

激光与光电子学进展

激光清洗技术在装备修理中的应用研究

李文豪*, 石玮玮, 李灌华, 李晓峰, 程远方, 张海伟

国营洛阳丹城无线电厂, 河南 洛阳 471000

摘要 在某些类型装备的修理过程中,需对装备进行分解,更换故障件后再进行装配。这类装备在生产时使用了多种胶黏剂,修理时需将密封胶清除干净并在装配时重新封胶。已有的修理工艺均采用人工除胶,清除效率低且除胶效果一般。激光清洗技术是一种新型表面清洗技术,具有清洗效率高、清洗精度高等特点,已广泛应用于金属材料表面氧化物清洗、飞机蒙皮清洗、半导体晶圆清洗等领域。对激光清洗技术在某些类型装备修理中应用的可行性进行了研究,对比了不同基底材料、不同胶黏剂类型、不同激光脉冲能量的清洗效率及清洗效果。结果表明,激光清洗技术可清洗金属、玻璃等表面的胶黏剂,但会对木材、电路板等基底材料造成不可逆的损伤。

关键词 激光光学; 激光技术; 激光清洗; 胶黏剂; 装备修理

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714010

Application Research of Laser Cleaning Technology in Equipment Repair

Li Wenhao*, Shi Weiwei, Li Guanhua, Li Xiaofeng, Cheng Yuanfang, Zhang Haiwei

State-Owned Luoyang Dancheng Radio Factory, Luoyang 471000, Henan, China

Abstract In the repair process of some types of equipment, the equipment must be disassembled and the faulty parts must be replaced before reassembly. Many types of adhesives are used when such equipment is manufactured, which should be removed during the repair process. Once repairing is completed, the equipment should be assembled and sealed using the necessary adhesives. In the current repair technology, adhesive removal is entirely artificial, which is inefficient and the effect is unideal. Laser cleaning technology is a new surface cleaning technology that shows high cleaning efficiency and accuracy and has been successfully used in the cleaning of oxides on metal surfaces, aircraft skins, semiconductor wafers, and other applications. This study examines the feasibility of applying the laser cleaning technology to some types of equipment repair. Moreover, the cleaning efficiencies and effects of different substrate materials, different adhesives, and different laser pulse energies are compared. Results show that the laser cleaning technology can remove adhesives from metal and glass surfaces but can cause irreversible damage to wood and circuit board surfaces.

Key words laser optics; laser technique; laser cleaning; adhesive; equipment repair

1 引言

在某些类型装备的制造过程中,胶黏剂广泛应用于结构件连接、紧固件连接、电子元器件焊接等部位,以达到密封、防松动、防脱落等目的。该类型装备中使用的胶黏剂包括单组分室温硫化硅橡胶 GD-414、HM304 以及环氧型胶黏剂 E-4X 等。其中,单组分室温硫化硅橡胶主要用于结构密封及防松动^[1-3],环氧型胶黏剂主要用于电子元器件粘接固定^[4-5]。

当装备出现故障或到达规定寿命期时,需对其进

行修理,以高效、经济地提高装备完好率^[6-7]。根据修理深度的不同,可将装备的修理分为组件级、分组件级和器件级。在修理时需将装备分解,按工艺更换故障件及必换件,组装并重新封胶,测试合格后即可交付。在重新封胶前,需将原有已固化的胶黏剂清理干净。现行工艺中,除胶工序需人工操作,除胶效率低、效果不理想。激光清洗技术是一种高效、绿色的清洗方法^[8],可分为激光干式清洗^[9]和激光湿式清洗^[10]。该技术利用激光会聚后能量密度高、精度高、可高效传导等特点,在短时间内使激光脉冲与基底、附着在基底上的

收稿日期: 2021-07-26; 修回日期: 2021-08-26; 录用日期: 2021-09-01

基金项目: 湖南省飞机维修工程技术研究中心 2020 年度开放基金(FJWX202003)

通信作者: *liwenhao_oe@foxmail.com

污染物或人工涂覆的薄膜相互作用,产生局部振动、高温高压或等离子体,进而使污染物与基底分离^[11-12]。目前,激光清洗技术已成功应用多个领域,如钢板表面氧化膜及锈层的去除^[8,10-11]、铝合金油滤表面附着油脂混合物的去除^[13]、铝合金轮胎模具表面橡胶的去除^[14]以及钛合金表面氧化层的去除^[15]。

装备修理中需要进行除胶的基底材料主要有 4 类,分别是金属、木材、电路板、玻璃。其中,金属分为金属平面、金属曲面和螺纹 3 类,对应的胶黏剂主要有单组分室温硫化硅橡胶(GD-414、HM304)和环氧型胶黏剂 E-4X。本文针对某些类型装备修理过程中需要清除胶黏剂的基底材料及胶黏剂类型,根据激光干式清洗原理进行了分析及计算,设计了激光清洗试验并对比了不同激光参数条件下激光清洗的效果及效率。

2 基本原理

当激光功率密度低于某一阈值时,即使延长激光清洗时间,也不能达到清洗效果,该阈值也被称为清洗阈值;当激光功率密度高于某一阈值时,虽然能达到清洗效果,但会损伤基底材料表面,该阈值也被称为损伤阈值^[16]。清洗阈值主要取决于胶黏剂与基底材料之间的作用力,损伤阈值由基底材料自身结构的化学键及对激光的吸收率决定^[17]。

附着物与基底材料的连接主要受到范德华力 F_v 、毛细作用力 F_c 和静电力 F_r 的作用,如图 1 所示。激光清洗的原理就是基底或附着物吸收激光后产生的热应力 F_t 大于范德华力、毛细作用力和静电力的合力且方向相反^[16]。若形成清洗所需热应力对应的激光脉冲能量小于基底材料的损伤阈值,则相应的激光可实现对基底的无损清洗。附着物与基底材料之间的作用力受到很多因素影响,包括两种材料的类型、接触面形状及粗糙度。激光照射后的热应力主要决定于激光波长及能量密度、材料的吸收率等。

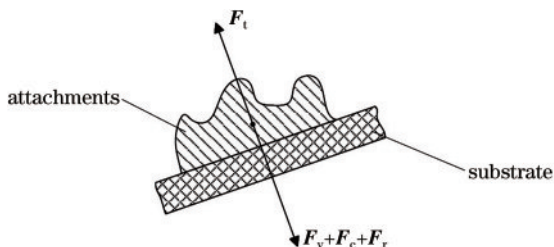


图 1 激光清洗的原理

Fig. 1 Principle of the laser cleaning

3 试验方法

3.1 激光清洗试验装置

试验选用 RFL-P200MX 脉冲光纤激光器,其平均额定功率为 200 W,光斑直径为 6~8 mm,单脉冲的最大能量为 2 mJ,主要技术参数如表 1 所示。其中, P 为

激光器的输出功率, P_{\max} 为激光器的最大输出功率。该激光器可在 210 mm×210 mm 范围内以 12000 mm/s 的速度进行线性扫描,进而清洗区域内的污染物。

表 1 RFL-P200MX 脉冲光纤激光器的参数
Table 1 Parameters of RFL-P200MX pulsed fiber laser

Parameter	Condition	Value
Center wavelength /nm	-	1064
Average output power /W	-	200
Repetition rate /kHz	-	10-50
Spectral half width /nm	$P=P_{\max}$	≤ 10
Spot diameter /mm	$P=P_{\max}$	6-8
Pulse width /ns	$P=P_{\max}$	10/20/30/60/100/ 200/250/350
Maximum single pulse energy /mJ	$P=P_{\max}$	1.5
Output optical fibers length /m	-	3

3.2 试验样品

针对某些装备进行修理时需要除胶的工艺环节中基底材料与胶黏剂的类型,选取同类型基底材料,按工艺要求涂覆胶黏剂并固化,试验样品清单如表 2 所示。

表 2 激光清洗试验的样品
Table 2 Samples of laser cleaning experiment

Serial number	Substrate material	Adhesive
1	metal plate	GD-414
2	wood	GD-414
3	circuit board	E-4X
4	glass	HM304

3.3 试验方法

在试验样品上选取尺寸为 10 mm×10 mm 的区域,将激光光斑直径调整为 0.04 mm,分别用脉冲能量为 0.5 mJ 和 1.0 mJ 的激光以一定的扫描速度进行清洗,目视观察胶黏剂清洗情况,根据扫描次数计算完全去除胶黏剂所需的时间,并在试验后使用高倍放大镜对比清洗前后的表面结构。

4 试验结果与讨论

4.1 金属基底

选取的金属基底试验品为镀锌低碳钢薄板,其表面有一层厚度约为 0.02 mm 的镀锌层,这种材料与某类型装备中的部分结构件相似,清洗前的表面形貌如图 2(a)所示。对薄板表面涂有单组分室温硫化硅橡胶 GD-414 的区域,分别用脉冲能量为 0.5 mJ 和 1.0 mJ、脉冲频率为 200 kHz、脉冲宽度为 350 ns 的激光以 8000 mm/s 的速度进行清洗试验。其中,使用脉冲能量为 0.5 mJ 的激光清洗时间为 6.45 s,使用脉冲



图2 试验前后金属基底表面形貌。(a)清洗前;(b)清洗后(脉冲能量为0.5 mJ);(c)清洗后(脉冲能量为1.0 mJ)

Fig. 2 Surface morphologies of metal substrates before and after the test. (a) Before cleaning; (b) after cleaning (pulse energy of 0.5 mJ); (c) after cleaning (pulse energy of 1.0 mJ)

能量为1.0 mJ的激光清洗时间为4.68 s,清洗后金属基底的表面形貌如图2(b)和图2(c)所示。可以发现,激光清洗后会将金属基底表面的处理层与胶黏剂一同去除,脉冲能量为1.0 mJ的激光清洗效率更高,两种脉冲能量的激光清洗后均可看到激光扫描后金属融化的痕迹。

4.2 木材基底

对表面涂有单组分室温硫化硅橡胶GD-414的木

材,使用脉冲能量为0.5 mJ、脉冲频率为400 kHz、脉冲宽度为350 ns的激光以8000 mm/s的速度进行清洗试验,激光清洗所需时间为2.34 s,清洗前后木材基底的表面形貌如图3所示。可以发现,由于木材和单组分室温硫化硅橡胶GD-414的化学组成存在大量键能相同的C-O共价键,其清洗阈值和损失阈值接近,在清洗胶黏剂时容易损伤基底材料。此外,清洗后的木材表面发黑,这是表面碳化的表现。

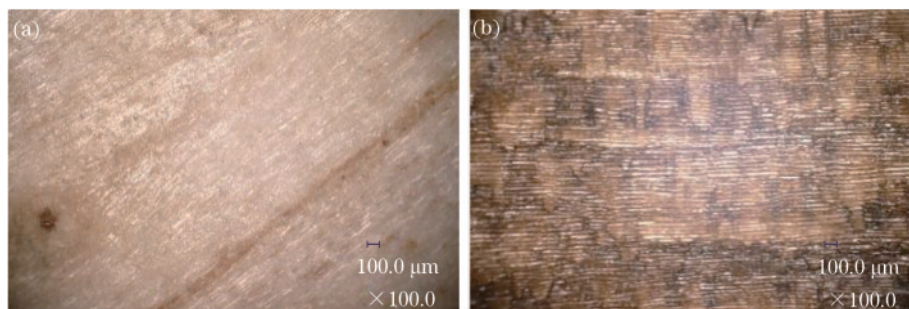


图3 试验前后木材基底表面形貌。(a)清洗前;(b)清洗后

Fig. 3 Surface topography of wood substrate before and after experiment. (a) Before cleaning; (b) after cleaning

4.3 电路板基底

对涂有环氧型胶黏剂E-4X的电路板分别使用脉冲能量为0.5 mJ、脉冲频率为400 kHz、脉冲宽度为350 ns的激光以6000 mm/s的扫描速度进行清洗,结

果如图4所示。可以发现,电路板基底为环氧树脂,其导热率较低,清洗时容易燃烧,使基材发黑并产生形变,损伤基底材料。

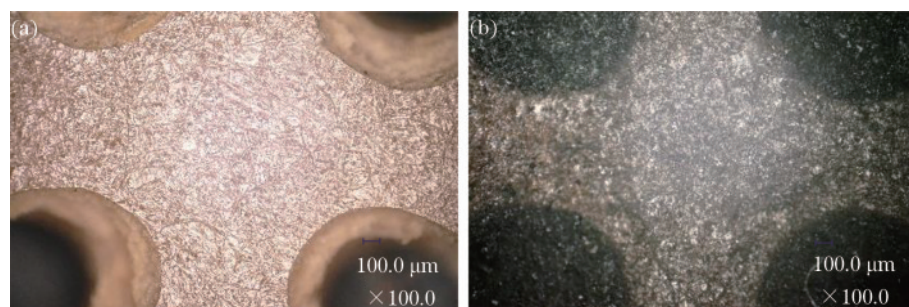


图4 试验前后电路板基底的表面形貌。(a)清洗前;(b)清洗后

Fig. 4 Surface topography of circuit board substrate before and after experiment. (a) Before cleaning; (b) after cleaning

4.4 玻璃基底

对涂有单组分室温硫化硅橡胶HM304的玻璃,

使用脉冲能量为0.5 mJ、脉冲频率为400 kHz、脉冲宽度为80 ns的激光以10000 mm/s的速度进行清洗,

结果如图 5 所示。可以发现,脉冲能量为 0.5 mJ 的激光可在不伤害玻璃基底的情况下将单组分室温硫化硅橡胶 HM304 清洗干净。玻璃内部主要的化学键

为键能较高的共价键,且玻璃对波长为 1064 nm 的激光吸收系数较低,因此该条件的激光不会损伤玻璃基底。

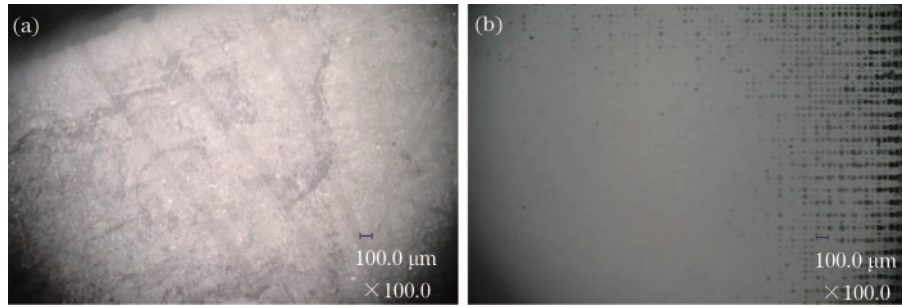


图 5 试验前后玻璃基底的表面形貌。(a)清洗前;(b)清洗后

Fig. 5 Surface topography of glass substrate before and after experiment. (a) Before cleaning; (b) after cleaning

5 结 论

针对某类型装备修理中常见的除胶需求,进行了激光清洗实验,研究了激光清洗速度和激光脉冲能量等参数对清洗效率及基底的影响,并对实验结果进行了讨论,具体结论如下。

1) 对于金属基底材料,使用脉冲能量为 0.5 mJ 的激光可有效清洗其表面的胶黏剂,用脉冲能量为 1.0 mJ 的激光清洗时清洗效率更高,但对基底的影响也更大。

2) 对于木材和电路板基底材料,由于其内部存在大量与胶黏剂相同的化学键,且导热率较低,使用脉冲能量为 0.5 mJ 和 1.0 mJ 的激光清洗时会烧蚀基底材料。

3) 对于玻璃基底材料,由于其损伤阈值较大且对激光的吸收率较低,激光能将胶黏剂清洗干净。

参 考 文 献

- [1] 邹丞, 陈夷, 向小平, 等. GD414 单组分室温硫化硅橡胶施工方法[J]. 工程与试验, 2019, 59(3): 66-67.
Zou C, Chen Y, Xiang X P, et al. GD414 one-component room temperature vulcanized silicone rubber construction method[J]. Engineering & Test, 2019, 59(3): 66-67.
- [2] 孙书, 李秀杰, 李伟煜, 等. 航天器用 GD414 硅橡胶材料的湿热老化试验与贮存寿命预测[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(2): 78-83.
Sun S, Li X J, Li W Y, et al. Hydrothermal aging test and storage life prediction of GD414 silicone rubber for spacecrafts[J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(2): 78-83.
- [3] 张晓强, 韩汶欣, 牛玉龙, 等. 牵引电机用有机硅密封胶的国产化研究[J]. 有机硅材料, 2020, 34(5): 38-41.
Zhang X Q, Han W X, Niu Y L, et al. Study on localization of silicone sealant for traction motor[J]. Silicone Material, 2020, 34(5): 38-41.
- [4] 张乐, 张广成, 任联锋, 等. 航天器电子产品用环氧胶粘剂粘接工艺研究[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(9): 24-29.

Zhang L, Zhang G C, Ren L F, et al. Study on bonding process of epoxy adhesive for spacecraft electronic products[J]. China Adhesives, 2019, 28(9): 24-29.

- [5] 余英丰, 刘小云, 李善君. 航空航天用环氧耐高温胶粘剂研究[J]. 粘接, 2005, 26(5): 4-7.
Yu Y F, Liu X Y, Li S J. High temperature resistant epoxy adhesive for aeronautical applications[J]. Adhesion in China, 2005, 26(5): 4-7.
- [6] 朱胜, 姚巨坤, 王晓明. 面向装备全寿命周期的维修发展新特点及技术体系[J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26(6): 1-5.
Zhu S, Yao J K, Wang X M. New features and technology system of maintenance development for equipment life cycle[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2012, 26(6): 1-5.
- [7] 王海峰, 王宏亮, 阳纯波. 航空装备保障智能化发展认识与探讨[J]. 测控技术, 2020, 39(12): 1-9, 27.
Wang H F, Wang H L, Yang C B. Understanding and discussion on intelligence-based aviation materiel support development[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(12): 1-9, 27.
- [8] 李鑫炎, 李灿阳, 王丹, 等. 激光扫描速度对 Q345 钢表面锈层清洗质量的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002010.
Li X Y, Li C Y, Wang D, et al. Effect of laser scanning speeds on cleaning quality of rusted layer on Q345 steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002010.
- [9] 万壮, 杨学锋, 夏国峰, 等. 激光频率对激光干式清洗机理及表面性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 70-77.
Wan Z, Yang X F, Xia G F, et al. Effect of laser frequency on the mechanism and performance of laser dry cleaning[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 70-77.
- [10] 雷正龙, 孙浩然, 陈彦宾, 等. 不同激光清洗方法对高强度钢表面锈蚀层的去除研究[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702003.
Lei Z L, Sun H R, Chen Y B, et al. Elimination of rusting layer from high-strength steel surface using different laser cleaning methods[J]. Chinese Journal of

- Lasers, 2019, 46(7): 0702003.
- [11] 解志欣, 孙文磊, 陶彦辉, 等. 316L 不锈钢表面污染物激光清洗工艺试验及耐腐蚀性能研究[J]. 应用激光, 2021, 41(2): 235-244.
- Xie Z X, Sun W L, Tao Y H, et al. Experimental study on laser cleaning process and corrosion resistance of 316L stainless steel surface contaminants[J]. Applied Laser, 2021, 41(2): 235-244.
- [12] 张晓, 王明娣, 刘金聪, 等. 基于机器视觉的激光智能去除锈蚀的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0814001.
- Zhang X, Wang M D, Liu J C, et al. Laser intelligent rust removal based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0814001.
- [13] 陈翊坤, 陆安进, 付宁宁, 等. 基于激光清洗技术实现航空油滤维保的工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 649-656.
- Chen Y K, Lu A J, Fu N N, et al. Research on technology of aviation oil filtration maintenance based on laser cleaning technology[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 649-656.
- [14] 任远, 王文涛, 金硕, 等. 激光清洗对铝合金轮胎模具表面性能的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(5): 901-906.
- Ren Y, Wang W T, Jin S, et al. Effect of laser cleaning on the surface properties of aluminum alloy tire mold[J]. Applied Laser, 2020, 40(5): 901-906.
- [15] 马玉山, 王鑫林, 何涛, 等. 金属表面腐蚀层及涂层的激光干式清洗研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 124-134.
- Ma Y S, Wang X L, He T, et al. Research progress in dry laser cleaning on corrosion and coating layers of metal surfaces[J]. Surface Technology, 2020, 49(2): 124-134.
- [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, 34(7): 17-20.
- Tan D H, Lu D S. Study of laser cleaning threshold and damage threshold[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1997, 34(7): 17-20.
- [17] 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 F, Zou W F, Tian B, 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.