

夹心式功率超声压电陶瓷换能器的工程设计

林书玉

(陕西师范大学应用声学研究所, 西安 710062)

摘要: 文中为换能器的优化设计和性能改善提供一些有用的设计指南和解决措施, 并对功率超声夹心式压电陶瓷换能器工程设计中的一些重要问题(即换能器各部分的功能及选择, 压电陶瓷元件的位置优化, 接触界面对换能器性能的影响与预应力的选择及影响等)进行了简要的分析。结论表明, 文中所述对于优化设计、改善并提高性能具有参考和使用价值。

关键词: 夹心式换能器; 预应力; 功率容量; 电声效率; 位移节点

中图分类号: TB552 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2006)-02-0160-05

Design of sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer

LIN Shu-yu

(Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xian 710062, China)

Abstract: The objective is to give some useful instructions to designers of sandwich piezoelectric ceramic transducers. Some important problems concerning the design of sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducers are analyzed and reviewed. The issues discussed include functional description and choice of transducer components, optimization of the position of piezoelectric ceramic elements, effects of contacting interfaces on the performances, and choice and effect of pre-stress of bolt in the transducer.

Key words: sandwich transducer; pre-stress; power capacity; electro-acoustical efficiency; displacement node

1 概 述

夹心式功率超声压电陶瓷换能器主要由压电陶瓷片、前后金属盖板、预应力螺栓、金属电极片以及预应力螺栓绝缘套管等组成, 如图 1 所示。此类换能器主要分为高、低强度两类。其主要特点包括: (1) 既利用了压电陶瓷振子的纵向效应, 又得到了较低的共振频率。(2) 通过采用前后金属块以及预应力螺栓给压电陶瓷圆片施加预应力, 使压电陶瓷圆片在强烈的振动时始终处于压缩状态, 从而可以避免压电陶瓷片的破裂, 达到了提高功率容量及改

变频率的目的。(3) 由于使用了金属前后盖板, 换能器的导热性能得到很大的改善。只要金属材料与压电陶瓷材料的厚度以及横向尺寸选择得当, 压电陶瓷材料弹性常数的温度系数可以由金属材料弹性的温度系数加以补偿, 因此夹心式压电陶瓷换能器的频率温度系数可以做得很小, 其温度的稳定性也较好。(4) 在夹心式压电陶瓷换能器中, 通过改变压电陶瓷材料的厚度、形状及前后金属盖板的几何尺寸和形状, 可以对换能器进行优化设计, 便于获得不同的工作频率和其他一些性能参数, 以适应不同的工作环境和应用场合。

对于夹心式压电陶瓷功率超声换能器的理论计算和工程设计, 工程师们进行了大量工作, 提出了许多设计理论及研制工艺^[1-5]。本文将对影响换能器性能的主要因素进行探讨, 以利于换能器性能的进一

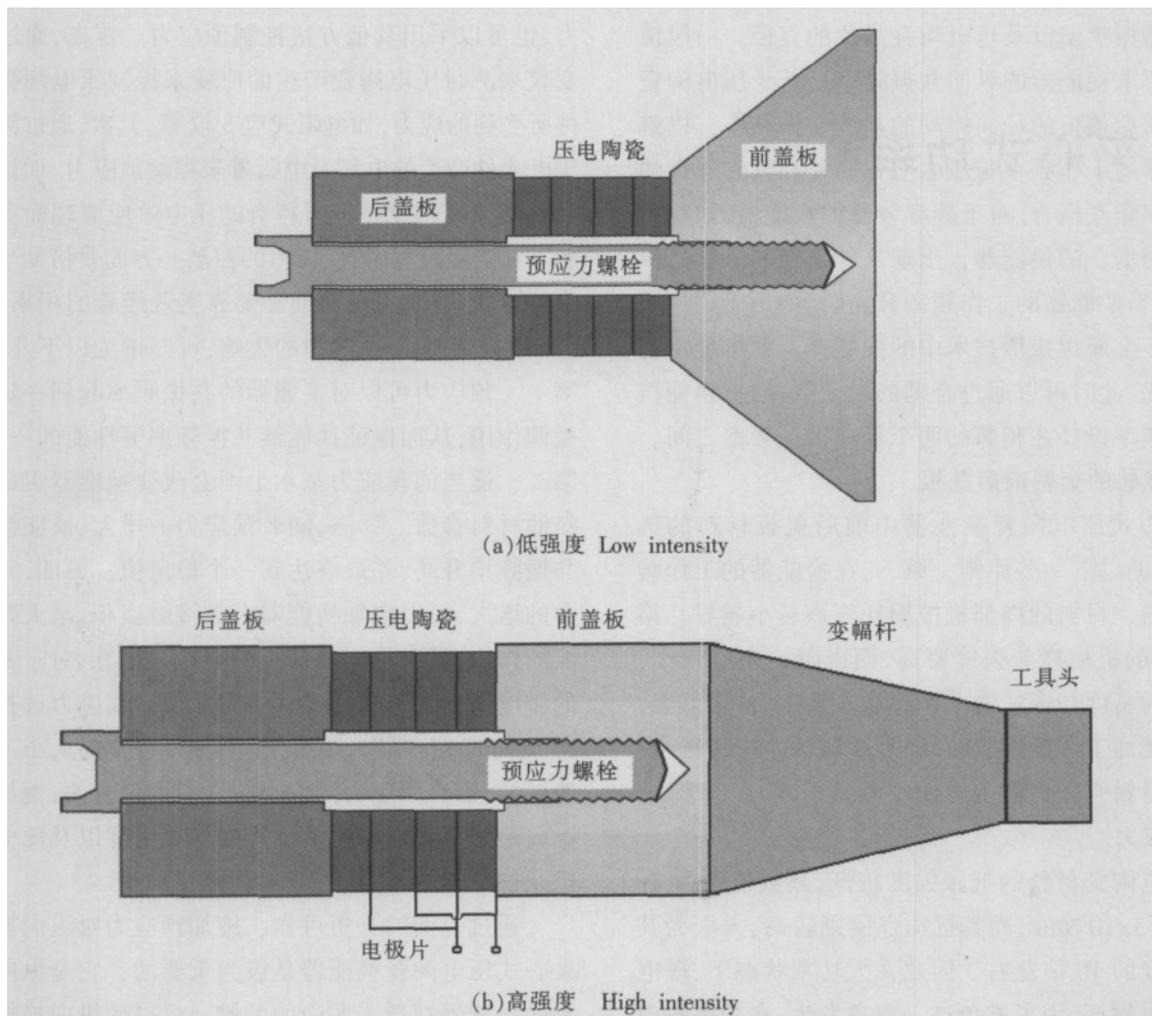


图1 夹心式压电陶瓷换能器的基本结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a sandwich piezoelectric transducer

步提高。

2 换能器各组成部分的功能及设计要求

2.1 压电陶瓷元件

压电陶瓷元件的设计尺寸是指压电陶瓷晶堆单个元件在振动方向上的几何尺寸以及整个压电陶瓷晶堆的总体积。在工程设计中,总是希望压电陶瓷元件能以最小的体积和重量,换来最大的功效,即较高的功率重量比。根据国外的资料报道,锆钛酸铅发射型陶瓷材料的功率容量为 $6\text{W}/(\text{cm}^3 \cdot \text{kHz})$ 。由此可见,对于高频换能器,压电陶瓷的体积可以做得很小。但是从另一方面考虑,当频率升高时,换能器的内部机械和介电损耗也会相应地增大。因此在现有的工艺条件下,换能器的功率容量一般取为 $(2 \sim 3)\text{W}/\text{cm}^3 \cdot \text{kHz}$ 。

至于压电陶瓷元件的厚度以及陶瓷片的数目

选择,也需要仔细地全面考虑,这和换能器的电阻抗、机械品质因数以及机电耦合系数都有关系。晶片不能太厚,否则不易激励;但也不能太薄,否则会造成片与片之间的接触面太多,形成多个反射层,影响声的传播。在功率超声领域,单个压电陶瓷片的厚度一般取为 $5\text{mm} \sim 10\text{mm}$ 。而换能器中压电片的总长度,即每片的厚度乘以片数,应为换能器总长度的三分之一左右,以保证适当的机电耦合系数。

根据压电陶瓷材料的性能和种类,单位长度上所加的激励电压是不同的。在理想的情况下,压电陶瓷的外场激励电压可达到 $4\text{kV}/\text{cm}$ 以上。然而在实际设计过程中,为了保证换能器的安全可靠工作,一般都取低于 $2\text{kV}/\text{cm}$ 。

压电陶瓷元件的直径应小于声波波长的四分之一。对于直径比较大的压电陶瓷元件,为了避免换能器的谐振频率与压电陶瓷的径向或其它振动模式相互耦合,从而造成换能器的效率下降,应适当设计换

好。具体地体现为:预应力螺纹的螺距越细,换能器前后金属盖板与压电陶瓷的接触面之间受到的预应力越均匀,预应力螺杆本身受到的应力分布也越均匀,从而可保证换整个换能器较高的机械品质因数及较低的机械损耗,以提高换能器的电声效率。以上分析仅是一些定性的结论,如果要详细地研究预应力螺钉的影响,则必须利用较为复杂的模型,例如螺钉的摩擦接触模型、螺钉的弹性形变及塑性形变等模型。

2.4 换能器各部分接触界面的影响

在夹心式压电陶瓷换能器的制作过程中,有许多工艺都对换能器的性能有很大的影响。第一,组成换能器的各个元件之间的接触面应光滑平整。所以各个结合部分的表面要进行研磨,一般应达到接近镜面的水平。第二,每相邻两片晶片之间、以及晶片和前后金属盖板之间通常要垫一薄金属片作为金属电极,其材料可选用镀青铜、黄铜以及镍片等。电极的厚度可分为两种情况。一种是薄电极情况,其厚度一般在0.2mm左右。另一种是厚电极情况,其厚度可根据具体的要求加以选择。对于厚电极情况,其作用除了用作电极接线以外,还具有散热及其它功能,如与外界连接等。第三,一般情况下,在晶片、电极片及金属前后盖板之间用环氧树脂胶合,然后用预应力螺栓将换能器各部件固定在一起并拧紧。如果换能器各部件的接触面是经过特殊的研磨工艺处理过,也可以不用环氧树脂胶合剂,直接用预应力螺栓拧紧。但为了消除空气隙的存在,提高超声波在换能器内部的传输效率,采用环氧树脂胶合剂方法是值得推荐的。另外,应尽量保证预应力螺栓与换能器各个部分的横截面保持垂直,否则换能器可能无法工作或者导致压电陶瓷晶片破裂。

除了超声清洗以外,其他大部分功率超声应用技术中换能器需要与外界进行连接,为了尽可能小地影响换能器的实际工作状态,应将换能器通过法兰盘与外部机构连接,而法兰盘的位置应位于换能器的位移节点处。由于理想的位移节点位置是一个几何面,而实际的法兰盘是有一定的厚度的,因此法兰盘不可能完全固定不动,也就是说换能器的振动要与外界产生机械耦合。为了尽量减轻这种耦合,可以采用两种方法。一是利用多级法兰盘结构,由于每经过一级法兰盘,振动都要经过一次隔振,因此可以实现最终的振动隔离。第二,在保证法兰盘所

需的支撑强度的情况下,法兰盘应尽可能薄一些,还可在法兰盘上车一个圆形的槽,以增加其顺性,提高隔振能力。

2.5 换能器的功率极限

换能器的辐射声极限主要是针对液体介质而言的。在大功率状态下,声波在液体负载中传播时会出现空化现象。空化现象的发生意味着在换能器辐射面的周围出现大量的空化气泡,形成一个声屏障,严重阻碍换能器进一步增大输出功率。从另一个角度来考虑,空化气泡的大量增加导致换能器的辐射阻抗下降,从而影响换能器的辐射功率和辐射效率。为了提高换能器的辐射声功率,可以采用增大换能器辐射面积的方法。但这种方法对于要求一定的声波强度的情况是不适合的。在这种情况下,可以采用提高介质的空化域、提高换能器的工作频率以及采用短脉冲工作方式等方法,也可以采用一种折衷的办法,即损失换能器的电声效率以达到一定的声强度要求。

压电陶瓷换能器的电极限是指换能器所能承受的最大输入电能。可以分为两种情况加以分析,即静态和动态情况。在静态的情况下,换能器的电极限主要由陶瓷材料的介电损耗所决定。产生介电损耗的原因主要有陶瓷的弛豫损耗和漏电损耗,它们主要与陶瓷材料的成分、制造工艺等有关。所有这些因素的综合表现之一就是换能器的耐电压程度。因此为了提高换能器的电极限,首先必须提高换能器的耐压特性。在动态的情况下,压电陶瓷换能器的电极限比较复杂。它不仅和压电陶瓷的材料有关系,而且与换能器的工作频率、换能器的电匹配状态等有关。当换能器处于电失配状态工作时,换能器中的无功功率增大,导致换能器急剧发热,有时可能损坏换能器。

2.6 换能器中压电陶瓷元件以及位移节点的位置对换能器性能的影响

在夹心式功率超声换能器中,压电陶瓷元件的位置以及换能器振动位移节点的位置是一个比较重要且研究得较多的问题之一。国内外学者对此进行了比较深入的理论探讨和实验研究。主要的结论有以下几点:

(1)从换能器的负载适应能力方面来看,如果不考虑换能器的机械损耗,换能器的位移节点位置越靠近压电陶瓷元件的中间,其负载能力越强,而且换

能器可在较大的负载变化范围内,仍有较高的电声效率。如果考虑到换能器的机械损耗,则其压电陶瓷元件应设计得稍微偏离换能器的位移节点位置。考虑到这些因素,可以得出夹心式功率超声换能器的一个设计准则:即对于重负载的换能器,例如超声清洗等,应把换能器的压电陶瓷元件放置在靠近换能器位移节点的位置;而对于轻负载的换能器,例如超声加工、超声钻孔以及超声焊接等应用,应把换能器的压电陶瓷元件放置在稍微偏离换能器位移节点的位置。

(2)从换能器的最大电声效率的角度来考虑,当压电换能器的位移节点位置偏离压电陶瓷的中心时,换能器的力因子减小(所谓换能器力因子就是在换能器的电极端施加单位电压时,在其力端所能产生的振动力的大小),负载适应能力减弱,换能器的潜在电声效率也略有减小。对于节点位置不同的换能器,其电声效率与负载之间的关系也有所不同。对于位移节点靠近换能器压电陶瓷中心的换能器,换能器必须在较大的负载下才能得到较大的电声效率。反之,对于位移节点偏离压电陶瓷中心的换能器,只有在比较小的负载下才能得到较高的电声效率。另外,当换能器的位移节点靠近压电陶瓷的中心时,换能器的效率负载曲线较平坦,因而换能器在较大的负载范围内能得到较高的电声效率。

值得指出的是,Shoh在其专利技术中指出,把压电陶瓷元件放在偏离位移节点的位置时,换能器的性能最佳。其理由是当压电陶瓷元件位于这一位置时,换能器中由电激励引起的介电损耗与由机械应力引起的机械损耗相等。从原文所描述的换能器的示意图来看,这一换能器是一种用于超声加工用的大振幅换能器,属于一种负载较轻的换能器。对于此类换能器,机械损耗的影响大于介电损耗,为了

降低机械损耗,应把压电陶瓷元件放在偏离位移节点处,这与上面得出的设计准则是一致的。

3 总 结

本文对影响夹心式功率超声换能器性能参数的一些关键问题进行了探讨和分析。分析了换能器各组成部分的功能及设计原则。探讨了换能器的功率容量,研究了换能器中压电陶瓷片以及位移节点的位置对换能器整体性能的影响,并就换能器中各组成部分的接触面状况对换能器性能的影响进行了分析,得出的结论对于优化换能器的设计,改善并提高换能器的性能具有参考与使用价值。

参 考 文 献

- [1] Neppiras E A. The pre-stressed piezoelectric sandwich transducer[J]. Ultrasonics International 1973 Conferences Proceedings, 295-301.
- [2] Lagodzinski Z. The radiation efficiency of ultrasonic transducers[J]. Archiwum Akustyki, 1972, 7(2), 151-167.
- [3] Gough P T, Knight J S. Wide bandwidth, constant beamwidth acoustic projectors: a simplified design procedure[J]. Ultrasonics, 1989, 27(4): 234-238.
- [4] Banno H, Masamura Y, Naruse N. Acoustic load dependency of electro-acoustic efficiency in the electrostrictive ultrasonic transducer and acoustical matching[J]. Ultrasonics, 1979, 17(2), 63-66.
- [5] 林书玉,张福成,赵恒元,夹心换能器效率与结构关系[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 1988, 16(2): 27-31.
LIN Shuyu, ZHANG Fucheng, ZHAO Hengyuan. Relationship between the structure and the efficiency of sandwich transducer[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science), 1988, 16(2): 27-31.