

激光清洗工艺参数对 TC4 钛合金表面除漆的影响

刘伟军, 张铭祺, 李强*, 卞宏友, 赵子铭, 张栋

沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 采用脉冲光纤激光器对 TC4 钛合金表面的环氧锌黄漆层进行了激光清洗试验,研究了激光能量密度和激光清洗速度对清洗效果的影响规律,分析了试样清洗后的表面形貌、表面粗糙度以及物相组成,并测量了清洗后基材表面的维氏硬度。研究表明,清洗效果随着激光能量密度的增加或清洗速度的减小而逐渐变好;当激光能量密度为 4.00 J/cm^2 、清洗速度为 3 mm/s 时,清洗后基材表面的物相成分只有 Ti 和 Ti_2O_3 ,没有 CaCO_3 ,说明在此工艺参数下漆层已经完全被去除。彻底去除漆层后的钛合金的表面粗糙度与原始基材表面粗糙度相近,粗糙度为 $S_a=2.082 \mu\text{m}$ 。清洗后 TC4 钛合金试样表面的维氏硬度平均值为 368.74 HV ,相比原始硬度约提高了 7.4% 。研究表明,通过合理选择工艺参数,可以有效去除钛合金表面漆层,并获得较好的表面形貌,同时能提升其表面平均硬度。

关键词 激光技术; 激光清洗; TC4 钛合金; 漆层; 能量密度; 清洗速度

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220718

1 引言

钛合金材料因具有强度高、耐腐蚀性好、耐高温性能好、密度小等一系列优点,在航空领域中有着广泛的应用^[1]。在工业领域中,为了提高材料的使用寿命、降低使用成本和增加应用的美观性,材料表面通常会喷涂防腐防锈的附着力较高的涂层^[2]。但在复杂的应用环境下,漆层会出现划伤、剥落、老化等现象^[3],需要除去表面的旧漆,喷涂新漆。现有的除漆方法主要是机械打磨、脱漆剂除漆、喷砂除漆等^[4],普遍存在除漆质量一致性差、基体微损伤、效率低、污染大等问题^[5-6]。激光清洗技术因具有绿色环保、清洗效率高、非接触式、自动化清洗等优势^[7-8],吸引了国内外科研人员的广泛关注,并在相关领域取得了一定的研究进展。

激光除漆的本质就是利用激光脉冲能量在短时间内使基材表面漆层烧蚀、气化或振动剥离去除,达到清洗基材的目的^[9],而激光清洗质量与工艺参数的选择密切相关。目前,国内外研究学者在激光除漆技术的工艺研究方面开展了大量工作。郭召恒等^[10]研究了激光功率、清洗速度和脉冲频率对 HT250 铸铁除漆后的表面形貌、表面粗糙度和除漆率的影响规律,最后得出了最优除漆工艺参数。蒋一岚等^[11]通过选择合适的扫描间距、激光功率密度及扫描次数,成功地将飞机蒙皮表面的两层油漆层完全去除。赵海朝等^[12]研究了清洗速度、脉冲频率和激光功率对除漆质量的影响,并且分

析了激光清洗漆层的过程和作用机制。Li 等^[13]比较了不同激光能量密度下金属基体上的涂层烧蚀特征和涂层去除效果。Zhao 等^[14]利用激光能量密度、扫描速度、重复频率进行了正交优化试验,得到了剥离涂层的最佳工艺参数。雷正龙等^[15]通过毫秒与纳秒脉冲激光除漆试验,发现不同时间尺度下的激光除漆质量和除漆机制有很大不同。童懿等^[16]研究发现,脉冲频率对激光除漆后的试样表面形貌、清洗厚度和清洗机理有较大的影响,同时得出提高脉冲频率可获得更好的清洗效果。Kim 等^[17]发现,通过选择合适的能量密度可以有效地去除油漆和氧化层,而不会损伤基材。Mateo 等^[18]研究发现,通过选择合适的激光能量和脉冲频率,能够在不损伤基体的情况下将漆层去除干净。黄华栋等^[19]通过正交试验研究了工艺参数对 Fe 元素质量分数和表面粗糙度的影响规律,确定了最佳的除漆参数。Li 等^[20]研究了不同激光清洗速度和移动速度下清洗后的材料表面形貌、显微组织、化学成分和硬度。

诸多学者虽对不同基材上的不同漆层去除工艺进行了大量研究,但关于钛合金表面漆层的激光清洗过程和清洗后材料表面性能的研究鲜有报道。本文采用 TC4 钛合金表面涂覆的环氧锌黄漆层为试验对象,进行了激光清洗试验,研究了激光能量密度和激光清洗速度对除漆效果的影响规律及激光清洗后的表面形貌和表面粗糙度,并分析了原因。最后通过物相分析确

收稿日期: 2022-03-30; 修回日期: 2022-04-29; 录用日期: 2022-05-15; 网络首发日期: 2022-05-26

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902022)、辽宁省揭榜挂帅科技攻关项目(2021JH1/10400077)

通信作者: *qlee77@163.com

定了最佳的激光除漆工艺参数。此外,还对激光清洗后的基材维氏硬度进行了研究。

2 试验装置与方法

2.1 试验材料

试验所用的材料为 TC4 钛合金,主要元素为 Ti、Al 和 V 等^[21]。用剪板机将 TC4 钛合金板材切割成尺

寸为 15 mm×15 mm×2 mm 的长方体试样块,在试样的表面均匀喷涂约 35 μm 厚的灰色环氧锌黄底漆(由环氧树脂、颜料、助剂、硬化剂等组成),其具有良好的附着力且防腐防锈、防水耐磨^[22]。图 1 为光学显微镜下喷漆后的试样截面和漆层表面,可以看出,钛合金表面漆层的分布比较均匀并且漆层表面分布着圆弧状的大小不均的颗粒。

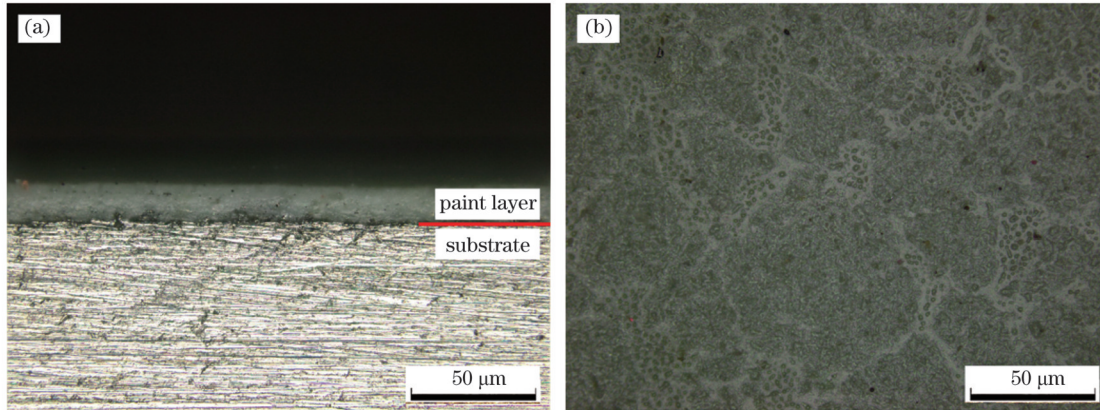


图 1 形貌图。(a)喷漆后的试样截面;(b)漆层表面

Fig.1 Topography images.(a)Section of specimen after painting;(b)paint layer surface

2.2 激光清洗试验装置与试验方法

图 2 是激光清洗系统的试验装置示意图,该装置主要由脉冲光纤激光器、扫描振镜系统、控制系统、移动工作台、传输系统及其他辅助设备等组成。激光发

射口被安装在机器人上,激光器在控制系统作用下发出激光,通过扫描振镜在 X 方向的往复摆动和机器人在 Y 方向的移动,实现试样表面的激光清洗。

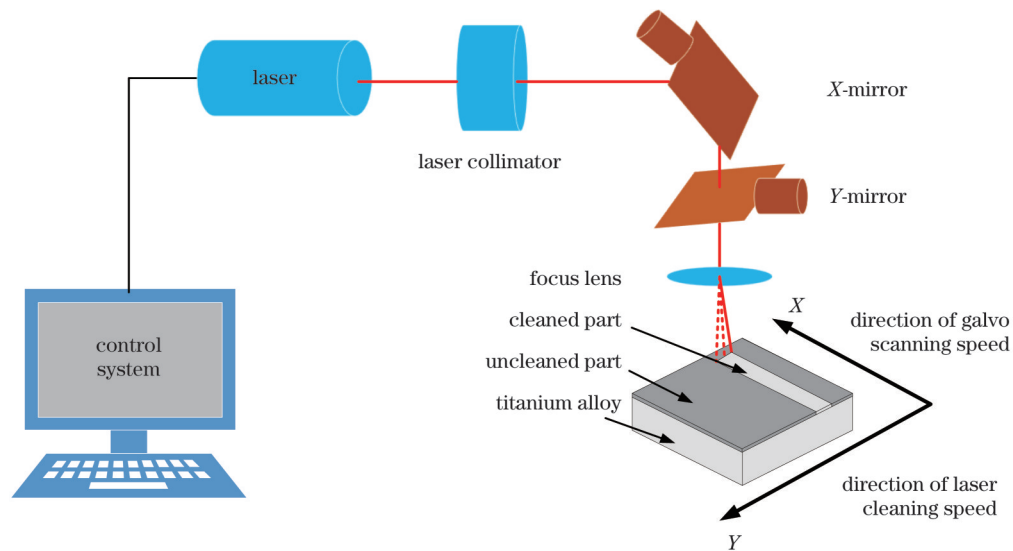


图 2 激光清洗系统示意图

Fig.2 Schematic of laser cleaning system

由于漆层较薄,为了提高清洗效率,本试验均采用一次扫描。试验中使用的脉冲光纤激光器的波长为 1064 nm,最大功率为 1000 W,聚焦到试样表面的激光光斑为边长为 1.5 mm 的方形平顶光斑,平顶光斑内的能量是均匀分布的^[23]。设定脉宽为 70 ns,脉冲频率为 10 kHz,扫描线宽为 10 mm,振镜扫描速度为 3000 mm/s,选择激光能量密度为 2.22~4.44 J/cm²,

激光清洗速度为 3~9 mm/s。

利用激光共聚焦显微镜分析清洗后的表面形貌并测量表面粗糙度,测量区域大小为 1280.088 μm×1279.821 μm,分析脉冲激光对 TC4 钛合金表面漆层的清洗过程。利用 X 射线衍射仪(XRD)对激光清洗漆层的物相变化进行表征,试样扫描角度为 5°~80°,扫描速度为 8(°)/min。利用显微维氏硬度计测试除漆

前、后的维氏硬度,测量时选择载荷为 1 kg,保荷时间为 15 s,分析脉冲激光在去除漆层的过程中对基材表面性能的影响。

3 结果与讨论

影响激光除漆质量的工艺参数较多,但影响效果较显著的是激光能量密度(e)和激光清洗速度(v)。激光能量密度^[24-25]可以表示为

$$e = \frac{q}{L^2}, \quad (1)$$

$$q = \frac{P}{f}, \quad (2)$$

式中: q 为单脉冲能量; L 为方形光斑的边长; P 为脉冲激光的平均功率; f 为脉冲频率。为了研究不同激光能量密度和清洗速度下的漆层去除情况以及过大能量密度对基材的影响,通过改变激光功率来确定激光能量密度,激光功率以最大功率的 10% 为变化量依次降低,直到降到最大功率的 50%,计算后得到的能量密度分别为 4.44、4.00、3.56、3.11、2.67、2.22 J/cm²。清洗速度从 9 mm/s 逐渐降到 3 mm/s。

3.1 激光能量密度对除漆效果的影响

为了研究激光能量密度对除漆效果的影响,选择激光能量密度在 2.22~4.44 J/cm² 范围内,清洗速度为 3 mm/s,得到的二维形貌如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,当能量密度为 2.22 J/cm² 时,漆层表面出现了许多分布不均且大小不同的凹坑,表面漆层相对比较完整;从图 3(b)可以看出,当能量密度为 2.67 J/cm² 时,漆层表面呈暗黑色,钛合金基体开始显露出来,且露出的基体区域呈现大小不一的不规则分布的圆弧形貌;从图 3(c)、(d)可以看出,当能量密度分别为 3.11 J/cm² 和 3.56 J/cm² 时,露出的基体面积逐渐变大,表面覆盖的漆层也逐渐减少;从图 3(e)可以看出,当能量密度为 4.00 J/cm² 时,可明显看到亮色的钛合金基体且表面无残留漆层;从图 3(f)可以看出,当能量密度继续增大到 4.44 J/cm² 时,会出现过度清洗,钛合金表面产生烧蚀损伤^[22],表面呈棕黄色。由式(1)可知,当光斑大小一定时,单脉冲能量与激光能量密度成正比,随着激光能量密度的增加,单脉冲能量增加,激光清洗强度增大,除漆效果也变好。

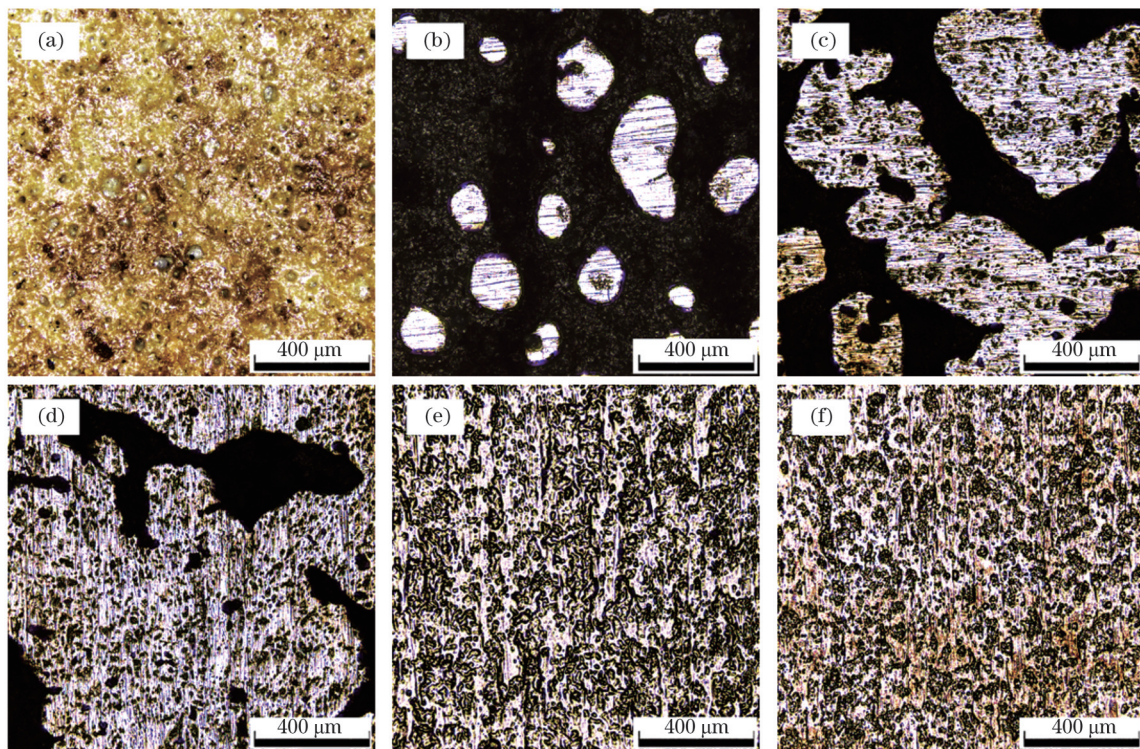


图 3 不同激光能量密度下清洗后的表面二维形貌。(a) 2.22 J/cm²; (b) 2.67 J/cm²; (c) 3.11 J/cm²; (d) 3.56 J/cm²; (e) 4.00 J/cm²; (f) 4.44 J/cm²

Fig.3 Two dimensional surface morphologies after cleaning under different laser energy densities. (a) 2.22 J/cm²; (b) 2.67 J/cm²; (c) 3.11 J/cm²; (d) 3.56 J/cm²; (e) 4.00 J/cm²; (f) 4.44 J/cm²

图 4 是激光清洗速度为 3 mm/s 时不同激光能量密度下试样表面的三维形貌。从图 4(a)可以看出,在试样表面覆盖着的漆层上存在许多大小、深浅不同的凹坑。这是由于油漆中的有机黏结剂在激光的

照射下吸收热量发生热分解,由于气化点低,产生热解气,膨胀气体会突破油漆的约束,释放到空气中^[15],因此油漆表面形成大小不同的凹坑。从图 4(b)可以看出,露出的基材区域为圆弧形的表面形貌,并且其

周围的漆层侧壁较光滑, 基材表面的漆层厚度相对比较均匀。从图 4(c)、(d)可以看出, 残留的漆层表面厚度不均, 尤其是靠近露出基材边缘的区域, 有较高的凸起, 犹如高低起伏的山脉。从图 4(e)可以看

出, 基材表面的漆层被全部去除, 表面形貌平整光滑。从图 4(f)可以看出, 过大的激光能量密度使基材发生损伤, 基材表面的条纹形貌呈现出明显的高低差异。

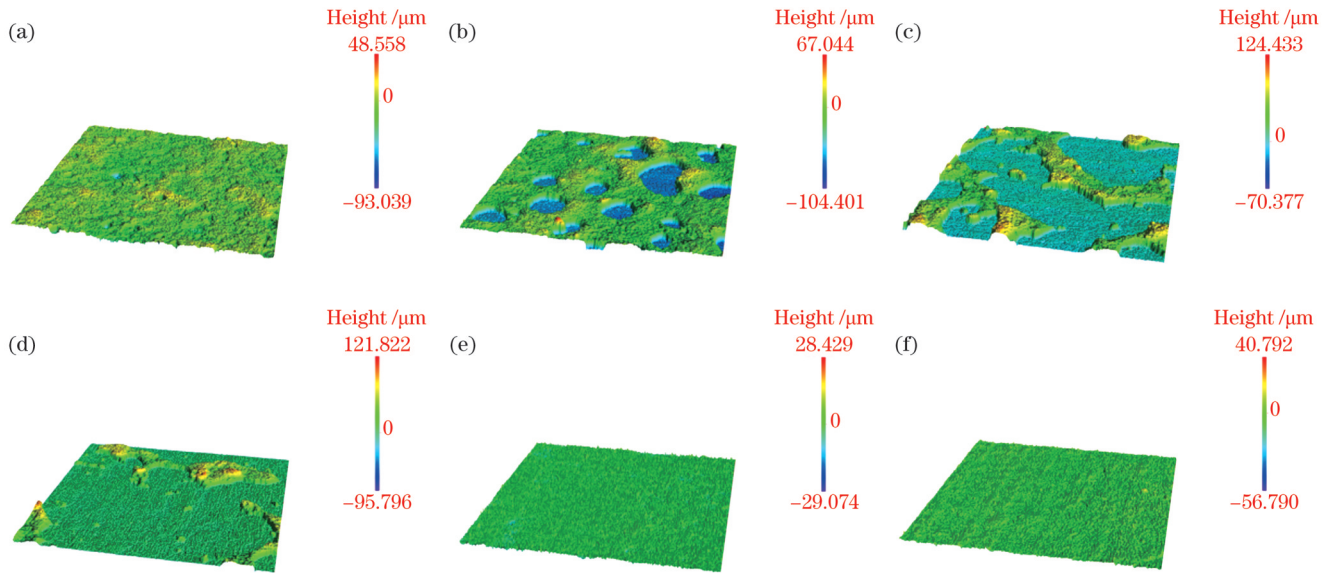


图 4 不同激光能量密度下清洗后的表面三维形貌。(a) 2.22 J/cm^2 ; (b) 2.67 J/cm^2 ; (c) 3.11 J/cm^2 ; (d) 3.56 J/cm^2 ; (e) 4.00 J/cm^2 ; (f) 4.44 J/cm^2

Fig.4 Three dimensional surface morphologies after cleaning under different energy densities. (a) 2.22 J/cm^2 ; (b) 2.67 J/cm^2 ; (c) 3.11 J/cm^2 ; (d) 3.56 J/cm^2 ; (e) 4.00 J/cm^2 ; (f) 4.44 J/cm^2

3.2 激光清洗速度对除漆效果的影响

为了研究激光清洗速度对除漆效果的影响, 选择

激光清洗速度在 3 ~ 9 mm/s 范围内, 能量密度为 4.00 J/cm^2 , 得到的二维形貌如图 5 所示。从图 5(a)可

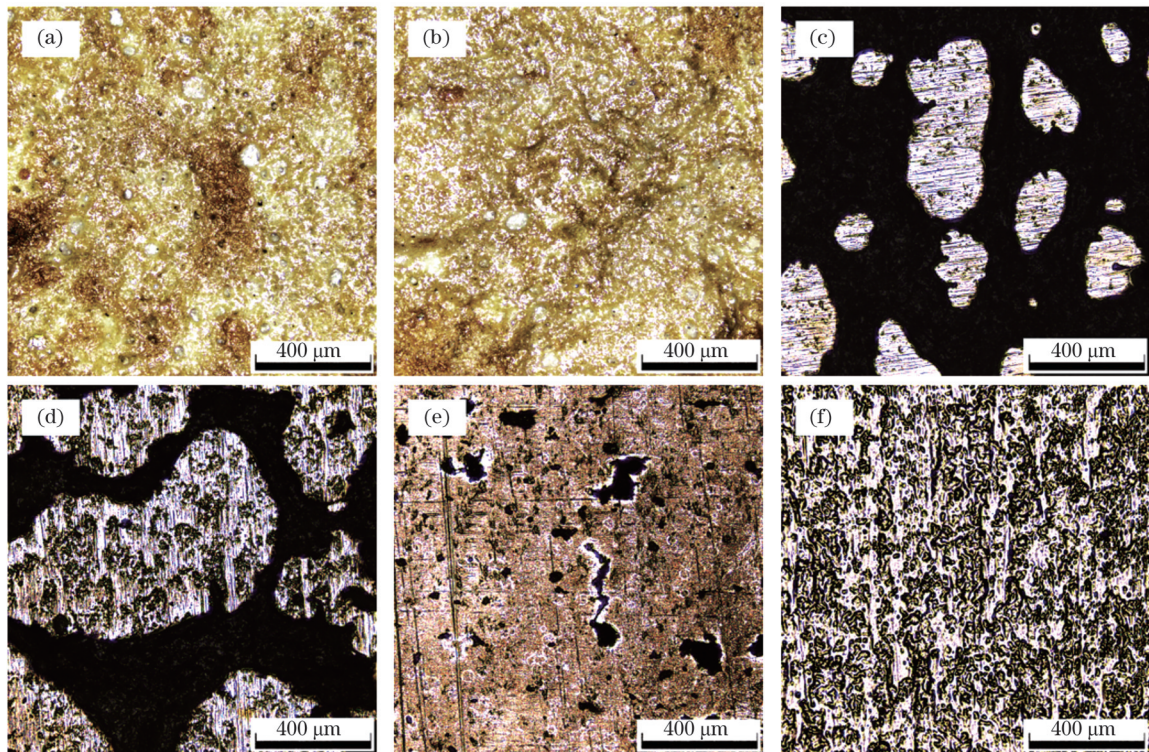


图 5 不同激光清洗速度下清洗后的表面二维形貌。(a) 9 mm/s; (b) 8 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 5 mm/s; (e) 4 mm/s; (f) 3 mm/s
Fig.5 Two dimensional surface morphologies after cleaning under different laser cleaning speeds. (a) 9 mm/s; (b) 8 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 5 mm/s; (e) 4 mm/s; (f) 3 mm/s

以看出,当清洗速度为 9 mm/s 时,过快的激光清洗速度导致漆层吸收的热量较小,试样表面依然存在着相对比较完整的漆层,漆层表面出现许多凹坑和部分凸起。从图 5(b)可以看出,当清洗速度为 8 mm/s 时,清洗速度有所减小,试样表面吸收的激光能量增加,导致热量积累,漆层表面出现了明显的熔融痕迹和较大的熔坑。从图 5(c)~(e)可以看出,当清洗速度为 6 mm/s 时,开始露出基材,并且随着清洗速度的进一步减小,激光作用到漆层的时间逐渐变长,试样表面残留的漆层逐渐减少,由相互连接的片状漆层变为无规则分布的残留漆层颗粒。从图 5(f)可以看出,当清洗速度为 3 mm/s 时,漆层全部去除。由图 5 可知,随着清洗速度的减小,在清洗速度方向上的扫描线之间的光斑搭接率变大,漆层表面的热量积累也逐渐升高,导致漆层被大量去除,除漆效果逐渐变好。最佳工艺参数是能量密度为 4.00 J/cm²,清洗速度为 3 mm/s。在此工艺

参数下,试样表面清洗效果最好,无漆层残留,且基体的损伤最小。

图 6 是激光能量密度为 4.00 J/cm² 时不同激光清洗速度下试样表面的三维形貌。从图 6(a)可以看出,漆层在激光的照射下,表面温度升高导致漆层受热膨胀并发生热分解,漆层表面出现了许多不规则分布的凸起和大量凹坑,且凸起部分圆润光滑。从图 6(b)可以看出,漆层表面出现了较大的熔坑,周围凸起了高峰,说明漆层受热熔化,形成了高低起伏的熔融痕迹。从图 6(c)可以看出,当清洗速度为 6 mm/s 时,基材显露出来,在剩余漆层表面靠近露出基材的区域有部分凸起,但整体表面形貌和厚度分布较均匀,并且漆层表面有许多分布不均的凹坑。从图 6(d)、(e)可以看出,表面依然覆盖着许多片状和颗粒状漆层,且漆层边缘呈圆弧形貌。从图 6(f)可以看出,漆层去除干净后露出了平整光滑的钛合金表面形貌。

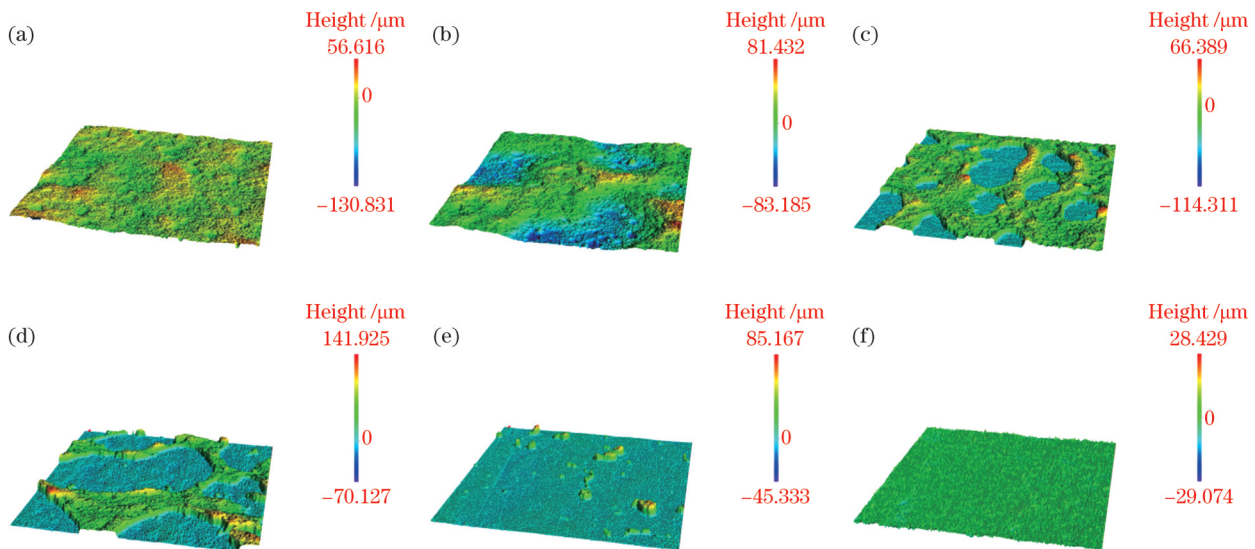


图 6 不同激光清洗速度下清洗后的表面三维形貌。(a) 9 mm/s; (b) 8 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 5 mm/s; (e) 4 mm/s; (f) 3 mm/s
Fig.6 Three dimensional surface morphologies after cleaning under different laser cleaning speeds. (a) 9 mm/s; (b) 8 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 5 mm/s; (e) 4 mm/s; (f) 3 mm/s

3.3 表面粗糙度

表 1 为不同能量密度下的单脉冲能量和激光清洗后的表面粗糙度。从表 1 可以看出,能量密度在 2.22~4.00 J/cm² 范围内时,随着能量密度的增加,表面粗糙度先增大后减小。结合图 4 三维形貌分析认为:当能量密度为 2.22 J/cm² 时,单脉冲能量较小,漆层吸收的激光能量没有使表面温度升高很多,漆层保持得相对比较完整,此时粗糙度较小,为 $S_a=6.439 \mu\text{m}$;当能量密度为 3.11 J/cm² 时,大部分基材已经露出,剩余

漆层受热产生了凹凸不平的表面形貌,如图 4(c) 所示,此时粗糙度达到最大值,为 $S_a=24.790 \mu\text{m}$;随着激光能量密度的增加,漆层吸收的脉冲能量增加,漆层表面的温度升高,更多的漆层被烧蚀、气化去除,表面粗糙度也逐渐减小;当能量密度为 4.00 J/cm² 时,试样的表面粗糙度达到最小,为 $S_a=2.082 \mu\text{m}$,此时表面漆层已经清洗干净,并且与原始 TC4 钛合金表面粗糙度 ($S_a=2.091 \mu\text{m}$) 相接近;当能量密度继续增大到 4.44 J/cm² 时,过大的激光脉冲能量对基材造成损伤,

表 1 不同能量密度下激光清洗后的表面粗糙度

Table 1 Surface roughnesses after laser cleaning under different energy densities

Laser energy density/(J/cm ²)	2.22	2.67	3.11	3.56	4.00	4.44
Single pulse energy /mJ	50	60	70	80	90	100
Surface roughness/ μm	6.439	20.562	24.790	14.006	2.082	2.533

使表面粗糙度变大,如图 4(f)所示,出现了沟壑条纹形貌。

表 2 为不同清洗速度下激光清洗后的表面粗糙度。从表 2 可知,在激光清洗速度从 9 mm/s 降到 3 mm/s 的过程中,表面粗糙度先增加后减小。结合图 6 的三维形貌分析可知,当清洗速度为 9 mm/s 时,激光清洗速度过快,试样表面吸收的热量较小,对漆层的影响不明显,此时粗糙度 $S_a=8.747 \mu\text{m}$;当清洗速度为 8 mm/s 时,漆层受热熔化并凝固,形成明显的熔融痕

迹,此时表面粗糙度变化幅度较大;当清洗速度为 6 mm/s 时,由于露出基材的区域呈现不规则分布的圆弧形貌以及剩余漆层表面出现部分凸起和大量凹坑,此时粗糙度达到最大值 $S_a=24.956 \mu\text{m}$;之后,随着清洗速度的减小,表面粗糙度开始减小,尤其是在清洗速度从 5 mm/s 降到 4 mm/s 的过程中,大部分的片状漆层被去除,试样表面仅有残留的漆层颗粒,所以表面粗糙度减小的幅度较大;当表面漆层清洗干净后,表面粗糙度达到最小,为 $S_a=2.082 \mu\text{m}$ 。

表 2 不同清洗速度下激光清洗后的表面粗糙度

Table 2 Surface roughnesses after laser cleaning under different cleaning speeds

Cleaning speed/(mm·s ⁻¹)	9	8	6	5	4	3
Surface roughness/ μm	8.747	20.268	24.956	23.878	2.764	2.082

3.4 物相分析

通过控制激光能量密度和激光清洗速度,发现当能量密度为 4.00 J/cm²、清洗速度为 3 mm/s 时,钛合金表面漆层基本被清洗干净。激光清洗 TC4 钛合金表面漆层前、后的 XRD 图如图 7 所示,可以看出,漆层主要物质 CaCO₃ 和 TiO₂ 的衍射特征峰非常明显,由于钛合金表面覆盖着较厚的漆层,因此检测不到钛合金

基材 Ti 的衍射特征峰,如图 7(a)所示。试样经激光清洗后, CaCO₃ 和 TiO₂ 的特征峰完全消失,只能检测出钛合金所含有的 Ti 和 Ti₆O 的特征峰,如图 7(b)所示。说明在激光能量密度为 4.00 J/cm²、清洗速度为 3 mm/s 时,钛合金表面的漆层已经全部被去除。

3.5 激光除漆对钛合金维氏硬度的影响

硬度是衡量材料软硬程度的一个指标,指材料对外界物体压陷、刻划等作用的局部抵抗能力。在激光清洗过程中,漆层被烧蚀、气化或振动剥离去除,这个过程基材也会受到一定的影响。使用维氏硬度计测量除漆前、后 TC4 钛合金的维氏硬度,测量时标块上显示的硬度标准差为 $\pm 10 \text{HV}$,压痕为菱形,每个试样分别选取 12 个点进行测试。图 8 为硬度压痕位置示意图和激光除漆前、后 TC4 钛合金维氏硬度的平均值。

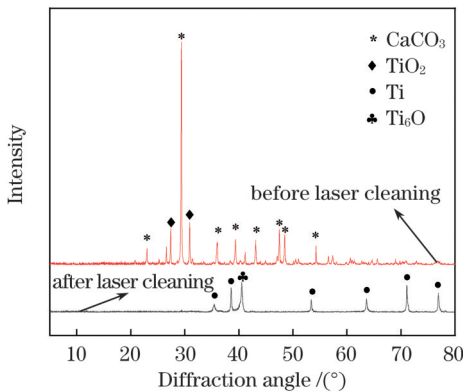


图 7 激光清洗 TC4 钛合金表面环氧锌黄漆层的 XRD 图
Fig. 7 XRD patterns of epoxy zinc yellow paint layer on surface of TC4 titanium alloy after laser cleaning

从图 8(b)可以看出,激光清洗后钛合金表面的平均维氏硬度由 343.48 HV 提高到 368.74 HV,约提高了 7.4%。分析认为,当激光照射到试样表面上时,基体表面温度会升高,由于脉冲激光的作用时间很短(ns 级)以及高温引起的等离子体冲击波所产生的应力影响,钛合金表层及内部组织发生改变,材料的显微硬度增加,这一过程相当于激光冲击强化作用过程。

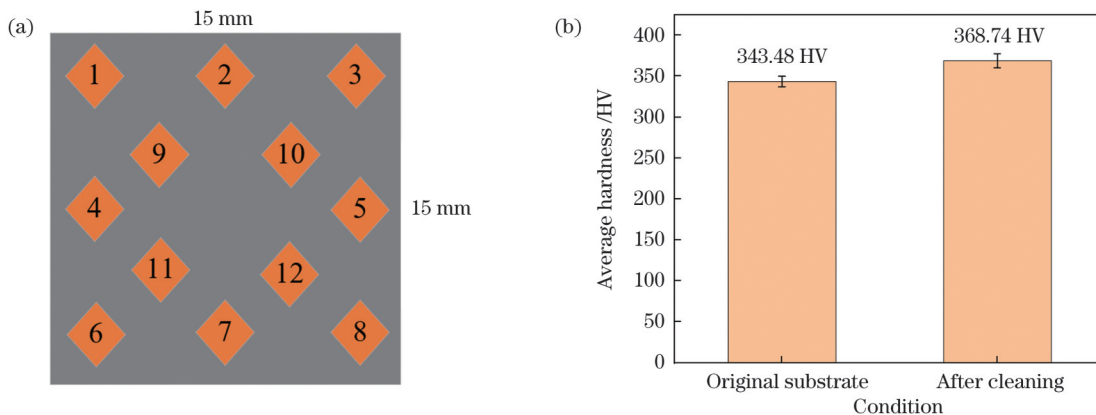


图 8 硬度测试。(a)硬度压痕位置示意图;(b)激光除漆前、后 TC4 的维氏硬度平均值
Fig.8 Hardness testing. (a) Schematic of hardness indentation positions; (b) Vickers hardness average value of TC4 before and after laser paint removal

4 结 论

通过激光清洗技术研究了激光能量密度和激光清洗速度对 TC4 钛合金表面漆层清洗效果的影响,对清洗后试样的表面形貌、粗糙度、物相组成和维氏硬度进行了分析,结论如下:

1) 激光能量密度和激光清洗速度对 TC4 钛合金表面漆层清洗效果有很大影响。随着激光清洗速度的减小,除漆效果逐渐变好;随着激光能量密度的增加,除漆效果逐渐变好,但过大的激光能量密度会导致过度清洗,当激光能量密度为 4.44 J/cm^2 、清洗速度为 3 mm/s 时,基材发生损伤,表现为基材表面部分区域呈现棕黄色,表面粗糙度增加。

2) 激光能量密度和清洗速度对试样清洗后的表面粗糙度有很大影响,随着激光能量密度的增加或清洗速度的减小,表面粗糙度先增大后减小。当能量密度为 4.00 J/cm^2 、清洗速度为 6 mm/s 时,清洗后的试样表面粗糙度最大, $S_a=24.956 \mu\text{m}$; 当能量密度为 4.00 J/cm^2 、清洗速度为 3 mm/s 时,表面粗糙度最小, $S_a=2.082 \mu\text{m}$,这与原始基材表面的粗糙度十分相近。

3) 通过合理选择激光能量密度和清洗速度可以获得较好清洗效果。当能量密度为 4.00 J/cm^2 、清洗速度为 3 mm/s 时,清洗后表面物相分析结果显示不含有 CaCO_3 成分,漆层已经完全被去除。清洗后钛合金表面的平均维氏硬度高于原始基材,激光去除漆层的同时也能够提高 TC4 钛合金的表面硬度。

参 考 文 献

- [1] 梅述文, 成群林, 胡佩佩, 等. TC4 钛合金蒙皮骨架结构件光纤激光焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 83-86.
Mei S W, Cheng Q L, Hu P P, et al. Study on fiber laser welding of skinned skeletal structure titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(3): 83-86.
- [2] 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.
- [3] 贾宝申, 唐洪平, 苏春洲, 等. 脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202010.
Jia B S, Tang H P, Su C Z, et al. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202010.
- [4] Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Laser cleaning performance and mechanism in stripping of polyacrylate resin paint[J]. Applied Physics A, 2020, 126(5): 360.
- [5] 王晓东, 余锦, 貂泽强, 等. 激光脱漆技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050005.
Wang X D, Yu J, Mo Z Q, et al. Research progress on laser paint stripping technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050005.
- [6] 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.
- [7] 邢宏楠, 冉合利, 赵慧峰, 等. 激光清洗技术发展及应用[J]. 清洗世界, 2018, 34(5): 23-31.
Xing H N, Ran H L, Zhao H F, et al. Development and application of laser cleaning technology[J]. Cleaning World, 2018, 34(5): 23-31.
- [8] 雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030005.
Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030005.
- [9] Sun Q, Zhou J Z, Meng X K, et al. Mechanism and threshold fluence of nanosecond pulsed laser paint removal[J]. Rare Metals, 2022, 41(3): 1022-1031.
- [10] 郭召恒, 周建忠, 孟宪凯, 等. HT250 灰铸铁纳秒脉冲激光除漆工艺研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002012.
Guo Z H, Zhou J Z, Meng X K, et al. Nanosecond-pulsed-laser paint stripping of HT250 gray cast iron[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002012.
- [11] 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): 1206003.
Jiang Y L, Ye Y Y, Zhou G R, et al. Research on laser paint removing of aircraft surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1206003.
- [12] 赵海朝, 乔玉林, 杜娟, 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): 0602121.
Zhao H C, Qiao Y L, Du X, et al. Research on paint removal technology for aluminum alloy using pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602121.
- [13] 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.
- [14] Zhao H C, Qiao Y L, Chen S Y, et al. Stripping polyacrylate paint with a pulsed laser: process development and mechanism analysis[J]. Physica Scripta, 2021, 96(12): 125103.
- [15] 雷正龙, 孙浩然, 田泽, 等. 不同时间尺度的激光对铝合金表面油漆层清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602103.
Lei Z L, Sun H R, Tian Z, et al. Effect of laser at different time scales on cleaning quality of paint on Al alloy surfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602103.
- [16] 童懿, 邱太文, 易俊兰, 等. 脉冲频率对油漆漆层激光清洗作用机制的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914009.
Tong Y, Qiu T W, Yi J L, et al. Effect of pulse frequency on laser cleaning mechanism of paint coating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914009.
- [17] Kim J E, Han M S, Kim J D. Removal characteristics of shop-primer paint by laser energy density in Q-switching fiber laser cleaning[J]. Modern Physics Letters B, 2020, 34(07n09): 2040042.
- [18] Mateo M P, Ctvrtnickova T, Fernandez E, et al. Laser cleaning of varnishes and contaminants on brass[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5579-5583.
- [19] 黄华栋, 丁倩倩, 董瑞, 等. 纳秒激光干式除漆的试验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(12): 1570-1575.
Huang H D, Ding Q Q, Dong R, et al. Experimental research on dry paint removal by nanosecond laser[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(12): 1570-1575.
- [20] Li X Y, Wang D, Gao J M, et al. Influence of ns-laser cleaning parameters on the removal of the painted layer and selected properties of the base metal[J]. Materials, 2020, 13(23): 5363.
- [21] 艾思飞, 王非森, 汪倩, 等. 高温氧化钛合金激光清洗机理与工艺[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114012.
Ai S F, Wang F S, Wang Q, et al. Laser cleaning mechanism and process of high-temperature-oxidized titanium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114012.
- [22] 周如东. 飞机蒙皮表面处理和涂层选择及涂装工艺[J]. 涂层与防护, 2018, 39(6): 51-54, 62.
Zhou R D. Surface treatment and coating process of aircraft skin[J].

- Coating and Protection, 2018, 39(6): 51-54, 62.
- [23] 李志超, 徐杰, 张东赫, 等. TA15 钛合金氧化膜激光清洗温度场有限元模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(2): 318-332.
- Li Z C, Xu J, Zhang D H, et al. Finite element simulation of temperature field in laser cleaning of TA15 titanium alloy oxide film [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(2): 318-332.
- [24] Miao R P, Wang T, Yao T, et al. Experimental and numerical simulation analysis of laser paint removal of aluminum alloy[J]. Journal of Laser Applications, 2022, 34(1): 012002.
- [25] Wen J Z, Li Y Q, Fan J Y, et al. Pulsed laser cleaning of resin-based surface coating on the titanium alloy substrate[J]. AIP Advances, 2021, 11(11): 115212.

Effect of Laser Cleaning Process Parameters on Surface Paint Removal of TC4 Titanium Alloy

Liu Weijun, Zhang Mingqi, Li Qiang*, Bian Hongyou, Zhao Ziming, Zhang Dong
School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China

Abstract

Objective Typically, a protective coating is sprayed onto the surface of materials to increase their service life, reduce the cost of use, and improve the aesthetics of the application. In complex environments and long-term application conditions, however, the paint layer will deteriorate, necessitating its removal in order to routinely inspect the substrate surface for defects. Traditional paint-stripping techniques have their own drawbacks, and laser cleaning technology has garnered more attention due to its benefits, including high efficiency and environmental friendliness. However, there are few reports on the laser cleaning technology of titanium-alloy surface-paint layers and the surface properties of the cleaned material. Moreover, the quality of laser cleaning appears to be highly dependent on the choice of process parameters. Herein, the effects of laser energy density and laser cleaning speed on the cleaning effect are investigated, and the optimal laser-paint removal process parameters are determined using phase analysis. In addition, the Vickers hardness of the substrate cleaned by laser is evaluated.

Methods The epoxy zinc yellow-paint coated layer on the surface of TC4 titanium alloy was experimentally investigated using a pulsed fiber laser with a flat 1.5-mm² top spot. The pulsed laser had a pulse width of 70 ns, pulse frequency of 10 kHz, a galvanometer scanning speed of 3000 mm/s, a laser energy density of 2.22–4.44 J/cm², and a laser cleaning speed of 3–9 mm/s; accordingly, the single cleaning was performed in the experiment. The surface morphologies and roughnesses of the samples were measured by a laser confocal microscope, and the effects of laser energy density and cleaning speed on the removal of the paint layer were investigated. In addition, the laser energy density was determined by changing the laser power; an X-ray diffraction (XRD) was performed using a diffractometer to characterize the phase transition of the laser-cleaned paint layer to analyze the cleaning quality; Vickers hardnesses before and after paint removal were measured using a Vickers hardness tester, and the effect of laser cleaning on the surface properties of the substrate was investigated.

Results and Discussions The paint-stripping effect improves gradually as laser energy density, single pulse energy, and laser cleaning intensity increase. However, the surface of the sample will have brownish yellow striped topography if the cleaning density is too high, causing ablation damage to the titanium-alloy surface (Figs. 3 and 4). As the laser cleaning speed decreases, heat accumulates on the surface of the paint layer and the paint removal effect improves incrementally (Figs. 5 and 6). When the energy density is 2.22–4.00 J/cm², the surface roughness increases and then decreases with increasing energy density. However, when the energy density exceeds 4.44 J/cm², the excessive laser-pulse energy damages the substrate, and the surface roughness increases again (Table 1). The surface roughness increases and then decreases as the laser cleaning speed decreases from 9 mm/s to 3 mm/s (Table 2). The findings from the phase analysis indicate that the surface composition of the sample after laser cleaning comprises only Ti and Ti₂O₃, without CaCO₃ and TiO₂, which indicates that the paint layer is cleaned when the laser energy density is 4.00 J/cm² and the cleaning speed is 3 mm/s (Fig. 7). The average Vickers hardness of the cleaned titanium-alloy surface is 368.74 HV, which is approximately 7.4% greater than that of the original substrate [Fig. 8(b)].

Conclusions With an increase in laser energy density or a decrease in cleaning speed, the cleaning effect is enhanced gradually. However, if the laser energy density is too high, excessive cleaning occurs. Accordingly, when the laser energy density is 4.44 J/cm² and the cleaning speed is 3 mm/s, the substrate is damaged. The damage is observed as the

surface of the substrate becomes brownish yellow and the surface roughness increases. Thus, the laser energy density and cleaning speed have a significant effect on the surface roughness of the cleaned sample. In addition, the surface roughness increases and then decreases as the laser energy density increases or cleaning speed decreases. Accordingly, at an energy density of 4.00 J/cm^2 , the surface roughness of the cleaned sample is maximum ($S_a = 24.956 \text{ }\mu\text{m}$) and minimum ($S_a = 2.082 \text{ }\mu\text{m}$) for cleaning speeds of 6 mm/s and 3 mm/s , respectively, which is comparable to the roughness of the original substrate surface. Additionally, when the energy density is 4.00 J/cm^2 and the cleaning speed is 3 mm/s , CaCO_3 component is not observed in the phase analysis of the cleaned surface, indicating that the paint layer has been entirely removed. Moreover, the average Vickers hardness of the cleaned titanium-alloy surface is greater than that of the original substrate, suggesting that the surface hardness of the TC4 titanium alloy can be enhanced by removing the paint layer with laser.

Key words laser technique; laser cleaning; TC4 titanium alloy; paint layer; energy density; cleaning speed