

文章编号 1004-924X(2018)07-1653-08

高质量玻璃微孔电化学放电加工模型及试验

刘 勇^{*}, 魏志远, 邓世辉, 李松松

(山东大学 力学与机电装备联合工程技术研究中心, 山东 威海 264209)

摘要:超白玻璃是一种超透明低铁玻璃,因其具有优越的物理、光学性能,而广泛应用于精密电子、高档汽车及太阳能光伏发电领域。由于其本身的硬脆特性,玻璃微孔的出口极易破损,为提高玻璃微孔的加工定域性,降低微孔出口破损的可能性,对微细电化学放电钻削加工工艺进行了研究与优化。首先,根据电化学放电原理,探讨了气膜的形成和材料去除机理,分析了放电能量对玻璃微孔加工工艺的影响,建立了单位时间电化学放电加工能量控制模型;其次,试验分析了电压幅值、占空比、脉冲频率、进给速度等主要参数对微孔入口直径和出口质量的影响;最后,通过优化后的加工参数在厚度为 300 μm 的超白玻璃试件上,成功加工得到入口直径为 172 μm 、出口直径为 167 μm 的 3×3 微孔阵列结构,出口无破损现象。实验结果表明,基于脉冲能量控制的微细电化学放电钻削工艺在玻璃微孔加工方面很有潜力。

关键词:电化学放电加工;超白玻璃;微孔;放电能量

中图分类号:V261.5;TG661 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182607.1653

Electrochemical discharge machining of glass micro-holes with high-quality

LIU Yong^{*}, WEI Zhi-yuan, DENG Shi-hui, LI Song-song

(Associated Engineering Research Center of Mechanics & Mechatronic Equipment,
Shandong University, Weihai 264209, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: rzliuyong@163.com

Abstract: Ultra-white glass is a kind of transparent low-iron glass. Owing to its excellent physical and optical properties, it is widely used in many fields such as precision electronics, luxury automobiles, and solar photovoltaic power generation. Because of its hard and brittle characteristics, the outlets of glass micro-holes are easily damaged. In order to improve the machining localization of glass micro-holes and reduce the possibility of micro-hole outlet damage, the micro electrochemical discharge drilling process was studied and optimized. Firstly, according to the principle of electrochemical discharge, the film forming mechanism and the material removal mechanism were discussed, the influence of discharge energy on the micro-holes machining technology of glass was analyzed, and an energy control model of electrochemical discharge was established. Secondly, according to the experiment, the influence of pulse voltage, frequency, and feed rate on the inlet diameter and outlet quality of the micro-holes was analyzed. Finally, the optimized parameters were chosen to fabricate a 3×3 high quality glass micro holes array with an inlet diameter of 172 μm and an outlet diameter of 167 μm on an ultra-white glass workpiece with a thickness of 300 μm ; the outlets exhibited no signs of

收稿日期:2017-11-23;修订日期:2018-01-20.

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2018MEE018);国家自然科学基金资助项目(No. 51305238);中国博士后基金资助项目(No. 2018M630772);山东大学(威海)青年学者未来计划资助项目(No. 2015WHWLJH03)

damage. The experimental results show that under the control of the discharge energy, micro electrochemical discharge drilling technology has great potential in glass micro-hole machining.

Key words: electrochemical discharge machining; ultra-white glass; micro-hole; discharge energy

1 引言

在科技迅速发展的今天,越来越多的非导电硬脆难加工材料被应用在航空航天、国防、医疗器械领域。这些材料具有高硬度、高脆性、高抗氧化性、耐磨损、耐腐蚀、绝缘、透明以及生物相容性等优良属性,广泛应用于微加速度计、微流量传感器、微反应容器、微型泵和生物医疗器械中^[1]。由于非导电硬脆材料本身的属性,传统机械加工玻璃非常困难^[2],因此,人们提出了磨料流加工、水射流加工、激光加工、超声加工等非传统加工方法。然而,这些加工方法存在表面质量差、热影响区大等问题。为了克服这些局限,众多学者探索了喷射液束电解-激光复合加工,电化学放电加工(Electrochemical Discharge Machining, ECDM)等复合加工技术^[3-4]。

利用电化学放电在非导电硬脆材料上加工微孔的方法最初由日本学者提出,随后这一加工方法在微细加工领域受到了广泛关注,众多科研工作者对这种加工方法进行了研究。韩国学者 K. Nguyen 等人基于对电化学放电加工条件的研究,在石英材料上铣削微槽,讨论了电解液液位、电解液浓度、脉冲电压、脉冲上升沿、脉冲下降沿和刀具进给速度对微细 ECDM 的影响^[5]。美国学者 B. Y. Jiang 等人在试验中将放电模型与实际放电现象进行比较,分析了分离气泡的流体动力特性^[6]。印度学者 S. Singh 等人分析了各参数对铣削加工中材料去除率的影响,根据 Taguchi 方法的 L9 正交阵列实验,在玻璃工件上进行试验,得出电压、电极间隙和电解液浓度等参数对铣削加工的影响^[7]。印度学者 S. V. Dafade 等人利用方差分析法研究了电化学放电加工参数(电压、工具工件间隙、刀具旋转速度)对材料去除率(Material Removal Rate, MRR)的影响。实验结果表明,电压对 MRR 影响最大^[8];印度学者 S. K. Chak 等人强调理解放电发生机制的重要性。研究结果的一个重要方面是 ECDM 非常依

赖于工件材料(玻璃、陶瓷、石英或者复合材料)。参数如脉冲持续时间、脉冲宽度也可能改变材料去除的机理,从而影响加工特性^[9]。台湾学者 Y. S. Laio 等人发现在电化学放电加工石英时,电解液中加入十二烷基硫酸钠可增加电流密度,工具电极周围产生更多气泡^[10]。印度学者 V. G. Ladeesh 等人探讨加工参数对磨削辅助 ECDM 钻孔的影响,发现由于缺少足够的时间散热,高占空比(0.6 以上)和高频率(高于 4 000 Hz)将产生高的热应力,可能会在工件上产生热裂纹^[11]。伊朗学者 S. Elhami 等人研究了电化学放电过程中单次放电的模式,采用特殊的结构和设备提供超声振动,并只产生单次放电,超声振动的应用改变了电流信号模式,提高了放电次数,使材料去除率提高了 35%,而刀具磨损减少了 3%~14%^[12]。南京航空航天大学的吴俊杰等人提出一种在电解液中加入导电粉末加工非导电材料的方法,可高效地加工非导电硬脆材料的表面,并获得较好的表面质量^[13]。山东大学的刘勇等人探讨了采用线 ECDM(使用螺旋电极作为工具电极)切割玻璃工件过程中电压、频率、占空比、主轴转速等加工参数对侧面间隙的影响,并使用该方法得到了复杂的封闭结构^[14]。上海交通大学的孙艳琪等人提出了基于力反馈控制进给速度的 ECDM 系统,分析了力反馈进给的 ECDM 机理。力反馈进给 ECDM 改善孔的入口质量,提高加工速度,并获得了较大的极限加工深度,孔的锥度也明显减小^[15]。孙艳琪还提出倒置 ECDM 方法,采用工件在上工具电极在下的布局,有利于形成稳定的气膜,维持该区域的放电加工,同时工具电极的旋转运动有利于工作液更新以及加工屑的排出^[16]。江苏大学的张朝阳等人探讨在不同加工条件下 ECDM 加工玻璃的临界电压,测量电流信号分析成膜时间和放电平均电流,总结出在微孔加工中,通过控制各加工参数,可获得更好的加工精度和表面质量^[17]。江苏大学的黄磊探讨了 ECDM 机理,而后基于火花放电效应搭建了试验平台,并分别对玻璃微孔、微槽和三维微细结构进行了试验

研究,得到电源电压和电源频率分别为 21 V 和 600 Hz 时进行加工,可以获得较为理想的微孔^[18]。

本文针对 ECDM 加工微孔易出现出口破损的问题,探讨了 ECDM 机理,建立了单位时间平均放电能量的控制模型,分析了影响放电能量的主要因素,设计不同参数(电压幅值,占空比,脉冲频率,进给速度)下 ECDM 加工玻璃微孔的试验,分析了不同参数对微孔入口孔径和出口质量的影响,并对加工参数进行了优化,最终解决了出口破损问题并提高了微孔加工的定域性。

2 加工原理及放电能量控制模型

2.1 加工原理

在 ECDM 加工非导电硬脆材料的过程中,加工系统包括脉冲电源、辅助阳极、工具电极、工件和电解液,电源正极接通辅助阳极,电源负极接通工具电极,辅助阳极和工具电极浸泡在电解液中。加载电压后,工具电极表面发生电解反应析出氢气,随着加载电压的增大,气体生成量也逐渐增加,小气泡聚集成大气泡,最终在工具电极周围形成气膜,工具电极与电解液之间在短时间内绝缘。当电压值升高到临界值时,工具电极击穿气膜对周围的电解液产生火花放电,当工件位置足够靠近工具电极,火花放电瞬间产生的高温作用于工件表面,通过放电产生的瞬时高温和冲击去除周围的工作材料。放电结束后,气膜被击穿,工具电极与电解液相接触,由于电解作用,在工具电极周围形成大量气泡,进而形成气膜,开始下一次放电。工具电极持续进给,最终完成微孔加工。图 1 所示为电化学放电加工原理示意图。

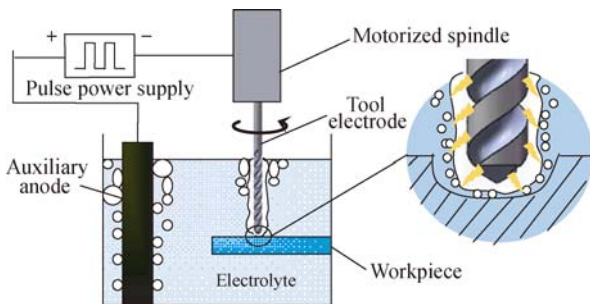


图 1 电化学放电加工原理图

Fig. 1 Mechanism sketch of electro-chemical discharge machining

2.2 放电能量控制模型的建立

在 ECDM 中,微孔入口直径和出口质量决定了加工精度,为了提高加工精度,减小入口直径,降低出口破损的可能性,本文采用脉冲电源进行加工。ECDM 过程复杂,随机性强。为了研究各参数对微孔入口直径和出口质量的影响,建立单位时间平均放电能量模型。

电解过程中有气泡生成,气泡在浮力和表面张力共同作用下形成气膜。当电压突破临界电压时,在电极与电解液之间就会发生放电现象,单次放电能量 $Q^{[19]}$ 可表示为:

$$Q = \int_0^t UI dt, \quad (1)$$

式中: U 为加载电压, I 为放电电流, t 为放电持续时间。单次放电过程因形成气膜差异而存在差别,峰值电流也不尽相同,所以可以通过计算单位时间内的平均电流 $I^{[20]}$ 反应加工情况:

$$I \cong \lambda_d A q \tau, \quad (2)$$

式中: λ_d 为单位时间的放电次数, A 为放电面积, q 为电荷量, τ 为时间常数。在 τ 不变的情况下,脉冲频率越高,脉冲周期越小,电解与形成气膜时间越短,气膜越难形成。气膜两端电压近似为 U , 则可得单位时间的平均放电能量为:

$$q_i = UI \cong \lambda_d A q \tau U. \quad (3)$$

靠近放电气膜的工件表面吸收热量,融化脱落,融化物质的量为:

$$n \cong \frac{q_i}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: λ 为超白玻璃的熔解热。则熔化的物质体积为:

$$V \cong \frac{n \cdot M}{\rho}, \quad (5)$$

式中: M 为超白玻璃的摩尔质量, ρ 为超白玻璃的密度。假设微孔无锥度,则微孔直径为:

$$d \cong \sqrt{\frac{M \lambda_d A q \tau U}{\pi L \rho \lambda}}, \quad (6)$$

式中: $L = 300 \mu\text{m}$, 为超白玻璃厚度。在已知融化物质体积的情况下,蚀除速度为:

$$v_t = \frac{\Delta V}{\pi d^2 \Delta t}. \quad (7)$$

由式(6)可知,在加工材料以及电解液条件相同的情况下,入口直径随着脉冲信号的峰值电压的增大而增大;由式(1)可知,单次放电能量随着电压幅值、电流以及放电时间的增大而增大。单

次放电能量越大, 蚀除速度越大, 进给速度需要与蚀除速度保持一致才能稳定加工; 当进给速度滞后于蚀除速度, 加工间隙会逐渐增大, 导致蚀除速度逐渐降低, 二者趋于平衡, 最终达到平衡稳定间隙, 实现稳定加工。

微孔出口是一层极薄的玻璃, 机械接触或巨大的放电冲击力都会导致出口破损。本文认为放电能量与微孔出口质量存在如下关系: 一方面, 能量不足, 工件吸收热量后, 温度难以上升至熔点, 即不能通过熔化进行蚀除, 随着工具电极的进给运动, 工具电极与工件势必会发生机械接触, 产生接触力, 导致出口破损, 这也适用于进给速度过大的情况; 另一方面, 能量过大, 在放电过程中会发生局部微爆炸, 产生冲击力, 当冲击力超过玻璃的抗冲击强度时也会导致出口破损, 所以适当的脉冲放电能量是保证玻璃微孔出口不出现破损的关键。

3 试验安排与分析

试验工件材料选用厚度为 $300\ \mu\text{m}$ 的超白玻璃; 电化学放电加工产生高温, 工具电极选择直径为 $100\ \mu\text{m}$ 的螺旋柱状碳化钨(WC)电极(抗高温, 不易损耗); 电解液选择 $3\ \text{mol/L}$ 的 KOH 溶液^[21]; 主轴转速为 $3\ 000\ \text{r/min}$ ^[22](通过电极的旋转, 能够促进有效电解液的更新和废物的排出, 从而使电化学放电加工过程有一个稳定的流场环境); 电解液浸没工件深度为 $800\ \mu\text{m}$ 。为使试验数据更具普遍性和真实性, 每组讨论参数重复试验至少 3 次, 并求数据均值。加工结束后, 使用 Nikon SMZ1270 光学体式显微镜(平行光学系统, 提供 $12.7\times(0.63-8\times)$ 同等级最高变倍比)进行加工结果的图像和数据测量。本文主要研究了电化学放电钻削时电压幅值、占空比、脉冲频率、进给速度对微孔入口直径和出口质量的影响。

3.1 电压幅值对入口直径和出口质量的影响

本试验主要探讨电压幅值对微孔入口孔径和出口质量的影响, 图 2 所示为入口直径随电压幅值的变化关系。试验中占空比为 70% , 脉冲频率为 $3\ 000\ \text{Hz}$, 进给速度为 $1\ \mu\text{m/s}$, 电压幅值在 $35\sim 41\ \text{V}$ 变化。从图中可以看出, 随着电压幅值

的增大, 入口直径也逐渐增大, 试验结果与式(6)体现的规律一致, 所以通过控制电压幅值可以控制入口直径。

图 3 所示为出口质量随电压幅值的变化关系, 从图中可以看出, 在 $37\ \text{V}$ 时, 出口没有出现明显破损, 但电压太小($35\ \text{V}$)或电压太大($45\ \text{V}$), 出口都出现了不同程度的破损。根据式(1)与试验结果可以得知, 在 $35\ \text{V}$ 时脉冲放电能量不足, 工件的熔化速度滞后于进给速度, 工件与工具电极产生机械接触, 最终导致出口破损; 而在 $45\ \text{V}$ 时脉冲放电能量产生的冲击力超过工件的抗冲击强度, 导致出口破损, 两种情况都增加了微孔出口破损的可能性。所以, 电压的选择要在保证出口不出现破损的同时使微孔具有较高的加工定域性。

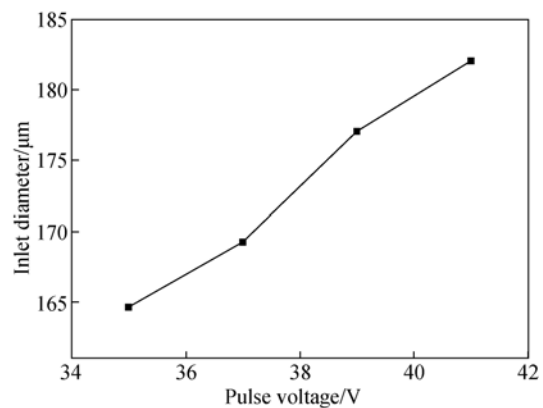


图 2 电压对入口直径的影响

Fig. 2 Effect of pulse voltage on inlet diameter

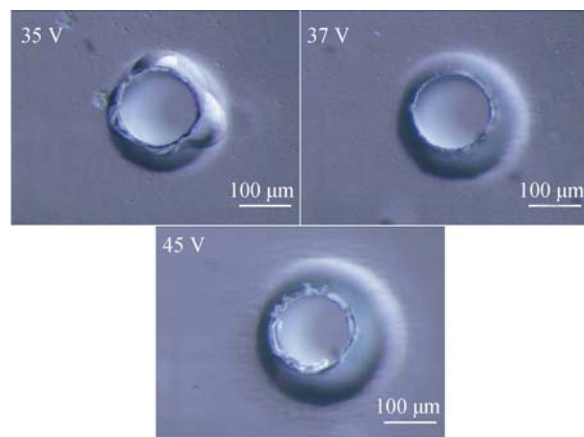


图 3 电压对出口质量的影响

Fig. 3 Effect of voltage on outlet quality

3.2 占空比对入口直径和出口质量的影响

本试验主要探讨占空比对微孔入口直径和出口质量的影响。图4所示为入口直径随占空比的变化关系,试验中电压幅值为37 V,脉冲频率为3 000 Hz,进给速度为1 $\mu\text{m}/\text{s}$,占空比在60%~90%之间变化。从图中可以看出随着占空比的增大,入口直径也逐渐增大。由于占空比的增大,单位时间的平均放电能量增大,加工间隙内的温度上升,从而导致材料去除率升高。所以,在加工过程中,可以通过控制占空比的大小控制微孔入口直径的大小。

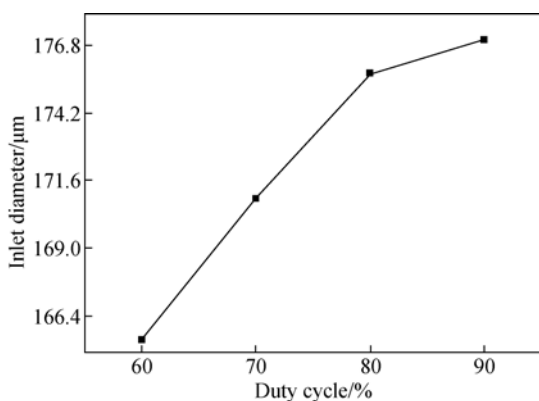


图4 占空比对入口直径的影响

Fig. 4 Effect of duty cycle on inlet diameter

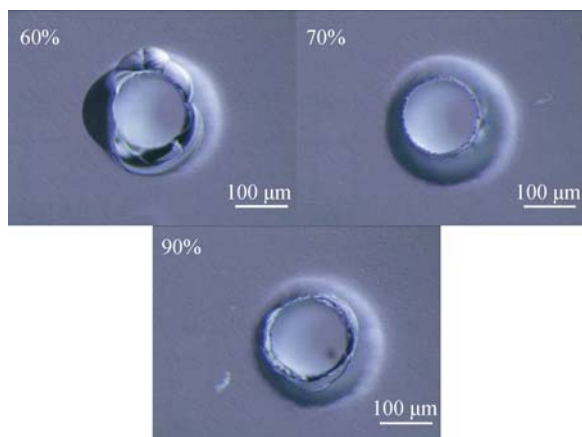


图5 占空比对出口质量的影响

Fig. 5 Effect of duty cycle on outlet quality

图5所示为出口质量随占空比的变化关系,从图中可以看出,占空比在60%和90%条件下,出口出现明显破损,而在70%条件下没有出现破

损。占空比增大,单次放电时间增大,根据式(1),单次放电能量也会增大。在电化学放电加工工件的过程中,放电能量超过一定限度,产生冲击力;放电能量不足,在工件与工具电极之间产生机械接触,两种情况都会导致出口破损。

3.3 脉冲频率对入口直径和出口质量的影响

本试验主要探讨脉冲频率对微孔入口直径和出口质量的影响。图6所示为入口直径随脉冲频率的变化关系,试验中电压幅值为37 V,占空比为70%,进给速度1 $\mu\text{m}/\text{s}$,脉冲频率在1 000~4 000 Hz之间变化。从图中可以看出随着脉冲频率的增大,入口直径逐渐减小。随着脉冲频率的增大,单位时间内放电次数增加,单位时间的平均放电能量增大,但是脉冲周期减小,单个脉冲放电能量减少,单次放电蚀除量减小,提高了电化学放电加工的定域性。因此,通过控制脉冲频率的大小可以控制微孔入口直径的大小。

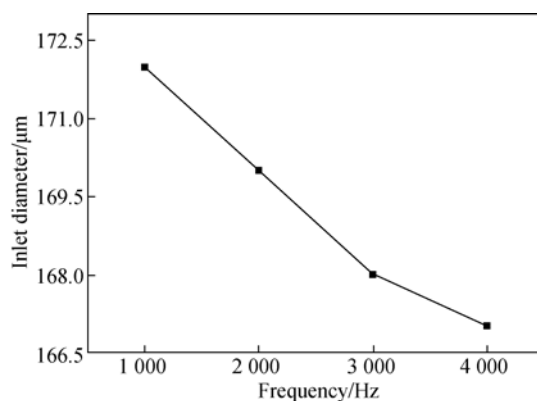


图6 脉冲频率对入口直径的影响

Fig. 6 Effect of pulse frequency on inlet diameter

图7所示为出口质量随脉冲频率的变化关系,从图中可以看出,脉冲频率为5 000 Hz时,微孔出口出现明显破损,而在另外两组较低脉冲频率的条件下,微孔出口均未破损。在脉冲频率较低的情况下,单个脉冲时间内足够发生放电来加工工件;而脉冲频率超过一定限度,导致脉冲宽度变小,单个脉冲能量减小,单次放电能量减小,单次放电能量不足以溶解工件时,工具电极与工件表面产生接触力,最终导致出口破损。

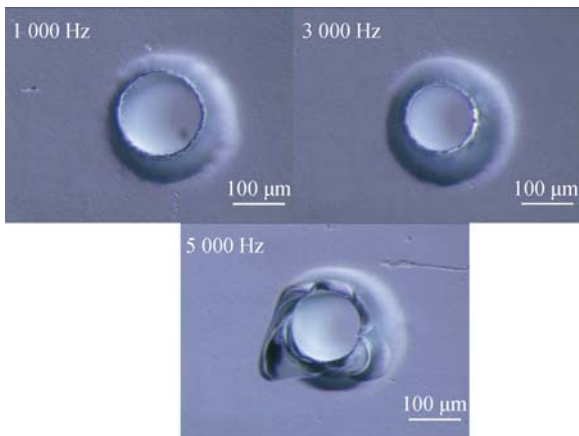


图 7 脉冲频率对出口质量的影响

Fig. 7 Effect of pulse frequency on outlet quality

3.4 进给速度对入口直径和出口质量的影响

本试验主要探讨进给速度对微孔入口直径和出口质量的影响。图 8 所示为入口直径随进给速度的变化关系,实验中电压幅值为 37 V,占空比为 70%,脉冲频率为 3 000 Hz,进给速度在 0.5~2.0 $\mu\text{m}/\text{s}$ 之间变化。从图中可以看出随着进给速度的增大,入口直径逐渐减小。在只改变进给速度的情况下,同样厚度的工件,进给速度增大,加工时间缩短,二次放电次数减少,总蚀除量减少,微孔入口直径减小。所以通过控制进给速度的大小可以控制微孔入口直径的大小。

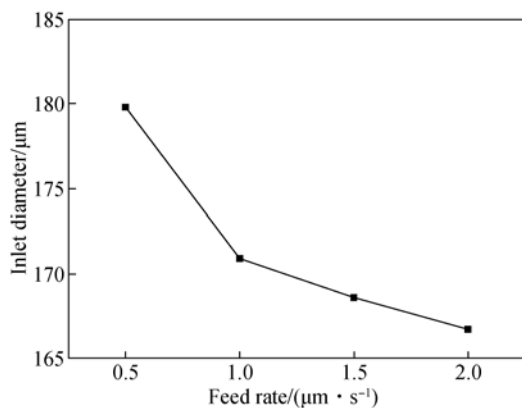


图 8 进给速度对入口直径的影响

Fig. 8 Effect of feed rate on inlet quality

图 9 所示为出口质量随进给速度的变化关系,从图中可以看出,在进给速度为 0.5 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的情况下,出口没有破损,但是出现热裂纹,说明加工时间过长,微孔出口粗糙;在 1.0 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的情况下,出口没有破损且出口质量较好;2.0 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时,出口大面积破损。参照式(7),在加工电参数选定

后,蚀除速度 v_r 随之确定,进给速度超过一定限度,工具电极与工件加工表面发生机械接触,产生接触力,导致出口破损。

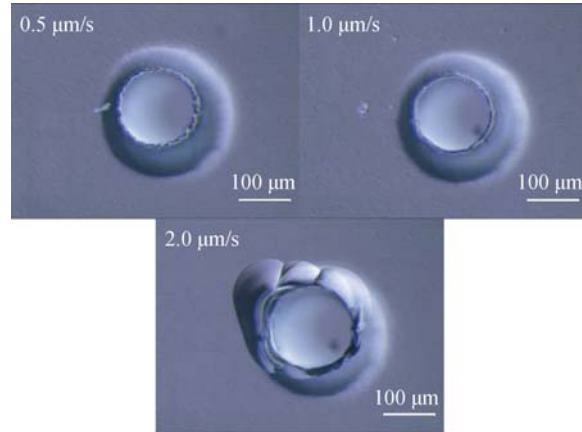


图 9 进给速度对出口质量的影响

Fig. 9 Effect of feed rate on outlet quality

4 试验结果

在本文建立的放电能量控制模型的指导下,结合第 3 节的分析结果,为了获得良好的加工定域性和加工质量,选取一组较优化的工艺参数加工出入口直径、出口直径分别为 172 μm 和 167 μm 的 3×3 高质量玻璃微孔阵列,阵列微孔的入口和出口整体与局部放大图如图 10 所示。

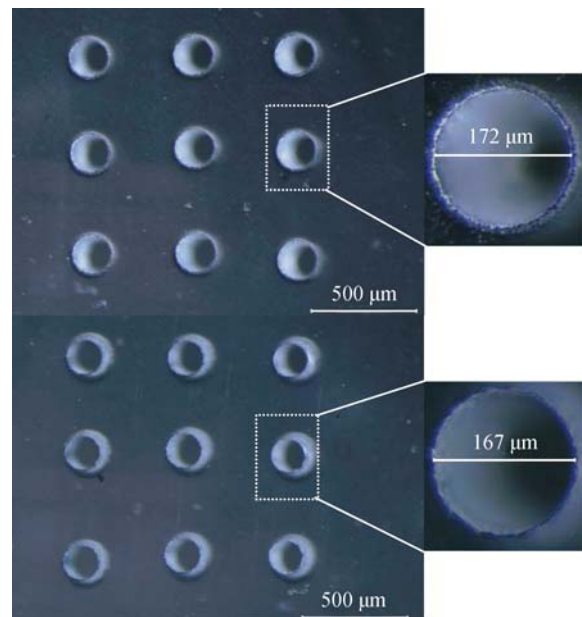


图 10 阵列微孔入口和出口及局部放大

Fig. 10 Inlet and outlet of array micro-holes and partial magnification

5 结论

本文提出了电化学放电加工能量控制模型,研究了不同加工参数对电火花放电加工玻璃微孔的入口直径和出口质量的影响规律。首先建立了电火花单位时间的平均放电能量计算模型,能够定性分析加工参数与入口直径、出口直径之间的关系,并通过试验验证了模型的正确性。试验结果表明:电压幅值和占空比越大,单位时间的平均

放电能量越大,微孔入口直径越大。同时,电压幅值和占空比需控制在一定范围内,单位时间的平均放电能量太大或者太小均会增大微孔出口破损的可能性;脉冲频率越大,电火花放电加工微孔的加工定域性越好,入口直径越小,但过高的脉冲频率会增大微孔出口破损的几率;进给速度越大,微孔入口直径越小,但进给速度不能高于蚀除速度,这样才能保证工具电极与工件之间不会发生机械接触,从而降低微孔出口破损的几率。本文的研究对玻璃微孔结构的高质量加工提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] ZHANG Z P, CHENG W H, HUANG F Y, *et al.*. 3D microstructuring of pyrex glass using the electrochemical discharge machining process [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(5): 960-966.
- [2] 郑锦华, 吴双, 魏新熙, 等. 研磨抛光表面微孔结构的形成[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 788-795.
ZHENG J H, WU SH, WEI X X, *et al.*. Formation of surface micro-pore texture by grinding and polishing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 788-795. (in Chinese)
- [3] 饶小双, 张飞虎, 刘立飞, 等. 电火花机械复合磨削反应烧结 SiC 陶瓷的表面特征[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2192-2199.
RAO X SH, ZHANG F H, LIU L F. Surface characteristics for RB-SiC ceramics by electrical discharge diamond grinding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2192-2199. (in Chinese)
- [4] 沈剑云, 陈剑彬, 鲁浪, 等. 径向超声振动辅助锯切光学玻璃[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1615-1622.
SHEN J Y, CHEN J B, LU L, *et al.*. Sawing of optical glass assisted with ultrasonic vibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1615-1622. (in Chinese)
- [5] NGUYEN K, LEE P A, KIM B H, *et al.*. Experimental investigation of ECDM for fabricating micro structures of quartz [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(1): 5-12.
- [6] JIANG B Y, LAN S H, WILT K, *et al.*. Modeling and experimental investigation of gas film in micro-electrochemical discharge machining process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 90(3): 8-15.
- [7] SINGH S, MITTAL S, MUKHEJA J, *et al.*. Optimization of material removal rate using electrochemical discharge machining for slotting operation [J]. *International Journal of Scientific Research and Engineering Studie*, 2015, 2(3): 113-117.
- [8] DAFADE S V, WAGHMARE C A. Optimization of process parameters in Electrochemical Discharge Machining (ECDM) [J]. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 2015, 2(16): 1339-1343.
- [9] CHAK S K. Electrochemical discharge machining discharge generation: a review [J]. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 2015, 2(10): 49-53.
- [10] LAIO Y S, WU L C, PENG W Y. A study to improve drilling quality of electrochemical discharge machining(ECDM) process [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 609-614.
- [11] LADEESH V G, MANU R. Grinding aided Electrochemical Discharge Drilling (G-ECDD) of borosilicate glass and its performance evaluation [J]. *Procedia Technology*, 2016, 25: 1122-1128.
- [12] ELHAMI S, RAZFAR M R. Effect of ultrasonic vibration on the single discharge of electrochemical discharge machining [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2017, 33(4): 444-451.
- [13] 吴俊杰, 谷安, 吕传伟, 等. 混粉电解电火花复合加工工艺研究[J]. *电加工与模具*, 2012(5): 64-66.
WU J J, GU A, LÜ CH W, *et al.*. Research on power-mixed electrochemical discharge machining process [J]. *Electromachining & Mould*, 2012(5): 64-66. (in Chinese)
- [14] LIU Y, WEI Z Y, WANG M Y, *et al.*. Experimental investigation of micro wire electrochemical discharge machining by using a rotating helical tool

- [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 265-271.
- [15] 孙艳琪,唐伟东,康小明,等. 基于力反馈控制进给的电化学放电加工方法[J]. *电加工与模具*, 2015(3): 31-36.
SUN Y Q, TANG D W, KANG X M, *et al.*. Electrochemical discharge machining method based on force feedback feeding [J]. *Electromachining & Mould*, 2015(3): 31-36. (in Chinese)
- [16] 孙艳琪. 绝缘硬脆材料电化学放电加工关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
SUN Y Q. *Key Technologies For Ecdm Machining Of Non-Conductive Hard And Brittle Materials* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [17] ZHANG Z Y, HUANG L, JIANG Y J, *et al.*. A study to explore the properties of electrochemical discharge effect based on pulse power supply [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016,85(9): 2107-2114.
- [18] 黄磊. 基于电化学放电加工工艺的玻璃微细加工研究[D]. 江苏:江苏大学, 2016.
HUANG L. *Research of Micro-machining of Glass Based on Electrochemical Discharge Machining* [D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [19] 刘庆明,汪建平,李磊,等. 电火花放电能量及其损耗的计算[J]. *高电压技术*, 2014,40(4): 1255-1260.
LIU Q M, WANG J P, LI L, *et al.*. Calculation of electric spark discharge energy and its energy loss [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(4): 1255-1260. (in Chinese)
- [20] WÜTHRICH R, ABOUZIKI J D. *Micromachining Using Electrochemical Discharge Phenomenon* [M]. Second Edition. US: Elsevier, 2015;84-88.
- [21] CAO X D, KIM B H, CHU C N. Micro-structuring of glass with features less than 100 μm by electrochemical discharge machining[J]. *Precision Engineering*, 2009,33(4): 459-465.
- [22] 王明宇. 玻璃微结构电解电火花加工关键技术研究[D]. 山东:山东大学, 2017.
WANG M Y. *Study on Key Technology of Micro Electrochemical Discharge Machining for Glass Microstructures* [D]. Shandong: Shandong University, 2017. (in Chinese)

作者简介:



刘 勇(1982—),男,山东日照人,博士,副教授,硕士生导师,2011年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事精密、微细特种加工方面的研究。
E-mail: rzliuyong@163.com



魏志远(1994—),男,内蒙古锡林浩特人,硕士研究生,2016年于山东大学获得学士学位,主要研究方向为精密、微细电解电火花加工技术。E-mail: 18369189101@163.com