

纳秒脉冲激光除胶过程仿真研究及阈值计算

赵飞飞, 英俊, 张巍*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

摘要

航空器起降阶段, 轮胎与跑道界面摩擦生成的橡胶残留物会形成微米级污染层, 其随时间累积将显著降低跑道表面摩擦系数, 导致制动效能衰减, 严重威胁航空器滑跑阶段的动力学安全。因此, 定期清除跑道橡胶污染物成为航空地勤维护的关键任务。传统高压水射流清洗工艺存在水渍侵蚀道面孔隙、次表面微裂纹扩展等结构性损伤风险, 而激光清洗技术通过光-热-力耦合效应实现了非接触式精准去除: 高能激光束辐照诱导表层污染物发生光热烧蚀然后在应力的作用下脱落, 从而在不损伤沥青/混凝土基体的前提下恢复跑道表面功能特性。本文针对机场跑道胶痕清洗场景, 本研究提出纳秒脉冲激光清洗方案: 采用脉冲激光(波长1064 nm)对胶层进行热应力脱落; 本研究通过构建多物理场耦合有限元模型, 系统模拟了激光功率密度对瞬时的温度, 并揭示了纳秒脉冲激光功率密度为 0.35 mJ/cm^2 为基地的损伤阈值。

关键词

纳秒激光, 有限元分析法, 应力, 烧蚀, 计算

Simulation Study of Nanosecond Pulsed Laser Debinding Process and Threshold Calculation

Feifei Zhao, Jun Ying, Wei Zhang*

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

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

During aircraft takeoff and landing phases, friction at the tire-runway interface generates rubber residues, forming a micron-level contamination layer. Over time, this layer significantly reduces the

*通讯作者。

文章引用: 赵飞飞, 英俊, 张巍. 纳秒脉冲激光除胶过程仿真研究及阈值计算[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 256-263. DOI: 10.12677/jsta.2025.133025

runway surface friction coefficient, leading to decreased braking efficiency and posing a serious threat to aircraft safety during taxiing. Consequently, regular removal of rubber contaminants has become a critical task in aviation ground maintenance. Traditional high-pressure water jet cleaning methods risk structural damage, such as water erosion of runway pores and subsurface microcrack propagation. In contrast, laser cleaning technology enables non-contact, precision removal through photothermal and mechanical coupling effects: high-energy laser irradiation induces photothermal ablation of surface contaminants, which detach under stress, restoring the runway's functional properties without damaging the asphalt or concrete substrate. This study focuses on airport runway rubber residue cleaning and proposes a nanosecond pulsed laser cleaning solution using a 1064 nm wavelength laser to achieve thermal stress detachment of the rubber layer. By developing a multi-physics coupled finite element model, the study systematically simulates the instantaneous temperature effects of laser power density and identifies a substrate damage threshold at a nanosecond laser power density of 0.35 MJ/cm^2 .

Keywords

Nanosecond Laser, Finite Element Analysis, Stress, Ablation, Calculation

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

在飞机着陆制动过程中, 轮胎与跑道道面形成高强度的动态接触界面, 两者剧烈摩擦产生的瞬时高温与极端剪切应力形成双重耦合作用, 促使轮胎表层橡胶发生相变熔融。熔融态橡胶在压力作用下与道面微观纹理产生粘附效应, 形成难以自然降解的致密沉积层。随着航空器起降频次累积, 沉积层厚度呈现非线性增长, 致使跑道有效摩擦系数由标准值 0.7 以上降至危险阈值 0.4 以下, 直接导致飞机着陆滑跑距离延长 30%~50%。在降雨或道面潮湿工况下, 橡胶沉积物与水的耦合作用会形成超滑界面层, 触发流体动力滑水效应, 使机轮完全丧失抓地力, 滑漂事故概率提升 4~6 倍[1]-[4]。

在工业制造领域, 激光清洗[5]-[10]技术已被广泛应用于表面处理工程, 包括文化遗产修复、金属锈蚀层去除及油脂污染物清理等场景。相较于仍被使用的传统机械清洗和化学清洗工艺, 后者普遍存在加工精度不足、易导致基材损伤、存在环境污染风险及处理效率低下等固有缺陷。相比之下, 激光清洗技术因其环境友好性、工艺参数精准可控、非接触式加工、高效能及低成本等显著优势, 已成为替代传统工艺的有效解决方案。最新研究进展表明, 学界正聚焦于激光诱导热烧蚀效应与应力波剥离效应的协同作用机制优化, 以提升清洗质量。研究者 Guo 等人通过构建铝合金氧化层激光清洗的三维热流耦合模型, 解析了不同功率密度下表面形貌的动态演变规律, 证实了热应力[11][12]诱导剥离的主导作用。另一项研究通过调控激光能量密度与扫描速率对钛合金氧化膜进行清洗工艺优化, 实现了表面性能的定向调控。当前研究对热烧蚀效应与应力剥离效应的协同作用机制尚未形成统一理论框架。

2. 脉冲激光除胶原理

激光清洗机制呈现多模态特征, 其主导性清洗机制随工艺参数(能量密度、脉宽)与材料特性(吸收系数、热导率)的匹配关系发生动态演变。针对颗粒污染物清洗场景, 本研究构建了基于热弹性耦合效应的激光烧蚀-热膨胀动力学模型(图 1)。在干式清洗过程中, 基底与污染颗粒因吸收系数差异产生非协调性

热膨胀位移：基底受激光辐照发生本征应变，而低吸收颗粒呈现滞后热响应，诱导界面剪切应力集中释放。该应力场通过应力波传播形成瞬态分离力，突破范德华力结合能，实现污染物与基底的超净分离。

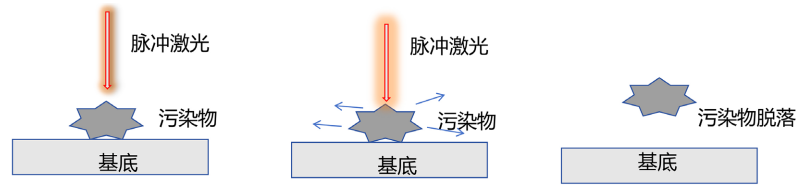


Figure 1. Schematic diagram of laser ablation model

图 1. 激光烧蚀模型示意图

激光烧蚀模型建立

在激光辐照作用下，颗粒脱离基底的动力学行为由范德华粘附力与激光诱导清洗力的动态平衡所主导。当激光作用于基底-颗粒体系时，其瞬态热弹性膨胀效应在基底表层引发垂直表面方向的加速度。该加速度通过接触界面转化为颗粒的惯性清洗力，其方向矢量与基底表面法线方向一致，从而克服范德华力实现清除。

当激光作用再胶层上，胶层温度瞬间升高。假设温度变化为 ΔT ，则橡胶颗粒产生的垂直于基底清洗力和向外的位移为：

$$\Delta L = B_s \times \sigma_s \times \Delta T \quad (1)$$

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = F_{VDW} + F_p \quad (2)$$

$$F_{VDW} = \frac{h\delta^2}{8\pi z^3} \quad (3)$$

$$F_p = \frac{\Delta L}{\tau^2} = \frac{B_s \times \sigma_s \times \Delta T}{\tau^2} \quad (4)$$

$$\sigma_s = \sqrt{4\alpha t} \quad (5)$$

其中 m_d 为颗粒的质量， v_d 为颗粒受热膨胀产生的向外飞溅速度， F_{VDW} 为范德华黏附力， F_p 为受热膨胀产生的清洗力， B_s 为清洗颗粒的膨胀系数， α 为时间在 t 内热传递的深度， τ 为脉冲宽度， α 为基底的热传递系数。由此可知激光的清洗力由温度、材料热膨胀系数、热穿透深度、及激光脉宽共同决定。

3. 污染物的黏附形式

3.1. 范德华力

范德华力对于脏污微粒而言是主要作用力，可使得大部分颗粒表面发生变形。由于轮胎橡胶为聚合材料，属于极性分子，分子之间的引力和斥力为

$$F_2 = \frac{h\delta^2}{8\pi z^3} \quad (6)$$

其中 δ 为粘附橡胶颗粒的半径， h 为 Hamaker 系数， z 为橡胶颗粒与基底的有效距离。橡胶颗粒与基底表面的总范德华力 F_v 为理想橡胶颗粒之间与平坦表面之间的范德华力与变形引起的附加范德华力之和为

$$F_v = F_1 + F_2 = \frac{hr}{8\pi z^3} + \frac{h\delta^2}{8\pi z^3} \quad (7)$$

r 为颗粒之间的半径, 如果存在较大的变形(例如大于 10%), 则理球形粒子和平坦表面之间的范德华力比附加范德华力低得多。因此有必要计算每单位面积范德华力的近值。其公式为

$$p = \frac{h}{\pi \delta^2} \approx \frac{h}{8\pi^2 z^3} \quad (8)$$

当颗粒存在较大变形且为非圆形, 在此情况下单位面积的范德华力为

$$p_1 = \frac{h}{8\pi z^3} \quad (9)$$

3.2. 毛细力和液桥力

在高湿度环境(相对湿度 $RH > 65\%$)中, 污染物颗粒与基底界面将发生毛细凝结现象, 形成纳米级液膜桥接结构, F_C 为毛细力, F_C 的表达式为:

$$F_C = 4\pi\gamma R \quad (10)$$

其中 γ 为液体的表面张力, R 为污染物颗粒的半径。液体膜的厚度是由污染物颗粒的亲水性和空气的湿度共同决定的。当空气或气体的湿度达到 65% 以上时, 每个颗粒之间的接触会形成一个液体桥, 进而产生液体桥力。典型的液桥力几何模型如图 2 所示。

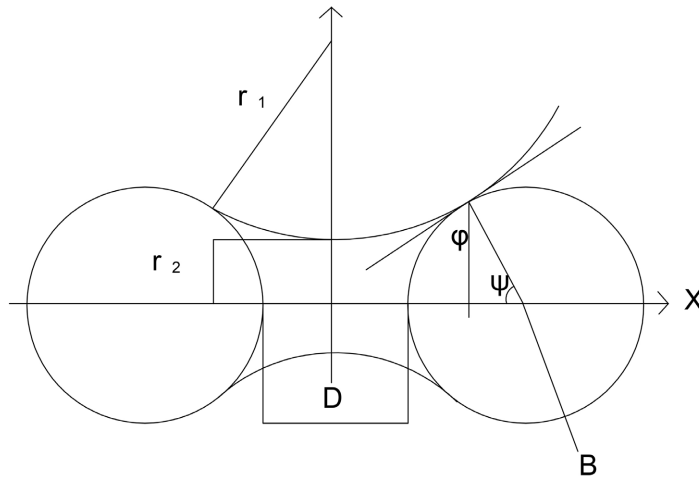


Figure 2. Schematic diagram of laser ablation model
图 2. 液桥力几何模型

液桥力 F_1 由细管之间压力 F_{CP} 张力 F_t 之和计算, 具体公式如下:

$$F_{CP} = -\pi R \sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \sin^2 \vartheta \quad (11)$$

$$F_t = 2\pi R \sigma \sin \varphi \sin(\vartheta + \varphi) \quad (12)$$

最后的液桥力为:

$$F_l = F_{CP} + F_t = 2\pi R \sigma \left[\sin \varphi \sin(\vartheta + \varphi) + \frac{R}{2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \sin^2 \vartheta \right] \quad (13)$$

式中 φ 、 ϑ 是液体表面张力, 湿气接触角, r_1 和 r_2 为液桥两个主曲率半径。它们的相对置如图 2 所示。在激光清洗工艺中, 范德华力通常作为污染物粘附的主导作用机制, 而毛细力与液桥力因其作用量级较

弱被视为次要因素。此外, 激光辐照产生的热效应会显著降低界面微环境湿度, 使得液体的粘附作用进一步衰减。因此, 在构建清洗理论模型时, 此类界面力通常可忽略不计或作为高阶修正项进行简化处理。

4. 激光清洗热方程求解

由于基底有一定的厚度, 激光肯定不会完全透射基底, 在一般情况下激光能量一部分被吸收, 剩余部分被物质所反射。热传导方程为

$$PC \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = (1-R) \alpha I_0 \exp(-\alpha x) \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (15)$$

ρ 、 c 、 K 分别为基底材料的密度、比热容和热传导系数。

$$-K \frac{dT}{dX} \Big|_{x=0} = 0 \quad (16)$$

$$-K \frac{dT}{dX} \Big|_{x=-l} = 0 \quad (17)$$

其中 $t_0 = \frac{1}{4a}$, k 为热时间常数, 上述(14)方程解为

$$T(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{a_l} \left(\frac{l}{n\pi} \right) \cos \left(\frac{nx\pi}{l} \right) \left\{ I_n - a_l \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t \right\} + c_0 t \quad (18)$$

上面的公式是将激光作为热源引进来处理, 激光引起的热源项作为热流密度加载在上表面, l 为基底的厚度, a_l 为热扩散率, 其中 C_n 为

$$C_1 = \frac{(1-R)I_0}{pcl} [1 - \exp(-al)] \quad (19)$$

$$C_n = \frac{(1-R)I_0}{pcl} \frac{1}{1 + \left(\frac{n\pi}{la} \right)^2} [1 - \exp(-al) \cos(n\pi)] \quad (20)$$

本模型将激光热源简化为表面热生成率, 忽略材料对激光能量的深度吸收效应, 进而将激光能量输入简化为作用于基底上表面的均匀热流。在此假设下, 热传导控制方程及其边界条件需相应调整。

$$PC \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (21)$$

$$-K \frac{dT}{dX} \Big|_{x=0} = (1-R)I_0 \quad (22)$$

$$-K \frac{dT}{dX} \Big|_{x=-l} = 0 \quad (23)$$

这时的热传导方程变为

$$T(x,t) = \frac{2(1-R)I_0}{k} \sqrt{a_l} \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_l t}} \right) \quad (24)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-s^2) ds \quad (25)$$

从以上的公式可以看出热传导的温度与激光能量密度和辐照时间长短都有关系，另一方面可计算出基底的温度上升情况，从而计算出清洗力 F_p

$$F_p = \frac{\Delta L}{\tau^2} = \frac{B_s \times \sigma_s \times 2(1-R) I_0 \sqrt{a_l t} \sqrt{a_l} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_l t}}\right)}{k \tau^2} \quad (26)$$

由公式(26)可知在激光脉宽与材料特性确定的前提下，清洗力强度由入射激光能量密度直接调控。清洗过程中存在两个临界能量边界：当能量密度低于特定临界值时，无法生成有效剥离颗粒污染所需的力学条件；而能量密度超过上限临界值时，则引发基底材料的热损伤效应(如熔融、相变、微裂纹等)。上述能量边界分别界定为激光清洗的有效阈值与损伤阈值，二者共同构成工艺参数的优化窗口。

5. 仿真模拟

5.1. 温度仿真模拟

针对激光清洗多参数耦合效应导致的工艺评估难题，本研究基于 COMSOL Multiphysics 构建了脉冲激光-材料热力耦合有限元模型，通过参数化建模实现了激光能量密度的单变量控制仿真。如图 3 所示，采用梯度能量密度(0.32/0.34/0.36 J/cm²)的脉冲激光(波长 1064 nm，脉宽 10 ns)对混凝土基底表面进行瞬态热传导数值模拟，通过控制变量法解析能量密度与温度场的非线性映射关系。数值仿真结果经格式转换后导入 Origin 进行数据后处理，运用非线性回归分析构建了温度场时空演，为工艺参数优化提供了热力学判据。

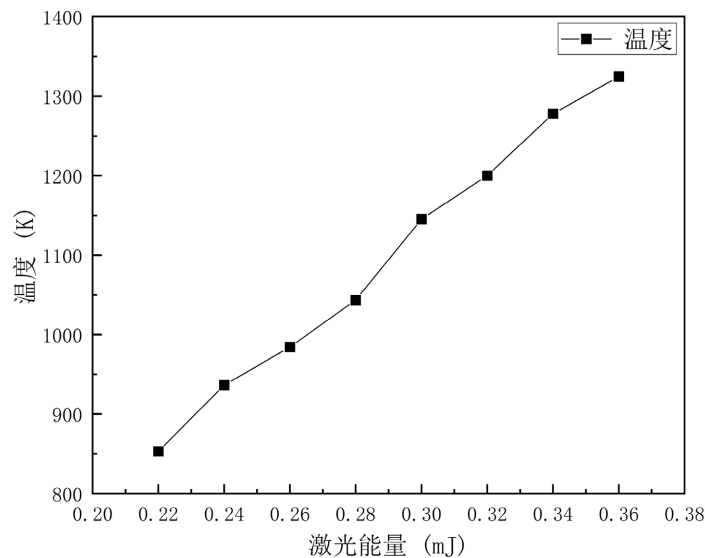


Figure 3. Evolution of different energy densities over time
图 3. 不同能量密度随时间演化图

激光辐照过程中，材料表面温度场呈现显著的非稳态动态响应特征：光斑作用区域在辐照初期经历快速温升阶段，温度瞬时达到峰值后因热传导与对流散热作用迅速衰减，形成“陡升-缓降”型温度演化曲线。不同能量密度激光作用时，表面峰值温度呈现显著正相关性，而热弛豫阶段材料平均温度最终

收敛于准稳态平衡值，该平衡温度始终高于环境基准温度。研究表明，能量密度是调控表面瞬态热响应的核心参数，其增量直接导致峰值温度梯度的非线性增强，这一规律为激光清洗工艺的温控优化提供了理论支撑。

5.2. 激光损伤阈值判断

仿真温度场分布表明，激光能量密度与材料热响应呈显著正相关性。选取混凝土模型光斑中心区域的最高温度节点作为关键评估点，其温度峰值直接关联基底热损伤阈值。为提升数值模拟精度，在有限元模型中设置梯度能量密度参数，通过多组参数化仿真获取不同情况下模具节点的瞬态温度极值，并基于多元数据拟合建立能量密度 - 峰值温度映射关系，最终量化结果如图 4 所示。

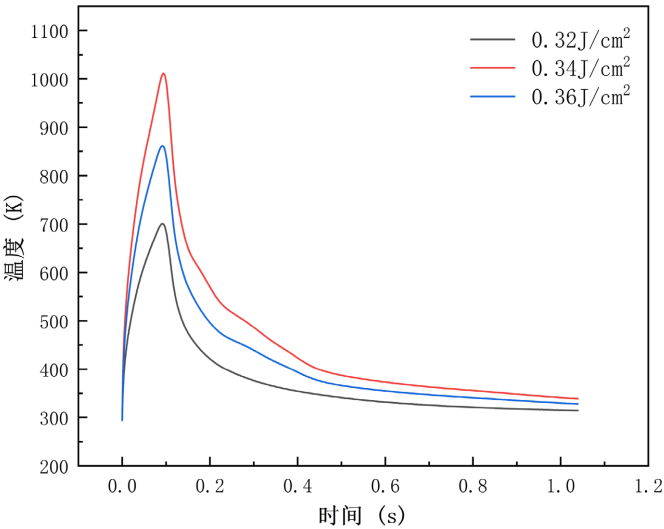


Figure 4. Highest temperature of different energy densities
图 4. 不同能量密度最高温度

激光清洗损伤阈值表征为基底材料在辐照过程中发生不可逆相变或热机械失效的临界能量密度，基于混凝土骨料模具材料的热损伤阈值区间(1100~1200 K)，将临界温度带入图 4 中，可求解获得材料发生热机械失效时的临界激光能量密度阈值。本研究基于有限元数值模拟方法，以范德华力为界面粘附主导机制，对激光辐照诱导的混凝土 - 橡胶界面瞬态温度场进行参数化建模。通过提取不同激光能量密度工况下的表面峰值温度数据，建立能量密度 - 温度梯度的线性回归模型， $T = 2429.5I + 335.2$ 将破坏温度带入可的出激光破坏能量密度为 0.32 mJ/cm²。

6. 结论

本仿真研究中详细分析了纳秒脉冲激光去混凝土表面的橡胶机理，通过建立纳秒脉冲激光去除混凝土表面的橡胶热烧蚀和热应力去除混凝土表面橡胶污染物，得到了温度随时间的变化趋势，通过仿真计算分析得出纳秒激光清洗混凝土表面橡胶污染物的清洗阈值能量密度 0.35 mJ/cm²，并得到了纳秒激光清洗的机制主要为应力为主导。研究结果对激光清洗技术具有重要意义，为激光清洗技术提供优化参数的指导。

参考文献

- [1] Liu, Y., Cai, J. and Jin, G. (2021). Simulation Study on Rubber Removal by Continuous Nanosecond Combined Laser.

- AOPC 2021: Advanced Laser Technology and Applications*, Changchun, 30 April 2025, 120601V.
<https://doi.org/10.1117/12.2607122>
- [2] Yuan, B., Wang, D., Dong, Y., Zhang, W. and Jin, G. (2018) Experimental Study of the Morphological Evolution of the Millisecond-Nanosecond Combined-Pulse Laser Ablation of Aluminum Alloy. *Applied Optics*, **57**, 5743-5748.
<https://doi.org/10.1364/ao.57.005743>
 - [3] Li, X.G., Huang, T.T., Chong, A., *et al.* (2017) Laser Cleaning of Steel Structure Surface for Paint Removal and Repaint Adhesion. *Opto-Electronic Engineering*, **44**, 340-344.
 - [4] Chen, G.X., Kwee, T.J., Tan, K.P., Choo, Y.S. and Hong, M.H. (2010) Laser Cleaning of Steel for Paint Removal. *Applied Physics A*, **101**, 249-253. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5811-0>
 - [5] 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>
 - [6] 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>
 - [7] Jasim, H.A., Demir, A.G., Previtali, B. and Taha, Z.A. (2017) Process Development and Monitoring in Stripping of a Highly Transparent Polymeric Paint with Ns-Pulsed Fiber Laser. *Optics & Laser Technology*, **93**, 60-66.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.01.031>
 - [8] Kim, J.H., Kim, J.S., Kim, Y.J., Bac, H.Y. and Kim, J.S. (2012) Effects of Simulation Parameters on Residual Stresses of Inconel Alloy 600 in Finite Element Laser Shock Peening Analysis. <https://doi.org/10.1115/pvp2012-78449>
 - [9] Zhu, G., Xu, Z., Jin, Y., Chen, X., Yang, L., Xu, J., *et al.* (2022) Mechanism and Application of Laser Cleaning: A Review. *Optics and Lasers in Engineering*, **157**, Article 107130. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107130>
 - [10] Zhang, Y. and Huang, Y.P. (2020) Finite Element Simulation and Parameter Optimization of Laser Descaling Process for Marine Steel Plates. *Applied Laser*, **40**, 294-299.
 - [11] Shi, S.D. (2012) Theoretical Modeling, Numerical Calculation and Application Research of Pulsed Laser Paint Removal. Nankai University.
 - [12] Shen, H., Feng, G.Y. and Wang, S.P. (2012) Theoretical Analysis and Related Experiments on Laser Light Transmission through Paint Layers. *Journal of Sichuan University (Natural Science)*, **49**, 1036-1042.