

电火花加工单晶硅微结构的表面质量及成形精度

孙瑶, 董俊逸, 唐本甲, 李思慧

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 以电火花加工(EDM)P型单晶硅为实验对象,探究单晶硅加工表面的形貌特征及微观放电凹坑特性,揭示电火花加工单晶硅的材料去除机理,即应力蚀除作用大于熔化和气化蚀除作用.开展单晶硅微槽和微孔的加工工艺实验研究,探究电火花加工单晶硅微结构的成形精度、尺寸偏差、截面轮廓起伏高度和表面质量,揭示主要加工参数对电火花加工单晶硅的材料去除率、表面形貌、表面粗糙度的影响规律.

关键词: 单晶硅;电火花加工;微槽;微孔;表面形貌;成形精度

中图分类号: TG 661 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)02-0096-08

Surface Quality and Forming Accuracy of Monocrystalline Silicon Microstructures by Electrical Discharge Machining

SUN Yao, DONG Jun-yi, TANG Ben-jia, LI Si-hui

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SUN Yao, E-mail: sy547515291@163.com)

Abstract: Taking the electrical discharge machining (EDM) of P-type monocrystalline silicon as the experimental subject, the surface morphology features and microscopic discharge pit characteristics of the monocrystalline silicon were investigated. It was revealed that the material removal mechanism of the monocrystalline silicon is dominated by stress erosion, which is more significant than melting and vaporization erosion. An experimental research on EDM of monocrystalline silicon microstructures, including micro-grooves and micro-holes, was done to explore the forming accuracy, size deviations, fluctuation height of the cross-sectional profiles, and surface quality of the EDM-processed microstructures, revealing the influence of the main processing parameters on the material removal rate, surface morphology, and surface roughness of the EDM-processed monocrystalline silicon.

Key words: monocrystalline silicon; electrical discharge machining; micro-groove; micro-hole; surface morphology; forming accuracy

电火花加工技术作为非传统加工方法,具有非接触、无宏观作用力、不受材料脆硬度限制等特点^[1-3].国内外很多学者对电火花加工机理及其实现难加工材料微结构的加工工艺优化等进行了研究.Bangash等^[4]采用电火花加工方法在钛合金(Ti6Al4V)表面分别加工出V形、半圆形和U形3种不同结构的微槽,微槽的平均加工时间约为3 min,其加工效率与冲液条件、工件材料热性能和电介质性能有关.Kuriachen等^[5]揭示了电火

花加工微孔过程的非线性动力学行为,系统地研究了电极穿透速度、切屑形状、气泡动力学和放电波形等指标的影响因素,并在钛合金材料表面成功制备出直径约为10 mm,长径比约为17.4的微孔.Li等^[6]探究了导致电火花加工微孔过程控制不佳和形状精度差的机理,发现通过气泡冲刷效应而影响介质交换和废屑排出.Hosseini等^[7]分析了电火花加工镍基高温合金718的表面完整性及其疲劳寿命,揭示了放电电流、放电时间和主

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2024-MSBA-39); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2403011); 国家自然科学基金资助项目(U23A20633); 中国博士后科学基金资助项目(2024MD754246).

作者简介: 孙瑶(1990—),女,辽宁锦州人,东北大学副教授.

轴转速等因素对镍基高温合金的疲劳寿命、表面粗糙度、残余应力和硬度的影响规律.高连等^[8]揭示了电火花线切割单晶硅的损伤层主要由杂质元素重污染层和高密度位错的弹性畸变层组成.Xu等^[9]采用电火花加工方法制备微阶梯孔,当加工电压设置为60 V,主轴转速设置为2 000 r/min,脉冲宽度和脉冲间隔分别设置为13 μs和15 μs时,通过方差和响应面模型分析,可以得到具有良好表面形貌的阶梯孔.Barman等^[10]引入破坏性方法观察微细电火花加工的微盲孔,研究大纵横比盲孔的形状、尺寸和表面质量的影响因素并进行加工调控.研究表明:电火花加工的盲孔边缘分布大量的毛刺,孔整体呈锥形,深度小于电极移动的距离,这与电极的腐蚀有关;经元素分析发现,微孔在加工过程中发生了元素迁移.Liu等^[11]优化了电火花加工奥氏体不锈钢微孔的显微组织和微观特征,分别对经氧化、酸洗处理与未处理的不锈钢进行对比,发现处理过的工件表面微孔加工的去除率较高,微孔锥度较小.Bellotti等^[12]采用黄铜管电极加工钛合金微孔并提出一种微孔电火花加工过程异常识别检测的方法,在灰色关联分析的基础上,优化出电火花加工钛合金微孔的最优工艺参数.Tiwary等^[13]研究了不同介质对电火花加工钛合金微孔质量、电极磨损率、材料去除率、过切量和微孔锥度的影响,研究表明采用纯去离子水及铜粉与去离子水混合液时,微孔的过切量和锥度都得到改善,且微孔的圆度最好.Tamang等^[14]通过多目标参数优化和统计回归建模方法探究304不锈钢电火花加工微孔的最优参数组合和影响规律,研究表明,微孔锥角随电流和电压的增大而增大,并得到最优参数组合为电流10 A,间隙电压50 V,脉冲宽度150 μs.Kuriakose等^[15]研究了电火花加工金属玻璃微孔的表面形貌和成形精度,分析电火花加工工艺参数如电容、电压、转速等对微孔精度和加工时间的影响规律,发现工具转速是提高微孔加工精度和缩短加工时间的关键因素.

目前,电火花加工钛合金、镍基高温合金等金属材料的研究已相当成熟,但对于非金属的半导体材料研究相对较少,单晶硅作为半导体材料具有断裂韧性低的特点,采用传统机械加工方法很难实现其微结构的高质量和高精度加工^[16-19].因此,本文以电火花加工单晶硅微孔和微槽为研究背景,探究其加工表面放电凹坑特性和材料去除机理,并研究加工过程中的峰值电流、脉冲宽

度和电极丝张力对单晶硅加工表面形貌、材料去除率和加工质量的影响规律.这为提高电火花加工其他半导体材料的参数选择提供参考依据,同时对促进电火花加工技术在电子及光伏领域中的应用有重要的意义.

1 实验设备与材料

实验材料为P型单晶硅片,厚度为(1.50±0.01) mm,平整度<3 μm,翘曲度<13 μm,表面粗糙度<0.5 μm.采用电火花加工方法在单晶硅片上进行微槽和微孔的加工工艺实验研究.其中,采用北京阿奇夏米尔生产的低速走丝电火花线切割机床CA20在单晶硅片上制备微槽,该机床轴的最小分辨率为0.1 μm,最大输入功率为9 kW,最大加工速度为250 mm²/min,工作液为去离子水,冲液压力为0.8 MPa,电导率为5 μs/cm,工具电极为φ0.2 mm黄铜丝,如图1所示.在加工过程中,黄铜丝接负极,单晶硅试件接正极,做单向连续移动的黄铜丝通过脉冲火花放电来实现对单晶硅材料的切割成型,每次火花放电都是新的黄铜丝表面进行,因此电极丝损耗可以忽略,保证了加工精度.采用AQ36Ls电火花成形机在单晶硅片上制备微孔,工作液为专用火花油.

2 实验设计与方案

设计单晶硅低速走丝电火花线切割的单因素实验,所选取的电参数和非电参数分别为峰值电流(I_p)、脉冲宽度(T_{on})和丝张力(F_w),每个参数选择4个水平,如表1所示.在实验中改变峰值电流、脉冲宽度、丝张力,其他电参数和非电参数是不变化的,峰值电流取230 A,脉冲宽度取13 μs,丝张力取15 N,放电间隔取5 μs.采用法国STIL公司生产的三维轮廓仪和激光共聚焦显微镜对电火花加工单晶硅的微槽和微孔表面形貌和质量进行观测,为保证测量结果的准确性,对表面粗糙度进行3次测量并取平均值.采用VHX超景深显微镜测量3个不同位置的微槽宽度,然后取平均值,根据式(1)得到单晶硅的材料去除率,

$$R_{MR} = V/t = \frac{1}{2} \times \pi R^2 \times h + h \times b \times (L - R)/t. \quad (1)$$

式中: R_{MR} 为材料去除率,mm³/min; R 为微槽前端半径,mm; h 为单晶硅工件厚度,mm; b 为微槽宽度,mm; V 为去除材料的体积,mm³; t 为加工时

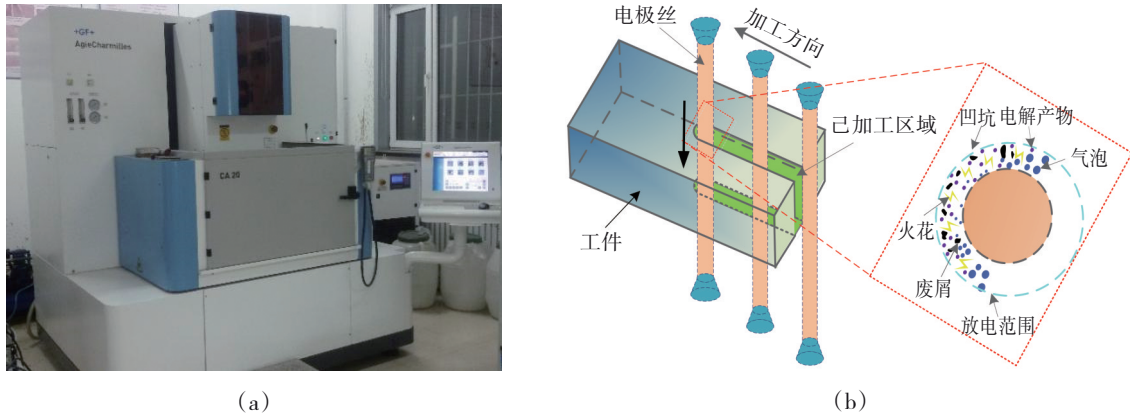


图 1 加工设备及工作原理图
 Fig. 1 Experimental equipment and schematic diagram
 (a)—低速走丝电火花线切割机 CA20; (b)—电火花线切割放电蚀除原理.

间, min; L 为微槽长度, mm.

在 AQ36Ls 电火花成形机上采用螺旋微细工具电极在单晶硅工件上加工微孔, 其中微细螺旋工具电极的直径均值约为 $260\ \mu\text{m}$, 长度约为 $1\ 500\ \mu\text{m}$, 电极材料为铜钨合金, 采用超景深显微镜对微细螺旋工具电极进行观测, 其二维和三维形貌的观测结果如图 2 所示, 可以看出微细螺旋工具电极直径一致性精度高, 微细螺旋结构明显且分布均匀.

表 1 单晶硅微槽加工因素和水平

Table 1 Factors and levels for micro-groove of the monocrystalline silicon

因素	水平			
	1	2	3	4
I_p/A	40	110	230	320
$T_{on}/\mu\text{s}$	4	6	13	15
F_w/N	9	12	15	16

3 实验结果与分析

3.1 电火花加工单晶硅表面形貌特征

电火花加工半导体单晶硅的微槽形貌如图 3 所示, 其微槽壁表面微观形貌观测结果表明单晶硅表面的放电凹坑类似贝壳状, 颜色光亮且具有棱线特征^[11], 凹坑中心部分具有明显的重熔痕迹或存在微孔. 这主要是单晶硅的抗拉强度远大于其剪切强度, 内部塑性变形能力小极易出现破碎, 致使电火花加工单晶硅时的材料应力蚀除作用会超过熔化和气化蚀除作用, 形成了尺寸较大的贝壳状放电凹坑. 此外, 在电火花加工单晶硅过程中放电能量会导致部分材料瞬间熔化、气化, 溶解于其中的气体来不及逸出, 从而产生微孔现象. 当脉冲宽度为 $15\ \mu\text{s}$, 开路电压为 $51\ \text{V}$

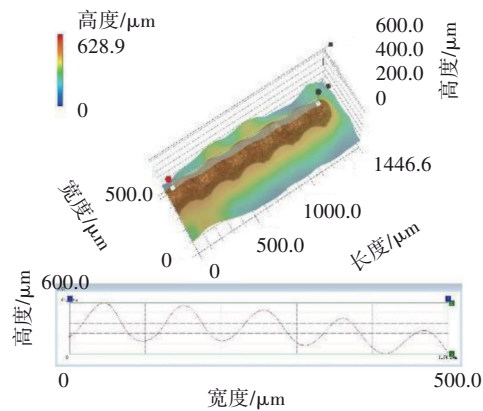
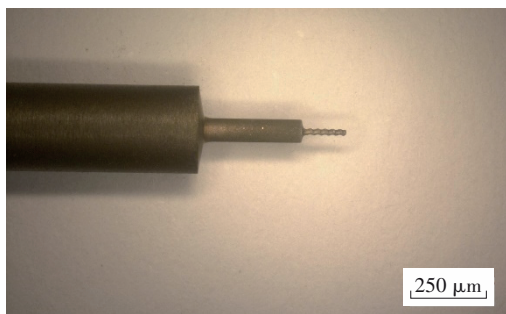


图 2 微细螺旋工具电极二维/三维形貌
 Fig. 2 2D / 3D morphology of the micro-spiral tool
 (a)—二维形貌; (b)—三维形貌.

时,不同峰值电流下电火花加工单晶硅表面形貌和表面起伏高度如图 4 所示,随着峰值电流的增加,表面形貌起伏高度增大,放电凹坑的深度和直径也增大,这是因为峰值电流与放电功率和单脉冲能量成正比,致使单晶硅内部的温度梯度增

大而产生很大热应力,造成单晶硅表面产生大尺寸剥落,同时也会有更多的熔化材料被抛出,所以贝壳状的放电凹坑会变深变大,表面形貌起伏高度增大.

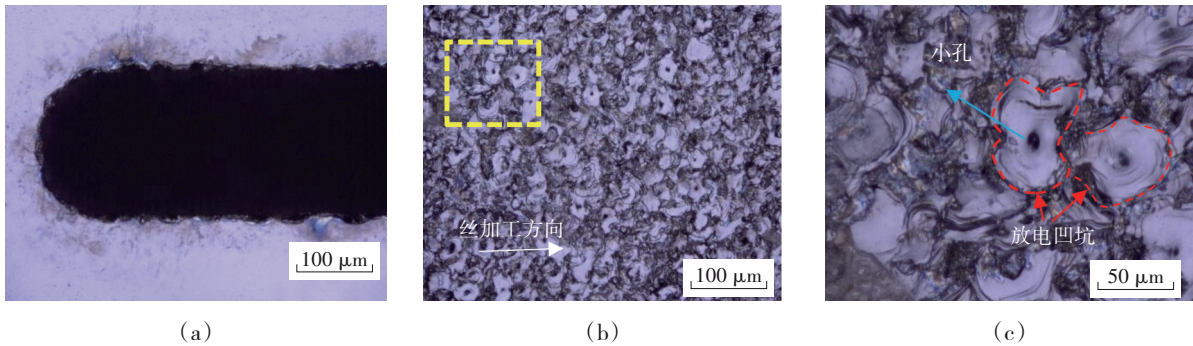


图 3 电火花加工单晶硅表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of the monocrystalline silicon machined by EDM

(a)—整体形貌;(b)—微槽剖面形貌;(c)—局部放大.

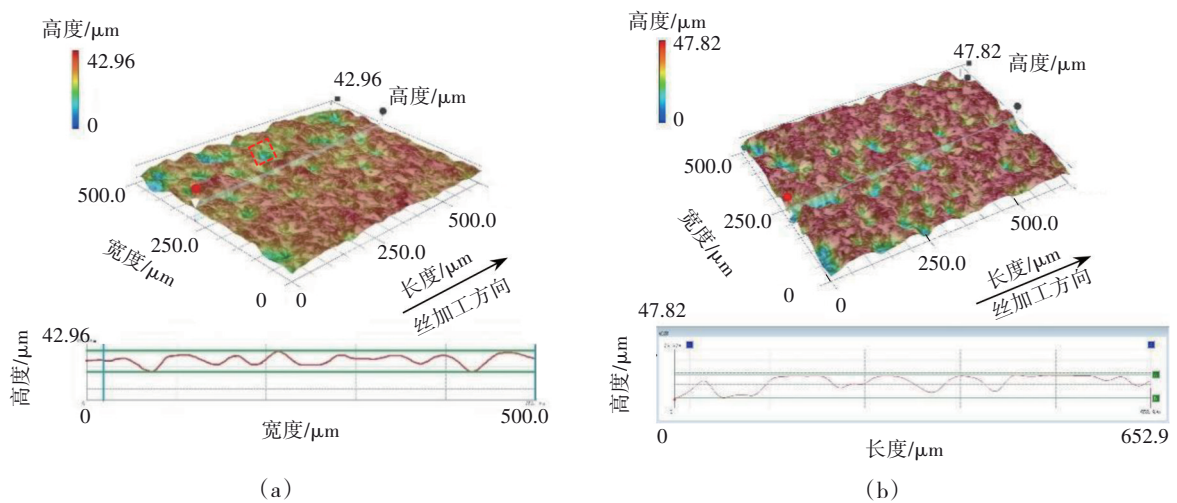


图 4 不同峰值电流下单晶硅低速走丝电火花加工表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of the monocrystalline silicon machined by low-speed wire EDM with various I_p

(a)— $I_p=230$ A;(b)— $I_p=320$ A.

3.2 电火花加工单晶硅表面质量和材料去除率

电火花加工单晶硅的表面形貌与传统机械加工存在很大不同,本文采用基于白光干涉原理非接触式的三维轮廓仪观测单晶硅低速走丝电火花线切割(LS-WEDM)的加工表面形貌和表面原始轮廓曲线如图 5 所示,随着峰值电流增加,轮廓曲线高度从 $3 \mu\text{m}$ 增大到 $12 \mu\text{m}$. 图 6a 表明随着峰值电流的增加,单晶硅的表面粗糙度从 $1.01 \mu\text{m}$ 增加到 $2.06 \mu\text{m}$,材料去除率从 $1.25 \text{ mm}^3/\text{min}$ 增大到 $1.33 \text{ mm}^3/\text{min}$. 图 6b 表明随着脉冲宽度的增加,表面粗糙度从 $1.91 \mu\text{m}$ 增加到 $2.19 \mu\text{m}$,材料

去除率也随之增加,这是由于脉冲宽度较小时,低速走丝电火花线切割加工过程中产生的热量来不及扩散便作用于很小的加工区域,致使单晶硅表面的放电凹坑小,表面粗糙度也小.此外单脉冲放电能量与峰值电流、脉冲宽度和加工时间成正比,脉冲宽度增大会使得热量的作用区域增加,放电凹坑变大变深,所以表面粗糙度也增大.图 6c 为电极丝张力对表面粗糙度和材料去除率的影响规律,可以看出随着电极丝张力增加,表面粗糙度和材料去除率均呈现减小的趋势.

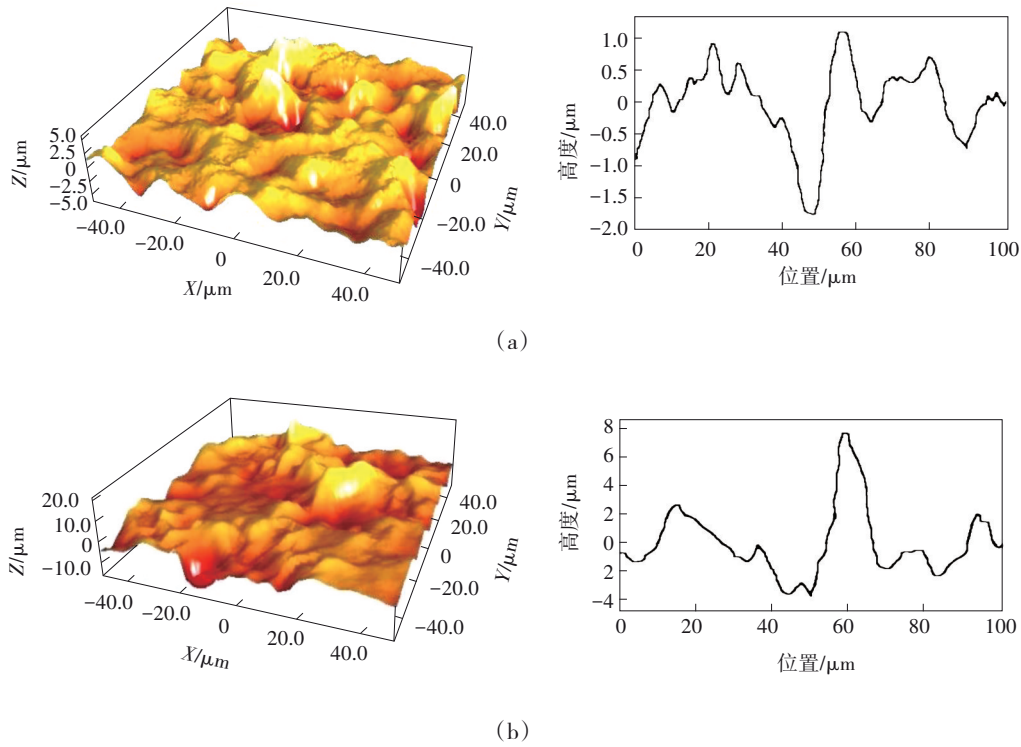


图 5 不同峰值电流下单晶硅低速走丝电火花线切割加工表面轮廓

Fig. 5 Surface roughness of the monocrystalline silicon machined by LS-WEDM with various I_p

(a)— $I_p=230$ A; (b)— $I_p=320$ A.

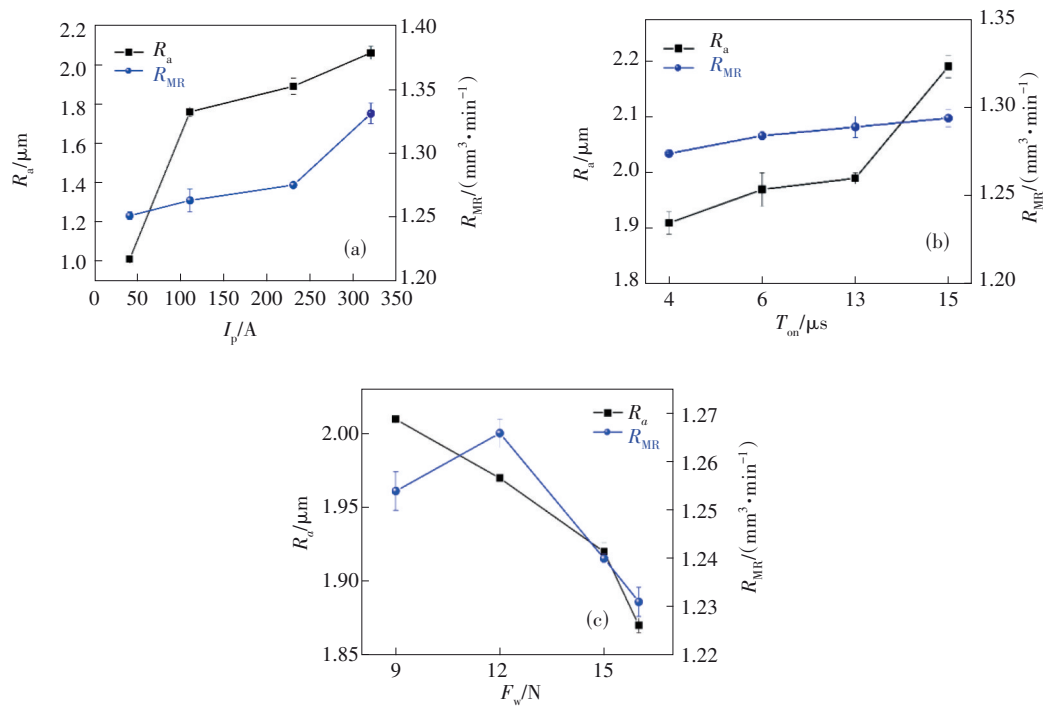


图 6 单晶硅低速走丝电火花线切割加工表面粗糙度和材料去除率

Fig. 6 R_a and R_{MR} of the monocrystalline silicon machined by LS-WEDM

(a)—峰值电流对 R_a 和 R_{MR} 的影响; (b)—脉冲宽度对 R_a 和 R_{MR} 的影响; (c)—电极丝张力对 R_a 和 R_{MR} 的影响.

3.3 电火花加工单晶硅微孔精度

由于电极损耗的存在,电火花加工单晶硅孔径会产生逐渐减小的变化趋势,为此,本研究采用了电极补偿策略,即微细电极加工出微孔后并不立即停止加工,而继续向下进行一段距离以保证出入口处具有更好的尺寸精度.电火花加工单晶硅微孔的超景深显微镜观察结果如图 7 所示,单晶硅微孔的出入口直径的变化规律如图 8 所示.其中第 1 个微孔的入口直径为 321.30 μm ,出口直径为 285.89 μm ;第 5 个微孔入口直径为 334.33 μm ,出口直径为 286.03 μm ;第 15 个微孔

的入口径为 333.21 μm ,出口直径为 279.92 μm ;第 30 个微孔的入口直径为 352.44 μm ,出口直径为 287.48 μm .可以看出单晶硅微孔的入口直径和出口直径存在明显偏差,且随着加工的进行出入口偏差有增大的趋势,当加工第 1 个微孔时,出入口偏差为 35.41 μm ,而加工到第 30 个微孔时,出入口偏差增加到 64.96 μm .这是由于随着微孔数量的增加,微细螺旋工具电极出现尖端损耗现象,如图 9 所示,微细螺旋电极前端的螺旋结构被电蚀,整个微细螺旋电极呈现一定的锥度.

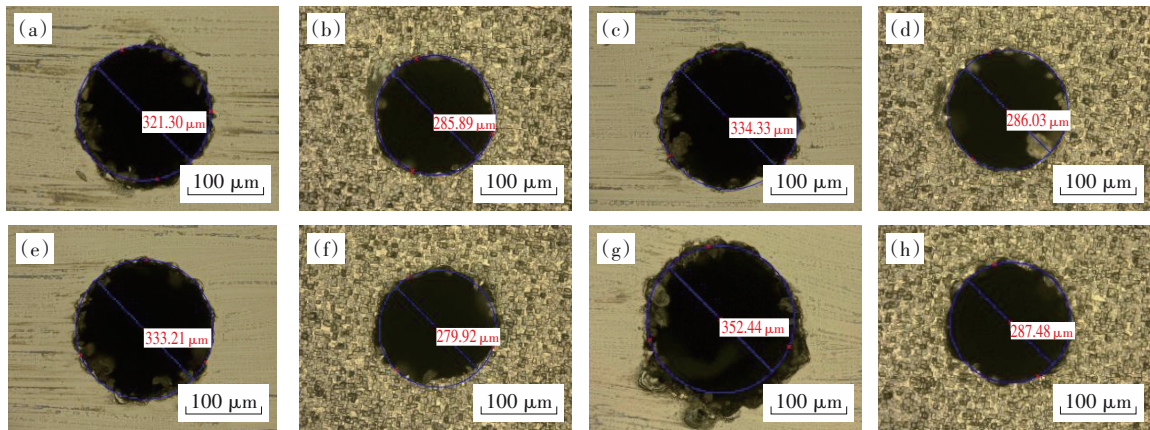


图 7 电火花加工单晶硅微孔的出入口形貌

Fig. 7 Inlet and outlet morphology of the monocrystalline silicon micro-hole machined by EDM

(a)—第 1 个孔入口;(b)—第 1 个孔出口;(c)—第 5 个孔入口;(d)—第 5 个孔出口;
(e)—第 15 个孔入口;(f)—第 15 个孔出口;(g)—第 30 个孔入口;(h)—第 30 个孔出口.

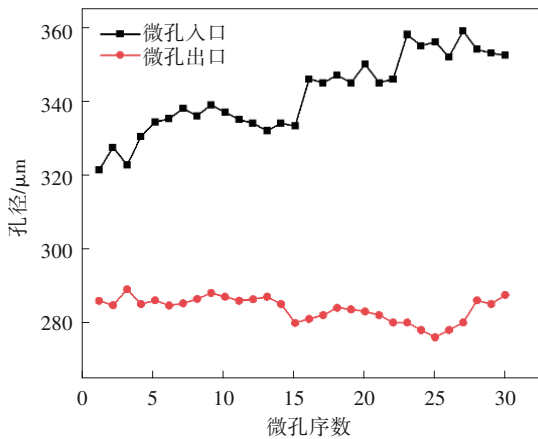


图 8 微孔出入口孔径尺寸的变化趋势

Fig. 8 Changed trend of the inlet and outlet diameters of the micro-holes

此外,通过低速走丝电火花线切割机将单晶硅微孔切开,采用OLS4100激光共聚焦显微镜对加工后的单晶硅微孔内壁形貌进行观测,如图 10a~10b 所示,为保证结果的准确性,微孔孔壁表

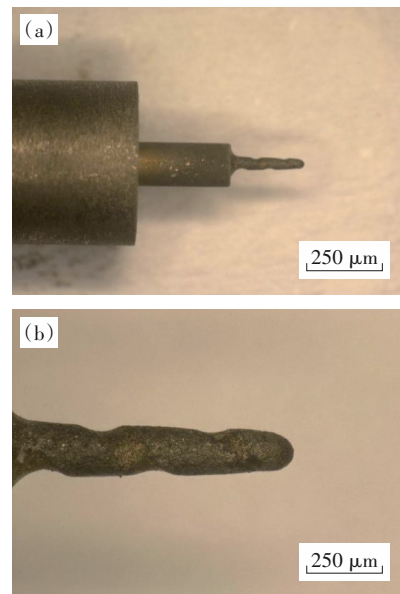


图 9 单晶硅微孔加工后的微细螺旋电极

Fig. 9 Spiral microelectrode after fabricating the monocrystalline silicon micro-holes

(a)—加工后的微细螺旋电极;(b)—局部放大.

面粗糙度测量 3 次求平均值,测量结果表明其表面粗糙度均值为 $2.54 \mu\text{m}$.由微孔内壁的截面轮廓可以看出其内壁表面相对光滑,但仍存在起伏,在单晶硅微孔内部选择 2 个不同的区域进行截面轮廓特征提取,如图 10c~10f 所示,可以看出

横向截面轮廓的出入口圆孔特征明显,纵向截面轮廓的起伏高度变化均值约为 $30.26 \mu\text{m}$.采用微细螺旋电极加工单晶硅微孔时其螺旋结构有助于加工废屑的排出,因此,采用微细螺旋电极加工单晶硅微孔的成形精度高.

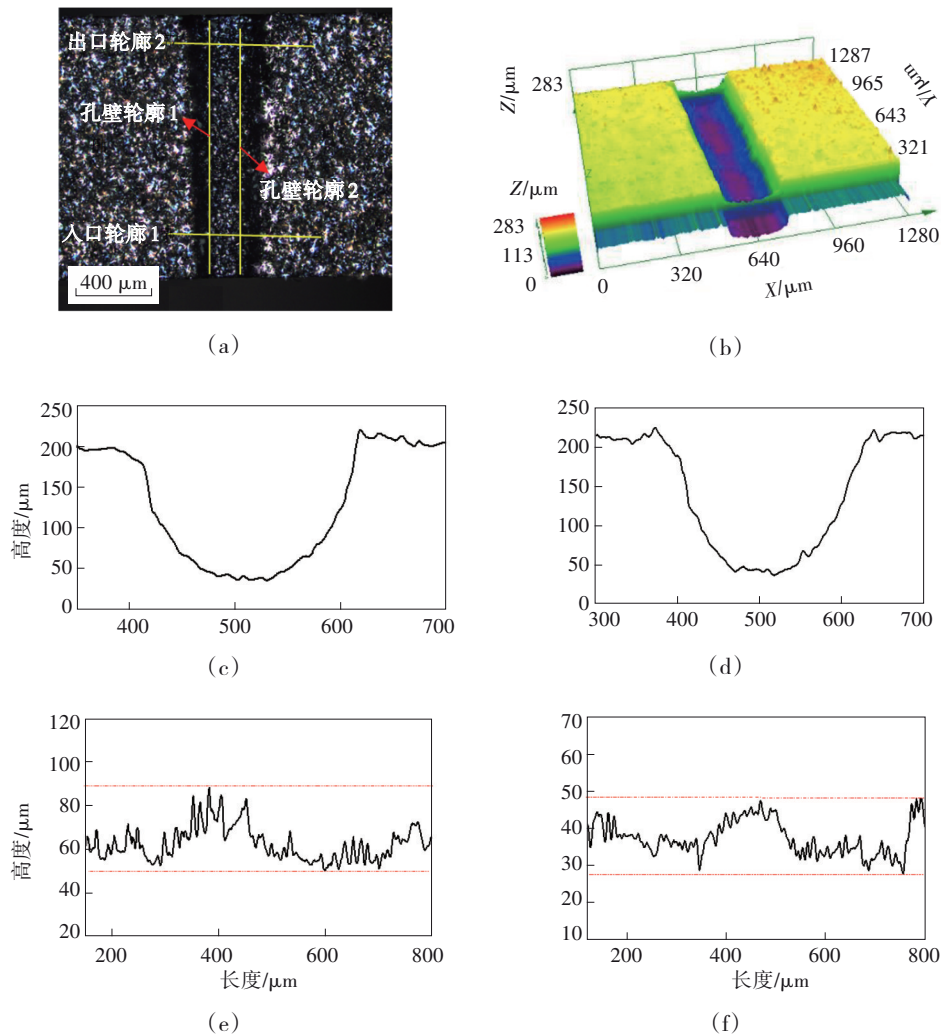


图 10 电火花加工单晶硅微孔剖面轮廓和三维形貌

Fig. 10 Cross-sectional profiles and three-dimensional surface of the micro-holes on the monocrystalline silicon machined by EDM

(a)—加工后的形貌;(b)—孔 1 的入口形貌;(c)—轮廓 1 入口截面;

(d)—轮廓 2 出口截面;(e)—轮廓 1 孔壁截面;(f)—轮廓 2 孔壁截面.

4 结 论

1)电火花加工单晶硅表面的放电凹坑呈现贝壳状,颜色光亮且具有棱线特征,凹坑中心部分具有明显的重熔痕迹或存在微孔,且单晶硅表面粗糙度和材料去除率随着电极丝张力增加均呈现减小趋势.

2)采用微细螺旋电极加工单晶硅微孔时其

螺旋结构有助于加工废屑的排出,可以成功制备单晶硅微孔,且成形精度高,微孔内壁表面相对光滑.

参考文献:

- [1] Wang X Z, Yi S, Easton M, et al. Active gap capacitance electrical discharge machining of polycrystalline diamond [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 280: 116598.
- [2] Sun Y, Gong Y D, Wen X L, et al. Micro milling characteristics of LS-WEDM fabricated helical and corrugated micro end mill [J]. *International Journal of*

- Mechanical Sciences*, 2020, 167: 105277.
- [3] Coelho F, Koshy P. Vibration damping capability of electrical discharge machined surfaces: characteristics, mechanism and application [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022, 177: 103888.
- [4] Bangash M K, Casalegno V, Kumar D A, et al. Surface machining of Ti_6Al_4V by means of micro-electrical discharging to improve adhesive joining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 286: 116813.
- [5] Kuriachen B, Varghese A, Somashekhar K P, et al. Three-dimensional numerical simulation of microelectric discharge machining of Ti-6Al-4V [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79: 147-160.
- [6] Li G D, Natsu W, Yu Z Y. Elucidation of the mechanism of the deteriorating interelectrode environment in micro EDM drilling [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 167: 103747.
- [7] Hosseini E, Rehman S, Alimoradi A. Surface integrity of fatigue strength of nickel based super alloy in turning by wire electrical discharge process [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2022, 236(3): 135-145.
- [8] 高连, 刘志东, 邱明波, 等. 电火花线切割单晶硅的损伤层[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(5): 874-879.
(Gao Lian, Liu Zhi-dong, Qiu Ming-bo, et al. Damaged layer of monocrystalline silicon cut by wire electrical discharge machining [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(5): 874-879.)
- [9] Xu B, Feng T, Wu X Y, et al. Micro-EDM of micro-stepped hole based on the wear of micro-bit [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, 37(3): 349-358.
- [10] Barman S, Hanumaiah N, Puri A B. Investigation on shape, size, surface quality and elemental characterization of high-aspect-ratio blind micro holes in die sinking micro EDM [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76: 115-126.
- [11] Liu Q Y, Zhang Q H, Zhang M, et al. Effects of surface layer of AISI 304 on micro EDM performance [J]. *Precision Engineering*, 2019, 57: 195-202.
- [12] Bellotti M, Qian J, Reynaerts D. Enhancement of the micro-EDM process for drilling through-holes [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 68: 610-615.
- [13] Tiwary A P, Pradhan B B, Bhattacharyya B. Investigation on the effect of dielectrics during micro-electro-discharge machining of Ti-6Al-4V [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95: 861-874.
- [14] Tamang S K, Natarajan N, Chandrasekaran M. Optimization of EDM process in machining micro holes for improvement of hole quality [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, 39(4): 1277-1287.
- [15] Kuriakose S, Patowari P K, Bhatt J. Effect of micro-EDM machining parameters on the accuracy of micro hole drilling in Zr-based metallic glass [J]. *Engineering Research Express*, 2020, 2(1): 015001.
- [16] 路雄, 李淑娟, 辛彬, 等. 单晶硅的电火花线切割过程建模与控制 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 149-156.
(Lu Xiong, Li Shu-juan, Xin Bin, et al. Modeling and control of WEDM process of silicon single crystal [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 149-156.)
- [17] 葛培琪, 陈自彬, 王沛志. 单晶硅切片加工技术研究进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 12-18.
(Ge Pei-qi, Chen Zi-bin, Wang Pei-zhi. Review of monocrystalline silicon slicing technology [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2020, 40(4): 12-18.)
- [18] 周云光, 巩亚东, 高奇, 等. 单晶硅微尺度侧磨表面质量影响因素试验研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(7): 983-988.
(Zhou Yun-guang, Gong Ya-dong, Gao Qi, et al. Experimental study on influencing factor of surface quality in micro side grinding of single crystal silicon [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(7): 983-988.)
- [19] Sun Z W, To S, Yu K M. Feasibility investigation on ductile machining of single-crystal silicon for deep micro-structures by ultra-precision fly cutting [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 176-187.