

# 超声振动钻削装置设计与研究

池建昌 田锡天 杨杰 刘书暖

(西北工业大学,西安 710072)

**文 摘** 为解决碳纤维复合材料和钛合金钻孔加工过程中钻头磨损严重、加工孔质量差等问题,研制了一款超声振动钻削装置。超声振动钻削装置的性能取决于声振系统设计的好坏。本文首先对声振系统的结构设计进行了理论探讨,然后采用 ANSYS 软件对其进行模态分析和谐波响应分析。在碳纤维复合材料和钛合金的初步钻削试验中,超声振动钻孔和普通钻孔相比轴向钻削力分别减少了 48% 和 31%,结果表明所研制的超声振动钻削装置具有良好的钻削性能。

**关键词** 超声振动钻削, 超声振动钻削装置, 声振系统, 碳纤维复合材料

## Design and Research of an Ultrasonic Transducer Drilling Device

Chi Jianchang Tian Xitian Yang Jie Liu Shunuan

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** In order to solve the problem of severe drill wear and bad quality of hole processing during the drilling process of carbon fiber composite materials and titanium, an ultrasonic vibration drilling device is designed. The performance of ultrasonic vibration drilling device depends on the quality of sound vibration system. In this paper, the design of the structure of the sound vibration system was analyzed theoretically. And then the modal analysis and harmonious response analysis was carried out using the ANSYS software. In the drilling tests of the carbon fiber composite materials and titanium, the ultrasonic vibration drilling axial drilling force decline 48% and 31% than ordinary drilling axial drilling force respectively. It showed that the developed ultrasonic vibration drilling device has a good drilling performance.

**Key words** Ultrasonic vibration drilling, Ultrasonic vibration drilling device, Sound vibration system, Carbon fiber composite materials

### 0 引言

碳纤维复合材料和钛合金均属于难加工材料,硬度大,在传统加工过程中刀具磨损严重,而且加工孔质量差,新加工工艺方法的探索势在必行<sup>[1-2]</sup>。超声振动加工实质是一种脉冲切削<sup>[3]</sup>,在切削过程中,刀刃以极高的加速度撞击加工材料,接触时间很短,又很快离开,这种撞击能量在时间和空间上的高度集中,使材料的破坏属性发生变化,不再经历塑性变形,直接微观碎裂,降低了切削力,且由于实际切削时间极短,切削温度不会太高,因此在工件的钻削过程中可以提高钻头的刚性,延长刀具的使用寿命<sup>[4]</sup>。

新材料的出现日趋推动和促进超声振动加工技

术的发展<sup>[5]</sup>。本文研制了一款超声振动钻削装置,并着重对声振系统的结构设计进行了研究。

### 1 声振系统结构设计

超声振动钻孔加工过程中要求工具输出端具有比较高的振动速度和位移振幅,这就要求气核心声振系统必须是一个谐振系统,最大化的将压电陶瓷晶堆产生的能量放大传送到系统工具端。声振系统通常为纵向复合式换能器结构,首、尾两端为金属盖板,中间是圆环型压电陶瓷晶堆,然后用一个应力螺杆将这三部分压牢。这种结构不但保护了中间的压电陶瓷材料,而且有利于两端金属盖板自由的设计。声振系统结构示意图如图 1 所示。

收稿日期:2011-12-19;修回日期:2012-08-27

作者简介:池建昌,1986 年出生,硕士,主要从事碳纤维复合材料/钛合金的超声振动钻削加工研究工作。E-mail:chit007@163.com

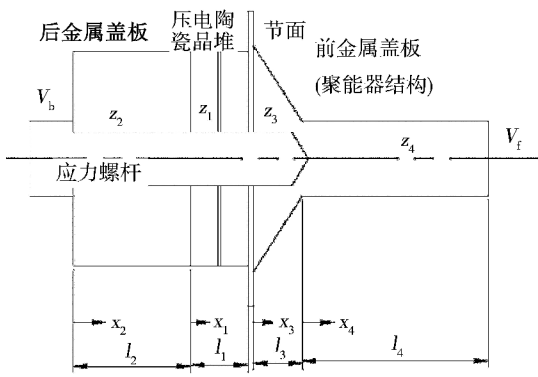


图1 声振系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sound vibration system

### 1.1 节面左侧系统设计

节面的左侧是一个1/4波长换能器振子,换能器由两片厚度为5 mm的压电陶瓷晶片叠加而成,中间为厚度是0.2 mm的铜电极片,后金属盖板材料为45#钢,节面左侧换能器振子边界条件为:

$$V_1(l_2) = 0; V_1(0) = V_2(l_2); V_2(0) = V_b; \\ F_1(0) = F_2(l_2); F_2(0) = 0.$$

将其边界条件代入变截面杆纵向简谐振动方程<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \cdot \frac{\partial S(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \xi = 0 \quad (1)$$

可得换能器振子频率方程为:

$$\frac{z_2}{z_1} \tan k_1 l_1 \tan k_2 l_2 = 1 \quad (2)$$

式中, $k$ 为波数, $k = \omega/c$ ;  $c$ 为声波在材料中的传播速度; $z_1, z_2$ 为材料的声阻抗率; $k \cdot l$ 为振子各部分波数与长度的乘积。

压电陶瓷片及45#钢的声阻抗率分别为 $2.242 \times 10^7$ 和 $3.978 \times 10^7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ,超声波在固体材料中的传播速度 $c = \sqrt{E/\rho}$ ,可得 $c_1 = 2950 \text{ m/s}$ , $c_2 = 5100 \text{ m/s}$ , $k = \omega/c = 2\pi f/c$ ,对设计后的声振系统进行模态分析后,可得系统的谐振频率为 $f = 26.6 \text{ kHz}$ ,将已知数据带入式(2),即可得到超声换能器后盖板厚度 $l_2$ 。

### 1.2 节面右侧聚能器设计

前盖板聚能器不但起到能量的传递和放大作用,而且负责和外界的连接。

聚能器为一锥度较大的圆锥体小圆柱复合式结构,选用钛合金材料,这种材料非常有利于声振系统前后两端获得较大的振速比。从而使聚能器输出端产生更大的能量输出。预紧螺杆也采用钛合金材料,并且和聚能器高精度配合,能很好的减小声波在传播过程中的能量损失。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012年 第5期

1/4波长聚能器边界条件:

$$V_3(0) = 0; V_3(l_3) = V_4(0); V_4(l_4) = V_f; \\ F_3(0) = F_1(l_1); F_3(l_3) = F_4(0); F_4(l_4) = 0;$$

将其代入波动方程式(1)可得1/4波长聚能器频率方程为:

$$\tan k_4 l_4 = \tan k_3 l_3 + \frac{1}{k_3 l_3} \cdot \frac{R_3 - R_4}{R_4} \quad (3)$$

式中, $R_3$ 为聚能器圆锥体大端半径, $R_4$ 为小圆柱半径。

由聚能器输入端的边界条件可知,对于1/4波长聚能器不能单独求它的振速放大系数,在这种情况下,就要求出整个换能器振子的前后振速比。

求解式(3)可得小圆柱体振速为:

$$V_4(x_4) = V_f \cos(l_4 - x_4) \quad (4)$$

求解式(2)可得金属后盖板振速分布:

$$V_2(x_2) = V_b \cos k_2 l_2 \quad (5)$$

综合(4)、(5)两式,可得换能器前后两端振速比:

$$\frac{V_f}{V_b} = -\frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{z_1}{z_3} \cdot \frac{\cos k_2 l_2}{\sin k_1 l_1} \cdot \frac{\cos k_3 l_3}{\sin k_4 l_4} \quad (6)$$

由(3)、(6)两式可知,超声换能器振子的前后振速之比 $V_f/V_b$ 在一定范围内随 $k_3 l_3$ 的增加而减小。然而,如果 $k_3 l_3$ 的取值太小,虽然可以获得一个较大的前后振速比,但导致圆锥体小端面接触处应力过于集中,容易发生疲劳损坏。经过强度校核分析计算,得到 $k_3 l_3$ 的最优值为0.3。钛合金材料声阻抗率 $2.202 \times 10^7 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ ,声波传播速度为 $c_3 = c_4 = 4850 \text{ m/s}$ ,带入式(3)计算可求得聚能器圆锥体厚度 $l_3$ 和末端小圆柱长度 $l_4$ 。

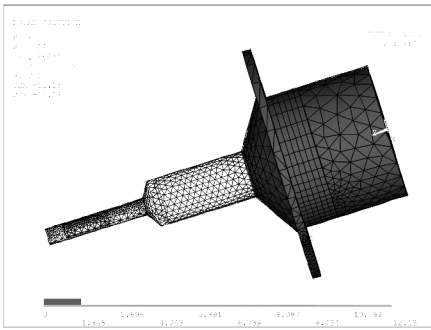
## 2 声振系统动力学分析

在超声振动加工中,要保证超声振动钻削装置有效可靠的工作,其声振系统须有良好的动态特性。本文采用ANSYS对声振系统进行模态分析和谐响应分析。模态分析用于确定声振系统的固有频率和振型,这也是对其声振系统进行谐响应分析的基础。谐响应分析用于确定声振系统在承受随时间按正弦规律变化的轴向载荷时的稳态响应,目的是计算出系统位移振幅随外界施加频率改变而改变的特性。

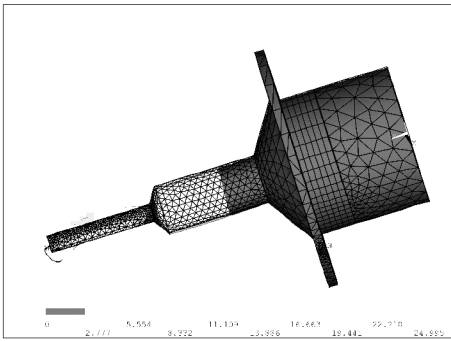
### 2.1 模态分析

声振系统安装上工具头后,其固有频率会产生很大的变化,这就需要对原有的设计进行修正和改进。首先,采用等效质量法,减小聚能器输出端小圆柱质量,其减小的质量即为工具头的质量。然后,使用ANSYS软件分析声振系统固有频率的变化,根据变化值对声振系统的结构进行适当调整,直至理论计算值和声振系统模态分析结果吻合为止<sup>[7]</sup>。

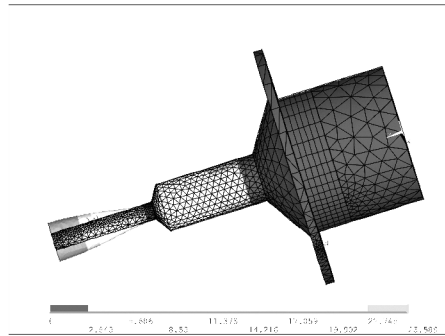
模态分析用于确定声振系统的固有频率和振型,首先建立声振系统结构模型,并分别对于各自结构赋予其材料属性;然后对声振系统模型进行网格划分,施加位移约束;最后对带有工具头的声振系统进行模态分析。分析可得声振系统的多组固有频率值以及与之相匹配的振型,从该声振系统的模态分析结果中选取三组具有代表意义的固有频率值,分别为第14阶固有频率 26.6 kHz、第12阶固有频率 22.5 kHz 和第15阶固有频率 29.7 kHz,图2为该声振系统在这三种情况下的振型。



(a) 第14阶声振系统振型



(b) 第12阶声振系统振型



(c) 第15阶声振系统振型

图2 第14、12和15阶声振系统振型

Fig.2 14th,12th,15th-order modal of sound and vibration system

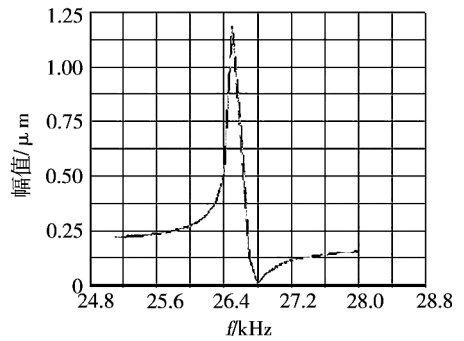
外界施加频率与声振系统在轴向上做纵向振动的固有频率相吻合时,声振系统能实现最佳振动效果;当外界施加给声振系统频率发生变化时,声振系统的振型会发生改变,其振动效果变差,而且也会对

加工孔的质量产生很大影响。

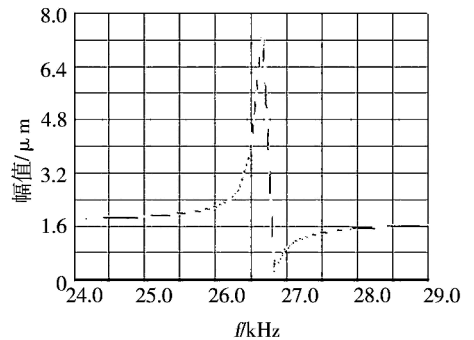
由图2(a)可知,在第14阶固有频率 26.6 kHz 时,声振系统在轴向上做纵向振动,即超声波电源施加给压电陶瓷晶堆的频率为 26.6 kHz 时,压电陶瓷晶堆的轴向振动与声振系统的振型吻合,这样即可实现声振系统的最佳振动效果。由图2(b)、(c)可知,声振系统在第12阶固有频率 22.5 kHz 或第15阶固有频率 29.7 kHz 时,声振系统工具头本身倾向于做摆动或扭动,与压电陶瓷晶堆产生的轴向振动不匹配,无法实现整个声振系统的谐振。

## 2.2 谐响应分析

在模态分析的基础上,主要研究声振系统在其固有频率 26.6 kHz 附近处的响应特性。取激振频率为 24 ~ 29 kHz,对压电陶瓷晶堆采用 Solid5 单元,施加幅值为 500 V 并联激励电压,分析过程采用模态叠加法,可得声振系统各点位移振幅与频率之间的幅频特性曲线图。其中一些点的幅频特性曲线见图3,由图可知,声振系统均在其固有频率 26.6 kHz 处取得最大幅值。



(a) 曲线1



(b) 曲线2

图3 幅频特性曲线

Fig.3 Amplitude frequency curve

其中,图3(a)为该声振系统节面处任取一点的幅频特性曲线,声振系统节面处的位移振幅非常小,只有 0.75 μm;如果取消施加在声振系统节面位置处的位移约束,再对该声振系统进行模态分析和谐响应

分析,并从声振系统界面处任取一点,可得其幅频特性曲线图3(b),其位移振幅为 $1.19\ \mu\text{m}$ ,虽略有提高,但两者差异不大,由此可见节面位置选择合理,对声振系统造成的能量损失不大。

从压电陶瓷晶堆上取不同的点,在靠近后盖板处可以得到其最大位移振幅为 $6.8\ \mu\text{m}$ ,此振幅不能达到超声振动加工的需要,必须借助声振系统的聚能器结构将机械振动的质点位移量和速度加以放大。

图4为工具头输出端任一点处的幅频特性曲线,其最大位移振幅为 $39\ \mu\text{m}$ 。当激振频率取值在 $26.5\sim 26.8\ \text{kHz}$ 时,工具头输出端处的位移振幅始终处于 $20\sim 39\ \mu\text{m}$ ,可以满足超声振动加工需要<sup>[8]</sup>,其频率取值范围处于一个比较宽的频带,易于超声波电源自动跟踪调节。除此之外,通过改变施加在压电陶瓷片上的电压,工具头输出端位移幅值大小可以进行自由调节,从而满足超声振动加工的实际需要。

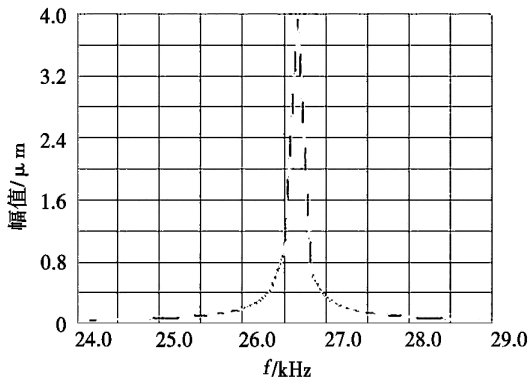


图4 工具头输出端幅频特性曲线

Fig. 4 Amplitude frequency curve

### 3 试验验证

为了验证超声振动钻削装置效果,进行碳纤维复合材料和钛合金材料的超声振动钻孔与普通钻孔试验对比,试验方案如下。

普通钻孔选用数控铣床(XKN713),机床转速分别为 $300, 600, 900\ \text{r/min}$ ,两只相同硬质合金YG-6X钻头,其直径为 $5\ \text{mm}$ ,顶角为 $100^\circ$ ,超声频率为 $26.6\ \text{kHz}$ ,超声波电源电压为 $500\ \text{V}$ ,输出功率为 $300\ \text{W}$ ,钻头位移振幅为 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ ,分别进行碳纤维复合材料和钛合金材料超声振动钻孔与普通钻孔试验。其中,以碳纤维复合材料的钻削试验为例,钻削力见表1。

由表1可知,碳纤维复合材料的超声振动钻孔和普通钻孔相比轴向钻削力平均减少了 $48\%$ 。对钻孔试验后的超声钻头和普通钻头进行观察,超声振动钻孔钻头比普通钻孔钻头的磨损有一定减轻。除此之

外,碳纤维复合材料和钛合金材料的超声振动加工孔壁光滑度也有一定提高,碳纤维复合材料的进出口毛刺也有一定减少。另外,由钛合金材料钻削试验可知超声振动钻孔比普通钻孔轴向钻削力平均减少了 $31\%$ ,钻削效果也有一定提高。

表1 钻孔试验轴向钻削力

Tab. 1 Drilling axial drilling force

进给量/ $\mu\text{m} \cdot \text{r}^{-1}$	300 r/min		600 r/min		900 r/min	
	普通	超声	普通	超声	普通	超声
10	36	19	29	17	23	13
20	46	23	38	20	31	16
30	59	28	49	25	40	19
40	75	36	61	32	49	24

### 4 结论

研制了一款超声振动钻削装置,在碳纤维复合材料和钛合金的钻孔试验中,超声振动钻孔和普通钻孔相比轴向钻削力分别减少了 $48\%$ 和 $31\%$ ,而且超声振动钻孔钻头磨损也有一定减轻,加工孔质量也有一定提高,该超声振动钻削装置具有良好的钻削性能。

#### 参考文献

- [1] 张万君,刘永琪,钱秀松. 碳纤维复合材料的孔加工[J]. 纤维复合材料加工技术,2005(3):49-52
- [2] 高世博,秦泓江. 钛合金的深孔钻削加工工艺分析及其改进方法[J]. 石油仪器,2007,21(4):89-91
- [3] Chandra Nath, Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48:965-974
- [4] 刘战锋,杨立合. 深孔超声轴向振动钻削装置的设计与研究[J]. 机床与液压,2007,35(3):56-58
- [5] 郑书友,冯平法,徐西鹏. 旋转超声加工技术研究进展[J]. 清华大学学报(自然科学版),2009,49(11):1800-1804
- [6] 陈桂生. 超声换能器设计[M]. 北京:海洋出版社,1984:97-99
- [7] Khulief Y A, Al-Naser H. Finite element dynamic analysis of drillstrings[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41:1270-1288
- [8] Li Z C, Jiao Y, Deines T W, et al. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: feasibility study and designed experiments[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45:1402-1411

(编辑 吴坚)