

文章编号 1004-924X(2015)05-1304-10

## 三维队列微电极在微细电火花加工的应用

徐斌<sup>1,2</sup>, 王振龙<sup>1</sup>, 伍晓宇<sup>2\*</sup>, 雷建国<sup>2</sup>, 阮双琛<sup>3</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 深圳大学 机电与控制工程学院 深圳市模具先进制造技术重点实验室, 广东 深圳 518060;
3. 深圳大学 电子科学与技术学院 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要:**研究了三维微型腔模具的制备方法。该方法基于微型双工位分层实体制造工艺(DLOM),通过多层铜箔二维微结构叠加拟合出三维队列微电极,将制备的微电极用于微细电火花加工来制得三维微型腔模具。首先,利用线切割对100  $\mu\text{m}$ 厚的多层铜箔进行逐层切割,获得多层二维微结构。然后,通过真空压力热扩散焊对多层铜箔二维微结构进行连接,叠加拟合出三维队列微电极。最后,在电压80 V,脉冲频率0.2 MHz,脉冲宽度800 ns,休止脉宽4 200 ns的作用下,将上述工艺制备的三维队列微电极用于微细电火花加工,获得表面质量良好、形状与尺寸精度较高的三维微型腔模具。为了有效减少电极损耗对加工精度的不利影响,使用队列电极中的微电极依序对三维微型腔进行了加工。基于上述研究结果,制备了两种形状的三维队列微电极并通过微细电火花加工获得了表面粗糙度 $R_a$ 为0.48  $\mu\text{m}$ 的三维微型腔模具。与目前主流的微细电极逐层扫描放电加工三维微结构的工作方式相比,提出的三维微电极只需进行上下往返式加工便可获得三维微型腔模具,工作效率高且损耗低。

**关键词:**三维微电极;三维微型腔;微细电火花加工;微型双工位分层实体制造

**中图分类号:**TG661 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1304

## Application of 3D queue micro-electrode to micro-EDM

XU Bin<sup>1,2</sup>, WANG Zhen-long<sup>1</sup>, WU Xiao-yu<sup>2\*</sup>, LEI Jian-guo<sup>2</sup>, RUAN Shuang-chen<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing of the Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
  2. Shenzhen Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Mold & Die, College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
  3. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)
- \* Corresponding author, E-mail: wuxy@szu.edu.cn

**Abstract:** This paper focuses on the fabrication of 3D micro-cavity molds. Based on micro Double-staged Laminated Object Manufacturing (DLOM) process, 3D micro-electrodes were fabricated by superimposing multilayer 2D micro-structures and they were applied to the micro Electrical Discharge

收稿日期:2015-11-12;修订日期:2015-12-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51405306, No. 51175348, No. 51205258);中国博士后科学基金资助项目(No. 2014M552233);深圳市基础研究计划资助项目(No. JCYJ20140418095735629)

Machining (EDM) to obtain a 3D micro-cavity mold. Firstly, 100  $\mu\text{m}$ -thick Cu foils were cut by micro-EDM to obtain multilayer 2D micro-structures and then the 2D micro-structures were connected together to fit out 3D micro-electrodes through a vacuum pressure thermal diffusion welding. Under the conditions of a voltage of 80 V, a pulse frequency of 0.2 MHz, pulse width of 800 ns and a pulse interval 4 200 ns, the 3D micro-electrodes were applied to the micro-EDM and the 3D micro-cavity mold with high surface quality and a precise shape was obtained. In order to reduce the adverse impact of electrode wear on machining precision of the 3D micro-cavity mold, the 3D queue micro-electrodes were used to process the same 3D micro-cavity mold, by which the first electrode was for rough machining and the others for fine machining. On the basis of these studies, two kinds of 3D queue micro-electrodes were fabricated and the 3D micro-cavity molds with surface roughness of 0.48  $\mu\text{m}$  were obtained through the Micro-EDM. As compared with the current scanning 3D micro-EDM process, the 3D micro-cavity molds fabricated could be obtained through up and down reciprocating method of the 3D queue micro-electrodes, showing a sample machining process and higher efficiency.

**Key words:** 3D queue micro-electrode; 3D micro-cavity; micro Electrical Discharge Machining(EDM); micro Double-staged Laminated Object Manufacturing(DLOM)

## 1 引 言

随着对各种生产、生活用产品微型化、精密化要求的逐渐提高,微型零件被广泛应用于微电子、精密机械、生物医疗以及航空航天等领域。微型零件的尺寸通常在微米量级,很难用普通的加工方法对其进行加工。微细电火花加工是微型零件加工的常用技术,它具有宏观切削力小、可加工各种超硬脆材料等优点。目前,各国学者对微细电火花加工进行了深入研究,并将该技术应用于微孔、微型零件和微模具的加工等。

为了制备复杂的三维微结构,大连理工大学余祖元和日本学者 Masuzawa 等提出了微细电极的均匀损耗方法(Uniform Wear Method, UWM)<sup>[1]</sup>。使用具有简单横截面形状的微细铜电极对不锈钢材料进行逐层微细电火花加工,并成功制备出各种复杂的三维微结构。为了实现任意三维微结构的加工,Rajurkar 等提出将 CAD/CAM 系统与微细电火花加工中的 UWM 技术相结合制备复杂的三维微结构<sup>[2]</sup>。为了提高三维微细电火花加工的加工效率,清华大学李勇和佟浩等以放电间隙伺服控制实时补偿电极损耗技术为基础,提出了三维微细电火花伺服扫描加工方法<sup>[3-4]</sup>。为了对微细电火花加工过程中电极的角磨损进行补偿,Yan 等提出将机器视觉系统运用到微细电火花加工中,并通过该方法加工出了精

度较高的三维微结构<sup>[5]</sup>。为了制备三维微结构,哈尔滨工业大学王振龙和彭子龙等提出了微细电火花可逆加工方法<sup>[6-7]</sup>,该方法以电极损耗和极性效应为基础,利用电极高损耗实现微结构的沉积生长加工。针对微细电火花加工中的脉冲电源频率高、放电状态不稳定以及放电信号易畸变等问题,大连理工大学贾振元与张玲瑄等将区间二型模糊逻辑理论引入到微细电火花加工的控制系統,并以此设计实现了基于区间二型模糊逻辑的两阶伺服运动控制器<sup>[8-9]</sup>。针对三维微细电火花加工中的电极损耗,大连理工大学李剑忠等以线性补偿法和均匀损耗法为基础提出了均匀损耗微量补偿法(Combination of LCM with UWM, CLU)<sup>[10]</sup>。针对微细电火花加工效率低、排屑困难、放电状态不稳定以及电极损耗大等问题,山东大学张勤河等先后提出了压电自适应微细电火花加工技术<sup>[11]</sup>和压电陶瓷(Piezoelectric ceramic, PZT)激励同步压缩放电通道的微细电火花加工技术<sup>[12]</sup>。

由于三维微电极制备困难,因此微细电火花加工三维微结构的一般方法是以分层制造工艺为基础,采用截面形状为圆形或方形的微细电极进行逐层扫描放电加工具有复杂形状的三维微结构。这种方式虽然可以加工复杂的三维微结构,但是存在微细电极损耗严重、三维微型腔结构的加工效率低等缺点。如果采用三维微电极进行微细电火花加工,则只需要进行上下往返式加工便

可获得三维微结构,可显著提高三维微结构的加工效率。

近年来,为了提高大尺寸三维成形电极的加工效率,降低其生产周期和成本,上海交通大学赵万生和顾琳等提出采用集束电极成形三维电极<sup>[13-14]</sup>。虽然集束电极的制备策略主要是针对常规大尺寸三维电极,但其基本思想为三维微电极的制备提供了有益的参考。

为了制备三维微模具,本文作者提出了微型双工位叠层成形方法(Micro Double-staged Laminated Object Manufacturing, Micro-DLOM)<sup>[15-18]</sup>。Micro-DLOM以分层实体制造工艺(LOM)为基础,通过多层二维微结构的叠加拟合从而获得三维微模具。

以上述研究为基础,本文使用 Cu 箔为原料,将 Micro-DLOM 工艺用于三维微电极的制备,将三维微电极应用于微细电火花加工来获得三维微型腔模具。

### 2 三维队列微电极的制备工艺

Micro-DLOM 工艺制备三维队列微电极的工艺过程包括:(1)采用电火花线切割工艺对 Cu 箔进行切割获得多层二维微结构;(2)通过压力热扩散焊将多层二维微结构进行连接从而叠加拟合出三维队列微电极。用于制备三维队列微电极的 Micro-DLOM 工艺路线如图 1 所示。

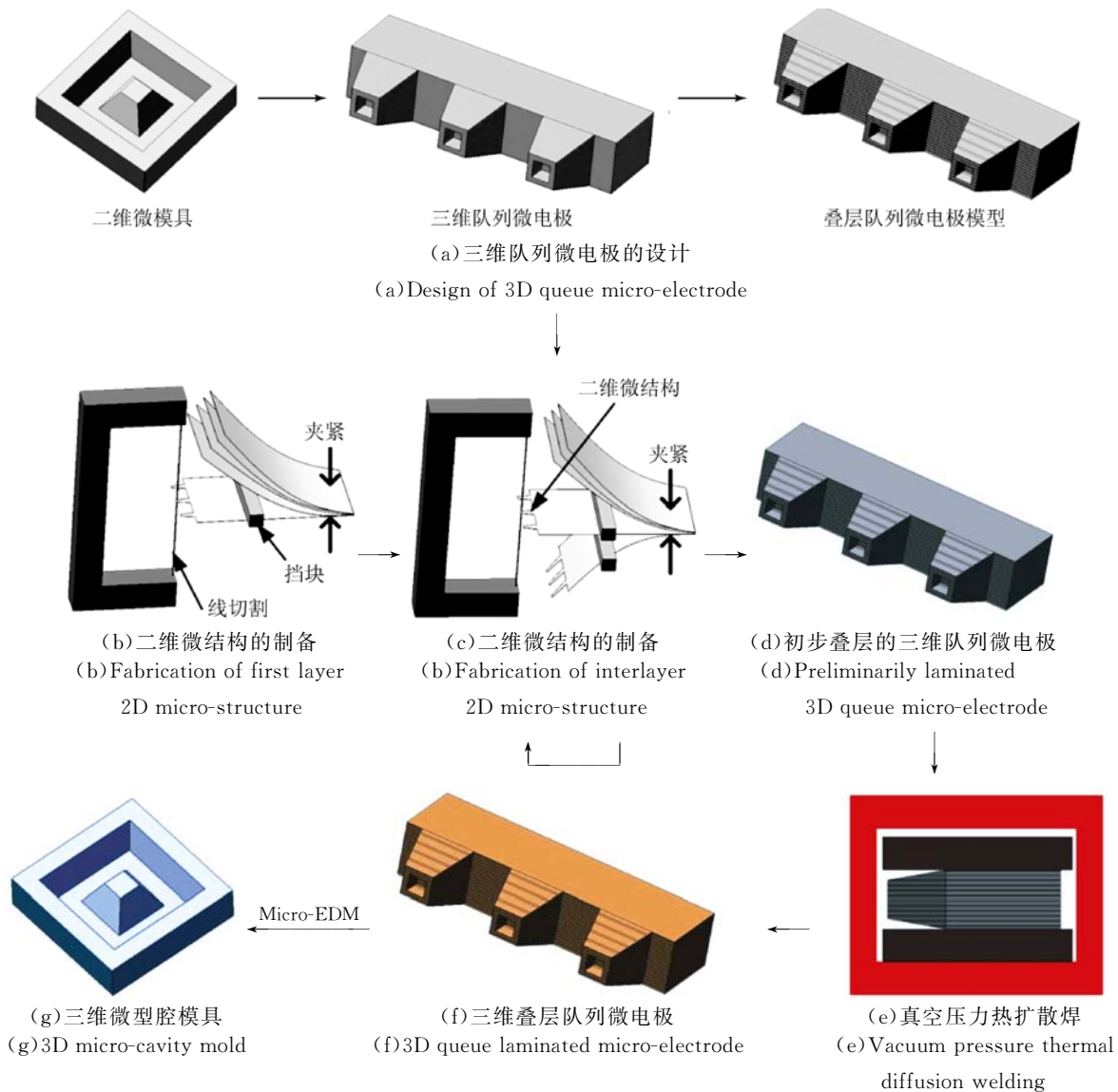


图 1 三维队列微电极的制备工艺

Fig. 1 Fabrication process of 3D queue micro-electrodes

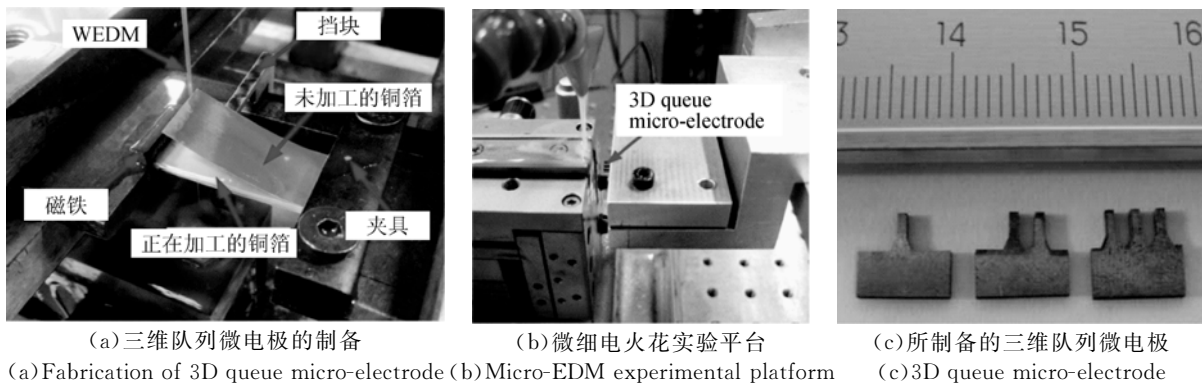


图2 三维队列微电极的制备及其微细电火花加工

Fig. 2 Fabrication of 3D queue micro-electrode and its application in micro-EDM

(1)根据三维微结构模型构建队列微电极模型,通过CAD切片软件将队列微电极模型沿其高度方向进行离散切片获得叠层队列微电极模型。切片软件还需对叠层队列微电极模型进行后处理从而获得Cu箔层数、层厚及每层Cu箔二维微结构轨迹等数据(图1a)。

(2)将确定的各层Cu箔的一端夹紧固定。Cu箔分已加工Cu箔、正加工Cu箔和待加工Cu箔。待加工Cu箔的另一端需要向上弹性弯曲并用挡块挡住(图1b和图2a),正加工Cu箔的另一端通过夹具固定,并由线切割加工该层的二维微结构,已加工Cu箔需要向下弹性弯曲并用挡块挡住(图1c和图2a)。重复上述过程,直至完成各层二维微结构的线切割加工,获得初步叠层的三维微电极(图1d)。

(3)初步叠层的三维微电极其各层二维微结构并没有真正连接,需将一端仍保持夹紧状态、初步叠层的三维微电极放入真空炉中,对其进行真空压力热扩散焊(图1e),从而完成各层铜箔二维微结构的完全连接。

(4)将上述工艺过程制备获得的三维队列微细电极(图2c)用于微细电火花加工(图2b)便可获得三维微型腔模具(图1g)。

### 3 实验材料与设备

制备三维队列微电极的材料为 $100\ \mu\text{m}$ 厚的铜箔,三维队列微电极的加工材料为304不锈钢,线切割机为深圳联高精密机械有限公司的中走丝线切割机(型号:H-CUT32F),真空炉为深圳中达

强电炉厂的真空热处理炉(型号:ZK1-12-1200),平台采用德国PI公司生产的高精度运动平台(型号:M511.DD)。另外采用日本KEYENCE公司的大景深体式显微镜(型号:VHX-1000)观察三维队列微电极和微结构的轮廓;采用日本KEYENCE公司的激光共聚焦显微镜(型号:VK-X100)测量三维微结构的表面粗糙度;采用日本JEOL公司的扫描电子显微镜(型号:JSM6490)观察微结构的表面形貌并测量微结构尺寸。

### 4 三维队列微电极的微细电火花加工

微细电火花加工的工艺参数主要包括电压、脉冲频率、脉冲宽度以及休止脉宽等。微细电火花加工主要是通过减小单脉冲放电能量和增加脉冲频率获得高精度的加工结果。将脉冲频率固定为 $0.2\ \text{MHz}$ ,主要研究电压、脉冲宽度和休止脉宽对加工结果的影响。

#### 4.1 电压对微细电火花加工结果的影响

加工电压是指在放电脉冲的作用下,微电极进行微细电火花加工时所施加在材料上的电压。加工电压对微细电火花加工结果的表面形貌和表面质量有较大影响。为了获取合适的加工电压,在其它工艺参数确定的情况下,依次施加不同的电压对加工材料进行微细电火花加工。实验所使用的 $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ 方形微电极通过5层 $100\ \mu\text{m}$ 厚的铜箔叠层制备获得,加工材料为304不锈钢。实验采用的工艺参数为:电压 $80\sim 130\ \text{V}$ ,脉冲频率 $0.2\ \text{MHz}$ ,放电脉宽 $800\ \text{ns}$ ,休止脉宽 $4\ 200\ \text{ns}$ ,加工深度 $100\ \mu\text{m}$ ,实验结果如图3所示。

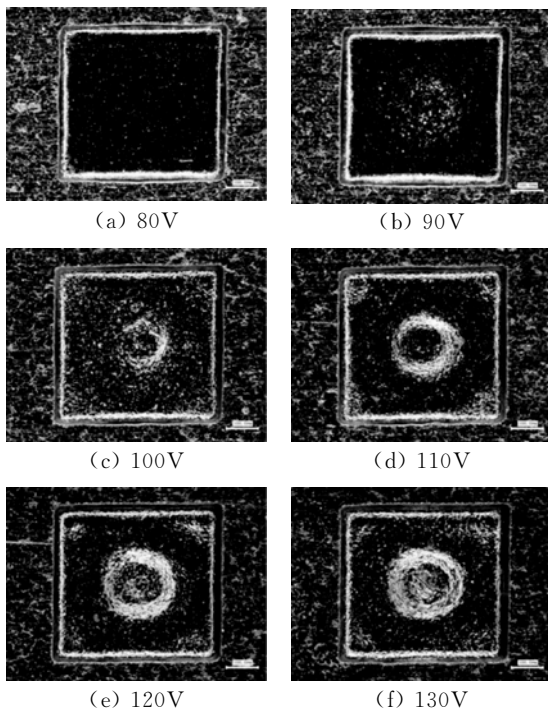


图 3 电压对微细电火花加工结果的影响

Fig. 3 Impact of voltage on micro-EDM results

由图 3 可知,随着加工电压的逐渐增大,微电极加工的微型腔中间逐渐出现凸台结构。对于凸台结构的产生,Ekmekeci 等认为是由于电极损耗的累积引起的<sup>[19]</sup>。

为了考察放电电压对微结构表面质量的影响,使用激光共聚焦显微镜测量上述加工结果的表面粗糙度,实验结果如表 1 所示。由实验结果可知:当加工电压为 80 V 时,微结构表面质量最好,此时微结构的表面粗糙度  $R_a=0.48 \mu\text{m}$ ;随着加工电压的逐渐增加,微型腔表面逐渐变得粗糙。对于上述实验结果,分析认为:随着加工电压的逐渐增加,单脉冲的放电能量增加,则单个放电脉冲蚀除不锈钢材料的体积增加。在上述这种加工状态下,微电极加工结果的表面质量也就越差。因此,出于对加工结果表面质量的考虑,选用的加工电压为 80 V。

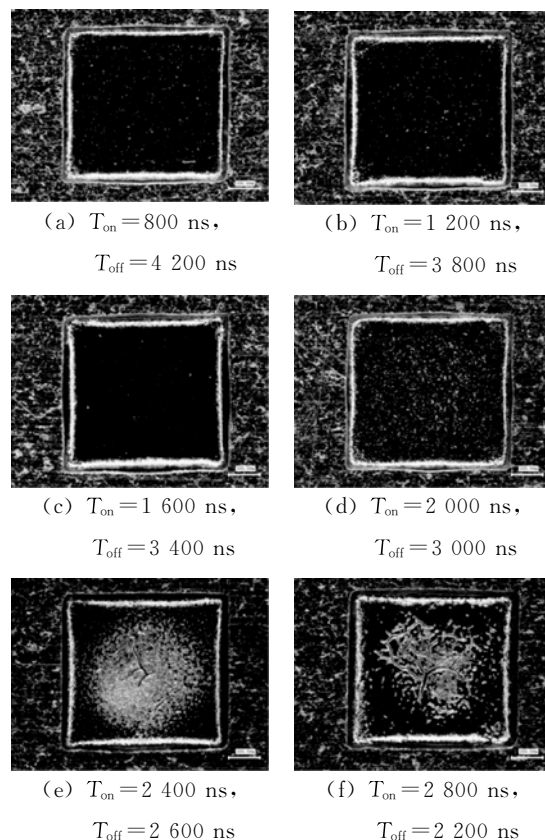
表 1 加工电压对微结构表面粗糙度的影响

Tab. 1 Impact of voltage on surface roughness of micro-cavity

加工电压/V	80	90	100	110	120	130
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.48	0.896	1.275	1.49	2.024	3.556

#### 4.2 脉冲宽度 $T_{\text{on}}$ 和休止脉宽 $T_{\text{off}}$ 对微细电火花加工结果的影响

由于所用的放电脉冲频率固定为 0.2 MHz,因此脉冲宽度和休止脉宽只能在  $5 \mu\text{s}$  内变化。为了获取合适的脉冲宽度和休止脉宽,在其它工艺参数确定的情况下,依次使用不同的脉冲宽度对不锈钢进行微细电火花加工。实验所采用的工艺参数为:脉冲宽度为 800~2 800 ns,脉冲频率为 0.2 MHz,加工电压为 80 V,加工深度为  $100 \mu\text{m}$ ,实验结果如图 4 所示。

图 4 脉冲宽度  $T_{\text{on}}$  和休止脉宽  $T_{\text{off}}$  对微细电火花加工的影响Fig. 4 Impact of pulse width  $T_{\text{on}}$  and pulse interval  $T_{\text{off}}$  on micro-EDM results

由图 4 可知,随着脉冲宽度的逐渐增加,加工工件的表面质量逐渐变差,直至将其表面烧伤。对于上述实验结果,分析认为:随着脉冲宽度的逐渐增加,休止脉宽则逐渐减小。这种情况不利于电蚀产物的及时排除,从而降低工作液的绝缘强度,影响微细电火花加工的稳定性。当放电间隙

间的电蚀产物累积到一定程度,工件表面就会产生结碳拉弧,从而将加工表面烧伤,严重影响微结构的表面质量。

为了考察脉冲宽度  $T_{on}$  和休止脉宽  $T_{off}$  对微结构表面质量的影响,使用激光共聚焦显微镜测量上述加工结果的表面粗糙度,实验结果如表 2 所示。当脉冲宽度为 800 ns 时,微结构的表面质量最好,此时微结构的表面粗糙度  $R_a=0.48 \mu\text{m}$ ;随着脉冲宽度的逐渐增加,微结构的表面粗糙度逐渐增加,表面质量逐渐变差。分析上述实验结果认为:随着脉冲宽度的逐渐增加,单脉冲的放电能量增加,则单个放电脉冲蚀除不锈钢材料的体积也就增加,并且当脉冲宽度过大时,放电过程容易产生结碳拉弧。上述因素均会对微结构的表面质量产生不利影响。因此,出于对加工结果表面质量的考虑,选用的脉冲宽度和休止脉宽分别为 800 ns 和 4 200 ns。

表 2 脉冲宽度  $T_{on}$  和休止脉宽  $T_{off}$  对微结构表面质量的影响

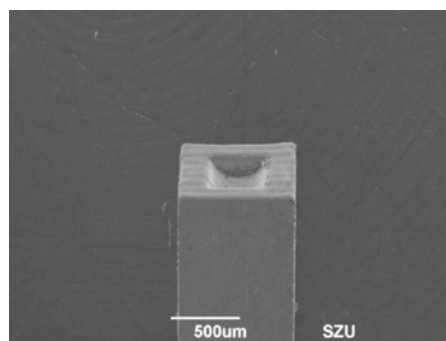
Tab. 2 Impact of pulse width  $T_{on}$  and pulse interval  $T_{off}$  on the surface quality of micro-cavity

脉冲宽度/ns	800	1 200	1 600	2 000	2 400	2 600
休止脉宽/ns	4 200	3 800	3 400	3 000	2 600	2 400
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.48	0.736	1.394	1.665	2.745	3.817

### 4.3 电极损耗对微细电火花加工结果的影响

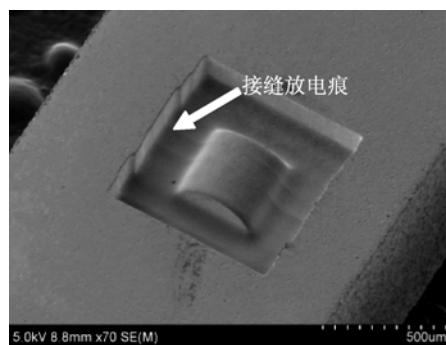
三维微电极只需进行上下往返式的加工便可获得三维微结构,在加工的过程中三维微电极也会产生损耗。三维微电极的损耗会对三维微结构的形状精度和尺寸精度产生影响。为了减小电极损耗对微型腔加工精度的影响,叠层制备三维队列微电极,并将该队列微电极依序对三维微型腔进行加工。第一个三维微电极对微型腔进行粗加工,后续电极对微型腔进行精加工,以减小电极损耗对三维微型腔精度的影响。对上述方法进行分析可知,参与微型腔加工的电极数量愈多,微型腔的精度愈高,但是微型腔的加工效率将降低。因此,为了获得合适的微电极数量,使用不同数量的微电极对同一个微型腔进行加工,结果如图 5 所示。

实验的加工对象为含有半圆柱体的三维微型腔结构,微型腔的设计深度为  $250 \mu\text{m}$ 。由图 5 可知,单个微电极所加工的三维微型腔表面质量较好,形状精度较差,含 2 个微电极的电极队列所加工的三维微型腔表面质量较好,形状精度较高,含 3 个微电极的电极队列所加工的三维微型腔表面质量较差,形状精度较好。还可以发现,通过三维微电极的电火花加工所获得的微型腔内部会出现轻微的接缝放电痕。接缝放电痕与三维微电极的焊接质量相关,三维微电极的焊接质量愈好,接缝放电痕愈不明显,反之亦然。



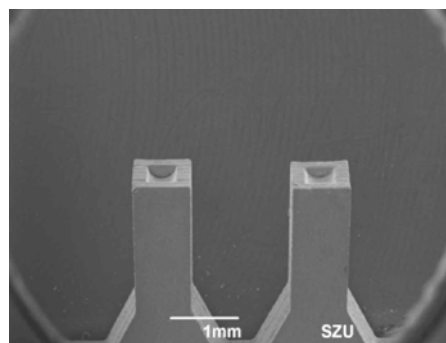
(a)加工后的单个微电极

(a) Processed single micro-electrode



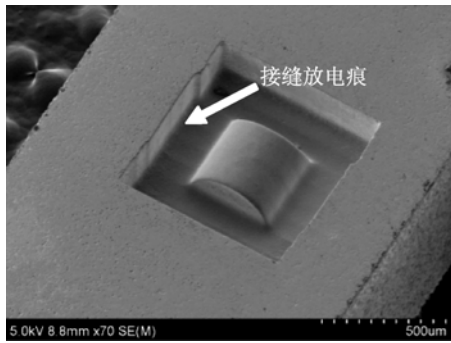
(b)单个微电极的加工结果

(b) Processing result of single microelectrode



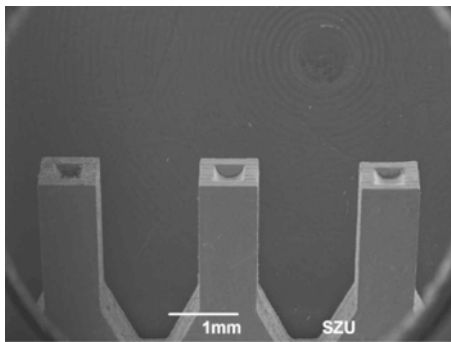
(c)加工后的微电极队列

(c) Processed queue micro-electrode with two electrodes



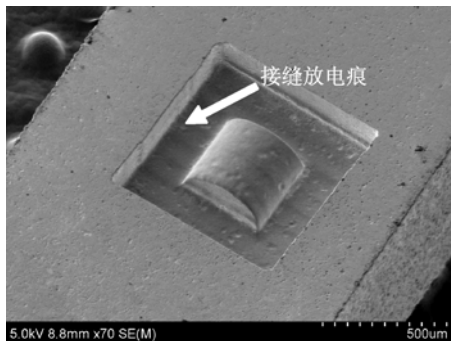
(d)两个微电极的加工结果

(d) Processing result of queue micro-electrode with two electrodes



(e)加工后的微电极队列

(e)Processed queue micro-electrode with three electrodes



(f)三个微电极的加工结果

(f) Processing result of queue micro-electrode with three electrodes

图 5 电极损耗对三维微型腔加工精度的影响

Fig. 5 Impact of 3D micro-electrode numbers on 3D micro-cavity mold

微电极的电极损耗不但会对三维微型腔的形状精度产生影响,而且会对三维微型腔的尺寸精度产生影响。为了考察电极损耗对三维微型腔尺寸精度的影响,使用大景深显微镜对微型腔的深度进行测量。图 5(b)所示的三维微型腔深度为  $235\ \mu\text{m}$ ,图 5(d)所示的三维微型腔深度为  $246\ \mu\text{m}$ ,图 5(f)所示的三维微型腔深度为

$252\ \mu\text{m}$ 。可以看出,含 2 个和 3 个微电极的电极队列所加工的三维微型腔,其形状精度和尺寸精度相差不大。因此,出于对三维微型腔加工效率的考虑,选用含有 2 个微电极的电极队列对三维微型腔进行加工。

### 5 三维队列微电极的制备及其微细电火花加工

为验证本工艺的可行性,设计了两种微型腔模具,基本形状如图 6 所示。以这两种微型腔模具为依据设计三维微电极,并使用切片软件对三维微电极模型进行离散切片从而获得铜箔层数、每层二维微结构加工路径等数据。

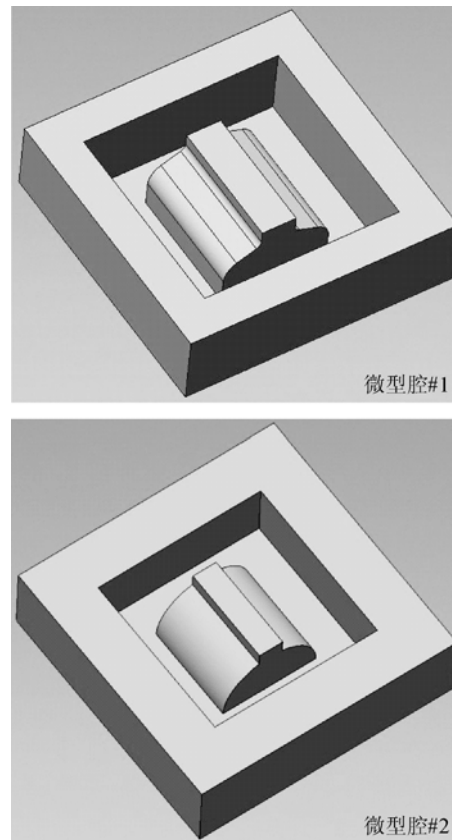


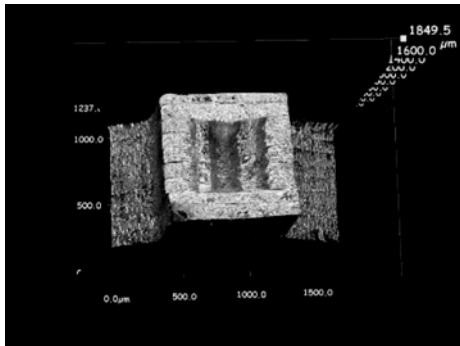
图 6 三维微型腔的设计图

Fig. 6 CAD models of 3D micro-cavity molds

以  $100\ \mu\text{m}$  厚的铜箔为原材料,使用线切割机 and 真空热处理炉制备了三维微电极。制备三维微电极的工艺参数为:线切割电流  $0.42\ \text{A}$ ,线切

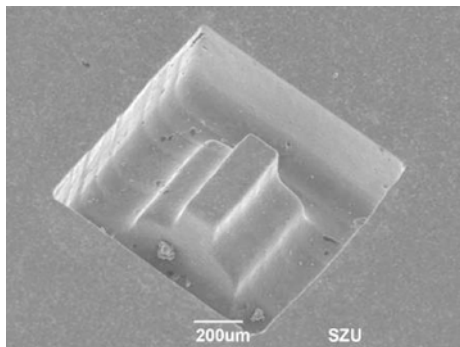
割电压 80 V,脉冲宽度 10  $\mu$ s,休止脉宽 40  $\mu$ s,热扩散温度 850 $^{\circ}$ C,热扩散时间 10 h,压力 100 N。三维微电极的制备结果如图 7 所示。

使用 2 个三维微电极构成的电极队列对 304 不锈钢材料进行微细电火花加工,从而获得三维微结构。微细电火花工艺参数为:电压 80 V,脉冲频率 0.2 MHz,脉冲宽度 800 ns,休止脉宽 4 200 ns。通过扫描电子显微镜(SEM)和大景深显微镜对加工结果进行观测,结果如图 7 所示。三维微型腔表面形貌较好;三维微电极的损耗会对加工结果的形状精度和尺寸精度产生影响,但使用 2 个微电极分别进行粗、精加工可以有效减小这种不利影响;通过三维微电极所加工的微型腔内部会出现轻微的接缝放电痕。通过显微镜对三维微型腔的基本尺寸进行测量,由测量结果可以知道,使用含 2 个微电极的队列对微型腔模具进行加工,三维微型腔模具的尺寸误差均在 10  $\mu$ m 以下,这些误差主要是由电极损耗和放电间隙等造成的。



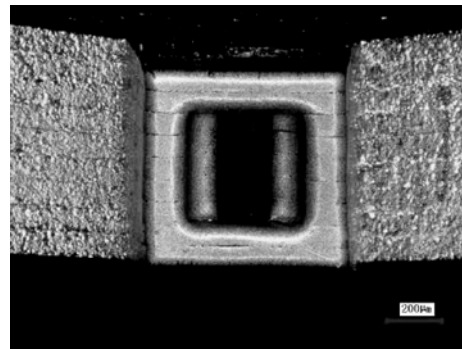
(a)未进行微细电火花加工的三维微电极(#1)

(a) 3D queue microelectrodes without micro-EDM(#1)



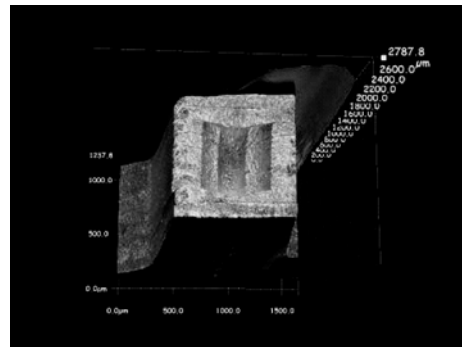
(b)三维微电极加工获得的三维微型腔(#1)

(b) 3D micro-cavity molds processed by 3D queue microelectrodes(#1)



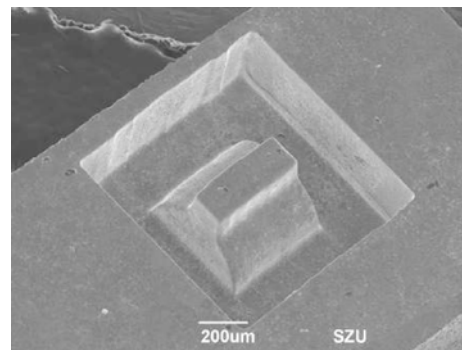
(c)精加工后的三维微电极(#1)

(c)3D microelectrode after fine processing(#1)



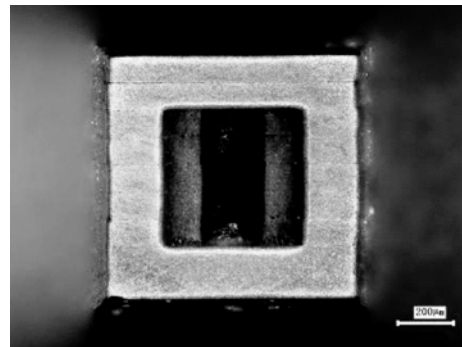
(d)未进行微细电火花加工的三维微电极(#2)

(d) 3D queue microelectrodes without micro-EDM(#2)



(e)三维微电极加工获得的三维微型腔(#2)

(e) 3D micro-cavity molds processed by 3D queue microelectrodes(#2)



(f)精加工后的三维微电极(#2)

(f)3D microelectrode after fine processing(#2)

图 7 三维队列微电极和三维微型腔

Fig. 7 3D queue micro-electrode and 3D micro-cavity molds

## 6 结 论

本文提出采用 micro-DLOM 工艺叠层制备三维阵列微电极,并通过三维阵列微电极的制备及其微细电火花加工验证了该工艺的可行性与先进性。通过对该工艺的研究发现:在电压 80 V,脉冲频率 0.2 MHz,脉冲宽度 400 ns,休止脉宽 4 600 ns 的作用下,使用三维阵列微电极对 304 不锈钢材料进行微细电火花加工,获得了质量好,表面粗糙度  $R_a=0.48 \mu\text{m}$  的微细电

火花加工获得的微型腔模具与设计模型基本相符。采用三维微电极对三维微型腔模具进行加工时,三维微电极会产生损耗并且该损耗会对微型腔的精度产生影响。使用阵列电极中的微电极依序对三维微型腔进行加工,从而降低电极损耗对三维微型腔形状精度的影响。通过三维微电极的微细电火花加工所获得的微型腔表面可能会出现接缝放电痕,接缝放电痕与三维微电极的焊接质量息息相关。因此,可以通过保证三维微电极的焊接质量减小接缝放电痕。

### 参考文献:

- [1] YU Z Y, MASUZAWA T, FUJINO M. Micro-EDM for three-dimensional cavities-development of uniform wear method [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1998, 47 (1): 169-172.
- [2] RAJURKAR K P, YU Z Y. 3D Micro-EDM using CAD/CAM [J]. *Annals of the CIRP*, 2000, 49 (7): 127-130.
- [3] TONG H, LI Y, WANG Y, *et al.*. Servo scanning 3D micro-EDM based on macro/micro-dual-feed spindle [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48: 858-869.
- [4] 李勇,佟浩,郝鼎文,等. 三维微细电火花伺服扫描加工工艺[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 4(6): 307-311.
- LI Y, TONG H, YU D W, *et al.*. Servo scanning process of 3D micro EDM [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 4 (6): 307-311. (in Chinese)
- [5] YAN M T, LIN S S. Process planning and electrode wear compensation for 3D micro-EDM [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53: 209-219.
- [6] 王振龙,彭子龙,金柏冬. 空气介质微细电火花沉积加工微结构机理 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, 7(1): 51-55.
- WANG ZH L, PENG Z L, JIN B D. Forming mechanism of micro electrical discharge machining deposition in air [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, 7(1): 51-55. (in Chinese)
- [7] PENG Z L, WANG Z L, DONG Y H, *et al.*. Development of a reversible machining method for fabrication of microstructures by using micro-EDM [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(1): 129-136.
- [8] ZHANG L X, JIA ZH Y, LIU W, *et al.*. A two-stage servo feed controller of micro-EDM based on interval type-2 fuzzy logic [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(5-8): 633-645.
- [9] 张玲瑄,贾振元,任小涛,等. 微细电火花加工放电状态逐级映射检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 662-669.
- ZHANG L X, JIA ZH Y, REN X T, *et al.*. Successive mapping detection of micro EDM discharge state [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 662-669. (in Chinese)
- [10] 李剑中,栾纪杰,虞慧岚,等. 微细电火花三维加工中电极损耗补偿新方法 [J]. *大连理工大学学报*, 2011, 51(4): 525-528.
- LI J ZH, LUAN J J, YU H L, *et al.*. A new method of electrode wear compensation in 3D micro-EDM [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2011, 51(4): 525-528. (in Chinese)
- [11] 付秀琢,张勤河,张建华,等. 压电自适应微细电火花加工系统特性分析 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(9): 164-168.
- FU X ZH, ZHANG Q H, ZHANG J H, *et al.*. Characteristics analysis of piezoelectric self-adaptive micro electrical discharge machining system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(9): 164-168. (in Chinese)
- [12] 杜连明,张勤河,张建华,等. 基于 PZT 激励同步压缩放电通道的微细电火花加工技术 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(9): 184-189.
- DU L M, ZHANG Q H, ZHANG J H, *et al.*.

- Discharge channel compressed micro-EDM techniques based on PZT excitation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(9): 184-189. (in Chinese)
- [13] LI L, GU L, XI X CH, *et al.*. Influence of flushing on performance of EDM with bunched electrode [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(1-4): 187-194.
- [14] Gu L, LI L, ZHAO W SH, *et al.*. Electrical discharge machining of Ti6Al4V with a bundled electrode [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 53: 100-106.
- [15] XU B, WU X Y, LEI J G, *et al.*. Research on micro-electric resistance slip welding of copper electrode during the fabrication of 3D metal micro-mold [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 2174-2183.
- [16] XU B, WU X Y, LING SH Q, *et al.*. Fabrication of 3D metal micro-mold based on femtosecond laser cutting and micro-electric resistance slip welding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66: 601-609.
- [17] 徐斌, 伍晓宇, 凌世全, 等. 飞秒激光切割与微细电阻滑焊组合制备三维金属微结构[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1811-1822.
- XU B, WU X Y, LING SH Q, *et al.*. Fabrication of 3D metal micro-structure based on fs laser cutting and micro electric resistance slip welding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1811-1822. (in Chinese)
- [18] 徐斌, 伍晓宇, 雷建国, 等. 逐层微细电阻滑焊工艺制备三维微结构[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1251-1259.
- XU B, WU X Y, LEI J G, *et al.*. Fabrication of 3D microstructure with layer-by-layer micro-electric resistance slip welding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1251-1259. (in Chinese)
- [19] EKMEKCI B, SAYAR A. Debris and consequences in micro electric discharge machining of micro-holes [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 65: 58-67.

#### 作者简介:



徐斌(1985-),男,山东临沂人,博士后,2013年于深圳大学获得博士学位,主要从事飞秒激光精密加工,微细加工技术,微模具制造方面的研究。E-mail: xubin\_szu@163.com

#### 通讯简介:



伍晓宇(1963-),男,四川仁寿人,教授,1995年7月于华中科技大学获博士学位,主要从事激光快速成形、微成形与微模具方面的研究。E-mail: wuxy@szu.edu.cn



王振龙(1963-),男,教授,博士生导师,1987年、1990年、2000年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位。主要从事特种加工技术、微细加工技术、机电控制技术、加工过程的智能化技术。E-mail: wangzl@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)