

## 激光清洗工艺对航空铝合金组织及疲劳性能的影响研究

程程<sup>1</sup>, 余玮琛<sup>1\*</sup>, 丁瑶<sup>1</sup>, 邱太文<sup>1</sup>, 富双超<sup>1</sup>, 唐云洋<sup>2</sup><sup>1</sup>中国商飞上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所, 上海 201324;<sup>2</sup>中国商飞上海飞机制造有限公司计量测试中心, 上海 201324

**摘要** 采用脉冲激光器,开展了航空铝合金表面漆层去除试验,通过外观检查、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、原位温度检测、力学性能检测和高周疲劳试验,研究了激光清洗工艺对航空铝合金组织、力学及疲劳性能的影响规律。结果表明:当激光功率和脉冲频率分别为 80 W 和 100 kHz 时,可去除铝合金表面环氧底漆涂层,但试样表面仍有漆层残余。当激光功率和脉冲频率分别达到 500 W 和 500 kHz 时,表面温度最高不超过 115 °C,未观察到明显的热影响区,材料表面 10 μm 深度范围内的组织出现部分烧蚀和熔化现象。激光清洗后,材料的硬度增加,并且随着激光功率、频率、能量密度的增加,硬度增幅逐渐减小。拉伸性能结果显示,激光清洗后的试样抗拉强度、屈服强度和延伸率较空白试样均略微下降。高周疲劳试验结果表明,与空白试样相比,激光清洗后的带漆试样的疲劳性能下降 11.76%,这主要是激光清洗造成了表面粗糙度增加。经阳极氧化和喷漆处理后,激光清洗去漆不会进一步增加阳极氧化造成的疲劳损伤。

**关键词** 激光技术; 激光清洗; 航空铝合金; 热影响区; 力学性能; 疲劳性能

中图分类号 V261.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231088

## 1 引言

飞机蒙皮表面附着氧化膜层和表面漆层等,具有良好的耐腐蚀能力<sup>[1-3]</sup>。目前国内外主要飞机制造厂所采用的飞机铝合金蒙皮表面涂层体系包括表面处理层、底漆层和面漆层<sup>[4]</sup>。但飞机服役一段时间后,蒙皮表面的漆层会受到外力、光照、湿度等诸多因素的影响,导致老化、龟裂、脱落等现象<sup>[5]</sup>,因此去除金属材料表面原有的涂层是金属材料表面重新喷漆的必要环节<sup>[6-8]</sup>。激光清洗技术具有非接触、清洗洁净度高、可精确定位清洗区域、不产生二次污染的优点<sup>[9-12]</sup>,能够取代传统机械打磨和化学除漆方式,提高飞机表面漆层的清洗质量<sup>[13-17]</sup>。

激光除漆技术研究的重点在于除漆对基材性能的影响,如基材表面质量和基材力学性能等。目前,国内外学者在激光除漆技术对基材表面质量和力学性能的影响方面开展了大量研究。胡太友等<sup>[18]</sup>使用纳秒脉冲激光器清除 Ti17 合金的表面漆层,研究发现选取合适的激光参数可去除污染物,并在一定程度上改善基材的表面质量。刘伟军等<sup>[19]</sup>研究了激光能量密度和清洗速度对钛合金表面漆层清洗质量的影响,发现在激光合理的工艺参数下可以有效去除

表面漆层,获得良好的表面形貌,并提升表面硬度。江国业等<sup>[20]</sup>研究发现,激光清洗不仅可满足基材表面的除漆要求,而且还能强化表层。Wei 等<sup>[21]</sup>研究了激光清洗对 316 不锈钢和 6061 铝合金激光焊接接头质量的影响,发现在合适参数下激光清洗可以有效提高激光焊接接头的力学性能。Wang 等<sup>[22]</sup>研究了在不同激光能量密度(3.11~4.44 J/cm<sup>2</sup>)下阳极氧化膜清洗对 7075 铝合金表面形貌、成分、粗糙度、显微硬度和接触角的影响,发现与机械法相比,在 4.44 J/cm<sup>2</sup>激光能量密度下进行激光清洗后,材料表面显微硬度略有提高,疏水性显著增强。Sun 等<sup>[23]</sup>研究了 2024-T351 铝合金激光除漆试样的力学性能和微观组织特征,发现与未处理的试样相比,激光清理后试样表面显微硬度和抗拉强度分别提高了 10.6% 和 8.4%。

目前激光清洗除漆的研究大多偏重激光工艺对基材表面质量和力学性能的影响研究,关于激光工艺参数对铝合金组织和疲劳性能的影响研究甚少。由于飞机对安全性能有着极高的要求,激光清除表面漆层的操作是否会影响到飞机的疲劳性能是一个十分重要的问题。细节疲劳额定值(DFR)法<sup>[24-26]</sup>是 20 世纪 70 年代美国波音公司提出的简单可靠的快速疲劳分析方

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-09-03; 录用日期: 2023-09-11; 网络首发日期: 2023-09-22

通信作者: \*yuweichen@comac.cn

法,该方法考虑了最能体现结构部位固有疲劳品质的结构细节、表面加工状态以及材料种类等,广泛应用于民机和军机的疲劳和耐久性分析与评定。

基于上述背景,为了丰富激光清洗表面除漆研究并进一步促进激光清洗的工业化应用,本研究采用纳秒脉冲激光器对涂有耐流体环氧底漆涂层的铝合金试验件进行除漆试验,探讨了激光清洗去漆工艺对铝合金组织和疲劳性能的影响。

## 2 试验方案

### 2.1 试验材料

试验件选用工厂提供的尺寸为 150.0 mm×75.0 mm×1.6 mm 的 Al-4.35Cu-1.5Mg 合金材料,试验件表面经过阳极氧化处理,并喷涂了耐流体环氧底漆。

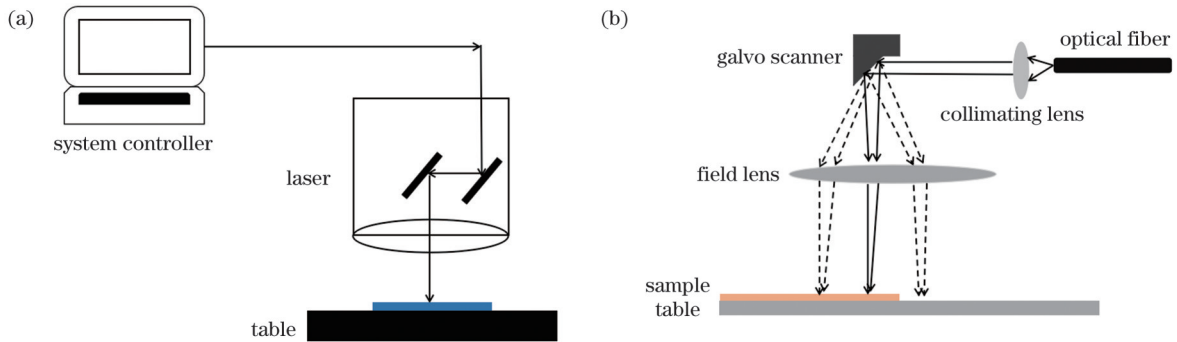


图 1 激光原理图。(a)激光器构件示意图;(b)激光器内部光路示意图

Fig. 1 Schematics of laser. (a) Schematic of laser components; (b) schematic of optical path inside laser

本次试验使用的激光设备的光斑直径为定值,因此可通过调节激光输出功率和激光频率设定激光能量。本次试验设定的激光扫描线宽为 75 mm,扫描行程为 80 mm,选择激光功率为 60~500 W,脉冲频

### 2.2 试验设备及方法

试验选用纳秒脉冲激光清洗设备,包括脉冲光纤激光器、工作台、系统控制装置,如图 1(a)所示。激光由脉冲光纤激光器发出,经过扫描振镜反射到场镜后,被场镜聚焦作用于待加工工件表面,如图 1(b)所示。激光光斑可以通过扫描振镜的摆动在工件表面实现高速移动,本次试验激光选用“弓”字形轨迹运动。

激光能量密度是影响清洗效果最主要的参数之一,为了研究激光能量对清洗效果的影响,采用不同激光能量密度对表面漆层和阳极氧化膜层进行清洗试验。激光能量密度的计算公式为

$$E = P / (f \times A), \quad (1)$$

式中: $P$ 为激光输出功率; $f$ 为激光频率; $A$ 为光斑面积。

率为 100~500 kHz,振镜扫描速度为 8000 mm/s,搭接长度为 0.05 mm,清洗次数为 2 次,能量密度在 7.64~12.73 J/cm<sup>2</sup> 范围内。激光清洗工艺参数如表 1 所示。

表 1 激光清洗工艺参数

Table 1 Laser cleaning process parameters

Parameter No.	Laser power /W	Pulse frequency /kHz	Laser energy density / (J·cm <sup>-2</sup> )
1 <sup>#</sup>	60	100	7.64
2 <sup>#</sup>	80	100	10.19
3 <sup>#</sup>	100	100	12.73
4 <sup>#</sup>	180	300	7.64
5 <sup>#</sup>	240	300	10.19
6 <sup>#</sup>	300	300	12.73
7 <sup>#</sup>	300	500	7.64
8 <sup>#</sup>	400	500	10.19
9 <sup>#</sup>	500	500	12.73

激光除漆试验完成后,通过目视检查宏观形貌,采用金相电子显微镜检测激光清洗后试样的热影响区,采用红外测温仪检测激光清洗过程中的试样表面温度变化,时间间隔 100 ms,采用洛氏硬度计检测激光清洗前后的宏观硬度,采用小负荷维氏硬度测试仪

检测清洗前后试样表面的显微硬度。选用粗糙度测试仪对清洗前后的试样表面粗糙度进行测试,每块试样测试三次后取平均值。采用万能力学试验机激光清洗试样进行力学性能检测,力学性能检测试样如图 2 所示。在疲劳试验机上检测激光清洗对材料疲劳性

能的影响,疲劳性能测试试样如图 3 所示。

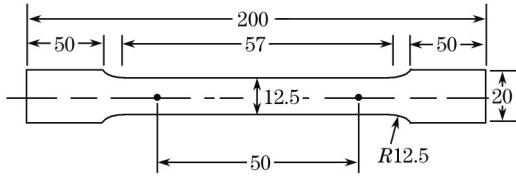


图 2 力学性能检测试样

Fig. 2 Diagram of specimen for testing mechanical properties

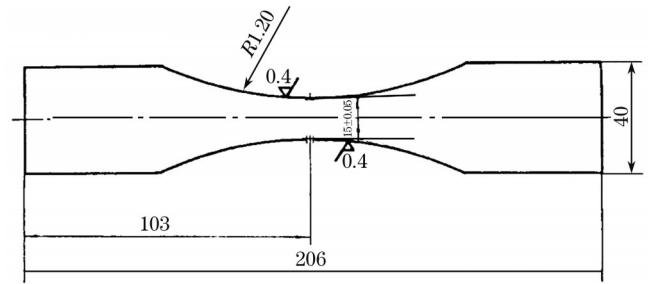


图 3 疲劳性能检测试样

Fig. 3 Diagram of specimen for testing fatigue properties

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 激光清洗工艺对铝合金组织的影响

图 4 为不同能量密度激光作用后的试样宏观形貌。图 4(a) 为激光能量密度为  $7.64 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$  时的试样表面状态,可以看出试样表面仍有漆层残余。当激光能量密度逐渐增高到  $10.19 \text{ J}/\text{cm}^2$  和  $12.73 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,如图 4(b) 和图 4(c) 所示,试验件表面漆层的去除量逐

渐增加,表面漆层可以被清除完全。这是由于当激光功率和激光能量密度较低时,表面漆层单位时间内吸收的激光能量较小,不会对漆层和基材产生过多影响,故表面仍有部分漆层未被清洗干净。随着激光能量密度的提高,表面漆层单位时间内吸收的激光能量增加,激光清洗的表面漆层量不断增加,清洗效果逐渐提高。

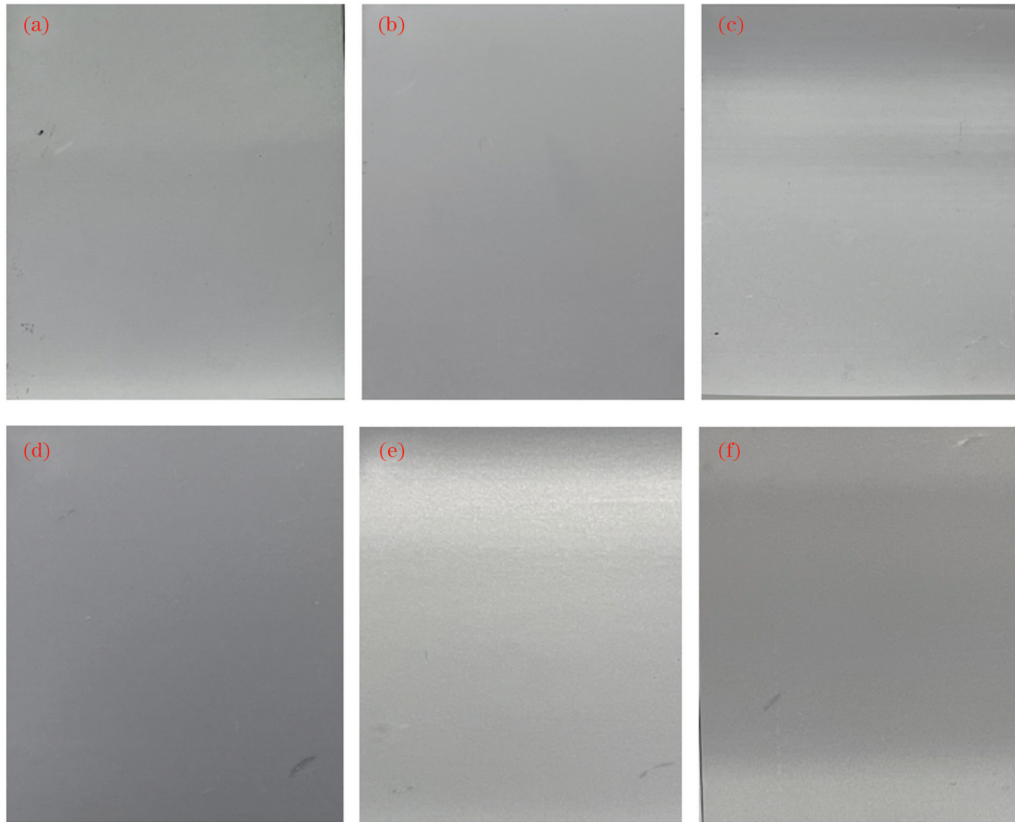


图 4 试验件宏观形貌。(a) 参数 1#; (b) 参数 2#; (c) 参数 3#; (d) 参数 4#; (e) 参数 5#; (f) 参数 9#

Fig. 4 Macroscopic topographies of samples. (a) Parameter 1#; (b) parameter 2#; (c) parameter 3#; (d) parameter 4#; (e) parameter 5#; (f) parameter 9#

如图 4(d) 和图 4(e) 所示,虽然激光能量密度为  $7.64 \text{ J}/\text{cm}^2$  和  $10.19 \text{ J}/\text{cm}^2$ , 低于参数 3# 下的  $12.73 \text{ J}/\text{cm}^2$ , 但随着激光功率和频率的增加,单位时间内的作用次数增多,表面漆层在一定时间内吸收的激光能量增加,因此表面漆层的清洗效果较参数 3# 下的清洗效果更佳。如图 4(f) 所示,当激光能量密度为  $12.73 \text{ J}/\text{cm}^2$  时,激光参数增大到 9#,清洗后的试样表面已有泛黄的氧

化色,这是因为表面漆层在单位时间内吸收的能量过多,激光清洗区域的表面温度相对较高,与空气中的氧气结合,基材表面发生氧化。

不同激光工艺参数下激光除漆后的表面粗糙度变化规律如图 5 所示。随着激光能量密度的增加 (1#、2# 和 3#),激光清洗后的试验件表面的粗糙度逐渐增加。这是因为激光清洗后试样表面峰谷的间距

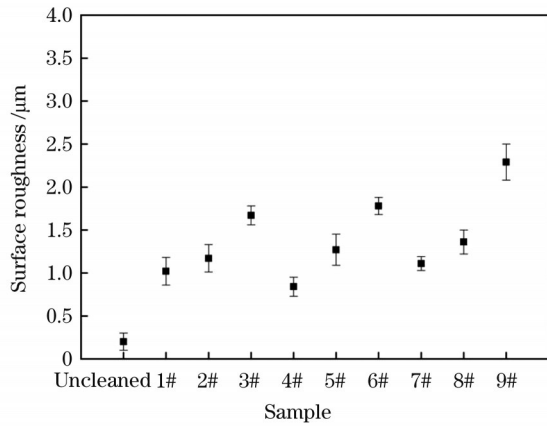


图5 未清洗试样与在参数1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>下激光清洗后试样的表面粗糙度

Fig. 5 Surface roughnesses of uncleaned sample and samples after laser cleaning under parameters 1<sup>#</sup>-9<sup>#</sup>

和不平整度增大,试样表面粗糙度逐渐增大。但当激光能量密度相同(3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>)时,随着脉冲频率的增加,基材表面粗糙度逐渐增大。这是因为在较低激光能量密度下,基材表面被脉冲激光冲击后,出现轻微的凹陷,表面粗糙度增加;随着激光能量密度的增大,激光作用在基材表面的深度逐渐加深,从而导致粗糙度增加。当激光能量和脉冲频率(参数9<sup>#</sup>)过大时,基材区域吸收激光能量后过度熔化并发生氧化,从而使得激光清洗后的试样表面粗糙度显著

增加。

采用金相显微镜可以更清晰地获取激光清洗后的基材表面状况,如图6所示,在不同激光参数下处理后的漆层表面状态基本和外观结果一致。当选用参数1<sup>#</sup>时,如图6(b)所示,可以看到脉冲激光打到漆层表面后,试样表面仍留有漆层,此时激光能量密度较低,不能完全清除表面漆层,激光光斑未能完全覆盖待清洗区域,因此凹坑四周会有明显的漆层残余。同时,由于试验所用的激光光斑为圆形,激光模式为高斯光,即光束中心能量分布比较均匀,但光束边缘能量较低,故激光光斑边缘的油漆难以完全清除,试样表面漆层仍有残余。当激光能量密度增大至10.19 J/cm<sup>2</sup>(参数2<sup>#</sup>)时,表面凹坑分布更加密集,基材表面整体较为平整,表面漆层被完全清洗。因此,在激光功率为80 W和脉冲频率为100 kHz的脉冲激光作用下,试样表面漆层可完全去除,获得较好的清洗效果。

当激光能量密度增大到12.73 J/cm<sup>2</sup>(参数9<sup>#</sup>)时,在激光清洗过的表面上能观察到较为密集的陨石坑现象,激光清洗过程中基材表面发生了熔化现象。这是由于激光照射到基材表面,基材发生熔融并快速冷却,凝固收缩形成了凹凸不平的表面形貌。因此,当激光能量和脉冲频率过高时,会对激光清洗试样表面状态造成影响,清洗效果不理想。

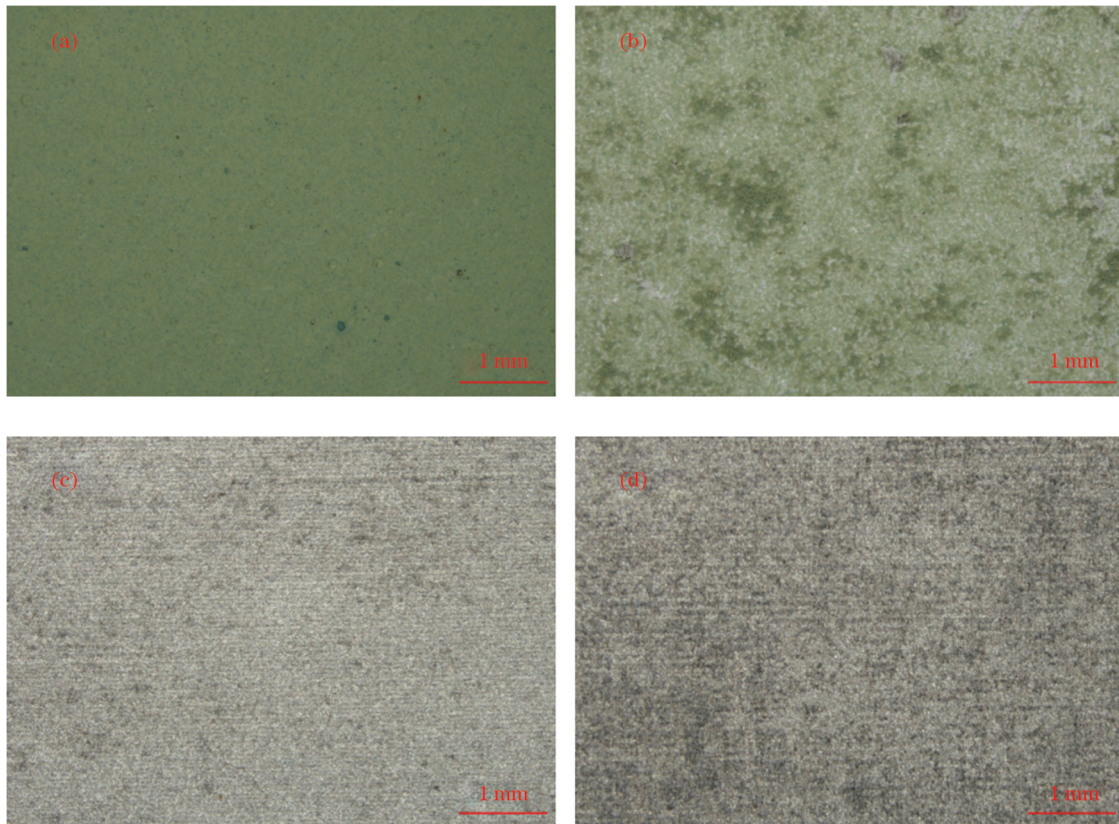


图6 试验件显微形貌。(a)未清洗试样;(b)参数1<sup>#</sup>;(c)参数2<sup>#</sup>;(d)参数9<sup>#</sup>

Fig. 6 Micro-morphologies of samples. (a) Uncleaned sample; (b) parameter 1<sup>#</sup>; (c) parameter 2<sup>#</sup>; (d) parameter 9<sup>#</sup>

图 7 为激光清洗参数 4<sup>#</sup>下激光清洗试样形貌的扫描电镜(SEM)照片。可以看出,如图 7(a)所示,激光清洗后无漆层残留,整体表面形貌均匀,高频光斑相互

搭接,形成有规律的堆叠层形貌。由于激光能量在光斑中心处较高,边缘较低,故光斑中心处平整,搭接处形成凸起[图 7(b)],这也是表面粗糙度升高的原因。

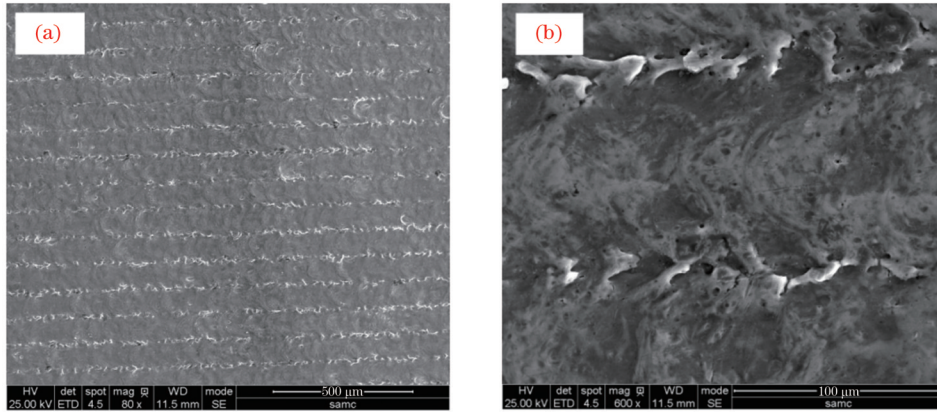


图 7 参数 4<sup>#</sup>下激光清洗试样的 SEM 照片。(a)低倍放大;(b)高倍放大

Fig.7 SEM images of sample after laser cleaning under parameter 4<sup>#</sup>. (a) Low magnification; (b) high magnification

图 8 所示为未清洗试样及参数 1<sup>#</sup>和参数 9<sup>#</sup>下试样截面的光学显微镜(OM)检测结果。在图 8(a)中,未清洗试样界面平整,可以看到明显的包铝层和基材。如图 8(b)所示,激光清洗后的试验件漆层与基材间的去除界面较为平整,出现轻微折线状,去除区域最

大深度约为 5 μm,但未见激光烧蚀和热影响区域。如图 8(c)所示,激光清洗后基材表面 10 μm 深度范围内出现部分烧蚀和破碎现象,结合图 5 可以看出,这造成了基材表面粗糙度的进一步增加,说明当激光能量密度较高时,激光清洗会引起部分烧蚀和熔化现象。

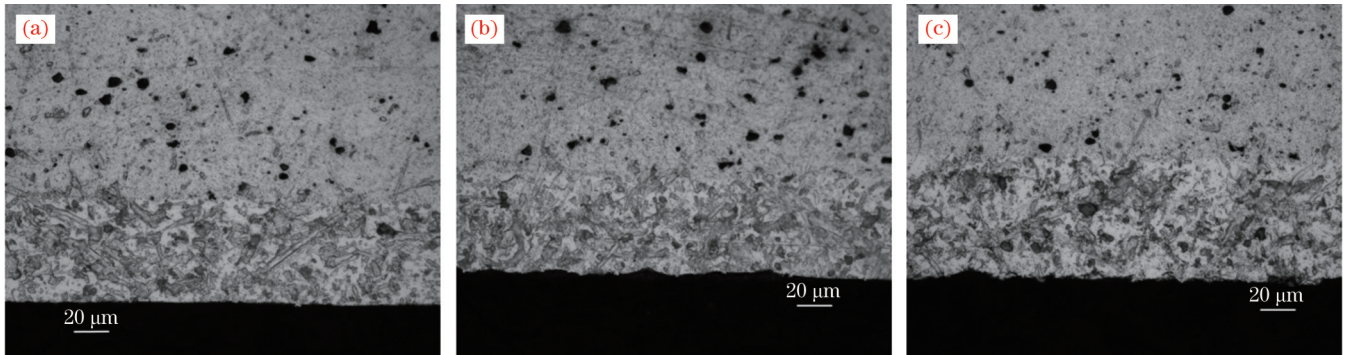


图 8 试样的 OM 图片。(a)未清洗试样;(b)参数 1<sup>#</sup>;(c)参数 9<sup>#</sup>

Fig.8 OM images of samples. (a) Uncleaned sample; (b) parameter 1<sup>#</sup>; (c) parameter 9<sup>#</sup>

### 3.2 激光清洗工艺对铝合金性能的影响

图 9 为不同激光清洗工艺参数下试样件表面温度的测试结果。当选用激光能量密度为 7.64 J/cm<sup>2</sup>(参数 1<sup>#</sup>)时,清洗过程中伴随着振动效应产生的啪啪声,试验件表面温度为 32.5 °C。这是脉冲激光照射到清洗区域时,表面漆层和基底分别吸收部分激光能量后温度升高,并在脉冲激光结束时降温,短时间内发生热胀冷缩,在表面漆层及漆层与基材的交界面处产生较大的应力,从而使污染物脱离基底并在激光清洗过程中发出啪啪的声音,此时表面漆层发生轻微熔化,因此此时激光能量主要以振动剥离的形式消耗。当激光能量密度分别增加到 10.19 J/cm<sup>2</sup>(参数 2<sup>#</sup>)和 12.73 J/cm<sup>2</sup>(参数 3<sup>#</sup>)时,激光能量增大,表面漆层吸收的部分激光能量转换为基底的热量,基底表面热累积增多,温度急剧升高,试验件表面温度也分别增高到 57.5 °C 和

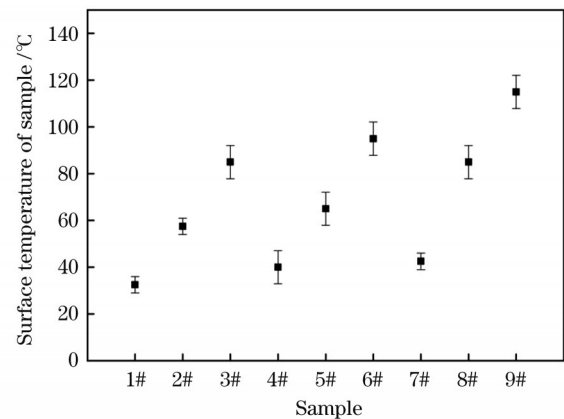


图 9 清洗过程中试样件表面温度

Fig.9 Surface temperatures of samples during cleaning

85.0 °C。当选用较高的激光功率和激光能量密度(参数 9<sup>#</sup>)时,温度可达到 115.0 °C,此时高能激光束在

单位时间内的作用次数增多,漆层表面在单位时间内易产生很高的热积累,使得清洗后的基材表面温度快速升高,导致基底表面熔融和氧化变黄,基材表面状况较差。

图 10 为宏观硬度测试结果。可以看出,当激光功率和频率较低(参数 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>)时,激光清洗后材料的宏观硬度均上升,且能量密度越低,上升幅度越大。这是因为大部分漆层去除后金属基材露出,材料宏观硬度上升。在参数 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>下进行激光清洗后,宏观硬度也上升,呈现与参数 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>相似的规律,但上升幅度减小。随着激光功率和频率的继续增加(参数 7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>和 9<sup>#</sup>),激光清洗后材料表面的宏观硬度的增幅减小,甚至在参数 7<sup>#</sup>和 9<sup>#</sup>下出现下降。这可能是因为随着激光功率和频率的增加,材料表面温度升高(图 9),部分应力释放,导致材料表面发生软化,所以宏观硬度的增幅减小甚至下降。

图 11 为参数 1<sup>#</sup>和参数 9<sup>#</sup>下试样横截面的显微硬度测试结果,分别测试了包铝层和靠近包铝层的基体的显微硬度。可以看出,当激光功率、频率和能量密度(参数 1<sup>#</sup>)较低时,材料包铝层硬度在激光清洗后上升,基体显微硬度略微下降。当激光功率、频率和能量密度(参



图 10 未清洗试样与在参数 1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>激光清洗后试样的宏观硬度  
Fig.10 Macro-hardnesses of uncleaned sample and samples after laser cleaning under parameters 1<sup>#</sup>-9<sup>#</sup>

数 9<sup>#</sup>)较高时,材料包铝层硬度在激光清洗后几乎没有增加,基体显微硬度上升,这可能是激光热力效应导致应力分布改变引起的。当激光能量较低时,激光热效应不明显,包铝层受热较少,力效应明显,因此包铝层硬度增加。当激光能量较高时,激光热效应明显,包铝层受热较多,发生明显软化,力效应也明显,因此应力往靠近包铝层的基体方向流动,导致基体的硬度增加。

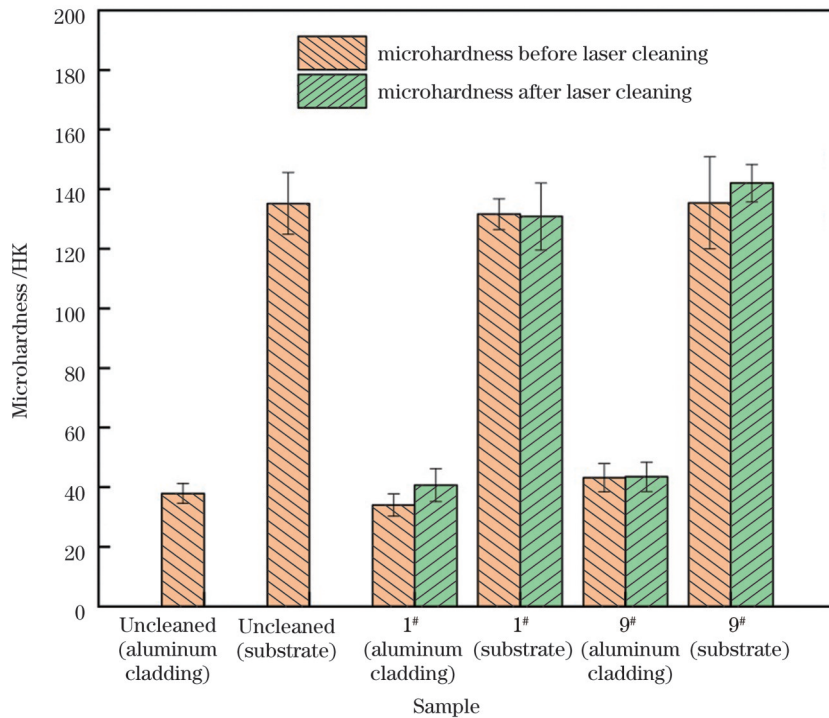


图 11 未清洗试样与在参数 1<sup>#</sup>和 9<sup>#</sup>下激光清洗后试样的显微硬度

Fig. 11 Microhardnesses of uncleaned sample and samples after laser cleaning under parameters 1<sup>#</sup> and 9<sup>#</sup>

表 2 为未清洗试样及参数 2<sup>#</sup>和参数 5<sup>#</sup>下试样的拉伸检测结果,可以看到未清洗试样的抗拉强度为 473.7 MPa,屈服强度为 340.6 MPa,延伸率为 17.5%。参数 2<sup>#</sup>和参数 5<sup>#</sup>下激光清洗后试样强度略微下降,抗拉强度分别下降 1.5% 和 1.9%,屈服强度分别下降 0.6% 和 4.3%。激光清洗后试样延伸率也下降,参数

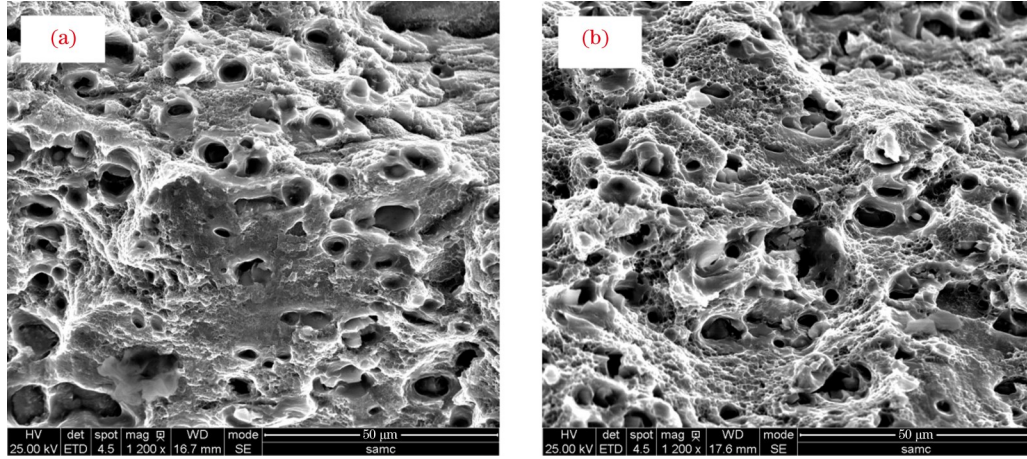
2<sup>#</sup>和参数 5<sup>#</sup>下分别下降 1.1% 和 6.3%。说明当激光能量密度相同时,增加激光功率和频率会对材料力学性能造成较大影响。

为了进一步分析激光清洗对基材的影响,采用扫描电镜对拉伸断口进行了观察,结果如图 12 所示。激光清洗前后试样的断口形貌类似,均为韧性断裂,可以

表 2 未清洗试样与不同参数下激光清洗后试样的拉伸检测结果

Table 2 Tensile test results of uncleaned sample and samples after laser cleaning under different parameters

Sample	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%
Uncleaned sample	473.7	340.6	17.5
2 <sup>#</sup>	466.8	338.5	17.3
5 <sup>#</sup>	464.7	326.1	16.4

图 12 未清洗试样与激光清洗后试样的拉伸断口截面。(a)未清洗试样;(b)参数 2<sup>#</sup>下激光清洗后的试样Fig. 12 Tensile fracture sections of uncleaned sample and sample after laser cleaning. (a) Uncleaned sample; (b) sample after laser cleaning under parameter 2<sup>#</sup>

观察到大量韧窝,且韧窝的数量、尺寸并没有太大区别,韧窝中均有第二相存在。结合表 2 数据可知,激光清洗会对材料力学性能造成一定损伤,并且随着功率和频率的增加,损伤增加。但是在试验条件下,激光清洗对力学性能的影响有限。

疲劳试验分别采用空白试样、带漆试样、激光清洗后的空白试样、激光清洗后的带漆试样,对 Al-4.35Cu-1.5Mg 合金进行同一应力水平下的疲劳试验,得到疲劳寿命均值,并计算 DFR,试验结果如表 3 所示。可以看出,与空白试样相比,带漆试样、激光清洗后的空白试样和激光清洗后的带漆试样的疲劳水平分别下降了 13.84%、9.34% 和 11.76%。空白对照组的疲劳寿命最高,其表面粗糙度仅为 0.2 μm。激光清洗后空白试

样的表面粗糙度达到 1.3 μm,激光能量造成表面出现部分烧蚀和孔洞,在一定程度上增大了试样表面的粗糙度,也形成了一些非常细小的微裂纹,试样局部应力集中,易成为裂纹源,从而降低了试样的疲劳寿命。带漆试样的疲劳性能最差,主要是因为试样经过阳极氧化处理后,形成了脆性多孔的氧化膜层,基体也会部分腐蚀溶解,所以整体疲劳性能的下降最严重,漆层与基体的结合对疲劳性能的影响较小;而用激光清洗将漆层和阳极氧化层去除后,激光清洗不会进一步降低疲劳,这是因为漆层和氧化膜吸收了大部分激光能量,仅有极少激光能量作用于基体,所以基体的烧损较少,并且去除脆性多孔的氧化膜层后,试样的疲劳性能得到恢复。

表 3 不同工艺条件下的疲劳试验结果

Table 3 Fatigue test results under different process conditions

Sample	Maximum stress /kN	Fatigue life /cycle	DFR /MPa
Blank sample	280	$2.93 \times 10^5$	289
Coating sample	280	$1.09 \times 10^5$	249
Blank sample after laser cleaning	280	$1.52 \times 10^5$	262
Coating sample after laser cleaning	280	$1.18 \times 10^5$	255

图 13 为空白试样、激光清洗后的空白试样和激光清洗后的带漆试样的疲劳断口的 SEM 观测结果,可以看出,三种试样的疲劳断口形貌差别不大,均存在明显的裂纹萌生区(A 区)、裂纹扩展区(B 区)和瞬断区。由于激光清洗仅改变材料的表面形貌,并不会产生明

显的热影响,故裂纹扩展区和瞬断区的形貌几乎一致,裂纹扩展区均存在疲劳辉纹,其方向与裂纹扩展方向垂直,而瞬断区则是明显的韧性断裂形貌,存在大量较深的韧窝,在韧窝中也可以观察到第二相。疲劳性能的差异仅存在于疲劳萌生的区域,由于激光清洗对表

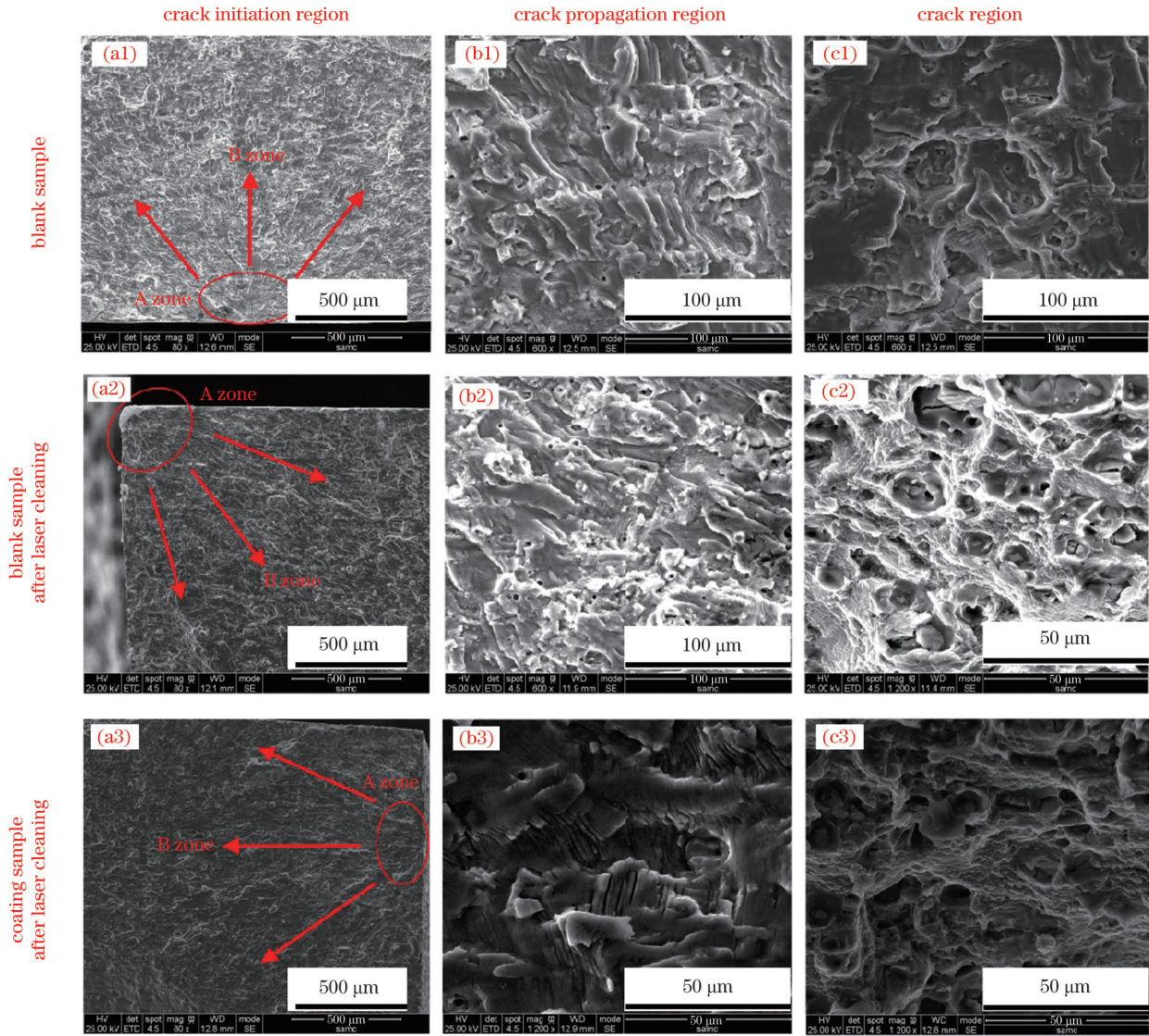


图 13 空白试样、经激光清洗的带漆试样和带漆试样疲劳断口形貌

Fig. 13 Fatigue fracture morphologies of blank sample, blank sample after laser cleaning, and coating sample after laser cleaning

面的影响,表面出现更多的缺陷,疲劳裂纹更易萌生。因此,空白试样的疲劳裂纹萌生点在试样的正中心位置,说明试样的均匀性较好。而激光清洗后的空白试样和激光清洗后的带漆试样的萌生点则在试样靠近边缘的位置,说明激光清洗确实导致试样表面出现更多缺陷,从而出现更多裂纹萌生源,进而疲劳裂纹更早萌生。

#### 4 结 论

研究了不同激光清洗工艺对铝合金表面漆层清洗效果和基材性能的影响,对激光清洗后试样的外观、微观组织、粗糙度、原位温度、力学性能和疲劳性能进行了分析,结论如下:

1) 当激光功率和脉冲频率分别为 80 W 和 100 kHz 时,试样表面仍有漆层残余。当激光功率和脉冲频率分别达到 500 W 和 500 kHz 时,基材表面可能发生氧化。激光清洗会导致表面粗糙度增加,激光清洗后的

基材表面在 10 μm 深度范围内出现部分烧蚀和熔化现象。

2) 激光清洗过程中表面温度随功率和脉冲频率的增加而升高,当功率和脉冲频率分别为 500 W 和 500 kHz 时,表面温度最高不超过 115 °C。激光清洗后,材料的硬度增加,并且随着激光功率、频率、能量密度的增加,硬度的增幅逐渐减小。

3) 激光清洗后试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率与空白试样相比均略微下降。与空白试样相比,激光清洗会导致疲劳水平下降 9.34%,经阳极氧化和喷漆处理后试样疲劳水平下降 13.84%,喷漆后再激光清洗,疲劳水平下降 11.76%,激光清洗不会进一步增加阳极氧化造成的疲劳损伤。

#### 参 考 文 献

- [1] 王在俊. 民用飞机蒙皮腐蚀研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(1): 31-34.  
Wang Z J. Study on the corrosion of civil aviation aircraft skin[J].



- Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2011, 22(1): 31-34.
- [2] 李江江, 宋震, 丁立群, 等. 民用飞机蒙皮涂层在不同表面处理状态下的性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(5): 8-9, 43.
- Li J J, Song Z, Ding L Q, et al. Study on the performance of civil aircraft skin coating under different surface treatment conditions[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(5): 8-9, 43.
- [3] 李超. 飞机蒙皮表面防护技术的研究进展[J]. 现代制造技术与装备, 2017, 242(1): 57-58.
- Li C. Research progress on surface protection technology of aircraft skin[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017, 242(1): 57-58.
- [4] 陆文明, 季建霞, 赵宝华, 等. 飞机蒙皮表面的预处理及涂装[J]. 上海涂料, 2016, 54(4): 13-18.
- Lu W M, Ji J X, Zhao B H, et al. The pretreatment and coating of aircraft skin surface[J]. Shanghai Coatings, 2016, 54(4): 13-18.
- [5] 李焱. 防腐涂层失效分析[J]. 上海涂料, 2008, 46(9): 36-39, 55.
- Li Y. Failure analysis of anti-corrosive coats[J]. Shanghai Coatings, 2008, 46(9): 36-39, 55.
- [6] 靳森, 王静轩, 袁晓东, 等. 飞机金属蒙皮以及复合材料表面激光除漆技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(17): 63-70.
- Jin S, Wang J X, Yuan X D, et al. Laser paint removal technology for aircraft metal skin and composite materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(17): 63-70.
- [7] Moskal D, Martan J, Kučera M, et al. Picosecond laser surface cleaning of AM1 superalloy[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 249-257.
- [8] 王普强, 吴梦杰, 王豫跃, 等. 不同热处理工艺下激光增材制造 TC4 钛合金组织与性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(10): 56-65.
- Wang P Q, Wu M J, Wang Y Y, et al. Research development on microstructure and properties of LAM TC4 titanium alloy with different heat treatment processes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10): 56-65.
- [9] 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗工艺的发展现状与展望[J]. 激光技术, 2000, 24(2): 68-73.
- Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 68-73.
- [10] 张光星, 华学明, 李芳, 等. 激光除锈、除漆的研究与应用现状[J]. 热加工工艺, 2019, 48(18): 1-4, 8.
- Zhang G X, Hua X M, Li F, et al. Research and application status of laser de-rusting and de-painting[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(18): 1-4, 8.
- [11] Tang Q H, Zhou D, Wang Y L, et al. Laser cleaning of sulfide scale on compressor impeller blade[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 334-340.
- [12] Guan Y C, Ng G K L, Zheng H Y, et al. Laser surface cleaning of carbonaceous deposits on diesel engine piston[J]. Applied Surface Science, 2013, 270: 526-530.
- [13] 邓德伟, 范清华, 赵祥路, 等. 激光清洗 FV520B 钢表面氧化色工艺参数对表面粗糙度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114005.
- Deng D W, Fan Q H, Zhao X L, et al. Influence of processing parameters on surface roughness for laser cleaning of FV520B steel oxide layer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114005.
- [14] 胡久, 马路, 王文全, 等. 激光除漆与溶剂除漆对飞机蒙皮零件的性能影响[J]. 金属世界, 2017(6): 6-9.
- Hu J, Ma L, Wang W Q, et al. Influence of laser paint removal and solvent paint removal on the performance of aircraft skin parts[J]. Metal World, 2017(6): 6-9.
- [15] Li X K, Zhang Q H, Zhou X Z, et al. The influence of nanosecond laser pulse energy density for paint removal[J]. Optik, 2018, 156: 841-846.
- [16] Kumar A, Bhatt R B, Behere P G, et al. Laser-assisted surface cleaning of metallic components[J]. Pramana, 2014, 82(2): 237-242.
- [17] Steen W M, Mazumder J, Watkins K G. Laser material processing [M]. 9th ed. London: Springer, 2003: 327-350.
- [18] 胡太友, 乔红超, 陆莹, 等. 激光除漆对 Ti17 合金表面组织性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 7-12.
- Hu T Y, Qiao H C, Lu Y, et al. Effects of laser de-painting on microstructure and properties of Ti17 alloy[J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 7-12.
- [19] 刘伟军, 张铭祺, 李强, 等. 激光清洗工艺参数对 TC4 钛合金表面除漆的影响[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 0402010.
- Liu W J, Zhang M Q, Li Q, et al. Effect of laser cleaning process parameters on surface paint removal of TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 0402010.
- [20] 江国业, 雷璞, 刘宇平, 等. 油气管道激光除漆对基材组织和硬度的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302009.
- Jiang G Y, Lei P, Liu Y P, et al. Laser removal of coating on oil and gas pipelines: effects on microstructure and hardness of substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302009.
- [21] Wei P Y, Chen Z H, Wang D, et al. Effect of laser cleaning on mechanical properties of laser lap welded joint of SUS310S stainless steel and 6061 aluminum alloy[J]. Materials Letters, 2021, 291: 129549.
- [22] Wang W, Li X J, Liu W J, et al. Experimental study on hydrophobic properties and corrosivity of laser cleaned 7075 aluminum alloy anodized film surface[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 166: 109615.
- [23] Sun Q, Zhou J Z, Meng X K, et al. Mechanical properties and microstructure characteristics of 2024-T351 aluminum alloy specimen subjected to paint removal by laser cleaning[J]. Vacuum, 2023, 211: 111927.
- [24] 陈先民, 廖江海, 董登科. 含多相似疲劳细节结构的细节疲劳额定值的估算模型[J]. 机械设计, 2014, 31(12): 16-20, 40.
- Chen X M, Liao J H, Dong D K. Estimation model of detail fatigue rating for multiple similar fatigue structures[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(12): 16-20, 40.
- [25] 李戈岚, 薛俊川. DFR 法在军机结构寿命分析中的重要作用[J]. 飞机设计, 2008, 28(6): 35-37, 65.
- Li G L, Xue J C. The important effect of the method of DFR in the life analysis for military aircraft structure[J]. Aircraft Design, 2008, 28(6): 35-37, 65.
- [26] 郑晓玲, 李令芳. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册-上册-疲劳设计与分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 335.
- Zheng X L, Li L F. Handbook of civil aircraft structures durability and damage tolerance design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003: 335.

# Effect of Laser Cleaning Process on Microstructure and Fatigue Properties of Aviation Aluminum Alloy

Cheng Cheng<sup>1</sup>, Yu Weichen<sup>1\*</sup>, Ding Yao<sup>1</sup>, Qiu Taiwen<sup>1</sup>, Fu Shuangchao<sup>1</sup>, Tang Yunyang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Aeronautical Manufacturing Technology Institute, Comac Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;*

<sup>2</sup>*Metrology & Test Center, Comac Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China*

## Abstract

**Objective** After an aircraft is in service for a certain period, various factors, such as external forces, light, and humidity, affect the paint layer on its skin surface. This leads to aging, cracking, peeling, and other phenomena. Hence, removing the original coating on the metal material surface becomes a necessary step before repainting it. Laser cleaning offers advantages, including non-contact, environmental friendliness, precision, and no secondary pollution. It can replace traditional mechanical polishing and chemical paint removal methods, enhancing the cleanliness of aircraft surface paint layers. Due to the strict safety requirements of aircraft, it is crucial to understand whether the use of lasers for removing surface paint layers impacts the fatigue properties of the aircraft. In this study, a nanosecond pulse laser is used to clean aviation aluminum alloys coated with a fluid-resistant epoxy primer coating. Subsequently, the effects of the laser cleaning process on the microstructure and fatigue properties of the aluminum alloys are examined.

**Methods** A pulsed laser was used to remove the surface coating of the aviation aluminum alloys. The effects of the laser cleaning process on the microstructure, mechanical properties, and fatigue properties of the aviation aluminum alloys were examined via appearance inspection, optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), *in situ* temperature detection, mechanical property detection, and high cycle fatigue test.

**Results and Discussions** The results show that when the laser power and pulse frequency are 80 W and 100 kHz, the epoxy primer coating on the surface of the aluminum alloy can be removed. However, some residual paint layer remains on the surface of the sample. When the laser power and pulse frequency are 500 W and 500 kHz, the maximum surface temperature does not exceed 115 °C, and no obvious heat affected zone is observed. Laser cleaning increases the surface roughness, with partial ablation and melting occurring within the depth range of 10 μm. After laser cleaning, the hardness of the material increases. As the laser power, frequency, and energy density increase, the rate of hardness increase decelerates. The tensile property results indicate that the tensile strength, yield strength, and elongation of the sample after laser cleaning are slightly lower than those of the blank sample. Through high-cycle fatigue testing, when compared to those of the blank sample, the fatigue properties of the painted sample after laser cleaning decrease by 11.76%. This mainly stems from the increased surface roughness caused by laser cleaning. However, after anodizing and painting treatments, laser cleaning does not further exacerbate the fatigue damage caused by anodizing.

**Conclusions** Analyses are conducted on the appearance, microstructure, roughness, *in-situ* temperature, mechanical properties, and fatigue performance of the samples after laser cleaning. With a laser power and pulse frequency of 80 W and 100 kHz, a residual paint layer remains on the sample surface. However, at elevated levels of 500 W and 500 kHz, oxidation might appear on the substrate surface. The process of laser cleaning tends to increase surface roughness, causing partial ablation and melting within the depth range of 10 μm. The surface temperature during this procedure increases in tandem with the increase in laser power and pulse frequency. But even at peaks of 500 W and 500 kHz, the maximum surface temperature stays below 115 °C. After cleaning, the material hardness increases. However, as the laser power, frequency, and energy density increase, the increase in hardness decelerates. There is a minor reduction in the sample tensile strength, yield strength, and elongation. When compared to the untreated samples, those cleaned by laser but not anodized or painted show a reduction in fatigue properties by 9.34%. In comparison, samples that undergo anodizing and painting processes after cleaning experience a reduction in fatigue properties by 13.84%. Specifically, after painting, laser cleaning results in a decrease in fatigue properties by 11.76%. Notably, laser cleaning does not further increase the fatigue damage due to anodizing.

**Key words** laser technique; laser cleaning; aviation aluminum alloy; heat affected zone; mechanical property; fatigue property