

螺旋孔电解加工多物理场耦合机理研究

王明环 章巧芳 彭伟

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州, 310014)

摘要:基于建立的三维多相流模型及间接耦合多物理模型(热电耦合和热流耦合),以螺旋孔电解加工为研究对象,对电解加工间隙中的电场、流场、温度场进行分析,掌握间隙参数变化规律,包括间隙电解液的流速与温度、间隙氢气气泡率分布、材料表面电流密度分布等。进而对影响材料去除的主要因素——电导率进行研究,确定了电导率在整个加工间隙内的变化规律及其对材料去除的影响,并提出了增加电解液出口背压以改善工件材料去除的一致性。最后,在搭建的实验平台上进行螺旋孔电解加工实验,验证了所提方法的正确性。

关键词:电解加工;多相流模型;多物理场耦合;内螺旋孔;气液两相流

中图分类号:V261.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)05-0774-06

Multiphysics Coupling of Electrochemical Machining for Spiral Hole

Wang Minghuan, Zhang Qiaofang, Peng Wei

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou, 310014, China)

Abstract: The three-dimensional multiphase flow model and indirect multiphysics model (including thermoelectric coupling model and thermal-fluid coupling model) are developed to describe the variations of electric field, flow field and temperature in the electrochemical machining gap. The electrochemical machining of the internal spiral hole is simulated. Simulation results show that the electrolyte velocity is fluctuant and decreasing, and the electrolyte temperature as well as the void fraction of the hydrogen are increasing along the flow direction. According to the variations of temperature and the void fraction of hydrogen, the electric conductivity of electrolyte is studied, which has a main effect on the material removal. The analysis denotes that the electric conductivity of electrolyte increases along the flow direction. As a result, the material removal rate (MRR) decreases along the flow direction which is unfavourable for machining. A method of applying back pressure in the outlet is selected to diminish the variation of electric conductivity of the electrolyte. Finally, experimental verification of the model using an in-house built electrochemical machining system for the internal spiral hole exhibits good correlation with theoretical predictions.

Key words: electrochemical machining; multiphase model; multiphysics coupling; internal spiral hole; gas-liquid flow

基金项目:国家自然科学基金(50905165;51475428)资助项目;浙江省自然科学基金(LY13E050019)资助项目。

收稿日期:2014-05-10;**修订日期:**2014-07-10

通信作者:王明环,女,副教授,E-mail:wangmh@zjut.edu.cn。

电解加工技术基于其在金属材料加工中所表现出的优越性,如加工中无刀具磨损、可加工高硬度金属材料、以离子形式对材料进行去除等,近年来受到越来越多的关注^[1-3],并不断在汽车^[4]、航空航天^[5-7]、电子^[8]、医学^[9]等领域得到应用。然而,电解加工过程是一个复杂的材料去除过程,加工受到电场、流场、温度场等多物理场的影响,间隙物理场的检测与控制、间隙多相流分布规律、间隙产物的去除、合理工具电极的设计等都还有待进一步研究。随着有限元技术的发展,间隙物理场的分布规律及物理场间的影响规律有望得到解决。以往研究人员曾针对电解加工的电场^[10-12]、流场^[13-15]、电场与温度场^[16]等进行了建模研究,文献^[10-12]建立了基于电场的电解加工材料去除模型;文献^[13, 14]建立了电解加工间隙流场二维模型,对间隙电解液压力和流速分布规律进行了研究;文献^[16]基于有限元方法,建立了电化学放电间隙热模型,对温度变化和材料去除规律进行了研究;文献^[17, 18]建立了二维电解加工间隙多物理场模型;文献^[19]建立了脉动流场下电解加工间隙多物理场模型,讨论了脉动流场下间隙电解液速度、气泡率和温度的变化规律,分析中忽略了电解液电导率的变化。然而,电解加工过程是一个复杂的三维材料去除过程,间隙中多物理场的存在及相互耦合影响着材料去除规律。

因此,本文基于前人研究基础,充分考虑电解加工间隙为一个三维空间,建立起三维电解加工间隙多相流模型及间接耦合多物理场模型,并针对间隙内各个物理参数的变化规律及物理场的耦合影响作用规律进行研究,并最终通过内螺旋孔电解加工实验进行验证。

1 理论模型建立

1.1 间隙多相流模型

电解加工过程中,间隙内充满了电解液、氢气泡和电解沉淀物的混合物,由于电解沉淀物所占体积较小,对间隙流场的影响可忽略不计^[9],因此,可建立间隙内电解液和氢气泡两相流模型,对间隙内物质流动状态进行研究。模型基于以下假设:(1)间隙液体为电解液和气泡所组成的一维两相均匀流,气泡在液相中服从理想气体状态方程;(2)液体具有不可压缩性,两相物质间不存在质量转换;(3)沿电解液流动方向每一个横截面上各相参数均匀分布。

建立混合模型的连续性方程、动量方程和第二相体积分方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \\ -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \\ \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) \quad (3)$$

式中: \mathbf{v}_m 为质量平均速度; ρ_m 为混合密度; \mathbf{F} 为体积力; μ_m 为混合黏性系数; α_k 为第 k 相的体积分; ρ_k 为第 k 相的密度; $\mathbf{v}_{dr,k}$ 为第 k 相的漂移速度。其中

$$\rho_m = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k \quad (4)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m \quad (6)$$

滑移相的速度 \mathbf{v}_{qp}

$$\mathbf{v}_{qp} = \mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q \quad (7)$$

将单相流的标准 $k-\epsilon$ 模型扩展至多相流模型,将单相流的压力速度耦合 SIMPLEC 算法扩展至多相流中,可对电解加工间隙多相流流场进行数值模拟。

1.2 电解加工间隙多物理场模型

电解加工是基于电化学原理进行的,加工过程中存在电场、流场、温度场等物理场,因此材料去除过程受到这些物理场及相互耦合作用的影响。研究针对电解加工间隙内存在的物理场,通过间接耦合方式建立起电场-流场-温度场间的耦合关系模型,并对耦合场对电解加工效果的影响进行分析。

1.2.1 间隙内热电耦合模型的建立

电解加工间隙内的电解液可看作导体,螺旋孔电解加工(取其中相邻2个)间隙内电解液集总电导可由图1表示。

电流与电压的关系为

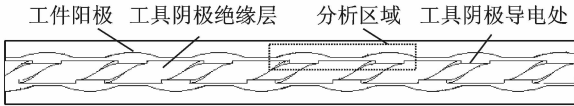
$$I_1 = G_{11}^1 (V_1) + G_{12}^1 (V_1 - V_2) \quad (8)$$

$$I_2 = G_{21}^1 (V_1 - V_2) + G_{22}^1 (V_2) \quad (9)$$

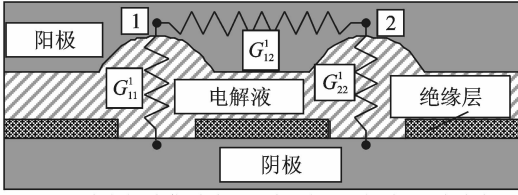
式中: \mathbf{G}^1 为集总电导矩阵。通电状态下间隙内电解液热功率为

$$W = U^2 / R \quad (10)$$

式中: U 为所加电压, R 为集总电阻。此时,间隙内电解液的生热率为



(a) 螺旋孔电解加工间隙结构图



(b) 间隙电解液集总电导分析原理图(分析区域放大)

图1 螺旋孔电解加工集总电导原理分析图

Fig. 1 Total energy model in interelectrode gap during electrochemical machining of spiral hole

$$\ddot{q} = W/V \quad (11)$$

式中: V 为间隙内电解液体积。

1.2.2 间隙内热流耦合模型的建立

根据热力学第一定律,热能量是守恒的,其控制方程为

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}^T \{L\} T \right] + \{L\}^T \mathbf{q} = \ddot{q} \quad (12)$$

式中: ρ 为电解液密度; c 为比热容; T 为温度向量(是坐标和时间的函数); \mathbf{V} 为速度向量,且 $\mathbf{V} = \{v_x, v_y, v_z\}^T$; $\{L\}$ 为矢量算子,且 $\{L\} = \{\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z\}^T$; \mathbf{q} 为热通量向量

$$\mathbf{q} = -\mathbf{D}\{L\} T \quad (13)$$

式中: \mathbf{D} 为热传导矩阵。式(13)代入式(12)有

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}^T \nabla T \right] = \nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla T) + \ddot{q} \quad (14)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子。

考虑稳态传热,其能量平衡方程为

$$\mathbf{K}T = \Phi \quad (15)$$

式中: \mathbf{K} 为热传导矩阵,包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数; T 为节点温度向量; Φ 为节点热流量向量,包含热生成。

由式(12~15),可求得间隙内电解液的速度和温度分布。

1.3 多场耦合下电解加工材料去除规律

根据法拉第定律,电解加工过程中材料单位去除速度为

$$V_l = \frac{\eta \omega \kappa U}{\Delta} \quad (16)$$

式中: ω 为体积电化学当量; η 为电流效率; U 为加工电压; Δ 为加工间隙;电导率 κ 受到电解液中所含 H_2 气泡率 α 和电解液温度 T 的影响,其关系式可表达为^[20]

$$\kappa = \kappa_0 (1 - \alpha)^{1.75} \{1 + 0.016(T - T_0)\} \quad (17)$$

式中: κ_0 为电解液初始电导率, T_0 为电解液入口处温度。

2 模拟结果与讨论

2.1 电解加工间隙多相流动特性分析

根据电解加工原理,螺旋孔电解加工过程中阳极材料发生溶解,阴极析出氢气(氢气入口),电解液流经阴阳极之间的间隙,并将加工产物一起带出加工区(混合物出口),建立间隙流场三维模型如图2(a)所示,图中外螺旋凸起部分为材料去除后的型面,内孔螺旋部分为氢气析出位置,模拟分析取加工过程中某一阶段进行。间隙模型螺旋外径1.2 mm、长20 mm,对间隙模型采用FLUENT GAMBIT-2.0中Tet/Hybrid四面体单元进行网格划分,分好的网格有678 855个体积单元,其中最大体积单元为 $7.056 831 \times 10^{-14} \text{ m}^3$,最小体积单元为 $2.231 075 \times 10^{-15} \text{ m}^3$ 。

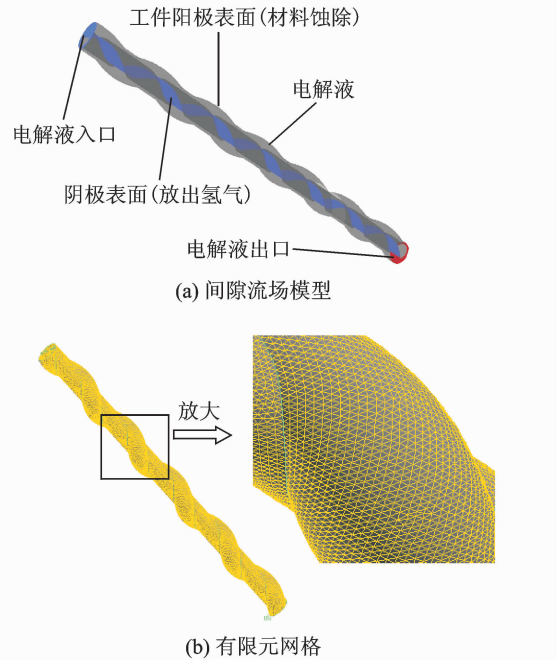


图2 间隙流场模型及其有限元网格

Fig. 2 Flow model of interelectrode gap and finite element mesh

考虑螺旋孔电解加工实际,模拟分析中需要对电解液入口速度、氢气入口速度及含量、混合物出口、流体黏性系数、密度等进行设置。为了使流场均匀并消除浓差极化,要求间隙内电解液处于紊流状态^[21],因此流速需满足

$$u > 2300 \frac{\nu}{D_h} \quad (18)$$

式中: D_h 为水力直径,由分析模型确定其大小为0.507 3 mm。由式(18)计算电解液流速 $u >$

4.5 m/s,考虑沿程流阻, u 取 10 m/s。其余边界条件设置如表 1 所示。

表 1 模拟分析初始边界条件

Tab. 1 Initial simulation parameters

指标参数	电解液	氢气
入口速度 $u/(m \cdot s^{-1})$	10	1.416×10^{-4}
密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1 150	0.081 89
动力黏度 $\nu/(kg \cdot s \cdot m^{-1})$	0.001 003	8.411×10^{-6}
初始体积分数/%	98.73	1.27

图 3 为电解液入口速度为 10 m/s 时间隙流场流速分布剖面图,从图中可以看出间隙最高流速达 20.3 m/s,这是由于间隙结构中存在狭小间隙,流体流经此处被加速所致;此外,蚀除材料后的螺旋槽内,螺旋槽下沿位置处电解液流速明显高于上沿位置,故此处产物冲刷较为彻底。测量同一相对位置处的流速得知,电解液流速沿着流程逐渐降低,因此,随着电解产物逐渐向出口聚集以及流速逐渐减小,易出现死水区,沿程产物不能及时排出,使加工速度和阳极工件表面成形精度降低。

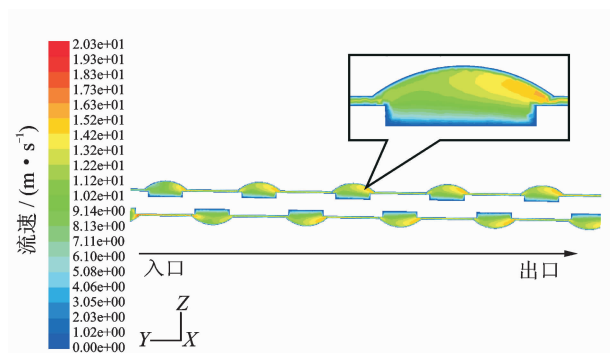


图 3 间隙流场流速分布

Fig. 3 Sectional velocity distribution of mixture in gap

提取分析后电解液流动方向上间隙内氢气泡率分布截面图(如图 4 所示),可以看出,沿电解液流程气泡率含量逐渐增加,且电解液入口处气泡率增加速度大于其他位置,这是因为靠近电解液入口处阴极产生的气泡还来不及扩散就被电解液带走,致使此处氢气含量较低;随着流程增加,氢气泡含量趋于稳定,并远高于入口处,这是由于随加工不断进行,间隙气泡量逐渐增加、电解液温度逐渐上升,且氢气泡在间隙内聚集、逐渐增大,因此其体积要比初始值大得多;气泡率含量在电解液出口位置处迅速增大,由于接近出口处电解液压力急剧下降、气泡迅速膨胀的缘故。

2.2 电解加工间隙内多物理场耦合模拟结果分析
由热电耦合模型中公式(8~11),可得到间隙

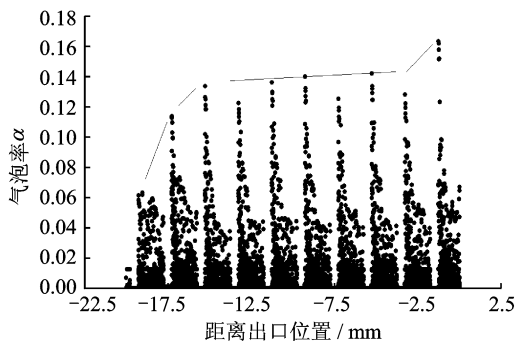


图 4 沿电解液流动方向间隙气泡率分布(截面图)

Fig. 4 Void fraction of H_2 in gap along flow path

电解液集总电阻 R 和生热率 \ddot{q} ,联合热流耦合模型中公式(14,15),可获得间隙电解液任意点的温度值,结果如图 5 所示。从图中可以看出,沿着电解液流动方向上,电解液温度逐渐升高,这是由于随着电解反应的进行,释放出一定的热量,同时反应中放出的氢气泡和产生的沉淀物增大了间隙内电解液电阻,导致热量增加,电解液温度上升。

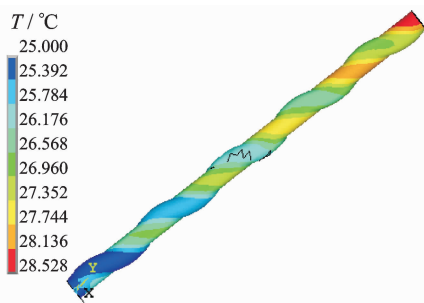


图 5 加工间隙内温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution in gap

提取同一相当位置处间隙 H_2 气泡率分布、间隙电解液温度分布结果,并将其代入公式(17),可获得电场、流场、温度场影响下间隙内电解液电导率分布规律,如图 6 所示。由图 6 可知,沿着电解液流动方向,电导率呈现减小的趋势;位于电解液入口和出口处,电导率减小速度较快,由于氢气含量在入口和出口处变化较大所致。因此,分析中尝试在电解液出口处增加 0.1 MPa 背压,结果如图 7 所示,可以看出增加背压后电解液温度升高,间隙气泡率变化较为缓和,这是由于随着间隙电解液压力的增大,间隙电解液流速增加,材料去除速度提高,单位时间内产生的焦耳热增加,造成电解液温度上升;背压的增加,抑制了间隙内气泡的扩散和集聚,使得气泡率变化平稳;两种因素影响下间隙电导率变化平稳,沿着电解液流动方向上材料去除速度较为均匀。

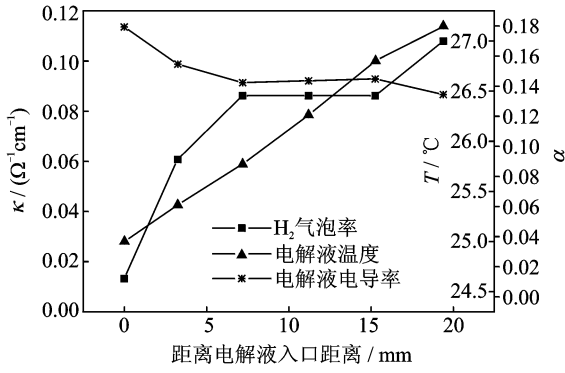


图6 多场耦合作用下间隙温度、气泡率及电导率分布规律(无背压)

Fig. 6 Variations of electrolyte temperature, void fraction of H₂ and κ under multiphysics (without back pressure)

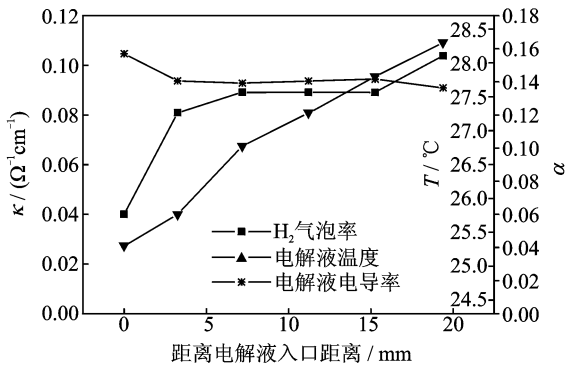


图7 0.1 MPa 背压下间隙温度、气泡率及电导率分布规律

Fig. 7 Variations of electrolyte temperature, void fraction of H₂ and κ under multiphysics with back pressure of 0.1 MPa

3 实验结果与分析

螺旋孔电解加工实验平台系统如图8所示,该系统包括机床运动控制、电解液循环过滤、电解液压力与温度检测和控制、加工电源等部分。加工过程中,阴极与阳极保持一定的加工间隙,电解液流经加工间隙的同时,接通加工电源,电解加工反应开始进行。

加工实验采用9 V电压、质量浓度15% NaNO₃、0.2 MPa电解液压力进行,加工时间10 min,为了保证实验结果的准确性,每组参数进行5次实验,取螺旋孔剖截面进行测量与分析。如图9所示为实验加工后的螺旋孔结构剖截面图,由图9可知,沿着电解液流动方向上螺旋孔肋的高度逐渐降低,说明加工中材料去除速度沿流程方向逐渐减小,这一变化规律可由图6及公式(17)得到解释。对比有背压和无背压情况下实验结果可知,施

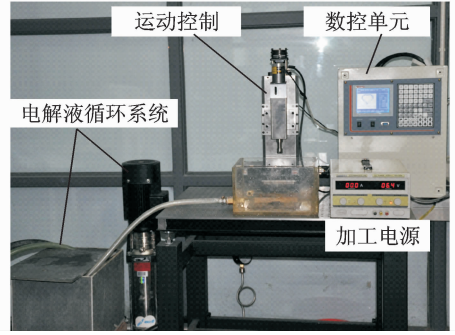


图8 螺旋孔电解加工实验平台系统图

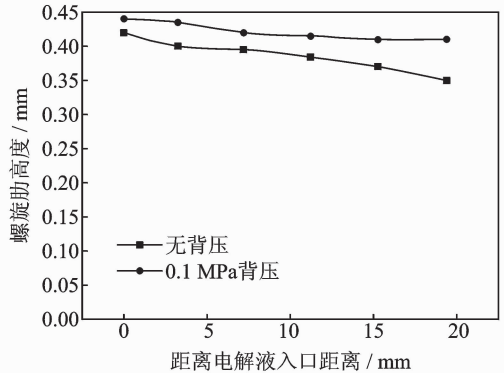
Fig. 8 Schematic of experimental system for internal spiral hole in ECM



(a) 无背压



(b) 0.1 MPa背压



(c) 沿着电解液流动方向上螺旋肋高度

图9 实验加工出的螺旋孔结构

Fig. 9 Machined internal spiral hole

加背压后螺旋肋成形尺寸一致性较无背压时明显改善,且施加背压后材料去除率提高,螺旋肋高度增加。因此在深孔加工中,施加背压有助于提高加工效率和成形精度。

4 结论

针对电解加工特点,以螺旋孔电解加工为研究对象,建立了加工间隙多相流、多物理场模型,采用有限元方法对间隙内电解液流速、H₂气泡率和电解液温度分布等变化规律进行了研究,并间接获得间隙内电解液电导率分布,可有效掌握工件表面材料去除的规律。通过本文研究可获得以下结论:

(1)螺旋孔电解加工中,间隙内产物的排出受到电解液流动状态、螺旋流道结构的影响。

(2)螺旋孔电解加工过程中, H_2 气泡率沿着电解液流程方向上逐渐增大,且在电解液入口和出口处气泡率变化较大。沿电解液流程方向,电解液温度值逐渐增加。

(3)在多物理场耦合因素的影响下,电导率沿着电解液流程逐渐减小,导致螺旋孔电解加工中材料去除速度沿流程逐渐减小。施加背压有助于改善间隙气泡率分布均匀性、提高加工速度,获得沿流程较为一致的材料去除率。

参考文献:

- [1] Schuster R, Kirchner V, Allongue P, et al. Electrochemical micromachining [J]. *Science*, 2000, 298(7):98-100.
- [2] Rajurkar K P, Sundaram M M, Malshe A P. Review of electrochemical and electrodischarge machining [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 13-26.
- [3] Alexandre S, Atanas I. Recent developments and research challenges in electrochemical micromachining (μ ECM) [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(1/2/3/4): 563-581.
- [4] Li Y, Hu R Q. Micro electrochemical machining for tapered holes of fuel jet nozzles [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 395-400.
- [5] Pattavanitch J, Hinduja S. Machining of turbulated cooling channel holes in turbine blades [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 199-202.
- [6] Wang Minghuan, Peng Wei, Yao Chunyan, et al. Electrochemical machining of the spiral internal turbulator [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49(9/10/11/12): 969-973.
- [7] Xu Z Y, Xu Q, Zhu D, et al. A high efficiency electrochemical machining method of blisk channels [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 62: 187-190.
- [8] Ghoshal B, Bhattacharyya B. Influence of vibration on micro-tool fabrication by electrochemical machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 64: 49-59.
- [9] Fan Zhiwen, Hourng Lih-Wu. The analysis and investigation on the microelectrode fabrication by electrochemical machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(7/8): 659-666.
- [10] Kozak J. Mathematical models for computer simulation of electrochemical machining processes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 76(1/2/3): 170-175.
- [11] Purcar M, Bortels L, Van den Bossche B, et al. 3D electrochemical machining computer simulations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/2/3): 472-478.
- [12] Wang M H, Zhu D. Simulation of fabrication for gas turbine blade turbulated cooling hole in ECM based on FEM [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(4): 1747-1751.
- [13] Dabrowski L, Paczkowski T. Computer simulation of two-dimensional electrolyte flow in electrochemical machining [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2005, 41(1):91-98.
- [14] Zhu Dong, Zhu Di, Xu Zhengyang, et al. Investigation on the flow field of W-shape electrolyte flow mode in electrochemical machining [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2010, 40(3): 525-532.
- [15] 王明环,刘望生,彭伟. 螺旋深小孔电解加工间隙多相流场特性及实验研究[J]. *兵工学报*,2013,34(6): 748-757.
Wang Minghuan, Liu Wangsheng, Peng Wei. Research on flow-field characteristics of gap multiphase flow and experiment of electrochemical machining of spiral deep small hole [J]. *Acta Armamentarii*, 2013,34(6): 748-757.
- [16] Bhondwe K L, Yadava V, Kathiresan G. Finite element prediction of material removal rate due to electrochemical spark machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(14):1699-1706.
- [17] Toshiaki F, Kazuaki I, Makoto Y, et al. Multiphysics simulation of electrochemical machining process for three-dimensional compressor blade [J]. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 2008, 130(8): 0816021-0816028.
- [18] Van Tijum R, Pajak T. Simulation of production processes using the multiphysics approach: The electrochemical machining process [C]//COMSOL Conference 2008 Hannover. Hannover: [s. n.], 2008.
- [19] Fang Xiaolong, Qu Ningsong, Zhang Yudong, et al. Effects of pulsating electrolyte flow in electrochemical machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014,214(1): 36-43.
- [20] Thorpe J F, Zerkle R D. Analytic determination of the equilibrium electrode gap in electrochemical machining [J]. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1969, 9(2): 131-144.
- [21] 王建国,徐家文. 电解加工原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
Wang Jianguo, Xu Jiawen. Principle and applications of electrochemical machining [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.