

同时发射和接收纵波和横波的压电 复合材料换能器

党长久 杨玉瑞 李明轩

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1997年4月7日收到

摘要 通过控制压电复合材料中压电相的分布形式, 本文把具有厚度模振动的 1-3 型压电复合材料和具有扭转模振动的拼接 2-2 型压电复合材料组合在一起, 构成一种混合模式压电材料, 并测试了这种压电材料晶片的性能参数。使用这种晶片作的换能器可以根据使用者的要求, 单独产生纵波或横波, 也可同时产生这两种波。

关键词 超声换能器, 混合模式换能器, 压电复合材料, 纵波和横波

A piezocomposite transducer capable of simultaneously transmitting and receiving longitudinal and shear waves

Dang Changjiu Yang Yurui Li Mingxuan

(Institute of Acoustics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract By controlling the distribution of the piezoelectric Phase in a piezocomposite, that a mixed-mode piezocomposite plate is designed and fabricated which is composed of a 1-3 composite with thickness-mode and a pieced 2-2 Composite with torsional shear mode. The parameters of the mixed-mode composite plate are tested. According to users requirement, the transducer made from the mixed-mode composite may generate either longitudinal Wave or shear wave, or both waves simultaneously.

Key words Ultrasonic transducers, Mixed-mode transducer, Piezocomposite, Longitudinal and shear waves

1 引言

常用的超声换能器要么产生纵波, 要么产生横波。一般来讲, 压电单晶可以产生一种准纵波或两种准横波。在实际应用中, 往往使其

中一种波的幅度足够大而其它一种波的幅度足够小, 从而获得单一模式的波。例如, 纵波换能器要求其中的纵波振动模式幅度尽可能大, 而切变模式幅度应接近于零, 横波换能器则有

相反的要求。

作为声学仪器的关键部件，压电换能器一直随着应用的要求而发展，并推动着压电材料性能的改善和提高。在固体声学测量中，有要求同时测出固体中纵波和横波的声速，以便于推算固体的弹性模量。在这种情况下，能同时产生纵波和横波的换能器十分有用。Cheng-Ken Jentff 等发现， Y 旋转 10° 切型铌酸锂单晶和 C 轴倾斜 16° 氧化锌薄膜可满足这种要求，并通过改变驱动频率可控制产生的波型^[1]。后来，Ching-Hua Chou 等又发展了用这类晶片设计混合模式换能器的理论，并制作了与理论预测相符合的换能器^[2]。

近二十年来受到广泛关注的压电复合材料用于制作纵横波换能器。这些材料具有一些新的特性，如较低声阻抗、有柔韧性等。通过适当选取压电陶瓷、聚合物、它们的比例和空间分布形式，可以得到满足特殊用途的压电复合材料。利用陶瓷相在复合材料中分布的可控性，可以在同一块晶片上集成多个不同的振动模式，从而使相应的换能器辐射不同种类的波，如纵波或横波。我们正是利用这个特点，把具有厚度伸缩振动的 1-3 型压电复合材料和具有圆周厚度切变振动的拼接 2-2 型压电复合材料组合在同一块压电晶片上。根据使用者的要求，用这种晶片制成的换能器可单独发射纵波或横波，或同时发射纵波和横波。

2 振动模式

2.1 厚度模

1-3 型压电复合材料是在三维连通的环氧树脂中排列有分立的陶瓷柱而形成的一种复合材料。极化方向沿着陶瓷柱的长度方向。有关 1-3 型压电复合材料的理论和应用的研究文章非常多^[3,4]。用这种复合材料制成的压电圆片除了含有径向振动模及横向结构模外，其主要的振动模式是厚度伸缩振动，即沿着垂直于晶片平面的方向向外辐射纵波^[5]。晶片的基本振动频率为

$$f_t = C_t/2t \quad (1)$$

式中 t 为晶片厚度， C_t 为晶片的纵波声速。

2.2 扭转切变模

对于圆柱 2-2 型压电复合材料晶片，如果陶瓷相沿切向极化，在横截面上加电场，晶片将产生扭转切变振动。晶片的基本振动频率由下式决定：

$$f_s = C_s/2t \quad (2)$$

t 为晶片厚度， C_s 为晶片的切变波声速。

因为获得同方向均匀切向极化的陶瓷环很困难，所以我们用 8 片楔形普通 2-2 型压电复合材料拼接起来，以模拟圆柱 2-2 型压电复合材料的振动^[6,7]。每个“楔形片”内陶瓷柱沿长度方向极化，且极化方向均相同。当这些“楔形片”按其极化方向沿圆周一致排列时，如果每个“楔形片”作厚度切变振动，则整个晶片振动的总体效果相当于扭转切变振动。“楔形片”数越多，越接近于扭转振动。这种拼接 2-2 型压电复合材料的振动基频可由 (2) 式决定。

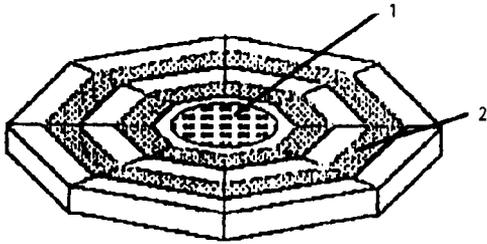
2.3 混合模

利用压电复合材料中陶瓷相分布的可控性，我们可以在同一块压电复合材料晶片上制作上述两种类型的压电复合材料，即主要用于产生纵波的 1-3 型压电复合材料和主要用于产生扭转切变波的扭转压电复合材料。这种新型晶片被称为混合模式压电复合材料晶片，因为它既能用于发射纵波，又能用于发射横波。

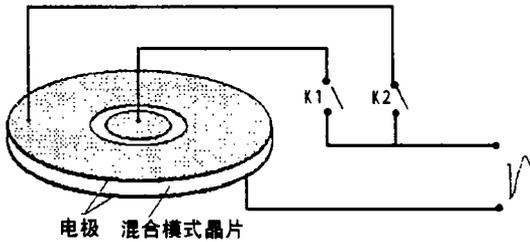
混合模式压电晶片的结构如图 1(a) 所示。该晶片分两部分，一部分是具有厚度模振动的 1-3 型压电复合材料，位于晶片中心，呈圆形。另一部分是围绕 1-3 型压电复合材料的可产生扭转振动的拼接 2-2 型压电复合材料。这两种材料的厚度是一样的。

为了使混合模式压电材料产生厚度振动和扭转切变振动，我们对覆盖晶片的电极作如下处理：压电晶片一面镀满电极，称为满电极面。在另一面，1-3 型压电复合材料的边缘处对电极作环形分割，使电极分为两部分：一部分为覆盖中心 1-3 型材料的圆片形；一部分为覆盖

扭转材料的环形。它们分别通过电极引线与开关 K1 和 K2 相连。该面称为分割电极面，如图 1(b) 所示。



(a) 混合模式压电复合材料晶片
1 1-3 型压电复合材料
2 拼接 2-2 型压电复合材料



(b) 覆盖电极的混合模式晶片

图 1 混合模式压电复合材料晶片结构示意图

表 1 受控于开关 K1 和 K2 的波型

开关 K1	开关 K2	波型
OFF	OFF	---
ON	OFF	只有纵波 P
OFF	ON	只有横波 S
ON	ON	同时有纵波和横波

开关 K1 和 K2 控制产生的波型。当 K1 闭合，K2 断开时，只有晶片中心的 1-3 型复合材料被激励，从而晶片只产生厚度伸缩振动，辐射纵波；当 K1 断开、K2 闭合时，只有晶片周围的拼接 2-2 型复合材料被激励，从而晶片只产生圆周切变振动，辐射扭转切变波；当 K1 和 K2 同时闭合时，晶片中的这两部分压电复合材料同时被激励，并各自振动，同时辐射纵波和扭转波。因此，通过控制开关 K1 和 K2 的状态，混合模式晶片可产生相对应的振动模式：厚度伸缩模或扭转切变模，或两者兼而有

之。表 1 列出了对应于不同开关状态时的各种波型。

3 实验及结果

3.1 晶片参数

根据上述设想，我们制作了两组混合模式的压电复合材料晶片。晶片的厚度为 0.7mm。晶片中，不论是 1-3 型还是拼接 2-2 型压电复合材料，均使用 PZT-5 作陶瓷相，使用环氧树脂 618 作聚合物相。压电晶片两面镀银后，使其中一面为满电极面，另一面为分割电极面。晶片的一些参数用 4192ALF 阻抗分析仪测试，连同其它参数一起列入表 2 中。表 2 中，扭转模材料中陶瓷相的体积比大于厚度模材料中的陶瓷相体积比，这里有两点考虑：

(1) 众所周知，同种均匀压电材料中纵波声速大于横波声速，因而，根据 (1) 式和 (2) 式，当压电晶片的厚度均匀时，这种压电材料产生的纵波频率大于横波频率。然而，在压电复合材料中，纵、横波声速除了与各相材料的特性有关外，还与陶瓷相所占的体积比有关。一般来讲，这两种声速随着陶瓷体积比的增加而升高。我们使扭转模的陶瓷相体积比大于厚度模的陶瓷相体积比，以使扭转模的横波声速与厚度模的纵波声速接近。由 (1) 和 (2) 式，当这两种材料厚度一样时，也缩小了各自所辐射声波的频率的差。在表 2 中，两块晶片的厚度模的振动频率与扭转模的振动频率之比约为 1.2，而相同厚度的 PZT-5 压电晶片的该比值为 2.3。显然，前者更接近 1。

(2) 在声学测试中，在相同的脉冲电压激励下，纵波换能器和横波换能器的接收波列中，纵波的幅度往往容易高于横波的幅度。为了使二者差不多相等，采取的一个措施是使扭转模材料中陶瓷相的体积比高于厚度模材料的陶瓷相体积比。从而在相同的耦合条件下，提高扭转模的灵敏度。当纵、横波同时出现时二者的幅度相差不太悬殊。

另外，1-3 型和拼接 2-2 型复合材料的 Q

值均低于 10，这类材料的低 Q 值特性使得它们很适合制作短脉冲宽带换能器。

3.2 换能器性能测试

我们使用上述得到的混合模式压电复合材料晶片制作了可产生纵波和横波的换能器。制作换能器的方法是常规的。压电晶片的两个端面被制成满电极面和分割电极面。满电极面与保护膜粘在一起，并通过保护膜辐射声波。由于保护膜的影响，声波的到达时间会有所延长。分割电极面与背衬粘在一起。为了防止被分割的电极导通，要求背衬具有绝缘特性。所以不使用通常的环氧树脂和钨粉的混合物作背

衬，而使用非导电的环氧树脂与金刚砂的混合物作背衬。背衬的另一个作用是吸声，以减少晶片振动所产生的余振。背衬的纵波特性阻抗为 5.54MRayls ，横波特性阻抗为 3.04MRayls 。

实验装置如图 2 所示。一个换能器发射声波，另一个换能器接收声波。试块置于两个换能器之间。为了使换能器产生的纵波和横波均能有效地辐射入试块中，耦合剂使用既能传播纵波又能传播横波的蜂蜜，并通过加压装置使换能器与试块耦合良好。所加压力为 259kg/cm^2 。蜂蜜的厚度与所传播声波的波长相比非常小，因而可忽略其对换能器的影响。试块由衰减较小的聚苯乙烯制成。

表 2 压电晶片参数

编号	1		2	
	厚度模	扭转模	厚度模	扭转模
陶瓷相体积比 (%)	36	80	36	80
声速 (m/s)	3090	2590	3080	2580
共振频率 (MHz)	2.21	1.85	2.20	1.84
机电耦合系数 K_{eff}	0.68	0.72	0.66	0.60
品质因数 Q	8.5	8.7	8.3	8.4
损耗因子 $\text{tg}\delta$	0.025	0.023	0.023	0.028
声阻抗 (MRayl)	10.56	16.11	10.52	16.05

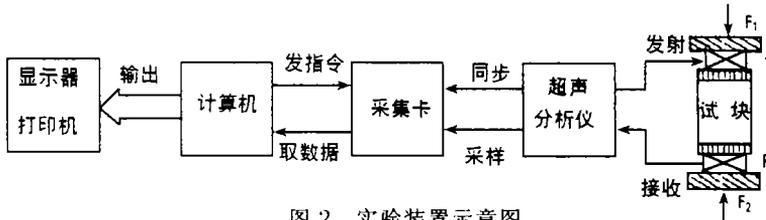


图 2 实验装置示意图

用超声分析仪 (5052UA) 测试换能器的性能。超声分析仪发射负的尖脉冲，激励发射换能器 T。产生的声波穿过聚苯乙烯试块由接收换能器 R 接收。接收波形经超声分析仪放大或衰减后显示在示波器上，或通过联于 PC586 微机的数据采集系统采样后存入计算机中，以供后期数据处理。

换能器辐射的波型受控于开关 K1 和 K2 的状态 (如表 1 中所示)。同时改变两个换能器相对应的开关状态，可以观察到不同的波型。图 3 示出了这些波型，其中 P 代表纵波应出现

的位置，S 代表横波应出现的位置。

图 3(a) 示出了开关 K1 闭合，K2 断开时的情况；波列中在时间为 $17.6\ \mu\text{s}$ 的位置出现了大幅度纵波，这种纵波是由混合模式晶片中心具有厚度模振动的 1-3 型压电复合材料单独产生的。同时在时间为 $35.2\ \mu\text{s}$ 的位置有幅度很小的横波，该横波产生于 1-3 型复合材料作厚度振动时引起的径向振动^[3,4]。该径向模以横波声速在介质中传播。由于该模式不是主要振动模式而幅度很小。

图 3(b) 示出了开关 K1 断开，K2 闭合

时的情况；波列中在时间为 $35.2\mu\text{s}$ 的位置出现了大幅度横波，这是由混合模式晶片中的具有扭转切变振动的环形接拼 2-2 型压电复合材料产生的。同时在时间为 $17.6\mu\text{s}$ 的位置有幅度很小的纵波。该纵波伴随着材料的扭转切变振动而产生 [7]。

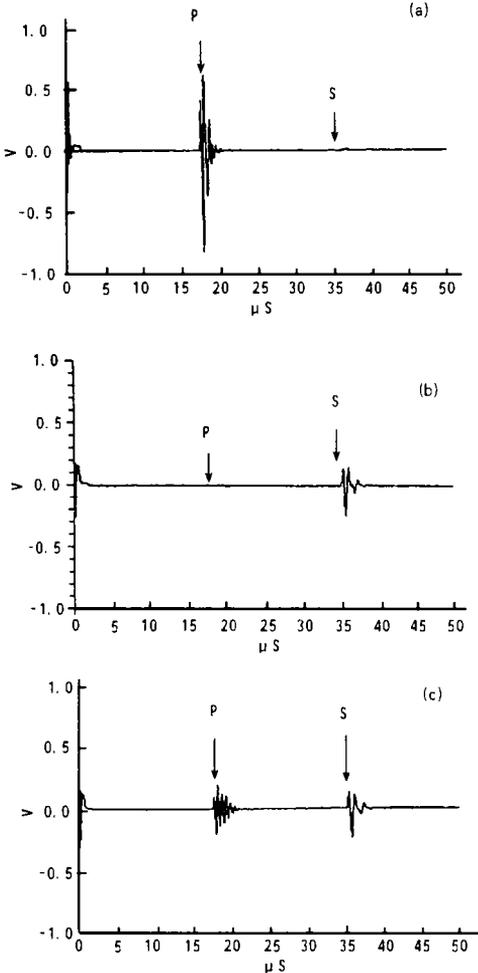


图 3 测试波形

- (a) 纵波 (K1 闭合, K2 断开)
- (b) 横波 (K1 断开, K2 闭合)
- (c) 同时产生纵波和横波 (K1 和 K2 同时闭合)

图 3(c) 示出了开关 K1 和 K2 均闭合时的情况，这时混合模式晶片中的两种复合材料均被电脉冲激励，因而波列中在时间为 $17.6\mu\text{s}$ 和 $35.2\mu\text{s}$ 的位置分别出现了纵波与横波。其中纵波的峰峰值幅度为 0.83V ，横波的峰峰值幅度为 0.76V ，这两种波的幅度相差不多。

在上述的实际测量中，纵波和横波在波列中的到达时间分别为 $17.6\mu\text{s}$ 和 $35.2\mu\text{s}$ ，均比它们在聚苯乙烯试块中的传播时间稍长。根据聚苯乙烯试块中纵横波声速推算，纵横波在其中传播的时间分别为 $16.9\mu\text{s}$ 和 $34.2\mu\text{s}$ 。这是因为发射和接收换能器的辐射面均有保护膜覆盖，从而使声波走时延长。

根据上述实验结果，实验者可以按照自己的要求，通过控制开关 K1 和 K2 的状态，使这种新型的压电复合材料换能器单独产生纵波或横波，或同时产生这两种波。

4 小结

通过控制陶瓷相在压电复合材料中的分布状态，经过适当的设计，压电复合材料晶片可以具有厚度模与扭转模振动。相应的换能器可以单独产生纵波或横波，也可同时产生这两种波。我们设计了这种晶片，测试了晶片的参数。同时制作了相应的换能器，并测试了换能器所产生的波形。

当换能器同时辐射纵波和横波时，压电晶片纵振动和扭转切变振动是否相互影响，以及相互影响的程度如何，有待于作进一步的研究。作者感谢中国科学院声学研究所的朱厚卿教授和王桂荣老师帮助测试了压电晶片的性能参数。

参 考 文 献

- 1 Jen C K, Sreenivas K, Sayer M. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, **84**(1): 26-29.
- 2 Chou C H, Khuri-Yakub B T. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, 1989, **36**(3):337-341.
- 3 Gururaja T R, Schulze W A, Cross L E, Newnham R E, et al. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, 1985, **SU-32**(4):481-498.
- 4 Gururaja T R, Schulze W A, Cross L E, et al. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, 1985, **SU-32**(4): 499-513.
- 5 党长久, 李明轩. *应用声学*, 1995, **14**(1): 2-6.
- 6 党长久, 杨玉瑞, 李明轩. *扭转压电复合材料*. 中国声学学会 1995 青年学术会议论文集: 479-482.
- 7 Dang Changjiu, Yang Yurui, Li mingxuan. *Chinese Science Bulletin*, 1996, **41**(11): p1044. in press.