

2021-12-28

Study on the Uniformity of Microgrooves in Through-Mask Electrochemical Micromachining with Moving Cathode

Li-Qun Du

1. Key laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; duliqun@dlut.edu.cn

Yi-Kui Wen

Fa-Long Guan

Ke Zhai

Zuo-Yan Ye

Chao Wang

Recommended Citation

Li-Qun Du, Yi-Kui Wen, Fa-Long Guan, Ke Zhai, Zuo-Yan Ye, Chao Wang. Study on the Uniformity of Microgrooves in Through-Mask Electrochemical Micromachining with Moving Cathode[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2021, 27(6): 658-670.

DOI: 10.13208/j.electrochem.201224

Available at: <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol27/iss6/7>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electrochemistry. It has been accepted for inclusion in Journal of Electrochemistry by an authorized editor of Journal of Electrochemistry.

移动阴极式掩膜电解加工微沟槽阵列均匀性研究

杜立群^{1,2*}, 温义奎², 关发龙², 翟科², 叶作彦³, 王超³

(1. 大连理工大学, 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学, 辽宁省微纳米及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 中国工程物理研究院, 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 掩膜电解加工是一种高效率、大规模加工微结构的特种加工方法。然而, 由于电流分布的边缘效应, 在微结构的掩膜电解加工过程中往往存在着严重的加工尺寸不一致问题。针对这一问题, 本文提出了一种移动阴极式掩膜电解加工方法。首先, 利用COMSOL有限元分析软件对微沟槽阵列掩膜电解加工过程中的电流分布和阳极轮廓形状进行了数值仿真。仿真结果表明, 相对于常规阴极结构的掩膜电解加工, 采用移动阴极结构的掩膜电解加工方法能够获得尺寸更加均匀的微沟槽阵列结构。其次, 在数值仿真的基础上, 开展了掩膜电解加工实验研究。实验结果表明, 移动阴极式掩膜电解加工方法能够有效地改善微沟槽阵列加工的尺寸均匀性。相对于常规阴极结构的掩膜电解加工过程, 移动阴极式掩膜电解加工微沟槽阵列的均匀性提高了68.3%, 并且随着阴阳极间距的增大, 微沟槽深度不均匀度呈现出先减小后增大的趋势。随着阴极宽度的增大, 微沟槽深度不均匀度逐渐增大; 随着阴极移动速度的增大, 微沟槽深度不均匀度逐渐减小, 仿真与实验结果趋势一致。

关键词: 移动阴极; 微沟槽结构; 掩膜电解加工; 刻蚀均匀性

1 引言

表面结构^[1-3]通常指在工件表面加工出的具有一定尺寸且排列整齐的凹坑、沟槽或者凸起等微结构。具有表面结构的工件在减摩减阻、光学、润滑以及信息存储等方面具有优良的性能^[4,5]。微沟槽是一种典型的表面结构, 在机械工程、生物医学、新型能源以及电子产品的高效散热等领域具有广阔的应用前景。例如, 在燃料电池双极板表面制作微沟槽结构可以提升燃料电池双极板的导电性能与散热性能, 有利于提高电池堆的输出功率和使用寿命^[6,7]; 在刀具表面制作微沟槽等微结构可以改善刀-屑接触面摩擦润滑状态, 延缓刀具磨损, 提高刀具的使用寿命^[8,9]。

微沟槽表面结构的常用加工方法包括激光束微细加工^[10]、超声微细加工^[11]、微细切削加工^[12]、电

火花微细加工^[13]及电化学微细加工等^[14]。其中, 电化学微细加工因其具有工具电极无损耗、加工后无残余应力、无再铸层, 且加工效率高等优点而被广泛采用。而掩膜电解加工结合了光刻的高分辨率及电解加工无应力等优点, 广泛地应用于表面结构的加工^[15]。

目前, 掩膜电解加工技术仍然存在一些亟待解决的问题^[16]。掩膜电解加工中电流分布存在的边缘效应严重地影响微沟槽结构的均匀性^[17], 使得掩膜电解加工的应用受限。针对单个微沟槽结构的加工, 薛腾和王艳萍等^[18,19]通过改善掩膜电解加工工艺参数的方法, 获得了形貌良好的单个微沟槽结构。在单个微沟槽结构的基础上, 研究人员开展了对微沟槽阵列结构的制作研究。Wang L等^[20]通过有限元软件模拟了不同参数下的电流分布情况

引用格式: Du L Q, Wen Y K, Guan F L, Zhai K, Ye Z Y, Wang C. Study on the uniformity of microgrooves in through-mask electrochemical micromachining with moving cathode. *J. Electrochem.*, 2021, 27(6): 658-670.

以及刻蚀趋势,用以改进电解加工工艺。刘建等^[21]利用掩膜电解加工技术在薄板上加工出尺寸在500~550 μm的群孔阵列,但结构的均匀性仍存在很大的提升空间。上述研究表明,只通过改进工艺参数的方法,无法从根本上解决微沟槽制作的均匀性问题。近年来,研究人员利用新颖的电解加工方法,从改善电流分布入手来提高电解加工微阵列结构的均匀性。Kwang-ho Chun^[22]提出采用网状电极来改善电流分布。但在实际加工中,网状电极改善电流分布的控制过程十分复杂,需要不断调节工艺参数才能达到最佳控制效果。陈晓蕾等^[23]采用辅助阳极的方法来提高微结构的均匀性,其制作出的阵列微结构深度范围为32~49 μm,该方法证明了通过改善电流分布来提高微结构均匀性的方法是有效的。

在微电铸领域,毕向阳^[24]等人利用阴极周向移动机构得到了均匀性较好的微铸层结构。受此启发,本文将移动式阴极应用于掩膜电解加工工艺过程中。通过不断改变阴阳极相对位置的方式,改善电流分布从而提高微沟槽阵列的均匀性。首先在分析电解加工基本过程的基础上,采用数值模拟的方法,对移动阴极式掩膜电解加工微沟槽的制作过程进行仿真计算,得到了不同电极间距与电极宽度下的微沟槽阵列轮廓,并与常规掩膜电解加工相对比。而后,对仿真结果进行实验验证。仿真与实验结果表明,移动阴极掩膜电解加工显著地提高了微沟槽阵列的均匀性。

2 数值模拟

2.1 物理模型

移动阴极式掩膜电解加工过程如图1所示,阴极与阳极工件间充满电解液。在电场的作用下,电解液中的阴阳离子移动,阳极裸露的金属逐渐被蚀除且产物溶于电解液中。外加的电解电源与阴阳极连接,使电解液中产生连续不断的电流^[25]。实际加工中刻蚀速度的差异性主要由电流分布引起,电流分布对于刻蚀结构均匀性起着至关重要的作用。本文研究一次电流分布情况下,阴极移动速度、阴阳极电极间距以及阴极电极宽度对电流分布的影响。同时,对掩膜电解加工过程做出如下假设:(1)电化学刻蚀溶液为各向同性且各微沟槽的成形规律一致;(2)阴阳极板间的电解溶液和电极的界面电位遵从欧姆定律;(3)考虑到电源位置在间隙之外,所以将本实验视为无源电场。

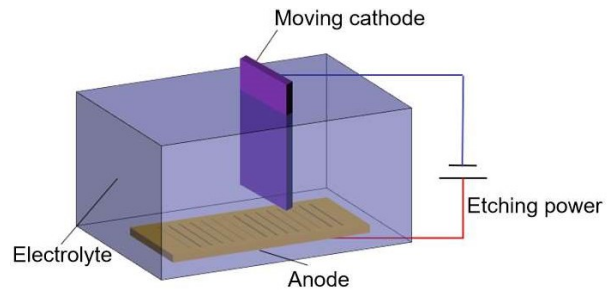


图1 移动阴极式掩膜电解加工原理示意图(网络版彩图)

Figure 1 Schematic diagram of TMEMM with moving cathode (color on line)

反应到达平衡状态时,阴阳极之间的电势分布符合拉普拉斯方程^[26]:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中, x, y, z 为间隙处各点的坐标; φ 为阴阳极的电势; ∇ 为Laplace算子。

电解过程中,某点的电流密度大小与该点的电势满足如下方程:

$$J_e = \sigma \nabla \varphi_e \quad (2)$$

式中, σ 表示溶液的电导率; J_e 表示电场区域内的电流密度, φ_e 表示电场区域中的电解电位。法拉第定律是电解加工过程中遵循的重要定律,它表述了流经电极板的电量与反应物质量之间的关系。本实验遵循法拉第一定律和法拉第二定律,根据法拉第定律可以求得掩膜电解加工中反应物质的质量如下^[27]:

$$m = \frac{QM}{zF} \quad (3)$$

式中, m 是去除金属的质量; Q 为通过极板的电量; M 为去除金属的原子量; z 为去除金属的化合价; F 为法拉第常数。

去除金属的质量公式也可表述如下:

$$m = HS\rho \quad (4)$$

根据(3)和(4)式,可以进一步化简为:

$$H = \frac{MIt}{z\rho SF} = \frac{MJt}{z\rho F} = KJ \quad (5)$$

式中, H 为刻蚀深度; S 为电解加工面积; ρ 为去除金属的密度; I 为电解总电流; J 为电流密度。

从公式(5)中可知,电解刻蚀的深度 H 与电解加工的电流密度 J 成正比。因此,要改变掩膜电解加工的均匀性,最重要的还是改善电流分布的均匀性。

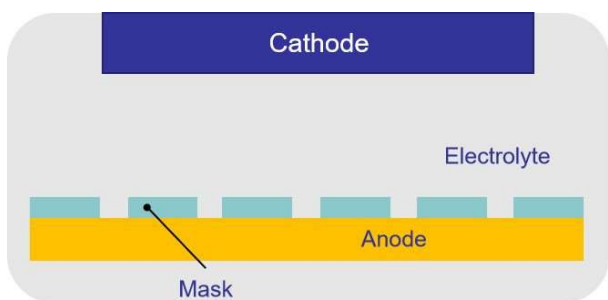


图2 固定阴极掩膜电解加工简化二维模型 (网络版彩图)
Figure 2 Two-dimensional simplified geometric model of TMEMM with fixed cathode (color on line)

2.2 几何模型及初始条件

利用COMSOL多物理场有限元分析软件,建立微沟槽阵列结构的二维几何模型进行仿真计算。并分别对常规的固定阴极式掩膜电解加工和移动阴极式掩膜电解加工的反应过程进行模拟。同时根据数值仿真计算结果进行对比,分析移动阴极式掩膜电解加工对均匀性的改善作用。

根据实际工况,将传统的固定阴极掩膜电解加工系统简化为如图2所示的二维几何模型,阴极所处位置相对阳极固定。模型中沟槽宽度为 $100\ \mu\text{m}$,沟槽中心距离为 $500\ \mu\text{m}$,电极宽度为 $4\ \text{mm}$,初始电导率选取为 $13.37\ \text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ [28],仿真时间设置为 $60\ \text{s}$ 。

为改善电流分布,采用电极宽度为 $200\ \mu\text{m}$ 的往复移动式阴极。移动阴极式掩膜电解加工简化后的二维几何模型如图3所示,其中阴极的移动速度为 $5\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.3 仿真结果分析

2.3.1 固定阴极式掩膜电解加工仿真结果

电流密度数值是反应电流分布情况的重要参

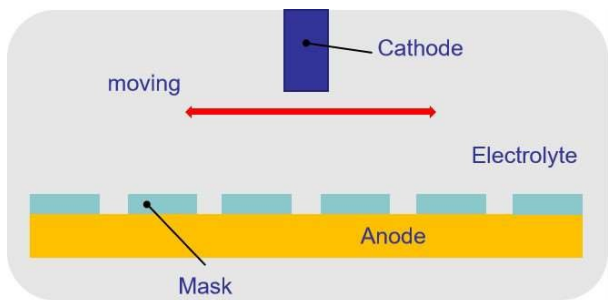


图3 移动阴极掩膜电解加工简化二维模型 (网络版彩图)
Figure 3 Two-dimensional simplified geometric model of TMEMM with moving cathode (color on line)

数。仿真计算结束后,提取反应过程中的电流密度云图如图4所示。由图可见,在微沟槽阳极电解加工区域,靠近微沟槽结构的边缘处电流密度更为集中。当采用传统的固定电极进行电解时,整个微沟槽阵列加工区域的电流分布十分不均匀,边缘沟槽处电流密度数值更大,中间位置处电流密度相对较小,二者存在明显差异。

仿真计算得到的微沟槽截面轮廓如图5所示。图中,常规掩膜电解加工后的微沟槽刻蚀深度不均匀,呈现出近边缘侧深度大,远边缘侧深度小的现象。从边缘处与中间位置沟槽的放大图可以看出,边缘处沟槽与中间位置的深度差可达 $15\ \mu\text{m}$ 。由于电流边缘效应的影响,使得电流分布不均匀,导致刻蚀速度存在差异,最终形成了这种刻蚀深

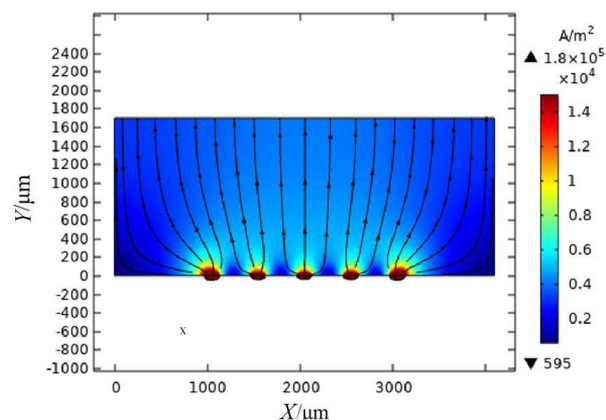


图4 固定阴极掩膜电解加工电流密度云图 (网络版彩图)
Figure 4 Current density nephogram of TMEMM with fixed cathode in simulation (color on line)

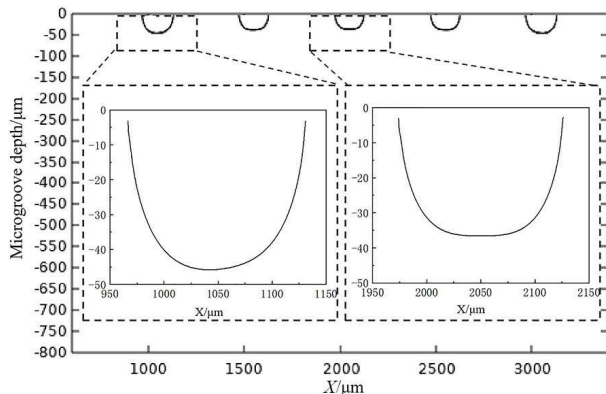


图5 固定阴极掩膜电解工微沟槽截面轮廓图 (网络版彩图)
Figure 5 Cross section profiles of microgrooves in TMEMM with fixed cathode (color on line)

度分布不均的现象。

2.3.2 移动阴极式掩膜电解加工仿真结果

改变移动阴极掩膜电解加工中电极间距和电极宽度两个几何参数, 分析二者对微沟槽电解加工均匀性的影响规律。

移动阴极式掩膜电解加工仿真过程中, 阴极所处位置不同会导致电流密度分布情况发生改变。任意选取阴极两个相对位置进行对比分析, 图 6(A)与图 6(B)分别为仿真时间 $t = 40\text{ s}$ 和 $t = 45\text{ s}$ 时阴极所处位置及其电流密度云图。由图可见, 电极位置不同时云图颜色分布存在明显差异。这说明阴极移动使得电解加工参数发生了变化。阴极在不同位置时电流密度分布情况也不同。相比于图 4 所示的固定电极电流密度分布, 当采用阴极移动的电解加工方法时, 边缘处微沟槽的电流密度数值从固定的高电流密度状态改变为数值不断变化

的状态, 于是整个微沟槽阵列的刻蚀就是在不断变化的电流分布状态下进行的。

数值模拟计算完成后, 提取的微沟槽截面轮廓如图 7 所示。由图可见, 当采用阴极移动的电解加工方式时, 虽然近边缘侧沟槽深度仍较大, 但相比图 5 所示的深度分布, 微沟槽阵列的深度分布更为均匀且边缘效应对结构的影响程度减弱, 中间位置的沟槽深度增大。从边缘处与中间位置沟槽的放大图可以看出, 边缘处与中间位置的深度差减小到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下。

改变阴阳极之间的电极间距, 在不同参数下进行仿真计算, 考察电极间距对结构不均匀度的影响规律。仿真计算完成后, 为更好地评价加工情况, 利用下述不均匀度公式对沟槽均匀性进行评价^[29, 30]:

$$D = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\min}} \times 100\% \quad (6)$$

其中, H_{\max} 为沟槽深度最大值; H_{\min} 为沟槽深度最小值。

为了研究电极间距对阳极电流分布的影响, 仿真分析了不同电极间距下的阳极反应过程, 获得了不同电极间距下的电流密度云图。如图 8 所示, 分别为电极间距为 0.8 mm 、 1.3 mm 以及 4 mm 时, 掩膜电解加工的电流密度云图。由图 8 可知, 随着电极间距的变化, 阳极基底上的电流分布会随之发生改变。当电极间距为 0.8 mm 时, 微沟槽阵列中间位置的电流密度相对较大, 中间位置结构的刻蚀深度较深, 边缘处刻蚀深度较浅, 整个微沟槽阵列的均匀性较差。当电极间距为 1.3 mm 时, 微沟

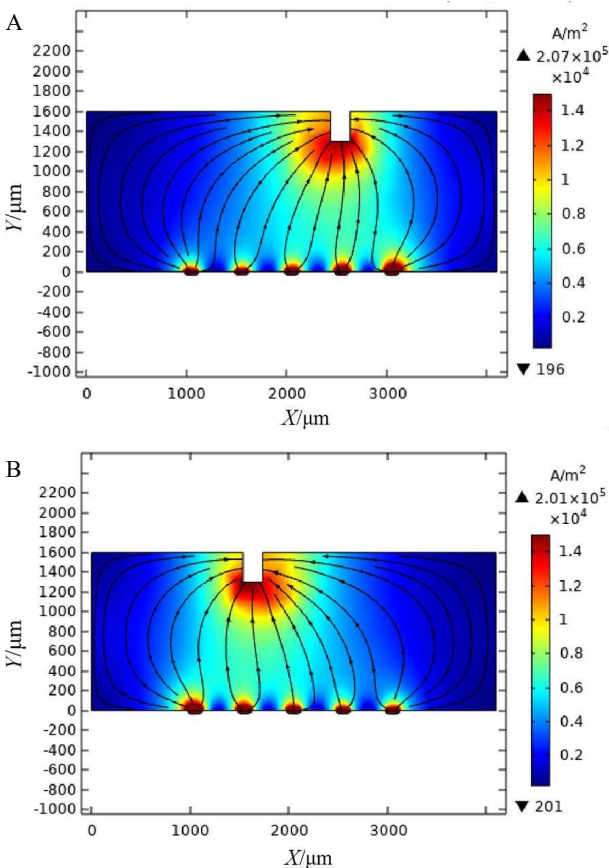


图 6 不同时间移动阴极掩膜电解加工电流密度云图。(A) $t = 40\text{ s}$; (B) $t = 45\text{ s}$ (网络版彩图)

Figure 6 Current density nephograms of TMEMM with moving cathode at different time (t). (A) $t = 40\text{ s}$, (B) $t = 45\text{ s}$ (color on line)

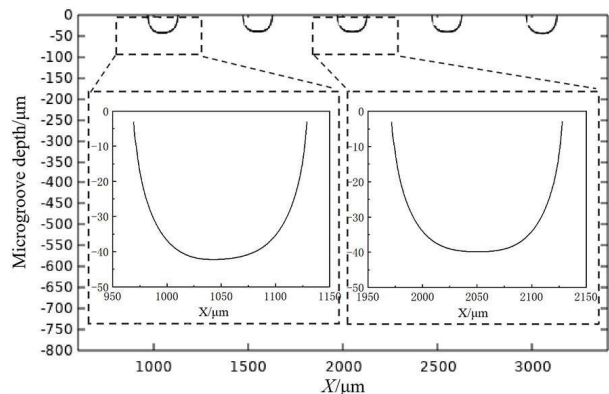


图 7 移动阴极掩膜电解加工微沟槽截面轮廓图

Figure 7 Cross section profiles of microgrooves in TMEMM with moving cathode

槽阵列的电流分布较为均匀,结构的刻蚀深度也趋于一致。当电极间距为4 mm时,从云图的颜色分布可看出边缘效应明显,微沟槽阵列边缘处的电流密度较大,中间位置的电流密度较小。电极间距与不均匀度的关系曲线如图9所示。当电极间距不断增大时,刻蚀得到的微沟槽不均匀度先下降后上升,且在1.3 mm左右达到最小值。

同理对移动阴极掩膜电解加工中阴极的电极宽度进行仿真模拟。当电极宽度增大时,电流分布会发生变化,如图10所示为不同电极宽度下的电流密度云图。由图可知,随着电极宽度的增大,边

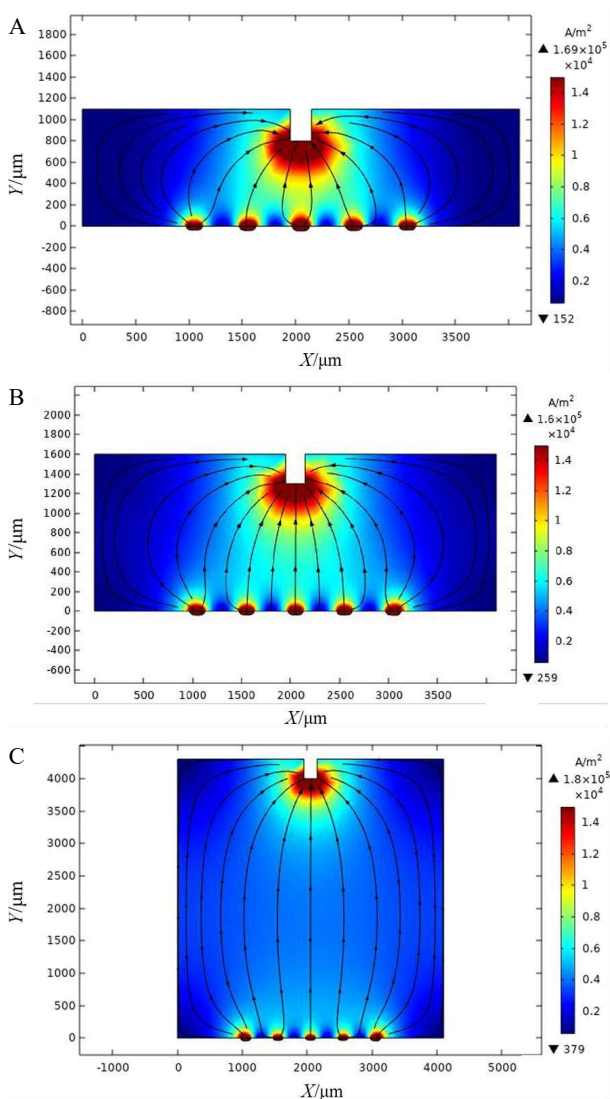


图8 不同电极间距下掩膜电解加工的电流密度云图。(A) 0.8 mm;(B) 1.3 mm;(C) 4 mm (网络版彩图)

Figure 8 Current density nephograms of TMEMM with different interelectrode distances. (A) 0.8 mm; (B) 1.3 mm; (C) 4 mm (color on line)

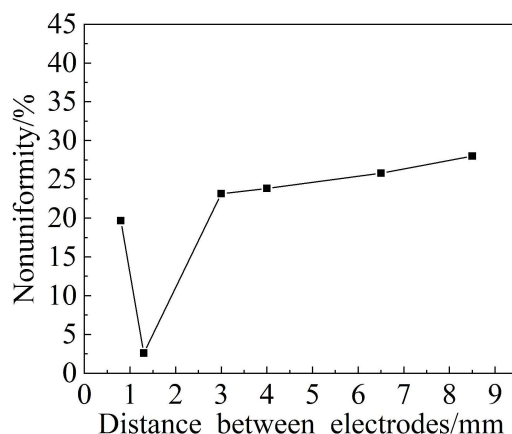


图9 阴阳极间距与不均匀度关系图

Figure 9 Relationship between electrodes distance and nonuniformity

缘处的电流密度相对较大。从云图中的电流密度极值可以看出,当阴极宽度从200 μm递增到1000 μm时,边缘处的电流密度最大值不断增大,从1.60 × 10⁵ A · m⁻²增加到1.64 × 10⁵ A · m⁻²,电流的边缘效应更加明显。分析微沟槽深度分布情况并计算不均匀度,其不均匀度变化趋势如图11所示。随着阴极宽度的增大,移动阴极掩膜电解加工的不均匀度逐渐上升,二者呈现正相关。

为了研究阴极移动速度对微沟槽阵列结构均匀性的影响,对不同阴极移动速度下的掩膜电解加工过程进行了数值仿真,利用不均匀度公式对微沟槽的深度分布情况进行分析,其不均匀度变化趋势如图12所示。当移动速度增大时,移动阴极掩膜电解加工的不均匀度逐渐减小。

2.3.3 仿真结果对比分析

为更方便地分析移动阴极式掩膜电解加工对微沟槽结构均匀性的改善情况,选取参数为电极间距1.3 mm、电极宽度200 μm以及移动速度为5 mm · s⁻¹的情况进行仿真,将该电解加工的仿真结果与常规固定阴极掩膜电解加工仿真结果进行对比。首先统计两种加工方式下沟槽深度分布情况,统计结果如图13所示。由图可见,当采用阴极移动的加工方式时,微沟槽结构的深度分布更为均匀,且近边缘侧与中间位置沟槽的深度差明显减小。再利用不均匀度公式对结果进行统计计算,统计结果如表1所示。由表1可以看出,与常规掩膜电解加工相比,移动阴极掩膜电解加工中微沟槽阵列的不均匀度有所减小,微结构的深度均匀性得到

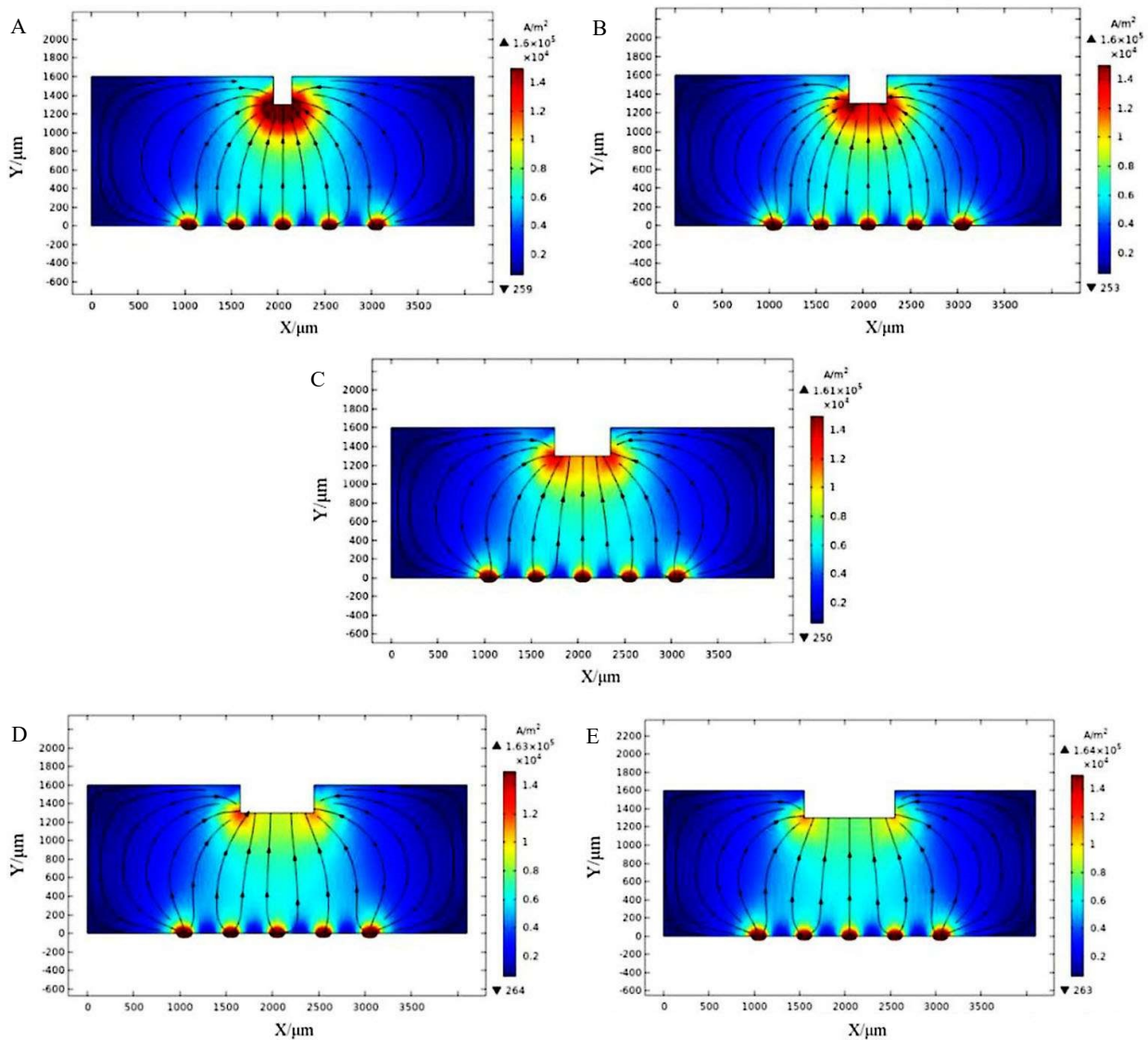


图10 不同电极宽度下掩膜电解加工的电流密度云图。(A) 200 μm;(B) 400 μm;(C) 600 μm;(D) 800 μm;(E) 1000 μm (网络版彩图)

Figure 10 Current density nephograms of TMEMM with different electrode widths. (A) 200 μm ; (B) 400 μm; (C) 600 μm; (D) 800 μm; (E) 1000 μm (color on line)

了改善。

3 移动阴极掩膜电解加工实验

3.1 实验装置

为了验证移动阴极式掩膜电解加工方法对微沟槽阵列均匀性的改善作用,进行了移动阴极式掩膜电解加工微沟槽阵列实验,并将实验结果与常规掩膜电解加工的刻蚀结果进行对比。移动阴极式掩膜电解加工实验装置如图14所示。直流电源为PLC和步进电机驱动器进行供电。PLC产生的脉冲信号和方向信号通过电机驱动器对步进电机

进行控制,从而实现阴极的往复移动,此外将阴极和阳极连接电解电源,实现电解刻蚀。

3.2 实验流程

移动阴极式掩膜电解加工实验的具体工艺流程如图15所示,刻蚀工艺参数如表2所示。其中,实验组A为移动阴极掩膜电解加工电极间距实验;实验组B为移动阴极掩膜电解加工电极宽度实验;实验组C为移动阴极掩膜电解加工阴极移动速度实验;实验组D为常规固定电极掩膜电解加工对照实验。具体实验操作流程为:首先对两块金属基板进

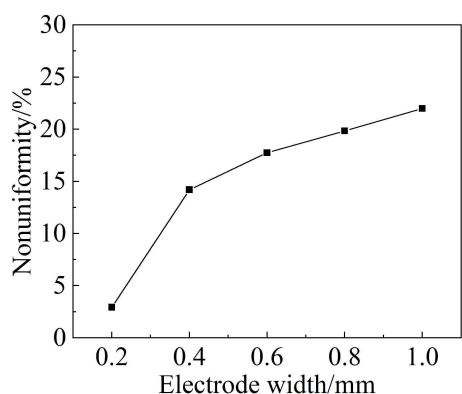


图11 阴极宽度与不均匀度关系图

Figure 11 Relationship between cathode width and nonuniformity

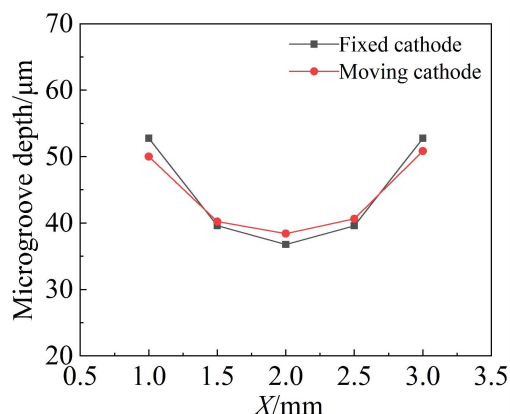


图13 微沟槽深度仿真结果对比图 (网络版彩图)

Figure 13 Simulation results of microgroove depth between moving cathode and fixed cathode (color on line)

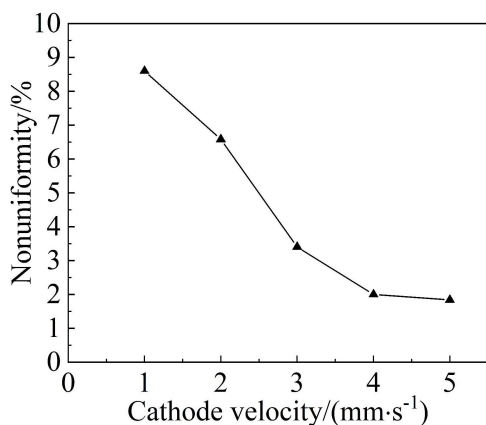


图12 阴极移动速度与不均匀度关系图

Figure 12 Relationship between cathode velocity and nonuniformity

行研磨抛光处理,清洗后将其中一个金属板用作阴极,另一金属板经过光刻胶旋涂、曝光、显影等标准工艺后,在金属板表面实现光刻胶图形化并形成掩膜。随后将阳极放置于电解槽底部且充分浸没在电解液中阴极固定在传动机构上,随传动机构进行往复运动,实现移动阴极式掩膜电解加工。

4 实验结果与分析

4.1 移动阴极掩膜电解加工实验结果

刻蚀实验完成后,利用OLYMPUS STM6工具显微镜对刻蚀的微沟槽进行观察,刻蚀后的微沟槽形貌如图16所示。相比之下,采用移动阴极式掩膜电解加工方法所获得的沟槽阵列整体形貌更加均匀。

同时,对移动阴极掩膜电解加工的微沟槽深度和均匀度进行测量和计算,并与仿真结果相对比。结果表明,仿真计算与实验结果呈现的趋势相符。其中,不均匀度与电极间距的关系如图17(A)所示。随着电极间距的增大,微沟槽结构的不均匀度先减小后增大,在间距1.3 mm左右达到极小值;不均匀度与电极宽度的关系如图17(B)所示,随着电极宽度的增大,微沟槽结构的不均匀度也逐渐增大;阴极移动速度与不均匀度之间的关系如图17(C)所示,随着阴极移动速度的增大,微沟槽的不均匀度逐渐减小。

为了研究阴极移动的搅拌作用对传质过程的影响,测量了常规固定阴极掩膜电解加工与移动阴极掩膜电解加工在5 mm·s⁻¹移动速度下的阳极

表1 微沟槽深度尺寸仿真结果

Table 1 Numerical simulation results of microgroove depth

Cathode mode	Depth of microgroove H (μm)					Nonuniformity
Moving cathode	50.0	40.2	38.4	40.6	50.8	34.1%
Fixed cathode	52.7	39.6	36.8	39.6	52.8	47.3%

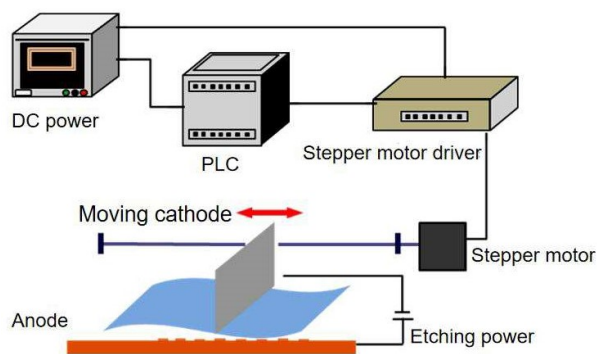


图14 移动阴极式掩膜电解加工实验系统 (网络版彩图)

Figure 14 The experimental system of TMEMM with moving cathode (color on line)

极化曲线并得到了极限扩散电流，通过极限扩散电流衡量不同加工方式的传质能力。利用上海辰

华电化学工作站对阳极极化曲线进行测量。图18为固定阴极掩膜电解加工与移动阴极掩膜电解加工在 $5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 移动速度下的阳极极化曲线测量结果。由图可见，极化曲线由2.2 V至4.0 V区间段存在一个平台期，该段为扩散层达到稳定状态时的电流。平台期反映出阳极在扩散作用下的极限扩散电流^[31]。其中固定阴极和移动阴极的极限扩散电流分别为 $8.8\times 10^{-3}\text{ A}$ 和 $1.62\times 10^{-2}\text{ A}$ 。极限扩散电流越大，则溶液的传质效果越好^[32]。由此可以看出，移动阴极的搅拌作用有助于增强传质过程，使极限扩散电流增大。

4.2 移动阴极与固定阴极掩膜电解加工实验结果对比

将移动阴极掩膜电解加工与常规固定阴极掩膜电解加工的实验结果进行对比分析，为更方便

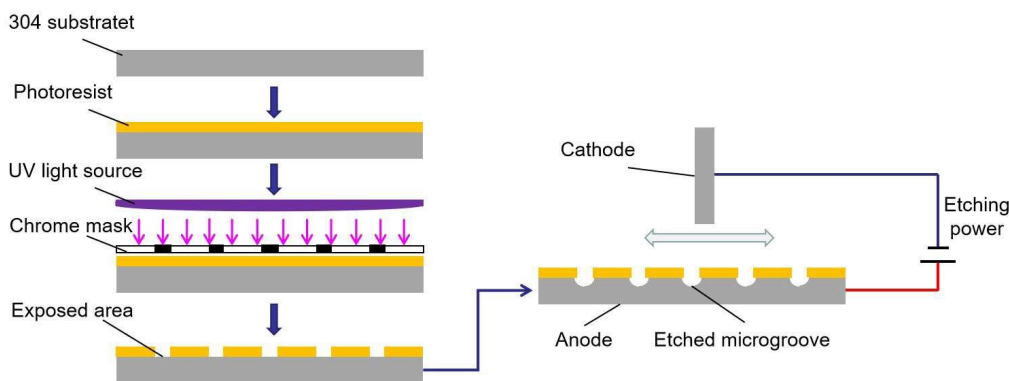


图15 移动阴极式掩膜电解加工工艺流程 (网络版彩图)

Figure 15 Fabrication process of TMEMM with moving cathode (color on line)

表2 刻蚀实验条件与工艺参数

Table 2 Experimental conditions and process parameters of TMEMM

Experimental condition	A	B	C	D
Etching substrate	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
Width of mask microgroove	100 μm	100 μm	100 μm	100 μm
Microgroove center distance	500 μm	500 μm	500 μm	500 μm
Electrolyte component	10wt.% NaCl	10wt.% NaCl	10wt.% NaCl	10wt.% NaCl
Total etching current	3 A	3 A	3 A	3 A
Etching time	60 s	60 s	60 s	60 s
Movement speed	$5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	variable	0
Mobile distance	1 cm	1 cm	1 cm	0
Electrode width	200 μm	variable	200 μm	4 mm
Distance between plates	variable	1.3 mm	1.3 mm	1.3 mm

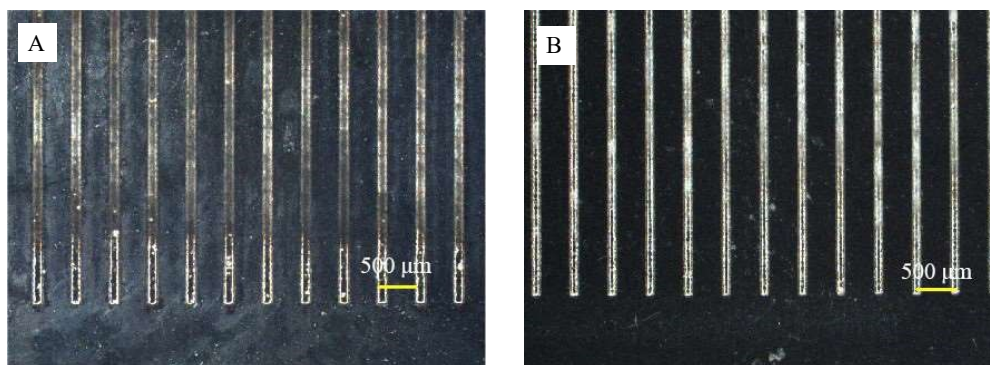


图16 沟槽阵列形貌图。(A)固定阴极掩膜电解加工;(B)移动阴极掩膜电解加工(网络版彩图)

Figure 16 Images of microgroove array. (A) TMEMM with fixed cathode; (B) TMEMM with moving cathode (color on line)

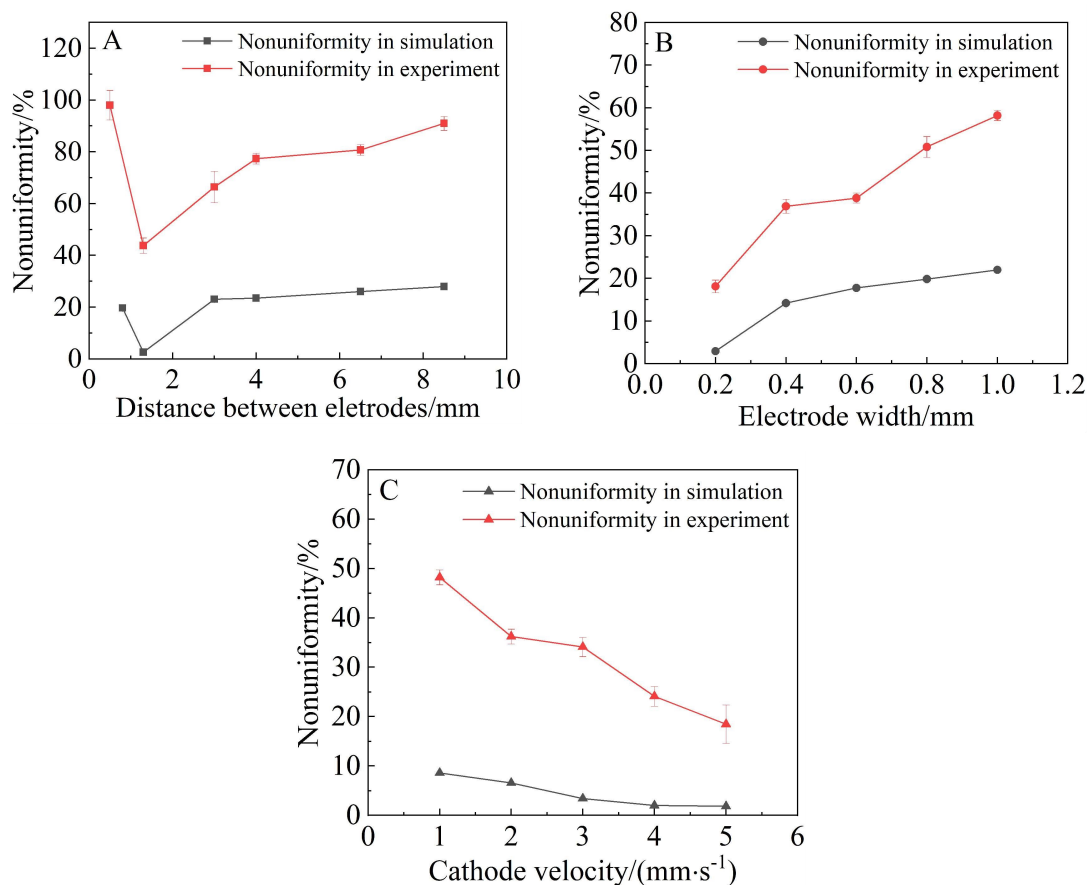


图17 刻蚀沟槽不均匀度实验与仿真结果对比图:(A)电极间距与不均匀度关系;(B)电极宽度与不均匀度关系;(C)移动速度与不均匀度关系。(网络版彩图)

Figure 17 Comparison results of microgroove nonuniformity between experiment and simulation. (A) Relationship between electrode spacing and nonuniformity; (B) Relationship between electrode width and nonuniformity; (C) Relationship between cathode velocity and nonuniformity. (color on line)

观察微沟槽的深度分布情况,对垂直于微沟槽长度方向的横截面进行观察,如图19所示,截面选取位置始终位于沟槽结构的中间位置处。如图20所

示为微沟槽阵列的横截面图,由图可见,与图20(A)中固定阴极电解加工得到的沟槽结构相比,图20(B)中移动阴极式掩膜电解加工得到的沟槽结

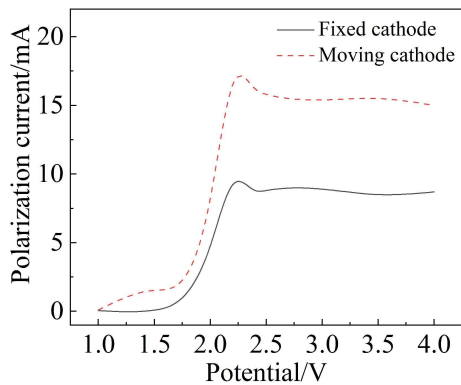


图18 在固定阴极和移动阴极条件下阳极极化曲线测量图 (网络版彩图)

Figure 18 Experimental results of anode polarization curves with and without moving cathode (color on line)

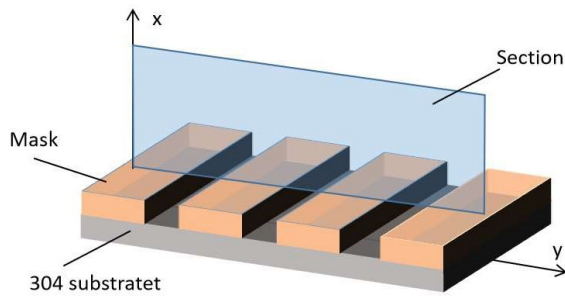


图19 截面位置图 (网络版彩图)

Figure 19 Diagram of section position (color on line)

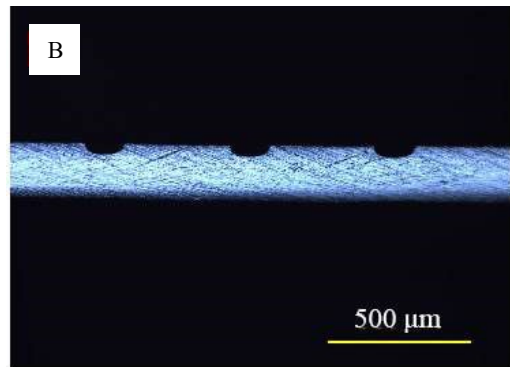
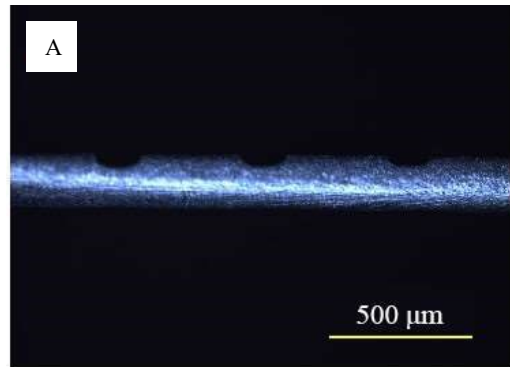


图20 不同电极形式下微沟槽截面轮廓图。(A)固定阴极掩膜电解加工;(B)移动阴极掩膜电解加工 (网络版彩图)

Figure 20 Cross section profiles of micro grooves with different cathode modes. (A) TMEMM with fixed cathode, (B) TMEMM with moving cathode. (color on line)

表3 刻蚀实验沟槽深度尺寸对比

Table 3 Comparison of microgroove depth in TMEMM experiment

Cathode mode	Depth of microgroove H (μm)									Nonuniformity
Moving cathode	41.7	39.8	35.7	35.5	35.2	36.7	37.8	38.7	39.6	18.4%
Fixed cathode	39.9	26.3	25.3	26.7	25.2	27.7	31.2	35.5	38.1	58.3%

构深度趋于一致。利用OLYMPUS STM6工具显微镜对微沟槽阵列的深度进行测量并计算其不均匀度情况,结果如表3所示。当采用移动阴极进行加工时,微沟槽结构边缘侧与中间位置的深度差由 $14 \mu\text{m}$ 减小到 $6 \mu\text{m}$,微沟槽结构的均匀性显著提升。与常规掩膜电解加工相比,移动阴极式掩膜电解加工技术使不均匀度降低了68.3%。

从以上仿真与实验结果可知,与常规的固定电极掩膜电解加工相比,采用移动阴极式掩膜电解加工方法显著提高了微沟槽结构的均匀性。

5 结论

为提高掩膜电解加工微沟槽阵列结构的均匀性,本文提出阴极移动的掩膜电解加工方法,并采用仿真与实验相结合的手段展开研究,得到如下结论:

(1)当采用移动阴极式掩膜电解加工方法时,随着电极间距的增大,微沟槽不均匀度先上升后下降,电极间距在1.3 mm左右时不均匀度达到最低。

(2)在移动阴极式掩膜电解加工中,随着阴极

宽度的增大,微沟槽不均匀度也逐渐增大。

(3)采用移动阴极掩膜电解加工时,阴极移动速度增大,微沟槽的不均匀度逐渐减小。

(4)通过比较移动阴极式掩膜电解加工与常规固定阴极式掩膜电解加工的沟槽阵列形貌可知,移动阴极式掩膜电解加工对均匀性有显著的改善效果,实际实验过程中不均匀度降低了68.3%。

参考文献(References):

- [1] Wang H X, Zhuang J, Yu J T, Qi H Y, Ma Y H, Wang H B, Guo Z J. Fabrication of anti-reflective surface with superhydrophobicity/high oleophobicity and enhanced mechanical durability via nanosecond laser surface texturing[J]. *Materials*, 2020, 13(24): 5691.
- [2] Rosenkranz Andreas, Costa Henara L, Baykara Mehmet Z, Martini A. Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear - A review[J]. *Tribol. Int.*, 2021, 155: 106792.
- [3] Guthrey H, Salles C L, Kale A S, Nemeth W, Page M, Agarwal S, Young D L, Al-Jassim M, Stradins P. Effect of surface texture on pinhole formation in SiO₂-based passivated contacts for high-performance silicon solar cells[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(50): 55737-55745.
- [4] Gao Y H(高一航). Design and application of bionic flow channel based on hexagonal structure[D]. Jilin University(吉林大学), 2019.
- [5] Yuan S H(袁思欢). Research on friction properties of micro-grooves surface textures[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(南京航空航天大学), 2011.
- [6] Hu Q H(胡清辉). Numerical simulation and design of metallic bipolar plate flow field parameters for proton exchange membrane fuel cell[D]. Wuhan University of Technology(武汉理工大学), 2016.
- [7] Su B(苏彬). The preparation of macroscopically oriented mesoporous films and their primary application in solar cells[D]. Shanghai Jiao Tong University(上海交通大学), 2009.
- [8] Zhang Y(张洋). Study on the milling performance of textured ball-end milling cutter with coating[D]. Jiangsu University(江苏大学), 2020.
- [9] Qi B Y(戚宝运). Research on cooling/lubrication technology of green cutting of titanium alloy using surface micro-textured cutting tool[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(南京航空航天大学), 2011.
- [10] Liu Y(刘煜). Study on carbide cutting tool's surface micro-texture processed by nanosecond laser and its correlative mechanisms[D]. Jilin University(吉林大学), 2021.
- [11] Zhang T(张涛). Research on surface texturing of polyimide composites by micro-ultrasonic machining[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(南京航空航天大学), 2017.
- [12] Yui A, Yan J W, Aoyama H. Ultraprecision micro grooving on brass for surface wettability control[J]. *Adv. Mater. Res.*, 2014, 1017: 489-494.
- [13] Tamura T, Akiyama R, Tanaka R, Kawamoto H, Umezui S. Groove fabrication on surface of soft gelatin gel utilizing micro-electrical discharge machining (Micro-EDM) [J]. *J. Food Eng.*, 2020, 277: 109919.
- [14] Yang Z W(杨志伟). The manufacture of array micro-protrudes and micro-pits in non-traditional machining[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(南京航空航天大学), 2007.
- [15] Baldhoff T, Nock V, Marshall A T. Through-mask electrochemical micromachining of aluminum in phosphoric acid[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2017, 164(9):194-202.
- [16] Schuster R. Electrochemical microstructuring with short voltage pulses[J]. *ChemPhysChem*, 2007, 8(1): 34-39.
- [17] Datta M. Microfabrication by through-mask electrochemical micromachining[M]//Chang S C, Pang S W (Editors). *Micromachining and Microfabrication Process Technology III, Proceedings of The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 1997, 3223: 178-184.
- [18] Lu Y N(卢亚娜). Numerical simulation and process study of electrochemical machining through mask for medical micro-channel mold[D]. Dalian University of Technology(大连理工大学), 2017.
- [19] Wang Y P(王艳萍). The study of micro-structure array machining based on lithography[D]. Dalian University of Technology(大连理工大学), 2015.
- [20] Wang L, Wang Q D, Hao X Q, Ding Y C, Lu B H. Finite element simulation and experimental study on the through-mask electrochemical micro-machining (EMM) process[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, 51: 155-162.
- [21] Liu J(刘建). Group of micro-holes produced by electrochemical machining with fixed cathode[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(南京航空航天大学), 2008.
- [22] Chun K H, Jin D S, Kim S H, Lee E S. Comparison between wire mesh and plate electrodes during wide-pattern machining on invar fine sheet using through-mask electrochemical micromachining[J]. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2017, 31(4): 1851-1859.
- [23] Chen X L, Qu N S, Li H S. Improvement of dimensional uniformity on micro-dimple arrays generated by electro-

- chemical micromachining with an auxiliary electrode[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2015, 8: 1577-1585.
- [24] Zhang J Z(张峻中). Investigation on thickness uniformity of micro parts deposited by near-cathode scanning wire-shape anode electrodeposition[D]. Henan Polytechnic University(河南理工大学), 2019.
- [25] Wang J Y(王建业), Xu J W(徐家文). Principle and application of electrochemical machining[M]. Beijing: National Defense Industry Press(国防工业出版社), 2001.
- [26] Palli S, Dey S R. Theoretical and experimental study of copper electrodeposition in a modified Hull cell[J]. *Int. J. Electrochem.*, 2016: 3482406.
- [27] Zhu H Q(朱和卿). Study on uniformity of electroforming layer of metallic microchannel plate based on micro electroforming process[D]. Dalian University of Technology(大连理工大学), 2019.
- [28] Zhai K, Du L Q, Wen Y K, Wang S X, Cao Q, Zhang X, Liu J S. Fabrication of micro pits based on megasonic assisted through-mask electrochemical micromachining[J]. *Ultrasonics*, 2020, 100: 105990.
- [29] Hume E C, Deen W M, Brown R A. Mass transfer analysis of electrodeposition through polymeric masks[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1984, 131(6): 1251-1258.
- [30] Luo J K, Chu D P, Flewitt A J, Spearing S M, Fleck N A, Milne W I. Uniformity control of Ni thin-film microstructures deposited by through-mask plating[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2005, 152(1): C36-C41.
- [31] Roy S, Pintauro P N. Analysis of mixed natural and forced convection copper deposition below the limiting current [J]. *Electrochim. Acta*, 1993, 38(10): 1461-1470.
- [32] Zhao M(赵明). Study on the Methods and mechanism of improving the thickness uniformity of micro electroforming layer[D]. Dalian University of Technology(大连理工大学), 2020.

Study on the Uniformity of Microgrooves in Through-Mask Electrochemical Micromachining with Moving Cathode

Li-Qun Du^{1,2*}, Yi-Kui Wen², Fa-Long Guan², Ke Zhai², Zuo-Yan Ye³, Chao Wang³

(1. Key laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 3. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: As a typical surface texture, microgrooves have broad prospects in the fields of mechanical engineering, bio-medicine, new energy and efficient heat dissipation of electronic products. Through-mask electrochemical micromachining (TMEMM) is widely used in the fabrication of micro-structures because of high processing efficiency and no residual stress. However, due to the edge effect of current distribution, there is often a serious dimension discrepancy problem in electrochemical machining of micro-structures. In order to weaken the influence of edge effect on the uniformity of microgrooves, the method that TMEMM with a moving cathode is presented. The current distribution in the electrochemical machining is constantly changed by the movement of the cathode. Thus, the uniformity of the micro-structure is improved. The method is studied through the combination of simulation and experimental verification. Firstly, the electrochemical machining process of TMEMM was analyzed theoretically. The theoretical analysis results show that the depth of electrolytic etching is proportional to the current density of electrolytic machining. To change the uniformity of the electrochemical machining, the most important thing is to improve the uniformity of the current distribution. On this theoretical basis, the current distribution and anodic contour of microgroove array during TMEMM are simulated by using the COMSOL finite element analysis software. The simulation results indicate that, compared with the conventional TMEMM, the TMEMM with moving cathode can obtain the microgrooves array with more uniform size. Secondly, on the basis of numerical simulation, the TMEMM experiment was carried out. The experimental results indicate that the TMEMM method of moving cathode can effectively improve the size uniformity of microgroove array. It can be observed by microscope that the microgroove array obtained by TMEMM with a moving cathode had good structural morphology and higher uniformity. Compared with conventional TMEMM, the uniformity of TMEMM with moving cathode has been improved by 68.3%. At the same time, under different experimental conditions, the trend of unevenness of microgroove array was calculated. With the increase of the distance between the cathode and anode, the microgroove depth heterogeneity showed a tendency of first decreasing and then increasing, when the distance between anode and cathode is about 1.3 mm, the unevenness of microgroove array reaches the minimum point. With the increases of cathode width and cathode speed, the depth inhomogeneities of microgroove increase and decrease gradually, respectively. The simulation results are basically consistent with the experimental results. It can be seen that the TMEMM with the moving cathode method can greatly improve the size uniformity.

Key words: moving cathode; microgroove structure; through-mask electrochemical micromachining; etching uniformity