

薄型中空电极振动电解切割 TB6 钛合金

姚俊¹, 王峰², 聂玉军³, 陈志同^{1,*}

1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083

2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016

3. 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 沈阳 110136

摘要: TB6 钛合金由于具有优越的性能, 广泛地用于航空航天领域。然而从大余量的 TB6 钛合金锻铸件毛坯加工成复杂结构的零件, 其加工效率低, 刀具和机床成本高, 造成了极大的浪费。为解决这一问题, 提出了一种利用薄型中空电极进行快速大余量去除的电解加工(ECM)方法, 即将零件与多余材料切割分离, 有望较大程度提高加工效率, 降低加工成本。为改善电解加工流场特性, 提高加工精度, 对电极施加振动, 并对薄型中空电极的振动切割进行了建模分析和试验研究。试验结果表明, 合适的振动幅值和频率($A=0.05\text{ mm}$, $f=50\text{ Hz}$)可以使得各处电解液电导率趋于一致, 从而提高加工的精度、稳定性和效率。复杂结构件的成功切割证明了薄型中空电极振动电解切割加工技术具有一定的适用性。

关键词: 薄型中空电极; 电解切割; 振动加工; 难加工材料; TB6 钛合金

中图分类号: V261.5⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2017)08-421150-11

1953 年, 钛材首次使用在美国道格拉斯公司出产的 DT-T 机发动机上, 拉开了钛合金应用于航空领域的历史^[1]。TB6 钛合金的比强度高, 在飞机机身、机翼和起落架结构中使用该合金代替同等强度的 30CrMnSiA 结构钢, 可减轻质量约 40%, 替代 TC4 可减轻质量约 20%, 该合金具有广泛的应用空间^[2]。

钛合金复杂结构件普遍需从大余量的锻铸件毛坯加工而成, 主要依靠机械切削(包括铣削、车削、磨削等)、电火花加工、电解加工等方式。但是钛合金在高的切削温度下, 容易和刀具发生亲和作用, 使刀具寿命降低, 也易吸收空气中的氧和氮, 造成表面硬化^[3-4]。相比于机械切削和电火花加工, 电解加工无残余应力、无刀具损耗, 不受材料硬度的限制, 加工效率高^[5-7], 但同时也存在加

工精度较低的缺点。为了提高电解加工的精度和稳定性, 国内外学者对振动电解加工技术展开了广泛的研究。Ebeid 等通过试验得出电极振动幅值对加工精度的影响十分显著^[8], 并通过数学模型分析, 指出阴极振动可以加速电解产物的排出和电解液的更新, 可提高加工精度和表面质量^[9]。Bhattacharyya 等在微细电解振动加工中同样证明了电极振动对精度提高具有积极作用^[10-11]。Förster 等对阴极叠加频率 50 Hz, 振幅 0.2 mm 的振动运动, 显著提高了微细加工精度, 使用成形阴极成功加工出三维复杂型腔^[12]。Fang 等采用脉动流场进行微小孔的电解加工, 得到了提高加工稳定性和精度的效果^[13-14]。王峰等提出了阴极持续直线进给与振动的复合进给方法进行窄缝的电解加工, 降低了杂散腐蚀, 提高了加工一致

收稿日期: 2017-01-18; 退修日期: 2017-02-15; 录用日期: 2017-04-17; 网络出版时间: 2017-04-28 16:48

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20170428.1648.006.html

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX04001201); 中航工业产学研专项(cxy2013BH04)

* 通讯作者。E-mail: ztchen@buaa.edu.cn

引用格式: 姚俊, 王峰, 聂玉军, 等. 薄型中空电极振动电解切割 TB6 钛合金[J]. 航空学报, 2017, 38(8): 421150. YAO J, WANG F, NIE Y J, et al. Electrochemical cutting of titanium alloy TB6 with vibration by thin hollow cathode[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(8): 421150.

性^[15]。马晓宇和李勇等利用工具电极间歇快速回退移除加工间隙内电解产物,增强电解液更新,并指出阴极回退存在一个较优的频率,可对其进行优化^[16]。Zeng 等为了增加电解线切割的传质效果,对线电极施加微小振动,可以提高加工效率和稳定性^[17-18]。众多研究成果表明,无论是在大尺寸结构件的电解加工、微细电解加工还是在电解线切割等领域对电极施加振动对提高加工精度和稳定性都具有较好的效果。

目前,钛合金电解加工技术的研究主要集中于电解液特性和工艺参数对加工过程和加工质量的影响。Klocke 等研究得出 TC4 钛合金在电解加工时 α 相具有稍快的反应速度,工件表面放大图中有微小波纹出现^[19]。Qu 等采用 NaCl 和 NaNO₃ 混合电解液对 TC1 钛合金薄板进行线切割实验,并采用田口方法优化了加工参数,提高了加工稳定性和精度^[20]。Dhobe 等采用 20 g/L 的硼酸溶液作为电解液在纯钛工件表面得到粗糙度为 2.4~2.93 μm ^[21]。Chen 和 Xu 采用优化的工艺参数加工 Ti60 钛合金整体叶盘,使得表面粗糙度达到 0.912 μm ^[22]。现有钛合金电解加工技术主要针对 α 相和 $\alpha+\beta$ 相钛合金的加工, β 相钛合金电解加工的研究较少。此外,钛合金电解产物具有高吸附性,易蓄积在加工间隙内,影响加工稳定性。改善钛合金电解加工的流场,促进电解产物的排出,仍是一大难题。

本文针对 TB6 材质,提出了一种利用薄型中空电极进行快速大余量去除的加工方法,即将零件与多余材料切割分离。为改善电解加工流场特性,提高加工定域性,对电极施加了低频振动。并对薄型中空电极的振动切割进行了建模分析和试验研究。

1 薄型中空电极及振动加工装置

本文采用的薄型中空电极由 Part A 及 Part B 组成,Part A 和 Part B 通过楔形加强筋咬合装配,两侧通过激光焊接技术连接为一体,如图 1(a) 所示。电极壁厚为 0.6 mm,中空厚度为 0.8 mm,电极总厚为 $0.6+0.8+0.6=2$ mm。楔形加强筋相互咬合具有两方面的作用,一方面可增加电极本身的刚性,降低电解加工过程中的电极的颤振,稳定性得到提高;另一方面可避免电解液压力

较大时,电极膨胀变形,而无加强筋时电极易受内压作用发生膨胀变形,如图 1(b) 所示。经前期多种绝缘方案的尝试,最终采用高温烧结搪瓷技术,得到的绝缘层耐高温、耐酸碱,与基体结合力强,累计使用 5 h 未出现脱落情况。相较于常采用的环氧树脂、绝缘漆等绝缘涂层,搪瓷绝缘层在使用寿命上具有较明显的优势。

振动装置核心部件包括音圈直线电机、驱动器(DC Whistle15/16 数字伺服智能驱动器)、滚珠花键运动导向、位置检测(0.1 μm 的 RENISHAW 数字光栅尺)及反馈控制系统等。数字光栅尺的标尺粘贴在连杆上,读数头则通过角铁固定于基座上。上端有配重气缸,通过调节活塞两端的气压,实现受力平衡。滚珠花键轴上端连接音圈电动机子,下端垫绝缘板和缓冲橡胶垫与阴极连接板连接,电极安装于阴极连接板上。该振动装置可实现的振动频率为 0~50 Hz,振幅为 0~1 mm。振动装置可实现质量在 15 kg 以内的工具电极需要的振动运动,实际振动运动轨迹与设定的振动运动轨迹误差可控制在 10 μm 以内。薄型中空电极材料为 SS304 不锈钢,电极及夹具总质量低于 5 kg,低于允许的最大电极质量。振动装置如图 2 所示。

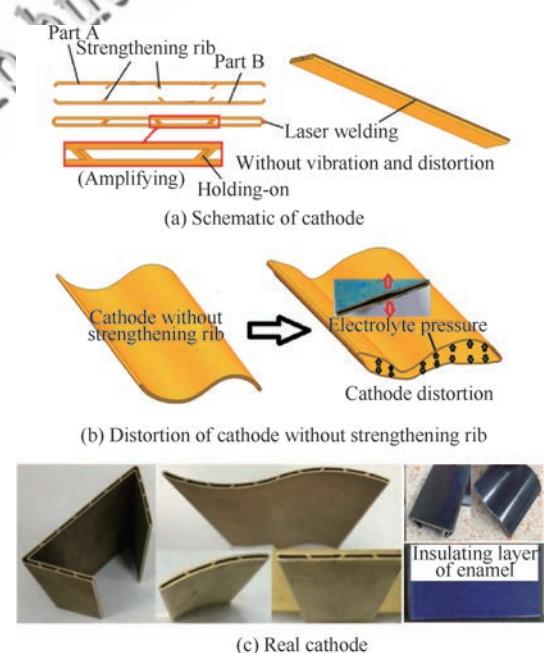


图 1 薄型中空电极

Fig. 1 Thin hollow cathode

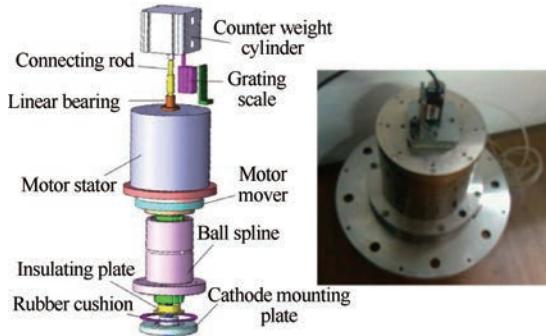


图 2 振动装置

Fig. 2 Vibration device

2 振动电解加工数学模型分析

电极在原本恒速进给的情况下,叠加谐波周期振动,则电极与工件之间的间隙、加工区的电流密度分布、材料去除效率、流场特性等都会发生相应的周期性变化。

2.1 振动加工电极运动模型

谐波振动加工时电极的叠加运动为

$$L = vt + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中: L 为振动加工时电极位移, mm; v 为电极恒速进给速度, mm/min; A 为振动的振幅, mm; ω 为振动角速度, rad/min; φ 为相位角, rad; t 为时间, s。则实际加工间隙和电极瞬时速度分别为

$$a = a_0 + A \sin(\omega t + \varphi) = \eta \omega \kappa \frac{U}{v} + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

$$v' = \dot{L} = v + A \omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中: a 为实际加工间隙, mm; a_0 为恒速进给时的平衡加工间隙, mm; η 为电流效率, ω 为体积电化学当量, $\text{mm}^3/(\text{A} \cdot \text{min})$; κ 为电解液实际电导率, S/m ; U 为间隙电解液中的电压降, V ; v' 为电极合速度, mm/min。

2.2 振动加工材料去除模型

无振动时, 加工区电流密度和材料去除率为

$$J_0 = \frac{I}{S} = \frac{\kappa U}{a_0} \quad (4)$$

$$\text{MRR}_0 = \frac{Sm\eta}{\rho NF} \times J_0 \quad (5)$$

式中: J_0 为恒速进给时电流密度, A/mm^2 ; I 为电流, A ; S 为加工面积, mm^2 ; MRR_0 为恒速进给时

体积去除效率, mm^3/min ; m 为工件金属的摩尔质量, g/mol ; N 为金属原子价; ρ 为金属密度, g/mm^3 ; F 为法拉第常数, $\text{A} \cdot \text{min}/\text{mol}$ 。则叠加振动的电流密度和材料去除率为

$$J = \frac{\kappa U}{a_0 + A \sin(\omega t + \varphi)} \quad (6)$$

$$\text{MRR} = \frac{Sm\eta}{\rho NF} \times J = \frac{Sm\eta}{\rho NF} \times \frac{\kappa U}{a_0 + A \sin(\omega t + \varphi)} = \frac{Sm\eta}{\rho NF} \times \frac{\kappa U}{\eta \omega \kappa \frac{U}{v} + A \sin(\omega t + \varphi)} \quad (7)$$

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \xi(\Delta T)) (1 - \varepsilon)^n \quad (8)$$

式中: J 为叠加振动的电流密度, A/mm^2 ; MRR 为叠加振动的体积去除效率, mm^3/min ; κ_0 为初始进给电解液电导率, $1/(\Omega \cdot \text{mm})$; ξ 为温度变化对电导率的影响系数, 一般取 0.016; $\Delta T = T' - T_0$ 为电解液温度变化值, $^\circ\text{C}$, T' 为电解液升温后的温度, $^\circ\text{C}$, T_0 为电解液初始温度, $^\circ\text{C}$; ε 为气泡率; n 为 Brugeman 系数, 电解加工一般取 1.5~2.1; $1 + \xi(T' - T_0)$ 为温度变化对电导率的影响; $(1 - \varepsilon)^n$ 为气泡率对电导率的影响。

2.3 振动加工流场特性

叠加振动后, 由于加工间隙呈现周期性的变化, 加工间隙内的电解液压力也呈现周期性的变化, 且其相位角与式(2)相差 π , 压力公式为

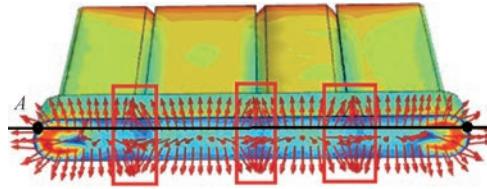
$$p = p_0 + B \sin(\omega t + \varphi + \pi) \quad (9)$$

式中: p_0 为恒定进给速度下的间隙压力, MPa; p 为叠加振动后间隙压力, MPa; B 为压力振动幅值, MPa。

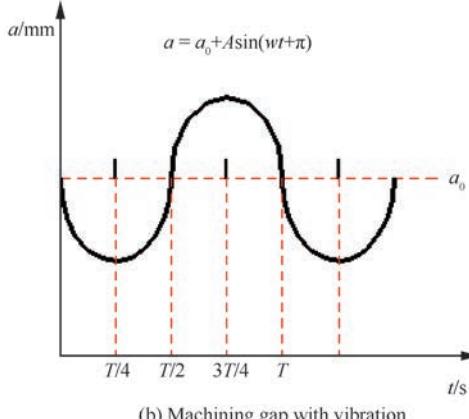
图 3(a)矩形框标识的区域为电极加强筋的正下方, 此处电解液流线相撞, 流速较低, 对工件冲刷作用较弱, 可能会成为整个加工区域腐蚀速度最低的点, 而电极中空部分下方电解液流速较高, 对工件的冲刷作用较强, 此处工件腐蚀速度较高。叠加振动后, 以 $\varphi = \pi$ 为例, 其加工间隙变化和间隙电解液压力变化如图 3(b)和图 3(c)所示。0~ $T/4$ 周期内, 电极向工件运动, 间隙由初始间隙 a_0 减小到 $a_0 - A$, 电解液压力由 p_0 增大到 $p_0 + B$; $T/4 \sim T/2$ 周期内, 间隙由 $a_0 - A$ 增加到 a_0 , 电解液压力由 $p_0 + B$ 减小到 p_0 ; $T/2 \sim 3T/4$ 周期内, 间隙由 a_0 增加到 $a_0 + A$, 电解液压力由 p_0 减小到 $p_0 - B$; $3T/4 \sim T$ 周期内, 间隙由 $a_0 + A$

减小到 a_0 , 电解液压力由 $p_0 - B$ 增加到 p_0 , 完成一个周期的变化。如此稳恒流场变为脉动流场, 文献[14]也证实了脉动流场可以促进电解加工的传热和材料蚀除速度, 对图3(a)的流速不均现象有一定的整平效果, 可提高加工稳定性。AB为电极边缘正下方对应的直线。

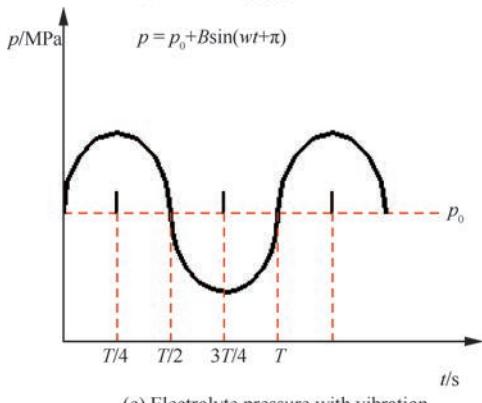
电极叠加振动后, 间隙变化产生的强烈抽吸作用有利于产物、热量的排出和电解液的更新。同时电极对电解液进行着扰动, 这些扰动对加工区内温度及气泡率分布具有整平作用, 致使原本温度较高的位置温度有所降低, 温度较低的位置温度有所上升, 气泡率分布的变化也有类似的规律。故考虑振动对流场的影响后式(8)变为



(a) Collision of streamline under strengthening rib



(b) Machining gap with vibration



(c) Electrolyte pressure with vibration

图3 加工间隙内流场速度、间隙和压力情况

Fig. 3 Velocity, gap size and pressure in machining gap

$$\kappa = \kappa_0 (1 + \tau' \xi (\Delta T)) (1 - \tau'' \varepsilon)^n \quad (10)$$

式中: τ' 为振动对加工区域内各处温度变化的整平作用系数 ($0 \leq \tau' \leq 1$); τ'' 为振动对加工区域内各处气泡率的整平作用系数 ($0 \leq \tau'' \leq 1$)。

在如图3(a)所示的直线AB上, 选取31个点, 分别将各点对应参数代入式(10)得出振动对电导率的整平作用如图4所示(图中纵坐标 κ 为电解液实际电导率, 横坐标X为以A点为原点沿直线AB方向的距离坐标值), 模拟时所用参数如表1所示(根据电解液流速高低不同, 中空部分对应的点选取较小的 ΔT 和 ε 值, 而加强筋附近的点选取较大值)。模拟结果显示当 $\tau' = 0, \tau'' = 0$ 时, 振动对电导率的整平作用达到极大化, 各处电导率都为 κ_0 , 此为理想状态, 实际是较难实现的; 当 $\tau' = 1, \tau'' = 1$ 时, 式(10)变为式(8)即不考虑振动作用, 此时沿直线AB电导率波动最大, 均匀性最差; 当 $0 < \tau' < 1, 0 < \tau'' < 1$ 时, 各处电导率波动变小, 均匀性较好, 且 τ' 和 τ'' 的值越小, 电导率波动也越小, 其值也更接近初始电导率。由此可见, 振动对电导率具有整平作用, 加工区各处电导率趋于一致, 趋于一致的电导率代入式(7)得到的材料去除率也将趋于一致, 从而加工精度、稳定性和效率得到提高。

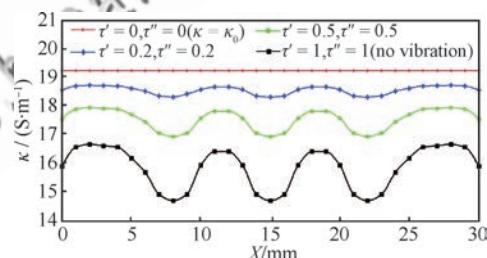


图4 振动对电导率的整平作用

Fig. 4 Leveling of conductivity with vibration

表1 模拟时所用各参数

Table 1 Parameter values used in simulation

$\kappa_0 / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	ξ	$\Delta T / ^\circ\text{C}$	ε	n	τ'	τ''
19.2	0.016	0-2	0-0.2	0-0.2	1.5	0-1

3 试验验证

3.1 加工TB6材质电解液的选择

钛合金TB6属于较为新型的高强度钛合金

材料,目前针对该材质的电解加工性能研究还较少。课题组针对 TB6 材料进行了电解加工性能研究,每项数据经过 5 次重复试验,得到不同电解液的加工效果。试验装置如图 5 所示,电解液从工件和阴极之间流过,为侧流式电解加工。工件静止不动,阴极采用不同的进给速度向工件直线进给,待电流值相对稳定,波动小于 5% 后,认为达到电解加工平衡状态,电极进给速度近似为工件溶解速度。试验初始加工间隙为 0.5 mm,脉冲电源峰值电压为 24 V,电源频率为 3 kHz,占空比为 80%,电解液入口压力为 0.5 MPa,电解液温度为(40±1) °C。

工件材料的体积电化学当量求解公式为

$$v_a = \eta\omega \frac{I}{S} \quad (11)$$

式中: v_a 为工件表面溶解速度(mm/min)。

计算得出 TB6 钛合金实际体积电化学当量如图 6 所示。随着电流密度的变化,钛合金中各元素发生的电化学反应和溶解价次也会不断变化,因而,钛合金在 3 种电解液中的 $\eta\omega-i$ 曲线均

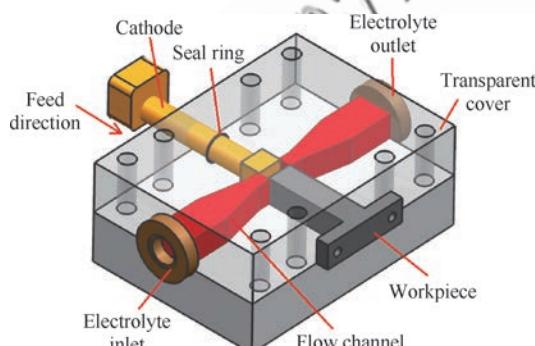


图 5 侧流式电解加工(ECM)装置

Fig. 5 Electrochemical Machining (ECM) apparatus of lateral flow

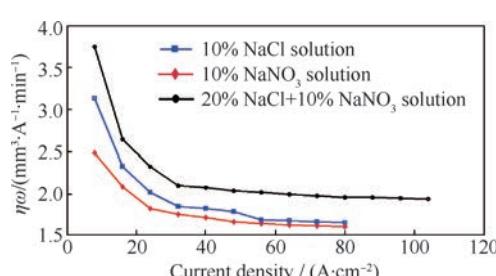


图 6 不同电解液对应的实际体积电化学当量

Fig. 6 Actual volume electrochemical equivalent with different electrolyte

呈非线性。且在电流密度较低时,各电解液仍具有较高的实际体积电化学当量,可以看出 TB6 钛合金的杂散腐蚀较为严重,故应注意非加工面的防护。总体来看,20% NaCl+10% NaNO₃ 的混合电解液具有最高的实际体积电化学当量,即有最高的加工效率。由图 7 和图 8 可以看出 10% NaNO₃ 电解液加工精度最高,但粗糙度远差于其他电解液,10% NaCl 电解液加工精度最低,但粗糙度值最低(图 7 中 X、Y、Z 为工件表面在直角坐标系 3 个方向上的坐标值)。而活性和钝性混合的电解液 20% NaCl+10% NaNO₃ 溶液可综合两者的效果使得既有较高的加工精度又有较好的表面质量。综合图 6~图 8 的结果,后续的电解切割加工试验均采用 20% NaCl+10% NaNO₃ 的混合电解液。

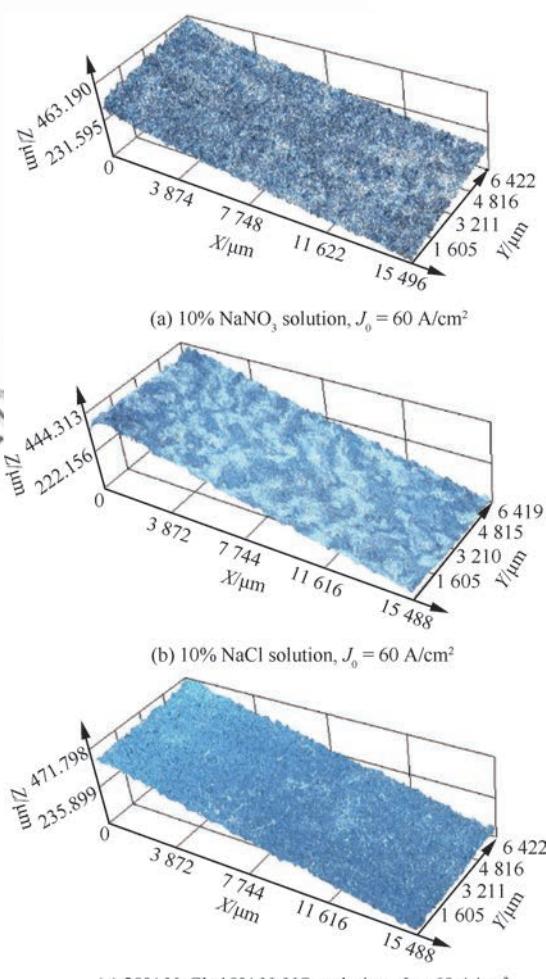


图 7 加工试件表面形貌

Fig. 7 Morphology of test piece surface

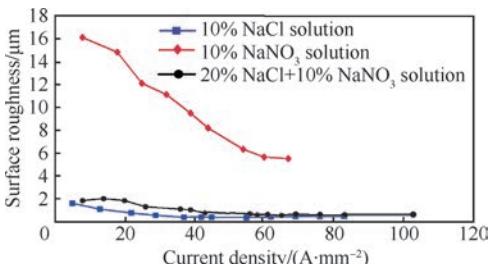


图 8 不同电解液对应的表面粗糙度

Fig. 8 Surface roughness with different electrolyte

3.2 振动对加工过程稳定性的影响

薄型中空电极振动电解切割系统示意图如图 9 所示,电解液首先经过温度调节达到所需温度,然后通过过滤器在电解液泵的带动下流入电极中空部分,再从中空部分高速高压喷出流向加工间隙,提供加工所需的电解液(属于电解加工中的正流式供液),最后再流入电解液箱进入下一个

循环。电极通过振动器安装于 Z 轴,振动的同时在 Z 轴带动下相对工件运动,对工件进行切割加工。

为分析振动幅值和振动频率对加工稳定性的影响,采用峰值 24 V、频率 3 kHz、占空比 80% 的加工电压,电解液入口压力 $p_0 = 0.5 \text{ MPa}$,电解液温度为 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$,初始加工间隙 0.5 mm,电极振动频率分别为 0(无振动)、20、50 Hz,振幅分别为 0.05、0.25、0.45 mm。每组参数试验 5 次,测试短路的次数,其结果如图 10 所示。电极不振动时,在进给速度达到 2.2 mm/min 时,开始出现短路现象。当电极振动, $A = 0.05 \text{ mm}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 时依然可以实现稳定进给。由文献[9]可知,当振幅 $A \geq 0.5a_0$ 时,短路现象较容易发生,故振幅应首先满足 $A \leq 0.5a_0$ 。当电极振幅较大时, $T/2 \sim T$ 周期内底部间隙较大,侧向腐蚀较多,底部流场冲击力变小难以冲走钝化层,加工效率变低,在 $0 \sim T/2$ 周期内电极向下加速进给容易造成短路。

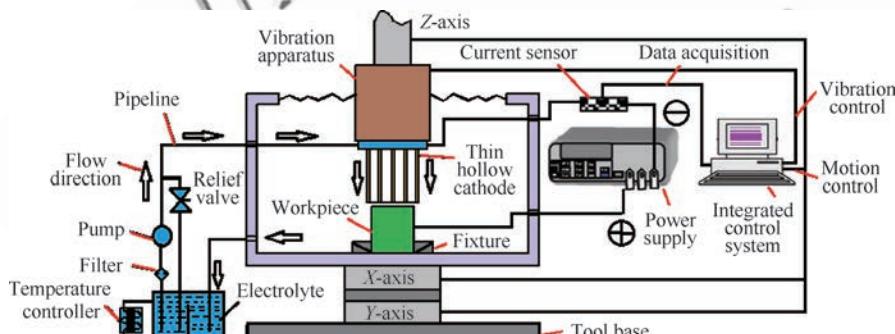


图 9 实验系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of test system

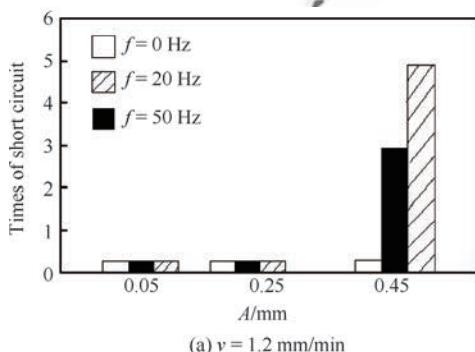
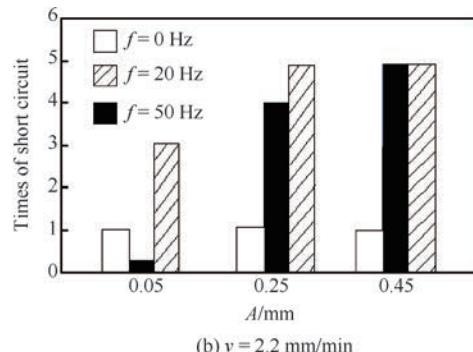
(a) $v = 1.2 \text{ mm/min}$ 

图 10 不同进给速度下的短路次数

Fig. 10 Times of short circuit with different feed rates

3.3 振动对加工精度的影响

为了分析电极振动对切割加工效率和精度的影响, 分别对切割缝隙入口和沿深度方向的5个位置宽度(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 和 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5)进行检测和评价, 测量位置如图11所示。通过分析不同的加工参数对入口平均宽度 W_1 及标准差 δ_1 和深度方向平均宽度 W_2 及标准差 δ_2 的影响, 探索振动对切割加工精度的影响。入口平均宽度 W_1 及标准差 δ_1 和深度方向平均宽度 W_2 及标准差 δ_2 计算公式分别为

$$W_1 = \sum_{i=1}^5 (d_i / 5) \quad (12)$$

$$W_2 = \sum_{i=1}^5 (c_i / 5) \quad (13)$$

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (d_i - W_1)^2} \quad (14)$$

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (c_i - W_2)^2} \quad (15)$$

电极进给速度 $v=0.6 \text{ mm/min}$, 峰值电压 M 分别为19、20、21、22、23、24 V, 其他参数同上, 得出切割缝隙入口处及深度方向的宽度和标准差, 其结果如图12和图13所示。如图12所示, 入口处, $A=0.05 \text{ mm}, f=50 \text{ Hz}$ 时 W_1 值最大, 说明此参数下入口处流场情况较好, 适宜电解加工的进行, 材料的去除率最高, 而当 $A=0.45 \text{ mm}, f=20 \text{ Hz}$ 时, 由于振动幅值过大, 加大了电极在刚进入工件时流场的畸变状态, 不适宜材料的去除, 所以 W_1 值最小。由图12(b)可以明显看出叠加振

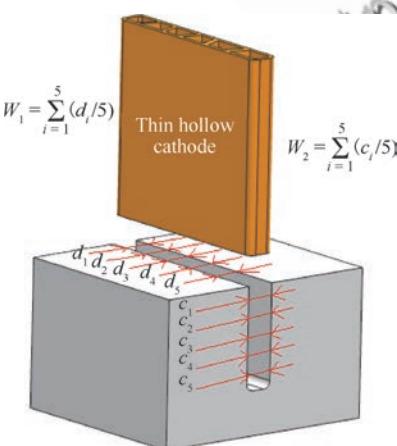


图11 切割槽宽测量

Fig. 11 Measurement of cutting slit width

动后宽度标准差 δ_1 降低(即精度提高), 且叠加 $A=0.05 \text{ mm}, f=50 \text{ Hz}$ 的振动参数后, 加工精度最高。

图13为深度方向上的加工情况。电极已经

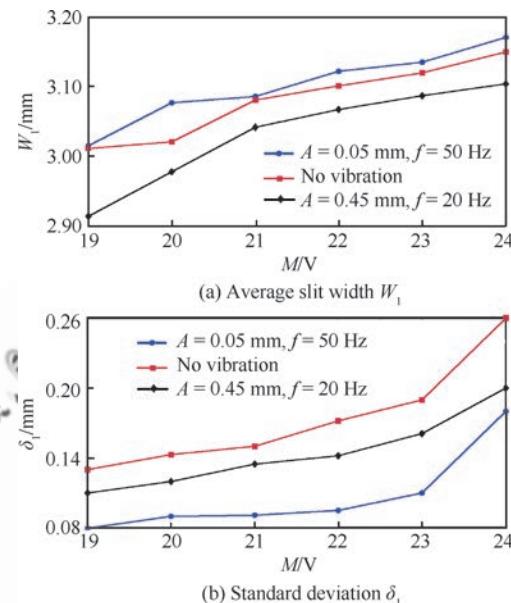


图12 入口平均宽度 W_1 及入口宽度标准差 δ_1 ($v=0.6 \text{ mm/min}$)

Fig. 12 Average slit width W_1 and standard deviation δ_1 at the entrance ($v=0.6 \text{ mm/min}$)

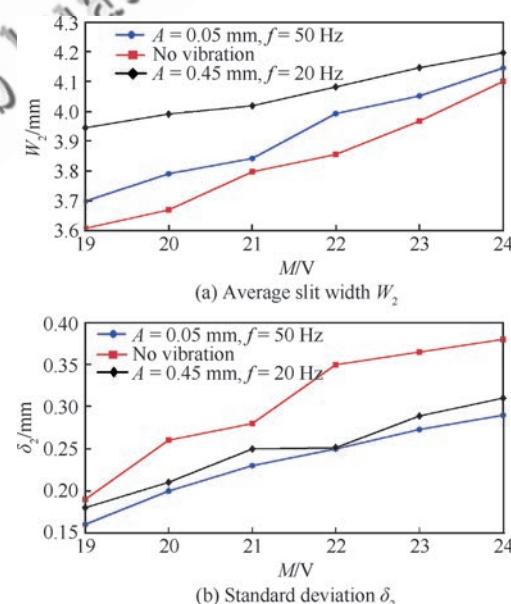


图13 深度方向平均宽度 W_2 和宽度标准差 δ_2 ($v=0.6 \text{ mm/min}$)

Fig. 13 Average slit width W_2 and standard deviation δ_2 in the depth direction ($v=0.6 \text{ mm/min}$)

进入工件，流场呈现稳定的周期性变化， $A = 0.45 \text{ mm}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 时， W_2 值最大，主要是因为电极进给速度不高，底部间隙较大，上下振动的电极对切缝侧壁腐蚀较多。同样，叠加振动后宽度标准差 δ_2 降低（即精度提高），且叠加 $A = 0.05 \text{ mm}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 的振动参数后，加工精度最高。可见合适的振动参数可使产物排出和电解液更新加速，电解液温度、浓度、电导率等更加均匀，精度得到提高。由此可以得出低振幅高频率的振动可以提高加工精度。

为了获得较高的切割速度和切割精度，采用 24 V 峰值电压，同样测量入口处与深度方向的平均宽度和标准差，其结果如图 14 和图 15 所示。如图 14(a) 所示，当 $v \leq 0.8 \text{ mm/min}$ 时，叠加 $A = 0.05 \text{ mm}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 的振动， W_1 较大，是由于进给速度较小，入口处加工时间较长，侧向腐蚀增多，加之小振幅高频率的振动有利于改善流场，材料去除率高，而不添加振动的电极在刚要进入工件时流场畸变严重，材料去除量相对较小，故叠加振动的 W_1 值较大。当 $v \geq 0.8 \text{ mm/min}$ 时，随着进给速度的增加，底部间隙逐渐变小，底部间隙内电流密度显著增大，底部材料去除速度加快。加之叠加振动后，有利于电解产物和电解液更新的

加快，底部材料腐蚀较快，出现了叠加振动的 W_1 值小于不叠加振动的 W_1 值，且叠加振动后可以使用更高的进给速度， $v = 2.2 \text{ mm/min}$ 时， $W_1 = 2.46 \text{ mm}$ 。如图 14(b) 所示，叠加振动后，电极的入口宽度标准差也明显降低，说明有效地电极振动可以整平切缝，提高精度。

如图 15(a) 所示，当 $v \leq 1.1 \text{ mm/min}$ 时，叠加 $A = 0.05 \text{ mm}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 的振动， W_2 较大，是由于进给速度较小，切槽侧壁加工时间延长，材料去除量增加，加之工具电极向上振动时，侧壁产生二次加工，因而叠加振动时 W_2 值较大。当 $v \geq 1.1 \text{ mm/min}$ 时，电极进给速度较高，底部间隙逐渐变小，底部间隙内电流密度显著增大，底部材料去除速度加快，而切缝侧壁加工时间显著缩短。叠加振动后，有利于电解产物和电解液更新的加快，底部材料腐蚀较快，出现了叠加振动的 W_2 值小于不叠加振动的 W_2 值，且叠加振动后可以使用更高的进给速度， $v = 2.2 \text{ mm/min}$ 时， $W_2 = 2.70 \text{ mm}$ 。如图 15(b) 所示，叠加振动后，电极的入口宽度标准差也明显降低，说明有效地电极振动可以整平切缝，提高精度。

如图 16(a) 和图 16(b) 所示为切缝的形貌图，在电极进给速度 $v = 2.0 \text{ mm/min}$ 时，叠加 $A =$

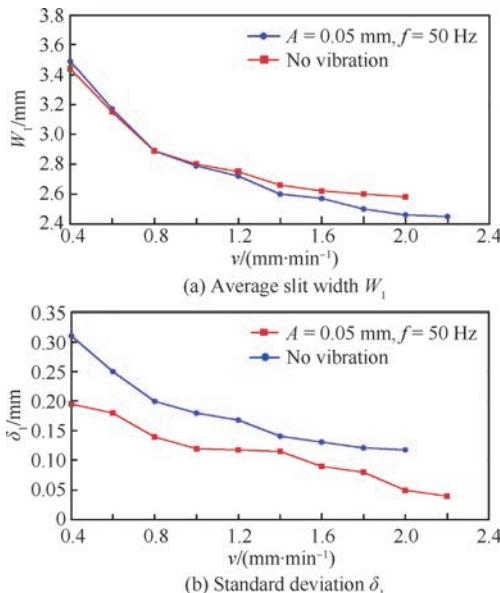


图 14 入口平均宽度 W_1 及入口宽度标准差 δ_1
($M=24 \text{ V}$)

Fig. 14 Average slit width W_1 and standard deviation δ_1 at the entrance ($M=24 \text{ V}$)

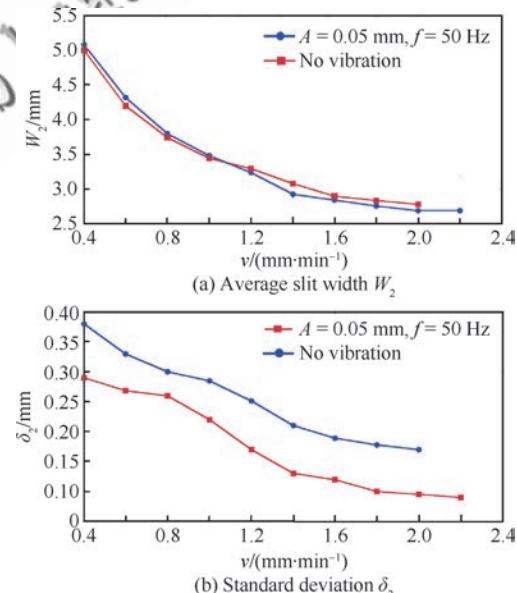


图 15 深度方向平均宽度 W_2 和宽度标准差 δ_2
($M=24 \text{ V}$)

Fig. 15 Average slit width W_2 and standard deviation δ_2 in the depth direction ($M=24 \text{ V}$)

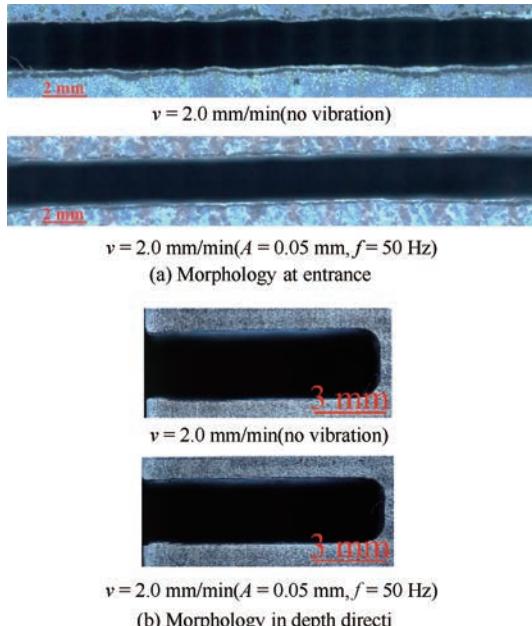


图 16 切割缝隙形貌

Fig. 16 Morphology of cutting slits

0.05 mm , $f = 50 \text{ Hz}$ 的振动后,无论是入口还是深度方向的切缝都比较平直,而不叠加振动的切缝平直度差,切割精度低。说明有效地电极振动可以整平切缝,提高精度。

采用峰值 24 V ,频率 3 kHz ,占空比 80% 的加工电压,初始加工间隙 0.5 mm ,结束加工间隙 0.1 mm ,电解液入口压力 $p_0 = 0.5 \text{ MPa}$,电解液温度为 $40 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$,电极振动 $A = 0.05 \text{ mm}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 的加工参数进行曲线电极(代表任意形状)的切割加工,其切缝形貌如图 17 所示,可以看出电极进给速度 $v = 2.0 \text{ mm/min}$ 时,工件的切缝轮廓明显更加平滑,精度更高。图 18(a)为采用薄型中空电极切割下的燕尾槽和曲线结构件,图 18(b)为从长方体形锻件切割下的某型直升机尾桨连接件,由于结构复杂,整个流场均匀性较难控制,进给速度降为 1.6 mm/min ,工件厚 35 mm ,只需 22 min 即可完成粗加工。入口附近切缝略窄,沿深度方向超过 1 mm 后,切缝略微变宽,且宽度一致性较高,侧壁锥度小于 $1 : 40$,整体精度满足厂家要求的后续加工余量在 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 的范围内,侧壁各处表面粗糙度在 $0.6 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的范围内,可进行后续的精加工工序。

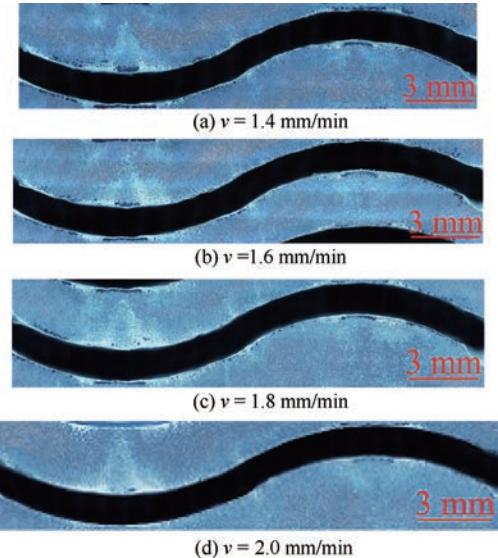


图 17 不同进给速度下的曲线切缝形貌

Fig. 17 Morphology of curve slits at different feed rates

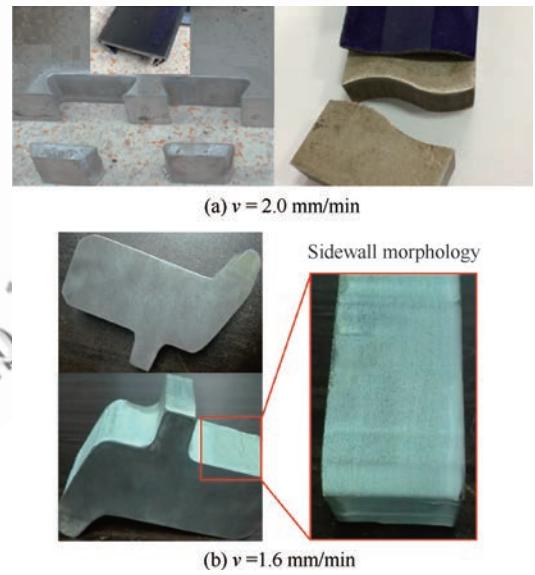


图 18 薄型中空电极切割的复杂结构件

Fig. 18 Complex structural components cut by thin hollow cathode

4 结 论

1) 薄型中空电极用于难加工材料复杂结构件的快速大余量去除是可行的选择,利用该方法可较大程度提高加工效率,降低刀具、机床等加工成本,加工精度满足后续精加工的需要。

2) 钛合金 TB6 材质,在电解加工电流密度

较低时,仍具有较高的体积电化学当量,故应注意非加工面杂质腐蚀的防护。针对TB6材料,20%NaCl+10%NaNO₃的混合电解液具有较高的加工效率和较低的表面粗糙度值。

3) 当切割采用较快的进给速度时,可获得较窄的切缝宽度和较好的加工精度。电极恒速进给叠加高频率、低振幅的周期振动时,流场受到周期性扰动,电解产物排出和电解液更新加速,电解液温度、浓度和电导率分布更加均匀,可提高加工效率、稳定性和精度。

参考文献

- [1] 金和喜,魏克湘,李建明,等.航空用钛合金研究进展[J].中国有色金属学报,2004,25(2):280-290.
JIN H X, WEI K X, LI J M, et al. Research development of titanium alloy in aerospace industry [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280-290 (in Chinese).
- [2] 姚倡锋,武导侠,靳淇超,等.TB6钛合金高速铣削表面粗糙度与表面形貌研究[J].航空制造技术,2012(21):90-97.
YAO C F, WU D X, JIN Q C, et al. Research on surface roughness and surface topography of high-speed milling TB6 titanium alloy[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012(21): 90-97 (in Chinese).
- [3] 周子同,陈志同,蒋理科,等.钛合金TB6铣削加工硬化实验[J].北京航空航天大学学报,2014,40(1):135-140.
ZHOU Z T, CHEN Z T, JIANG L K, et al. Experiment on work hardening of milling TB6[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(1): 135-140 (in Chinese).
- [4] 陈燕,杨树宝,傅玉灿,等.钛合金TC4高速切削刀具磨损的有限元仿真[J].航空学报,2013,34(9):2230-2240.
CHEN Y, YANG S B, FU Y C, et al. FEM estimation of tool wear in high speed cutting of Ti6Al4V alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(9): 2230-2240 (in Chinese).
- [5] ZHU D, ZHU D, XU Z Y, et al. Trajectory control strategy of cathodes in blisk electrochemical machining [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(4): 1064-1070.
- [6] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVAC D, et al. Turbo-machinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63: 703-726.
- [7] 赵建社,王福元,徐家文.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 J S, WANG F Y, XU J W. 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 (in Chinese).
- [8] EBEID S J, HEWIDY M S, EI-TAWEEL T A, et al. Towards higher accuracy for ECM hybridized with low-frequency vibrations using the response surface methodology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149: 432-438
- [9] HEWIDY M S, EBEID S J, EI-TAWEEL T A, et al. Modelling the performance of ECM assisted by low frequency vibrations [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189: 466-472.
- [10] GHOSHAL B, BHATTACHARYYA B. Vibration assisted electrochemical micromachining of high aspect ratio micro features [J]. Precision Engineering, 2015, 42: 231-241.
- [11] BHATTACHARYYA B, GHOSHAL B. Influence of vibration on micro-tool fabrication by electrochemical machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 64: 49-59.
- [12] FÖRSTER R, SCHOTH A, MENZ W. Micro-ECM for production of microsystems with a high aspect ratio[J]. Microsystem Technologies, 2005, 11(4-5): 246-249.
- [13] FANG X L, QU N S. Effects of pulsating electrolyte flow in electrochemical machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(1): 36-43.
- [14] QU N S, FANG X L. Enhancement of surface roughness in electrochemical machining of Ti6Al4V by pulsating electrolyte[J]. International Journal of Advanced Manufacturing, 2013, 69(9-12): 2703-2709.
- [15] 王峰,赵建社,干为民.阴极复合进给窄缝电解加工精度的试验研究[J].华南理工大学学报,2016,44(3):16-22.
WANG F, ZHAO J S, GAN W M. Experimental investigation into accuracy of narrow-slit electrochemical machining with cathodic compound feeding[J]. Journal of South China University of Technology, 2016, 44(3): 16-22 (in Chinese).
- [16] 马晓宇,李勇.间歇回退对微细电解加工的影响分析及实验研究[J].航天制造技术,2009(6):6-11.
MA X Y, LI Y. Analysis and experimental study of micro ECM with intermittent retraction of electrode[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009(6): 6-11 (in Chinese).
- [17] XU K, ZENG Y B. Vibration assisted wire electrochemi-

- cal micro machining of array micro tools[J]. Precision Engineering, 2017, 47: 487-497.
- [18] ZENG Y B, YU Q. Enhancement of mass transport in micro wire electrochemical machining [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61: 195-198.
- [19] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVAC D, et al. Turbo machinery component manufacture by application of electrochemical, Electro-physical and photonic processes [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63: 703-726.
- [20] QU N S, FANG X L, LI W, et al. Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26 (1): 224-229.
- [21] DHOBE S D, DOLOI B, BHATTACHARYYA B. Surface characteristics of ECMed titanium work samples for biomedical applications[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55 (1-4): 177-188.
- [22] CHEN X Z, XU Z Y. Experimental research on electrochemical machining of titanium alloy Ti60 for a blisk[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(1): 274-282.

(责任编辑:李世秋)

Electrochemical cutting of titanium alloy TB6 with vibration by thin hollow cathode

YAO Jun¹, WANG Feng², NIE Yujun³, CHEN Zhitong^{1,*}

1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100083, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

3. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

Abstract: Titanium alloy TB6 has been widely used in the field of aerospace because of its excellent properties. However, the fabricating of complex structure components from titanium alloy TB6 forging-casting fittings with large cutting allowance is inefficient and costly in cutting tool and machine tool to cause great waste. In order to solve this problem, one type of Electrochemical Machining (ECM) for rapidly removing large allowance by thin hollow cathode is proposed. The spare material is cut and separated from the blank, so as to improve machining efficiency and reduce the cost. In order to improve the flow field characteristics of ECM and machining accuracy, the vibration of electrode is applied, the model for ECM with vibration is built, and experimental research is carried out. The experimental results show that the conductivity of electrolyte in the whole area tends to be consistent with the appropriate vibration amplitude and frequency ($A = 0.05 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ Hz}$), so that the machining accuracy, stability and efficiency can be improved. The applicability of electrochemical cutting with vibration by thin hollow cathode is proved by successful cutting of complex structure components.

Keywords: thin hollow cathode; electrochemical cutting; vibration machining; difficult-to-machine material; titanium alloy TB6

Received: 2017-01-18; **Revised:** 2017-02-15; **Accepted:** 2017-04-17; **Published online:** 2017-04-28 16:48

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20170428.1648.006.html

Foundation items: National Science and Technology Major Project of China (2015ZX04001201); Industry-University-Research Special Project of AVIC (cxy2013BH04)

* **Corresponding author.** E-mail: ztchen@buaa.edu.cn