

文章编号:1000-6893(2010)08-1667-07

# 群孔管电极电解加工均流设计及其试验研究

王维, 朱荻, 曲宁松, 黄绍服, 房晓龙

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

## Flow Balance Design and Experimental Investigation on Electrochemical Drilling of Multiple Holes

Wang Wei, Zhu Di, Qu Ningsong, Huang Shaofu, Fang Xiaolong

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

**摘要:** 为提高群孔电解加工的稳定性和成形精度,对群孔管电极电解加工(ECD)的分流腔流场进行了建模分析。通过对分流腔进行数值求解,研究了分流腔电解液的分布规律,并分析得到了影响电解液分流均匀度的主要参数(分流腔直径),进而对其进行了优化设计。基于该优化设计并结合试验得到了适合正流群孔电解加工的分流均匀度系数和相应的尺寸系数。采用优化的分流腔参数和加工参数进行试验,得到了尺寸精度较好的长排孔结构,孔间距5 mm,孔径为 $(1.03 \pm 0.03)$  mm,其加工过程稳定,无短路现象。通过优化分流腔结构可以提高其分流均匀度,从而使电解孔加工的稳定性显著增加,加工精度提高。

**关键词:** 电解加工; 稳定性; 分流腔; 优化; 管电极电解加工

**中图分类号:** V261.5; TG662 **文献标识码:** A

**Abstract:** In order to enhance the processing stability and machining accuracy of electrochemical drilling (ECD) on multiple holes, the flow of the electrolyte along the dividing manifold is modeled, and the electrolyte distribution along the dividing manifold is analyzed through the numerical solution of the model. Manifold diameter, which is the main parameter affecting the uniformity of electrolyte distribution, is optimized subsequently. Based on the optimization, experiments are conducted to obtain the uniformity ratio and the corresponding dimension ratio which suit the multiple hole drilling process. With optimized manifold structure and suitable machining parameters, long rows of holes with a spacing of 5 mm and a diameter of  $(1.03 \pm 0.03)$  mm are machined by multiple electrodes with good stability. Flow uniformity can be enhanced by optimizing the manifold structure, the machining stability and accuracy of ECD process is hence increased.

**Key words:** electrochemical cutting; stability; manifolds; optimization; electrochemical drilling

航空发动机的涡轮叶片、导向器叶片以及燃烧室等结构上有大量冷却孔结构<sup>[1]</sup>。这些零件均为高温合金材料,用机械钻孔方法难以加工。电火花、激光加工又存在热效应问题<sup>[2]</sup>,而采用管电极电解加工(Electrochemical Drilling, ECD)方法既可以忽略工件硬度,又无工具损耗,可在保证较好的加工质量的基础上,显著降低航空发动机零件的制造成本<sup>[3-5]</sup>。ECD是一种使用金属管作为阴极对工件阳极进行电化学蚀除的孔加工工艺,尽管ECD拥有上述诸多优势,但还存在一些问题限制了其发展与应用,加工过程稳定性不高就是其中之一<sup>[4]</sup>。加工过程稳定性差往往恶化为短路、火花放电等现象。加工过程稳定性受到多种

因素的影响,例如,加工间隙内的流场分布不均匀、出现空穴状态<sup>[6]</sup>等。提高加工过程稳定性,一直是电解加工研究人员致力于解决的重要问题,国内外的研究者在这方面也进行了一系列研究<sup>[6-9]</sup>。

为了提高电解孔加工的效率,常采用群电极进行群孔加工的方式<sup>[4]</sup>,这对管电极加工过程稳定性提出了更高的要求。在群孔电解加工中,为了对每个管电极的加工区同时供液,通常需要设置电解液分配腔(Electrolyte Manifold),分配腔的设计不合理将会导致管电极之间的流量分配出现偏差,从而导致前述各种流场弊病,严重影响电解加工过程的稳定性,甚至出现短路现象,使加工被迫停止。

因此在群电极加工的方式下,为保证电解液流量在各电极之间分配均匀,需要对电解液分配腔进行系统的优化设计。电解液分配腔按群孔电

收稿日期:2009-07-20; 修订日期:2010-01-07

基金项目:国家自然科学基金(50635040);江苏省自然科学基金(BK2008043)

通讯作者:朱荻 E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn



$$\xi_i = 1 + C_j + \lambda_i \frac{l}{d} \quad (9)$$

连续性方程和终端方程分别为

$$\rho A U_i = \rho A U_{i-1} - m \rho A_i V_i \quad (10)$$

$$m \rho A U_n = 0 \quad (11)$$

式中: $m$ 为管电极周向排数,若腔截面为方形,则为纵向排数; $A$ 和 $A_i$ 分别为腔体和管电极的过流截面积。式(4)、式(5)、式(8)、式(10)和式(11)构成了电解液分流腔的方程组。求解方程组时,先假设分配管入口处的初始速度 $U_{in}$ ,根据式(4)、式(5)、式(8)和式(10)计算 $p_1$ 和 $U_1$ ,逐点递推,完成对整个管路的第1次计算。若式(11)左侧大于给定的微小量 $\epsilon$ ,修正分配管入口处的初始速度,进行第2次计算,直到该数据小于给定值,即得到在该均流腔尺寸下的流场分布( $p_i, U_i, V_i$ )。

## 2 优化原理与方法

### 2.1 影响分流均匀度的参数

得到分流腔的流场分布之后,需要寻找影响分流均匀度的主要参数,以便对其进行优化。对于电解液分流腔,其分流均匀度 $M$ 可以表示为

$$M = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{V} - V_i}{\bar{V}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

$M$ 值越小,分布均匀性越好。应用分流腔能量方程,可得

$$(p_i - p_{i-1}) + K \rho (U_i^2 - U_{i-1}^2) = 0 \quad (13)$$

式中: $K$ 为动量摩擦修正因数。

假定分流腔沿 $x$ 方向流场分布均匀,即<sup>[16]</sup>

$$U_i = U_0 \left( 1 - \frac{i}{n} \right) \quad (14)$$

同时定义欧拉数 $Eu_i$ :

$$Eu_i = \frac{\Delta p_i}{\rho U_0^2} \quad (15)$$

由于腔外压力 $p_c$ 恒定,则由式(13)得

$$(p_i - p_c) - (p_{i-1} - p_c) = K \rho (U_{i-1}^2 - U_i^2) \quad (16)$$

将式(14)和式(15)代入式(16),得

$$Eu_i - Eu_{i-1} = K \left( \frac{2n - 2i + 1}{n^2} \right) \quad (17)$$

则可得第 $i$ 个电解液出口的压降满足

$$Eu_i - Eu_0 = K \left[ 1 - \left( 1 - \frac{i}{n} \right)^2 \right] \quad (18)$$

式中: $Eu_0$ 为尺寸系数。

根据式(17)可知

$$Eu_i - Eu_0 \leq K \quad (19)$$

由式(19)知,只有当 $K$ 为零时各分流处的压差才会相等,而这在理论上是难以实现的。但是可以看出, $Eu_0$ 值越大, $K$ 对 $Eu_i$ 的影响越小。当 $Eu_0$ 足够大时,沿腔体 $x$ 方向各分流处的 $Eu_i$ 值则几乎不变,从而达到均流的目的。在均布条件下,近似地用 $\Delta p_{0a}$ 代替 $\Delta p_0$ ,将式(8)代入式(15)可以得到

$$Eu_0 = \frac{\xi_i D^4}{2n^2 d^4} \quad (20)$$

由式(20)可见,增加管电极的数目则会导致 $Eu_0$ 减小,流场分布的不均匀性增大。亦即设计包含电极管数越多的电解液分流腔,其难度也越大。腔体的设计中,减小直径比 $d/D$ 或增大总阻力系数 $\xi_i$ ,都能使 $Eu_0$ 增大。但是在决定腔体尺寸时,应在满足允许的 $M$ 值之前提下,尽可能降低 $Eu_0$ 值,这样设计出的分流腔结构紧凑,尺寸相对较小,安装和定位都较简单,可以为后续进行群孔的电解加工提供便利。

由上述论述可知,对电解液腔的优化设计主要方法是改变直径比 $d/D$ 和总阻力系数 $\xi_i$ 。根据式(9), $\xi_i$ 主要由 $l$ 和 $d$ 决定。 $d$ 决定了电解加工中所需维持加工稳定的电解液流量,在电解液腔的优化设计中取常数。 $l$ 增加可以提高流量分配的均匀度,F. Lu等通过离散方程对热交换器流场进行分析时得出相似的结论<sup>[10]</sup>。但 $l$ 的增加导致沿程损耗的急剧增大,特别是对于内径较小的管电极,沿程损耗更大,管长过大还使其本身的挠性增大,不利于电极定位,影响加工精度。故 $l$ 亦不宜作为流场设计的参数。综合以上分析,最终选择分流腔直径 $D$ 为电解液分流腔均流的主要设计参数,即通过调节 $D$ 值来调节 $Eu_0$ ,进而改变分流的均匀度。

### 2.2 优化过程与结果

对 $D$ 进行优化设计时,先预设分流目标均匀度系数 $M_0$ 并设定初始 $D$ 值,可取 $D = d$ 。并据此解方程组,即式(4)、式(5)、式(8)、式(10)和式(11),得到该设计值下的流场分布,并计算 $M$ 值。得到 $M$ 值后与 $M_0$ 进行比较,若不能满足,则 $D = D + \phi$ , $\phi$ 为一微小步进量。再代入循环,直到满足条件,得到优化参数 $D_0$ 为止。优化具体过程如图3所示。图中: $\epsilon$ 为 $\epsilon_0$ 的预设微小量; $\delta$ 为 $U_{in}$ 的预设微小量。本文利用该算法研究了影响流量均匀度的因素,以及不同 $M_0$ 值对应的尺寸优化结果。

图4所示为在不同分流腔直径下,电极管数 $n$ 对 $M$ 值的影响。由图4可见, $n$ 和 $D$ 都是影响

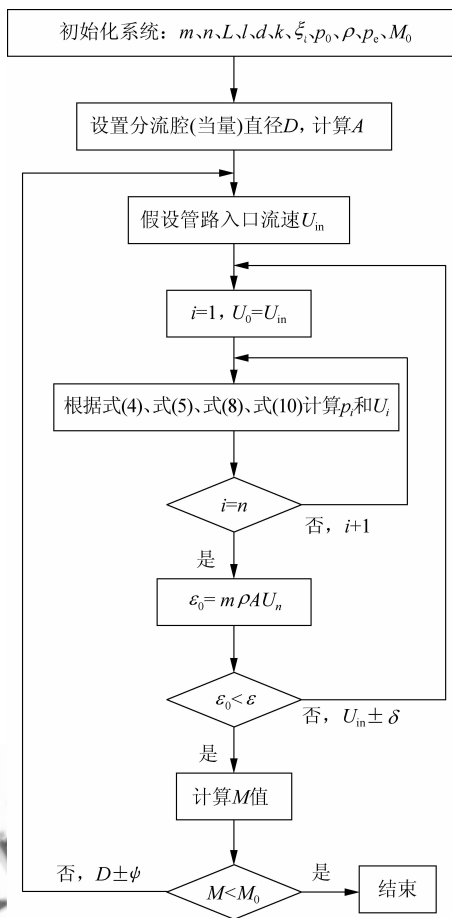
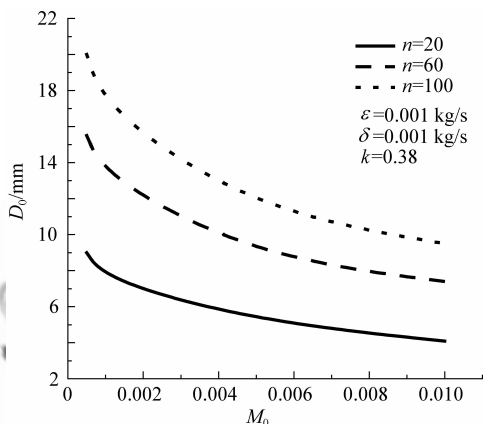
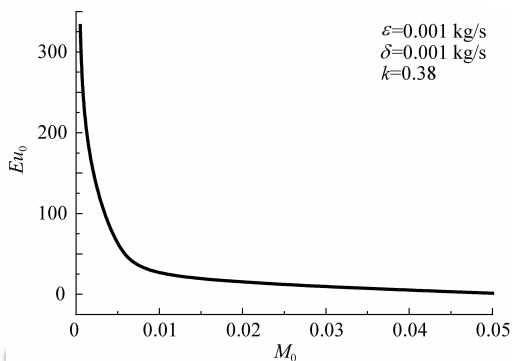
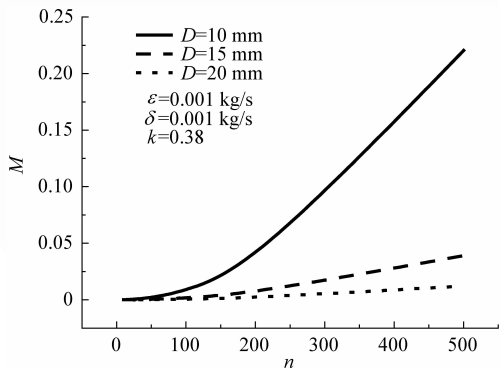


图3 分流腔流场计算及均流流程

Fig. 3 Calculation of manifold flow and balance optimization routine

征的综合反应,图6是  $M_0$  与  $Eu_0$  的关系曲线,可见要得到较高的分流均匀度,需要较高的  $Eu_0$  值。下面通过单排等间距群孔加工试验来确定合适的  $M_0$  值,以得到最优的设计尺寸。

图5  $M_0$  对设计直径  $D_0$  的影响Fig. 5 Effect of  $M_0$  on  $D_0$ 图6 尺寸系数  $Eu_0$  与  $M_0$  的对应关系Fig. 6 Relationship of  $Eu_0$  and  $M_0$ 图4 电极管数  $n$  对  $M$  值的影响Fig. 4 Effect of  $n$  on  $M$ 

$M$  值的重要因素,采用较大的分流腔直径  $D$  可以大大提高流场的均匀性,这与能量方程的分析结果相同,见式(20)。从图4还可看出,电极管数  $n$  大于200时,  $n$  与  $M$  几乎呈线性关系。图5则表明需要达到的分流均匀度越高,即  $M_0$  值越低,设计值  $D_0$  则越大。 $M_0$  在  $0 \sim 0.001$  之间时  $D_0$  值随  $M_0$  变化明显。尺寸系数  $Eu_0$  是分流腔各尺寸特

### 3 试验系统与方案

本试验平台包括机床主体、电源、供液系统、控制单元等,如图7所示。试验所采用的分流腔带有群电极夹持装置,其密封性良好,能承受2 MPa的压强,且安装简单,电极可单独拆卸更换,通用性强。试验中通过改变分流腔的内径  $D$  来调节尺寸系数,已达到改变分流均匀度的目的。试验所用管电极为内径为  $(500 \pm 10) \mu\text{m}$ 、外径为  $(800 \pm 10) \mu\text{m}$  的不锈钢管,试验前涂覆聚酯涂层进行绝缘处理。阳极工件材料为厚度为1.9 mm的SS320不锈钢片,加工前进行打磨以去除表面氧化物。电解液采用质量分数为17%的  $\text{NaNO}_3$  溶液,工作温度为室温,入口压力为500 kPa。为了便于研究加工电流,系统选用运动控制卡 PCI-7344 的模数转换器(ADC)输入通道采集采样电

阻(阻值为  $1 \Omega$ ) 两端的电压信号, 模拟/数字 (A/D) 转换时间为  $6 \mu\text{s}$ 。为了验证不同  $M_0$  值对加工效果的影响, 选取电极管数  $n=20$ 。电极管长度为  $15 \text{ mm}$ , 电极间距  $5 \text{ mm}$ , 供液管直径  $6 \text{ mm}$ , 供液管口到最近之管电极的水平距离  $40 \text{ mm}$ 。应用  $M_0$  值为  $0.05$ 、 $0.01$ 、 $0.005$ 、 $0.001$  和  $0.0005$  的分流腔(对应的尺寸系数  $Eu_0$  分别为  $1.5$ 、 $16.9$ 、 $43.3$ 、 $173.7$ 、 $332.8$ ) 进行电解加工试验, 每组试验重复 5 次。通过加工信号的稳定性和侧面间隙的一致性来反映加工质量。试验采用  $12 \text{ V}$  直流电源, 电极进给速度为  $0.5 \text{ mm/min}$ 。

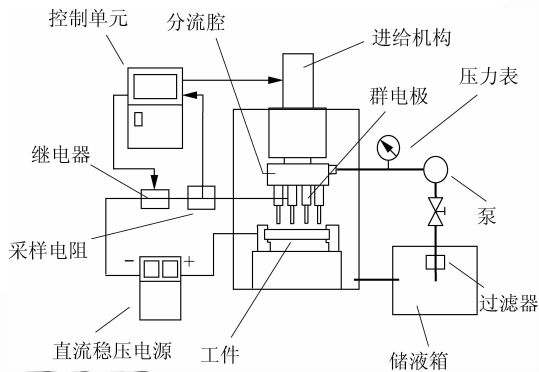


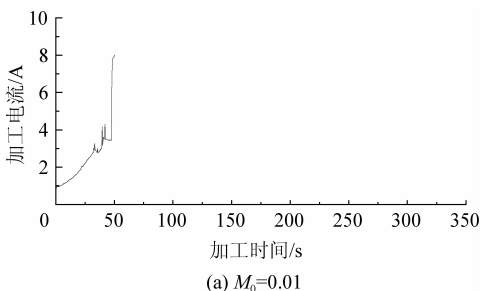
图 7 群孔管电极电解加工系统简图

Fig. 7 Construction of ECD system on multiple holes

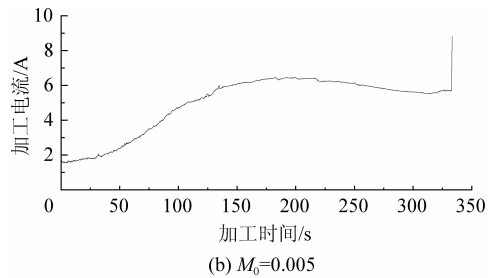
## 4 试验结果与讨论

### 4.1 $M_0$ 对加工过程稳定性的影响

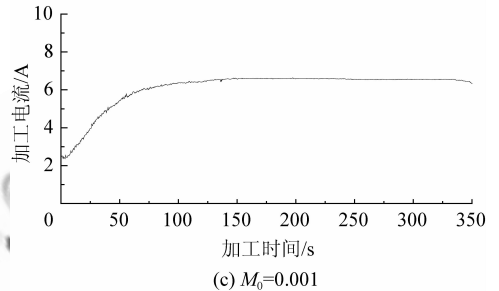
$M_0$  值为  $0.05$ 、 $0.01$  时, 5 次加工均未能完成, 在开始加工不久即出现短路, 无法进入加工平衡状态,  $M_0=0.01$  时的电流信号如图 8(a) 所示。这是由于电解液在某些电极管处流量的供给严重不足, 无法及时排出加工产物, 导致加工过程无法继续, 故而该分流均匀度无法满足电解加工的需求。当  $M_0=0.005$  时, 5 次加工完成 4 次, 电流波动较大, 其中一次短路电流信号如图 8(b) 所示。当  $M_0$  减小到  $0.001$  和  $0.0005$  时, 均能顺利完成加工, 无任何火花短路现象, 电流波动小于  $5\%$ ,  $M_0=0.001$  时的典型信号如图 8(c) 所示。



(a)  $M_0=0.01$



(b)  $M_0=0.005$



(c)  $M_0=0.001$

图 8 典型加工电流信号

Fig. 8 Typical machining currents

### 4.2 $M_0$ 对平均侧面间隙的影响

对  $M_0=0.005$ ,  $M_0=0.001$  和  $M_0=0.0005$  所加工的排孔进行孔径的测量, 计算其极间侧面间隙。平均侧面间隙  $S$  是反映加工孔精度的重要指标, 其定义为

$$S = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \left( \frac{d_i(r)}{2} - r \right) \quad (21)$$

式中:  $r$  为电极半径;  $j$  为沿孔排列方向的测量次数;  $d_i(r)$  为每个测量位置的直径。每个孔均取 5 次加工的平均值(对于  $M_0=0.005$  的加工情况取成功加工的 4 次平均值), 最终结果如图 9 所示; 对各组孔的侧面间隙值求其均方差和最大偏差, 结果如图 10 所示。

从图 9 和图 10 中可以看到,  $M_0=0.005$  时侧面间隙的均匀度较差, 最大偏差达到  $45 \mu\text{m}$ , 而

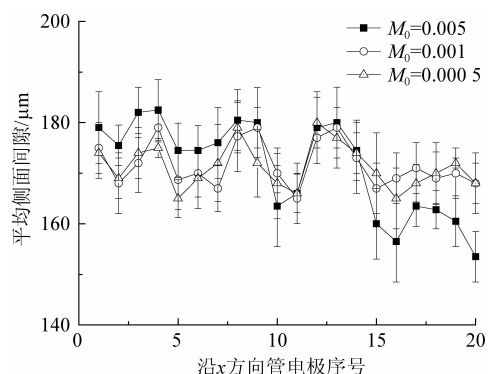


图 9 沿  $x$  方向电极加工的各孔平均侧面间隙变化  
Fig. 9 Average overcut of holes machined by electrodes in  $x$  direction

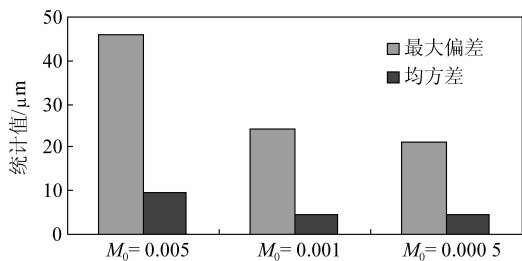


图10 不同分流均匀度下的孔侧面间隙值的最大偏差和均方差

Fig. 10 Maximum deviations and mean square errors of  $S$  under different  $M_0$

且沿  $x$  方向变化明显:随着离供液口的距离变远,侧面间隙值逐渐下降。由于侧面间隙与加工电流密度密切相关,而电流密度受到电解液流速的影响,对于单电极的电解加工,这种影响在供液泵压力大于 300 kPa 时并不明显<sup>[7]</sup>。但是流量分配的不均匀仍会导致电流密度的微小变化,这种变化同时反映在加工的侧面间隙和正面间隙上。对于具有分流腔的群电极加工,其加工间隙的变化又进一步影响了不同电极之间流量的分配,即导致了流量分配的恶化,最终导致较大的侧面间隙偏差。而在  $M_0=0.001$  和  $M_0=0.0005$  时侧面间隙均匀度较好且相差无几,最大偏差分别为 24  $\mu\text{m}$  和 21  $\mu\text{m}$ ,均方差分别为 4.47 和 4.49,各间隙值沿供液方向变化均不显著。这说明流量分配的均匀性较好,对侧面间隙的影响已不明显。从尺寸优化的角度,选择  $M_0=0.001$  (尺寸系数  $Eu_0=173.7$ ) 为正流电解排孔加工的分流均匀度系数。由于  $M_0$  值是反映分流腔均流性能的特征参数,理论上只与分流腔尺寸结构有关,几乎不受外部条件(如入口流速  $U_{in}$ )影响,故该均匀度系数在正流群孔电解加工中具有通用性。图 11 为采用  $M_0$  值

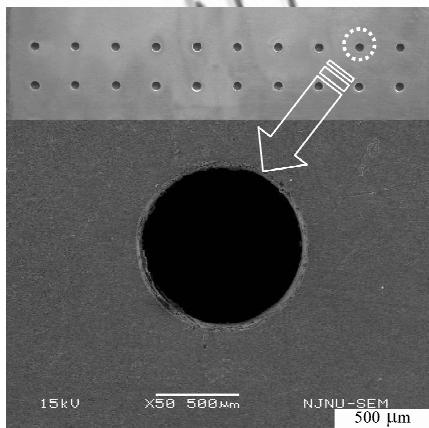


图11 采用优化参数加工的群孔工件图(局部)

Fig. 11 Machined multiple holes using optimized parameters (partial)

为 0.001 的电解液分流腔所加工的阵列孔结构,孔径为  $(1.03 \pm 0.03) \text{mm}$ ,加工过程稳定,没有出现短路、烧伤等常见问题。

## 5 结论

(1) 在群孔 ECD 分流腔设计中,减小管电极数量、增大腔体直径、减小管电极内径以及增加总阻力系数均能使腔体内流场分布更加均匀。分流腔直径或是当量直径是进行分流腔设计的主要优化参数。

(2) 通过优化分流腔尺寸,提高其分流均匀度系数,能使电解孔加工的稳定性显著增加,加工精度提高。但试验同时证明,分流均匀度过高,其对进一步提高加工稳定性和加工精度的作用已不显著,为降低分流腔尺寸,在本文试验条件下,选择  $M_0=0.001$  (尺寸系数  $Eu_0=173.7$ ) 为正流群孔电解加工的分流均匀度系数。

## 参 考 文 献

- [1] Bunker R S. A review of shaped hole turbine film-cooling technology[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2005, 127(4): 441-453.
- [2] 张华, 徐家文, 王吉明, 等. 喷射液束电解-激光复合加工工艺试验研究[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1138-1143. Zhang Hua, Xu Jiawen, Wang Jiming, et al. Experimental study of hybrid processing of jet electrochemical machining and laser beam machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1138-1143. (in Chinese)
- [3] McGeough J A, Pajak P T, de Silva A K M, et al. Recent research and developments in electrochemical machining [J]. International Journal of Electrical Machining, 2003 (8): 1-14.
- [4] Sen M H, Shan H S. A review of electrochemical macro-to micro-hole drilling processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(2): 137-152.
- [5] Rajurkar K P, Zhu D, McGeough J A, et al. New developments in electrochemical machining[J]. Annals of CIRP, 1999, 48(2): 567-580.
- [6] 朱获, 曲宁松. 电极平动式电解加工技术研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(5): 105-109. Zhu Di, Qu Ningsong. Investigation on electrochemical machining with the orbital movement of electrode[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 105-109. (in Chinese)
- [7] Sharma S, Jain V K, Shekhar R. Electrochemical drilling of inconel superalloy with acidified sodium chloride electrolyte[J]. International Journal, Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(7): 492-500.

- [8] Hewidy M S, Ebeid S J, Rajurkar K P, et al. Electrochemical machining under orbital motion conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(3): 339-346.
- [9] Bilgi D S, Jain V K, Shekhar R, et al. Hole quality and interelectrode gap dynamics during pulse current electrochemical deep hole drilling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(1-2): 79-95.
- [10] Lu F, Luo Y H, Yang S M. Analytical and experimental investigation of flow distribution in manifolds for heat exchangers[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2): 179-185.
- [11] Maharudrayya S, Jayanti S, Deshpande A P. Flow distribution and pressure drop in parallel-channel configurations of planar fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 94-106.
- [12] Wang J Y. Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: U-type arrangement[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(21): 6339-6350.
- [13] 王俊晔, 章明川, 范浩杰, 等. 锅炉分配集箱非线性水力特性分析[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(3): 268-272.  
Wang Junye, Zhang Mingchuan, Fan Haojie, et al. Non-linear hydrodynamic characteristics in boiler's dividing header[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(3): 268-272. (in Chinese)
- [14] Bajura R A. A model for flow distribution in manifolds [J]. Journal of Engineering for Power—Transactions of the ASME, 1971, 93(1): 7-12.
- [15] 郑洽徐, 鲁钟琪. 流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.  
Zheng Qiayu, Lu Zhongqi. Fluid dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 1980. (in Chinese)
- [16] 董谊仁, 过健. 填料塔排管式液体分布器的研究和设计[J]. 化学工程, 1990, 18(3): 28-34.  
Dong Yiren, Guo Jian. Research and design on the row-hole style fluid distributor of the packed tower[J]. Chemical Engineering, 1990, 18(3): 28-34. (in Chinese)
- [17] Sen M H, Shan S. Analysis of hole quality characteristics in the electro jet drilling process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(15): 1706-1716.

#### 作者简介:

王维(1982—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 精密制造。

Tel: 025-84895912

E-mail: wwwei@nuaa.edu.cn

朱荻(1954—) 男, 博士, 长江学者特聘教授, 博士生导师。主要研究方向: 特种加工、微细加工和 MEMS 加工。

Tel: 025-84891077

E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn

(编辑: 蔡斐, 杨冬)