

纳秒脉冲激光去除铝合金表面氧化膜数值模拟与试验研究

卢珊漫, 王堂皓, 刘瀚琦, 张巍*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年5月8日; 录用日期: 2024年6月17日; 发布日期: 2024年6月24日

摘要

采用纳秒脉冲激光开展了7075铝合金表面5 μm 厚氧化层的清洗研究。通过仿真模拟软件建立三维移动纳秒脉冲激光清洗7075铝合金表面氧化层的有限元模型, 分析不同激光参数对氧化层表面的温度场分布的影响。分析了激光清洗试样表面的微观形貌, 探讨了不同激光参数下的除氧化层效果以及基材表面的损伤情况。试验结果表明: 当激光功率为34 W, 试样表面的氧化层被完全去除, 且粗糙度最低, 基材表面未发生熔化; 在该参数下清洗后试样表面氧元素最低, 说明此参数为清洗阈值; 去除量随功率增加而增加, 与模拟结果相符; 在激光功率为34 W的激光参数下除氧化层后, 基材表面的硬度为432 HL, 大于基材硬度, 说明发生了激光表面硬化。

关键词

激光清洗, 7075铝合金, 表面形貌, 工艺参数, 有限元模拟

Numerical Simulation and Experimental Study of Nanosecond Pulsed Laser Removal of Oxide Film on Aluminum Alloy Surface

Shanman Lu, Tanghao Wang, Hanqi Liu, Wei Zhang*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: May 8th, 2024; accepted: Jun. 17th, 2024; published: Jun. 24th, 2024

Abstract

A nanosecond pulsed laser was used to carry out a study on the cleaning of a 5 μm thick oxide film on the surface of 7075 aluminum alloy. The finite element model of the nanosecond pulsed laser cleaning of the oxide film on the surface of 7075 aluminum alloy was established by simulation software, and the influence of different laser parameters on the temperature field distribution of the oxide film surface was analyzed. The micro-morphology of the laser cleaned specimen surface was analyzed, and the effect of different laser parameters on the oxide film removal and the damage of the substrate surface was discussed. The experimental results show that when the laser power is 34 W, the oxide film on the specimen surface is completely removed, and the roughness is the lowest, and the substrate surface does not melt; after cleaning with this parameter, the oxygen content on the specimen surface is the lowest, indicating that this parameter is the cleaning threshold; the removal amount increases with the increase of power, which is consistent with the simulation results; after removing the oxide film with the laser power of 34 W, the hardness of the substrate surface is 432 HL, which is greater than the substrate hardness, indicating that laser surface hardening has occurred.

*通讯作者。

文章引用: 卢珊漫, 王堂皓, 刘瀚琦, 张巍. 纳秒脉冲激光去除铝合金表面氧化膜数值模拟与试验研究[J]. 应用物理, 2024, 14(6): 424-435. DOI: 10.12677/app.2024.146047

layer on the surface of 7075 aluminum alloy. A finite element model of the oxide layer on the surface of 7075 aluminum alloy cleaned by a three-dimensional moving nanosecond pulsed laser was established by simulation software to analyze the influence of different laser parameters on the temperature field distribution on the surface of the oxide layer. The microscopic morphology of the laser-cleaned specimen surface was analyzed, and the effect of removing the oxide layer and the damage to the substrate surface under different laser parameters were discussed. The test results show that: when the laser power is 34 W, the oxide layer on the surface of the specimen is completely removed, the roughness is the lowest, and the surface of the substrate is not melted; the oxygen element on the surface of the specimen is the lowest after the cleaning under this parameter, which indicates that this parameter is the threshold of the cleaning; the amount of the removal increases with the increase of the power, which is by the simulation results; the hardness on the surface of the substrate after removing the oxide layer under the laser parameter of the laser power is 34 W, which is 432 HL, greater than that of the substrate. 432 HL, which is greater than the hardness of the substrate, indicating that laser surface hardening has occurred.

Keywords

Laser Cleaning, 7075 Aluminum Alloy, Surface Morphology, Process Parameters, Finite Element Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

7075 铝合金因为质量轻且具有良好机械性能被广泛用于航空航天、模具加工,尤其适用于航空结构件和对高强度和耐蚀性有较高要求的高应力结构件的生产[1] [2] [3] [4] [5]。然而,由于空气中的水分以及细小颗粒物会对铝合金表面侵蚀污染,导致铝合金零件在实际使用过程中,表面生成氧化膜,影响铝合金产品的使用及寿命[6]。因此,在铝合金产品的生产制造和再制造工艺的过程中,都需要对零件表面的氧化层进行清洗处理。机械打磨法会对基材表面造成损害,传统的化学法存在着操作复杂、污染严重的问题,而激光清洗技术具有无接触等优势。它可以达到自动清洗的效果,适用范围广泛,清洗效果好。

Zhang FD 等[7]用激光清洗 AA7024 铝合金表面原始氧化层,研究得出,激光在一定的能量范围内清洗原始氧化层后,铝合金基材表面在激光作用下会再热氧化,生成耐腐蚀性能更好的新氧化层。招观荣等[8]采用纳秒脉冲激光器,在不同的工艺参数下对 Q235 钢表面污染漆层进行除漆试验,研究表明,激光清洗通过选取合适的工艺参数,不仅可去除表面污染漆层,还能在很大程度上不损伤基材。陈一鸣等[9]采用脉冲光纤激光器对 5A06 铝合金进行清洗,探究并优化了氧化膜清洗工艺,并提出了氧化层的剥离机制。Ma 等[10]通过研究不同工艺参数对氧化膜清洗效果的影响,探究了平均功率、重复频率、激光光斑重叠率对表面完整性的影响,并获得了激光清洗工艺参数对表面性能的影响规律。Zhu 等[11]通过研究能量密度对清洗效果的影响,得到了激光清洗的最优参数,获取了激光清洗对试样耐磨耐蚀性能的影响规律。邱太文等[12]采用不同脉冲频率和脉冲宽度的纳秒激光开展 2024 铝合金表面漆层的研究。探讨了不同激光工艺参数下的除漆效果以及基材表面的损伤情况,并获得了激光清洗对表面显微硬度的影响规律。王蔚等[13]以 5083 铝合金为研究对象,采用纳秒脉冲光纤激光器对其表面附着的阳极氧化膜进行清洗实验的研究。探究了不同参数对激光清洗的影响。研究表明,脉冲频率影响扫描振镜方向的光斑

搭接率, 激光行进速度影响清洗方向的光斑搭接率, 在过高的激光能量下清除氧化膜时会造成基体二次氧化。

通过上述研究分析纳秒脉冲激光更适用于清洗铝合金表面氧化层。本文通过模拟激光清洗铝合金表面氧化膜, 改变激光功率模拟材料被清洗后表面温度变化, 并采用脉冲光纤激光清洗机开展 7075 铝合金氧化膜的清洗工艺实验研究, 利用金相显微镜观察清洗后的形貌, 三维表面测量仪测量清洗后的表面粗糙度, 结合 X 射线能谱仪(EDS)对试样表面的元素含量进行分析。模拟结合试验确定清洗阈值, 且分析激光功率对清洗效果的影响规律。

2. 激光与铝合金表面氧化膜相互作用的温升模型

基体表面的污染物受到激光辐照时, 表面吸收能量后, 污染物吸收激光的能量导致温度升高[14]。当吸收的能量足够高时, 待清洗物表面的温度可能瞬间超过其熔、沸点。此时污染物会发生物理化学反应, 包括烧蚀、气化等, 导致污染物消失实现激光清洗。由于激光清洗的过程复杂, 影响因素较多, 故为了简化模型, 在对温度场模拟时进行以下假设: 氧化膜与基体均匀且各向同性; 忽略热传导中的辐射和对流; 不考虑材料吸收热量后产生形变的影响。由于激光光斑的尺寸大于激光脉冲作用时间内热量的传播深度, 可近似地按一维热传导问题处理, 将板材视为半无限大物体, 一维热传导方程如下[15]:

$$\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = (1-R)\alpha I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

式中, T 为温度, ρ 为材料的密度, c 为比热容, k 为热传导系数, R 为材料表面对激光的反射率, α 为吸收系数, I_0 为激光功率密度, 假设材料热物理性质不随温度变化, 将激光视为表面热源, 且不考虑辐射热损失及相变, 则边界条件为:

$$\begin{aligned} -k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} &= (1-R)I_0 \\ k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

当 $x=0$ 时, 表面吸收的功率密度为 $(1-R)I_0$, 根据上述方程及边界条件求解可得:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{2(1-R)I_0}{k} \left[(\lambda t)^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\lambda t}} \right) \right] \quad (3)$$

式中, $\operatorname{ierfc}(u)$ 为互补误差函数, 极值条件下 $\operatorname{ierfc}(0) = 1$, $\operatorname{ierfc}(\infty) = 0$, 激光能量在材料内部的扩散深度为 τ 为加热时间, 对于脉冲激光来说, 即脉冲宽度。脉冲宽度越大, 激光能量能够作用到的材料深度就越大, 激光通过烧蚀作用可以去除的涂层厚度随之增加。

$$D = 2\sqrt{\alpha\tau} \quad (4)$$

激光作用区域温度升高, 同时会发生局部区域的升温膨胀, 热能从高温区域向低温区域传递, 这是宏观表现。微观表现为粒子之间的运动, 光子吸收能量从低能级向高能级跃迁, 与材料内部粒子相比, 表面粒子的运动更加剧烈, 不平衡的热运动使粒子之间相互作用, 粒子的碰撞进行能量交替, 实现新平衡, 和宏观上温度传递一致。

当激光作用于各向同性的均匀材料时, 材料表面热传导的偏微分方程一般形式为[15]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) \quad (5)$$

(ρ 、 C 、 K 分别为材料密度，材料比热容，材料热导率。)

激光能量为一种表面光源，激光在表面瞬间全部转化为热能，有 $Q = 0$ ，激光作用过程不存在体积热源。在一定边界条件下，设热导率 K 为常数，热传导方程可转化为：

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T(x, y, z) \quad (6)$$

3. 数值模型

采用有限元软件对物理过程进行仿真研究，氧化铝和 7075 铝合金热物性参数如表 1 所示。

Table 1. Thermal physical parameters of alumina and 7075 aluminum alloy

表 1. 氧化铝和 7075 铝合金热物性参数表

参数	氧化铝	7075 铝合金
导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.84	156
比热容($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1530	921
密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	4080	2800
熔点(K)	2327	933
气化点(K)	3250	

激光作用在材料表面的几何模型见图 1。在模拟试验中，激光垂直的辐照在基体—氧化层表面，并沿着 x 正方向进行高速移动，对激光清洗过后的温度场进行瞬态分析。

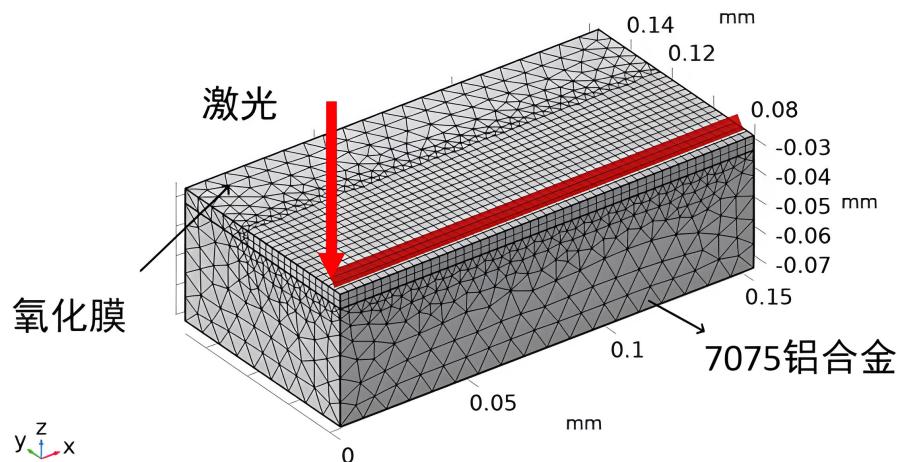


Figure 1. Geometric model of laser acting on the surface of a material

图 1. 激光作用在材料表面的几何模型

如图 2 所示为纳秒脉冲激光在不同功率条件下，清洗后材料表面温度场的分布。在其他参数一定的条件下，经模拟计算当激光功率为 30 W、32 W、34 W、36 W、38 W、40 W 时，氧化膜表面的峰值温度分别为 3439 K、3980 K、4411 K、4771 K、5106 K、5354 K。逐步提升激光功率，激光作用在材料表面部分区域的能量增加，材料表面的温度也随之提升。

由于铝合金表面的氧化膜仅有 $5\ \mu\text{m}$ ，无法仅从表面温度判定氧化膜的去除程度和清洗后基底的受损程度，所以如图 3 添加了不同激光功率试样切面温度场的分布，通过对模拟后温度场云图添加过滤器，对超过氧化膜的气化温度的区域进行过滤，以便观察不同激光功率下氧化膜的去除量。根据温度到达氧

化膜的气化点来界定氧化膜是否被去除，可观察到随着激光功率的增加，由材料表面向材料内部传递的温度增大，氧化膜的去除量也随之增加。

如图 4(a)所示为不同激光功率纳秒脉冲激光温度变化曲线，不同激光功率导致激光作用过程中材料温度变化较大。激光清洗 7075 铝合金表面氧化膜时应考虑基体的损伤情况，所以仿真时在铝合金基底表面添加探针可以得知基底表面温度分别为 798 K、936 K、1050 K、1155 K、1260 K、1359 K。如图 4(b)为材料峰值温度变化，随着激光功率的增加，氧化膜与基底温差也随之增大。

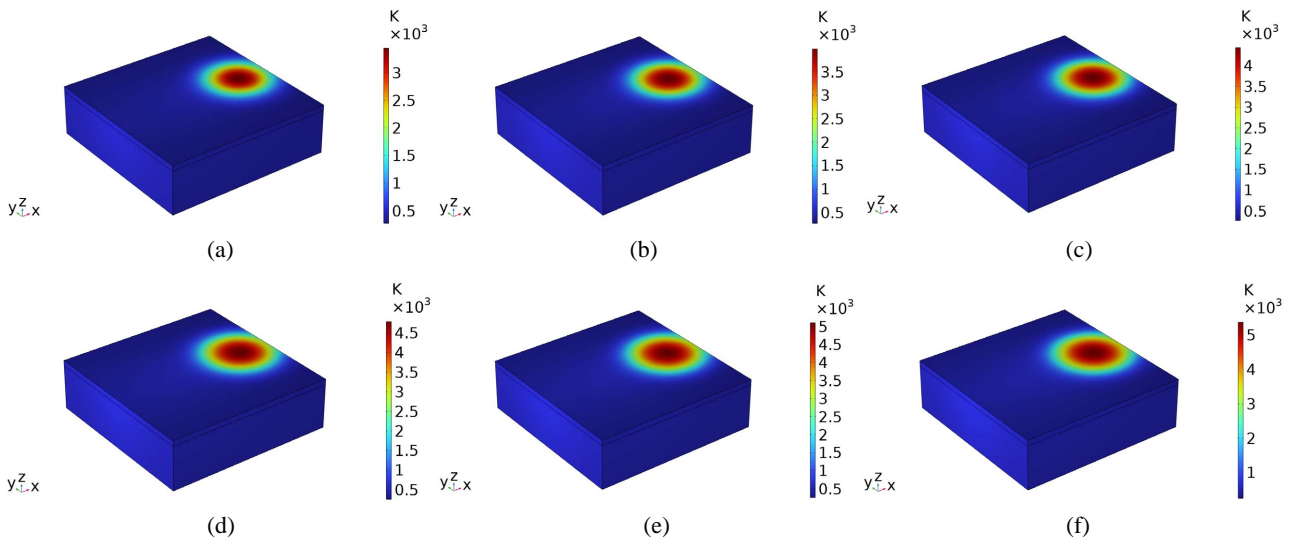
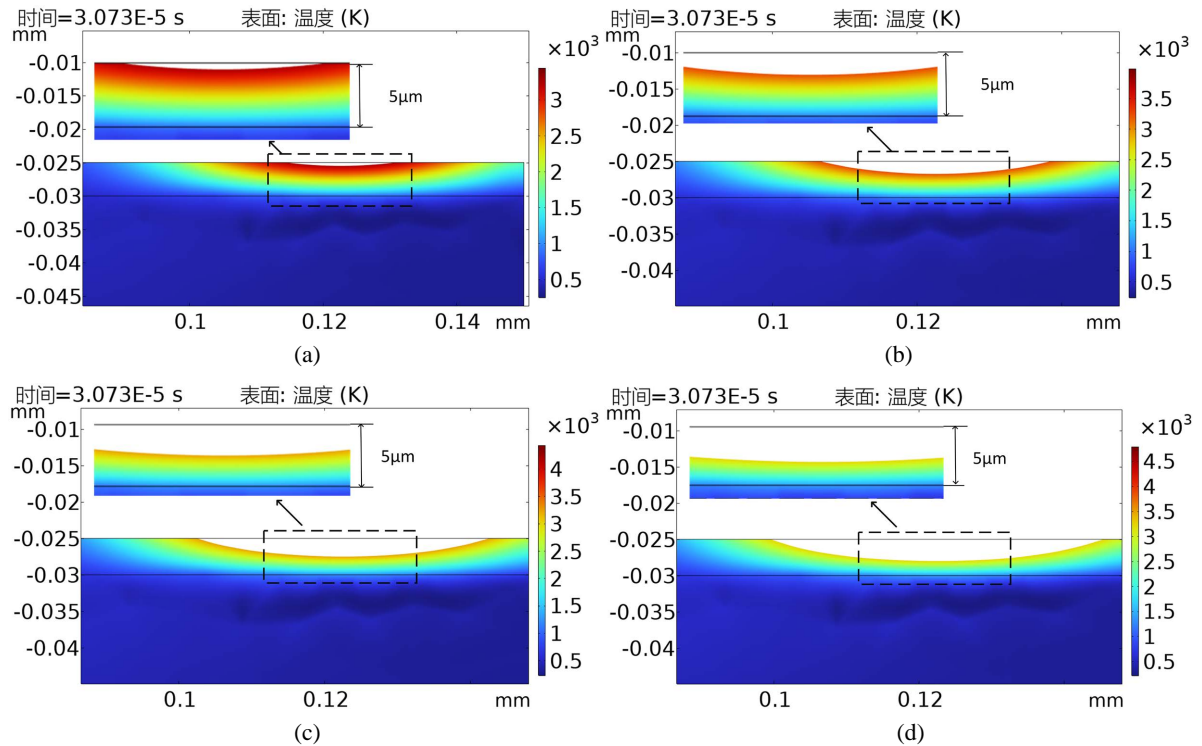


Figure 2. Temperature field distribution on the specimen surface after nanosecond pulsed laser cleaning at the different laser power (a) 30 W, (b) 32 W, (c) 34 W, (d) 36 W, (e) 38 W, (f) 40 W

图 2. 不同激光功率下纳秒脉冲激光清洗后试样表面温度场分布 (a) 30 W, (b) 32 W, (c) 34 W, (d) 36 W, (e) 38 W, (f) 40 W



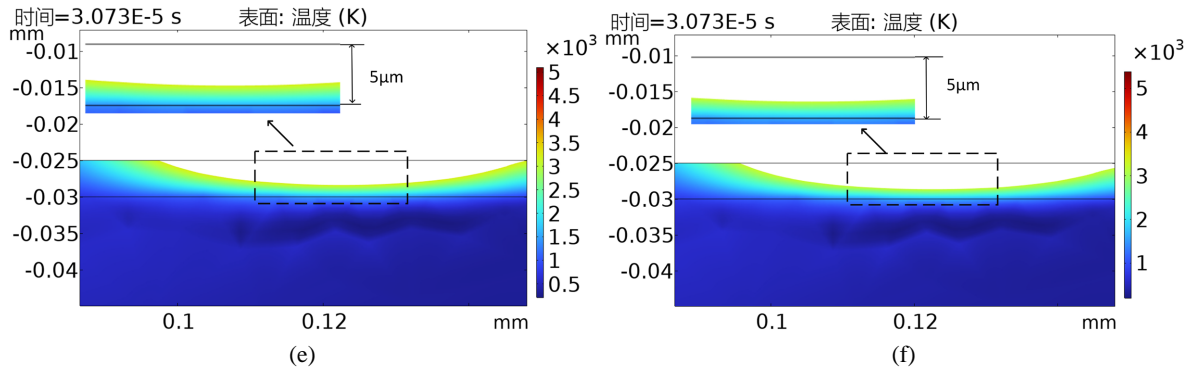


Figure 3. Temperature field distribution of specimen cut surface after nanosecond pulsed laser cleaning at different laser powers (a) 30 W, (b) 32 W, (c) 34 W, (d) 36 W, (e) 38 W, (f) 40 W

图 3. 不同激光功率下纳秒脉冲激光清洗后试样切面温度场分布 (a) 30 W, (b) 32 W, (c) 34 W, (d) 36 W, (e) 38 W, (f) 40 W

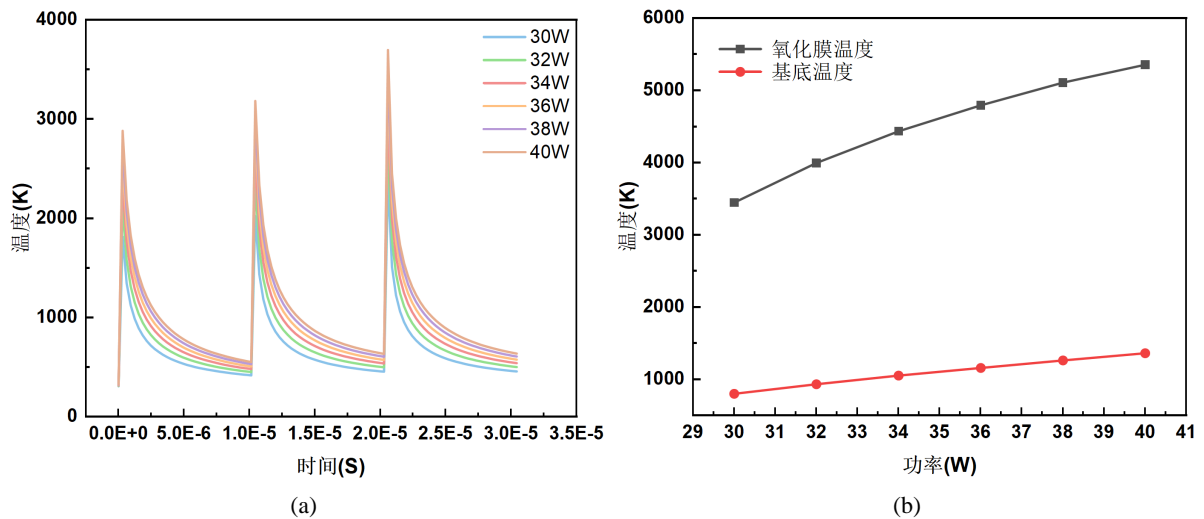


Figure 4. Material temperature change after nanosecond pulsed laser cleaning under different laser powers (a) Nanosecond pulsed laser temperature variation curve, (b) material peak temperature variation

图 4. 不同激光功率下纳秒脉冲激光清洗后材料温度变化 (a) 纳秒脉冲激光温度变化曲线, (b) 材料峰值温度变化

综上所述, 激光功率为 30 W 时, 仅有少部分氧化膜达到气化点被去除, 由于传递到材料内部至基底表面的温度为 798 K, 未到达其熔点, 所以基底未受到损伤。激光功率增至 32 W 时, 表面温度增高至 3980 K, 被去除的氧化膜也增多, 经探针测得基底表面最高温度接近铝合金熔点。功率为 34 W 时, 大部分氧化膜被去除, 但铝合金表面的温度高于熔点较少, 清洗后的材料表面会有轻微的烧蚀痕迹, 激光功率为 36 W、38 W、40 W 时, 虽然氧化膜去除量逐渐增加, 但基底表面温度高于铝合金的熔点较多, 所以烧蚀痕迹明显, 损伤了铝合金基底。因此在激光清洗铝合金表面氧化膜时, 过低的激光功率会导致氧化膜清洗的不完全, 过高的激光功率会导致氧化膜去除的同时损伤铝合金基底, 所以在实际操作中应适当调整, 选择合适的激光功率才能有效清洗且不损伤基底。

4. 试验装置与方法

4.1. 试验材料

试验所选的材料为 7075 铝合金, 将其切割成尺寸为 50 mm × 50 mm × 2 mm 的块体, 铝合金表面生

成平均 5 μm 的自然氧化膜。利用金相显微镜和扫描电镜观察试样表面，如图 5 可观察到其表面带有条纹缺陷和孔洞。再结合图 6 及表 2 能谱分析发现，自然氧化膜中的主要元素有 C、O、Al，其中氧元素含量(原子百分比)为 26.73%。

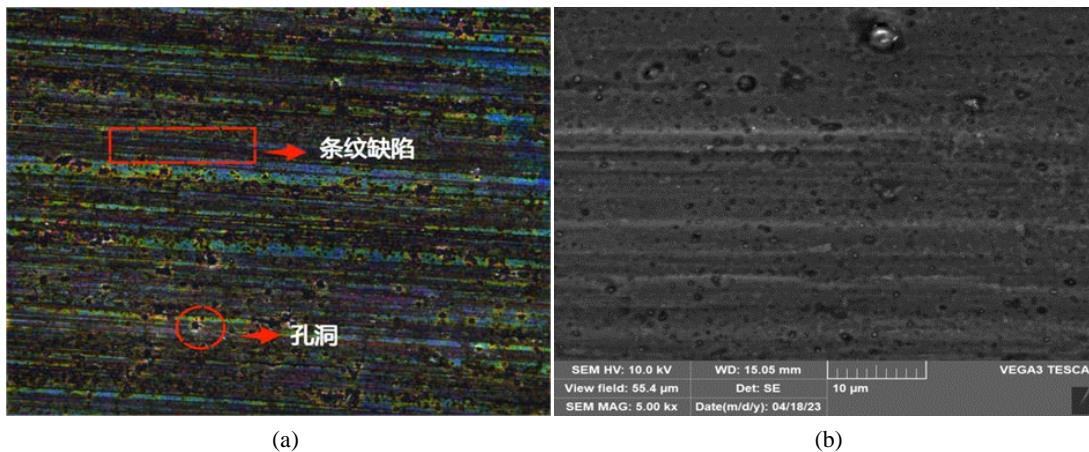


Figure 5. Original morphology of 7075 aluminum alloy after oxidation (a) Original morphology under metallographic microscopy; (b) Original morphology under scanning electron microscopy

图 5. 7075 铝合金氧化后的原始形貌 (a) 金相显微镜下的原始形貌; (b) 扫描电镜下的原始形貌

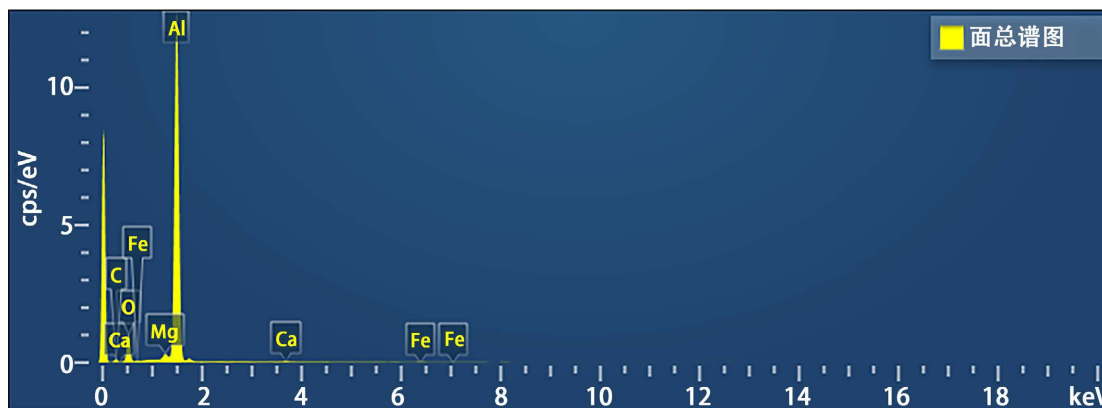


Figure 6. Total spectrum after oxidation of 7075 aluminum alloy

图 6. 7075 铝合金氧化后面总谱图

Table 2. Element content after oxidation of 7075 aluminum alloy

表 2. 7075 铝合金氧化后元素含量

面总谱图				
元素	线类型	重量百分比	Wt % Sigma	原子百分比
O	K 线系	19.65	0.29	26.73
Al	K 线系	70.18	0.51	56.59
C	K 线系	8.60	0.57	15.58
Ca	K 线系	0.29	0.06	0.16
Fe	K 线系	0.40	0.12	0.15
Mg	K 线系	0.88	0.06	0.79
总量		100.00		100.00

4.2. 试验装置

激光清洗 7075 铝合金表面氧化膜实验装置如图 7 所示。主要由脉冲激光清洗机及其它辅助设备等组成。激光工艺参数如表 3 所示, 如表 4 选择激光功率在 30 W~40 W 范围内分为 6 组进行清洗试验。使用金相显微镜观察清洗后表面微观形貌, 三维表面测量仪检测表面粗糙度。通过能谱分析确定表面元素含量, 以激光清洗后试样表面的氧含量为检验依据, 检验铝合金氧化膜的清洗效果。使用硬度测量计测量表面硬度变化。综合分析功率和脉冲重复频率对 7075 铝合金表面形貌和元素含量的影响规律, 探究激光清洗铝合金氧化膜的最佳加工参数。

Table 3. Laser cleaning process parameters

表 3. 激光清洗工艺参数

参数	数值	单位
激光功率(P)	30/32/34/36/38/40	W
脉冲宽度(τ)	100	ns
脉冲频率(f)	98	kHz
光斑直径(D)	50	μm
扫描速度(v)	2450	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Table 4. Nanosecond pulsed laser cleaning aluminum alloy oxide film test group

表 4. 纳秒脉冲激光清洗铝合金氧化膜试验分组

试验编号	功率(W)	脉冲重复频率(kHz)	扫描速度(mm/s)	脉宽(ns)
1	30			
2	32			
3	34			
4	36	98	2450	100
5	38			
6	40			

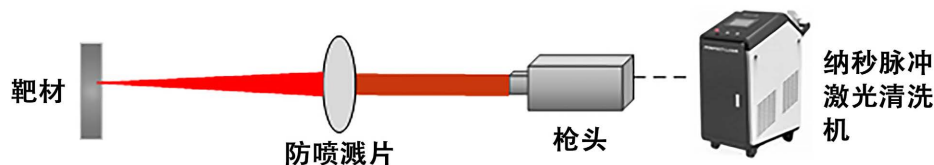


Figure 7. Schematic diagram of the experimental device for laser cleaning of oxide film on the surface of aluminum alloy

图 7. 激光清洗铝合金表面氧化膜实验装置示意图

5. 结果与分析

5.1. 不同激光功率下氧化膜清洗效果分析

为探究激光功率对激光清洗铝合金表面氧化膜的影响, 使其他参数不变, 采用纳秒脉冲激光功率在 30 W~40 W 范围内清洗铝合金表面的氧化膜。如图 8 所示为不同功率下纳秒脉冲激光清洗后试样的微观形貌图, 功率设置为 30 W 时, 部分铝合金显露出来, 大部分氧化膜依然附着在铝合金基底表面。增加功

率至 32 W，铝合金露出的面积增加，氧化膜大部分被去除，仅有少部分黄色氧化膜存在。激光功率调至 34 W 时，经过清洗的表面，铝合金完全露出，呈原本的亮白色，氧化膜被完全去除且观察其表面未见铝合金损伤。功率调至 36 W、38 W、40 W 时，发现虽然氧化膜已经被完全清洗干净，但由于功率过大致使清洗后的表面出现凹坑且凹坑随着功率的增加而增大，对靶材表面产生损伤。经观察铝合金生产加工产生的圆形孔洞也随之变大。这是由于激光清洗时产生的冲击作用，使重熔后的铝合金沿激光扫描轨迹的两边流动，导致样品表面产生纹路，原有的孔洞也增大。与此同时，由于激光能量过大，样品表面的高温使样品二次氧化，从而纹路底部的颜色明显加深。

通过对纳秒脉冲激光清洗后的铝合金表面二维形貌分析可得出：随着纳秒脉冲激光功率增大，激光作用在材料表面的能量随之增大，这直接导致待清洗材料表面形貌发生明显变化。激光功率较低时，作用在材料表面的能量较低，从而导致氧化膜清除不完全，激光功率过高时，氧化膜被去除的同时也损伤了基底，致使铝合金基底出现重融现象。

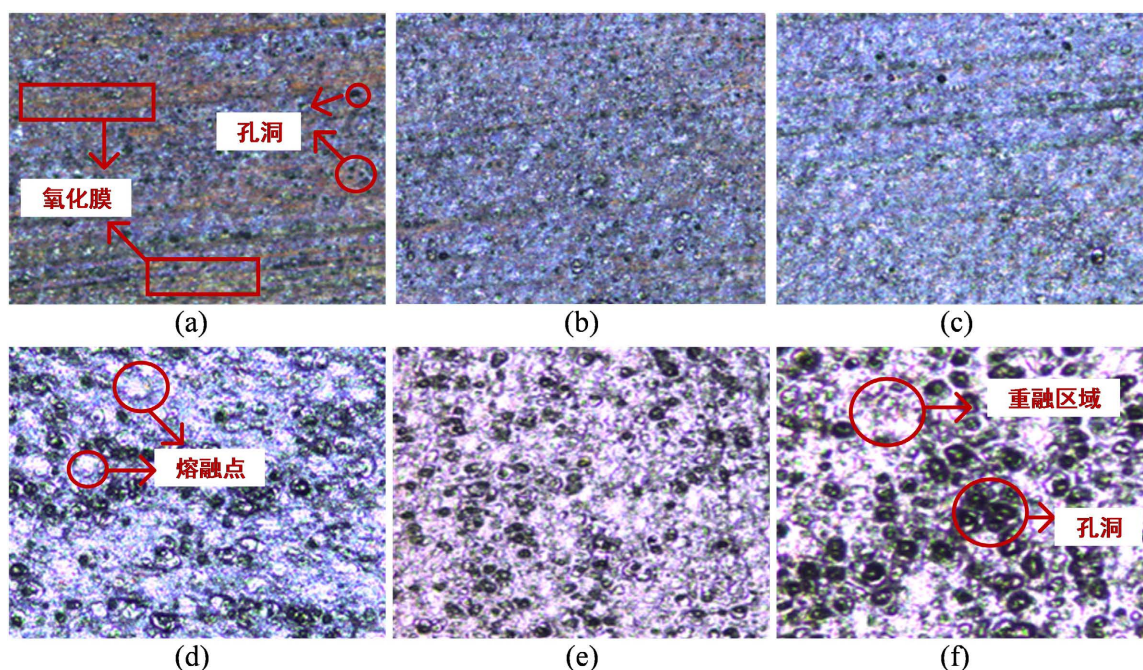


Figure 8. Micro-morphology of specimens after nanosecond pulsed laser cleaning at different powers (a) 30 W, (b) 32 W, (c) 34 W, (d) 36 W, (e) 38 W, (f) 40 W

图 8. 不同功率下纳秒脉冲激光清洗后试样的微观形貌图 (a) 30 W, (b) 32 W, (c) 34 W, (d) 36 W, (e) 38 W, (f) 40 W

5.2. 表面粗糙度分析

表面粗糙度与机械零件的配合性质、耐磨性、疲劳强度、接触刚度、振动和噪声等有密切关系，对机械产品的使用寿命和可靠性有重要影响[16]，所以清洗后的材料表面的粗糙度是衡量清洗效果好坏的重要标准之一，表面粗糙度越小，则表面越光滑。为了进一步确定清洗后铝合金基底是否损伤，故采用三维表面测量仪测试清洗后表面的粗糙度。

由图 9 不同功率清洗后表面粗糙度变化曲线可知，固定激光脉冲频率为 98 kHz，扫描速度为 2450 mm/s 时，随着功率的增加，表面粗糙度逐渐降低后明显增高；功率为 30 W 时，氧化膜逐渐被去除，随着功率的增加，被清洗的氧化膜逐渐增多，所以表面粗糙度逐渐上升。当功率为 34 W 时，氧化膜被去除且表面无烧蚀产生的凹坑，表面平整，所以在此参数下，测得表面粗糙度值最低。当激光功率从 34 W 增

加至 40 W 时，氧化膜被去除的同时，多余的能量使铝合金基底损伤，产生熔融的凹坑，随着激光功率的增大，激光对材料表面的作用增强，铝合金受损所产生的凹坑也随之加剧，所以在功率从 34 W 增加至 40 W 时，表面的粗糙度逐渐上升。

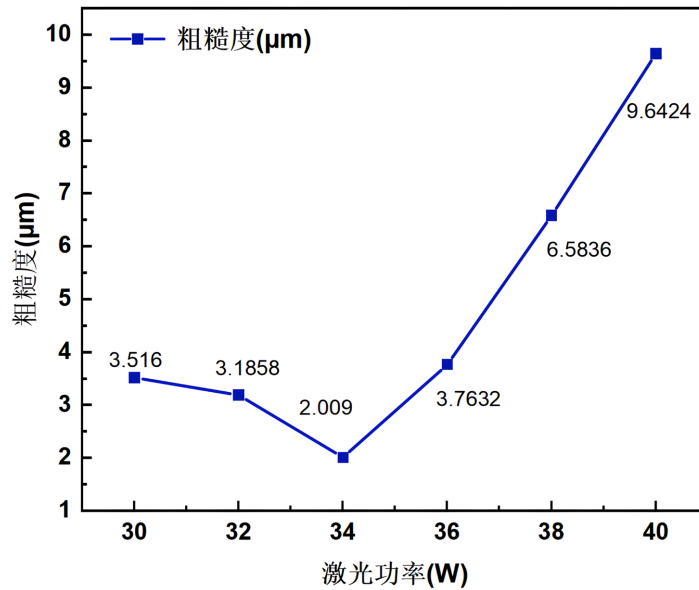


Figure 9. Changes in surface roughness of target material after laser cleaning at different powers
图 9. 不同功率下激光清洗后靶材表面粗糙度变化

5.3. EDS 分析

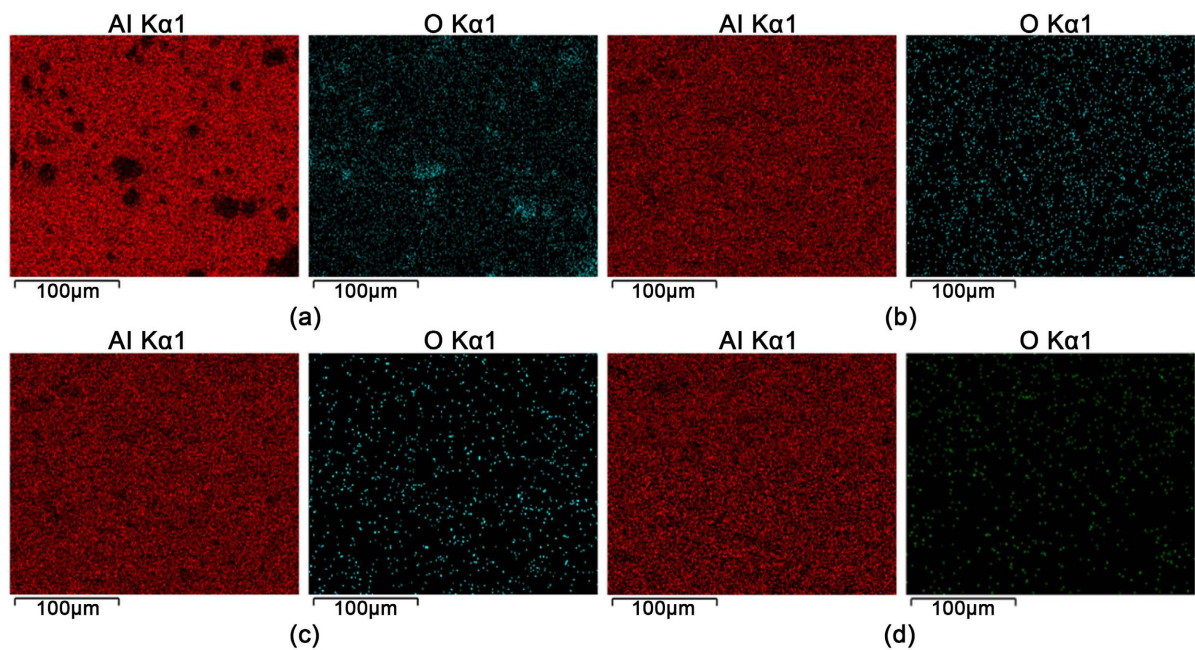


Figure 10. Distribution of elemental Al and O on the surface of laser cleaned samples (a) Sample 1 (not cleaned), (b) Sample 2 (32 W), (c) Sample 3 (34 W), (d) Sample 4 (38 W)

图 10. 激光清洗样品表面上 Al 元素和 O 元素的分布图 (a) 样品 1 (未清洗), (b) 样品 2 (32W), (c) 样品 3 (34 W), (d) 样品 4 (38 W)

激光清洗铝合金表面氧化膜时,选取不同的工艺参数,激光清洗的效果差异很大,为了使清洗达到好的效果,选取合适的参数是至关重要的。根据测得的表面二维形貌和表面粗糙度可初步确定清洗阈值,为了进一步验证,本实验采用能谱仪对清洗后的表面进行元素种类和含量分析。结果如图 10 激光清洗样品表面上 Al 元素和 O 元素的分布图,及图 11 样品 1-4 氧元素和铝元素的重量百分比变化所示。通过测量试样表面元素含量可知:样品 4 与其他样品相比较 O 含量最低,证明氧化膜被清除彻底但结合其微观形貌发现靶材表面轻微损坏,存在烧蚀痕迹且粗糙度较高。根据如图 11 观察到样品 3 和样品 4 中 O 元素含量相差不大,经观察样品 3 的表面形貌得知氧化膜被去除并且未见基体损伤,且测量得出的表面粗糙度达到最低值,所以综合分析在此参数下清洗铝合金表面氧化膜效果理想。

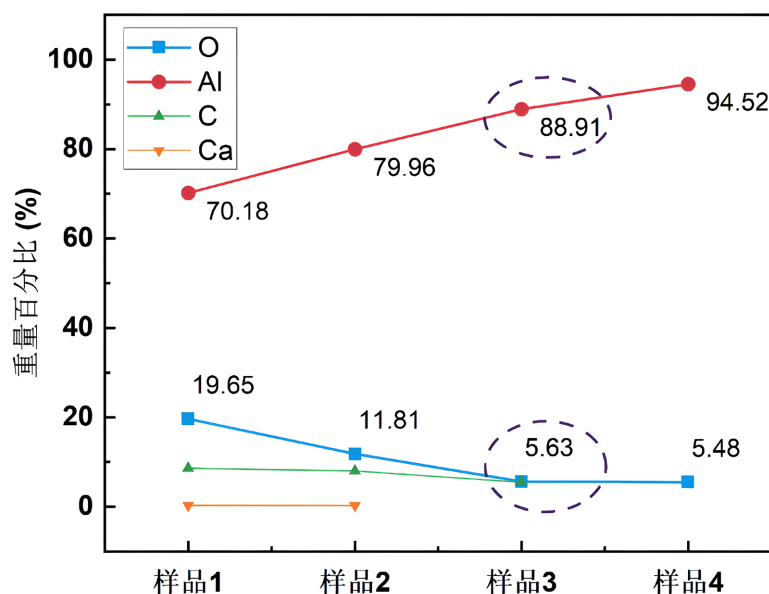


Figure 11. Percentage change in weight of oxygen and aluminum under different laser parameters in samples 1-4

图 11. 样品 1-4 氧元素和铝元素的重量百分比变化

5.4. 硬度分析

经里氏硬度计检测生成氧化膜前后的硬度分别为 409 HL、393 HL,到达清洗阈值时测得硬度增大至 432 HL。清洗后的表面硬度明显增大是由于当激光束照射到材料表面时,激光能量会被吸收并转化为热能,使材料表面温度迅速升高。这种局部加热使得材料表面发生热膨胀和热应力,从而改变了材料的晶体结构和组织状态,提高了铝合金硬度。

6. 总结

本文采用不同参数的纳秒脉冲激光对表面带有厚约 5 μm 氧化层的 7075 铝合金试样进行了激光清洗试验,通过观察试样的微观形貌和表面元素成分、表面粗糙度及里氏硬度变化,分析了表面除氧化层效果以及基材的表面损伤情况,得到如下结论:

1) 通过观察清洗后基材表面的宏观与微观形貌,对除氧化膜效果以及激光对基材表面的影响进行了分析,获得了 7075 铝合金表面氧化层的最优激光清洗参数(激光功率 34 W),在参数下可以完全去除试样表面的氧化层,且基材表面未发生熔化,微观形貌接近原始基材。对激光清洗后的试样进行 EDS 分析,结果发现其表面氧的含量最低,这表明在该参数下进行激光除氧化层效果最佳。

2) 激光功率会对试样表面氧化层的清洗效果产生影响。在一定范围内, 随着激光功率的增大, 去除量和粗糙度增大。

3) 使用里氏硬度计检测靶材后发现, 在清洗阈值下清洗后的表面硬度大于原始基材的硬度, 这是由于当激光作用在材料上, 激光能量被铝合金表面吸收并转化为热能, 局部加热会使得材料表面发生热膨胀和热应力, 从而改变了材料的晶体结构和组织状态。

本文通过数值模拟和激光清洗实验相结合的方式, 探究了工艺参数对激光清洗效果的影响, 但仍需要拓展及完善, 为了激光清洗后的表面再制造, 对清洗后 7075 铝合金表面的耐腐蚀等性能进行测试是至关重要的。

参考文献

- [1] 熊柏青, 闫宏伟, 张永安, 等. 我国航空铝合金产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 88-95.
- [2] 宋友宝, 李龙, 吕金明, 等. 7xxx 系铝合金焊接研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 492-501.
- [3] Wang, H., Luo, Y., Friedman, P., *et al.* (2012) Warm Forming Behavior of High Strength Aluminum Alloy AA7075. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, 1-7.
- [4] Zhou, J., Wang, B., Lin, J., *et al.* (2014) Forming Defects in Aluminum Alloy Hot Stamping of Side-Door Impact Beam. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **24**, 3611-3620.
- [5] 丛福官, 赵刚, 田妮, 等. 7xxx 系超高强铝合金的强韧化研究进展及发展趋势[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(10): 23-33.
- [6] 陈康华, 刘允中, 刘红卫. 7075 和 2024 铝合金的固溶组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 819-822.
- [7] Zhang, F.D., Hiu, H., Subka, C., *et al.* (2018) Corrosion Behavior of Laser-Cleaned AA7024 Aluminum Alloy. *Applied Surface Science*, No. 435, 452-461.
- [8] 招观荣, 雷泽勇, 邓健, 黄灿裕. 纳秒脉冲激光在 Q235 表面污染漆层的清洗工艺研究[J]. 机电工程技术, 2023, 52(2): 38-41.
- [9] 陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 王军, 黎硕, 王春明. 铝合金激光清洗机理与质量评估[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 87-94.
- [10] Ma, M.L., Wang, L.M., Li, J.F., *et al.* (2020) Investigation of the Surface Integrity of Q345 Steel Cleaning of Oxidized Mining Parts. *Coatings*, **10**, Article 716.
- [11] Zhu, G.D., Wang, S.R., Cheng, W., *et al.* (2020) Corrosion and Wear Performance of Aircraft Skin after Laser Cleaning. *Optics & Laser Technology*, **132**, Article ID: 106475.
- [12] 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.
- [13] 王蔚, 纪向城, 刘伟军, 等. 5083 铝合金阳极氧化膜激光清洗工艺研究[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 181-196.
- [14] 单腾, 王思捷, 殷凤仕, 等. 激光清洗的典型应用及对基体表面完整性影响的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(11): 11164-11173.
- [15] 孙承纬. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 11-16.
- [16] 郑伟. 铣削镍基合金 Inconel718 涂层刀具切削性能及失效机理研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2012.