

激光除漆对 Ti17 合金表面组织性能的影响

胡太友^{1,2}, 乔红超¹, 陆莹¹, 吴嘉俊^{1,2}

(1.中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院大学 计算机与控制学院, 北京 100049)

摘要: **目的** 研究激光除漆对 Ti17 合金表面组织性能的影响机理, 探讨激光清洗在去除污染物的同时是否可以改善基材的组织性能。 **方法** 在预处理的试样表面均匀喷涂一层厚度约为 50 μm 的丙烯酸树脂哑光黑色油漆, 采用脉冲光纤激光器在不同功率 (10、15、20W) 下对试样进行脱漆处理。采用白光干涉表面轮廓仪观测试样表面的三维形貌, 采用金相显微镜观察试样表面的微观组织, 采用显微硬度测试仪测量试样的表面显微硬度, 采用表面粗糙度仪测量试样的表面粗糙度。 **结果** 经过激光除漆处理后的试样表面均出现了大量凹坑和白色褶皱硬化层, 表面显微硬度均得到提高, 平均增幅在 5% 左右, 表面粗糙度变化不大, 在亚微米级。激光功率为 15 W 时, 白色硬化层分布均匀, 厚度约为 10 μm , 表面显微硬度增幅最大, 为 6.9%, 表面粗糙度下降了 0.07 μm , 清洗效果较优。 **结论** 激光清洗处理通过选取合适的激光参数, 可以在去除污染物的同时, 一定程度上改善基材的表面性能。

关键词: 激光清洗; 激光除漆; Ti17 合金; 微观组织; 表面性能

中图分类号: TG174.46 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0007-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.002

Effects of Laser De-painting on Microstructure and Properties of Ti17 Alloy

HU Tai-you^{1,2}, QIAO Hong-chao¹, LU Ying¹, WU Jia-jun^{1,2}

(1.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2.School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: The work aims to study mechanism of effects of laser de-painting on microstructure and properties of Ti17 alloy, and investigate whether laser cleaning can improve the microstructure and properties of substrate while removing pollutants. A layer of nearly 50 μm thick acrylic resin matte black paint was evenly sprayed on the surface of pretreated samples. De-painting processing was applied to the samples at different power with a pulsed fiber laser. Then three-dimensional morphology of the surface was observed with a white light interferometer surface contourgraph, microstructure with a metallographic microscope, surface microhardness with a microhardness tester, and surface roughness with a surface roughness meter. A large number of pits and white folds hardened layer appeared on the surface of the sample after laser de-painting. The microhardness of the surface was increased by about 5%. The surface roughness of the sample before and after laser cleaning changed little, at the sub-micron level. When the laser power is 15 W, the white hardened layer is evenly distributed with a thickness of about 10 μm ,

收稿日期: 2017-11-01; 修订日期: 2017-12-10

Received: 2017-11-01; Revised: 2017-12-10

基金项目: 国家科学支撑计划项目 (2015BAF08B01-01); 国家自然科学基金项目 (51501219)

Fund: Supported by the National Key Technology Support Program (2015BAF08B01-01), the National Natural Science Foundation of China (51501219)

作者简介: 胡太友 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光清洗技术和激光冲击强化技术。

Biography: HU Tai-you (1994—), Male, Master, Research focus: laser cleaning technology and laser shock peening technology.

通讯作者: 乔红超 (1982—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: QIAO Hong-chao (1982—), Male, Master, Associate research fellow, Research focus: surface engineering.

the maximum increase of surface microhardness is 6.9%, the surface roughness is 0.07 μm lower than the substrate, and the cleaning effect is better. Laser cleaning can improve surface properties of a substrate by selecting appropriate laser parameters while removing the pollutants.

KEY WORDS: laser cleaning; laser de-painting; Ti17 alloy; microstructure; surface properties

在日常生活和工业领域中,人们广泛采用喷涂技术对材料进行防锈防蚀。当飞机、轮船、机车等设备需要维修保养或原有漆层出现剥落而需要重新涂漆时,基本上都要除去表面的旧油漆,以便喷涂新的油漆^[1-2]。以飞机蒙皮油漆的去除为例,飞机每隔三到五年就需脱漆大修一次^[3],而国内的民用航空飞机数量已经超过 4000 架,飞机除漆每年都要花费数亿元人民币,需要消耗巨大的人力、财力。同时,传统的除漆方法对环境有严重污染,因此对于除漆新方法的研究,具有重要的实际应用价值。

激光清洗是一种新型的表面处理技术^[4-7]。其利用高能激光束诱导的热效应和力效应,通过克服漆层与基体的附着力或将油漆直接气化来去除油漆。相比于传统的除漆方法(机械法、化学法、高压水射流法),激光清洗具有精度高、耗能低、适用范围广、易实现自动化、废弃物易处理、几乎不对环境造成污染的优点^[8-9]。

国内外对于激光清洗的研究主要集中在讨论污染物的清洗阈值和基材的损伤阈值、优化激光参数、建立清洗阈值的理论模型,目的是尽量减少对基材的影响,而关于激光清洗对基材组织性能影响的研究则较少^[10-18]。激光清洗在工业实际中的应用,尤其是在大型装备中的应用,往往着重于污染物的去除而忽略了对基材的影响。但是,这些影响可能会降低设备的使用寿命或使用精度,恰恰是不容忽略的。

实验研究与工业应用侧重点的不同导致了理论不能很好地指导实践,而且至今仍没有一种理论模型可以准确地计算污染物的清洗阈值和基材的损伤阈值,当要完全去除污染物时,就很容易发生过度清洗,

从而损伤基材。而且当污染物的清洗阈值大于基材的损伤阈值时,基材的损伤是不可避免的,此时单纯地计算清洗阈值和损伤阈值并没有太大的实用意义,因此研究激光清洗对基材组织性能的影响非常有必要,且具有很强的现实意义。

谭荣清等^[19]使用高重复率 TEA CO_2 激光器研究了激光除漆对飞机蒙皮材料力学性能的影响,发现经过激光除漆处理后,样品的屈服强度、抗拉强度、杨氏模量等力学特性没有明显变化。Zemin^[20]使用 Nd:YAG 脉冲激光器研究了激光除漆对 Q235 钢块表面性能的影响,发现清洗后表面的粗糙度略微增加,显微硬度增加,耐腐蚀性得到改善。

为了丰富激光清洗的实验研究和进一步促进激光清洗的工业化应用,本研究采用 IPG 公司生产的掺镱脉冲光纤激光器对涂有丙烯酸树脂哑光黑色油漆的 Ti17 合金试件进行了除漆实验,研究了激光清洗对基材表面组织性能的影响,并讨论了其变化机制。

1 实验

1.1 试样制备

实验所用材料为 Ti17 合金,名义成分为 Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr,其主要成分及含量如表 1 所示。Ti 合金板材经数控电火花线切割成 60 mm×10 mm×2 mm 的长方体试块,试样上、下表面先经 200[#]~1000[#] 的 SiC 砂纸逐级打磨,用无水乙醇清洗后,再用氮气吹干,最后在试样的一面均匀喷涂约 50 μm 厚的丙烯酸树脂哑光黑色油漆,另一面不加处理。

表 1 Ti17 钛合金的主要化学成分
Tab.1 Main chemical constituents of Ti17 titanium alloy

										wt%
Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	C	N	H	O	Ti
4.5 ~ 5.5	1.6 ~ 2.4	1.6 ~ 2.4	3.5 ~ 4.5	3.5 ~ 4.5	0.30	0.05	0.05	0.0125	0.08 ~ 0.13	Bal.

1.2 实验设备

激光清洗系统采用的激光器主机为 IPG 公司生产的掺镱脉冲光纤激光器,型号为 YLP-1-120-50-50-HC-RG,其主要技术参数如表 2 所示。

实验时,设定重复频率为 100 kHz,扫描速度为 6000 mm/s,光斑垂直照射试件,且作用点始终处于

光斑焦点位置,试件的清洗范围为 30 mm×10 mm。在激光器功率分别为 10、15、20 W 下,沿清洗区域横向、纵向交叉清洗 6 遍后,取下试件,激光清洗系统的实验装置和除漆后的试件如图 1、2 所示。

激光除漆处理后,依次用 200[#]~2000[#] 的 SiC 砂纸逐级打磨试件的横截面,然后用 w2.5~w0.5 的研磨膏对其进行抛光,直至表面无划痕,最后用 2% 的氢氟

表 2 激光清洗系统主要技术参数
Tab.2 Main technical parameters of laser cleaning system

Parameters	Value
Wavelength/nm	1064
Power/W	<50
Pulse width/ns	120
Frequency/kHz	50 ~ 200
Scan speed/(mm·s ⁻¹)	<8000
Focal length/mm	160
Spot spape	Circle
Waist diameter/mm	0.1

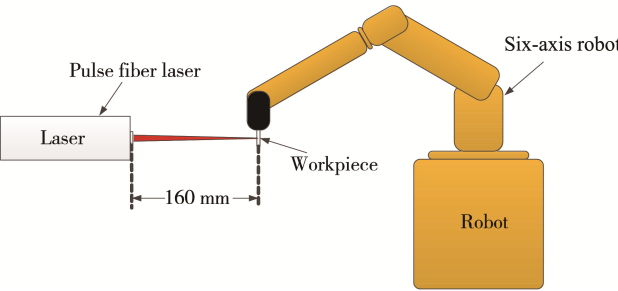


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental device

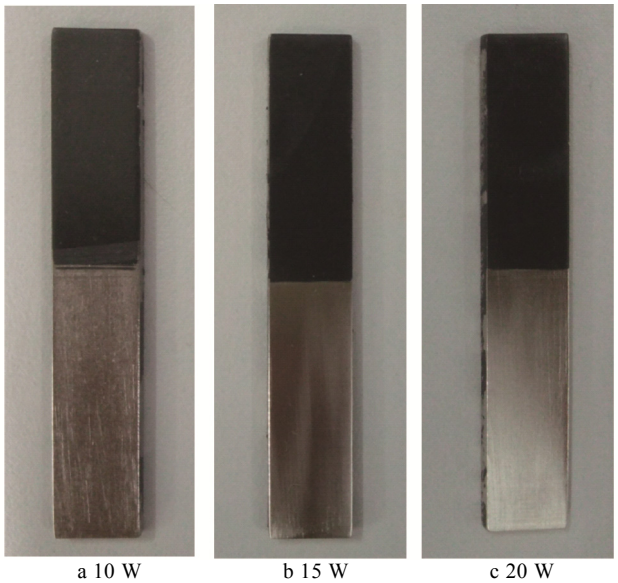


图 2 除漆后的试件
Fig.2 Sample after de-painting

酸水溶液侵蚀试样截面 3~5 s。

采用 CMM-33E 型金相显微镜观察并记录试件横截面的上下边线，从而可以得到经激光除漆后和未经激光处理的 Ti17 合金微观组织；采用 Talysurf CCI 型白光干涉三维轮廓仪观察并记录激光除漆后试样表面的三维轮廓，测量范围分别为 726 μm×726 μm、146 μm×146 μm，物镜倍率分别为 10×、50×；采用 HV-1000 型显微硬度测试仪测量激光除漆前后试件表面的显微硬度，每个清洗参数下测量 5 个点，取算

术平均值，测试载荷为 50 g，加载时间为 10 s；采用 TR100 型表面粗糙度仪测量并直接读取试件的表面粗糙度，测量范围为 2.5 mm×6 mm。

2 结果与分析

2.1 三维形貌

图 3 显示了除漆后基材的三维表面形貌，可以看出激光除漆处理后的试样表面均出现了大量凹坑，且当功率为 10、20 W 时，凹坑较深，表面较粗糙。当功率为 15 W 时，凹坑较浅，表面较平滑。分析认为表面凹坑的形成主要有两方面的原因：一是基材表面熔融留下的熔坑；二是表面在冲击波作用下产生塑性变形而形成的凹坑。当激光器功率为 10 W 时，光束能量密度较小，为 1.27 J/cm²，基材表面吸收激光能量而发生熔融，但形成的熔融层较浅，熔浆几乎没有流动性，熔池表面不易变形，此时伴随的冲击波压力很小，对熔池的影响不大，凹坑主要是基材表面熔融留下的；当激光器功率为 20 W 时，基材表面吸收大量的激光能量，形成的熔融层较深、流动性大，此时伴随的冲击波压力较大，在其作用下熔浆向四周集聚，加大了凹坑的深度；当激光器功率为 15 W 时，光束能量密度适中，为 1.91 J/cm²，此时熔融层流动性和冲击波压力得到较优配置。基材表面吸收激光能量形成的熔融层较浅，但具有一定的流动性，同时在 40%搭接率的冲击波作用下，熔坑中心被填充、四周被压平，形成的凹坑很浅。

2.2 微观组织

图 4 显示了试样截面的金相组织，可以看出经过激光清洗后，试样表面均形成了一层褶皱状的白色物质，称之为白层，且白层的厚度随着激光功率的增加而增加，而未经激光清洗的试样表面则没有。当激光功率为 15 W 时，白层分布比较均匀，厚度约为 10 μm；当激光功率为 10、20 W 时，白层分布不均匀，存在白层和基材相间分布的现象。分析认为激光清洗后，基材表面产生的白层主要是表面熔融与冲击波共同作用的结果：一方面，基材表面吸收激光能量后，温度迅速升高至熔点，基材发生熔融。脉冲过后，基体又快速冷却、重结晶，形成了一层新组织。另一方面，激光清洗过程中伴随着等离子体冲击波和表面声波的产生，基材在其作用下发生了塑性变形，进而引起位错密度增加、晶界滑移和位错运动，产生了孪晶和亚晶界等晶体结构变化，从而引起组织变化。结合试样三维表面形貌分析可知，不同能量密度下，熔融层厚度和冲击波压力不同，热效应和力效应所占比重不同，导致白层厚度和分布也不同。

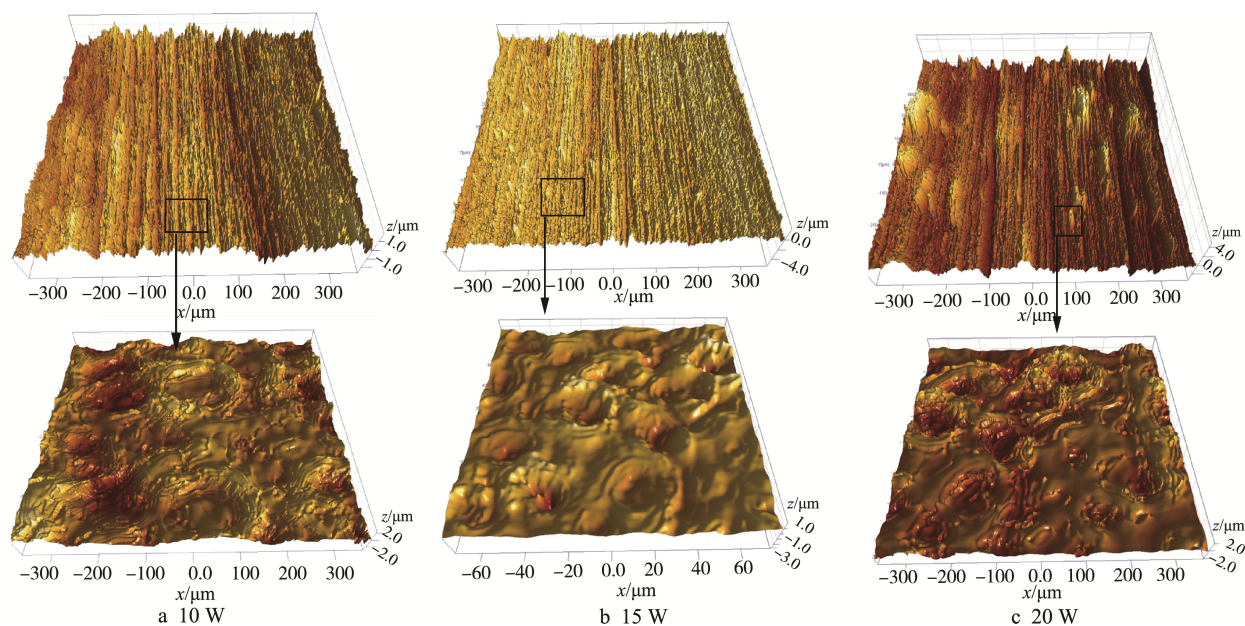


图3 除漆后基材表面三维形貌图

Fig.3 Three-dimensional morphology of substrate surface after de-painting

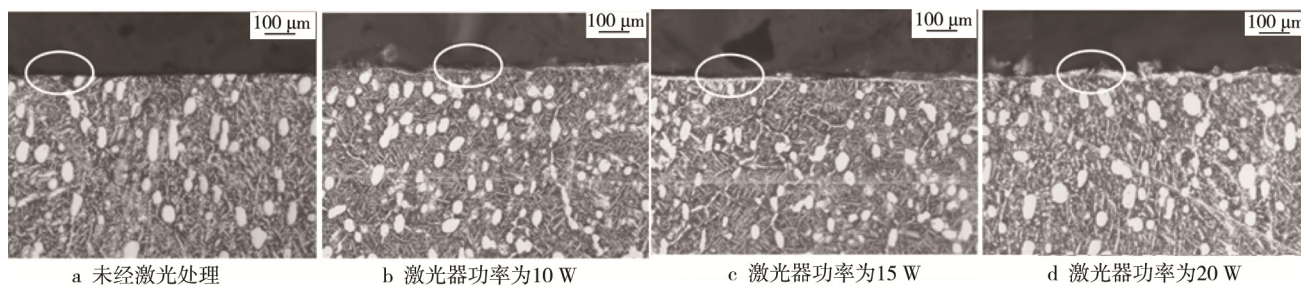


图4 试样截面的金相组织

Fig.4 Metallographic structure of sample cross section: a) No laser processing, b) laser power 10 W, c) laser power 15 W, d) laser power 20 W

2.3 显微硬度

图5为基材表面显微硬度随激光器功率的变化趋势。由图可以看出,经过激光清洗后,试样表面显微硬度有少量增加,且增加量随着激光器功率的增大先增加后减小。结合基材表面组织、形貌分析可知,

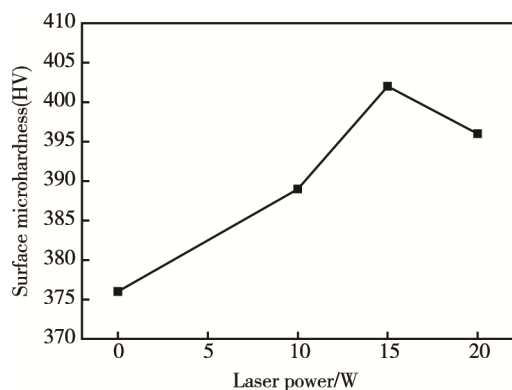


图5 基材表面显微硬度随激光器功率的变化趋势

Fig.5 Variation of substrate surface microhardness as a function of laser power

这是因为在清洗过程中,基材表面快速升温、融化,随后又快速冷却、重结晶生成了一层白色硬化层,其过程相当于表面淬火。此外,功率为10、20 W时,激光能量密度过小和过大,导致表面凹坑较深、表面硬化层厚度不均匀甚至出现中断,从而容易产生应力集中,此时试样表面抵抗变形的能力较弱、强化效果不明显。当功率为15 W左右时,激光能量密度适中,试样表面硬化层厚度均匀,可以有效抵抗变形,强化效果较明显。

2.4 表面粗糙度

图6为基材表面粗糙度随激光器功率的变化趋势。由图可以看出,激光除漆对基材表面粗糙度的影响不大,为亚微米级,且随着激光器功率的增加,基材表面粗糙度先减小后增大。当激光器功率为15 W左右时,基材的表面粗糙度最小,且低于未处理试样。结合基材表面形貌的分析可知,随着激光器功率的增加,熔池的流动性逐渐增加,伴随的冲击波压力也逐渐增大。当激光器功率为10 W时,基材表面主要是

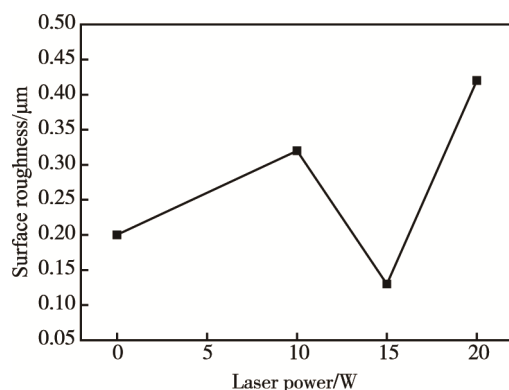


图 6 基材表面粗糙度随激光器功率的变化趋势

Fig.6 Variation of substrate surface roughness as a function of laser power

熔融作用形成的凹坑, 凹坑较深, 此时的油漆可能未被完全清除, 表面粗糙度较大; 当功率为 20 W 时, 在冲击波的作用下, 熔坑进一步加深, 表面粗糙度也较大; 当激光器功率为 15 W 左右时, 在熔融和冲击波的共同作用下原表面的尖峰被削减, 沟壑被填覆, 表面粗糙度降低。

3 结论

1) 经激光除漆后, 基材表面存在大量凹坑和褶皱状白色硬化层。白层增加了基材的表面显微硬度, 但对基材表面粗糙度的影响较小, 为亚微米级。激光功率为 15 W 时, 清洗效果较优。

2) 讨论了凹坑与白层的形成机制, 认为主要是表面熔融和冲击波共同作用的结果, 但白层的组织成分和结构还有待进一步探讨。

3) 激光清洗可以实现表面材料改性, 在一定程度上能够改善基材的表面质量。激光清洗后金属的表面质量可以作为激光清洗参数选取的一个重要指标, 这对于以后的研究和应用有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 宋峰, 刘淑静, 邹万芳. 激光清洗——脱漆除锈[J]. 清洗世界, 2005, 21(11): 38-41.
SONG Feng, LIU Shu-jing, ZOU Wan-fang. Typical Application of Laser Cleaning—Removal of Rust and Paint[J]. Cleaning World, 2005, 21(11): 38-41.
- [2] 杨宏波, 刘朝辉, 丁逸栋, 等. 金属表面耐高温防腐涂料的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 216-222.
YANG Hong-bo, LIU Zhao-hui, DING Yi-dong, et al. Research Progress of High Temperature Resistant Anticorrosive Coatings on Metal Surface[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 216-222.
- [3] 刘其斌, 朱维东, 陈江. 高温合金激光熔覆涂层中裂

纹防止方法的研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2000(5): 56-59.

- LIU Qi-bin, ZHU Wei-dong, CHEN Jiang. Study on Crack Prevention in High Temperature Alloy Laser Cladding Coating[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2000(5): 56-59.
- [4] LU Y F, SONG W D, ANG B W, et al. A Theoretical Model for Laser Removal of Particles from Solid Surfaces[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1997, 65(1): 9-13.
- [5] XU J, SUN Z, ZHOU W, et al. Real-time Monitoring Technique for Laser Cleaning Rust Deposit[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(9): 1090-1092.
- [6] 宋峰, 刘淑静, 牛孔贞, 等. 激光清洗原理与应用研究[J]. 清洗世界, 2005(1): 1-6.
SONG Feng, LIU Shu-jing, NIU Kong-zhen, et al. Principle and Application Research on Laser Cleaning[J]. Cleaning World, 2005(1): 1-6.
- [7] 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.
- [8] 王海将, 刘伟崑, 余跃, 等. 金属表面污染物的激光清洗研究现状与展望[J]. 内燃机与配件, 2016(8): 75-78.
WANG Hai-jiang, LIU Wei-wei, YU Yue, et al. Research Status and Prospect of Laser Cleaning of Metal Surface Contamination[J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2016(8): 75-78.
- [9] 邵飞, 刘洪军, 马颖. 磨料水射流抛光技术及其发展[J]. 表面技术, 2007, 36(3): 64-66.
SHAO Fei, LIU Hong-jun, MA Ying. Polishing Techniques and Development of Abrasive Water Jet[J]. Surface Technology, 2007, 36(3): 64-66.
- [10] ZHENG Y W, LUKY'ANCHUK B S, LU Y F, et al. Dry Laser Cleaning of Particles from Solid Substrates: Experiments and Theory[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(5): 2135-2142.
- [11] LUKY'ANCHUK B S, ARNOLD N, HUANG S M, et al. Three-dimensional Effects in Dry Laser Cleaning[J]. Applied Physics A, 2003, 77(2): 209-215.
- [12] LUKY'ANCHUK B S, WANG Z B, SONG W D, et al. Particle on Surface: 3D-effects in Dry Laser Cleaning[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2004, 79(4): 747-751.
- [13] LU Y F, SONG W D, YE K D, et al. A Cleaning Model for Removal of Particles due to Laser-induced Thermal Expansion of Substrate Surface[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(10A): L1304.

- [14] 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): 181-185.
- [15] 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 Wan-fang, YIN Zhen. The Theoretical Cleaning Model of Paint Removal by Short Pulse Laser[J]. Journal of Gannan Normal University, 2008, 29(6): 27-30.
- [16] 谭东晖, 陆冬生. 激光清洗阈值和损伤阈值的研究[J]. 激光与光电子学进展, 1997(7): 17-20.
TAN Dong-hui, LU Dong-sheng. Study of Laser Cleaning Threshold and Damage Threshold[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1997(7): 17-20.
- [17] 施曙东. 脉冲激光除漆的理论模型、数值计算与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
SHI Shu-dong. Theoretical Model, Numerical Calculation and Application of Paint Removal by Pulse Laser[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- [18] 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(11): 1577-1581.
SONG Feng, ZOU Wang-fang, 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(11): 1577-1581.
- [19] 谭荣清, 郑光, 郑义军, 等. 激光除漆对基材力学性能的影响[J]. 激光杂志, 2005(6): 83-84.
TAN Rong-qing, ZHENG Guang, ZHENG Yi-jun, et al. The Effect of Laser Paint Stripping on the Mechanical Properties of the Substrate[J]. Laser Journal, 2005(6): 83-84.
- [20] WANG Z, ZENG X, HUANG W. Parameters and Surface Performance of Laser Removal of Rust Layer on A3 Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166(1): 10-16.