

# 光纤激光在微喷灌塑料管上的打孔实验

赵宏亮<sup>1</sup> 翟立斌<sup>1</sup> 陈继民<sup>1</sup> 律永顺<sup>2</sup> 吕建民<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022; <sup>2</sup>阿帕奇(北京)光纤激光技术有限公司, 北京 100176)

**摘要** 农业用的塑料微喷灌管上要加工 0.3~1 mm 的小孔,传统的机械冲孔方式不能很好地满足质量要求。用激光在微喷灌管材上打孔,有对材料适应性好,加工效率高,孔口无毛刺等优点,提高了产品质量和产品种类。实验采取连续光纤激光和脉冲光纤激光对聚乙烯(Polyethylene,PE)管进行打孔,得到了激光功率与加工孔径之间的关系和能量通量与加工孔径之间的关系。最后,用连续光纤激光和脉冲光纤激光均能够加工出符合要求的孔。

**关键词** 激光技术; 激光打孔; 微喷灌管; 光纤激光; 塑料

中图分类号 TN249 文献标识码 A

## Drilling in Micro-Sprinkler Irrigation Plastic Pipeline by Fiber Laser

Zhao Hongliang<sup>1</sup> Zhai Libin<sup>1</sup> Chen Jimin<sup>1</sup> Lü Yongshun<sup>2</sup> Lü Jianmin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)  
(<sup>2</sup>*IPG (Beijing) Fiber Laser Technology Co. Ltd., Beijing 100176, China*)

**Abstract** Holes with diameter from 0.3~1 mm need to be processed in micro-sprinkler irrigation plastic pipeline for agriculture. This requirement cannot be satisfied by traditional way of using mechanical punching. Laser drilling in such pipeline not merely brings some advantages such as good suitability in material, high efficiency in production and free burr on porthole but also improves product quality and increases variety of product. The CW fiber laser and pulsed fiber laser have been employed on drilling in micro-sprinkler irrigation plastic pipeline with ingredient of PE (Polyethylene) in the experiment. The dependence between laser power and hole diameter and the dependence between fluence and hole diameter have been achieved. Finally, holes for required diameter have been made in the pipeline by using CW fiber laser and pulsed fiber laser.

**Key words** laser technique; laser drilling; micro-sprinkler irrigation pipeline; fiber laser; plastic

## 1 引 言

我国是一个农业大国,灌溉技术在农业生产中占有重要的地位。微喷灌溉是现代农业生产中节约水源,提高灌溉效率的一种技术。在微喷灌溉技术的应用中,使用到具有小孔的管材,叫微喷灌管。目前,我国的微喷灌管材的产品从质量到种类尚不能满足需求,有效改善我国微喷灌管的质量是本文研究的重点。

## 2 实验设备和方法

微喷灌管材有金属管材和塑料管材,其中塑料

管材是聚乙烯(Polyethylene,PE)等聚合物材料,塑料管材上要加工 0.3~1.0 mm 的小孔,为保证灌溉水流的均匀性,所加工的孔需要有良好的圆度和光洁度。传统的打孔方法是机械冲孔,优点有生产成本低,并且根据冲针的大小,容易调节孔径的大小。缺点是冲针需要经常更换,对材料的适应性较差,效率比较低,并且加工过的小孔边缘有许多残留的毛刺,严重影响产品的使用<sup>[1]</sup>。激光在微喷灌管材的打孔有逐步代替机械冲孔的趋势,国外的产品通常用激光打孔方法加工。

激光打孔的应用范围很广,多见应用于难加工的

**基金项目:** 国家自然科学基金(50575005)资助课题。

**作者简介:** 赵宏亮(1977—),男,河南人,硕士研究生,主要从事激光微加工方面的研究。

E-mail: sonorozhao@emails.bjut.edu.cn

**导师简介:** 陈继民(1965—),男,广东人,教授,主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: jimin@bjut.edu.cn

材料上,如宝石,金属及其合金,陶瓷等。激光打孔设备多采用固体脉冲激光器或是带 Q 开关调制的激光器,如红宝石,钕玻璃和钕铝石榴石(YAG)激光器,它具有较窄的脉宽和较高的峰值功率,易获得较好的打孔质量。打孔的理论模型也很多,但多为对金属打孔的分析和模拟,这些模型对塑料的打孔并不适合。塑料为聚合物,它具有较低的熔点和软化点,在受激光辐照的作用下,所表现的状态很特殊,会伴有解聚或碳化现象。CO<sub>2</sub> 激光器所发出 10.6 μm 的激光比 Nd:YAG 激光器发出的 1.06 μm 的激光对塑料的吸收更加容易<sup>[2]</sup>,所以,从能量利用率的角度讲,多选用 CO<sub>2</sub> 激光器对塑料进行加工。光纤激光器作为第四代激光器的代表,近年得到了非常迅速的发展。光纤激光器具有光束质量好、效率高、性能稳定、寿命长、体积小、运行费用低等显著优点<sup>[3]</sup>。本试验采取的是 IPG 公司出产的连续掺镱光纤激光器和脉冲掺镱光纤激光器,中心辐射波长分别 1065 nm 和 1070 nm,试验材料采用农田灌溉中的农用水带,强度较低,但是柔韧,其材料是低密度聚乙烯(LDPE)<sup>[4]</sup>,水带的中间包增强管材强度的加强筋,加强筋的材料为尼龙,其成分是聚酰胺(polyamide),尼龙与聚乙烯具有相似的热物理性质,农用水带的管壁厚度为 1.5 mm。

实验中,由计算机控制激光驱动电源来调制光纤激光器输出的功率和输出时间。为了保证光束聚焦后具有较小的光锥角,选用焦距为 175 mm 中等焦距的聚焦透镜,这有利于加工高深宽比的孔径<sup>[5]</sup>,在材料的底部是镂空的工作平台,试验装置图如图 1。

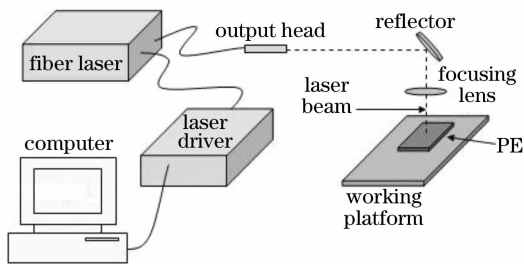


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the laser drilling system

采用不同激光器加工时,需要调整不同的工艺参量,对于连续光纤激光器,可以调节输出功率和输出时间,而对于脉冲光纤激光器,可以调节激光的抽运功率或脉冲频率来调节激光的单脉冲输出能量,结合控制脉冲的个数,达到控制总输出能量的目的。分别用这两种激光器加工,并配合不同参量,各打出 10~20 个小孔,用 OLYMPUS SZ61 体视显微镜观察并测量孔径。由于小孔具体形状并非实际的圆,

取小孔横向和纵向相垂直的两个尺寸为  $D_1$  和  $D_2$ ,并定义当量直径  $D$  为小孔的直径。

$$D = \sqrt{D_1 D_2}. \quad (1)$$

### 3 实验结果和讨论

#### 3.1 连续光纤激光的打孔

首先,用连续光纤激光加工小孔。调节激光输出功率和输出时间,取得不同大小孔径的小孔,并得到不同加工时间下激光功率和加工孔径之间的关系,如图 2 所示。

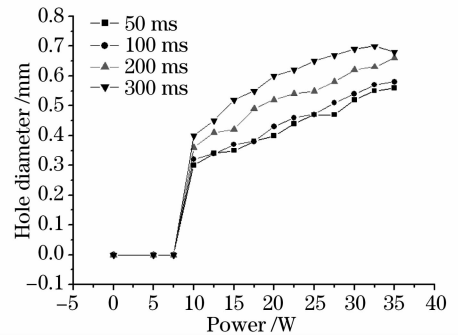


图 2 不同加工时间下功率和小孔孔径关系

Fig. 2 Relationship of laser power and hole diameter under various process time

由图 2 分析得到,塑料聚乙烯对光纤激光的气化阈值远没有金属和陶瓷的气化阈值高。随着增加激光功率和加工时间,所加工的孔径也随之增大。但激光功率较小时,即使加工时间较长,也不能够将 1.5 mm 厚的聚乙烯材料完全打穿。当激光功率增加一定量值时,采用不同的加工时间,均能够将材料打穿,通孔的孔径都在 0.3 mm 以上。提高激光功率,即激光功率密度较大时,使得加工较小孔径的孔更为容易,而使用较小的激光功率时,打穿孔所消耗的时间和能量都会相应增加。

#### 3.2 脉冲光纤激光打孔

脉冲光纤激光加工小孔时,可以调节单脉冲能量,所用的单脉冲能量最大可调到 1 mJ。由于加工深孔时常用多脉冲打孔<sup>[6]</sup>,这里采用高频脉冲控制孔形和尺寸,在实验中同时控制脉冲的个数,最后得到激光能量通量与孔径的关系曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知采用不同的单脉冲能量,所加工的孔径范围是一定的。例如,用 0.25 mJ 的单脉冲能量时,可以加工 0.2 mm 到 0.3 mm 的小孔,用 1 mJ 的单脉冲能量时能够加工 0.3 mm 到 0.6 mm 的小孔,在不同的单脉冲能量下,所加工孔径的能力有限,当能量通量达到一定值时,都存在着最大的加工

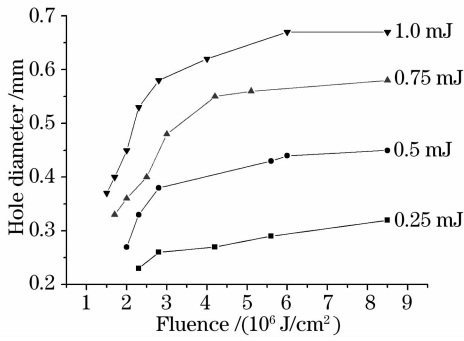


图3 不同脉冲能量下能量通量与小孔孔径的关系

Fig. 3 Relationship of fluence and hole diameter under various pulse energy

孔径。这是由于当材料被打穿后,后续能量继续扩孔至材料不能被激光束所影响的时候,孔径的变化甚微。孔径大小的极限与材料的热物理性质和对光的吸收率有关,同时,也和加工光束的特性有关。然而对于1 mJ 单脉冲来说,能够发现在能量通量变化为 $(1.5 \sim 2.7) \times 10^6 \text{ J/cm}^2$  的阶段能量利用率很高,其中孔径的变化从0.37 mm到0.6 mm。由于用最高的单脉冲能量加工的小孔也不能满足孔径为0.7 mm 以上的要求,这时需要在离焦处打孔来提高孔径的大小。当单脉冲能量减小为0.2 mJ 加工时,能够得到0.1 mm 的孔或更小的微孔,这样的微孔具有15:1以上的深宽比。但单脉冲能量过小时,并不利于孔的加工。图4 为不同参量下加工的5 个小孔的样品,孔径从0.1~1 mm。

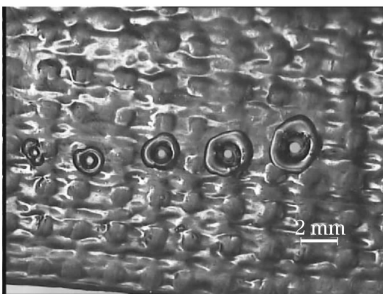


图4 具有不同孔径的小孔样品

Fig. 4 Sample with five holes identified with various diameters from 0.1~1 mm

用显微镜观察小孔的横截面和小孔孔径,知道小孔具有较小的锥度(如图5)和较好的圆度(如图6)。

聚乙烯属高分子非晶体固体,在变成液体时会变得很粘稠<sup>[7]</sup>。这也解释了连续光纤激光用较低的功率密度打不穿材料的原因。聚乙烯在激光加热熔化和蒸发后,液体遇冷重凝在孔口的边缘处,如图6 有隆起的残留物,这些物质很容易剥落,这时重凝的聚合物已经碳化。

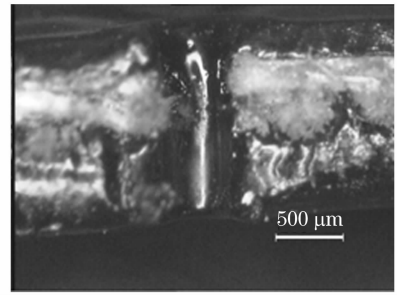


图5 小孔的剖面图

Fig. 5 Cross section of hole

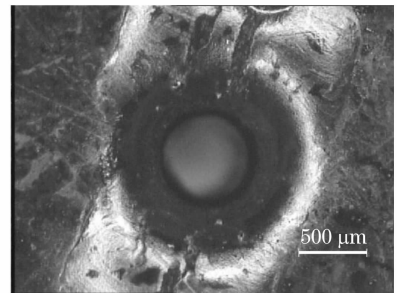


图6 小孔的孔形图

Fig. 6 Pattern of hole

同时,为了便于对比,选用超脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器(深圳大通 LASY-12)。通过类似的加工系统可在同种材料上加工出0.1~0.2 mm 的小孔,如需要打更大的孔需要离焦加工,在加工孔径大小变化的能力上不如光纤激光。

激光打孔的影响因素很多,为了能够充分反映光纤激光光束和材料作用的特性,还应在不同厚度的材料上加工,或在不同的离焦状态下加工,得到激光能量通量与孔径变化的关系。

## 4 结 论

1) 连续光纤激光器和脉冲光纤激光器都能在农用水带上加工出符合条件的微喷灌小孔。但脉冲光纤激光对小孔加工的性能更加优越,能够打出更小的孔,加工孔径的尺寸大小范围更宽广,加工性能更加优越。

2) 从对比脉冲光纤激光和超脉冲 CO<sub>2</sub> 激光对聚乙烯材料加工结果来看,脉冲光纤加工能力和能量利用率不亚于 CO<sub>2</sub> 激光。

3) 得到激光功率与加工孔径之间的关系和能量通量与加工孔径之间的关系。

致谢 感谢中国农业科学院农田灌溉研究所灌水技术研究室吴景社博士在实验中提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yongtao. The experimental study on the laser drilling machine for the thin-soft spray tape [D]. Yantai: Master Dissertation of China Agricultural University, 2003. 3~4  
王永涛. 微喷带激光打孔机的试验研究[D]. 烟台: 中国农业大学硕士论文, 2003. 3~4
- 2 D. Bimberg, W. English, H. Rottenkolber *et al.*. Laser in Industrie und Technik[M]. Lexika-Verlag, 1977. 79~80
- 3 Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 135~138  
廖健宏, 蒙红云, 王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 135~138
- 4 Zhang Yuchuan. Development of PE pipe for water supply[J]. *Plastic*, 2001, **30**(4): 9  
张玉川. 给水用聚乙烯管的发展[J]. *塑料*, 2001, **30**(4): 9
- 5 F. T. Arecchi, E. O. Schulz-DuBois. Technical Application of Laser. Six Section in Laser Handbook [M]. North-Holland, 1977. 206~207
- 6 Zhu Qiye. Laser Precise Machining[M]. Beijing: China Machine Press, 1990. 80  
朱企业. 激光精密加工[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 80
- 7 Xi Shizhifu, Wan Shanyoucheng. Structure and Physical Aspect [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1979. 141  
细矢治夫, 丸山有成. 结构与物性[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 141