

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

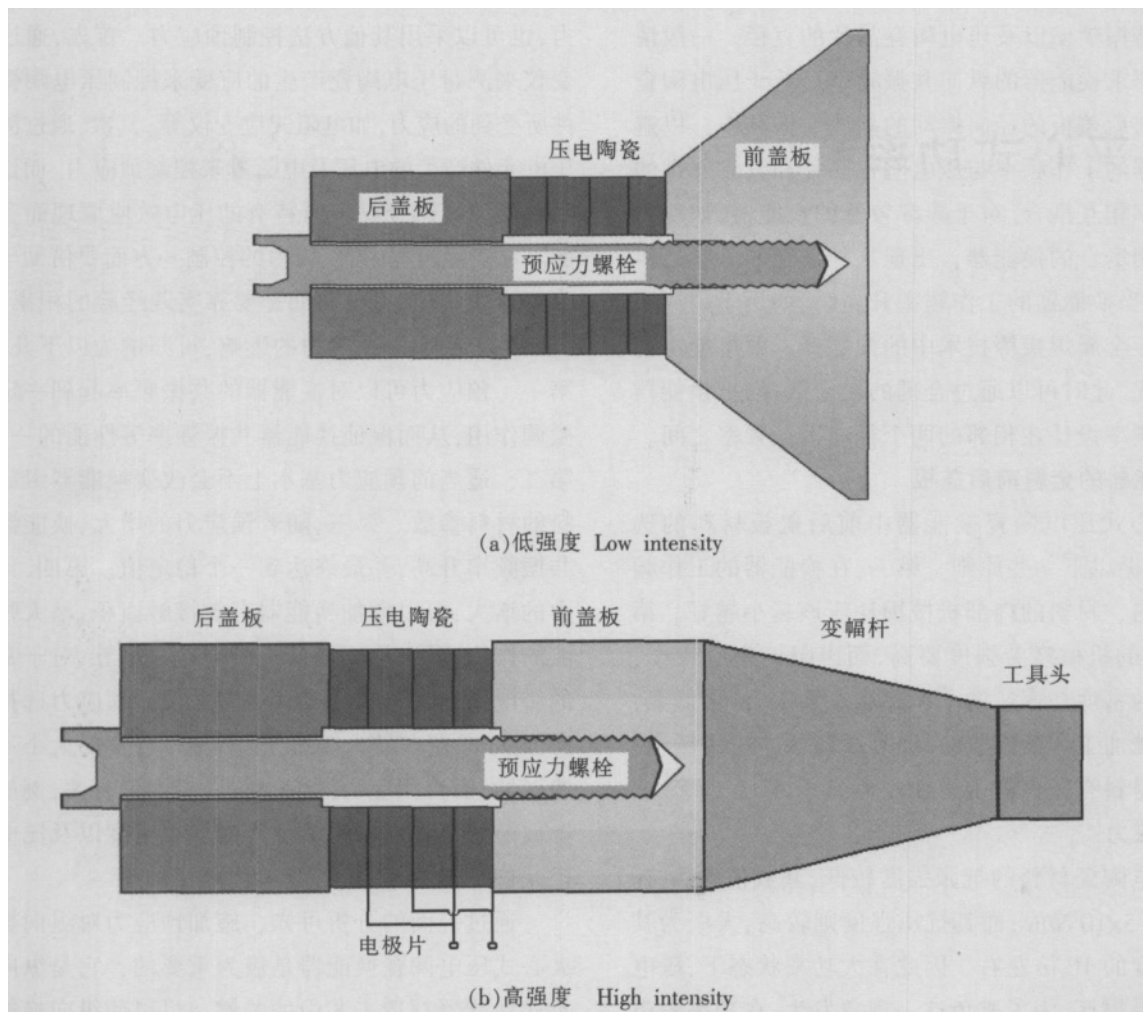


图1 夹心式压电陶瓷换能器的基本结构示意图

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

能器的谐振频率以及压电陶瓷晶片的直径。一般情况下,要求换能器的纵向共振频率远低于压电陶瓷晶片及前后盖板的径向振动的基波谐振频率,以避免换能器的工作频率与压电陶瓷晶片和其它元件的径向频率相互耦合。对于频率较低的换能器,如功率超声应用场合的换能器,出现这种情况的可能性很小。然而当换能器的工作频率升高时,如用于超声医疗和超声金属焊接等技术中的换能器,就可能出现这种情况。此时可以通过合理的尺寸选择,把换能器的工作频率设计在相邻的两个径向谐振频率之间。

2.2 换能器的金属前后盖板

夹心式压电陶瓷换能器中前后盖板材料的选择,应遵循以下一些原则。第一,在换能器的工作频率范围内,材料的内部机械损耗应该越小越好。第二,材料的机械疲劳强度要高,而声阻抗率应较小,即材料的密度与声速的乘积要小。第三,价格低廉,易于机械加工。第四,在一些易于腐蚀的应用场合,还要求材料有较强的抗腐蚀能力。

2.3 预应力

压电陶瓷材料的抗张强度较低,其数值约为 $2 \times 10^7 \text{N/m}^2$ ~ $5 \times 10^7 \text{N/m}^2$,而其抗压强度则较高,大概为其抗张强度的 10 倍左右。因此在大功率状态下,压电陶瓷容易损坏。为了避免这一现象发生,在功率超声换能器中都采用增加预应力的办法。对于预应力螺栓的要求是既能产生一个很大的恒定预应力,又要有良好的弹性。预应力螺栓要用高强度的螺栓钢制成,常用的有 40 号铬钢、工具钢以及钛合金等。为了保证螺钉材料的性能,对于要求较高的超声应用,还必须对螺钉材料进行适当的热处理。另一方面,预应力的大小对换能器的性能影响很大。试验表明预应力的大小应有一个较合适的范围,所加的预应力大小应调节到大于换能器工作过程中所遇到的最大伸张应力。如果预应力太小,换能器工作过程中产生的伸缩应力可能大于预应力,使换能器的各个接触面之间产生较大的能量损耗,降低换能器的机电转换效率,严重时可能导致压电陶瓷片碎裂,从而损坏换能器。另一方面,换能器的预应力又不能太大,因为太大的预应力可能会使压电陶瓷片的振动受到影响,降低压电陶瓷晶堆的机电耦合系数,有时可能也会导致压电陶瓷片碎裂。

预应力的施加通常采用力矩扳手,它可以实时地显示力矩的大小。有时为了更加精密地控制预应

力,也可以采用其他方法控制预应力。首先,通过应变仪来测量压电陶瓷产生的应变来控制压电陶瓷元件所受到的应力,如电阻式应变仪等。其次,通过测量压电元件产生的电压及电荷量来控制预应力。而这都是利用压电陶瓷材料所特有的压电效应原理而实现的。在实际过程中,预应力的控制一方面要借助于实验仪器的监控,更重要的是要靠实践经验的积累。

关于换能器预应力的影响,可归纳为以下几点。第一,预应力可以对换能器的共振频率起到一定的微调作用,从而保证换能器共振频率等性能的一致。第二,适当的预应力基本上不会改变换能器组成材料的材料参数。第三,随着预应力的增大,换能器的共振频率升高,并最终达到一个稳定值。第四,预应力的增大,可以增加换能器有效接触面积,增大弹性波的作用范围,从而降低机械损耗。第五,对于常用的压电陶瓷材料,如 PZT-4 型材料,预应力选择在 300kg/cm^2 左右较为合适。当然这一数值的大小不是绝对的,因为预应力的大小与许多因素有关,例如接触面的光滑程度,机械零件的加工精度以及压电陶瓷元件性能的不一致等。

通过上面的分析可知,施加预应力对纵向振动夹心式压电陶瓷换能器是极为重要的,它是纵向夹心式换能器制造工艺中的关键,可以使纵向换能器承受大功率,提高换能器的可靠性、稳定性和一致性。另外,螺纹形状及几何尺寸对换能器振动性能也是有影响的。影响螺钉的横截面积的因素很多,例如频率、换能器的功率及辐射声强度等,而所有这些都与预应力螺钉的预应力紧密关联,因而其选择是很复杂的。一般情况下,决定换能器预应力螺钉横截面尺寸的主要因素就是换能器的功率,而换能器功率又和换能器的横截面积有关。因此,根据一些实际考虑,预应力螺钉的横截面尺寸应为换能器横向尺寸的四分之一到三分之一之间,以保证足够的机械强度。关于预应力螺钉的长度,原则上是越长越好,但考虑到工艺及成本等问题,预应力螺钉的最佳长度应为压电陶瓷元件总长度的三倍以上。至于具体的长度,还要考虑换能器功率及螺钉的螺距等因素的影响。在换能器预应力螺钉的选择过程中,螺钉的螺距选择是很重要的,它对换能器的性能影响很大。根据一般的原则,细牙螺纹优于粗牙螺纹,螺纹的螺距不能大于 2mm,而对于同一种规格的螺钉,例如同为细牙或粗牙螺纹,则螺距越细,换能器的性能越

