

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.003

# 宽刃超声波切割刀的研究与设计

张云电, 陈 健, 储 瑞, 董昌帅

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对传统切割方法对大尺寸脆性、粘性食品切割时,会产生碎屑、挤压变形等问题,对用于食品的 20 kHz 宽刃超声波切割刀的模型设计、刀具横向振动等方面进行了研究。根据复合变幅杆设计理论,确定了切割刀基本尺寸,通过在刀具特定位置上开槽的方法抑制了刀具横向振动。依照优化流程图,在 ANSYS 环境下对刀具进行了模态分析,得出了刀具模型最优解,使刀具在 20 kHz 频率左右刃口振动主要以纵向振动为主,刀具整体振型均匀;利用激光位移传感器对刀尖进行了振幅测量,发现刀具振型稳定;对上述宽刃超声波切割刀进行了面包切割实验。实验结果表明:该宽刃超声波切割刀进行食品切割时整体振型均匀,不会产生碎屑、挤压变形等问题。

**关键词:**超声切割刀;谐振频率;振幅分布

**中图分类号:**TH113.1;TG702

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2017)12-1382-05

## Structural design of wide edge ultrasonic cutter

ZHANG Yun-dian, CHEN Jian, CHU Rui, DONG Chang-shuai

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the traditional cutting method of large size brittleness, sticky food cutting, will produce debris, extrusion and other issues, the model for the design of 20 kHz wide blade ultrasonic food cutter, cutter of transverse vibration and so on were studied. According to the design theory of composite horn, the basic size of the cutter was determined, the transverse vibration of the cutter methods was restrained in the specific location on the slotted cutter. According to the optimization of flow chart, the modal analysis was carried out to obtain the optimal cutting tool model in the ANSYS environment, so that the tool in the 20 kHz frequency around edge vibration mainly by longitudinal vibration, uniform overall vibration amplitude. The laser displacement sensor was used to measure the amplitude of the tool nose and find that the tool vibration is stable. Ultrasonic cutting knife for cutting bread experiment was presented. The results indicate that the ultrasonic cutting knife blade width for food when cutting the overall vibration of uniform, not produce debris, extrusion and other issues.

**Key words:** ultrasonic cutter; resonant frequency; amplitude distribution

## 0 引 言

传统的切割方式会使食品出现碎屑、挤压变形等缺点,而且刀具使用寿命短。食品超声波切割技术可以有效避免上述缺点,因而得到广泛应用。

周胜利等<sup>[1]</sup>对超声波切割刀进行了动力学分析和结构优化,并且设计了一套结构优化程序。刘井权等<sup>[2]</sup>对超声刀切割系统进行了模态分析的研究。上述研究均是对于工程材料方面的研究,对于超声波食品切割工具的设计优化方法较少。

超声波食品处理系统使用高频率波的振动来快速

收稿日期:2017-04-03

作者简介:张云电(1956-),男,安徽淮南人,教授,博士生导师,主要从事精密制造与特种加工技术、智能超声波仪器、光机电一体化技术等方面的研究。E-mail: zyydd@hdu.edu.cn

处理食品,消除了传统切割片连续清洗造成的停机时间。超声波设备提供了一个新型途径来割块、切条、转向,对齐或传送各种不同的食品,使得生产流程化,废品最小化和维护成本最低化。

本研究通过理论设计宽刃超声波食品切割刀,对其优化,并通过 ANSYS 对其开槽进行优化分析,使其刃口振幅位移分布均匀、纵向振动纯净。

## 1 超声波切割原理

超声波切割声学系统由压电换能器、变幅杆和切割工具组成。超声波切割原理是<sup>[3]</sup>:压电换能器将超声波发生器产生的超声频电流转换为超声频机械振动,变幅杆将压电换能器输出的超声频机械振动放大后传递给切割工具。

超声波发生器又称驱动电源,主要组成元件包括振荡器、电压放大器、功率发生器、输出变压器等基本单位,工作时将市电的交流电信号转换成超声频电振荡信号,驱动超波换能器工作。

目前,压电式超声换能器是最为常见,它的电声转换效率高、生产工艺较成熟。夹芯式压电换能器由声头、绝缘套、压电片、电极片、反射罩和预应力螺栓组成<sup>[4]</sup>,工作时将超声波电源传入的高频电振荡信号通过压电陶瓷片逆压电效应转换成超声频机械振动<sup>[5]</sup>。

超声变幅杆的作用主要是聚能和阻抗匹配。超声变幅杆,其重要作用是聚能和阻抗匹配,聚能即将在很小的面积集聚较大的超声振动能量,来改变增大换能器的振幅。根据能量守恒定律,忽略传播过程中能量消耗,变幅杆任一截面处能量总是固定,能量密度与振幅的关系为:

$$\rho_e = \frac{1}{2}K_e\alpha^2, \alpha = \sqrt{\frac{2\rho_e}{K_e}} \quad (1)$$

式中: $k_e = \rho c\omega^2$ ;  $\rho$ —材料密度。

由此可知截面积与能量密度成负相关。

## 2 超声波切割刀设计

### 2.1 切割刀材料和形状选择

本研究以面包为切割对象,因此要选择对人体无害的切割材料,且具有防锈属性,结合各类刀具材料性能,选取钛合金 TC4 作为切割刀具的材料,材料性能如

表 1 所示。

表 1 钛合金的声学特性

材料	密度 $\rho / 10^3 \times (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / 10^{10} \times (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	泊松比 $\mu$	纵波声速 $c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
钛合金	4.5	12.07	0.25	4 920

钛合金在工作频率范围内材料的损耗小,声阻抗小,疲劳强度高。由于切割后的食品要求断面光滑,同时,形状受输出端和切割对象的外形限制,本研究选择复合结构切割刀,设计理论基础为矩形截面变幅杆理论,切割刀初始形状如图 1 所示。

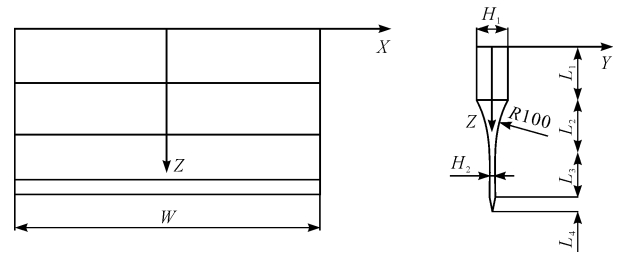


图 1 切割刀示意图

### 2.2 超声波切割刀具理论与设计

三段变截面复合变幅杆如图 2 所示。

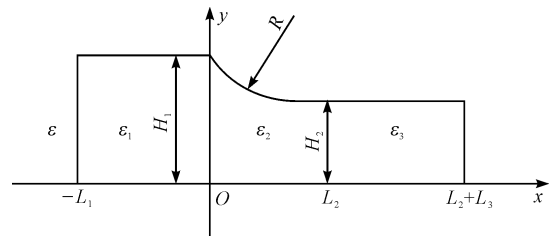


图 2 复合变幅杆

$L_1$  段和  $L_3$  段—等截面;  $L_2$  段—圆弧过渡截面

图 2 中变幅杆各段质点振动位移分别为:

$$\varepsilon_1 = a_1 \varepsilon \cos(Kx + \alpha_1) \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = a_2 \varepsilon \frac{1}{R(x)} \cos(K'x + \alpha_2) \quad (3)$$

$$\varepsilon_3 = a_3 \varepsilon \cos(Kx + \alpha_3) \quad (4)$$

式中:

$$R(x) = R_0 + r - R_0 \cos\theta;$$

$$\sin\theta = \frac{l_2 - x}{R_0};$$

$$K' = K^2 - \frac{R''(x)}{R(x)} = K^2 - \frac{1}{R} \left( 1 - \frac{l_2}{(R_0 + r - R)^3} \right).$$

由边界条件  $\varepsilon_1 \Big|_{x=-l_1} = \varepsilon, \varepsilon_1 \Big|_{x=0} = \varepsilon_2 \Big|_{x=0}, \varepsilon_2 \Big|_{x=l_2} = \varepsilon_3 \Big|_{x=l_2}$  得:

$$a_1 = \frac{1}{\cos(-KL_1 + \alpha_1)} \quad (5)$$

$$a_2 = a_1 \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \quad (6)$$

$$a_3 = \frac{a_2 R \cos(k'L_2 + \alpha_2)}{H_2 \cos(KL_2 + \alpha_3)} \quad (7)$$

其中:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{K'}{K} \tan \alpha_2 + \frac{R'(0)}{KR} + \frac{\alpha}{K}\right);$$

$$R'(0) = \frac{RL_2}{\sqrt{R^2 - L_2^2}};$$

$$\alpha_3 = -(KL_2 + KL_3).$$

其频率方程为:

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(K'L_2 + \alpha_2) + \frac{1}{K'} \operatorname{tg}KL_3 = 0 \\ \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{K}{K'} \operatorname{tg}KL_1 - \frac{RL_2}{K'R\sqrt{R^0 - L_2^2}} - \frac{\alpha}{K'} \end{cases} \quad (8)$$

根据弹性力学相关知识得任一点应力与应变关系:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu \\ -\mu & 1 & -\mu \\ -\mu & -\mu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{Bmatrix} \quad (9)$$

根据假设,杆的横截面积尺寸远小于波长时,平面纵波沿轴向传播。对于直径超过  $1/4\lambda$  的超声变幅杆,此时横向振动对系统造成的影响不能被忽略。因为横向振动比较大时,会影响系统动能和系统惯性大小,从而降低变幅杆能量等效分布,最终引发纵向振动传播速度和振动频率减小。由式(9)可得任意位置的轴向应力与应变的关系<sup>[6]</sup>,根据胡克定律整理后得大尺寸矩形截面切割刀具耦合振动频率方程为:

$$(3\mu^3 + 2\mu^2 - 1)P^3 + (1 - \mu^2) \left( \frac{1}{x^2 + y^2 + z^2} \right) P^2 - \left( \frac{1}{x^2 y^2} + \frac{1}{y^2 z^2} + \frac{1}{z^2 x^2} \right) P + \frac{1}{x^2 y^2 z^2} = 0 \quad (10)$$

式中: $P = \omega^2/C^2 \pi^2$ ;  $C$ —杆中纵波声速。

切割刀具刀刃段侧面为三角形,建立坐标系如图 3 所示。

刀片长度为  $L_4$ 、横截面积函数为  $A(x)$ 、质量函数和抗弯刚度函数分别为:

$$A(x) = A_0 \left(1 - \frac{x}{L_4}\right) \quad (11)$$

其中: $A_0 = WH_2$ 。

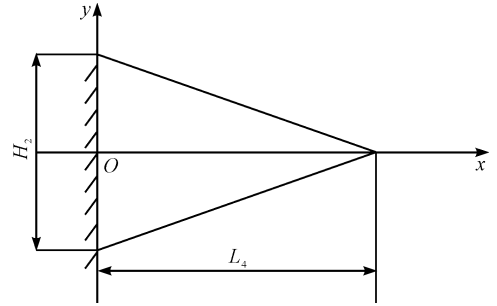


图 3 刀尖坐标图

$$m(x) = \rho A(x) = \rho A_0 \left(1 - \frac{x}{L_4}\right) \quad (12)$$

式中: $\rho$ —刀具材料的密度。

$$EJ(x) = EI = EJ_0 \left(1 - \frac{x}{L_4}\right)^3 \quad (13)$$

式中: $E$ —材料弹性模量; $J_0$ —横截面对主轴的惯性矩。

利用李兹法求解振型函数,选取系统假设模态为:

$$Y_i(x) = \left(1 - \frac{x}{L_4}\right)^2 \left(\frac{x}{L_4}\right)^{i-1}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

该方程同时满足位移和力边界条件,取  $n = 2$ ,将式(11)、式(12)代入振型方程:

$$\sum_{j=1}^n (k_{ij} - p^2 m_{ij}) A_j = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

其中,系数  $m_{ij}$ :

$$m_{ij} = \int_0^{L_4} \rho A Y_i Y_j dx, k_{ij} = \int_0^{L_4} EJ \frac{d^2 Y_i}{dx^2} \frac{d^2 Y_j}{dx^2} dx$$

即得切割刀具频率和振型函数。

根据最大长度的面包,设计谐振频率为 20 kHz 的大尺寸矩形截面复合切割刀具,经计算得:

$$W = 245 \text{ mm}, L = 132 \text{ mm}, H_1 = 25 \text{ mm}, H_2 = 4 \text{ mm}, N = H_1/H_2, L_1 = L_2 = 42 \text{ mm}.$$

将其代入方程(14),得:

$$L_3 = 36 \text{ mm}, L_4 = 12 \text{ mm}.$$

### 2.3 刀具的横向振动的开槽抑制

由式(10) 频率方程所得出的 3 个谐振频率解即为刀具沿着  $X, Z, Y$  3 个方向的共振频率。其中  $Y$  远远小于  $Z$ ,即满足  $Z \geq 2Y$ ;沿着  $Y$  方向的横向振动可以忽略不计。而  $X$  方向上,由于  $X$  与  $Z$  相当,在这两个方向上的共振频率比较接近,两者将相互作用。设计目标是将  $L$  方向的谐振频率尽可能的接近 20 kHz,简单且行之有效的方法是通过垂直  $X$  方向开一定数量的槽来抑制其沿着  $X$  方向的横向振动。

槽的位置则要开在刀具 X 方向的横向振动模式的节点处,这是因为节点处应力较为集中,非常容易产生横向振动,并且对纵向振动的影响最小。对于频率确定刀具的横向振动模式,其振动节点的位置可由下式确定<sup>[7]</sup>:

$$X_n = \frac{\lambda_j}{4} + (n - 1) \frac{\lambda_j}{2} (n = 1, 2, \dots, j) \quad (16)$$

式中: $\lambda_j$ — 刀具所对应的波长。

当槽的位置确定后,必须合理选择槽的宽度以及长度。宽度以及长度的确定对刀具的纵向共振频率比较大。总结其他学者的研究经验,最佳开槽理想宽度、最佳的开槽长度约为 1/4 至 1/3 纵向频率基频波长,开槽形状一般为矩形,对于总体尺寸较小且材料难加工的刀具,考虑加工工艺问题,会选择腰型槽,与同尺寸的矩形槽相比,其对横向振动抑制及对纵向共振频率的影响作用近似<sup>[8]</sup>。

经过计算,切割刀具尺寸如图 4 所示。

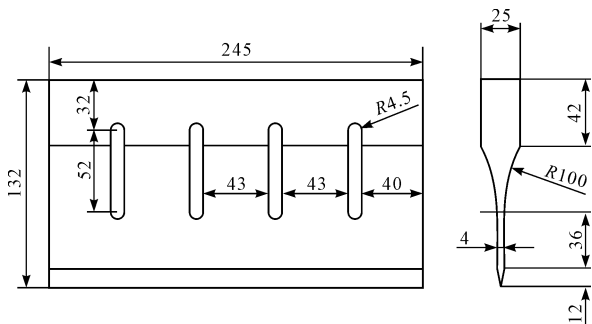


图 4 切割刀具尺寸图(单位:mm)

### 3 基于 ANSYS 超声振动刀具的有限元分析

优化流程图如图 5 所示。

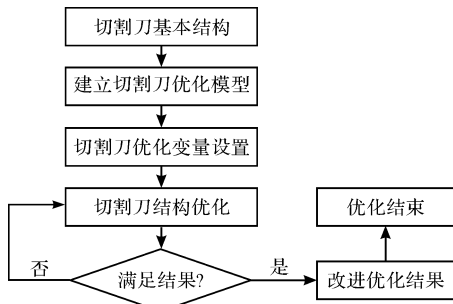


图 5 优化流程图

本研究在 ANSYS 环境下建立切割刀模型,选择 Soild45 单元,自由网格划分,采用 Block-Lanczos 方法提取切割刀具模态,输入其材料属性,选择感兴趣模态

范围 15 kHz ~ 25 kHz,提取 20 阶模态,遵循图 5 优化流程图,得出的切割刀在 20 kHz 左右最优模态图,如图 6 所示。

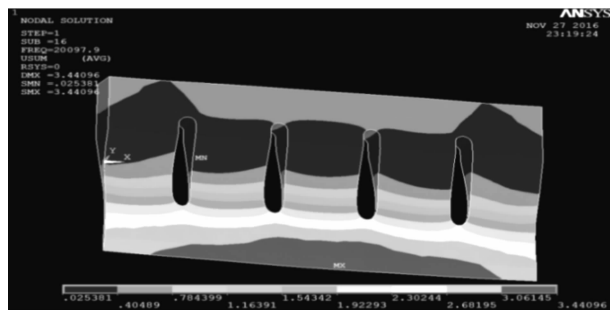


图 6 切割刀具优化后模态图

此时切割刀第十三模态谐振频率为 200 098 Hz,与理想频率相差 0.049%,从图 6 中可以看出,刀尖处振幅达到最大,且刃口振幅分布均匀,横向振动被很好的抑制,此时刀具满足所设计目标。

## 4 实验及结果分析

### 4.1 超声波切割实验

利用激光位移传感器测出刀具在 20 kHz 频率工作时刀尖振幅图如图 7 所示。

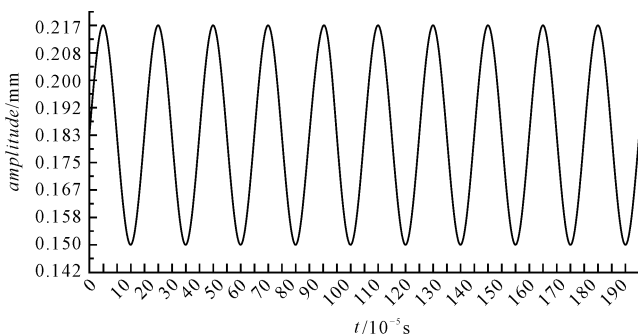


图 7 刀尖振幅图

在工作台上,让刀具分别在有超声和无超声环境下切割同一面包,得出切割效果如图 8、图 9 所示。

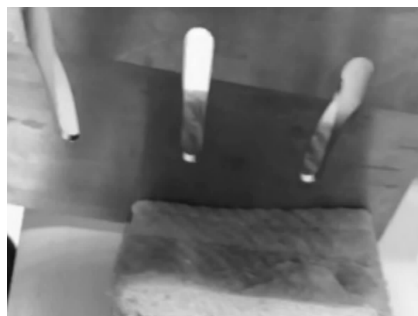


图 8 有超声波激励

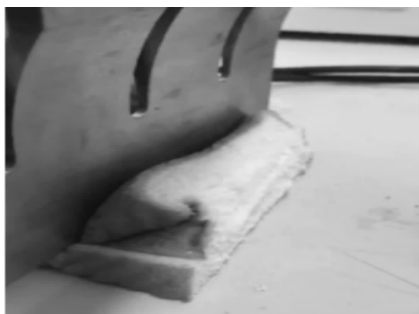


图 9 无超声波激励

有超声激励下切割面包后的效果图如图 10 所示。



图 10 有超声切割效果

## 4.2 实验结果分析

分析图 7 刀尖振幅图可以看出:刀尖振幅稳定,横向振动得到很好的抑制。

分析图 8、图 9 可以得出:在有超声波激励环境下,超声波切割刀具不会挤压食品,效果优于无超声波激励环境下传统刀具的切割。

由图 10 可以看出:该超声波切割面包时没有产生切割碎屑、食物浪费等问题。

实验表明:该宽刃超声波切割刀刀尖振型均匀,切割面包时可以有效避免传统切割带来的挤压食品、产生碎屑问题。

## 5 结束语

本研究概述了超声波切割理论,根据超声振动变幅杆相关理论,使用解析法设计研究了大尺寸矩形切割刀具的振动模型。通过纵向开槽来抑制刀具横向振动,借助 ANSYS 分析软件对超声系统进行模态分析,观察位移云图,依照刀具优化流程图,最终得出合适刀具模型,此时刀具末端振动位移最大,横向振动得到很好抑制,振幅均匀,符合设计要求。

最后通过实验表明:该切割刀切割时可以避免传统食品切割所带来的挤压食品、产生碎屑等问题,同时也验证了对该宽刃超声波切割刀理论分析的正确性。

## 参考文献(References):

- [1] 周胜利,姚志远,沙金. 超声切割刀动力学分析和结构优化设计[J]. 中国机械工程,2013,24(12):1631-1635.
- [2] 刘井权,闫久春,杨士勤. 超声刀切割系统的模态分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(4):435-438.
- [3] 张云电,陈炎. 光学玻璃细长孔超声加工技术[J]. 机电工程,2008,25(9):51-53.
- [4] 张云电,韩俊慧. 硅镜超声加工机进给压力的检测与控制系统[J]. 机电工程,2009,26(1):74-76.
- [5] 王振斌,刘加友. 无花果多糖提取工艺优化及其超声波改性[J]. 农业工程学报,2014,30(10):262-269.
- [6] 张云电,余芳. 硅镜超声加工声学系统设计[J]. 机电工程,2008,25(6):24-26.
- [7] 林书玉,张福成. 超声塑料焊接工具横向振动及开槽的研究[J]. 声学技术,1992(4):24-28.
- [8] 张云电,翟宇嘉. 超声车削气凝胶材料声学系统设计及实验研究[J]. 杭州电子科技大学学报:自然科学版,2015,35(6):8-13.

[编辑:李辉]

## 本文引用格式:

张云电,陈健,储瑞,等. 宽刃超声波切割刀的研究与设计[J]. 机电工程,2017,34(12):1382-1386.

ZHANG Yun-dian, CHEN Jian, CHU Rui, et al. Structural design of wide edge ultrasonic cutter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(12):1382-1386.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>