

难切削材料超声电火花复合加工中空变幅杆的设计

李梦龙^{1,2}, 于大国^{1,2}, 王峰^{1,2}, 王健^{1,2}, 周瑞峰¹

¹中北大学机械工程学院; ²山西省深孔加工工程技术研究中心

摘要: 为解决超声电火花复合加工中超声振动加载于电极丝上的问题,将电火花加工机床中的电极丝由电主轴端部放入导向套中,对这种结构超声变幅杆进行研究,引入了一种轴心通孔式超声变幅杆,便于放入电极丝。通过解析计算得到振动频率为 28kHz 的两种不同形状的超声变幅杆的谐振频率和放大系数。利用 ANSYS 软件进行分析对比及优化,对解析计算进行验证,并进行了阻抗分析试验。研究表明:优化后的频率误差及放大系数误差较小,理论计算和实际谐振频率为 1% 左右,证明所设计的超声变幅杆符合设计要求。

关键词: 超声振动;变幅杆;ANSYS;阻抗分析

中图分类号: TB559;TH16

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.10.011

Design of Hollow Horn with Ultrasonic EDM for Difficult-to-cut Material

Li Menglong, Yu Daguo, Wang Feng, Wang Jian, Zhou Ruifeng

Abstract: In order to solve the problem of ultrasonic vibration loading on the electrode wires in ultrasonic EDM, the electrode wires are put into the guide sleeve from the end of the electric spindle in EDM machine tool. According to the structure, an axial through-hole ultrasonic horn is introduced to facilitate the insertion of electrode wires. Two different shapes of ultrasonic horns with vibration frequency of 28kHz are obtained by analytical calculation. The resonant frequencies and amplification coefficient of the two ultrasonic horns are analyzed and calculated. ANSYS software is used for analysis, comparison and optimization, the analytical calculation is verified by machining object, the impedance analysis test is carried out. The results show that the optimized frequency error and amplification factor error are small and the theoretical calculation and actual resonance frequency are about 1%, which verifies that the designed ultrasonic horn can meet the design requirements.

Keywords: ultrasonic vibration; ultrasonic horn; ANSYS; impedance analysis

1 引言

电火花加工(EDM)技术使用电极丝和被加工工件作为正负电极,通过两者之间的脉冲火花放电(非接触式加工)产生的电腐蚀来去除多余的材料,进而实现对零件的精密加工,但处理速度慢,效率较低^[1-3]。超声电火花复合加工技术是一种将超声加工与电火花加工相结合的新型特种加工技术。当在难加工材料中加工深径比较大的微孔时,所产生的腐蚀产物在孔的底部堆积沉积,使正负极放电状态变差,容易发生电极短路现象。在电火花加工中,加工部位存在一定的工作液,将超声振动加载到电极丝上时,会产生空化作用引起工作液的不规则流动,从而产生紊流,且超声振动的空化作用会产生气泡,其中一些形状不规则的气泡发生破裂产生作用力,使电蚀产物及时排出。超声振动产生的高频泵吸作用,会使电极间隙的工作液在加速流动的同时

带动电腐蚀产物的排出,并提高消电离能力^[4,5]。此外,由于将超声振动加载于电极丝上,超声振动会引起电极间隙中的工作液产生高频的压力冲击波,减少电腐蚀产物的积累。因此,超声振动加载于电火花加工上可以改善其工作状态,提高加工效率^[6]。

常见的超声电火花复合形式主要有两种:①电极丝做超声振动;②工件做超声振动。本文主要研究电极丝超声振动。超声振动通过电极丝夹具由变幅杆传递到电极丝上,在电火花加工机床中,电极丝需要穿过变幅杆,从电主轴端部放入导向套中,故只有通孔变幅杆才能满足电极丝超声振动的需求。超声变幅杆的主要作用是放大位移振幅,变幅杆的放大倍数主要与自身结构相关,且不同形状的变幅杆放大倍数不同,常见形状的变幅杆均是由大端到小端,有一定的聚能作用^[7,8]。当不同变幅杆的大端面与小端面面积相等且拥有相同的面积系数时,与其它类型的变幅杆相比,阶梯型变幅杆放大倍数较大,但频率存在较大误差;由于变幅杆的阶梯处存在截面突变,所受的应力较大^[9,10]。

指数型变幅杆相比其它类型的变幅杆而言放大倍数较小,轴线方向上不存在突变,所受的应力较小,相比其它类型的变幅杆而言频率误差较小,但同样存在加工较为困难、加工精度要求较高及成本较大等缺点。与其它种类的变幅杆相比,圆锥形变幅杆具有放大系数最小、加工较为简单且频率设计误差也相对较小等优势^[11-14]。为了满足汽车、医疗、包装及电加工等行业特种材料加工的质量要求,超声振动技术正在飞速发展。为了提高超声加工的稳定性与效率,设计复合加工所需的特殊形状变幅杆同样得到了重视和研究^[15]。

选取材料相同、面积系数相同以及设计频率相同的指数型变幅杆和阶梯型变幅杆进行解析计算,利用有限元仿真分析确定变幅杆的尺寸参数,并通过加工实物进行阻抗分析试验,得到一种可应用于电火花机床的变幅杆。

2 变幅杆设计

超声变幅杆的主要作用是放大位移振幅,选取合适的超声变幅杆可以提高工件的加工效率与加工质量。采用45钢作为变幅杆的加工材料,根据材料类型即可获得声速。设计28kHz的变幅杆,确定变幅杆的大端及小端直径,即可求出变幅杆的具体参数。

超声变幅杆的主要性能由以下几种参数来确定:变幅杆的放大系数 M_p 、形状因数 Φ 、位移节点 X_0 、共振长度 L 、输入力阻抗 Z_i 及弯曲劲度等。其中放大系数 M_p 指的是当变幅杆处在谐振频率时、变幅杆的输入端与输出端位移振幅的比值;形状因数 Φ 用来判断振动速度大小,影响形状因素的参数只有变幅杆自身的几何尺寸,形状因素越大,说明变幅杆处在谐振频率时的振动速度越大,如等截面杆的 Φ 值为1,常用变幅杆的 Φ 值均接近于3,而某些特殊形状变幅杆的 Φ 值可达5左右;输入力阻抗 Z_i 也是衡量变幅杆性能的参数,所以在加工中通常要求尽可能地减小输入力阻抗随频率及负荷的变化;弯曲劲度会影响变幅杆的振动性能,影响弯曲劲度的参数只有变幅杆自身的几何尺寸。在日常生产加工中应尽可能减少弯曲柔顺性随着变幅杆的增长而加大的情况。

2.1 指数型变幅杆

指数型变幅杆结构如图1所示, $D=40\text{mm}$, $d=20\text{mm}$ 。

使用45钢作为变幅杆的材料,其性能参数见

表1。

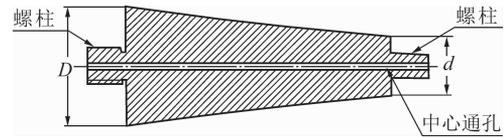


图1 指数型变幅杆

表1 45钢材料性能表

弹性模量 Y_0 (GPa)	密度 ρ (kg/m^3)	泊松比 μ	声速 C (m/s)
210	7810	0.30	5.17×10^6

设计 $f=28\text{kHz}$ 的变幅杆,面积系数 N 为

$$N = \frac{D}{d} = 2 \quad (1)$$

式中, D 为指数型变幅杆大端直径; d 为指数型变幅杆小段直径。

则谐振长度 L 为

$$L = \frac{C}{2f} \left[1 + \left(\frac{\ln N}{\pi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 94.54\text{mm} \quad (2)$$

式中, C 为材料声速; f 为谐振频率。

当指数型变幅杆满足 $f > 1.5(\beta C/2\pi)$ 时,指数型变幅杆才能正常工作

$$\beta = \frac{\ln N}{L} = 7.33 \times 10^{-3} \quad (3)$$

可得

$$1.5 \left(\frac{\beta C}{2\pi} \right) = 9049 < f \quad (4)$$

计算得到的结果满足限制条件。

放大系数 $M_p = N = 2$,应变极大点 X_M 为

$$\tan(kX_M) = -\frac{k'}{\beta} \quad (5)$$

式中, $k' = \sqrt{k^2 - \beta^2}$; $k = \frac{\omega}{c}$; $\omega = 2\pi f$; ω 为圆频率; k 为圆波数。

形状因素 φ 为

$$\varphi = N \frac{k'}{k} e^{-\beta X_M} \frac{1}{\sin(k'X_M)} \quad (6)$$

位移节点 X_0 为

$$X_0 = \frac{L}{\pi} \arccot \frac{\ln N}{\pi} = 40.73\text{mm} \quad (7)$$

指数型变幅杆尺寸变化应符合

$$D_x = D e^{-\beta X} \quad (8)$$

式中, D_x 为指数变幅杆各截面直径; X 为距指数变幅杆大端面距离。

通过计算得出,指数型变幅杆的谐振长度为 $L=94.54\text{mm}$,放大系数 $M_p=2$,指数型变幅杆轴向尺寸参数见表2。

表2 指数型变幅杆尺寸

X (mm)	βX	$e^{-\beta X}$	D_X (mm)
0	0	1	40
5	0.03665	0.9640	38.56
10	0.07330	0.9293	37.17
15	0.10990	0.8959	35.84
20	0.14660	0.8636	34.54
25	0.18325	0.8325	33.30
30	0.21990	0.8026	32.11
40	0.29320	0.7458	29.83
50	0.36650	0.6932	27.73
60	0.43980	0.6442	25.77
70	0.51310	0.5986	23.94
80	0.58640	0.5563	22.25
94.54	0.69300	0.5000	20.00

2.2 阶梯型变幅杆

阶梯型变幅杆的阶梯处存在截面突变,容易产生集中应力,采用过渡圆弧处理可极大程度减少应力集中的问题。图2为阶梯型变幅杆的结构, $D=40\text{mm}$, $d=20\text{mm}$ 。

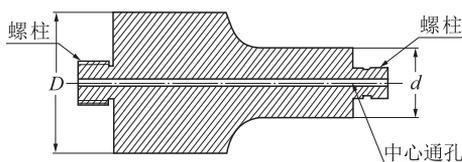


图2 阶梯型变幅杆

阶梯型变幅杆使用材料为45钢,设计频率为28kHz的变幅杆的计算如下。

面积系数 N 为

$$N = \frac{D}{d} = 2 \quad (9)$$

谐振长度 L 为

$$\lambda = \frac{C}{f} = 184.64\text{mm} \quad (10)$$

变幅杆两端长度为 $a = b = \lambda/4$, 则有

$$L = a + b = \lambda/2 = 92.32\text{mm} \quad (11)$$

放大系数 $M_p = N^2 = 4$ 。

由于变幅杆的阶梯处存在截面突变,容易产生集中应力,且当变幅杆自身的放大系数 $M_p > 4$ 时,产生的疲劳破坏现象会更加严重,所以通常情况下在截面面积突变时会采用增加过渡圆弧的方式处理,以降低应力集中。截面面积突变不仅会引起疲劳破坏,还会增加设计频率与实际频率的误差。在截面面积突变处采用增加过渡圆弧的处理方式,可以减少应力集中和频率误差,由图3获取过渡圆弧的计算系数,计算过程为

$$\alpha = \frac{D}{L} = 0.43; N = 2$$

由图3查得 $R/d = 0.57$, 得出过渡圆角半径 $R = 0.57d = 11.4\text{mm}$ 。由此得到变幅杆的主要参数:谐振长度 $L = 92.32\text{mm}$, 放大系数 $M_p = 4$ 。

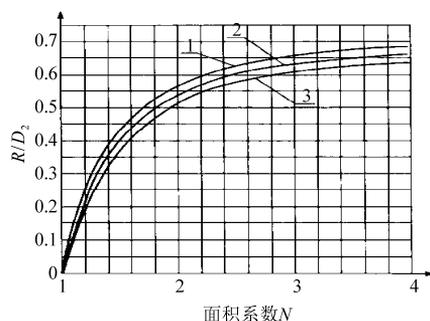
1. $\alpha = 0.45$ 2. $\alpha = \text{中间值}$ 3. $\alpha = 0.25$

图3 过渡圆弧与面积系数的关系曲线

通过上述计算,分别得出指数型与阶梯型两种变幅杆的具体设计参数,接下来使用ANSYS软件来验证参数的准确性并对其进行参数优化。

3 有限元仿真及参数优化

3.1 指数型变幅杆仿真

根据理论计算的指数型变幅杆尺寸参数,绘制指数型变幅杆的三维模型并导入ANSYS软件中,在网格划分面板中设置好网格参数进行网格划分。采用Subspace的方法获得指数型变幅杆20阶振型的谐振频率,并从中选择出最优的纵向振动谐振频率。

由图4可知,当变幅杆处在当前的谐振频率时,有着良好的轴线方向振动,其仿真的谐振频率为27.13kHz。此时的谐振频率与设计频率相差较大,因为变幅杆的前后端面增加了两个螺柱与中心通孔,导致频率误差较大,需要对变幅杆进行参数优化。在改变指数型变幅杆的长度时可知,变幅杆的谐振频率随着变幅杆长度的增加而减小,为了达到所设计的28kHz谐振频率,将变幅杆长度由开始的94.54mm调整至92mm。得到的仿真结果见图5,谐振频率为27.90kHz,满足设计需求。

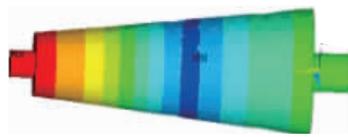


图4 无优化指数型变幅杆仿真结果

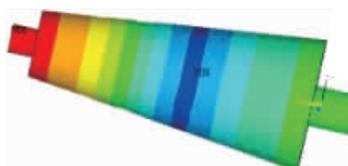


图5 优化后指数型变幅杆仿真结果

在当前的谐振频率下,在变幅杆输入端(大端面)加载 $3\mu\text{m}$ 的振动位移,则变幅杆输出端(小端面)获得的振动位移为 $6.4\mu\text{m}$,放大倍数为 2.1。所得放大倍数的仿真结果与计算结果十分相近,验证了计算的准确性。

3.2 阶梯型变幅杆仿真优化及验证

根据理论计算的阶梯型变幅杆尺寸参数,绘制阶梯型变幅杆的三维模型并导入 ANSYS 软件中,在网格划分面板中设置好网格参数后进行网格划分。采用 Subspace 的方法获得阶梯型变幅杆 20 阶振型的谐振频率,从中选择出最优的纵向振动频率。

由图 6 可知,在当前谐振频率下,变幅杆具有良好的轴线方向振动,其仿真谐振频率为 27.43kHz,与设计的 28kHz 有差距,无法满足要求,原因是在阶梯型变幅杆两个端面中增加的两个螺纹孔与中心通孔导致阶梯型变幅杆本身存在较大计算误差的前提下又增加了频率误差,因此需要对所设计的阶梯型变幅杆进行优化。

在不断改变阶梯型变幅杆大小端的长度时发现,变幅杆的谐振频率受小端面长度的影响较大,如果想通过长度来修改阶梯型变幅杆的谐振频率,大端面的修改长度应大于小端面,且修改小端面的长度不利于保持阶梯型变幅杆的振动稳定性,故通常是先修大端再修小端。



图 6 无优化阶梯型变幅杆仿真结果

微调阶梯型变幅杆长度并进行仿真验证时可以得到:变幅杆的谐振频率随着变幅杆长度的增加而减小,适当增加变幅杆端面的长度,将阶梯型变幅杆大端面的长度由 46.16mm 调整到 42mm,小端面的长度由 46mm 调整到 45mm,以优化变幅杆。



图 7 优化后阶梯型变幅杆仿真结果

优化后的结果见图 7,谐振频率为 28.31kHz,当变幅杆处于现有谐振频率下、其输入端(大端面)加

载了 $3\mu\text{m}$ 纵向振动位移时,输出端(小端面)纵向的最大位移为 $12.3\mu\text{m}$,放大倍数为 4.07。放大倍数的仿真结果与计算结果十分相近,验证了计算的准确性。

为了对设计的两种变幅杆进行综合分析,分别计算优化前后的误差。优化前的误差 = (优化前频率 - 设计频率) × 100% / 设计频率,优化后的误差 = (优化后频率 - 设计频率) × 100% / 设计频率。计算结果见表 3。

表 3 优化前后对比分析

类型	设计频率(kHz)	优化前频率(kHz)	优化后频率(kHz)
指数型变幅杆	28	27.14	27.89
阶梯型变幅杆	28	27.43	28.31
类型	优化前误差	优化后误差	放大倍数 M_p
指数型变幅杆	3.1%	0.39%	2.10
阶梯型变幅杆	2.0%	1.10%	4.07

由表 3 的数据可知,优化后的阶梯型变幅杆与指数型变幅杆在仿真频率与设计频率上的误差十分接近,但由于指数型变幅杆有放大倍数较小、加工较为困难等缺点,最终选用优化后的阶梯型变幅杆。

4 试验分析

根据上述理论计算得到的尺寸参数加工如图 8 所示的变幅杆,将变幅杆与 YP-3828-4BZ 柱形换能器相连,使用阻抗分析仪验证其谐振频率(见图 9)。



图 8 阶梯型变幅杆



图 9 阻抗试验

得到的试验结果见图 10。可知,阶梯型变幅杆的谐振频率为 28.4kHz,机械品质因数高,优化设计后的阶梯型变幅杆与理论分析结果基本一致,为安

装火花加工机床提供了有效验证。

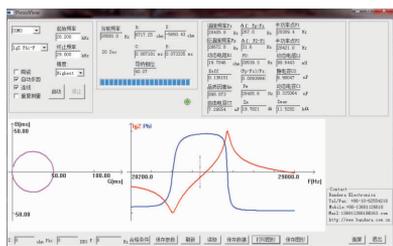


图 10 阻抗试验结果

5 结语

本文研究了可应用于电火花加工机床的中空类型的指数型变幅杆和阶梯型变幅杆。通过对两种变幅杆的理论计算和有限元仿真分析,得到如下结果:

(1)对理论计算的变幅杆进行了优化,未经优化的指数型变幅杆和阶梯型变幅杆的频率误差分别为 3.1% 和 2.0%,优化后的指数型变幅杆和阶梯型变幅杆的频率误差分别为 0.39% 和 1.1%。

(2)通过理论计算和仿真分析比较两种变幅杆的放大倍数,阶梯型变幅杆放大振幅的倍数较大,为指数型变幅杆的 1.94 倍。

(3)选择放大倍数较大的阶梯型变幅杆,根据相应尺寸对实物进行加工,将其与 28kHz 换能器连接进行了阻抗试验,进一步验证了该变幅杆的可行性,为超声电火花复合加工机床中空变幅杆的设计提供了思路。

参考文献

[1] Kumar K, Kumar Rawal S, Singh V P, et al. Experimental study on diametric expansion and taper rate in EDM drilling for high aspect ratio micro holes in high strength materials [J]. *Materials Today Proceedings*, 2018, 5(2): 7363 - 7372.

[2] Feng G, Yang X, Chi G. Experimental and simulation study on micro hole machining in EDM with high-speed tool electrode rotation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 101(11): 367 - 375.

[3] Hao N, Hu G, Dong Y H, et al. A comparative investigation on hybrid EDM for drilling small deep holes [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(11): 1465 - 1472.

[4] 朱波, 钟晓红, 陈济轮. 超声振动复合微细电火花加工微孔试验研究 [J]. *电加工模具*, 2014(3): 58 - 61.

[5] 袁芳革. 特种加工方法的内容和趋势 [J]. *机电工程技术*, 2011, 40(7): 142 - 143.

[6] 黎秉彝. 超声加工技术应用的发展研究 [J]. *机电信息*, 2017(27): 84 - 85, 87.

[7] 贺西平, 高洁. 超声变幅杆设计方法研究 [J]. *声学技术*, 2006, 25(1): 82 - 86.

[8] 陈汇资, 赵波, 卞平艳, 等. 圆锥型复合蝙蝠杆优化及动力学特性 [J]. *应用声学*, 2016, 35(1): 20 - 26.

[9] 余银柱, 吕明, 王时英. 1/2 波长复合变幅杆的数值设计 [J]. *太原理工大学学报*, 2011, 4(26): 630 - 633.

[10] 戴向国, 傅水根, 王先逵, 等. 新型超声变幅杆结构设计 [J]. *现代制造工程*, 2002(4): 42 - 43.

[11] 贾杨, 沈建中. 带过渡段阶梯形变幅杆的有限元分析 [J]. *声学技术*, 2006, 25(1): 75 - 81.

[12] 薛庚健, 马麟, 李亚杰. 阶梯形超声变幅杆的设计分析 [J]. *机械设计与制造*, 2013(12): 14 - 16.

[13] 王维鸽, 贺西平. 超声纵振动空心变幅杆的特性 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 43 - 47.

[14] 张向慧. 1/2 波长复合形变幅杆的有限元分析 [J]. *南京理工大学学报*, 2010, 34(1): 99 - 102.

[15] Hunter G, Ucaus M, Watson I, et al. A radial mode ultrasonic horn for the inactivation of *Escherichia coli* K12 [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, 15(2): 101 - 109.

第一作者: 李梦龙, 硕士研究生, 中北大学机械工程学院, 030051 太原市

First Author: Li Menglong, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China