

电解加工锥式变齿阴极设计及试验

李博,赵小惠,魏同学,王岗
(西安工程大学 工程训练中心,陕西 西安 710600)

摘要:为了解决传统阴极相邻等厚齿间电解液流场出现分散、不饱满和漩涡问题,基于电解加工蚀除规律,设计一种锥式变齿,利用 COMSOL Multiphysics 对加工间隙流场分布进行模拟,对齿牙进行修形。仿真结果表明:在每片厚轮齿一侧切除 $1/2$,旋出台阶均为 0.3 mm 的圆角,另一侧的薄齿旋出台阶右下角为 0.4 mm 的圆角,有效降低工作齿错位形成的台阶对流场的影响。采用锥式变齿阴极进行相关试验,对加工成型后多旋线工件切片进行测量分析,结果表明锥式阴极满足设计要求,极大地提高了加工精度和加工效率。

关键词:电解加工;多旋线;变齿;仿真分析

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0140-04

Design and Experiment of Conical Variable Tooth Cathode in Electrochemical Machining

LI Bo, ZHAO Xiaohui, WEI Tongxue, WANG Gang

(Engineering Training Center, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract: To solve the problems of cavitation, not full and vortex in machining electrolytic flow field between adjacent working tooth, the conical variable teeth are designed based on the etching law of electrochemical machining. By COMSOL Multiphysics, the distribution of the gap flow field is simulated and tooth shape is optimized. The simulation result shows that by cutting off $1/2$ of every piece thick tooth on one side, its round angle radius of spiraled steps is within 0.3 mm , while the lower right corner on the other side within 0.4 mm , which effectively reduces the influence on gap flow field from the steps caused by working tooth malposition. The cone type variable teeth cathode is used to carry out relevant tests, and the multi rotation line workpiece slices are measured and analyzed. The results show that the conical cathode meets the design requirements and greatly improves the machining accuracy and efficiency.

Keywords: electrochemical machining; multi rotation line; variable teeth; simulation analysis

0 引言

阴极作为电解加工的刀具,是影响加工工件最终成型的关键因素。目前国内外学者创造性地提出了混合多旋线新结构的设计,对阴极的设计要求越来越高^[1-3]。传统阴极一般成整体柱式,通过一定的压力由铜体本身和环氧树脂相插而成型,在材料加工过程中,阴极工作铜齿按多旋线方程作轴向和进给运动。对于等齐多旋线,多旋线螺旋角的角度是不变的,所加工成型的凹凸槽尺寸以及表面质量能够得到满足,但对于混合多旋线而言,由于螺旋角在变化,采用整体阴极加工,加工结果使多旋线加宽,产生“塌坑”,线槽加深等现象。针对整体阴极加工的缺点,国内外相关学者提出了楔形工作齿柱体阴极,通过计算机数控系统的控制、加工过程电源参数的调整、电解液参数的设计等系列方案,虽然基本实现了中小口径混合多旋线的加工^[4-7],但整个加工过程极不稳定,对于变螺距多旋线加工,楔形工作齿柱体阴极难以保证其表面质量;而锥式变齿阴极,是将阴极工作铜齿沿圆周方向分成独立的齿盘,每个齿盘控制相应部分材料的蚀除,通过对锥式阴极

各独立工作铜齿产生错位进行流场仿真分析,进行工艺试验,确定独立工作铜齿的形状以及尺寸,基本解决了“踏坑”、线槽过宽的问题。

1 锥式变齿阴极设计

当多旋线的螺旋角转动变化过大时,尤其是从 $0^\circ \sim 8^\circ$,若将工作齿分成 10 个工作齿盘,各工作齿盘产生的错位阻碍电解加工时齿盘与工件之间电解液的正常流动,而且间隙过小,电解液不饱满,使流场出现分散、不饱满、漩涡,甚至出现阴极烧伤。

1.1 工作齿计算

根据花键、多头键加工间隙设计经验,多旋线也是深孔里的深槽、花键类深槽整个加工过程阴极单方向运动,而多旋线由于螺旋角的变化,整个阴极同时作径向和轴向运动^[8-9]。为了保证加工精度,实际工作时维持工作铜齿在径向方向上的加工间隙不变,其有利于流场的均匀,一般加工间隙为 $0.5 \sim 0.7\text{ mm}$ 。

设加工间隙为 0.5 mm ,待加工凸线直径 $D_a = 160\text{ mm}$,

基金项目:陕西省教育厅自然科学一般专项科学研究计划项目(21JK0656)

第一作者简介:李博(1988—),男,山西运城人,工程师,硕士,研究方向为机械设计、电化学加工。

凹线直径 $D = 155.4$ mm,凹线宽 $B = 6.3$ mm,工作铜齿长 $L_c = 50$ mm,工作齿示意图如图1所示,相关参数计算如下。

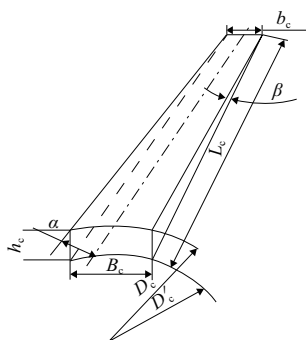


图1 工作齿参数

大端直径 $D_c = 160 - 2 \times 0.5 = 159$ mm; 小端直径 $D'_c = D_a - 2 \times 0.5 = 154.4$ mm。

大端宽度 $B_c = B - 2 \times 0.5 = 5.3$ mm; 大端高度 $h_c = \frac{D_c - D'_c}{2} = \frac{159 - 154.4}{2} = 2.3$ mm; $\tan \beta = \frac{h_c - h'_c}{L_c}$; $\tan \alpha = \frac{B_c - b_c}{2 L_c}$ 。

式中: α 为工作齿半面角, ($^\circ$); β 为工作齿半锥角, ($^\circ$)。

为确保多旋线成型后尺寸精度, 令 $\alpha = \beta$; 且小端高度 $h'_c = 0$ mm; 小端宽度 $b_c = B_c - 2h_c + 2h'_c = 5.3 - 2 \times 2.3 = 0.7$ mm。

1.2 工作齿形状设计

图2(a)为等齿弧形齿形, 是为了防止相邻两个铜齿齿盘间错位而形成真空区, 弧形齿有效地使加工间隙电解液均匀的流过。而在实际设计时发现, 轮盘工作齿转动时, 弧形齿产生的台阶有时也很大。过大的台阶, 使电解液流场发生紊乱, 易产生水纹理现象。

图2(b)所示为变齿齿形弥补等齿弧形齿形加工时所产生的缺陷。每个独立工作轮盘铜齿分成三部分工作齿, 各个轮盘工作铜齿两侧薄中间厚, 理论上满足电解加工混合多旋线加工工艺和加工精度的要求。

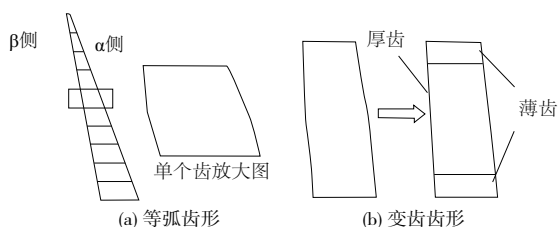


图2 齿形

对于图2的两种齿形, 为了确保电解加工实际加工过程稳定, 理论上将阴极工作铜齿侧面的台阶简化为矩形截面, 工作齿侧面都有一定的倾斜角度。倾斜角度不同, 阻力系数值也不同, 倾斜角度与阻力系数关系如下:

$$y = 0.01x + 0.7 \quad (1)$$

式中: x 为倾斜角度; y 为阻力系数。

按以上设计思路, 等弧齿形和变齿齿形的倾斜角度都为 5.4035° 。如图3所示, 电解液流经 β 侧台阶处时, 两者均去掉 β 侧各个齿牙到 $1/2$ 处, 倾斜角度相同均为 0° 。

$$y = 0.01 \times 5.4035 + 0.7 = 0.754035。$$

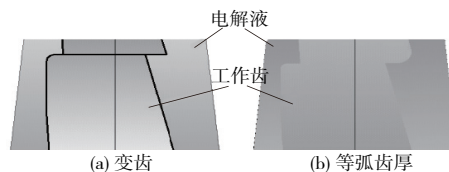


图3 倾斜角度示意图

此方案的 C_D 值

$$y = 0.01 \times 0 + 0.7 = 0.7 \quad (2)$$

减阻量

$$f = \frac{0.754035 - 0.7}{0.754035} \times 100\% = 7.166\% \quad (3)$$

计算结果表明, 此设计方案理论上大大改善加工间隙电解液的均匀性, 电解液阻力大大减小。

图4所示为阴极工作齿尺寸示意图, 工作齿长 50 mm, 厚齿 3.6 mm, 薄齿 0.7 mm。

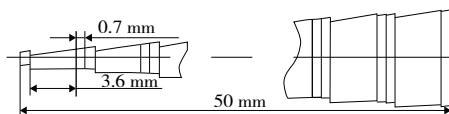
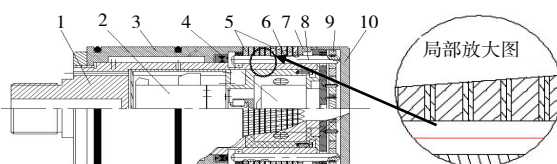


图4 尺寸示意图

1.3 阴极整体示意图

图5为锥式变齿阴极的整体结构图。整个阴极在电机的驱动下, 每个轮盘的工作铜齿按照数控加工程序的指令作轴向和纵向进给运动, 每个工作铜齿的加工方向和多旋线螺旋角的变化始终一致, 理论上满足加工工艺的要求。

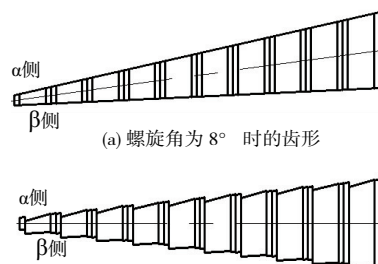


1—阴极体; 2—电机; 3—阴极前置; 4—差速器; 5—工作齿; 6—驱动齿; 7—后导向; 8—驱动轴; 9—齿轮; 10—后堵头。

图5 整体阴极结构图

2 优化齿形

图6为螺旋角分别为 8° 和 0° 时的齿形。当轮齿工作时, 相邻两节齿形成错位, 无论哪侧, 相邻两节齿之间会产生台阶。对工作齿齿牙的修形, 不仅有利于提高加工效率, 还有利于电解液的均匀和饱满。



(a) 螺旋角为 8° 时的齿形
(b) 螺旋角为 0° 时的齿形

图6 工作齿变化示意图

当螺旋角为 0° 时,工作齿宽度大于待加工多旋线的宽度,为此切除 β 侧每片厚齿旋出部分。切除后台阶变小,但依然存在,为使流场更均匀,把旋出部分的棱角倒成半径 $R'=0.2\text{ mm}$ 的圆角。 α 侧圆角过大容易使电解液在流速加大,材料蚀除不规律,因此将 α 侧每片薄齿旋出部分右下角倒成 $R=0.3\text{ mm}$ 的圆角。为了使电解液饱满、均匀,在确保 β 侧厚轮齿多余的部分倒成半径 $R'=0.3\text{ mm}$ 外,还将 α 侧薄齿多余部分右下角倒成 $R=0.4\text{ mm}$,如图 7 所示。

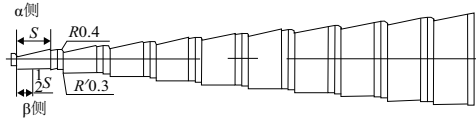


图 7 工作齿修形二维图

3 加工间隙流场的仿真

3.1 仿真模型确定

假设进口速度设置为 15 m/s ,电解液温度选 35°C ,电解液平均流速 V 为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,运动黏性系数 ν 为 $1.01\times 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,动力黏度系数 μ 为 $1\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,液体的密度 ρ 为 $1\,100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,直径 $D_h = D - d = 155.4 - 154.4 = 1\text{ mm} = 1\times 10^{-3}\text{ m}$ 。

雷诺数 Re :

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} = \frac{15 \times 1 \times 10^{-3}}{1.01 \times 10^{-6}} = 14.851\,49 \times 10^3 = 14\,851.49$$

由于雷诺系数为 $14\,851.49$,故模型为湍流模型。

根据 Navier-Stokes 矢量方程^[10]:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V$$

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度; u, v, w 分别为速度矢量在 x, y, z 方向上的分量; p 为微元体上的压力; μ 为动力黏度; g 为重力加速度; $\nabla \cdot V$ 为体积膨胀率。

当流动为不可压, $G_k = 0$;用户自定义变量 $S_k = 0, S_\varepsilon = 0$,这时,标准 κ - ε 两方程模型为:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho K u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{c1}}{K} G_k - C_{c2} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (6)$$

$$G_k = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (7)$$

式中: μ_i 为湍动黏度; G_k 为湍动 k 的产生项; ε 为湍动耗散率;其他常数如表 1 所示。

表 1 常数值

模型常数	C_{c1}	C_{c2}	C_μ	κ 方程的湍流 Pt 数 σ_k	ε 方程的湍流 Pt 数 σ_ε	热导系数 K
取值	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3	0.41

根据加工条件对求解域进行边界以及各物理参数的设定,如表 2 所示。

表 2 求解域的设定及参数

边界类型	边界条件	
	速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	压力、无黏滞压力/MPa
进口	15	—
出口	—	1.013 25

3.2 流场仿真结果分析

1) 流场流线分析

如图 8(a) 所示,当螺旋角为 0° 时,工作齿在待加工多旋线的尺寸内,优化工作铜齿,图 8(b) 和图 8(c) 在 α 侧处出现旋涡,图 8(c) β 侧比图 8(a) 稍好,流线分布相对均匀;图 8(d) 中 β 侧台阶倒 $R'=0.3\text{ mm}$ 的圆角,流线分布均匀;从图 8(a) - 图 8(d), α 侧拐角产生的漩涡逐渐变小。因此,图 8(d) 对加工最为有利。

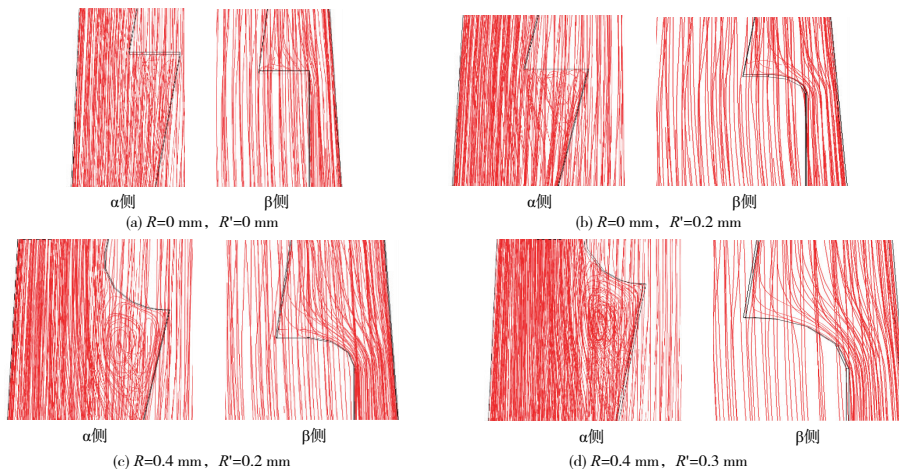


图 8 流线分布对比

2) 压力场分析

图 9 所示为压力场分布图。根据模拟结果,图 9(a)

压力最高,图 9(d) 压力最小。图 9(a) 和图 9(b) 电解液下降速度相对过快,图 9(c) 和图 9(d) 电解液下降速度相

对缓慢。两者比较,图9(c)的压力值为 1.8846×10^5 MPa,图9(d)压力值为 1.8617×10^5 MPa,阴极工作锥齿壁面摩擦较小,对加工最有利。

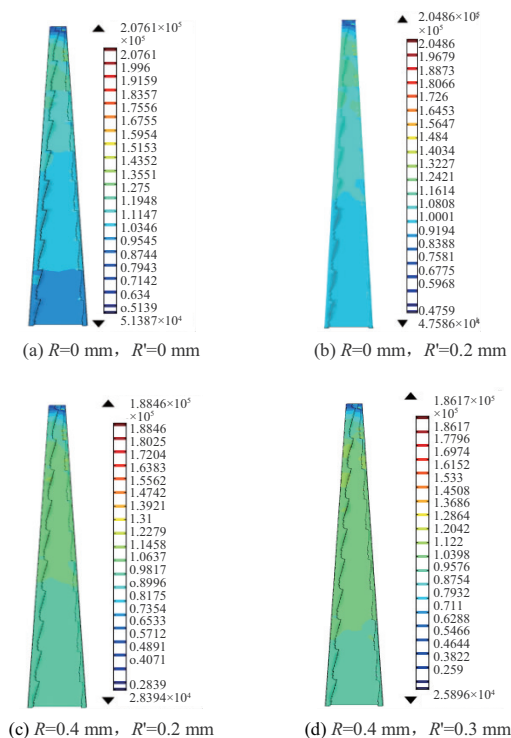


图9 压力场分布对比

4 工艺试验

如图10所示,工艺试验在卧式数控电解加工机床上进行加工,电解加工参数设置如下:加工电压12~15 V,进给速度15~18 mm/min,电解液压力2 MPa,电解液温度35℃。通过工艺试验,验证锥式变齿阴极工作齿设计结构是否合理。

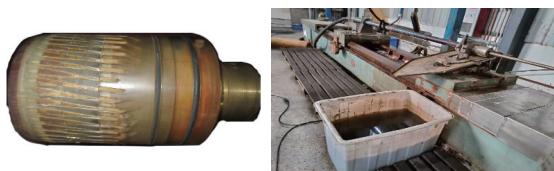


图10 加工阴极及加工现场

图11为加工出的多旋线实物,整个电解加工过程十分稳定。对加工任意切片进行测量,随机选取4个切片,用游标卡尺测量尺寸合格,如表3所示,加工尺寸的误差均在 ± 0.02 mm范围内,样柱检测均满足零件图样的要求,表面粗糙度达 $Ra1.6 \mu\text{m}$ 。这是因为使用锥式变齿阴极,各个工作轮盘齿控制相应的加工区域,电解液经工作齿大端流向小端,加工间隙形成了收敛型流场;电解液从工作齿与后引导贯通的泄流孔进入与机床尾座连接的管道流回电解液池,生产过程中不增加拆装构件和辅助时间的条件下,实现了零件的稳定高效加工。

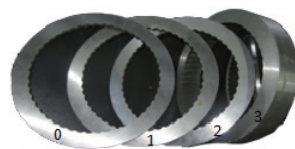


图11 加工实物

表3 零件测量数据

序号	阴线宽/mm	阴线直径/mm	表面粗糙度/ μm
0	6.27	159.68	1.6
1	6.26	159.66	1.6
2	6.25	159.66	1.6
3	6.25	159.68	1.6

5 结语

1) 在花键阴极的设计思路的基础上,设计并计算了锥式阴极工作齿的参数,结合多旋线混合螺旋角的变化,为满足阴极加工间隙电解液流场的收敛均匀要求,对锥式变齿工作齿进行了优化。

2) 用COMSOL软件对锥式变齿阴极加工间隙的流场进行流线、压力场模拟。结果表明:将齿轮盘每片厚齿 β 侧切去 $\frac{1}{2}$,倒成 $R'=0.3$ mm的圆角;将 α 侧薄齿右下角全部倒成 $R=0.4$ mm的圆角时,流场显著改善。

3) 通过工艺试验,对仿真结果进行验证,通过对零件切片多旋线的测量及分析,表面粗糙度达 $Ra1.6 \mu\text{m}$ 。结果表明:锥式变齿阴极在电解加工过程中加工间隙流场收敛,满足实际生产要求。

参考文献:

- [1] 范植坚,李新忠,王天诚. 电解加工与复合电解加工[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 李博,黎云玉,唐霖. 新型阴极结构对机床受力的影响分析及试验[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):9-11.
- [3] 范植坚,王天诚,冯延军,等. 火炮身管大端角混合膛线计算机数字控制电解加工技术研究[J]. 兵工学报,2005,26(5):651-655.
- [4] 范植坚,何江伟. 分立式阴极工作齿与阴极体错位角的实现[J]. 西安工业大学学报,2009,29(1):24-27.
- [5] 李丹丹. 分体式阴极竹节形齿间隙流场模拟[D]. 西安:西安工业大学,2012.
- [6] 宁生科,王瑞峰,马保吉. 磁场对电解加工间隙流场影响的仿真分析[J]. 机械设计与制造,2015(8):89-93.
- [7] 雷庆斌,唐霖,张利峰,等. 钛合金内螺旋线电解加工流场仿真及试验研究[J]. 机械工程与自动化,2021(1):10-13.
- [8] 吕焱明,赵建社,范延涛,等. 大长宽比深窄槽电解加工阴极结构设计[J]. 航空制造技术,2018,61(3):46-53.
- [9] TANG L, LI B, YANG S, et al. The effect of electrolyte current density on the electrochemical machining S-03 material[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9/10/11/12):1825-1833.
- [10] BURGER M, KOLL L, WERNER E A, et al. Electrochemical machining characteristics and resulting surface quality of the nickel-base single-crystalline material LEK94[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14(1):62-70.

收稿日期:2021-11-12