

# 离焦量对铝合金表面激光除漆损伤特性的影响

杨文锋<sup>1</sup>, 付婵媛<sup>1</sup>, 钱自然<sup>1</sup>, 曹宇<sup>2</sup>, 张华忠<sup>1</sup>, 李天权<sup>1</sup>, 朱德华<sup>2</sup>, 李绍龙<sup>1</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院航空工程学院, 四川 广汉 618307; 2. 温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:**飞机激光除漆时铝合金基体保护及除漆效率与材料损伤阈值密切相关, 而激光离焦量的变化将直接改变材料的损伤阈值, 以及除漆效率。采用 ISO 11254 1-on-1 激光损伤阈值测试方法研究不同离焦量时的铝合金和漆层的损伤阈值, 对激光单脉冲光斑的二维、三维形貌进行分析, 将理论值与实测值得到的不同离焦量时的损伤凹坑直径及深度进行验证。结果表明: 随激光离焦量增加, 光斑面积增大的同时材料损伤阈值下降, 可有效提升能量利用率及除漆效率; 实际单脉冲作用的材料凹坑深度随离焦量的增大而减小, 且面积增大; 凹坑深度、凹坑直径的理论值、实测值具有较好的相关性, 并从激光材料作用机理角度对其误差进行了解释说明。

**关键词:**激光除漆; 离焦量; 损伤阈值; 损伤凹坑形貌

**中图分类号:** TN249      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.009

## Effect of defocus on damage characteristics of laser paint removal on aluminum alloy surface

YANG Wen-feng<sup>1</sup>, FU Chan-yuan<sup>1</sup>, QIAN Zi-ran<sup>1</sup>, CAO Yu<sup>2</sup>,  
ZHANG Hua-zhong<sup>1</sup>, LI Tian-quan<sup>1</sup>, ZHU De-hua<sup>2</sup>, LI Shao-long<sup>1</sup>

(1. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** When aircraft laser paint is removed, the aluminum alloy substrate protection and paint removal efficiency are closely related to the material damage threshold, and the change of the laser defocus will directly change the material damage threshold and the paint removal efficiency. The ISO 11254 1-on-1 laser damage threshold test method is adopted to study the damage threshold of aluminum alloy and paint at different defocusing amounts. The two-dimensional and three-dimensional morphologies of the laser single pulse spot are analyzed, and the theoretical value and the actual value are compared. The diameter and depth of the damage craters at different defocusing amounts were verified. The results show that with the increase of the laser defocus, the spot area increases while the material damage threshold decreases, which can effectively improve the energy utilization and paint removal efficiency. The actual single pulse action of the material crater depth decreases with the increase of the defocus, and the area increases. The theoretical and measured values of crater depth, crater diameter show a good correlation, and the errors are explained from the perspective of the action mechanism of laser materials.

**Keywords:** laser paint removal; defocus; damage threshold; damage crater morphology

**基金项目:**四川省科技计划项目(No. 2021YFSY0025, 2019YFG0311); 中国民用航空飞行学院科研基金(No. J2019-078, BJ2016-02); 中国民用航空飞行学院成果转化与创新基金项目(No. CJ2019-03); 中国民用航空飞行学院重点项目(No. ZJ2021-04); 研究生科研创新基金项目(No. X2021-6); 大学生创新创业训练计划项目(No. S202010624080)资助。

**作者简介:**杨文锋(1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光智能维修研究。E-mail: ywfcyy@163.com

**通讯作者:**李绍龙(1988-), 男, 副教授, 博士, 主要从事航空复合材料性能与应用研究。E-mail: zlishaolong@163.com

**收稿日期:**2021-06-13

## 1 引言

激光清洗技术是近 10 年来飞速发展的一种新型清洗技术,其原理在于高能量密度、短脉冲激光照射下,使工件表面的污染物瞬间气化、蒸发、振动剥落,广泛应用于现代高端行业设备清洁领域,包括航天航空、轨道交通、汽车制造等<sup>[1-4]</sup>。飞机表面整体除漆是飞机大修的重要环节,且在飞机除漆过程中必须在保证不损伤铝合金基体的前提下,将除漆效率提升到行业可接受的程度。随着激光除漆可行性和有效性得到广泛认可,其应用部位逐渐扩展到飞机结构及部件。飞机进行除漆工作时会涉及复杂表面形状或异形结构,当激光束作用在大曲率半径表面或不规则几何突变区域时,可能会导致离焦效果及激光光斑形貌、能量密度等重要参数的变化,激光除漆的损伤阈值及作用机理也相应改变,影响激光除漆质量<sup>[5-9]</sup>。激光除漆时铝合金基体、漆层损伤阈值的确定显得尤为重要,而损伤阈值决定于激光主要工艺参数及其与材料作用的机理。对于确定的激光器类型与材料体系,在不同离焦量进行激光除漆时,在保证基体不损伤的情况下,如何充分利用激光输出能量,并有效提升激光除漆效率,是飞机蒙皮激光除漆的重要应用需求及待解决的关键问题之一。

在激光作用效果及精度方面,倪加明等<sup>[10]</sup>开展了激光束以不同离焦量(-6 ~ +8 mm)入射到铝合金表面氧化膜的理论和实验探索,表明激光离焦量会显著的影响清洗质量,离焦量为 0 mm 氧化膜彻底清洗干净;离焦量为 -2 ~ +2 mm 时,表面显露铝合金本色,没有氧化物残留,激光清洗工艺对平面度有一定适应性。元泉等人<sup>[11]</sup>开展了铝合金表面氧化层及底漆的激光清洗实验,研究表明,适当的离焦量有助于非均匀漆层的清洗,且焦点附近的激光更适用于铝合金表面漆层和氧化层的清洗去除。Mali Zhao 等<sup>[12]</sup>采用三维(3-D)动态聚焦激光振镜对黄铜表面氧化层进行清洗,分析了氧化层的去除效率与离焦量的关系,得出结论,当离焦量为 +0.5 mm 时,Cu/O 与 Zn/O 分别达到最大 53.20 和 27.78,意味着清洗效果最好,且当激光离焦量大于 72 mm 时失去清洗能力。在激光束作用机理方面,朱映瑞等<sup>[13]</sup>针对激光除漆过程中离焦量的变化会对漆层去除机理产生影响的问题,通过高速摄像动态过程和扫描电子显微镜微观形貌分析相结合的方法研究了不同离焦量条件下漆层去除机理的差异,

表明离焦量为 0 mm 时,漆层主要通过热应力、熔化、气体冲击三种方式去除;离焦量为  $\pm 4$  mm 时,漆层主要通过热应力和熔化蒸发去除。在表面形貌与损伤阈值方面,林嘉剑等<sup>[14]</sup>研究了变离焦量效应和能量累积效应,探索飞秒激光烧蚀过程中的能量吸收规律,研究激光功率和脉冲次数对面齿轮材料 18Cr2Ni4WA 的烧蚀凹坑深度和直径的影响,研究表明正负离焦的存在都会造成烧蚀凹坑直径增大和深度减小的现象,功率  $P = 1$  W 时激光加工质量较好,脉冲数大于 20 时,加工质量受脉冲数影响较小。

本文针对飞机蒙皮激光除漆过程中,不同离焦量对激光作用于材料表面的光斑形貌及机理进行分析,并借鉴 ISO 11254 - 1:2000(E) 1-on-1 激光损伤阈值测试方法(以下简称 ISO 11254),对激光不同离焦量下的铝合金、漆层的激光损伤阈值进行了测试与分析,基于激光单脉冲时材料表面单光斑的实际形貌进行二维、三维分析,并与理论结果进行了对比验证。

## 2 材料与方法

铝合金基体为飞机蒙皮常用的 2024-T3 铝合金,切割为 15 mm × 15 mm × 1 mm 的试样块;铝合金表面进行除油、清洗等预处理后,均匀涂覆 40  $\mu\text{m}$  厚的黄色环氧涂料。

激光除漆设备由光纤脉冲激光器、扫描振镜、激光加工头等组成,如图 1 所示。光纤脉冲激光器主要参数见表 1。激光器发出的激光光斑是按给定频率分布的一系列不连续圆形光斑,在圆形光斑区域内激光能量服从高斯分布,本实验中场镜焦距为 19.7 cm,光斑聚焦直径为 50  $\mu\text{m}$ 。

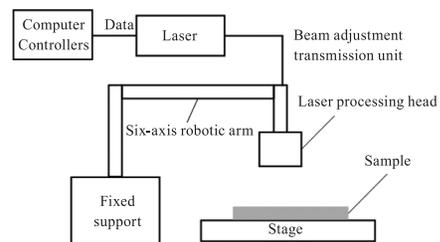


图 1 激光除漆设备示意图

Fig. 1 Diagram of the laser paint stripping machine

表 1 激光器主要参数

Tab. 1 Parameters of the fiber laser

波长/nm	平均功率/W	脉冲宽度/ns	频率/kHz
1064	120	60 ~ 350	1 ~ 1000

借鉴 ISO 11254 损伤阈值测试方法<sup>[15-16]</sup>,对铝合金及漆层表面进行设定某一功率及离焦量下的

10次单脉冲辐照,每一辐照点光斑外圆间隔为40 μm。根据ISO 11254损伤阈值判定方法,若10个辐照点中有1个点出现了较为明显的损伤,则对应的损伤机率为10%,以此类推。固定频率60 kHz,调整激光功率从12 W开始,以0.12 W连续递增,至损伤机率为100%为止。

铝合金基体及表面漆层损伤单脉冲辐照损伤凹坑的测试,采用S neox 090 3D光学表面轮廓仪观察激光辐照后的凹坑形貌,测量凹坑直径及深度。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 损伤阈值分析

损伤阈值是表征被激光辐照的介质抗激光损伤能力的重要参量,取决于激光参数及材料性能。在激光除漆过程中,若将能量密度控制在漆层100%损伤与铝合金0%损伤之间即可达到高效去除漆层且不损伤铝合金基体的效果。

以损伤机率为X轴,能量密度为Y轴建立X-Y坐标系,将试验数据引入坐标系中进行线性拟合。

离焦有两种形式:焦点处于被处理材料表面以上被称之为正离焦,反之则被称为负离焦。正负离焦情况下虽然最大能量密度移动方向不同,但在激光除漆领域,除漆效果呈对称分布<sup>[10]</sup>,因此本文离焦方式均采用正离焦。当激光分别以离焦量0 mm,+2 mm,+4 mm辐照在铝合金基体及表面漆层上,能量密度与损伤机率的关系拟合曲线如图2所示。

铝合金基体在离焦量为0 mm,+2 mm,+4 mm情况下的能量密度与损伤机率拟合关系式如下:

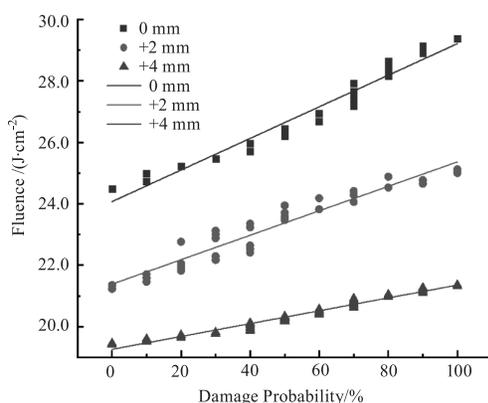
$$\begin{cases} Y_{D0} = 0.051x_{D0} + 24.071 \\ Y_{D2} = 0.040x_{D2} + 21.382 \\ Y_{D4} = 0.021x_{D4} + 19.259 \end{cases} \quad (1)$$

计算得到离焦量为0 mm,+2 mm,+4 mm时铝合金基体的损伤阈值DT<sub>Al-D0</sub>、DT<sub>Al-D2</sub>、DT<sub>Al-D4</sub>分别为24.07 J/cm<sup>2</sup>、21.38 J/cm<sup>2</sup>、19.26 J/cm<sup>2</sup>。

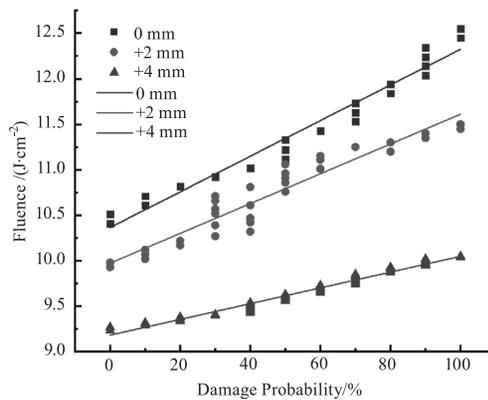
漆层在离焦量为0 mm,+2 mm,+4 mm情况下的能量密度与损伤机率拟合关系式如下:

$$\begin{cases} Y_{D0} = 0.020x_{D0} + 10.366 \\ Y_{D2} = 0.016x_{D2} + 9.974 \\ Y_{D4} = 0.009x_{D4} + 9.182 \end{cases} \quad (2)$$

计算得到离焦量为0 mm,+2 mm,+4 mm时漆层的损伤阈值DT<sub>sp-D0</sub>、DT<sub>sp-D2</sub>、DT<sub>sp-D4</sub>分别为10.37 J/cm<sup>2</sup>、9.97 J/cm<sup>2</sup>、9.18 J/cm<sup>2</sup>。



(a) 铝合金



(b) 漆层

图2 不同离焦量时铝合金基体与漆层能量密度与损伤机率的关系

Fig. 2 Relationship between energy density and damage probability with different defocusing distance

铝合金基体及漆层的损伤阈值范围可以采用图3清晰的表现。不同离焦量下,当能量密度介于漆层损伤阈值与铝合金基体损伤阈值之间时(图中线段所示区域),可以高效去除漆层且不损伤铝合金基体。以激光束聚焦入射为例,除漆时将能量密度控制在12.37~24.07 J/cm<sup>2</sup>之间可满足除漆要求。随离焦量增加,铝合金基体及漆层的损伤阈值也相应降低。相对于聚焦入射,当离焦量为+4 mm时,铝合金基体及漆层的损伤阈值分别降低19.98%(4.81 J/cm<sup>2</sup>),11.48%(1.19 J/cm<sup>2</sup>)。意味着仅需较小的激光能量即可达到清洗的目的,从而提升了激光除漆的能量利用率及除漆效率。不同离焦量下,去除漆层且不损伤铝合金基体的能量密度范围(漆层损伤机率100%至铝合金损伤机率0%的范围)均为9~11 J/cm<sup>2</sup>。较大的能量密度范围为激光除漆且不损伤基体提供了可靠的安全余度。另外,铝合金基体及漆层的损伤机率从0增加到100%时,所对应的能量密度区间范围相对较窄。以漆层为例,其损伤机率从0增加到100%时,其对应离焦量为0 mm,+2 mm,+4 mm的能量密度范围分别

为  $2.00 \text{ J/cm}^2$ ,  $1.60 \text{ J/cm}^2$ ,  $0.90 \text{ J/cm}^2$ 。说明对于特定的激光设备及材料,满足漆层清除且不损伤铝合金基体的激光除漆工艺参数规律明显且可控性好。

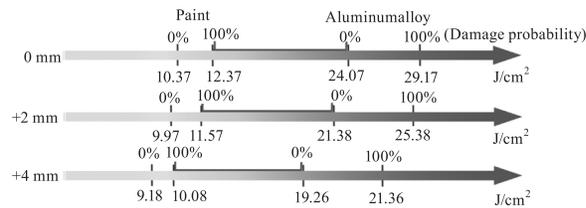


图 3 铝合金基体及漆层损伤阈值范围

Fig. 3 Damage threshold range of aluminum alloy and paint

### 3.2 表面形貌及机理分析

根据 ISO 11254 激光损伤阈值测试方法,激光以不同能量密度和离焦量在铝合金及漆层上,材料表面损伤凹坑形貌存在差异。图 4 为三种离焦量时铝合金损伤机率分别为 10%、50%、100% 所对应的能量密度作用下形成的损伤凹坑。

由图 4,当激光离焦量为 0 mm,激光能量密度为  $24.73 \text{ J/cm}^2$ ,损伤机率为 10%。仅高斯光斑能量中心处对铝合金基体造成损伤,呈不规则孔状;激光能量密度为  $26.45 \text{ J/cm}^2$  时(对应损伤机率为 50%),损伤处呈圆形,且高斯光斑能量最高处对铝合金基体造成冲击挤压,形成冲击凹坑;激光能量密度增加至  $29.17 \text{ J/cm}^2$  时(对应损伤机率为 100%),冲击挤压区(即环形内圆)的直径增大,形成明显的环形结构,并出现熔化态铝合金向外扩展或内流的趋势。同理,当离焦量为 +2 mm、+4 mm 时,随着能量密度增加,激光作用在铝合金基体表面造成损伤形貌符合以上变化规律。激光照射在铝合金基体上时,随着离焦量由 0 mm 增加到 +4 mm,损伤机率为 100% 时凹坑直径由  $26.22 \mu\text{m}$  增加到  $65.55 \mu\text{m}$ 。激光光斑聚焦直径为  $50 \mu\text{m}$ ,说明高斯光束能量在距离光轴一定距离后,其能量密度的下降已不能实现对材料表面的实际损伤,也说明随离焦量增加,在功率及光斑大小保持不变时,材料表面实际作用面积相应增加,提高了能量利用及表面处理效率。

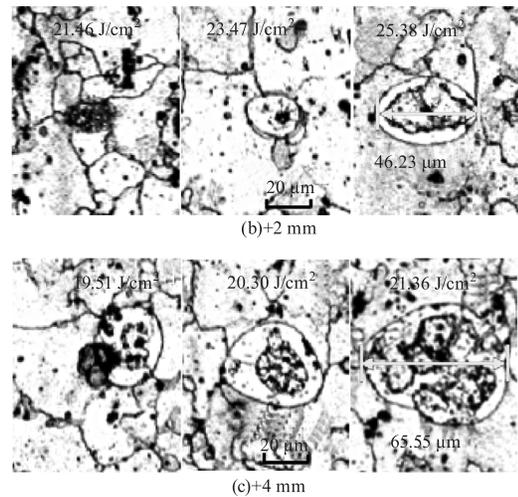
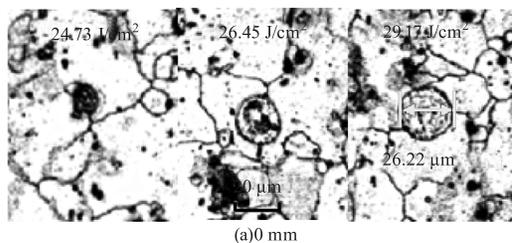


图 4 不同激光离焦量、能量密度

作用下铝合金基体损伤形貌

Fig. 4 Damage morphology of aluminum alloy under different laser defocusing distance and energy density

图 5 为不同离焦量时漆层表面单脉冲激光损伤形貌。相对于铝合金,漆层损伤机率及单脉冲作用效果随激光能量密度地增加而产生更为明显的变化。当激光离焦量为 0 mm,激光能量密度为  $10.61 \text{ J/cm}^2$  时(对应损伤机率为 10%),光束对漆层表面产生烧蚀作用,使漆层表面出现明显小于激光光斑 ( $50 \mu\text{m}$ ) 的损伤。激光作用于漆层首先出现光热转换,光热转换后温度升高,温度向周围扩散,在漆层表面厚度及水平方向产生温度梯度,温度高于漆层热分解温度时漆层出现热氧化降解现象。损伤位置位于高斯光斑的中心区域,而远离光轴的光斑截面区域无明显的漆层烧蚀或脱落。随着激光能量密度增加至  $11.43 \text{ J/cm}^2$  时(对应损伤机率为 50%),漆层表面厚度方向及水平方向产生温度梯度使漆层中存在热应力,当热应力大于漆层撕裂强度后,漆层出现热应力去除现象。在激光除漆烧蚀效应与热应力效应作用下<sup>[17]</sup>,部分漆层剥离形成损伤凹坑及裂纹。激光能量密度进一步增加至  $12.37 \text{ J/cm}^2$  时(对应损伤机率为 100%),烧蚀效应起主导作用,除此之外还存在冲击作用。激光作用于漆层后漆层温度急剧升高,漆层出现剧烈燃烧、气化现象,在极短时间(约 0.02 s)<sup>[18]</sup> 和很小体积内燃烧、气化现象导致漆层出现冲击去除现象。因此表面无明显裂纹,形成较大面积的整体烧蚀及剥离。激光照射在漆层上时,随着离焦量由 0 mm 增加到 +4 mm,损伤机率为 100% 时凹坑直径增加,由  $47.61 \mu\text{m}$  增加到  $69.69 \mu\text{m}$ ,这是由于离焦量 0 mm 漆层去除方式主要有热应力去除、热降解去除、气体冲击去除,而离

焦量 +4 mm 时漆层去除方式主要为热应力去除和热降解蒸发去除,无气体冲击过程。由于光斑面积增加,能量密度小于离焦量为 0 mm 的光斑能量密度,光热转换后的温度要低于离焦量为 0 mm 时温度,导致漆层的热降解蒸发现象较为缓慢(约 0.5 s)<sup>[18]</sup>。当去除过程进行到漆层与基体界面附近时温度变化不明显,烧蚀凹坑尺寸远大于离焦量为 0 mm 时的尺寸,因此蒸发的涂层蒸汽不会出现被压缩的过程,无气体冲击过程。

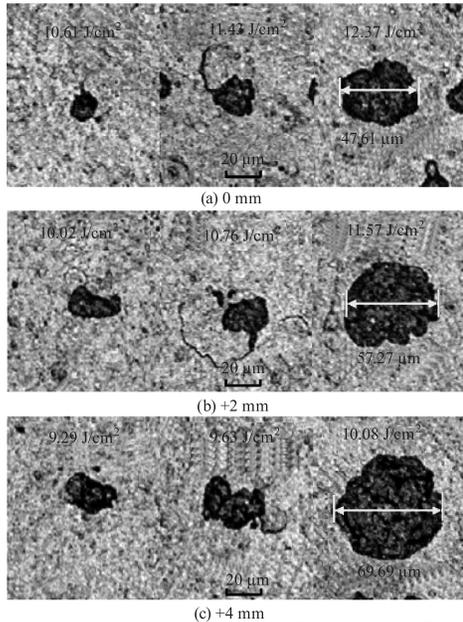


图5 不同激光离焦量、能量密度作用下漆层损伤形貌  
Fig. 5 Damage morphology of paint under different laser defocusing distance and energy density

### 3.3 凹坑直径及深度分析

当激光束以离焦状态辐照在样品表面,其光斑直径采用式(3)计算<sup>[12]</sup>:

$$D_b(h) = D_f \left[ 1 + \frac{4\lambda h}{\pi D_f^2} \right] \quad (3)$$

式中, $D_f$ 代表光斑直径(50 μm); $h$ 代表离焦量(mm); $\lambda$ 代表波长(1064 nm)。损伤机率 100% 时,不同离焦量下的理论值、实测值比较见图 6。

图 6 表明,对应 100% 损伤机率的最低能量密度下,铝合金基体与漆层在不同离焦量下的凹坑直径理论值均小于损伤凹坑直径的实测值。其原因在于,激光单脉冲作用于材料表面时,超过最低能量密度值,铝合金与漆层均以烧蚀作用为主。由于铝合金对红外光纤激光的强吸收,在理论轮廓直径外的小区域范围内,其热积累依然会导致铝合金材料的烧蚀,且烧蚀边界较为平齐。这一小区域范围即为实际凹坑直径与理论轮廓直径的差异,其差异约 23.8 ~ 29.0 μm。漆层材料在激光单脉冲作用下,

在理论轮廓直径内,主要以烧蚀与冲击剥离为主。但在理论轮廓直径外的小区域范围内,主要在热应力、蒸汽压力及冲击力作用下呈小面积整体剥离,凹坑边界不规则,且边缘由于应力作用导致裂纹产生。漆层实际凹坑直径与理论轮廓直径的差异约 2.4 ~ 19.3 μm。

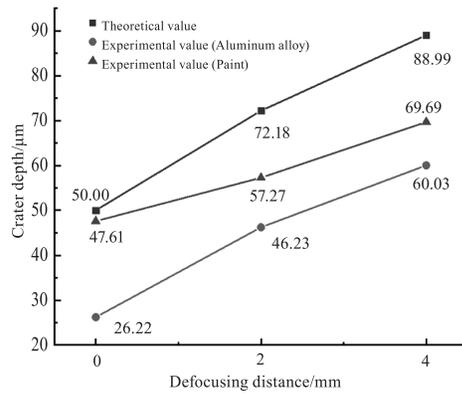


图6 铝合金及漆层凹坑直径(理论值、实测值)随激光离焦量变化关系曲线

Fig. 6 Aluminum and paint crater diameter (theoretical and measured values) as a function of laser defocus

依据损伤凹坑的 3D 共聚焦线扫结果对铝合金基体及漆层在不同离焦量下的凹坑深度进行自动测量,以离焦量 0 mm 的铝合金 100% 损伤机率凹坑测量为例,凹坑剖面曲线如图 7,结果列于表 2。

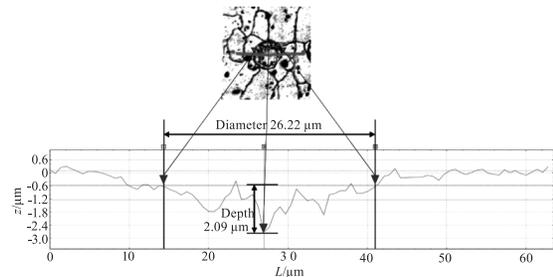


图7 离焦量 0 mm 的铝合金 100% 损伤机率凹坑剖面曲线图

Fig. 7 Craters of aluminum alloy with 100% probability of damage at 0mm out of focus

表 2 铝合金与漆层凹坑深度的测试结果  
Tab. 2 Test results of craters depth of aluminum alloy and paint

离焦量/mm	0	+2	+4
铝合金凹坑深度/μm	2.09	1.88	1.70
漆层凹坑深度/μm	15.95	15.40	14.75

由表 2,由于单个光斑区域的激光能量未发生变化,铝合金及漆层在不同离焦量时的凹坑深度未产生明显变化。但由于激光对铝合金及漆层材料作

用机制的差异,以及漆层损伤阈值较低,漆层表面的凹坑深度远大于铝合金,其差异约一个数量级。铝合金及漆层的凹坑深度均随着离焦量的增加而减小。这是由于能量随传播距离成指数规律衰减,导致激光作用材料表面的深度减小。距离材料表面  $H$  处的能量密度为<sup>[14]</sup>:

$$F(H, R) = \beta b F(R) \exp(-bH) \quad (4)$$

式中,  $R$  代表光斑半径;  $\beta$  为材料的吸收率;  $b$  为材料的吸收系数(铝合金约为  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ , 环氧底漆约为  $1.21 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$ )。对式(4)进行转化,令  $R = 0$ ,  $F(H, R) = \beta b F_{th}$ 。即光斑中心位置处的烧蚀凹坑深度  $h_{\max}$  为<sup>[14]</sup>:

$$h_{\max} = b^{-1} \ln P + b^{-1} \ln \left( \frac{2}{\pi \omega_0^2 f_n F_{th}} \right) \quad (5)$$

式中,  $P$  代表损伤机率为 100 % 时所对应的功率;  $\omega_0$  代表损伤机率为 100 % 时所对应的实际凹坑直径;  $f_n$  代表频率;  $F_{th}$  代表损伤阈值。由式(5)可知,烧蚀凹坑深度  $h_{\max}$  和功率的对数值  $\ln P$  满足线性关系,斜率  $k = b^{-1}$ 。因此凹坑深度主要取决于材料对激光的吸收系数、不同离焦量下的凹坑直径、损伤阈值。根据式(5)计算损伤机率 100 % 时的铝合金凹坑深度分别为 1.24  $\mu\text{m}$ 、1.20  $\mu\text{m}$ 、1.18  $\mu\text{m}$ , 漆层凹坑深度分别为 14.44  $\mu\text{m}$ 、14.03  $\mu\text{m}$ 、13.92  $\mu\text{m}$ 。不同离焦量下的计算值、实测值比较见图 8, 两种结果吻合度较高,可得到相互验证。

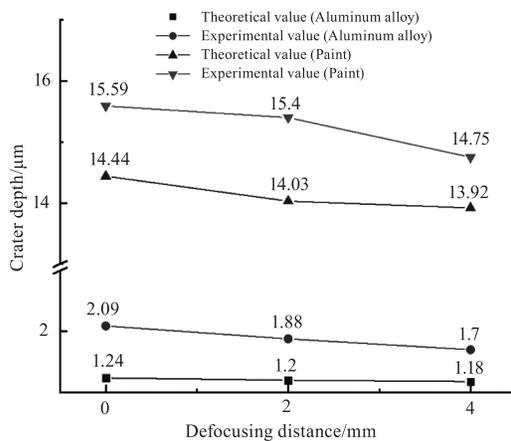


图 8 铝合金及漆层凹坑深度(理论值、实测值)随激光离焦量变化关系曲线

Fig. 8 Depth of aluminum and paint craters (theoretical and measured values) as a function of laser defocus

图 8 表明,对应 100 % 损伤机率的最低能量密度下,铝合金基体与漆层在不同离焦量下凹坑深度略小于实际损伤凹坑深度。其原因在于,在脉冲激光束作用下,铝合金表面迅速加热升温、熔化并发生剧烈的气化,在气化反冲力的作用下,铝合金表面向

下凹陷,形成凹坑。激光束在凹坑纵深方向深入铝合金内部,热量从凹坑向周围传递,产生新的蒸发,在蒸汽压力的作用下把邻近的熔化金属推向四周,从而进一步加深凹坑<sup>[18]</sup>,造成铝合金实际凹坑深度与理论凹坑深度的差异约 0.5 ~ 0.9  $\mu\text{m}$ 。脉冲激光束作用于漆层,漆层以烧蚀效应及冲击剥离效应为主,热应力效应为辅,漆层表面及厚度方向加热升温、热降解并气化,在理论凹坑外的小区域范围内,低于气化温度的涂层在气化反冲力的作用下,堆积在凹坑周围,导致实际凹坑深度与理论凹坑深度的差异约 0.9 ~ 1.2  $\mu\text{m}$ ,大于铝合金差异。

#### 4 结论

本文针对不同离焦量时激光单脉冲作用于铝合金及漆层材料的损伤阈值及损伤特性进行了实验与模拟研究,结论如下。

(1) 激光离焦量由 0 mm 增加为 +4 mm,光斑直径与面积增加,铝合金基体的损伤阈值由 24.07  $\text{J}/\text{cm}^2$  减小为 19.26  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,漆层的损伤阈值由 10.37  $\text{J}/\text{cm}^2$  减小为 9.18  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,可有效提升能量利用率及除漆效率;

(2) 铝合金及漆层表面凹坑深度随离焦量的增大而减小,且漆层深度比铝合金深度大一个数量级。离焦量增加,二种材料的表面凹坑直径及面积均增加,且漆层凹坑面积均大于铝合金。

(3) 铝合金表面凹坑主要以烧蚀作用为主,漆层表面凹坑主要以烧蚀、热应力、蒸汽压力及冲击力作用为主,导致漆层实际凹坑面积较大,且凹坑边缘在内应力作用下产生裂纹。

(4) 离焦量 0 mm 漆层去除方式主要有热应力去除、热降解去除、气体冲击去除,而离焦量 +4 mm 时漆层去除方式主要为热应力去除和热降解蒸发去除,未出现气体冲击过程。

#### 参考文献:

- [1] Zhou Jingyu, Xiao Liya. Application analysis of laser cleaning technology in rail transit equipment manufacturing and maintenance [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2021, 44(3): 72-74, 78. (in Chinese) 周婧好,肖黎亚. 激光清洗技术在轨道交通装备制造检修中的应用分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(3): 72-74, 78.
- [2] Li Chenyu, Qu Liang, Liu Xiaolong, et al. Application of laser cleaning technology on cultural relics [J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2021, (1): 52-60. (in Chinese)

- 李晨毓,曲亮,刘晓龙,等. 激光清洗技术在文物上的应用[J]. 中国文物科学研究,2021,(1):52-60.
- [3] Gu Bo. Current status and application development trend of laser processing technology and industry[J]. MW Metal Forming,2020,(10):37-42,47. (in Chinese)  
顾波. 激光加工技术及产业的现状与应用发展趋势[J]. 金属加工(热加工),2020,(10):37-42,47.
- [4] Cao Chengming, Wang Yawen, Chen Bo, et al. Development and application status of laser cleaning technology for equipment remanufacturing [J]. Cleaning World, 2020,36(9):119-120. (in Chinese)  
曹成铭,王亚文,陈波,等. 面向装备再制造的激光清洗技术发展及应用现状[J]. 清洗世界,2020,36(9):119-120.
- [5] Wan Zhuang, Yang Xuefeng, Xia Guofeng, et al. Effect of laser frequency on the mechanism and performance of laser dry cleaning[J]. Surface Technology, 2021, 50(5):70-77. (in Chinese)  
万壮,杨学锋,夏国峰,等. 激光频率对激光干式清洗机理及表面性能的影响[J]. 表面技术,2021,50(5):70-77.
- [6] Ye Shaowei. The mechanism and experimental research of pulse laser dry cleaning tire mold[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology,2020. (in Chinese)  
叶少伟. 脉冲激光干式清洗轮胎模具的机理与实验研究[D]. 厦门:厦门理工学院,2020.
- [7] Zhou X, Imasaki K, Furukawa H, et al. Experimental study on surface decontamination by laser ablation[J]. Journal of Laser Applications,2002,14(1):13-16.
- [8] Zheng Y W, Lu Y F, Song W D. Angular effect in laser removal of spherical silica particles from silicon wafers[J]. Journal of Applied Physics,2001,90(1):59-63.
- [9] Chen Shuixuan, Ye Shaowei, Hong Zhaobin, et al. Optimization of process parameters of laser cleaning metal coating based on orthogonal experiment[J]. Applied Laser, 2020,40(3):492-496. (in Chinese)  
陈水宣,叶少伟,洪昭斌,等. 不同工艺参数对激光清洗金属涂层影响研究[J]. 应用激光,2020,40(3):492-496.
- [10] Ni Jiaming, Zu Xunqiang, Xu Aijie, et al. Research on laser cleaning process for aluminum alloy anodic oxide film[J]. Hot Working Technology,2017,46(16):164-167. (in Chinese)  
倪加明,朱迅强,徐爱杰,杨学勤. 铝合金阳极氧化膜激光清洗工艺研究[J]. 热加工工艺,2017,46(16):164-167.
- [11] Yuan Quan, Qiu Yuan, Liu Yang, et al. Research on laser cleaning application for coating and oxide layer of aluminum alloy[J]. Plating and Finishing,2019,41(12):25-29. (in Chinese)  
元泉,邱媛,刘洋,等. 铝合金漆层与氧化层激光清洗应用研究[J]. 电镀与精饰,2019,41(12):25-29.
- [12] Zhao M L, Liu T G, Jiang J F, Wang M. Effect of defocusing distance on the contaminated surface of brass ring with nanosecond laser in a 3D laser scanning system[J]. Optics and Lasers in Engineering,2014,59(8):11-18.
- [13] Zhu Yingrui, Zhu Ming, Shi Yu, et al. The effect of laser defocusing amount on the removal mechanism of metallic paint[J]. Electric Welding Machine, 2020,50(1):29-33,124-125. (in Chinese)  
朱映瑞,朱明,石珩,等. 激光离焦量对金属漆去除机理的影响[J]. 电焊机,2020,50(1):29-33,124-125.
- [14] Lin Jiajian, Ming Rui, Li Xuekun, et al. Study on morphology characteristic of femtosecond laser ablated face gear materials[J]. Chinese Journal of Lasers;2021,48(14):1402203. (in Chinese)  
林嘉剑,明瑞,李学坤,等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的形貌特征研究[J]. 中国激光:2021,48(14):1402203.
- [15] Li Yuyan, Wang Fei, Sun Tongtong. Calibration technology of laser-induced damage threshold of thin films[J]. Laser Technology,2021,45(6):729-734. (in Chinese)  
李玉瑶,王菲,孙同同. 薄膜激光损伤阈值标定技术[J]. 激光技术,2021,45(6):729-734.
- [16] Shan Cong, Zhao Yuanan, Zhang Xihe, et al. Study on laser damage threshold of optical element surface based on gaussian pulsed laser spatial resolution[J]. Chinese Journal of Lasers,2018,45(1):158-165. (in Chinese)  
单翀,赵元安,张喜和,等. 基于高斯脉冲激光空间分辨测量光学元件表面激光损伤阈值研究[J]. 中国激光,2018,45(1):158-165.
- [17] Xuan Shanyong. Study on laser paint stripping technology for aircraft composite parts[J]. Aviation Maintenance & Engineering,2016,(8):15-18. (in Chinese)  
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.
- [18] Chen Hong. Influence of beam quality on propagation and focus of laser beam and quality of laser material processing[D]. Beijing: Beijing University of Technology,2006. (in Chinese)  
陈虹. 激光光束质量对光束传输聚焦和加工质量的影响[D]. 北京:北京工业大学,2006.