

文章编号: 1001-3806(2016)03-0422-04

连续 CO₂ 激光在线膏药群孔加工系统的研究

吴超杰, 陈培锋*, 王 英, 夏兵兵

(华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

摘要: 激光扫描打孔系统具有结构简单可靠、打孔效率高、质量好等优势, 广泛用于非金属薄型材料(如纸张、皮革、膏药)加工以增强其透气度及防伪性能。为了解决现有激光打孔设备价格昂贵、加工效率低等问题, 采用嵌入式控制系统与振镜扫描, 设计了一套基于连续 CO₂ 激光器的在线膏药打孔设备。该膏药打孔设备在生产线上 2m/min ~ 12m/min 的运行速率范围, 可实现通孔直径 0.2mm ~ 1.2mm、孔群间距 4mm ~ 10mm 的调节功能。结果表明, 该实验对膏药群孔加工效率的提高和激光打孔设备的推广是有帮助的。

关键词: 激光技术; 膏药打孔; 在线调制; 振镜

中图分类号: TP271; TN249

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.026

Study on online plaster perforation systems based on continuous wave CO₂ laser

WU Chaojie, CHEN Peifeng, WANG Ying, XIA Bingbing

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Laser scanning and perforating systems have advantages of simple and reliable controlling structure, high perforation efficiency and good quality. Perforation systems have been widely used to perforate thin material such as paper, leather and plaster to improve the permeability and discourage the counterfeit. In order to solve the problem of expensive cost and low efficiency of the existing laser perforating equipment, an online plaster perforation system was proposed based on continuous wave CO₂ laser, embedded control system and galvanometer scanning. The experiment results show that the system can adjust hole diameter from 0.2mm to 1.2mm and space between holes in the range of 4mm ~ 10mm at online speed of 2m/min ~ 12m/min. This experiment is useful to improve the efficiency of plaster laser perforation processing and expand the market of laser drilling equipment.

Key words: laser technique; plaster perforation; online modulation; galvanometer

引 言

橡胶膏剂作为皮下吸收的主导剂型产品之一, 可以在保证疗效的同时将药品的副作用降到最低, 因此具有广阔的前景。但传统橡胶膏剂由于透气性差, 会给患者带来皮肤红肿、瘙痒、溃烂等副作用。针对这一问题, 现在普遍采用机械接触式冲孔打孔等方法^[1]增加了产品透气性, 为橡胶膏剂产品的发展起到了较好的促进作用。但机械冲孔存在设备易磨损、产品收率低、产品损耗大等缺点。

采用激光打孔可以很好地克服机械冲孔的这些缺点^[1-2]。但以前的激光打孔需要采用可以快速开启和关断的射频激励的 CO₂ 激光器, 设备造价高, 很难推广。本文中采用连续 CO₂ 激光器作为光源, 通过单片

机控制, 研制出一套基于连续 CO₂ 激光器的在线膏药群孔加工系统, 实现了实时、可靠、灵活的膏药加工。

1 激光打孔原理

激光打孔是利用激光高功率密度和高空间相干特性, 作用于被加工器件, 使材料升温到一定温度, 汽化成孔^[3]。采用连续激光打孔, 一方面需要保证激光器具有足够的功率和作用时间, 完成打孔要求; 同时要保证在从一个孔位置转移到另一个孔位置的过程中, 激光不能烧蚀橡胶膏剂表面。

均匀高功率激光照射到半无限平板表面产生的温度 T_0 为:

$$T_0 = \frac{2P_0}{\pi a^2} \frac{\sqrt{kT_u}}{\kappa} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (1)$$

式中, P_0 为材料表面吸收激光辐射功率 (W), k 为材料热扩散率 (cm^2/s), κ 为材料热导率 ($\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$), a 为激光光斑半径, T_u 为激光脉冲持续时间。

发散角为 θ_0 的单模高斯光束再通过焦距为 f 的

作者简介: 吴超杰 (1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光加工及光电检测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: pfchen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2015-03-06; 收到修改稿日期: 2015-04-30

透镜后聚焦光斑半径 a 为:

$$a = f\theta_0 \quad (2)$$

代入(1)式得:

$$T_0 = \frac{2P_0}{\pi(f\theta_0)^2} \frac{\sqrt{kT_u}}{K} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (3)$$

由(3)式可得,对于一定材料,为实现高速打孔,需要提高激光功率 P_0 。但采用连续激光打孔时,一方面要保证激光打孔位置时, T_0 达到膏剂的汽化温度,同时又要保证在激光光束从一个孔位置转移到另一个孔位置时, T_0 低于膏剂的熔化温度。当激光光束从一个孔位置转移到另一个孔位置的扫描速率一定时,单纯增加激光功率就可能引起膏剂表面的烧蚀。为此一方面需要提高激光扫描速率,同时确定合适的激光功率非常重要。

2 激光打孔系统设计

2.1 激光打孔系统需求分析

通过对膏药打孔企业的调研和分析,结合嵌入式控制系统特点,群孔加工系统应具备以下功能:(1)人机交互界面。用户能通过友好的操作界面进行群孔孔型阵列设置、系统工作模式选择、启停控制及运行状态显示;(2)实时性。需要直接嵌入运行速率 2m/min ~ 10m/min 的膏药生产线,在不改变生产线运行的情况下打出行列整齐的矩形阵列孔,要求系统采集生产线运行速度信息并计算光路偏转信号,因此需要采用中断控制的嵌入式系统以提高其中断相应和计算速度;(3)参量设置。包括打孔过程中孔型、工作范围及间距、激光器功率及光学系统原点等参量,需由用户通过控制界面输入并存储;(4)工作状态警示。对包括激光器、辅助系统、光学系统等设备的监控,使用户了解各系统工作状态;(5)成本控制。要求采用低成本激光系统,并采用嵌入式控制系统,在使控制系统小型化的同时大大降低系统加工及运行成本^[4-5]。

根据连续激光打孔原理,考虑上述设备需求,系统包括中央控制单元、连续 CO₂ 激光器、振镜扫描系统和辅助系统。中央控制单元采用以单片机为核心的嵌入式控制系统,利用单片机中断实现速度采集与振镜控制,中断响应为纳秒量级。控制系统通过光电编码器采集膏药生产线实时运行速度信号,计算振镜偏转角度,并输出给振镜偏转系统,共同组成一个闭环自动控制系统,以保证矩形阵列孔分布整齐^[6]。单个振镜扫描系统工作范围 100mm,因此整套设备采用 9 个振镜扫描系统并联使用,辅以水冷、排烟等辅助系统^[7]。

系统总体设计框图如图 1 所示。

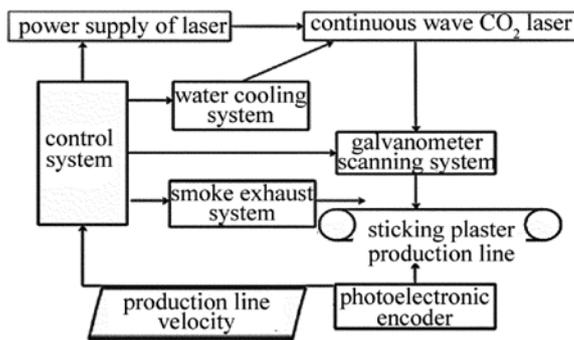


Fig. 1 Structure diagram of the perforating system

2.2 激光光源

波长为 10.6μm 的 CO₂ 激光器常用于非金属材料打孔设备,实验测定膏药材料对 CO₂ 激光吸收率在 95% 以上^[8-9]。由激光打孔原理分析可知,膏药打孔过程中激光功率的选择及作用时间控制是进行激光群孔加工的两个重要因素,为了确定连续 CO₂ 激光与膏药相互作用效果,采用 100W 连续 CO₂ 激光器,光斑直径 $\Phi = 0.2\text{mm}$,作用于膏药表面进行打孔实验,实验结果如表 1 所示。

Table 1 Effect of laser perforation (100W continuous wave CO₂ laser)

duration/ms	<0.12	0.3	0.7	0.9	1.2
effect	no obvious phenomenon	ointment brown	ointment perforated	cloth cover perforated	via hole

在采用激光冲孔方式制孔时,制孔周期 T 是打孔位置悬停时间 t_1 和光束偏转机构空走时间 t_2 之和。通过上述实验可以看出,当激光功率 100W 时,在光束偏转系统能够满足 $t_1 > 1.2\text{ms}$ 且 $t_2 < 0.12\text{ms}$ 情况下,连续 CO₂ 激光器作用于膏药表面效果与脉冲激光相同,一方面可以保证激光器具有足够的功率和作用时间完成打孔要求;同时又可以保证光束从一个孔位置转移到另一个孔位置时,橡胶膏剂表面不被烧蚀。

2.3 光束扫描系统

激光打孔设备中光束扫描通常采用旋转多棱镜或振镜扫描变换方式。为了简化系统光路,提升打孔速率与质量,采用振镜扫描方式进行连续激光光束变换。振镜扫描系统由垂直放置的两个振镜及 $f-\theta$ 透镜组成。振镜由反射镜、扫描电机和伺服电路组成,反射镜固定于扫描电机轴上,由扫描电机控制其偏转角度;扫描电机是一种冲击式有限转动伺服电机,内部集成了一套电容式转角位置传感器,保证偏转角度准确性;伺服电路接收控制系统输出的位置电压信号,驱动扫描电机转到指定转角位置^[10]。

在膏药生产线速率一定时,制孔周期 T 一定。为使激光光束有足够长的作用时间烧穿膏药,同时足够的进动速度防止孔型拉长及拖尾,振镜扫描系统小步

长阶跃时间 t_s 要尽可能小^[11]。

直径为 D 的 CO_2 激光光束 (波长为 λ) 通过焦距为 f 的平场透镜后的聚焦光斑直径为:

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (4)$$

若振镜偏转角度为 φ , 则膏药平面光斑移动距离 $\Delta s = 2f\varphi$, 单台振镜扫描幅面为 L 时, 要求每台振镜最大扫描角度 $\alpha \geq L/(2f)$ ^[12]。

振镜小步长阶跃位移定义为 $s = L/100$, 为保证橡胶膏剂表面不被烧蚀, 则要求振镜小步长阶跃响应时间 $t_s \leq 0.12s/d$, 即:

$$t_s \leq 0.09 \frac{LD}{f} \quad (5)$$

2.4 动态跟随制孔原理

为了保证矩形群孔阵列整齐, 聚焦激光光斑需要随膏药生产线同步运动, 实现动态打孔。本系统采用光电编码器采集膏药生产线运动产生的位移^[13-14]。光电编码器由光源、转盘、光电接收器等组成, 可以将转动轴上的位移信号转换为电脉冲, 通过对脉冲信号的计数, 可以获得生产线运行速度信息。每个点中断时间为:

$$T = \frac{N_e W^2}{\pi D_w N_T L} T_c \quad (6)$$

式中, N_e 为编码器分辨率, W 为矩形阵列孔间距, D_w 为编码器转盘直径, N_T 为控制系统周期计数脉冲数, T_c 为计数周期。

一个打孔周期内, 设初始位置坐标为 (x_0, y_0) , 偏转后坐标 (x_n, y_n) , 则加入动态校正量后光束偏转坐标可以表示为:

$$\begin{cases} x_n = \begin{cases} x_0 + nW, & (0 \leq n \leq \frac{L}{W}, n \text{ 为整数}) \\ x_0 + 2L - (n-1)W, & (\frac{L}{W} < n \leq \frac{2L}{W} + 1) \end{cases} \\ y_n = \begin{cases} y_0 + n \frac{W^2}{L} + \sum_{m=0}^n \Delta s_m, & (0 \leq n \leq \frac{L}{W}, n \text{ 为整数}) \\ y_0 - W + (n-1) \frac{W^2}{L} + \sum_{m=0}^n \Delta s_m, & (\frac{L}{W} < n \leq \frac{2L}{W} + 1) \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中, y 为生产线运动方向, x 为垂直生产线运动方向, Δs_m 为生产线位移。

2.5 嵌入式系统设计

2.5.1 硬件设计 嵌入式硬件系统包括核心微控单元、生产线速度采集、人机交互、生产控制等模块^[15]。核心微控单元负责采集光电编码器反馈的生产线速率脉冲信号, 计算生产线速率, 计算并控制振镜偏转以及

外部设备启停控制。为了提高打孔速率, 要求核心控制单元有极快的中断响应速度及计算能力。本系统核心微控单元采用 ARM Cortex-M 内核的高性能、低成本、低功耗的增强型 STM32 嵌入式微控芯片, 最高工作频率可达 72MHz, 中断响应时间为纳秒量级; 运算能力强大, 支持单周期乘法及硬件除法; 支持 43 个可屏蔽中断通道, 支持大量模拟和数字外设中断控制器; 同时采用中断驱动系统有效地减少了微控制单元干涉, 提高了系统执行效率。为了实现个性化加工操作和生产状态监控功能, 采用触控液晶显示屏作为用户输入与显示接口, 用户可通过模拟键盘实现生产数据设置及设备运行状态监控等交互功能。其硬件结构如图 2 所示。

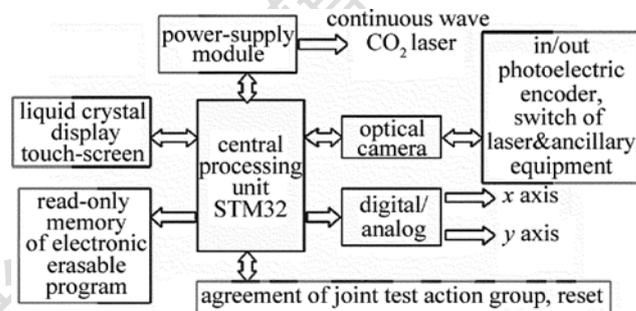


Fig. 2 Hardware structure diagram of the controlling system

2.5.2 软件设计 根据打孔系统功能需求, 软件设计包括主程序和中断子程序。系统主程序完成系统外围设备寄存器初始化、用户界面显示和数据通信等功能。核心打孔功能由中断子程序实现, 外部计数器完成闭环反馈计算功能, 一方面保证了系统实时性要求, 另一方面提高了软件抗干扰能力。软件流程图如图 3 所示。

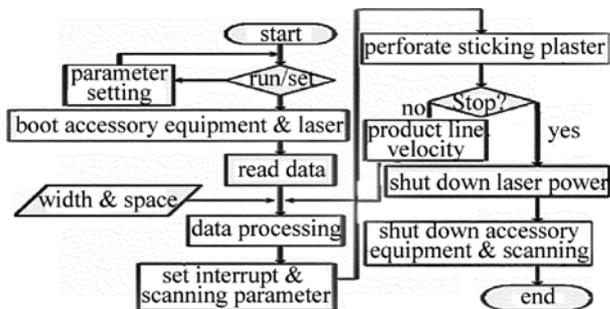


Fig. 3 Flow chart of the control software

2.6 辅助系统

CO_2 激光输出的模式及功率的稳定度直接影响膏药打孔效果, 为了保证 CO_2 激光管工作稳定, 在系统运行过程中需要利用冷却设备对 CO_2 激光管进行冷却以提供稳定的温度环境。根据 CO_2 激光管工作指标, 采用 7.2kW 制冷量的冷水机, 温度控制在 $25^\circ C \sim 30^\circ C$ 范围内, 流量 33.4L/min, 对 CO_2 激光管阵列进行

冷却。

由于激光打孔是利用激光高功率密度和高空间相干性的特点将被作用材料汽化成孔,生产过程中会产生少量的烟尘,为防止烟尘污染光束扫描系统聚焦透镜,设计采用2kW抽风机对900mm宽幅膏药生产线进行排烟。

3 实验结果与分析

将上述激光打孔系统并联,可以实现宽幅膏药在线打孔,根据膏药生产线特点设计支架,直接在生产线上插入激光打孔设备,在涂膏工艺中同时实现激光打孔,提高了打孔膏药产品生产效率。

利用激光在线打孔设备进行孔群加工,在膏药幅面宽度900mm、速率10m/min的生产线上进行间距6mm、孔径0.30mm时的打孔效果如图4所示。

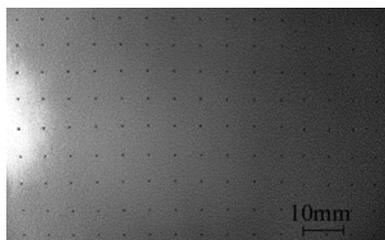


Fig. 4 The final result of plaster perforation

从效果图中可以看出,膏药孔群行列整齐,孔型大小、疏密一致,产品整洁美观,达到了预期的效果。

4 结论

在理论分析的基础上成功开发出了一套基于连续CO₂激光器的嵌入式膏药打孔设备,实现了灵活高效的动态打孔效果,该设备同时可以应用于皮革、纸张等薄型材料群孔加工,有良好的市场应用前景。

参 考 文 献

[1] ZHAO X M, WANG S L, YANG H, *et al.* Study on dynamic laser

drilling for sticking plaster [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 308-310 (in Chinese).

- [2] WANG X D, ZHAO X M. Study on dynamic and high speed laser drilling system [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 563-566 (in Chinese).
- [3] ZHENG Q G, GU J H. *Laser interaction with matter* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1998:46-59 (in Chinese).
- [4] LUO X, WANG Y, CHEN P F, *et al.* Investigation of CO₂ laser beam modulation by rotating polygon[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(1):132-136.
- [5] SONG Q G. Design and implementation of a laser marking control system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 5-13 (in Chinese).
- [6] HAN Y X, CHEN P F, ZHOU Zh Y, *et al.* Laser perforating technology of tipping paper [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(5):330-333 (in Chinese).
- [7] CHEN P F, LIU Z X, XIA B B. Laser perforation system of thin material: China, 201220466984.9 [P]. 2012-09-17 (in Chinese).
- [8] XIA L L, CHEN P F, WANG Y, *et al.* Investigation of flexible perforation of thin materials using a continuous-wave CO₂ laser[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 44(1):1641-1645.
- [9] ZHAO X M, HE Y G, WANG S L, *et al.* Laser drilling on plaster [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(1): 81-82 (in Chinese).
- [10] FENG J. Research on digital galvanometer control system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2012: 9-22 (in Chinese).
- [11] KATO M, ARAKI N, ISAJI K, *et al.* Concurrent in-line inspection system for CO₂ laser drilling machine [J]. *Proceedings of the SPIE*, 1999, 3618: 269-275.
- [12] XU L L. The design of scanning control system based on 2-D laser galvanometer [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 7-9 (in Chinese).
- [13] CHEN P F, ZHOU L, ZHU M Z, *et al.* Study on optical system for high speed laser drilling[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1):12-14 (in Chinese).
- [14] FAN Y X, ZHAO X M, WANG X D, *et al.* Research for a new drilling multi-holes on the thin metalloid material system [J]. *Applied Laser*, 2004, 26(4): 393-395 (in Chinese).
- [15] SONG Z M. Design of laser marking control software based on embedded system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010: 5-12 (in Chinese).