

一种可提高压电复合材料 d_{33} 和 d_h 值的 新型结构传感器

李 擎

(北京信息工程学院传感器电子学研究所 北京 100101)

1997 年 3 月 14 日收到

摘要 原理分析和实验结果证明了:通过一种含有空腔的金属电极与压电复合材料的界面作用,改变了应力的作用方式,提高了 d_{33} 值(从 12.0–27.8pC/N 提高到 33.6–106pC/N);并使数值符号相反的 d_{33} 和 d_{31} 均对 d_h 值起加大作用,从而 d_h 值可由复合材料的小于 27pC/N 提高到 41pC/N 以上,这种新型结构可显著提高压电复合材料力敏器件的灵敏度和机械强度,使之有望在水声等诸多领域广泛应用。

关键词 高灵敏度, 空腔结构, 压电复合材料

A sensor with new construction for raising d_{33} and d_h of the piezoelectric composite material

Li Qing

(Beijing Information Technology Institute, Beijing 100101)

Abstract A principle analysis and experiments have proved that using the interfacial action between a metal electrode with cavity and a piezoelectric composite film can change the action of the stress, raise the value of d_{33} from (12.0–27.8pC/N) to (33.6–106pC/N), make d_{33} and d_{31} with opposite signs to add up in their contributions to d_h , which can thus be raised from $< 27pC/N$ to $> 41pC/N$. The new construction increases the piezoelectric sensitivity and the mechanical strength of the piezoelectric composite film as a force sensing element and can be expected to be applied widely in underwater acoustics, electroacoustics, etc.

Key words High piezoelectric sensitivity, Electrode with cavity, Piezoelectric composite material

1 前言

压电复合材料已开始作为一种新型的换能器材料在国内外应用,但其压电应变系数

d_{33} 值一般 $< 30pC/N$, 压电耦合系数 d_h 值 $< 27pC/N$, 而且其机械强度较低。为了改善性能,目前国内外正研究复合材料的配

方和工艺条件。本文受 R.E.Newnham 博士等对水听器用压电陶瓷进行结构设计^[1] 的启发, 根据弯曲伸张换能器的原理, 将含有空腔的金属片作为压电复合材料的电极, 本文将这种结构的换能器称为压电复合材料 KX 型结构传感器, 其压电应变系数 d_{33} 和静压压电应变系数 d_h 值显著提高, 而且, 由于金属片的保护, 其机械强度大大提高。

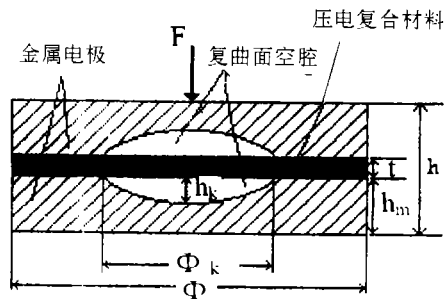


图 1 传感器剖面图

2 结构原理

压电复合材料 KX 型结构传感器由金属电极和压电复合材料组成, 外形为圆片, 金属电极与复合材料粘贴的一面磨出复曲面空腔, 其剖面图如图 1 所示。图中 ϕ 和 h_m 分别为电极的直径和厚度, ϕ_k 和 h_k 分别为空腔的径向跨度 (直径) 和高度, t 为压电材料厚度。设 d_{33} 、 d_{31} 为复合材料的压电应变系数, d_h 为复合材料的静压压电应变系数; d_{33}' 、 d_{31}' 为传感器的等效压电应变系数, d_h' 为传感器的等效静压压电应变系数。下面推导 d_{33}' 和 d_h' 的表达式。

2.1 d_h'

如图 2 所示, 在静水压模式下, 即传感器只受流体等静压力 P_0 作用时, 设 T_z 为复合材料所受的 Z 方向的应力, T_r 、 T_θ 为其径向应力, 压电方程为

$$\begin{aligned} D_h' &= d_h' P_0 \\ &= d_{33} T_z + d_{31} T_r + d_{31} T_\theta \\ &= d_{33} T_z + 2d_{31} T_r \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) 中

$$T_z = P_0 \cdot S/S_2 \quad (2)$$

S 为电极的表面积, S_2 为电极与复合材料粘接的面积,

$$S = \pi(\phi/2)^2 \quad (3)$$

$$S_2 = S - \pi(\phi_k/2)^2 \quad (4)$$

S 略大于 S_2 ;

$$T_r = P_0 - T_r' \quad (5)$$

T_r' 为径向拉伸应力。由图 2 和图 1, 有

$$F_r' = T_r' \cdot \pi\phi_k/2 \cdot t/2 \quad (6)$$

$$F_z' = P_0 \cdot \pi(\phi_k/2)^2 \quad (7)$$

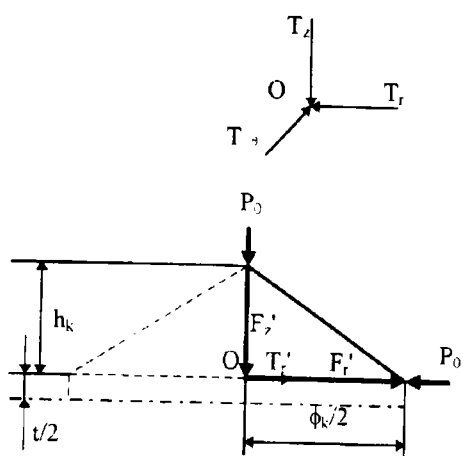


图 2 传感器受等静压 P_0 作用时的受力分析
由图 2 知

$$\begin{aligned} F_r'/F_z' &= (\phi_k/2)/h_k \\ &= \phi_k/2h_k \end{aligned} \quad (8)$$

$$T_r' = p_0 \cdot \phi_k^2/(2h_k t) \quad (9)$$

由式 (1),(2),(5) 和 (9) 得

$$D_h' = \{d_{33}S/S_2 - 2d_{31}[\phi_k^2/(2h_k t) - 1]\}P_0 \quad (10)$$

所以

$$\begin{aligned}d_h' &= D_h' / P_0 \\&= d_{33} S / S_2 - 2d_{31} [\phi_k^2 / (2h_k t) - 1]\end{aligned}\quad (11)$$

设 $\phi_k=10\text{--}1\text{mm}$, $h_k=1\text{--}0.1\text{mm}$, $t < 100\mu\text{m}$, 则有

$$\phi_k^2 / (2h_k t) > 5 \quad (12)$$

由式 (5),(9) 和 (12), 有

$$-T_r' > 4P_0 \quad (13)$$

在

$$\phi_k^2 / (2h_k t) \gg 1 \quad (14)$$

的条件下, 即空腔的直径越大, 空腔的高度越小时, 由式 (5),(9) 有

$$T_r \approx -T_r' \quad (15)$$

式 (15) 表明复合材料在径向主要受负剪切力作用。由式 (11),(12) 和式 (3),(4) 可得

$$d_h' > d_{33} + 8(-d_{33}) \quad (16)$$

由式 (11),(14) 和式 (3),(4) 有

$$d_h' \approx d_{33} + 2(-d_{31})\phi_k^2 / (2h_k t) \quad (17)$$

由于复合材料的 d_{31} 值为负数, 并且其

$$d_h = d_{33} + 2d_{31} = d_{33} - 2(-d_{31}) \quad (18)$$

将式 (16),(17) 与式 (18) 比较, 可知

$$d_h' > d_h \quad (19)$$

即含空腔的电极与压电复合材料界面的作用,

改变了应力的作用方式, 使复合材料在径向受到较大的负剪切力作用, 从而使数值符号相反的压电应变系数 d_{33} 和 d_{31} 均对传感器的压电耦合系数 d_h' 起加合作用。

2.2 d_{33}'

参见图 1, 当传感器受到 Z 方向的压力 F, 且只受到该力时, 弓型空腔把这个正压力的一部分转换成径向较大的负剪切力, 使得复合材料在径向有外延力, 这样, 外加正压力和内部负剪切力都产生压电效应, 为简化分析起见, 设分别产生电荷 Q_z, Q_r , 则电极上产生的总电荷

$$Q = Q_z + Q_r \quad (20)$$

由于 Z 方向的力是正压力, 径向的力是负负剪切力, 所以 Q_z 和 Q_r 的符号相同, 根据式 (20) 和 d_{33} 计算公式 $d_{33} = Q/F$, 传感器的

$$d_{33}' = (Q_z + Q_r)/F = Q_z/F + Q_r/F \quad (21)$$

由于 S 约等于 S_2 , 故式 (21) 中 Q_z/F 约等于复合材料的 d_{33} 值, 所以

$$d_{33}' \approx d_{33} + Q_r/F > d_{33} \quad (22)$$

还可以从另一角度得出该结论: 对应式 (8),(10),(11) 有传感器中心点的

$$d_{33}' = d_{33} S / S_2 - 2d_{31} \phi_k^2 / (2h_k t) \quad (23)$$

由式 (3),(4),(12) 和 (23) 有

$$d_{33}' > d_{33} + 8(-d_{33}) > d_{33} \quad (24)$$

如果在式 (14) 的条件下, d_{33}' 比 d_{33} 更显著增大。

3 制作、测试与讨论

按上述设计传感器的原理加工金属电极。压电复合材料为厚度 $t=85\text{--}60\mu\text{m}$ 的 0-3 复合材料, 为简化传感器制作工艺, 复合材料用已

溅射电极和已极化的材料，这样，传感器制作后不需极化，而且便于复合材料和金属板电极的电联通。

电极和复合材料表面清除油污后用导电胶粘接。粘接时胶层要薄，不能将空腔填塞，以免影响应力的转化；由于复合材料很薄，胶不能溢出，以免将电极短路。从理论上讲，所用导电胶的柔顺性要求比复合材料的好，但由于客观条件限制，没有对其进行选择，所以影响

了样品性能。
 d_{33} 值和 d_h 值测试装置分别为中国科学院声学所研制的 ZJ-Zd₃₃ 测试仪、水听器校准器和阻抗分析仪。测试误差主要是由传感器制作工艺不一致性和安装误差引起。

表 1 是传感器中心点的 d_{33}' 测试值与所用复合材料的 d_{33} 值，测试频率为 100Hz。

表 1 d_{33} 值测试结果

参数	样品号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$d_{33}(\text{pC/N})$	12.0	15.5	16.8	17.0	17.2	17.6	24.5	27.8
$h_m=1.2\text{mm}, d_{33}'(\text{pC/N})$	33.6	34.7	37.5	38.4	39.0	39.9	43.0	62.0
$h_m=0.8\text{mm}, d_{33}'(\text{pC/N})$	48.0	55.0	64.2	67.0	68.0	70.0	83.0	106

表 2 d_h 值测试结果

参数	样品号						
	1	2	3	4	5	6	7
$d_h(\text{pC/N})$	26.9	26.9	25.8	25.6	27.5	25.2	26.2
$d_h'(\text{pC/N})$	55.3	41.6	45.7	43.4	48.0	47.0	49.1

由表 1 所示测试结果可见：

(1) 含空腔电极的传感器的 d_{33}' 值 (33.6–106pC/N) 比复合材料的 d_{33} 值 (12.0–27.8pC/N) 明显提高，这验证了“2 结构原理”中的分析结果。

(2) 薄的空腔电极比厚的更能增大传感器的 d_{33}' 值 (厚 1.2mm 时 d_{33}' 值为 33.6–62.0pC/N，厚 0.8mm 时 d_{33}' 值为 48.0–106pC/N)。这是因为金属电极在弯曲振荡模式下，薄的极板弯曲容易，应力转换效果明显。

图 3 是电极空腔不同直径情况下，传感器中心点 d_{33}' 测试值与所用复合材料的 d_{33} 值的关系，测试频率为 100Hz。曲线 1–4 所对应的复合材料厚度 t 和 d_{33} 值分别为 (80 μm ，14.0pC/N)、(60 μm ，17.0pC/N)、(78 μm ，24.5pC/N) 和 (85 μm ，27.8pC/N)。由图 3 所示测试结果可见：大直径的空腔更能增大传感器的 d_{33}' 值，与“2 结构原理”中的分析结果

相符。

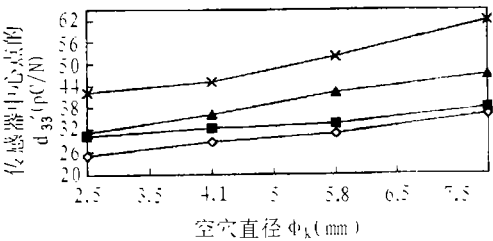


图 3 空腔直径与传感器中心点的 d_{33}' 的关系

- × — $d_{33}=27.8\text{pC/N}$
- ▲ — $d_{33}=24.5\text{pC/N}$
- — $d_{33}=17.0\text{pC/N}$
- ◇ — $d_{33}=14.0\text{pC/N}$

图 4 是传感器表面 d_{33}' 值的分布曲线，横坐标为距传感器表面几何中心的距离。由此可见，在弯曲运动最大的中心区域，压电效应最大。

(下转第 48 页)

虽然这样做比用静态法和小信号法更准确、更合理,能避免和减少超声清洗器清洗液空化不均匀、少数换能器发热和剥离等现象,但所得数据并不是实际工作时的实际数据,因为还有换能器与清洗槽底板的粘贴和匹配,再加上有负载等因素,实际数据还会变化。至于超声清洗机的清洗槽成品通过何种形式和参数

来进行有效的检测,则有待以后进一步探讨,也恳请广大同行赐教。

致谢 实验中曾得到华南理工大学佃岳武教授、广东省超声电子工程技术开发中心吴仕鸿、董尊成高工的指导,谨致深切谢意。

(上接第 33 页)

表 2 是传感器的 d_h' 测试值与所用复合材料的 d_h 值,测试频率 500Hz。

由表 2 可见传感器的 d_h' (41.6~55.3pC/N)比所用复合材料的 d_h 值(25.2~26.9pC/N)大,与原理分析结果相符合。

4 结论

本文的原理分析和实验结果证明了:由含有空腔的铜电极与压电复合材料组成的压电复合材料 KX 型结构传感器,改变了压电复合材

料应力的作用方式,提高了 d_{33} 值;并使数值符号相反的 d_{33} 和 d_{31} 对 d_h 值起加大作用,从而提高了 d_h 值。

这种新型结构成本低,可望作为提高压电材料力敏传感器灵敏度的一种手段得到应用。尤其在水听器方面,具有实用化的可能。

参 考 文 献

1 Xu Q C,Yoshikawa S,Newnham R E,et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control(USA)*, 1991, **38**(6): 634-639.

中国声学学会三届五次常务理事会在温州市召开

中国声学学会三届五次常务理事会于 1998 年 3 月 13 日~16 日在浙江省温州市召开。理事长陈通教授主持了会议。吴文虬、杨士莪、赵松林副理事长及关定华教授等 16 位常务理事出席了会议。

会议议程有:侯朝焕秘书长传达中国科协第五届全国委员会常务理事委员会的会议精神;修改中国声学学会章程;通报学会四届理事候选人的选举情况;通报各分会换届及主任委员的改选情况;汇报 1998 年全国声学学术会议的筹备情况;对参加学术会议的论文进行评审;介绍我会参加国际声学会议的情况;对下届学会领导人选征求意见。

会议对科协文件进行了学习讨论,对学会章程进行了认真讨论和修改,以适应新的形势发展,修改稿作为代表大会的审议稿。章程增设了会士和高级会员

等条例。本届常务理事会提议:中国声学学会现有的两院院士及名誉理事长、名誉理事、本届常务理事中符合条件的即为会士,待下届理事会通过章程后,再提交下届常务理事会确认。

常务理事会对各分会的改选情况进行了个别调整和补充,并责成学会办公室进一步完善改选前的准备工作。

对报审的 250 篇论文进行了评审,选出 233 篇。对文章的分组、大会报告、论文集的编排也做了较细致的安排。

会议决定中国声学学会换届大会暨 1998 年全国声学学术会议于今年 9 月中下旬在成都召开。

会议至此圆满完成各项议程。

(中国声学学会办公室)