用于声化学的复合换能器的研究

张永元[1], 吴胜举[2], 庞绍芳[1]
(1. 西安科技大学基础部, 西安 710054; 2. 陕西师范大学应用声学研究所, 西安 710062)

摘要: 设计了一种夹心式纵弯复合振动模式超声换能器,该换能器由纵向夹心式压电超声换能器与弯曲正六边形薄板组成。采用有限元方法,对一定几何尺寸边界自由的正六边形薄板进行模态分析,得到中心位移最大的某一模态,设计以该模态的频率作为共振频率的纵弯复合模式换能器。当复合振动系统振动模式的共振频率与纵向换能器的共振频率以及正六边形薄板弯曲振动的共振频率一致时,复合振动系统具有较高的有效机电耦和系数,系统声辐射能力较强;频率的理论与测量值的误差可能是设计纵向换能器时未考虑预应力螺栓、前后盖板的形状以及横向振动的影响,材料参数的取值与实际值有误差。弯曲振动的正六边形薄板的几何尺寸大,将会增大复合振动系统声波的辐射面积,因此可以改善局部空化腐蚀问题,并且可以提高槽内声场的均匀性,从而可以提高声化学产率;实验结果表明,换能器的共振频率测试值与设计值基本吻合。

关键词: 声化学;纵弯复合振动;夹心式;换能器;共振频率
中图分类号: O426 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2007)-06-1300-04

The composite mode ultrasonic transducer for sonochemsitry

ZHANG Yong-yuan[1], WU Sheng-ju[2], PANG Shao-fang[1]
(1. Departmentof Basic Courses, Xi'an University of Science and Technology, 710054 Xi'an, Shannxi, China;
2. Applied Acoustic Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, a longitudinal-flexural composite mode ultrasonic transducer composed of the sandwich longitudinal mode ultrasonic transducer and the flexural regular hexagon plate is studied. The FEM (finite element method) is adopted to analyze the pattern of the regular hexagon plates, which have a certain geometric size and a free border, and then get a pattern having the largest central displacement. A longitudinal-flexural composite mode ultrasonic transducer is designed with the pattern's frequency as the resonance frequency. The experiment shows that the measured frequency is in agreement with the calculated one.

Key words: sonochemistry; longitudinal-flexural composite vibrations; sandwiched transducer; resonant frequency

1 引 言

进行声化学研究、实现声化学反应的重要场所是声化学反应器, 声化学反应器是指有超声波引入并在其作用下进行化学反应的容器或系统, 与一般的化学反应器不同, 声化学反应器包括反应溶液的空间以及换能器两部分[1-3]。反应溶液和换能器之间属于耦合体系, 并且声化学反应的引发是通过超声的空化效应,声空化是声化学反应的主动力。而声空化的形成、状态和强度与诸多的声学参量相关。当反应溶液物理、化学属性一定时,声化学产率的高低主要取决于声化学反应器的形状和换能器及其阵列所产生的声场以及空化场的分布[4,5]。反应器内的声场分布越均匀,越有利于提高声化学产率。因此,对于声化学反应器的设计,必须考虑换能器本身的参数。

收稿日期: 2006-09-14; 修回日期: 2006-12-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10474061, 10074042)
作者简介: 张永元(1980-),女,宁夏人,硕士,助教,研究方向:声学测量。
通信作者: 张永元, E-mail: zyypapers@126.com

目前，实验室常用的清洗槽式声化学反应器所用的换能器一般都为夹心式压电换能器，这类换能器由于辐射面积比较小，因此容易产生局部空化腐蚀，从而造成反应器内声场分布不均匀。为了改善反应器内的声场分布，本文设计了纵弯复合模式换能器，该换能器由纵向夹心式换能器与弯曲正六边形薄板组成，由于弯曲振动的正六边形薄板的几何尺寸可以很大，因此，将此类换能器用于清洗槽式声化学反应器，即在纵向振动夹心式换能器与清洗槽式声化学反应器之间增加一个弯曲振动正六边形薄板，将会增大声波的辐射面积，并且可以提高槽内声场的均匀性，从而可以提高声化学产率。

2　复合振动模式换能器的设计理论

由于研究的振动系统包括纵向振动的夹心式换能器以及弯曲振动正六边形薄板，为了保证复合系统的高效工作，振动系统必须处于共振状态，因此必须研究系统的共振频率。

2.1　弯曲振动正六边形薄板

由于正六边形薄板弯曲振动的复杂性，其振动方程无解析解，其共振频率方程也不能得到，因此采用有限元方法，对一定几何尺寸的正六边形薄板进行模态分析。

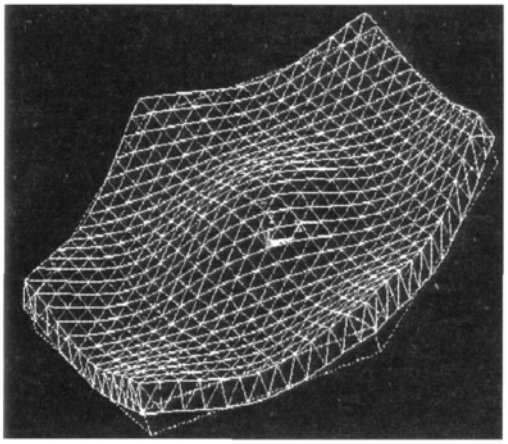


图 1　正六边形薄板模态振形（f=32337Hz）

Fig.1　Modal shape of a thin hexagonal plate（f=32337Hz）

对边长为 a=0.05m，厚度为 h=0.0045m 边界自由的正六边形薄钢板进行模态分析，其材料泊松比 σ=0.28，杨氏模量 E=19.5×10^{10}N/m^2。参数分别为：密度 ρ=7.8×10^{3}kg/m^3。得到中心位移幅值最大的模态振形如图 1 所示。以该模态频率作为整个复合系统的共振频率，设计纵弯复合模式换能器。

2.2　纵向振动夹心式压电换能器

设计的夹心式压电换能器如图 2 所示，该换能器的前后金属盖板分别为圆台形和圆柱形，且换能器的节面位于压电陶瓷内部，则换能器可看成是两个 1/4 波长振子的组合，其共振频率方程为[6,7]：

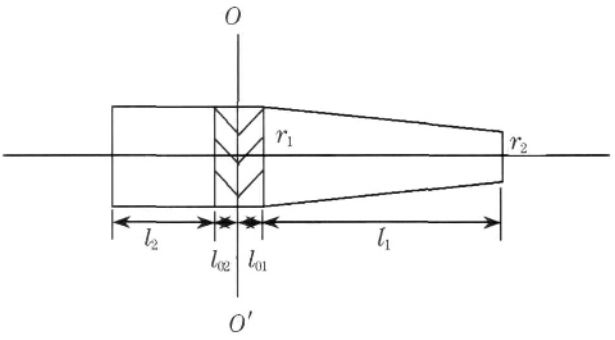


图 2　纵向夹心式换能器示意图

Fig.2　Sketch map of the sandwich longitudinal ultrasonic transducer

$$\tan k_0 l_{01} \tan k_2 l_2 = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_2 c_2} \tag{1}$$

$$\tan k_0 l_{02} = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1} \frac{F k_1 l_1 [(1+F)] k_1 l_1 - \tan k_1 l_1}{\{[1+F(F+1)(k_1 l_1)^2] \tan k_1 l_1 - k_1 l_1\}} \tag{2}$$

式(1)、(2)分别为半波长换能器节面前后两部分的共振频率方程，式中 l_1、l_2、l_{01} 及 l_{02} 分别为前盖板、后盖板以及节面前后压电陶瓷片的长度，ρ_0、ρ_1、ρ_2 以及 c_0、c_1、c_2 分别为压电陶瓷、前、后盖板材料的密度、纵向声速。$F=r_1/r_2$，r_1 为延展系数，r_2、r_1 分别为前盖板前后端面的半径。$k_0=\omega/c_0$，$k_1=\omega/c_1$，$k_2=\omega/c_2$，分别为各部分的波数，$\omega=2\pi f$，f 为振子的共振频率。

3　实　验

以边界自由正六边形薄板弯曲振动频率 f=32.337kHz 为复合系统的共振频率，设计加工了纵弯复合模式换能器。纵向换能器的前后金属盖板分别为硬铝和 45 号钢，材料参数取值为：ρ_1=2.7×10^{3}kg/m^3，ρ_2=7.8×10^{3}kg/m^3，c_1=5 040m/s，c_2=5 050m/s。压电陶瓷片为 PZT-4 薄圆环，其规格为 ϕ×38×ϕ16×5。压电陶瓷材料参数取值为的几何尺寸为：外直径为 38mm，内径为 16mm，厚度为 5mm。其材料参数分别为：ρ_0=7.5×10^{3}kg/m^3，c_0=2950 m/s。

3.1　振动系统共振频率的测量

用Ⅲ型压电阻抗分析系统对所设计的纵弯复合模式换能器的共振频率进行测量，测量结果见表 1，其中 f_{Td} 以及 f_{Tm} 分别为夹心式纵向换能器共振频率的理论设计值与实验测量值，f_{bd} 为正六边形薄板弯曲振动的理论设计值，f_c 为纵弯复合模式换能器共振频率的实验测量值。

表1 纵弯复合模式换能器共振频率的设计值以及测量值

Table 1 The calculated and the measured resonance frequency

h/mm	a/mm	f_{Td}/mm	f_{Tm}/mm	f_{bd}/mm	f_c/mm
4.5	50.0	32.337	31.544	32.337	34.196

从表中可以看出，复合系统各个部分的共振频率的理论设计值与实验测量值基本一致，复合系统的共振频率与各个部分的共振频率也基本一致。

3.2 复合振动系统的多种振动模式

通过测量复合振动系统的共振频率，发现复合系统除了设计频率以外，还存在其他多个共振频率，即复合系统存在多个振动模式。为了研究这些振动模式的振动性能，测量了不同振动模式复合振动系统的有效机电耦合系数 K_{eff} 和位移分布。

对复合振动系统不同振动模式的有效机电耦合系数 K_{eff} 进行测量，具体结果见表2。

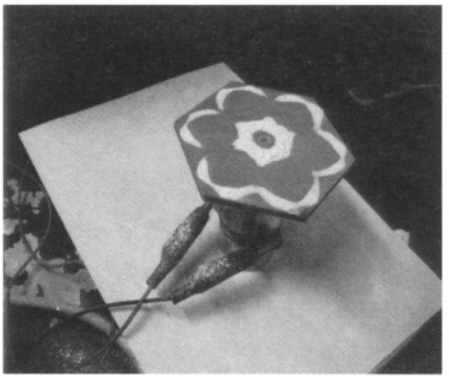
表2 不同振动模式有效机电耦和系数

Table 2 The effective electromechanical coupling coefficient of different vibration modes

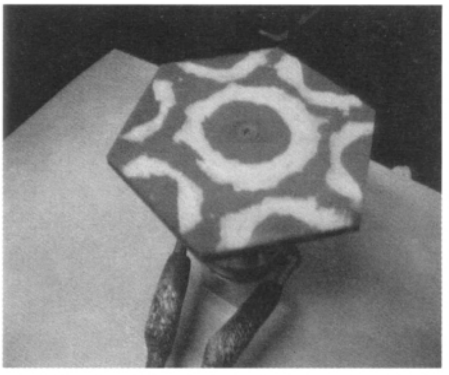
共振频率/kHz	模式一	模式二	模式三
K_{eff}	25.215	34.196	44.750
	0.318	0.254	0.208

K_{eff} 定义为无负载的压电换能器在机械谐振时，贮存的机械能与贮存的全部能量比值的平方根。由 K_{eff} 的定义可知，K_{eff} 越大，复合振动系统的机电转换效率越高，因此，复合振动系统的有效机电耦合系数 K_{eff} 可以定性地表示复合振动系统的机电能量转换的大小。从表2中的测量结果可以看出，当复合振动系统振动模式的共振频率不等于纵向换能器的共振频率与正六边形薄板弯曲振动的共振频率时，即与设计的复合系统的共振频率不相等时，复合振动系统的有效机电耦合系数较小；而当复合振动系统振动模式的共振频率与设计的复合系统的共振频率相符时，复合振动系统具有较高的有效机电耦合系数，因此，当复合振动系统工作于这一振动模式时，振动系统具有较高的机电转换效率。

在复合振动系统的辐射面板上撒一些粉末，当复合系统在某一振动模式下振动时，粉末将集中在振动位移的节线上。因此，粉末的分布图案就是板的位移节线分布图。由于现有与换能器阻抗匹配较好的超声信号发生器可用输出频率范围是18kHz~40kHz，因此只能对复合振动系统的振动模式一、振动模式二的位移节线分布图进行测量。测量结果如图3所示。从图中可以看出，实验测量结果与理论设计一致。



(f=25.215kHz)



(f=34.196kHz)

图3 位移节线分布图

Fig.3 The displacement map

4 结 论

本文设计了由纵向夹心式换能器与弯曲六边形薄板组成的复合振动系统，测量了复合振动系统中的各个振动模式的振动情况及其及机电转换能力。总结上述内容可得以下结论：

(1) 由纵向换能器与弯曲六边形薄板组成的复合振动系统由多个共振频率，即复合系统存在多个振动模式。但是，只有当复合振动系统振动模式的共振频率与纵向换能器的共振频率以及正六边形薄板弯曲振动的共振频率一致时，复合振动系统具有较高的有效机电耦和系数。因此，当复合振动系统工作于这一振动模式时，系统声辐射能力较强。

(2) 频率的理论设计值与测量值的误差可能是因为：设计纵向换能器时未考虑预应力螺栓、前后盖板的形状以及横向振动的影响；材料参数的取值与实际值有误差。

(3) 弯曲振动的正六边形薄板的几何尺寸大，将会增大复合振动系统声波的辐射面积，因此可以改善局部空化腐蚀问题，并且可以提高槽内声场的均匀性，从而可以提高声化学产率。

参 考 文 献

[1] 刘岩，丁锁根，义树生. 声化学反应器设计研究进展[J]. 化学工程，1999，30(4)：17-18.
LIU Yan，DING Suogen，YI Shusheng. The advance in sonochemical reactor design[J]. Chemical Engineering，1999，30(4)：17-18.

[2] 张颖，林书玉. 实验室中的声化学研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版)，2001，29(2)：110-116.
ZHANG Ying，LIN Shuyu. Research on sonochemistry in laboratory[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)，2001，29(2)：110-116.

[3] 何北星，方启平，颜忠余，等. 用于声化学研究的大功率超声系统的研制[J]. 声学技术，1996，15(4)：184-187.
HE Beixing，FANG Qiping，YAN Zhongyu，et al. Design and development of high-powerful transonic system used for sonochemical research [J]. Technical Acoustics，1996，15(4)：184-187.

[4] Berlan J，Masun TJ. 题名 Ultrasounics[J]. 1992，30(4)：203-212.

[5] 沈壮志，尚志远. 四棱台容器对声化学产率的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版)，1999，27(4)：41-43.
SHEN Zhuangzhi，SHANG Zhiyuan. Effect of quadrangular frustum of a pyramid on sonochemical yield[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)，1999，27(4)：41-43.

[6] 路德明. 水声换能器原理[M]. 青岛：青岛海洋大学出版社，1999. 174-178.
LU Deming. The principle of underwater sound transducer [M]. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press，1999. 174-178.

[7] 陈桂生. 超声换能器的设计[M]. 北京：海洋出版社，1989. 208-210.
CHEN Guisheng. The design of ultrasonic transducer[M]. Beijing: Ocean Press，1989. 208-210.

简　讯

中国声学学会六届二次理事扩大会议纪要

中国声学学会于 2007 年 9 月 15 日在武汉召开了有理事、理事代表、各分会、地方学会代表参加的六届二次理事扩大会议。

田静理事长主持会议并讲话，副理事长宗健研究员传达了中国科协 2007 年学会工作会议精神。并对中国科协书记处第一书记邓楠同志所作的题为 “振奋精神、开拓创新、为建设充满生机和活力的现代科技团体而努力奋斗”的重要讲话作了全面传达。宗健副理事长强调指出，大家要按照中国科协的要求，努力把我会建设成充满生机和活力的现代科技社团。为此我们一要着力加强学术建设，增强自主创新的能力；二要着力发挥智力优势，服务经济社会发展；三要加强服务意识，增强学会对会员的凝聚力；四要着力夯实组织基础，提高学会服务能力；五要着力处理好改革与发展，学会为会员提供服务与规范行为，学术建设与服务社会等几个关系，推动学会健康发展。

会上对中国声学学会在井冈山召开的中国声学学会六届二次常务理事扩大会议向理事会做了汇报。

副理事长杨德森教授向各位代表介绍了中国声学学会会徽产生的情况，与会代表对此展开了热烈讨论，并决定进一步充实完善后使用该会徽。

副理事长程建春教授介绍了有关学科进展年报的事宜，他介绍了各分会对此事重视和进展情况，大家讨论后认为声学近年来发展很快，我们要积极行动起来，对本领域的发展提出权威性的意见和建议，以表现出自身的学术水平，逐步提高自身的威望，学科进展年报预计在今年 10 月完成初稿，修改后印刷出版。

宗健副理事长向各位代表汇报了学会上半年的工作，同时对第一次理事长会议和六届二次常务理事会议的内容、决定及声学学会的工作计划作了全面说明。他指出，为抓好学会的学术活动，以后把每四年一次的学术年会改为每两年一次，与两年召开一次的青年学术会议交叉进行，以保证学会每年都有大会召开，并且在同时大会召开理事会，这样既保证了学术交流，又保证了理事会的程序化和规范化，便于大家及时交流情况，推动我会的工作开展。

2006 年 10 月学会在完成了换届改选工作后，学会办公室完成了社团法人变更工作，通过了中国科协、民政部 2006 年度年检及 2006 年度组织机构代码证书的年检工作，同时完成了分支机构年审换证，配合中国科协完成了中国科学院、中国工程院院士候选人的推荐工作，完成了中国声学学会六届二次常务理事会的组织准备工作和本次在武汉召开的 2007 年中国声学学会青年学术会议的准备工作，并向理事汇报了 2007 年中国声学学会青年学术会议的准备情况。

宗健副理事长还向代表通报了学会网站的建设情况。

会议代表对学会工作进行了讨论，大家认为，会员是学会的基础，会员发展工作纳入学会的工作日程非常重要。声学学会作为声学领域的科技工作者的组织，其宗旨就是为会员服务，通过服务扩大学会的影响，提升学会的水平，增强学会的实力，进而吸引更多的科技工作者参与到学会活动中来。特别要注意在企业中发展会员，使学会工作既要促进学科、学术发展，又能更好地贴近社会实际，促进社会经济发展。发展会员可采用多种形式，注意发挥团体会员单位、地方学会和理事个人的作用。通过会员介绍和网上登记等方便科技工作者入会。有代表提出以后召开理事会准备工作要做的更好些，日程安排更紧凑些，对开会