

# 基于有限元模型的超声切割刀优化设计

尤晓镇<sup>1</sup>, 隆志力<sup>2</sup>, 傅惠<sup>1</sup>, 汤晖<sup>1</sup>, 杨芳<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006, 2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 超声切割刀在材料加工领域中有广泛的应用前景, 可用于切割各种复合材料等硬脆材料。该文利用 ANSYS 有限元分析软件建立超声切割刀的有限元模型, 对其进行模态分析和谐波响应分析。仿真结果显示, 超声切割刀在 40 kHz 频率附近存在轴向纵振模态, 其振动节点位于安装环和压电陶瓷中心线上, 符合设计要求。基于有限元模型研制超声波切割刀, 通过阻抗分析仪与激光多普勒测振仪对换能器的固有频率与响应进行测试, 获得的超声切割刀阻抗曲线平滑, 谐振频率为 40.261 kHz, 设计误差为 0.83%, 最大振幅达到 14.52  $\mu\text{m}$ , 结果与有限元计算相互吻合。

**关键词:** 超声切割刀; 换能系统; 有限元分析; 优化设计; 振幅测试

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A

## Optimization Design of Ultrasonic Knife Cutting System Based on Finite Element Model

YOU Xiaozhen<sup>1</sup>, LONG Zhili<sup>2</sup>, FU Hui<sup>1</sup>, TANG Hui<sup>1</sup>, YANG Fang<sup>2</sup>

(1. School of Electro-mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The ultrasonic cutting machine has wide application in material processing in cutting various hard-and-brittle materials, such as composite material. An ultrasonic cutting system is proposed, and a finite element model of the proposed system is established by ANSYS software. Then modal analysis and harmonic response analysis of the proposed system are conducted by ANSYS software. It shows that the proposed system has an axial vibration modal around the frequency of 40 kHz. At the same time, the vibration nodes of the proposed system locate at the erection loop and the center of piezoceramics. These locations accord with the design demands. Based on the finite element model, the proposed system is fabricated, and the natural frequency of the transducer is measured by an impedance analyzer and a laser doppler analyzer. The measured natural frequency is 40.26 kHz, and the obtained frequency and impedance curve is smooth. The relative error between the measured and the predicted result is only 0.83%, and the maximum amplitude of vibration is 14.52  $\mu\text{m}$ . This indicates that the predicted results well agree with the measured results.

**Key words:** ultrasonic cutting; transducer system; finite element analysis; optimization design; amplitude test

## 0 引言

超声切割是利用超声发生器使超声换能器前端的刀片做超声频率的振动, 通过刀头将碰撞和冲击能量传递到被切介质, 致使被切介质材料疲劳破碎而达到切割目的的一项新型工艺技术。超声切割可更有效、更精确地加工如碳纤维、玻璃纤维、凯夫拉纤维、各种蜂窝材料等航空制造领域所用的复合材

料和硬脆材料如光学玻璃、硅晶体、陶瓷等<sup>[1-2]</sup>。

现阶段超声切割技术的研究多在于新型切割设备的设计和实验研究, 以及利用有限元软件进行仿真分析等。在国外, Nath 等做了超声切割低合金钢的实验研究<sup>[3]</sup>; Eggers 等研究超声切割在骨切割和面部手术的应用<sup>[4]</sup>; Andreas 等设计并研究了一种新型的多刀片切割装备<sup>[5]</sup>。在国内, 高军研究超声切割技术在复合材料加工领域的应用<sup>[6]</sup>; 宋立为等

收稿时间: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSFC); 广东联合基金重点基金资助项目(U1134004)

作者简介: 尤晓镇(1989-), 男, 广东揭阳人, 硕士生, 主要从事超声器件的结构设计及性能研究。

研究超声切割止血刀的结构及其原理<sup>[7]</sup>；沙金等研制了一台超声波切割刀样机，并研究了刀头材料对切割性能的影响<sup>[8]</sup>；郭玉泉等进行了超声切割用压电换能器的理论研究及有限元仿真<sup>[9]</sup>。

本文研究一个手持式超声切割刀，可用实验室及生产车间中切割复合材料等难加工材料。本文利用有限元分析软件建立有限元模型，并对其进行模态分析和谐响应分析，得到了纵振模态，最后通过实验验证有限元计算结果。

### 1 压电换能器的有限元理论

有限元法是目前国际上设计换能器普遍采用的手段，利用有限元软件 ANSYS 进行换能器的设计可以方便的计算出换能器的谐振频率，观察谐振时换能器各部分的位移分布，得到换能器的导纳曲线、发射接收的频率响应曲线和指向性图，还可进行换能器的结构优化。

#### 1.1 模态分析原理

模态分析用于抽取超声换能器的自然频率和振型。ANSYS 在处理结构力学线性问题时的有限元方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \tag{1}$$

式中： $M, C, K$  分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $u, F$  分别为节点的位移向量和载荷力向量。

#### 1.2 谐响应分析原理

谐响应分析用于确定线性结构在承受随时间按照正弦规律变化的载荷时的稳态响应。分析得到结构位移对频率的幅频特性曲线，即其他结果随频率的变化曲线，如电导纳曲线、发射电压响应曲线等。

当式(1)中的  $F = F_0 e^{j\omega t}$  是时间的简谐函数，则分析类型为谐响应分析，对应的有限元方程为

$$(-\omega^2 M + j\omega C + K)u = F_0 e^{j\omega t} \tag{2}$$

## 2 切割刀结构及运动方程

### 2.1 切割刀结构

如图 1 所示，超声切割刀主要由压电陶瓷、前盖板、变幅杆、刀片等部分组成。

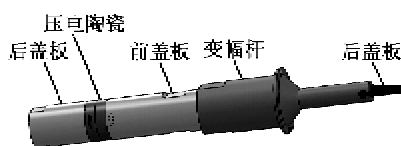


图 1 超声切割系统的组成

超声切割刀的工艺过程为：超声发生器将高频

交流电传输给压电陶瓷，电能通过压电陶瓷的逆压电效应转换为纵向机械振动，然后经过变幅杆的放大作用，再经刀片转化为横向振动，由此刀片与待加工材料发生相互摩擦振动，从而实现材料切割的过程。

### 2.2 运动方程

#### 2.2.1 压电方程

压电陶瓷是一种智能材料，当受到电场作用时发生压电效应，当受到力作用时发生逆压电效应。压电陶瓷的运动状态可由压电方程描述<sup>[10-13]</sup>：

$$\begin{cases} T = cS - eE \\ D = eS - \epsilon E \end{cases} \tag{3}$$

式中： $T$  为应力矢量； $c$  为弹性矩阵； $D$  为电位移矢量； $e$  为压电矩阵； $S$  为应变矢量； $\epsilon$  为介电矩阵； $E$  为电场强度矢量。

本文使用 PZT-4 压电陶瓷，对于 PZT-4 压电材料，其各参数为

$$e = \begin{bmatrix} 728.5 & 0 & 0 \\ 0 & 634.7 & 0 \\ 0 & 0 & 728.5 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & -5.2 & 0 \\ 0 & 15.1 & 0 \\ 0 & -5.2 & 0 \\ 12.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12.7 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C/m}^2) \tag{5}$$

$$c = \begin{bmatrix} 139 & 74.3 & 77.8 & & & \\ & 115 & 74.3 & & & \\ & & & 139 & & \\ & & & & 25.6 & \\ & & & & & 25.6 \\ & & & & & & 25.6 \end{bmatrix} \quad (\text{GPa}) \tag{6}$$

#### 2.2.3 变幅杆运动方程

变幅杆的横截面尺寸远小于声波波长，所以声波传递可以视为平面纵波在变幅杆中的传递，由此，其波动方程可定义<sup>[14-16]</sup>为

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \frac{\partial S(x)}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x} + k^2 y = 0 \tag{7}$$

$$y(x, t) = y(x) e^{j\omega t} \tag{8}$$

$$k = \omega / c_g \quad (9)$$

$$c_g = \sqrt{E_g / \rho_g} \quad (10)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (11)$$

式中:  $y$  为  $x$  位置的质点振动位移;  $k$  为声波在杆件传递时的波数;  $c_g$  为声波在杆件传递时的波速;  $E_g$  为变幅杆材料的弹性模量;  $\rho_g$  为变幅杆的密度;  $f$  为质点的振动频率;  $S(x)$  为圆截面变幅杆的横截面面积。

### 3 ANSYS 建模及分析

#### 3.1 超声切割刀 ANSYS 建模

利用 ANSYS12.0 有限元分析软件建立换能系

统的有限元模型,包括后盖板、2 片 PZT-4 压电陶瓷片、前盖板、变幅杆及刀片等部分。

#### 3.2 网格划分

对有限元模型进行网格划分,压电片采用 VSWEPT 方式划分网格,其他部件采用 VMESH 方式划分网格。

#### 3.3 定义材料属性及单元类型

在进行 ANSYS 模态分析之前,首先要定义换能系统各构件的材料属性及其单元类型,选择 SOLID45 作为金属板单元,压电片采用 SOLID5 单元。各零件的材料属性及单元类型如表 1 所示。

表 1 各部分材料属性及单元类型

序号	组成部分	材料	单元类型	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
1	前、后盖板	7075-T6	Solid45	2 720	71	0.33
2	压电陶瓷片	PZT-4	Solid5	7600	—	—
3	刀片	304	Solid45	7 800	195	0.3

#### 3.4 模态分析

本文采用 Block Lanczos 方法计算换能系统模态的自由振动模态。结果显示:换能系统在 50 kHz 频率范围内包含 14 种振动模态,如表 2 所示,模态类型可分成纵振、弯曲、扭转等模态。

表 2 50 kHz 频率范围内系统振动模态

模态阶数	谐振频率/Hz	模态类型
1	7 385	xoz 平面弯曲
2	7 770	xoz 平面弯曲
3	10 630	z 轴扭转
4	14 708	yoz 平面弯曲
5	17 815	沿 z 轴纵振
6	28 287	z 轴扭转
7	28 375	z 轴扭转
8	29 314	xoz 平面弯曲
9	33 976	z 轴扭转
10	35 653	xoz 平面弯曲
11	39 930	沿 z 轴纵振
12	45 160	yoz 平面弯曲
13	45 257	xoz 平面弯曲
14	45 532	z 轴扭转

表 2 中,z 轴纵振模态能保证刀片与待加工材料之间有规律的相互摩擦,被认为超声切割过程中最理想的模态。在 50 kHz 的频率范围内,换能系统有二阶纵振模态,其固有频率分别为 17.815 kHz,39.93 kHz。图 2,3 分别为第五阶轴向纵振模态及位移振型。图 4,5 分别为第十一阶轴向纵振模

态及位移振型。

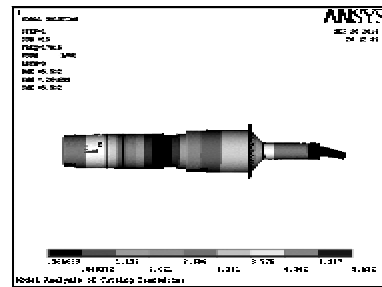


图 2 固有频率为 17.815 kHz 时的振动模态

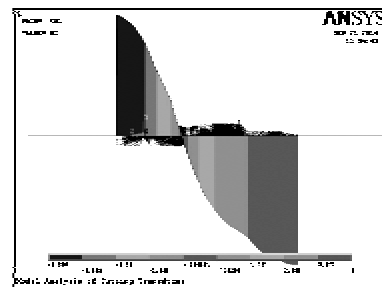


图 3 固有频率为 17.815 kHz 时的振型

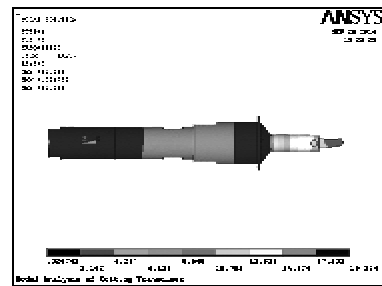


图 4 固有频率为 39.93 kHz 时的振动模态

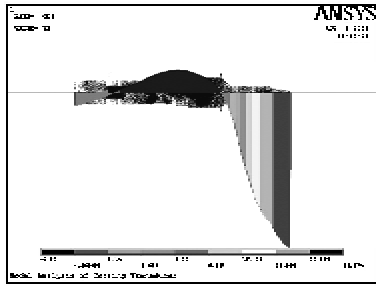


图5 固有频率为 39.93 kHz 时的振型

由图 2、3 可得,当固有频率为 17.815 kHz 时,换能系统振动节点为 1 个,落在前盖板上;由图 4、5 可得,当固有频率为 39.93 kHz 时,换能系统振动节点有 2 个,分别落在压电陶瓷中间和安装环上,此时的节点位置对系统安装及系统稳定性有着重大的意义,因此,换能系统第十一阶(固有频率为 39.93 kHz)轴向振动模式是最理想的工作模式,可作为实际切割状态下的工作模式<sup>[16]</sup>。

### 3.5 谐响应分析

谐响应分析可用于确定位移对频率的幅频特性曲线及其他结果随频率变化的情况。本文采用完整法计算谐响应的结果,通过 ANSYS 后处理程序 POST26,可以绘制出刀片前端节点纵向位移随频率变化的关系曲线,如图 6 所示。

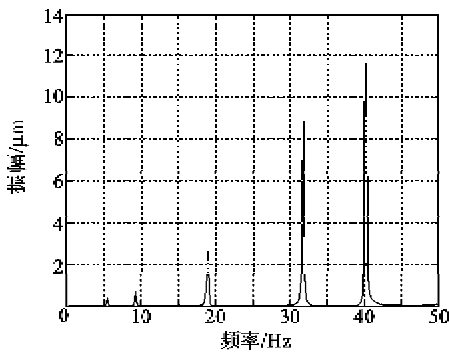


图6 换能器响应曲线

由图 6 可见,超声切割刀系统在 40 kHz 频率附近达到谐振状态,刀片前端的位移为 12.9  $\mu\text{m}$ 。

## 4 实验验证

### 4.1 阻抗测试

换能器阻抗测试是研究换能器性能的常用方法,通过阻抗分析仪可测得换能器的主要参数,包括谐振频率  $f_s$ 、反谐振频率  $f_p$ 、静态电容  $C_0$ 、动态阻抗  $R_1$ 、动态电容  $C_1$ 、动态电感  $L_1$ 、机械品质因素  $Q_m$  等。本文采用阻抗分析仪对超声切割换能器进行测试,如图 7 所示。

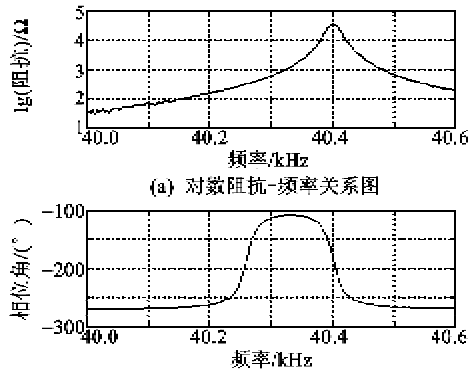


图7 换能器阻抗及相位曲线

由图 7 可见,超声切割换能器阻抗曲线及相位曲线平滑,无杂波,换能器的谐振频率为 40.261 kHz,设计误差为 0.83%,符合设计要求。

### 4.2 振幅测试

超声切割刀在实际加工过程中,刀片前端振幅的大小必须满足加工要求,振幅大小是超声切割刀系统设计的重要性能指标之一,它能直接反映超声切割系统加工的性能。如果振幅太小,不能满足加工要求,故振幅一般要求在 10  $\mu\text{m}$  以上。

本文采用激光干涉法,搭建实验测试平台测量刀片的振幅,如图 8 所示。

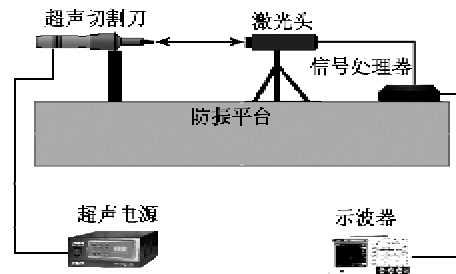


图8 测试平台示意图

该测试平台由激光多谱勒测振仪、存储示波器及计算机等设备组成,激光多谱勒测振仪提取刀片前端的振动速度,数字示波器显示振动速度电压当量,通过公式转换可将振动速度电压当量转换成振幅值。

本实验利用上述实验测试平台,分别测量超声切割刀在不同功率下,超声振幅大小与功率的变化规律。表 3 为超声振幅与超声功率的测试数据。

表3 振幅随功率变化的规律

功率/W	10	20	30	35
振幅/ $\mu\text{m}$	2.84	6.78	12.11	14.52

由表 3 可见,随着超声功率的增加,超声振幅不断增加,最大能达到 14.52  $\mu\text{m}$ ,能满足加工要求。

## 5 结束语

通过有限元分析软件 ANSYS 对超声切割刀进行建模及模态分析,获得换能器纵振模态,并进行超声换能器的谐响应分析,获得系统谐响应曲线,发现切割刀系统约在 40 kHz 时达到谐振状态。经过多普勒激光测振仪测试验证:超声切割刀最大振幅为 14.52  $\mu\text{m}$ 。本文有益于了解超声切割换能器的设计过程,在理解超声切割系统的工作方式和优化设计方面也有很大作用。

### 参考文献:

- [1] 刘井权,闫久春,杨士勤,等.碳纤维预浸料超声切割工艺[J].焊接,2001(8):24-26.  
LIU Jingquan, YAN Jiuchun, YANG Shiqin, et al. Ultrasonic cutting technology for carbon fibre pre-preg [J]. Welding & Joining, 2001(8):24-26.
- [2] 文立伟,严飙,肖军,等.复合材料超声切割系统及稳定性研究[J].航空制造技术,2010,17:49-52.  
WEN Liwei, YAN Biao, XIAO Jun, et al. Research on ultrasonic cutter system and stability of composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 17:49-52.
- [3] NATH C, RAHMAN M. A study on ultrasonic vibration cutting of low alloy steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(192/193):159-165.
- [4] EGGERS G, KLEIN J, BLANK J. Piezosurgery: an ultrasound device for cutting bone and its use and limitations in maxillofacial surgery[J]. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2004, 42:451-453.
- [5] ANDREAS C, MARGARET L, MATTHEW C. A novel multiple blade ultrasonic cutting device[J]. Ultrasonics, 2004, 42:69-74.
- [6] 高军,崔巍.超声切割技术在复合材料加工领域的应用[J].航空制造技术,2008(4):50-52.  
GAO Jun, CUI Wei. Application of ultrasonic cutting technology in composite material process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(4): 50-52.
- [7] 宋立为,李晓亮,苏庆.超声切割止血刀与高强度聚焦超声刀的比较[J].医疗设备信息,2007,10:32-34.  
SONG Liwei, LI Xiaoliang, SU Qing. Comparison between UHS and HIFU[J]. Information of Medical Equipment, 2007, 10:32-34.
- [8] 沙金,姚志远,焦阳.超声波切割刀结构设计及切割力实验研究[C]//上海:第十六届中国小电机技术研讨会论文集,2011.
- [9] 郭玉泉,张辽远.超声切割用压电换能器理论设计及有限元仿真[J].现代机械,2008(6):44-46.  
GUO Yuquan, ZHANG Liaoyuan. Design and finite element simulation on piezoelectric ceramic actuator for ultrasonic vibration cutting [J]. Modern Machinery, 2008(6): 44-46.
- [10] 张福学.压电学[M].北京:国防工业出版社,1984.
- [11] 倪振华.振动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1989.
- [12] 林书玉.超声换能器的原理与设计[M].北京:科学出版社,2003.
- [13] 隆志力.芯片键合换能系统动力学特性与优化设计研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [14] 应崇福.超声学[M].北京:科学出版社,1990.
- [15] 隆志力,吴运新,韩雷,等.热超声引线键合换能系统振动特性仿真研究[J].中国机械工程,2006,17(15):1613-1617.  
LONG Zhili, WU Yunxin, HAN Lei, et al. Vibration simulation of transducer system in thermosonic wire bonding[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(15): 1613-1617.
- [16] 张兴红,闫德鑫,陈鑫.超声车削瞬时切削力仿真研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2014(7):39-42.  
ZHANG Xinghong, YAN Dexin, CHEN Xin. Simulation research on the instantaneous cutting force in ultrasonic turning[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2014(7):39-42.