

纳秒激光脉冲宽度对2024铝合金损伤特性的影响

杨文锋 李天权 林德惠 李绍龙 杨帆

(中国民用航空飞行学院民机复合材料维修研究中心, 广汉 618307)

文 摘 飞机激光除漆对2024铝合金蒙皮可能造成潜在的损伤,需探究激光参数变化对基体材料表面的作用规律,其中脉冲宽度对激光-材料作用与材料损伤特性具有重要影响。本文采用COMSOL Multiphysics软件模拟分析了不同脉冲宽度时激光作用铝合金表面的温升特性,并借鉴ISO 11254 1-on-1激光损伤阈值测试方法研究了脉冲宽度对铝合金损伤阈值的影响,进一步分析了不同脉冲宽度下的烧蚀凹坑微观形貌、直径与深度变化规律。结果表明:铝合金表面峰值温度随脉冲宽度增加而降低;脉冲宽度从150 ns增加到240和330 ns时,铝合金损伤阈值从9.96 J/cm²分别增加到11.24和12.66 J/cm²,当激光能量密度达到损伤阈值时,3 μm厚氧化膜被完全损伤,破坏了铝合金表面完整性;烧蚀凹坑直径和深度随脉冲宽度增加而增加,深度受影响程度更大。该研究可为激光与材料作用的脉冲宽度选择提供一定的参考。

关键词 脉冲宽度,温升特性,损伤阈值,烧蚀凹坑

中图分类号:TN249

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.01.004

Influence of Nanosecond Laser Pulse Width on Damage Characteristics of 2024 Aluminum Alloy

YANG Wenfeng LI Tianquan LIN Dehui LI Shaolong YANG Fan

(Civil Aircraft Composites Maintenance Research Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307)

Abstract Aircraft laser paint removal might cause potential damage to the 2024 aluminum alloy skin. It was necessary to explore the effect of laser parameter changes on the surface of the matrix material, in which the pulse width had an important impact on the laser-material interaction and material damage characteristics. In this paper, the temperature rise characteristics of the aluminum alloy surface exposed to laser with different pulse width were simulated and analyzed by COMSOL Multiphysics software, and the ISO 11254 1-on-1 laser damage threshold test method was used to reveal the influence of pulse width on aluminum alloy damage threshold. Furthermore, the micro-morphology, diameter and depth of ablation pits were further analyzed under different pulse widths. The results show that the peak temperature of aluminum alloy surface decreases with the increase of pulse width. When the pulse width increases from 150 ns to 240 and 330 ns, the damage threshold of aluminum alloy increases from 9.96 J/cm² to 11.24 and 12.66 J/cm², respectively. The laser energy density reaches the damage threshold, the 3 μm thick oxide film is completely damaged, which destroys the surface integrity of the aluminum alloy. The diameter and depth of the ablation pits increase with the increase of the pulse width, and the depth is more affected. This research can provide a reference for the selection of pulse width for the interaction between laser and materials.

Key words Pulse width, Temperature rise characteristics, Damage threshold, Ablation pit

0 引言

飞机蒙皮激光除漆技术凭借“绿色环保、高效”等优势,有望替代传统打磨技术、抛丸喷砂技术

及化学溶剂处理技术^[1-2],其工程化应用需要通过合理的参数匹配优化保证基体材料不受激光损伤的负面作用^[3]。激光产生热量的热扩散时间由脉冲宽度

收稿日期:2022-07-13

基金项目:四川省科技计划项目(2021YFSY0025);大学生创新创业训练计划项目(S202110624140)

第一作者简介:杨文锋,1979年出生,博士,教授,主要从事飞机复合材料智能维修与除漆的研究工作。E-mail:ywfcyy@163.com

决定,而热扩散时间又直接影响热扩散深度和热效应,即脉冲宽度对激光-材料作用及其损伤特性具有重要影响。鉴于飞机蒙皮激光除漆会产生热效应和冲击作用,为保护除漆过程中基体材料表面的完整性,脉冲宽度变化对激光作用于基体材料表面完整性的影响规律具有重要研究价值。

近年来,关于激光脉冲宽度开展的研究工作包括材料温度场、损伤阈值、烧蚀形貌等方面。GU Xiuying等^[4]系统地研究了激光能量密度、脉冲宽度等参数对铝合金温度场的影响。结果表明随着脉冲宽度增加,目标中心点温度也会随之降低,且轴向传热减小。姜德元等^[5]采用面积推算法研究了不同脉冲宽度和脉冲数目对铝板的损伤规律,结果表明材料损伤阈值随脉冲宽度减小或脉冲个数增多而呈下降趋势。LEE Jaeyool等^[6]通过有限元软件进行模拟分析,研究了纳秒激光参数变化下的材料烧蚀过程,发现材料去除体积随着脉冲宽度增加呈下降趋势。艾思飞等^[7]研究了激光脉冲宽度对钛合金材料表面形貌的影响规律,结果表明随着脉冲宽度增加,激光清洗的热积累效应增加,使试样表面发生严重熔化,导致了平整性下降。上述工作主要研究了激光脉冲宽度对金属材料表面加工的影响,缺乏脉冲宽度变化对基体材料表面完整性的作用规律研究。故基于激光清洗残余漆层时保护基体材料表面完整性的考虑,可结合激光与材料作用时的温升特性、损伤阈值、烧蚀特性三个方面开展深入研究,以考察纳秒激光脉冲宽度对飞机2024铝合金蒙皮损伤特性的影响。

本文采用COMSOL Multiphysics软件进行模拟分析脉冲宽度变化下铝合金表面的温升特性;然后借鉴ISO 11254-1:2011(E) 1-on-1激光损伤阈值测试方法^[8](以下简称ISO 11254),揭示不同脉冲宽度时铝合金的损伤阈值;进一步基于烧蚀凹坑微观形貌、直径与深度的表征,探究脉冲宽度对烧蚀特性的影响。旨在获得激光脉冲宽度对2024铝合金损伤特性的影响规律,为激光除漆过程中的参数调控优化、激光与材料作用的脉冲宽度选择提供一定的参考。

1 材料与方法

研究对象为飞机蒙皮常用的2024铝合金,表面阿洛丁处理,氧化膜厚度约3 μm,其横截面微观形貌图如图1所示。激光设备为1 064 nm红外光纤脉冲激光器,光束能量服从高斯分布,主要性能参数见表1。

根据ISO 11254激光损伤阈值测试方法^[8],采用1-on-1方式对2024铝合金进行激光辐照。设定相邻辐照点圆心间隔为80 μm,截取10个连续辐照点,若其中存在1个明显损伤凹坑,则对应损伤概率为10%,以此类推。脉冲宽度分别为150、240和330 ns时,固定脉冲频率80 kHz,初始激光功率10 W,以

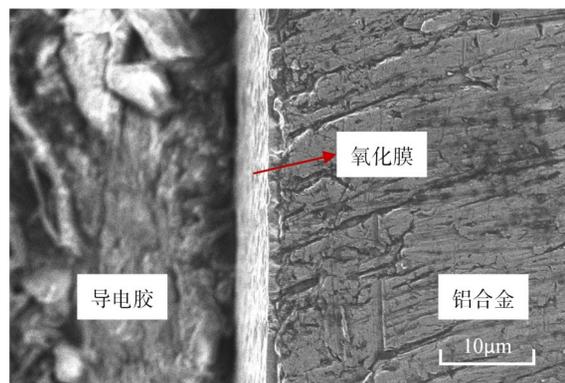


图1 2024铝合金的横截面微观形貌图

Fig. 1 Cross-sectional microscopic topography of 2024 aluminum alloy

表1 激光器主要性能参数

Tab. 1 The main performance parameters of the laser apparatus

Wavelength λ/nm	Average Power P/W	Pulse Width τ/ns	Pulse Frequency f/kHz	Focused spot radius $d/\mu\text{m}$
1 064	120	90~350	1~200	25

0.12 W 递增,相同参数组获取3条连续辐照点,记录相应损伤概率,直至损伤概率达到100%为止。

采用Sneox 090型3D光学表面轮廓仪,测量2024铝合金烧蚀凹坑的微观形貌、直径与深度,测量期间遵循ISO 25178-2:2021标准,并在相同参数组下选择5个凹坑进行测量,每个凹坑相关参数各测量4次,将其平均值作为最终结果。

2 有限元分析模型

采用COMSOL Multiphysics软件建立单脉冲激光辐照铝合金的二维模型,实际激光辐照材料是一个复杂的物理化学过程,为了使模拟结果更为准确,做出以下合理的假设和简化:(1)激光光束能量分布为理想的高斯分布,铝合金表面为理想平面;(2)材料连续且各向同性;(3)研究所涉及的峰值功率密度远低于 $10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$,故不考虑激光辐照过程中等离子体对激光能量的吸收^[9];(4)材料只存在相变过程,不发生化学反应^[10]。

脉冲激光辐照铝合金表面时,光斑直径远远大于材料的热扩散深度,故只考虑 z 方向的一维非稳态热传导;激光能量吸收与转化都遵循玻意耳定律与能量守恒法则,其热传导方程与边界条件^[11]如下:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (2)$$

$$T(z) \Big|_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

式中, ρ 、 $C_p(T)$ 、 $k(T)$ 、 T 分别为铝合金的密度、比热容、热导率和温度, t 为辐照时间, z 为距离材料表面的深度, T_0 为环境温度,设 $T_0 = 300 \text{ K}$ 。

脉冲激光热源模型采用更符合实际的高斯面热源分布函数,且激光以热流密度的形式加载到铝合金表面,单个激光脉冲的热流密度的表达式^[12]为:

$$I_0 = A \left[\frac{P}{f\tau\pi d^2} \right] \exp \left[-\frac{(x-d)^2}{2\phi^2} \right] \text{rect}1 \left(t, \frac{1}{f} \right) \quad (4)$$

式中, P 、 τ 、 f 、 d 分别为激光平均功率、脉冲宽度、频率、光斑半径, ϕ 为高斯光束的标准差, A 为铝合金表面对激光能量的吸收率, t 为时间。2024铝合金的热导率与比热容随温度变化的关系^[13]如图2所示,其他相关计算参数如表2所示。

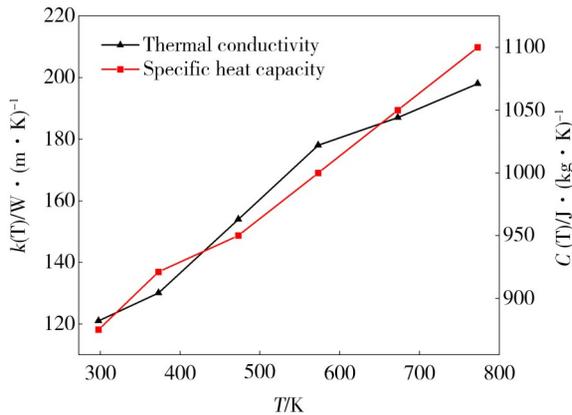


图2 2024铝合金热导率及比热容与温度的关系

Fig. 2 The relationship between thermal conductivity, specific heat capacity and temperature of 2024 aluminum alloy

表2 2024铝合金的相关计算参数

Tab. 2 Relevant calculation parameters of 2024 aluminum alloy

Density ρ /kg·m ⁻³	Absorption coefficient A	Latent heat of melting L_m /J·g ⁻¹	Melting point T_m /K
2 780	0.09	390	911

3 结果与讨论

3.1 脉冲宽度对温升特性的影响

探究脉冲宽度对2024铝合金表面温度变化过程的影响,可为损伤特性分析提供理论依据。图3为能量密度为9.37 J/cm²、脉冲宽度为240 ns时,铝合金表面的温升曲线。在脉冲辐照期间,铝合金表面温度随着激光辐照时间增加而迅速上升;当脉冲持续时间(脉冲宽度240 ns)结束时达到峰值温度964.49 K;随后在脉冲间隔时间内,温度急剧下降,直至环境温度附近。故根据铝合金表面温度,以脉冲宽度为界限分为两个区间:加热区间和冷却区间。其中加热区间是激光光束能量转化为热量导致的温升现象,冷却区间则是由于热量传递散失导致的温降现象,因此在单脉冲激光辐照作用时,铝合金表面温升曲线呈现典型的齿状,且脉冲宽度影响着表面峰值温度(图3中“齿尖”)。

激光辐照时,峰值温度是导致材料被损伤的主要原因之一。图4为不同脉冲宽度时2024铝合金表面峰

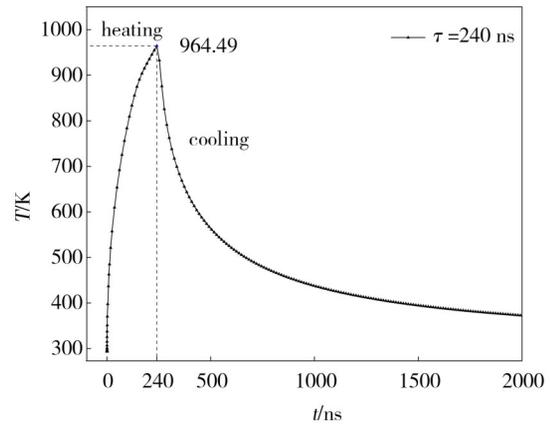


图3 单脉冲激光作用下2024铝合金表面温度随时间的变化

Fig. 3 Variation of surface temperature of 2024 aluminum alloy with time

值温度随能量密度的变化。当脉冲宽度不变时,铝合金表面峰值温度随能量密度增加而增加;当能量密度不变时,铝合金表面峰值温度随脉冲宽度增加而降低。这是由于峰值温度受激光参数影响,其中激光能量密度、脉冲宽度和峰值功率三者的关系可表示为

$$E_d = \frac{E_p}{S} = \frac{F \times \tau}{S} \quad (5)$$

式中, E_d 、 E_p 、 F 、 τ 分别为激光能量密度、单脉冲能量、峰值功率和脉冲宽度, S 为光斑面积。当其他参数不变时,峰值功率与能量密度成正比关系,峰值功率随能量密度增加而增加,从而导致峰值温度增加;而峰值功率则与脉冲宽度成反比关系,峰值功率随脉冲宽度增加而降低,因而峰值温度也会随之降低。同时根据图4中铝合金熔点温度 T_m (虚线)与拟合直线交点处对应的能量密度,预测在脉冲宽度为150~350 ns时,铝合金表面出现熔化损伤的能量密度范围为7~10 J/cm²。

综上分析可得,相同激光能量密度时,铝合金表面峰值温度随脉冲宽度增加而降低,说明为保护铝合金表面不被熔化损伤,即获得较低峰值温度,应增

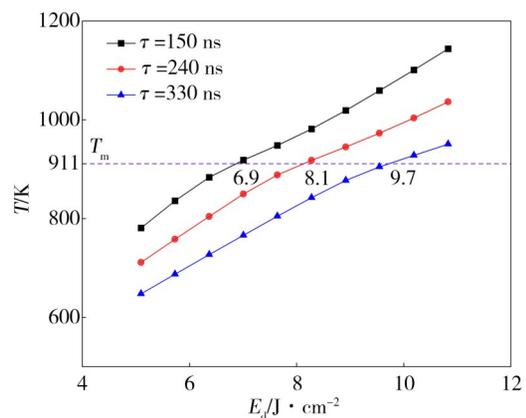


图4 不同脉冲宽度时2024铝合金表面峰值温度随能量密度的变化

Fig. 4 Variation of surface peak temperature of 2024 aluminum alloy with energy density at different pulse widths

加脉冲宽度。

3.2 脉冲宽度对损伤阈值的影响

损伤阈值是表征材料抗激光损伤能力的重要参数,由激光参数与材料性质决定。对于纳秒脉冲激光和 2024 铝合金,脉冲宽度密切影响着损伤阈值。借鉴 ISO 11254 激光损伤阈值测定方法,并结合铝合金表面熔化损伤能量密度预测范围(图4)进行试验,获得了不同脉冲宽度下能量密度与损伤概率的拟合曲线,如图5所示。

2024 铝合金在脉冲宽度分别为 150、240、330 ns

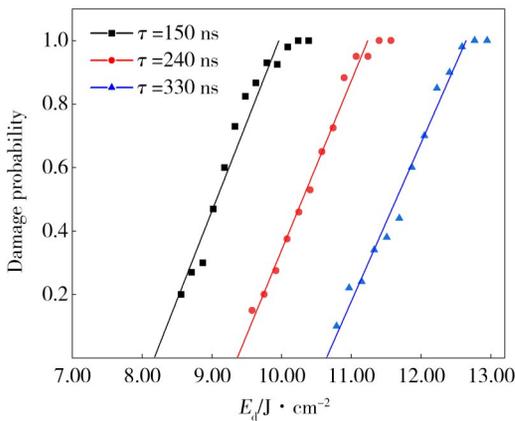


图5 不同脉冲宽度时激光能量密度与损伤概率的关系

Fig. 5 Relationship between laser energy density and damage probability at different pulse widths

时能量密度与损伤概率的拟合关系式如下:

$$y_{\tau 150} = 0.560x_{\tau 150} - 4.576 \quad (6)$$

$$y_{\tau 240} = 0.534x_{\tau 240} - 5.004 \quad (7)$$

$$y_{\tau 330} = 0.499x_{\tau 330} - 5.316 \quad (8)$$

激光辐照材料在达到熔化温度以上后,还需要作用一定时间保证“原子迁移”,才能导致铝合金损伤。针对激光清洗残余漆层时保护基体材料表面完整性,需考虑大面积损伤,忽略偶然概率性损伤,故根据拟合曲线,当损伤概率为 100% 时可得到脉冲宽度为 150、240、330 ns 时对应的损伤阈值 $DT_{\tau 150}$ 、 $DT_{\tau 240}$ 、 $DT_{\tau 330}$ 分别为 9.96、11.24、12.66 J/cm²。可见脉冲宽度增加,铝合金损伤阈值也随之增加。脉冲宽度增加能使脉冲持续时间相应增加,但根据式(5)可发现,峰值功率会随之降低,间接导致峰值温度也随之降低。为满足损伤温度要求,此时材料被损伤则需要更高的能量密度,故铝合金损伤阈值随着脉冲宽度增加而增加。

进一步基于损伤凹坑微观形貌分析了脉冲宽度对损伤阈值(100% 损伤概率)的影响规律。图6为不同脉冲宽度基于损伤阈值时的损伤凹坑三维形貌,并对损伤凹坑的深度和直径进行了测量,不同脉冲宽度下获取 5 个凹坑的深度和直径(每个凹坑测 4 次),均值及离散系数如表3所示。

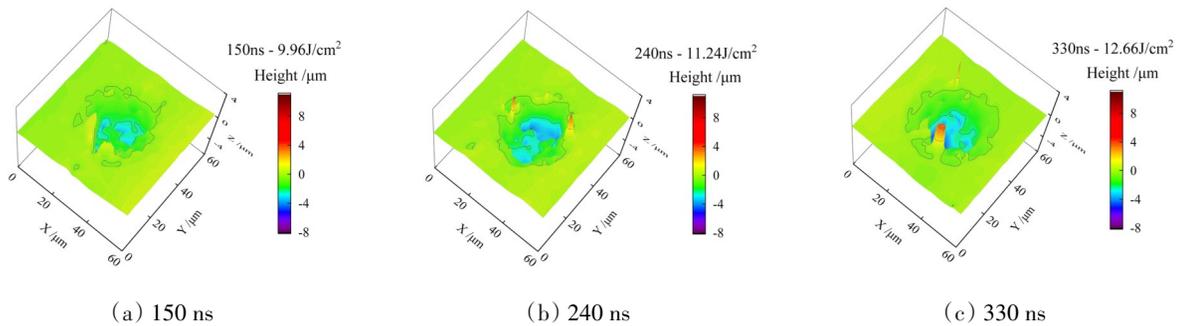


图6 不同脉冲宽度基于损伤阈值时的损伤凹坑三维形貌

Fig. 6 3D topography of damaged pits with different pulse widths based on damage threshold

表3 不同脉冲宽度基于损伤阈值时的凹坑深度和直径值

Tab. 3 Pit depth and diameter values for different pulse widths based on damage threshold

Pulse width/ns	Damage threshold/J · cm ⁻²	Depth		Diameter	
		Mean value/μm	Coefficient of Variation/%	Mean value/μm	Coefficient of Variation/%
150	9.96	2.73	6.68	35.95	1.16
240	11.24	3.42	6.02	36.14	2.22
330	12.66	3.60	6.09	37.30	4.27

如图6(a)-(c)所示,损伤凹坑内部颜色由浅变深,损伤区域逐渐增大,说明铝合金损伤阈值随着脉

冲宽度增加而增加,同时其损伤凹坑深度和直径也随之增加。这是由于脉冲宽度越长对应损伤阈值越

大所导致的,然而相应激光能量密度更大。表3中深度与直径的离散系数均在7%以内,表明数据的离散程度较小,均值代表性较强。从表3中凹坑深度均值可以得出,脉冲宽度为240、330 ns时,其损伤凹坑深度都大于3 μm ,脉冲宽度为150 ns时的凹坑深度也接近3 μm ,而铝合金的氧化膜厚度约为3 μm ,说明激光能量密度达到铝合金损伤阈值(100%损伤概率)后,会完全损坏氧化膜,即破坏铝合金表面完整性。

综上分析可得,当激光能量密度达到或超过损伤阈值时,会破坏铝合金表面完整性,而2024铝合金的损伤阈值随着脉冲宽度增加而增加,脉冲宽度越长时损伤阈值相应则越大,激光能量密度选择区间越大,故为降低铝合金被激光损伤风险,提升其损伤阈值是有利的。

3.3 脉冲宽度对烧蚀特性的影响

3.3.1 脉冲宽度对烧蚀凹坑微观形貌的影响

为探究脉冲宽度对铝合金烧蚀特性的影响,将激光能量密度研究区间确定为13~22 J/cm^2 (超过损伤阈值)。图7为脉冲宽度为150、240、330 ns,能量密度为13、16、19、22 J/cm^2 时,2024铝合金烧蚀凹坑

的三维形貌图。

当脉冲宽度一定时,随着能量密度增加(由上至下),烧蚀凹坑的熔化区域逐渐增大,凹坑内部颜色由浅蓝向深蓝色(黑)变化,即烧蚀凹坑直径与深度随之增大。且随着单脉冲能量密度的增大,烧蚀凹坑周围出现凝固的喷溅物,如图7(a4)、(b4)和(c4)中红色凸起部分。这是由于激光光束能量密度的增大,烧蚀凹坑熔池内的流动加剧,受马拉高尼效应主导的热表面张力流与熔池表面张力波振荡引起的表面张力流等机制影响^[14],导致高温铝合金微滴向凹坑四周喷溅,然后凝固成峰状熔融凸起物。

而当能量密度一定时,随着脉冲宽度增加,烧蚀凹坑内部颜色逐渐变浅,即烧蚀凹坑深度随脉冲宽度增加而降低。这是由于脉冲宽度增加会使峰值功率密度降低,当能量密度为16 J/cm^2 时,脉冲宽度150 ns时的峰值功率密度为 $1.07 \times 10^8 \text{ W}/\text{cm}^2$;脉冲宽度240 ns时的峰值功率密度为 $6.67 \times 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$;脉冲宽度330 ns时的峰值功率密度为 $4.85 \times 10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。故峰值功率密度的差异导致烧蚀凹坑熔融区域逐渐变小,以及深度逐渐变浅,如图7(a2)、(b2)、(c2)所示。

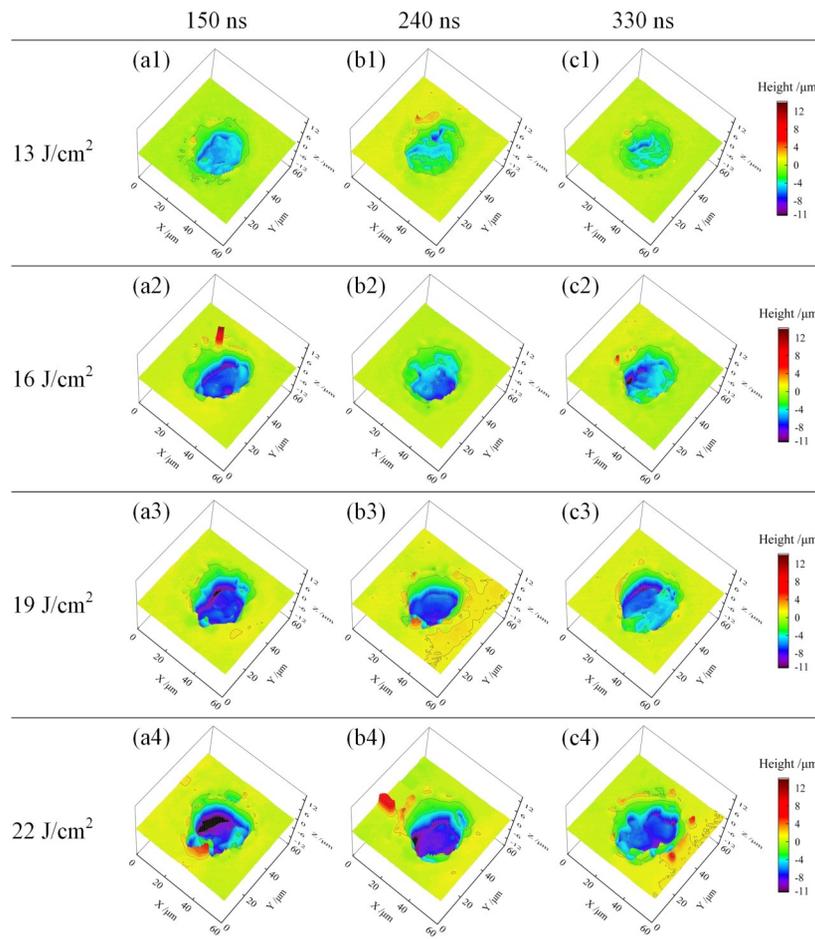


图7 不同脉冲宽度时烧蚀凹坑的三维形貌

Fig. 7 3D topography of ablated pits with different pulse widths

3.3.2 脉冲宽度对烧蚀凹坑直径与深度的影响

进一步深入研究脉冲宽度对烧蚀凹坑直径的影响,图8为不同脉冲宽度时烧蚀凹坑直径随能量密度变化曲线。

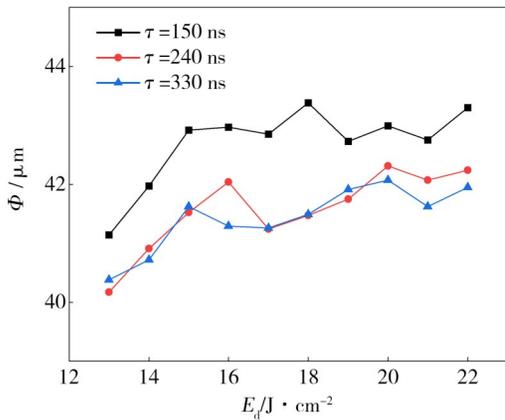


图8 不同脉冲宽度时烧蚀凹坑直径随能量密度变化曲线
Fig. 8 Variation curve of ablation pit diameter with energy density at different pulse widths

能量密度小于 15 J/cm^2 时,随着能量密度增加,不同脉冲宽度时烧蚀凹坑直径均逐渐增加;而能量密度大于 15 J/cm^2 后,随着能量密度增加,不同脉冲宽度时烧蚀凹坑直径大小不受影响^[15],如图8所示脉冲宽度 150 ns 时烧蚀凹坑直径在 $43 \mu\text{m}$ 附近波动。实际烧蚀凹坑最大直径 ($43 \mu\text{m}$ 左右) 小于研究所用的激光光斑聚焦直径 $50 \mu\text{m}$,这是由于高斯光束能量在距离光轴一定距离后,其光斑边缘的能量密度下降已不能实现对铝合金的实际损伤。且随能量密度变化时,脉冲宽度 150 ns 时的烧蚀凹坑直径均最大;而脉冲宽度 240 ns 和 330 ns 时的烧蚀凹坑直径大小与走势基本一致,这可能是由于脉冲宽度 150 ns 时拥有更高峰值功率密度而形成激光冲击作用,导致了烧蚀凹坑直径更大^[16]。

最后深入研究了脉冲宽度对 2024 铝合金烧蚀凹坑深度的影响,图9为不同脉冲宽度时烧蚀凹坑深度随能量密度变化曲线。

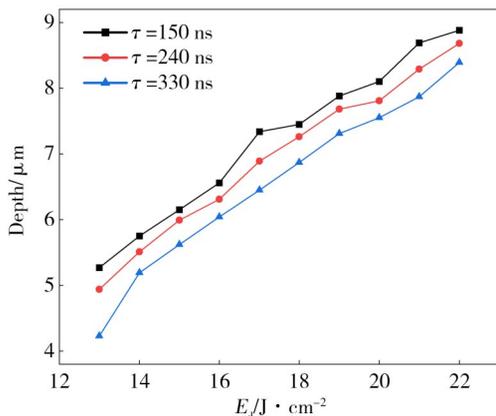


图9 不同脉冲宽度时烧蚀凹坑深度随能量密度变化曲线
Fig. 9 Variation curve of ablation pit depth with energy density at different pulse widths

从图9可看出,随着能量密度增加,不同脉冲宽度的烧蚀凹坑深度均呈增大趋势。而能量密度不变时,烧蚀凹坑深度随脉冲宽度增加而降低。当其他激光参数不变时,峰值功率会随着脉冲宽度增加而降低,故峰值温度和激光冲击作用降低,导致了烧蚀凹坑深度随着脉冲宽度增加而呈降低的趋势。

综上所述可得,脉冲宽度减小(其他参数不变)会加剧对 2024 铝合金表面的烧蚀损伤程度,且较于烧蚀凹坑直径,脉冲宽度对烧蚀凹坑深度影响程度更大。

4 结论

基于激光清洗残余漆层时保护基体材料表面完整性的考虑,结合了激光与材料作用时的温升特性、损伤阈值、烧蚀特性三个方面,深入研究了纳秒激光脉冲宽度对飞机蒙皮 2024 铝合金损伤特性的影响,得出如下结论。

(1) 相同激光能量密度时,铝合金表面峰值温度随脉冲宽度增加而降低,“齿状”温升曲线也随之变窄。故为保护基体材料表面完整性,即为追求较低峰值温度,应增加脉冲宽度。

(2) 当激光能量密度达到或超过损伤阈值时,则会完全破坏铝合金表面氧化膜,即损伤铝合金表面完整性。而铝合金损伤阈值随脉冲宽度增加而变大,脉冲宽度为 150、240、330 ns 时对应损伤阈值分别为 9.96 、 11.24 、 12.66 J/cm^2 。脉冲宽度越长时铝合金表面完整性不被破坏的激光能量密度选择区间则越大,即提升其损伤阈值是有利的。

(3) 脉冲宽度减小会加剧对 2024 铝合金表面的烧蚀损伤程度,较于烧蚀凹坑直径,脉冲宽度对烧蚀凹坑深度影响程度更大。

参考文献

- [1] 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): 0514001.
- QIU T W, YI J L, CHENG C, et al. Characteristics of nanosecond pulse laser cleaning paint coatings on 2024 aluminum alloy surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0514001.
- [2] 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): 1-8.
- 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): 1-8.
- [3] YOUSAF D, BASHIR S, AKRAM M, et al. Laser irradiation effects on the surface, structural and mechanical properties of Al-Cu alloy 2024 [J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2014, 169(2): 144-156.

- [4] GU X Y, CHEN G, JIN G, et al. Numerical analysis of thermal effect in aluminum alloy by monopulse laser [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9295:92950N-92950N-5.
- [5] 姜德元,熊厚,伍义刚,等. 不同脉冲宽度纳秒激光致铝材损伤特性与打孔机理[J]. 激光技术, 2017, 41(3): 427-432.
- LOU D Y, XIONG H, WU Y G, et al. Damage threshold and drilling mechanism of aluminum plate by nanosecond laser with different pulse widths [J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 427-432.
- [6] LEE J, YOO J, LEE K. Numerical simulation of the nanosecond pulsed laser ablation process based on the finite element thermal analysis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(5): 1797-1802.
- [7] 艾思飞,王非森,汪倩,等. 激光清洗脉冲宽度对钛合金表面形貌的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(8): 104-107.
- AI S F, WANG F S, WANG Q, et al. Effect of laser cleaning pulse width on surface morphology of titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(8): 104-107.
- [8] ISO 11254-1: 2011, Lasers and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surfaces. Part 1: 1-on-1 test [S]. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2000.
- [9] HU X L, WU J J, ZHAO J B, et al. Numerical simulation of the surface morphology and residual stress field of IN718 alloy by Gaussian mode laser shock [J]. Optik, 2020, 207: 164441.
- [10] 孙浩然. 铝合金表面油漆涂层激光复合清洗工艺及去除机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- SUN H R. Research on technology and mechanism of laser composite cleaning paint coating from aluminum alloy surface [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [11] 佟艳群,任旭东. 纳秒脉冲激光清洗理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 14-15.
- TONG Y Q, REN X D. Theory and Technology of Nanosecond Pulse Laser Cleaning [M]. Beijing: Science Press, 2011: 61-64.
- [12] VORA H, SANTHANAKRISHNAN S, HARIMKAR S, et al. One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: evolution of surface topography [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1-4): 69-83.
- [13] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000.
- WANG Z T, TIAN R Z. Aluminum Alloys and Their Processing Handbook [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2000.
- [14] 张廷忠,张冲,李晋,等. Ti6Al4V合金毫秒激光打孔重铸层的形成机制[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0214001.
- ZHANG Y Z, ZHANG C, LI J, et al. Formation mechanism of recast layer in millisecond laser drilling of Ti6Al4V alloys [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0214001.
- [15] 黄志辉,刘会霞,沈宗宝,等. 工艺参数对激光冲击微造型效果的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503004.
- HUANG Z H, LIU H X, SHEN Z B, et al. Process parameters analysis on surface texturing under laser shock peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0503004.
- [16] 袁天琦. 激光诱导5052铝合金表面微织构及其性能研究[D]. 南京:南京农业大学, 2020.
- YUAN T Q. Laser induced surface micro texture and properties of 5052 aluminum alloy [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.