

# 激光清洗AH32钢表面漆研究

韩宁, 张巍\*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年2月10日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月17日

## 摘要

本研究采用数值模拟与实验验证相结合的方法。首先, 借助COMSOL Multiphysics软件构建了激光与漆层相互作用的有限元模型, 通过仿真系统探究了激光功率密度及扫描速度对试样温度场分布的影响机制。基于仿真所得规律, 进一步设计了实验方案。通过对处理后的表面进行形貌观察与粗糙度分析, 最终将最佳激光参数确定为功率70 W、扫描速度2500 mm/s。在此参数下, 聚氨酯漆层得以被高效且完整地去除, 同时在清洗效果与基材保护之间取得了最优平衡。这一研究不仅有助于深入理解激光与材料相互作用的物理过程, 也为该技术在船舶维修领域的实际应用提供了关键的工艺依据与操作参考。

## 关键词

脉冲激光, AH32船用钢, 数值模拟, 激光清洗, 表面形貌

# Study on Laser Cleaning of Painted Surfaces on AH32 Steel

Ning Han, Wei Zhang\*

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

Received: February 10, 2026; accepted: March 2, 2026; published: March 17, 2026

## Abstract

In this study, a combination of numerical simulation and experimental verification was used. Firstly, the finite element model of the interaction between laser and paint layer was established by COMSOL Multiphysics software, and the influence mechanism of laser power density and scanning speed on the temperature field distribution of the sample was explored through the simulation system. Based on the simulation results, the experimental scheme is further designed. By observing the surface morphology and analyzing the roughness of the treated surface, the optimal laser parameters were determined as the power of 70 W and the scanning speed of 2500 mm/s. Under these parameters,

\*通讯作者。

**the polyurethane paint layer can be removed efficiently and completely, while achieving an optimal balance between cleaning effect and substrate protection. This study not only helps to understand the physical process of the interaction between laser and materials, but also provides a key process basis and operational reference for the practical application of this technology in the field of ship maintenance.**

## Keywords

**Pulsed Laser, AH32 Marine Steel, Numerical Simulation, Laser Cleaning, Surface Morphology**

Copyright © 2026 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

AH32 钢由于强度高、韧性好、耐腐蚀性出色且易于加工, 广泛用于制造船体甲板等结构部件。为延长这类钢材的使用寿命, 通常会在其表面涂覆防护漆层。然而, 长期使用后漆层容易发生剥落, 导致保护作用失效。与此同时, 钢板本身也需要定期进行裂纹检测和疲劳评估。因此, 彻底清除金属表面的旧漆层, 就成为实施有效检测与重新涂装的关键步骤。传统除漆方法主要包括机械打磨、化学浸泡或使用脱漆剂等, 但这些方法往往效率较低, 清洁效果也不够理想。在此背景下, 激光清洗技术以其高效、环保的特点, 正逐步成为工业领域迫切需要的表面处理新方案。

宋峰等人[1]通过比较热应力与粘附力大小, 建立一维短脉冲激光除漆模型。施曙东、杜鹏等人[2]利用连续 Nd:YAG 激光对钢基底表面漆层样品进行了清洗实验和工作机理研究。顾志同等人[3]采用 COMSOL 有限元仿真软件, 对不同激光功率和扫描速度下的除漆深度和温度场分布情况进行了数值模拟, 并通过实验验证了模拟结果的可靠性。DanSavastru 等人[4]介绍了在研究激光从不同金属基材去除油漆时获得的数值模拟结果。Yin Liu 等人[5]采用自主研发的激光清洗系统, 进行了脉冲光纤激光器对聚氨酯漆船壳板表面重复清洗实验。刘伟军[6]等人采用脉冲激光器对铝合金基底表面涂覆的环氧树脂底漆与丙烯酸聚氨酯面漆进行激光清洗试验, 针对激光清洗表面的形貌、粗糙度及元素含量进行分析。高辽远[7]等人分析了不同参数对激光清洗温度场和清洗深度的影响。张天刚[8]等人揭示扫描速度对激光除漆的影响规律。Donghe Zhang 等人[9]采用不同激光功率密度的纳秒脉冲激光对铝合金表面的蓝色和红色聚氨酯漆进行激光清洗研究。方世超[10]等人基于激光清洗技术研究船舶板材 921A 钢表面改性厚浆环氧防锈漆层的脱除。李思凡等人[11]针对船舱内各种复杂空间的作业环境需求, 利用激光清洗技术对船用钢材 EH36 表面的漆层、锈蚀、油污开展工艺试验研究。Ji-Eon Kim 等人[12]为了解决造船厂现有表面清洁技术的局限性, 正将激光清洁工艺应用于喷漆和焊接的预处理。李华婷[13]等人以 AH32 船用钢表面锈蚀为研究对象, 探索激光清洗对 AH32 钢表面耐腐蚀性能的影响。张鑫[14]等人探究了不同激光参数对激光去除 AH32 船用钢表面漆层的温度场影响。

本研究综合运用了仿真模拟与实验验证的方法。通过有限元建模, 计算了不同激光参量下清洗 AH32 钢表面漆层时的温度分布, 确定了优化参数。实验环节的清洗结果, 与仿真结果具有较好的一致性。

## 2. 仿真研究

### 2.1. 仿真模型建立

本研究为模拟激光清洗过程中的温度及应力变化, 在 COMSOL Multiphysics 有限元软件中同时引入

了固体传热、变形几何和固体力学模块。通过多物理场耦合计算,并在漆层表面设置广义热通量边界条件进行瞬态分析,最终获得了材料在不同时刻、不同位置上的温度分布与应力状态。所建几何模型尺寸为  $2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ ,上层为聚氨酯漆,下层为 AH32 船用钢基底,各厚  $0.1\text{ mm}$ 。由于激光直射的漆层热流密度高,为提升计算精度,对漆层进行了细化,而基底则采用常规划分,如图 1 所示。

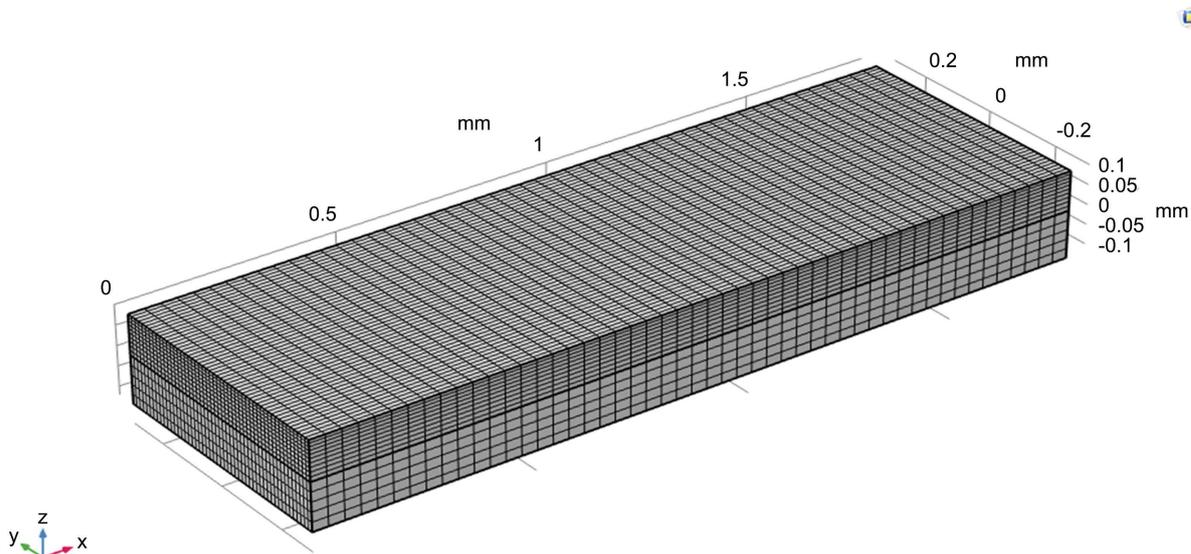


Figure 1. Finite element model

图 1. 有限元模型

## 2.2. 材料参数

当有限元进行分析时,需要运用到材料的热物性参数,因此 AH32 船用钢和聚氨酯漆层热导率均采用常温下的数值,不考虑温度的影响。查阅相关资料,其各种材料的热物性参数如表 1 所示。

Table 1. Physical parameters of materials

表 1. 材料的物理参数

参数	单位	聚氨酯漆	AH32 船用钢
密度	$\text{kg/m}^3$	1200	7850
导热系数	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.2	14.848
比热容	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1260	467
热膨胀系数	$\text{K}^{-1}$	$9 \times 10^{-5}$	$12 \times 10^{-6}$
杨氏模量	GPa	1	206
泊松比		0.47	0.3

## 3. 有限元仿真结果分析

### 3.1. 激光参数对温度场分布的影响

基于纳秒脉冲激光清洗船用钢表面漆层的物理模型,结合材料参数和几何模型,开展了纳秒脉冲激光清洗船用钢表面漆层的仿真实验研究。

移动纳秒脉冲激光沿 X 正向扫描试样, 设置激光功率为 70 W, 脉冲宽度 200 ns, 激光重复频率 100 kHz, 光斑半径 0.05 mm, 扫描速度 2500 mm/s, 根据激光功率密度  $E$  ( $\text{W}/\text{cm}^2$ ) 计算公式:

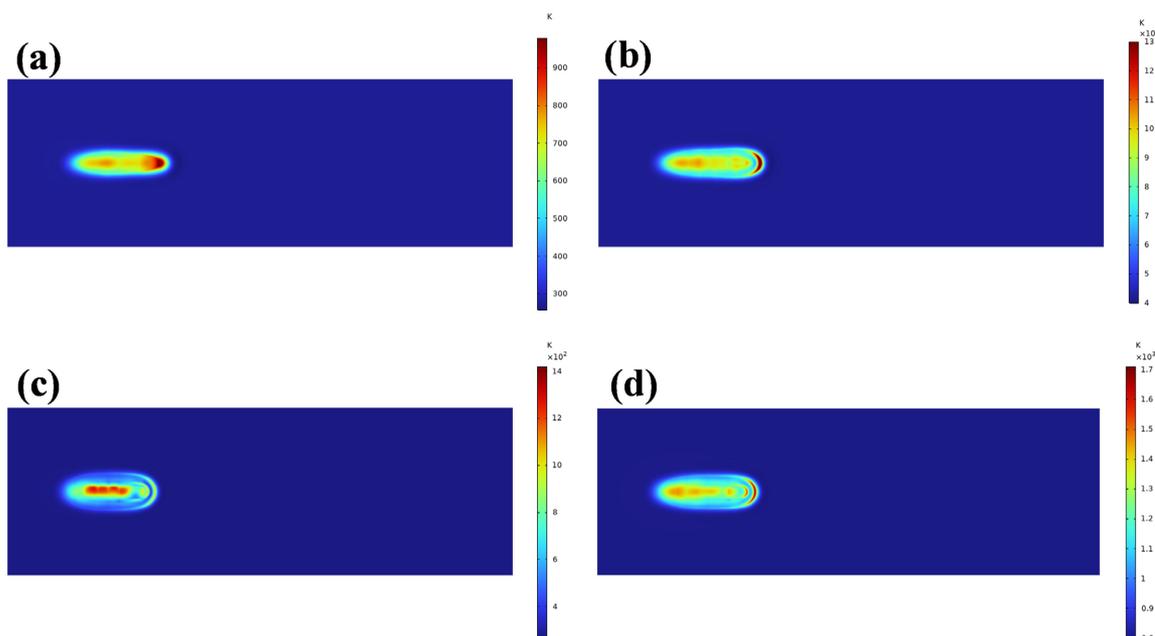
$$E = \frac{P}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中  $P$  为激光平均功率,  $R$  为光斑半径。

### 3.1.1. 不同激光功率密度对温度场分布的影响

激光功率设置为 60 W、65 W、70 W、75 W, 功率密度分别为  $3.06 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 、 $3.32 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 、 $3.57 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 、 $3.83 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$  的条件下, 重复频率 100 kHz, 脉宽 200 ns, 扫描速度 2500 mm/s, 光斑半径 0.05 mm, 探究激光功率密度对温度场的影响即探究激光功率对温度场分布的影响。

在相同时间内, 上述不同激光功率密度的脉冲激光对 AH32 船用钢表面漆层温度分布的影响如图 2 所示。

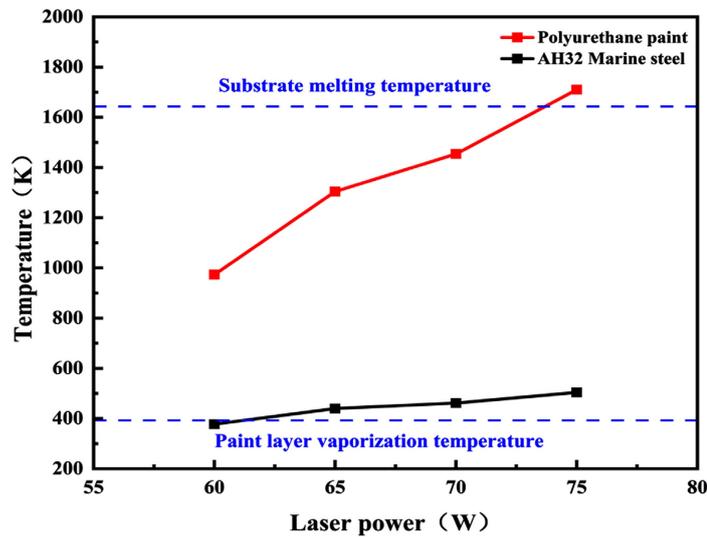


**Figure 2.** Surface temperature distribution of paint layer under different laser power densities: (a)  $3.06 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ ; (b)  $3.32 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ ; (c)  $3.57 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ ; (d)  $3.83 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$

**图 2.** 不同激光功率密度下漆层表面温度场分布: (a)  $3.06 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ ; (b)  $3.32 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ ; (c)  $3.57 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ ; (d)  $3.83 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$

通过分析仿真结果图可以发现, 在其他变量固定的情况下, 激光功率密度越高, 漆层表面的温度分布范围就越大。这一点可以直接从温度云图中观察到: 随着功率密度上升, 代表高温区域的颜色范围明显向外扩展。

图 3 所示为漆层表面和基底表面最高温度随激光功率的变化规律。根据图中折线显示, 漆层表面的峰值温度伴随激光功率密度的递增而升高。对应的漆层最高温为 973 K、1304 K、1454 K、1710 K, 基底表面最高温为 378 K、440 K、462 K、504 K。从这些数据可以总结, 功率密度必须超过  $3.06 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ , 基底才能达到漆层气化所需的 393 K; 功率密度必须控制在  $3.83 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$  以下, 漆层温度才不会超过基底的 1643 K 熔化点。因此 65 W 至 70 W 的功率均为合适的激光参数。

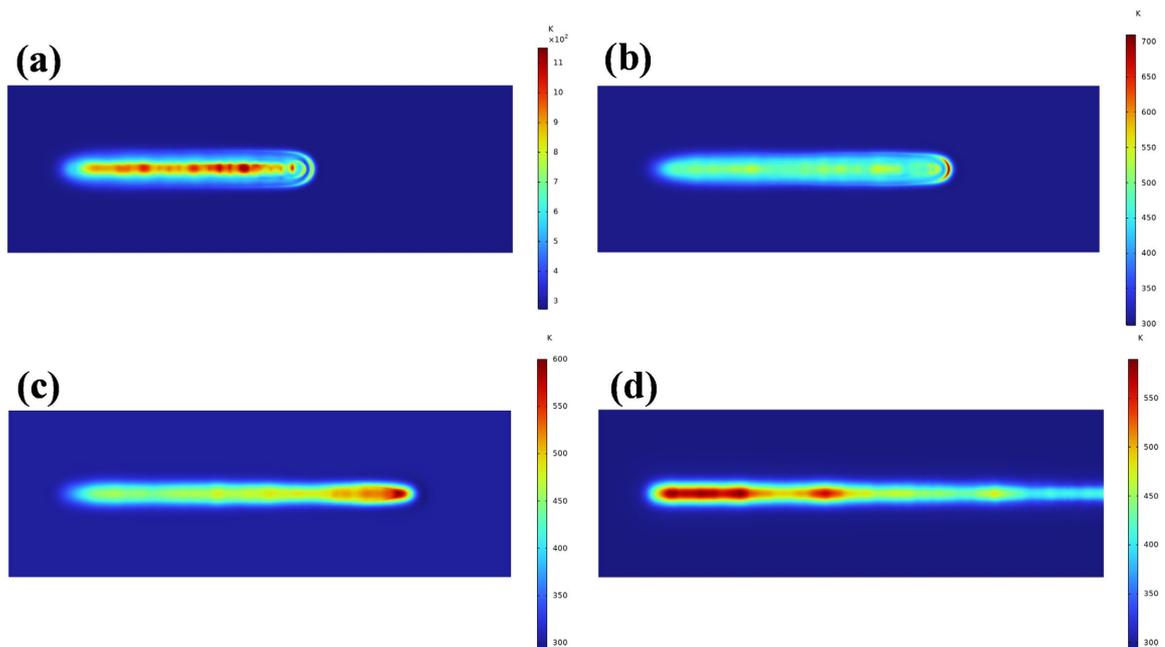


**Figure 3.** Maximum temperature curves of paint layer surface and substrate surface under different laser powers  
**图 3.** 不同激光功率下的漆层表面和基底表面最高温度曲线

### 3.1.2. 不同激光扫描速度对温度场分布的影响

在激光清洗过程中，扫描速度是调控漆层温度场的一个关键因素。速度太快，激光作用时间过短，无法累积足够热量使漆层完全气化，容易导致残留；速度太慢，热量持续输入过多，又会造成基底过热甚至损伤。因此，选择合适的扫描速度对于实现彻底清洗并同时保护基体材料来说至关重要。

如图 4 所示，其他激光参数固定不变，扫描速度分别为 2500 mm/s、5000 mm/s、7500 mm/s 和 10,000 mm/s 时的漆层表面温度场分布。



**Figure 4.** Temperature distribution on the surface of the paint layer at different scanning speeds: (a) 2500 mm/s; (b) 5000 mm/s; (c) 7500 mm/s; (d) 10,000 mm/s

**图 4.** 不同扫描速度下漆层表面温度场分布: (a) 2500 mm/s; (b) 5000 mm/s; (c) 7500 mm/s; (d) 10,000 mm/s

图 5 展示了漆层与基底表面峰值温度随激光扫描速度变化的规律。当扫描速度设定为 2500 mm/s、5000 mm/s、7500 mm/s 及 10,000 mm/s 时, 漆层最高温度依次为 1154 K、705 K、600 K 与 590 K, 而基底最高温度则分别为 462 K、446 K、330 K 和 310 K。从综合数据来看, 当扫描速度达到 5000 mm/s 时, 基底温度仅为 342 K, 尚未达到漆层的气化阈值。相比之下, 只有在 2500 mm/s 的扫描速度下, 漆层与基底表面的温度才同时处于较为理想的范围。因此, 将扫描速度设定为 2500 mm/s 可视为较优的工艺参数选择。

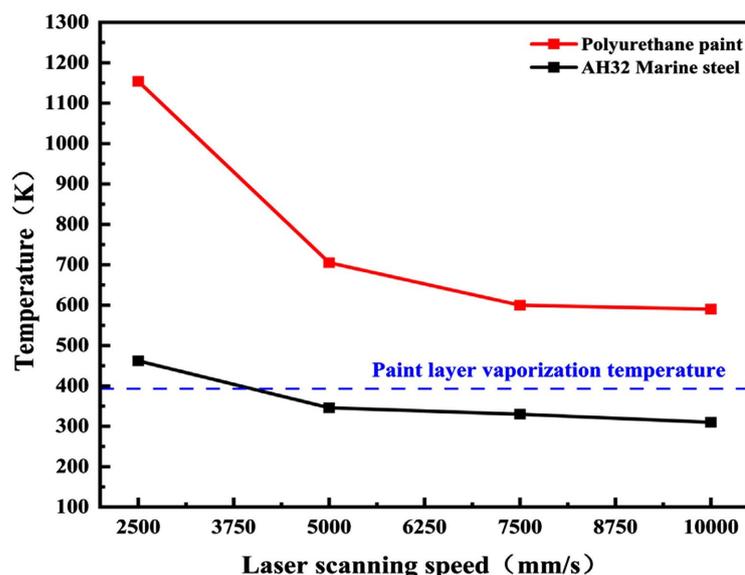


Figure 5. Maximum temperature curves of paint layer surface and substrate surface at different scanning speeds  
图 5. 不同扫描速度下的漆层表面和基底表面最高温度曲线

## 4. 实验验证

### 4.1. 激光清洗设备

在实验部分, 我们针对纳秒脉冲激光清洗 AH32 船用钢表面漆层的过程展开研究。通过调整激光工艺参数, 系统观察并记录了样件表面的形貌变化。基于上述结果, 进一步剖析激光清洗的作用机理, 同时对仿真数据加以验证和深入探讨, 以期更完整地阐释激光清洗的物理过程, 并为提升清洗效果提供依据。

实验装置如图 6 所示, 主要由纳秒脉冲激光清洗机、532 nm 波长激光器、防喷溅保护镜、可移动三维样品台、CCD 高速相机、脉冲延时触发器、光电探测器以及高速红外测温仪等组成。激光清洗机的输出功率可在 0~100 W 范围内连续调节。通过金相显微镜和三维自聚焦表面轮廓仪对试样表面进行观测, 我们采集并分析了经激光处理的区域形貌数据, 进而获得表面粗糙度信息。这一方法有助于系统考察激光参数与清洗效果、清洗效率之间的关联规律。

### 4.2. 实验设计

在清洗实验中, 实验样品采用 40 mm × 40 mm × 2 mm 的 AH32 船用钢板, 研究除漆工艺参数对除漆效果的影响, 其中激光波长 1064 nm, 激光脉冲宽度 200 ns, 激光重复频率 100 kHz, 光斑半径 0.05 mm, 激光功率 60 W、65 W、70 W、75 W, 激光扫描速度 2500 mm/s、5000 mm/s、7500 mm/s、10,000 mm/s。

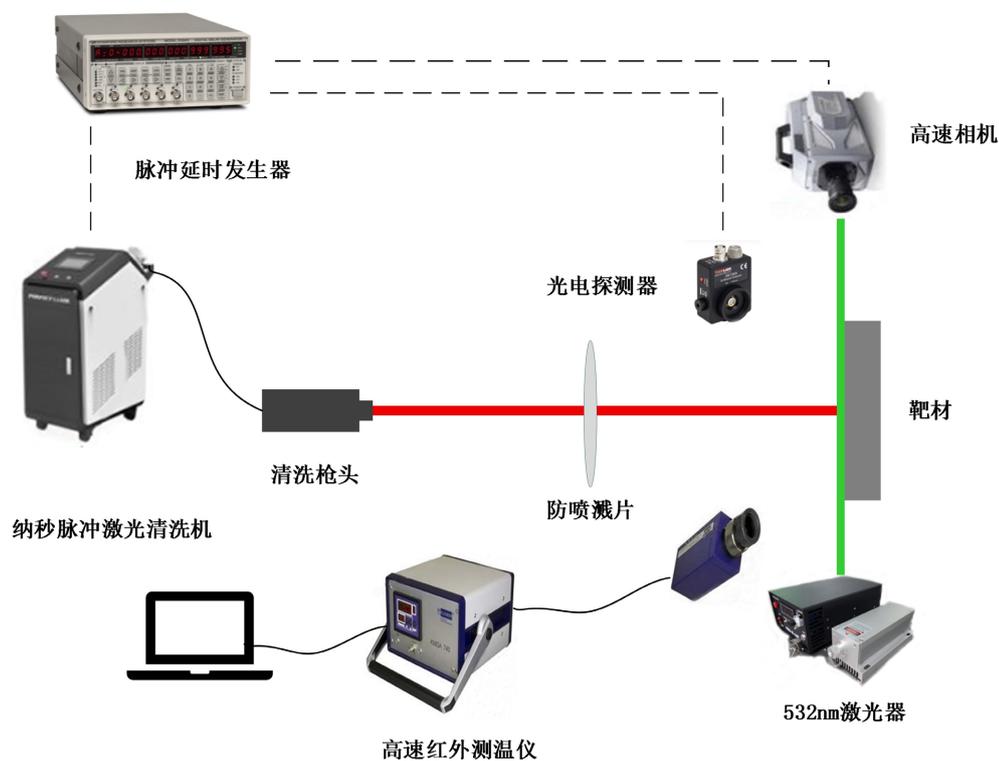


Figure 6. Experimental drafting flowchart  
图 6. 实验拟定流程图

### 4.3. 实验结果分析

#### 4.3.1. 不同激光功率密度对二维形貌的影响

设定其他激光参数不变, 改变功率为 60 W、65 W、70 W、75 W, 观察功率对除漆效果的影响。

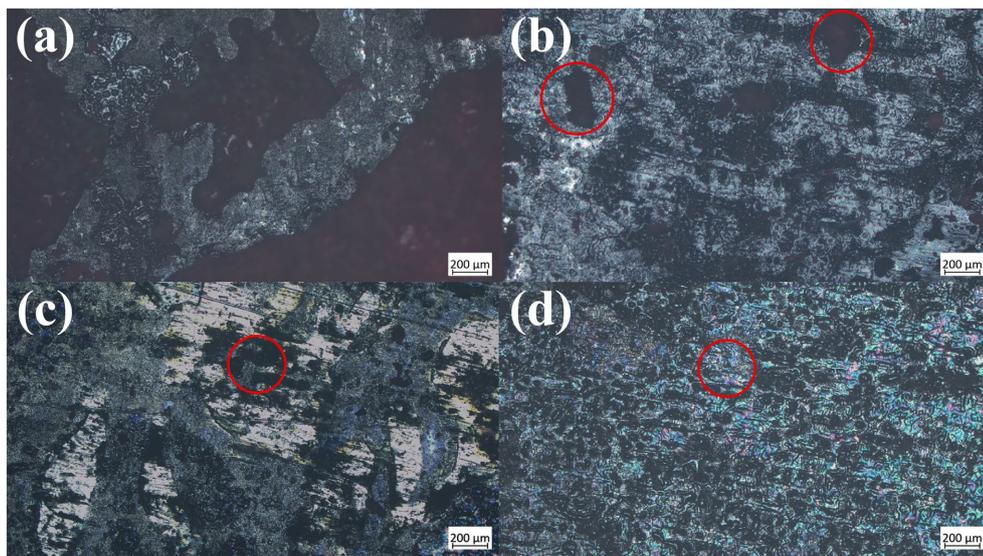
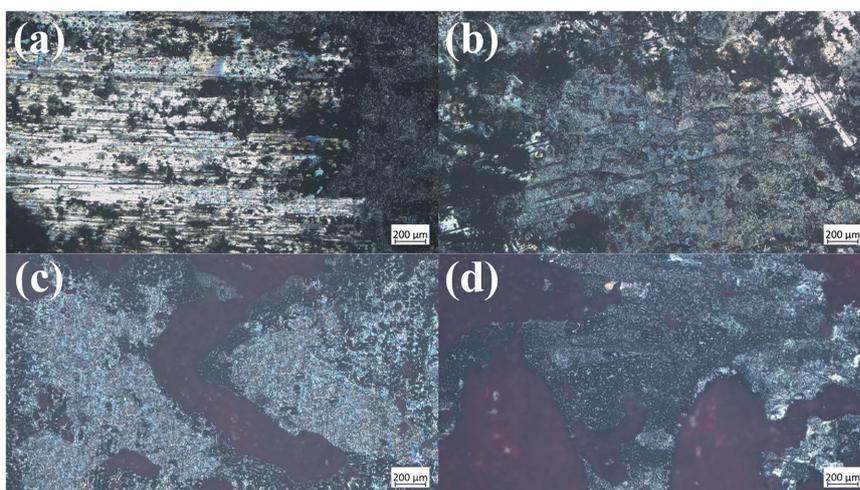


Figure 7. Surface morphology of marine steel under different laser powers: (a) 60 W; (b) 65 W; (c) 70 W; (d) 75 W  
图 7. 不同激光功率下船用钢表面形貌: (a) 60 W; (b) 65 W; (c) 70 W; (d) 75 W

从图7能够直接对比不同激光功率下的清洗效果。当功率为60 W时, 漆层残留十分明显, 几乎完全覆盖钢材表面。将功率提升至65 W后, 如图7(b)所示, 漆层残留有所减少。进一步提高到70 W时, 清洗效果显著改善(图7(c)), 此时船用钢表面仅出现少量因烧蚀产生的黑色小凹坑, 这是由于功率增大使得聚氨酯漆层达到完全气化所需的393 K, 而基底并未受到明显损伤, 此时的清洗效果最佳。然而, 当功率继续增加至75 W(图7(d)), 过高的热量导致基底部分熔化, 形成表面凹凸不平的烧蚀坑, 对材料造成了较为严重的破坏。

#### 4.3.2. 不同激光扫描速度对二维形貌的影响

激光扫描速度对清洗效果也会产生一定的影响, 设定其他激光参数不变, 改变扫描速度为2500 mm/s、5000 mm/s、7500 mm/s、10,000 mm/s, 图8为不同扫描速度下清洗效果的表面形貌。



**Figure 8.** Surface morphology of marine steel under different scanning speeds: (a) 2500 mm/s; (b) 5000 mm/s; (c) 7500 mm/s; (d) 10,000 mm/s

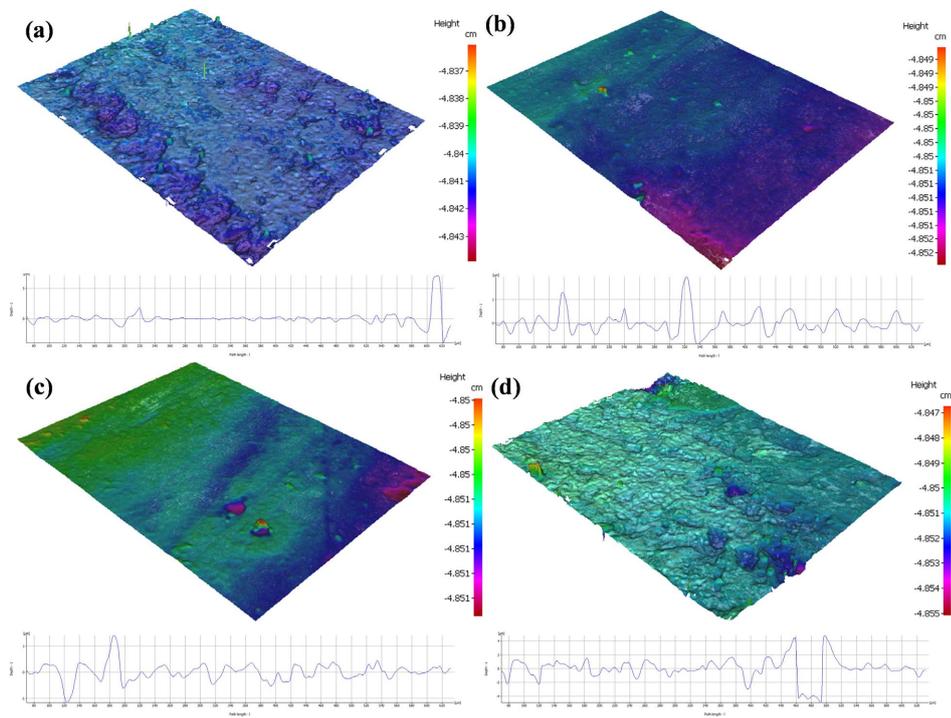
**图 8.** 不同扫描速度下船用钢表面形貌: (a) 2500 mm/s; (b) 5000 mm/s; (c) 7500 mm/s; (d) 10,000 mm/s

图8展示了扫描速度对清洗效果的明显影响。在2500 mm/s的速度下, 钢表面未观察到漆层残留, 温度条件适宜, 此时清洗效果最好。将速度提升至5000 mm/s后, 表面开始出现少量残留, 清洗质量有所下降。速度达到7500 mm/s时, 已能见到部分未被清除的漆层。而速度继续升高到10,000 mm/s, 表面则残留大量漆层, 此时清洗效果已不理想。

#### 4.3.3. 不同激光参数对表面漆层粗糙度的影响

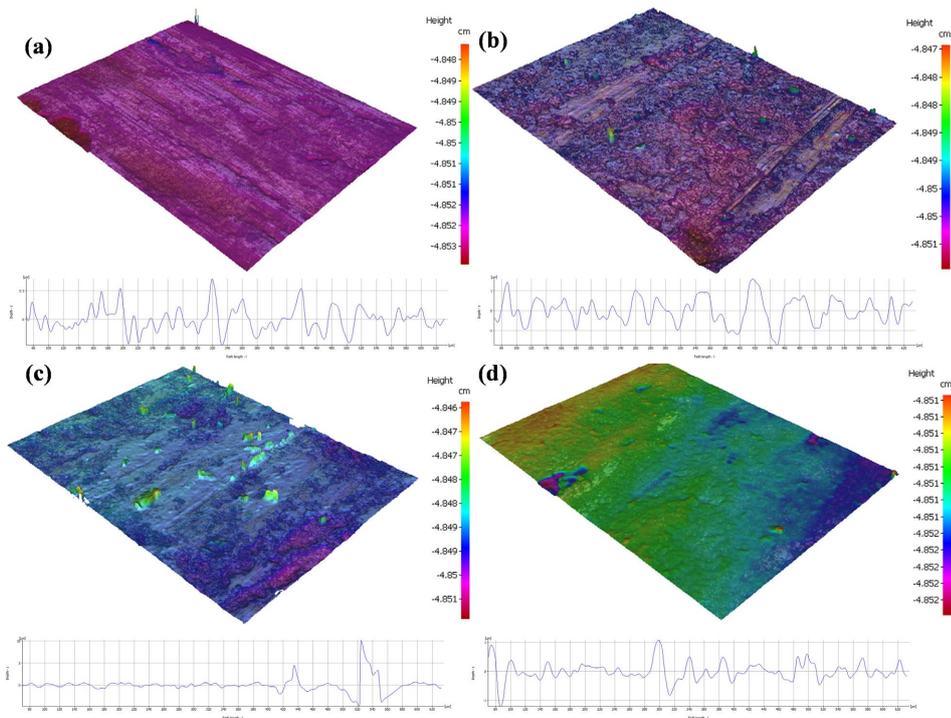
AH32 钢表面漆层清除后, 其粗糙度会发生变化, 这一数值直接影响后续喷涂涂层的附着力。为了评估这一影响, 本研究使用三维形貌仪对处理后的钢表面进行了观测与粗糙度测量。为确保结果可靠, 在同一区域进行了多次测量, 并将所获数据的算术平均值作为表面粗糙度  $R_a$  的最终结果。

图9展示了在固定其他激光参数时, 不同功率处理后的AH32钢表面三维形貌与平均粗糙度变化。随着功率从60 W逐步提高到75 W, 清洗效果与表面形貌呈现出明显的对应趋势。在60 W功率下, 传入基体的能量有限, 漆层表面仅形成少量微坑, 此时表面粗糙度  $R_a$  为  $5.13 \mu\text{m}$ 。将功率提升至65 W后, 大部分漆层被去除, 粗糙度相应下降至  $2.93 \mu\text{m}$ 。当功率达到70 W时, 激光能量恰好将漆层完全烧蚀并触及基底表面, 尽管残留少量熔融物与微凹坑, 但粗糙度进一步降低至  $2.31 \mu\text{m}$ , 为所有测试条件下的最低值。然而, 功率继续升高至75 W后, 基底出现明显的熔融与热损伤, 导致粗糙度急剧上升至  $9.86 \mu\text{m}$ 。综合来看, 70 W被确认为最佳清洗功率, 此时可获得约  $2.31 \mu\text{m}$  的最低平均表面粗糙度。



**Figure 9.** Three-dimensional topography and roughness of shipbuilding steel surfaces under different laser power levels: (a) 60 W; (b) 65 W; (c) 70 W; (d) 75 W

**图 9.** 不同激光功率下船用钢表面三维形貌与粗糙度: (a) 60 W; (b) 65 W; (c) 70 W; (d) 75 W



**Figure 10.** Three-dimensional morphology and roughness of ship steel surfaces at different scanning speeds: (a) 2500 mm/s; (b) 5000 mm/s; (c) 7500 mm/s; (d) 10,000 mm/s

**图 10.** 不同扫描速度下船用钢表面三维形貌与粗糙度: (a) 2500 mm/s; (b) 5000 mm/s; (c) 7500 mm/s; (d) 10,000 mm/s

图 10 显示了在不同扫描速度下清洗后 AH32 钢表面的三维形貌与平均粗糙度。表面粗糙度随扫描速度的变化并非单调递增或递减,而是呈现先升高后降低的趋势:对应的粗糙度值分别为 1.54  $\mu\text{m}$ 、5.01  $\mu\text{m}$ 、7.99  $\mu\text{m}$  和 2.21  $\mu\text{m}$ 。当扫描速度设定为 2500 mm/s 时,漆层被精确去除,基底表面仅留下少许熔融痕迹与微小凹坑。随着速度增加至 5000 mm/s 和 7500 mm/s,由于激光作用时间缩短、光斑搭接率降低,漆层清除不彻底,表面粗糙度相应上升。值得注意的是,当速度进一步提高到 10,000 mm/s 时,尽管此时光斑搭接率最低、清洗效果最差,但表面反而显得相对平整,粗糙度值低于 5000 mm/s 和 7500 mm/s 的情况。综合来看,在扫描速度为 2500 mm/s 时,不仅清洗效果最好,而且获得的表面平均粗糙度最低,仅为 1.54  $\mu\text{m}$ 。

## 5. 总结

本研究明确了激光功率与扫描速度对 AH32 船用钢表面聚氨酯漆层峰值温度的作用规律。清洗实验结果显示,采用 70 W 激光功率与 2500 mm/s 扫描速度这一参数组合,能够有效去除漆层并较好地保护基底,这一结果也从侧面验证了所建立数学模型的可靠性。

## 参考文献

- [1] 宋峰, 邹万芳, 田彬, 刘淑静, 牛孔贞, 李训谱, 田建国. 一维热应力模型在调 Q 短脉冲激光除漆中的应用[J]. 中国激光, 2007(11): 1577-1581.
- [2] 施曙东. 脉冲激光除漆的理论模型、数值计算与应用研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2012.
- [3] 顾志同, 王涛, 冯伟峰, 张鑫, 姚涛. 激光清洗铝合金表面漆层的实验与工艺参数优化研究[J]. 光电子·激光, 2025, 36(2): 208-215.
- [4] Savastru, D., Savastru, R., Lancranjan, I., Miclos, S. and Opran, C. (2013) Numerical Analysis of Laser Paint Removal from Various Substrates. *SPIE Proceedings*. <https://doi.org/10.1117/12.2032660>
- [5] Liu, Y., Liu, W., Zhang, D., Tian, Z., Sun, X. and Wei, Z. (2020) Experimental Investigations into Cleaning Mechanism of Ship Shell Plant Surface Involved in Dry Laser Cleaning by Controlling Laser Power. *Applied Physics A*, **126**, Article No. 866. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04050-y>
- [6] 刘伟军, 赵子铭, 李强, 等. 激光清洗 2A12 铝合金复合漆层的技术研究[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 134-144.
- [7] 高辽远, 周建忠, 孙奇, 等. 激光清洗铝合金漆层的数值模拟与表面形貌[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 335-343.
- [8] 张天刚, 李昱, 邹俊豪, 等. 民机铝合金蒙皮表面漆层激光清洗仿真与实验研究[J/OL]. 中国激光, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20240311.2232.002.html>, 2024-06-25.
- [9] Zhang, D., Xu, J., Li, Z., Jin, Y., Su, X., Shan, D., et al. (2022) Removal Mechanisms of Nanosecond Pulsed Laser Cleaning of Blue and Red Polyurethane Paint. *Applied Physics A*, **128**, Article No. 170. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05296-4>
- [10] 方世超. 激光脱除船舶板材表面环氧漆的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
- [11] 李思凡, 王春明, 张威. 基于激光清洗技术的船舶绿色清洗方法研究[J]. 应用激光, 2022, 42(5): 168-177.
- [12] Kim, J., Song, M., Han, M. and Kim, J. (2021) A Study on the Application of Laser Cleaning Process in Shipbuilding Industries Using 100 W Fiber Laser. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **35**, 1421-1427. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0113-3>
- [13] 李华婷. 纳秒脉冲激光清洗 AH32 钢锈蚀的表面质量及耐蚀性研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [14] 张鑫, 王涛, 冯伟峰, 等. 激光去除 AH32 钢漆层的数值模拟及实验研究[J/OL]. 光电子·激光, 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1182.O4.20240326.1406.017.html>, 2024-06-25.