

## 飞机蒙皮的激光除漆技术研究

蒋一岚, 叶亚云, 周国瑞, 王海军, 廖 威, 袁晓东, 贾宝申

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 激光清洗在再制造行业、微机电系统(MEMS)和超精密加工行业具有重要的应用前景, 飞机蒙皮激光脱漆技术是激光清洗技术中的一个重要分支。利用 10.6  $\mu\text{m}$  的高重复频率  $\text{CO}_2$  激光器对飞机蒙皮(LY12 铝合金板材)上的 90  $\mu\text{m}$  厚的双层复合油漆层进行去除。研究表明, 通过选择合适的扫描间距、激光功率密度及扫描次数, 成功地将飞机蒙皮表面的两层油漆层完全去除, 通过对比试验测试飞机蒙皮在激光除漆前后的抗拉强度、屈服强度、维氏硬度以及粗糙度等力学性能, 发现激光除漆未损伤基底且未改变其力学性能。该种除漆方式较传统除漆方式具有环保无接触、效率高、参数可控以及维护成本低等优点, 为在其他领域应用开拓新的方向。

**关键词:** 激光除漆; 飞机蒙皮; 油漆层;  $\text{CO}_2$  激光

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1206003

## Research on laser paint removing of aircraft surface

Jiang Yilan, Ye Yayun, Zhou Guorui, Wang Haijun, Liao Wei, Yuan Xiaodong, Jia Baoshen

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

**Abstract:** Laser cleaning technology, which is environment-friendly, has a wide range of application prospects in remanufacturing, micro-mechanical system (MEMS) and ultra-precision machining. Laser paint removing of aircraft surface is one of the important branches of the technology of laser cleaning. A high repetition frequency  $\text{CO}_2$  laser, with 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength, was used to remove paint, which was double composite paint layer with thickness of 90  $\mu\text{m}$ , from aircraft surface (LY12 aluminum plate). It is shown that totally removed paint stripping and undamaged surface can be reached with selecting appropriate laser power density, scanning distance, and scanning time, the double composite paint layer on aircraft surface can be removed totally, the effect of paint removing on the tensile strength, yield strength, Vickers hardness and roughness of the substrate is studied by the method of experimental contrast. It is found that the mechanical properties of the aircraft surface did not change after the treatment of laser paint removing. Aircraft laser paint removing has more predominance than traditional methods, such as environmental protection without contact, high efficiency, parameters controlling, and low maintenance cost and so on, it develops new directions for applications in other fields.

**Key words:** laser paint removing; aircraft surface; paint layer;  $\text{CO}_2$  laser

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61675186); 青年人才基金(RCFPD1-2017-7)

作者简介: 蒋一岚(1987-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事激光预处理相关方面的研究。Email: jiangyilan1023@163.com

通讯作者: 贾宝申(1980-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光清洗相关方面的研究。Email: jbslaser@126.com

## 0 引言

在工业领域中,当金属表面的涂层出现脱落,或对底层的金属基底进行检修时,则需要对原有的油漆层进行去除,特别是飞机、轮船等每隔几年就要脱漆大修一次,需要除去表面的旧油漆,以便喷涂新油漆<sup>[1-2]</sup>。飞机对于安全性有着非常苛刻的要求,所以在飞机飞行一段时间以后需要将其表面的油漆层全部去除,便于检查发现铝蒙皮或结构件的缺陷和疲劳裂纹,从而避免飞机发生疲劳事故<sup>[3]</sup>。因此,在对飞机蒙皮进行除漆处理时,首先需要考虑的便是不能损伤基底,保证其安全性。

传统的除漆方法主要采用机械除漆法、化学除漆法和超声波除漆法等<sup>[4]</sup>。这几种方法虽已是相当成熟的技术,但它们都存在很大的弊端,如机械除漆法是采用刮、擦、刷、喷砂等机械手段去除表面漆层,其劳动强度大,噪声大,且很容易损伤基体,除漆效果也不是很理想;化学除漆方法是利用有机清洗剂,通过喷、淋、浸泡或高频振动等措施去除表面漆层,容易造成严重的环境污染,且在需要局部除漆时无法使用;超声波除漆法则是将被处理零件放入除漆剂中,利用超声波产生的振动效应去除工件表面油漆层,虽然除漆效果不错,但除漆槽的尺寸限制了除漆对象的体积和形状,且除漆后对去漆对象的干燥亦是一大难题。

被称为“绿色”除漆工艺的激光除漆技术是近些年来飞速发展起来的新型除漆技术,与传统的除漆方法相比较而言,激光除漆技术则有着无可比拟的优势<sup>[5-6]</sup>:(1)不存在机械接触;(2)对欲除漆的部位定位准确,并可广泛应用于不同表面;(3)可实施实时监控,并及时得到反馈;(4)除漆对象的适应性;(5)无环境污染;(6)多用途和可靠性;(7)运行和维护成本低。因此对激光除漆技术进行研究具有重要的意义。

激光除漆实际上就是利用激光与漆层和基底的相互作用克服漆层与金属基底的粘附力或直接将漆层气化实现去除的过程。国内外有不少科研人员对激光除漆的物理机制进行过研究<sup>[7]</sup>,总结来看,激光除漆主要作用机理包括振动效应和烧蚀效应<sup>[8]</sup>。

振动效应(Vibration Effect)是指:当激光脉冲到

达漆层表面的时候,漆层和基底会反射部分激光能量并各自吸收部分激光的能量,这需要漆层对激光具有一定的透过率,实际清洗过程中,由于油漆涂层一般厚度都不大,所以可以满足这个条件。这时漆层和基底由于吸收了激光能量并转化成热导致温度升高,同时漆层特别是基底会由于热膨胀系数的不同,随着温度的升高而产生热膨胀,由于脉冲激光作用时间极短,这种短时间的急剧热膨胀会导致漆层和基底的结合处产生巨大的应力差,应力差产生的振动能克服粘附力的作用,最终使漆层脱离基底。

烧蚀效应(Ablation Effect)是指:当激光脉冲到达吸收激光的漆层表面时,漆层吸收并转化激光能量,使得漆层温度升高。当油漆层在吸收了相对较多的激光能量后,温度达到和超过材料气化温度点时,漆涂层会被气化,就好像漆层被逐层烧蚀剥离掉一样,这种激光除漆方式就是烧蚀效应。

近年来,在激光去除油漆层方面,发展有皮秒激光清洗漆涂层的图形扫描技术<sup>[9]</sup>;Francois Brygo 等研究了烧蚀机制除漆时激光脉冲重复频率、脉冲宽度的技术特点<sup>[10]</sup>;2010年,G.X.Chen 等人专门针对远洋航海工具和船舶的重装涂漆特点研究了相应的激光清洗除漆技术<sup>[11]</sup>;2016年,国内的宣善勇分析了激光除漆在飞机复合材料部件表面的除漆应用发展趋势,并阐述了国外相关应用实例的进展情况<sup>[12]</sup>;此外还有一些关于温度场分布的数值模拟研究<sup>[13]</sup>。从以上工作中可以看出,在激光除漆时绝大多数采用 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[14]</sup>以及 YAG 激光器。

飞机蒙皮激光脱漆技术是激光清洗技术<sup>[15]</sup>中的一个重要分支。文中的工作是利用 10.6 μm 的高重复频率 CO<sub>2</sub> 激光器对飞机蒙皮(铝合金板材)表面油漆层进行除漆。因为金属对长波长的激光吸收弱,对短波长激光吸收强,对于铝材而言,对 10.6 μm 激光的吸收比为 0.019,而对 1 064 nm 的激光,吸收比达 0.08,所以选用 CO<sub>2</sub> 激光器有利于保护基体;另外,10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光比 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光的穿透深度大一个数量级,所以 CO<sub>2</sub> 激光器的脱漆效率高于 Nd:YAG 激光器,且高重复频率的 CO<sub>2</sub> 激光器效率更高。文中通过选择合适的扫描间距、激光功率密度及扫描次数,成功地将飞机蒙皮表面的两层油漆层完全除漆,露出了基底层原有的打标字样,通过一系列的表征手段,结果证明该方法未损伤飞机

蒙皮的基底,也未改变其力学性能。

### 1 实验方法与设备

所用实验样品为真实的飞机蒙皮样品,其基底材料为 1.01 mm 厚的 LY12 铝合金样片,铝合金表面有一层青黄色的阳极氧化层,其上涂层为双层复合油漆层——灰黑色 TS96-71 面漆以及黄色 TB06-9 底漆,厚度大约为 90 μm。将油漆层除漆干净的标准为:去掉面漆和底漆层之后露出铝合金表面的阳极氧化层,且该阳极氧化层的力学性能、颜色及粗糙度无变化。

图 1 为激光除漆实验的装置图。去漆所用的激光器为 100 W CO<sub>2</sub> 激光器,输出波长为 10.6 μm,激光从 CO<sub>2</sub> 激光器出射之后,通过一个合束镜将激光与指示光同轴,然后再经过扩束镜、振镜,最后达到样品表面。使用德国 CINOGY 公司型号为 Laser DEC CL200 的 CO<sub>2</sub> 激光光束质量分析仪测试到达样品表面的激光光斑,其为超高斯圆光斑,光斑直径约为 800 μm,激光器的频率为 20 kHz,扫描速度为 200 mm/s。通过选择不同的激光功率密度、扫描间距以及扫描次数来对实验样品进行激光除漆实验。表 1 为各组实验的具体参数。

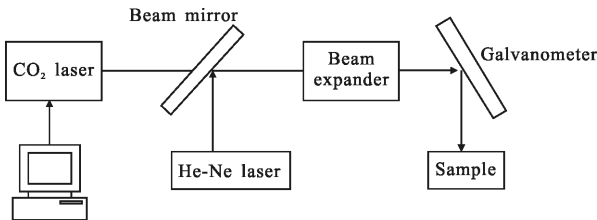


图 1 激光除漆技术的实验装置图

Fig.1 Experimental configuration for laser paint removing

表 1 各组实验的具体参数

Tab.1 Specific parameters of each experiment

Serial number	Average power density /kW·cm <sup>-2</sup>	Peak power density /kW·cm <sup>-2</sup>	Scanning distance /mm	Scanning time
1	11.5	46.2	0.2	7
2	13.1	43.8	0.2	7
3	14.7	42.1	0.2	7
4	15.4	40.6	0.2	2
5	16.1	40.2	0.2	2
6	16.1	40.2	0.1	1
7	13.1	43.8	0.1	2

### 2 实验结果分析与讨论

图 2(a)为实验样片激光除漆之后与原始油漆层的实物照片,图中序号对应表 1 中的序号,图 2(b)为面漆层的光学显微镜图片。

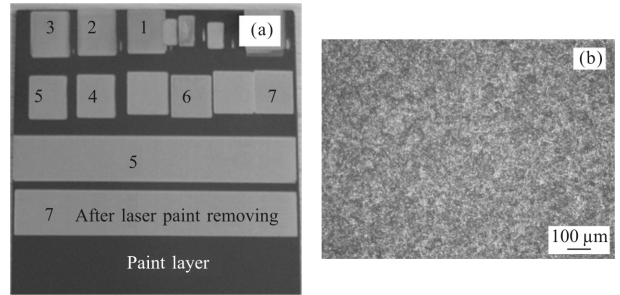


图 2 (a) 飞机蒙皮照片和(b) 面漆层的光学显微镜图片

Fig.2 (a) Photograph of the aircraft surface and (b) the optics microscope image of the paint layer

实验表明,除漆效果受到平均功率密度、峰值功率密度、扫描间距(搭接量)和扫描次数等因素的影响。随着平均功率密度的增加,峰值功率密度的降低(主要由于脉冲时间变长而导致峰值功率降低),样品表面形貌变化见图 3。除漆过程中能观察到明火,第一

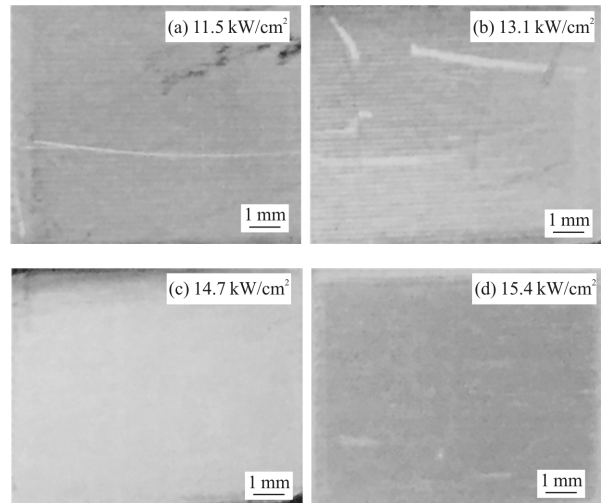


图 3 不同功率密度处理之后的除漆结果

Fig.3 Results of paint removing after treatment with different power density

遍扫描之后样品表面出现碳化的黑色粉末物质,该物质质地松软,且易于擦去,擦去之后便会露出黄色底漆。继续增加平均功率密度,激光作用区域能显露出

极少面积的基底阳极氧化层。随着平均功率密度不断提高,能够露出大部分阳极氧化层,但直到第七遍扫描之后仍不能将黄色底漆层完全除漆,当进一步增大平均功率密度到  $15.4 \text{ kW/cm}^2$  时,第二遍扫描之后黄色底漆残留极少,随着激光功率密度的增加,显露的阳极氧化层面积不断增加,除漆率不断上升。

当激光平均功率密度增大到  $16.1 \text{ kW/cm}^2$ ,第二遍扫描之后便能将黄色底漆层除完,但露出的基底上出现了较为明显的光斑拼接痕迹(图 4(a)),在光学显微镜下能看到光斑拼接处还有明显的残留油漆(图 4(b)),这是由于激光光斑为高斯光斑,  $0.2 \text{ mm}$  的扫描间距明显大于光斑的有效除漆面积,除漆效果仍有待提高。

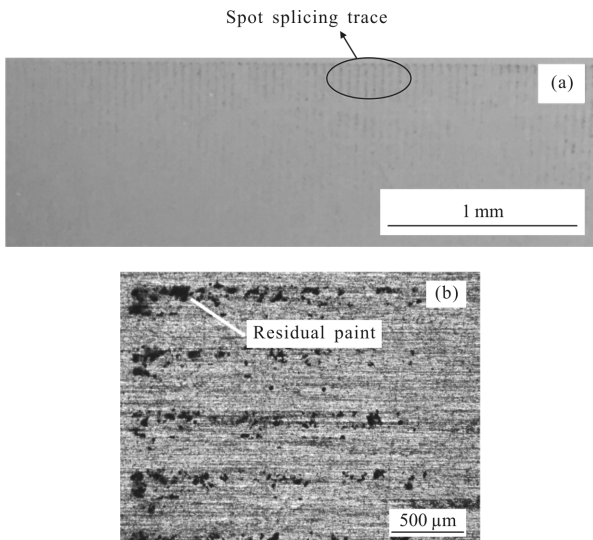


图 4 激光功率密度  $16.1 \text{ kW/cm}^2$ , 扫描间距  $0.2 \text{ mm}$ , 扫描两次  
(a)光斑拼接痕迹,(b)光斑拼接处残留油漆光学显微镜图  
Fig.4 With laser power density of  $16.1 \text{ kW/cm}^2$ , scanning distance of  $0.2 \text{ mm}$ , scanning twice (a) the imprint of spot stitching, (b) the optics microscope image of the residual paint at place of the spot stitching

由于之前的各组实验都能在样品表面看到较为明显的光斑拼接痕迹,这也表明一味地提高平均功率密度并不能获得很好的除漆效果,因此,可以通过适当地提高激光光束之间的搭接率来提高激光作用的覆盖区域,减少残留油漆量,从而提高激光除漆的效果。故将扫描间距改为  $0.1 \text{ mm}$ ,当激光功率密度为  $16.1 \text{ kW/cm}^2$  时,第一遍扫描之后就能实现油漆层的完全去除,但阳极氧化层出现明显的发白现象(图 5),表明已损伤基底。这是由于此时光斑叠加到了较为理想

的状态,虽然除漆效果较好,但是样品在长时间的较高平均功率密度作用下,其表面温度升高值已超过基底能承受的最大值,出现了基底被损伤的状态。

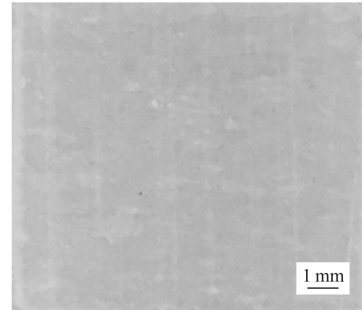


图 5 激光功率密度  $16.1 \text{ kW/cm}^2$ , 扫描间距  $0.1 \text{ mm}$ , 扫描一次  
Fig.5 Result with laser power density of  $16.1 \text{ kW/cm}^2$ , scanning distance of  $0.1 \text{ mm}$ , and scanning one times

由于第六组实验易损伤基底,表明平均功率密度已超过基底的损伤阈值,但除漆效果较好,也没有出现明显的光斑拼接痕迹,故在扫描间距为  $0.1 \text{ mm}$ ,降低平均功率,实验结果显示当扫描间距为  $0.1 \text{ mm}$ ,平均功率密度为  $13.1 \text{ kW/cm}^2$  时扫描两遍之后便能将油漆层完全去除,还能清晰看到基底层上原有的打标字样(图 6),此时的平均功率密度为完全除漆阈值。

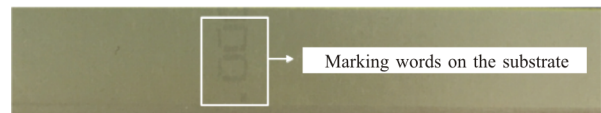


图 6 激光功率密度  $13.1 \text{ kW/cm}^2$ ,  $0.1 \text{ mm}$  条件下扫描两次之后的露出的基底打标字样

Fig.6 Appearance of the marking words on the substrate after paint removing with laser power density of  $13.1 \text{ kW/cm}^2$ , scanning distance of  $0.1 \text{ mm}$ , and scanning twice

图 7 为完全除漆后露出的阳极氧化层与激光未

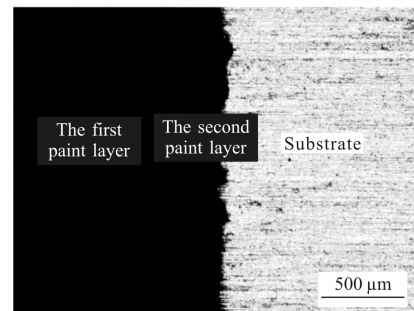


图 7 激光除漆后与原始油漆层交界处的光学显微镜图片  
Fig.7 Optics microscope image of the interface for paint removing and the original paint layer

作用区域的对比图,从图中可以看出激光能量的一个递减作用,在完全除漆区域的附近,由于激光能量的减弱,附近区域未能实现完全除漆,导致面漆被去除,露出黄色的底漆层,更远的区域则完全不受激光的作用。从此处也可以看出激光的精确定位功能。

图 8(a)为第七组参数完全除漆后露出的阳极氧化层的显微图片,图 8(b)为样片涂漆前的阳极氧化层显微图片,从两张图片的对比可以看出其形貌相同,所以第七组实验参数是较为理想的飞机蒙皮除漆参数。

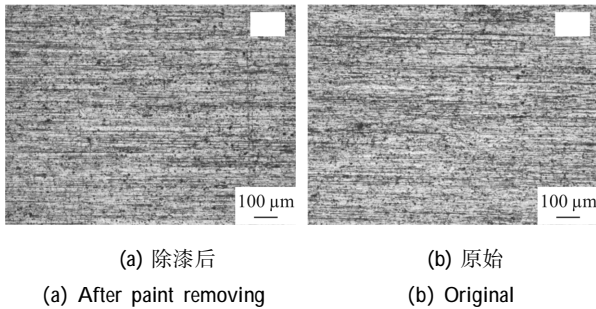


图 8 完全除漆与原始阳极氧化层光学显微镜图片

Fig.8 Optics microscope image of the paint removing totally and the original anodic oxide coating

### 3 激光除漆对飞机蒙皮力学性能的影响

在激光除漆之后,需要进一步确定其基底是否受到了损伤,故对激光除漆后的飞机蒙皮和其原始的阳极氧化层基底进行了粗糙度、抗拉强度、屈服强度以及维氏硬度的测量、分析及对比。

通过测试两种情况的粗糙度(图 9),激光除漆之后露出的基底阳极氧化层粗糙度  $R_a$  平均值为  $0.351 \mu\text{m}$ ,而样品原始阳极氧化层  $R_a$  平均值为  $0.354 \mu\text{m}$ ,二者粗糙度并无本质上的差别,所以激光除漆并未改变样片基底的粗糙度。

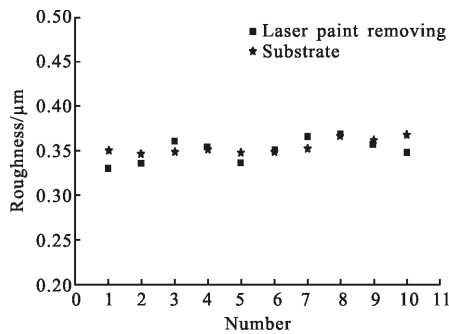


图 9 激光除漆与原始基底粗糙度值

Fig.9 Roughness of the paint removing and the original substrate

金属的硬度是金属材料抗局部变形,特别是塑

性变形、压痕或划痕的能力,是衡量金属软硬程度的一个参数。

用显微维氏硬度计测量飞机蒙皮的维氏硬度(HV)。所用仪器为烟台华银试验仪器有限公司的 HVT-1000A 硬度计,使用 50 g 试验力,保持时间为 15 s,测试所得的飞机蒙皮激光除漆与原始基底的维氏硬度列于表 2。

表 2 激光除漆和原始基底的维氏硬度值

Tab.2 Vickers hardness of paint removing and original substrate

No.	Original substrate	Laser paint removing
1	155.7	161.6
2	155.5	178.3
3	147.1	169.6
4	141.3	163.2
5	155.7	178.3
6	147.4	185.8
7	152.3	175.8
8	147.6	176.5
9	162.8	167.1
10	159.6	171.3
Standard deviation	6.588	7.562

图 10 为激光除漆和基底的维氏硬度值的对比图,从图中可以看出,激光除漆之后飞机蒙皮的维氏硬度值普遍高于原始飞机蒙皮基底的维氏硬度值,这也说明了激光作用到飞机蒙皮表面时存在一个激光冲击强化飞机蒙皮表面的效果。激光冲击强化(Laser Shock Peening, LSP)是一种利用短脉冲激光束对材料表面进行改性,提高材料的疲劳强度、硬度、耐腐蚀性能和耐磨性等机械性能的技术。故激光除漆之后其表面的硬度值略高于原始基底,表明激光除漆还能提高飞机蒙皮的力学性能。

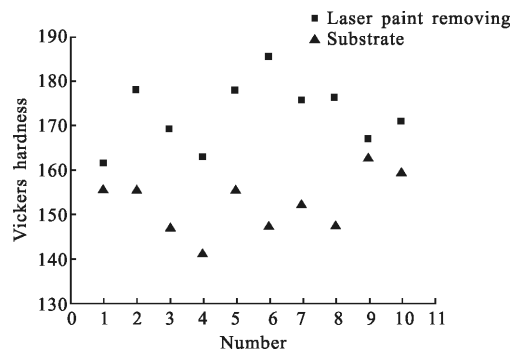


图 10 激光除漆与原始基底维氏硬度值

Fig.10 Vickers hardness of paint removing and original substrate

强度失效是指在常温静载作用下,由于材料的屈服或断裂引起的失效,文中对飞机蒙皮激光除漆前后进行强度失效分析,分别测量了样品激光除漆前后的

抗拉强度和屈服强度,具体数据如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,激光除漆对于飞机蒙皮的抗拉强度以及屈服强度等力学特性没有影响,飞机

表 3 抗拉强度和屈服强度实验数据

Tab.3 Experimental data of the tensile strength and yield strength

	Average tensile strength/MPa				Average yield strength/MPa			
	Before laser paint removing	Standard deviation	After laser paint removing	Standard deviation	Before laser paint removing	Standard deviation	After laser paint removing	Standard deviation
Aircraft surface	461	1	458	0	337	1.53	330	4.95

蒙皮不会因为激光除漆而导致其强度性能变坏,因此,CO<sub>2</sub>激光除漆不会损伤飞机蒙皮。

#### 4 除漆机理分析

在整个激光除漆实验过程中所观察到的现象和结果与激光除漆的烧蚀机制相吻合:当漆层表面吸收激光之后,首先是面漆层转化激光能量,较高的峰值功率使得面漆层的温度瞬间升高,平均功率相对于峰值功率能够较长时间作用在面漆层,当面漆层在吸收了相对较多的激光能量后,温度达到和超过材料气化温度点时,面漆层会被气化,从而达到去除的效果。激光除漆过程中,光束中心表面升高的温度 T<sub>s</sub>可近似按下式计算<sup>[16]</sup>:

$$T_s = \frac{2(1-R)F}{K} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \quad (1)$$

式中:(1-R)为表面对激光的吸收率;F为平均激光功率密度;K为热传导率; $\alpha=K/\rho C_v$ 是热扩散率, $\rho$ 为材料密度,C<sub>v</sub>为材料比定压热容;t是激光作用时间。 $\alpha$ 的典型值为 10<sup>-2</sup>cm<sup>2</sup>/s,第七组实验一个脉冲激光的作用时间 t=0.15 μs,假设油漆层表面对激光的吸收率为 1,K=0.3 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,通过公式(1)计算得到第七组实验 T<sub>s</sub>≈1 648 °C,该温度已足以让油漆层汽化。又由于对于铝材而言,对 10.6 μm 激光的吸收比为 0.019,因此,当油漆层被激光去除之后,剩余的激光辐照在基体表面并不会引起基体的温度升高很多,除此之外,铝本身的热导率很高,所以激光结束作用之后,其基体能够进行自我快速冷却。

表面油漆层对波长 10.6 μm 的激光强烈吸收,被吸收的激光在漆层内部的穿透深度 d 与光强 I 遵

从朗伯定律  $I=I_0e^{-ad}$ ,油漆的吸收系数  $a \approx 10^6 \text{ m}^{-1}$ ,激光在油漆层中的穿透深度只有几个微米,而且油漆层的热导率很低,因此,在激光辐照下,热量在面漆层积聚,表面温度迅速上升,达到油漆的熔点、沸点及燃点以上,导致漆层瞬间发生气化挥发,或受热燃烧,从而产生火花和烟雾,使得面漆层脱落。实验所用的漆层厚度为 90 μm,辐照在漆板表面的激光束不能一开始就透过面漆层和底漆层直达基体表面,而是在激光的作用下,漆层逐层脱落,厚度不断减薄,这与笔者在实验中所观察到的面漆层先脱落,然后才是底漆层脱落这一现象是相吻合的。所以,通过选择合适的激光除漆参数,能够将表面的油漆层完全去除且不损伤基体。

#### 5 结论

综上所述,飞机蒙皮激光脱漆技术是激光清洗技术中的一个重要分支,有着广阔的应用前景。文中针对 1.01 mm 厚的飞机蒙皮(LY12 铝合金板材)上的 90 μm 厚的双层复合油漆层,采用高重频 CO<sub>2</sub> 激光器,通过选择合适的扫描间距、激光功率密度及扫描次数,成功地将飞机蒙皮表面的两层油漆层完全去除。通过对激光除漆后的飞机蒙皮和其原始的阳极氧化层基底进行了粗糙度、抗拉强度、屈服强度以及维氏硬度的测量、分析及对比发现,激光除漆完全不会对基底造成损伤,也不会改变其力学性能,甚至可能还会提高其硬度值,并对激光除漆的机理进行了分析,通过计算对比发现计算出的理论值与实验现象和结果相吻合,但这项研究课题还有很多的问题有待解决(如热效应和激光冲击强化<sup>[17]</sup>相关问题),还

需要进行大量研究工作。

#### 参考文献:

- [1] Song F, Liu S J, Zou W F. Laser cleaning removal of rust and paint [J]. *Cleaning World*, 2005, 21(11): 38-41.
- [2] Yang Guang, Liu Huanhuan, Zhou Jiaping, et al. Research on laser deposition repair aircraft vertical tail beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206004. (in Chinese)
- [3] He Nai, Lei Junzhi, Hua Xinhao. *Aircraft Coating and Application Techniques* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [4] Li Lin, Zu Daoqi. Research on the maintenance technology of the aluminum paint removing for warship [J]. *China Shiprepair*, 2015, 28(5): 13-18. (in Chinese)
- [5] Kim T, Lww J M, Cho S H, et al. Acoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2005, 43(9): 1010-1020.
- [6] Hou Suxia, Luo Jijun, Xu Jun, et al. Laser cleaning technology application of military equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 357-360. (in Chinese)
- [7] Wang Deliang, Feng Guoying, Deng Guoliang, et al. Study of mechanism on laser paint removal based on the morphology and element composition of ejected particle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (10): 1003007. (in Chinese)
- [8] Zhang Heng, Liu Weiwei, Dong Yazhou, et al. Experimental and Mechanism Research on Paint Removal with Low Frequency YAG Pulsed Laser [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 121401. (in Chinese)
- [9] Rode A V, Freeman D, Baldwin K G H, et al. Scanning the laser beam for ultrafast pulse laser cleaning of paint [J]. *Applied Physics A*, 2008, 93: 135-139.
- [10] Francois B, Dutouquet C, Guern F L, et al. Laser fluence, Repetition rate and pulse duration effects on paint ablation [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252: 2131-2138.
- [11] Chen G X, Kwee T J, Tank P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal [J]. *Applied Physics A*, 2010, 101: 249-253.
- [12] Xuan Shanyong. Study on laser paint stripping technology for aircraft composite parts [J]. *Aviation Maintenance Engineering*, 2016(8): 15-18. (in Chinese)
- [13] Wang Zhenbao, Wu Yong, Yang Pengling, et al. Numerical simulation and experiment on temperature fields distribution of aluminum target under intensive laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2061-2065. (in Chinese)
- [14] Pan Qikun, Xie Jijiang, Ruan Peng, et al. Output performance of acousto-optic Q-switched CO<sub>2</sub> laser [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 283-288. (in Chinese)
- [15] Wu Dongjiang, Xu Yuan, Wang Xuyue, et al. Experimental and theoretical study on laser cleaning Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle on silicon wafer surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 764-770. (in Chinese)
- [16] Watkins K G, Curran C, Lee J M. Two new mechanisms for laser cleaning using Nd: YAG sources [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4(S1): 59-64.
- [17] Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, et al. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1766-1773. (in Chinese)