DOI: 10.3901/JME.2019.17.215

基于湍流 SST 模型电解加工温度场数值仿真研究*

陈远龙¹ 周小超^{1,2} 陈培譔¹ 王子权¹

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009;

2. 皖西学院机械与车辆工程学院 六安 237012)

摘要: 针对电解加工过程中电解液温度难以准确预测的问题, 采用湍流 SST 模型求解电解液流速及 Euler 双流体模型求解气泡率分布, 建立多场耦合仿真模型求解极间间隙中电解液的温度分布。对比湍流 $k-\varepsilon$ 、SST 模型以及 SST 耦合 Euler 模型计算温度分布的结果, 分析了不同流量和出口压力对电解液温度分布的影响。结果表明: 采用湍流 SST 模型计算得到的电解液温度分布比 $k-\varepsilon$ 模型更接近试验结果; 考虑气泡率对温度的影响, 采用 SST 耦合 Euler 模型计算得到温度分布的结果更精确; 出口处电解液温度随流量的增加而降低; 在相同流量下, 极间电解液温度随出口压力的增加而小幅上升。

关键词: 电解加工; 温度; 湍流 SST 模型; 气泡率

中图分类号: TG662

Numerical Simulation Study on Temperature Field of ECM Based on the Turbulent SST Model

CHEN Yuanlong¹ ZHOU Xiaochao^{1,2} CHEN Peixuan¹ WANG Ziquan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. School of Mechanical and Vehicle Engineering, West Anhui University, Luan 237012)

Abstract: The temperature distribution of the electrolyte in electrochemical machining gap influence the machining precision. The temperature distribution of electrolyte is solved by equations, which using the turbulence SST equation to get the flow velocity of boundary layer, the Euler two-fluid model to solve the bubble rate distribution, coupling electric field and convective heat transfer equations. The influence of different flow rate and outlet pressure on the temperature distribution of the electrolyte is analyzed by comparing the results of the $k-\varepsilon$ model, SST turbulent and SST coupling with Euler model. The results show that the calculated temperature of the SST turbulent model is closer to the experimental results than the $k-\varepsilon$ model. Considering the effect of bubble rate on temperature, the result of temperature distribution calculated by SST coupled Euler model is more accurate. The temperature of the electrolyte at the outlet decreases with the increase of flow. At the same flow rate, the temperature of the inter-electrode electrolyte increases slightly with the increase of outlet pressure.

Key words: ECM; temperature; turbulence SST model; bubble rate

0 前言

电解加工具有加工速度快、表面质量好、工具无损耗等优点, 被广泛应用在航空航天发动机叶片、整体叶轮等零部件的生产中^[1]。随着加工精度要求的不断提高, 工具阴极和流场的设计越来越复杂。电解加工间隙是指阴极和阳极之间的距离, 它与阴极设计密切相关, 对电解加工成形精度起着最终决定作用, 其分布与电解液流场、温度场密切相关^[2]。

为了确保加工间隙的均匀性, 国内外学者对电解液流场、温度场等进行了大量研究。DECONINCK 等^[3-4]在电压模型(PM)中采用层流 Navier-Stokes 方程研究了温度对材料去除一致性的影响, 在多离子传输模型(Multi-Ion)中采用层流模型求解温度分布。方明等^[5-6]用湍流 RNS $k-\varepsilon$ 方程, 研究了直流、脉冲电解加工成形过程中电解液的流场和温度场, 预测了工件阳极型面形状。MAYANK 等^[7]用 Bruggemann 方程计算了气泡率的分布, 研究了不同流速下气泡率对轴对称零件加工精度的影响。常园园等^[8]分析了电解液池中热量的传递过程及电解液的流速对温度场分布的影响。在叶片、整体叶轮精

* 国家自然科学基金资助项目(51775161)。20180804 收到初稿, 20190509 收到修改稿

密电解加工研究中^[9-13], 学者们通过 Fluent 模拟仿真, 对流场状态进行了分析。

电解液温度对加工间隙的稳定性和均匀性非常重要。针对电解加工间隙中湍流状态的电解液与工具阴极、工件阳极之间的对流换热问题, 本文采用湍流 SST(Shear stress transport)模型^[14]计算近壁处电解液流速, 耦合 Euler 双流体模型^[15], 求解电解液的温度分布。对比仿真与试验结果, 揭示湍流 SST 模型和 $k-\varepsilon$ 模型温度仿真结果的差异以及气泡对电解液温度分布的影响规律, 为准确预测电解加工温度场奠定基础, 并可为等间隙设计中获得均匀间隙以及阳极型面预测等提供理论依据。

1 数学模型

1.1 流场模型

1.1.1 液相模型

电解加工间隙中的电解液流动处于湍流状态, 边界层的电解液流动可分成三个区域: 黏性底层、缓冲层和湍流区域, 如图 1 所示。在黏性底层中, 壁面处电解液速度为 0, 在缓冲层中, 流体速度和与壁面的距离呈线性变化。黏性底层的厚度非常薄, 在工程应用时, 一般对该区域进行简化处理, 从而减小计算量, 但是针对电解加工中电解液温度场求解的问题, 对黏性底层进行简化处理是无法满足要求的。因为忽略黏性底层中较低流速的部分, 会导致电解液的计算温度远低于实际值。

图 1 电解液边界层流体状态

本文中采用湍流 SST 模型计算电解液流速分布, 该模型能够对工具阴极、工件阳极表面近壁处电解液流速进行很好的计算, 而且其鲁棒性较强。湍流 SST 模型方程的求解项为 k 和 ω 。

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = P - \rho \beta_0^* k \omega + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_T) \nabla k) \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = \frac{\rho \gamma}{\mu_T} P + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega \mu_T) \nabla \omega) - \rho \beta \omega^2 + 2(1 - f_{v1}) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla \omega \cdot \nabla k \quad (2)$$

$$P = \min(P_k, 10 \rho \beta_0^* k \omega) \quad (3)$$

$$P_k = \mu_T \left(\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) \quad (4)$$

式中, μ_T 为湍流黏度; β_0^* 、 β 、 γ 、 σ_k 、 σ_ω 为模型常数。

1.1.2 气液两相流模型

假设电解加工中只有阴极产生氢气, 并且氢气的压力、温度与电解液一致。根据法拉第定律和理想气体状态方程有

$$M_g = k_g I t = k_g i S t \quad (5)$$

$$\rho_g = \frac{p}{RT} \quad (6)$$

式中, M_g 为氢气质量; ρ_g 为氢气密度; k_g 为氢质量电化当量; p 为电解液压力; S 为阴极面积; R 为理想气体常数; i 为电流密度。

本文采用 Euler 双流体模型研究氢气在电解液中的分布, 电解加工中的气液两相流满足质量守恒

$$\frac{\partial}{\partial t} (\beta_l \rho_l + \beta_g \rho_g) + \nabla \cdot (\beta_l \rho_l \mathbf{u}_l + \beta_g \rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho}_g \mathbf{u}_g) = m_{l \rightarrow g} \quad \tilde{\rho}_g = \beta_g \rho \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho}_l \mathbf{u}_l) = -m_{l \rightarrow g} \quad \tilde{\rho}_l = \beta_l \rho \quad (9)$$

$$\beta_l + \beta_g = 1 \quad (10)$$

式中, β_g 、 β_l 分别为气体、液体占总体积的比例; ρ_l 为液体密度; $\mathbf{u}_g$ 、 $\mathbf{u}_l$ 分别为气体、液体速度; $m_{l \rightarrow g}$ 为液相转变为气相的传质率, 根据式(5), 阴极表面单位面积上 $m_{l \rightarrow g} = i k_g$ 。

气液两相流满足动量守恒

$$\frac{\partial}{\partial t} (\tilde{\rho}_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\tilde{\rho}_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\beta_g \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g + \tilde{\rho}_g \mathbf{g} + F_m \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\tilde{\rho}_l \mathbf{u}_l) + \nabla \cdot (\tilde{\rho}_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l) = -\beta_l \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_l + \tilde{\rho}_l \mathbf{g} - F_m \quad (12)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}_g$ 、 $\boldsymbol{\tau}_l$ 分别为气体、液体黏性应力张量; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; F_m 为气液相间作用力。

1.2 温度场模型

相对于电解加工过程中产生的反应热和电解液中产生的焦耳热, 由于工具阴极和工件阳极的电阻很小, 其产生的焦耳热极小, 可忽略电极的焦耳热对温度分布的影响。工具阴极和工件阳极边界层的热平衡方程可表示为

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (d_z k_t \nabla T) = Q_{dl} + q \quad (13)$$

式中, d_z 为边界层厚度; C_p 为常压比热容; k_t 为

导热率。忽略热焓的变化, 反应热表示为^[4]

$$Q_{dl}=U_k j_k \quad (14)$$

式中, U_k 为过电压; j_k 为双电层电流密度。

工具、工件与电解液的边界层存在对流换热, 其热通量可表示为

$$q=h(T_e-T_a) \quad (15)$$

式中, h 为边界 1、5 的换热系数; T_e 为电解液温度; T_a 为工具、工件温度。边界 3、7 与空气自然对流, 空气温度为 T_{ref} , 其他边界为热绝缘, 如图 2 所示。

图 2 几何模型

电解液的温度分布由能量平衡方程表示为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k_t \nabla T) = Q_{bulk} \quad (16)$$

电解液中产生的焦耳热为

$$Q_{bulk} = \kappa (\nabla U)^2 \quad (17)$$

式中, κ 为电解液电导率; U 为电解液电势。电解液入口温度定义为 T_{ref} , 出口满足

$$(k_t \nabla T) \cdot \mathbf{I}_n = 0 \quad (18)$$

电解液电导率 κ 定义为^[16]

$$\kappa = \kappa_0 \left[1 + \xi (T - T_{ref}) \right] (1 - \beta)^n \quad (19)$$

式中, κ_0 为电解液在 T_{ref} 下的电导率; ξ 为温度影响系数; n 为气泡率影响系数。

1.3 几何模型

如图 2 所示, 工件阳极在上, 尺寸为 100 mm×60 mm, 工件阴极在下, 尺寸为 100 mm×20 mm, 加工间隙中温度测量点分别为 A、B、C、D、E、F, 电解液出口处测量点为 G 点。

1.4 电场模型

针对图 2 中的模型, 稳态时控制方程和边界条件如下。

$$\nabla \cdot (\kappa \nabla \phi) = 0 \quad (20)$$

边界 3: $\phi_a = 32 \text{ V}$, 边界 7: $\phi_c = 0 \text{ V}$; 边界 2、4、6 和 8 满足 $\partial \phi / \partial n = 0$ 。

2 仿真策略

电解加工是电场、流场和温度场等多物理场作用的过程, 计算电解液温度场的流程图如图 3 所示。本文是对电解加工平衡状态进行求解, 仿真过程中加工间隙保持不变, 并忽略温度对电解液流速的影响。

图 3 求解温度场流程图

采用 SST 模型精确求解电解液速度, 对电解液边界层网格数量和质量的要求较高, 网格划分的结果如图 4 所示, 工具阴极、工件阳极表面电解液边界层均为 10 层, 整个模型共有 19 590 单元。

图 4 网格划分

本文仿真参数与文献[17]一致, 其中电解加工工艺参数如表 1 所示, 阴极、阳极和电解液物理特性如表 2 所示。

表 1 电解加工工艺参数

参数	数值
电压/V	32
流量/($\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)	11.3、6.9、5.0、3.6
出口压力/MPa	0.10、0.17、0.29

表 2 阴极、阳极和电解液物理特性

参数		数值
阳极	比热容/[J/(kg·K)]	475
	热导率/[W/(m·K)]	76.2
阴极	比热容/[J/(kg·K)]	440
	热导率/[W/(m·K)]	44.5
电解液	10%NaCl 电导率/(S/m)	13
	比热容/[J/(Kg·K)]	4200
	初始温度/K	293.15

3 结果分析

采用湍流 SST 模型耦合 Euler 双流体模型, 电解液流量为 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 出口压力为 0.17 MPa, 得到工具阴极、工件阳极和电解液的温度分布如图 5 所示。由图可知, 在反应热和焦耳热的作用下, 电解液的温度沿流程方向逐渐升高; 电解液与工具阴极、工件阳极之间存在对流换热, 其边界层流速低, 温度梯度变化较大(图 5 中虚线框中放大部分); 工具阴极和工件阳极的温度均是靠近电解液入口处最低, 越接近电解液出口温度越高。由此可知, 采用湍流 SST 模型耦合 Euler 双流体模型计算极间电解液温度分布的收敛效果较好, 其求解得到的温度分布趋势与实际相符。

图 5 等温线

3.1 出口处温升

如图 6 所示, 当出口压力为 0.17 MPa 时, $k-\varepsilon$ 模型、SST 模型和 SST 耦合 Euler 双流体模型中, 出口处电解液的温升均随流量的增加而减小, 与试验数据(来自文献[17], 下同)温升的变化趋势相一致。这是因为随电解液流量的增加, 电解液流速变大, 电解液带走的热量增多, 其温升减小。

由图 6 可知, 当流量为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $11.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, $k-\varepsilon$ 模型和 SST 模型计算得到的电解液温升在出口 G 点处相同。这是因为

两种模型中反应热和焦耳热的总量相同, 并且在电极之间温度分布不均的电解液流到 G 点处已充分混合, 因此该点电解液的温升相同。当流量减小到 $3.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 用 $k-\varepsilon$ 模型和 SST 模型计算电解液温度分布, 得到加工间隙中电解液局部温度超过了电解液的沸点, 导致模型的计算结果与试验数据存在较大偏差。

图 6 不同模型出口 G 点的温升

电解加工中工具阴极表面产生大量的氢气泡, 考虑其对电解加工温度场的影响, 更符合实际。如图 6 所示, 考虑气泡的影响, 采用 SST 模型耦合 Euler 双流体模型, 计算得到不同流量下出口处 G 点的温升均比 $k-\varepsilon$ 模型和 SST 模型计算的结果低, 且考虑气泡影响的计算结果更接近试验数据。由公式(19)知, 电解液的电导率受气泡率影响, 电解液的电导率在考虑气泡影响时比不考虑时小。由公式(17)知, 电导率减小, 焦耳热随之减少; 根据公式(14), 电导率减小, 总电流密度减小, 反应热也随之减少。所以, 考虑气泡影响时, 模型中电解加工产生的焦耳热和反应热总量减少, 电解液的温升也减小。

综上所述, 未考虑气泡影响的 $k-\varepsilon$ 模型和 SST 模型计算得到的电解液出口处温度精度较低; 考虑气泡对电解液电导率的影响, 采用湍流 SST 模型耦合 Euler 双流体模型计算得到的结果精度较高。

3.2 加工间隙中测量点温升

3.2.1 不同模型测量点的温升

当电解液流量为 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 出口压力为 0.17 MPa 时, $k-\varepsilon$ 模型、SST 模型和 SST 耦合 Euler 双流体模型分别计算得到 A~F 点的温升如图 7 所示。由图可知, 各模型加工间隙中沿流程方向测量点 A、B、C、D、E、F 处电解液温度均逐渐升高, 即 $T_A < T_B < T_C < T_D < T_E < T_F$, 这种变化趋势与试验数据相一致。电解加工产生的焦耳热和反应热传递到加工间隙中的电解液, 流动的电解液吸收的热量越来越多, 导致沿流程方向电解液温度越来越高。

由图 7 可知, 用湍流 $k-\varepsilon$ 模型仿真得到的测量点温升远低于试验测得结果, 采用湍流 SST 模型计算的结果更接近试验数据。 $k-\varepsilon$ 模型求解电解液流速时, 由于采用壁函数对边界层进行了简化处理, 这种简化虽可以提高计算速度, 但忽略了边界层中流速较低的黏性底层和缓冲层。对于电解液与阳极、阴极之间对流换热而言, 忽略边界层中流速较低的部分, 由湍流区域较高的流速来代替整个边界层流速, 意味着放大了边界层的电解液流速(见图 1)。由式(14)知, 在其他参数不变的情况下, 电解液的流速增加, 其温升下降。所以, 求解电解加工中电解液的温度分布时, 采用 $k-\varepsilon$ 模型得到的计算结果远比实际值低。湍流 SST 模型对电解液边界层流速较低的黏性底层和缓冲层进行了计算, 因此, 电解液温度分布的计算结果精度更高, 更接近试验数据。

考虑气泡影响时, 采用湍流 SST 模型耦合 Euler 双流体模型, 计算得到的 $A\sim D$ 点的温升比仅采用湍流 SST 模型计算的结果高, F 点的温升则相反, 如图 7 所示。测量点位于工具阴极表面, 此处气泡率大于 0, 根据式(19), 此处的电导率比不考虑时小, 电解加工产生的焦耳热和反应热也少一些, 但是, 氢气比电解液的 ρC_p 值小得多, 因此出现 $A\sim D$ 点的温升高于仅用湍流 SST 模型计算的结果。随流程的增加, 考虑气泡影响时电解加工产生的焦耳热和反应热的总量比不考虑气泡时产生的热量相差越来越大, 其对温升的影响占主导, 导致湍流 SST 模型耦合 Euler 双流体模型计算得到 F 点的温升低于湍流 SST 模型计算的结果。

图 7 不同模型测量点的温升

测量点温升的相对误差表示为

$$E_r = \frac{T_i - T_i^a}{T_i^a} \times 100\% \quad (21)$$

式中, T_i 为测量点 $A\sim G$ 温升的仿真结果, T_i^a 为测量点 $A\sim G$ 温升的试验数据。

在流量为 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 出口压力为 0.17 MPa, 三种模型测量点温升的相对误差 E_r 如表 3 所示。由

表 3 可知, 在出口 G 点, $k-\varepsilon$ 模型和 SST 模型计算得到的相对误差 E_r 比 SST 模型耦合 Euler 双流体模型的 E_r 大; 在加工间隙中 $A\sim F$ 点, $k-\varepsilon$ 模型计算得到的 E_r 比 SST 模型、SST 模型耦合 Euler 双流体模型的 E_r 大。综上所述, 采用 SST 模型耦合 Euler 双流体模型计算电解加工温度场分布有较明显优势。

表 3 测量点温升相对误差

模型	A	B	C	D	E	F	G
$k-\varepsilon$	-71.4	-56.0	-44.8	-38.4	-35.8	-35.7	31.1
SST	-8.8	-5.2	-4.2	-3.5	-6.5	-10.3	29.7
SST+Euler	0.6	4.3	3.5	1.2	-5.5	-12.9	-5.5

3.2.2 不同流量测量点的温升

出口压力为 0.17 MPa, 采用湍流 SST 模型耦合 Euler 双流体模型计算得到不同流量下的测量点 $A\sim F$ 温升如图 8 所示。由图可知, 不同流量加工间隙中沿流程方向测量点 $A、B、C、D、E、F$ 处电解液温度均逐渐升高, 且随着流量的增加, 测量点温升上升的趋势减缓, 这种变化趋势与试验数据相一致。

由图 8 可知, 测量点的温升, 在入口流量为 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 仿真结果与试验数据比较一致, 在入口流量为 $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 仿真结果比试验数据低, 在入口流量为 $11.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 仿真结果比试验数据高。由于工具阴极近壁处电解液黏性底层的厚度随流速的增加而减小, 因此, 当流量变大流速增加时, 温度较高的电解液黏性底层变薄, 热电偶反映的平均温度减小, 导致仿真结果比试验数据高, 反之, 仿真结果比试验数据低。

图 8 不同流量测量点温升

3.2.3 不同出口压力测量点的温升

电解液流量为 $6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 采用 SST 模型耦合 Euler 双流体模型计算得到不同出口压力下测量点的温升如图 9 所示。由图可知, $A、B$ 点在不同出口压力下温升几乎相同, $C\sim F$ 点的温升随出口压力的增加而增加, 且随出口压力的增加, 测量点的温升上升趋势小幅增加。电解加工间隙中的气泡率分

布是沿流程方向越来越大,在入口处气泡率非常小,出口压力的变化对其影响不大,因此,A、B点在不同出口压力下温升相差较小。在流量相同的条件下,出口压力越高,加工间隙中电解液压力越高,氢气泡所占的体积越小,因此,电解液中气泡率会减小,电解液的电导率增大,电解加工产生的反应热和焦耳热总量增加,所以,C~F点的温升增加。

图9 不同出口压力测量点温升

4 结论

(1) 电解加工中用湍流 SST 模型计算电解液流速,考虑边界层中较低流速的电解液对对流换热的影响,可以大幅提高加工间隙中温度分布的计算精度。

(2) 考虑气泡率对温度的影响,采用湍流 SST 模型耦合 Euler 双流体模型,能进一步提高电解液温度分布的计算精度。

(3) 仿真结果与试验数据吻合,验证了模型的有效性。

(4) 通过对加工间隙中电解液温度和气泡率的精确求解,为准确计算阳极表面电流密度大小提供了必要条件,并可对复制精度做出预测。

参 考 文 献

[1] 朱荻. 国外电解加工的研究进展[J]. 电加工与模具, 2000(1): 11-16.
ZHU Di. Review on research progress of ECM at abroad[J]. Electromachining & Mould, 2000(1): 11-16.
[2] 徐家文, 云乃彰, 王建业, 等. 电化学加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
XU Jiawen, YUN Naizhang, WANG Jianye, et al. Electrochemical machining technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
[3] DECONINCK D, DAMME S V, ALBU C, et al. Study of the effects of heat removal on the copying accuracy of the electrochemical machining process[J]. Electrochimica

Acta, 2011, 56(16): 5642-5649.

[4] DECONINCK D, DAMME S V, DECONINCK J. A temperature dependent multi-ion model for time accurate numerical simulation of the electrochemical machining process. Part I: Theoretical basis[J]. Electrochimica Acta, 2012, 60(8): 321-328.
[5] CHEN Y L, FANG M, JIANG L J. Multiphysics simulation of the material removal process in pulse electrochemical machining (PECM)[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5): 1-10.
[6] 陈远龙, 方明, 裴迪, 等. 叶片电化学加工过程多场耦合仿真[J]. 中国机械工程, 2016, 27(22): 3087-3092.
CHEN Yuanlong, FANG Ming, PEI Di, et al. Multi-physics coupling simulation of ECM processes for compressor blade[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(22): 3087-3092.
[7] MAYANK G, KUNIEDA M. Two-phase simulation of electrochemical machining [J]. International Journal of Electrical Machining, 2017, 22: 31.
[8] 范植坚, 常园园, 田军委, 等. 基于 COMSOL 的电解加工电解液池的温度场分析[J]. 西安工业大学学报, 2013, 33(6): 458-462.
FAN Zhijian, CHANG Yuanyuan, TIAN Junwei, et al. Temperature field analysis for the electrochemical machining's electrolytic cell based on COMSOL[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013, 33(6): 458-462.
[9] 徐正扬. 发动机叶片精密电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
XU Zhengyang. Key technologies research on precision turbine blade ECM[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
[10] 徐正扬, 朱荻, 王蕾, 等. 三头进给电解加工叶片流场特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 189-194.
XU Zhengyang, ZHU Di, WANG Lei, et al. Character of flow field on turbine blade with 3-electrode feeding method in electrochemical machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 189-194.
[11] 徐庆, 朱荻, 徐正扬. 整体叶盘通道电解加工流场的均匀性[J]. 华南理工大学学报, 2011, 39(6): 7-12.
XU Qing, ZHU Di, XU Zhengyang. Uniformity of flow field in electrochemical machining of blisk tunnel[J]. Journal of South China University of Technology, 2011, 39(6): 7-12.
[12] 赵建社, 王福元, 徐家文, 等. 整体叶轮自由曲面叶片精密电解加工工艺研究[J]. 航空学报, 2013, 34(12): 2841-2848.
ZHAO Jianshe, WANG Fuyuan, XU Jiawen, et al.

- Research on electrochemical machining process for fine finishing of integral impeller with free-form surface blade[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(12): 2841-2848.
- [13] 刘嘉, 徐正扬, 万龙凯, 等. 整体叶盘型面电解加工阴极进给方向优化及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(7): 146-153.
- LIU Jia, XU Zhengyang, WAN Longkai, et al. Optimization and experiment of cathode feeding direction in electrochemical machining of blisk[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(7): 146-153.
- [14] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. *Turbulence Heat and Mass Transfer*, 2003(1): 4.
- [15] SOKOLICHIN A, EIGENBERGER G, LAPIN A. Simulation of buoyancy driven bubbly flow: Established simplifications and open questions[J]. *Aiche Journal*, 2004, 50(1): 24-45.
- [16] THORPE J F, ZERKLE R D. Analytic determination of the equilibrium electrode gap in electrochemical machining[J]. *International Journal of Machine Tool Design & Research*, 1969, 9(2): 131-144.
- [17] CLARK W G, MCGEOUGH J A. Temperature distribution along the gap in electrochemical machining[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1977, 7(4): 277-286.
-
- 作者简介: 陈远龙(通信作者), 男, 1964 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向电解加工工艺及装备。
E-mail: chenyanlong@hfut.edu.cn
周小超, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为电解加工工艺及装备。
E-mail: 39548804@qq.com