



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.07

脉冲激光清洗2024铝合金基材的损伤行为分析

李浩然¹, 朱明^{1,2*}, 徐瑞¹, 石珏^{1,2}

1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

摘要: 飞机蒙皮铝合金激光清洗时, 过高的激光注量会对基材造成损伤, 明确损伤行为与阈值对工艺参数优化至关重要。针对2024铝合金基材在1064 nm脉冲激光清洗过程中的损伤行为展开研究, 采用激光共聚焦显微镜分析不同激光注量下基材表面粗糙度的变化, 利用扫描电子显微镜观察损伤微观特征, 计算熔化与喷溅损伤阈值, 测试激光作用后基材表面显微硬度, 并通过X射线衍射分析物相变化。结果表明: (1) 随激光注量增加, 基材表面依次出现细小凹坑、局部熔化、全面熔化和喷溅, 熔化阈值为19.15 J/cm², 喷溅阈值为24.69 J/cm²; (2) 基材表面硬度呈先降后升再降的趋势, 15.279 J/cm²时由40.95 HV降至34.83 HV, 25.465 J/cm²时升至76.6 HV, 超过喷溅阈值后硬度再次下降; (3) 50.929 J/cm²注量下基材表面生成CrC、CrO_{0.87}和AlN新物相, 对硬度升高有附加贡献。

关键词: 激光清洗; 激光注量; 2024铝合金; 损伤阈值

中图分类号: TG456.7, TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0058-06

Analysis of Damage Behavior of 2024 Aluminum Alloy Substrate during Pulsed Laser Cleaning

LI Haoran¹, ZHU Ming^{1,2*}, XU Rui¹, SHI Yu^{1,2}

1. Lanzhou University of Technology, State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou 730050, China

2. Lanzhou University of Technology, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou 730050, China

Abstract: During laser cleaning of aircraft skin aluminum alloy, excessive laser fluence can cause substrate damage, and clarifying the damage behavior and thresholds is essential for process parameter optimization. In this study, the damage behavior of 2024 aluminum alloy substrate during 1064 nm pulsed laser cleaning was investigated. The variation of substrate surface roughness under different laser fluences was analyzed by laser confocal microscope, the microscopic characteristics of damage were observed by scanning electron microscope, the melting and spattering damage thresholds were calculated, the microhardness of the substrate surface after laser irradiation was measured, and the phase composition was analyzed by X-ray diffraction. The results show that: (1) with the increase of laser fluence, the substrate damage sequentially manifests as fine pits, localized melting, full melting, and spattering, with the melting threshold of 19.15 J/cm² and the spattering threshold of 24.69 J/cm²; (2) the substrate surface hardness exhibits a trend of initial decrease, subsequent increase, and final decrease, decreasing from 40.95 HV to 34.83 HV at 15.279 J/cm², increasing to 76.6 HV at 25.465 J/cm², and decreasing again beyond the spattering threshold; (3) new phases of CrC, CrO_{0.87}, and AlN are generated on the substrate surface at a fluence

收稿日期: 2025-03-05 修回日期: 2025-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(52065041)

作者简介: 李浩然(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事研究材料激光表面加工。E-mail: 1322725175@qq.com。

通讯作者: 朱明(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事先进焊接方法及机器人自动化、激光增材与再制造的研究。E-mail: zhumin@yeah.net。

of 50.929 J/cm², contributing additionally to the increase in surface hardness.

Keywords: laser cleaning; laser fluence; 2024 aluminum alloy; damage threshold

引用格式:李浩然,朱明,徐瑞,等. 脉冲激光清洗2024铝合金基材的损伤行为分析[J]. 电焊机,2026,56(6):58–63.

Citation:LI Haoran, ZHU Ming, XU Rui, et al. Analysis of Damage Behavior of 2024 Aluminum Alloy Substrate during Pulsed Laser Cleaning[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 58–63.

0 引言

飞机蒙皮铝合金表面漆层的定期维护是保障飞行安全和延长服役寿命的重要环节,清除漆层而不损伤铝合金基体是航空工业的一项重要需求。传统化学溶剂清洗方法存在环境污染和废液处理成本高等问题,已难以满足现代航空工业对绿色、高效维护技术的需求^[1–2]。激光清洗作为一种非接触、高精度、环保的表面处理技术,在高效去除漆层的同时,避免对铝合金基材的损伤,从而显著提升维护效率并降低维护成本^[5],在航空航天领域展现出广阔的应用前景^[3–4]。然而,激光清洗去除漆层时,其热过程控制精度较低,容易因能量密度过高或作用时间过长对基材造成损伤,这是限制其工程应用的关键问题。

国内外学者对此已展开研究。在形貌变化方面,激光作用会使得铝合金形貌发生改变^[6–7];在损伤机制方面,激光作用会使铝合金局部熔化,熔化产生的等离子体冲击铝合金表面导致基材损伤^[8–9];在力学性能方面,激光作用下铝合金表面同时受到热作用和力作用两种形式的损伤^[10];在服役性能方面,激光改变铝合金的热力学状态和物理化学性能,对基材造成不同程度的损伤^[11]。上述研究从不同角度分析了激光清洗对铝合金基材的影响,但对于基材损伤模型的分析尚不完整。

为了实现飞机蒙皮漆层的无损激光清洗,本文针对激光清洗过程中2024铝合金基材的损伤行为与热作用机理展开研究。通过激光共聚焦显微镜分析不同激光注量下基材表面粗糙度的变化规律,利用扫描电子显微镜观察损伤的微观特征,采用X射线衍射仪分析激光作用后基材表面的物相变化,测试不同激光注量下基材表面显微硬度,最终确定熔化损伤和喷溅损伤的阈值范围,为激光清洗工艺参数的优化提供依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

采用2024铝合金板材作为基材,尺寸30 mm×30 mm×1 mm。2024铝合金属于Al–Cu–Mg系合金,其主要化学成分如表1所示。

表1 2024铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 2024 aluminum alloy composition table (wt. %)

Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	Ti	Al
4.2	1.6	0.8	0.5	0.3	0.15	0.1	其余

1.2 激光清洗试验系统

试验采用1 064 nm脉冲光纤激光清洗系统,如图1所示,系统主要由激光器、扫描系统、控制终端和固定平台组成。通过电脑控制终端可以调节激光功率、激光脉冲宽度及脉冲频率,激光器最大输出功率20 W,激光脉冲宽度调节范围1~350 ns,脉冲频率调节范围为10~2 000 kHz。透镜焦距210 mm,最小光斑直径30 μm,输出光束质量为M²≤1.3。试验采用单向逐行的激光扫描路径,如图1所示。

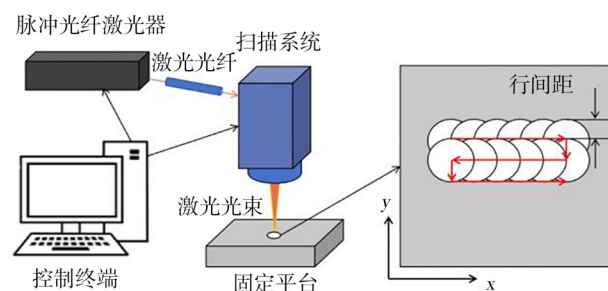


图1 激光清洗系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of laser cleaning system

激光工艺参数如表2所示,激光扫描速度为350 mm/s,激光搭接率为30%。为了使激光均匀作用在材料表面,扫描线间距设为35 μm,使用1~10 W的激光功率进行面扫。

激光注量是脉冲激光的激光功率、激光光斑面积和激光脉冲频率的综合体现,可以反映脉冲激光

表2 激光清洗工艺参数

Table 2 Laser cleaning process parameters table			
参数	单位	数值	
固定参数	脉冲宽度	ns	300
	光斑直径	μm	50
	脉冲频率	kHz	10
变参数	扫描速度	mm·s ⁻¹	350
	线间距	μm	35
	搭接率	%	30
	激光功率	W	1、2、3、4、5、6、7、8、9、10

对材料单位面积内的能量输入。以激光功率为单一变量,分别设置1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 W共10组,对应激光注量由式(1)计算获得,结果如表3所示。

$$I_0=\frac{P}{f\cdot S}$$

(1)

式中 I_0 为激光注量; P 为激光功率; S 为激光光斑面积; f 为激光脉冲频率。

表3 不同激光功率对应的激光注量

Table 3 Laser fluence corresponding to different laser power			
激光功率/W	激光注量/(J·cm ⁻²)	激光功率/W	激光注量/(J·cm ⁻²)
1	5.093	6	30.558
2	10.186	7	35.651
3	15.279	8	40.744
4	20.372	9	45.837
5	25.465	10	50.929

2 试验结果

2.1 激光作用后基材表面形貌与粗糙度的变化

图2为不同激光注量面扫描后基材的三维形貌,图3为对应的SEM图像。当激光注量小于20.372 J/cm²时,基材表面仅产生了零星细小凹坑且不均匀分布,对应图2a~2c,表面粗糙度Sa仅从0.494 μm小幅升至0.538 μm;当激光注量增加至20.372 J/cm²时,粗糙度增至0.644 μm,略有增加。

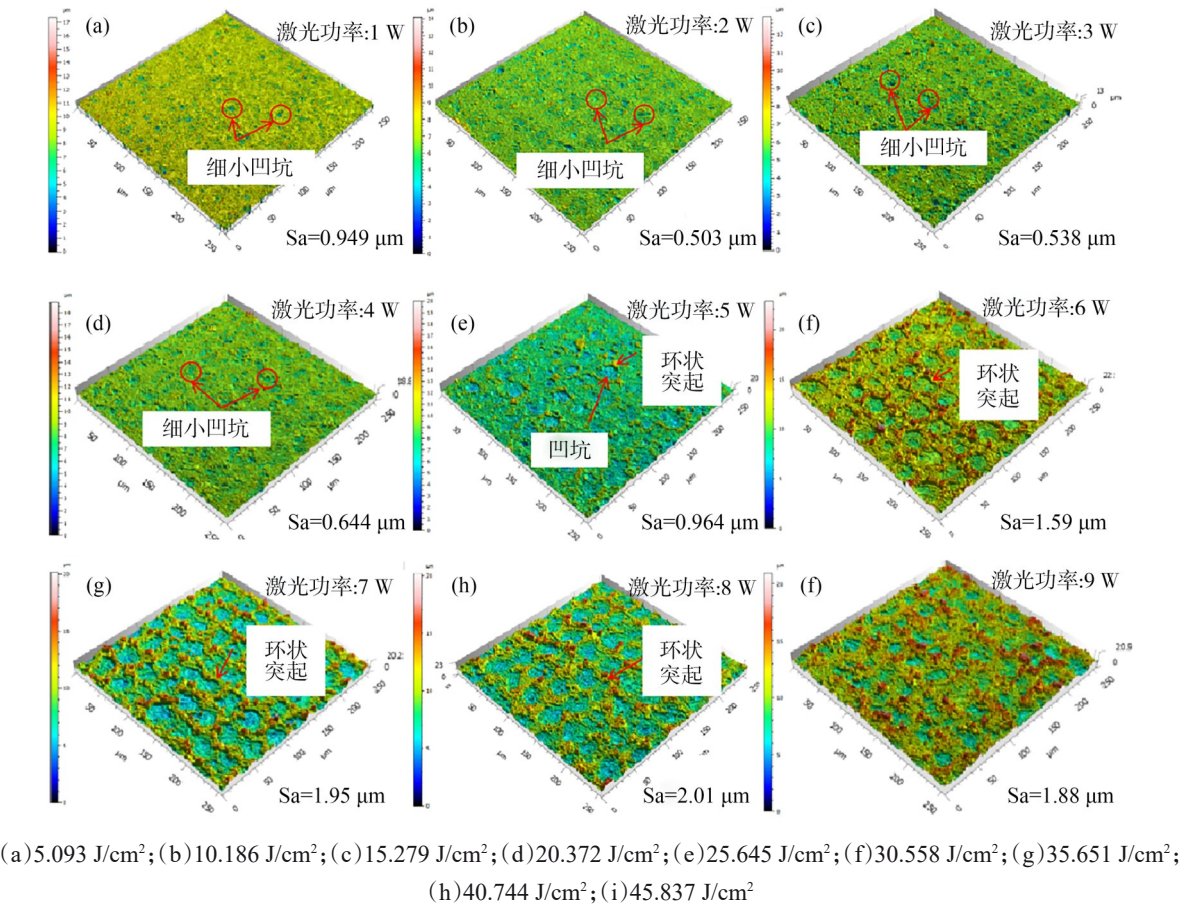
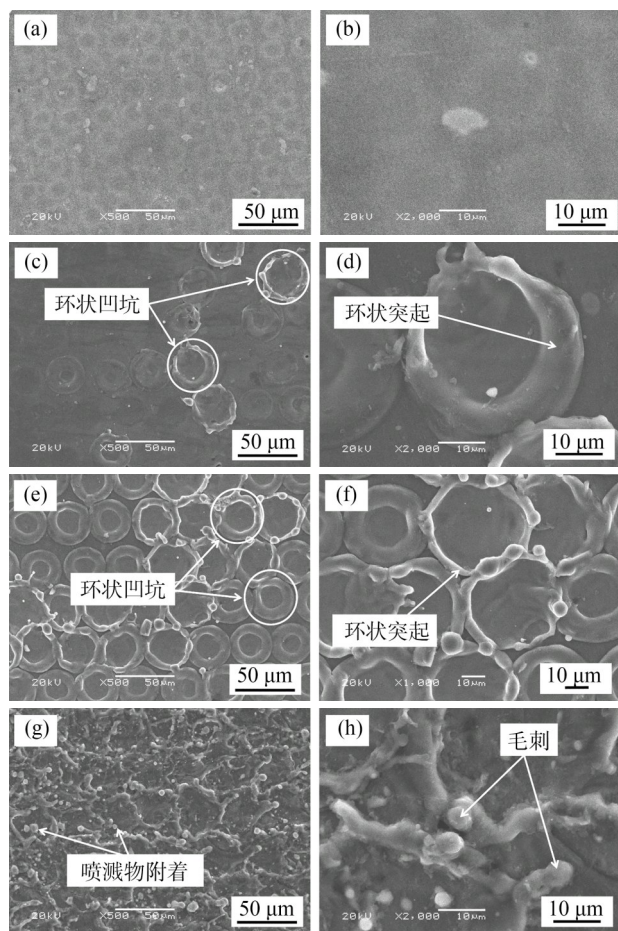


图2 激光注量面扫后基材的三维形貌

Fig.2 The three-dimensional morphology of the substrate after laser fluence surface scanning

由图3a可见,试样表面凹坑较小且并不明显;放大至2 000倍,如图3b所示,未观察到基材有熔化特征,说明此能量区间基材表面未发生宏观损伤。当激光注量增加至 25.465 J/cm^2 时,表面三维形貌如图2e所示,此时表面粗糙度 S_a 大幅增至 $0.964 \mu\text{m}$,基材表面一些区域出现了明显的周期性排列的凹坑,且一些凹坑周围有明显的突起。其SEM图像如图3c所示,发现部分区域凹坑呈现熔化特征;将图像放大至2 000倍如图3d所示,发现凹坑周围一些区域的金属熔化后凝固,呈现表面光滑的环状,此时激光能量的输入已使基材局部熔化。激光注量继续从 30.558 J/cm^2 增加至 40.744 J/cm^2 时,三维形貌如图2f~2h所示,表面粗糙度由 $1.59 \mu\text{m}$ 增至 $2.01 \mu\text{m}$,周期性排列的凹坑更深且周围产生了更多的突起,



(a, b) 20.372 J/cm^2 ; (c, d) 25.465 J/cm^2 ; (e, f) 60.588 J/cm^2 ; (g, h) 40.744 J/cm^2

图3 不同激光注量面扫后基材表面SEM图像

Fig. 3 SEM images of the substrate surface after scanning with different laser fluence levels

说明此时基材表面持续熔化。 30.558 J/cm^2 激光注量面扫后基材表面的SEM图像如图3e所示,视场内所有圆形凹坑都呈现出熔化特征。将图像放大至2 000倍如图3f所示,凹坑周围熔化产生的突起持续增多。 40.744 J/cm^2 激光注量面扫后基材表面的SEM图像如图3g所示,此时熔化金属吸收的热量产生压力大于金属表面热膨胀系数而产生喷溅现象,喷溅出的熔融金属附着于环形凹坑内,未喷溅脱离的液态金属在凹坑周围形成毛刺,并由三维表面形貌图2i可知此时粗糙度 S_a 降低至 $1.88 \mu\text{m}$ 凹坑特征开始消失。

2.2 激光作用后基材表面硬度的变化

图4为不同激光注量面扫描后基材表面显微硬度的测试结果,每个表面取4个试验点,再取4个试验点显微硬度测试结果的平均值。原始基材表面显微硬度平均值为 40.95 HV 。图中左侧红线为铝合金基材出现熔化阈值 19.15 J/cm^2 ,右侧红线为基材出现喷溅阈值 24.69 J/cm^2 。

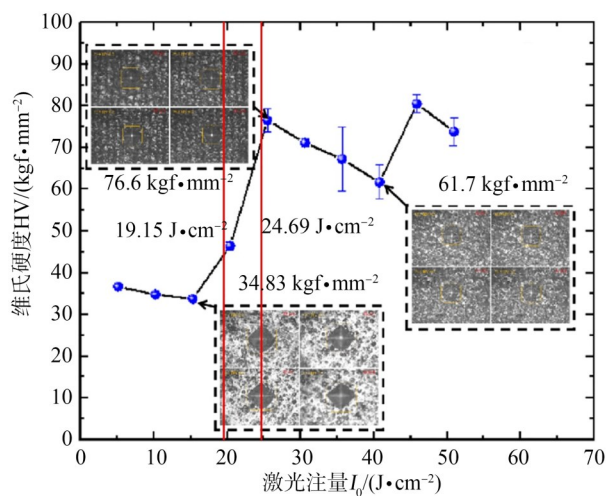


图4 基材表面显微硬度与激光注量之间的关系

Fig. 4 The relationship between substrate surface microhardness and laser fluence

随激光注量的增加,基材表面显微硬度呈现下降趋势。当激光注量为 15.279 J/cm^2 时,表面硬度已由 40.95 HV 下降至 34.83 HV ,此时基材表面未发生熔化损伤。这是由于激光能量输入的增加使金属表面温度上升,金属发生动态回复和动态再结晶,因此基材表面硬度下降。当激光注量大于基材损伤阈值后,基材表面硬度迅速上升,激光注量为

25.465 J/cm² 时, 表面硬度上升至 76.6 HV, 此时 SEM 下(见图 3)可见鱼鳞状的环状凹坑, 基材表面已发生重铸。其原理为: 本阶段激光脉冲持续时间仅 300 ns, 激光能量使基材表层温度迅速升高而熔化, 由于铝合金强导热性能使熔化金属迅速冷却, 凝固过程中过冷度极大, 重新凝固的表面金属过晶粒细化, 也就是金属表面在激光的作用下产生重铸现象, 因此表面硬度上升。当激光注量超过喷溅阈值后, 表面产生喷溅现象, 喷溅产物附着于基材表面, 基材表面金属结构变得疏松, 因此表面硬度随激光注量的增加再次呈下降趋势。

2.3 激光作用后基材表面的物相转变

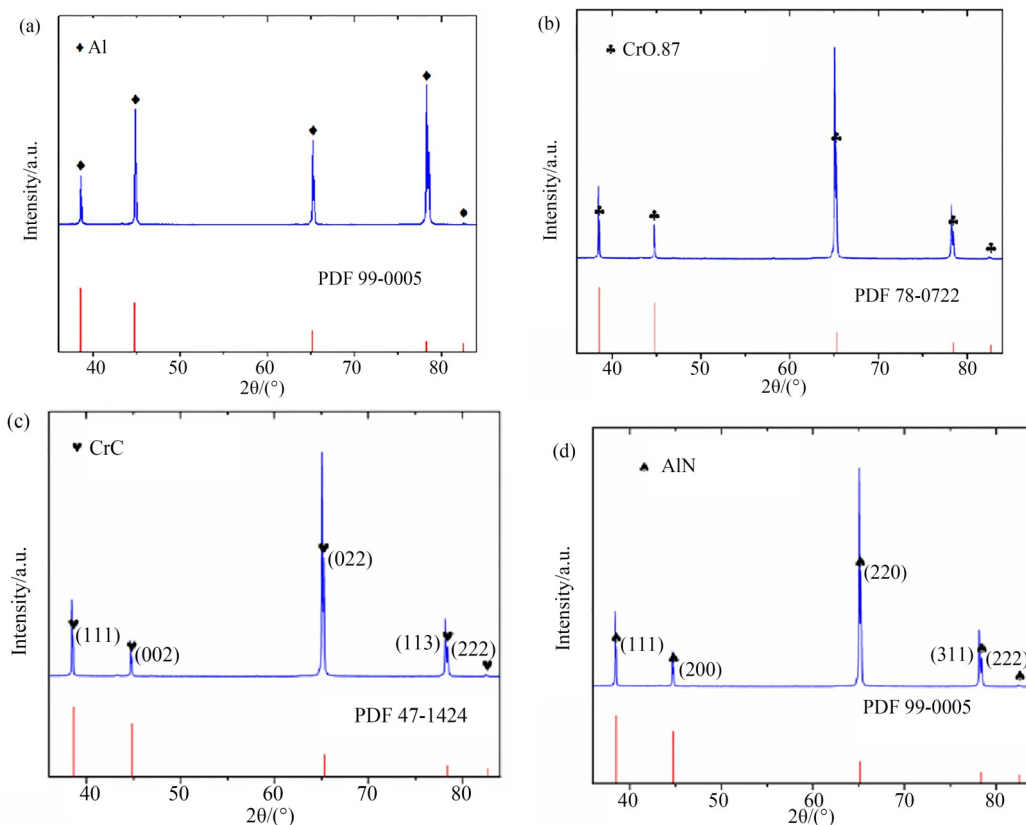
图 5 为 50.929 J/cm² 激光注量作用前后基材表面 XRD 衍射峰图像。图 5a 为铝合金基材 XRD 衍射图; 图 5b 中峰位于约 28°、36°、55°、62°, 与 PDF 卡片对比为 CrO₂ 的特征衍射峰; 图 5c 中峰位于约 34°、36°、64°, 为 CrC 的特征衍射峰; 图 5d 中峰位于约 33°、36°、59°、66°, 为 AlN 的特征衍射峰。上述结果

表明, 激光作用过程中基材表面产生了新的物相 CrC、AlN 和 CrO₂。其中, CrC 与 CrO₂ 属于致密硬质相, AlN 为共价键氮化物, 三者晶体缺陷密度低于 Al 基体, 硬度均显著高于纯铝, 对激光作用后基材表面硬度的升高有一定贡献。

3 结论

(1) 激光清洗 2024 铝合金时, 基材表面形貌随着注量的增加依次出现细小凹坑、局部熔化、全面熔化和喷溅。注量低于 20.372 J/cm² 时表面仅产生细小凹坑, 粗糙度增幅较小(Sa 由 0.494 μm 升至 0.644 μm); 25.465 J/cm² 时 SEM 下可见周期性排列的环状凹坑, 凹坑周围金属熔化后凝固形成光滑环状突起; 30.558~40.744 J/cm² 时熔化金属流动加快, 粗糙度增至 2.01 μm; 45.837 J/cm² 时粗糙度降至 1.88 μm, 出现喷溅与毛刺。

(2) 基材表面显微硬度随激光注量呈先降后升



(a) 激光作用前; (b) 激光作用后基材表面生成 CrO₂; (c) 激光作用后基材表面生成 CrC; (d) 激光作用后基材表面生成 AlN

图 5 激光作用前后基材表面 XRD 衍射峰图像

Fig. 5 XRD diffraction peak images of substrate surface before and after laser irradiation

再降的趋势:注量为 15.279 J/cm^2 时,硬度由 40.95 HV 下降至 34.83 HV;注量增加至 25.465 J/cm^2 时,硬度上升至 76.6 HV;注量超过喷溅阈值后,硬度再次下降。硬度下降对应动态回复与再结晶,硬度上升对应重铸层晶粒细化,喷溅后硬度下降对应表面结构疏松。

(3) 50.929 J/cm^2 注量作用后, XRD 检测到基材表面生成 CrC、CrO.₈₇、AlN 新物相。CrC 与 CrO.₈₇ 为致密硬质相, AlN 为共价键氮化物,三者对表面硬度升高有一定贡献。

参考文献:

- [1] 步明升,郭年华,汪威,等. 国产飞机蒙皮底漆工艺适应性研究[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(1): 12-15.
BU M S, GUO N H, WANG W, et al. Study on process adaptability of domestic aircraft skin primer[J]. Aging and application of synthetic materials, 2024, 53(1): 12-15.
- [2] 刘俊文,张净,李琼,等. 飞机蒙皮表面的预处理及涂装研究[J]. 中国金属通报, 2022(7): 138-140.
LIU J W, ZHANG J, LI Q, et al. Study on pretreatment and coating of aircraft skin surface [J]. China Metal Bulletin, 2022(7): 138-140.
- [3] Kim J E, Song M K, Han M S, et al. A study on the application of laser cleaning process in shipbuilding industries using 100 W fiber laser[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(4): 2269-2275.
- [4] 佟艳群,马健,上官剑锋,等. 航空航天材料的激光清洗技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(11): 48-56.
TONG Y Q, MA J, SHANGGUAN J F, et al. Research progress of laser cleaning technology for aerospace materials [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(11): 48-56.
- [5] 段家振,史如新,张伟,等. 基于图像处理的碳钢表面激光除锈工艺研究[J]. 中国激光, 2024, 51(20): 128-137.
- DUAN J Z, SHI R X, ZHANG W, et al. Laser Derusting Process for Carbon Steel Surface Based on Image Processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(20): 128-137.
- [6] 俞鸿斌,王春明,张威,等. 激光清洗应用发展现状及展望[J]. 电焊机, 2014, 44(10): 80-84.
YU H B, WANG C M, ZHANG W, et al. Development status and prospect of laser cleaning application [J]. Welding machine, 2014, 44(10): 80-84.
- [7] 陈婧雯,彭章祝,王非森,等. 激光清洗对铝合金表面形貌及激光-MIG 复合焊质量的影响[J]. 电焊机, 2019, 49(8): 66-71.
CHEN J W, PENG Z Z, WANG F S, et al. Effect of laser cleaning on surface morphology of aluminum alloy and quality of laser-MIG hybrid welding [J]. Welding machine, 2019, 49(8): 66-71.
- [8] Tian Z, Lei Z, Chen X, et al. Evaluation of laser cleaning for defouling of marine biofilm contamination on aluminum alloys [J]. Applied Surface Science, 2020, 499: 144060.
- [9] 李海洋,赵喆,郑超,等. 激光冲击光整对 2024 铝合金铣削平面表面质量的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 388-396.
LI H Y, ZHAO J, ZHENG C, et al. Effect of laser shock finishing on the surface quality of 2024 aluminum alloy milling plane [J]. Surface Technology, 2023, 52(9): 388-396.
- [10] 李绍龙,王志兴,高韶华,等. 铝合金蒙皮激光除漆后新漆层的耐高温性能研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(4): 537-543.
LI S L, WANG Z X, GAO S H, et al. Study on high temperature resistance of new paint layer after laser paint removal of aluminum alloy skin [J]. Laser and infrared, 2023, 53(4): 537-543.
- [11] Shan T, Yin F, Wang S, et al. Surface integrity control of laser cleaning of an aluminum alloy surface paint layer [J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9313-9319.