

激光清洗轮胎模具表面橡胶层的机理 与工艺研究

王泽敏¹ 曾晓雁^{1*} 黄维玲²

(华中科技大学¹ 材料学院国家模具重点实验室,² 激光加工工程中心 武汉 430074)

提要 研究了运用脉冲激光清洗橡胶轮胎印字模具表面橡胶层的工艺参数与机理。结果表明,工艺参数适当时,脉冲激光能完全清洗模具表面而不损伤基体。激光清洗存在着清洗阈值和损伤阈值。在起始清洗阈值和完全清洗阈值之间,清洁率随着激光能量密度的升高而增大。在完全清洗阈值与损伤阈值之间,基体表面清洁率保持 100% 而且不受任何损伤。激光清洗橡胶的机理有二:一为激光产生的高温导致橡胶表层瞬间燃烧和气化;二为橡胶深层受热振动和激光脉冲的热冲击作用使铝片表面橡胶颗粒飞溅。

关键词 激光清洗, 橡胶层, 机理, 阈值, 清洁率

1 引 言

激光清洗技术是指采用高能激光束照射工件表面,使表面的颗粒、锈迹和涂层等发生瞬间蒸发与剥离,从而达到洁净化工艺过程。与传统清洗工艺相比,激光清洗技术具有以下特点:(1)它是一种“干式”清洗,不需要清洁液或其他化学溶液,且清洁度远远高于化学清洗工艺;(2)清除污物的范围和适用的基材范围十分广泛;(3)通过调控激光工艺参数,可以在不损伤基材表面的基础上,有效去除污染物,使表面复旧如新;(4)激光清洗可以方便地实现自动化操作;(5)激光去污设备可以长期使用,运行成本低;(6)激光清洗技术是一种“绿色”清洗工艺,消除的废料为固体粉末状,体积小,易于收集和存放,对环境无污染^[1]。

汽车轮胎模具底部及周边花纹每隔二至三周必须擦洗一次,整个模具几个月要彻底擦洗一次。传统方法是用玻璃珠擦洗,不但费用昂贵、噪音大,还影响模具表面质量;导致生产的轮胎等级下降,降低模具的使用寿命^[2]。同时模具不能实现在线清洗,清洗前拆卸和清洗后安装耗时很长。国外采用 YAG 激光器实现了轮胎模具的在线清洗,并已在工业中加以应用^[2],然而,其机理研究和加工工艺参数未见详细报道。我国有关这方面的研究在近几年才开始,且至今未见具体的报道。本文研究了激光清洗轮胎模具的工艺参数和去除机理,并在此基础上对较大面积清洗轮胎模具的工艺可行性作了研究。

* 通信联系人。

收稿日期: 1999-06-25; 收到修改稿日期: 1999-08-26

2 实 验

实验样品来自东风轮胎公司的轮胎印字模具片。材料为硬铝, 厚度为 1 mm, 表面因长期工作而粘满黑色的橡胶层。激光实验采用 HGM-50 Q 开关脉冲激光器, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 200 ns, 重复频率为 3.7 kHz, 聚焦后辐照到铝片表面的光斑直径大小为 0.09 mm。激光入射方向与工件表面垂直。由计算机控制激光器的工艺参数和扫描系统。大量的实验数据表明, 激光清洗的关键在于控制激光能量密度, 而受其他工艺参数的影响相对较小^[1]。因此, 本文将主要研究不同能量密度下激光清洗橡胶层的机理。实验中, 选用 300 mm/s 的扫描速度, 以直接辐射的方法, 在每一能量条件下清洗面积为 $15 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ 的方块, 以便于相互比较。激光实验装置如图 1 所示。

对清洗后的每一小方块, 采用定量金相图像分析系统测出清洁率^[3]。其中, 试样由光学显微镜成像, 通过 CCD 将光信号转化为电信号, 最后由图像采集卡及相应的软件完成采样和量化功能, 获取数字图像。将清洗干净的区域着色, 计算着色区域占整个小块的面积百分比, 即为清洁率。

将清洗小块制成单个试样, 采用 JEOL JSM-35C 型扫描电镜(SEM) 进行表面形貌分析。因为橡胶层不导电, 在用 SEM 观察前要作喷金处理。采用 CARLZEISS JENA 双管显微镜, 用光切法测量橡胶层的厚度。

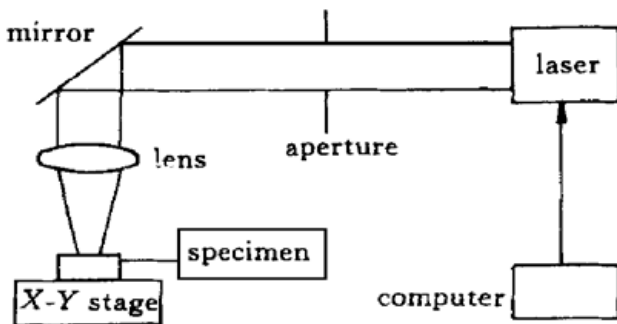


图 1 激光清洗实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cleaning system

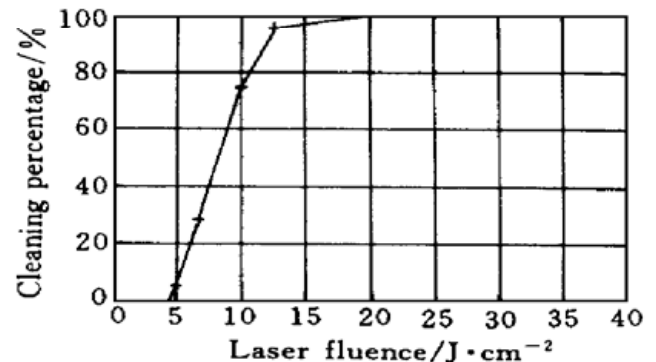


图 2 清洁率随激光能量密度的变化

Fig. 2 Effect of laser fluence on cleaning percentage of the surface

3 结果与讨论

3.1 激光工艺参数对清洁率的影响

图 2 给出了不同激光能量密度下清洁率的变化曲线。由图 2 可知, 激光能量密度在 4.42 J/cm^2 以下时, 激光对铝片表面的橡胶层无明显作用; 当激光能量密度超过 4.42 J/cm^2 时 (6.72 J/cm^2), 橡胶层表面开始出现被激光清洗掉的痕迹, 但清洁率较低, 如图 3 (a) 所示。因此, 可将 4.42 J/cm^2 定义为起始清洗阈值。不断增加激光束能量密度, 当其达到 25.1 J/cm^2 时, 实现了橡胶层的完全清洗, 清洁率达到 100%, 而且基材表面完好无损, 如图 3 (b) 所示。可将 25.1 J/cm^2 定义为完全清洗阈值。当激光能量密度进一步增加到 29.7 J/cm^2 时, 尽管实现了完全清洗, 但在光学显微镜下观察发现基体表面存在少量熔化烧蚀现象, 如图 3 (c) 所示。可将 29.7 J/cm^2 定义为损伤阈值。可见, 理想状态下激光器的能量密度应限制在完全清洗阈值和损伤阈值之间。

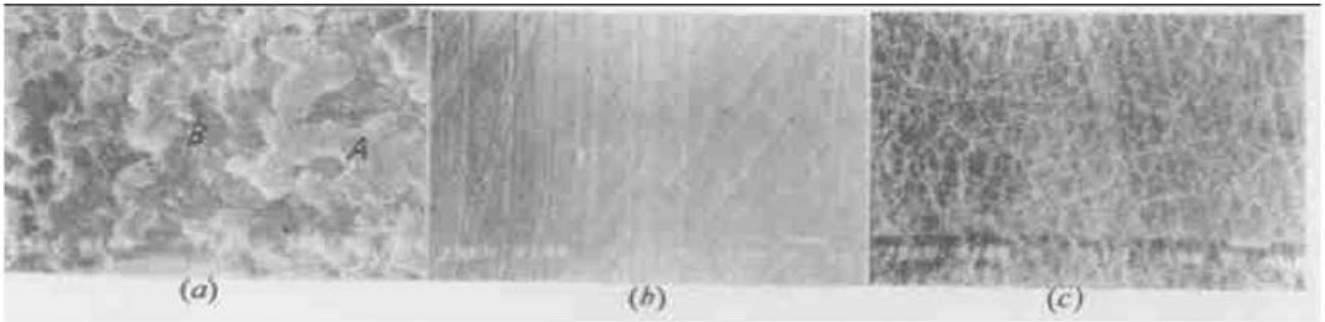


图3 不同激光能量密度条件下试样表面的清洗形貌图

Fig.3 SEM images of the cleaned surface under different laser fluence

(a) $F = 6.72 \text{ J/cm}^2$; (b) $F = 25.1 \text{ J/cm}^2$; (c) $F = 35.9 \text{ J/cm}^2$

A: unremoved rubber layer; B: substrate surface

3.2 激光清洗的机理分析

在激光辐照过程中,试样表面处有明显的烟雾、火花,散发出橡胶烧焦的气味。由于基材为铝片,表面附着物为橡胶层,它们对同一波长的激光能量的吸收系数差别很大。橡胶对激光有较大的吸收系数,而且热导率极低。当激光辐照时,激光能量大部分被表面的橡胶层所吸收,温度上升速度很快。因此,覆盖在铝片表面的橡胶层瞬间受热燃烧,发生气化挥发,产生火花和异味。

激光脉宽在纳秒级时,表面温升为^[4]

$$T_s = \frac{2F(1-R)}{K} \sqrt{\frac{2at}{\pi^3}} \quad (1)$$

式中, F 为激光能量密度, R 为表面反射率, K 为热导率, a 为热扩散率, t 为激光脉冲宽度。对于特定的材料(橡胶)来说,参数 R 、 a 和 K 是固定的。由于采用的激光器的脉冲宽度不发生变化(200 ns),因此表面温升只与激光能量密度有关。

令 T_1 表示橡胶层的气化温度, T_2 表示铝的熔点。由于 $T_2 > T_1$,为了保证只除去橡胶层而不影响基体,必须要求温升函数 T_s 满足条件: $T_1 \leq T_s \leq T_2$,结合(1)式有

$$F_1 \leq F_s \leq F_2 \quad (2)$$

F_s 为激光加热时,表面温升为 T_s 时的激光能量密度; F_1 为表面温升达到橡胶层气化温度时的激光能量密度; F_2 为表面温升达到模具片(铝)熔点时所需的激光能量密度。当 F_s 左边取等号时,就得到激光的起始清洗阈值 F_1 ;当 F_s 右边取等号时,即为激光清洗的损伤阈值 F_2 。完全清洗阈值在 F_1 与 F_2 之间,其大小与橡胶层的厚度有关。所以,当能量密度条件满足(2)式时,就可以用激光除去橡胶层而不损伤基体。

据文献[5],表面热作用深度与激光的脉宽有关: $D = \sqrt{4at}$,其中 D 表示作用深度。由于橡胶的热扩散率较低,采用的激光器脉宽为纳秒级,激光的作用深度只有几微米。而用双管显微镜测得橡胶层的实际平均厚度为 $15.9 \mu\text{m}$ 。如果激光辐照过程中表面物质不损失,热作用就不会影响橡胶深层和基体。但由于橡胶表层瞬间受热燃烧气化,橡胶层厚度减小,使得激光的热作用深度加深。所以,激光清洗过程中,橡胶表层在燃烧气化的同时,橡胶深层会由于脉冲激光的快速加热而发生急剧的热振动。而铝片受热较少,产生的热膨胀极小。因此热振动产生的力使橡胶底层有脱离基体的趋势。尽管橡胶层的线性膨胀幅度非常小($\sim 10^{-8} \text{ m}$),但激光作用的

时间极短,产生的热冲击力很大^[6],能使部分橡胶块克服基体的表面吸附力,发生飞溅而脱离基体,从而实现清洗。在实验过程中我们观察到大量松散的橡胶颗粒随挥发性气流高速飞离铝片表面,证明了这一机理的确存在。

4 实际应用的工艺可行性探讨

由 3.1 节的工艺参数研究可知:当激光能量密度为 25.1 J/cm^2 时,清洁率达到 100% 而且基体表面未受任何损伤。在该能量密度下,用 300 mm/s 的扫描速度(其他工艺条件不变),对轮胎印字模具片和轮胎模具进行较大面积的清洗。

从图 4 和图 5 可以发现,实验所用的激光清洗工艺参数具有可重复性,能实现两类模具的完全清洗,而且模具表面未产生任何损伤。对轮胎印字模具片进行清洗时,扫描道之间的搭接量为 0.05 mm 。在 300 mm/s 的扫描速度下清洗面积为 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的长方形区域(沿长度方向扫描),时间为 40 s 。如果在工业中采用激光清洗模具,可以加大激光能量密度,提高激光扫描速度,减少扫描道之间的搭接量,以及采用长聚焦镜头以进一步提高清洗效率。对印字模具片,采用 71.2 J/cm^2 的能量密度, 600 mm/s 的扫描速度,其他工艺条件不变,同样可以得到图 4 所示的清洗效果,但花费的时间降为 20 s 。从上面的分析可知,激光清洗在工业生产中有广阔的应用前景。



图 4 印字模具片的清洗形貌图

Fig. 4 Surface photograph of cleaned wording mould sliver

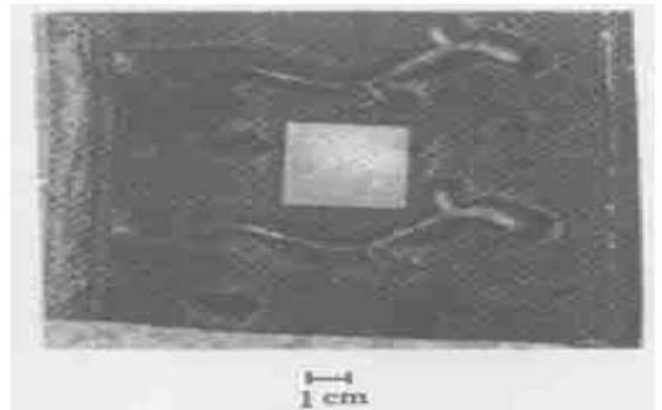


图 5 轮胎模具的清洗形貌图

Fig. 5 Surface photograph of cleaned tyre mould

参 考 文 献

- 1 Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. State and prospect of the art for laser cleaning. *Laser Technology* (激光技术), in press (in Chinese)
- 2 Lou Qihong. Laser cleaning mould of tyre. *Laser & Optonics Progress* (激光与光电子学进展), 1997, (12): 41 (in Chinese)
- 3 Yao Bo. Laser surface strengthening image analysis system. Master Degree Paper of Huazhong University of Science and Technology (in Chinese)
- 4 H. H. Pbihanu. *Laser Processing on Material*. Translated by Wang Shaoshui. Beijing: Science Press, 1980 (in Chinese)
- 5 John F. Ready. Material processing—An overview. *Proc. IEEE*, 1982, 70(6): 533~ 543
- 6 Hee K. Park, Cosfas P.. Practical excimer laser-assisted cleaning of solid surface. *SPIE*, 1995, 2498: 22 ~ 31

Parameters and Mechanisms of Laser Cleaning Rubber Layer on a Tyre Mould

Wang Zemin¹ Zeng Xiaoyan¹ Huang Weiling²

(¹School of Material Science and Engineering, State Key Laboratory of Die and Mould, ²State Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract This report presented a detailed study on parameters and mechanisms of cleaning rubber layer from a tyre wording mould with pulse laser. The results demonstrated that pulse laser can remove rubber layer completely under proper parameters. There exist cleaning threshold and damage threshold in laser cleaning. Between the initial cleaning threshold and complete cleaning threshold, cleaning percentage of the surface increases with the increasing of laser fluence. When the laser fluences are between complete cleaning threshold and damage threshold, cleaning percentage keeps up 100% and no damage is found on substrate surface. Two mechanisms for laser cleaning rubber layer are suggested: one is the combustion and vaporation of upper rubber layer resulted by high temperature of laser beam, the other is the vibration of deep rubber layer as well as thermal shock action by laser pulse to make rubber particles sputter.

Key words laser cleaning, rubber layer, mechanism, threshold, cleaning percentage