

柱-壳式圆形超声塑料焊接模具的耦合 振动及优化

周光平¹, 梁召峰¹, 梁明军²

(1. 深圳职业技术学院, 广东深圳 518055; 2. 深圳众和超声科技有限公司, 广东深圳 518055)

摘要: 提出一种由圆柱、圆壳、圆盘结构组成的大尺寸圆形超声塑料焊接模具, 并对其进行了耦合振动分析, 同时给出了基于有限元分析的设计优化方法。分析及优化结果表明: 对径向尺寸大于一个波长的圆柱形模具, 柱-壳式结构的超声塑料焊接模具能获得良好的振动特性, 是一种有效的大尺寸圆形辐射面模具的新结构。

关键词: 耦合振动; 模态分析; 有限元; 优化设计

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-04-0560-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.027

Modal analysis and optimization of cylinder-shell circular ultrasonic plastic welding tool

ZHOU Guang-ping¹, LIANG Zhao-feng¹, LIANG Ming-jun²

(1. Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

2. Shenzhen COGO Ultrasonic Rechnology Limited, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: A kind of large-dimension circular ultrasonic plastic welding tool composed of cylinder, shell and disk is brought forward, and an analysis of its coupled vibration is made. Meanwhile the designing and optimizing method based on FEA is developed. The result of analysis and optimization shows that the cylinder-shell tool has good vibration performance when the radial size is more than one wavelength, so the cylinder-shell plastic welding tool is a kind of new valid structure for the tool with large-dimension circular radiation surface .

Key words: coupled vibration; modal analysis; FEA; optimization design

1 引言

大尺寸超声焊接模具是超声塑料焊接中振动系统的一部分, 与塑料焊接件直接接触, 其振动特性如振幅分布的一致性对焊接质量起决定性作用。且超声波塑料焊接模具因焊件形状不同而不同, 因此模具类型很多, 需要专门设计。对于大尺寸圆形塑料焊接件, 需要设计专门的圆形塑料焊接模具, 来满足工程应用的需要。

在工程应用当中, 对于横向尺寸小于四分之一波长的模具, 可以利用一维理论来分析和设计, 而当横向尺寸大于四分之一而小于一个波长的大尺寸模具时, U 槽式结构模具可以达到良好的特性^[1,2]。对于横向尺寸接近甚至大于一个波长的模具, 由于径向振动与纵向振动的强烈耦合, 采用 U 槽式模具

结构会降低模具辐射面上的振幅一致性, 模具的辐射面上的纵向振幅分布呈现余弦曲线形状分布, 或模具的强度不好, 容易出现疲劳断裂的问题, 满足不了工程应用的要求。为解决这一问题, 本文提出一种采用圆柱、圆壳与圆盘组成的柱-壳式模具, 在模具辐射面上能够获得良好的振幅分布一致性^[3,4]。

2 大尺寸圆形超声塑料焊接模具的结构

为了在如图 1 所示的大尺寸圆形超声振动体的辐射表面得到一致性较好的纵向振幅, 必须减弱或抑制径向振动的产生。开槽是一种有效的减弱或抑

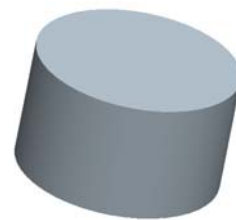


图 1 大尺寸圆形超声振动体

Fig.1 Large-dimension circular vibrator

收稿日期: 2008-09-13; 修回日期: 2008-11-05

基金项目: 广东省自然科学基金(07009027)

作者简介: 周光平(1963-), 男, 湖南双峰人, 博士, 教授, 研究方向为功率超声。

通讯作者: 周光平, E-mail: zhougp@oa.szpt.net

制径向振动的方法^[5,6]。与长条形超声塑料焊接模具类似, 在圆柱体内侧和外侧采用去除材料的方法, 即开槽的方法, 有助于提高外侧单元体的振幅一致性。基于这种思路本文提出如图 2 所示结构的大尺寸圆柱形超声塑料焊接模具。

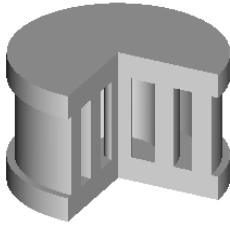


图 2 大尺寸圆形超声塑料焊接模具
Fig.2 Large-dimension circular ultrasonic plastic welding tool

若开槽后的模具纵向振动时能在其表面产生一致的振动特性, 则可将其分解为多个在连接处视为自由的振动单元体, 即多个单元的振动频率一致, 相位相同。根据以上分析及假设, 可将图 2 的结构分解为图 3 所示的几种单元体。

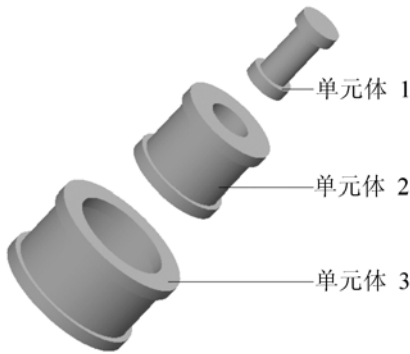


图 3 大尺寸圆形模具单元体
Fig.3 Elements of large-dimension circular tool

3 大尺寸圆形超声塑料焊接模具单元体的耦合振动分析

为了更好地研究单元体的耦合振动, 根据大尺寸圆形超声塑料焊接模具的轴对称性, 以及模具一阶纵向振动的特点, 简化模具为四分之一的轴向截面来进行研究, 如图 4 所示。

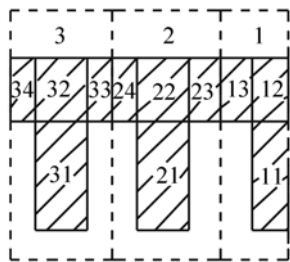


图 4 柱-壳式模具截面图
Fig.4 Sections of cylinder-shell tool

对不同的振动耦合情况, 其对应的表观弹性常数亦不同。由表观弹性法的定义, 根据弹性力学中应力应变的关系, σ_z 、 σ_r 、 σ_c 分别为某点所受的纵向应力、径向应力和周向应力, 可以推导出以下几种情形的纵向、径向和周向表观弹性常数 E_z 、 E_r 和 E_c , 如表 1 所示, 表中“-”表示不存在此方向的振动耦合。下标 z 表示存在纵向振动, 下标 r 表示径向振动, 下标 c 表示周向振动。圆柱体和圆壳部分在工作频率下薄圆柱体在径向存在两个柱节面, 即 13 与 23 部分的交界面、24 与 33 部分的交界面的径向振动位移为零。

表 1 模具各单元、部分存在的耦合振动
Table 1 Coupled vibrations of welding tool elements

		纵向	径向	周向
单元 1	11	E_{z11}	-	-
	12	E_{z12}	E_{r12}	-
	13	-	E_{r13}	E_{c13}
单元 2	21	E_{z21}	-	E_{c21}
	22	E_{z22}	E_{r22}	E_{c22}
	23	-	E_{r23}	E_{c23}
	24	-	E_{r24}	E_{c24}
单元 3	31	E_{z31}	-	E_{c31}
	32	E_{z32}	E_{r32}	E_{c32}
	33	-	E_{r33}	E_{c33}
	34	-	E_{r34}	E_{c34}

(1) 存在纵-径向耦合振动: 定义耦合系数 $n = -\frac{\sigma_z}{\sigma_r}$, 则:

$$E_z = \frac{E}{1+2\nu/n} \tag{1}$$

$$E_r = \frac{E}{(1-\nu^2)+n\nu(1+\nu)} \tag{2}$$

(2) 存在纵-周向耦合振动: 定义耦合系数 $n = -\frac{\sigma_z}{\sigma_c}$, 则:

$$E_z = \frac{E}{1+2\nu/n} \tag{3}$$

$$E_\theta = \frac{E}{(1-\nu^2)+n\nu(1+\nu)} \tag{4}$$

(3) 存在径-周向耦合振动: 定义耦合系数 $n = -\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta}$, 则:

$$E_r = \frac{E}{1+n\nu} \tag{5}$$

$$E_\theta = \frac{E}{1+\nu/n} \tag{6}$$

(4) 存在纵-径-周向耦合振动: 定义耦合系数 $n_1 = -\frac{\sigma_z}{\sigma_r}$ 、 $n_2 = -\frac{\sigma_r}{\sigma_c}$ 、 $n_3 = -\frac{\sigma_c}{\sigma_z}$, 则:

$$E_z = \frac{E}{1 + \frac{\nu}{n_1} + n_3 \nu} \tag{7}$$

$$E_r = \frac{E}{1 + \frac{\nu}{n_2} + n_1 \nu} \tag{8}$$

$$E_\theta = \frac{E}{1 + \frac{\nu}{n_3} + n_2 \nu} \tag{9}$$

以上分析表明，模具的振动十分复杂，解析法需要研究几种单元的对应该振动方向的振动方程，对此以后将进一步研究。下面介绍这类模具的有限元的优化及设计问题。

4 大尺寸圆形超声塑料焊接模具的模态分析及优化设计

根据前面对柱-壳式圆形模具的耦合振动分析，用解析法求解相对复杂。借鉴 U 槽式模具的设计方法，尽管模具的形状更加复杂，但利用模具结构的轴对称性，应用现有的计算机资源，离散化的数值方法仍能得到很好的应用，完全能够满足工程设计精度要求。圆壳的个数，根据薄圆柱体的半径来确定，这里以 2 个圆壳为例。对如图 5 所示的柱-壳式模具优化模型， R_1 为中心圆柱体的半径， R_2 、 R_3 分别为两个圆壳的等效半径(内外半径的几何平均值)， $2R_{22}$ 、 $2R_{33}$ 分别为对应圆壳的厚度， R_4 为薄圆柱体的半径， H_1 为薄圆柱体的高度，圆柱体和圆壳高度均为 $2H_2$ 。以 R_1 、 R_2 、 R_{22} 、 R_3 、 R_{33} 、 H_1 、 H_2 作为优化变量，以频率 f 作为状态变量，以辐射面上的振动幅度作为目标函数，对模型进行优化。

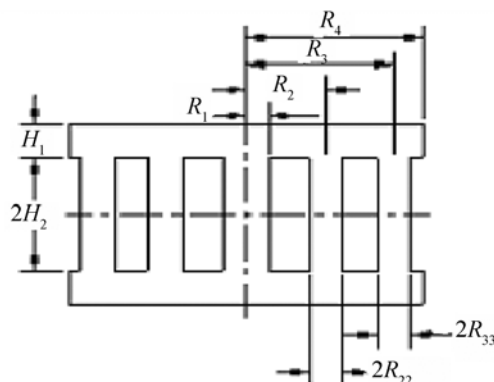


图 5 柱-壳式模具优化模型
Fig.5 Optimization model of cylinder-shell tool

对如图 5 所示的例子，假如设计一个频率为 20kHz 的模具，材料选用铝合金，其材料参数为：杨氏模量 $E=7.15E^{10}N/m^2$ ，密度 $\rho=2.79E^3kg/m^3$ ，泊松比 $\sigma=0.34$ 。在优化的过程中，可以根据实践经验来

设定设计变量的变化范围，根据工程中可接受的精确程度来设定状态变量频率 $FREQ$ 的范围，本例中设定频率的上下限分别为 $UPPER=20.1kHz$ ， $LOWER=19.9kHz$ 。由于模具结构具有轴对称性，纵向振动模态亦近似轴对称，因此定义辐射面上沿直径方向上的纵向振幅一致性 $UNIF=U_zmin/U_zmax$ ， U_z 为辐射面上纵向振动的幅度。应用一阶优化方法，设置步进百分比为 10%，设置前向差分百分比为 10%，优化循环次数为 9 次时，优化达到收敛。由优化数据可以得到设计变量与优化次数间的变化曲线如图 6 所示(以 H_1 为例)，状态变量与优化次数之间的关系曲线，如图 7 所示。其优化结果如表 2 所示。图 8 给出了优化后的模具辐射表面沿直径方向的振幅分布曲线。由优化结果可以看出，柱-壳式超声塑料焊接模具能够得到良好的振幅一致性，振动频率可以在优化的过程中逐渐逼近设定范围，这能保证优化后的结果能够很好地满足设计的要求。

5 结 论

研究表明，采用圆柱、圆壳、圆盘结构组成的柱-壳式大尺寸圆形塑料焊接模具，在辐射面上能够

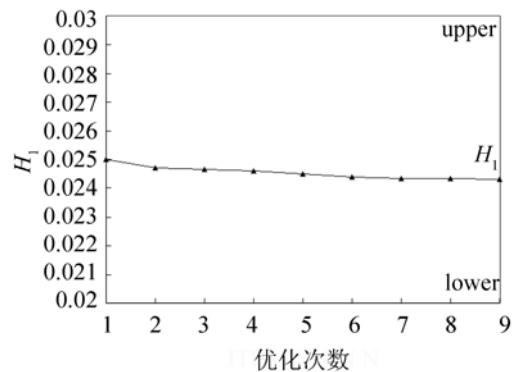


图 6 优化次数与设计变量 H_1 的关系
Fig.6 Relation between iteration and design variable H_1

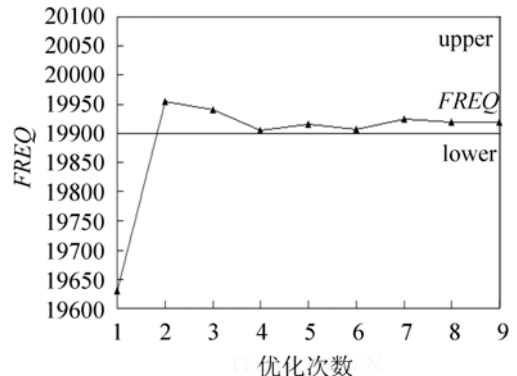


图 7 优化次数与状态变量 $FREQ$ 的关系
Fig.7 Relation between iteration and state variable $FREQ$

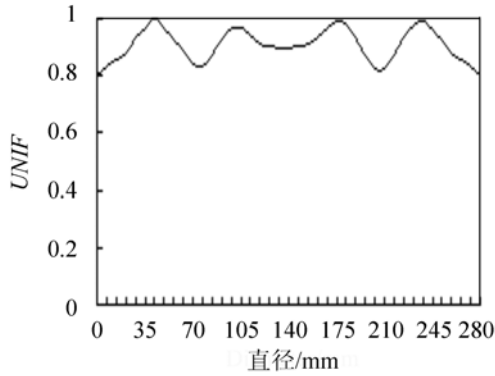


图 8 辐射表面沿直径方向的振幅分布
Fig.8 Distribution of vibration amplitude along diameter on the radiation surface

表 2 柱-壳式模具优化数据
Table 2 Optimal results of cylinder-shell tool

	参数	初始值	优化值
设计 变 量	H_1	0.025	0.024297
	H_2	0.058	0.057811
	R_1	0.032	0.031858
	R_2	0.070	0.069996
	R_{22}	0.014	0.013664
	R_3	0.117	0.11745
	R_{33}	0.011	0.011441
状态变量/kHz	f	19.632	19.919
振幅一致性/%	$UNIF$	70.36	79.81

获得良好的振幅分布一致性。通过有限元分析及优

化的方法,可以得到大尺寸超声塑料焊接模具良好的各项性能,因此柱壳式超声塑料焊接模具是一种有效的新型模具结构。

参 考 文 献

- [1] 周光平, 梁召峰, 梁明军, 等. U 槽式大尺寸圆形超声塑料焊接模具[J]. 声学技术, 2008, 27(2): 287-289.
ZHOU Guangping, LIANG Zhaofeng, LIANG Mingjun, et al. Large ultrasonic plastic welding tool with U slots[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(2): 287-289.
- [2] 梁明军. 超声振动体耦合振动研究[D]. 南昌航空工业大学硕士学位论文, 2004.4.
LIANG Mingjun. Study on coupled vibration for ultrasonic vibrators[D]. Nanchang HangKong University, 2004.4.
- [3] Margaret Lucas. Vibration sensitivity in the design of ultrasonic forming dies[J]. Ultrasonics, 1996, 34(1): 35-41.
- [4] Mori E, Ioh K, Imamura A. Analysis of a short column vibrator by apparent elasticity method and its application[A]. Ultrasonic International 1997 Conference Proceedings[C]. IPC Science and Technology Press. 1977, 262-266.
- [5] 林书玉, 张福成. 大截面超声变幅杆的近似设计理论[J]. 声学技术, 1990, 9(4): 10-13.
LIN Shuyu, ZHANG Fucheng. Approximate design theory of large dimension ultrasonic horns[J]. Technical Acoustics, 1990, 9(4): 10-13.
- [6] 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, 11(4): 24-28.
LIN Shuyu, ZHANG Fucheng. A study of large dimension vibrating systems and their transverse slotting[J]. Technical Acoustics, 1992, 11(4): 24-28.