

文章编号: 1001-3806(2022)06-0767-06

## 266nm 纳秒固体激光在 CH 薄膜上打孔的工艺实验研究

齐立涛<sup>1</sup>, 刘凤聪<sup>2</sup>

(1. 黑龙江科技大学 激光先进制造研究所, 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 机械工程学院, 哈尔滨 150022)

**摘要:** 为了研究 266nm 纳秒固体激光在 CH 膜上打孔的工艺规律和材料去除机理, 采用单因素控制变量的方法, 进行了单脉冲和多脉冲打孔的实验研究, 分析了 266nm 纳秒固体激光对 CH 膜材料的去除机理; 取得了激光脉冲能量、脉冲数量对孔径和孔深影响规律的数据。结果表明, 单脉冲打孔条件下, 当激光脉冲能量为 0.014mJ 时, 微孔直径和深度最小, 当激光脉冲能量为 0.326mJ 时, 微孔直径和深度最大, 孔径和孔深随着激光脉冲能量的增大而增大; 多脉冲打孔条件下, 当激光脉冲能量较低时, 激光对 CH 膜的单脉冲烧蚀率约为 0.56 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ , 当激光脉冲能量较高时, 激光对 CH 膜的单脉冲烧蚀率约为 1 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ , 孔径和孔深随着激光脉冲数量的增加而增大; 266nm 纳秒固体激光在 CH 膜上打孔时的微孔形状规则, 大小均匀, 微孔周围无残渣、碎屑等抛出物, 边缘无热影响区, 可推断其材料去除机理主要为“光化学蚀除”。该研究对 266nm 纳秒固体激光加工 CH 膜的应用具有一定的参考意义。

**关键词:** 激光技术; 激光加工 CH 膜; 工艺实验; 266nm 纳秒固体激光; 微孔; 烧蚀特征; 材料去除

**中图分类号:** TN249; TG665 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.06.009

### Experimental investigation on 266nm nanosecond solid-state laser drilling on CH film

QI Litao<sup>1</sup>, LIU Fengcong<sup>2</sup>

(1. Institute of Advanced Laser Manufacturing, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China; 2. School of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

**Abstract:** In order to investigate the process law and material removal mechanism of 266nm nanosecond solid-state laser drilling on CH film, the single-pulse and multi-pulse drilling experiments were carried out by adopting the single-factor control variable method. The removal mechanism of CH film material by 266nm nanosecond solid-state laser was analyzed. The data of the influence of laser pulse energy and pulse number on the diameter and depth of micropores were obtained. The results show that: when the CH film material is drilled by a single pulse with energy of 0.014mJ, the micropore with the smallest diameter and depth is obtained; when the laser pulse energy is 0.326mJ, the micropore with the largest diameter and depth is obtained. Both the diameter and depth of a micropore increases with the increase of laser pulse energy. When the CH film material is drilled by multiple pulses with low pulse energy, the single pulse ablation rate of laser on CH film is about 0.56 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ . When the laser pulse energy is high, the single pulse ablation rate of laser on CH film is about 1 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ . The diameter and depth of a micropore increase with the increase of laser pulse number. When 266nm nanosecond solid-state laser is used as the drilling source on the CH film, the micropores are regular in shape and uniform in size. There are no residues and debris around the micropores, and there is no heat affected zone at the edge. It can be inferred that the material removal mechanism is mainly “photochemical removal”. The research has certain reference significance for the application of 266nm nanosecond solid-state laser processing CH film.

**Key words:** laser technique; laser processing CH film; process test; 266nm nanosecond solid-state laser; micro-hole; ablation characteristics; material removal

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目 (LH2021E107); 黑龙江省教育厅××专项资金资助项目 (H××201905); 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目 (2018-KYYWF-1168)

作者简介: 齐立涛 (1977-), 男, 博士, 副教授, 现主要从事激光加工的研究。

E-mail: qltx@hotmail.com

收稿日期: 2021-11-08; 收到修改稿日期: 2021-11-12

### 引言

CH 薄膜是一种利用 C、H 两种元素合成的新型聚合物材料, 制备方法主要包括低压等离子体化学气相沉积法<sup>[1]</sup>和射频等离子体化学气相沉积法<sup>[2]</sup>等, 常被应用于激光惯性约束聚变实验的烧蚀层材料<sup>[3]</sup>、包装材料领域的阻隔材料<sup>[2]</sup>和航空航天等空间技术领域的新型润滑材料<sup>[4]</sup>等。在激光加工聚合物材料时, 材

料的去除机理主要包括光热蚀除、光化学蚀除、光热和光化学共同作用等<sup>[5]</sup>。紫外纳秒激光因其波长较短、单光子能量高和聚焦尺寸小等优点<sup>[6]</sup>,在加工材料时,在一定条件下能够直接打断材料的化学键<sup>[7]</sup>,更大程度上通过光化学作用实现材料的去除,从而获得较高的加工质量<sup>[8]</sup>。利用激光打孔技术在聚合物材料上制孔,能够克服传统机械加工中出现的精度低、效率低和孔内碎屑堆积等缺陷<sup>[9]</sup>,但聚合物材料的熔点和沸点较低,加工过程中易出现热烧伤现象<sup>[10]</sup>,因此,通过研究紫外激光加工聚合物材料的作用机理,找出减轻或避免热影响区问题的方法,已成为重要研究内容。为此,国内外学者做了大量研究。

SRINIVASAN 等人利用 193nm 准分子激光对聚合物薄膜进行刻蚀研究,研究发现,193nm 紫外激光可以利用光子能量破坏材料内部的化学键,同时在材料表面形成少量颗粒状碎片,并将这种现象被称为光化学蚀除<sup>[11]</sup>。SUTCLIFFE 等人对紫外激光烧蚀聚合物材料的去除机理进行了研究,通过将刻蚀过程的动力学与实验参数如光子流量阈值、波长和脉宽等相结合,建立了紫外激光烧蚀聚合物材料的光化学模型,通过与实验结果进行比较发现,建立的模型能够定量预测刻蚀特性<sup>[12]</sup>。D' COUTO 等人利用 248nm、308nm 激光进行了多种聚合物的烧蚀实验,研究发现,聚合物材料在达到烧蚀阈值之后,才会出现降解现象,依据实验结果并结合 1 维传热模型建立了光热蚀除模型,模型预测的蚀除率-光通量结果与实验结果一致<sup>[13]</sup>。YALUKOVA 等人利用 3 种波长(1064nm, 532nm, 266nm)激光进行了热塑性和热固性聚合物的实验研究,研究发现,在 1064nm、532nm 波长下加工时,材料的去除机理为光热蚀除,加工区域周围会出现燃烧和烧伤现象;在 266nm 波长下加工时,热损伤现象显著降低。通过分析可知,使用不同光子能量的紫外激光,能够影响光化学蚀除和光热蚀除所占的比例,相互作用机制会发生变化<sup>[14]</sup>。WANG 等人采用 355nm 波长纳秒紫外激光对聚苯乙烯材料进行了打孔实验研究,研究发现,在不同的激光脉冲能量、重复频率下,光化学蚀除和光热蚀除所占的比例不同,微孔的形成是光化学蚀除和光热蚀除共同作用的结果<sup>[15]</sup>。

综上所述,国内外学者对激光加工聚合物材料的去除机理进行了一定研究,并结合实验结果建立了包括光化学模型、光热模型等在内的各种蚀除模型。但已有的研究中,关于 CH 薄膜激光加工的相关研究较少,利用 266nm 纳秒激光进行材料加工的相关研究也

相对较少。因此,本文中利用 266nm 纳秒固体激光进行 CH 薄膜打孔的实验研究,分析打孔过程中材料的去除机理和打孔的工艺规律,拟为 CH 薄膜的工程应用以及 266nm 纳秒激光的应用提供指导。

## 1 实验设备与方法

266nm 纳秒激光打孔试验系统如图 1 所示。实验系统中激光器采用北京中科紫玉光电技术有限公司的 Nd:YAG 全固态紫外激光器,主要性能参数如表 1 所示。实验中选取 266nm 波长激光作为加工光源,激光束能量服从高斯分布。激光束通过反射镜反射,并利用 1mm 的光阑对光束进行整形,最后经过 50mm 焦距的平凸透镜聚焦后照射到工件表面。工件放置在电脑控制的 X-Y-Z 加工平台上,通过控制系统调节打孔位置,工件高度和相邻孔间距等。实验中,激光脉冲能量通过调节激光器输入电流控制,激光脉冲能量数值利用 OPHIR 公司生产的能量计测量得到。实验在空气和常温下进行,实验后利用原子力显微镜(NT-MDT)和数字显微镜(Olympus DSX1000)检测微孔直径和微孔深度。

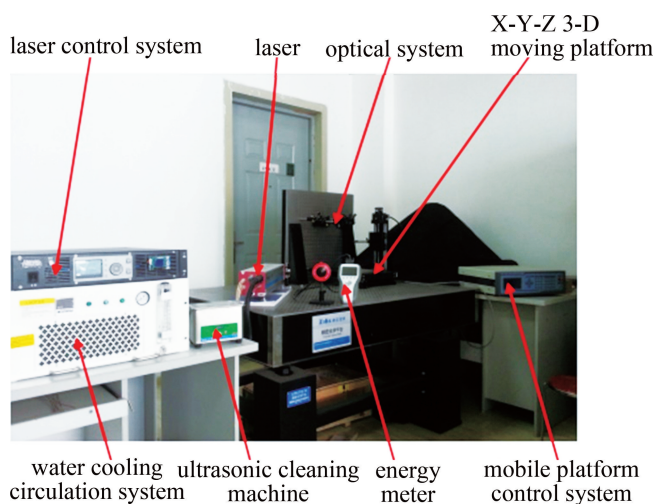


Fig. 1 Photo of 266nm nanosecond solid-state laser drilling system

Table1 Main parameters of Nd:YAG laser

| parameter           | range               |
|---------------------|---------------------|
| laser wavelength    | 532nm, 266nm, 213nm |
| single pulse energy | 1mJ (266nm)         |
| pulse width         | 7ns                 |
| laser frequency     | 1Hz~100Hz           |

实验样品如图 2 所示。样品包括两层材料,上层为 CH 薄膜,厚度约为 50 $\mu$ m,下层为表面抛光后的硅片,厚度约为 1mm。CH 膜具有一定的透光性,表面具有部分气泡状的凸起,在显微镜下观察时,可见类似气

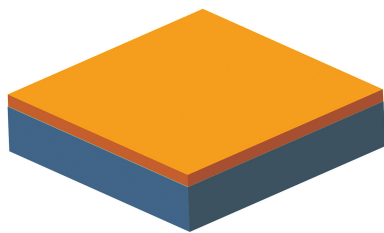


Fig. 2 Image of CH film sample

泡凸起的存在。

利用 266nm 纳秒固体激光对 CH 薄膜进行打孔实验,通过控制变量法研究各打孔参数对微孔加工尺寸的影响。因实验条件限制,实验中只考虑激光脉冲能量和脉冲数量两组参数对微孔的影响,且不考虑交互作用。实验中通过改变激光脉冲能量和脉冲数量等激光打孔参数,分别进行激光打孔的工艺实验,检测加工后的微孔直径、微孔深度和微孔表面形貌,分析激光打孔参数对微孔尺寸影响的工艺规律。通过原子力显微镜和数字显微镜检测得到的微孔表面形貌,结合激光打孔参数对微孔尺寸影响的工艺规律,分析 266nm 纳秒激光加工 CH 薄膜的材料去除机理。实验中微孔直径、微孔深度等测量参数取 3 次测量后所得参数的平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 激光脉冲能量对微孔尺寸的影响

2.1.1 激光脉冲能量对微孔直径的影响 图 3 为不同激光脉冲能量下,单个脉冲打孔时微孔直径的变化趋势。由图 3 可见,266nm 纳秒固体激光在 CH 膜上进行单脉冲打孔时,随着激光脉冲能量的增大,微孔直径呈现出先逐渐增大,后基本保持不变的趋势。因为激光束服从高斯分布,当激光脉冲能量较低时,光斑中心位置因激光能量密度达到材料的烧蚀阈值成功将材料去除,而光斑外围因激光能量密度不足而无法将材料去除。随着激光脉冲能量的逐渐增大,光斑中心和

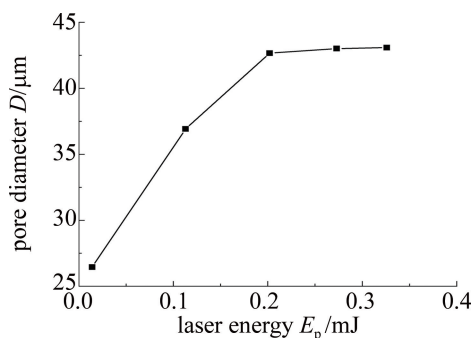


Fig. 3 Diameters of the microholes under single pulse drilling at different laser pulse energies

外围的能量密度不断增大<sup>[16]</sup>,光斑外围的材料不断被去除,进而表现出微孔直径不断增大的趋势。当微孔直径接近于聚焦之后的光斑束腰直径时,由于光斑大小的限制,以及加工过程中等离子体屏蔽效应、热扩散和热对流等多方面的影响<sup>[17]</sup>,微孔直径趋近于极限最大值,并维持基本不变的趋势。实验中当激光脉冲能量为 0.014mJ 时,微孔直径最小为 26.457μm;当激光脉冲能量增大至 0.202mJ 时,微孔直径增大为 42.663μm,随后微孔直径随激光脉冲能量增大的增大趋势变缓,并基本保持不变;当激光脉冲能量为 0.326mJ 时,微孔直径最大为 43.083μm。

2.1.2 激光脉冲能量对微孔深度的影响 图 4 为不同激光脉冲能量下,单个脉冲打孔时微孔深度的变化趋势。由图 4 可见,266nm 纳秒固体激光在 CH 膜上进行单脉冲打孔时,随着激光脉冲能量的增大,微孔深度呈现逐渐增大的趋势,且增大趋势逐渐减缓。这是因为当激光脉冲能量增大时,激光能量密度增大,单位时间和单位面积内材料吸收的激光能量增多,能量传递效率增加,更多的材料被烧蚀去除,微孔深度逐渐增大<sup>[18]</sup>。但是随着微孔深度不断增大,一方面由于材料内部的能量扩散范围有限,另一方面由于等离子体屏蔽效应和激光持续时间较短等因素的影响,微孔深度的增大趋势逐渐变缓。实验中当激光脉冲能量为 0.014mJ 时,微孔深度最小为 0.756μm;当激光脉冲能量为 0.326mJ 时,微孔深度达到最大为 1.410μm。

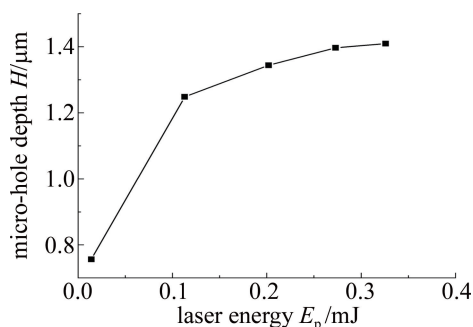


Fig. 4 Depth of microholes under single pulse drilling at different laser pulse energies

### 2.2 激光脉冲数量对微孔尺寸的影响

2.2.1 激光脉冲数量对微孔直径的影响 图 5 为激光脉冲能量分别为 0.017mJ,0.034mJ 和 0.098mJ 时,不同激光脉冲数量下,微孔直径的变化曲线,图中激光脉冲数量无单位。由图 5 可见,当脉冲数量在 5~50 范围内时,随着脉冲数量的增加,微孔直径不断增大,当脉冲数量达到 50 之后,增大趋势变缓。这是因为随着脉冲数量的增加,激光对材料的作用时间增加,加工



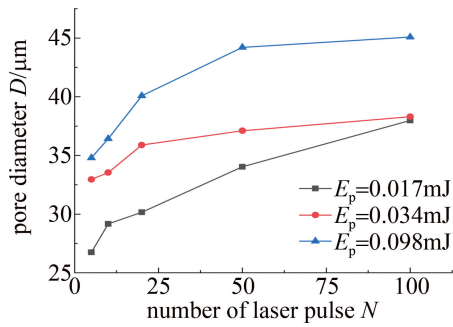


Fig. 5 Diameter of microholes under different number of laser pulses

区域吸收了更多的激光能量,从而使更多的材料被烧蚀去除,微孔直径逐渐增大。但是由于聚焦之后光斑直径的限制,能量扩散不足以将微孔边缘更多的材料烧蚀去除,故微孔直径增大趋势变缓<sup>[19]</sup>。实验中当激光脉冲能量为 0.017mJ、脉冲数量为 5 时,微孔直径最小为 26.742 $\mu\text{m}$ ;当激光脉冲能量为 0.098mJ、脉冲数量为 100 时,微孔直径达到最大为 45.090 $\mu\text{m}$ 。

2.2.2 激光脉冲数量对微孔深度的影响 图 6 为激光脉冲能量分别为 0.017mJ, 0.034mJ 和 0.098mJ 时,不同激光脉冲数量下,微孔深度的变化曲线。由图 6 可见,随着脉冲数量的增加,微孔深度不断增大,当激光脉冲能量较高时,微孔深度随脉冲数量的增加呈线性增长,当激光脉冲能量较低时,微孔深度增大幅度有

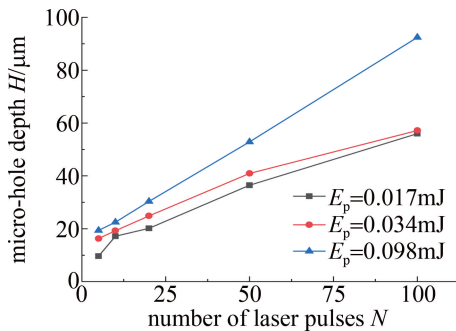


Fig. 6 Depth of microhole under different number of laser pulses

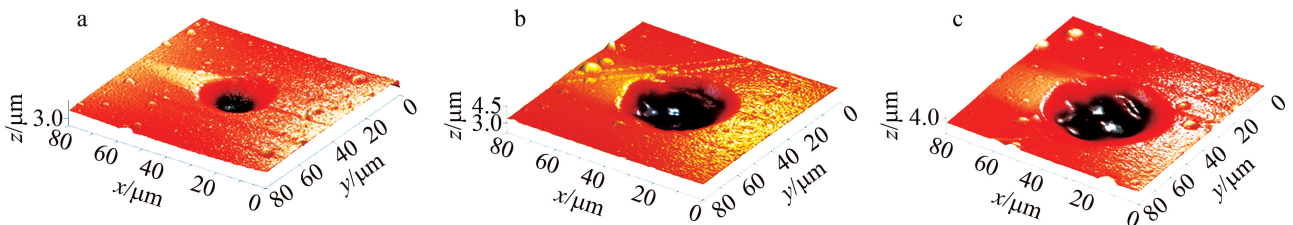


Fig. 8 AFM morphology of single pulse drilling at different laser pulse energy

a—0.014mJ b—0.202mJ c—0.326mJ

熔融物沉积,孔边缘无残渣、碎屑等喷溅物,微孔内部和周围较为清洁。

上述结果表明,266nm 纳秒固体激光在 CH 膜上进行单脉冲打孔时,加工特征与光化学蚀除的“冷加

减缓的趋势。这是因为随着脉冲数量的增加,激光与材料的作用次数增加,材料不断吸收激光能量后达到烧蚀阈值,并以熔化或汽化的形式去除,过程中不断形成蒸汽以及等离子体等气体,气体在激光作用下发生膨胀并产生向外的冲击压力,被烧蚀材料不断的被排出孔外。激光继续同微孔底部的材料相互作用,重复上述步骤,从而使微孔深度不断增大<sup>[20]</sup>。当激光脉冲能量较小时,微孔深度的增大趋势逐渐变缓,分析原因可能为激光能量较小,随着微孔深度的增加,激光束不能够完全穿透加工过程中的等离子体等气体,使得到达微孔底部的激光脉冲能量变少,从而造成微孔深度的增大趋势变缓。试验中当激光脉冲能量较低(0.017mJ, 0.034mJ)时,激光穿透 50 $\mu\text{m}$  的 CH 膜需要 90~100 个脉冲,单脉冲烧蚀率约为 0.56 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ ;当激光脉冲能量较高(0.098mJ)时,激光穿透 50 $\mu\text{m}$  的 CH 膜需要 45~55 个脉冲,单脉冲烧蚀率约为 1 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ 。

### 2.3 CH 膜激光打孔的机理分析

图 7 为利用数字显微镜得到的不同激光脉冲能量下单脉冲打孔图。图 8 为利用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 得到的 3 维形貌图。由图 7、图 8 可见,利用 266nm 纳秒固体激光在 CH 膜上进行单脉冲打孔时,微孔形状较规则,尺寸均匀,微孔内部无

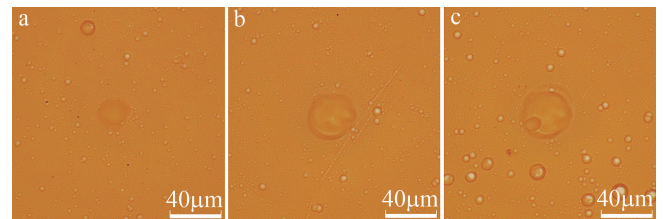


Fig. 7 Digital microscope morphology of single pulse drilling at different laser pulse energy

a—0.014mJ b—0.202mJ c—0.326mJ

工”特性相似度较高<sup>[21]</sup>,因此推断 266nm 纳秒固体激光在 CH 膜上进行单脉冲打孔时,材料去除机理主要为光化学蚀除。在光化学蚀除的过程中,材料在吸收激光光子能量后,内部会通过化学反应实现能量的弛

豫,即材料内部的化学键被激光光子能量破坏,加工区域材料被降解为分子或原子碎片,并在压强的作用下被排除孔外,进而实现材料的去除。

图9为不同激光脉冲数量打孔时,由数字显微镜观测得到的CH膜表面形貌图。图9中激光脉冲能量为0.034mJ,脉冲数量由上到下各行依次为2,5,10,20,50,100个脉冲。由图9可见,利用266nm纳秒固体激光在CH膜上进行多脉冲打孔,当脉冲数量较少(2~50)时,微孔形状规则,大小均匀,微孔周围无残渣、碎屑等抛出物,边缘无热影响区;当激光脉冲数量大于50时,微孔周围出现大量的熔融物沉积,并且材料表面出现一定的烧伤现象。

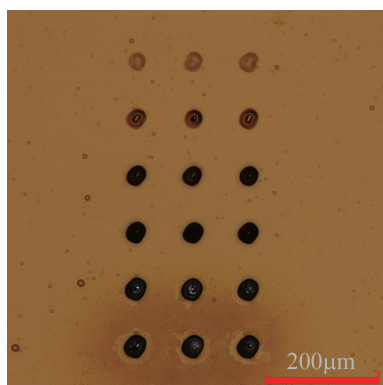


Fig.9 Digital microscope morphology of drilling at different pulse numbers

结合图6可知,当激光脉冲能量为0.034mJ时,激光穿透50μm的CH膜需要90个脉冲左右,在激光穿透CH膜前,激光去除材料的方式主要为光化学蚀除,因此加工效果较好。当激光穿透CH膜之后,激光继续与CH膜下方的硅片发生反应,因硅片的熔点在1400℃左右,加工过程中的高温导致CH膜材料出现烧伤现象。因硅片为硬脆材料,紫外纳秒激光与其作用过程中,主要通过光热蚀除将材料去除,因此加工过程中会出现较为明显的熔融物喷溅以及重凝现象<sup>[22]</sup>。在熔融物从微孔底部喷出的过程中,高温状态的熔融物会粘连部分CH材料,并混合为一体,最终重凝于微孔周围,造成加工区域周围出现大量棕色飞溅物,如图9最末行所示。

### 3 结 论

(1)通过266nm纳秒固体激光在CH膜上单脉冲打孔的实验,得出了激光脉冲能量对孔径和孔深的影响规律。随着激光脉冲能量的增大,孔径和孔深都呈现出先逐渐增大,后增大趋势减缓,并最终基本保持不变的趋势。实验中当激光脉冲能量为0.014mJ时,微

孔直径和深度最小,分别为26.457μm和0.756μm;当激光脉冲能量为0.326mJ时,微孔直径和深度最大,分别为43.083μm和1.410μm。

(2)通过不同激光脉冲能量下,266nm纳秒固体激光在CH膜上多脉冲打孔的工艺实验,得出了激光脉冲数量对孔径和孔深的影响规律。随着激光脉冲数量的增加,孔径和孔深都呈现出不断增大的趋势,其中微孔直径增大趋势逐渐变缓。实验中当激光脉冲能量较低(0.017mJ,0.034mJ)时,激光烧蚀CH膜的单脉冲烧蚀率约为0.56μm/pulse;当激光脉冲能量较高(0.098mJ)时,激光烧蚀CH膜的单脉冲烧蚀率约为1μm/pulse。

(3)266nm纳秒固体激光在CH膜上打孔时,微孔形状规则,大小均匀,微孔周围无残渣、碎屑等抛出物,边缘无热影响区。通过对打孔形貌进行分析,得出其加工特征与光化学蚀除的冷加工特性较为相符,推断266nm纳秒固体激光在CH膜上进行打孔时,材料去除机理主要为光化学蚀除。加工结果说明了266nm纳秒激光加工CH膜材料时具有较好的加工质量。

上述研究为CH膜材料以及266nm纳秒激光在工程中的应用提供一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] ZHANG B L, HE Zh B, WU W D, *et al.* Influencing factors study of surface finish of CH coating on microshell[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2009, 46(3): 647-651(in Chinese).
- [2] CHEN G L, GE Y J, ZHANG Y F, *et al.* Study on the preparation of high barrier hydrogenated carbon film and its properties[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(2): 818-823(in Chinese).
- [3] WU W D, LUO J Sh, HUANG Y, *et al.* The effect of H<sub>2</sub> and H<sup>+</sup> on C<sub>x</sub>H<sub>1-x</sub> film surface state[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(5): 593-596(in Chinese).
- [4] WU Y X, LI H X, JI L, *et al.* Effect of rotational speeds and mated balls on the vacuum tribological properties of a-C:H film[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 90-95(in Chinese).
- [5] WANG B F, ZHANG Y K, WANG Zh W, *et al.* Study on the mechanism and wettability of pmma surface microstructure prepared by femtosecond laser[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(9): 1057-1064(in Chinese).
- [6] QI L T, LI X, LIU Y Sh. Process and mechanism for sapphire ablation by single-pulse 266nm solid-state laser[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2020, 30(4): 416-421(in Chinese).
- [7] FU Q, ZHANG F, JIANG M, *et al.* Study on technology and quality of etching copper clad laminate with 1064nm and 355nm laser[J]. Laser Technology, 2014, 38(4): 435-440(in Chinese).
- [8] QI L T. Different wavelength solid-state laser ablation of silicon wafer in vacuum[J]. Chinese Optics, 2014, 7(3): 442-448(in Chinese).

- [9] ZHANG X C, QIAN J, LIU J, *et al.* Recent process in laser processing of fiber-reinforced composites[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111432(in Chinese).
- [10] TAN C W, SU J H, FENG Z W, *et al.* Research status and development on laser joining of metal to plastic[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6): 85-94(in Chinese).
- [11] SRINIVASAN R, MAYNEBANTON V. Self-developing photoetching of poly(ethylene terephthalate) films by far-ultraviolet excimer laser radiation[J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 41(6): 576-578.
- [12] SUTCLIFFE E, SRINIVASAN R. Dynamics of UV laser ablation of organic polymer surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(9): 3315-3322.
- [13] D' COUTO G C, BABU S V. Heat transfer and material removal in pulsed excimer-laser-induced ablation: Pulsewidth dependence[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(5): 3052-3058.
- [14] YALUKOVA O, SARADY I. Investigation of interaction mechanisms in laser drilling of thermoplastic and thermoset polymers using different wavelengths[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 66(10): 1289-1296.
- [15] WANG J, ZHOU L, FU H T, *et al.* Experimental study on ultraviolet laser drilling of polystyrene[J]. *Electromachining & Mould*, 2019, 348(4): 54-57(in Chinese).
- [16] WU P, FAN Y R, GUO J W, *et al.* High reflectivity aluminum film processed by nanosecond pulse laser[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(6): 779-783(in Chinese).
- [17] XIE X Zh, HUANG X D, CHEN W F, *et al.* Study on scribing of sapphire substrate by pulsed green laser irradiation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1203010(in Chinese).
- [18] GUO M Ch, WANG M D, ZHANG Sh J, *et al.* Techniques for femtosecond laser processing of micro-holes in FR-4 copper clad laminate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1202008(in Chinese).
- [19] ZHANG Y J, FANG M G. The research of the ceramic drilling by Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(3): 161-162(in Chinese).
- [20] CHEN K H, WU W, CHU B H, *et al.* UV excimer laser drilled high aspect ratio submicron via hole[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 256(1): 183-186.
- [21] SONG Y Q, WEI X, XIE X Zh, *et al.* The detection analysis methods of photochemical effect in laser processing[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2011, 25(4): 59-63(in Chinese).
- [22] ZHANG Q L, CHU Ch L, ZHAI J Ch, *et al.* Surface characteristics formation mechanism of the ablated monocrystal-line Si by a UV nanosecond pulsed laser[J/OL]. (2021-04-29) [2021-09-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20210429.1136.034.html> (in Chinese).