

# 纳秒激光去除漆层传热模型及其机理研究\*

于松洁, 崔高伟, 许光映

(浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022)

**摘要:** 考虑激光在漆层和基层的吸收和扩散特性, 建立漆层和金属基层传热模型 I 和热衔接边界条件, 作为对比, 相应建立传热模型 II 和 III, 它们均忽略漆层和基层交界面处的热衔接条件, 其中模型 III 基层中漆层和基层均采用体热源. 利用 Laplace 变换求出问题的半解析解. 利用 Laplace 数值反变换, 给出相应的数值解算例, 得出了以下结论: 模型 I 得到连续的温度分布, 而模型 II 和模型 III 得到间断的温度分布, 这是违背物理实际的. 其次, 基于模型 I 预测清洗去除漆层的时间和能量密度处于对比模型 II 和 III 之间, 所得结论可为激光清洗工艺的优化改进提供理论支撑.

**关键词:** 清洗模型; 衔接条件; 损伤阈值; 热应力

**中图分类号:** O13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.440344

## Study on Heat Transfer Models and Mechanisms for Nanosecond Laser Removal of Paint Layers

YU Songjie, CUI Gaowei, XU Guangying

(School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University,  
Zhoushan, Zhejiang 316022, P.R.China)

**Abstract:** In view of the absorption and diffusion characteristics of laser in the paint layer and the base layer, heat transfer model I and thermal connection boundary conditions for the paint layer and the metal base layer was established. As a comparison, corresponding heat transfer models II and III were established, with the thermal connection conditions at the interface between the paint layer and the base layer ignored. In model III, both the paint layer and the base layer were connected to the bulk heat source. A semi-analytical solution to the problem was obtained through the Laplacian transformation. Corresponding numerical solution examples were given through the Laplacian numerical inverse transformation. The results show that, model I gives continuous temperature distributions, while model II and model III give discontinuous temperature distributions, which goes against physical reality. Secondly, based on model I, the predicted time and energy density for cleaning and removing the paint layer are between those of model II and model III. The work provides a theoretical reference for improving the laser cleaning process.

**Key words:** cleaning model; thermal connection condition; damage threshold; thermal stress

\* 收稿日期: 2023-12-04; 修订日期: 2024-07-11

基金项目: 舟山市科技基金(2017C41002;2016C41009)

作者简介: 于松洁(1998—),女,硕士(E-mail: 19818064618@139.com);

许光映(1967—),男,副教授,硕士生导师(通讯作者. E-mail: xugy@zjou.edu.cn).

引用格式: 于松洁, 崔高伟, 许光映. 纳秒激光去除漆层传热模型及其机理研究[J]. 应用数学和力学, 2024, 45 (12): 1577-1588.

## 0 引言

激光清洗是指激光直接或间接与污染物相互作用,从而产生复杂的物理或化学作用达到清洗目的的清洁技术.该技术已逐步应用于航空航天、船舶、汽车等行业<sup>[1]</sup>.激光除漆是激光清洗技术的一个重要分支,传统的材料表面的除漆方法主要有化学清洗和机械清洗.但化学清洗成本高,对环境污染严重,机械清洗则消耗大量劳动力,对基层造成破坏.相比于传统的手工机械和化学方法,激光用途广、可靠性高、清洗效率高、时效性好、运行成本低且绿色环保<sup>[2-4]</sup>,这使得激光清洗油漆越来越受到研究人员的重视.随着技术与时代的发展,激光除漆面临着更高的要求,因此对激光除漆技术进行系统研究显得尤为重要.对此,国内外在对激光清洗的相关理论和实验方面均有一定的研究.

在实验研究中,针对不同的研究对象,采用不同的激光参数进行了激光除漆实验,进行了表面宏观形貌、微观结构和力学性能等多方面的测试,从而获得激光除漆的机理、工艺规律和工艺效果.而在激光除漆方面,实验研究多,而理论研究相对较少.目前,激光除漆的主要机理有热烧蚀效应、热振动效应、等离子效应等,上述机制并非单独出现,因此在除漆过程中存在着非常复杂的作用过程.王泽敏等<sup>[5]</sup>研究了脉冲激光除漆的工艺参数和机理,指出激光除漆的机理有三个:燃烧气化、热振动和声波振碎,并对其进行了详细的理论分析.邹万芳<sup>[6]</sup>介绍了干式激光除漆的烧蚀机制和振动机制,并给出了振动机制中的三种数学理论模型:脱离加速度模型、热应力模型和热弹性振动模型.

热应力振动是激光清洗油漆的一种重要机制,无论是微粒污染物还是层状污染物,一直以来很多研究者为此做出了大量贡献.1993年,Kelley等<sup>[7]</sup>建立了针对微粒清除的加速度模型,指出微粒的清除是由于微粒吸收激光能量后产生瞬时的热膨胀,进而产生足够的加速度从基层脱离出来.通过建立数学模型计算出温度变化,得到了整个过程的脱离力.该理论模型对激光除漆的研究有一定的影响,被视为激光清洗颗粒的理论模型之一,此后更加全面的理论模型相继被提出.而后,Lu等<sup>[8-9]</sup>阐述了激光清洗的热应力模型,认为热应力是使微粒从基层表面剥离的主要作用力,并通过一维热传导方程及其清洗条件,计算了基层的温度分布和热应力分布,其理论结果与实验吻合.邹万方等<sup>[10]</sup>研究了短脉冲激光除漆热应力模型,讨论了两端绝热有限长度、前端绝热无限长度和前端导热无限长度的三种理论模型,进一步获得了激光除漆过程中漆层和基层的温度情况.田彬<sup>[11]</sup>提出了双层热弹性振动模型,并通过求解方程得出污物与基底的温度分布和位移分布函数,以此计算出脱离应力,最终算出激光清洗的清洗阈值和损伤阈值,与实验结果基本吻合.宋峰和邹万方等<sup>[12-13]</sup>从热应力的角度建立了短脉冲激光除漆的理论模型,计算出漆层和基层的温度和热应力分布,最后通过比较热应力和黏附力的大小,得到了激光除漆的条件.Li等<sup>[14]</sup>认为激光作用机理由激光能量密度决定,不仅从理论上得到了不同激光能量密度对油漆去除的影响,而且通过实验对比得到了完全脱漆的理想参数.Lu等<sup>[15]</sup>基于热应力提出了纳秒激光清洗漆层的模型,定量研究了激光通量、作用时间与温升的关系,预测了清洗阈值和损伤阈值,结果发现,最优参数为 $1.56 \text{ J/cm}^2$ 激光能量密度,可以有效地从基层剥离油漆.

上述传热模型由热传导模型和热应力模型构成,是研究激光清洗理论的重要方法,但仍然存在不足之处需要澄清:①忽略了激光与油漆和基层相互作用机制.在激光与物质相互作用时,存在光能转化为热的机制,即物质对光的吸收机制,同时也存在热扩散机制.现有模型都忽略了这两种机制及其影响,体现在传热模型中内热源处理上不合理.激光在金属基层中传热模型的内热源的处理上,有的文献采用面热源,有的文献采用体热源,存在随意性,都未交代其理由<sup>[13,15]</sup>.②假设交界面处绝热不合理<sup>[7-13]</sup>.金属对于光子的吸收时间极短,吸收及转化为热的过程在 $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{ s}$ 完成,远小于激光脉冲作用于金属基层的时间 $10^{-9} \text{ s}$ ,且在实际操作中的时间由多个脉冲组成,所以此假设不合理.③交界面处存在两个温度是不合理的.激光清洗中最高温度出现在交界面处,说明热量是向两侧传递的,但上述文献在数学模型中并未体现,并且根据数学模型得出来的交界面处温度是不相等、不连续的,这表明交界面处存在两个温度,不符合事实,在下文中会被证明.④同种条件和材料下有不同的清洗阈值.文献<sup>[13,15]</sup>分别给出了清洗阈值为 $0.5 \text{ J/cm}^2$ 和 $1.56 \text{ J/cm}^2$ .

热传导问题是计算热应力的核心问题,之所以出现以上问题是目前的热传导数学模型带来的,因此本文在考虑上述问题的基础上,克服目前不足,考虑漆层和基层之间的热衔接行为,选取合适的热源,重新建立了纳秒激光辐照去除油漆的理论模型I,同时建立模型II和III作为对比,验证模型I的温度和热应力分布是合

理的,为激光除漆在工业领域上的进一步应用提供了一定参考。

## 1 激光除油漆问题的数学描述

常温下,金属内部能量载体(自由电子、声子)平均自由时间处于皮秒( $10^{-12}$  s)量级,而对于介质晶体和绝缘体而言,平均自由时间相对长一些,大致在纳秒( $10^{-9}$  s)至皮秒之间<sup>[16]</sup>,本文中使用的纳秒激光,脉宽时间为 10 ns,大于油漆和金属的平均自由时间,因此理论上本文的传热过程不属于非 Fourier 定律应用的范围,对不考虑热弛豫时间<sup>[17]</sup>的一般热传导方程为<sup>[18]</sup>

$$k\Delta T = \rho c \dot{T} \left[ 1 + \eta \frac{\lambda + 2\mu}{3\lambda + 2\mu} \left( \frac{\dot{u}}{\gamma \dot{T}} \right) \right] + Q, \quad (1)$$

其中

$$\eta = \frac{(3\lambda + 2\mu)^2 \gamma^2 T_0}{\rho^2 c v_e^2},$$

式中,  $T$  为温度;  $\Delta$  为 Laplace 算子;  $u$  为位移;  $\eta, k, \rho, c, \gamma, v_e, Q$  分别为耦合系数、导热系数、密度、比热容、线热膨胀系数、弹性波在物体中的传播速度、内热源;  $\lambda, \mu$  为弹性常数; 在方程中,  $\dot{u}$  与  $\gamma \dot{T}$  视为同阶的量,  $\lambda + 2\mu$  与  $3\lambda + 2\mu$  也是同阶的量。因此,在  $\eta \ll 1$  时,耦合项的影响忽略不计,对于铁,  $\eta = 5.49 \times 10^{-3}$ , 所以本文不考虑耦合项的位移变化对温度的影响。

### 1.1 热传导模型 I

如图 1 所示,当激光照射到油漆上时,会被反射、吸收和透射。

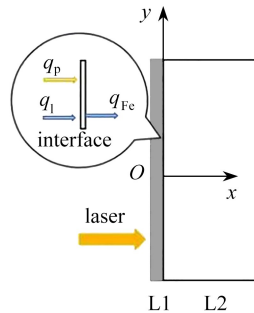


图 1 一维物理模型

Fig. 1 The 1D physical model

假设如下:

- ① 激光束在平面上均匀分布;
- ② 激光光斑的范围是毫米(mm)量级,油漆层厚度是微米( $\mu\text{m}$ )量级,激光束的直径远大于扩散深度,因此只考虑在  $x$  方向上的一维热传导方程;
- ③ 油漆层与基层存在热交换,二者之间存在热量的传导;
- ④ 油漆层和基层都是各向同性介质;
- ⑤ 油漆层和基层不存在相变。

表 1 激光参数<sup>[19]</sup>

Table 1 Laser parameters<sup>[19]</sup>

parameter	paint	Fe substrate	Al substrate
thermal diffusion length $L_t$ / m	$9.5 \times 10^{-9}$	$1.48 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-7}$
absorption depth $L_a$ / m	$5.3 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-8}$

温度加热模型有表面加热模型和体加热模型,当热扩散长度远大于光吸收长度时采用表面热源,否则采用体热源<sup>[19]</sup>。如表 1 所示,本文漆层采用体热源,基层采用面热源,得到以下热传导方程:

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{I_1}{k_p} \delta_p \exp(-\delta_p x) f(t), \quad t > 0, 0 < x < l, \quad (2a)$$

$$\frac{1}{\alpha_{\text{Fe}}} \frac{\partial T_{\text{Fe}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{Fe}}}{\partial x^2}, \quad t > 0, l < x < \infty, \quad (2b)$$

式中,  $T_p$  为油漆的温度;  $x, l, t$  分别为深度、漆层厚度和时间;  $\alpha_p, k_p, \delta_p$  分别为油漆的热扩散率、导热系数和油漆对激光的吸收系数;  $f(t)$  为激光辐照时间函数,  $f(t) = U(t) - U(t - t_d)$ ,  $t_d$  为激光脉冲时间,  $U(t)$  为单位阶跃函数;  $I_1 = (1 - R)I_0$ ,  $I_0$  为初始激光能量强度,  $I_1$  为作用于油漆的激光能量强度,  $R$  为漆层表面的反射率,  $I_0 = E/t_d$ ,  $E$  为激光通量;  $T_{\text{Fe}}$  为铁基层的温度,  $\alpha_{\text{Fe}}$  为铁基层的热扩散率。

在纳秒激光照射短时间内,忽略表面的散热,因此漆层表面可以按照绝热考虑:

$$k_p \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0, \quad t > 0, x = 0. \quad (3a)$$

在油漆层与基层界面处满足温度和热流连续的物理现实(图2)  $q_p + q_l = q_{\text{Fe}}$ , 因此如下所示:

$$\begin{cases} T_p = T_{\text{Fe}}, \\ -k_p \frac{\partial T_p}{\partial x} + I_1 \tau f(t) = -k_{\text{Fe}} \frac{\partial T_{\text{Fe}}}{\partial x}, \end{cases} \quad t > 0, x = l. \quad (3b)$$

此式是衔接条件,是油漆和基层温度相等和热流连续的要求<sup>[20]</sup>.图中  $q_p$  为油漆传导的能量,  $q_l$  为激光透过的能量,  $q_{\text{Fe}}$  为基底接收的能量,  $\tau$  是漆层透射率,  $k_{\text{Fe}}$  为铁基层的热导率,铁基层外侧按无穷远处理:

$$T_{\text{Fe}} = 0, \quad t > 0, x \rightarrow \infty. \quad (3c)$$

假设初始状态为

$$T_p = T_{\text{Fe}} = 0, \quad t = 0, 0 < x < l, x > l. \quad (3d)$$

为求解方便,引入下列无量纲量:

$$(T_p, T_{\text{Fe}})^* = \frac{\delta_p k_p}{I_1} (T_p, T_{\text{Fe}}), \quad (t, t_p)^* = \alpha_p \delta_p^2 (t, t_p), \quad (x, l)^* = (x, l) \delta_p, \quad (4)$$

则方程(2a)—(3d)化为下列无量纲方程组(为方便起见,省去所有\*):

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \exp(-x)f(t), \quad t > 0, 0 < x < l, \quad (5a)$$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_{\text{Fe}}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{\text{Fe}}}{\partial x^2}, \quad t > 0, l < x < \infty, \quad (5b)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial x} = 0, \quad t > 0, x = 0, \quad (6a)$$

$$\begin{cases} T_p = T_{\text{Fe}}, \\ -\frac{\partial T_p}{\partial x} + \tau f(t) = -k \frac{\partial T_{\text{Fe}}}{\partial x}, \end{cases} \quad t > 0, x = l, \quad (6b)$$

$$T_{\text{Fe}} = 0, \quad t > 0, x \rightarrow \infty, \quad (6c)$$

$$T_p = T_{\text{Fe}} = 0, \quad t = 0, 0 < x < l, x > l, \quad (6d)$$

式中,  $\alpha = \alpha_{\text{Fe}}/\alpha_p$ ,  $k = k_{\text{Fe}}/k_p$ .

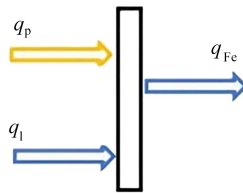


图2 界面处能量守恒

Fig. 2 Energy conservation at the interface

对方程(5a)—(6d)进行时间变量的 Laplace 变换,得到

$$s\bar{T}_p = \frac{d^2\bar{T}_p}{dx^2} + \exp(-x)\bar{f}(s), \quad 0 < x < l, \quad (7a)$$

$$\frac{s}{\alpha}\bar{T}_{Fe} = \frac{d^2\bar{T}_{Fe}}{dx^2}, \quad l < x < \infty, \quad (7b)$$

$$\begin{cases} \bar{T}_p = \bar{T}_{Fe}, \\ -\frac{d\bar{T}_p}{dx} + \tau\bar{f}(s) = -k\frac{d\bar{T}_{Fe}}{dx}, \end{cases} \quad x = l, \quad (8a)$$

$$\bar{T}_p = \bar{T}_{Fe} = 0, \quad x \rightarrow \infty, \quad (8b)$$

式中

$$\bar{T}_p = \int_0^\infty T_p(x,t)\exp(-st)dt, \quad \bar{T}_{Fe} = \int_0^\infty T_{Fe}(x,t)\exp(-st)dt,$$

$$\bar{f}(s) = \frac{1 - \exp(-t_d s)}{s}.$$

对上述 Laplace 变换后的常微分方程求解,得到油漆层和基层温度的拉氏域解为

$$\bar{T}_p(x,s) = c_1(s)\sinh(x\sqrt{s}) + c_2(s)\cosh(x\sqrt{s}) + c_3(s)\exp(-x), \quad (9a)$$

$$\bar{T}_{Fe}(x,s) = d_1(s)\exp(-(x-l)\sqrt{s/\alpha}). \quad (9b)$$

整理成

$$\bar{T}_p(x,s) = \left[ \frac{\tau \cosh(x\sqrt{s})}{\sqrt{s} F_2(s)} - \frac{1}{s-1} \left( \exp(-x) - \frac{1}{\sqrt{s}} \frac{F_1(x,s)}{F_2(s)} \right) \right] \bar{f}(s), \quad (10a)$$

$$\bar{T}_{Fe}(x,s) = \left[ \frac{\cosh(l\sqrt{s})}{F_2(s)} \frac{\tau}{\sqrt{s}} + \frac{1}{s-1} \left( \exp(-l) - \frac{F_3(s)}{F_2(s)} \right) \right] \bar{f}(s) \exp(-(x-l)\sqrt{s/\alpha}), \quad (10b)$$

其中

$$F_1(x,s) = \frac{k}{\sqrt{\alpha}} \sinh((l-x)\sqrt{s}) + \cosh((l-x)\sqrt{s}) + \exp(-h) \left( \frac{k}{\sqrt{\alpha}} + \frac{1}{\sqrt{s}} \right) \cosh(x\sqrt{s}),$$

$$F_2(s) = \frac{k}{\sqrt{\alpha}} \cosh(l\sqrt{s}) + \sinh(l\sqrt{s}),$$

$$F_3(s) = \exp(-l) \left( \frac{k}{\sqrt{\alpha}} - \frac{1}{\sqrt{s}} \right) \cosh(l\sqrt{s}) + \frac{1}{\sqrt{s}}.$$

## 1.2 对比模型 II

此模型为文献[14-15]所建立,忽略界面处衔接条件,假设漆层和基层是相互独立的,热传导方程如式(2a)和(2b)所示,在热源的处理上,油漆层采用体热源,基层采用面热源,其边界条件和初始条件如下:

$$T_p = 0, \quad t = 0, \quad 0 < x < l, \quad (11a)$$

$$k_p \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0, \quad t > 0, \quad x = l, \quad (11b)$$

$$-k_{Fe} \frac{\partial T_{Fe}}{\partial z} = I_1 \tau f(t), \quad x = l, \quad t > 0, \quad (11c)$$

$$T_{Fe} = 0, \quad t > 0, \quad x \rightarrow \infty. \quad (11d)$$

对其无量纲化、Laplace 变换,得到解析解为

$$\bar{T}_p(x, s) = \frac{\bar{f}(s)}{s-1} \left( \frac{\exp(-l) \cosh(x\sqrt{s}) - \cosh((x-l)\sqrt{s})}{\sqrt{s} \sinh(l\sqrt{s})} + \exp(-l) \right), \quad (12a)$$

$$\bar{T}_{Fe}(x, s) = \frac{\tau \bar{f}(s)}{k \sqrt{\frac{s}{\alpha}}} \exp(-(x-l)\sqrt{s/\alpha}). \quad (12b)$$

### 1.3 对比模型 III

此模型为文献[13]所建立,同样忽略界面处衔接条件,假设漆层和基层是相互独立的,在热源的处理上,油漆层和基层独立处理且均采用体热源,热传导方程及求解如下:

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + \frac{I_0}{k_p} a_p \delta_p e^{-\delta_p z} f(t), \quad 0 < x < l, t > 0, \quad (13a)$$

$$\frac{1}{\alpha_{Fe}} \frac{\partial T_{Fe}}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_{Fe}}{\partial z^2} + \frac{I_0 \tau}{k_{Fe}} a_{Fe} \delta_{Fe} e^{-\delta_{Fe}(z-l)} f(t), \quad x > l, t > 0, \quad (13b)$$

$$k_p \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0, \quad x = 0, x = l, t > 0, \quad (14a)$$

$$k_{Fe} \frac{\partial T_{Fe}}{\partial x} = 0, \quad x = l, t > 0, \quad (14b)$$

$$T_{Fe} = 0, \quad x \rightarrow \infty, t > 0. \quad (14c)$$

经过同样方法求解得

$$\bar{T}_p(x, s) = \frac{\bar{f}(s)}{s-1} \left[ \frac{\exp(-l) \cosh(x\sqrt{s}) - \cosh((x-l)\sqrt{s})}{\sqrt{s} \sinh(l\sqrt{s})} + \exp(-x) \right], \quad (15a)$$

$$\bar{T}_{Fe}(x, s) = \frac{ab}{k} \frac{\delta \bar{f}(s)}{(s/\alpha) - \delta^2} \left[ e^{-\delta(x-l)} - \frac{\delta}{\sqrt{s/\alpha}} \exp\left(- (x-l) \sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \right], \quad (15b)$$

其中,  $\alpha = \alpha_{Fe}/\alpha_p$ ,  $k = k_{Fe}/k_p$ ,  $\delta = \delta_{Fe}/\delta_p$ ,  $a = a_{Fe}/a_p$ ,  $a_p$  为油漆对激光的吸收率,  $a_{Fe}$  为基层对激光的吸收率.

### 1.4 激光除漆的热应力方程

当物体吸收激光能量后,其温度上升,物体两端因受到约束会开始膨胀,物体内部产生热应力.对于热应力有如下关系<sup>[13]</sup>:

$$\sigma = Y\varepsilon = Y \frac{\Delta l}{l} = Y\gamma \Delta T, \quad (16)$$

其中,  $Y$  是弹性模量,  $\varepsilon$  是应变,  $\gamma$  是热膨胀系数.关于激光清洗漆层,主要存在两个热应力导致漆层剥离,分别是  $x = l$  处油漆的热应力  $\sigma_p$  和基层的热应力  $\sigma_{Fe}$ .  $\sigma_p$  和  $\sigma_{Fe}$  的热应力分别为

$$\sigma_p = Y_p \varepsilon_p = Y_p \gamma_p \Delta T_p(l, t), \quad (17a)$$

$$\sigma_{Fe} = Y_{Fe} \varepsilon_{Fe} = Y_{Fe} \gamma_{Fe} \Delta T_{Fe}(l, t). \quad (17b)$$

因此,去除油漆时热应力产生的清洗力为

$$\Delta \sigma = \sigma_{Fe} - \sigma_p = Y_{Fe} \gamma_{Fe} \Delta T_{Fe}(l, t) - Y_p \gamma_p \Delta T_p(l, t). \quad (18)$$

为了满足漆层完全清洁的条件,界面上的应力应超过附着力,如下所示:

$$\Delta \sigma = \sigma_{Fe} - \sigma_p \geq f, \quad (19)$$

其中,  $f$  是漆层与基层之间的黏附力.

### 1.5 黏附力的计算

影响油漆与金属之间的黏附力的因素有很多<sup>[21]</sup>,本文为简化计算,把油漆与金属之间黏附力简单看作是平行平面之间的黏附力.公式如下<sup>[22]</sup>:

$$f = \frac{h_{12}}{8\pi^2 z^3}, \quad (20)$$



$$h_{12} = \frac{4\pi A_{12}}{3}, \quad (21)$$

$$A_{12} \approx \sqrt{A_{11}A_{22}}, \quad (22)$$

式中,  $z$  为相互接触的两个平行平面的距离,  $h_{12}$  为 Lifshitz-Van der Waals 常数,  $A_{12}$  为油漆和金属相互接触的 Hamaker 系数,  $A_{11}$  为油漆与油漆相互接触的 Hamaker 系数,  $A_{22}$  为金属与金属的相互接触的 Hamaker 系数。

## 2 算例及结果分析

### 2.1 数值反演方法

Laplace 反演可以通过 Laplace 反演积分变换后的 Fourier 积分的 Riemann 和近似得到<sup>[18]</sup>:

$$T(x, t) \cong \frac{\exp(\gamma t)}{t} \left[ \frac{1}{2} \bar{T}(x, s = \gamma) + \operatorname{Re} \sum_{n=1}^N \bar{T}\left(x, s = \gamma + \frac{in\pi}{t}\right) (-1)^n \right], \quad (23)$$

这里  $\gamma$  和  $N$  是常数, Riemann 和精度取决于  $s$  的值和由  $N$  决定的截断误差。此外,  $\gamma$  应满足以下关系, 以实现更快的收敛:

$$\gamma t \cong 4.7. \quad (24)$$

### 2.2 传热模型对温度分布的影响

以上是基于一维物理模型, 我们考虑激光与油漆层和基层的相互作用及油漆底层衔接传热机制, 建立了热传导模型 I 且给出了 Laplace 半解析解, 作为比较, 也给出了在忽略激光与漆层和底层相互作用和衔接传热机制时, 文献中的模型 II 和 III 及相应的半解析解。

依据文献[13]提供的材料物性数据(如表 2 所示), 以此为基础展开进一步的探讨与分析。

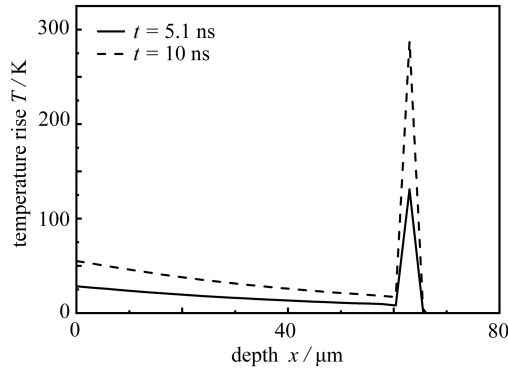
表 2 油漆和基层的物理参数<sup>[13]</sup>

Table 2 Physical parameters of base and paint<sup>[13]</sup>

parameter	paint	Fe base	Al base
thermal conductivity $k / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	0.3	78.48	205.8
thickness $l / \mu\text{m}$	63	-	-
density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1 300	7 870	2 696
specific heat capacity $c / (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	2 510	452	879
thermal diffusivity $\alpha$	$9.19 \times 10^{-8}$	$2.206 \times 10^{-5}$	$8.684 \times 10^{-5}$
linear expansion coefficient $\gamma / \text{K}^{-1}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.23 \times 10^{-5}$	$2.38 \times 10^{-5}$
absorption rate $a$	0.611	0.363	0.642
reflectivity $R$	0.202	0.637	0.358
transmittance $\tau$	0.187	0	0
absorption coefficient $\delta / \text{m}^{-1}$	$1.88 \times 10^4$	$5.24 \times 10^7$	$1.0 \times 10^8$
elasticity modulus $Y / (\text{N}/\text{m}^2)$	$1.0 \times 10^{10}$	$1.9 \times 10^{11}$	$7.0 \times 10^{10}$
approximate adhesion value $f / (\text{N}/\text{m}^2)$	$4.2 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7$	-	-

设初始温度为 300 K, 图 3 显示了在不同时刻各模型温升与位置的变化关系。三个分图的共同特点是, 随着深入漆层, 温度呈现出先逐步下降, 继而在接近金属基层表面处急剧上升至峰值, 随后在基层内部非常窄的区域内迅速降至环境温度的趋势。这一现象主要是由于漆层的热扩散深度小于光透射深度, 加之金属基层相较于漆层具有显著更高的吸收系数, 使得激光能量在基层表面区域高度集中, 引发局部高温。图 3(a) 中温度变化是连续的, 在分界面处漆层底侧和基层表侧的温升均为 288.746 K, 其原因在于模型 I 中激光能量一方面被金属基层吸收并向其内部传递, 另一方面逆向传递至漆层内部, 使得漆层底侧与基层表侧温度相等。此外, 漆层的温度梯度大于基层, 恰好满足两者间的衔接要求, 有力证明了本研究中对漆层与基层衔接效应的合理考量。相比之下, 图 3(b) 和 3(c) 所示的非衔接模型, 交界处漆层底侧的温升均为 20.27 K, 基层表侧的温升分别为 379.23 K 和 224.14 K, 在这两个模型中, 漆层底侧与基层表侧被假设为绝热状态, 导致交界处漆

层底侧的温度梯度为零,且整个漆层区域温度偏低,漆层底侧与基层表侧温差明显,从物理学角度看,这种不连续性显然是不合理的.综上所述,模型 I 更符合实际物理过程.在数学建模过程中,我们必须充分考虑漆层与基层之间的衔接条件,确保两者间的温度变化连续、协调.文献[23-25]通过有限元的方法间接模拟了温度场分布,有限元模型中对于不同材料界面应用的是第四类边界条件及衔接边界条件,从而也间接验证了模型 I 的有效性和准确性.



(a) 模型 I

(a) Model I

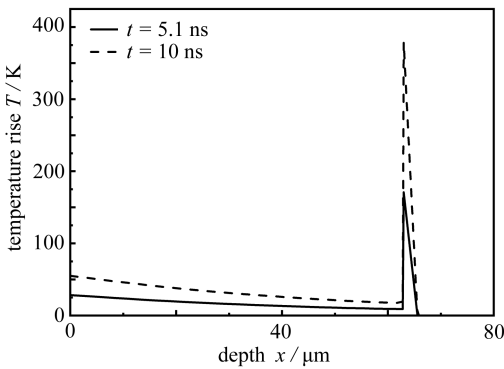
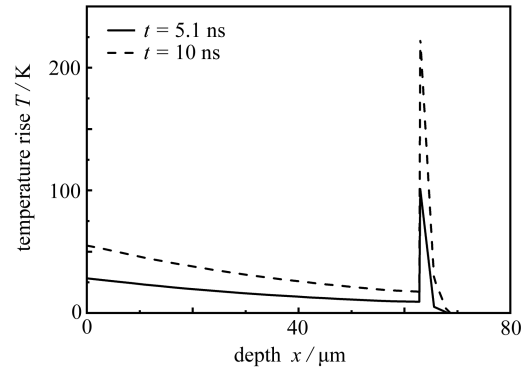
(b) 模型 II<sup>[13]</sup>(b) Model II<sup>[13]</sup>(c) 模型 III<sup>[15]</sup>(c) Model III<sup>[15]</sup>

图 3 不同时刻不同模型温升随位置的变化

Fig. 3 Temperature variations of different models with positions for different moments

图 4 显示了  $t = 10$  ns 时,各模型基层表面处温度与激光通量的关系,基层温度随激光通量的增加而增大.当温度达到 900 K 时,铁基层被快速氧化,导致基层结构受损.观察图 4 可知,模型 III 损伤阈值接近  $1.7$  J/cm<sup>2</sup>,与文献[13]中样品 I 损伤阈值极为接近,鉴于模型 III 采用了油漆与基层均为体热源的非衔接模型设定,且其材料属性与文献中一致,这有力证实了模型 III 确实为文献[13]所构建的非衔接模型.由于该模型的金属基层采用体热源设计,使得基层能够将透过油漆层的能量均匀分散至其内部,从而降低了金属表面的温度.

模型 II 为文献[14-15]建立的模型,假定油漆底层与基体表层之间按绝热条件处理,同时金属基层满足 Fourier 第二类边界条件,即激光能量完全施加于基体表层,由此导致其基层表面温度高于模型 I 中的相应值.文献[14]中不同能量密度激光脉冲作用下测得的温升数据与图 3(b) 所示变化规律相吻合,特别是油漆底侧温度梯度趋于零,以及清洗阈值和损伤阈值的变化趋势与模型 II 的预测结果颇为接近,这些事实从侧面印证了建立模型的差别以及本文考虑衔接条件的合理性和有效性.而文献[15]在不同能量密度激光脉冲作用下,温升值偏低,进而导致计算得到的清洗阈值偏大,其结论在逻辑上存在不合理之处.



如图 5 所示,对比分析了在  $t = 10 \text{ ns}$  时刻,两种模型(模型 I 与模型 II)中铁质与铝质基材上油漆温度随激光通量变化的趋势.其中,模型 II 为非衔接模型,其特点在于漆层与金属基层被视为相互独立的实体,故无论基层材质为何种金属,漆层温度均保持恒定,不受基层影响.相反,模型 I 为衔接模型,它充分考虑了漆层与金属基层之间的热衔接效应,即漆层温度会因基层温度变化而发生相应改变.显然,这种假设更为合理,因为它更贴近现实情况中漆层与基层间热量传递的实际过程.

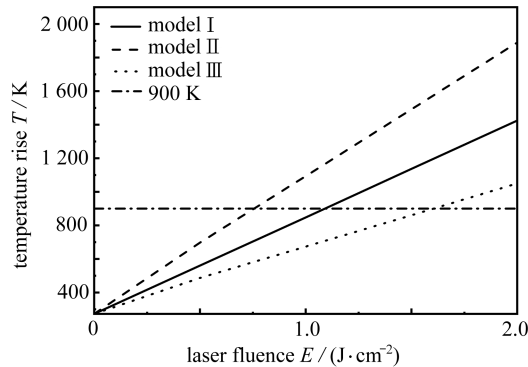


图 4 脉冲结束时,铁基层交界面处各模型温度随激光通量的变化

Fig. 4 The different models' temperature variations with laser fluences on the iron substrates at the end of a single laser pulse

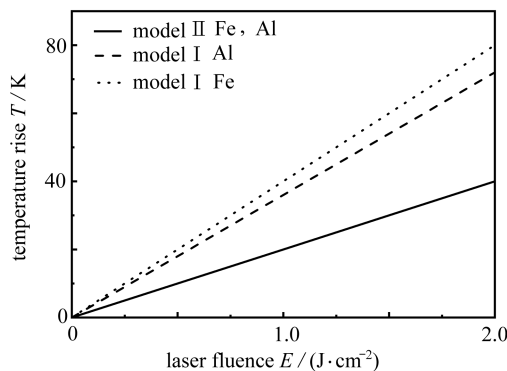


图 5 脉冲结束时,模型 I、II 中铁、铝基层上油漆升温模型随激光通量的变化

Fig. 5 Temperature rises of model I, II with laser fluences on the iron, aluminum substrates at the end of a single laser pulse

### 2.3 传热模型对除漆热应力的影响

图 6 揭示了在  $t = 10 \text{ ns}$  时,各模型交界面上热应力随激光通量的变化情况,此处热应力实质上即为清洗力,而油漆自身的热应力则被忽略.在模型 I 中,漆层与基层在交界处温度相等,热应力基于此单一温度点进行计算.相比之下,模型 II 与 III 中,漆层与基层温度并不一致,导致同一位置存在双重温度,据此计算热应力显然缺乏合理性.

观察图 6 可见,热应力与激光通量之间呈现线性关系.当热应力数值等于漆层与基层间的附着力(设定为  $4.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ )时,对应的激光通量即为清洗阈值.由图 6 可得,模型 I 的清洗阈值为  $0.3 \text{ J/cm}^2$ .鉴于弹性模量与热膨胀系数数值较大,各模型间热应力值差异较小,故清洗阈值相近.由图 4 可知,此清洗阈值对应的激光通量所引发的温度低于油漆熔点( $500 \text{ K}$ ),这意味着油漆未发生相变.因此,热应力振动是去除油漆的主要机制.综上所述,模型 I 中考虑交界面处漆层与基层温度衔接、保证温度热流在此连续,且认为交界处仅存在唯一温度的说法,更符合实际情况.

图 7 显示了各模型交界面上热应力与黏附力比值随脉冲时间的变化规律,可见,该比值随着脉冲时间的

增长而逐渐升高,且激光通量的提升会加剧热应力.具体而言,在相同能量密度下,模型Ⅱ的热应力值居首位,其次为模型Ⅰ,最低为模型Ⅲ.这源于各模型对能量传递的不同处理方式:模型Ⅱ完全忽视了能量的逆向传递,模型Ⅰ则考虑了交界面上热量向油漆层的反向传递,使得部分热量被油漆吸收,而模型Ⅲ则假设所有透过油漆层的能量均匀分散至基层,故其能量分散程度更高,热应力相对较小.

从图7中还可观察到,当热应力与黏附力相等时,所需的辐照时间与激光通量密切相关,通量越高,所需照射时间越短.总的来说,模型Ⅱ基层表面温度高于模型Ⅰ,导致预测热应力清洗能量密度比模型Ⅰ小,辐照时间比模型Ⅰ短,模型Ⅲ预测热应力清洗能量密度比模型Ⅰ大,辐照时间比模型Ⅰ长.

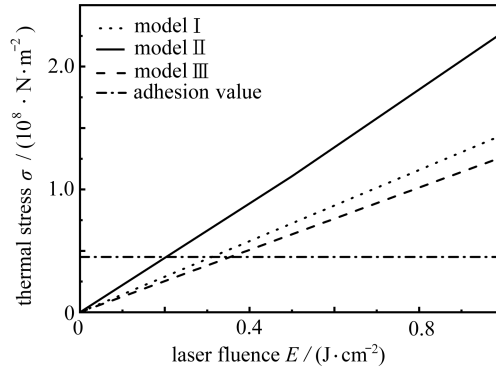
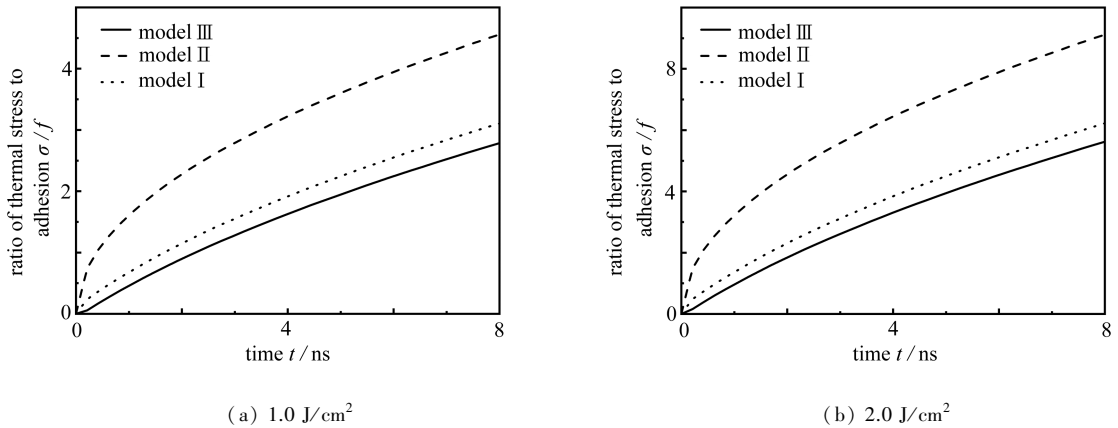


图6 热应力随激光通量的变化

Fig. 6 Variations of thermal stresses with the laser fluence



(a)  $1.0 \text{ J/cm}^2$

(b)  $2.0 \text{ J/cm}^2$

图7 热应力与黏附力之比随脉冲时间的变化

Fig. 7 Variations of the ratio of thermal stresses to adhesion with the pulse time

### 3 结 论

本文基于纳秒激光与油漆层和基层相互作用的特点和交界面上传热衔接热行为,对油漆层和金属基层构建了合理的传热模型和边界条件,并同时建立了文献中的传热模型和边界条件作对比研究,得出了以下结论:

1) 模型Ⅰ针对漆层与基层存在温度和热流交换的实际情况,考虑了激光在漆层和金属基层传热特点,得到了合理温度分布.模型Ⅱ和模型Ⅲ交界面处按绝热处理,未考虑衔接热边界条件,使漆层整体处于低温区,不受基层温度影响,得到交界面处漆层底侧和基层表侧两个不同的温度.模型Ⅰ理论结果得到间接验证,因此激光除漆传热学模型一方面考虑激光与漆层和基层相互作用,另一方面还要考虑交界面衔接热条件.

2) 当考虑由不同温度分布引起的除漆热应力时,在辐照时间,能量密度方面也会不同,模型Ⅱ交界面处按绝热处理时,模型Ⅱ基层表面温度高于模型Ⅰ,导致预测热应力清洗能量密度比模型Ⅰ小,清洗时间比模

型 I 短;模型 III 交界面处按绝热处理且基层采用体热源时,预测热应力清洗能量密度比模型 I 大,清洗时间比模型 I 长。

## 参考文献(References):

- [1] BEDAIR S M, SMITH H P. Atomically clean surfaces by pulsed laser bombardment[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, **40**(12): 4776-4781.
- [2] 叶少伟. 脉冲激光干式清洗轮胎模具的机理与实验研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2020. (YE Shaowei. The mechanism and experimental research of pulse laser dry cleaning tire mold[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [3] 秦哲, 高谦, 王斌, 等. 飞机蒙皮纳秒脉冲激光除漆工艺与机理研究[J]. 表面技术, 2022, **51**(7): 370-376. (QIN Zhe, GAO Qian, WANG Bin, et al. Technology and mechanism of nanosecond pulse laser paint removal of aircraft skin[J]. *Surface Technology*, 2022, **51**(7): 370-376. (in Chinese))
- [4] 齐扬. 云冈石窟砂岩文物表面污染物激光清除机理及应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015. (QI Yang. Study of mechanisms of laser cleaning of sandstone surface contaminants in Yungang grottoes and its applications [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese))
- [5] 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 脉冲激光除漆机理及工艺参数的研究[J]. 材料保护, 2000, **33**(4): 21-22. (WANG Zemin, ZENG Xiaoyan, HUANG Weiling. Parameters and mechanisms of paintcoat laser cleaning[J]. *Materials Protection*, 2000, **33**(4): 21-22. (in Chinese))
- [6] 邹万芳. 激光干式除漆作用机制的分析[J]. 航空精密制造技术, 2010, **46**(6): 60-61. (ZOU Wanfang. Analysing mechanics of dry laser paint removal[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2010, **46**(6): 60-61. (in Chinese))
- [7] KELLEY J D, HOVIS F E. A thermal detachment mechanism for particle removal from surfaces by pulsed laser irradiation[J]. *Microelectronic Engineering*, 1993, **20**(1/2): 159-170.
- [8] LU Y F, ZHENG Y W, SONG W D. An energy approach to the modelling of particle removal by pulsed laser irradiation[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1999, **68**(5): 569-572.
- [9] LU Y F, SONG W D, LOW T S. Laser cleaning of micro-particles from a solid surface: theory and applications [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, **54**(1/3): 181-185.
- [10] 邹万芳, 尹真. 短脉宽激光除漆理论清洗模型的建立[J]. 赣南师范学院学报, 2008, **29**(6): 27-30. (ZOU Wanfang, YIN Zhen. The theoretical cleaning model of paint removal by short pulse laser[J]. *Journal of Gannan Normal University*, 2008, **29**(6): 27-30. (in Chinese))
- [11] 田彬. 干式激光清洗的理论模型与实验研究[D]. 天津: 南开大学, 2008. (TIAN Bin. Theoretical model and experimental study of dry laser cleaning[D]. Tianjin: Nankai University, 2008. (in Chinese))
- [12] 宋峰, 邹万芳, 田彬, 等. 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, **34**(11): 1577-1581. (SONG Feng, ZOU Wanfang, TIAN Bin, et al. Model of one-dimensional thermal stress applied in paint removal by Q-switched short pulse laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(11): 1577-1581. (in Chinese))
- [13] ZOU W F, XIE Y M, XIAO X, et al. Application of thermal stress model to paint removal by Q-switched Nd: YAG laser[J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(7): 074205.
- [14] 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.
- [15] LU Y, YANG L J, WANG M L, et al. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress[J]. *Optik*, 2021, **227**: 165589.
- [16] 张鹏, 王如竹. 超流氦传热[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (ZHANG Peng, WANG Ruzhu. *Superfluid Helium Heat Transfer*[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))

- [17] 赵颀, 田晓耕. 基于 L-S 广义热弹性理论 YSZ 在超短脉冲下的热力响应[J]. 应用数学和力学, 2023, **44**(7): 784-796. (ZHAO Yi, TIAN Xiaogeng. Thermomechanical responses of YSZ under ultrashort thermal shock based on the L-S generalized thermoelastic theory[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2023, **44**(7): 784-796. (in Chinese))
- [18] TZOU D Y. *Macro- to Microscale Heat Transfer: the Lagging Behavior*[M]. 2nd ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2015.
- [19] 胡汉平, 董艺. 短脉冲激光加热模型的遴选原则[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(10): 1593-1596. (HU Hanping, DONG Yi. Model selection criterion for short pulse laser heating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1593-1596. (in Chinese))
- [20] 胡汉平. 热传导理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. (HU Hanping. *Heat Conduction Theory*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010. (in Chinese))
- [21] TAM A C, LEUNG W P, ZAPKA W, et al. Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, **71**(7): 3515-3523.
- [22] 法西罗夫斯基 R A, 凯斯特尔曼 V N. 聚合物的粘接作用[M]. 王洪祚, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004. (VESELOVSKY R A, KESTTELMAN V N. *Adhesion of Polymers*[M]. WANG Hongzuo, transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese))
- [23] YANG H, LIU H X, GAO R X, et al. Numerical simulation of paint stripping on CFRP by pulsed laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, **145**: 107450.
- [24] WANG P, ZHANG Z, HAO B, et al. Investigation on heat transfer and ablation mechanism of CFRP by different laser scanning directions[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, **262**: 110827.
- [25] 赵安安, 张鸿帅, 燕国强, 等. 铝合金化铣保护胶激光刻型热应力耦合分析[J]. 激光技术, 2023, **47**(3): 419-424. (ZHAO An'an, ZHANG Hongshuai, YAN Guoqiang, et al. Thermal stress coupling analysis on laser engraving of aluminum alloys with protective coatings for chemical milling[J]. *Laser Technology*, 2023, **47**(3): 419-424. (in Chinese))