

面切变压电复合材料及其换能器^{*}

党长久 杨玉瑞 李明轩

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1996 年 6 月 14 日收到

摘要 本文通过控制压电相在压电复合材料中的分布形式,把四块完全相同的等腰直角三角形 2—2 型压电复合材料拼接起来,四个直角顶点位于晶片的中心,相邻块压电相的极化方向相对.这种新型材料可产生面切变振动,其换能器可辐射面切变波.波列中的纵波具有伴随性且其首波位相与面切变波首波位相相反.

关键词 压电复合材料,横波换能器,面切变模式

Piezocomposites and transducers with face shear modes

Dang Changjiu, Yang Yurui, Li Mingxuan

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

Abstract Four identical 2-2 composite pieces in the form of isosceles right triangles are pieced together, with their vertexes touching at the center of the whole piezoelectric plate. The poling directions of adjacent pieces face each other. The new pieocomposites produce face shear vibration and the resulting transducers radiate face shear wave. The behaviors of the weak accompanying P-wave are studies experimentally and discusse qualitatively.

Key words Pieocomposites, Transverse transducers, Face shear modes

1 前言

压电复合材料已广泛应用于纵波换能器中^[1,2],近年来在国内外压电材料的研究中,横波压电复合材料又得到了关注,耿学仓等研制出厚度切变模 2-2 型压电复合材料及其换能器^[3]. Q.M. Zhang 等也使用 2-2 型复合物研制出横波压电材料^[4]. 党长久等以圆柱 2-2 型压电复合材料为基础制作了具有扭转切变模的拼接 2-2 型压电复合材料及其换能器^[5]. 本文将利用压电复合材料来实现另一种切变模式一面切变振动^[6,7].

可产生面切变的压电单晶制作工艺复杂,因而较少使用. 我们采用拼接方法,使四块等腰直角三角形 2-2 型压电复合材料沿圆周排列,四个直角顶点位于晶片的中心,相邻三角形块内压电相的极化方向相对. 在这种材料晶片的两面镀上电极并加激励电压后,晶片作面切变振动,沿着垂直于晶片表面的方向辐射的声波是面切变波. 本文中,我们制作并测试了面切变压电复合材料晶片的性能. 用这种材料制作了面切变横波换能器,测量了这种换能器的辐射特性,分析了其中纵波产生的原因及特点等.

^{*} 国家自然科学基金和中国科学院声学研究所资助项目.

2 振动模式

厚度切变模和扭转切变模是常用的两种振动模式，而面切变模较少应用。压电晶片作面切变振动时，其表面的形态如图 1 所示。图中 (a)-(e) 示出了晶片在一个振动周期内的振动过程。令 T 为振动周期，晶片在 $x-y$ 平面内振动。当 $t=0$ 时，如图 1(a) 所示，晶片处于静止状态。当 $t=T/4$ 时，如图 1(b) 所示，晶片平面相对的两个角 a 和 c 沿对角线向晶片中心收缩，而另两个角 b 和 d 沿对角线向外伸张。当 $t=T/2$ 时，如图 1(c) 所示，晶片平面恢复到 $t=0$ 时的状态。当 $t=3T/4$ 时，如图 1(d) 所示，晶片平面的形态与 $t=T/4$ 时的形态相反，即两个对角 a 和 c 沿对角线向外伸张，而另两个对角 b 和 d 沿对角线向晶片中心收缩。当 $t=T$ 时，如图 1(e) 所示，晶片平面又恢复到初始状态。然后，开始下一个周期的振动。当振动沿垂直于 $x-y$ 平面的方向传播时，由于质点的振动方向与波的传播方向垂直，显然，这是一种横波，在介质中以横波的声速传播。

当 $t=T/2$ 时，如图 1(c) 所示，晶片平面恢复到 $t=0$ 时的状态。当 $t=3T/4$ 时，如图 1(d) 所示，晶片平面的形态与 $t=T/4$ 时的形态相反，即两个对角 a 和 c 沿对角线向外伸张，而另两个对角 b 和 d 沿对角线向晶片中心收缩。当 $t=T$ 时，如图 1(e) 所示，晶片平面又恢复到初始状态。然后，开始下一个周期的振动。当振动沿垂直于 $x-y$ 平面的方向传播时，由于质点的振动方向与波的传播方向垂直，显然，这是一种横波，在介质中以横波的声速传播。

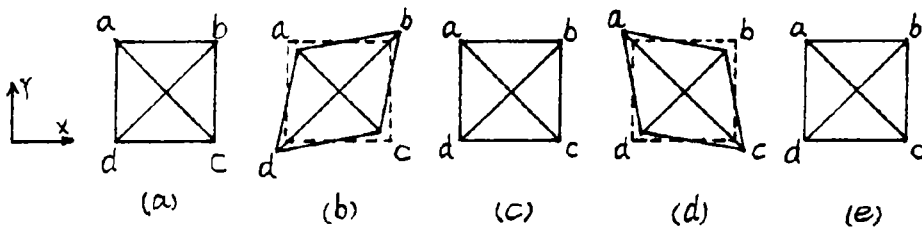


图 1 面切变振动示意图

(a) $t=0$ 时, (b) $t=T/4$ 时, (c) $t=T/2$ 时, (d) $t=3T/4$ 时, (e) $t=T$ 时

面切变振动可由压电单晶产生 [6,7]，如石英晶体采用 x 切割，在电极面施加电压后，通过 d_{14} 压电常数，即可产生面切变振动。

为了用压电复合材料产生面切变，我们改变 2-2 型压电复合材料中压电相的分布状况。采用本文作者在文献 [5] 中描述的拼接方法，用四块完全相同的等腰直角三角形普通 2-2 型压电复合材料，沿圆周拼接成如图 2 所示的形状，四个直角顶点位于晶片的中心。每个块内压电相和非压电相平面与“三角形”的弦平行，且压电相的极化方向均相同。相邻块间压电相的极化方向相对。这种晶片的两面镀上电极以后加电压激励，每个“三角形”块分别作厚度切变，则晶片前表面或后表面的总体振动效果是面切变振动，如图 2 所示。

式中 d_c 、 d_p 分别是压电相和非压电相的宽度， $d = d_c + d_p$ 为周期， n 是压电相和非压电相的层数。“+”对应中心是非压电相、最外层是压电相的情况，“-”对应反之的情况。

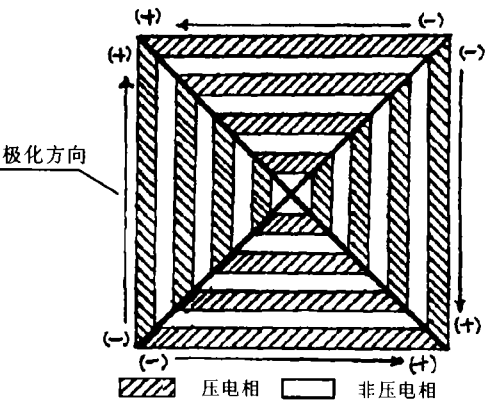


图 2 面切变压电复合材料横截面示意图

面切变压电复合材料中压电相的体积比 v 由下式给出 [8]:

$$v = \frac{d_c}{d} \pm \frac{d_c d_p}{n d^2}$$

3 晶片测试

按照上述的设计思想,我们制作了面切变压电复合材料.使用 PZT-5 作压电相,环氧树脂 -618 作非压电相.最内层为环氧树脂,最外层为 PZT. PZT 的宽度为 0.8mm,环氧树脂的宽度为 0.4mm.层数为 5.表 1 中列出了两片面切变压电复合材料晶片的性能参数.其中一些参数用 4192A LF 阻抗分析仪测试.

根据表中数据,面切变压电复合材料具有如下特点:

- (1) 机电耦合系数较大,接近厚度切变模 PZT-5 的机电耦合系数 0.69.
- (2) 机械品质因数 Q 值小于 5,很适合制作宽频横波换能器.
- (3) 横波特性阻抗低于 PZT-5 单相压电材料的横波特性阻抗 17.6MRayl 适合制作与低横波特性阻抗材料匹配的横波换能器.

表 1 面切变压电复合材料晶片参数

晶片编号	1	2
PZT 相体积比 (%)	70	70
厚度 (mm)	0.55	0.55
共振频率 (kHz)	1.69	1.90
反共振频率 (kHz)	2.32	2.50
横波声速 (km/s)	2.55	2.75
横波特性阻抗 (MRayl)	13.7	14.8
有效机电耦合系数 keff	0.70	0.69
机械品质因数 Q	4.5	4.2
损耗因子 tgδ	0.026	0.028

4 面切变换能器测试

用上述晶片制作了一对面切变横波换能器.换能器的制作方法是常规的.背衬使用钨粉和环氧树脂的混合物,并粘结在压晶片的后表面上,以减少压电晶片的余振,增加换能器的带宽.前表面浇铸上厚度为 λ/4 的环氧树脂作匹配层兼保护膜.两个换能器相对且同轴放置.其中一个换能器发射声波,另一个接收声波.试块为圆柱形,使用的衰减较小的聚苯乙

烯制成.试块周围有角度刻度,可用来记录换能器旋转时接收波形随角度的变化情况.换能器与试块间使用的蜂蜜作耦合剂,并用加压装置使二者耦合得更好.

使用超声分析仪 (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发射声波.声波穿过试块由接收换能器接收.接收信号经超声分析仪放大或衰减后显示于示波器上,或由计算机采样存储以备后期处理.采样器的采样率为 50MHz.

4.1 面切变波形

在示波器上观察接收到的面切变波形.调整两个换能器相对旋转角度,使接收的面切变波最大.采集到的波形如图 3 所示.在接收波列中,首先出现的是纵波 P,其到达时间为 17.7μs.其次是横波 S,其到达时间为 35.2μs.使用的蜂蜜作耦合剂,此时,纵横波峰峰值幅度比为 -20dB.由于波列中纵波 P 的幅度很弱,这种换能器同其它横波换能器一样可用于测量固体中的横波声速.

4.2 面切变波幅度随发射和接收换能器夹角的变化

旋转两个换能器的相对角度,并测量接收波列中面切变波 S 的峰峰值幅度 V 随相对角度 α 的变化情况.当切变波幅度最大时把相对夹角定为 0 度.每隔 10 度记录一个面切变波 S 的峰峰值幅度.换能器旋转一周共测得 36 个数据点,用其中的最大值做归一,在极坐标纸上作出归一化幅度随 α 的变化情况,如图 4 中 “*” 所示.把 “*” 号用折线连起来,状似四叶玫瑰,具有类似 “四极子” 的辐射特征.当 α = 0°、90°、180°、270° 时,接收到的面切变波的幅度最大.当 α = 45°、135°、225°、315° 时,接收到的面切变波的幅度最小.这与图 2 中面切变压电复合材料的几何形状和压电相分布的对称性是一致的.

4.3 波列中的纵波

在接收波列中,在面切变波到达之前,还存在纵波 P.因为纵波非常弱,用采样器采集不到可供观察的纵波.我们只能通过观察示波器来研究纵波 P 的特征及变化规律.

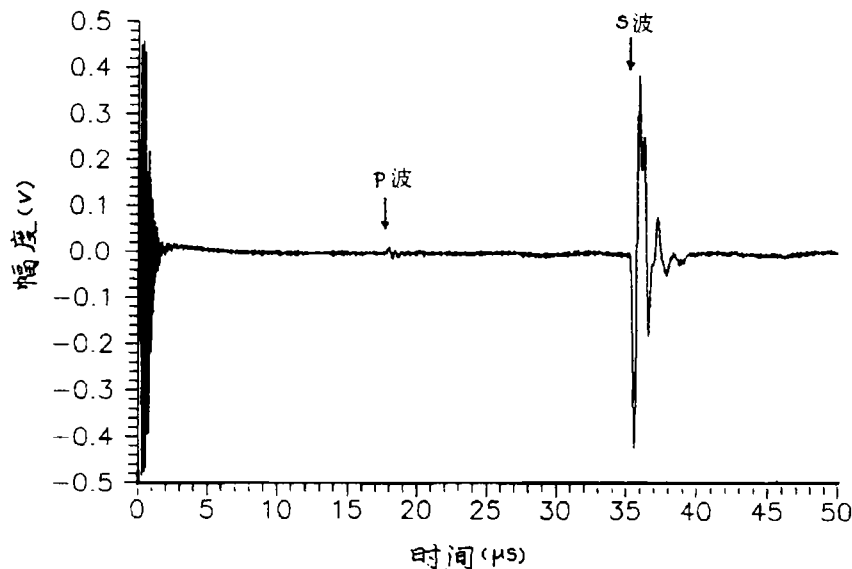


图 3 接收波列

P 为纵波, S 为横波

观察波列中纵横波幅度随相对夹角变化的规律, 可得出纵波 P 有如下特征:

(1) 伴随性

纵波 P 的幅度和面切变波 S 幅度一起随相对夹角的改变而改变. 它们同时从最大值降至最小值, 然后再增至最大值. 如此重复下去. 当相对夹角改变一周后, 都出现了四个极大值和四个极小值. 事实上, 纵波的幅度随相对夹角的变化也具有图 4 的特征. 显然这是四极子纵波. 对于普通 2-2 型压电复合材料, 当晶片作厚度切变振动时, 在压电相两端产生伴随纵波偶极子^[9]. 这里产生的原因主要是由各对偶极子组合振动引起的.

(2) 与 S 波首波位相相反

波列中纵波与面切变波的首波位相刚好相反. 文献 [9] 中详细分析了厚度切变换能器中纵横波首波位相相反的问题. 这里亦可作相应的解释.

5 小结

通过控制压电复合材料中压电相的分布形式, 由拼接 2-2 型压电复合材料可方便地制成

面切变压电复合材料. 我们给出了这种压电复合材料的制作方法并测试了其特性参数, 然后制作了面切变换能器并测试了其辐射特性. 同时指出波列中的纵波具有四极子纵波的特性、伴随特性以及其首波位相与面切波首波位相相反.

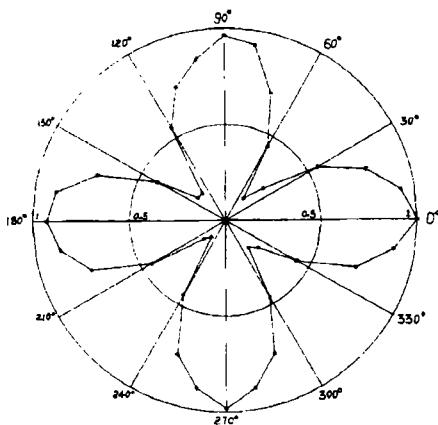


图 4 面切变波幅度随两个换能器夹角的变化情况, 呈四叶玫瑰状

(下转第 37 页)

5 数据处理 — 排队式数字滤波方法

在前述提高分辨力的多次测量法的基础上,利用微机计算快速准确的功能,以排队式数字滤波法排除可疑数据(特别是偏差超过一个超声波周期的数据),减小随机误差,以大量正确数据的平均值估计真值,进一步提高精度和分辨力.具体方法是一次测 49 个数,共测 10 次,49 个数按大小排序去掉两头,取中间数据的平均值作为一次测量值,再将 10 次测量值,排队去掉两头,取中间数据平均值作为最后测量值.

6 分辨力测试举例

分别在 L=3018.4mm 和 L=4911.7mm 处进行了 10 次测量(已按大小排序).

(1) L=3018.4mm,测量的 10 个数分别为(单位: mm):

3019.721, 3019.733, 3019.736, 3019.748, 3019.754, 3019.799, 3019.808, 3019.824, 3019.83, 3019.854.

标准误差 σ = 标准偏差 $S_x=0.0475\text{mm}$, 分辨力 $\sigma = 2.35 \times 0.0475\text{mm}=0.11\text{mm}$.

(2) L=4911.7mm,测量的 10 个数分别为

(单位: mm):

4912.016, 4912.031, 4912.032, 4912.061, 4912.119, 4912.125, 4912.175, 4912.176, 4912.178, 4912.203.

标准误差 σ = 标准偏差 $S_x=0.0713\text{mm}$, 分辨力 $\sigma = 2.35 \times 0.0713\text{mm}=0.17\text{mm}$.

7 结论

系统误差不影响测距分辨力,分辨力取决于测量的随机误差. $\delta = 2.35\sigma$ 可作为计算分辨力的定量公式,故提高分辨力的基本方法是减小测量系统的随机误差.采用压电式超声换能器,高压充放电发射电路和非谐振的直接放大、带通滤波接收电路及高频计数测时电路组成的一发一收超声测距硬件系统,加上排队法软件滤波,减小了随机误差,具有较高的测量分辨力.

参 考 文 献

1 李锡镨. 实验的数学处理. 北京: 科学出版社. 1993. 74, 64.
2 翟国富, 刘茂恺等. 仪表技术与传感器, 1994, (6): 25-28.
3 山东省计量科学研究所. “七五”攻关项目中 DKJ-1 煤矿矿压计算机监测系统计量测试报告.

(上接第 10 页)

致谢 中国科学院声学研究所朱厚卿教授帮助测试了面切变晶片的一些参数,作者在此谨表谢意.

参 考 文 献

1 Gururaja T R, Schulze W A, Cross L E, et al. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, 1985, **32**(4): 481-498.
2 Gururaja T R, Schulze W A, Cross L E, et al. *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, 1985, **32**(4): 499-513.

3 耿学仓, 李明轩. 应用声学, 1991, **10**(5): 10-14.
4 Zhang Q M, Chen J, Zhao J, et al. *IEEE Trans. UFFC*. 1994, **42**(4): 774-781.
5 Dang C J, Yang Y R, Li M X. *Chinese Science Bulletin*, 1996, **41**(11): 1044-1046.
6 Berlincourt D A. Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers. In: Mason W P ed, *Physical Acoustics*, 1(Part A), New York and London: Academic Press, 1964. 169.
7 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵, 北京大学出版社, 1990.
8 党长久, 杨玉瑞, 李明轩. 应用声学, 1997, **16**(2): 7-13.
9 党长久, 杨玉瑞, 李明轩. 应用声学, 1996, **15**(4): 10-15.