

# 螺旋线刃型电解阴极流场的数值模拟与结构优化

干为民 吴小锋 陈志伟 徐波

(江苏省数字化电化学加工重点建设实验室,常州工学院,常州,213002)

**摘要:**为了降低数控电解铣削时阴极流场的波动和不均匀性,提高工件的电解铣削加工精度和表面质量,针对叶轮电解铣削中螺旋线刃阴极结构,建立其流场模型,采用标准  $K-\epsilon$  模型对叶轮加工时铣削阴极流场进行了动态模拟,分析了不同的内部流道结构和加工工艺参数对电解液流场速度和压力分布的影响,并结合模拟结果对阴极结构进行了改进。最后以叶轮为加工对象,在数控复合电解铣削加工中心进行了实验。实验结果验证了仿真模拟的有效性和正确性,为铣削用阴极结构的设计和改进了提供了依据。

**关键词:**电解加工;螺旋线刃阴极;流场模拟;流场不均匀性

中图分类号:V261.5

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)05-0738-06

## Flow Field Numerical Simulation and Optimization of Spiral Blade Cathode in NC Electrochemical Machining

Gan Weimin, Wu Xiaofeng, Chen Zhiwei, Xu Bo

(Jiangsu Key Laboratory of Digital Electrochemical Machining, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, 213002, China)

**Abstract:** In order to reduce the volatility and heterogeneity of the cathode flow in numerical control electrochemical milling, and improve the accuracy and surface quality of the workpiece in electrolytic machining, a spiral blade cathode structure is proposed. The flow model of the cathode structure is built and simulated by using the standard turbulence model. The simulation results show that the electrolyte flow velocity and pressure distribution are influenced by internal channels with different structures and different technology parameters, therefore the structure of cathode is improved according to the simulation results. Finally, regarding the impeller as the milling object, experiments are carried out at the CNC composite electrolytic milling machining center. The experimental results verify the validity and correctness of the simulation.

**Key words:** electrochemical machining; spiral blade cathode; flow simulation; flow heterogeneity

电解加工是利用金属在电解液中发生阳极溶解的原理在加工过程中使用简单结构阴极加工复杂阳极表面的一种特种加工方法,需保证加工间隙内有充足、均匀的电解液,且间隙内的电解液流场合理分布。但是,往往会有电解加工阴极内部流场设计不合理导致加工精度低,表面粗糙,严重的还会导致阴极和工件的损伤。因此,阴极内部流场特

性研究已经成为电解铣削工艺中的重要组成部分。

国内外对电解加工阴极的流场模拟和设计开展了一系列研究,文献[1,2]设计了球头铣刀的刀具阴极,进行型面光整加工的实验研究,取得了形状误差小于 0.01 mm 的加工效果;文献[3]对平板状和球头状阴极结构和加工技术进行了研究,并对平板状和球头状阴极电解加工过程进行了计算机

基金项目:国家自然科学基金(51305049)资助项目;江苏省高校科研成果产业化推进工程(JHB2012-65)资助项目。

收稿日期:2014-05-10;修订日期:2014-07-10

通信作者:干为民,男,教授,E-mail:ganwm@czu.cn。

仿真;文献[4]利用 Fluent 软件对电解型腔流场进行了仿真模拟;文献[5]对整体式叶轮数控电解加工三维流场进行了数值模拟;文献[6]对球形阴极进行了三维流场仿真模拟,分析了不同加工结构参数和加工工艺参数对流场特性的影响。本文基于以上研究基础,设计了螺旋线刃型内喷式阴极结构,并借助于 Fluent 软件对加工过程中该阴极内流体特性进行了模拟和分析,并对阴极内部和出口流道结构进行了优化和改进,最后通过改进后的阴极用于典型的叶轮加工实验验证了模拟结果,为类似的阴极结构设计提供了设计方法和理论依据。

## 1 数控电解铣削用阴极加工原理与物理模型

数控加工电解铣削加工时,采用直线刃型和螺旋线刃型阴极结构,电解液为硝酸钠盐溶液,电解时具有一定压力的电解液从阴极进液口进入阴极,通过阴极内部通道从阴极的侧刃上的出口口喷出,进入阴极与阳极间的加工间隙,如图 1 所示,从而构成从阴极到电解液再到工件的通电回路,电解液与工件金属表面发生电化学反应,从而不断腐蚀金属表面,并通过电解液流动带走腐蚀物,实现金属工件结构形状的电解加工。该技术结合数控加工和电解加工的优势,可铣削任意形状、不同硬质和材质的金属,且阴极无损耗。

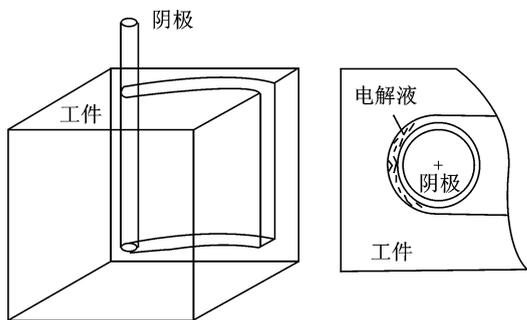


图 1 电解阴极加工原理

Fig. 1 Processing principle of electrolytic cathode

数控电解铣削加工过程中,流场分布是否合理是影响加工深度和最大进给速度的关键因素之一。与传统反拷式电解加工不同,数控电解铣削加工使用的是棒状标准阴极,电解液一般采用内喷为主,外喷为辅的方式。本文选择了螺旋线刃型电解阴极结构,如图 2 所示,该结构为两段直径不同的空心圆柱体构成,其中小径段为引导流体流入加工段,加工段上分布两条对称的螺旋线刃窄口,以此

保证理论上阴极加工时在加工段沿轴线方向都有电解液喷出。这种分段式阴极结构有别于一体式阴极结构,它将阴极加工段与非加工段有效地分离开来,在加工复杂工件表面时更灵活,更易于控制。

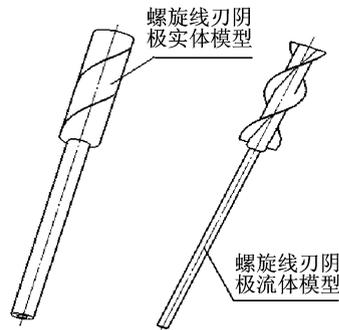


图 2 螺旋线刃阴极实体与流体模型

Fig. 2 Helical blade cathode and fluid model

结合实际应用环境和条件,针对螺旋线刃阴极结构的流场进行模拟仿真,研究在一定边界条件作用下,内部流道结构、加工工艺参数等与流场之间的关系。

## 2 阴极流场的流体控制方程

数控电解铣削用阴极电解加工时,使用的电解液为氯化钠溶液,电解压力比较高(0.5~2.0 MPa),流体的流速大(6~30 m/s),为了简化计算,建模时对阴极内部流体作如下假设:

(1) 流体为不可压缩的、恒定的牛顿流体,即动力黏度不随速度梯度变化而变化;

(2) 在电解加工时,阴极出口处流道结构复杂,阴极内部流体呈湍流状态,并且忽略加工过程中介质温度变化以及温差造成的能量损耗,流动受到连续性方程和动量守恒定律方程的约束。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \nabla) u = g - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (2)$$

式中: $\rho$ 表示流体密度; $u$ 为流体速度; $g$ 为流体重力项; $\nabla p$ 为流体压降; $\nu$ 为黏性系数。

标准  $k-\epsilon$  湍流方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho U k) - \nabla(\Gamma_k \nabla k) = A \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho U \epsilon) - \nabla(\Gamma_\epsilon \nabla \epsilon) = B \quad (4)$$

$$A = p_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$B = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\tau 1} p_k - C_{\tau 2} \rho \varepsilon) \quad (6)$$

式中:  $\Gamma_k = \mu + \mu_i/\sigma_k$ ,  $\Gamma_\tau = \mu + \mu_i/\sigma_\tau$ , 其中  $\Gamma_k$  和  $\Gamma_\tau$  为耗散系数;  $C_{\tau 1}$ ,  $C_{\tau 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\tau$  为湍流模型常数, 并选取  $C_{\tau 1} = 1.44$ ,  $C_{\tau 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\tau = 1.3$ 。

### 3 数控电解铣削阴极的流场数值模拟

#### 3.1 阴极模型及网格划分

以螺旋线刃型阴极结构为对象, 电解加工流场的形状由阴极实体的内部轮廓、阴极流体入口和阴极流体入口构成。由于阴极内部结构导致了流场的不规则形状, 采用 Gambit 软件, 利用非结构网格的自适应性, 对流场结构进行网格划分, 并对网格质量进行了检查, 结果符合流场数值模拟的要求, 最终网格划分如图 3 所示。

在 Gambit 软件中定义实体为 Fluid 类型, 并命名为 fluid, 设置流体模型的入口为 PRESSURE\_INLET, 出口为 PRESSURE\_OUTLET, 其余边界全部为 Wall, 最后导出 msh 文件。



图 3 螺旋线刃阴极网格

Fig. 3 Helical blade cathode grid

#### 3.2 边界条件与流场初始化参数设置

利用 Fluent 软件对流场进行模拟解析, 在 Fluent 软件中定义流场模拟基本参数, 如表 1 所示。求解器选用基于压力的求解器, 采用隐式算法, 流动为非定常流动。运行环境不考虑重力的影响, 设定边界条件为进口压力和出口压力, 设置流体模型为绕轴线转动, 边界相对于流体处于静止, 湍流模型采用标准  $K-\varepsilon$  模型进行求解。模型参数设为湍流强度  $I$  和水力直径  $D_H$ , 近壁区采用标准

表 1 流场模拟基本参数设置

Tab. 1 Basic parameter settings of flow field simulation

流体密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度 $\nu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	传导系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	进口压力 $P_i/(\text{MPa})$	出口压力 $P_o/(\text{MPa})$	阴极转速 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
1 280	0.048	0.026 4	1 006	2.0	0.1	1.5

壁面函数法, 压力和速度的耦合采用 Simple 算法, 离散格式选用二阶迎风格式。连续性方程和动量方程收敛残差标准均为  $10^{-4}$ 。

#### 3.3 流场的仿真模拟与结果分析

在 Fluent 中需定义 Solver 类型为非定常流动 Unsteady, 边界定义的 Boundary Conditions 选项中, 选择 fluid, 设置其 move type 为 Moving mesh, 定义选择轴并设置速度大小为  $1.5 \text{ rad/s}$ , 为了非定常流动计算仿真结果的收敛和稳定, 将每个动态时间步最大迭代步数设置为 100 步。最后通过模拟, 获得阴极内部流场的压力分布和速度矢量显示如图 4, 5 所示。

为了更直观和清楚地了解内部流场的特性, 在出口面上设置一些列标记, 沿着旋转轴直线方向逐个计算标记点组成的标记区域的出口平均速度, 来反映流场的均匀性。

设定阴极转速为  $500 \text{ r/min}$  固定不变时, 如图 6 所示, 当入口压力为  $1.0 \text{ MPa}$  时, 阴极的扩孔结构处流场的速度为负, 远离扩孔处速度逐渐升高,

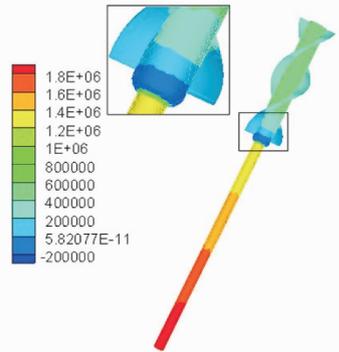


图 4 螺旋线刃型阴极流场压力分布

Fig. 4 Pressure distribution of flow field

最后趋于稳定, 它表明实际加工时速度为负的出口区域没有水流出, 速度在轴向方向上分布明显不均匀。随着入口压力设置变高, 出口平均速度明显提高, 压力为  $1.5 \text{ MPa}$  时, 阴极不出水的区域面积减少, 当压力达到  $2.0 \text{ MPa}$  时, 阴极出口面上速度都为正, 表示在出口面上都有水流出, 但是不论如何改变入口压力, 靠近扩孔处和远离扩孔处的出口

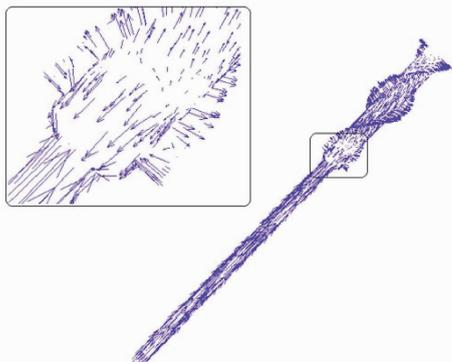


图 5 螺旋线刃阴极速度矢量图  
Fig. 5 Velocity vector of flow field

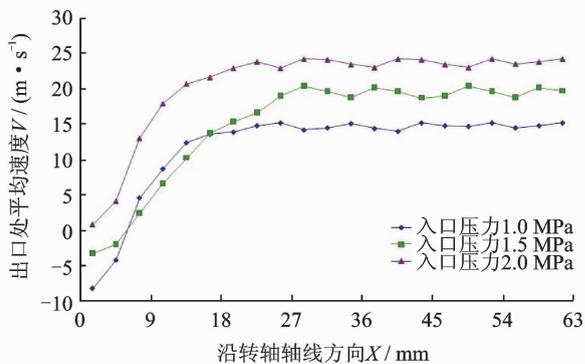


图 6 不同入口压力时阴极流场出口速度分布比较  
Fig. 6 Outlet velocity distribution of flow field under different entrance pressures

区域平均速度差异总是存在,表明出口压力的提高能够保证出口面上处处有水流出,但是无法实现出口面上水流速度的均匀性。

设定阴极入口压力为 1 MPa 固定不变,如图 7 所示,当转速为 500 r/min 时,阴极的扩孔结构处的出口有负速度,表示实际加工时没有液流喷出,在离开扩孔处大约 15 mm 处往后的出口面速度趋于均匀,约为 13 m/s;当转速调整至 800 r/min 时,

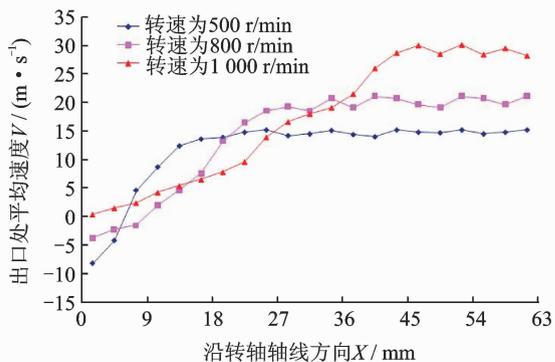


图 7 不同转速时阴极流场出口速度分布比较  
Fig. 7 Outlet velocity distribution of flow field under different speeds

负速度现象有所改善,但离开扩孔处约 25 mm 处往后才趋于基本均匀,约为 20 m/s;当转速调整至 1 000 r/min 时,负速度现象基本消失,但趋于均匀需在离扩孔处 38 mm 往后的出口面区域,速度约为 29 m/s。所以,提高转速可以避免阴极出口面不出液的现象,最大速度与最小速度差稍微有所减少,但随着转速上升,出口面沿轴线方向速度均匀区域减少。

### 3.4 流场结构的改进

通过以上模拟过程和解析结果分析,螺旋线刃阴极内部流场不均匀性主要由于其内部扩孔结构导致,调节加工工艺参数,如入口压力、阴极加工时的转速等可以对流场产生一定的影响,但都无法实现较满意的均匀流场。为此,对内部结构进行改进,在扩孔处加入三角形阻尼块结构,如图 8 所示。

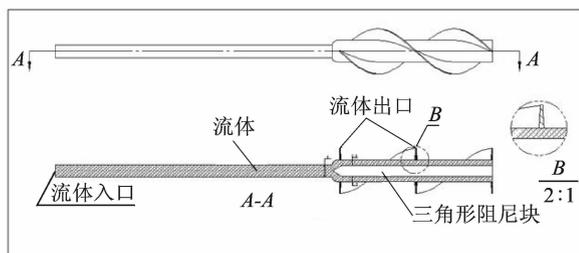


图 8 螺旋线刃阴极内部流道改进结构  
Fig. 8 Improved structure of spiral blade inside cathode

在内部结构中加入带三角形头的阻尼块结构,使得流道原扩孔处增加阻尼,设计三角形结构使得流体的过流截面面积始终保持不变,通过对新结构进行模拟,并对加了阻尼块的阴极结构与原结构出口流场均匀性进行了比较,如图 9 所示,设定入口压力为 1 MPa,转速为 500 r/min。

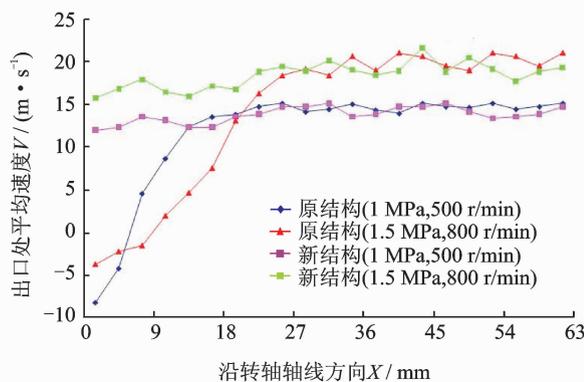


图 9 螺旋线刃阴极内部结构优化前后流场出口速度对比  
Fig. 9 Comparison of outlet velocity of flow field before and after cathode optimization

由图9所示,新结构流场出口处的流速明显比较均匀,不论工艺参数如何变化,新结构在出口端面上整体的均匀性都比较好。当入口压力为1 MPa,转速为500 r/min时,新结构出口面上的速度基本维持在12~14 m/s之间;当入口压力变为1.5 MPa,转速为800 r/min时,新结构出口面上的速度维持在16~21 m/s,所以与原结构相比,其对流场的改善作用很明显。

### 4 铣削电解阴极的实验验证

为了更进一步验证阴极流场动态仿真模拟结果的正确性,搭建了叶轮数控电解铣削加工实验平台。该实验平台由数控机床、螺旋线刃型阴极、叶轮、液压系统等构成,原理如图10所示。实验条件设置数控机床转速为1 000 r/min,阴极入口压力设置为2.0 MPa,电压22 V,进给最大速度0.7 mm/min,温度35 °C。

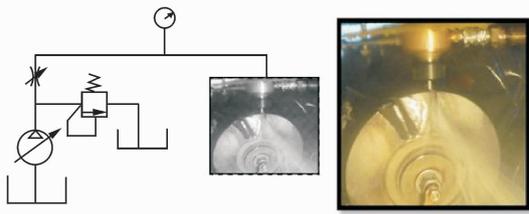


图10 螺旋线刃型电解阴极加工叶轮实验平台

Fig. 10 Experimental platform of impeller electrolytic processing with spiral blade cathode

对两种阴极结构加工叶轮的实验进行比较,如图11,12所示,原结构电解加工时,扩孔处对应叶轮电解位置为叶尖处,由于原阴极结构扩孔处的负压以及出口流场流速不均匀,首先会导致叶轮叶尖表面的凹凸和不平整现象,其次也会引起叶尖以下的叶身部位有凹凸和不平整出现,这正说明了原阴极结构带来的加工缺陷。另外,为了更具体和形象



图11 原阴极加工叶轮实体表面

Fig. 11 Impeller solid surface of original cathode processing



图12 新阴极加工叶轮实体表面

Fig. 12 Impeller solid surface of new cathode processing

地说明新阴极结构的优点,对两种结构加工的叶轮表面进行了粗糙度测量,如图13,14所示,结果发现原阴极结构加工粗糙度在±0.5 μm区间内;新阴极结构加工表面光滑整洁,加工粗糙度在±0.3 μm区间内,因此,通过对叶轮加工实验证明了阴极结构内部流场均匀性模拟和解析的正确性,同时也为新型阴极结构设计提供了理论方法和设计依据。

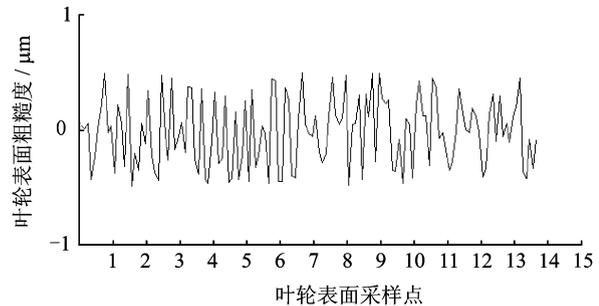


图13 原阴极加工叶轮实体表面粗糙度

Fig. 13 Impeller solid surface roughness of original cathode processing

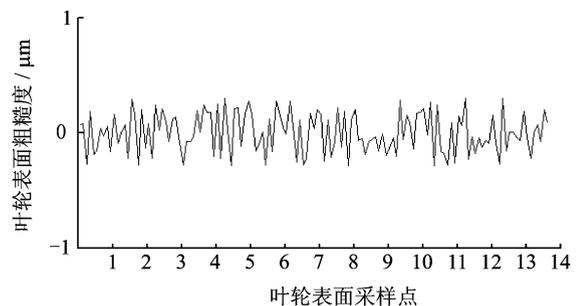


图14 新阴极加工叶轮实体表面粗糙度

Fig. 14 Impeller solid surface roughness of new cathode processing

### 5 结论

(1)利用计算流体力学方法对螺旋线刃型电

解阴极结构进行了动态模拟,分别比较了不同的入口压力和不同阴极转速条件下电解阴极流场出口速度均匀性,结果表明提高阴极电解液入口压力和阴极转速都能实现整条螺旋线刃有电解液流出,避免出现断流现象,但是对于出口流场速度的均匀性改善不是特别明显。

(2)优化阴极流场内部结构,对扩孔处和阴极加工段内加入三角块,使得流体在阴极内流动时过流面积始终保持不变,有效避免了由于过流面积突然变大导致的低压涡流区的产生,并与调节工艺参数结合,保证了流场的均匀性。

(3)针对螺旋线刃阴极优化前后的结构,进行了叶轮数控电解铣削实验,比较了螺旋线刃阴极新结构与原结构的加工效果,结果表明,新阴极结构对于提高加工质量起到了明显的效果。

#### 参考文献:

- [1] Ruszaj A, Zybura-Skrabalak M. The influence of process parameters on technological indications of the electrochemical machining process with a non-profiled electrode[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1993, 64(1): 713-718.
- [2] Kozak J, Dabrowski L, Lubkowski K, et al. CAE-ECM system for electrochemical technology of parts and tools[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 107 (1): 293-299.
- [3] Kozak J. Computer simulation system for electrochemical shaping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109 (1): 354-359.
- [4] 吴锐,徐家文,赵建社. 基于计算流体动力学软件的型腔电解流场仿真[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(14): 1657-1660.  
Wu Rui, Xu Jiawen, Zhao Jianshe. Fluid field simulation of electrochemical machining cavities based on software of CFD[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(14): 1657-1660.
- [5] 吴建民,徐家文. 数控电解加工整体式叶轮阴极三维流场数值模拟[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(7): 780-783.  
Wu Jianming, Xu Jiawen. Numerical simulation of three-dimensional flow field of cathode of NC-Electrochemical machining in machining integral impeller [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(7): 780-783.
- [6] 傅秀清,康敏,杨勇,等. 球形阴极数控电解加工的流场仿真及实验研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(8): 1038-1041.  
Fu Xiuqing, Kang Min, Yang Yong, et al. Research on flow field simulation and experiment of NC-ECM with spherical cathode [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(8): 1038-1041.