

基于热力耦合的复合激光除漆数值模拟研究

张百杰, 金 乐, 李 忆, 李 顺

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年2月27日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月2日

摘 要

本研究针对航空铝合金表面复合漆层高精度去除需求, 建立连续-纳秒复合激光与气流辅助耦合的有限元模型。基于有限元仿真分析法构建包含激光热源、气固耦合传热及热弹性力学的多物理场模型, 重点分析不同能量密度下的温度梯度演化规律与热应力分布特征。揭示复合激光除漆的机理, 阐明激光参数与热力耦合响应的关联机制, 为复合激光除漆工艺优化提供理论依据。

关键词

复合激光, 铝合金, 热力耦合, 气流

Numerical Simulation of Gas-Assisted Composite Laser Paint Removal Based on Thermodynamic Coupling

Baijie Zhang, Le Jin, Yi Li, Shun Li

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

Received: Feb. 27th, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 2nd, 2025

Abstract

A finite element model of continuous nanosecond composite laser coupled with air flow assisted coupling was established to remove the high layer accuracy of composite coatings for aerospace aluminum alloys. A multi-physics model including laser heat source, gas-solid coupled heat transfer and thermoelasticity was constructed based on finite element simulation analysis. The temperature gradient evolution law and thermal stress distribution characteristics under different energy densities were analyzed. The mechanism of composite laser paint removal was revealed, and the correlation mechanism between laser parameters and thermal coupling response was elucidated,

which provided theoretical basis for the optimization of composite laser paint removal process.

Keywords

Recombination Laser, Aluminium Alloy, Thermodynamic Coupling, Airflow

Copyright © 2025 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

随着航空制造业的快速发展, 7075 铝合金因其优异的比强度与耐腐蚀性, 广泛应用于飞机蒙皮、结构件等关键部位。在长期服役过程中, 其表面防护漆层易出现老化、剥落现象, 亟需高效的再制造处理技术。传统机械打磨与化学溶剂除漆方法存在基材损伤率高(约 15%~20%)、环境污染严重等问题[1], 而激光除漆技术凭借非接触、选择性去除等优势, 逐渐成为航空维修领域的研究热点[2][3]。然而, 传统的激光模式在去除高附着力漆层时面临显著挑战: 连续激光易引发基体热积累导致微观组织相变[4]-[6], 纳秒激光则因能量密度不足难以实现高效剥离[7]-[9]。如何通过激光参数协同控制热力耦合效应, 成为提升除漆质量的核心问题。

近年来, 复合激光技术为解决上述矛盾提供了新思路。研究表明, 连续激光与脉冲激光的时序组合可实现材料预热 - 冲击剥离的协同作用: He Cao [10]等采用纳秒 - 皮秒组合短脉冲激光分析了其与 CCD 相互作用过程中的温度场和应力场的分布, 但未涉及热应力演化机制分析; Xianshi Jia 等[11]使连续激光器和纳秒脉冲序列组合脉冲激光, 用于在不使用高压气体射流的情况下钻孔 Q235B 钢, 然而其模型未考虑相变潜热对温度场的影响。与此同时, 气流辅助技术被证实可有效调控激光加工过程中的热力学行为: Weina Zhao 等[12]研究了在超音速风洞中连续波激光作用下层压碳纤维增强塑料(CFRP)的烧蚀行为, 但缺乏对气固耦合传热机制的定量描述。现有研究多聚焦于单一激光模式, 对气流影响下的连续 - 纳秒时序耦合下的动态热力耦合效应尚未形成系统认知。

本研究提出一种气流辅助连续 - 纳秒复合激光除漆新工艺, 通过建立多物理场耦合数值模型, 揭示连续激光预热与纳秒激光冲击剥离的时序能量分配机制, 阐明漆层相变阈值与热影响区形成的动力学规律; 构建激光 - 气流 - 材料参数的多目标优化模型, 突破传统试错法在工艺参数匹配中的效率瓶颈, 实现了复合激光作用下漆层剥离过程的热 - 力 - 流多场协同仿真, 为航空铝合金表面高质量再制造提供了理论支撑。

2. 气流辅助复合激光除漆理论模型

如图 1 所示, 基于 7075 铝合金基体与环氧底漆、环氧清漆和醇酸漆的多层结构, 构建二维热力耦合仿真模型。在连续激光辐照阶段, 入射能量经表面反射损失后, 剩余部分被漆层吸收并转化为非稳态热传导过程。当漆层表层温度超过其汽化阈值时, 发生汽化相变并形成烧蚀凹坑。纳秒激光作用时, 基底与漆层的热膨胀系数差异引发瞬态热应力波。根据热弹性理论, 界面处产生的双向应力波引发应力差。两种机制的协同作用表现为: 连续激光通过汽化消融实现表层去除, 同时预热作用降低漆层结合强度; 纳秒激光则通过热应力波传播引发界面层裂。残余应力释放过程中, 汽化产物(气溶胶颗粒)与层裂碎片在辅助气流作用下被有效排除, 最终实现漆层的高效低损伤去除。

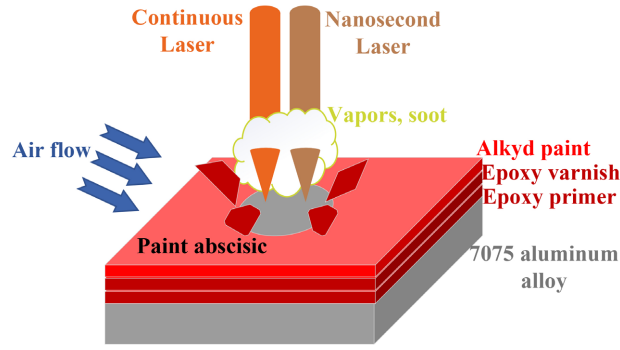


Figure 1. Schematic diagram of airflow-assisted composite laser paint removal model

图 1. 气流辅助复合激光除漆模型示意图

激光与材料的相互作用以热传导为主导，考虑相变潜热与强制对流换热，建立瞬态热传导方程：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{laser} - Q_{conv} - Q_{latent} \quad (1)$$

式中 ρ 是密度， C_p 是比热容， k 是热导率， Q_{laser} 是复合激光热源，是连续激光与纳秒激光热源的耦合 $Q_{laser} = q_c + q_n$ ，连续激光热流密度可由以下公式计算：

$$q_c = \frac{2P_c}{\pi r_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_c^2}\right) \cdot \alpha_c \quad (2)$$

式中 P_c 是连续激光功率， r_c 是光斑半径， α_c 是漆层吸收率。

纳秒激光脉冲能量密度可由以下公式计算：

$$q_n = \frac{E_n}{\tau_p \pi \gamma_n^2} \cdot \exp\left(-\frac{(t-t_0)^2}{2\tau_p^2}\right) \cdot \alpha_n \quad (3)$$

式中 E_n 是单脉冲能量， τ_p 是脉宽， t_0 是脉冲中心时间。

基于热传导方程进行跨层传递，通过“连续性边界条件”保证界面处温度与热流密度的连续。

气流强制对流换热损耗为：

$$Q_{conv} = h(T - T_\infty) \quad (4)$$

式中 h 为对流换热系数， T_∞ 是环境温度。

漆层汽化的相变潜热项为：

$$Q_{latent} = L \cdot \delta(T - T_m) \cdot \frac{\partial f}{\partial t} \quad (5)$$

式中， L 是相变潜热， T_m 是相变温度， f 是相变体积分数。

基于热膨胀效应，推导热应力场，采用“固体力学接口”的位移连续性约束，确保各层间应力张量的连续演化，应变和位移的关系为：

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (6)$$

考虑热应变的本构方程为：

$$\sigma = C : (\epsilon - \alpha \Delta T I) \quad (7)$$

I 是偏应力张量, C 为弹性张量, α 是热膨胀系数, $\Delta T = T - T_{ref}$ 。
得到临界判断依据为:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{3}{2} \left[\sigma - \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma) \right]} \geq F_{ad} \tag{8}$$

F_{ad} 是漆层与铝合金黏附力:

$$F_{ad} \approx \frac{\sqrt{A_{11}A_{22}}}{6\pi z^3} \tag{9}$$

z 为漆层与 7075 铝合金交界处的实际距离, A_{12} 为漆层和 7075 铝合金相互接触的 Hamaker 系数根据理论公式计算, 漆层于 7075 铝合金基底之间的吸附力约为 $2.76 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 。

3. 仿真结果与讨论

仿真中, 为了凸显复合激光对除漆作用机制的界定, 仿真中所采用的复合激光参数如下表 1 所示。

Table 1. Laser parameters
表 1. 激光参数

参数名称	数值及单位
光斑直径	1 mm
纳秒能量密度	120~250 mJ/mm ²
连续激光功率	35~70 W/mm ²
波长	1064 nm
脉宽	20 ns

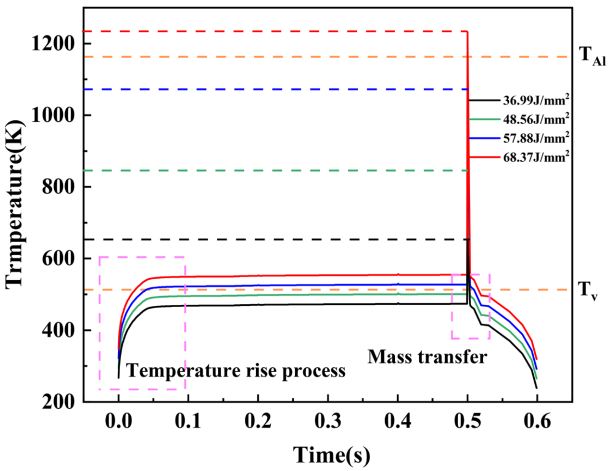


Figure 2. Temperature variation trend of laser irradiation center with different energy density combinations
图 2. 不同能量密度组合激光辐照中心点温度变化趋势

图 2 为设定辅助气流速度为 50 m/s 以与靶材平面成 20°角入射, 更改组合激光能量密度分别为 36.99 J/mm² (36.86 W/mm² + 139 mJ/mm²) 48.56 J/mm² (48.41 W/mm² + 156 mJ/mm²) 57.88 J/mm² (57.70 W/mm² + 182 mJ/mm²)和 68.37 J/mm² (68.16 W/mm² + 217 mJ/mm²)分析漆层表面激光辐照中心点温度变化趋势。图中 T_v 是醇酸漆气化点 513 K, T_{Al} 是铝合金熔点 1163 K。在 0.1 s 内连续激光作用使温度瞬间上升至 500 K

以上,至 0.5 时纳秒脉冲激光入射使温度达到峰值,发生了油漆的大面积弹性去除导致温度急速下降,复合激光停止作用。当能量密度为 36.99 J/mm^2 和 48.56 J/mm^2 时,整体温度处于醇酸漆气化点以下,无法有效清除漆层;当能量密度为 57.88 J/mm^2 时,整体温度处于醇酸漆气化点以上,且峰值温度低于铝合金熔点,可以较好的去除油漆且不发生损伤;当能量密度为 68.37 J/mm^2 时,纳秒激光入射时峰值温度超出铝合金熔点,将对铝合金基底造成损伤。

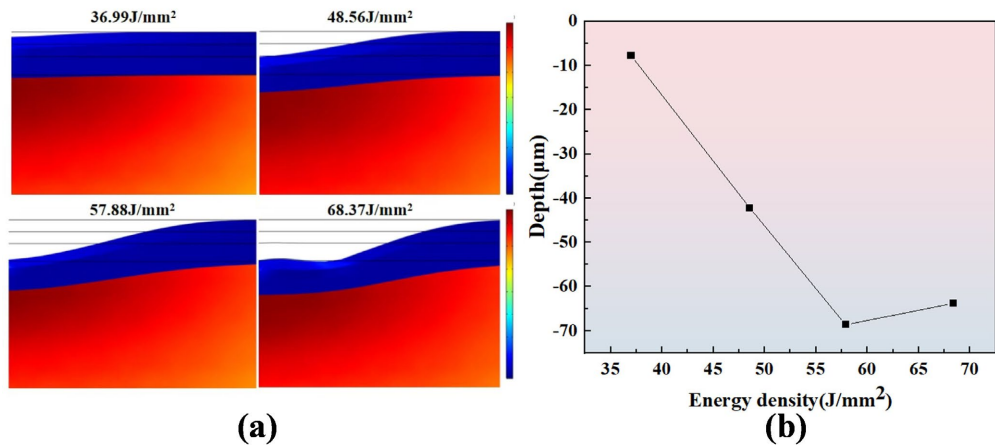


Figure 3. Changes in removal depth of different energy densities (a) evolution of paint removal; (b) dot plot of removal depth
图 3. 不同能量密度去除深度变化(a) 漆层去除演化图; (b) 去除深度点线图

如图 3(a)、图 3(b)所示,当能量密度较低时表面漆层仍有残留,去除效果不明显,这是因为表面所达到温度低于漆层气化点,并且不发生相变。清洁力也就低于吸附力。能量密度为 57.88 J/mm^2 时表面温度超过铝合金表面漆层的汽化点,使得漆层表面被热烧蚀作用去除,从而产生良好的清洁效果。而当能量密度为 68.37 J/mm^2 时漆层被彻底去除,同时铝合金基底发生熔融损伤导致去除深度转而上升。

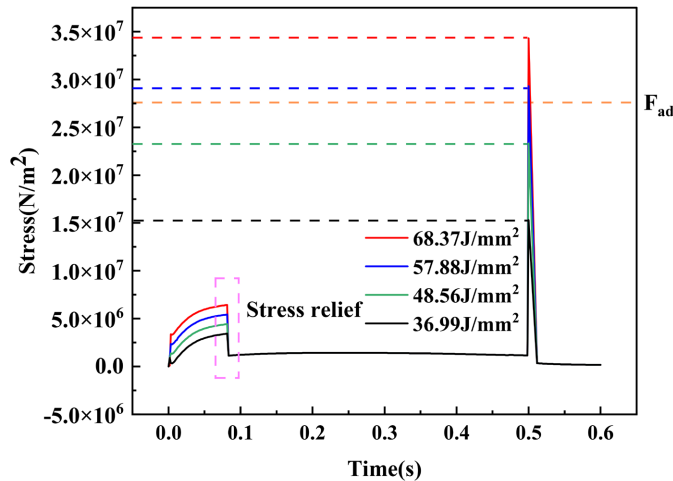


Figure 4. Trend of stress difference between primer and substrate with different energy densities over time
图 4. 不同能量密度底漆与基底间应力差随时间变化趋势

图 4 所示是不同组合激光能量密度下的底漆与基底间应力差随时间变化趋势图, F_{ad} 是漆层与铝合金基底间的粘附力大小是 $2.76 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 。在连续激光初始作用阶段,温度快速升高,由于漆层与基底热传

导系数不同,漆层与基底间热应力差迅速增加。而后油漆发生相变,温度平稳,应力得以释放。在纳秒脉冲激光入射到预热后的油漆时峰值功率使得热应力差瞬增,在 57.88 J/mm^2 超过漆层与铝合金基底间的粘附力,漆层崩离铝合金表面。 68.37 J/mm^2 时应力过高将造成损伤。

4. 结论

本研究系统阐明了气流辅助复合激光清除铝合金表面漆层的耦合作用机制。通过构建气流辅助条件下复合激光的热烧蚀与热应力耦合作用模型,揭示了温度场与应力场的动态演变规律,并在此基础上确定了特定工艺参数下的能量密度阈值:当辅助气流以 50 m/s 速度、 20° 入射角作用时,在连续激光辐照 0.5 s 后纳秒脉冲激光入射的能量密度阈值为 57.88 J/mm^2 。进一步分析表明,清洗机制呈现阶段性特征:连续激光通过热烧蚀效应优先剥离表层漆膜并建立高温环境,纳秒脉冲激光随后诱导的瞬态热应力显著超过底漆-基底界面结合强度,从而实现界面解离的精准控制。研究结论不仅深化了对激光清洗机理的认知,更为工业应用中的参数优化提供了理论依据。

参考文献

- [1] Liu, J., Wang, J., Mazzola, L., Memon, H., Barman, T., Turnbull, B., *et al.* (2018) Development and Evaluation of Poly (Dimethylsiloxane) Based Composite Coatings for Icephobic Applications. *Surface and Coatings Technology*, **349**, 980-985. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.066>
- [2] Chongcharoen, K., Kittiboonanan, P. and Ratanavis, A. (2017) Feasibility Study of a Dual Wavelength Laser Cleaner. *Journal of Physics: Conference Series*, **901**, Article 012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/901/1/012105>
- [3] Zou, W., Xie, Y., Xiao, X., Zeng, X. and Luo, Y. (2014) Application of Thermal Stress Model to Paint Removal by Q-Switched Nd: YAG Laser. *Chinese Physics B*, **23**, Article 074205. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/23/7/074205>
- [4] Tsunemi, A., Hagiwara, K., Saito, N., Nagasaka, K., Miyamoto, Y., Suto, O., *et al.* (1996) Complete Removal of Paint from Metal Surface by Ablation with a TEA CO_2 Laser. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, **63**, 435-439. <https://doi.org/10.1007/s003390050413>
- [5] Li, Y., Li, J., Dong, H., Zhang, W. and Jin, G. (2024) Simulation and Experimental Study on Continuous Wave Fiber Laser Removal of Epoxy Resin Paint Film on the Surface of 6061 Aluminum Alloy. *Photonics*, **11**, Article 82. <https://doi.org/10.3390/photonics11010082>
- [6] Lu, Y., Yang, L., Wang, Y., Chen, H., Guo, B. and Tian, Z. (2019) Paint Removal on the 5A06 Aluminum Alloy Using a Continuous Wave Fiber Laser. *Coatings*, **9**, Article 488. <https://doi.org/10.3390/coatings9080488>
- [7] Apostol, I., Damian, V., Garoi, F., Iordache, I., Bojan, M., Apostol, D., *et al.* (2011) Controlled Removal of Overpainting and Painting Layers under the Action of UV Laser Radiation. *Optics and Spectroscopy*, **111**, 287-292. <https://doi.org/10.1134/s0030400x11080054>
- [8] Zhao, H., Qiao, Y., Du, X., Wang, S., Zhang, Q., Zang, Y., *et al.* (2019) Paint Removal with Pulsed Laser: Theory Simulation and Mechanism Analysis. *Applied Sciences*, **9**, Article 5500. <https://doi.org/10.3390/app9245500>
- [9] Brygo, F., Dutouquet, C., Le Guern, F., Oltra, R., Semerok, A. and Weulersse, J.M. (2006) Laser Fluence, Repetition Rate and Pulse Duration Effects on Paint Ablation. *Applied Surface Science*, **252**, 2131-2138. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.143>
- [10] Cao, H., Xie, X., Chang, H., Li, Y., Yue, J., Yu, Y., *et al.* (2024) Laser-Induced Damages to Charge Coupled Devices with Combined Nanosecond/picosecond Short-Pulse Lasers. *Frontiers in Physics*, **12**, Article 1345859. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1345859>
- [11] Jia, X., Zhang, Y., Chen, Y., Wang, H., Zhu, G. and Zhu, X. (2019) Combined Pulsed Laser Drilling of Metal by Continuous Wave Laser and Nanosecond Pulse Train. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **104**, 1269-1274. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04139-6>
- [12] Zhao, W., Ma, T., Song, H., Yuan, W., Wang, R., Wang, Z., *et al.* (2021) Effects of Tangential Supersonic Airflow on the Laser Ablation of Laminated CFRP. *Journal of Materials Research and Technology*, **14**, 1985-1997. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.101>