有效去除表面环氧类保护层(I),且对基体材料本身表面的固化环氧树脂(II)不造成损伤。

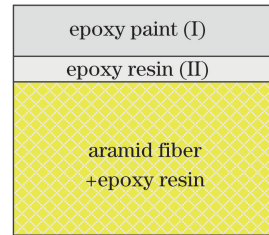


图 2 材料结构示意图

Fig. 2 Schematic of material structure

激光除漆是通过高能量短脉冲激光束照射漆层,其中主要的机制是烧蚀效应和振动效应,具体过程可归纳为如图 3 所示的三种模式。

烧蚀效应和振动效应共同决定了激光去除过程,但激光能量密度不同,两种效应的影响程度不同。当激光能量高于去除阈值时,样品表面被烧蚀气化,表面物质向外喷溅实现部分去除,如图 3(a)所示,同时物体吸收激光能量膨胀,热膨胀产生了应变并同时产生了应力,如果应力大于黏附力,则涂层脱落;当激光能量密度达到单脉冲最佳去除能量密度后,激光能量的一部分用于分解去除表面,剩余部分则被基体吸收,但剩余的激光能量不足以使基体材料气化,如图 3(b)所示;激光能量继续增大,当基体材料吸收足够多的激光能量后,开始发生气化,如图 3(c)所示,此时激光能量越大,对基体材料的损伤就越大。对于树脂基复合材料,首先排除图 3(c)所示的模式,因为这种模式会使基体材料发生损伤。图 3(b)所示的模式为临界状态,应用于实际时需要满足十分苛刻的条件:首先,涂层厚度要严格一致;其次,涂层与基底材料的性能应比较接近,且复合材料的导热能力要较差。激光照射物体引起的温度升高与激光的功率、脉宽和光斑尺寸等参数有关,因此需要保持上述激光参数十分稳定,而且清洗对象也必须为平面,这在实际应用中较难满足。对于复合

材料来说,激光照射引起的温度升高会导致材料发生热分解,这是材料的主要损伤模式。通过以上分

析可知,图 3(a)所示的模式不会使基体材料发生热损伤,为首选方案。

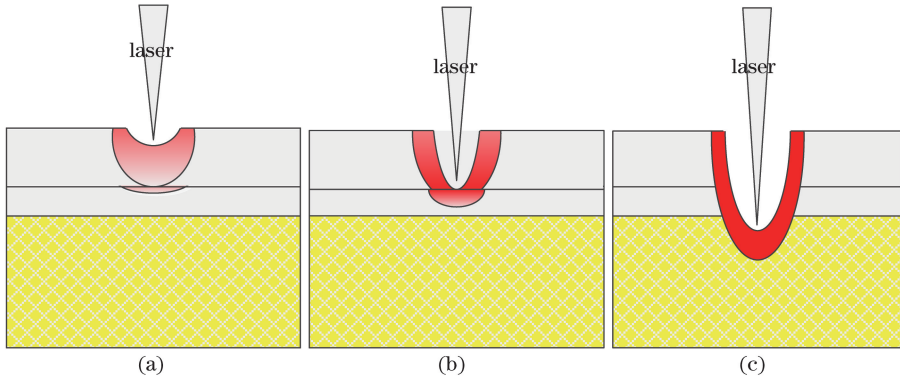


图 3 激光去除模式示意图。(a)烧蚀效应与振动效应共同作用;(b)临界状态;(c)烧蚀效应占主导

Fig. 3 Schematic of laser removal modes. (a) Combination of ablation and vibration effects; (b) critical status; (c) dominant ablation effect

3.2 热应力计算

选择图 3(a)所示的模式需要满足激光入射引起的热应力大于黏附力。当激光入射到涂层上时,涂层吸收激光,温度升高,从而产生了沿 z' 轴正方向的热应力 σ_c ,如图 4 所示,该力作用于基体上使基体产生一个对涂层的反作用力,沿 z' 轴的负方向。基体吸收热量后,也会产生一个沿 z' 轴负方向的热应力 σ_s 。当总的热应力 $\sigma = \sigma_c + \sigma_s$ 大于涂层与基体之间的黏附力 f 时,涂层脱落,从而实现激光去除。

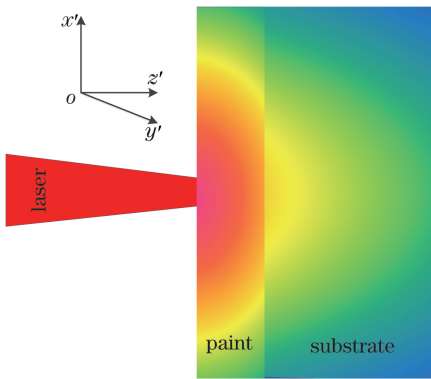


图 4 激光辐照引起的材料应力分布示意图

Fig. 4 Schematic of stress distribution of materials induced by laser radiation

物体吸收激光能量后膨胀,纵向(z' 方向)热膨胀的长度为 $\Delta l = l\gamma\Delta T$,其中 γ 为该物体的线膨胀系数, l 为物体的初始长度, ΔT 为温度的变化量。热膨胀产生了应变,并同时产生了应力。环氧涂层和基体本身表面的固化环氧树脂均为各向同性弹性体,对于这类物体,单位面积上的应力为

$$\sigma = Y\epsilon = Y \frac{\Delta l}{l}, \quad (1)$$

式中: Y 为材料的杨氏模量; ϵ 为应变。对于激光除漆而言,使涂层脱落的力主要是 $z' = l$ 处(即界面处)的热应力。涂层和基体的热应力可分别表示为

$$\sigma_c = Y_c \epsilon_c = Y_c \gamma_c \Delta T_s, \quad (2)$$

$$\sigma_s = Y_s \epsilon_s = Y_s \gamma_s \Delta T_s, \quad (3)$$

式中:下标 c 表示涂层;下标 s 表示基体。

涂层的热分解温度为 723 K^[15],计算时假设涂层与基材接触面的温度为 723 K。涂层和基材表面材料主体均为环氧树脂,只是使用的固化剂和固化工艺不同。取室温为 298 K,计算使用的热力学参数如表 1 所示。计算得到的应力 $\sigma = \sigma_c + \sigma_s = 8.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 。因为涂层与基材接触面的温度不可能达到 723 K,所以实际的应力值一定小于计算值。

表 1 涂层和基材的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of coating and substrate

Material	Elastic	Linear thermal	$\Delta T / \text{K}$
	modulus / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	expansion coefficient / K^{-1}	
Paint	10^{10}	10^{-6}	425
Substrate	10^{10}	10^{-6}	425

3.3 黏附力计算

涂层与基体材料之间的黏附力受很多因素的影响,可简单地把涂层与基体材料之间的黏附力的计算看作是二个平行平面之间黏附力的计算。二个平行平面之间的单位面积黏附力^[18]为

$$f = \frac{h_{12}}{8\pi z_1^3}, \quad (4)$$

其中,

$$h_{12} = \frac{4\pi}{3} A_{12}, \quad (5)$$

式中: h_{12} 为 lifshitz-VanderWaals 常数, 是与相互接触的材料有关的一个量; z_1 是相互接触的两个平行平面间的距离, 一般取 $z_1 = 4 \times 10^{-10} \text{ m}$; A_{12} 为涂层与基体材料相互接触的 Hamaker 系数, 可由 $A_{12} = \sqrt{A_{11}A_{22}}$ 计算得到。从物理参数表中可以查得涂层与涂层相互接触的 Hamaker 系数 $A_{11} = 8 \times 10^{-8} \text{ J}$, 而涂层与基底的成分相似, 所以可以近似得到基体材料与基体材料相互接触的 Hamaker 系数 $A_{22} \approx A_{11}$ 。由此可以计算得到涂层与基体的黏附力约为 $6.62 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 。

通过计算可知, 黏附力 f 比热应力 σ 的最大值还要大近一个数量级, 因此采用图 3(a) 所示的模式无法实现涂层的有效去除。

3.4 激光去除方案设计

通过以上的分析可知, 在不损伤基体的前提下, 仅采用激光清洗技术无法实现树脂基复合材料表面环氧类保护涂层的有效去除。因此考虑激光清洗技术与其他技术结合的方式, 与之结合的技术须简单易行, 否则选择激光去除就失去了应用意义。

由 3.1 节的分析可知, 激光清洗的决定因素是温度。激光照射到涂层上会发生反射、透射和吸收。当激光入射到涂层时, 涂层吸收激光, 产生热能, 温度发生变化, 温度变化满足热传导方程; 透过涂层的激光继续被基体吸收, 也会产生热能和温度的变化, 并且温度变化也满足热传导方程。由于实验所用涂

层为深绿色环氧树脂漆, 透射率很低, 因此计算时可忽略透射。

激光能量是一种表面热源, 当激光作用于各向同性的均匀材料(密度为 ρ , 比热容为 C , 热导率为 K)时, 属于表面加热过程。假设被吸收的激光全部转化为热能, 用 z 、 t 和 T 分别表示激光的加热深度(z 向)、激光的作用时间和材料温度, 热传导方程可表示为

$$\frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T(x, y, z), \quad (6)$$

式中: 热扩散率 $\alpha_1 = \frac{K}{\rho C}$ 。如果温度场是稳定的, 且不随时间变化, 则有 $\nabla^2 T(x, y, z) = 0$ 。

在计算涂层温度时还有如下假设。

- 1) 激光光强在 x - y 平面上是平顶分布, 即在激光作用时间内, 脉冲激光的平均功率密度恒定不变;
- 2) 在 z 方向上的热传导深度远小于 x - y 平面上激光的照射范围, 近似认为 x - y 平面是无限大的平面, 因此只考虑在 z 方向上的一维热传导方程。

则热传导方程可转换为

$$\frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (7)$$

若满足边界条件, 当 $z = \infty$ 时, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$; 当 $t = 0$ 时, $T = T_0$ (T_0 为初始温度), 则激光辐照引起的材料温度变化为

$$T(z, t) =$$

$$\begin{cases} T_0 + \frac{2P(1-R)}{KS} \left[\sqrt{\alpha_1 t} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_1 t}} \right) \right], & t \leq t_p \\ T_0 + \frac{2P(1-R)}{KS} \left[\sqrt{\alpha_1 t} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_1 t}} \right) \right] - \frac{2P(1-R)}{KS} \cdot \left[\sqrt{\alpha_1 (t - t_p)} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_1 (t - t_p)}} \right) \right], & t > t_p \end{cases}, \quad (8)$$

式中: t_p 为激光脉宽; S 为激光光斑的面积; P 为脉冲激光的平均功率; R 为反射率, ierfc 为误差函数。

由(8)式可知, 脉冲激光辐照引起的材料温度升高与脉冲激光功率、脉宽和光斑面积有关。实验所用的激光清洗机的平均功率在 $10 \sim 200 \text{ W}$ 范围内可调, 设激光的重复频率为 30 kHz , 脉宽为 100 ns , 聚焦光斑直径为 0.8 mm , 假设样品位于焦点处。环氧树脂涂层的热力学参数如表 2 所示, 由此计算得到涂层表面的温度如图 5 所示。

由图5可以看出: 在脉冲激光作用时间内, 温度

表 2 环氧树脂涂层的热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of epoxy resin coating

Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Absorptivity
0.8	1.30×10^3	2.51×10^3	0.53

急剧升高, 脉冲激光作用结束后, 温度迅速降低。表面的最高温度出现在脉冲结束时, 且远高于涂层的热分解温度, 即采用脉冲激光完全可以实现涂层的热分解。图 6 为在激光平均功率为 150 W , 重复频率为 30 kHz , 脉宽为 100 ns , 聚焦光斑直径为 0.8 mm 的脉

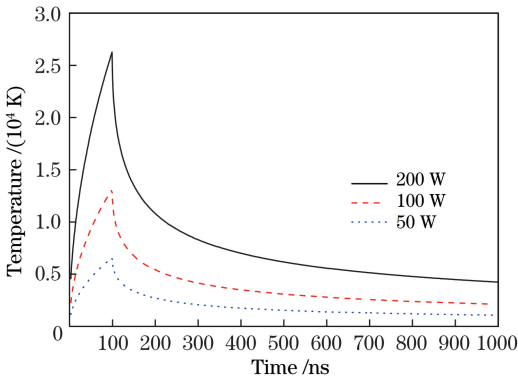


图 5 不同平均功率激光照射下材料表面的温度曲线

Fig. 5 Temperature curve of material surface irradiated by lasers with different average powers

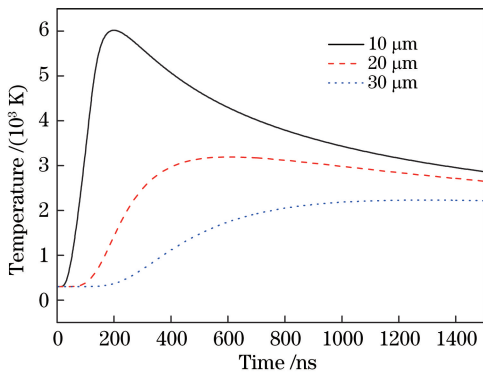


图 6 涂层不同深度处的温度-时间曲线

Fig. 6 Temperature-time curve of coating at different depths

冲激光的作用下,涂层不同深度处的温度。

由图 6 可知,虽然涂层表面的温度很高,但是由于涂层材料的热扩散率小,随着深度增加,温度会急剧下降。涂层的热分解温度为 723 K,通过以上计算可以确定不同激光参数下去除涂层的厚度。表 3 给出了重复频率为 30 kHz,脉宽为 100 ns,聚焦光斑直径为 0.8 mm 时,不同平均功率脉冲激光去除涂层厚度的计算值和实验测量值。

表 3 去除涂层厚度的计算值和实验测量值

Table 3 Calculated and measured values of removal coating thickness

Power /W	Calculated removal thickness / μm	Actual removal thickness / μm
150	45	31
100	36	20

由表 3 可以看出,实际的去除厚度小于计算值,主要有以下原因:1)计算误差。与金属不同,高分子材料的热学参数和力学参数往往不是一个确定的数值,而是一个范围,且涂层为含有颜料的混合物,计算时认为涂层是纯净物,因此计算时参数的选择会

造成一定误差。2)能量损失。激光去除过程中产生的气体、等离子体和颗粒等会对后续激光产生一定的吸收作用,降低了直接辐照在样品表面的激光能量。

样品表面涂层的厚度约为 100 μm ,可以采用如下激光去除方法:采用激光去除大部分涂层,剩余的部分涂层由于激光作用已达到其软化温度 200 $^{\circ}\text{C}$,故采用酒精擦拭的方法去除(由于采用的固化剂和固化工艺不同,基体材料表面的环氧树脂层的软化温度比涂层高 100 $^{\circ}\text{C}$ 左右)。根据以上计算和实验结果,经过多次实验,确定采用如下参数:平均功率为 150 W,重复频率为 30 kHz,脉宽为 100 ns,聚焦光斑直径为 0.8 mm。为减少热量累积,尽量缩小光斑重叠率,光斑排列如图 7 所示。

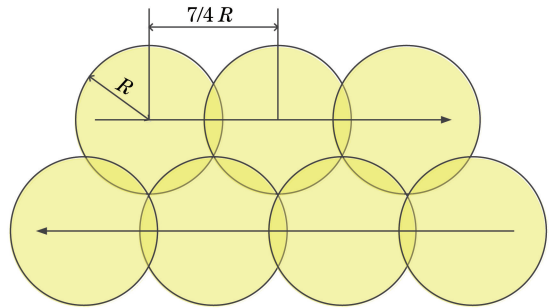


图 7 光斑有效重叠示意图

Fig. 7 Schematic of effective overlap of spots in removal process

采用上述工艺清洗三次可去除 90 μm 左右厚度的涂层,如图 8 中的 A 区域所示。涂层的剩余部分采取酒精擦拭的方法去除。本文采用的擦拭方法为:将绸布用化学纯酒精浸润后,固定在机械臂的夹具上(设定压强为 $3 \times 10^4 \text{ N/m}^2$),平行于清洗方向运动,速度设定为 50 mm/s,往复擦拭 4 次,擦拭结果如图 8 中的 B 区域所示。

由图 8 可见,采用激光清洗三次并结合酒精擦

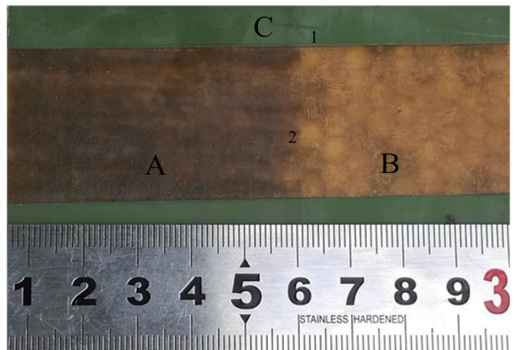


图 8 清洗后的树脂基复合材料

Fig. 8 Cleaned resin matrix composites

拭的方式实现了树脂基复合材料表面涂层的有效去除,图中B区域的颜色与图1(b)的颜色相同,从外观看可以满足清洗要求。图9(a)、(b)分别是由B区域到C区域(图8中的点1)和由B区域到A区域(图8中的点2)的台阶仪检测数据。

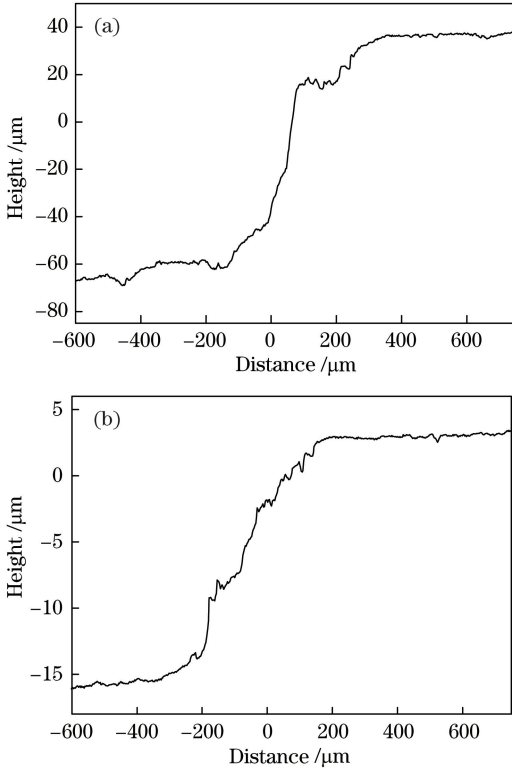


图9 台阶仪检测数据。(a) 激光清洗部分至初始部分;
(b) 擦拭部分至激光清洗部分

Fig. 9 Measured data by step profiler. (a) From laser-cleaned part to initial part; (b) from wiped part to laser-cleaned part

由图9可知,涂层厚度约为105 μm,激光清洗后剩余厚度约为18 μm,即激光去除厚度约为87 μm,与90 μm的预期值相近,证明激光清洗的工艺参数是可行的,也证明了在工程中应用图3(b)所示的模式不可行的结论是正确的。虽然涂层的剩余厚度只有18 μm左右,但涂层仍然没有实现有效剥离。

3.5 清洗材料的表征

采用Ultra55扫描电镜附带的能谱仪(EDS)分析激光清洗前后样品表面的成分,原始涂层的EDS测试结果如图10(a)所示,原始基体材料、激光清洗并经酒精擦拭之后区域以及采用打磨去除后材料表面的EDS测试结果如图10(b)所示。

涂层的主体成分为环氧树脂,主要元素为C和O,其余的成分为颜料或者材料在使用和保存过程中附着的杂质,Au峰是制备试样过程中喷金

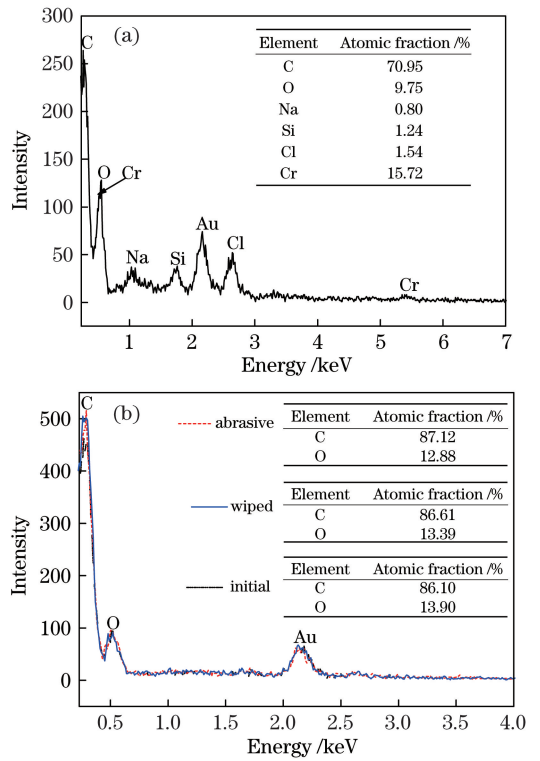


图10 样品的EDS分析结果。(a)原始涂层;
(b)不同状态的基体

Fig. 10 EDS analysis results of specimens. (a) Coating;
(b) substrates in different states

所致。由图10(b)可以看出:经激光清洗和酒精擦拭之后,基体材料表面只含有C和O元素,与环氧树脂材料只有C和O元素相符,且没有涂层颜料元素Cr,说明涂层已经被完全去除,达到了与打磨相同的效果;激光清洗结合酒精擦拭后的样品表面的C、O元素含量与打磨后的样品、初始样品中的基本相同,证明激光清洗结合酒精擦拭的处理方法不会使材料发生氧化。图11分别为初始样品、激光清洗结合酒精擦拭后的样品、打磨后的样品的扫描电镜照片。

由图11可以看出,采用激光去除并用酒精擦拭后的样品的表面形貌与初始样品的表面形貌相似,说明该处理方法没有对材料表面造成明显的机械损伤,而打磨后样品表面的划痕非常明显,说明与打磨相比,激光去除结合酒精擦拭的方法能有效减少材料表面的机械损伤。

4 结 论

理论计算和实验结果表明,仅采用激光清洗技术无法实现树脂基复合材料表面环氧类保护涂层的有效去除。确定了激光清洗去除一定厚度涂层的工艺参数,采用激光去除大部分涂层,然后采用酒精擦

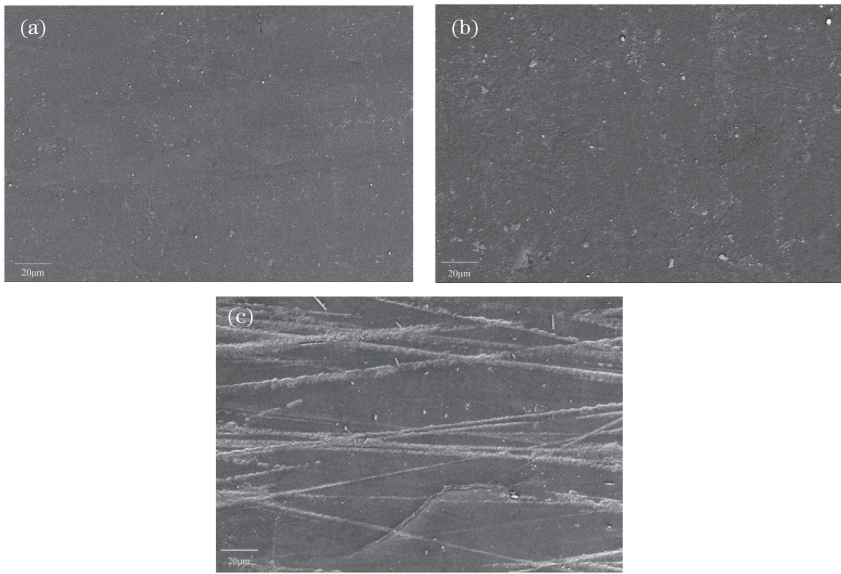


图 11 不同状态样品的扫描电镜照片。(a)初始状态;(b)激光清洗后;(c)打磨后
 Fig. 11 Scanning electron microscope images of specimens in different states. (a) Initial state;
 (b) laser-cleaned specimen; (c) abrasive specimen

拭去除剩余涂层的方法,可以实现涂层的完全去除。去除涂层后的基体材料中的 C 和 O 元素与原始材料、打磨后材料基本相同,说明基体材料未发生氧化,并且基体材料表面无机械损伤。激光清洗结合酒精擦拭的方法为激光去除高分子材料表面涂层提供了参考。

参 考 文 献

[1] Wang Y, Yan J, Tang K, *et al.* Study progress on paint stripper of aircraft surface[J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2013, 42(4): 22-24, 37.
 王议, 颜杰, 唐楷, 等. 飞机蒙皮脱除技术研究进展[J]. *化工技术与开发*, 2013, 42(4): 22-24, 37.

[2] Peng G L, Yan H, Liu F, *et al.* Numerical simulation of laser ablation of fiber-reinforced composite materials [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6 (2): 216-222.
 彭国良, 闫辉, 刘峰, 等. 纤维增强复合材料激光烧蚀效应的数值模拟[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 216-222.

[3] Xuan S Y. Study on laser paint stripping technology for aircraft composite parts[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2016(8): 15-18.
 宣善勇. 飞机复合材料部件表面激光除漆技术研究进展[J]. *航空维修与工程*, 2016(8): 15-18.

[4] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030005.
 雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术

[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030005.

[5] Xue Y F, Wang W, Wang X F, *et al.* Laser cleaning technology of 38CrMoAl material surface pollutants [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0706004.
 薛亚飞, 王巍, 王学锋, 等. 38CrMoAl 材料表面污染物激光清洗技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47 (7): 0706004.

[6] Qiao Y L, Zhao J X, Wang S J, *et al.* Laser cleaning and elemental composition analysis of rusty surface [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(3): 299-304.
 乔玉林, 赵吉鑫, 王思捷, 等. 锈蚀表面的激光清洗及其元素组成分析[J]. *激光与红外*, 2018, 48(3): 299-304.

[7] Leone C, Genna S, Caggiano A. Compact disc laser cleaning for polycarbonate recovering [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 9: 73-78.

[8] Kumar A, Sonar V R, Das D K, *et al.* Laser cleaning of tungsten ribbon [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 308: 216-220.

[9] Fox J A. Effect of water and paint coatings on laser-irradiated targets[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(10): 461-464.

[10] Klingenberg M L, Naguy D A, Naguy T A, *et al.* Transitioning laser technology to support air force depot transformation needs[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 202(1): 45-57.

[11] Freeman R K, Rigby F A, Morley N. Temperature-dependent reflectance of plated metals and composite materials under laser irradiation [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2000, 14 (3):

- 305-312.
- [12] Klingenberg M L, Naguy D A, Naguy T A, *et al.* Transitioning laser technology to support air force depot transformation needs[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 202(1): 45-57.
- [13] 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.
- [14] Zhan X H, Fan X X, Gao C Y, *et al.* Study on the surface of carbon fiber reinforced epoxy resin composites for pulse laser cleaning technology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(20): 38-42.
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(20): 38-42.
- [15] Zhou L J. Reserach on laser cleaning technique of resin matrix composites coating [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
周礼君. 树脂基复合材料表面涂层激光清洗应用技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- [16] Pan Z H, Gao N K, Li C L, *et al.* Effect of surface condition of aramid fiber on mechanical properties of epoxy resin composites [J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(7): 15-21.
潘泽华, 高乃奎, 李成磊, 等. 芳纶纤维表面状态对环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(7): 15-21.
- [17] Zhang X B, He X H, Cheng J J. Research progress on surface modification of aramid fibers and preparation of their reinforced resin matrix composites [J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(8): 149-153.
张雄斌, 贺辛亥, 程稼稷. 芳纶纤维表面改性及其增强树脂基复合材料制备的研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(8): 149-153.
- [18] Tam A C, Leung W P, Zapka W, *et al.* Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71(7): 3515-3523.