



## 论文

# 极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工微坑技术

明平美\*, 周维海, 赵晨昊, 周红梅, 秦歌, 张新民

河南理工大学机械与动力工程学院, 焦作 454000

\* E-mail: mingpingmei@163.com

收稿日期: 2015-12-22; 接受日期: 2016-08-05; 网络出版日期: 2016-08-29

国家自然科学基金(批准号: 51475149)、河南省科技创新人才支持计划(编号: 154100510008)和河南省高校科技创新团队支持计划(编号: 15IRTSTHN013)资助项目

**摘要** 针对常规掩膜电解加工极难在非平面工件上高效制取表面织构的难题, 在设计开发出进液、排液、导流等功能结构合为一体的特殊工具阴极的基础上, 本文提出一种极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工微坑技术, 数值仿真并优化设计了极间流场, 试验分析了掩膜厚度、极间电压、压紧力、脉冲参数等核心工艺参数对微坑几何特征及其分布特性的影响. 基于优选工艺条件, 分别在不锈钢平面与圆柱面上加工出几何特征尺寸分布较均匀的微坑阵列. 极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工对平面与曲面工件均能展现出较强的表面织构制备能力和适应性.

**关键词** 掩膜电解加工, 微坑, 柔性多孔物, 表面织构, 活动掩膜

## 1 引言

研究与应用表明, 金属制件内外表面织构化能赋予产品某些独特的功能或特性, 如降摩减阻<sup>[1,2]</sup>, 提高传热效率<sup>[3]</sup>, 改善植入体的生物兼容性<sup>[4]</sup>, 实现自清洁表面<sup>[5]</sup>, 等等. 圆形微坑阵列是一种典型的表面织构形式. 目前, 在金属表面上制备圆形微坑阵列的主要方法有: 激光加工、电火花加工、超声加工、化学蚀刻和电解加工等. 电解加工是一种基于金属阳极电化学溶解原理的特种加工方法, 其可加工性不受材料机械力学性能限制, 加工表面无宏观残余

应力、再铸层和微裂纹, 加工速度快. 基于此, 工程技术界对电解加工法制备高品质金属表面织构给予了很高期待. 电解加工有无膜电解加工和掩膜电解加工两种类型. 其中, 后者是金属表面织构制备的主流工艺.

针对传统掩膜电解加工的研究与应用开发<sup>[6-10]</sup>已有很长一段时间. 典型掩膜电解加工常需一系列繁杂的操作环节来制备掩膜, 以在工件阳极表面上形成用以定义加工区域的图形结构. 掩膜制备过程一般包括工件表面前处理、匀胶、前烘、曝光、后烘和显影等步骤, 操作条件苛刻, 影响参数多. 然而,

**引用格式:** 明平美, 周维海, 赵晨昊, 等. 极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工微坑技术. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 1005-1015  
Ming P M, Zhou W H, Zhao C H, et al. Active through-mask electrochemical machining with its interelectrode gap filled with flexible porous material (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 1005-1015, doi: 10.1360/N092015-00377

这种历经复杂环节制备而成的掩膜只能使用一次,也就是说,电解加工后掩膜必须从工件阳极表面上破坏去除掉,后续其他工件或部位的加工仍需按上述步骤重新制备掩膜.而且,受限于光刻工艺的技术能力,目前极难在非平面工件表面上制备高精度的掩膜,导致三维廓面上的掩膜电解加工几乎无法实施.因此,传统的掩膜电解加工微结构技术工艺复杂、成本高、效率低,不利于规模化生产,难以适用于复杂表面工件.

简化掩膜的制备工艺,改善掩膜的贴附方式,进而增强掩膜电解加工的技术能力与适用性,至今仍是该领域研究者的核心课题之一.与传统掩膜电解加工不同的是, Schönerberger 等人<sup>[11]</sup>提出了一种掩膜固结于工具阴极的阴极掩膜电解加工技术,实现了掩膜的多次重复应用,极大提高了加工效率.曲宁松等人<sup>[12]</sup>和 Zhang 等人<sup>[13]</sup>则采用干膜技术对这种阴极掩膜电解加工新工艺进行了研究与应用拓展.进一步, Costa 等人<sup>[14]</sup>和 Parreira 等人<sup>[15]</sup>则把工具阴极通孔化,以借助阴极与掩膜的通孔实现加工间隙喷射式给液,进而达到减小加工间隙、提高加工精度与加工效率的目的.尽管如此,相比(阳极)掩膜电解加工,金属电化学溶解原理的固有局限性及更大的极间间隙决定了阴极掩膜电解加工技术在保持与提高加工精度、定域性及其可控性方面具有更大挑战性.

与上述努力不同的是,朱荻等人<sup>[16]</sup>、Li 等人<sup>[17,18]</sup>和 Qian 等人<sup>[19]</sup>则主要致力于阳极掩膜的可再用化和加工定域性(加工精度)的提高,提出了活动掩膜电解加工技术,并进行了系统研究与开发利用.该技术用直接贴合于工件阳极上的可再用的掩膜或掩膜组合体代替传统的不可复用的黏结型掩膜.无疑,这种基于可复用模板的活动掩膜电解加工技术能显著降低掩膜制备的繁杂性和成本,提高工艺的适用性和生产效率,并为加工精度和定域性的改善创造了更大空间与可能性,发展前景好.但是,与阴极掩膜电解加工不同的是,阳极活动掩膜电解加工技术需反复进行掩膜定位、贴合、压紧与分离等操作.其中,压紧环节是关键,也是难点,直接决定着这种新型掩膜电解加工技术的可行性与适用性.目前,阳极活动掩膜的固定与贴合只好通过微柱阵列在掩膜非镂空区域施加多点压力来实现.显然,一方面,这种压贴方式极难保证活动掩膜各处能紧密且均匀地贴合在工件表面上,且不可避免地降低极间液流的顺畅性和

分布均匀性,尤其在大面积加工场合.另一方面,它在微小间距微结构特征阵列和非平面(如内外圆柱面、曲面等)工件的掩膜电解加工场合面临巨大挑战.为此,需要探索开发新的阳极掩膜电解加工技术,以期更好地满足多样化金属表面(包括非平面、大面积表面等)的高效结构化需求.对此,我们开发了一种极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工微坑技术<sup>[20,21]</sup>.本文重点对该技术的基本特征、加工原理、核心操作参数对工艺质量的影响、应用效果等方面进行阐释与研究.

## 2 加工原理与电场流场分析

### 2.1 加工原理

极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工系统的核心单元包括贴附在工件阳极上的活动掩膜、与活动掩膜贴合的柔性多孔物、多功能夹具等(图 1).其中,柔性多孔物有两方面功能:(1)传递来自夹具的力并以“面压力”的形式作用于活动掩膜上,进而使活动掩膜受力均匀且自适应地贴附在工件阳极上;(2)自身的多孔和渗流特性为电解加工的顺利进行奠定了一种相对均一的液相传质环境基础.多功能夹具内设有配流盘(图 1(c)),因此,它除了有夹压柔性多孔物的作用外,还特别具有双向导流(进液与出液)和工具阴极的作用.配流盘的中心区域设有汇液槽,此外还均匀分布地设置有进液孔、出液孔、进液槽、出液槽,且它们互独立、互不串通(图 1(b)和(c)).

电解加工时,外部泵入的电解液经总进液口流入配流盘的汇液槽后,除一部分直接通过汇液槽中的进液孔进入柔性多孔物外,其余的流经各进液槽后通过进液孔也进入柔性多孔物中.如此方式,外部电解液相对均匀地渗入到柔性多孔物中,然后在压差的作用下自柔性多孔物渗出并流入掩膜上的通孔,最终达到加工区域.加工区的金属因电化学溶解作用而不断地被蚀除.加工产物的排出和电解液的出流有两途径:少部分通过柔性多孔物的侧边(即周向极间间隙)流出;大部分通过配流盘中的出液孔回流后经出液槽排出.加工完成后,卸下的上述多功能夹具、柔性多孔物和活动掩膜可反复用于后续加工任务.

由上可知,与现有掩膜电解加工不同的是,在上述极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工工艺中,

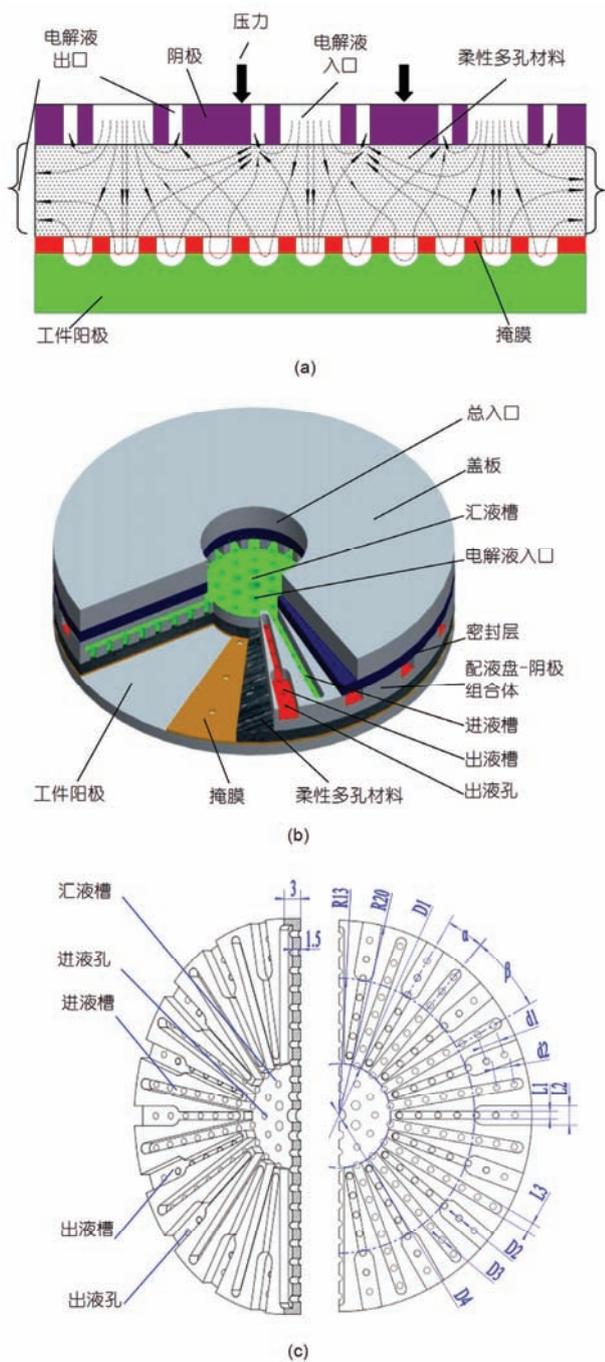


图1 (网络版彩图)极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工原理示意图

(a) 原理图; (b) 阴极-阳极组合单元配置示意图; (c) 配液盘几何特征及其主要尺寸

因柔性多孔物具有一定的弹性和可变形性, 如配以象形阴极, 活动掩膜便可在不同特征表面(平面或曲

面)的工件阳极上都能获得紧密且均匀的贴合效果; 此外, 特殊结构配流盘的引入, 从根本上改变了传统掩膜电解加工的排液模式, 使得加工产物的排出与电解液的回流更快、更均匀, 且受加工面积的影响非常小. 为此, 理论上, 新开发的极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工技术的经济性与适用性更好.

## 2.2 电场流场分析与优化

对于这种新型活动掩膜电解加工工艺, 尽管采用了特殊结构配流体以构建良好的传质基础, 但柔性多孔物的引入, 必然一定程度上降低了加工间隙内的传质速度, 并有可能影响电场流场分布特性, 进而影响工艺效果. 为此, 下面对上述因素进行数值分析与优化.

### 2.2.1 电场分析

为分析非金属柔性多孔物对极间电场分布可能造成的影响, 进行了数值分析. 分析时, 作如下假设: (1) 工件阳极上的电流密度分布仅由欧姆定律决定, 忽略其他效应影响; (2) 电解液电导率不变, 且各处相同; (3) 电解液温度恒定不变, 且各处相等; (4) 忽略电解液浓度梯度; (5) 柔性多孔物材质和厚度分布均匀, 各处阻力系数相同. 利用 Comsol 5.0 软件进行仿真分析.

从工件中心到周边, 工件阳极上各掩膜孔对应区域的初始电流密度除边缘处略高外, 整体上分布比较均匀(图 2). 但是, 各掩膜孔对应区域内部的初始电流密度很不均匀, 都呈现“孔壁处极高而中心处低”的分布特征. 这与其他文献<sup>[6-8]</sup>报道的结果相一致.

与传统掩膜电解加工(极间无多孔物填充)相比, 无论是整个工件还是各微区内部, 两者的初始电流密度分布特征都基本相同. 所不同的是, 极间充填有多孔物时, 各掩膜孔对应区域平均电流密度要比无充填时的要小约 20%. 这主要是由于加工间隙不同造成的, 柔性多孔物充填物层增大的了工间隙. 上述结果说明, 如果不考虑流场、温度场等因素, 柔性多孔物的存在对极间电场分布特征几乎没有影响, 但会降低电流密度的大小. 实际上, 柔性多孔物对极间特性的影响是必然的, 且比较复杂.

### 2.2.2 流场分析与优化

在不失一般性的情况下, 为便于分析, 作如下假

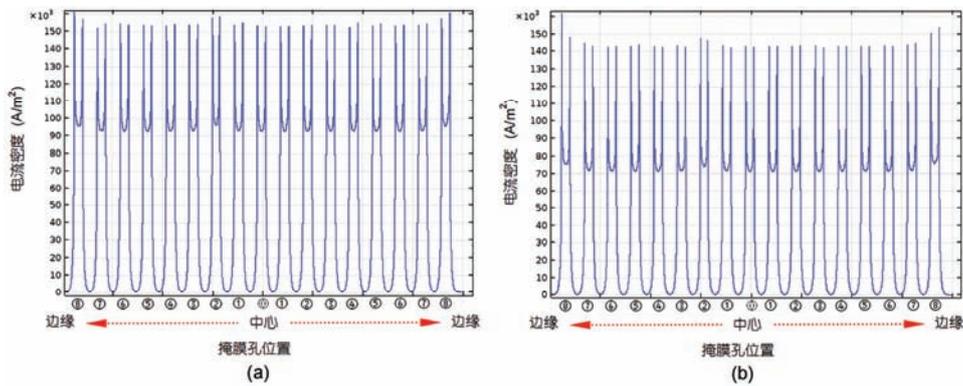


图2 (网络版彩图) 充填型与常规掩膜电解加工各掩膜孔对应区域初始电流密度分布  
(a) 充填型; (b) 常规

设: (1) 柔性多孔物材质和厚度分布均匀, 各处阻力系数相同; (2) 各处电解液温度恒定, 无能量损耗; (3) 电解液为不含固、气相的单相流体; (4) 电解加工时间极短, 忽略电解过程对流场的影响; (5) 柔性多孔物与掩膜、掩膜与工件间的贴合处无液流; (6) 液流出口压力为 1 个标准大气压。

基于标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 采用流体分析专业软件 FLUENT 6.3 对阴-阳极加工间隙内的流场进行分析。优化分析时所需的主要参数与条件如表 1 所示。初步分析表明, 导流体中的汇液槽大小  $D1$ 、汇液槽区的进液孔  $D4$ 、相邻两进液孔间距  $d2$  和相邻两出液孔间距  $d1$  等对极间流场影响较大, 本文重点对它们进行了优选。数值分析流程如图 3 所示。图 4(a) 是采用优化配流盘结构参数后得出的极间流场全局分布图。由图可知, 尽管配流盘进出液孔对应区域存在流速大小不一现象, 但整体而言, 多孔物内贴近掩膜面处的流场分布比较均匀, 基本上都处于同一个数量级, 即  $1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$  m/s。  $D1, D4, d2$  和  $d1$  的优选值分别为 10, 0.8, 2 和 3 mm。作为对比, 本文同时数值仿真分析了基于常规阴极结构(无出液孔和出液槽等)的极间流场情况, 如图 4(b) 所示。在此情况, 极间流速分布不均匀, 不但流速( $6 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3}$  m/s)比优化阴极结构小 1 个数量级, 且呈区域性大面积分布不均现象。常规阴极的厚度为 1.5 mm、贯穿孔的孔径为 1 mm、孔间距为 2 mm, 其他条件参数(如多孔物特性参数、入口压力等)与前者相同。此外, 基于结构优化的阴极, 即使充填有柔性多孔物, 各掩膜孔内的流场分布也相当均匀(图 4(c))。

上述数值仿真分析表明, 采用优化设计的工具

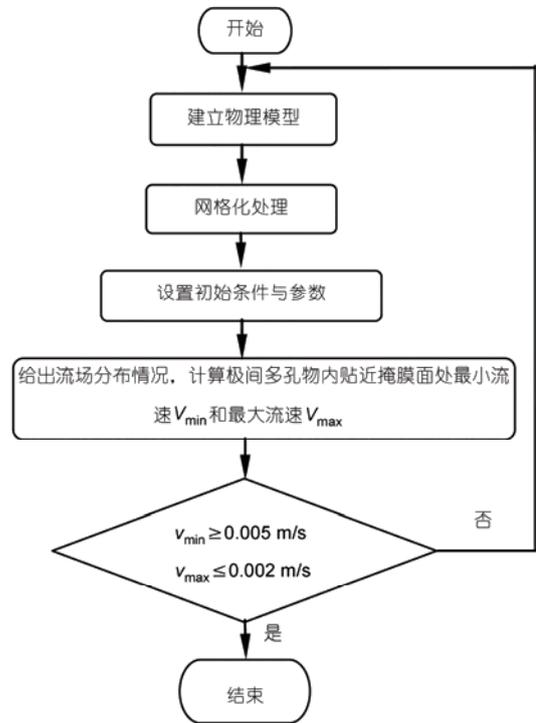


图3 极间流场仿真分析流程图

阴极结构, 极间的流场条件比较理想。这为新型活动掩膜电解加工微坑技术的可行性提供了理论支持。下面本文对其进行实验研究。

### 3 实验

实验所用的阴极为黄铜, 其结构特征和几何参数与数值仿真时的一样。工件为直径 40 mm 的不锈

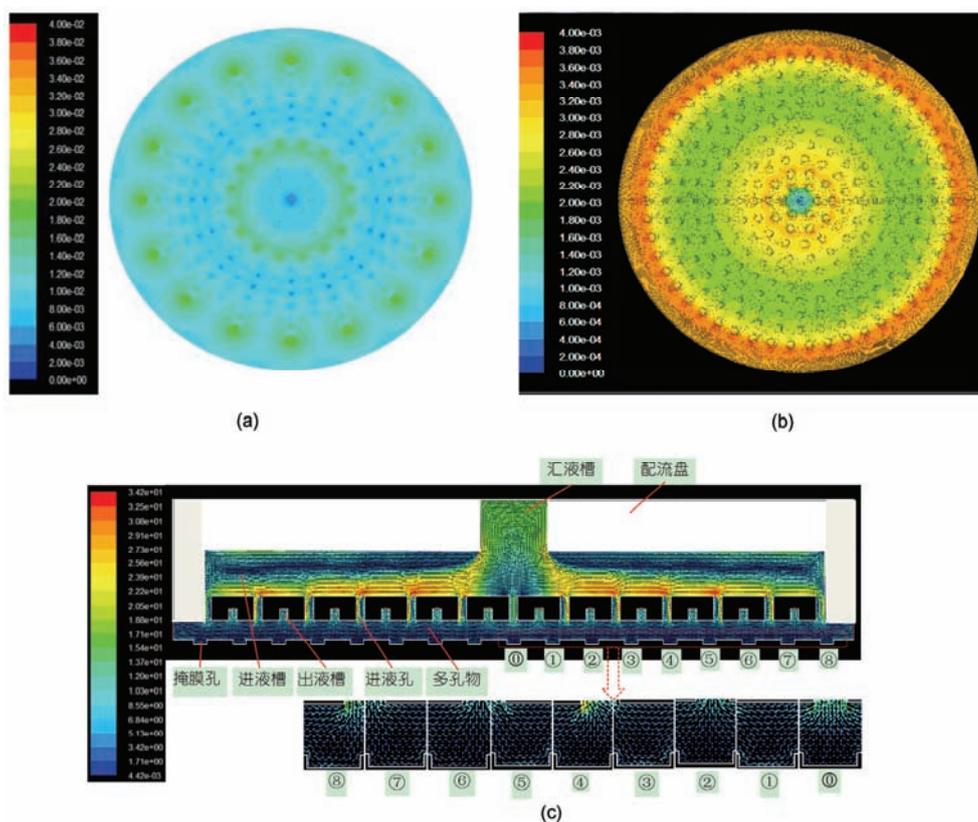


图4 (网络版彩图)柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工极间流场分布

(a) 充填型掩膜电解加工掩膜上表面(与柔性多孔物贴合面)处流场分布图; (b) 传统掩膜电解加工掩膜上表面处流场分布图; (c) 充填型掩膜电解加工极间与各掩膜孔内流场分布图

钢片(SUS304). 为利于加工产物的排除与流场的均匀, 使用脉冲电源(GKDM12-400, 成都星同力电源设备公司, 型号)的恒压模式进行加工. 加工电压为12~16 V, 脉冲宽度为10 ms, 占空比为1/2, 1/3或1/4, 柔性多孔物总压力为5或7 N, 掩膜厚度为0.1或0.2 mm, 孔径为0.5 mm, 此时的掩膜孔深径比对应为0.2或0.4. 加工时间为3 min. 其他实验参数与条件如表1所示.

利用数码照相机、超景深三维观测系统(VHX-2000, 基恩士, 日本)和扫描电子显微镜(SH4000M, HIROX, 日本)对所加工微坑阵列的形貌与廓形进行观测. 利用白光干涉仪(TALYSURF CCI6000, 泰勒, 英国)测量微坑表面的粗糙度. 为方便定量分析微坑直径与深度的分布情况, 本文特意制作了含有13个通孔的掩膜以期在工件表面的代表性空间位置加工出微坑(图5), 每个孔分别标记了序号.

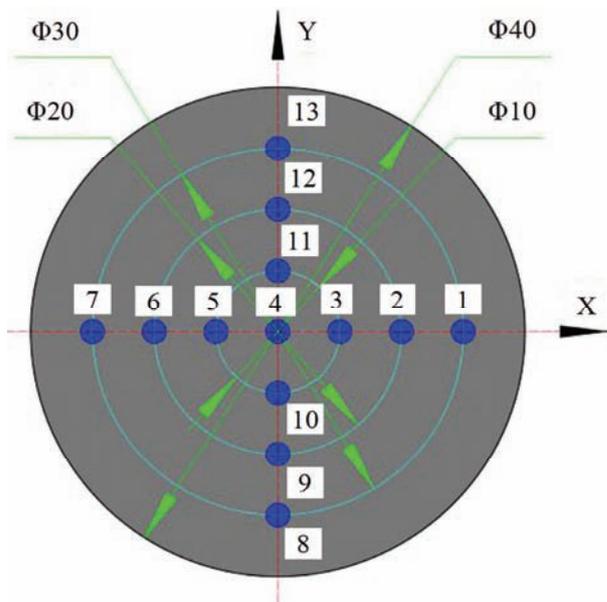


图5 (网络版彩图)掩膜孔的位置分布图

表 1 数值分析与实验所用的主要工艺与条件参数

条件和类目	取值
电解液	20wt.% NaNO <sub>3</sub>
温度( <i>T</i> )	25°C
输入压力( <i>P</i> )	1 MPa
聚丙烯柔性多孔物厚度( <i>h</i> )	0.2 mm
柔性多孔物开孔率	70%
汇液槽直径( <i>D</i> 1)	10, 15 mm
配流盘-电极组合体直径	40 mm
出液孔直径( <i>D</i> 2)	0.5 mm
进液孔直径( <i>D</i> 3)	0.5 mm
汇液槽处进液孔直径( <i>D</i> 4)	0.8, 1.5, 2 mm
工件阳极直径	40 mm
出液槽宽度( <i>L</i> 1)	1 mm
出液槽宽度( <i>L</i> 2)	2 mm
进液槽宽度( <i>L</i> 3)	1 mm
相邻两进液槽夹角( $\beta$ )	22.5°
相邻进/出液槽夹角( $\alpha$ )	11.25°
相邻两出液孔的孔间距( <i>d</i> 1)	2, 3 mm
相邻两出液孔的孔间距( <i>d</i> 2)	2, 3 mm
作用于柔性多孔物上的压力	5, 7 N
配流盘厚度	3 mm
进/出槽深度	1.5 mm

## 4 结果与讨论

由掩膜电解加工理论可知, 在阴极、导流体结构、多孔物等参数既定的条件下, 影响掩膜电解微坑加工质量的核心工艺参数为加工电压、压紧力、脉冲电参数(脉宽、占空比等)和掩膜几何尺寸等. 下面对它们的影响进行研究分析.

### 4.1 电压对微坑几何尺寸的影响

由于在既定实验条件下, 当极间电压低于 10 V 时, 金属溶解极其缓慢, 为此, 设定的电压值大于 10 V. 如图 6 所示, 电解加工施加的电压对微坑的几何尺寸(直径和深度)有一定的影响. 随着电压从 12 V 增大到 16 V, 虽然微坑的平均直径与平均深度变化不明显, 分别为 618~628 和 18~27  $\mu\text{m}$ , 但整体而言, 电压越低, 微坑直径和深度越小, 且几何尺寸分布越均匀. 如电压 12 V 时, 微坑直径与深度的极差分别为 23.3 和 7.33  $\mu\text{m}$ , 而电压 16 V 时, 上述两值分别为 87.8 和 74.59  $\mu\text{m}$ . 这显示, 高的电压因为对应着更大的电化学反应速度, 它在增大微坑直径和深度的同时, 也导致更严重的几何尺寸分布不均现象. 其原因可能是, 柔性多孔物的存在使得极间传质环境无法

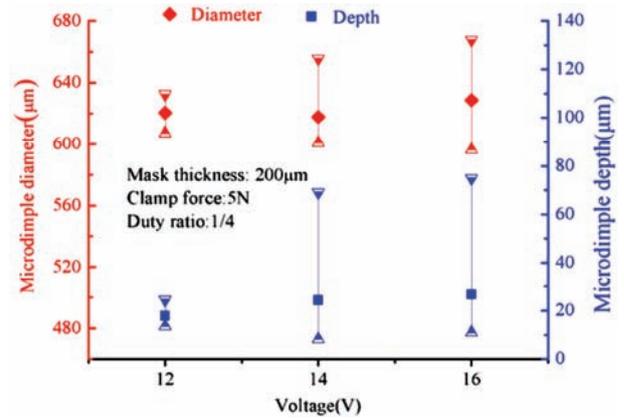


图 6 (网络版彩图)微坑几何尺寸(深度与直径)与加工电压间的关系

满足高加工电压所需求的更大的供液和产物排除速度, 导致传质受限与不均现象突出.

为此, 新型活动掩膜电解加工微坑时, 宜采用适当低的电压. 本文以下研究选定加工电压恒为 12 V.

### 4.2 压紧力对微坑几何尺寸的影响

显然, 极间柔性多孔物的被压缩程度因所受压紧力的不同而变化, 进而形成不同的渗流特性. 而渗流特性的变化无疑会影响阳极溶解过程的传质效果和(或)电场分布情况. 本研究选用 5 和 7 N 两种大小的压紧力, 以探讨压紧力对微坑几何特征的影响. 图 7 是在上述不同压紧力下获得的微坑的直径与深度的变化情况. 图 7 证实了微坑的几何尺寸及其分布对柔性多孔物所受压紧力的大小非常敏感. 当压紧力小时, 所加工微坑的直径和深度分别为 607~632  $\mu\text{m}$ (平均值 620  $\mu\text{m}$ )和 14~26  $\mu\text{m}$ (平均值 18  $\mu\text{m}$ ), 尺寸分布特性好. 而当压紧力大时, 如 7 N, 上述值分别为 571~642  $\mu\text{m}$ (平均值 606  $\mu\text{m}$ )和 16~95  $\mu\text{m}$ (平均值 43  $\mu\text{m}$ ), 尺寸分布特性明显不如前者. 这主要因为, 夹紧力大时, 柔性多孔物中的微孔的被压缩幅度更大, 从而导致它的渗流效果显著降低, 使得液体出入不畅. 在此情况下, 新鲜的电解液无法及时足额输送到加工区域, 而加工产物则极难快速顺畅排出, 此时, 还可能会诱发多种不良效应发生, 如析气、气泡与产物积聚、杂散电流严重等. 上述这些因素的综合效果, 必然导致微坑几何尺寸的离散性增大.

为此, 在保证掩膜能获得良好贴合的情况下, 应尽可能采用小的压紧力. 本文以下实验的压紧力取 5 N.

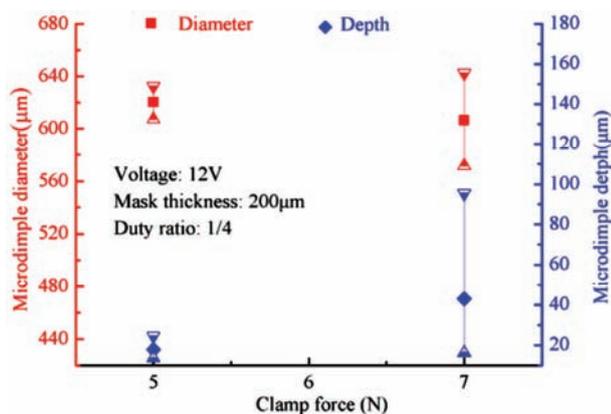


图7 (网络版彩图)微坑几何特征尺寸与柔性多孔物所施加的压紧力之间的关系

#### 4.3 脉冲占空比对微坑几何尺寸的影响

脉冲掩膜电解加工时,脉冲电参数(如脉宽、占空比等)对加工特征的几何尺寸有不同程度的影响.图8的结果显示,在脉宽一定的情况下,占空比为1/2时,加工的微坑几何特征尺寸(直径610~657.2 μm,平均值637.5 μm;深度25.6~57.7 μm,平均值41.2 μm)要比更小占空比时如1/3和1/4时获得的对应值要大得多,尺寸分布范围也更大;占空比1/4时,所对应的微坑几何尺寸分布特性最好,虽微坑较浅,但彼此相差不大,微坑直径小且一致性好.这说明,对于本新工艺,宜采用更小的占空比进行加工,以为蚀除产物的排离提供更多的时间,进而创造更好的加工环境.

#### 4.4 掩膜厚度对微坑几何尺寸的影响

研究<sup>[6-10]</sup>已表明,在掩膜电解加工过程中,掩膜

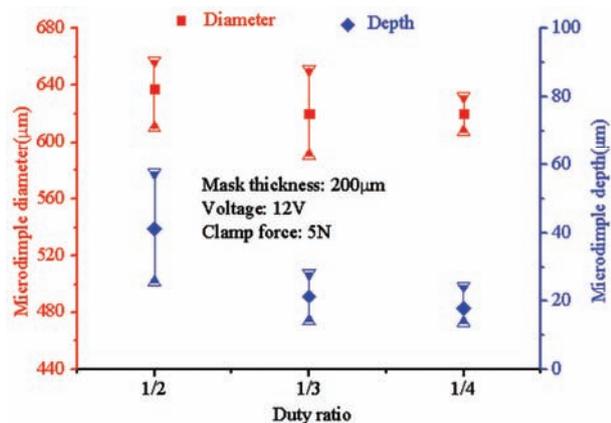


图8 (网络版彩图)微坑几何特征尺寸与脉冲电流占空比间的关系

厚度或掩膜孔的深径比因为影响电场分布与传质效果进而影响微坑/孔的廓形特征.对于本新工艺,图9也同样证实了掩膜几何尺寸与微坑直径与深度的关系.很明显,采用较大的掩膜厚度(意味加工间隙与掩膜孔深径比更大),如0.2 mm,能获得尺寸分布特性更好的微坑.而且,在此情况下,微坑表面更光滑,0.1 mm厚度掩膜普遍存在的“小岛”(图10(c))现象消失.这其中的原因文献<sup>[6-10]</sup>已有详细解释.因此,适当大的掩膜厚度或掩膜孔深径比更有利于获得满意的加工效果.

#### 4.5 微坑廓形特征及几何尺寸分布

如图10所示,优化条件下加工而成的微坑呈“浅盆状”廓形特征,表面较光滑,表面粗糙度Ra为1.35~3.56 μm(图10(a)和(b)).图11所示的为采用优化工艺参数,即掩膜厚度0.2 mm、压紧力5 N、加工电压12 V和脉冲电流占空比1/4,加工出的13个微坑直径与深度分布情况.由图11可知,采用优化后的工艺参数加工而成的微坑直径与深度尺寸分布均匀性比较理想:微坑直径615.2~630.5 μm,深度14.5~20.0 μm.与之对比的是,当采用无特殊导电结构的常规多孔阴极时,柔性多孔物贴附型掩膜电解加工的微坑直径和深度分别为655.2~757.6 μm和28.7~82.6 μm,加工定域性和尺寸分布均匀性明显比前者差.但是,不论采用何种阴极结构,整体上看,微坑几何尺寸空间上都呈中心区域偏小、四周偏大的分布特征.这种分布特征与各自对应的极间流场分布状况基本一致,如图4所示,所以,极间传质状况与微坑几何尺寸的分布特性密切关联.同时,上述结果也

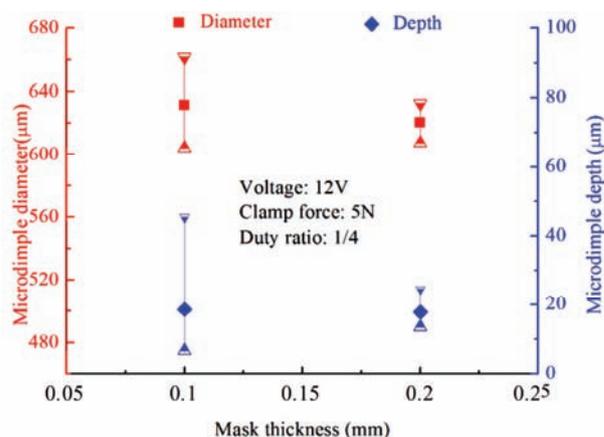


图9 (网络版彩图)微坑几何特征尺寸与掩膜厚度间的关系

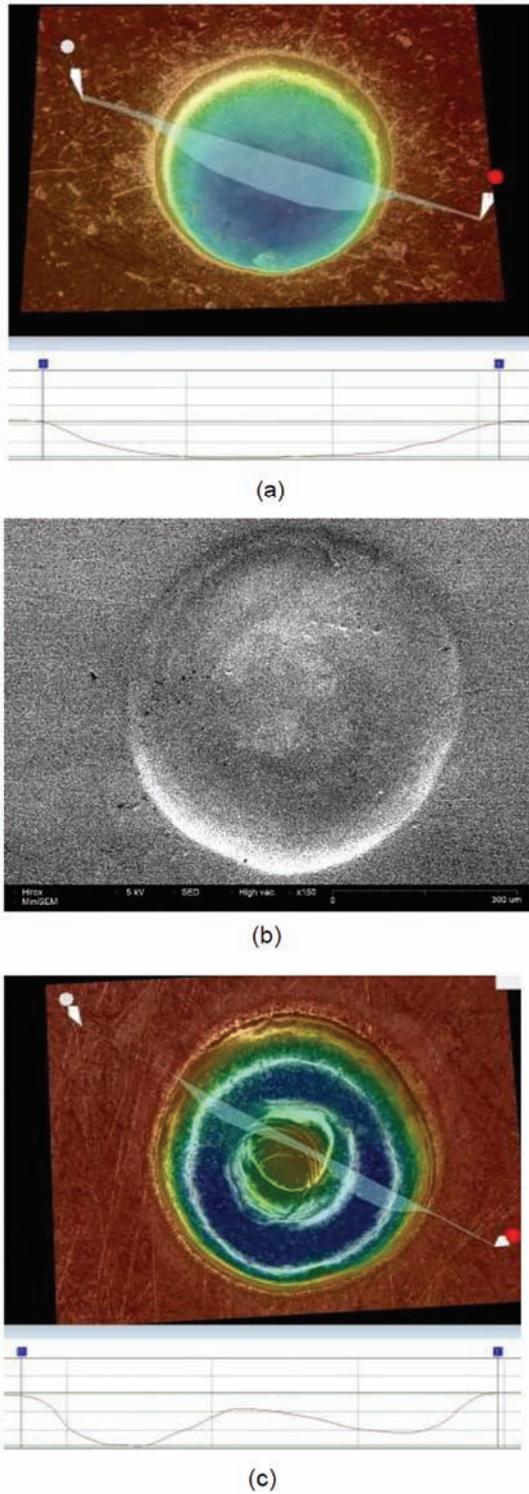


图 10 (网络版彩图)掩膜厚度不同时获得的微坑的典型廓形特征

(a) 微坑三维廓形(掩膜厚度为 0.2 mm); (b) 微坑扫描电子显微镜图(掩膜厚度为 0.2 mm); (c) 微坑三维廓形(掩膜厚度为 0.1 mm)

说明, 极间含有柔性多孔物的阳极活动掩膜电解加工需要配合采用特殊导流结构的阴极以改善传质特性.

### 5 微坑阵列加工

为评价极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工技术在平面与非平面工件上成形微坑阵列的应用效果, 分别在  $\phi 40$  mm 的 SUS304 不锈钢薄片和  $\phi 48$  mm 的 SUS304 不锈钢圆柱面加工微坑阵列. 不锈钢薄片上的加工方式和主要工艺参数与前述试验的相同. 如图 12 所示, 在平面工件上各微坑的廓形特征基本一致, 表面较光滑, 直径为  $611.8\sim 627.3\ \mu\text{m}$ , 深度为  $13.3\sim 19.1\ \mu\text{m}$ , 几何尺寸均一性较高. 圆柱面微坑阵列的加工采用专门设计的阴极, 如图 13 所示.

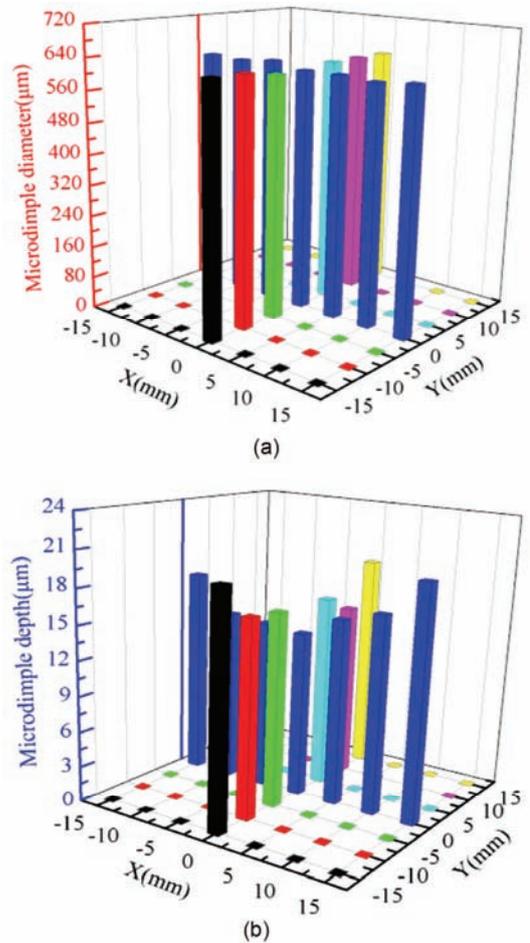


图 11 (网络版彩图)基于优化参数加工出的微坑几何尺寸的空间分布

(a) 微坑直径; (b) 微坑深度

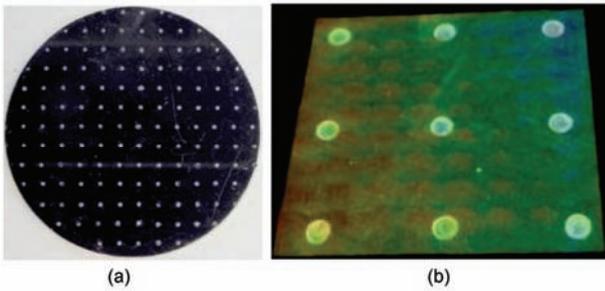


图 12 (网络版彩图)微坑阵列形貌图  
(a) 实物图; (b) 三维形貌

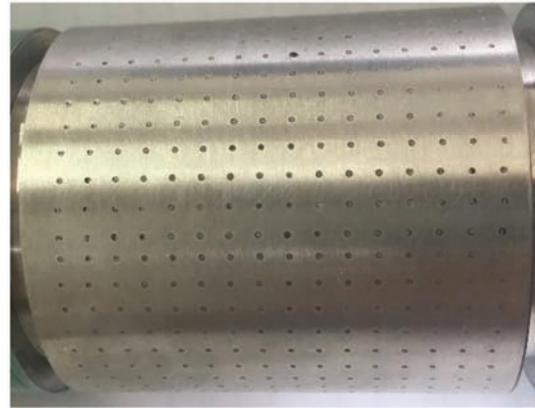


图 14 (网络版彩图)用极间充填型活动掩膜电解加工方法在圆柱面上加工的微坑阵列

深度为 11.5~18.9  $\mu\text{m}$ , 几何尺寸分布较好. 上述试验表明, 新开发的活动掩膜电解加工微坑技术在平面与非平面工件上都能获得不错的加工效果.

## 6 结论与展望

为拓展掩膜电解加工的工艺能力与适用性, 本文提出了一种极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工微坑技术, 并针对性设计开发了进液、排液、导流等功能结构合为一体的特殊工具阴极, 研究与分析了它的核心工艺参数与微坑几何尺寸的关系, 评估了它在平面与圆柱面工件上的应用效果. 结果表明:

- (1) 借助柔性多孔物的作用, 活动掩膜在平面与曲面工件上都能获得较好的贴合效果;
- (2) 具有极间多点内出液功能的工具阴极能明显改善加工过程中的流场分布均匀性和促进电蚀产物的排出;
- (3) 微坑几何尺寸及其分布均匀性受加工电压、柔性多孔物压紧力、掩膜厚度和脉冲电流占空比等核心参数影响大;
- (4) 在优化工艺条件下, 该技术在平面与圆柱面工件上都能制备出表面粗糙度小、几何尺寸分布较均匀的微坑阵列.

下一步的研究工作重点是探讨柔性多孔物特性对加工效果的影响, 并开发或选用抗压与渗流特性更好的柔性多孔物. 此外, 优化阴极布局方式, 如采用膜阴极, 以期在更小的加工间隙下获得更好的微坑加工效果或进行微孔加工, 也是我们未来的重要研究课题.

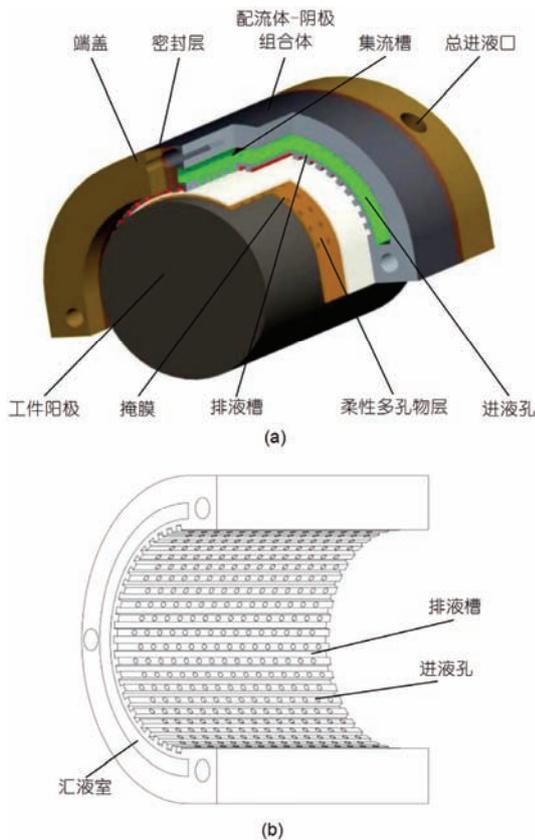


图 13 (网络版彩图)用于在圆柱面上加工微坑的配流体-阴极组合单元

(a) 用于圆柱面加工的阴极装配单元; (b) 配流体-阴极组合体

该阴极的设计思路与前面用于平面薄片微坑加工的相同, 也含有特殊导流结构, 以改善极间的传质条件. 采用上述专用的阴极单元, 分 3 次( $120^\circ/\text{次}$ )完成整个圆柱面微坑阵列的加工. 图 14 为加工后的实物图. 测试表明, 圆柱面微坑阵列的直径为 605.3~624.9  $\mu\text{m}$ ,

## 参考文献

---

- 1 Byun J W, Shin H S, Kwon M H, et al. Surface texturing by micro ECM for friction reduction. *Int J Precis Eng Manuf*, 2010, 11: 747–753
- 2 Kawasegi N, Sugimori H, Morimoto H, et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. *Precis Eng*, 2009, 33: 248–254
- 3 Kandlikar S G, Joshi S, Tian S. Effect of surface roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes. *Heat Transfer Eng*, 2003, 24: 4–16
- 4 Zinger O, Chauvy P F, Landolt D. Scale-resolved electrochemical surface structuring of titanium for biological applications. *J Electrochem Soc*, 2003, 150: B495–B503
- 5 Lafuma A, Quéré D. Superhydrophobic states. *Nature Mat*, 2003, 2: 457–460
- 6 West A C, Madore C, Matlosz M, et al. Shape changes during through-mask electrochemical micromachining of thin metal films. *J Electrochem Soc*, 1992, 139: 499–506
- 7 Shenoy R V, Datta M, Romankiw L T. Investigation of island formation during through-mask electrochemical micromachining. *J Electrochem Soc*, 1996, 143: 2305–2309
- 8 Datta M. Microfabrication by electrochemical metal removal. *IBM J Res Dev*, 1998, 42: 655–670
- 9 Madore C, Piotrowski O, Landolt D. Through-mask electrochemical micromachining of titanium. *J Electrochem Soc*, 1999, 146: 2526–2532
- 10 McCrabb H, Lozano-Morales A, Snyder S, et al. Through mask electrochemical machining. *ECS Trans*, 2009, 19: 19–33
- 11 Schönenberger I, Roy S. Microscale pattern transfer without photolithography of substrates. *Electrochim Acta*, 2005, 51: 809–819
- 12 Qu N S, Zhang X F, Chen X L, et al. Modified microscale pattern transfer without photolithography of substrates. *J Mater Process Tech*, 2015, 218: 71–79
- 13 Zhang X F, Qu N S, Li H S, et al. Investigation of machining accuracy of micro-dimples fabricated by modified microscale pattern transfer without photolithography of substrates. *Int J Adv Manuf Tech*, 2015, 81: 1475–1485
- 14 Costa H L, Hutchings I M. Development of a maskless electrochemical texturing method. *J Mater Process Technol*, 2009, 209: 3869–3878
- 15 Parreira J G, Gallo C A, Costa H L. New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes. *Surf Coating Technol*, 2012, 212: 1–13
- 16 Zhu D, Qu N S, Li H S, et al. Electrochemical micromachining of microstructures of micro hole and dimple array. *CIRP Ann Manuf Technol*, 2009, 58: 177–180
- 17 Li D L, Zhu D, Li H S, et al. Effects of mask wall angle on matrix-hole shape changes during electrochemical machining by mask. *J Cent South Uni Tech*, 2011, 18: 1115–1120
- 18 Li D L, Zhu D, Li H S. Microstructure of electrochemical micromachining using inert metal mask. *Int J Adv Manuf Tech*, 2011, 55: 189–194
- 19 Qian S Q, Zhu D, Qu N S, et al. Generating micro-dimples array on the hard chrome-coated surface by modified through mask electrochemical micromachining. *Int J Adv Manuf Tech*, 2010, 47: 1121–1127
- 20 明平美, 郝巧玲, 张新民, 等. 一种电解加工微坑阵列的方法. 中国专利, CN201410303580.1, 2014-10-15
- 21 明平美, 张晓东, 秦歌, 等. 一种用于极间多孔介质充填型掩膜电解加工的引液装置. 中国专利, CN201510205346.X, 2015-07-22

## Active through-mask electrochemical machining with its interelectrode gap filled with flexible porous material

MING PingMei, ZHOU WeiHai, ZHAO ChenHao, ZHOU HongMei, QIN Ge & ZHANG XinMin

*School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China*

It has been one of issues that conventional through-mask electrochemical machining is very hard to fabricate surface texture efficiently on the non-planar workpiece. To solve this problem, a modified active through-mask electrochemical machining process (active TM-ECM) with its interelectrode gap filled with flexible porous material was proposed on the basis of development of a special tool cathode. The newly developed tool cathode allows for inlet and distributing of electrolyte as well as discharging of solution. The flow field within the interelectrode was analyzed and optimized numerically, and the effects of key process parameters including mask thickness, flexible porous layer thickness, clamping force and pulsed current parameter on the geometric profiles and their distributing characteristics of the machined microdimple were investigated experimentally. The arrays of microdimples with a fairly good distribution of geometric dimensions were successfully machined on both the stainless steel planar substrate and cylindrical workpiece by using the optimal process conditions. It is showed that the modified active TM-ECM process exhibits favorable machinability and applicability to produce microdimples on the planar and non-planar surfaces.

**through-mask electrochemical machining, microdimple, flexible porous material, surface texture, active mask**

doi: 10.1360/N092015-00377