

文章编号 1004-924X(2018)06-1407-08

旋转电极电解电火花切割玻璃微结构试验研究

刘 勇*, 魏志远, 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:针对高深宽比非导电硬脆材料(如石英玻璃和陶瓷)微结构的加工需求,对微细电解电火花切割加工方法进行了深入研究。首先,提出了使用旋转螺旋微工具电极的电化学放电切割方法,并对切割缝宽模型进行了讨论;其次,对旋转螺旋电极电解电火花切割加工工艺进行了深入的试验研究,试验研究了加工电压、脉冲频率、占空比和主轴转速这些关键工艺参数对切割加工精度的影响。实验结果表明,缝宽随着施加电压和占空比的增加而增加,随着频率、主轴转速和进给速率的增加而减小。最后,通过优化后的参数成功加工出缝宽为 135 μm 的微缝阵列、复杂的封闭微结构以及深宽比达 6:1 的微图形结构。由此表明该方法是一种可有效加工高深宽比绝缘硬脆材料微结构的新工艺。

关键词:电化学放电切割加工;石英玻璃;旋转螺旋工具;高深宽比微结构;封闭结构

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182606.1407

Electrochemical discharge cutting of glass microstructures with rotating electrodes

LIU Yong*, WEI Zhi-yuan, LI Song-song

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

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

Abstract: An in-depth study of the method of wire electrochemical discharge machining was carried out for fabricating microstructures on non-conductive brittle materials such as quartz glass and ceramics. First, the method of wire electrochemical discharge machining with a rotating spiral tool was proposed and the slit width model was established. Next, the experimental process was studied, and the influence of many key machining parameters such as the voltage, pulse frequency, duty ratio, and spindle speed on the machining accuracy was discussed in detail. The experimental results indicate that the slit width increases with an increase in the applied voltage and duty ratio and decreases with an increase in the frequency, spindle speed, and feed rate. A micro-slit array with a slit width of 135 μm and complex closed microstructures and micrographic structures with an aspect ratio of 6:1 were successfully machined by optimizing the parameters for quartz glass. Therefore, this method may prove to be an effective new technology for machining high-aspect-ratio microstructures on non-conductive, hard, and brittle materials.

收稿日期:2017-10-16;**修订日期:**2017-12-14.

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(No. 2R2018MEE018);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)

Key words: electrochemical discharge cutting; quartz glass; rotating spiral tool; high-aspect-ratio microstructures; closed structure

1 引言

随着科学技术的发展,对高强度、高耐热性和高耐腐蚀性的先进工程材料的需求不断增加。先进的工程材料包括玻璃(石英)、陶瓷和氮化硅等。其中,玻璃具有透明性、生物相容性和低导电性能,被广泛应用于微机电系统(MEMS)中,如微加速计、微流控传感器、微型泵、微容器和生物医疗等^[1]。然而,由于非导电硬脆材料的特性,通过传统方法加工玻璃是比较困难的,众多学者尝试使用特种加工方法加工玻璃^[2-3]。电化学放电加工(Electrochemical Discharge Machining, EC-DM)已被证明是一种加工非导电硬脆材料的有效方法^[4-7]。在 EC-DM 中,电化学反应在工具电极周围形成绝缘气体膜。当施加的电压高于临界值时,由于气体膜的隔离,在工具电极和电解质之间发生放电,放电产生的高温使工件熔化和蒸发并加剧其化学腐蚀。电化学放电切割加工(Wire Electrochemical Discharge Machining, WECDM)工艺在 EC-DM 工艺中使用电极丝作为工具电极,非常适于加工高深宽比的非导电硬脆材料微结构,如薄壁、微缝和复杂图案。

近些年来,国内外学者对 WECDM 进行了深入的研究。Han 在电化学放电切割玻璃的工艺中使用了表面纹理工具^[8]。Kuo 等提出了一种滴定电解液的 WECDM 加工方法,他们发现适当的电解液滴定速度可以提高加工的质量和效率^[9],通过混粉的方式改善了 WECDM 加工玻璃的表面质量^[10]。Bhuyan 和 Yadava 提出了一种用于走丝电化学放电加工(Travelling Wire Electrochemical Spark Machining, TW-ECSM)建模和优化的方法,且进行了大量实验来研究 TW-ECSM 加工硼硅玻璃的加工性能^[11-12]。Malik 和 Manna 介绍了使用 TW-ECSM 加工玻璃纤维环氧复合材料的加工结果^[13]。Rattan 和 Mulik 在电解液中加入磁场,改善电解液循环和提高 TW-ECSM 加工过程中材料的去除率^[14]。蒋毅等人利用 WECDM 技术对玻璃进行了微细线切割研究,讨论了加工中 U-I 曲线与微细电极丝放电长

度之间的关系,研究发现增大加工电压可得到更高的材料去除率,但会降低加工精度和表面质量^[15]。李其等人搭建了水平走丝的电化学放电切割装置,研究了加工电压在火化区和电弧区的加工性能^[16],提出了润湿供液方式,并对步进进给和匀速进给进行了对比研究^[17]。学者们通过各种方法来增强 EC-DM 和 WECDM 过程中的电解液更新,通过增强电解质更新能够获得良好的加工质量^[14,18-19]。Fang 等利用旋转螺旋电极提高电解线切割加工(Wire Electrochemical Machining, WECM)的加工性能,并进行了大量的仿真和试验,以证明旋转螺旋电极可以提高电解质的更新^[20]。

本文提出在 WECDM 加工中采用旋转螺旋工具电极对玻璃进行切割加工。试验中,使用直径为 100 μm 的旋转螺旋电极来研究施加电压、频率、占空比及旋转速度等参数对 WECDM 加工精度的影响。通过该方法成功在 300 μm 厚的玻璃工件上加工出微缝阵列和复杂封闭微结构;在超过 1 000 μm 厚的玻璃工件上加工出深宽比达 6 : 1 的微缝复杂图案结构。

2 试验平台设计

本文建立了改进的 WECDM 试验平台,以研究使用旋转螺旋工具电极的电化学放电切割的加工性能。试验装置的加工原理示意图如图 1 所示,试验系统如图 2 所示。该系统由电源、微型工具电极、电解液槽、控制系统和监测系统等组成。电源是在 0~120 V 内的脉冲电源(RGMC-120/5 / 100K)。脉冲电源的频率(0~100 kHz)和占空比(0~100%)可根据加工要求进行调节。加工时通过示波器来监测电压和电流。

微型工具电极采用螺旋钻头,并固定在旋转的 C 轴上,C 轴固定在移动滑台的 Z 轴上。工件浸没在电解液中,并通过固定装置固定在电解槽上。辅助电极浸没在电解液中并与阳极连接。电解液槽固定在升降平台,随直线 X 轴和 Y 轴一起移动。移动滑台的 X 轴、Y 轴、Z 轴和旋转 C 轴由控制系统控制,主轴转速和进给速度可以在控

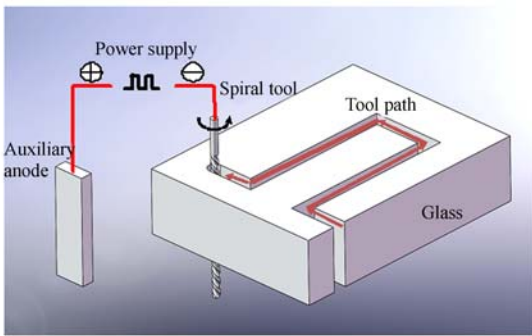


图1 使用旋转螺旋电极的电解放电切割加工原理
Fig.1 Principle of electrochemical discharge machining with rotating spiral electrode

制界面中设置。监测系统用来监测加工过程和观察实验现象。



图2 使用旋转螺旋电极的电解放电加工试验系统照片
Fig.2 Photo of electrochemical discharge machining system with rotating spiral electrode

本文使用旋转螺旋电极在玻璃材料上进行了一系列电化学放电切割试验。加工前,将玻璃切片超声清洗干净。本文选用氢氧化钾(KOH)溶液作为电解液,辅助电极为石墨板,其它参数如表1所示。

表1 实验参数选择

Tab.1 Setting of experimental parameters

类别	值
微螺旋电极	Φ100 μm 碳化钨电极
辅助阳极	600 μm 厚的石墨片
工件1	300 μm 厚的玻璃片
工件2	1 060 μm 厚的玻璃片
电压/V	32-42
频率/Hz	200-600
占空比/%	40-90
主轴转速/(r·min ⁻¹)	3 000-15 000
电解液浓度/(mol·L ⁻¹)	3

切割缝宽用于反映加工性能,它与材料去除率(Material Removal Rate, MRR)的关系为:

$$MRR = K_{\omega} h v, \quad (1)$$

其中: v 是进给速度, h 是工件厚度。

由Jain等提出的关于火花放电释放热量 q 的近似关系为^[21]:

$$q = UI - RI^2, \quad (2)$$

其中: U 是施加的电压, I 是平均电流, R 是阴极和阳极之间的电阻。

假设:(1)由放电释放的平均热量与通过放电的材料去除量呈线性关系,其中线性系数是常数 k ;(2)由化学反应引起的MRR被认为是常数 c 。那么:

$$MRR = k(UI - RI^2) + c. \quad (3)$$

可以得到关于缝宽 K_{ω} 的简化模型:

$$K_{\omega} = \frac{k(UI - RI^2) + c}{hv}. \quad (4)$$

3 结果与讨论

本文使用不同的加工参数在WECDM设备上进行了多组对比试验。在讨论某一参数时,其他参数保持不变。讨论各参数对加工定域性的影响时,玻璃厚度为300 μm,工具电极的浸入深度为900 μm,电解质液面高于玻璃表面300 μm。每一组参数对应的实验至少重复3次,加工长度至少600 μm。加工稳定性也是一个需要重视的试验指标,极端参数可能导致加工过程不稳定。因此,需要综合考虑缝宽和加工稳定性,合理地选择各加工参数的讨论范围。

3.1 加工电压对缝宽的影响规律

研究加工电压对切割缝宽的影响规律时,设定加工电压为34~42 V,其它工艺参数设置如下:频率为500 Hz,占空比为50%,主轴转速为3 000 r/min。加工电压对缝宽的影响如图3所示,随着加工电压的增加,缝宽不断增大,在加工电压为34和42 V时分别获得最小缝宽和最大缝宽。随着加工电压的提高,缝宽变大,MRR增大,但加工定域性变差。

加工电压为34 V和38 V时,加工过程中的电流信号如图4所示。圆圈中的巨大凸起是火花放电产生的大电流,矩形中的小电流信号是电解作用产生的电流。在较低电压下,在旋转螺旋工

具电极周围形成的气泡很少,不足以形成稳定的绝缘气体膜,低电压下的电解作用比高电压占用更多的时间。在较高电压下,火花放电变得更加强烈和频繁。实际上,在更高的加工电压下产生更多的气泡,进而产生更高的放电能量并释放更多的热量。因而,缝宽随着加工电压的增加而增加。在较高的施加电压下,电化学反应剧烈并产生大量气泡,放电作用增强,释放更多的热量去除更多的玻璃材料,导致缝宽增加。

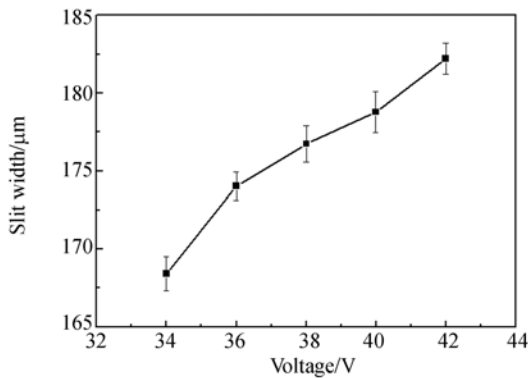


图 3 加工电压对缝宽的影响规律曲线

Fig. 3 Effect of machining voltage on slit width

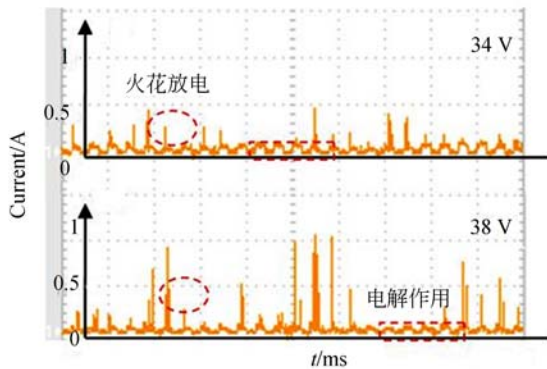


图 4 不同加工电压下的电流(间隔为 5 ms/grid)

Fig. 4 Currents under different machining voltages (interval: 5 ms/grid)

3.2 脉冲频率对缝宽的影响规律

在 WECDM 工艺中,脉冲频率对切割缝宽的影响规律如图 5 所示,加工电压采用 35 V,选择脉冲频率为 200~600 Hz,其他工艺参数保持不变。显然,缝宽随着频率的增加不断减小。在脉冲频率为 200 Hz 时缝宽最大,而在频率为 600 Hz 时最小。事实上,随着频率的增加每个脉冲产生的放电能量变小,放电能量随着频率的增加而分散,因而材料去除能力减小,缝宽减小。同样,

随着频率的上升,MRR 减小。

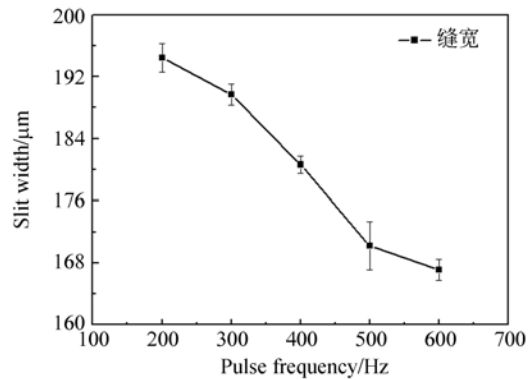


图 5 脉冲频率对缝宽的影响规律曲线

Fig. 5 Effect of pulse frequency on slit width

3.3 占空比对缝宽的影响规律

在 WECDM 加工中,占空比对切割缝宽的影响规律曲线如图 6 所示。占空比设置在 40%~80%,电压为 35 V,频率为 500 Hz,其他工艺参数保持不变。随着占空比从 40%增加到 80%,缝宽不断增加。当占空比为 40%时,电极出现断裂,表明虽然可以取得较小的缝宽,但是加工不稳定。在占空比为 50%时,缝宽的标准偏差值较小。在稳定加工的前提下,缝宽在占空比为 50%时最小,在占空比为 80%时最大。其原因是更高的占空比导致加工期间更高的放电密度,因而去除更多的玻璃材料。在一个脉冲周期中,当占空比增加时,更多的时间处于通电状态产生更多的放电能量,因此缝宽随着占空比的增加而增加。

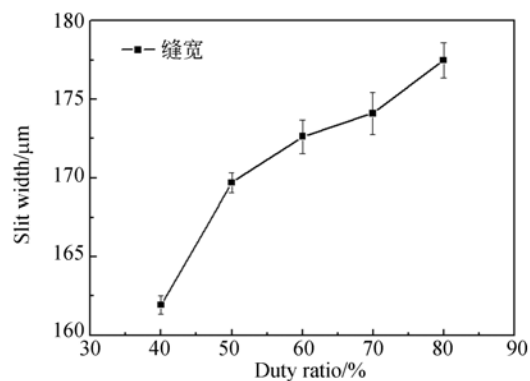


图 6 占空比对缝宽的影响规律曲线

Fig. 6 Effect of duty ratio on slit width

3.4 主轴转速对缝宽的影响规律

在不同的转速下加工微缝,其他参数保持不变,得到主轴转速对切割缝宽的影响规律曲线如

图7所示。缝宽在主轴转速为3 000 r/min时最大,在9 000 r/min时最小。同时,缝宽标准差随着主轴转速增加到9 000 r/min而变得非常大;在12 000 r/min时,缝宽变化很大;在15 000 r/min时出现了工具电极断裂的现象。在较高的主轴转速下,虽然能够得到较小的缝宽,但是加工稳定性变差。图7表明,在3 000~9 000 r/min内,缝宽随着主轴转速的上升而减小,但是减小的趋势减缓。主轴转速为3 000 r/min和9 000 r/min时电流信号如图8所示。可以看出,主轴转速在3 000 r/min时比9 000 r/min有更多的火花放电次数。一个可能的原因是在高转速下由于离心力的作用,气泡被甩出更难形成稳定的气膜,导致放电条件恶化。因此,随着转速的增加,虽然缝宽减小,但是加工稳定性变差。

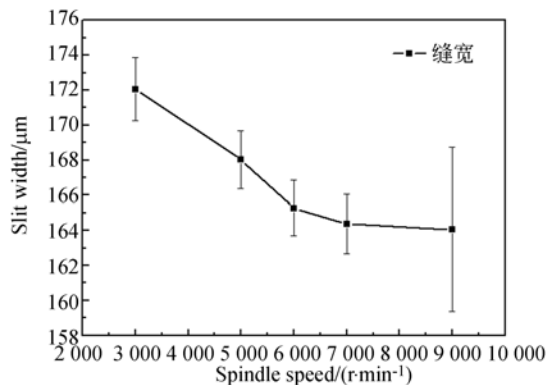


图7 主轴转速对缝宽的影响规律曲线

Fig. 7 Effect of spindle speed on slit width

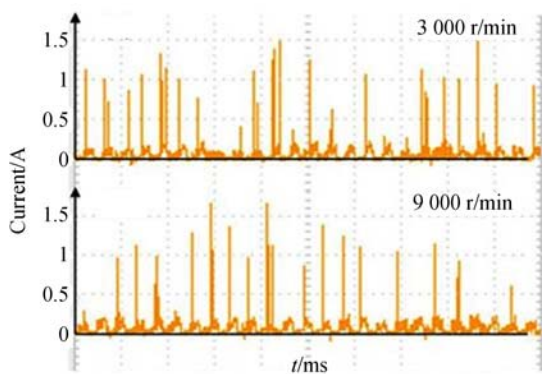


图8 不同主轴转速下的电流信号(间隔为5 ms/grid)

Fig. 8 Current signals at different spindle speeds (interval: 5 ms / grid)

3.5 复杂微结构的切割加工

利用上述试验发现的规律,使用优选的工艺

参数,成功加工出微缝阵列及高深宽比的微结构,电子扫描显微镜(SEM)拍摄的微结构照片(图9)展现了WECDM加工玻璃的加工性能。

基于上述实验,使用优选的加工参数在300 μm厚的玻璃上加工微缝阵列。根据上述关键工艺参数对缝宽的影响规律,为得到较小的缝宽,需要利用较小的电压和占空比,以及较高的频率和主轴转速。加工稳定性也是一个关键指标,极端参数可能导致加工不稳定甚至工具电极断裂。通过综合考虑,选择35 V, 600 Hz, 50%, 6 000 r/min(主轴转速)作为优化参数。利用旋转螺旋工具的WECDM工艺加工出微缝阵列,如图9所示,切割缝宽在135 μm左右,加工过程非常稳定。

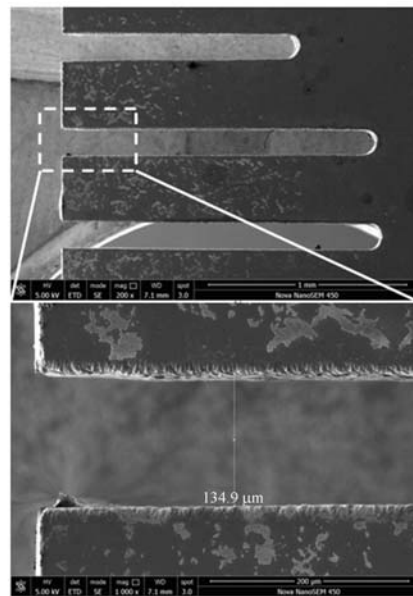


图9 在300 μm厚的玻璃工件上加工的微缝阵列

Fig. 9 Microslit array machined on a 300 μm thick glass workpiece

本文提出的使用旋转螺旋工具电极的WEC-DM工艺对复杂封闭结构的切割加工具有独特的优势。与传统线电极的WECDM工艺不同,本文方法是先钻下孔,然后通过插补走出复杂的刀具路径,在玻璃工件中切割出复杂的闭合图案结构。在这种加工过程中,电解液的更新比非闭合的直线微缝要慢,因而提高了电压并减慢了主轴转速,使加工过程更加稳定。由这种方式加工出的复杂闭合图案结构如图10所示,加工参数为40 V, 500 Hz, 50%, 主轴转速为3 000 r/min, 封闭微切

割缝宽度为 $172\ \mu\text{m}$ 。

为验证该方法对非导电硬脆材料高深宽比微结构的加工能力,采用该方法在 $1\ 060\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃工件上加工出微长缝复杂图案结构。在

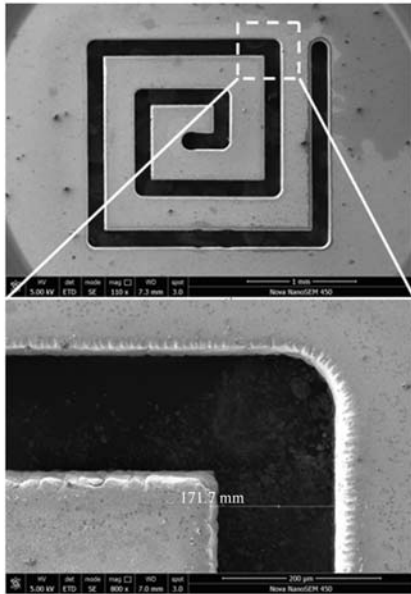


图 10 在 $300\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃工件上加工的复杂封闭微结构
Fig. 10 Complex closed microstructure machined on a $300\ \mu\text{m}$ thick glass workpiece

$1\ 060\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃工件上通过该方法加工出深而长的切口,如图 11 所示,加工参数为 $40\ \text{V}$, $300\ \text{Hz}$, 66% , $3\ 000\ \text{r/min}$ (主轴转速),微切割缝宽度为 $174\ \mu\text{m}$,深宽比为 $6:1$ 。

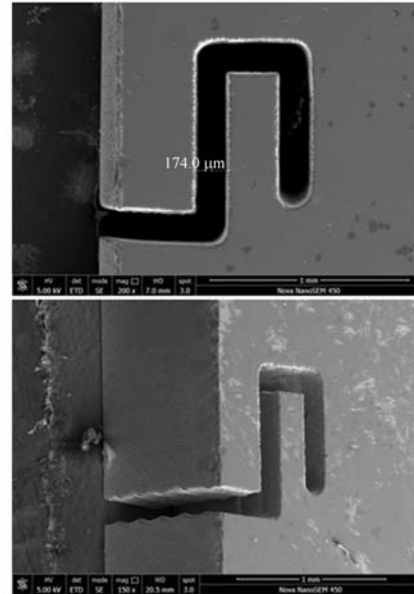


图 11 在 $1\ 060\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃工件上加工的复杂微图案结构
Fig. 11 Complex microstructure machined on a $1\ 060\ \mu\text{m}$ thick glass workpiece

4 结 论

本文提出了一种使用旋转螺旋工具电极的电化学放电切割石英玻璃的加工方法,搭建了试验平台,并进行了一系列试验以研究该方法对玻璃的加工性能。讨论了加工电压、脉冲频率、占空比和主轴转速对缝宽的影响规律和机理。试验结果显示:在试验研究范围内,加工缝宽随着加工电压

和占空比的增加而增大,随着脉冲频率和主轴转速的上升而减小。利用优化参数在 $300\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃工件上成功加工出宽 $138\ \mu\text{m}$ 的微缝阵列和缝宽为 $173\ \mu\text{m}$ 的复杂闭合图案结构;在超过 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃上成功加工出微缝缝宽为 $174\ \mu\text{m}$ 的复杂微图案结构,深宽比为 $6:1$ 。试验结果表明,本文提出的使用旋转螺旋工具电极的 WEC-DM 是一种可加工绝缘硬脆材料复杂高深宽比微结构,特别是复杂闭合图案结构的有效方法。

参考文献:

- [1] ZHENG 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.

- [2] 张博, 韩雪峰, 齐蓉, 等. 复合滑模控制在精密 PMLSM 激光切割运动平台的应用[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 84-92.

ZAHNG B, HAN X F, QI R, et al.. Application of composite sliding mode control on motion platform

- of PMLSM precision laser cutting[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(1): 84-92. (in Chinese)
- [3] 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 Mass assisted with ultrasonic vibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(7): 1615-1622. (in Chinese)
- [4] 刘永红,王致良. 非导电材料的电加工[J]. *电加工*, 1994 (5): 2-7.
- LIU Y H, WANG ZH L. Electromagnetic processing of nonconductive materials[J]. *Electrical Processing*, 1994 (5):2-7. (in Chinese)
- [5] 王建业,罗千英. 电解电火花复合加工的发展[J]. *电加工*, 1997 (5): 15-19.
- WANG J Y, LUO G Y. Development of electrochemical discharge machining [J]. *Electrical Processing*, 1997 (5): 15-19. (in Chinese)
- [6] 郭永丰,黄荣和. 非导电材料的电化学电火花复合加工工艺研究[J]. *电加工*, 1998 (6): 23-25.
- GUO Y F, HUANG R H. Study on electrochemical discharge machining processing technology of nonconductive materials [J]. *Electrical Processing*, 1998 (6): 23-25. (in Chinese)
- [7] CAO X D, KIM B H, CHU C N. Micro-structuring of glass with features less than 100 μm by electrochemical discharge machining[J]. *Precis. Eng.*, 2009,33(4):459-465.
- [8] HAN M S, MIN B K, LEE S J. Micro-electrochemical discharge cutting of glass using a surface-textured tool[J]. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2011,4(4):362-369.
- [9] KUO K Y, WU K L, YANG C K, *et al.*. Wire electrochemical discharge machining (WECDM) of quartz glass with titrated electrolyte flow[J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2013,72:50-57.
- [10] KUO K Y, WU K L, YANG C K, *et al.*. Effect of adding SiC powder on surface quality of quartz glass microkerf machined by WECDM[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015,78(1-4):73-83.
- [11] BHUYAN B K, YADAVA V. Experimental modeling and multi-objective optimization of traveling wire electrochemical spark machining (TW-ECSM) process[J]. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2013, 27(8):2467-2476.
- [12] BHUYAN B K, YADAVA V. Experimental study of traveling wire electrochemical spark machining of borosilicate glass[J]. *Mater. Manuf. Process*, 2014,29(3):298-304.
- [13] MALIK A, MANNA A. An experimental investigation on developed WECSM during micro slicing of e-glass fibre epoxy composite[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016,85(9):2097-2106.
- [14] RATTAN N, MULIK R S. Improvement in material removal rate (MRR) using magnetic field in TW-ECSM process[J]. *Mater. Manuf. Process*, 2017,32(1):101-107.
- [15] 蒋毅,李其,孔令蕾,等. 电化学放电线切割加工方法实验研究[J]. *现代制造工程*, 2015(11):88-92.
- JIANG Y, LI Q, KONG L L, *et al.*. Experimental study on cutting method of wire electrochemical discharge [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2015(11):88-92. (in Chinese)
- [16] 李其,蒋毅,孔令蕾,等. 电化学放电线切割电压-电流特性研究[J]. *电加工与模具*, 2015(6):15-19.
- LI Q, JIANG Y, KONG L L, *et al.*. Study on voltage-current characteristics of WEDM[J]. *Electric Processing and Mold*, 2015(6):15-19. (in Chinese)
- [17] 李其,蒋毅,赵万生,等. 基于润湿供液的电化学放电线切割实验研究[J]. *电加工与模具*, 2016(3):16-19,26.
- LI Q, JIANG Y, ZHAO W SH, *et al.*. Experimental study on wire electrochemical discharge machining based on wetting liquid supply[J]. *Electric Processing and Mold*, 2016(3): 16-19, 26. (in Chinese)
- [18] HUANG S F, LIU Y, LI J, *et al.*. Electrochemical discharge machining micro-hole in stainless steel with tool electrode high-speed rotating[J]. *Mater. Manuf. Process*, 2014,29(5):634-637.
- [19] HAN M S, MIN B K, LEE S J. Geometric im-

- provement of electrochemical discharge micro-drilling using an ultrasonic-vibrated electrolyte[J]. *J Micromechanics Microengineering*, 2009, 19(6): 65004.
- [20] XIAO L F, PENG F Z, YONG B Z, *et al.*. Enhancement of performance of wire electrochemical micromachining using a rotary helical electrode[J]. *J. Mater. Process Technol.*, 2016, 227:129-137.
- [21] JAIN V K, DIXIT P M, PANDEY P M. On the analysis of the electrochemical spark machining process[J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1999, 39(1):165-186.

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