

# 不同光束类型致铝合金表面漆层损伤形貌研究

杨文锋, 何双江, 李绍龙, 李天权

(中国民用航空飞行学院 民机复合材料研究中心, 四川 广汉 618307)

**摘要:** 漆层的损伤形貌反映了激光与材料相互作用的规律及除漆机理, 了解不同光束类型对漆层的损伤特征及作用规律有助于选择激光精准除漆, 提高表面处理质量。为探究不同光束类型对漆层材料的作用规律及除漆机理, 采用扫描电子显微镜和3D光学表面轮廓仪测量铝合金表面漆层在高斯与平顶激光除漆后, 损伤直径、损伤深度及损伤形貌随能量密度的变化。结果表明, 在高斯光束作用下, 表面漆层损伤区域受到热烧蚀和热振动效应影响, 出现漆层剥离、烧蚀去除等现象, 损伤凹坑光滑、规则, 当能量密度为  $12.37 \text{ J/cm}^2$  时, 漆层的损伤直径达到  $46.71 \mu\text{m}$ , 深度达到  $10.14 \mu\text{m}$ ; 在平顶光束作用下, 表面漆层损伤区域主要受到热振动效应影响, 损伤凹坑呈现出振动剥离去除的形貌, 凹坑范围内的漆层剥落不规则, 剖面呈“锯齿”状, 当能量密度为  $12.37 \text{ J/cm}^2$  时, 损伤直径达到  $612.3 \mu\text{m}$ , 深度达到  $19.42 \mu\text{m}$ ; 同等能量密度下, 平顶光束剥离漆层量更大。

**关键词:** 高斯光束; 平顶光束; 损伤形貌; 除漆机理

**中图分类号:** TN249; TP73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.009

## Research on damage morphology of aluminum alloy surface paint by different beam types

YANG Wen-feng, HE Shuang-jiang, LI Shao-long, LI Tian-quan

(Civil Aircraft Composite Materials Research Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The damage morphology of the paint layer reflects the law of laser-material interaction and the mechanism of paint removal. Understanding the damage characteristics and the law of action of different beam types on the paint layer helps to select the laser for precise paint removal and improve the quality of surface treatment. To investigate the action law of different beam types on the paint layer material and the mechanism of paint removal, scanning electron microscope and 3D optical surface profiler are used to measure the variation of damage diameter, damage depth and damage morphology with energy density of aluminum alloy surface paint layer after Gaussian and flat-top laser paint removal or the aluminum alloy surface. The results show that the surface paint damage area is affected by thermal ablation and thermal vibration effects under the action of Gaussian beams, and the phenomenon of paint peeling and ablation removal appears, and damage crater is smooth and regular. When the energy density is  $12.37 \text{ J/cm}^2$ , the damage diameter of the paint layer reaches  $46.71 \mu\text{m}$  and the depth reaches  $10.14 \mu\text{m}$ ; under the action of the flat-top beam, the surface paint damage area is mainly affected by the thermal vibration effect, and the damage crater shows the shape of vibration peeling removal, and the paint layer within the crater is irregularly peeling, and the profile is "jagged"; when the energy density is  $12.37 \text{ J/cm}^2$ , the damage diameter reaches  $612.3 \mu\text{m}$  and the depth reaches  $19.42 \mu\text{m}$ ; at the same energy density, the flat-top beam peels off a larger amount of paint layer.

**Keywords:** Gaussian beam; flat top beam; morphology of damage; paint removal mechanism

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(No. 2021YFSY0025)资助。

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

收稿日期: 2022-08-19

## 1 引言

飞机蒙皮激光除漆技术凭借其精准可控、高效环保及便于自动化等优势,受到了国内外学者的广泛关注,被认为是未来最有效、最可靠的除漆方法<sup>[1-2]</sup>,极具发展潜力。近年来,激光除漆技术在工艺参数优化和除漆机理上的研究不断完善<sup>[3-5]</sup>,针对不同类型、不同厚度漆层,在不损伤基体的情况下实现了表面漆层完全清除。在除漆应用中,激光光束的空间轮廓和能量分布会对激光的能量密度、平均功率等参数产生影响,进一步影响除漆质量。对于确定的材料体系,在使用不同光束类型进行激光除漆时,如何有效利用激光进行精准的材料加工,提升除漆效率及质量,是飞机蒙皮激光除漆技术应用需求及待解决的关键问题之一。

目前,已有学者针对不同光束类型开展除漆研究。在数值计算分析方面,赵乐<sup>[6]</sup>基于激光清洗热传导理论,采用 COMSOL-Multiphysics 软件分别对高斯光束、平顶光束的热-结构应力相互作用进行建模,并采用光纤脉冲激光器清洗钢板表面漆层,对数值计算结果进行验证。为高斯光束、平顶光束的除漆应用及参数选择提供了理论基础。Shi 等<sup>[7]</sup>通过有限元分析计算了高斯光束、平顶光束下涂层和基体的温度、应力及位移分布,并比较了两种激光器除漆效果。研究表明,采用平顶激光器可以减少基底损伤,提高清洗效率;在清洗效果及效率方面,韦彦锦等<sup>[8]</sup>对比了高斯光束、平顶光束清洗 6005A 铝合金型材表面氧化膜的微观形貌变化。结果表明,高斯光束清洗后试样表面均呈现出明显的犁沟状,平顶光束清洗后试样表面痕迹比较均匀。Tong 等<sup>[9]</sup>分别采用高斯光束、平顶光束清除 EH36 钢基体环氧底漆,研究激光光束类型对清洗后基底表面微观形貌、除漆效率等特征的影响。研究表明,使用高斯光束会损伤基底表面,相比之下,采用平顶光束未造成基底损伤。通过计算,平顶光束的除漆效率为高斯光束的 1.2 倍。综上所述,关于使用不同光束类型除漆的研究较少,主要关注不同光束类型激光整体去除漆层或氧化膜,对漆层损伤形貌的研究未见相关报道,不同光束类型与材料的作用规律及除漆机理尚不明确。

本文采用高斯和平顶激光对铝合金表面漆层进行不同能量密度下单脉冲除漆实验,对比了高斯和

平顶激光作用下漆层损伤凹坑二维、三维差异,解释了高斯和平顶光束作用漆层时不同除漆机理,研究可为激光除漆技术的工艺设计和参数优化提供参考。

## 2 材料与方法

如图 1 所示,试样样品为飞机蒙皮常用的 2024-T3 态 Al-Cu-Mg 系高强度硬铝合金,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 μm 厚的黄色环氧涂料。

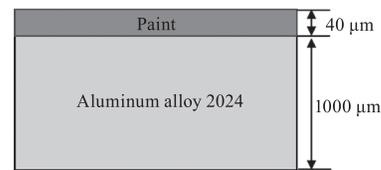


图 1 漆层示意图

Fig. 1 Diagram of paint layer

试验使用的高斯光束激光器为波长 1064 nm 的 MFPT-120P 脉冲光纤激光器(温州天琴激光科技有限公司),最大功率为 120 W;平顶光束激光器为 YLPN-100-25 × 100 × 100-500-R 型脉冲激光器(美国 IPG Photonics),最大功率为 500 W。

两种激光除漆设备主要由光纤脉冲激光器、扫描振镜、激光加工头等组成,除漆设备示意图如图 2。

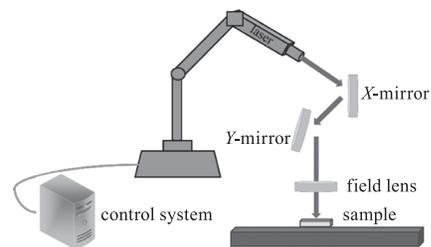


图 2 激光除漆设备示意图

Fig. 2 Diagram of the laser paint stripping machine

其中,两种光束类型激光器的主要参数见表 1。

表 1 激光器主要参数

Tab. 1 Parameters of the fiber laser

Laser Type	Beam Diameter / μm	Maximum Pulse Energy / mJ	Pulse Width / ns	Pulse Frequency / kHz
Gaussian Laser	50	1.33	60 ~ 350	1 ~ 200
Flat-top Laser	677	25.99	25 ~ 100	2 ~ 50

不同光束能量分布示意图如图3。由图3,高斯光束的能量分布沿半径差异较大,能量密度在光斑中心高,外围则低;平顶光束的能量分布沿半径分布差异较小,光斑范围内能量密度分布相对均匀。

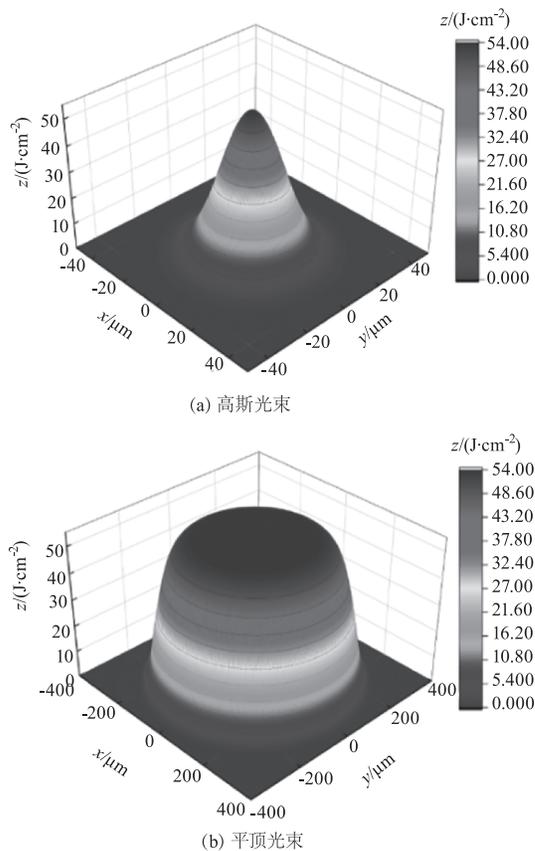


图3 光束能量分布示意图

Fig.3 Diagram of energy distribution of laser beam

为了避免脉冲之间相互影响,设计高斯激光光斑搭接率为-20%,平顶激光光斑搭接率为-30%。根据光斑搭接率公式<sup>[10]</sup>(1),设置高斯激光的扫描速度和频率分别为3600 mm/s,60 kHz,平顶激光的扫描速度和频率分别为4400 mm/s,5 kHz,扫描示意图如图4。

$$L = \left(1 - \frac{v}{fD}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中,L为光斑搭接率;v为扫描速度;f为脉冲频率;D为光斑直径。

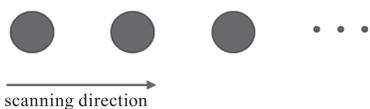


图4 单脉冲扫描示意图

Fig.4 Schematic diagram of single pulse scanning

调整激光功率以改变能量密度,高斯激光功率从12 W开始,以0.12 W连续递增,观察除漆后的

损伤形貌。根据式<sup>[11]</sup>(2)计算其平均能量密度( $E_D$ )。

$$E_D = \frac{P}{f\pi\omega_0^2} \quad (2)$$

式中,P为激光功率;f为频率; $\omega_0$ 为光斑半径。

当高斯光束激光器以不同能量密度作用漆层表面时,10.61 J/cm<sup>2</sup>、11.43 J/cm<sup>2</sup>、12.37 J/cm<sup>2</sup>对应的损伤形貌差异较明显,随着能量密度的增加,损伤凹坑出现孔状损伤、近椭圆损伤、近圆形损伤三种损伤形态,原因可能是除漆机制发生了变化。故论文重点讨论了3组能量密度(10.61 J/cm<sup>2</sup>、11.43 J/cm<sup>2</sup>、12.37 J/cm<sup>2</sup>)下漆层的损伤形貌,并采用平顶光束激光器以相同的能量密度进行除漆试验,对比高斯和平顶两种光束作用漆层后其损伤形貌的差异,并分析原因。

采用S neox 090 3D光学表面轮廓仪(西班牙Sensofar公司)测量凹坑损伤直径、损伤深度和三维形貌,台式扫描电子显微镜(深圳善时仪器有限公司)测量凹坑微观形貌。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 凹坑二维形貌对比

图5为不同能量密度下漆层凹坑表面形貌,可以看出,不同能量密度作用后的损伤形貌存在差异。

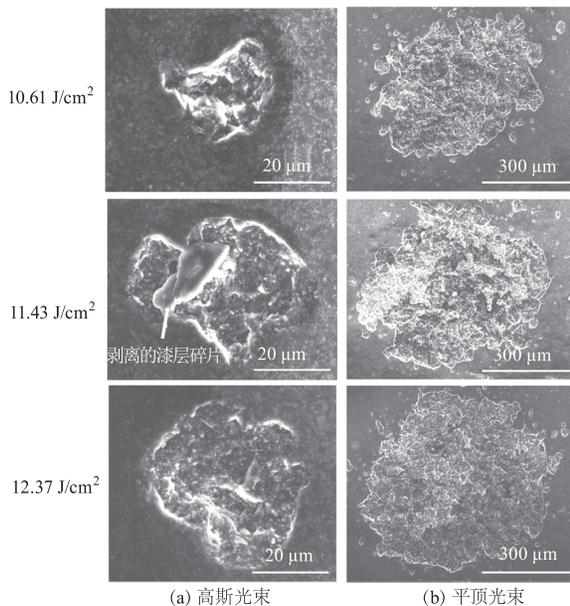


图5 不同能量密度下漆层凹坑表面形貌

Fig.5 Surface morphology of craters in the paint under different energy density

在高斯光束作用下,不同能量密度辐照漆层后的表面形貌如图5(a)。由图5(a)可知,当能量密

度为  $10.61 \text{ J/cm}^2$  时,受光-力作用影响,漆层表面出现孔状不规则的损伤,损伤区域明显小于光斑直径。损伤位置位于高斯光束的中心区域,而远离光轴的光斑截面区域无明显的漆层烧蚀或脱落,此时油漆只能部分去除,去除的部分非常不均匀。随着能量密度增加至  $11.43 \text{ J/cm}^2$ ,脱漆区域扩大,漆层的烧蚀更加严重。且在激光作用区域发现剥离的漆层碎片,这表明漆层受到力学作用,热应力诱导的断裂和油漆与基体之间的剥离导致漆层去除<sup>[12]</sup>。激光能量密度进一步增加至  $12.37 \text{ J/cm}^2$  时,未观察到明显剥离的漆层碎片,此时光-热作用占主导。当能量密度增加到一定程度,激光作用于漆层后漆层温度会急剧升高,漆层出现剧烈燃烧、气化等现象<sup>[13]</sup>,在极短时间( $0.02 \text{ s}$ )<sup>[14]</sup>和很小体积内燃烧、气化现象导致漆层出现冲击去除。因此漆层表面没有剥离的漆层和裂纹,最终形成较大体积的烧蚀及脱落。

在平顶光束作用下,不同能量密度辐照后的漆层表面形貌如图 5(b)。由图 5(b)可知,当能量密度从  $10.61 \text{ J/cm}^2$  增加至  $12.37 \text{ J/cm}^2$ ,漆层损伤区域逐渐扩大,其损伤形貌未出现明显差异,说明除漆机理未发生较大的变化。从损伤凹坑表面形貌上看,漆层在光束作用范围内呈现不同程度的剥离和脱落,极不规则。说明清洗过程中存在力学作用,如振动、冲击等<sup>[15]</sup>。漆层内的热应力差异引起热振动效应,聚合物高分子链间的范德华力或氢键被破坏,导致漆层因振动效应而被清除<sup>[16]</sup>。

漆层凹坑的损伤直径能反映激光光束作用材料的区域范围。为了对比两种光束在不同能量密度下凹坑直径的变化,对漆层表面凹坑直径进行了测量。分别采用激光能量密度  $10.61 \text{ J/cm}^2$ 、 $11.43 \text{ J/cm}^2$ 、 $12.37 \text{ J/cm}^2$  作用于漆层,不同能量密度下漆层的凹坑直径如图 6。

图 6 表明,对于高斯和平顶光束,随着能量密度增加,漆层凹坑直径均增加。原因是激光能量密度增大,漆层材料吸收激光能量,高于漆层损伤阈值的能量使激光辐照区域变宽,即光斑尺寸变大,表现为凹坑直径的增加。当能量密度由  $10.61 \text{ J/cm}^2$  增加到  $12.37 \text{ J/cm}^2$ ,高斯光束作用下的凹坑损伤直径由  $25.9 \mu\text{m}$  增加至  $46.71 \mu\text{m}$ ;平顶光束下损伤直径则由  $431.29 \mu\text{m}$  增加至  $612.3 \mu\text{m}$ 。平顶光束作用下的凹坑直径远大于高斯光束作用下的凹坑直径。这

是由于激光光束直径不同,高斯光束直径小于平顶光束直径,这直接影响了激光的辐照区域;高斯光束中心能量很高,周围能量迅速衰减,平顶光束的能量分布较高斯光束更均匀,不会出现同一光斑范围内能量差异很大的现象。说明光束直径大小以及光束能量分布特点会导致实际作用材料的范围出现差异,在激光除漆以及精准去除材料的工作中,不可忽略此类因素。

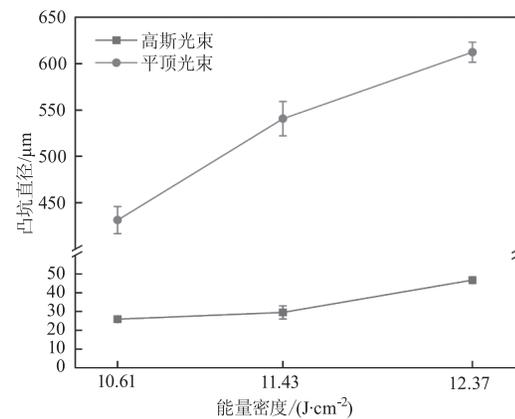


图 6 不同能量密度下漆层凹坑直径变化关系

Fig. 6 Variation relationship of craters diameter in the paint under different energy density

### 3.2 凹坑三维形貌对比

通过三维形貌从整体上反映凹坑损伤特点以及漆层剥落情况。不同能量密度下漆层的凹坑三维形貌如图 7。

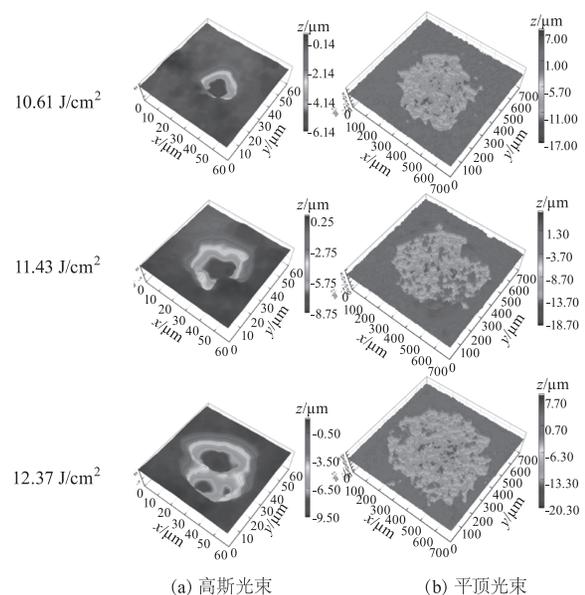


图 7 不同能量密度下漆层凹坑三维形貌图

Fig. 7 Three-dimensional morphology of craters in the paint under different energy density

由图7可知,高斯和平顶两种类型光束作用材料后,漆层凹坑三维形貌存在差异。从三维形貌可以看出,高斯光束作用下,漆层最深剥离处于光束中心,深度大小沿光束半径方向递减,可以明显观察到深度梯度,去除后的漆层凹坑较为规则、光滑,满足高斯能量分布特点;在平顶光束作用下,光束范围内的漆层均受到不同程度剥离,去除后的漆层凹坑不规则,残余漆层参差不齐,证明其清洗过程主要受光-力作用影响。

为了进一步观察漆层凹坑形貌,对比了凹坑的剖面轮廓。不同能量密度下漆层的凹坑剖面如图8。

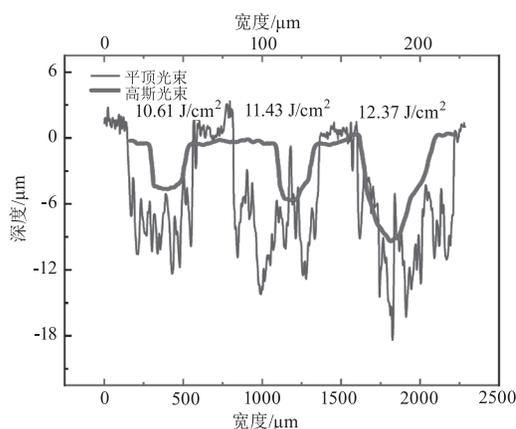


图8 不同能量密度下漆层凹坑剖面深度图

Fig. 8 Depth of paint crater profiles under different energy density

由图8可知,通过对比漆层凹坑剖面轮廓,可以看出高斯光束作用下漆层凹坑剖面轮廓光滑,体现出材料烧蚀后规则的形貌;而平顶光束作用下漆层凹坑剖面轮廓高低不平,凹坑剖面底部呈“锯齿”状。这是由于高斯光束作用下的漆层受到光-热作用,漆层出现烧蚀去除现象,所以漆层凹坑平滑且规则;而平顶光束作用下的漆层主要受到光-力作用,漆层的去除方式为热应力。不规则的“锯齿”状的凹坑剖面,说明除漆过程中起主导作用的机制不再是烧蚀,更可能是热振动机制引起的片状剥离,漆层在热应力的作用下,出现裂纹和剥落现象<sup>[16]</sup>。通过观察凹坑三维形貌以及剖面的差异,看出高斯与平顶激光光束在作用材料过程中,其除漆机理不同,高斯光束主要通过烧蚀效应以及热致应力去除漆层;而平顶光束则主要以热振动效应为主要除漆机制,过程中未出现明显的烧蚀去除。

漆层凹坑的损伤深度能反映激光对漆层材料的

剥离情况,控制凹坑的剥离深度有助于实现对漆层的可控去除。不同能量密度下漆层的凹坑深度如图9。

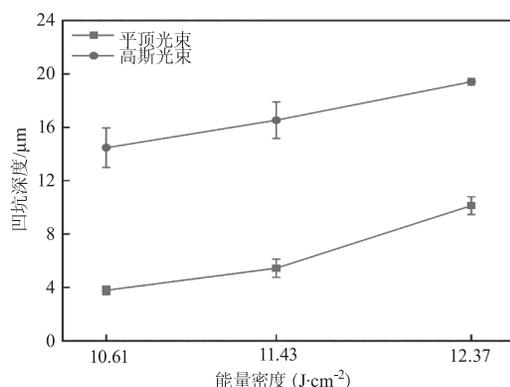


图9 不同能量密度下漆层凹坑深度变化关系

Fig. 9 Variation relationship of craters depth in the paint under different energy density

由图9可知,随着能量密度的增加,作用于漆层表面能量递增,激光与漆层之间的相互作用不只局限于表面,而是向深度扩展,导致凹坑深度增加。当能量密度由  $10.61 \text{ J/cm}^2$  增加到  $12.37 \text{ J/cm}^2$ ,高斯光束作用下的凹坑损伤深度由  $3.79 \mu\text{m}$  增加至  $10.14 \mu\text{m}$ ;平顶光束下损伤深度则由  $14.47 \mu\text{m}$  增加至  $19.42 \mu\text{m}$ 。在同等能量密度下,由于二者光束能量分布差异,高斯光束最高能量集中在光斑中心,总体施加在漆层上的能量较少;而平顶光束光斑范围能量相对较均匀,总体施加在漆层上的能量要高于高斯光束,导致平顶激光光束比高斯激光光束烧蚀凹坑更深。

#### 4 结论

采用高斯和平顶两种光束激光对 2024-T3 铝合金表面漆层进行单脉冲除漆实验,对比了高斯与平顶激光单脉冲作用下漆层损伤形貌二维、三维的差异,结论如下:

(1) 能量密度从  $10.61 \text{ J/cm}^2$  增加为  $12.37 \text{ J/cm}^2$ ,高斯光束作用下,漆层损伤直径由  $25.9 \mu\text{m}$  增加为  $46.71 \mu\text{m}$ ,损伤深度由  $3.79 \mu\text{m}$  增加为  $10.14 \mu\text{m}$ ;平顶光束作用下,损伤直径由  $431.29 \mu\text{m}$  增加为  $612.3 \mu\text{m}$ ,损伤深度由  $14.47 \mu\text{m}$  增加为  $19.42 \mu\text{m}$ 。平顶光束作用下漆层凹坑的直径、深度均大于高斯光束作用下漆层凹坑的直径、深度,说明在相同的激光输出能量下,平顶激光能剥离更大的漆层量;

(2) 高斯光束作用下的漆层去除方式主要以烧蚀为主,过程中还会伴随着热应力、气体燃烧蒸发及

冲击力作用;而平顶光束作用下的漆层去除方式主要以热应力作用下的热振动效应为主,未发现明显的烧蚀去除痕迹。

### 参考文献:

- [1] Jin Sen, Wang Jingxuan, Yuan Xiaodong, et al. Laser paint removal technology for aircraft metal skin and composite materials [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(17): 63–70. (in Chinese)  
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.
- [2] Xuan Shaoyong. 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.
- [3] Jiang Yilan, Ye Yayun, Zhou Guorui, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 29–35. (in Chinese)  
蒋一岚, 叶亚云, 周国瑞等. 飞机蒙皮的激光除漆技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 29–35.
- [4] Qiu Taiwen, Yi Junlan, Cheng Cheng, et al. Characteristics of nanosecond pulse laser cleaning paint coatings on 2024 aluminum alloy surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 168–175. (in Chinese)  
邱太文, 易俊兰, 程程等. 纳秒脉冲激光清洗 2024 铝合金表面油漆涂层特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 168–175.
- [5] Zhao Haizhao, Qiao Yulin, Du Xian, et al. Effect and mechanism of energy density on the aluminum alloy paint cleaned by laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 212–220. (in Chinese)  
赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 能量密度对激光清洗铝合金漆层的影响及作用机理[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 212–220.
- [6] Zhao Le. Research on hand-held laser cleaning system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)  
赵乐. 手持式激光清洗系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [7] Shi S D, Li W, Du P, et al. Removing paint from a metal substrate using a flattened top laser [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(10): 104209.
- [8] Wei Yanjin, Peng Zhangzhu, Chen Ya. Analysis on laser cleaning of 6005A aluminum alloy for high speed train [J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2020, 43(3): 71–75. (in Chinese)  
韦彦锦, 彭章祝, 陈亚. 高铁列车用 6005A 铝合金激光清洗技术分析[J]. *电力机车与城轨车辆*, 2020, 43(3): 71–75.
- [9] Tong Y, Shang Guan J, Ren X, et al. Surface quality of laser paint removal of marine steel: a comparative study using a Gaussian beam and a flat-top beam [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(9): 2237–2246.
- [10] Kaldos A, Pieper H J, Wolf E, et al. Laser machining in die making—a modern rapid tooling process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155–156: 1815–1820.
- [11] Sun C, Min J, Lin J, et al. The effect of laser ablation treatment on the chemistry, morphology and bonding strength of CFRP joints [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2018, (84): 325–334.
- [12] Li X, Zhang Q, Zhou X, et al. The influence of nanosecond laser pulse energy density for paint removal [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, (156): 841–846.
- [13] Han J, Cui X, Wang S, et al. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064nm: a multi-pulse model [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(19/21): 1947–1959.
- [14] Zhu Yingrui, Zhu Ming, Shi Yu, et al. Effect of laser defocusing amount on metallic paint removal mechanism [J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(1): 29–33, 124–125. (in Chinese)  
朱映瑞, 朱明, 石玓, 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.
- [15] Zhao Haizhao, Qiao Yulin, Du Xian, et al. Research on paint removal technology for aluminum alloy using pulsed laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(6): 246–259. (in Chinese)  
赵海朝, 乔玉林, 杜娴, 等. 脉冲激光清洗铝合金表面漆层的技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(6): 246–259.
- [16] Shi Shudong. Researches on theoretical model, numerical simulation and application of painting removal by laser cleaning [D]. Tianjing: Nankai University, 2012. (in Chinese)  
施曙东. 脉冲激光除漆的理论模型、数值计算与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.