

2-2 压电复合材料面板的压力放大作用

郑进鸿 李锦元

(海鹰集团公司 江苏无锡·214061)

2-2 压电复合材料应用普遍。材料中聚合物对压电陶瓷的应力作用,使性能得到许多改善。在复合材料两电极面上复盖薄面板,由于板的应力传递作用会使接收力和辐射力产生放大效应,从而提高了接收灵敏度和发射响应。本文对复合材料的聚合物和面板的复合作用进行了静态分析,得出了接收态的应力放大系数(s. a. f)和发射态的声压放大系数(p. a. f)。分析的结论对聚合物的选择、压电陶瓷和聚合物的尺寸比例、面板的材料与厚度选定,有明确的实用意义。

Pressure amplification effect of face plate on 2-2 piezoelectric composites

ZHENG Jinhong LI Jinyuan

(Haiying Group, Jiangsu Wuxi · 214061)

2-2 type piezoelectric composites is used for many practical application. Due to the stress effect of polymer matrix on ceramic in its composite, piezoelectric performance of the composites has been improved. With the face plates on electrodes surface in its composites, its stress transfer between the plate and two constituents—the ceramic and polymer matrix so that better receiving sensitivity and transmitting response of 2-2 composite transducer can be achieved. In this paper the effect of the polymer and face plate on the composites is analyzed by static condition. The stress amplification factor (s. a. f) and pressure amplification factor (p. a. f) are derived. It is also predefined confirmatively to select the polymer materials, the face plates materials and its thickness and to determine the geometry and aspect ratio for ceramic and polymer.

1 引言

压电复合材料是近十几年来发展很快的新型压电材料,其研究和应用得最为普遍的是 1-3 和 2-2 两种复合材料,特别是 2-2 压电复合材料,由于它的研究较为成熟,并且因结构和制作工艺较简便,在超声和水声中得到很多应用。近几年来,我们对 2-2 压电复合材料换能器进行了一系列的应用研究,发现面板对换能器的接收灵敏度和发射响应有明显的放大作用,这正是我们所期望的,为此我们对聚合物的选择,压电陶瓷和聚合物尺寸比例及面板的材料与厚度等作用机理进行理论分析。

2-2 压电复合材料换能器的结构形式见图 1,分析用的座标系原点在聚合物中间,取向见图 1 右,陶瓷和聚合物在 X 方向相间排列,陶瓷条在 Z 方向极化,长度方向尺寸为 L,陶瓷条宽为 a,聚合物宽为

d,厚度为 h,上下面板厚度为 t,在 $L \gg h, a, d$ 的条件下,可以近似用二维理论分析。

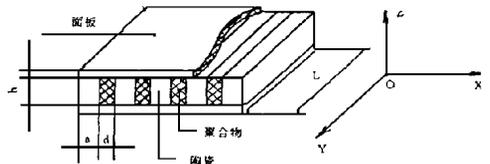


图 1 换能器结构

在没有面板时,且表面均匀接受压力的情况下,由于两种材料的弹性模量不一样(在动态时是特性阻抗不一样),表面产生的位移就不同,并有一个周期性的分布。聚合物的形变由于切变模量的作用通过接触界面将这形变的应力传递给陶瓷,产生了陶瓷的应力。当在材料表面覆盖一薄层硬质面板时,表面周期分布的位移就会趋于均匀化,由于面板的抗

弯强度的作用, 接受到的压力, 又会集中到陶瓷条上, 另一方面聚合物的切变应力作用仍然存在, 可能减弱些。但是两者的综合作用, 仍然产生应力增加的现象, 这种现象称为应力放大作用, 用应力放大系数 (stress amplification factor) 来表征, 简称 s. a. f. 当材料受电压激励发射声压时, 陶瓷受激产生位移, 通过聚合物交界面切变模量的作用使聚合物上下表面产生位移, 由于面板的存在也会使表面位移趋于均匀化, 会使位移产生的体积速度增加。聚合物和面板的综合效应, 也使声压产生增大作用, 我们用声压放大系数 (pressure amplification factor) 来表征, 简称 p. a. f. 根据这样的物理模型可以看出, 这两种放大作用必定与聚合物材料的切变模量、弹性模量及面板的抗弯强度 (弹性模量、厚度) 有关系, 与压电复合材料本身的陶瓷体积百分比以及 $(a+d)/h$ 的比例有关系。通过这些分析, 可以对上述各种参数的选择和确定提供理论依据。

2 模型

2.1 位移分布

2-2 压电复合材料的结构和坐标系见图 1, 上下面板外表覆盖两个硬质薄板, 其抗弯强度 D 为:

$$D = Y^f t^3 / 12(1 - \sigma^2) \quad (1)$$

式中 Y^f 、 σ 分别为面板的弹性模量和泊松比, t 为面板的厚度。在复合材料表面 $Z = h/2$ 处面位移为 $U(x, h/2)$, 为平衡条件分两种情况来讨论:

2.1.1 接收态

在聚合物区域有薄板的抗弯力 DU_{xxxx} , 聚合物的剪切力 $h\mu^p U_{xx} / 4$, 弹性恢复力 $-2Y^p U / h$ 和接收外力 T_3 等 4 种力在表面平衡。即

$$DU_{xxxx}(x, h/2) + h\mu^p U_{xx}(x, h/2) / 4 - 2Y^p \cdot U(x, h/2) / h + T_3 = 0 \quad -d/2 < x < d/2 \quad (2)$$

在陶瓷区域表面有同样的力平衡, 仅材料参数不同。

$$DU_{xxxx}(x, h/2) + h\mu^c U_{xx}(x, h/2) / 4 - 2Y_{33}^c \cdot U(x, h/2) / h + T_3 = 0 \quad d/2 < x < d/2 + a \quad (3)$$

式中 μ^p 、 Y^p 分别为聚合物的切变模量和弹性模量, μ^c 、 Y_{33}^c 分别为陶瓷的切变模量和弹性模量。

由(2)和(3)式解微分方程得表面位移:

聚合物面:

$$U(x, h/2) = A \operatorname{ch}(\beta^p x) + hT_3 / 2Y^p \quad -d/2 < x < d/2 \quad (4)$$

陶瓷面:

$$U(x, h/2) = B \operatorname{ch}[\beta^c(x - (a+d)/2)] + hT_3 / 2Y_{33}^c \quad d/2 < x < d/2 + a \quad (5)$$

式中:

$$\beta^p = \frac{-h\mu^p + \sqrt{h^2(\mu^p)^2 + 128DY^p/h}}{8D} \quad (6)$$

$$\beta^c = \frac{-h\mu^c + \sqrt{h^2(\mu^c)^2 + 128DY_{33}^c/h}}{8D} \quad (7)$$

根据陶瓷和聚合物界面位移连续条件, 可得出:

$$A = \frac{\frac{h}{2} \left[\frac{1}{Y_{33}^c} - \frac{1}{Y^p} \right] T_3}{\frac{\beta^c Y^p}{\beta^p Y_{33}^c} \operatorname{sh}(\beta^p \frac{d}{2}) \operatorname{cth}(\beta^c \frac{a}{2}) + \operatorname{ch}(\beta^p \frac{d}{2})} \quad (8)$$

$$B = \frac{-\frac{h}{2} \left[\frac{1}{Y_{33}^c} - \frac{1}{Y^p} \right] T_3}{\frac{\beta^p Y_{33}^c}{\beta^c Y^p} \operatorname{sh}(\beta^c \frac{a}{2}) \operatorname{cth}(\beta^p \frac{d}{2}) + \operatorname{ch}(\beta^c \frac{a}{2})} \quad (9)$$

2.1.2 发射态

在聚合物区域有薄板的抗弯力 DU_{xxxx} , 聚合物的剪切力 $h\mu^p U_{xx} / 4$, 弹性恢复力 $-2Y^p U / h$ 等 3 种力在表面平衡, 即

$$DU_{xxxx}(x, h/2) + h\mu^p U_{xx}(x, h/2) / 4 - 2Y^p \cdot U(x, h/2) / h = 0 \quad -d/2 < x < d/2 \quad (10)$$

在陶瓷区域表面, 除了上述 3 种力之外, 还有外加电压压电效应激励的力 $Y_{33}^c d_{33} E_3$

$$DU_{xxxx}(x, h/2) + \frac{h}{4} \mu^c U_{xx}(x, h/2) - \frac{2}{h} Y_{33}^c \cdot U(x, h/2) + Y_{33}^c d_{33} E_3 = 0 \quad d/2 < x < d/2 + a \quad (11)$$

由(10)和(11)式解微分方程得表面位移:

聚合物面:

$$U(x, h/2) = A \operatorname{ch}(\beta^p x) \quad -d/2 < x < d/2 \quad (12)$$

陶瓷面:

$$U(x, h/2) = B \operatorname{ch}[\beta^c(x - (a+d)/2)] + hd_{33} E_3 / 2 \quad d/2 < x < d/2 + a \quad (13)$$

根据陶瓷和聚合物界面位移连续条件, 同样得出:

$$A = \frac{hd_{33} E_3 / 2}{\left(\frac{\beta^c Y^p}{\beta^p Y_{33}^c} \operatorname{sh}(\beta^p \frac{d}{2}) \operatorname{cth}(\beta^c \frac{a}{2}) + \operatorname{ch}(\beta^p \frac{d}{2}) \right)} \quad (14)$$

$$B = \frac{hd_{33} E_3 / 2}{\left(\frac{\beta^p Y_{33}^c}{\beta^c Y^p} \operatorname{sh}(\beta^c \frac{a}{2}) \operatorname{cth}(\beta^p \frac{d}{2}) + \operatorname{ch}(\beta^c \frac{a}{2}) \right)} \quad (15)$$

2.2 放大系数

2.2.1 接收态的应力放大系数

在外力 T_3 作用下, 陶瓷面电位移面积分 (电荷) Q 为:

$$Q = 2 \int_{-d/2}^{(d+a)/2} d_{33} \frac{U(x, h/2)}{h} 2Y_{33}^c dx = d_{33} T_3 l \quad aY^p / 4 \quad (16)$$

得出接收态的应力放大系数为:

$$Y_s = 1 + \frac{2(1/Y^p - 1/Y_{33}^c) / a}{\frac{\beta^p}{Y^p} \operatorname{ch}(\beta^p \frac{d}{2}) + \frac{\beta^c}{Y_{33}^c} \operatorname{cth}(\beta^c \frac{a}{2})} \quad (17)$$

2.2.2 发射态的声压放大系数

陶瓷条在电压 E_3 作用下, 体积速度 V 为:

$$V = \frac{4}{h} \frac{(a+d)^{1/2}}{0} U(x, \frac{h}{2}) l dx = d_{33} E_3 a l Y_p \quad (18)$$

得出发射态的声压放大系数为

$$Y_p = 1 + \frac{2(1/Y_p + 1/Y_{33})/a}{\frac{\beta^p}{Y_p} \text{cth}(\beta^p \frac{d}{2}) + \frac{\beta^e}{Y_{33}} \text{th}(\beta^e \frac{a}{2})} \quad (19)$$

从(17)、(19)两个放大系数的数值结果就可以分析一系列参数的影响, 下面我们就对几个感兴趣的参数进行讨论。

3 数值分析

(1) 无面板($t=0$)时 s. a. f 和 p. a. f 与陶瓷的体积百分比 V_c 的关系

① 以 $k_1 = (a+d)/h$ 为参变量, 见图 2a、2b, 曲线由上向下分别对应不同的 K_1 次序(聚合物是橡胶), 可以看出 V_c 越小, 放大系数越大, K_1 越小, 放大系数越大, 即陶瓷条越稀, 越窄, 放大作用越明显, 这是由于聚合物切变位移的作用变得明显的结果。

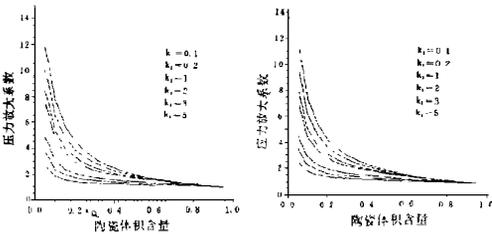


图 2a

图 2b

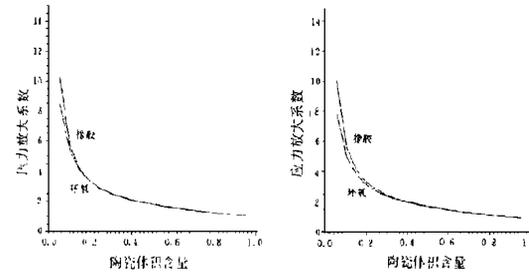


图 3a

图 3b

② 用环氧和橡胶作聚合物材料的比较, 取 $K_1 = 0.8$ 曲线见图 3a、3b, 发现在陶瓷的体积百分比 V_c 小的时候, 用橡胶的放大系数较用环氧的高些, 在 V_c 较大时, 相差不多, 这是由于橡胶 Y^p 较小而容易变形的缘故。

声学技术

(2) 有面板时 s. a. f 和 p. a. f 与陶瓷体积百分比 V_c 的关系

① 在面板材料为铜, 厚度 $t = 1\text{mm}$ 时聚合物用橡胶和环氧的比较见图 4a、4b, 可以看出加了面板后用橡胶的优越性明显提高。

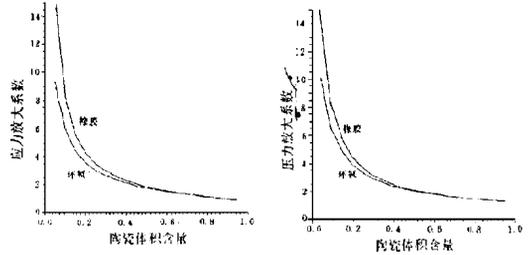


图 4a

图 4b

② 聚合物材料用橡胶情况下, 不同厚度面板的影响见图 5a、5b, 可以看出面板越厚越好, 越硬越好。即面板不仅提高橡胶的作用, 而且自身的作用, 随着厚度增加, 放大作用也增加。

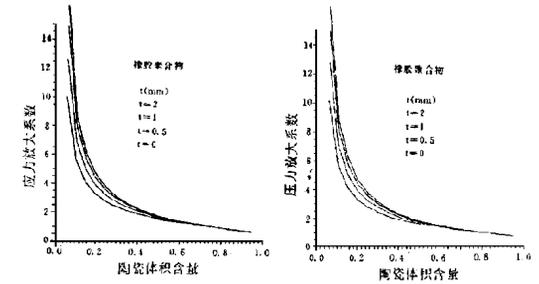


图 5a

图 5b

③ 聚合物用环氧时, 不同材料(铜、不锈钢)面板的影响见图 6a、6b。可见随着面板硬度的增加, 放大作用也增加, 这是由于抗弯强度增加的好处。

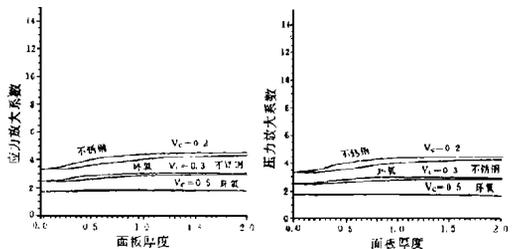


图 6a

图 6b

(3) 聚合物用橡胶时, s. a. f 和 p. a. f 与面板厚度的关系

以陶瓷体积百分比 V_c 为参变量见图 7, 可以看(下转第 188 页)

结构参量 X 与 π 的关系, 而 π 是 E 对体积的等温偏导, 因而(4)式实际上表示了分子结构参量 X 与分子势的关系。由此可以利用(4)式得:

$$XJ(X) = [P + \pi_i - PLT] \left[\frac{2}{RLT} + \frac{3n+1}{V(P + \pi_i) - (3n+1)RLT} \right]$$

将上式代入(15)、(16)、(17)式, 得到声速、声速系数和非线性声参量 B/A 与 $P + \pi_i$ 的关系, 一般情况下, 以 π_i 代替 $P + \pi_i$, 则各表达式中不显含 P , 故可认为 P 对声速、声速系数及非线性声参量的影响主要是通过改变体积 V 来实现的, 而 E 对其起着重要作用。这与 Bruce Hartmann 关于分子间势能是决定声速及其相关特性的主要因素的假设相一致²¹。

4 结论

自由体积理论得到的关于声速、声速系数及非线性声参量的表式在一定范围内是有效的。它能从一个侧面揭示声速及其相关特性与液体分子结构和分子作用力间的关系, 进而表明液体中声速、声速系数及 B/A 参量表达了分子级的信息, B/A 是液体分子结构和分子作用力信息的载体, 本文用不同方法得到了与 Bruce Hartmann 关于分子势能是决定声

速及其相关特性的主要因素的假设相一致的结论。

参考文献

- 1 胡英. 流体的分子热力学. 高等教育出版社, 1982
- 2 C. V. Suryanarayana. Ultrasonics, 1993; 31(4): 281 ~ 287
- 3 B. Hartmann. J. A. S. A., 1979; 65: 1362
- 4 C. V. Chaturvedi and Surendra Pratap. Acustica, 1979; 42: 260 ~ 263
- 5 Bertil Jacobson. Acta Chemical Scandinavica, 1952; 6: 1485 ~ 1493
- 6 L. 别尔格曼. 超声. 国防工业出版社, 1964
- 7 Handbook of Chemistry and Physics, 58th. Ed., The Chemical Rubber Company, Cleveland Ohio, U.S.A., 1977 ~ 1978, F ~ 16
- 8 A. B. Coppons, Robert T. Beyer, M. B. Seidin, James Donohue, Frans Guepin, Richard H. Hodson, and Charles Townsend, J. Acoust. Soc. Am., 1995; 38
- 9 全杰. 95 中国青年学术会议论文集, 1995; 277 ~ 280
- 10 [美]J. M. 普劳斯尼茨等著. 流体相平衡的分子热力学, 第二版. 化学工业出版社
- 11 全杰, 董彦武. 声学技术, 1989; 8(3): 39 ~ 43

(上接第 185 页)

出在 V_c 小时, 随面板厚度增加, 放大系数增加尤为明显, 而在 V_c 大时, 面板作用不明显。s. a. f 与 p. a. f 在 V_c 小时稍有差别。

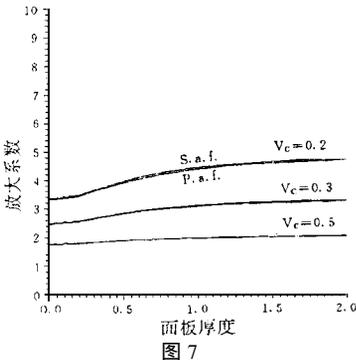


图 7

4 结 语

在 2-2 复合材料中聚合物和面板在陶瓷体积比较小时, 发挥非常有利的应力传递和放大作用, 聚合物是选择软性的材料较好, 面板是选择硬性材料和适当的厚度较好, 以期达到较好的综合效果, 为了保证应力良好传递, 各界面必须有良好的耦合。

本文进行了部分的实验验证, 冯嗣丁高工参与了实验用 2-2 复合材料的研制。

参考文献

- 1 Q. M. Zheng, W. Cao, J. Zhao, and L. E. Cross. Piezoelectric performance of piezoceramic-polymer composites with 2-2 connectivity-A combined Theoretical and Experimental study. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. Freq. Cont., 1994; 41: 556 ~ 563
- 2 W. Cao, Q. M. Zheng, J. Zhao, and L. E. Cross. Effects of face plates on surface displacement profile in 2-2 piezoelectric composites: IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. Freq. Cont., 1995; 42: 37 ~ 41