

38CrMoAl 材料表面污染物激光清洗技术

薛亚飞, 王巍, 王学锋, 王军龙, 李广, 高文焱, 李本海, 李凯

(北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

摘要: 采用脉冲激光对 38CrMoAl 材质样件进行了激光清洗试验研究, 通过显微镜、白光干涉仪、台阶仪、红外测温仪等分析方法, 研究了 38CrMoAl 材料表面污染物的清洗阈值、损伤阈值、激光功率密度对清洗效果的影响规律。结果表明, 当激光功率密度大于 1.22 J/cm^2 时, 样件表面污染物开始被有效清除, 对应污染物的清洗阈值, 当能量密度增加到 3.11 J/cm^2 时, 38CrMoAl 基材开始出现损伤, 对应基材的损伤阈值; 当能量密度位于清洗阈值和损伤阈值之间时, 清洗机理主要为振动效应; 当激光能量密度为 2.36 J/cm^2 时, 清洗效果最好, 样件表面污染物去除干净, 清洗前后表面粗糙度基本没有变化, 基材无损伤, 激光清洗可满足 38CrMoAl 材质样件的精密清洗需求。

关键词: 激光清洗; 工艺优化; 清洗阈值

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0706004

Laser cleaning technology of 38CrMoAl material surface pollutants

Xue Yafei, Wang Wei, Wang Xuefeng, Wang Junlong, Li Guang, Gao Wenyan,

Li Benhai, Li Kai

(Institute of Beijing Aerospace Control Instrument, Beijing 100854, China)

Abstract: The laser cleaning experiment of 38CrMoAl samples was studied by pulsed laser. The influence law of cleaning threshold, damage threshold and laser power density of surface pollution of 38CrMoAl samples was studied by microscope, white light interferometer, step profiler and infrared thermometer. The result shows that when the laser power density increases to 1.22 J/cm^2 , the surface contaminants begin to be effectively removed, corresponding to the cleaning threshold, when the power density increases to 3.11 J/cm^2 , the substrate begins to be damaged, corresponding to the damage threshold; When the energy density between the cleaning threshold and the damage threshold, the cleaning mechanism is vibration effect; When the power density equals to 2.36 J/cm^2 , all the contaminants on the sample are removed, the roughness is not changed after cleaning, the substrate is not damaged. Laser cleaning can satisfy the fine cleaning needs of 38CrMoAl parts.

Key words: laser cleaning; parameter optimization; cleaning threshold

收稿日期: 2018-02-10; 修订日期: 2018-03-20

基金项目: “增材制造与激光制造”重点专项(2016YFB1102503)

作者简介: 薛亚飞(1983-), 男, 工程师, 博士, 主要从事激光加工方面的研究。Email: xueyafei2005@sina.com

0 引言

38CrMoAl 是一种高级氮化钢, 其具有表面硬度高、抗疲劳强度高、耐腐蚀、耐热等优良的性能, 在日常生产中被广泛用于制造轴承、阀门、活塞、齿轮、丝杠、螺杆等耐磨部件^[1]。目前, 特材零件在使用一段时间后面临一系列的清洗难题^[2], 传统的清洗方法已不能满足无污染、无损伤的清洗需要, 如螺杆清洗等。

文中以挤塑机螺杆为例, 对 38CrMoAl 类零件进行了激光清洗技术研究。螺杆是注塑机的重要部件, 它的作用是对塑料粒料进行输送、压实、熔化、搅拌和施压, 这些都是通过螺杆在料筒内的旋转作用来完成的。塑料材料经过螺杆高温熔化时会在螺杆表面残留形成黑色积碳, 同时高分子材料也会腐蚀螺杆, 产生锈蚀等, 如果不及时对螺杆进行清洗, 在下次生产时就会造成产品中出现黑点, 另外, 在塑料加工中换料、转色时, 也需要对螺杆进行清洗^[3]。

目前主要有两种清洗螺杆的方法, 一种是生产结束后, 加入螺杆清洗剂, 通过螺杆加热旋转, 清洗剂熔化后将残余在螺杆上的旧料挤出, 这种方法具有清洗效率高的优点, 但存在无法有效清除螺杆上的积碳等顽固污染物^[4]; 另外一种方法是直接把螺杆拆出来, 放进马弗炉 450 °C 保温 4~5 h, 然后用铜刷刷干净, 该方法存在时间成本高, 清洗过程中工作量极大且极易造成螺杆磨损, 影响螺杆与料筒的配合直径间隙, 进而影响到螺杆的使用寿命^[5]。

激光清洗技术是近几年发展起来的新技术, 相比于传统清洗方法而言, 具有无污染、效率高、基材无损伤等优点。该技术已成功应用于微电子器件、艺术品保护、模具清洗、除漆、军用装备除菌等各个领域^[6-9]。螺杆表面污染物主要为高分子残留物、积碳、金属氧化物等, 针对这种类型的污染物, 国内外学者也开展了一些研究, 赵一峰等人采用激光来清洗发动机燃烧室积碳^[10], 并申请了专利。王泽敏等人^[11]开展了激光清洗轮胎模具表面橡胶层的工艺和机理研究。宋峰等人^[12-13]开展了激光除锈的工艺和理论研究, 并开发了一些激光除锈设备。

大量的试验表明, 激光清洗的关键在于控制激光能量密度, 其他工艺参数影响相对较小^[14]。因此,

文中主要研究了激光能量密度对螺杆表面污染物清洗效果影响规律及作用机理, 对于工业应用中 38CrMoAl 类零件的清洗具有一定的参考价值。

1 试验方法与设备

试验所选清洗对象为双螺杆挤出机待清洗的螺杆, 螺杆材质为 38CrMoAl。所采用激光清洗系统主要由激光器单元、光束调控传输单元、升降位移平台单元、控制系统、监测保护装置等组成。其中, 所用激光器为脉冲光纤激光器, 波长为 1 064 nm, 脉冲宽度为 100 ns, 重复频率为 30 kHz; 光束调控传输单元包括准直镜、光束整形部件、扫描振镜和聚焦镜; 位移平台在 X-Y-Z 方向可调; 监测保护装置对清洗效果进行实时监测; 清洗过程中激光入射方向与样品表面垂直, 扫描线光束宽度 30 mm, 光斑重叠率 40%, 清洗过程中, 螺杆样品固定在转台上, 以固定速度旋转, 激光工艺参数可由控制系统调整。

采用激光显微镜对清洗效果进行评价, 采用白光干涉仪测试清洗前后样品表面的粗糙度, 台阶仪测试污染物去除厚度, 红外测温仪对清洗结束瞬时样品表面的温度进行测量。

2 试验结果与讨论

2.1 能量密度对螺杆清洗后表面形貌的影响规律及清洗去除机理分析

激光清洗去除机理主要包括振动效应和烧蚀效应^[15-16], 其中振动效应是指当脉冲激光照射时, 污染物和基底分别吸收部分激光能量后, 其温度升高并在激光脉冲结束时降温, 短时间内迅速的热膨冷缩会在污染层中和界面处产生很大的应力, 从而使污染物脱离基底。烧蚀效应是指当污染物吸收激光能量后, 温度迅速升高到或超过其气化温度, 污染物被气化去除的现象。激光清洗是一个复杂的过程, 除了以上介绍的两个主要机理外, 还可能包括光子压力、激光软烧蚀、等离子体爆炸等机理。

激光功率密度是影响清洗效果最主要的参数之一, 为了研究功率密度对清洗效果和清洗去除机理的影响规律, 采用不同功率密度进行螺杆清洗试验, 试验中点状激光束经扫描振镜转变为线光束, 然后用线光束扫描待清洗螺杆样品, 清洗过程中,

扫描线光束之间的间距为 0.05 mm,振镜扫描速度为 1 000 mm/s。表 1 为试验过程中各清洗样件所采用激光能量密度对照表。

表 1 各螺杆样件清洗过程中所采用激光能量密度表

Tab.1 Laser energy density table of screw samples in cleaning process

No.	Energy density/J·cm ²
1#	0.39
2#	0.56
3#	0.74
4#	1.01
5#	1.22
6#	1.83
7#	2.36
8#	3.11
9#	4.34
10#	5.25
11#	7.85

清洗过程中,采用红外测温仪实时测量样件温度,清洗结束后,立刻记录温度值,图 1 为不同功率的螺杆样件清洗结束瞬间表面温度的测试结果,图 1 中各点与表 1 中 1#~10# 样件对应。图 2~4 为各样件清洗后表面显微形貌图,各图中 1#~11# 编号与表 1 中样件编号对应。根据显微形貌测试结果,螺杆

样件激光清洗过程可分为不能有效清洗阶段(图2)、有效清洗阶段(图 3)和清洗损伤阶段(图 4)三个阶段。

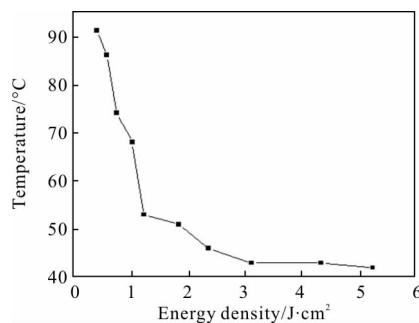


图 1 清洗结束瞬间基底表面温度

Fig.1 Moment temperature of substrate after cleaning

如图 2 中 1# 样件激光清洗后形貌所示,当激光能量密度为 0.39 J/cm² 时,样件清洗前后表面没有明显变化,这是因为,此时激光能量密度很小,不能对污染物造成影响,污染物吸收的激光能量都转换为基底的热能,所以基底材料表面残留温度达到图 1 中的最高温度 91℃。当激光能量密度增加到 0.56 J/cm² 时,如图 2 中 2# 样件所示,样件表面开始出现少量熔化痕迹,如图 1 所示,此时基底的瞬时温度降低到 86℃,因为与激光能量密度的增量相比,污染物熔化需要消耗更多的能量。当激光能量密度分别增加到 0.74 J/cm²(3#)、1.01 J/cm²(4#)时,样件表面熔化痕迹越来越重,样件表面瞬时温度也分别下降到 74℃、68℃,表面温度下降的原因也是因

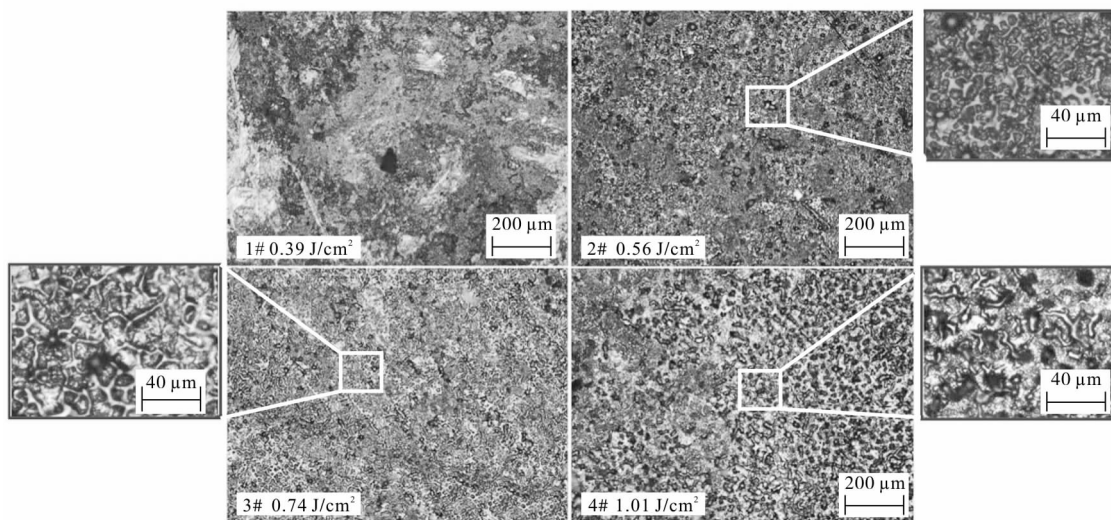


图 2 不同激光能量密度清洗效果形貌图

Fig.2 Morphology diagram of cleaning effect with various laser energy density

为污染物熔化带走了大量的激光能量。在激光能量密度从 0.39 J/cm^2 增加到 1.01 J/cm^2 的过程中,清洗过程中无振动效应产生的啪啪声,此时仅造成污染物表面部分熔化,污染物未被有效去除,对应不能有效清洗阶段,该阶段清洗结束瞬时螺杆基材残留温度较高,随着能量密度的增加,基材瞬时残留温度迅速降低。

当激光能量密度增加到 1.22 J/cm^2 时,如图 3 中 5# 所示,样件表面污染物开始被去除,同时在清洗过程中伴随着振动效应产生的啪啪声,表面残留

污染物无熔化痕迹,样件表面瞬时残留温度也急剧下降到图 1 中的 53°C ,因为此时激光能量主要以污染物振动剥离的形式所消耗。当激光能量密度增加到 1.83 J/cm^2 时,如图 3 中 6# 所示,残留污染物进一步减少,开始显露出部分基底材料。当激光能量密度进一步增加到 2.36 J/cm^2 时(7#),样件表面残留的污染物已经完全清洗干净,且基底材料表面无损伤。在 5#~7# 样件的清洗过程中,随着激光能量密度的增加,如图 1 所示,样件表面瞬时温度呈下降趋势,但变化较缓,清洗过程中振动效应产生的声音也

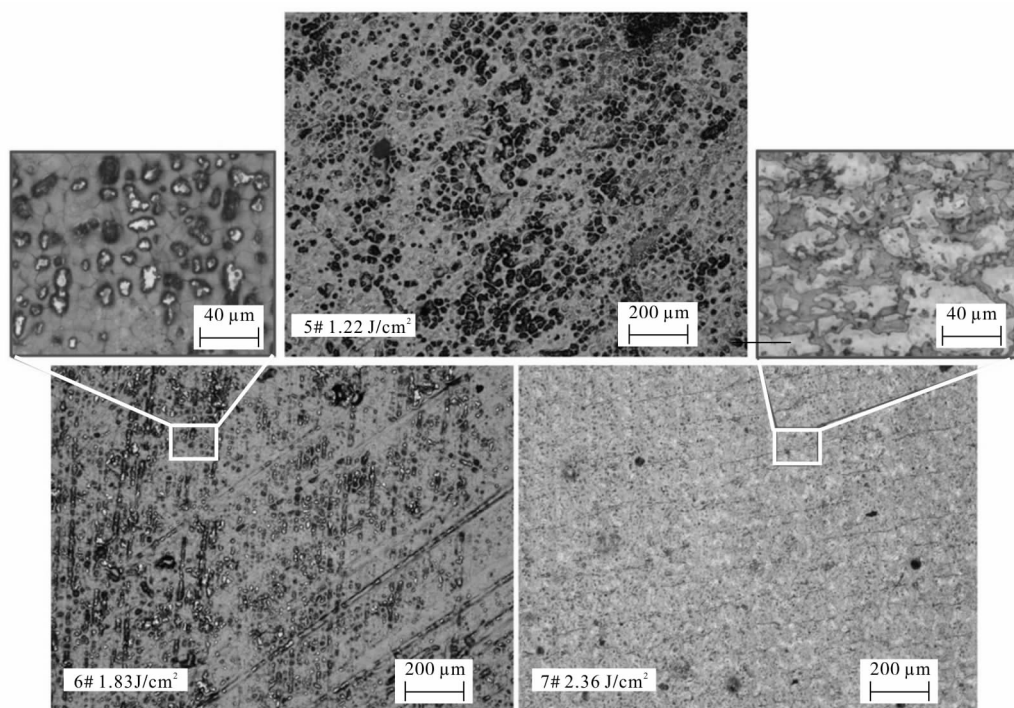


图 3 不同激光能量密度清洗效果显微形貌图

Fig.3 Micro-morphology diagram of cleaning effect with various laser energy density

越来越大,且样件表面无熔化痕迹,说明此时的清洗机制主要为污染物振动去除。

当激光能量密度增加到 3.11 J/cm^2 时,如图 4 中 8# 所示,样件基材表面开始出现轻微损伤,基底材料被氧化成淡黄色;当能量密度增加到 4.34 J/cm^2 时(9#),在激光光斑直接照射到的位置,基底材料出现熔化、汽化后残留的小坑,表面氧化也进一步加重;当激光能量密度进一步增加到 5.25 J/cm^2 时(10#),样件表面基材汽化残留的小坑进一步增大,样件表面开始出现轻微发黑现象;当激光能量密度增加到 7.85 J/cm^2 时(11#),表面损伤也更严重,基底材料被氧化变黄、变

黑的更加严重。在 8#~11# 样件的清洗过程中,随着激光能量密度的增加,清洗过程中伴随的振动声音也越来越大,同时基底材料表面出现基底熔化、汽化后残留的小孔,说明此时的清洗机制主要为热效应和振动效应共同作用。8#~11# 样件清洗过程中,如图 1 所示,样件表面瞬时温度随着能量密度的增加缓慢减小,这主要是因为,基材熔化、汽化以及振动带着了大量的激光能量,所以样件瞬时温度反而降低。

清洗阈值和损伤阈值是清洗过程中两个重要参数,清洗阈值定义为当样品表面污染物刚开始被清除时对应的激光功率密度。当金属表面开始出现损

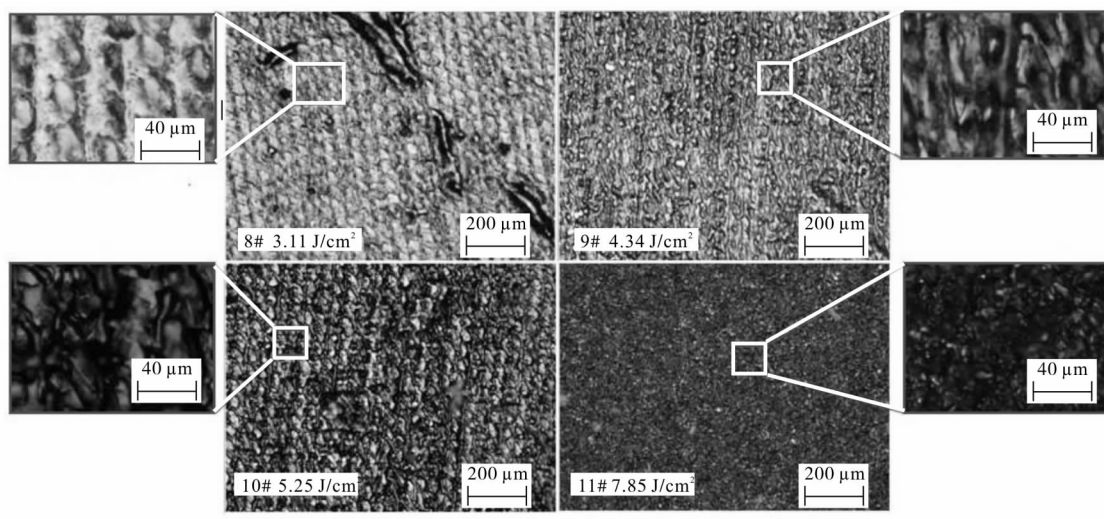


图 4 不同激光能量密度清洗效果显微形貌图

Fig.4 Micro-morphology diagram of the samples after cleaning with various energy density

伤时所对应的功率密度为基底材料的损伤阈值。在清洗过程中，激光能量密度应处于清洗阈值和损伤阈值之间。结合清洗过程中显微形貌照片，当激光能量密度为 1.22 J/cm^2 时(5#)，样品表面污染物开始被清除，所以清洗阈值为 1.22 J/cm^2 ，当激光能量密度达到 3.11 J/cm^2 时(8#)，基底材料开始出现损伤，所以损伤阈值为 3.11 J/cm^2 。结合试验结果，当激光能量密度为 2.36 J/cm^2 时，样品清洗效果最好，为最佳激光能量密度。图 5 分别为激光能量密度采用清

洗阈值(清洗不足)、最佳能量密度(完全清洗)和损伤阈值(过清洗)清洗一遍的螺杆清洗效果图。如图 5 所示，采用最佳的能量密度对螺杆样品进行清洗，样品表面污染物清除干净，基底材料表面无损伤。

2.2 清洗后样品表面粗糙度及厚度测试分析

双螺杆之间、螺杆与料筒之间的配合直径间隙有严格要求，间隙太小会造成螺杆“扫膛”，产生磨损，甚至卡死螺杆，间隙太大会造成生产效率低，还会影响产品品质，另外，表面粗糙度会影响到螺杆的耐磨性能和使用寿命。因此，要求清洗后螺杆表面基材无损伤，且表面粗糙度基本无变化。

为了研究激光清洗对螺杆基材的影响，采用台阶仪分别对激光清洗后的两类螺杆样品进行了清除厚度测试试验，一类为表面有污染物的螺杆样品，另一类为表面干净的螺杆样品，清洗采用优化后的功率密度 2.36 J/cm^2 。如图 6 所示，表面有污染物的螺杆样品激光清洗前后厚度差为 $4 \mu\text{m}$ 。干净的螺杆样

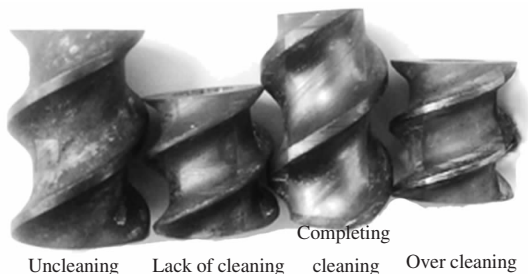


图 5 螺杆样品清洗前后效果图

Fig.5 Comparison of screw before and after cleaning

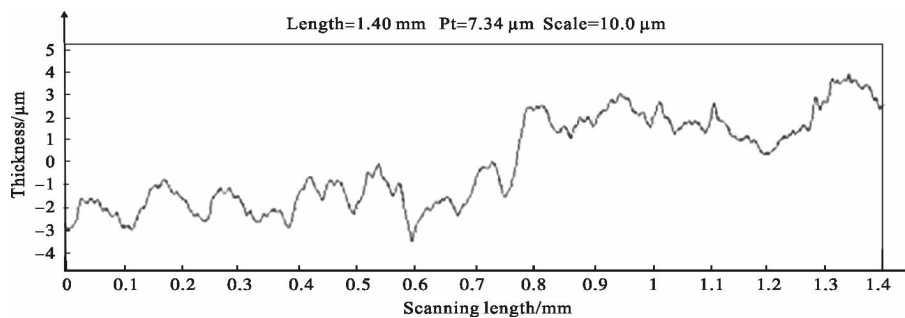


图 6 螺杆样品激光清洗前后台阶仪测试结果

Fig.6 Result of step profiler before and after laser cleaning

件激光清洗 5 遍后, 台阶仪也无法测试出清洗前后的厚度差。上述试验结果表面采用优化后的参数, 仅能去除螺杆表面污染物, 不会对螺杆基材造成损伤。

采用白光干涉仪对干净螺杆和激光清洗后螺杆样件的表面粗糙度进行了测试, 测试结果如图 7 所示, 表面粗糙度数值如表 2 所示。

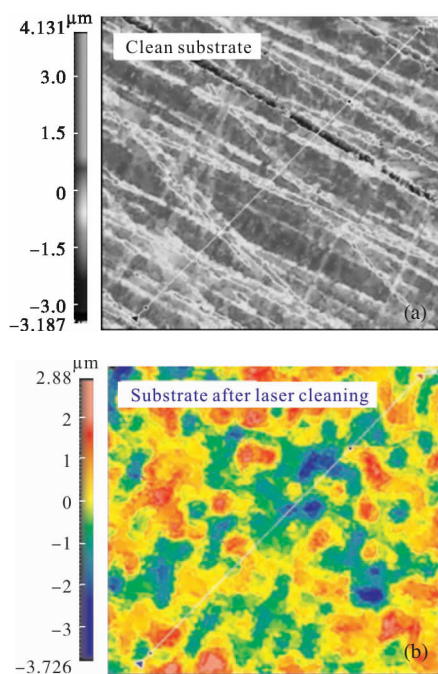


图 7 激光清洗前后螺杆表面粗糙度图

Fig.7 Roughness results of screw surface before and after laser cleaning

表 2 为激光清洗前后表面粗糙度测试结果, 如表 2 所示, 激光清洗前后样件表面粗糙度没有明显变化, 这说明合理地选择激光清洗参数不会对螺杆基材造成影响, 激光清洗可以满足螺杆无损伤精密清洗要求。

表 2 激光清洗前后试验表面粗糙度值

Tab.2 Roughness value of screw before and after laser cleaning

Roughness	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	$S_z/\mu\text{m}$
Substrate	0.45	0.61	7.3
After cleaning	0.66	0.83	6.6

3 结 论

通过对挤塑机 38CrMoAL 材质螺杆样件的激

光清洗试验研究, 当激光能量密度比较小时, 螺杆表面污染物不能被有效清洗, 激光能量被螺杆样件表面污染物吸收, 转化为样件的热量, 造成污染物表面部分区域溶化, 导致螺杆基底温度升高; 当激光能量密度增加到污染物的清洗阈值 1.22 J/cm^2 时, 污染物开始被部分清除, 清洗过程中, 伴随振动效应产生的啪啪声, 此时的清洗机制主要为热振动效应; 当激光能量密度增加到 3.11 J/cm^2 时, 螺杆基底材料开始出现损伤、氧化变黑, 达到螺杆基底材料的损伤阈值; 当采用合适的激光功率密度时, 激光清洗可有效去除螺杆表面污染物, 同时不会造成螺杆基材损伤, 清洗前后螺杆表面粗糙度基本没有变化。试验初步说明, 激光清洗可满足 38CrMoAl 类零件精密清洗的要求。

参考文献:

- [1] Li Zhengda, Na Ran, Chen Tao. Research on laser polishing of 38CrMoAl [C]//The Academic Conference Proceedings of 16th National Special Processing Conference, 2015: 120 - 124. (in Chinese)
李政达, 纳冉, 陈涛. 激光抛光 38CrMoAl 合金工艺特性的试验研究 [C]//第 16 届全国特种加工学术会议论文集, 2015: 120-124.
- [2] Wang Changqing, Xue Fengju, Zhong Sheng, et al. Optimization research of special material parts degreasing technological parameters[J]. *Navigation and Control*, 2016, 1 (15): 54-58. (in Chinese)
王长青, 薛风举, 钟声, 等. 特材零件除油工艺参数的优化研究[J]. *导航与控制*, 2016, 1(15): 54-58.
- [3] Yu Shengrui. Research on key techniques of process control for all-electric injection molding machine [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
于盛睿. 全电动塑料注射机工艺控制关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [4] Wu Huazhong, He Wenxuan, Peng Chao, et al. Comprehensive analysis of screw cleaning agent [J]. *Journal of Minjiang University*, 2010, 31(2): 124-126. (in Chinese)
吴华忠, 何文绚, 彭超, 等. 固体螺杆清洗剂的综合分析[J]. *闽江学院学报*, 2010, 31(2): 124-126.
- [5] Zhu Yuming. The wear resistance and repair for the screw and machine barrel of double screw extruder [J]. *Research Application*, 2015, 8: 180-181. (in Chinese)
朱玉明. 双螺杆挤出机螺杆机筒的耐磨处理和修复[J]. 科

- 研应用, 2015, 8: 180-181.
- [6] Su Chunzhou, Luan Xiaoyu, Wang Haijun, et al. The preliminary study and application on laser cleaning [J]. *Science and Technology Information*, 2013, 26: 3-6. (in Chinese)
苏春洲, 栾晓雨, 王海军, 等. 激光清洗技术的初步研究和应用[J]. 科技资讯, 2013, 26: 3-6.
- [7] Hou Suxia, Luo Jijun, Xu Jun, et al. Laser cleaning technology application of military equipment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 357-360. (in Chinese)
侯素霞, 罗积军, 徐军, 等. 军用装备的激光清洗技术应用研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 357-360.
- [8] Wu Dongjiang, Xu Yuan, Wang Xuyue, et al. Experimental and theoretical study on laser cleaning Al_2O_3 particle on silicon wafer surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 764-770. (in Chinese)
吴东江, 徐媛, 王续跃, 等. 激光清洗硅片表面 Al_2O_3 颗粒的试验和理论分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 764-770.
- [9] Wang Xuyue, Xu Weixing, Sima Yuan, et al. Evaluation of efficiency for silicon wafer cleaning by image processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1263-1268. (in Chinese)
王续跃, 许卫星, 司马媛, 等. 利用图像处理技术评价硅片表面清洗率[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1263-1268.
- [10] Zhao Yifeng, Zhou Sijia, Pan Dixin, et al. Combustion chamber carbonized laser cleaner: China, 203265160U [P]. 2006-12-12. (in Chinese)
赵一峰, 周斯加, 潘迪欣, 等. 燃烧室积碳的激光清洁器: 中国, 203265160U[P]. 2006-12-12.
- [11] Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Study on the mechanism and technology of laser cleaning tire mold surface rubber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 1050-1054. (in Chinese)
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, 27(11): 1050-1054.
- [12] Tian Bin, Zou Wanfang, Liu Shujing, et al. Introduction of rust removed by dry laser cleaning [J]. *Cleaning World*, 2006, 22(8): 33-38. (in Chinese)
田彬, 邹万芳, 刘淑静, 等. 激光干式除锈 [J]. 清洗世界, 2006, 22(8): 33-38.
- [13] Li Wei. Research on mechanisms of laser rust removal and manufacture of laser cleaning devices [D]. Tianjin: Nankai University, 2014. (in Chinese)
李伟. 激光清洗锈蚀的机制研究和设备开发[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [14] Tian Bin, Zou Wanfang, He Zhen, et al. Paint removal experiment with pulsed Nd:YAG laser [J]. *Cleaning World*, 2007, 23(10): 2-5. (in Chinese)
田彬, 邹万芳, 何真, 等. 脉冲 Nd:YAG 激光除漆试验[J]. 清洗世界, 2007, 23(10): 2-5.
- [15] Song Feng, Liu Shujing, Niu Kongzhen, et al. Principle and application research on laser cleaning [J]. *Cleaning World*, 2005, 21(1): 1-6. (in Chinese)
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, 21(1): 1-6.
- [16] Liu Qiao, Shi Minqiu, Zhang Xin, et al. Laser cleaning and applications [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2010, 38(6): 23-26. (in Chinese)
林乔, 石敏球, 张欣, 等. 激光清洗及应用进展[J]. 广州石化, 2010, 38(6): 23-26.