

文章编号: 0258-7025(2008)08-1277-04

# 基于声波控制激光焦点的打孔系统

王 萌<sup>1</sup> 刘铁根<sup>1</sup> 许宝忠<sup>1</sup> 张国顺<sup>2</sup> 禹东赫<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072; <sup>2</sup> 天津市力能激光技术有限公司, 天津 300072)

**摘要** 激光焦点的位置控制是激光打孔中需要解决的技术问题之一, 在现有的几种激光焦点控制方法中, 其技术核心均为如何通过传感器进行有效的信号测量。对于不同材料的激光打孔技术, 研制一种适合材料的焦点位置监测系统就显得尤为重要。通过对不同方法的比较和试验, 阐述了一种基于声波传感器的激光打孔焦点控制系统, 系统通过加工过程中产生的声波作为控制信号, 实时对激光焦点位置进行在线的监测和控制, 通过对金刚石进行激光打孔试验, 并对比传统控制方法, 得到了满意的结果。

**关键词** 激光技术; 激光打孔; 焦点控制; 声波传感器

**中图分类号** TN 249; TG 665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1277

## Sound Controlled Focus System for Laser Drilling System

Wang Meng<sup>1</sup> Liu Tiegen<sup>1</sup> Xu Baozhong<sup>1</sup> Zhang Guoshun<sup>2</sup> Yu Donghe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, Ministry of Education,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup>Tianjin High Power Laser Technology Limited Company, Tianjin 300072, China

**Abstract** Measurement and control of the laser beam focus remain to be solved as a technique for laser drilling. There have been developed many methods for laser focus control, where transducers for monitoring focus are key technologies. So the development of focus control system fitted to materials and processing schedule is very important. The sound transducer based laser focus control system is proposed, which uses aural sound as a control parameter, and measures and controls laser focus in real time on line. Through testing the technology in diamond laser drilling system and comparing it with traditional laser control, we get a satisfying result.

**Key words** laser technique; laser drilling; focus control; acoustic sensor

## 1 引 言

激光在加工直径小、厚度薄的过孔时, 由于存在一定的焦长束腰, 可以将焦点位置固定, 通过单脉冲或多脉冲的激光进行打孔, 这种方法称为复制法<sup>[1]</sup>。但对于一些直径大、厚度大而传统手段又无法加工的零件, 在激光打孔时就需要通过轮廓迂回法才能完成。例如在 6 mm 厚的金刚石上加工直径 2 mm 的孔, 就需要在金刚石高速旋转的同时, 将激光焦点沿旋转半径方向往返运动以完成加工, 为了节省时间并获得较好的打孔效果, 则必须保证激光的最大功率密度始终作用于金刚石的表面<sup>[2]</sup>。但在加工过程

中, 随着打孔深度的增加, 表面材料不断气化, 激光焦点和被加工材料之间的距离不断加大, 功率密度逐渐减少, 打孔速度变慢, 质量随之下降。因此需要在打孔过程中实时监控激光焦点和工件间的相对位置变化情况, 使其始终作用于被加工材料表面。

传统的激光加工中, 焦点位置的控制方法通常有三种: 电容式传感器法、光学法和接触式法。由于传感器本身的限制, 每种方法都只能在一定的领域发挥作用。例如电容式非接触传感器主要应用于金属的三维激光加工, 而光学法则大部分使用在小功率的激光精密加工领域<sup>[3,4]</sup>。其他一些开环的焦点

收稿日期: 2007-11-26; 收到修改稿日期: 2008-01-08

作者简介: 王 萌(1980—)男, 天津人, 硕士研究生, 主要从事激光加工应用技术方面的研究。

E-mail: wangmeng\_tju@126.com

导师简介: 张国顺(1938—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 目前主要从事激光加工应用技术方面的研究。

E-mail: zhanggsh@vip.sina.com

控制方法大部分则凭借经验,按照预定的焦点移动路径进行控制,往往不够准确,尤其当被加工个体间存在差异时<sup>[5]</sup>。

针对传统监控方法的不足,提出了一种基于声波传感器的新型激光焦点实时监控方法。

## 2 基于声波传感器的激光焦点位置检测

激光打孔时一般会产生三种信号,即红外信号、可被人耳听到的声波信号以及人耳无法捕捉的超声波信号<sup>[2]</sup>。红外信号主要是被加工材料对激光的反射,声波信号则是在激光与被加工材料相互作用时产生的。把检测到的声波信号进行傅里叶变换,可以得到一个谐振频率,此频率随加工孔径的增加而减小,通过测量声音信号可以获得加工过程的信息。超声波信号则是由于激光照射到被加工材料表面时,产生一定的反射波,反射波作用于聚焦、反射等光学镜片时而产生的<sup>[6]</sup>。随着打孔过程的进行反射波的强度也随之改变,因此可以通过超声波信号来检测打孔过程的变化情况。但在这种方案中,为了获取较强的超声波信号,传感器必须和镜片接触进行测量和采样,实际操作存在一定的困难和不便<sup>[7]</sup>。因此分别采用声波传感器和红外波传感器的方案对激光焦点进行检测试验,对两种方法进行比较、筛选,图1为对比实验中传感器的位置照片。

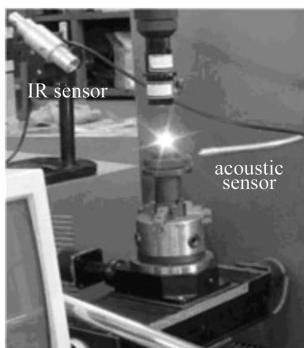


图1 传感器位置照片

Fig. 1 Picture of sensor position

监控激光焦点技术中的关键问题是找到打孔过程中检测信号和加工过程的对应关系,以此作为控制的基础,结合数控系统对激光焦点进行实时调整。因此红外波和声波在整个加工过程中是否存在一定的变化规律就成了整个试验的重点。

红外波的检测采用 Ge-PIN 红外线光电传感器,其入射窗口正对加工位置,用以接收辐射。图2

是金刚石打孔中红外波的检测信号,由图可见整个打孔过程中红外信号的强度和频率仅存在很小的波动,并没有明显的变化。该信号频率为10 Hz,脉冲宽度为4 ms,与激光器的频率脉宽基本一致,说明该信号主要还是激光的反射信号。把该信号通过傅里叶变换,在频域内可以得到几个峰值,但其位置和形状在不同的测量过程中并无规律可寻,因此采用红外波检测技术来实时控制激光焦点的方法并不可行。

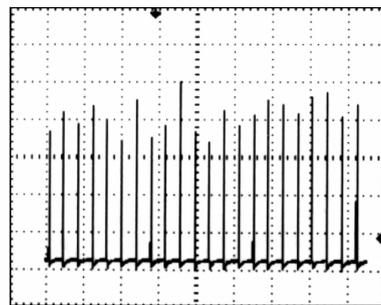


图2 红外传感器的测量信号

Fig. 2 Signal measured by infrared sensor

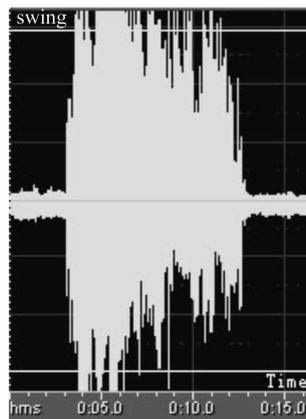


图3 声波随时间变化图

Fig. 3 Sound wave changing with time

声波的检测试验采用电容式声波传感器测量打孔时产生的声音信号,图3是对金刚石进行激光打孔时声波随时间变化图。可以看出随着打孔过程的进行,声波的振幅也逐渐减小,即声波的变化和打孔的过程存在一定的关系。

另外通过打孔的声波信号与环境噪声信号加以比较得到图4。可以看出环境噪声的强度远远小于打孔时所产生的声波信号。可以通过电路或软件的方法加以滤波,经过多次试验获得相同的结果。由此判断通过声波进行激光焦点的实时监控方案是可行的。

通过两组实验比较,决定采用声波信号进行焦

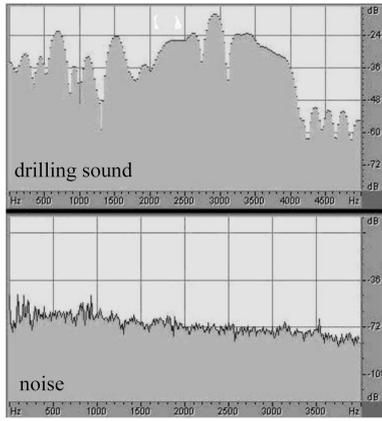


图 4 声波信号与环境噪声对比图

Fig. 4 Picture of signal-to-noise

点的监控。但在试验过程中发现声波信号较红外信号存在 3 ms 的滞后,主要是由于声波传递的速度引起的。因此在实时监控要求较高的情况下,声波检测方式存在一定的缺陷。而对于加工直径大、厚度深的工件,这个延迟可以忽略不计。

为了提取反映激光打孔过程的有效信号,需将传感器采集的声波信号通过整合、放大、带通滤波等电路进行处理,再通过计算机进行傅里叶变换,找到激光与物质作用时的谐振频率,实现激光焦点监控。

### 3 焦点控制系统

声控激光打孔系统主要由 YAG 激光器、声波传感器以及计算机控制系统组成。

激光器的输出参数和稳定性直接影响打孔的效果,普通的灯抽运脉冲 YAG 激光器峰值功率较低,因此采用超声调 Q 的方法获得高峰值、窄脉宽的激光脉冲。

声波传感器负责检测声音信号,并通过电路放大、滤波等处理后以电压的形式输入计算机。计算机利用该信号判断打孔过程的变化,并输出控制信号,驱动电机带动工作台上下移动用以调整工件和聚焦镜之间的距离,实现对焦点的实时控制,定位精度可达 0.01 mm。由于只需采集声波作为控制信号,因此对信号的方向性并没有太高的要求,这更加方便整个系统的安装与调试。

系统检测到的声波信号的振幅为

$$A(x) = A'[P(x)]P(x), \quad (1)$$

式中  $A$  为声波振幅,  $P$  为激光功率,  $x$  为焦点与实际加工面的距离。当  $x$  很小时,激光功率的变化也很小,(1) 式可以转化为

$$A(x) = A'P(x), \quad (2)$$

若不考虑激光在空气中传播的损耗,激光功率随  $x$  值的变化为

$$P(x) = P_f \left( \frac{f}{f+x} \right)^2, \quad (3)$$

式中  $f$  为焦距。应用泰勒公式近似计算,(2) 式可简化为

$$A(x) \approx A_f P_f - B \Delta x, \quad (4)$$

式中  $B$  为常数。

通过调整聚焦透镜和工件表面的初始距离,使激光聚焦于加工位置,然后发出几个激光脉冲,并将监测到的声波信号输入计算机,作为基准。但是由于加工中工件表面温度升高、激光器输出不稳定、辅助气体压力变化等原因,使得加工过程中最佳位置的声波信号仍然会和基准信号间存在一定差别。为了解决这个问题,控制系统可通过

$$\left. \frac{dA}{dx} \right|_{x=x_0} = 0, \quad (5)$$

自动找到最佳的位置。

计算机对测量数据进行微分计算,得到

$$\frac{dA(x)}{dx} \approx \frac{A(x_n) - A(x_{n-1})}{\Delta x}, \quad (6)$$

式中  $A(x_n)$  为  $n$  次移动时的声波振幅。

然后通过振幅移动平均法(该方法应用于大型电炉的温度控制系统,用以解决监测信号波动的问题),当声音信号减小为最高值的 1/3 时,沿声波振幅最大的方向移动工作台,实现激光焦点的控制。

### 4 试验结果

通过声控激光打孔,对金刚石模具进行打孔试验,结果如表 1 所示。

表 1 金刚石激光打孔试验结果

Table 1 Test result of laser drill through diamond

No.	Time /s	Diameter /mm	Error /mm
1	167	2.09	0.09
2	155	2.02	0.02
3	152	1.97	-0.03
4	161	2.08	0.08

试验是在 6 mm 厚的金刚石模具上加工直径为 2 mm 的孔,采用脉冲氙灯抽运激光器,电压为 600 V,脉冲宽度为 1.8 ms,重复频率为 30 Hz。同样条件下,采用传统的金刚石模具开环控制系统,打孔时间一般为 4 min 以上,孔径误差超过 0.2 mm。图 5 为加工直径为 2 mm 和 3 mm 的金刚石模具照片。

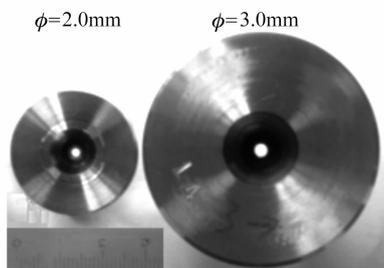


图5 金刚石激光打孔试验照片

Fig. 5 Test result picture of laser drill through diamond

## 5 结 论

声波传感器采集的信号通过计算机处理后控制电机运动,实现了激光打孔中焦点位置的在线实时监控,并成功地应用于金刚石模具的加工,和传统激光加工控制相比较,加工过程时间短、精度高。

通过试验,发现在利用声波传感器监控焦点时,还应注意以下问题:

1) 传感器的安装位置应尽量靠近工件,用以减少延时。传感器和打孔工件的距离越长,延时造成的误差越大,系统的实时性越差。

2) 打孔的精度和速度之间存在一定的矛盾,应借助试验确定一个理想的平衡点并通过计算机加以调整,使二者均可以满足生产的要求。

3) 激光打孔过程中发出的声波强弱,与辅助气体的压力存在一定的关系,气压增大时所发出的声波强度加大,频率略高,更接近爆破声,因此在整个打孔过程中辅助气体的压力应尽量保持恒定。另外,由于激光打孔中产生的声波频率和强度与未打孔时辅助气体直接作用在加工材料表面时所产生的

声波差异很大,可将后者视为环境噪声,进行滤波,降低干扰。

4) 激光焦点的控制方法不仅局限于金刚石模具的加工,对于其他适合于轮廓迂回法打孔的场合也可起到参考作用,对于复制法打孔效果如何则需要通过进一步的试验进行分析。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Guoshun. Laser Manufacturing Technology Today [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 237~260  
张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 237~260
- 2 Ye Jiaxiang, Xu Qiyang, Fu Xinyao. Detection of a sound of modulation signal in scattering laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):507~510  
叶嘉雄,徐启阳,符鑫尧. 探测受声波调制的激光漫反射回波信号[J]. 中国激光, 2007, **34**(4):507~510
- 3 Gao Zan, Jiang Wei, Zhu Kongfeng *et al.*. An auto-adaptive algorithm to auto-focusing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1474~1478  
高赞,姜威,朱孔凤等. 一种自适应的自动聚焦算法[J]. 光学学报, 2006, **26**(10):1474~1478
- 4 Zhu Kongfeng, Jiang Wei, Gao Zan *et al.*. Focusing window choice and parameters determination in automatic focusing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):836~840  
朱孔凤,姜威,高赞等. 自动聚焦系统中聚焦窗口的选择及参量的确定[J]. 光学学报, 2006, **26**(6):836~840
- 5 Wang Meng, Zhang Guoshun, Li Hefen *et al.*. New type high speed laser drilling system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(Suppl.):360~363  
王萌,张国顺,李荷芬等. 新型激光高速柔性线路板打孔系统[J]. 中国激光, 2007, **34**(增刊):360~363
- 6 Xuesheng Liu, Zhiyong Wang, Qiang Wu *et al.*. 500-W high average power, high beam quality Nd:YAG solid-state laser with one focusing reflector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):409~411
- 7 Peiquan Xu, Xinhua Tang, Ri Na *et al.*. Study on welded seam recognition using circular laser vision sensor [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6):328~331