

电极丝失稳临界摩擦力及临界转速研究^{*}

王 民^{1,3}, 马钢建¹, 曹鹏军¹, 刘建勇^{2,3}

(1. 北京工业大学先进制造技术北京市重点实验室 北京, 100124)

(2. 北京市电加工研究所 北京, 100191)

(3. 电火花加工技术北京市重点实验室 北京, 100191)

摘要 微细孔电火花加工过程中, 电极丝与导向器间的摩擦力控制不合理极易导致电极丝断丝和电极丝振动加剧, 影响加工效率和加工精度。将电极丝简化为 Euler-Bernoulli 梁, 建立电极丝受压失稳的临界摩擦力计算模型和电极丝固有模态计算分析模型。利用建立的通用模型进行分析, 得到直径为 0.19mm 的钨电极丝避免断丝的临界摩擦力, 并结合有限元方法分析电极丝长度及摩擦力对电极丝横向振动固有频率的影响规律, 进一步确定了微量进给旋转轴的临界转速。该结论可从理论上指导电火花孔加工过程中工艺参数的选择和优化。

关键词 电火花孔加工; 电极丝; 临界摩擦力; 临界转速

中图分类号 TH113; TG502

1 问题的引出

精密微细电火花加工技术因具有非接触式加工、无宏观切削力、以柔克刚、精密微细和仿形逼真等特点, 广泛运用于航空航天、计算机技术、仪器仪表、精密机械、汽车及轻工业等行业的一些尖端制品中^[1-2]。例如, 高端发动机燃油喷射系统中的喷油嘴的喷孔成倒锥形状, 对孔加工精密度要求较高^[3]。电极丝在孔加工过程中用来切削刀具, 因此其在切削过程中的受力及振动情况与加工微细孔质量密切相关。

国内有关电极丝研究对象多为电火花线切割机床, 针对用于孔加工的电极丝研究较少, 尤其是微细孔加工过程中电极丝在受力、断丝和振动方面的研究不多。然而, 电极丝在孔加工过程中是否断丝和振动的强弱程度直接影响加工效率及精度。当导向器对电极丝的夹持力过小、导致电极丝与导向器之间的摩擦力过小时, 电极丝在微动进给时将产生微小的晃量, 从而增大切削面积, 导致放电加工时间增加、电极丝的损耗增大、微细孔精度降低。摩擦力过大会使电极丝在微动进给过程中受压失稳导致频繁的折断, 从而影响孔加工

效率^[4]。电控共轨系统是汽车行业和军工行业的一项核心技术, 其中喷油嘴是电控共轨系统的重要组成部分, 呈倒锥状的喷油孔是喷油嘴加工中的重要工艺^[4-5]。在加工倒锥孔过程中需要将电极丝倾斜一定角度后旋转加工。

R 轴为旋转进给轴, 是实现微细倒锥孔加工的核心部件。如图 1 所示, 电极丝直线进给, 且以距离工件表面一定距离的坐标点为锥顶, 以一定的倾斜角度 θ 做旋转运动^[4]。为避免剧烈振动从而更稳定的加工, 需确定 R 轴的临界转速。因此, 对于电火花机床的电极丝进行临界摩擦力及 R 轴临界转速的研究是十分必要的。

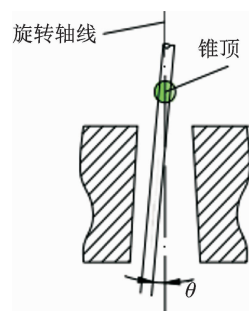


图 1 电极丝运动简图

Fig. 1 Schematic diagram of electrode wire motion

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51575014);北京教委暨北京自然科学基金重点资助项目(KZ201410005010)
收稿日期: 2017-03-02; 修回日期: 2017-04-26

2 确定电极丝临界摩擦力

2.1 电火花机床进丝机构

笔者以北京市电加工研究所自主研制的多轴电火花小孔机为对象展开理论分析和试验。W 轴为直线微量进给轴。进丝机构在加工过程中起着带动电极丝进给和回退的关键作用。如图 2 所示,进丝机构由丝杠、导轨及滑块组成。电极丝由夹丝管夹持,夹丝管固联在 W 轴滑块上,通过滑块在导轨上的往复运动实现电极丝的间歇性往复进给运动。试验加工用的电极丝有直径为 0.1mm~0.25mm 不等的钨电极丝,并且有在 xy 平面内摇动装置,可满足多孔径尺寸的微细孔加工,电极丝直径尺寸不需在线加工获得。

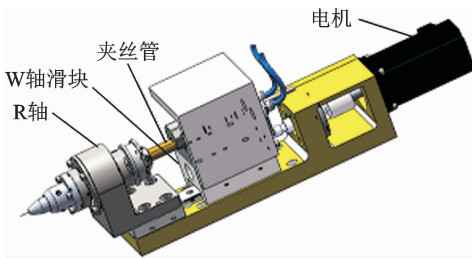
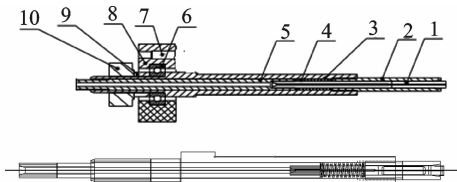


图 2 电火花机床进丝机构简图

Fig. 2 Block diagrams of EDM champing mechanism

在孔加工过程中由于电极丝的磨损,W 轴的滑块在往复运动的同时向靠近工件的方向运动。当 W 轴滑块运动到行程极限位置时,通过气动装置按压夹丝管上的进丝法兰将夹丝管松开,此时通过数控程序控制 W 轴滑块向上运动。由于电极丝与导向器之间存在摩擦力,电极丝不动,W 轴滑块同夹丝管一起向着远离工件的方向运动。当运动到数控系统指定位置后,控制气动装置松开进丝法兰,在弹簧回弹力作用下,夹丝管再次夹紧电极丝,这样就完成了进丝的目的,夹丝管结构如图 3 所示。



1-电极丝夹头; 2-接管 I; 3-接管 II; 4-夹簧; 5-接管 III; 6-深沟球轴承; 7-螺钉; 8-轴承座总成; 9-限位环; 10-锁紧螺母

图 3 夹丝管结构简图

Fig. 3 Structure diagram of threading device

2.2 建立临界摩擦力计算模型

将加工过程中的电极丝简化为如图 4 所示结构:电极丝在夹丝管夹持力作用下处于全约束状态,A 处截面为夹丝管下端,电极丝处于固定端约束状态,B 处为电极丝与导向器接触部分。如图 5 所示,只有沿 x 轴移动的自由度,并且在相对运动过程中有摩擦力的存在。

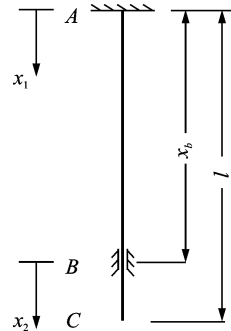


图 4 电极丝简化模型图

Fig. 4 Simplified model of electrode wire

在微细孔加工过程中,BC 段为用于切削部分的电极丝;随着加工微细孔深度的增加和电极丝的损耗,A 点往下移动,这样夹丝管与导向器之间 AB 段电极丝长度减小、BC 段长度增加,用以加工更深微细孔和对电极丝磨损的补偿。在 A 点下移的过程中 AB 段电极丝在夹丝管的推力和摩擦力作用下易发生失稳而弯曲,甚至是折断。当电极丝有向下运动的趋势和在向下运动的过程中,电极丝两端受挤压。当电极丝与导向器处于临界滑动摩擦时,电极丝与导向器并未发生相对滑动,B 点可视为固定端约束。因此将 AB 段电极丝简化为两端固定的细长杆进行受压稳定性分析,由经典材料力学理论可知,在不同的边界条件约束情况下,统一临界力公式^[6-7]为

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(al)^2} \quad (1)$$

其中: E 为电极丝弹性模量; I 为电极丝圆截面惯性

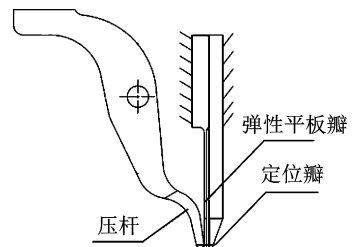


图 5 导向器结构简图

Fig. 5 Structure diagram of director

矩; α 为电极丝长度系数; l 为电极丝长度。

式(1)中电极丝长度系数 α 为未知量,如图 6 所示,将与电极丝平行向下取为 x 轴正方向,与 x 轴垂直向右取为 y 轴正方向,假设电极丝在导向器发生动摩擦之前处于临界状态。电极丝两端的约束力偶矩同为 M_0 。

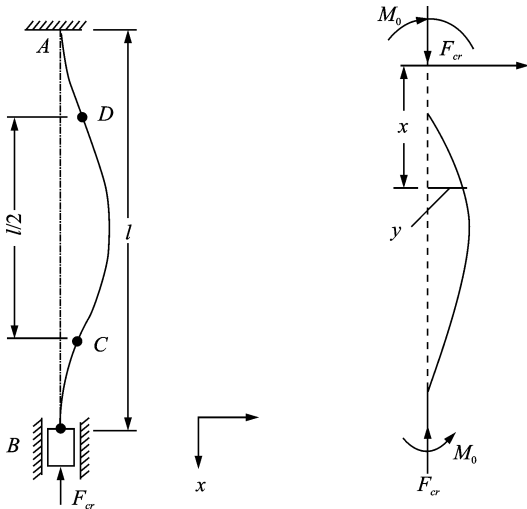


图 6 电极丝受力简图

Fig. 6 A schematic diagram of electrode wire

挠曲线近似微分方程^[7]为

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} = -\frac{F_{cr} y}{EI} + \frac{M_0}{EI} \quad (2)$$

令 $k^2 = \frac{F_{cr}}{EI}$, 带入式(2)得到其通解为

$$y = a \sin kx + b \cos kx + \frac{M_0}{F_{cr}} \quad (3)$$

由于电极丝两端固定,其边界条件为

$$\begin{cases} x=0 \rightarrow y=0, y'_{x=0}=0 \\ x=l \rightarrow y=0, y'_{x=l}=0 \end{cases} \quad (4)$$

根据边界条件可解得

$$\begin{cases} \cos kl = 1 \\ \sin kl = 0 \end{cases} \quad (5)$$

满足上式的根,除 $kl=0$ 外,最小根为 $kl=2\pi$, 即 $\alpha=0.5$ 。

取直径为 0.19mm 的钨电极丝进行分析,受压段 AB 长 $l=65\text{mm}$, 即

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.5l)^2} = 0.26 \text{ N} \quad (6)$$

2.3 试验验证

为了测试电极丝与导向器间摩擦力而搭建的摩擦力测试平台如图 7 所示。为了使试验接近电极丝加工微细孔正常工作状态,设计如图 7 所示的支架

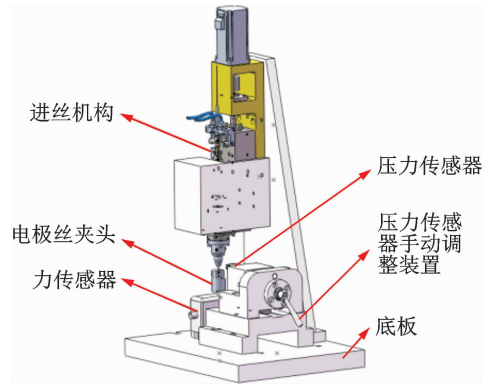


图 7 摩擦力测试装置

Fig. 7 The device to test friction

结构。电极丝下端通过电极丝夹头与高精度的拉、压传感器固联;通过压力传感器手动调节装置可以改变导向器夹紧电极丝间的夹紧力,从而改变两者间的摩擦力。通过该试验装置可以测出在电极丝受压时发生断丝的临界摩擦力。

通过摩擦力测试装置对直径为 0.19mm 钨电极丝的断丝临界摩擦力进行测试。测试得到 20 组试验数据如图 8 所示。其中,最大值为 0.263N,最小值为 0.255N,误差分别为 1.92% 和 1.15%。通过建立的摩擦力计算模型计算临界摩擦力是准确的,可以通过理论计算的方式确定不同直径、材料及不同长度的电极丝的临界摩擦力,为避免断丝和选择加工参数提供参考。

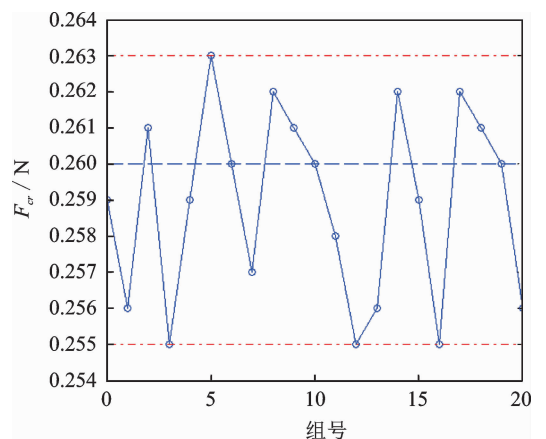


图 8 临界摩擦力数值

Fig. 8 The value of critical friction

3 电极丝模态分析

3.1 电极丝频率方程推导

如图 4 所示,将电极丝简化为一端固定、一端铰

支的梁结构,上端A为固定端。设 x 为电极丝横截面位置坐标,其中 $0 < x_1 < x_b, 0 < x_2 < (l - x_b)$, $X_j(x)$ 为变形位移。

电极丝的弯曲振动微分方程^[6]为

$$EI \frac{\partial^4 X(x)}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 X(x)}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

其中: S 为电极丝截面面积; ρ 为钨电极丝密度。

由分离变量法得到电极丝阵型函数为

$$X_j(x_j) = a_j \cosh \beta x_j + b_j \sinh \beta x_j + c_j \cos \beta x_j + d_j \sin \beta x_j \quad (8)$$

$$\beta^4 = \omega^2 \rho S / EI \quad (9)$$

其中: β 为弯曲振动电极丝的特征值; ω 为发生横向弯曲振动电极丝的固有频率; x_j 为电极丝在 x 轴方向的坐标值; $a_j, b_j, c_j, d_j (j=1, 2)$ 为任意不全为零常数,其值由边界条件而定。

边界条件

A处

$$\begin{cases} X_1(0) = 0 \\ X'_1(0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

B处

$$\begin{cases} X_1(x_b) = X_2(0) = 0 \\ X'_1(x_b) = X'_2(0) = 0 \\ X''_1(x_b) = X''_2(0) \end{cases} \quad (11)$$

C处

$$\begin{cases} X''_2(l - x_b) = 0 \\ X_2^{(3)}(l - x_b) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

结合式(8)与边界条件得到

$$\begin{cases} a_1 + c_1 = 0 \\ b_1 + d_1 = 0 \\ a_2 \cosh \beta(l - x_b) + b_2 \sinh \beta(l - x_b) - c_2 \cos \beta(l - x_b) - d_2 \sin \beta(l - x_b) = 0 \\ a_2 \sinh \beta(l - x_b) + b_2 \cosh \beta(l - x_b) - c_2 \sin \beta(l - x_b) - d_2 \cos \beta(l - x_b) = 0 \\ a_1 \cosh \beta x_b + b_1 \sinh \beta x_b + c_1 \cos \beta x_b + d_1 \sin \beta x_b = 0 \\ a_2 + c_2 = 0 \\ a_1 \sinh \beta x_b + b_1 \cosh \beta x_b - c_1 \sin \beta x_b + d_1 \cos \beta x_b - b_2 - d_2 = 0 \\ a_1 \cosh \beta x_b + b_1 \sinh \beta x_b - c_1 \cos \beta x_b - d_1 \sin \beta x_b - a_2 + c_2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

由于 $a_j, b_j, c_j, d_j (j=1, 2)$ 不全为零数,所以式(13)的系数行列式为零,频率方程为

$$\cos \beta(2l - x_b) \sinh \beta x_b - \sin \beta(2l - x_b) \cosh \beta x_b + \cos \beta(2l - 3x_b) \sinh \beta x_b + \sin \beta(2l - 3x_b) \cosh \beta x_b +$$

$$\cos \beta l \sinh \beta l - 3 \cosh \beta l \sin \beta l + 2 \cos \beta x_b \sinh \beta x_b - 2 \cosh \beta x_b \sin \beta x_b - \cos \beta l \sinh \beta(l - 2x_b) - \cosh \beta l \sin \beta(l - 2x_b) - \sin \beta l \cosh \beta(l - 2x_b) + 3 \sinh \beta l \cos \beta(l - 2x_b) - 4 \cos \beta(l - x_b) \sinh \beta(l - x_b) + 4 \cosh \beta(l - x_b) \sin \beta(l - x_b) + \cos \beta(l - 2x_b) \sinh \beta(l - 2x_b) + \cosh \beta(l - 2x_b) \sin \beta(l - 2x_b) = 0 \quad (14)$$

利用数值分析(二分法)通过式(14)计算长度 $l=0.065\text{m}$, $x_b=0.063\text{m}$ 电极丝的固有频率为 $\omega_{n1}=195.7437\text{Hz}$ 。通过 Workbench 进行有限元分析得到固有频率为 $\omega_{n2}=196.85\text{Hz}$,两者误差为 0.56% 。

3.2 有限元分析

建实体模型以及有限元模型,在A端进行固定端约束,B处限制除 x 方向外的其他自由度。由于电极丝在孔加工过程中做反复进给、回退运动,电极丝所受轴向力也是在拉伸和压缩之间不断转换。在B处取小段圆周面,并在此圆周面上沿电极丝轴向分别施加力 F 、大小从 $0 \sim 0.26\text{N}$ 逐步增大的拉力或压力,且累加力大小为 0.05N 。随着电极丝的磨损,夹丝管与导向器之间的电极丝距离会变短,因此选取总长分别为 $65, 50$ 和 40mm 的电极丝进行分析。取直径 $d=0.19\text{mm}$ 、弹性模量 $E=4.10 \times 10^{11}\text{Pa}$ 、泊松比 $\mu=0.3$ 、密度 $\rho=1.935 \times 10^4\text{kg/m}^3$ 进行仿真分析。

梁的振动可以通过各阶固有振型的线性组合来表示。在各阶固有频率中较低阶的固有频率对应的振型对梁的振动影响较大,并且越是低阶的固有频率影响越大,低阶振型对梁的动态特性起决定性作用,所以接下来的分析以电极丝第1阶固有频率为主要参考对象^[8]。对摩擦力与电极丝频率之间的关系进行分析,对比电极丝长度变化对电极丝频率的影响,其结果如图9所示。

4 R轴临界转速

R轴为实现微细倒锥孔加工的核心部件,其作用是在加工过程中是电极丝以一定的角度和某一确定的锥顶位置绕轴线进行旋转运动。所谓回转体的临界转速是指回转体在这一转速或者接近这一转速转动时本身将出现较大的变形并作弓状回旋,引起支座或这个机械结构的剧烈振动,甚至造成回转体的破坏^[9-10]。当转速不在这些特定范围内时运行趋于平稳。电极丝随着R轴转动,当转动频率与电极丝一阶固有频率相近时出现共振现象。R轴的临界转速与分析得到的电极丝一阶频率相对应^[11]。通

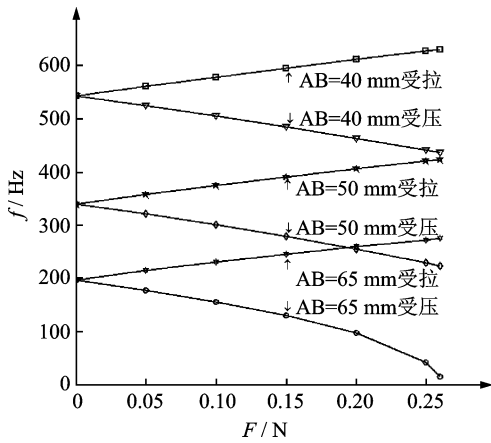


图9 电极丝长度、受力、固有频率规律

Fig. 9 The Regular of Electrode wire length, force and natural frequency

过有限元仿真计算出当电极丝直径为0.19mm, AB=65mm、受压(电极丝向下进给)时的一阶频率为15.01Hz,对应的时长为1 min R轴的转数为 $r=15.01 \times 60=900$ r/min。

由于直径为0.19 mm, AB=65 mm、受压情况下的电极丝的固有频率为最小值,所以计算得到的R轴的转速为避免发生共振的最大临界转速。通过以上分析可知,针对直径为0.19mm的钨电极丝,R轴临界转速为900r/min。所建计算模型同样适用于其他直径的电极丝。

5 结束语

以精密微细孔加工电极丝为研究对象,建立了电极丝受压失稳的临界摩擦力计算模型和电极丝固有模态计算分析模型。运用有限元软件对指定直径的电极丝进行分析,验证了模型的准确性。分析得到了避免断丝的临界摩擦力以及电极丝长度和摩擦力对电极丝横向振动固有频率的影响规律,进一步确定了微量进给旋转轴的临界转速,为微细孔电火花加工工艺参数的选择和优化提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 曹凤国. 特种加工手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2010:1-8, 26-45.
- [2] 陈云信,吴福明,邓成文. 基于ANSYS的电极丝振动现象研究[J]. 电加工与模具, 2006(4): 26-28.
- Chen Yunxin, Wu Fuming, Deng Chengwen. Deliberated wire electrode vibration based on ANSYS[J]. Electromachining and Mould, 2006(4): 26-28. (in

Chinese)

- [3] 杨大勇,伏金娟. 电火花成形加工技术及其发展动向[J]. 航空制造技术, 2010(5): 43-46.
- Yang Dayong, Fu Jinjuan. Development of electrical discharge forming technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(5): 43-46. (in Chinese)
- [4] 刘建勇,杨大勇,郭妍,等. 精密微细倒锥孔电火花加工机床机械系统的研究[J]. 电加工与模具, 2013(5): 54-58.
- Liu Jianyong, Yang Dayong, Guo Yan, et al. Research on the mechanical system of EDM machine machining for the precision reverse taper microhole [J]. Electromachining and Mould, 2013(5): 54-58. (in Chinese)
- [5] 贾志新,滕向阳,闫凯,等. 立式回转电火花线切割加工新技术[J]. 机械工程师, 2006(5): 19-20.
- Jia Zhixin, Teng Xiangyang, Yan Kai, et al. Novel technology of vertical wire electrical discharge machining with rotation wire[J]. Mechanical Engineer, 2006(5): 19-20. (in Chinese)
- [6] Wang Min, Zhou Qiang, Liu Jianyong. Geometric and motion error model and precision analysis of Multiaxial EDM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 742: 631-635.
- [7] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2004: 38-50, 301-337.
- [8] 吴天行,华宏星. 机械振动[M]. 北京:清华大学出版社, 2014: 29-36, 45-55.
- [9] Koch O, Ehrfeld W, Michel F, et al. Recent progress in micro-electro discharge machining (part I): technology [C] // Proceedings of the 13th International Symposium for Electrode Machining. [S. l.]: World Manufacturing Engineering & Market, 2002: 29-36.
- [10] Soichi Ibaraki, Chiaki Oyama, Hisashi Otsubo. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test [J]. International Journal of Machine Tools Manufacturer, 2011(51): 190-200.
- [11] König W, Klonche F, Lenzen R. The electrical machining process-what demands will they face in the future [J]. International Journal of Electrical Machining, 1996, 1(1): 1-8.



第一作者简介:王民,男,1972年2月生,教授、博士生导师。主要研究方向为制造系统监控、智能材料与结构、切削稳定性分析、远程故障诊断和质量控制技术。曾发表《Feasibility study of nonlinear tuned mass damper for machining chatter suppression》(《Journal of Sound and Vibration》2011, Vol. 330)等论文。

E-mail: wangm@bjut.edu.cn