

ANSYS 辅助楔形超声波聚能器的优化设计和实验研究

喻 强, 周红生, 许小芳, 王 欢, 张 华, 周 斌

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 使用有限元分析方法, 设计了一种楔形超声波聚能器。通过对其进行模态分析和谐响应分析, 优化聚能器的结构, 保证所设计的聚能器能具有较纯的纵振模式、辐射面振幅分布均匀。为了验证有限元分析结果, 在水介质中进行了相关的空化腐蚀实验。实验证明, 聚能器工作时, 辐射面振幅分布均匀性较好, 侧面无明显横振。

关键词: 聚能器; 有限元; 振幅分布; 横向振动;

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-01-0107-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.01.025

The optimal design aided by ANSYS and experiment research on ultrasonic wedge horn

YU Qiang, ZHOU Hong-sheng, XU Xiao-fang, WANG Huan, ZHANG Hua, ZHOU Bin

(Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: In this paper, an ultrasonic wedge horn is designed by FEM method. In order to optimize the structure of the wedge horn, the modal analysis and harmonic analysis are conducted. This can give a guarantee to get a longitudinal vibration pattern, and help to homogenize the amplitude distribution on the radiant surface of the wedge horn. Some cavitation corrosion experiments of the wedge horn are performed in water to check the result of FEM method. There is no distinct transverse vibration while wedge horn is running, and the amplitude is evenly distributed on the radiant surface.

Key words: wedge horn; FEM; amplitude distribution; transverse vibration

1 引言

功率超声设备主要由四部分组成: 超声波聚能器、大功率超声波换能器、电功率发生器以及功率声源与换能器之间的匹配电路^[1]。超声波聚能器是功率超声设备的关键器件之一, 在高强度超声振动系统中其主要作用是: 进行位移(振幅)放大、能量会聚、作为机械阻抗变换器、作为过渡单元实现换能器与工作媒质之间隔热、在聚能器波节位置固定整个振动系统等^[2]。

有限元分析法是目前进行超声聚能器设计时常用且有效的分析方法。其本质是数值计算中的一种离散化方法, 在每个单元的物质特性及节点载荷、边界条件明确后, 通过节点、位移与节点力之间的关系式计算出每个单元的刚度矩阵, 并通过数学形式表达出来, 最后通过数学表达式的特征值来

得到构件的固有频率。有限元法计算精度高, 能适应各种复杂形状的换能器, 是一种高效的工程分析手段^[3]。

ANSYS 是一种通用的有限元软件, 能从聚能器的形状、尺寸出发, 对其进行自由模态分析, 求取各阶固有频率和对应的振型; 能进行谐响应分析, 求得聚能器在某种激励下的响应行为, 获取聚能器的振幅分布、应力分布等重要信息; 能进行结构声辐射的耦合场分析, 求取聚能器在媒质中的辐射声场分布^[3]。利用 ANSYS 软件, 可以高效、精确地进行各种复杂聚能器的设计。

2 楔形聚能器应用时常见的问题

楔形聚能器是一种常用的聚能器, 利用其纵振模式传递超声能量, 在超声波焊接、超声波处理等领域应用广泛。

楔形聚能器在使用时, 存在以下几种常见的问题^[4-5]:

(1) 纵振聚能器辐射面的振幅分布不均匀, 甚

收稿日期: 2009-08-05; 修回日期: 2009-11-22

作者简介: 喻强(1982-), 男, 助理研究员, 研究方向为超声应用。

通讯作者: 喻强, E-mail: yq_salas@126.com

至出现较大的横向振动，影响工作效果；

(2)为了改善楔形聚能器辐射端面的振幅分布均匀性，通常会在振头中开一些长槽或者狭缝以消除部分横振。但是如果设计不合理，所开长槽边缘容易开裂，造成聚能器失效；

(3) 聚能器的纵振谐振峰与其邻近的其它模式的谐振峰频率间隔太小。系统工作时邻近的谐振峰会带来影响，造成换能器发热，工作效率降低，甚至损坏。

3 半波长楔形聚能器的设计

本文以某工程应用作为背景，设计一只半波长超声波聚能器。要求楔形聚能器的下辐射端面厚度为 $B_2=32\text{mm}$ ，宽度为 $D=236\text{mm}$ 。如图 1 所示，聚能器材质选用钛合金。

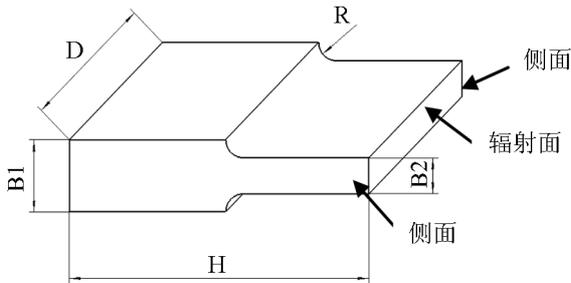


图 1 楔形聚能器示意图
Fig.1 Sketch of Wedge horn

3.1 设计目标

- (1) 振动模式：纵向谐振；
- (2) 谐振频率 F_s ：19.2kHz；
- (3) 辐射面振幅分布均匀：最小位移/最大位移 ≥ 0.8 ；
- (4) 聚能器侧面无明显横向振动：辐射面上靠近侧面的质点的横向振动位移远小于其在激励方向的振动位移；
- (5) 纵振谐振峰远离其相邻的其它模式的谐振峰：频率间隔 $\geq 500\text{Hz}$ 。

3.2 楔形聚能器的模态分析

(1) 模型建立

以 Pro/E wildfire4.0 为工具，建立有限元分析模型，保存为 IGES 格式文件，以便 ANSYS 能识别模型。

(2) 定义材料属性和网格划分

选择 solid95 单元。solid95 是 3 维 8 节点实体单元 solid45 的高阶版本。它可以适应复杂形状的聚能器而不会损失太多的精确度。solid95 单元具有

协调的位移性质函数，可以很好地拟合模型的曲线边界。solid95 单元包括 20 个节点，每个节点有 3 个自由度(在 x 、 y 和 z 方向的平移)。单元方向可以是任意的。solid95 具有塑性、蠕变、应力刚度、大变形和大应变能力。

定义单元长度为 0.005m。设置钛合金材料的属性：密度 $\rho=4510\text{kg/m}^3$ ，弹性模量 $E_x=116\text{GPa}$ ，泊松比 $\sigma=0.32$ ，网格划分如图 2 所示。

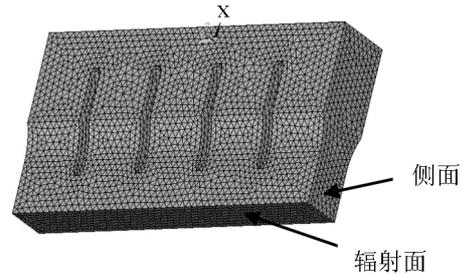


图 2 有限元网格划分图
Fig.2 Meshing of analysis model

(3) 模型求解与后处理

程序求解完成后，可以通过 General Postproc 查看相关结果。所设计的聚能器模型的一阶纵振谐振频率为 19.269kHz，与该谐振频率邻近的两个峰点的振动类型及频率间隔如表 1。

表 1 聚能器的纵向振动及邻近谐振峰比较

Table 1 Comparison between the frequencies of the longitudinal vibration and the vibration nearby

振型种类	振动频率/kHz	频率间隔/Hz
弯曲振动	18.528	$\Delta f_1=741$
纵向振动	19.269	
扭曲振动	20.406	$\Delta f_2=1137$

图 3 是聚能器纵向振动的振型图，云图颜色代表了不同的位移大小。可见，聚能器辐射面的振幅中心大，向两侧面依次减小。

在厚度 $B_2=32\text{mm}$ 的辐射面上选择一条路径，求取该路径上的质点位移分布规律。将模态分析的质

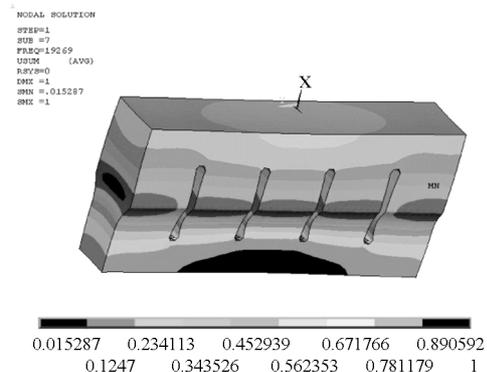


图 3 聚能器纵向振动振型图
Fig.3 The vibration mode of horn

点位移归一化, 观察该面上质点总位移($USUM$)分布的均匀性(如图 4 所示)。聚能器两侧质点的总位移约为中心质点处总位移的 83%。可见, 聚能器的振幅分布均匀性较好。

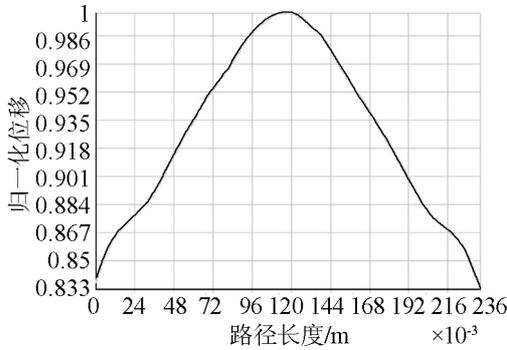


图 4 模态分析位移归一化

Fig.4 The normalized displacement in modal analysis

3.3 楔形聚能器的谐响应分析

通过模态分析, 计算出该结构尺寸的聚能器的谐振频率为 19.269kHz。在聚能器的上端面直径为 $\phi 38\text{mm}$ 的面上施加 $5\mu\text{m}$ 的正弦激励信号, 激励方向为纵向(x 方向)。图 5 是聚能器的谐响应振型图。

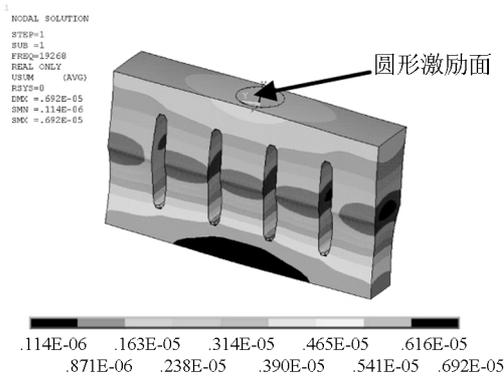


图 5 聚能器谐响应分析振型图

Fig.5 The vibration mode of horn in harmonic analysis

如图 6 所示, 辐射面上质点在激励方向(x 方向)发生的最大位移为 $6.92\mu\text{m}$, 这些质点位于聚能器的中心位置。 x 方向辐射面上靠近侧面的质点的最大位移为 $5.7\mu\text{m}$, y 方向辐射面上靠近侧面的质点的最大位移为 $0.12\mu\text{m}$, z 方向辐射面上靠近侧面的质点的最大位移为 $0.018\mu\text{m}$ 。显然, 谐振时, 辐射面上的质点在 x 方向发生位移远大于其它两个方向(y 、 z 方向)上的位移。即, 辐射面上质点的横向振动位移很小。

通过软件后处理可以察看聚能器工作时的应力分布情况, 如图 7 所示。等效应力最大位置在聚能器的圆弧面上。最大等效应力值为 20.8MPa , 远小

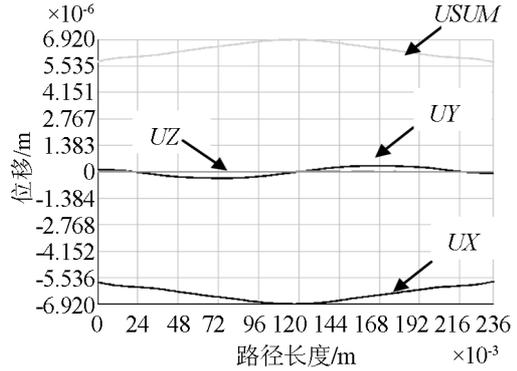


图 6 辐射面质点在 x 、 y 、 z 方向上的最大位移分布

Fig.6 The displacement on the radiant surface in x 、 y 、 z direction

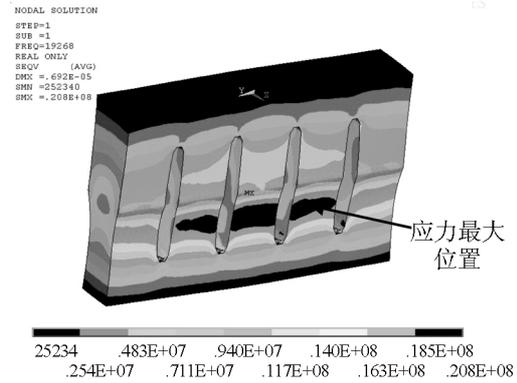


图 7 谐响应分析中等效应力分布

Fig.7 The distribution of SEQV in harmonic analysis

于钛合金材料的抗拉强度极限(约 895MPa)。

3.4 楔形聚能器的优化设计

为了进一步优化聚能器的结构, 使辐射面上质点的振幅分布更均匀, 可以通过改变长槽的长度、宽度及槽之间的相对位置等措施来实现。图 8 是优化设计后的聚能器的模态分析归一化后的振动位移分布图。

由图 8 可见, 优化后聚能器的辐射面位移均匀性有所提高, 聚能器两侧质点的总位移约为中心质点处总位移的 89%。

在优化后的聚能器上端面, 直径为 $\phi 38$ 的面上同样施加 $5\mu\text{m}$ 的正弦激励, 激励方向为纵向(x 方向)。

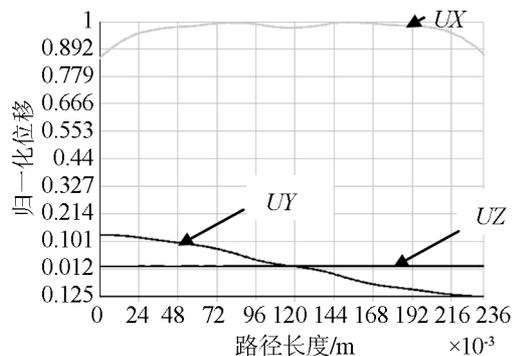


图 8 辐射面质点在 x 、 y 、 z 方向上的最大位移分布

Fig.8 The displacement on the radiant surface in x 、 y 、 z direction

如图 9 所示,辐射面上质点在激励方向(x 方向)发生的最大位移为 $6.78\mu\text{m}$,这些质点位于聚能器的中心位置。 x 方向辐射面上靠近侧面的质点的最大位移为 $5.78\mu\text{m}$, y 方向辐射面上靠近侧面的质点的最大位移为 $0.8\mu\text{m}$ 。 z 方向辐射面上靠近侧面的质点的最大位移为 $0.03\mu\text{m}$ 。显然,谐振时,辐射面上的质点在 x 方向发生的位移远大于其它两个方向(y 、 z 方向)上的位移。即辐射面上质点的横向振动位移很小。

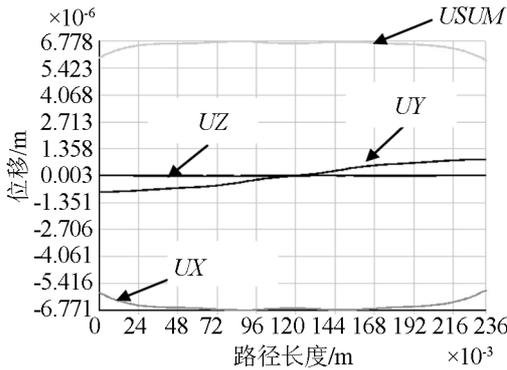


图 9 辐射面质点在 x 、 y 、 z 方向上的最大位移分布
Fig.9 The displacement on the radiant surface in x 、 y 、 z direction

考虑到聚能器在实际工作中容易产生裂纹而损坏,可以对其应力分布等做进一步优化设计。

4 楔形聚能器的空化腐蚀实验

为了验证有限元分析的结果,我们制作了一只钛合金振头。并在水中进行了实验。

4.1 实验方法

聚能器正常工作时,将一块厚度为 3mm 的铝合金板正对着聚能器的辐射面。铝合金板在高强度超声波的作用下,会产生空化腐蚀。观察铝合金板的腐蚀情况,可判断聚能器辐射面的振幅分布均匀性。

让聚能器长期工作 500h 后,观察聚能器辐射面的空化腐蚀情况。

4.2 实验结果

聚能器在水中工作时,超声沿着辐射面的法线方向辐射。辐射器侧面没有水花飞溅。图 10 所示为铝合金板在聚能器的超声作用 20min 后的腐蚀情况。

聚能器在水介质中进行空化实验。工作 500h 以后,聚能器的辐射面上出现了明显腐蚀深坑,如图 11 所示。

空蚀坑深度最大达到 $1306.7\mu\text{m}$ 。空化腐蚀表面的局部三维放大视图如图 12 所示。

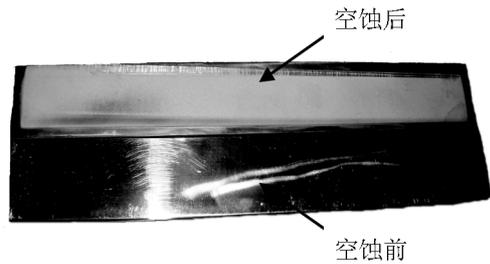


图 10 铝合金板超声腐蚀前后对比实验
Fig.10 Cavitation corrosion experiment for aluminium alloy plate

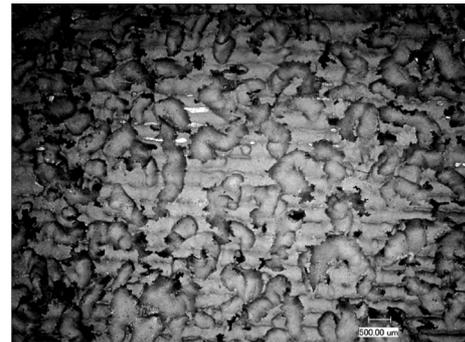


图 11 辐射面的空化腐蚀
Fig.11 The cavitation corrosion on the radiant surface

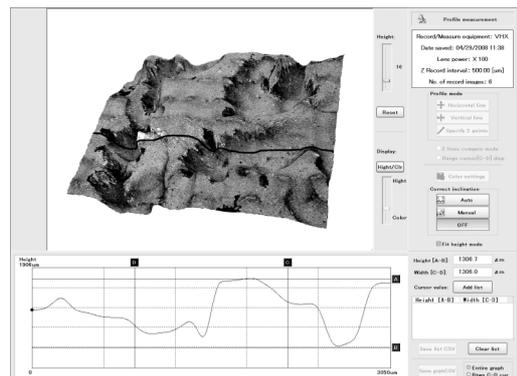


图 12 聚能器空化腐蚀表面的局部三维图
Fig.12 The local 3-D graph of the cavitation corrosion on the radiant surface

从实验结果可以看出,聚能器工作时,铝合金板的腐蚀比较均匀,说明辐射面的超声分布比较均匀。但聚能器在高强度超声的长时间作用下,辐射面容易产生空化腐蚀。

5 结 论

- (1) 有限元分析法是进行聚能器设计的一种有效方法,能对复杂形状的超声波聚能器进行高效、可靠设计,计算精度较高。
- (2) 优化设计的超声波聚能器辐射面的振幅分布比较均匀,辐射面上质点的横向振动位移远小于纵向振动位移。
- (3) 在高强度超声波的长时间作用下,超声波

聚能器的辐射面容易产生空化腐蚀。未来需要进行一些相关的研究,通过改变辐射器的材质与金相结构、表面处理等措施来提高聚能器的抗空化腐蚀的能力。

参 考 文 献

- [1] 袁易全. 近代超声原理与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996.
YUAN Yiquan. Ultrasonic principle and application in modern times[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1996.
- [2] 贺西平, 高洁. 超声变幅杆设计方法研究[J]. 声学技术, 2006, 25(1): 83-86.
- [3] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1279-1290.
MO Xiping. Simulation and analysis of acoustics transducers using the ANSYS software[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1279-1290.
- [4] Cardoni A, Lucas M. Enhanced vibration performance of ultrasonic block horns[J]. Ultrasonic, 2002, 40(2): 365-369.
- [5] Adachi K, Ueha S. Modal vibration control of large ultrasonic tools with the use of wave-trapped horns[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1990, 87(1): 208-214.

第二届中国韩双边超声无损评估学术会议在同济大学召开

日前,由同济大学声学研究所主办,国家自然科学基金委、韩国科学与工程基金会、上海市科学技术协会、上海市声学学会资助的第二届中国韩双边超声无损评估学术会议在同济大学召开。

会上,大会主席、上海市声学学会理事长、同济大学声学所钱梦麟教授和同济大学科技处张军副处长致欢迎辞。来自世界无损评估中心的副主任、美国 Iowa 州立大学 Schmerr 教授,韩国无损检测协会理事、城均馆大学宋城镇教授等 10 多位外国学者,以及中科院上海市硅酸盐研究所殷庆瑞研究员,同济大学声学所胡文祥教授,中科院声学所张碧星研究员,南京大学声学所徐晓东副教授等在会上分别作了特邀报告和大会报告,就中韩两国近三年来的超声无损评估的最新研究成果/创新技术等作了充分交流。中国无损检测协会副理事长、中科院声学所沈建中研究员,陕西师范大学理学院院长林书玉教授,中科院声学所吴先梅副研究员等多位学者,以及中科院声学所东海站、上海市 726 研究所、复旦大学、华东理工大学、上海大学、《声学学报》编辑部、《声学技术》编辑部等多家单位的专家学者出席了会议,与报告人展开了热烈讨论。同济大学声学所的全体研究生和物理系声学方向的本科生也参加了会议,学习国际前沿的先进无损检测技术。两国的会议论文还将在《声学学报》英文版上全文发表。

同济大学声学研究所 程茜

