

# 大长径比微圆柱阵列工具电极的制备

金丽雅<sup>1,2</sup>, 巩亚东<sup>1</sup>, 朱容迪<sup>1</sup>, 高鸿飞<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 针对大长径比微圆柱阵列电极制备难度大、工艺复杂等问题, 基于微正四棱柱电极电蚀致截面变圆形的特殊现象, 提出一种多次迭代加工新工艺方法, 以高质、高效制备大长径比微圆柱阵列电极。通过实验验证了该方法的可行性, 并对比了不同电极材料(铜、铜钨合金)对加工性能的影响。结果表明, 与铜钨合金相比, 铜材料电极迭代制备微圆柱阵列电极所需的迭代次数更少。制备出的铜和铜钨合金6×6微圆柱阵列电极的长径比分别为6.08, 8.81, 加工得到的阵列圆孔直径标准差分别为8.48, 8.18 μm。

**关键词:** 微圆柱; 微棱柱; 阵列电极; 阵列圆孔; 电火花加工

中图分类号: TG 132.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)11-0098-08

## Preparation of Microcylindrical Array Tool Electrode with Large Aspect Ratio

JIN Li-ya<sup>1,2</sup>, GONG Ya-dong<sup>1</sup>, ZHU Rong-di<sup>1</sup>, GAO Hong-fei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China. Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In view of the difficulty and complexity in the preparation of microcylindrical array electrodes with a large aspect ratio, a new process method with multiple iterations based on the special phenomenon of rounded cross-section caused by galvanic corrosion of micro-normal tetragonal electrodes was proposed, so as to achieve high-quality and high-efficiency preparation of microcylindrical array electrodes with a large aspect ratio. The feasibility of the method was verified experimentally, and the effects of different electrode materials (copper and copper-tungsten alloy) on the processing performance were compared. The results show that fewer iterations are required for the iterative preparation of microcylindrical array electrodes for copper electrodes compared with copper-tungsten alloys. The large aspect ratios of the prepared 6×6 microcylindrical array electrodes of prepared copper and copper-tungsten alloy are 6.08 and 8.81, respectively, and the standard deviations of the diameters of circular holes in the processed array are 8.48 μm and 8.18 μm, respectively.

**Key words:** microcylinder; microprism; array electrode; circular hole in array; electrical discharge machining

微阵列电极由多个单微电极组成, 广泛应用于精密仪器、生物医学等领域<sup>[1-3]</sup>。低成本、简单化、高质量地制备微阵列电极具有重要价值, 受到学者们的高度重视。

微阵列电极可以通过各种方法制造, 主要有磁控溅射技术<sup>[4]</sup>、光刻铸造成型(lithographic

galvanoformung abformung, LIGA)技术<sup>[5]</sup>、电火花加工(electrical discharge machining, EDM)技术<sup>[6-7]</sup>、激光加工技术<sup>[8]</sup>和微注射成型技术<sup>[9]</sup>。与其他方法相比, 电火花加工技术具有非接触加工的优势, 适合加工导电的难加工材料, 已成为制备微阵列电极的重要方法之一<sup>[10-11]</sup>。Jin等<sup>[12]</sup>分析了

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U23A20633); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2303001); 辽宁省科学技术计划项目(2025-BSLH-285)。

作者简介: 金丽雅(1997—), 女, 辽宁鞍山人, 东北大学博士研究生; 巩亚东(1958—), 男, 辽宁本溪人, 东北大学教授, 博士生导师。

电火花线切割加工微棱柱阵列电极时,工件旋转使工件形状从连续结构变为非连续的薄壁阵列结构,并探讨了低速走丝电火花线切割加工时工件形状变化对放电间隙的影响,最终在不同材料上制备出边长均为  $300\ \mu\text{m}$  的超大长径比微棱柱阵列电极.Chen<sup>[13]</sup>利用微细电火花线切割技术,在硬质合金材料上制备了宽度为  $21\ \mu\text{m}$ 、间距为  $24\ \mu\text{m}$  的  $10\times 10$  微棱柱阵列电极.Wang 等<sup>[14]</sup>通过降低开路电压和峰值电流、延长放电时间和优化加工速度,制造出了宽度为  $40\ \mu\text{m}$  的  $10\times 10$  微棱柱阵列电极.解宝成<sup>[15]</sup>探讨了电火花反拷加工块电极制造微圆柱电极阵列的精度,认为在电极中加入超声振动可改善阵列圆柱电极的表面质量.综上所述,电火花线切割加工只能加工微棱柱阵列电极,而微圆柱阵列电极的制备主要基于块电极电火花反拷加工.但电火花反拷加工时,由于需要去除的材料较多,存在放电间隙条件差而导致微圆柱阵列电极尺寸不均匀、表面质量差、长径比不高等问题,且阵列圆孔基板制备难度大、加工效率低.

针对大长径比微圆柱阵列电极制备困难、工艺复杂等问题,本文基于电火花加工中的尖端放电效应,提出了一种利用微棱柱阵列电极迭代加工制备微圆柱阵列电极的新工艺方法.然后,在不同材料上制备出  $6\times 6$  微圆柱阵列电极,并通过实验对比了电极材料对加工性能的影响.

## 1 实验材料和方法

利用低速电火花线切割加工机床结合分度回转装置,制备微正四棱柱阵列电极.电火花线切割加工设备型号为阿奇夏米尔 CA20.制备得到的铜钨合金(CuW70)和纯铜(Cu)的  $6\times 6$  微棱柱阵列电极如图 1 所示.两种电极尺寸相当,边长均约为  $300\ \mu\text{m}$ 、长度均约为  $3\ 100\ \mu\text{m}$ .

当电荷分布在导体上时,导体尖端的电荷分布更密集,电场更强.因此,电火花加工时微棱柱电极的棱角和棱边首先被损耗,电极前端截面形状由正方形变为圆形.利用上述特点,本文首先使用损耗后的微棱柱电极在工件上加工出具有圆形出口的微阵列孔,然后更改加工极性,利用阵列圆孔对微棱柱阵列电极进行电火花反拷加工,通过多次迭代,实现大长径比微圆柱阵列电极的制备.加工过程示意图如图 2 所示.对比块电极电火花反拷制备微圆柱阵列电极方法,本

文提出的多次迭代加工法无需采用微小单圆柱电极在基板上逐个加工阵列圆孔,待去除材料较少,更有利于实现大长径比微圆柱阵列电极的高质、高效制备.

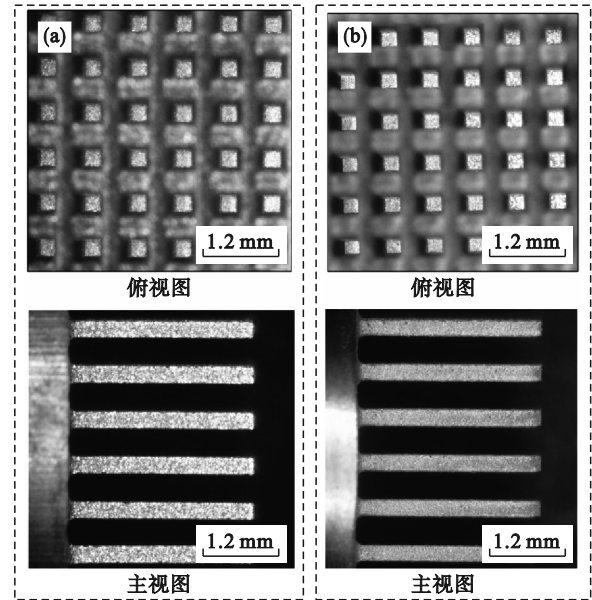


图 1 微棱柱阵列电极加工结果

Fig. 1 Processing results of microprismatic array electrodes

- (a)—Cu 的  $6\times 6$  微棱柱阵列电极;
- (b)—CuW70 的  $6\times 6$  微棱柱阵列电极.

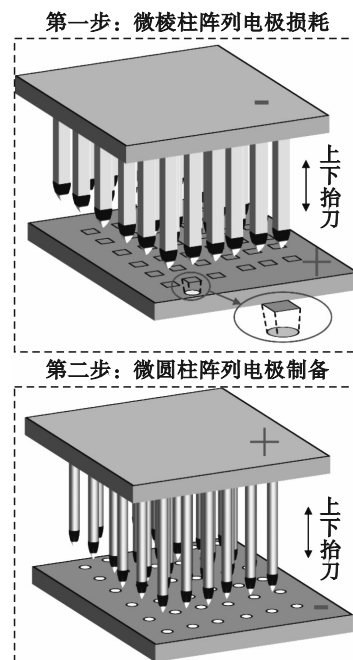


图 2 微圆柱阵列电极加工方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of microcylindrical array electrode processing method

微圆柱阵列电极制备实验使用电火花加工机床,设备型号为沙迪克 AQ32Ls.工件材料为纯

铜,工件厚度约为 500  $\mu\text{m}$ .加工过程中,电压设定为 120 V,脉冲持续时间设定为 3  $\mu\text{s}$ ,脉冲间隔设定为 8  $\mu\text{s}$ ,跳转加工时间设定为 0.22 s.测试设备包括 VHX-1000E 超景深显微镜、JEOL JSM-7900F 热场发射扫描电子显微镜和 OLYMPUS LEXT OLS4100 激光共聚焦显微镜.

## 2 结果与讨论

### 2.1 微棱柱阵列电极的损耗过程分析

当加工深度设定为 1 500  $\mu\text{m}$  时,使用不同材料的 6 $\times$ 6 微棱柱阵列电极连续加工多组微阵列孔,统计每次加工时电极的轴向损耗长度,结果如图 3 所示.对于铜电极,随着加工微阵列孔的次数从 1 增加到 2,每次加工时电极的轴向损耗长度从 178.4  $\mu\text{m}$  增加到 214.1  $\mu\text{m}$ .当加工次数超过 2 时,每次加工的电极轴向损耗长度基本不变.对于铜钨合金电极,当加工微阵列孔的次数从 1 增加到 6,每次加工时电极的轴向损耗长度从 13.8  $\mu\text{m}$  增加到 43.5  $\mu\text{m}$ .当加工次数超过 6 时,上述参数变化不大.这是由于在加工微孔初期,微阵列棱柱形电极棱角、棱边处电场分布集中,导致棱角的损耗率大于电极中心的损耗率.此时,电极的损耗主要体现在径向损耗,轴向损耗较小.随着棱柱电极的逐渐损耗,电极前端形状呈弧状,电场强度分布逐渐均匀.此时,微棱柱阵列电极形状基本不变,电极进入均匀损耗阶段,损耗主要体现为轴向损耗.

图 4 给出了电极进入均匀损耗阶段后,每次加工微阵列孔时,不同材料电极所用的加工时间.结果表明,铜和铜钨合金微棱柱阵列电极的加工时间分别为 406 s 和 93 s.铜钨合金电极耗时更少.这是由于铜钨合金的熔点更高,耐电蚀性更好,因此这种材料的电极加工时间更短,加工效率更高.

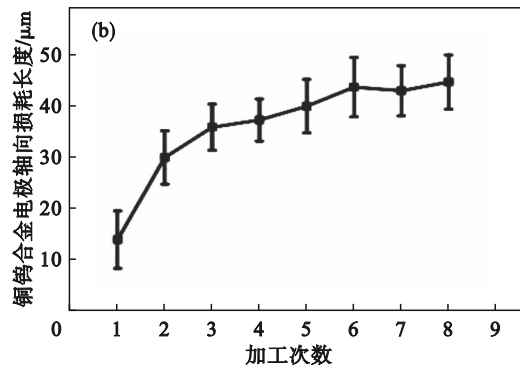
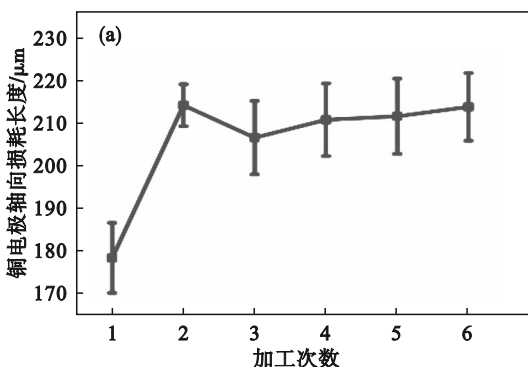


图 3 加工次数对微棱柱阵列电极轴向损耗长度的影响  
Fig. 3 Effect of numbers of processing operations on axial wear length of microprismatic array electrodes

(a)—铜; (b)—铜钨合金.

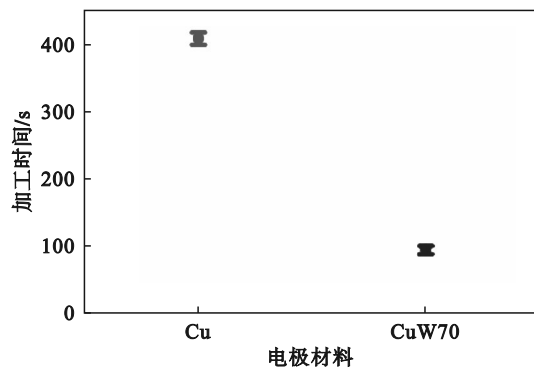
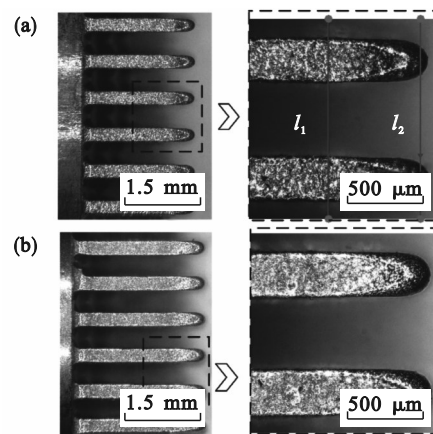


图 4 不同材料的微棱柱阵列电极加工微阵列孔所用时间  
Fig. 4 Time required to process microarray holes for microprismatic array electrodes of different materials

### 2.2 微棱柱阵列电极的损耗形貌特征

当电极进入均匀损耗阶段后,观测不同材料的微棱柱阵列电极形貌如图 5 所示.提取的铜电极不同位置的线轮廓,可见电极前端轮廓呈现圆形,而后端则保持最初的方形.使用铜钨合金电极在铜板上加工阵列微孔,电极前端伸出工件底部尺寸设定为 100  $\mu\text{m}$  时,加工得到的微阵列孔形貌如图 5d 所示.微孔的入口为方形,出口为圆形.



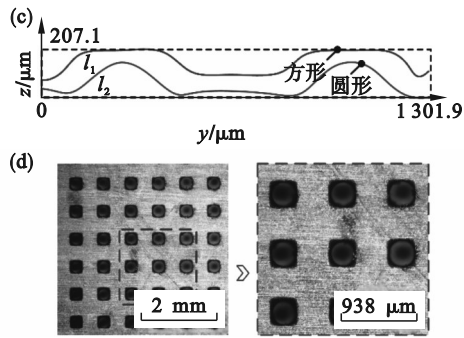


图 5 微棱柱阵列电极损耗形貌分析  
Fig. 5 Morphological analysis of electrode loss in microprismatic arrays

(a)—铜电极; (b)—铜钨合金电极;  
(c)—线轮廓; (d)—异形微阵列孔.

测量不同电极的棱边、棱角损耗尺寸,如图 6 所示.结果表明,铜电极的棱边、棱角损耗长度分别为  $160.50\ \mu\text{m}$  和  $439.87\ \mu\text{m}$ ;铜钨合金电极的棱边、棱角损耗长度分别为  $138.51\ \mu\text{m}$  和  $372.17\ \mu\text{m}$ .尖端放电使棱角损耗量更大.比较两种电极的损耗形貌发现,与铜钨合金电极相比,铜电极前端曲线轮廓的曲率更大,各部位损耗量也更大.

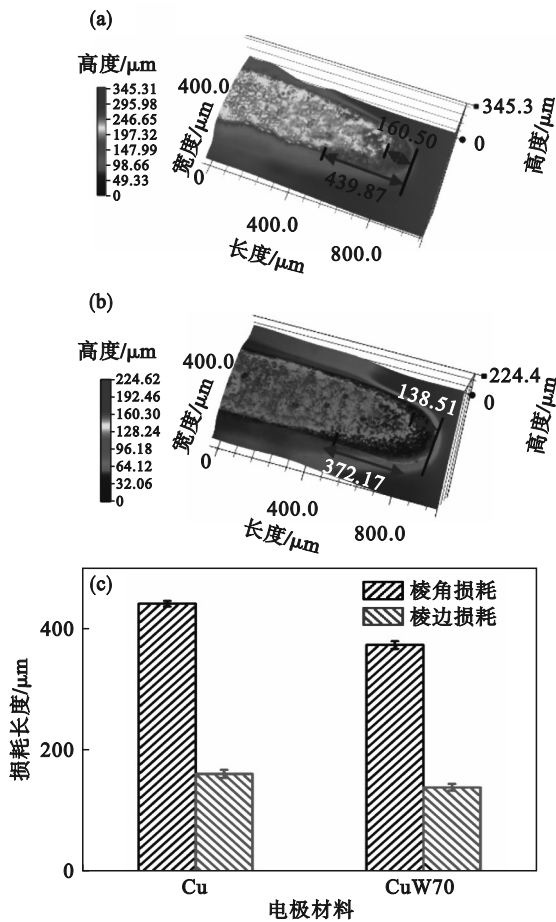


图 6 不同材料的微棱柱阵列电极的损耗长度  
Fig. 6 Loss length of microprismatic array electrodes of different materials

(a)—铜电极; (b)—铜钨合金电极; (c)—损耗长度.

### 2.3 微圆柱阵列电极的制备

利用  $6\times 6$  微棱柱阵列电极制作微圆柱阵列电极时,过渡阶段铜钨合金电极的形貌如图 7 所示.电极前端由棱柱形过渡至圆柱形,后端依旧为初始的棱柱形状.由于在电火花加工过程中两个电极都会损耗,因此需要多次迭代加工才能成功制备微圆柱阵列电极.当微阵列孔的出口形状为圆形时,表明微棱柱阵列电极已完全加工成微圆柱阵列电极.

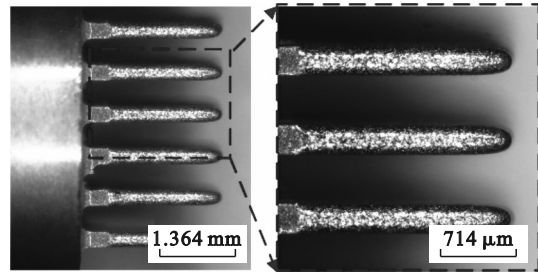


图 7 过渡阶段铜钨合金微阵列电极形貌  
Fig. 7 Morphology of microarray electrodes of copper-tungsten alloy in transition stage

图 8 所示为采用铜电极加工时,迭代次数( $N$ )对基板微阵列孔出口形貌的影响.当  $N=1$  时,微孔的外接圆和内切圆直径分别为  $364.86\ \mu\text{m}$  和  $304.28\ \mu\text{m}$ ,二者相差  $60.58\ \mu\text{m}$ ;当  $N=2$  时,微孔的外接圆和内

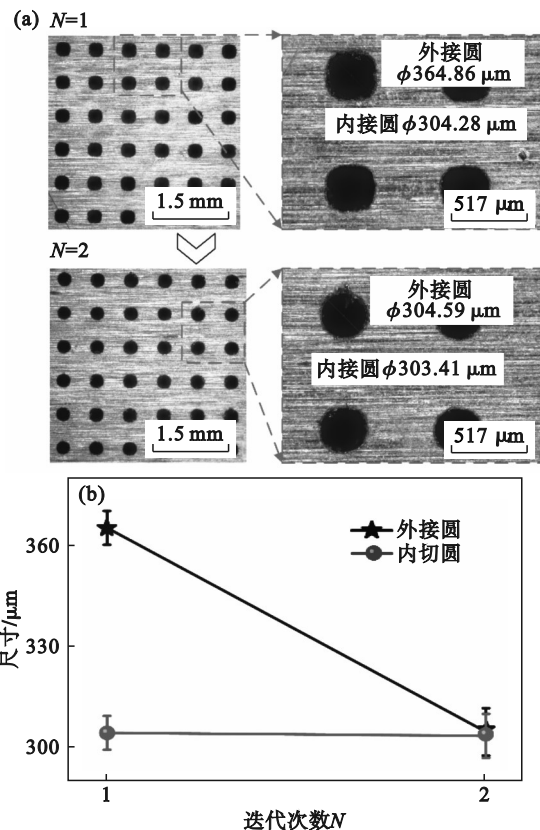


图 8 铜电极加工过程中迭代次数对微阵列孔出口的影响  
Fig. 8 Effect of numbers of iterations on microarray hole exit during copper electrode processing  
(a)—形貌; (b)—尺寸.

切圆直径分别为  $304.59\ \mu\text{m}$  和  $303.41\ \mu\text{m}$ , 二者相差  $1.18\ \mu\text{m}$ . 此时, 微孔外接圆和内切圆尺寸相当. 综上所述, 2 次迭代加工即可达到目标.

图 9 所示为采用铜钨合金电极加工时, 迭代次数对基板微阵列孔出口形貌的影响. 当  $N=1$  时, 微孔的外接圆和内切圆直径分别为  $428.23\ \mu\text{m}$  和  $344.71\ \mu\text{m}$ , 二者相差  $83.52\ \mu\text{m}$ . 随着  $N$  的增加, 外接圆和内切圆直径的差值逐渐减小. 当  $N=6$  时, 微孔的外接圆和内切圆直径尺寸相当, 分别为

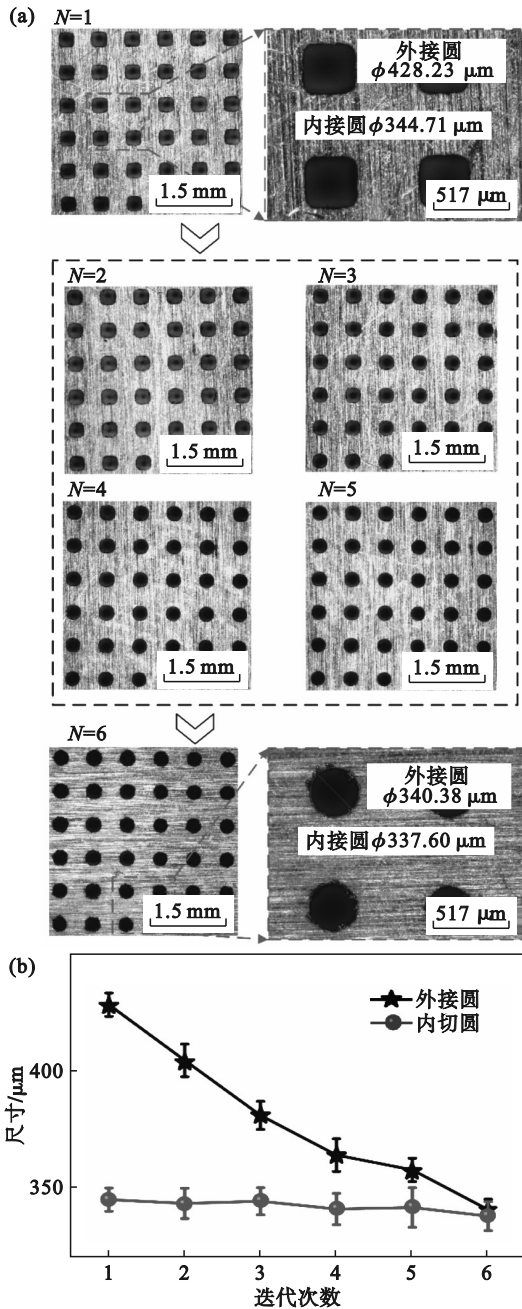


图 9 铜钨合金电极加工过程中迭代次数对微阵列孔出口的影响

Fig. 9 Effect of number of iterations on microarray hole exit during copper-tungsten alloy electrode processing

(a) — 形貌; (b) — 尺寸.

$340.58\ \mu\text{m}$  和  $337.60\ \mu\text{m}$ , 相差  $2.98\ \mu\text{m}$ . 即对于铜钨合金电极, 当迭代次数为 6 时, 可加工得到微圆柱阵列电极.

对比结果表明, 采用多次迭代加工法制备微圆柱阵列电极时, 铜电极比铜钨合金电极所需的迭代次数更少.

### 2.4 6×6 微圆柱阵列电极评价

制备的不同材料的  $6\times 6$  微圆柱阵列电极如图 10 所示. 微圆柱阵列铜电极的长度约为  $1\ 467\ \mu\text{m}$ , 直径约为  $241\ \mu\text{m}$ , 长径比为 6.08. 微圆柱阵列铜钨合金电极的长度约为  $2\ 397\ \mu\text{m}$ , 直径约为  $272\ \mu\text{m}$ , 长径比为 8.81. 二者相比, 铜钨合金电极的直径和长度更大. 直径差异是由于加工损耗后的微圆柱阵列电极的曲率不同所导致的. 铜钨合金电极的曲

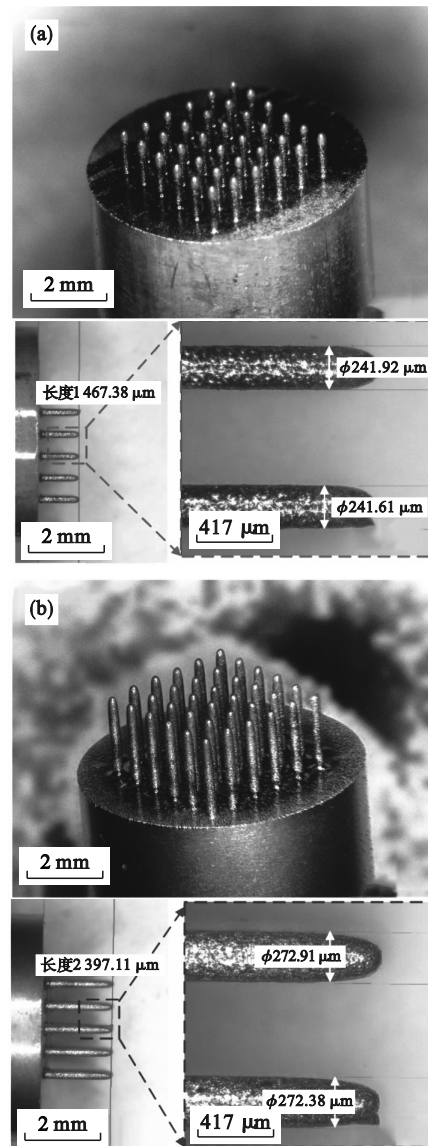


图 10 不同材料的  $6\times 6$  微圆柱阵列电极

Fig. 10  $6\times 6$  microcylindrical array electrodes of different materials

(a) — 铜; (b) — 铜钨合金.

率更小,采用多次迭代加工法获得的微圆柱阵列电极的直径更大.电极长度的差异是由于电极的轴向损耗尺寸不同以及所需的迭代次数不同造成的.

阵列电极直径一致性是衡量新方法优劣的重要指标.由于很难直接测量每个电极的尺寸,因此,本文利用阵列电极在铜工件上加工出微阵列圆孔,通过测量每个圆孔的大小,间接反映微圆柱阵列电极的直径一致性.图 11 显示了不同材料电极加工出的阵列圆孔,测量孔的直径并统计出其

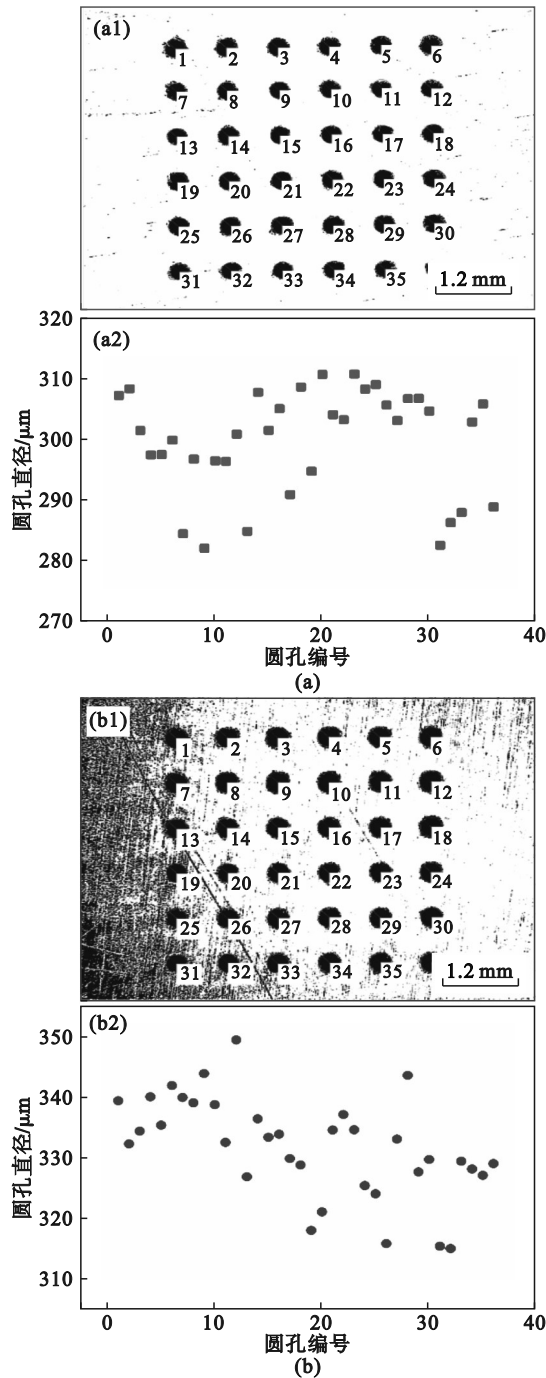


图 11 不同材料电极加工的阵列圆孔的尺寸  
Fig. 11 Dimensions of circular holes in processed array from electrodes of different materials  
(a)—铜; (b)—铜钨合金.

标准差.结果表明,铜和铜钨合金电极加工后微阵列圆孔直径的标准差分别为 8.48 μm 和 8.18 μm.可见微圆柱阵列电极的直径一致性较好.

不同材料的微圆柱阵列电极表面的微观形貌如图 12 所示.结果表明,电极前、后端的表面微观

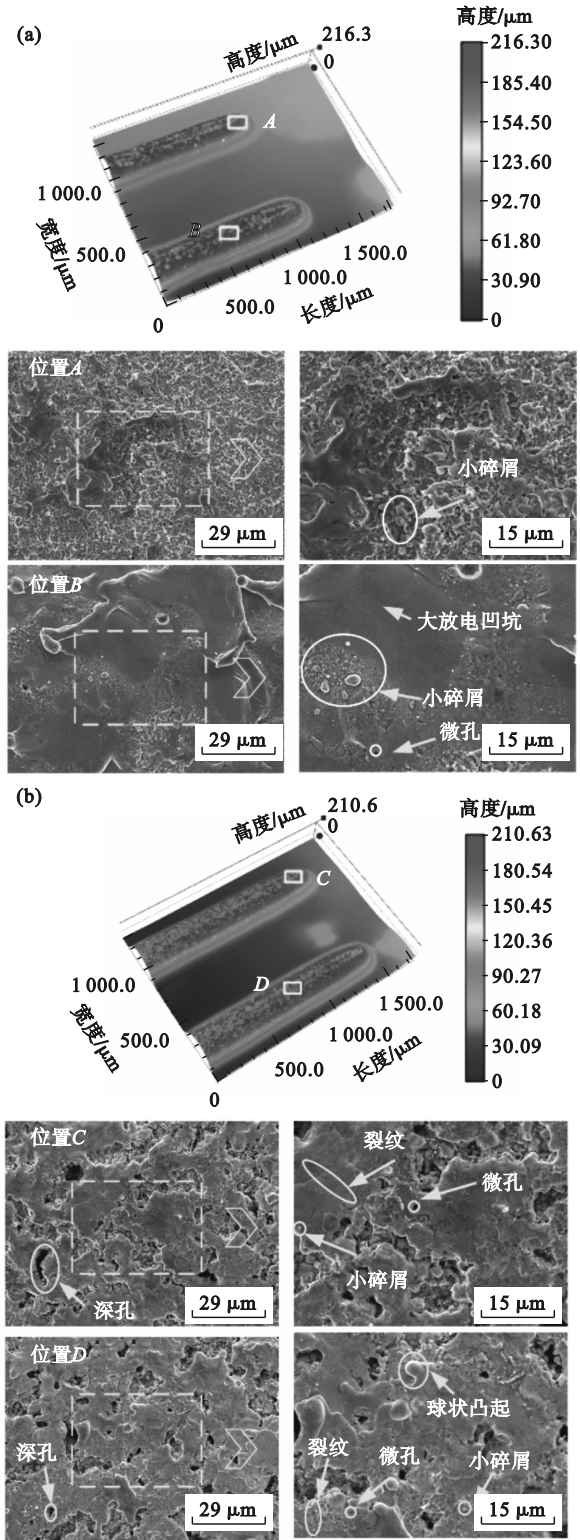


图 12 不同材料电极的表面微观形貌  
Fig. 12 Surface microscopic morphology of electrodes of different materials  
(a)—铜; (b)—铜钨合金.

形貌存在一定差异.铜电极前端多为细小的放电凹坑,而后端则分布着较大的放电凹坑.铜钨合金电极前、后端微观形貌差异则主要体现在球状突起,前端很难观察到,而后端则零星分布着一些球状凸起特征.原因是在制作微圆柱形电极的过程中,总是需要用电极前端加工出阵列圆孔,多次迭代加工会对电极前端产生表面精加工效果.两种材料的电极表面都出现了电火花加工通常存在细小的球形碎屑和微孔.此外,与铜相比,铜钨合金电极表面除了材料本身存在深孔外,还存在微裂纹.这是由于铜钨合金材料在生产过程中,熔体没有完全渗透到材料内部结构而形成多孔疏松结构,电火花加工时,温度骤变使材料产生热应力,更容易在材料缺陷处产生微观裂纹.而铜是一种延展性很好的金属,因此表面没有观察到明显的微裂纹.

提取微圆柱阵列电极的前、后端线轮廓,测量其表面粗糙度 $R_a$ ,结果如图13所示.铜电极的前、后端 $R_a$ 分别为 $0.677\ \mu\text{m}$ 和 $1.112\ \mu\text{m}$ .铜钨合金电极的前、后端 $R_a$ 分别为 $0.616\ \mu\text{m}$ 和 $0.982\ \mu\text{m}$ .整体来看,由于多次迭代加工,电极前端 $R_a$ 明显小于后端.对比不同材料电极的 $R_a$ 差异可以看出,电极前端 $R_a$ 差异相对较小,后端 $R_a$ 差异较为明显,铜电极的 $R_a$

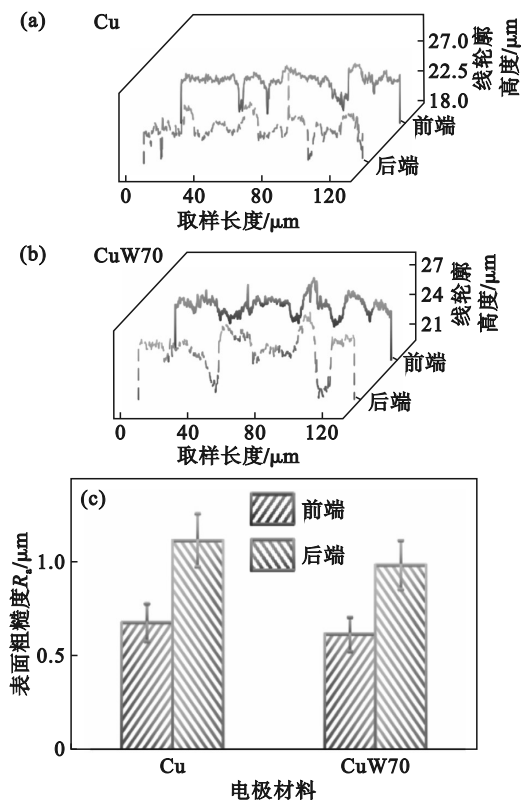


图13 不同材料电极的线轮廓及表面粗糙度  
Fig. 13 Line profile and surface roughness of electrodes of different materials

(a)—铜; (b)—铜钨合金; (c)—表面粗糙度.

较大.这是因为铜的熔点更低,在相同参数下,电火花加工形成的放电凹坑更深、边缘凸起更高.

图14为铜电极表面M点处能量色散X射线能谱(EDS)分析结果.结果表明,除了电极本身的元素外,圆柱电极表面还有大量的碳和少量的氧.这是因为在电火花加工过程中,工作介质在高温下发生热分解,形成带负电荷的胶团,在电场作用下移动到电极表面.因此,电极表面存在大量碳元素.氧元素是由加工后附着在电极表面的氧化物颗粒造成的.

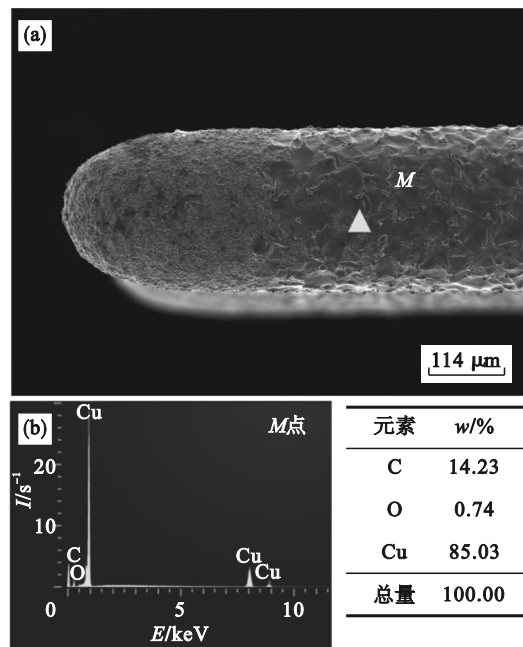


图14 铜电极表面EDS分析

Fig. 14 EDS analysis of copper electrode surfaces

(a)—电极表面微观形貌;

(b)—M点EDS分析谱图及元素质量分数.

### 3 结 论

1) 提出了利用微棱柱阵列电极电蚀致截面变圆形的特殊现象,经过多次迭代加工,高质、高效制造大长径比微圆柱阵列电极的新方法,解决了大长径比微圆柱阵列电极难加工的问题.

2) 探索了电极材料(铜和铜钨合金)对微棱柱阵列电极的损耗和新方法制作微圆柱阵列电极加工性能的影响.在微棱柱阵列电极损耗方面,铜电极进入均匀损耗阶段所需的加工次数更少、加工效率更低、损耗量更大、电极前端轮廓曲率更大.在新方法制备微圆柱阵列电极方面,铜电极所需的迭代次数更少.

3) 基于新方法,制备和评价了不同材料的 $6\times 6$

微圆柱阵列电极.铜电极的长度、直径、长径比以及加工出阵列圆孔的标准差分别约为 1 467  $\mu\text{m}$ , 241  $\mu\text{m}$ , 6.08 和 8.48  $\mu\text{m}$ , 而铜钨合金电极则分别约为 2 397  $\mu\text{m}$ , 272  $\mu\text{m}$ , 8.81 和 8.18  $\mu\text{m}$ .微圆柱阵列电极的直径一致性较好.电极前、后端的表面微观形貌存在一定差异,前端表面粗糙度  $R_a$  更小.铜电极表面存在杂质元素碳和氧.

#### 参考文献:

- [1] Kashani R G, Henslee A, Nelson R F, et al. Robotic assistance during cochlear implantation: the rationale for consistent, controlled speed of electrode array insertion[J]. *Frontiers in Neurology*, 2024, 15: 1335994.
- [2] Brunn L, Neighbors E, Martin R. Transcutaneous spinal cord stimulation with novel electrode array improves walking in a patient with incomplete spinal cord injury[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2024, 105(4): e107.
- [3] Liu H, Bai J C, Zhang B, et al. Breakthrough detection and servo control for micro-hole array EDM drilling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(1/2): 615-629.
- [4] Cheng E, Zhu Y M, Deng Q B, et al. Fabrication of micro-ultrasonic phased array electrode via electric field-driven printing method[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2024, 34(4): 045012.
- [5] Takahata K, Gianchandani Y B. Batch mode micro-electro-discharge machining [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(2): 102-110.
- [6] Singh S, Pandey A. Some studies into electrical discharge machining of Nimonic75 super alloy using rotary copper disk electrode [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(5): 1290-1303.
- [7] 孙瑶,唐本甲,巩亚东,等.镍基单晶高温合金表面微阵列孔的制备方法及其实验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(12): 1719-1725.  
(Sun Yao, Tang Ben-jia, Gong Ya-dong, et al. Preparation method and experimental study of array microholes on the surface of nickel-based single crystal superalloy [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(12): 1719-1725.)
- [8] Tkadletz M, Waldl H, Schiester M, et al. Efficient preparation of microtip arrays for atom probe tomography using FS-laser processing [J]. *Ultramicroscopy*, 2023, 246: 113672.
- [9] Song M C, Zhao H, Liu J S, et al. Replication of large scale micro pillar array with different diameters by micro injection molding [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(6): 2087-2096.
- [10] Jin L Y, Gong Y D, Sun Y, et al. Research on surface quality and tool wear of micro-groove array machined by a novel micro-milling cutter[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(3): 2383-2397.
- [11] Liang Z Q, Su Z P, Du Y C, et al. Research on design and fabrication of micro ball end milling tool with flat edge and conical flank[J]. *Precision Engineering*, 2023, 79: 323-334.
- [12] Jin L Y, Gong Y D, Hu Y T, et al. Experimental study on the influence of workpiece shape on discharge gap and burr in LS-WEDM and the preparation of microelectrode array with specific size[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130(11/12): 5965-5977.
- [13] Chen S T. A high-efficiency approach for fabricating mass micro holes by batch micro EDM[J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2007, 17(10): 1961-1970.
- [14] Wang Y K, Wang Z L, Li M S, et al. Microelectrode array fabrication by micro-WEDM [J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 69/70: 79-82.
- [15] 解宝成. 微小孔及阵列孔微细电火花加工的若干基础问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
(Xie Bao-cheng. Research on several basic problems for micro-EDM of micro hole and array holes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)

(上接第 18 页)

#### 参考文献:

- [1] Yang X W, Wu C Z, He Y, et al. A dynamic rollover prediction index of heavy-duty vehicles with a real-time parameter estimation algorithm using NLMS method [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3): 2734-2748.
- [2] Jin Z L, Zhang L, Zhang J L, et al. Stability and optimised  $H_\infty$  control of tripped and untripped vehicle rollover [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(10): 1405-1427.
- [3] Song Z S, Wang L L, Liu Y M, et al. Actively steering a wheeled tractor against potential rollover using a sliding-mode control algorithm: scaled physical test[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 213: 13-29.
- [4] Hu C, Wang Z F, Qin Y C, et al. Lane keeping control of autonomous vehicles with prescribed performance considering the rollover prevention and input saturation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(7): 3091-3103.
- [5] Zhang Y, Lu J W, Xia G, et al. Enhancing roll stability of counterbalance forklift trucks with a novel rollover index and hierarchical adaptive model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(6): 7925-7938.
- [6] Wang L P. Discrete model predictive controller design using Laguerre functions[J]. *Journal of Process Control*, 2004, 14(2): 131-142.
- [7] Wang W R, Yan J H, Wang H, et al. Adaptive MPC trajectory tracking for AUV based on Laguerre function[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 261: 111870.
- [8] Jeong D, Choi S B. Tracking control based on model predictive control using laguerre functions with pole optimization [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 20652-20663.
- [9] Panahi S, Kashani A, Danielson C. Primal-dual interior-point algorithm for symmetric model predictive control [J]. *Automatica*, 2023, 155: 111157.
- [10] Hu W J, Zhou Y H, Zhang Z L, et al. Model predictive control for hybrid levitation systems of maglev trains with state constraints [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 9972-9985.
- [11] Chu D F, Li Z L, Wang J M, et al. Rollover speed prediction on curves for heavy vehicles using mobile smartphone[J]. *Measurement*, 2018, 130: 404-411.
- [12] Larish C, Piyabongkarn D, Tsourapas V, et al. A new predictive lateral load transfer ratio for rollover prevention systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(7): 2928-2936.
- [13] 李寿涛,魏玉博,李秋媛,等.考虑车辆侧偏刚度变化的 MPC 稳定性控制方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(2): 162-167.  
(Li Shou-tao, Wei Yu-bo, Li Qiu-yuan, et al. MPC stability control method considering the variation of vehicle's cornering stiffness [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(2): 162-167.)
- [14] 朱天军,麻威,王振峰,等.基于 AdaBoost 算法的重型车辆侧翻预警研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(8): 25-33.  
(Zhu Tian-jun, Ma Wei, Wang Zhen-feng, et al. Rollover warning study of heavy vehicle based on AdaBoost algorithm [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(8): 25-33.)