

飞秒激光成丝制备毫米级深孔

张艳杰¹, 宋海英^{1*}, 刘海云¹, 刘 勋², 李 维², 刘世炳¹

¹北京工业大学激光工程研究院强场与超快光子学实验室, 北京 100124;

²中国空间技术研究院北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 利用飞秒激光成丝效应对 2 mm 厚的聚甲基丙烯酸甲酯材料在空气环境下进行打孔实验, 总结光纤长度随飞秒激光平均功率的变化, 利用扫描电子显微镜初步分析深微孔的表面形貌并测量孔径的大小, 然后分析孔径、深宽比以及锥度随激光平均功率和加工时间的变化规律。研究结果表明, 随着飞秒激光平均功率的增大, 孔径大小和锥度均有着明显的增大趋势, 且深宽比下降。随着加工时间的增加, 孔径变大, 深宽比下降, 锥度先增大后减小再增大, 但总体上呈现增大趋势。

关键词 激光技术; 飞秒激光成丝效应; 深孔锥度; 孔径; 深宽比

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402012

Fabrication of Millimeter-Scaled Holes by Femtosecond Laser Filamentation

Zhang Yanjie¹, Song Haiying¹, Liu Haiyun¹, Liu Xun², Li Wei², Liu Shibing¹

¹Strong-Field and Ultrafast Photonics Laboratory, Institute of Laser Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract By using femtosecond laser filamentation, the drilling of micro-holes in 2 mm thick polymethyl methacrylate materials in the air environment is carried out. During the experiments, the variations of the femtosecond laser filament length with average femtosecond laser power are summarized. The surface morphology and the diameter of the micro-holes are measured by scanning electron microscopy. The hole dimensions, the aspect ratio (depth to diameter) and the taper as a function of laser average power and processing time are analyzed. The results show that with the increase of the average laser power, the diameter and the taper of the holes increase obviously, while the aspect ratio decreases. With the increase of the processing time, the diameter of the holes increases, the aspect ratio decreases, and the taper of the holes increases first and then decreases and then increases, however it keeps an increasing trend in overall.

Key words laser technique; femtosecond laser filamentation; deep hole taper; hole dimensions; aspect ratio

OCIS codes 140.7090; 140.3390; 320.2250

1 引 言

随着航空航天、汽车、工程器件、生物医疗等近代工业以及科学技术的迅速发展, 强度大、硬度高、柔韧性强的复合材料得到了越来越广泛的应用^[1], 而在这些材料上加工出高质量的深微孔是目前亟待解决的问题。传统的打孔工艺远远满足不了许多高精尖产品的关键零件对深微孔加工的要求, 由于达不到其所要求的特定功能和精度, 从而大大降低了产品的性能^[2]。激光打孔技术具有精度高、可重复性强、成本低、材料消耗少

收稿日期: 2016-11-03; 收到修改稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51275012)、中国空间技术研究院创新基金项目

作者简介: 张艳杰(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事超快激光微纳技术方面的研究。E-mail: yjzhang92@163.com

导师简介: 刘世炳(1957—), 男, 博士, 教授, 主要从事强场物理、超快光谱学, 微纳技术等方面的研究。

E-mail: sbliu@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: hysong@bjut.edu.cn

等优点,在现代制造领域发挥着越来越重要的作用^[3-4]。

20世纪90年代掺钕蓝宝石飞秒激光器的问世,意味着飞秒激光开始进入工业应用领域。飞秒激光具有极高的峰值功率和超短脉冲宽度,相比于传统激光和材料相互作用时的线性效应,飞秒激光与材料相互作用时表现为强烈的非线性效应,相互作用时间极短,热效应几乎可以忽略不计,加工精度非常高,因此,飞秒激光加工技术逐渐进入了高精细加工领域^[5-10]。目前利用飞秒激光进行微孔加工主要有两种方法,分别为复制法和轮廓迂回法^[11]。复制法加工微孔,孔的形状是由光束质量决定的。若想利用复制法加工出高质量的圆孔,对光束质量的要求非常高^[12]。因此,利用复制法加工高质量的圆孔实现起来较为困难。利用迂回法进行微孔加工,受到其定位精度的限制,很难实现直径小于250 μm 的精密微孔加工^[13]。同时,利用迂回法加工微孔,其加工系统复杂,对光轴有着非常高的要求,精度难以控制^[12]。因此,迂回法的应用也受到了较大的限制。飞秒激光打孔虽然较长脉冲激光打孔有着明显的优势,但从目前已有的报道来看,飞秒激光打孔一般都局限于在一些薄层材料上加工微孔。因此,深微孔的加工方法也就成了当前打孔技术亟待解决的问题。

随着超快激光技术的快速发展,人们也逐渐开展了飞秒激光成丝这一重要的非线性光学现象的研究。飞秒激光在空气中传输时,可以产生明亮的等离子体通道,并实现远距离传输^[14-15]。进一步的研究认为,飞秒激光光束在空气中传播过程中,会导致空气折射率的非均匀变化,光斑中心区域折射率高于边缘区域折射率,形成一个类似凸透镜的区域,从而使得光束产生会聚现象,此即所谓光的克尔自聚焦过程^[16-19]。与此同时,光斑中心区域光强高于边缘区域光强,因此,光斑中心区域产生的等离子体密度也高于边缘区域等离子体密度,形成一个类似凹透镜的区域,从而使光束产生发散现象,这就是通常所说的等离子体散焦过程^[16-19]。由于克尔自聚焦效应和等离子体散焦效应同时存在,通过两者竞争最终达到动态平衡时,飞秒激光就可以在空气中形成稳定的等离子体通道。飞秒激光成丝实质上是通过光学聚焦系统,使飞秒激光在空气中传播时产生能使空气击穿(电离)的长光腰光强分布。光丝即是击穿空气时的发光线,称其为等离子体通道。利用飞秒激光成丝打孔就是利用能使空气电离的长光腰激光强度分布的光丝效应对材料进行深孔加工。

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为本文的研究对象,PMMA俗称有机玻璃或亚克力,具有较好的化学稳定性和耐候性、易加工染色、外观优美、无毒环保、良好的光透过率以及具有良好的介电和电绝缘性能等特点,是迄今为止合成透明材料中应用最广泛的材料之一,广泛用于仪器仪表零件、汽车车灯、光学镜片、透明管道等方面^[20]。因此,在PMMA材料上制备毫米级深微孔对以上相关产业的发展具有重要意义。

本文利用飞秒激光的成丝效应,对PMMA靶材进行深微孔加工。考虑到仪器仪表零件、汽车车灯、光学镜片、透明管道等领域所用到的PMMA材料厚度通常在2 mm,既满足实际应用需求,又可节约生产成本。因此,本文以2 mm厚的PMMA板作为靶材进行了深微孔加工的实验探索。实验观测并记录了小孔的孔径大小、圆度及锥度随激光平均功率以及加工时间的变化规律,以期利用飞秒激光成丝制备的毫米级深孔能够应用到实践工程领域。

2 实验原理

由于飞秒激光成丝具有较高的烧蚀强度、均匀性好且传播距离长等优点,因此,利用飞秒激光成丝技术来代替传统的聚焦打孔技术,可以大大降低孔的锥度,提高孔的表面质量。图1为传统的聚焦打孔技术[图1(a)]和飞秒激光成丝打孔技术[图1(b)]的示意图。从图中可以看出两者之间的明显差别,传统的聚焦打孔技术采用的是追踪方法,聚焦的激光点一直需要跟踪孔洞最前端点,因此会造成孔洞直壁上重凝、重堆积,表面粗糙度大,大大降低了其深宽比,采用飞秒激光成丝的方法则可以一次性成孔,避免了传统方法的缺陷。

利用飞秒激光成丝制备毫米级深孔的方法不仅相比于传统的聚焦打孔技术具有明显的优势,而且相比于有着无衍射光束之称的贝塞尔光束^[21],在打孔技术方面飞秒激光成丝也有着其独有的优势。贝塞尔光束的主要特点是其中心主瓣有很大的焦深,但贝塞尔光束中有许多的旁瓣,这些旁瓣的能量占据着一大部分能量,这使得中心主瓣的能量只占总能量的一小部分^[22-24]。贝塞尔光束若想获得较大的焦深,能量利用率会显著下降^[25]。因此,贝塞尔光束适用于小孔径且深度要求不高的孔,而飞秒激光直接成丝可以在空气中以高强度且无明显发散情况下传播较长距离^[26],因此,飞秒激光成丝打孔技术相比于贝塞尔光束打孔更适合加工深微孔。

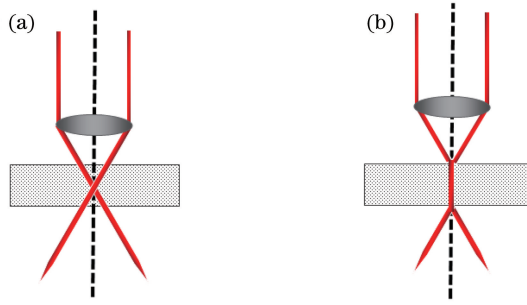


图 1 (a) 传统的聚焦打孔技术; (b) 飞秒激光成丝打孔技术

Fig. 1 (a) Conventional focusing drilling technique; (b) femtosecond laser filament beam drilling

3 实验内容

飞秒激光成丝制备毫米级深孔的实验装置如图 2 所示,其中包括外光路系统和样品平移台两个部分。飞秒激光的参数为:中心波长为 800 nm,脉冲宽度为 35 fs,重复频率为 1 kHz,最大平均功率为 3.5 W。激光脉冲的平均输出功率可以通过中性衰减片连续调节,由机械快门来控制光路通断。利用 750 mm 焦距的透镜将飞秒激光进行聚焦成丝,可在空气中形成相对稳定的光丝通道。通过改变加工时间、激光平均输出功率等方法来获得靶材在不同情况下的加工结果,从而总结出飞秒激光成丝打孔的规律,以便于将来的实际应用。所有实验均在空气环境下进行。

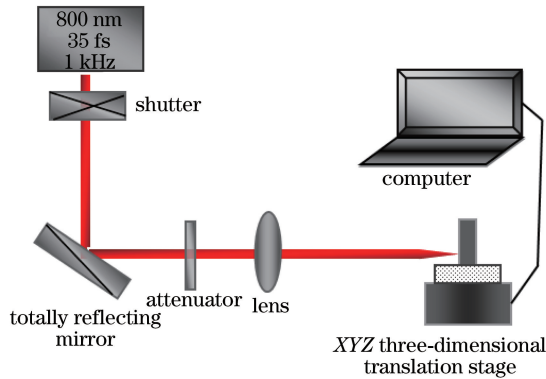


图 2 飞秒激光成丝制备毫米级深孔的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of millimeter-scale deep-hole fabricated by femtosecond laser filament

由于 PMMA 溶于有机溶剂而不溶于水的特性,将样品放入蒸馏水中进行超声清洗,待样品晾干后利用扫描电子显微镜(SEM)对样品进行表面形貌的分析,并且利用三英公司的可三维重构 X 光显微成像系统测量得到所有孔的纵截面图。实验所用的 PMMA 实验靶材厚度为 2 mm。

4 实验结果

4.1 飞秒激光平均功率对光丝长度的影响

飞秒激光在传输过程中,克尔自聚焦效应和等离子体散焦会达到相对稳定的动态平衡^[16]。当峰值功率达到一定值时,飞秒激光可以在没有明显发散的情况下,以很高的强度传播很长的距离。此时,周围的介质分子被电离成一条明亮的等离子体通道^[18]。

飞秒激光在空气中所成的丝长会随着飞秒激光平均功率的增大而增长^[27]。飞秒激光丝长随平均功率的变化如图 3 所示,透镜焦距为 750 mm 时,飞秒激光在空气中形成的丝长随着激光平均功率的增大而增长,且在激光平均功率为 1.6 W 时激光成丝的丝长增长最慢。

飞秒激光在空气中成丝的长度会随着飞秒激光平均功率的改变而变化,这是飞秒激光平均功率不同使得光斑强度分布不同导致的。飞秒激光成丝长度随飞秒激光平均功率变化如图 4 所示,从同一飞秒激光放

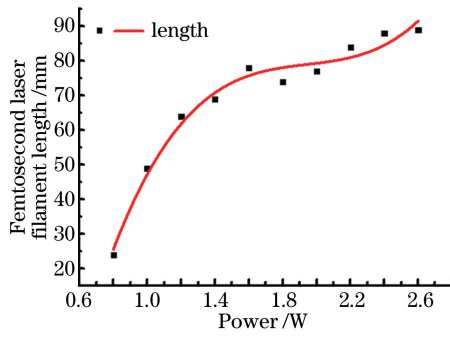


图 3 飞秒激光成丝长度随飞秒激光平均功率的变化

Fig. 3 Variation of the femtosecond laser filament length with average femtosecond laser power

大器输出的飞秒激光经过分束器后获得除平均功率不同外其他参数均相同的光束 1 和光束 2。由于输出的光斑大小由飞秒激光放大器的输出口径决定,与功率无关,因此光束 1 和光束 2 的光斑直径 R 相同,但由于光束 1 的平均功率大于光束 2 的平均功率,因此光强大小分布不同,两束光的光强分布如图 4(b)所示。空气击穿(电离)阈值 I_c 一定,由图 4(b)可以看出,光束 1 在 M 和 N 处的光强 I_M 和 I_N 等于空气击穿(电离)阈值 I_c ,在 MN 之间的区域,光强均大于空气击穿(电离)阈值 I_c 。同理,光束 2 在 A 和 B 处的光强 I_A 和 I_B 等于空气击穿(电离)阈值 I_c ,在 AB 之间的区域,光强均大于空气击穿(电离)阈值 I_c 。由图 4(b)和图 4(c)可知, MN 与 AB 分别为光束 1 和光束 2 可击穿(电离)空气的临界点, L_{MN} 与 L_{AB} 分别表示光束 1 和光束 2 的光丝长度。由图 4(c)可知,光束 1 形成的光丝不仅比光束 2 形成的光丝长度长且光丝直径大。很明显,飞秒激光成丝随飞秒激光平均功率的变化而改变。

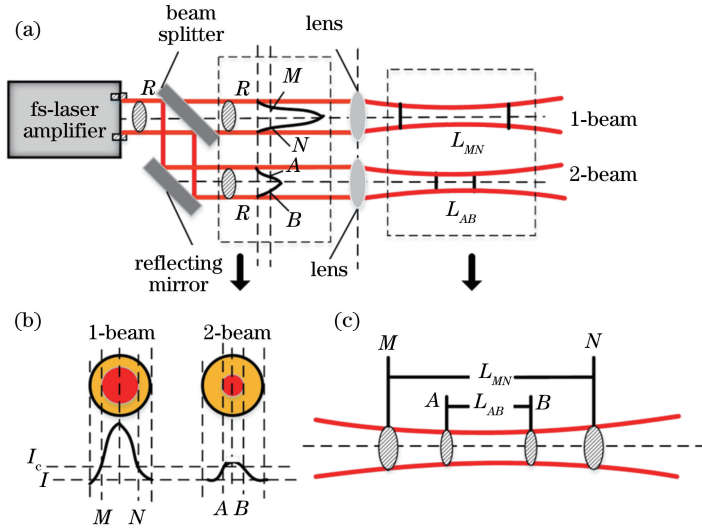


图 4 飞秒激光成丝长度随飞秒激光平均功率变化原理图。(a)不同功率飞秒激光成丝原理图;(b)不同功率的飞秒激光光强分布图;(c)不同功率下飞秒激光光丝对比图

Fig. 4 Variation of the femtosecond laser filament length with average femtosecond laser power principle diagram. (a) Femtosecond laser filamentation of different powers; (b) femtosecond laser intensity distribution of different powers; (c) femtosecond laser filament length contrasts of different powers

4.2 飞秒激光平均功率对深微孔的影响

实验首先研究飞秒激光平均功率对成孔的影响,根据 4.1 可知,通过增大或减小飞秒激光的平均功率,可以增长或缩短飞秒激光所成的丝长,从而对加工深微孔产生影响。利用实验中介绍的方法加工靶材。飞秒激光光丝作用于 PMMA 靶材,飞秒激光平均功率调节间隔为 0.2 W,飞秒激光平均功率分别为 1.0, 1.2, 1.4, ..., 2.6 W 时,加工 2 mm 厚的 PMMA 靶材。图 5 所示为加工时间为 9 s 时,飞秒激光在不同功率下,深微孔的孔径大小。由图 5 可以看出,在加工时间一定时,深微孔的孔径基本随着飞秒激光平均功率的增大而

增大。在平均功率为 1.0 W 时,孔径最小为 221.2 μm ;在功率为 2.6 W 时,孔径最大为 356.6 μm 。在加工时间一定的情况下,随着飞秒激光平均功率的增大,光丝直径增大,对靶材的烧蚀面积增大,因此孔径有所增加。

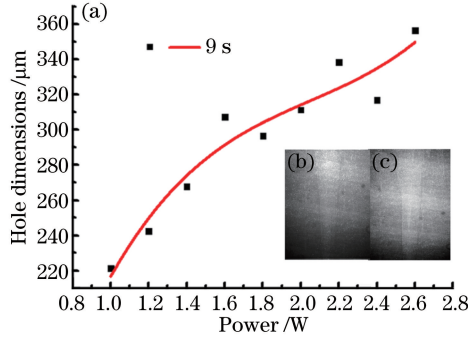


图 5 (a)不同平均功率下的孔径变化图;功率(b) 1.4 W 和(c) 1.8 W 时成孔的纵截面图

Fig. 5 (a) Variation of hole dimensions under different average powers; longitudinal cross-section of the drilling holes at the power of (b) 1.4 W and (c) 1.8 W

由图 6 可以看出,在加工时间为 9 s,加工功率分别为 1.0, 1.4, 1.8 W 时,深微孔的孔径分别为 221.2, 278.2, 296.6 μm ,并且深微孔均有着较为理想的形貌结构,满足精密电子、汽车制造、航空航天等高精尖领域对孔的指标要求。

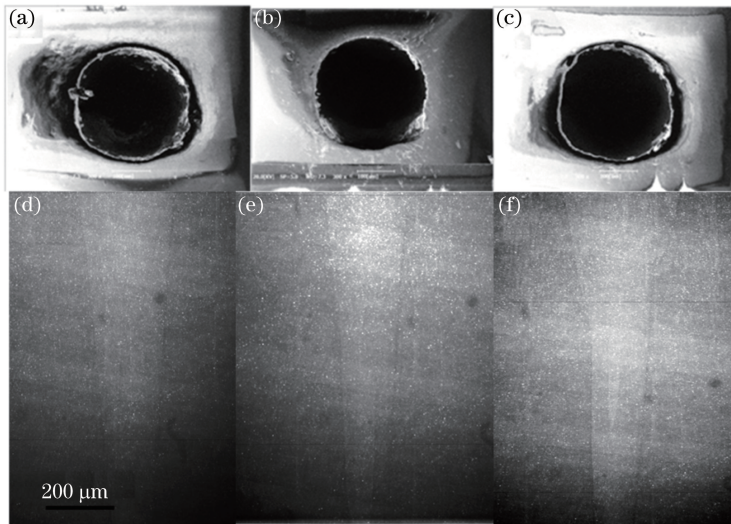


图 6 加工时间为 9 s 时,平均功率分别为 1.0, 1.4, 1.8 W 时,深微孔表面的 SEM 形貌

(a)(b)(c)以及对应的纵截面显微照片(d)(e)(f)

Fig. 6 Processing time is 9 s, average power of 1.0, 1.4, 1.8 W respectively, the surface of deep pores SEM morphology (a)(b)(c) and longitudinal cross-sectional micrographs (d)(e)(f)

众所周知孔的深宽比也是衡量孔的质量的一个重要指标。表 1 所示为加工时间分别为 5, 7, 9 s 时,飞秒激光在不同功率下,孔的深宽比大小。由表 1 可以看出,在加工时间一定的情况下,孔的深宽比随着飞秒激光平均功率的增大而降低,在加工时间为 7 s 或 9 s,激光平均功率为 1.0 W 时,孔的深宽比达到 19.075。在加工时间一定的情况下,随着飞秒激光平均功率的增大,使得光丝长度增长和光丝直径增大。光丝长度的增加可以提高孔的深宽比,但光丝直径的增加,增大了孔的烧蚀区域,使得孔径变大,又在一定程度上降低了深宽比。因此,在加工靶材厚度固定的情况下,激光功率不宜过大。

表 1 飞秒激光不同功率下深微孔的深宽比

Table 1 Aspect ratio of deep micro-holes under different powers

Power /W	Aspect ratio (Time: 5 s)	Aspect ratio (Time: 7 s)	Aspect ratio (Time: 9 s)
2.6	9.383	10.314	11.217
2.4	11.409	11.488	12.618
2.2	12.247	12.140	11.813
2.0	12.796	12.598	12.845
1.8	13.765	13.012	13.486
1.6	14.020	13.063	13.012
1.4	14.114	14.378	14.942
1.2	17.444	17.543	16.495
1.0	19.075	17.197	19.075

除了孔径和深宽比之外,衡量孔径好坏的另一个重要的参数就是锥度,利用锥度角计算公式^[28]

$$\theta = \arctan[(D_{en} - D_{ex})/2h], \quad (1)$$

式中 D_{en} 为深微孔入口直径, D_{ex} 为深微孔出口直径, h 为实验靶材厚度, 本文取 $h = 2 \text{ mm}$ 。

计算得出不同功率下每一个深微孔锥度大小。图 7 为孔的锥度大小随平均功率变化的情况。由图 7 可知,加工时间一定时,深微孔的锥度大致随着飞秒激光平均功率的增加而增大。在平均功率为 2.4 W 时,锥度最大为 0.0514;在平均功率为 1.0 W 时,锥度最小为 0.04027。在加工时间一定的情况下,随着激光平均功率的增大,使得光丝长度变长和直径增大,光丝长度变长可以减小孔的锥度。但光丝直径的增大,烧蚀区域增大,孔径变大,并且入孔直径比出孔直径增大得多,使得孔的锥度增大。因此,在加工靶材厚度固定的情况下,激光功率不宜过大。

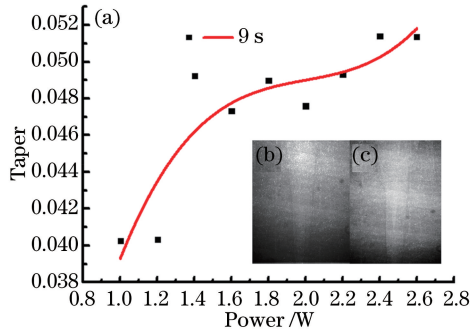


图 7 (a)不同平均功率下锥度变化图;功率(b)1.4 W 和(c)1.8 W 时成孔的纵截面图

Fig. 7 (a) Variation of taper under different average powers; longitudinal cross-section of the drilling holes at the power of (b) 1.4 W (a) and (c) 1.8 W

4.3 不同加工时间对深微孔的影响

研究了不同加工时间对加工深微孔孔径变化和锥度的影响,分别对平均功率为 1.0 W 和 1.4 W 时,加工时间对孔径和锥度的影响进行分析。飞秒激光光丝作用于 PMMA 靶材,加工时间间隔为 2 s,加工时间分别为 3, 5, 7, ..., 21 s 时,加工 2 mm 厚的 PMMA 靶材。图 8 所示为平均功率一定时,不同的加工时间对加工深微孔的影响。由图 8 可以看出,深微孔的孔径基本随着飞秒激光加工时间的增加而增大,并且平均功率为 1.0 W 和 1.4 W 时,孔径变化具有高度的一致性。在激光平均功率为 1.0 W,加工时间为 3 s 时孔径达到最小为 190.6 μm 。在飞秒激光平均功率一定的情况下,随着加工时间的增大,光丝对靶材的烧蚀越来越久,烧蚀区域增大,因此,孔径有所增加。

由图 9 可以看出,在平均功率为 1.4 W,加工时间分别为 5, 7, 9 s 时,深微孔的孔径分别为 267.7, 278.2, 283.4 μm 。并且深微孔均有着较为理想的形貌结构,满足精密电子、汽车制造、航空航天等高精尖领域对孔的指标要求。

由于加工的 PMMA 靶材厚度一定,因此,孔的深宽比与孔径大小成反比关系,加工时间一定时,孔的深宽比大小如表 2 所示,深宽比随着加工时间的增加而降低,在飞秒激光平均功率为 1.0 W,加工时间为 3 s

时,孔的深宽比达到最大值,为 20.953。在飞秒激光平均功率一定的情况下,光丝长度一定,孔的深宽比主要取决于孔径大小。随着加工时间的增长,光丝对靶材的烧蚀也较为严重,使得烧蚀面积增大,孔径增大,因此孔的深宽比随着加工时间的增长而降低。

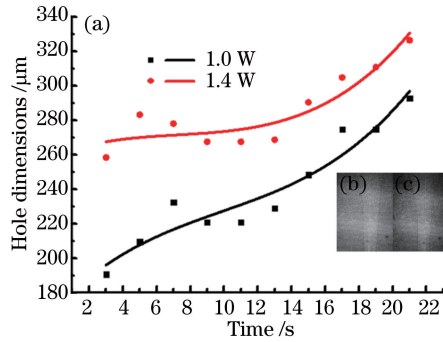


图 8 (a)不同加工时间下的孔径变化图;加工时间(b) 7 s 和(c) 9 s 时成孔的纵截面图

Fig. 8 (a) Variation of hole dimensions under different processing time; longitudinal cross-section of the drilling holes at (b) 7 s and (c) 9 s

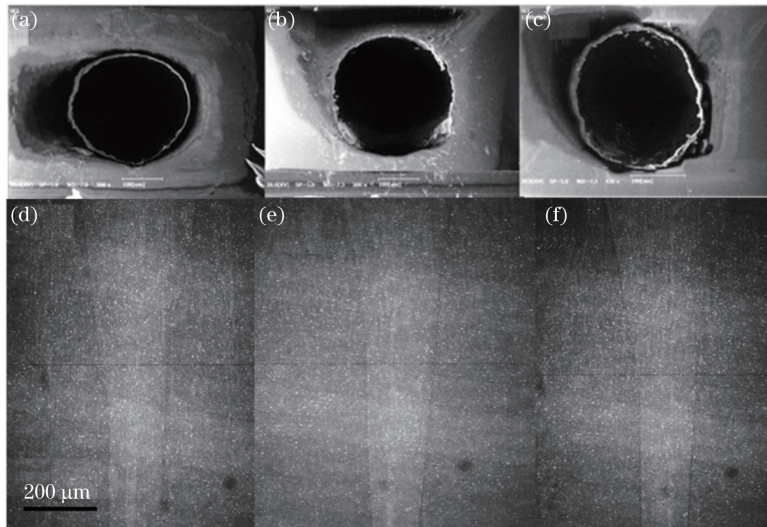


图 9 平均功率为 1.4 W,加工时间分别为 5,7,9 s 时,深微孔表面的 SEM 形貌(a)(b)(c)以及纵截面显微照片(d)(e)(f)

Fig. 9 Average power of 1.4 W, processing time for 5, 7, 9 s, the surface of deep pore SEM morphology (a)(b)(c) and longitudinal cross-sectional micrographs (d)(e)(f)

表 2 飞秒激光加工时间下深微孔的深宽比

Table 2 Aspect ratio of deep micro-holes under different processing time

Time /s	Aspect ratio (Power: 1.0 W)	Aspect ratio (Power: 1.4 W)
3	20.953	15.468
5	19.075	14.114
7	17.197	14.378
9	18.083	14.942
11	18.083	14.942
13	17.452	14.875
15	16.097	13.765
17	14.545	13.114
19	14.545	12.862
21	13.652	12.247

在飞秒激光平均功率一定时,不同的加工时间不仅会对孔径及深宽比造成影响,还会对孔的锥度产生较大影响。由图 10 可以看出,孔的锥度大小随加工时间的增加而先增加后减小再增加,总的来说呈现增大趋

势。在平均功率为 1.0 W 和 1.4 W 时,对于不同的加工时间,锥度的变化趋势基本一致。在激光平均功率为 1.0 W,加工时间为 3 s 时锥度达到最小为 0.03168。飞秒激光平均功率一定时,光丝长度一定,孔的锥度主要取决于孔径的大小。随着加工时间的增长,光丝对靶材的烧蚀越来越严重,从而使得孔径变大,且入孔直径变化量大于出孔直径变化量,因此,孔的锥度随加工时间的增长基本呈现增大趋势。

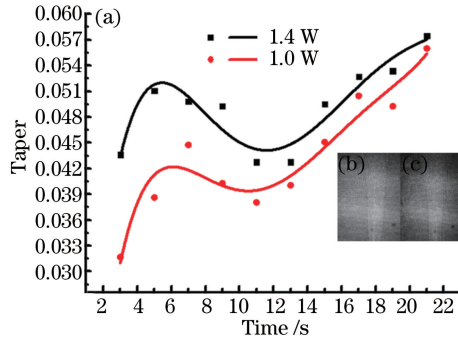


图 10 (a)不同加工时间下锥度变化图;加工时间(b) 7 s 和(c) 9 s 时成孔的纵截面图
 Fig. 10 (a) Variation of taper under different processing time; longitudinal cross-section of the drilling holes at (b) 7 s and (c) 9 s

上述实验分别给出了不同激光平均功率和不同加工时间对加工深微孔的影响。实验表明,随着飞秒激光平均功率的增大,孔的孔径和锥度均有明显的增大趋势,且深宽比下降。随着加工时间的增加,孔径变大,深宽比下降;孔的锥度先增加后减小再增加,但总体来说呈现增大趋势。传统加工有机玻璃的方式一般为利用玻璃钻头来钻孔,此方法得到的孔虽然深度可以满足要求但尺寸远远大于利用飞秒激光成丝加工得到的深微孔,因此利用飞秒激光成丝加工深微孔具有深远意义。

5 结 论

借助飞秒激光成丝具有较长距离内均匀性高的优势,利用飞秒激光成丝对 PMMA 板进行深微孔的打孔实验,从深微孔的 SEM 图可以看出,所制备的深微孔都有着较为理想的表面形貌,孔的圆度增加以及孔边的裂纹减少,较传统的聚焦打孔技术以及贝塞尔光束打孔技术均有着明显的优势。实验结果表明,在飞秒激光平均功率一定的情况下,随着加工时间的增加,孔的孔径变大,深宽比下降;孔的锥度先增加后减小再增加,但总体来说呈现增大趋势。加工时间一定时,随着飞秒激光平均功率的增大,孔的孔径和锥度均有着明显的增大趋势,且深宽比下降。近年来,随着科学技术的不断进步,越来越多的领域对毫米级的深微孔需求增加。利用飞秒激光成丝加工出的毫米级深微孔,不仅可以在航空航天领域中得到广泛的实际应用,而且还可以在实际的生物医疗或者工程器件中获得实践性的应用。

参 考 文 献

[1] Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.* Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201001.
 夏 博, 姜 澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.

[2] Huang Haiyun. Study on minitaper laser drilling technique and technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2004.
 黄海云. 小锥度激光打孔技术及工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2004.

[3] Tan Xianfeng, Yang Junhua, Geng Yanqing. Experiment research on the influence of impulse width on laser drilling [J]. New Technology & New Process, 2011(3): 77-79.
 谭险峰, 杨俊华, 耿艳青. 脉冲宽度对激光打孔影响的试验研究[J]. 新技术新工艺, 2011(3): 77-79.

[4] Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1653-1659.
 钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659.

[5] Yu Benhai. Ablation and micromachining of dielectrics with a femtosecond laser[D]. Wuhan: Huazhong University of

- Science & Technology, 2008.
- 余本海. 飞秒激光对透明电介质材料的烧蚀与微加工研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [6] He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromaching: Frontier in laser precision micromaching[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 595-622.
- 何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 595-622.
- [7] Shirk M D, Molian P A. A review of ultrashort pulsed laser ablation of materials[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(1): 18-28.
- [8] Wang Yuqian, Zhang Junzhan, Liu Yongsheng, *et al.* Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003010.
- 王禹茜, 张军战, 刘永胜, 等. 飞秒激光工艺参数对加工 TiC 陶瓷微孔的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003010.
- [9] Xing Songling, Liu Lei, Zou Guisheng, *et al.* Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403001.
- 邢松龄, 刘 磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403001.
- [10] Hu Mengning, Ge Licheng, Zhang Jinping, *et al.* Hole-drilling with high depth-diameter ratio using multi-pulse femtosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0403006.
- 胡梦宁, 葛励成, 张晋平, 等. 多脉冲飞秒激光深小孔的加工[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403006.
- [11] Liao Changrui. Theoretical and experimental studies on femtosecond laser micromaching of metals [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007.
- 廖常锐. 飞秒激光微细加工金属材料的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [12] Tan Chao. Research on processing technology and surface quality of metal micro-holes machined by femtosecond laser [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- 谭 超. 飞秒激光加工金属微孔工艺及表面质量研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [13] Pan Yong, Jiang Zhaohua, Zhang Tongxing, *et al.* Application of rotating pairs of optical wedge in the laser micro-holes processing[J]. Applied Laser, 2009, 29(6): 515-517.
- 潘 涌, 姜兆华, 张同兴, 等. 旋转双光楔在激光微孔加工中的应用[J]. 应用激光, 2009, 29(6): 515-517.
- [14] Rairoux P, Schillinger H, Niedermeier S, *et al.* Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses[J]. Appl Phys B, 2000, 71(4): 573-580.
- [15] Zhang Ping, Bian Baomin, Qian Yan, *et al.* The study of filament caused by propagation of ultra-strong femtosecond laser in air[J]. Laser Journal, 2004, 25(6): 1-3.
- 张 平, 卞保民, 钱 彦, 等. 飞秒超强激光在空气中光丝现象的研究[J]. 激光杂志, 2004, 25(6): 1-3.
- [16] Dai Yuyin. Investigation of propagation of femtosecond laser pulses in air[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- 代玉银. 飞秒激光在空气中的传输研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [17] Zhang Jie, Hao Zuoqiang, Yuan Xiaohui, *et al.* Propagation of intense femtosecond laser pulses in air[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3): 282-294.
- 张 杰, 郝作强, 远晓辉, 等. 超强飞秒激光脉冲在空气中的传输研究[J]. 量子电子学报, 2006, 23(3): 282-294.
- [18] Xu shengqi. Study of intensity clamping during femtosecond laser filamentation[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- 徐圣奇. 飞秒激光成丝现象中光强钳制效应研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
- [19] Sun Xiaodong. Control of multiple filaments during femtosecond laser filamentation[D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
- 孙晓东. 飞秒激光成丝现象中多丝控制的研究[D]. 天津: 南开大学, 2012.
- [20] Zhou Chunyan, Jiang Yuewei, Xu Bing. Manufacture and market of PMMA[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(9): 5-15.
- 周春艳, 姜月伟, 徐 兵. 国内聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的生产及市场[J]. 塑料工业, 2011, 39(9): 5-15.
- [21] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [22] Huang Wenlong, Lü Baida, Ye Yidong, *et al.* Axial intensity distribution of a Bessel-Gauss beam focused by an aperture lens[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(4): 285-292.
- 黄文龙, 吕百达, 叶一东, 等. 有限束宽聚焦贝塞尔-高斯光束轴上的光强分布[J]. 中国激光, 1995, 22(4): 285-292.
- [23] Jiang Zhiping, Lu Qisheng. Bessel beam and laser drilling[J]. Optical Technology, 1996(1): 32-35.
- 蒋志平, 陆启生. 贝塞尔光束与激光打孔[J]. 光学技术, 1996(1): 32-35.
- [24] Mori S. Side lobe suppression of a Bessel beam for high aspect ratio laser processing[J]. Precision Engineering, 2014,

39: 79-85.

- [25] Jiang Zhiping, Lu Qisheng, Liu Jinze, *et al.* Applications of Bessel beam a review[J]. Optical Technology, 1997(1): 1-9.
蒋志平, 陆启生, 刘金泽, 等. 贝塞尔光束的应用[J]. 光学技术, 1997(1): 1-9.
- [26] Xu Zhijun. Experimental and applied study of femtosecond laser-induced[D]. Tianjin: Nankai University, 2013.
徐智军. 飞秒激光诱导空气等离子体的实验与应用研究[D]. 天津: 南开大学, 2013.
- [27] Xu Z J, Liu W, Zhang N, *et al.* Effect of intensity clamping on laser ablation by intense femtosecond laser pulses[J]. Optics Express, 2008, 16(6): 3604-3609.
- [28] Dasa D K, Pollock T M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15): 5661-5668.