

基于 FPGA 激光清洗系统的设计与实现

戴金跃, 汤发全*

江苏航空职业技术学院航空工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为实现激光在二维平面内高效、均匀烧蚀污渍、清洗靶材, 更改激光逐行烧蚀扫描模式, 设计了一种激光螺旋式填充路径, 控制振镜电机偏转激光使其在平面内的烧蚀呈网状分布。结果表明: 对于清洗区域内的任一点, 相比于逐行烧蚀, 螺旋烧蚀过程中该点区域获得冷却时间, 激光热积累效应变弱。逐行扫描速度为单个振镜电机速度, 螺旋扫描速度为两电机速度的矢量和。因此, 相比于逐行扫描方式, 激光螺旋式清洗的效果更加均匀, 效率更高。

关键词 激光光学; 激光清洗; 逐行烧蚀; 螺旋式扫描; 网状分布

中图分类号 TP273

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0402005

Design and Implementation of Laser Cleaning Control System Based on FPGA

Dai Jinyue, Tang Faquan*

College of Aeronautical Engineering, Jiangsu Aviation Technical College, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract To enable efficient and uniform ablation of stains and cleaning of targets using laser in the two-dimensional plane, a laser spiral filling path is designed by changing the laser progressive scanning mode in this study. By controlling the galvanometer motor, the laser is deflected to distribute the ablation in a network shape over the plane. At any ablation point in the laser filling field, compared with the line-by-line ablation, the results confirmed a longer cooling time and a weaker laser thermal accumulation during spiral ablation. The line-by-line scanning speed is the motor speed of a single galvanometer, whereas the spiral scanning speed is the vector speed of two motors. Therefore, the effect of laser spiral cleaning is more uniform and effective as compared with the cleaning in the line-by-line scanning mode.

Key words laser optics; laser cleaning; line-by-line ablation; spiral scanning; network distribution

OCIS codes 140.3390; 320.7080; 350.4600

1 引 言

在二维平面内, 利用激光烧蚀靶材表面的污渍, 如锈、油漆、氧化物等, 以达到清洁靶材的目的^[1], 激光清洗作为表面处理辅助工序, 被广泛应用于激光焊接、船体喷涂、磨具清洁等领域^[2-3]。目前, 二维激光清洗主要以激光打标机的填充模式作为控制依据, 逐行烧蚀靶材表面污渍。打标逐行扫描模式下, 激光在行边缘区域内经过减速到反向加速的过程, 非边缘区域激光保持高速偏转。边缘区域激光扫描的平均速度低于非边缘区域, 导致边缘区域烧蚀程度强于非边缘区域, 烧蚀区域形貌高度分布不均。同时, 激光逐行扫描速度为单个电机偏转速度, 清洗

效率低。对于激光清洗领域, 前人主要对激光工艺参数、烧蚀速度参数进行了研究, 缺少对激光清洗填充路径的深入研究^[4-6]; 螺旋式扫描路径目前主要应用于激光摆动焊接、激光螺旋打孔, 激光高速淬火等领域^[7-9]。基于此, 本文将螺旋式填充路径应用于激光清洗中, 控制激光在平面内呈网状烧蚀分布, 使得激光清洗后材料表面形貌分布更加均匀, 提高了清洗速度。

2 基本原理

2.1 螺旋填充算法

激光清洗系统的结构如图 1 所示, 波长为 1064 nm 的光纤激光通过光隔离系统、准直系统后

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-10-22; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(51175233)

* E-mail: 929351786@qq.com

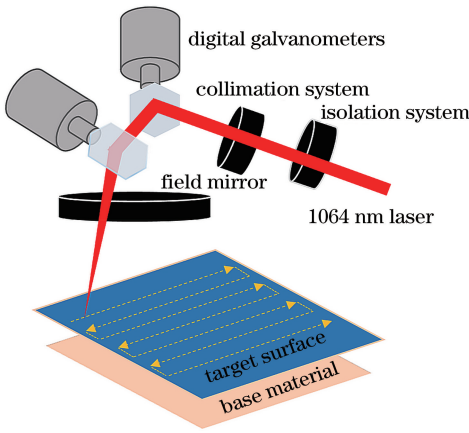


图 1 激光清洗系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of laser cleaning system

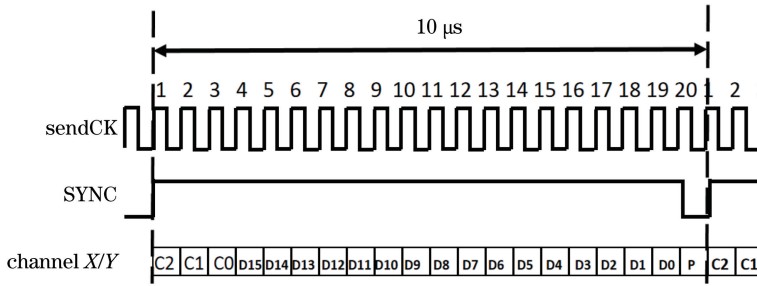


图 2 XY2-100 协议时序图

Fig. 2 Sequence diagram of XY2-100 protocol

激光清洗系统中包含两个正交偏转的数字振镜电机,两个电机在一个周期内的偏转角度变化可分别按照 \sin 函数和 \cos 函数分布进行控制,使得合成的烧蚀轨迹为椭圆。在控制 X、Y 振镜摆动过程中保持动态相位差,使合成的椭圆轨迹沿自身中心旋转直至填充整个二维平面,从而实现整个平面螺旋式扫描清洗。选择振镜电机的偏转范围为 0° 到 30° 。如图 3 所示,以 \sin 函数分布为例,对其均匀取样 128 个点,相邻点偏转时间间隔约为 $30 \mu\text{s}$ 。在振镜电机均匀偏转过程中, 15° 附近的曲线加速度大于边缘区域加速度,即在 15° 附近扫描速度快于边缘区域,使得激光区域烧蚀时间不均,致使清洗效果不好。如图 4 所示,保持相邻时间间隔一定情况下,以 15° 为中心区域进行高斯分布采样, 15° 附近点采样点数多于边缘采样点数,有利于增强清洗均匀性,对 \sin 函数按高斯取样 128 个点,振镜电机在中间角度 15° 附近停留位置点数量多于边缘区域。

基于 Visual Studio2010 开发环境,在微软基础类库 (MFC) 窗口中添加图片控件,主要利用 Windows 接口函数,如定点函数 Moveto 和绘制线

入射到数字振镜电机轴上的反射镜上,经二次反射后由场镜约束聚焦在二维平面内,用于扫描烧蚀靶材基底表面上的污渍。

清洗系统根据 XY2-100 协议,通过向数字振镜电机接口发送表征电机偏转角度的指令来控制电机转动^[10]。如图 2 所示,协议规定指令数据长度为 20 bit,具体结构为 3 bit 控制位、16 bit 数据位、1 bit 偶校验位,16 bit 数据位线性对应电机的绝对角度,即数据 0-65535 线性对应电机偏摆的绝对位置。同步序列控制 (SYNC) 信号由低电平变成高电平后,每个 sendCK 时钟上升沿发送 1 bit 指令数据,振镜电机接收 20 bit 完整指令后定位偏转。

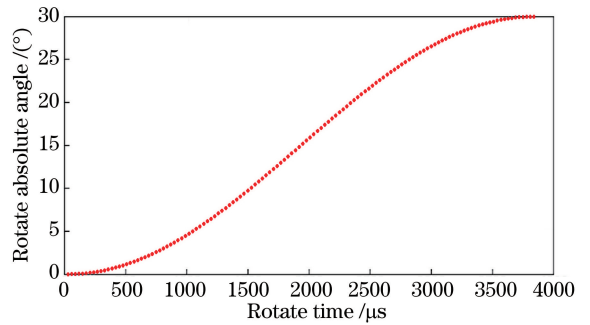


图 3 均匀取样条件下电机摆幅分布图

Fig. 3 Swing amplitude distribution of motor under uniform sampling condition

条函数 LineTo,来仿真激光扫描轨迹。对两组 128 个采样点的偏转角度数据进行归一化处理,然后存储到两个一维数组中。将数组的每个数据元分别乘以图片控件的长、宽,可获得绘图逻辑坐标。开辟绘图新线程,每隔 10 ms 绘制两组坐标单元数据,从而可仿真出动态二维扫描过程。如图 5 所示,在均匀取样情况下电机以椭圆方式进行旋转扫描进而填充二维平面,平面填充的网状分布是中间疏、边缘密;图 6 为高斯分布取样下电机扫描路径分布图,平面填充的网状分布疏密均匀。因此,本文选择高斯

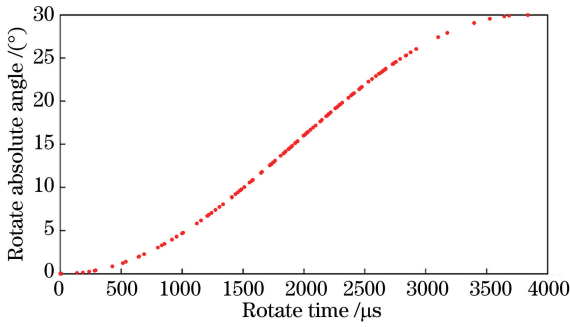


图 4 高斯取样条件下电机摆幅分布图

Fig. 4 Swing amplitude distribution under Gauss sampling condition

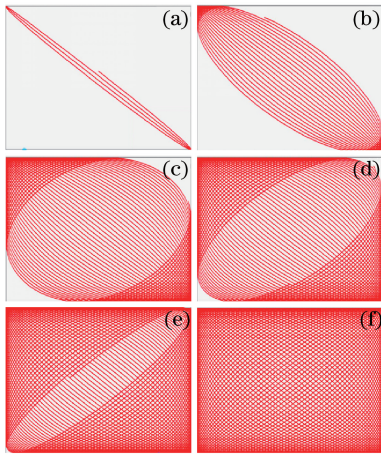


图 5 均匀取样路径仿真进度。(a) 5%;(b) 20%;
(c) 50%;(d) 75%;(e) 85%;(f) 100%

Fig. 5 Simulation progress of uniform sampling path.

(a) 5%; (b) 20%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 85%; (f) 100%

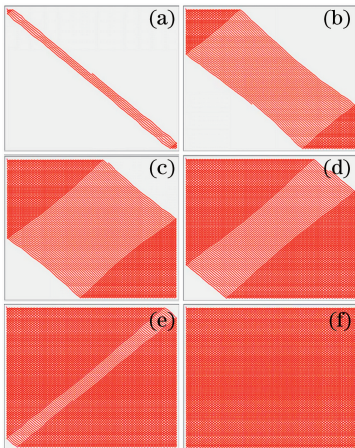


图 6 高斯取样路径仿真进度。(a) 5%;(b) 20%;
(c) 50%;(d) 75%;(e) 85%;(f) 100%

Fig. 6 Simulation progress of Gaussian sampling path.

(a) 5%; (b) 20%; (c) 50%; (d) 75%; (e) 85%; (f) 100%

取样数据用于清洗测试。

2.2 实验设计

在软件 Quartus II 11.0 编译环境中,按螺旋式

算法进行 FPGA(field programmable gate array)芯片程序编写,程序设计主要划分为三大模块:指令译码模块、算法控制模块和振镜执行模块。

指令译码模块中设计存储空间为 4 byte 的临时缓冲寄存器 r_temp_data ,模拟拓展 SPI(serial peripheral interface)通信时序接收上位机传来的 4 byte 指令。 $r_temp_data[31:24]$ 作为地址位段, $r_temp_data[23:8]$ 为数据位段, $r_temp_data[7:0]$ 为校验位段,检测当前 $r_temp_data[7:0]$ 是否等于校验码 $0x64$,如果不等则丢弃。地址位段将 $r_temp_data[23:8]$ 指令有效数据分别赋值给激光参数寄存器组和振镜参数寄存器组。

算法控制模块主要针对振镜摆动速度和摆动幅度进行控制,该模块中设计 2 组位宽为 16 bit、深度为 128 byte 的 ROM (read-only memory)存储空间,分别存储 X、Y 振镜每次偏转的螺旋角度数据,ROM 地址范围为 $0\sim 127$ 。读取 $ROM[0]$ 角度数据 ScanMirrorAmplification 并下发给振镜执行模块;再对周期为 $10\ \mu s$ 的基准时钟脉冲进行计数得到该点停留时间从而控制振镜摆动速度;停留到后,触发 ROM 地址递增 1,即读取 $ROM[1]$ 中的角度数据并下发给振镜执行模块。按照该时序,依次读取 $ROM[0]$ 到 $ROM[127]$ 数据并下发给振镜电机驱动接口,实现振镜电机对应从最小角度摆动到最大角度。为保证两个电机之间存在动态相位差,X 振镜电机对 $ROM[0]$ 到 $ROM[127]$ 地址取值,而 Y 振镜电机对 $ROM[1]$ 到 $ROM[126]$ 地址取值。

振镜执行模块内设置位宽为 20 bit 的指令寄存器 r_mirror_data ,利用接收算法控制模块传来的 ScanMirrorAmplification 角度数据,根据 XY2-100 协议对 16 bit 的角度数据进行指令封装。 $r_mirror_data[19:17]$ 置 0,将 ScanMirrorAmplification[15:0]赋值给 $r_mirror_data[16:1]$,对 $r_mirror_data[19:1]$ 相邻位进行异或运算得到 $r_mirror_data[0]$ 位。指令封装完成后,每个 sendCK 时钟上升沿发送 1 bit 的指令数据,振镜电机接收 20 bit 长的指令后发生偏转。如图 7 所示,将表征 X 轴角度的数值 136 和表征 Y 轴角度的数值 264 封装为 20 bit 长的指令,模拟 XY2-100 协议时序并发送给振镜电机信号接口。

3 分析与讨论

前人基于打标机操作模式对选中区域进行填充,填充方式为逐行扫描。将这种方案应用在激光

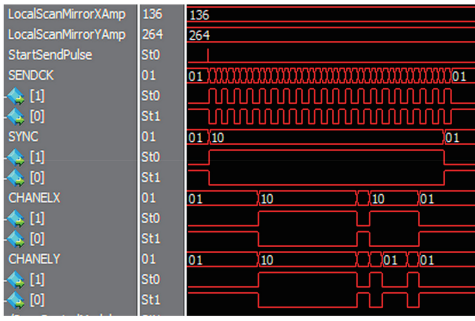


图 7 振镜偏转指令发送时序图

Fig. 7 Sequence diagram of galvanometer deflection command transmission

清洗领域时存在以下两个缺陷：

1) 逐行扫描过程中, X 振镜将激光从左偏转到右后停止偏转, Y 轴振镜电机开始偏转使激光换行, 然后再由 X 轴振镜摆动, 周而复始直至填充整个区域。逐行烧蚀过程中同一时刻仅一轴电机运动即激光偏转速度为单轴电机速度, 电机扫描速度慢直接导致清洗效率低。

2) 逐行烧蚀过程中, 在每一行的边缘区域内电机经过减速到反向加速过程, 和非边缘区域扫描过程中电机一直保持高速偏转相比, 激光热效应积累程度不同, 边缘烧蚀程度强于非边缘区域, 清洗后

边缘区域留下焦深印痕, 清洗不够均匀。

针对上述问题, 设计了一种螺旋式烧蚀路径使得 X/Y 振镜电机独立受控。螺旋烧蚀过程中, X/Y 双电机始终保持偏转, 偏转速度为两个正交电机的合成速度。振镜组的合成速度大于单个电机偏转速度, 从而可提高激光清洗效率。对于扫描区域内任一点, 尤其是边缘处, 激光经过该点后需要绕完外圈才能再次经过该点附近, 激光热积累减弱, 清洗分布均匀。本文采用波长 1064 nm、脉宽 150 ns 的光纤脉冲激光器, 激光功率为 50 W, 频率为 100 kHz, 场镜焦距为 160 mm, 振镜最大扫描速度为 5 m/s, 对幅面大小为 50 mm × 20 mm 的表面光滑的 6061 铝合金材料进行逐行烧蚀和螺旋烧蚀, 根据表面烧蚀的形貌分布对激光清洗的均匀性指标进行分析。对比逐行烧蚀 [图 8(a)] 和螺旋烧蚀 [图 8(b)] 的形貌表面可看出, 逐行烧蚀的形貌表面留下了横向分布的条段印痕, 轮廓算术平均偏差 $R_a = 6.98 \mu\text{m}$ 、均方根偏差 $R_q = 9.01 \mu\text{m}$, 大于螺旋烧蚀形貌的轮廓算术平均偏差 $R_a = 6.09 \mu\text{m}$ 、均方根偏差 $R_q = 7.93 \mu\text{m}$ 。螺旋烧蚀的形貌表面留下少数点痕迹, 烧蚀后的靶材表面高度分布也更加平整。

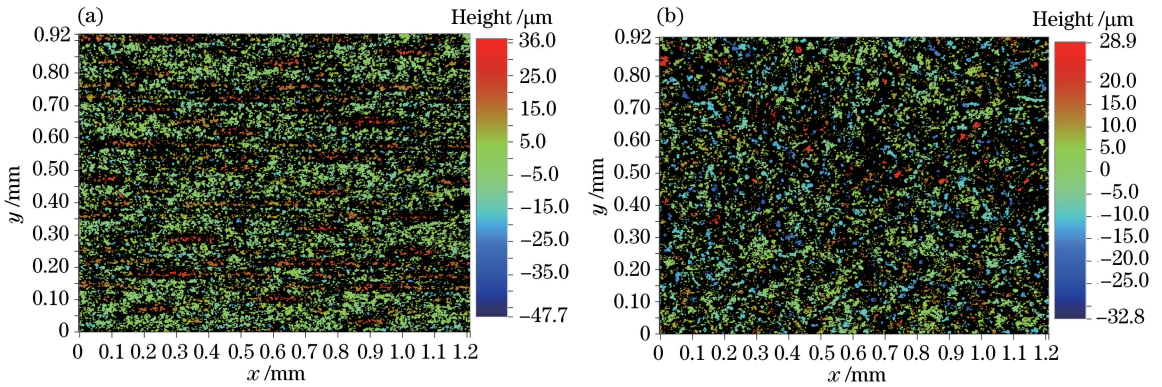


图 8 烧蚀形貌分布。(a)逐行烧蚀;(b)螺旋烧蚀

Fig. 8 Ablation morphology distributions. (a) Line-by-line ablation; (b) spiral ablation

对于边缘区域, 逐行烧蚀边缘形貌如图 9(a) 所示, 从中心到边缘, 形貌高度逐渐降低即烧蚀程度不断加深。边缘烧蚀加深在大功率清洗过程中可能会导致靶材被切割, 从而破坏靶材, 边缘处也容易产生熔渣堆积形成二次污染, 影响清洗质量; 对于图 9(b) 所示的螺旋烧蚀形貌而言, 从中心到边缘, 形貌高度逐渐上升即烧蚀程度不断变浅, 相对于中心区域边缘烧蚀程度减弱, 有利于避免切割靶材现象发生。

将表面光滑的铝合金材料更换为幅面为 20 mm × 80 mm、锈蚀厚度约为 0.5 mm 的铁板, 更

改激光功率为 60 W, 采用逐行烧蚀和螺旋烧蚀方式清洁表面, 并对清洗效率指标进行分析。逐行烧蚀过程中, 保持振镜最大扫描速度为 5 m/s 情况下, 行间距越小, 烧蚀越细腻, 整面清洁时间就越长, 锈蚀面较厚则需要整面多次重新扫描。图 10 为逐行清洗和螺旋清洗铁锈表面的效果图, 逐行清洗铁锈完成耗时 10.9 s, 螺旋清洗铁锈完成耗时 8.1 s。逐行烧蚀耗时比螺旋烧蚀耗时长, 效率低; 同时逐行烧蚀图中仍有肉眼可见的行间印痕, 清洁效果不如螺旋烧蚀。

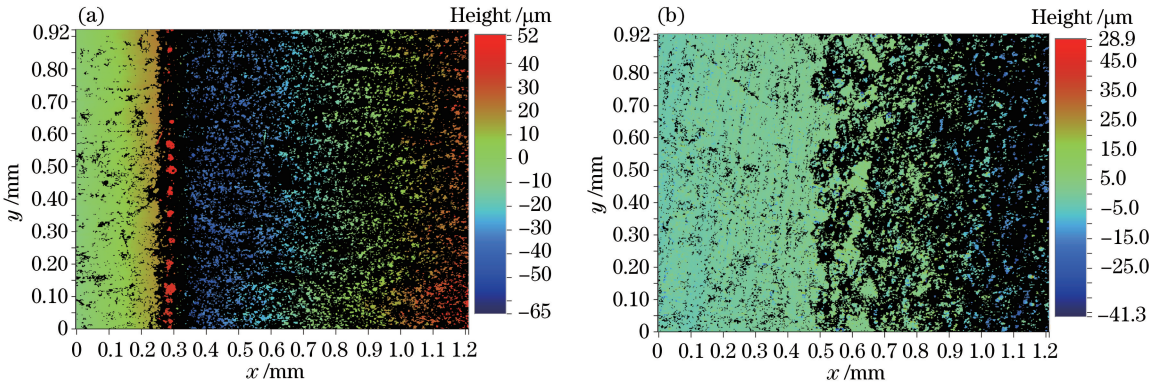


图 9 边缘烧蚀形貌分布。(a)逐行烧蚀;(b)螺旋烧蚀

Fig. 9 Edge erosion morphology distributions. (a) Line-by-line ablation; (b) spiral ablation

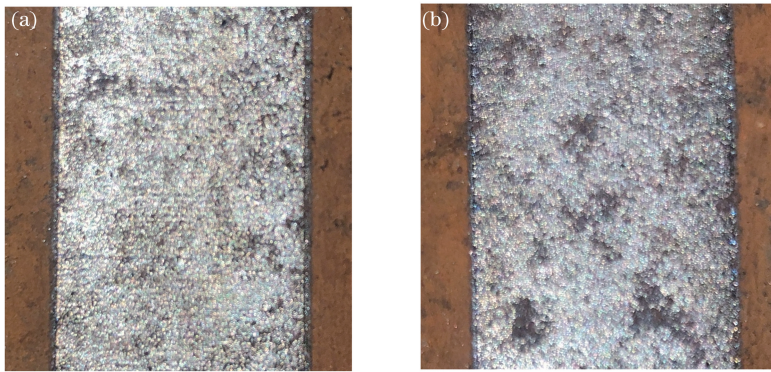


图 10 铁锈表面清洗效果图。(a)逐行烧蚀;(b)螺旋烧蚀

Fig. 10 Rust surface cleaning effects. (a) Line-by-line ablation; (b) spiral ablation

4 结 论

激光清洗是一种材料表面清洁的新技术,采用打标方式逐行烧蚀污渍的工作模式存在激光扫描效率低、清洗不均匀等问题。通过优化激光控制方案,本文设计了一种螺旋式激光填充扫描路径,能够控制双轴电机时刻偏转,从而提高激光扫描效率;螺旋状扫描路径使得某局部区域内激光的热积累减少,有利于清洗区域边缘拼接,从而获得更加均匀的靶材形貌,大幅度提高清洗效果。

参 考 文 献

[1] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030005.
雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030005.

[2] Zhang Z Y, Wang Y B, Liang H, et al. Removal of low thermal conductivity paint with high repetition rate pulse laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102009.

张志研, 王奕博, 梁浩, 等. 高重复频率脉冲激光去除低热导率涂漆 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102009.

[3] Radojković B, Ristić S, Polić S, et al. Preliminary investigation on the use of the Q-switched Nd:YAG laser to clean corrosion products on museum embroidered textiles with metallic yarns [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2017, 23: 128-137.

[4] Xia P Y, Yin Y H, Cai A J, et al. Laser cleaning process of 2219 aluminum alloy anodic oxide film before welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102005.
夏佩云, 尹玉环, 蔡爱军, 等. 2219 铝合金阳极氧化膜焊前激光清洗工艺研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102005.

[5] Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Parameters and mechanisms of laser cleaning rubber layer on a tyre mould [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(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, 27(11): 1050-1054.

[6] Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, et al. Mechanism and

- quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202005.
- 陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202005.
- [7] Tan X J, Hu Y, Guo L, et al. The effect of galvanometer spiral scanning welding of 3003 aluminum alloy on weld forming and mechanical properties[J]. Applied Laser, 2015, 35(5): 558-563.
- 谭小军, 胡玉, 郭亮, 等. 振镜螺旋扫描焊接对 3003 铝合金焊缝成形和抗拉强度的影响[J]. 应用激光, 2015, 35(5): 558-563.
- [8] Hung T P, Hsu C M, Tsai H A, et al. Temperature field numerical analysis mode and verification of quenching heat treatment using carbon steel in rotating laser scanning[J]. Materials, 2019, 12(3): 534.
- [9] Sun S F, Liao H P, Wu X H, et al. Experimental study about micro hole processing by picosecond laser [J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 234-238.
- 孙树峰, 廖惠鹏, 吴旭浩, 等. 皮秒激光旋切加工微孔试验研究[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 234-238.
- [10] Zhang R, Zhang Q E, Li Y Z. The research on high speed driving system of digital scanning mirror [J]. Applied Laser, 2013, 33(5): 551-554.
- 张荣, 张秋鄂, 李永正. 高速数字扫描振镜驱动卡设计及研究[J]. 应用激光, 2013, 33(5): 551-554.