

· 资助成果 ·

难加工材料微槽结构离散电化学制造

朱 荻* 房晓龙 刘 嘉 杨晓龙

南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016

[摘 要] 金属微槽结构在能源、航空航天、化工等领域的高科技产品中被广泛采用, 由于该类部件常常涉及到弱刚性、材料难加工、精度不易保证等问题, 其制造技术成为研究热点。在多种制造技术中, 电化学制造因其无工具损耗、无加工应力等特点表现出了原理上的优势。针对微槽的结构特点, 提出了离散电化学加工的概念并进行了模拟仿真和试验研究, 获得了很好的加工效果。

[关键词] 微槽; 难加工材料; 电化学制造; 场域离散

1 微槽结构部件的发展需求和加工现状

1.1 难加工材料微槽结构在高技术产品领域被广泛应用

微槽部件通常由难加工的钛合金或不锈钢板材制成, 其单面或双面密布群微槽结构, 微槽尺度在数十微米至 1~2 mm 之间, 微槽截面形状有直壁凹槽或曲线凹槽, 通过群槽的排布和连通构成了微流道或通道。该类组件和部件在燃料电池双极板、微流道换热器等高技术产品领域广泛应用。

燃料电池双极板。双极板是燃料电池重要部件之一^[1-3], 它具有分割燃料和氧化剂, 收集和传导电流, 将气体均匀分配到电极的反应层, 传递热量, 保持电池内部温度场均匀等诸多作用, 其制造质量对燃料电池输出功率和使用寿命有很大的影响^[4, 5]。高温环境下工作的固体氧化物燃料电池(SOFC)通常采用厚度 2~3 mm 的厚型金属双极板, 在其上下表面加工出阵列流道结构(通常为 1~2 mm 宽、0.5~1.0 mm 深的阵列直槽和交叉槽), 如图 1 所示。金属双极板的体积约占整个电堆的 80%, 制造成本占整个电堆的 50% 以上, 其制造质量和生产成本直接决定着 SOFC 产品的性能、寿命和市场竞争能力^[6-8]。因此 SOFC 双极板的设计与制造获得了世界各国的高度重视。



朱荻 南京航空航天大学教授, 中国科学院院士。在电化学制造领域取得了一系列发明创新, 主持研制出多种具有自主知识产权的电化学制造装备, 研究成果得到重要应用。曾获国家技术发明奖二等奖 2 项、国防科学技术奖一等奖、国防创新团队奖等多项奖励。

电子器件散热微流道。航空航天领域电子器件朝着极端服役环境、极端集成化、轻量化和极端性能方向发展, 由此带来的热载荷大幅提升^[9-11], 器件的散热问题非常突出。微流道散热技术借助泵驱动流体流经热载荷区带走热量, 散热效率高。英国 REL 公司提出由薄板微槽扩散连接构成的印刷电路板式微流道换热器(PCHE)结构紧凑、换热效率高, 在高超声速发动机强预冷中作为末端换热器(HX4)实现高温介质(氢)和液氢高效换热(图 2)^[12]。国内北京航空航天大学提出水力直径约 0.3 mm 的不锈钢槽式微流道换热^[13]。槽式微流道换热器具有优越的散热效率和较低的流体压降, 是未来高度集成相控阵天线 T/R 组件的重要散热手段^[14], 微槽板制造是首先需要解决的问题。

整体叶环微槽板。整体叶环是新一代高推重比涡扇发动机压气机的新结构, 采用纤维增强钛基复合材料承力环替代金属轮毂, 可使压气机结构质量

收稿日期: 2021-06-04; 修回日期: 2021-07-15

* 通信作者, Email: dzhu@nuaa.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(U1601201)的资助。

减轻 70%，发动机性能大幅度提升。箔—纤维—箔法是纤维增强钛基复合材料的主要制备方法之一。该工艺将纤维和金属箔材交错排布后，通过热压复合或热等静压制备 SiC_f/Ti，但固化过程纤维容易移动、导致纤维的均匀分布相当困难。采用表面有微/群槽结构的柔性钛箔，有利于实现纤维的有序铺放，提高材料性能和整体叶环的力学性能。柔性钛箔微/群槽精密制造技术难度大，需要在厚度 100 μm 左右的柔软钛箔两面加工出位置交错的半径 50 μm 半圆群槽，其结构如图 3 所示。NASP、IHPTET、TMCTECC 等欧美重大研究计划均将纤维增强钛

基复合材料列为制造整体叶环的核心技术。

综上所述，微槽板已广泛应用于我国能源、电力电子、化工以及航空航天领域的高技术产品中，是决定产品性能、质量的核心部件，微槽板的精密制造是亟待解决的核心技术。

1.2 微槽精密制造的研究

微槽的精密制造技术难度很大，主要表现在以下方面：(1) 精度难保证。该类零件结构复杂，数十乃至数百条微槽密布于工件表面，微槽相互交错，槽宽及槽间距狭窄。该类薄壁微群槽结构件通常由难加工的钛合金或不锈钢制成^[15, 16]，精度要求较高，

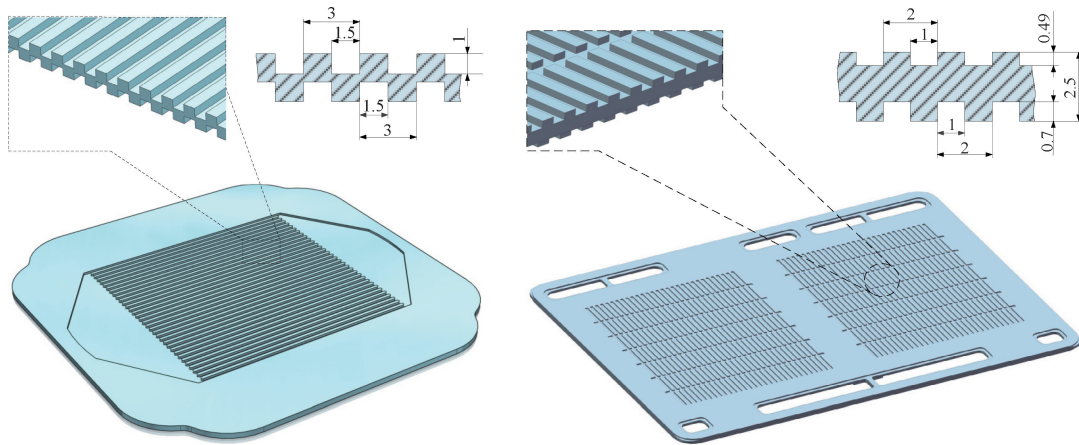


图 1 SOFC 燃料电池双极板

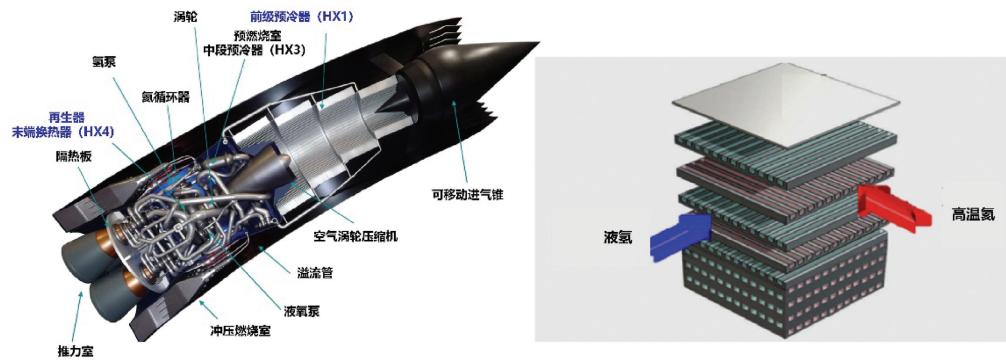


图 2 微流道散热器图

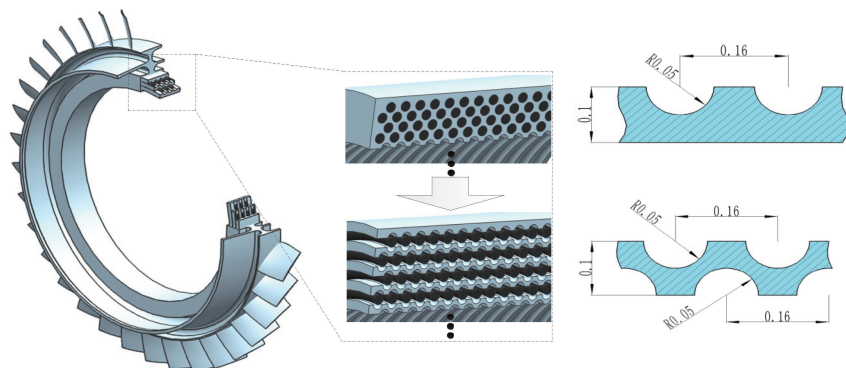


图 3 整体叶环纤维增强复材柔性钛箔微槽

在某些特殊需求场合,例如整体叶环的微槽钛箔,半圆形微群槽半径 $50\ \mu\text{m}$,其轮廓误差与位置误差都要小于 $10\ \mu\text{m}$ 。(2) 加工易变形。该类零件常常为薄板类弱刚性件,机械加工中刀具切削力会使工件发生变形或引起振动,严重影响加工质量。(3) 加工效率低。由于群槽结构复杂,材料难加工,铣削加工只能采用很小的加工用量加工,效率低,成本高。(4) 表面有毛刺。加工微槽棱边会产生大量毛刺,去毛刺的难度很大。而该类结构件应用时,通常由多件组合成空间通道组件,层板之间要结合严密,不能存在毛刺。燃料电池、微通道换热器等高科技产品应用面不断扩大,对薄壁微群槽结构件的规模化生产需求非常迫切。微槽板的制造质量、效率、成本问题凸显,亟需突破。微槽精密制造已受到广泛关注,近些年国内外学者从多方面进行了研究探索。

塑性成形是薄型双极板的主要制造方法之一。美国 Koc 等系统研究了液压胀形微沟槽成型方法,通过分析多种金属材料液压胀形后板材的局部变形与表面质量^[17, 18],提出了成型后整形以及改善成型表面质量的方法。武汉理工大学华林等研究了橡胶垫软模成形加工微群槽流道的方法,分析了该工艺在加工复杂截面形状或小拔模度微群槽结构时的可行性^[19]。上海交通大学来新民等在薄型金属双极板新结构、极板多步成形误差补偿与焊接变形抑制技术、耐蚀导电多元材料复合涂层及其制备技术方面突破了很多关键技术,获得了很好的工艺效果^[20, 21]。研究人员还尝试采用电磁微成形,电辅助成形等工艺加工微群槽结构^[22, 23]。由于难加工金属材料屈服应力较高,塑性成形工艺仍存在着成形力大、工件残余应力大、金属板材易变形以及模具磨损大等问题。

铣削加工微槽的研究非常活跃。美国路易斯安娜大学 Friedrich 等人研究了通过补偿刀具径向跳动量来提升微槽加工精度的方法,采用直径 $22\ \mu\text{m}$ 的微型铣刀,在五轴联动微铣床上加工出槽深 $62\ \mu\text{m}$ 、槽间 $8\ \mu\text{m}$ 的直壁微槽结构^[24]。华南理工大学汤勇等研究了一种组合片状刀具微细铣削方法,加工出燃料电池双极板微群槽流道^[25]。台湾大学李贯铭等采用振动辅助提高了微槽微细铣削的刀具寿命,减少了加工毛刺^[26]。韩国庆北大学 Lee 等研究了一种截面为 V 字形的群槽微细铣削方法,并研制出相关工艺装备^[27];日本名古屋大学 Shamoto 等研究了微铣刀在铣削过程中的变形,并提出了一种刀具辅助支撑方法,减小了刀具在加工中的变形^[28]。厦门大学 Zhou 等人采用多刃铣削在铜表面加工宽 $1.0\ \text{mm}$ 深 $1.5\ \text{mm}$ 微流道,并结合激光加工在流道

底部加工出 $500\sim 900\ \mu\text{m}$ 的柱状阵列,有效降低了微流道散热过程的流体压降^[29]。铣削技术在微流道加工效率和成型精度有一定优势,但是加工易产生毛刺、刀具磨损、加工材料受限等问题仍是未来需解决的关键问题。

近些年微槽的特种加工方法研究活跃,包括微细电火花加工^[30]、激光加工^[31]、化学刻蚀^[32]等工艺。电火花加工和激光加工利用热能蚀除工件,薄壁零件受热易变形;电火花加工速度较慢,工具电极损耗严重;激光加工存在残留熔融物遇凝固形成的“翻边”,通常需要采用二次光整加工工艺去除。激光加工、化学刻蚀加工对于微槽的精度控制能力较差。研究人员特别关注电化学加工技术,期望利用其独特的加工原理和特性解决难加工材料薄壁微槽结构的制造难题。德国 Hackert 等采用电液束技术扫描加工出带有微群槽结构的微反应器^[33, 34]。日本东京大学 Kunieda 等采用射流电化学加工技术在复杂曲面表面加工出微沟槽^[35]。台湾元智大学 Lee 等采用成形群电极电解加工微流道,模拟了该加工方式下微流道的成型过程,加工出表面宽 $450\ \mu\text{m}$ 、底面宽 $340\ \mu\text{m}$ 、深 $65\ \mu\text{m}$ 的微群槽流道^[36, 37]。广东工业大学张永俊等研究了锯片状圆盘阴极电解加工内腔壁微群槽的方法^[38]。大连理工大学余祖元等采用电解铣削加工出微群槽^[39]。南通大学钱双庆等开展了蛇形微槽的电化学掩膜刻蚀电场的有限元分析,研究了加工参数对槽宽度与深度的影响^[40]。

对于薄板和高精度微槽加工来说,电解加工相对于其他加工技术具有原理上的优势:(1) 电解加工基于阳极电化学反应原理实现材料去除,与材料硬度等机械性能无关,无工具损耗。(2) 少、无加工力。电解加工中工具与工件不接触,不存在机械切削力,可有效防止薄壁零件加工变形,提升产品合格率。(3) 加工无毛刺。电解加工后的表面无毛刺,可直接节省去毛刺工序的时间与成本。(4) 可实现微槽板全部槽的双面同时加工,生产效率高。但是,由于微槽板的特殊性,传统电解加工技术难以直接应用,还需要解决一系列的难题:(1) 被加工部位(槽)和非加工部位(筋)相隔排布,加工槽时会对筋表面产生杂散腐蚀,严重影响表面质量。(2) 电解液流程过长,电解加工产生的气泡、焦耳热沿程积累,导致电解液电导率沿流程呈显著的非线性变化,造成溶解不均匀,严重影响加工精度。(3) 过程稳定性差。由于微槽板结构复杂,流程过长,加工产物会在间隙中呈非线性聚集,其分布状态呈现非线性和随机性,会影响加工的一致性和稳定性。由此可

见,虽然电化学加工技术在制造难加工材料薄壁微群槽结构件领域具有原理上的优势,但现有的电化学加工方法尚无法满足该类结构件的制造,必须创新加工方法,解决科学问题,突破关键技术,研究探索出微槽板类零件的精密电化学加工技术。

2 场域离散式微槽电化学加工

针对微槽板类零件,提出了“场域离散”式加工的新概念:(1) 电场离散。将覆盖微槽板全域的电场离散为多个局域场,每个局域场仅覆盖一个加工区,非加工区域的电场完全屏蔽,消除非加工区域杂散腐蚀,提升电化学加工定域性,消除筋部腐蚀的弊端。(2) 流场离散。将传统电化学加工的全域流场离散为多个独立的局域流场,每个局域流场仅覆盖一个加工区,电解液仅在各自的加工区内流动。各个槽内电解液相互独立、彼此无干扰,电解液流程显著缩短,加工副产物沿程积累的现象显著改善,电解液电导率均匀性大幅提升。(3) 过程离散。将连续的加工过程离散为断续加工,工具进给、回退周期进行,工具接近工件时通电加工,远离工件时断电冲刷,使加工在每个周期内“清零重启”,从而消除或减少加工间隙中去除物、氢气泡、焦耳热的堆积,提升加工过程的可控性和稳定性。

“场域离散”电化学加工方法以离散的电场、流场、加工过程取代传统电化学加工方法的连续电场、流场和加工过程,有效提升了微槽板精密电化学加

工的溶解定域性、流场稳定性、加工过程可控性,从而实现该类结构件的高质量、高效率、低成本制造。本研究得到国家自然科学基金—广东联合基金资助(U1601201)。

2.1 拷贝式电化学加工

2.1.1 场域离散电化学加工过程仿真

电解加工过程涉及到电场、流场、温度场综合影响,规律非常复杂。同时,电解加工生成的气泡等产物在加工间隙内不断堆积,影响着加工过程。为了揭示场域离散电化学加工方法对电解加工过程的影响规律,建立了0.2 mm加工间隙、60 mm加工区长度的加工多场耦合仿真模型,如图4所示。在该模型上分别模拟常规直流加工和场域离散式两种电化学加工模式。仿真中,加工电压为10 V,离散加工模式的脉宽和脉间为1 ms和24 ms,工具往复运动振幅为0.3 mm,振动频率为40 Hz,电解液温度为20 °C,电解液入口压力1 MPa,出口背压0.1 MPa。

传统直流加工仿真结果如图5所示。通电后加工间隙内的气泡率、温度迅速增加,通电仅5 ms加工间隙内气泡率和温升就达到平衡态的80%以上。此后经过一段过渡过程,约通电500 ms达到稳态。在稳态下,电解液入口边界1 mm处气泡率为0.7%,温度为20.8 °C,出口边界1 mm处气泡率为25.7%,温度为32.2 °C,沿程气泡率增加25%,沿程温升达到11.4 °C。由此可见,直流加工模式下气泡和焦耳热等产物在加工间隙内堆积较为严重。

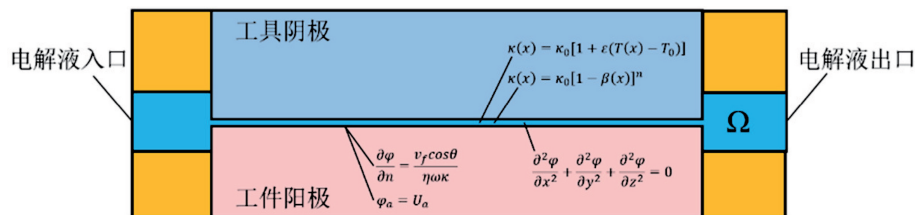


图4 电化学加工多场耦合仿真模型模型

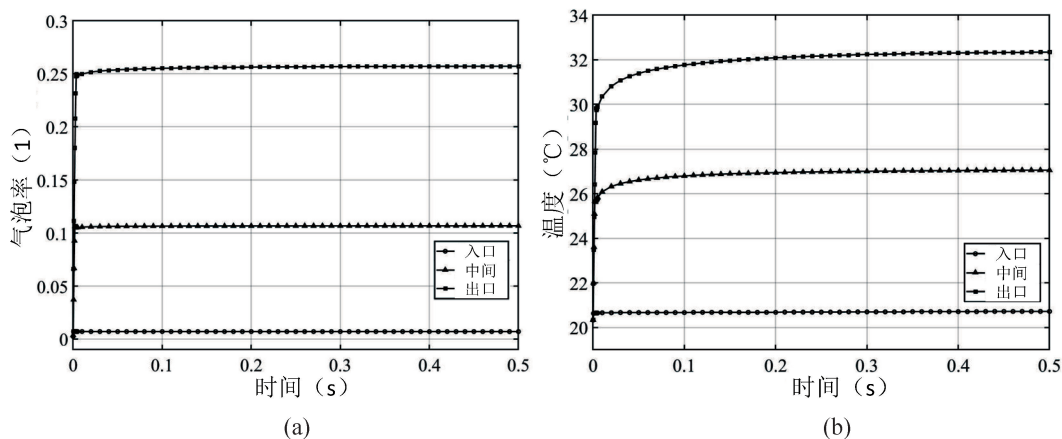


图5 直流加工多场耦合仿真结果 (a) 电解液气泡率, (b) 电解液温升

离散电化学加工仿真结果如图 6 所示,由于离散加工的通电脉宽 1 ms 远小于直流加工达到稳态所需时间,加工产生的气泡和焦耳热积累较少。工具周期运动使极间间隙周期变化,在小间隙通电周期内电解液入口边界 1 mm 处气泡率为 0.2%,温度为 20.3℃,出口边界 1 mm 处气泡率为 7.8%,温度为 23.3℃,沿流程气泡率增加仅 7.6%,沿程温升只有 3.0℃,较直流加工大幅降低。同时,在断电的脉冲间隔内产物能彻底排出间隙,加工过程得以“清零重启”。

为了分析两种加工模式下气泡和焦耳热对加工间隙内电解液电导率分布的影响,选择流道截面为对象,定义从开始通电到断电期间某一截面上的平均电导率对时间的积分均值为通电周期内该截面上的电导率积分均值,以此衡量此处电解液电导率受气泡和焦耳热的综合影响程度。在 60 mm 长的加工间隙内等距均匀截取 15 个流道截面,在每个截面分别计算两种加工模式通电周期内的电导率积分均值,并形成电导率积分均值沿流程分布图,如图 7 所示。结果表明,离散加工间隙内电导率变化幅值小

于 0.5 S/m,远小于直流加工的 2.8 S/m。随着离散加工间隙内电导率均匀性显著改善,将大幅提升电解加工的加工精度。

2.1.2 随动式梳状工具

拷贝式加工时,虽然阴极加工面之外的其他表面均涂覆有绝缘层,但杂散电流仍会对工件筋部造成杂散腐蚀,将边缘腐蚀成圆角。在 SOFC 电池中,双极板板上的筋具有收集电流并将反应气体密封在相邻流道中的功能。筋的边缘圆角和平面度误差将明显影响双极板的导电性和密封性,显著影响 SOFC 电堆的性能。

为了解决上述问题,提出了一种随动式梳状绝缘阴极新结构,如图 8(b)所示。梳状绝缘体和栅格状阴极相互交叉组装在一起,在加工过程中,通过弹簧将绝缘体梳齿紧压在工件筋端面上,屏蔽筋端面的杂散电流,消除杂散腐蚀。同时,绝缘体梳齿填补了筋上方空刀槽间隙,将整个加工区流场离散为若干独立的流场,槽与槽之间的流场相互独立,消除了常规流场空刀槽处的电解液分流。

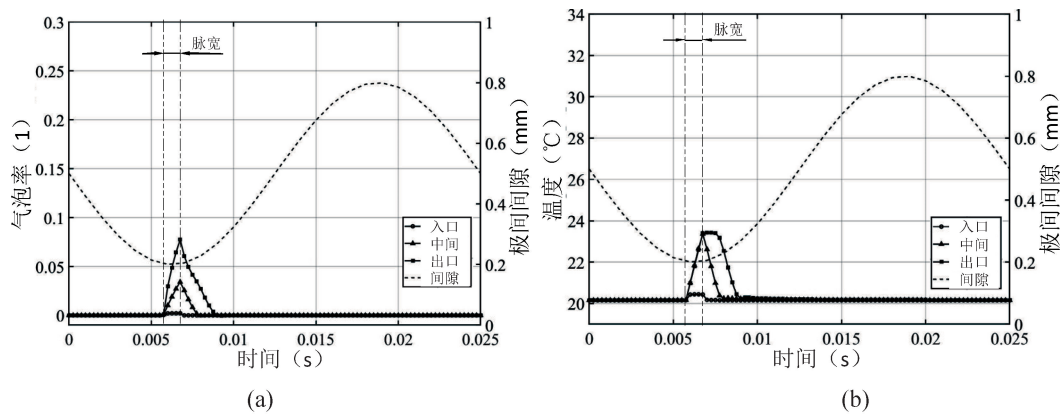


图 6 离散加工多场耦合仿真结果 (a) 电解液气泡率, (b) 电解液温升

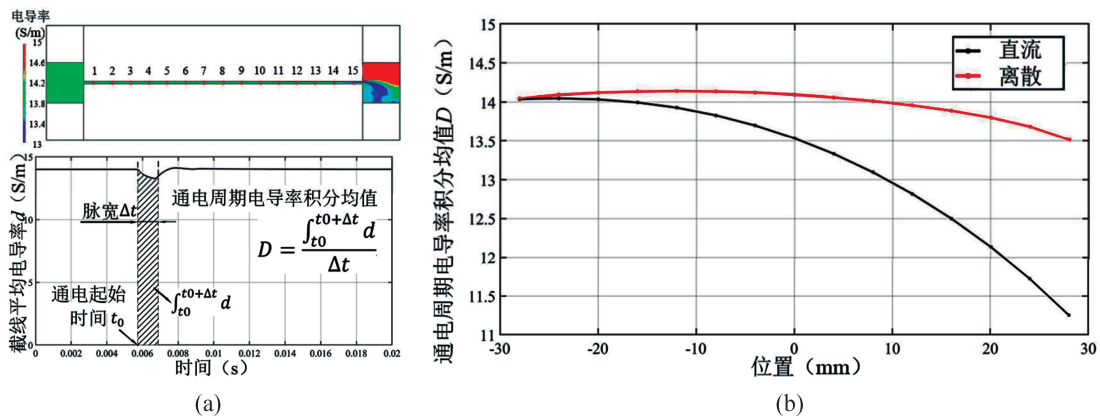


图 7 直流和离散加工电导率积分均值沿流程分布情况

(a) 电导率积分均值计算方法, (b) 两种加工模式电导率沿程分布

为了验证随动梳状绝缘工具阴极的有效性,开展了常规阴极和带有梳状绝缘块阴极试验研究,试验结果如图9所示。常规阴极工件的筋端面明显受到杂散电流的腐蚀,筋的边缘显示出明显的圆角,上端面明显弯曲;随动梳状绝缘阴极加工工件的筋端面未被腐蚀,平面度良好,复制精度得到提高。同时随着加工流场得到改善,槽底面无明显流纹,表面质

量得到明显提高。

2.1.3 典型 SOFC 双极板加工

针对典型等槽深 SOFC 双极板和多槽深新型 SOFC 双极板结构开展了场域离散电化学加工的试验研究,成功加工出两类典型 SOFC 双极板缩比试件如图10和图11所示。等槽深连接板缩比件的加工时长为13.4分钟,微槽的槽宽1.42mm、筋宽

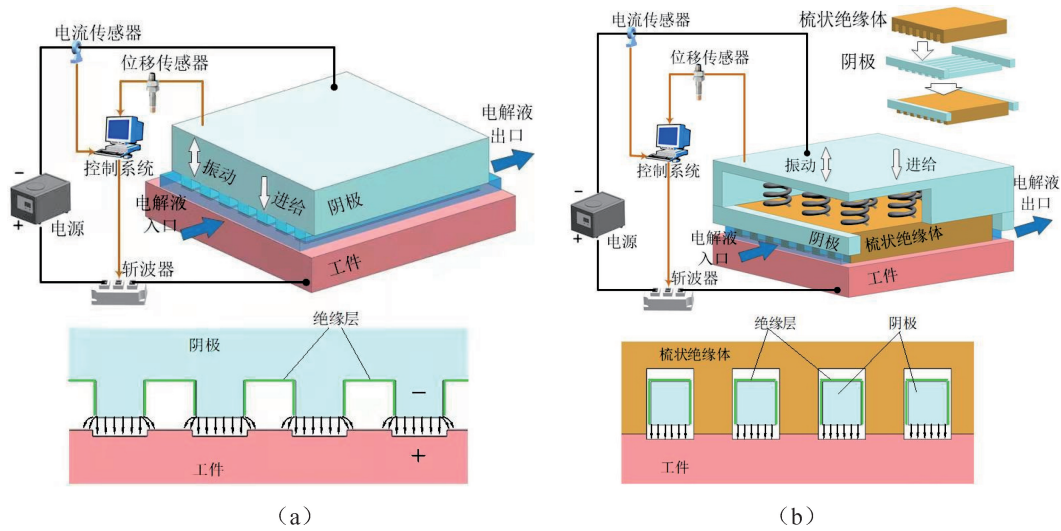


图8 微槽拷贝式加工方法示意图
(a)常规工具阴极,(b)梳状绝缘阴极

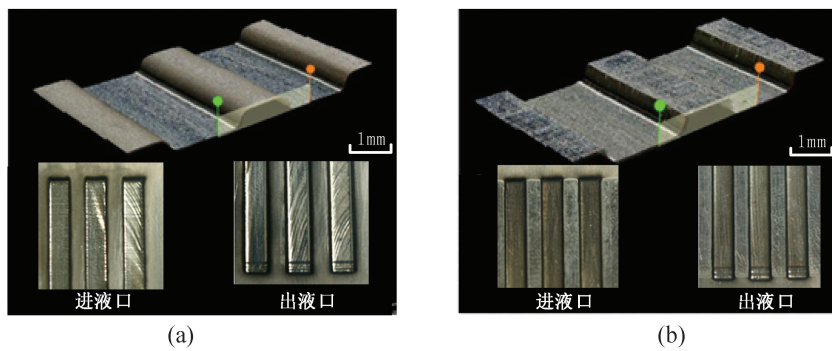


图9 加工结果(a)传统方法加工,(b)场域离散加工

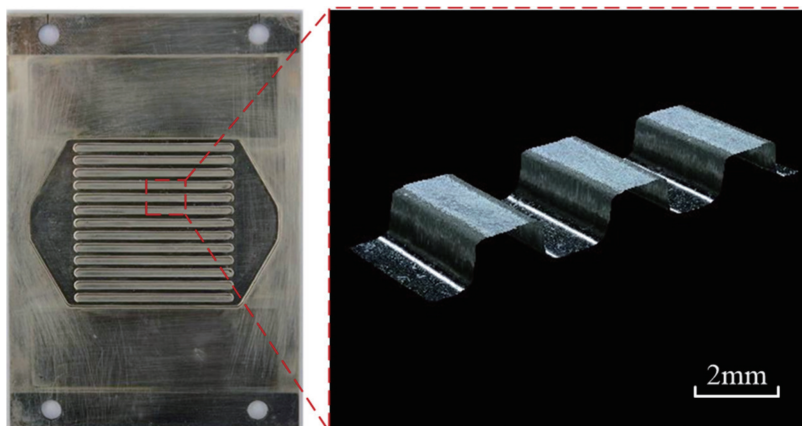


图10 等槽深二维图形连接板缩比件与检测结果

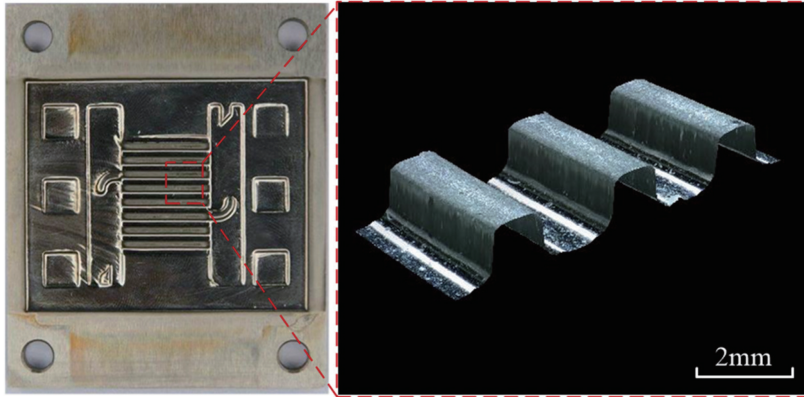


图 11 多槽深三维图形连接板缩比件与检测结果

1.58 mm,槽深 0.94 mm,槽底表面粗糙度 Ra 0.48 μm ;多槽深连接板缩比件的加工时长为 12.1 分钟,微槽的槽宽 1.19 mm、筋宽 0.91 mm,槽深 0.85 mm,槽底表面粗糙度 Ra 0.37 μm 。加工试验结果证明了场域离散拷贝式电化学加工方法的可行性与有效性。

2.2 扫掠式电化学加工

扫掠式电化学加工采用简单形状工具按照预设的路径在零件表面运动,零件材料在电场作用下发生电化学溶解、包络出所需结构特征。

2.2.1 电化学线切割扫掠加工

针对柔性钛箔微槽加工,提出了场域离散电化学线切割扫掠加工方法,如图 12 所示:弧面绝缘模板与柔性工件贴合,工件可沿弧面绝缘模板和辊轮切线方向滑动,电解液由绝缘模板与封液板之间的间隙进入加工区;加工时,线电极沿辊轮径向方向作往复运动,使线电极周期性接近、远离工件;当线电极接近工件时通电加工,远离工件时断电;随着辊轮连续转动,柔性工件沿辊轮切线方向缓慢移动,在柔性工件表面加工出连续的微群槽结构。

为了揭示电化学线切割扫掠加工的微槽成形过程和建立参数调控改善微槽轮廓精度的理论基础,

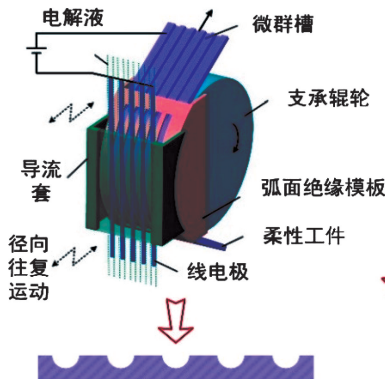


图 12 电化学线切割扫掠加工原理图

建立了如图 13(b)所示的加工区电解液模型,以直角坐标系和极坐标系从不同角度来定量描述微槽轮廓与电化学线切割加工间隙分布的关系,如图 13(c)所示(电解液电导率 2 S/m,线电极直径 35 μm ,初始间隙 30 μm ,脉冲频率 100 KHz,占空比 25%,加工电压 12.5 V,线电极进给速度 0.5 μm)。采用归一化数值处理方法,拟合出平衡状态下任意电压与进给速度参数组合、任意 θ 角方向的加工间隙值;可以看出,加工间隙始终在 $\theta=0$ 处取得最小值,率先进入平衡状态。

为提高半圆形微槽的轮廓加工精度,提出了参数动态调控方法:在一定参数下,首先驱动线电极进给临近目标深度;调整加工电压或线电极进给速度,继续进给至微槽目标深度,如图 13(d)所示。借助电场仿真,得到了优化的分步调控参数。试验结果如图 13(e)所示,微槽轮廓误差由恒参数加工时的 3.56 μm 减小至参数动态调控加工时的 1.21 μm 。

为实现双面微群槽结构的加工,提出图 14(a)所示连续扫掠加工方法:薄板上下表面分别贴紧辊轮 A 和 B,并在薄板两端分别安放传送机构,实现双面连续加工。设计了图 14(b)所示电化学线切割连续扫掠加工装置,加工出槽深 $45 \pm 5 \mu\text{m}$ 、槽宽 $120 \pm 5 \mu\text{m}$ 的阵列群槽。

2.2.2 扫掠模板电化学加工

模板电化学加工首先在零件表面覆盖带有镂空图案的模板,形成具有一定图案的裸露表面,通过电化学加工选择性地溶解未被模板保护的部分,加工出所需结构。扫掠模板电化学加工将带有椭圆孔的绝缘模板固定在金属喷嘴表面,加工时保证绝缘模板与工件表面贴紧,控制绝缘模板沿着椭圆孔长轴方向扫掠运动加工出连续微槽,如图 15(a)所示。工件表面与模板贴合屏蔽非加工区(筋),实现电场离散;高速电解液通过模板微通孔结构分流进入各个加工区,实现流场离散。控制工件与模板喷嘴之

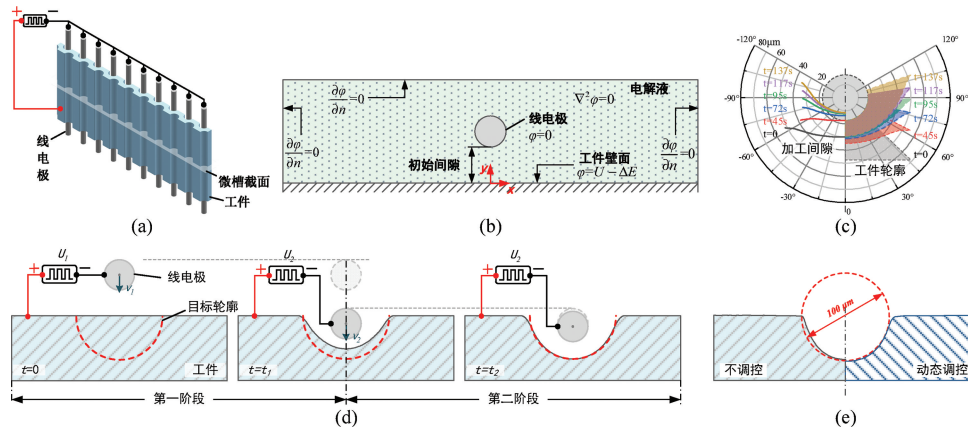


图 13 微槽电化学线切割扫掠加工

(a) 原理图, (b) 仿真模型, (c) 间隙演变过程, (d) 参数动态调控流程图, (e) 参数调控加工微槽轮廓精度对比

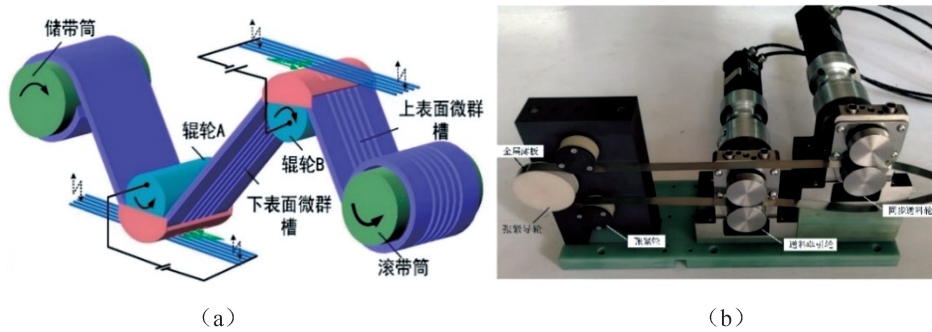


图 14 微槽双面连续电化学线切割加工

(a) 加工原理, (b) 加工装置

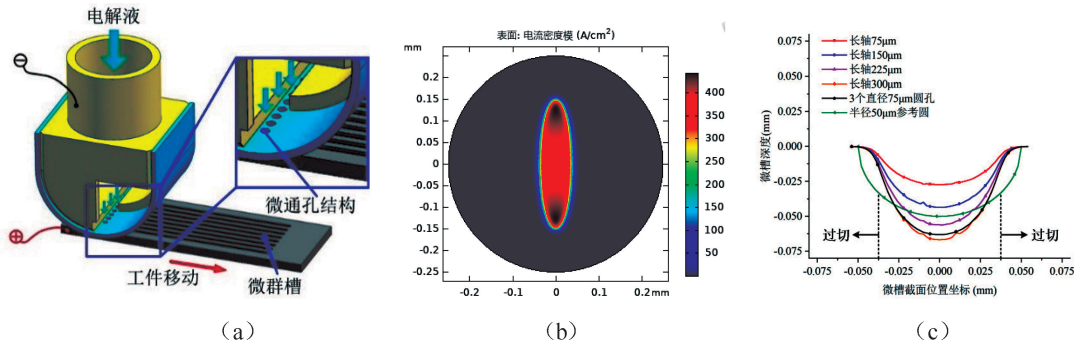


图 15 扫掠模板电化学加工

(a) 原理图, (b) 模板内电流密度分布, (c) 理论计算的微槽轮廓

间的相对运动速度和轨迹,可扫描实现数十甚至数百条不同形状微流道一次加工成型。

建立了扫掠式模板电化学加工的物理模型,分析了模板通孔内阳极表面的电流密度分布情况,计算得到各个模型的阳极表面电流密度分布如图 15 (b)所示;沿着 X 轴间隔设定采样样点,再沿着扫掠方向(椭圆模板长轴方向)积分电流密度分布,得到微槽截面各个位置的电流线密度和轮廓形貌如图 15(c)所示。可以看出,椭圆孔的长轴越长,微槽截

面各位置的电流线密度越大,微槽越深。

开展了扫掠式模板电化学加工试验,探究了模板形状和扫掠速度对微槽加工结果的影响,得到了多种可以加工出半径近似 50 μm 的半圆形微槽椭圆孔模板组合。使用短轴 75 μm、长轴 230 μm 的椭圆孔模板和优化的参数,以 100 μm/s 扫掠速度下加工出半径约 50 μm 的半圆形微槽;使用间距 160 μm 的四列交叉 60 孔模板,加工出质量较好的阵列微槽结构。

3 结束语

对于难加工材料微槽结构而言, 电化学加工技术是一种有效的制造技术。传统的电化学加工存在着很多问题, 通过离散电场、离散流场、离散过程的方法, 降低了加工过程产物、析出的气泡以及产生的欧姆热对间隙电导率的影响程度, 从而提高了加工稳定性和加工精度。仿真和试验结果都证实了离散方法的效果。结合燃料电池双极板和整体叶环钛箔的制造开展了工艺研究, 获得很好的工艺效果。

参 考 文 献

- [1] 中国能源研究会. 中国能源发展报告 2018. 北京: 中国建材工业出版社, 2019.
- [2] 李伟伟, 李丽, 杨理. 固体氧化物燃料电池研究进展. 电源技术, 2016, 40(9): 1888—1889, 1892.
- [3] Wei T, Huang YH, Zhang Q, et al. Thermoelectric solid-oxide fuel cells with extra power conversion from waste heat. *Chemistry of Materials*, 2012, 24(8): 1401—1403.
- [4] 李俊超, 王清, 蒋锐, 等. 质子交换膜燃料电池双极板材料研究进展. 材料导报, 2018, 32(15): 2584—2595, 2600.
- [5] 张亮, 张维竞, 崔贺. 固体氧化物燃料电池作为动力源在船舶应用中的关键技术问题. 中国舰船研究, 2011, 6(6): 109—113.
- [6] 沈元兴. 固体氧化物燃料电池的研究. 汽车实用技术, 2021, 46(7): 3—6.
- [7] Wu SD, Yang WM, Yan H, et al. A review of modified metal bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(12): 8672—8701.
- [8] Yoon JS, Lee J, Hwang HJ, et al. Lanthanum oxide-coated stainless steel for bipolar plates in solid oxide fuel cells (SOFCs). *Journal of Power Sources*, 2008, 181(2): 281—286.
- [9] Tan H, Zong K, Du P. Temperature uniformity in convective leaf vein-shaped fluid microchannels for phased array antenna cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, 150: 106224.
- [10] 邓大祥, 陈小龙, 谢炎林, 等. 航空航天冷却微通道制造技术及应用. 航空制造技术, 2017, 60(23): 16—24.
- [11] 王强, 郑日恒, 陈懋章. 航空发动机科学技术的发展与创新. 科技导报, 2021, 39(3): 59—70.
- [12] Webber H, Feast S, Bond A. Heat exchanger design in combined cycle engines. *Journal of the British Interplanetary Society*, 2009, 54(4): 122—130.
- [13] Mylavarapu SK, Sun X, Christensen RN, et al. Fabrication and design aspects of high-temperature compact diffusion bonded heat exchangers. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, 249: 49—56.
- [14] 宋正梅. 有源相控阵天线微通道冷却技术研究. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [15] Heras N, Roberts EPL, Langton R, et al. A review of metal separator plate materials suitable for automotive PEM fuel cells. *Energy & Environmental Science*, 2009, 2(2): 206—214.
- [16] Karimi S, Fraser N, Roberts B, et al. A review of metallic bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: materials and fabrication methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 2012: 1—22.
- [17] Mahabunphachai S, Cora ON, Koc M. Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(16): 5269—5277.
- [18] Mahabunphachai S, Koc M. Fabrication of micro-channel arrays on thin metallic sheet using internal fluid pressure: Investigations on size effects and development of design guidelines. *Journal of Power Sources*, 2008, 175(1): 363—371.
- [19] Liu Y, Hua L. Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(11): 3529—3535.
- [20] 易培云. 无极板式质子交换膜燃料电池结构设计制造工艺研究. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [21] 毕飞飞. 燃料电池金属极板非晶碳复合涂层磁控溅射工艺及性能实验研究. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [22] 赵庆娟. 金属双极板电磁微成形工艺研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [23] 彭林法. 微/介观尺度下薄板成形建模分析与实验研究. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [24] Friedrich CR, Vasile MJ. Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1996, 5(1): 33—38.
- [25] Pan MQ, Zeng DH, Tang Y. Feasibility investigations on multi-cutter milling process: a novel fabrication method for microreactors with multiple microchannels. *Journal of Power Sources*, 2009, 192(2): 562—572.
- [26] Li KM, Wang SL. Effect of tool wear in ultrasonic vibration-assisted micro-milling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228(6): 847—855.
- [27] Lee JH, Park SR, Yang SH, et al. Fabrication of a V-groove on the optical fiber connector using a miniaturized machine tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155—156: 1716—1722.
- [28] Shamoto EJ, Saito A. A novel deep groove machining method utilizing variable-pitch end mill with feed-directional thin support. *Precision Engineering*, 2016, 43: 277—284.

- [29] Zhou F, Zhou W, Zhang C, et al. Experimental and numerical studies on heat transfer enhancement of microchannel heat exchanger embedded with different shape micropillars. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115296.
- [30] Hung JC, Chang DH, Chuang Y. The fabrication of high-aspect-ratio micro-flow channels on metallic bipolar plates using Die-sinking micro-electrical discharge machining. *Journal of Power Sources*, 2012, 198: 158—163.
- [31] Schreck S, Gahr K. Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties. *Applied Surface Science*, 2005, 247(1-4): 616—622.
- [32] Kim GY, Ni J, Mayor R, et al. An Experimental investigation on semi-solid forming of micro/meso-scale features. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129(2): 246—251.
- [33] Hackert-Oschätzchen M, Meichsner G, Zinecker M, et al. Micro machining with continuous electrolytic free jet. *Precision Engineering*, 2012, 36(4): 612—619.
- [34] Hackert-Oschätzchen M, Martin A, Meichsner G, et al. Microstructuring of carbide metals applying Jet Electrochemical Machining. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 621—634.
- [35] Natsu W, Ikeda T, Kunieda M. Generating complicated surface with electrolyte jet machining. *Precision Engineering*, 2007, 31(1): 33—39.
- [36] Lee YM, Lee SJ, Lee CY, et al. The multiphysics analysis of the metallic bipolar plate by the electrochemical micro-machining fabrication process. *Journal of Power Sources*, 2009, 193(1): 227—232.
- [37] Lee SJ, Lee CY, Yang KT, et al. Simulation and fabrication of micro-scaled flow channels for metallic bipolar plates by the electrochemical micro-machining process. *Journal of Power Sources*, 2008, 185(2): 1115—1121.
- [38] Liu GX, Zhang YJ, Jiang SZ, et al. Investigation of pulse electrochemical sawing machining of micro-inner annular groove on metallic tube. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 102: 22—34.
- [39] Chen CC, Li JZ, Zhan SC, et al. Study of micro groove machining by micro ECM. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 418—422.
- [40] 鲍凯, 周一丹, 钱双庆. PEMFC 金属双极板流道模板电解加工的有限元模拟与分析. *制造业自动化*, 2015, 37(13): 25—30.

Discrete Electrochemical Machining of Micro Grooves in Difficult-to-cut Materials

Zhu Di* Fang Xiaolong Liu Jia Yang Xiaolong

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Abstract Metallic micro grooves have been widely used in various high-tech products of energy, aerospace and chemical industries. However, the manufacture of these components is a challenge and a research hotspot because of its weak rigidity, being made of difficult-to-cut materials and unstable machining accuracy. Electrochemical machining has outstanding superiorities to other methods for its inherent characteristics of no tool wear and no machined stresses. A novel concept of electrochemical machining in discrete fields and domains has been proposed to overcome difficulties in generating micro grooves. Series of simulations and experiments have verified its excellent performances and the broad prospect.

Keywords micro grooves; difficult-to-cut materials; electrochemical machining; discrete fields and domains

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: dzhu@nuaa.edu.cn