

文章编号: 0258-7025(2007)11-1577-05

一维热应力模型在调 Q 短脉冲激光除漆中的应用

宋 峰¹, 邹万芳^{1,2}, 田 彬¹, 刘淑静¹, 牛孔贞¹, 李训谱¹, 田建国¹

(¹南开大学物理学院, 天津 300071; ²赣南师范学院物理与电子信息科学系, 江西 赣州 341000)

摘要 讨论了热应力在短脉冲激光清洗油漆过程中的作用, 从一维热传导方程出发, 计算了由热膨胀产生的热应力以及根据粘附力公式计算出了油漆的粘附力。通过比较热应力与粘附力大小, 得到激光清洗油漆的条件, 进而建立一维短脉冲激光除漆模型。根据此模型可计算出: 波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ns 的激光清除铁基底上厚度为 40 μm 橙色漆的清洗阈值为 0.5 J/cm²; 不同能量密度下使得油漆脱落所需的激光作用时间; 激光脉冲作用过程中铁基底的温度变化情况。实验所测得的清洗阈值为 0.57 J/cm², 与理论结果接近。实验与理论都表明当能量密度过高时, 铁基底的温度升高很大, 超过其熔点, 铁基底被损坏。并考虑了激光清洗铝基底上油漆的情况。

关键词 激光技术; 激光清洗; 清洗阈值; 热应力; 热膨胀

中图分类号 TN 249 文献标识码 A

Model of One-Dimensional Thermal Stress Applied in Paint Removal by Q-Switched Short Pulse Laser

SONG Feng¹, ZOU Wan-fang^{1,2}, TIAN Bin¹, LIU Shu-jing¹,
NIU Kong-zhen¹, LI Xun-pu¹, TIAN Jian-guo¹

¹College of Physics Science, Nankai University, Tianjin 300071, China

²Department of Physics and Electronic Information Science, Gannan Teachers College, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Abstract The thermal stress model was put forward in the paint removal from substrate by Q-switched laser pulses. With the one-dimensional equation of heat conduction, the thermal stress generated by thermal expansion was calculated. The adhesion force between the paint and the substrate was calculated according to adhesion formula. If the thermal stress is greater than the adhesion force, the paint will be removed from the substrate by the laser action. When the Nd:YAG laser with wavelength of 1064 nm and pulse width of 10 ns is used to remove orange paint from Fe substrate, the cleaning threshold is 0.5 J/cm² and the irradiation time required for paint removal and the temperature change of Fe substrate were calculated according to the theoretical model. The experimental cleaning threshold is 0.57 J/cm², which is in accordance with the theoretical result. From the experiments and theoretical model it is found that if the laser fluence is too high, the temperature of Fe substrate will exceed the melting point of Fe and the Fe substrate will be broken. And the paint removal on Al substrate by laser was taken into account.

Key words laser technique; laser cleaning; cleaning threshold; thermal stress; thermal expansion

1 引言

激光清洗作为一种环保、高效的清洗方法, 可应用于文物、电子元件、模具, 激光去氧化层、去油污、除漆等领域^[1~5]。国内外对激光清洗的实验和机制均有一定的研究, 激光清洗对象和清洗条件不同, 其

清洗机制也有很大差异。目前对激光清洗微粒的机制研究较多^[2,6,7], 对于清洗层状污染物的机制的研究较少^[5,8~10]。早期大家采用烧蚀效应、振动效应、声波震碎效应、等离子体效应、光压效应^[11]等清洗机制来定性解释激光除漆, 目前认定激光除漆中

收稿日期: 2006-11-21; 收到修改稿日期: 2007-08-06

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-224)资助项目。

作者简介: 宋 峰(1967—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术及其应用、发光技术、光纤技术等方面的研究工作。E-mail: fsong@nankai.edu.cn

起主要作用的是灼烧效应和振动效应^[5],但是基本没有定量研究。本文主要研究短脉冲激光除漆的机制,当激光作用时间为纳秒量级时,由于作用时间短,在温度升高到能发生灼烧效应之前,热应力已经使得油漆脱离,所以此时以热应力作用为主。并对热应力在激光清洗油漆时的作用进行了定量分析,从一维热传导方程出发,计算了由热膨胀产生的热应力和油漆与基底间的粘附力,建立了激光除漆模型,得出清洗阈值及不同能量密度下基底的温度变化情况,根据理论计算,可以选择既能清洗油漆又不破坏基底的能量密度进行激光除漆,对实际清洗具有重要的指导作用。

2 理论模型

2.1 一维热传导方程

如图 1 所示,当激光入射到油漆上时,油漆吸收激光,导致温度发生变化,其变化满足热传导方程,从而产生了热应力 σ_p ,沿 z 轴方向;该力作用于基底上使基底产生一个对油漆的反作用力,沿 $-z$ 轴方向。透过油漆的激光入射到基底上,基底吸收后,也产生一个热应力 σ_s (文中下标 p 代表油漆,下标 s 代表基底),沿 $-z$ 轴方向。当总的热应力 $\sigma = \sigma_p + \sigma_s$ 大于油漆与基底之间的粘附力 f 时,油漆就能被清洗,即激光清洗油漆的条件为 $\sigma \geq f$ 。

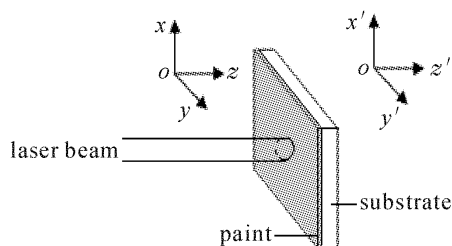


图 1 激光清洗油漆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of paint removal by laser

在短脉冲激光除漆的过程中,一般满足以下条件:1) 吸收的激光光强在 z 方向上的分布遵守光的吸收定律;2) 由于在 z 方向上的热传导深度(油漆的厚度一般为几十微米),远远小于在 $x-y$ 平面上激光的照射范围(激光光斑一般为几毫米甚至更大),所以近似认为 $x-y$ 平面是无限大的平面,因此只考虑在 z 方向上的一维热传导方程;3) 由于脉冲激光作用时间很短(10 ns量级),假设油漆以及基底的两端是绝热的。此外,为了方便起见,假设激光光强在 $x-y$ 平面上是平顶分布,则可以给出满足以上条件

的一维热传导方程

$$\rho c \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + \alpha I_0 A e^{-\alpha z}, \quad (0 \leq t \leq \tau) \quad (1)$$

方程中温度 $T(z,t)$ 为随位置和时间变化的量, $\rho, c, \lambda, \alpha, A, I_0, \tau, l$ 分别为物体的密度、比热容、热导率、物体对激光的吸收率(物体在激光照射后吸收的光强占总光强的比率)、物体对激光的吸收系数、激光初始光强、脉冲激光作用时间(即激光脉宽)和物体的厚度。

方程的边界条件为物体两端绝热,初始温度为室温 300 K。由(1)式可得油漆和基底的温度 $T(z,t)$ 的解为

$$T(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n I_0 \rho c}{\lambda} \left(\frac{l}{n\pi}\right)^2 \cos\left(\frac{n\pi}{l}z\right) \times [1 - e^{-\left(\frac{\lambda}{\rho c}\right)\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t}] + C_0 I_0 t + 300(K). \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

温度变化 $\Delta T(z,t) = T(z,t) - T(z,0)$ 。在计算基底的温度时,要考虑到基底吸收的是透过油漆的激光,(1)式中的 I_0 要换成作用在基底上的激光光强 $I = t_p I_0$,其中 t_p 为油漆对激光的透射率, $r_p + t_p + \alpha_p = 1$, r_p 为油漆对激光的反射率, α_p 为油漆对激光的吸收率。 C_n 和 C_0 是为了计算方便定义的参数。

2.2 热膨胀和热应力的计算

物体吸收激光能量受热膨胀,纵向(z 方向)热膨胀的长度为 $\Delta l = l\gamma\Delta T$,其中 γ 为该物体的线膨胀系数。热膨胀产生了应变并且同时产生了应力,把物体看作是各向同性的弹性体,对于各向同性弹性物体单位面积的热应力为

$$\sigma = Y\epsilon = Y \cdot \frac{\Delta l}{l} = Y\gamma\Delta T, \quad (3)$$

式中 Y 为弹性模量,也就是杨氏模量, ϵ 为应变。 ρ, c, λ, γ 和 Y 为随温度变化的量,在这里都假设成常量,通过后面的计算可知在清洗阈值附近铁基底的温度变化不大,所以这种假设是成立的。

对于激光除漆而言,使得油漆脱落的力主要是由 $z = l$ 处油漆的热应力 σ_p 和 $z = 0$ 处基底的热应力 σ_s ,如图 1 所示, σ_p 和 σ_s 分别为

$$\sigma_p = Y_p \epsilon_p = Y_p \gamma_p \Delta T_p(l,t), \quad (4)$$

$$\sigma_s = Y_s \epsilon_s = Y_s \gamma_s \Delta T_s(0,t). \quad (5)$$

2.3 粘附力的计算

油漆与金属粘附力受很多因素影响^[12],可简单地把油漆与金属的粘附力的计算看作两个平行平面之间粘附力的计算。两个平行平面之间的单位面积

粘附力为^[7]

$$f = h_{12}/(8\pi^2 Z^3), \quad (6)$$

这里, Z 为相互接触的两个平行平面的距离, 一般情况下 $Z = 4 \times 10^{-10}$ m。 h_{12} 为 lifshitz - Van der Waals 常数^[2,7], 是与相互接触的材料有关的一个量

$$h_{12} = \frac{4\pi}{3} A_{12}, \quad (7)$$

式中 A_{12} 为油漆和基底相互接触的 Hamaker 系数, 它可以由 $A_{12} \approx (A_{11} A_{22})^{1/2}$ 计算得到。从物理参数表中可以查得油漆与油漆相互接触的 Hamaker 系数 $A_{11} \approx 8 \times 10^{-20}$ J; 金属与金属的相互接触的 Hamaker 系数 $A_{22} \approx (30 \sim 50) \times 10^{-20}$ J^[13], 为了计算方便, 取中间值 40×10^{-20} J。因此计算得到油漆与金属的粘附力约为 1.48×10^8 N/m²。

3 理论模拟

根据理论模型, 对激光去除铁、铝基底上的油漆进行理论模拟。所用激光的波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ns。油漆和铁、铝的热学^[14,15]、光学、力学参数^[15,16] 分别见表 1 和表 2, 表中所列的油漆参数是在温度为 340 K, 铁、铝参数在温度为 500 K 下得到的。铁基底上的油漆厚度为 4×10^{-5} m; 铝基底上的油漆厚度为 6.3×10^{-5} m。油漆对激光的透射率 t_p 和反射率 r_p 由双积分球装置测得。铁基底上的漆为 $t_p = 0.09, r_p = 0.41$, 则 $\alpha_p = 1 - t_p - r_p = 0.50$, 可计算出对激光的吸收系数为 $A = 4.29 \times 10^4$; 铝基底上的漆为 $t_p = 0.193, r_p = 0.193$, 则 $\alpha_p = 0.614, A = 2.27 \times 10^4$ 。

表 1 油漆、铁和铝的热学参数

Table 1 Thermal parameters of paint, Fe and Al

Thermal properties	Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Specific heat $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Linear thermal expansion coefficient γ / K^{-1}
Paint	0.3	1.30×10^3	2.51×10^3	10^{-6}
Fe	61.5	7.85×10^3	0.54×10^3	12.7×10^{-6}
Al	238	2.70×10^3	1.00×10^3	30.0×10^{-6}

表 2 油漆、铁和铝的光学、力学参数

Table 2 Optical and mechanical parameters of paint, Fe and Al

Optical and mechanical properties	Absorptivity to 1064 nm laser, α	Optical absorption coefficient to 1064 nm laser A / m^{-1}	Elastic modulus $Y / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	Thickness l / m
Paint			10^{10}	
Fe	0.36	5.24×10^7	1.9×10^{11}	10^{-3}
Al	0.642	1.00×10^8	0.7×10^{11}	10^{-3}

3.1 清洗阈值

根据计算可知, 当激光脉冲结束时, ΔT 最大, 再根据 (3) ~ (5) 式可知此时具有最大热应力 σ_{\max} , 对波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ns 的激光清洗油漆在脉冲结束时 ($t = \tau = 10$ ns), $z = l$ 处油漆和 $z' = 0$ 处铁基底、铝基底的热应力即最大热应力与激光能量密度的变化情况进行了计算, 如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可见, 随着激光能量密度的增加最大热应力线性增加, 而且基底产生的热应力远远大于油漆产生的热应力, 因此主要是基底的热应力使得油漆脱离。从图 3 还可以看到, 当激光的能量密度为 0.50 J/cm² 时, 铁基底的 最大热应力为 1.50×10^8 N/m², 大于油漆与铁基底的粘附力 1.48×10^8 N/m², 所以激光除漆的理论清洗阈值大概为 0.50 J/cm²。当激光的能量密度等于或大于清

洗阈值 0.50 J/cm² 时, 油漆就能被清洗。同理可知铝基底的清洗阈值为 0.16 J/cm²。

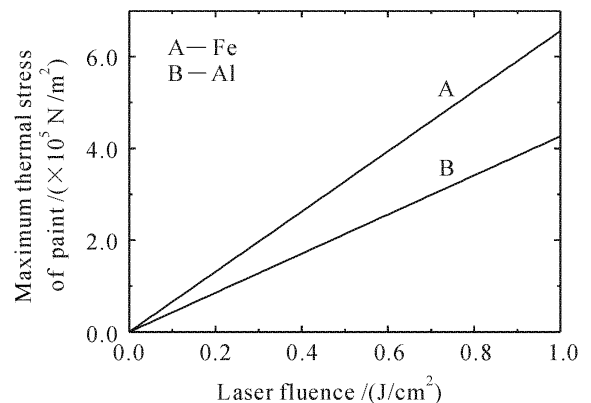


图 2 油漆的最大热应力与激光能量密度的变化关系
Fig. 2 Maximum thermal stress of paint versus the laser fluence

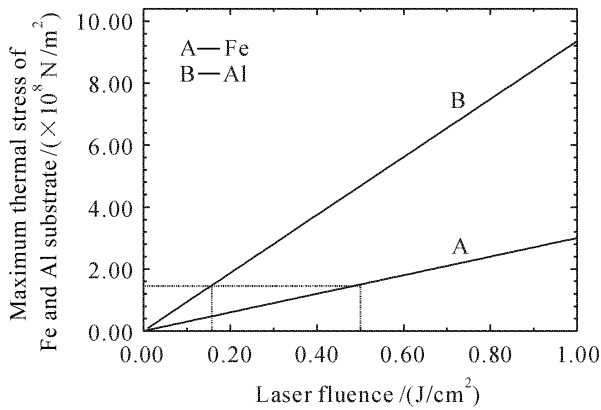


图 3 基底的 最大热应力与激光能量密度的变化关系
Fig. 3 Maximum thermal stress of substrate versus the laser fluence

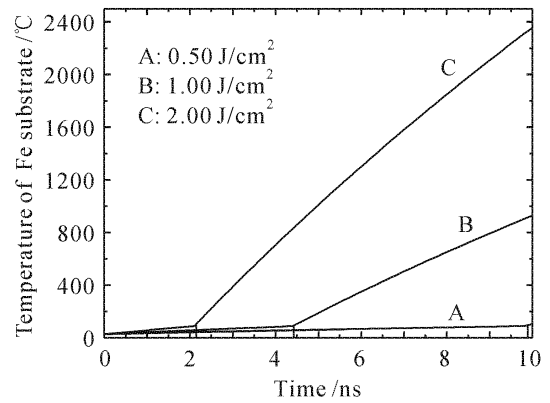


图 5 激光脉冲作用过程中铁基底的温度随时间的变化关系
Fig. 5 Temperature of Fe substrate versus the time of pulsed laser action

3.2 除漆所需的激光脉冲作用时间和铁基底的温度变化情况以及能量密度的选择

由于油漆的热应力远小于基底的热应力,因此主要分析基底的热应力以及温度的变化情况。图 4 和图 5 分别为 $z = 0$ 处铁基底的热应力和温度随整个脉宽时间的变化曲线图。

由图 4 可知,在固定脉宽 ($\tau = 10$ ns) 的激光脉冲作用过程中,铁基底热应力随着时间的增加是逐渐增大的。在脉冲结束时 ($t = 10$ ns),热应力达到最大。而且任意时刻,能量密度越大,所产生的热应力也越大。不同的能量密度下达到与粘附力大小相等的热应力需要的时间是不同的。能量密度越大,所需要的时间越短,能量密度为清洗阈值 0.50 J/cm² 时,所需的时间是 9.8×10^{-9} s,接近整个激光脉宽时间 10 ns,所以当激光的能量密度大于清洗阈值时,油漆在脉冲结束前就能被清洗干净,而在剩余的时间里激光只是对基底产生作用。

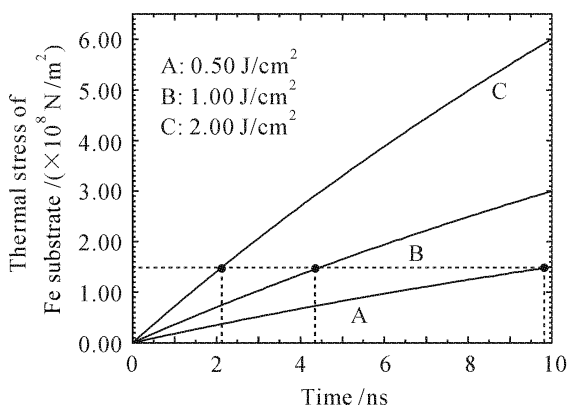


图 4 激光脉冲作用过程中铁基底的热应力随时间的变化关系
Fig. 4 Thermal stress of Fe substrate versus the time of pulsed laser action

由图 5 可知,在激光脉冲作用过程中,铁基底 $z = 0$ 处的温度随着激光作用时间的增加而升高,能量密度不同,油漆脱落所需的时间不一样(见图中拐点),油漆脱落后,激光对铁基底直接作用,导致铁基底的温度迅速增加。能量密度分别为 0.50 J/cm², 1.00 J/cm² 和 2.00 J/cm² 时,铁基底达到的最高温度分别为 105 °C, 929 °C 和 2358 °C。Fe 的熔点和沸点分别为 1535 °C 和 3000 °C,当激光能量密度为 2.00 J/cm² 时,铁基底温度超过 Fe 的熔点,基底被破坏。因此,根据实际情况选择使得油漆能够被清洗、但是基底又不被损坏的能量密度即可。既能节约能量,又能提高清洗效率。因能量密度超过清洗阈值时,铁基底的温度变化较大,所以 ρ, c, λ, γ 和 Y 都不能看作常量,图 5 的 C 曲线只能作为一个参考,而对于发生了相变的理论模型还有待进一步研究。

4 实验验证

4.1 实验装置与方法

实验装置如图 6 所示,采用波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns 的 Nd:YAG 激光器对铁基底、铝基底上的橙色油漆进行清洗,实验中使用 30 cm 的凸透镜对激光束进行光学聚焦,用部分反射镜让一小部分激光进入能量计的探头,通过能量计实时监测激光能量的变化,大部分激光打在样品上进行激光清洗,再用游标卡尺测出照射在油漆样品上的激光光斑直径 D ,最后根据公式 $e = E / [\pi(D/2)^2]$,算出清洗时的激光能量密度 e 。用显微镜观察在不同能量密度的激光照射后铁基底表面的变化,以此来分析基底是否被破坏。

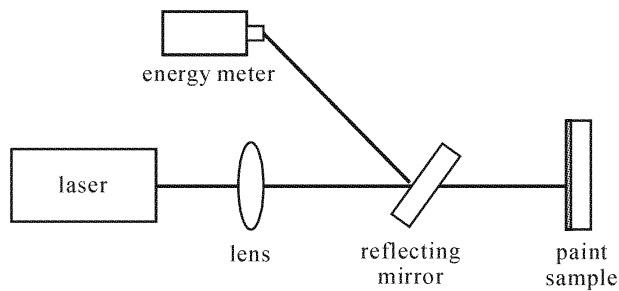


图 6 激光除漆的实验装置示意图

Fig. 6 Schematic experimental setup for paint removal by laser

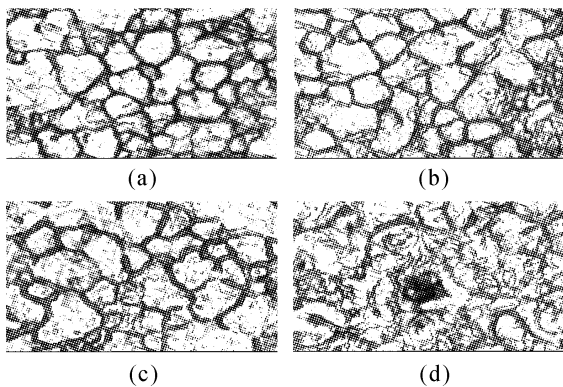


图 7 Fe 基底的光学显微图

(a) 激光照射前;(b) 能量密度为 0.5 J/cm^2 时;(c) 能量密度为 1.0 J/cm^2 时;(d) 能量密度为 2.0 J/cm^2 时

Fig. 7 Optical micrograph of Fe substrate

(a) before laser irradiation; (b) at the laser fluence of 0.5 J/cm^2 ; (c) at the laser fluence of 1.0 J/cm^2 ; (d) at the laser fluence of 2.0 J/cm^2

4.2 实验结果

通过上述方法,测得铁基底上的油漆刚刚能被清洗时的能量为 $E = 92 \text{ mJ}$,光斑大小 $D = 4.52 \text{ mm}$,因此能量密度 e 为 0.57 J/cm^2 ,与理论计算值 0.50 J/cm^2 接近。同样测得铝基底的清洗阈值为 0.18 J/cm^2 ,与理论计算值 0.16 J/cm^2 接近。由此可知由理论模型所得到的清洗阈值是比较可信的。

图 7(a)~(d)为铁基底的光学显微图。与激光照射前铁基底的图形相比,激光能量密度分别为 0.50 J/cm^2 , 1.00 J/cm^2 时照射后铁基底的变化都不大,当能量密度为 2.00 J/cm^2 时,显微图中出现黑点,说明铁基底被破坏,这与理论分析一致。

5 结 论

主要从一维热传导方程出发,定量计算了由热膨胀产生的热应力和油漆的粘附力,比较热应力 σ 与粘附力 f 大小,得到激光清洗的条件 $\sigma \geq f$, 建立

了激光除漆模型。用此理论模型计算了激光除漆的清洗阈值,使得油漆脱落所需的激光作用时间和激光脉冲作用中基底的温度变化情况,并且通过对铁基底和铝基底上油漆的激光清洗实验验证了理论模型的正确性。

参 考 文 献

- Renzo Salimbeni. Laser techniques in conservation an example of sustainable innovation in full development in Europe [C]. *SPIE*, 2006, **6162**:616204-1~616204-11
- Y. F. Lu, W. D. Song, B. W. Ang *et al.*. A theoretical model for laser removal of particles from solid surface [J]. *Appl. Phys. A*, 1997, **65**(1):9~13
- Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mould [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):1050~1054
王泽敏,曾晓雁,黄维玲. 激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理与工艺研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):1050~1054
- Xu Jun, Sun Zhenyong, Zhou Wenming *et al.*. Real-time monitoring technique for laser cleaning rust deposit [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9):1090~1092
徐 军,孙振永,周文明 等. 激光除锈过程的实时监测技术研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(9):1090~1092
- Craig T. Walters. Short-pulse laser removal of organic coatings [C]. *SPIE*, 2000, **4065**:567~575
- N. Arnold. Theoretical description of dry laser cleaning [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2003, **208-209**:15~22
- Andrew C. Tam, Wing P. Leung, Werner Zapka *et al.*. Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**(7):3515~3523
- Katherine Liu, Elsa Garmire. Paint removal using lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21):4409~4415
- Akira Tsunemi, Akira Endo, Daiji Ichishima. Paint removal from Aluminum and composite substrate of aircraft by laser ablation using TEA CO_2 lasers [C]. *SPIE*, 1998, **3343**:1018~1022
- Guo Weixi, Hu Qianwu, Wang Zemin *et al.*. Paint removal research on high power TEA CO_2 laser [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(3):32~35
郭为席,胡乾午,王泽敏 等. 高功率脉冲 TEA CO_2 激光除漆的研究[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(3):32~35
- K. G. Watkins. Mechanisms of laser cleaning [C]. *SPIE*, 2000, **3888**:165~174
- Roman A. Veselovsky, Vladimir N. Kestelman. Adhesion of Polymers [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 1
R. A. 法西罗夫斯基, V. N. 凯斯特尔曼. 聚合物的粘接作用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004. 1
- Jacob N. Israelachvili. Intermolecular and Surface Forces: with Applications to Colloidal and Biological Systems [M]. London: Academic Press, 1985. 146
- Ma Qingfang, Fang Rongsheng, Xiang Licheng. Practical Thermophysics Handbook [M]. Beijing: China Agriculture and Mechine Press, 1986. 647
马庆芳,方荣生,项立成. 实用热物理性质手册[M]. 北京:中国农业机械出版社, 1986. 647
- Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Interaction between Laser and Material [M]. Beijing: China Mechine Press, 1996. 200
陆 建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 1996. 200
- Guan Zhenzhong. Laser Processing Technology Handbook [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998. 28
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京:中国计量出版社, 1998. 28