

# 超声塑料焊接工具横向振动及开槽的研究

林书玉 张福成

(西安, 陕西师范大学应用声学研究所, 710062)

本文利用耦合振动理论研究了大尺寸超声塑料焊接工具的三维振动, 推出了决定工具谐振频率与其材料及尺寸之间关系的频率方程。还研究了工具的横向振动与开槽之间的关系, 从理论上得出了决定工具开槽位置的数学表达式, 在某种程度上解决了大尺寸工具的开槽问题。实验表明, 大尺寸工具的设计频率与测量值基本符合, 开槽大大地改善了工具辐射面上的位移分布的均匀程度。

关键词: 超声塑料焊接, 耦合振动, 谐振频率, 横向开槽。

## A study of large dimension vibrating systems and their transverse slotting

Lin Shuyu Zhang Fucheng

(Applied Acoustics Institute, Shanxi Teachers University, Xian, 710062)

The paper studied the three dimensional vibration of large dimension vibrating systems using the coupled vibrating theory. The frequency equation for the design and calculation of vibrating systems was derived out theoretically. A new method of slotting in the suppressing of transverse vibration was developed, and the theoretical expression of slotting positions was given. Experiments show that the measured resonant frequencies agree well with the calculated results according to the theory of this paper, and slotting improves the uniformity of displacement distribution on the radiating surface of large dimension vibrating systems.

key words, ultrasonic plastic welding, coupled vibration, resonant frequency, transverse slotting

### 1 引言

在不同的应用场合, 由于焊接对象不同,

必须使用相应的焊接工具。对于较大的部件, 为提高生产率, 保证产品质量, 需要大尺寸的超声焊接工具, 其辐射面是一个狭长的条形面, 或者一个长与宽可相比拟的大尺寸矩

形面。在实际工作中,要求工具的谐振频率必须等于激发换能器及变幅杆系统的共振频率,否则将产生换能器效率下降、工具的振动模式发生变化等许多问题。为此,必须从理论上准确地决定工具的谐振频率。对于横向尺寸远小于纵向尺寸(例如横向尺寸大于1/4纵波波长)的振动工具,横向振动对纵向振动的影响不大,可以忽略不计。此时用一维振动理论便可以得出与实验符合的结果。但是对于大尺寸振动系统,由于工具的横向尺寸接近或大于振动系统工作频率所对应的纵波波长,工具产生了严重的横向振动。并且,横向振动与纵向振动相互影响,此时,一维振动理论将产生较大的误差,必须发展新的理论以满足此类大尺寸系统的设计需要,有效地抑制工具的横向振动和改善工具辐射面位移分布的均匀程度。

## 2 大尺寸超声塑料焊接工具的频率方程

常用的超声塑料焊接工具一般为长方体,用直角坐标表示,三个方向的尺寸分别为 $l_x$ 、 $l_y$ 和 $l_z$ ,设与Z轴垂直的上下底面分别为声波的激发及辐射面,声波能量沿着工具的纵向即Z轴方向传播,而X与Y两个方向则属于工具横向振动的方向。根据弹性力学原理,振动体内任一点的轴向应力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 和轴向应变 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_z$ 之间的关系为,

$$\epsilon_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]/E \quad (1)$$

$$\epsilon_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]/E \quad (2)$$

$$\epsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]/E \quad (3)$$

式中,E和 $\nu$ 为材料的杨氏模量及泊松系数。令振动体各轴向之间的应力比分别为: $n_1 = \sigma_x / \sigma_y$ ,  $n_2 = \sigma_y / \sigma_z$ ,  $n_3 = \sigma_z / \sigma_x$ , 定义为振动体轴向之间的耦合系数。令 $E_x = \sigma_x / \epsilon_x$ ,  $E_y = \sigma_y / \epsilon_y$ ,  $E_z = \sigma_z / \epsilon_z$ , 称为振动体的表观弹性系数,由(1)~(3)式可得,

$$n_1 n_2 n_3 = 1 \quad (4)$$

声学技术

$$E_x = E/[1 - \nu(n_3 + 1/n_1)] \quad (5)$$

$$E_y = E/[1 - \nu(n_1 + 1/n_2)] \quad (6)$$

$$E_z = E/[1 - \nu(n_2 + 1/n_3)] \quad (7)$$

利用弹性体的表观弹性系数概念,根据表观弹性法原理<sup>[1]</sup>,可把大尺寸振动工具的振动看成是沿振动工具轴向的三个互相垂直的一维纵振动的耦合振动,而沿各轴的一维纵振动可以看成是弹性系数分别为 $E_x$ 、 $E_y$ 及 $E_z$ 的细长棒的纵向振动,在空载情况下,即工具的边界自由情况下,可得大尺寸振动工具的频率方程,

$$k_x l_x = i\pi \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

$$k_y l_y = j\pi \quad (j = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

$$k_z l_z = m\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

(8)~(10)三式分别为工具三个轴向的频率方程,其中, $k_x = \omega/c_x$ ,  $k_y = \omega/c_y$ ,  $k_z = \omega/c_z$ ,  $c_x = (E_x/\rho)^{1/2}$ ,  $c_y = (E_y/\rho)^{1/2}$ ,  $c_z = (E_z/\rho)^{1/2}$ , 分别称为振动工具三维耦合振动的轴向波数及声速, $\rho$ 为材料密度, $f$ 为谐振频率,正整数 $i$ 、 $j$ 、 $m$ 分别对应振动体不同的振动模式。把上述各量代入(8)~(10)三式可得:

$$1 - \nu(n_3 + 1/n_1) = i^2 A/l_x^2 \quad (11)$$

$$1 - \nu(n_1 + 1/n_2) = j^2 A/l_y^2 \quad (12)$$

$$1 - \nu(n_2 + 1/n_3) = m^2 A/l_z^2 \quad (13)$$

式中,  $A = c^2 \pi^2 / \omega^2$ ,  $c^2 = E/\rho$ ,  $c$ 为细长棒中一维纵振动的传播速度,由上述三式结合(4)式消去耦合系数 $n_1$ 、 $n_2$ 及 $n_3$ 可得决定大尺寸超声塑料焊接工具谐振频率的频率方程式:

$$\frac{i^2 j^2 m^2}{l_x^2 l_y^2 l_z^2} A^3 - \left( \frac{i^2 j^2}{l_x^2 l_y^2} + \frac{j^2 m^2}{l_y^2 l_z^2} + \frac{i^2 m^2}{l_x^2 l_z^2} \right) A^2 + (1 - \nu^2) \left( \frac{i^2}{l_x^2} + \frac{j^2}{l_y^2} + \frac{m^2}{l_z^2} \right) A + 2\nu^3 + 3\nu^2 - 1 = 0 \quad (14)$$

给定工具的材料及尺寸,就可得出工具耦合

振动的谐振频率，由于(14)式中考虑了工具横向振动的影响，因此它得出的结果不同于一维理论的数值。由(14)式可以看出，大尺寸工具的频率方程为一关于A的三次方程，由此可解得三个频率，结合上文分析，可以看出，这三个谐振频率分别对应工具的纵向及横向共振频率。工具的纵向共振频率也就是其工作频率，它必须与换能器振动系统的共振频率保持一致，否则将导致振动系统纵向工作效率下降。而工具的横向共振则必须尽量抑制。对应(14)式的解，工具的振动可分以下三种状态：

(1)工具的横向尺寸远小于纵向尺寸，一般要求2倍以上，即 $l_x \geq 2l_z$ ， $l_y \geq 2l_z$ ，横向谐振频率远高于其纵向共振频率，因此，横向振动对纵向振动影响不大，工具振动类似于沿Z方向的细长棒的一维纵振动，此时，利用一维理论计算及设计工具可以满足工程上的精度要求。

(2)在工具的两个横向尺寸中，其中之一远小于工具的纵向尺寸，即满足 $l_x \geq 2l_z$  (或 $l_y$ )但工具的另一个横向尺寸较大，接近或超过工具的纵向尺寸，此时声波的辐射面为一狭长的矩形面，对应于较小尺寸方向上的横向振动可以忽略不计，但是对应于较大尺寸方向上的横向共振频率与纵向共振频率比较接近，两者将相互作用。因此，该方向上的横向振动对纵向产生较大的影响。此时，一维理论不再适用，必须利用耦合振动理论来分析、研究及设计此类系统，且此横向振动应加以抑制。

(3)工具的两个横向尺寸皆与其纵向尺寸可相比拟，此时工具的声波辐射面为一长与宽相差不大的大尺寸矩形面，工具的纵向共振频率与其两个横向共振频率比较接近。在这种情况下，由于泊松效应的影响，工具在纵向共振的同时，在其两个横向也产生较强的振动。纵振动与横振动之间的相互耦合使工具的纵向振动状态发生变化，此时，如

果仍采用一维理论来计算及设计工具，理论与实验将出现较大的误差，因此，必须利用上述耦合振动理论对工具的三维耦合振动进行研究。并且为了保证工具的工作效率及其辐射面上位移分布的均匀性，必须对其两个方向的横向振动分别加以有效的抑制。

### 3 大尺寸超声振动工具中横向振动的开槽抑制

如上分析，大尺寸振动工具的耦合振动存在三个轴向的谐振频率，其中只有一个是实际所需要的。为抑制横向振动，目前，普遍采用在振动体上开槽的方法。

#### 3.1 开槽位置的确定

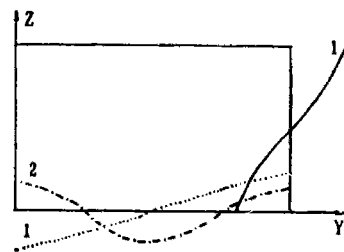


图1 工具耦合振动的位移分布图

设有一超声塑料焊接工具，换能器的激励方向沿着工具的Z轴，因此，开槽必须能够抑制工具在X与Y这两个方向的振动。若工具的几何尺寸为 $l_x \geq 2l_z$ ，而 $l_y$ 与 $l_z$ 可相比拟。相应的谐振频率为 $f_{x1}$ 、 $f_{y1}$ 、 $f_{zm}$ ，实际中要求 $f_{z1}$ 等于换能器的工作频率。如前所述，工具在X方向的横向振动对纵向振动的影响可以忽略。而Y方向的振动将对Z方向产生大的影响。根据上文分析，图1为大尺寸超声塑料焊接工具耦合振动的位移分布，其中实线1代表工具纵向振动基频的位移分布，其振动频率为 $f_{z1}$ 。虚线1和2分别表示工具在Y方向上横向振动的基频及二次谐频振动模式的位移分布，它们对应的频率分别为 $f_{y1}$ 及 $f_{y2}$ ，由位移分布图可以清楚地

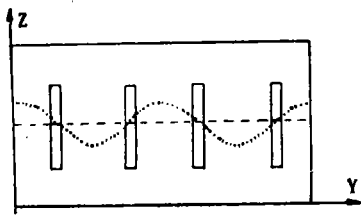


图2 带有开槽的焊接工具及其横向振动位移分布

看出和 $f_{y1}$ 接近的振动模式,则可对其分别进行抑制。比较简单且行之有效的方法是沿着工具的Y方向开一些平行于Z方向的小长槽,图2所示为一带有开槽的超声焊接工具的Y-Z平面示意图,槽的位置必须位于工具Y方向横向振动模式的节点处,这是因为节点处应力较集中,最易产生横向振动,且对纵向振动影响最小。对于频率为 $f_{y1}$ 的横向振动模式,其振动节点的位置可由下式决定,

$$Y_n = \frac{\lambda_{y1}}{4} + (n-1)\frac{\lambda_{y1}}{2} \quad (n=1, 2, \dots, j) \quad (15)$$

式中, $\lambda_{y1}$ 为对应的波长,另外,为了减少开槽对工具纵向振动的影响,槽的位置也必须位于工具纵向振动的节点处,并且对称于工具的纵向振动节面。

### 3.2 开槽宽度的确定

槽的位置决定以后,还必须合理选择槽的宽度,当开槽宽度太小时,不能产生有效的抑制作用;而宽度太大时,由于工具质量改变较大,容易使工具的纵向振动状态发生变化,因而也影响工具的纵向共振频率。经反复实验,开槽的较理想宽度约为 $\lambda_{y1}/25 \sim \lambda_{y1}/20$ 。由此可以看出,为了抑制不同振动模式的横向振动,需要在工具上开设不同宽

度的槽子。

### 3.3 开槽长度的确定

开槽长度对工具的振动有较大的影响,当开槽长度太短时,由于工具的横向振动是分布于工具整个侧面上的,因此,不能有效地消除横向振动,同时也不能有效地改善工具振动辐射面的位移分布。但是,当开槽长度太长时,由于开槽离工具辐射面太近,使工具的声波辐射面上出现位移分布不均匀现象,影响工具辐射效率及产品质量,因此,综合上述两种情况,结合实际工作经验,最有效且不明显影响工具振动分布的开槽长度约为 $1/4 \sim 1/3\lambda_{z1}$ , $\lambda_{z1}$ 为工具纵向振动基频模式的波长。

上面,我们讨论了工具辐射面为一狭长矩形面情况,如果工具沿X及Y方向的尺寸都较大,则必须对工具的两个横向振动分别加以开槽抑制。可以预见,在这种情况下,横向振动的抑制将更加困难,有关这方面的工作正在进行。

## 4 实验及结论

### 4.1 大尺寸振动工具谐振频率的测量

为验证文中得出的关于大尺寸工具的设计公式,笔者加工了一些用于超声塑料焊接中的振动工具,其材料为硬铝,声速 $c=5100\text{m/s}$ ,泊松系数 $\nu=0.34$ ,测量了工具的纵向谐振频率。工具的几何尺寸及测试数据见表1,表中, $f_c$ 为工具的计算频率, $f_m$ 为测量值。为进行比较,表中同时列出了不考虑工具的横向振动时工具一维振动理论的共振频率 $f_{LL}$ ,其计算式为 $f_{LL}=c/2l_z$ 。

表1 工具的谐振频率测试结果

工具	$l_x(\text{mm})$	$l_y(\text{mm})$	$l_z(\text{mm})$	$f_{LL}(\text{Hz})$	$f_c(\text{Hz})$	$f_m(\text{Hz})$	$\frac{ f_m - f_{LL} }{f_m}$	$\frac{ f_m - f_c }{f_m}$
1	20.0	270.0	120.0	21250	22808	23127	8.12%	1.38%
2	20.0	250.0	100.0	25500	27241	28277	9.82%	3.66%
3	18.6	133.5	50.7	50295	52863	54349	7.46%	2.73%

## 4.2 工具辐射面位移分布的测量

为研究开槽对工具横向振动的抑制情况以及工具辐射面的位移分布,我们加工了一些开槽工具,其材料也为硬铝,尺寸为 $l_x = 28\text{mm}$ ,  $l_y = 280\text{mm}$ ,  $l_z = 137\text{mm}$ ,其设计频率为 $20\text{kHz}$ ,开槽前实测频率为 $19.898\text{kHz}$ ,开槽后测量频率为 $19.718\text{kHz}$ ,对其辐射面的位移分布进行了测量,结果见图3,其中(a), (b)两条线分别为工具开槽前后的位移分布曲线,可以看出,开槽后工具的位移分布比未开槽要均匀得多,前者近似于一细长棒中的位移分布。

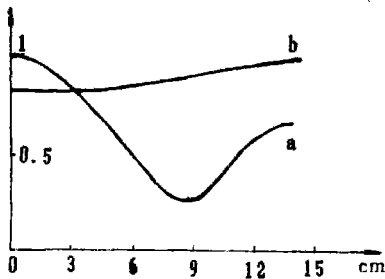


图3 测得的工具辐射面的位移分布图

## 4.3 讨论

本文导出的大尺寸超声振动工具的设计公式考虑了工具的横向振动,与一维理论相

比,频率的设计值更加接近于测量值。另外,与数值计算方法相比,本法计算简单,物理意义明显。为了有效地抑制工具的横向振动,必须首先利用频率方程(14)式求出工具的纵向及横向谐振频率,对最接近工具纵向振动基频的横向振动模式进行开槽抑制。开槽必须位于工具横向振动模式的节点处,并且合理选择开槽尺寸,为了达到经济有效,应该对最强的横向振动加以抑制,只有这样,才能有效地抑制大尺寸工具的横向振动,并且改善工具声波辐射面的位移分布均匀程度,提高系统的纵向工作效率,取得理想的加工及处理效果。

## 参考文献

- 1 E.Mori, K. Itoh and A. Imamura. Analysis of a short column vibrator by apparent elasticity method and its application. Ultrasonics International 1977 Conference Proceedings, 262
- 2 K. Adachi and S. Ueha. Modal vibration control of large ultrasonic tools with the use of wave-trapped horns. J. Acoust. Soc. Am, 1990; 87(1); 208-214

## GM型特种耐高温隔声门通过省级鉴定

由宜兴市南方吸音器材厂研制生产的GM型特种耐高温隔声门9月中旬在宜兴通过新产品投产鉴定,该隔声门的设计采用了复合隔声结构及多层石棉布密缝处理等技术,经同济大学声学所及省轻工机械产品质量检测站检测,其隔声指数达 $42\text{dB}$ ,耐高温达 $300\text{℃}$ 。具有结构合理、开启方便、隔声、耐高温、隔热性能好、使用耐久等特点,适用于高噪声、高温及气动负荷较大的各类发动机试验间、排气道等航空航天及冶金工业部门使用。经航空航天部701所及空军第一研究所等单位试用都取得了质量满意性能可靠的效果。鉴定认为该隔声门设计合理、性能优良,填补了特种耐高温隔声门的空白,可以投入批量生产。

(章奎生)