

考虑损耗的磁致/压电层合材料谐振磁电响应分析^{*}

杨帆 文玉梅[†] 李平 郑敏 卞雷祥

(重庆大学光电工程学院, 国家教育部光电技术及系统重点实验室, 重庆 400030)

(2006 年 11 月 13 日收到, 2007 年 1 月 26 日收到修改稿)

运用等效电路法, 对磁致/压电层合材料谐振状态下的磁电响应进行分析, 得到了材料在谐振状态下的磁电电压转换系数理论计算公式. 详细地分析了磁致/压电层合材料在谐振点附近的磁损耗、机械损耗、电损耗, 并给出了各种损耗相应的计算方法和大小, 发现谐振状态下, 材料的主要损耗来源于机械损耗. 分析结论较好地解释了磁电层合材料在不同偏置磁场下磁电响应的实验结果.

关键词: 磁致/压电层合材料, 磁电效应, 谐振, 损耗分析

PACC: 7580, 7540F

1. 引言

磁致/压电层合材料的磁电效应是由磁致伸缩层和压电层的“乘积效应”产生的. 在磁场的作用下, 磁致伸缩层产生应力或应变, 此机械运动通过粘接层传递到压电层, 压电层由于逆压电效应而产生电场, 从而实现磁电转换. 由于其磁电转换能力与其层间磁机电相互作用紧密相连, 因此当层合材料工作在谐振点附近时, 其磁电转换系数会显著增大. 研究表明磁电层合材料在谐振状态下的磁电转换系数可以比低频磁电转换系数高 1—2 个数量级^[1-4]. 磁致/压电层合材料具有高谐振磁电转换系数这一特性使得它可以在谐振状态下获得极高的磁传感以及能量转换能力, 在传感器与换能器领域有着广泛的应用前景, 因而近年来受到了广泛研究^[1-12].

磁致/压电层合材料具有高谐振磁电转换系数的现象首先由 Dong 等人报道^[1], 他们随后还对多种结构的磁致/压电层合材料的谐振磁电响应进行了理论和实验研究^[1-4]. 南京大学的 Wan 等人对弯曲谐振的磁致/压电层合材料进行了实验研究^[5], 并用串/并联等方式扩展了磁致/压电层合材料谐振带宽^[6]. 此外, Bichurin, Filippov, Srinivasan 等人对铁电/压电复合材料的谐振磁电响应也做了大量的理论和实验工作^[7-9]. 目前, 对磁致/压电层合材料的

谐振磁电响应的理论分析方法主要是 Dong 等人提出等效电路法^[4]. 为了分析谐振状态下磁致/压电层合材料的磁电响应特性, Dong 等人在等效电路中引入了机械品质因数 Q_{mech} 用来表征谐振状态时的损耗. 但是, 需要注意的是除了机械损耗, 磁致/压电层合材料谐振时还存在着磁致层的磁损耗以及压电层的电损耗. 为了更为全面地理解谐振状态下的磁电响应, 有必要进一步分析磁损耗和电损耗对谐振磁电响应的影响. 此外, Dong 等人并未给出 Q_{mech} 的具体计算方法, 只是给出了几个假设值^[4], 这也不便于人们对谐振磁电响应进行分析. 因此, 本文在分析得到谐振状态下磁致/压电层合材料磁机电等效电路之后, 详尽地讨论了磁电层合在谐振时的各种损耗并给出了相应计算方法, 最后得到了磁电材料在谐振状态下磁电转换系数与各种材料参数之间的关系. 通过实验以及与文献实验结果的对比, 分析结论较好的解释了相关实验结果.

2. 理论分析

2.1. 谐振状态下的等效电路模型

本文研究的磁致/压电层合材料按纵-横(LT)模式复合, 即磁致伸缩层沿长度方向磁化、压电层沿 31 方向极化(如图 1). 根据等效电路法, 令 $A = A_1$

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60374045, 50677072)和国家高技术研究发展计划(863 计划)(批准号: 2006AA04Z337)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ymwen@cqu.edu.cn

+ $A_2 = tw$ 为层合材料横截面积, $n = A_1/A = t_p/t$ 为磁致材料的厚度比, $\rho = (\rho_p A_1 + \rho_m A_2)/A$ 为层合材料的平均密度, 其中 t_p, t_m 分别为压电层和磁致伸缩层的厚度, $A_1 = t_m w, A_2 = t_p w$ 分别是磁致伸缩层和压电层的横截面积, ρ_p, ρ_m 分别是压电材料和磁致伸缩材料的密度, \dot{u}_1, \dot{u}_2 分别是晶片 $z = 0$ 和 $z = l$ 处的速度, 因此可得磁电层合材料低频 LT 模式下的磁机电等效电路^[10], 如图 2 所示.

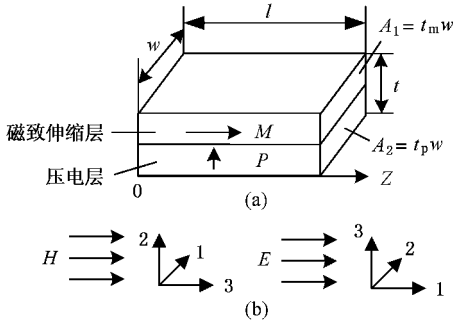


图 1 LT 模式 (a) 结构 (b) 坐标取向

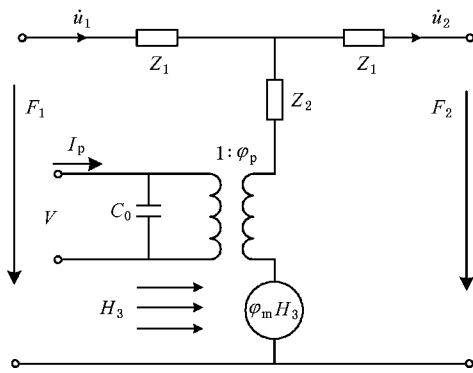


图 2 磁机电等效电路

图 2 中, $Z_1 = j\rho v A \tan \frac{kl}{2}, Z_2 = \frac{\rho v A}{j \sin kl}, C_0 = \frac{lw \epsilon_{33}^-}{t_p}, \epsilon_{33}^- = \epsilon_{33} (1 - k_{31}^2), \varphi_p = \frac{wd_{31,p}}{s_{11}^E}, \varphi_m = \frac{A_2 d_{33,m}}{s_{33}^H}, v^2 = \left(\frac{n}{s_{33}^H} + \frac{1-n}{s_{11}^E} \right) / \rho, k = \omega/v; H_3$ 为外加磁场强度; $s_{33}^H, d_{33,m}, \mu_{33}$ 分别是磁致材料的柔顺系数、动态磁致伸缩率以及材料磁导率; $s_{11}^E, d_{31,p}, \epsilon_{33}$ 分别是压电材料的柔顺系数、压电常数以及介电常数. 压电材料的机电耦合系数为 k_{31} .

材料自由振动时, $F_1 = F_2 = 0$, 相当于两个机械电压端短路, 磁机电等效电路如图 3 所示.

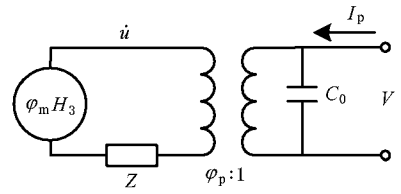


图 3 自由振动时的磁机电等效电路

此时机械端等效阻抗为

$$Z = Z_2 + Z_1 // Z_1 = -\frac{1}{2} j \rho v A \tan(kl/2). \quad (1)$$

利用公式:

$$\frac{\tan x}{x} = -\sum_{\vartheta} \frac{2}{x^2 - \frac{\vartheta^2 \pi^2}{4}} \quad (\vartheta \text{ 为奇数}), \quad (2)$$

在谐振点附近, $\vartheta = 1$, 并考虑到自由状态下薄板的一阶纵向谐振角频率为 $\omega_r = \pi v/l$ 以及 $k = \omega/v$ (1) 式可化简为

$$Z = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, \quad (3)$$

其中, $L_1 = \frac{\pi Z_0}{8\omega_r}, C_1 = \frac{8\pi Z_0}{\pi\omega_r}, Z_0 = \rho v A$.

上述分析都没有考虑材料及换能结构本身在磁电转换过程中的损耗, 因而当其谐振时, $Z = 0$, 这就意味着利用以上公式分析谐振磁电响应时, 会得到一个无穷大的磁电电压转换系数^[10], 这显然是不合实际的. 因此, 为了得到更为合理的谐振磁电转换系数公式, 有必要在磁机电等效电路的各部分引入各自的损耗电阻, 即表征 Terfenol-D 磁损耗的 R_{mag} , 表征层合材料机械损耗的 R_{mech} , 以及表征压电材料电损耗的 R_e . 相应地, 各部分的品质因数分别为 Q_{mag}, Q_{mech}, Q_e . 此时, 材料的磁电机等效电路如图 4 所示.

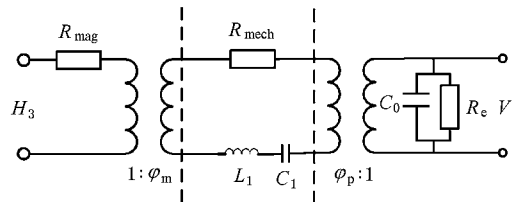


图 4 谐振频率附近考虑损耗的磁机电等效电路

2.2. 损耗分析

磁电层合材料在谐振时存在磁、机、电三种损

耗,下面分别对其进行分析。

铁磁材料在交变磁场中磁导率 $\tilde{\mu}$ 为一复数,即 $\tilde{\mu} = \mu' - i\mu''$,其中 μ' 为弹性磁导率,它是由于材料被磁化引起的; $i\mu''$ 为黏滞性磁导率,它是由磁滞、涡流、磁化弛豫或磁后效应等产生的磁损耗引起的。对于 Terfenol-D 来说,一般认为涡流损耗是磁损耗的主要原因,而且涡流会随着工作频率的提高而增大,从而降低磁电转换的效率^[5]。

一般的,在弱磁感应强度($B < 100 \text{ G}$ (0.01 T))及低频($f < 1 \text{ MHz}$)交变磁场中,厚 $t_m = 2d$ 的无限大铁磁薄板的涡流损耗系数 e 为^[13]

$$e = \frac{2\pi}{\mu' f Q_{\text{mag}}} = \frac{4\pi^2 \mu_0}{3} d^2 \sigma, \quad (4)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, σ 为样品的电导率。

但是(4)式只适用于小的交变磁场的情况。而作用于磁致/压电层合材料的外加磁场 H_x 是由交变磁场 H_{ac} 和偏置磁场 H_{bias} 构成,其关系如下:

$$H_x = H_{\text{ac}} + H_{\text{bias}} = H_0(e^{i\omega t} + a), \quad (5)$$

$$H_{\text{ac}} = H_0 e^{i\omega t}, H_{\text{bias}} = aH_0.$$

Terfenol-D/PZT 层合材料磁电响应的最优偏置磁场 H_{bias} 在 300—1000 Oe($1 \text{ Oe} = 79.6 \text{ A/m}$)之间^[1-5],而交变磁场峰值磁场强度 H_0 一般为 1 Oe,因而 $a \gg 1$ 。此时铁磁材料的磁导率几乎为常数,涡流损耗很小^[14]。重新利用 Maxwell 方程组对无限大的铁磁导电薄板在强偏置磁场作用下的涡流问题进行求解(见附录),得到

$$\mu' \approx a\mu_0\mu, \quad (6)$$

$$\mu'' = \frac{2}{3}\pi(\mu_0\mu)^2 d^2 \sigma f. \quad (7)$$

那么在偏置磁场作用下,

$$Q_{\text{mag}} = \frac{\mu'}{\mu''} = \frac{3a}{2\pi f \mu_0 \mu d^2 \sigma}. \quad (8)$$

对 Terfenol-D 薄板而言,当 $t_m = 10 \text{ mm}$, $a = 400$, $f = 100 \text{ kHz}$ 时利用(8)式,结合表 1 中 Terfenol-D 的相关参数,可以估算出层合材料谐振时 Terfenol-D 的 $Q_{\text{mag}} \approx 730$ 。

机械品质因数 Q_{mech} 为每周期内单位体积储存的机械能与损耗的机械能之比的 2π 倍,它反映了材料储存机械能的能力。材料单位体积上损耗的机械能可用损耗因子 $\tan\delta_{\text{mech}} = 1/Q_{\text{mech}}$ 表示,产生机械损耗的原因主要是由于材料的内摩擦。对层合材料而言,材料单位体积机械损耗应该等于材料总损耗与总体积之积,即

$$\tan\delta_{\text{mech}} = \frac{V_m \tan\delta_{\text{mech mag}} + V_p \tan\delta_{\text{mech piezo}}}{V}, \quad (9)$$

其中, V , V_m , V_p 分别是材料的总体积、磁致伸缩层体积、以及压电层体积, $\tan\delta_{\text{mech mag}}$, $\tan\delta_{\text{mech piezo}}$ 则分别是磁致伸缩层体积和压电层的机械损耗因子。

由图 1 可知 $V_m = nV$, $V_p = (1-n)V$,并考虑到 $\tan\delta_{\text{mech mag}} = 1/Q_{\text{mech mag}}$, $\tan\delta_{\text{mech piezo}} = 1/Q_{\text{mech piezo}}$,那么(9)式重写为

$$\frac{1}{Q_{\text{mech}}} = \frac{n}{Q_{\text{mech mag}}} + \frac{1-n}{Q_{\text{mech piezo}}}. \quad (10)$$

一般来说, Terfenol-D 的机械品质因数较低($Q_{\text{mech mag}} < 40$),而压电材料一般具有较高的机械品质因数(PZT-8 的 $Q_{\text{mech piezo}} > 1000$, PZT-5H 的 $Q_{\text{mech mag}} \approx 70$)^[15,16]。而磁致/压电层合材料中磁致层的最优体积比 n 一般在 0.5 以上,故由(9)式可得 Terfenol-D/PZT-5H 层合材料的机械品质因数 $Q_{\text{mech}} < 51$ 。这一数值与 Dong 等人^[1]和 Wan 等人^[5]的实验结果极为接近。

已知机械品质因数 Q_{mech} 后,则磁致/压电层合材料在谐振频率附近的机械阻抗可以表示为^[16]

$$R_{\text{mech}} = \frac{\omega_r L_1}{Q_{\text{mech}}} = \frac{\pi Z_0}{8 Q_{\text{mech}}}. \quad (11)$$

所有的压电材料都是电介质材料,但它们都不是理想电介质,不可能绝对绝缘。因此,在交变电场作用下,压电材料仍具有一定的导电性能,会产生电导电流和电导损耗。同时,相对于电场强度 E 来说,由于存在着极化弛豫现象,压电材料的电位移密度总是滞后一个相位角,因而通过试样的电流不会比外加电压超前 90° ,于是就产生的介质损耗。但是在较低的温度下,电导损耗很小,可以忽略不计^[17]。因此,通常把介质损耗当作压电材料的电损耗,即

$$Q_e = \omega C R_e, \quad (12)$$

其中, C 为试样的电容,且在谐振频率附近,可用 C_0 近似。

由文献[14]可知, PZT-5H 的 Q_e 约为 50,而 PZT-8 的 Q_e 在 250 以上。

2.3. 谐振状态下的磁电转换

通过损耗分析可以看出,对于由 Terfenol-D 和 PZT-5H 构成的层合材料, $Q_{\text{mag}} > 700$,而 Q_{mech} , Q_e 都在 50 左右,所以可以认为 Terfenol-D/PZT-5H 层合材料的损耗主要来自于机械损耗和压电层的介电损耗

而磁致层的磁损耗相对来说较小,即在分析时,图 4 中的 R_{mag} 可以认为等于零.

根据图 4,谐振状态下,电学端部分的阻抗大小为

$$|Z_e| = \left| \frac{R_e \frac{1}{j\omega C_0}}{R_e + \frac{1}{j\omega C_0}} \right| = \frac{Q_e}{\omega C_0 \sqrt{Q_e^2 - 1}} \approx \frac{1}{\omega C_0}. \quad (13)$$

可以看到,由于 Q_e 的数值较大,使得介电损耗在(13)式中被近似忽略掉了.那么根据电路原理有

$$\left| \frac{\varphi_p dV}{\varphi_m dH_3} \right| = \left| \frac{\frac{\varphi_p^2}{j\omega C_0}}{R_{mech} + \frac{\varphi_p^2}{j\omega C_0}} \right| = \left| \frac{\varphi_p^2}{j\omega C_0 R_{mech} + \varphi_p^2} \right|, \quad (14)$$

化简即可得 Terfenol-D/PZT-5H 磁致/压电层合材料谐振时的磁电转换系数

$$\alpha_V^{reson} = \frac{8Q_{mech}n(1-n)td_{33am}d_{31p}}{\epsilon_{33} [n\pi^2(1-k_{31}^2)s_{11}^E + (1-n)(\pi^2 + (8Q_{mech} - \pi^2)k_{31}^2)s_{33}^H]}. \quad (15)$$

考虑到(9)式以及 Terfenol-D/PZT-5H 层合材料的 Q_{mech}, k_{31} 大小(15)式可简化为

$$\alpha_V^r = \frac{8Q_{mech}}{\pi^2} \frac{n(1-n)td_{33am}d_{31p}}{\epsilon_{33} [n(1-k_{31}^2)s_{11}^E + (1-n)s_{33}^H]} = \frac{8Q_{mech}}{\pi^2} \alpha_V^{low}, \quad (16)$$

其中

$$\alpha_V^{low} = \frac{n(1-n)td_{33am}d_{31p}}{\epsilon_{33} [n(1-k_{31}^2)s_{11}^E + (1-n)s_{33}^H]}$$

为低频时磁电层合材料的磁电转换系数^[10].

因此当材料工作在谐振点附近时,其磁电响应不但与磁致、压电材料的柔顺系数、磁致伸缩系数、压电常数材料物理参数有关,而且材料的几何尺寸也将显著影响其磁电响应.若将(16)式对几何尺寸参数 n 求偏导并使之等于 0,则可以确定磁电层合材料各层最优尺寸比.此外,在谐振状态下,材料的主要损耗来源于机械损耗,而磁致伸缩层的涡流损耗和压电层的介电损耗在经优化实验条件后可以忽略,即可近似认为材料的机械品质因数 Q_{mech} 为材料的品质因数 Q .

3. 实验与讨论

实验用的 Terfenol-D(甘肃天星稀土功能材料有限公司生产)和 PZT-5H(电子工业部 26 所生产)样片尺寸分别为 $12\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, $12\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$, Terfenol-D 沿其长度方向磁化, PZT-5H 沿其 31 方向极化,其各项参数如表 1 所示.先用有机溶剂将样品清洗干净,然后用导电胶粘接后置于烤箱,在 100°C 下烘烤 4 h,取出冷却,得到磁电层合材料.

表 1 材料参数

	d_{33am} 或 d_{31p} / $10^{-12}\text{ m} \cdot \text{N}^{-1}$	s_{33}^H 或 s_{11}^E / $10^{-12}\text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$	ϵ_{33}	k_{31}	$\mu \sigma / (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
Terfenol-D	4000	40			$5 \quad 1.7 \times 10^6$
PZT-5H	-270	16.5	3800	0.38	

将 Terfenol-D/PZT-5H 层合材料置于测量系统中,改变交变磁场频率,从而得到不同频率下的材料的磁电电压转换系数.图 5 为材料在低频的磁电电压转换系数,图 6 为一阶纵向谐振点附近的磁电电压转换系数.

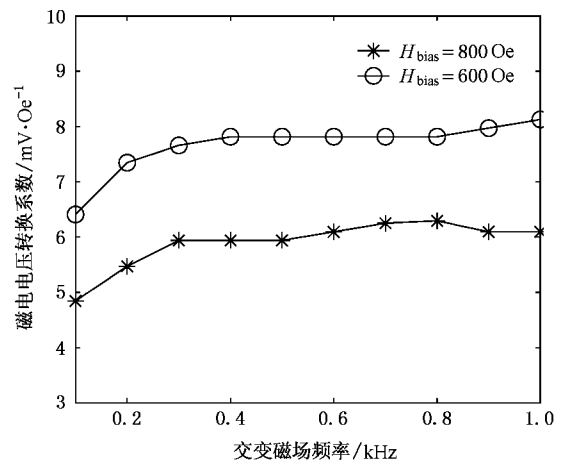


图 5 低频磁电电压转换系数

由图 5,6 可知,当偏置磁场 $H_{bias} = 800\text{ Oe}$ 样片低频谐振磁电电压转换系数约为 6.25 mV/Oe ,谐振磁电电压转换系数为 559.4 mV/Oe ,且谐振频率 $f_r = 103\text{ kHz}$, 3 dB 带宽 Δf 约为 6 kHz ,等效品质因数 $Q = f_r/\Delta f = 17$;当 $H_{bias} = 600\text{ Oe}$ 时,样片低频谐振磁电电压转换系数约为 8.125 mV/Oe ,谐振磁电电压转换

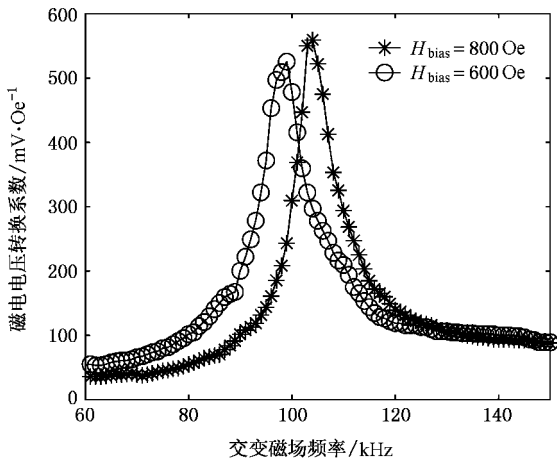


图6 一阶纵向谐振点附近磁电电压转换系数

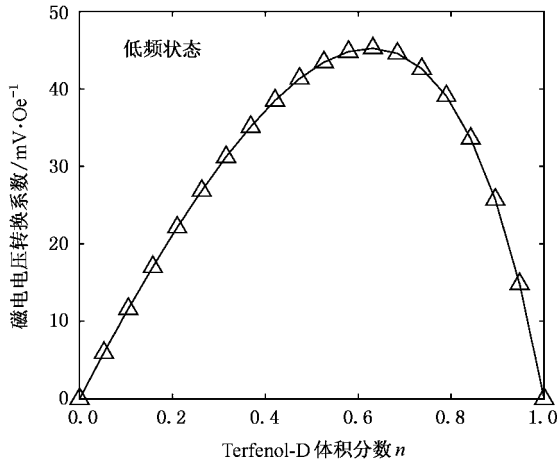


图7 理论低频磁电电压转换系数

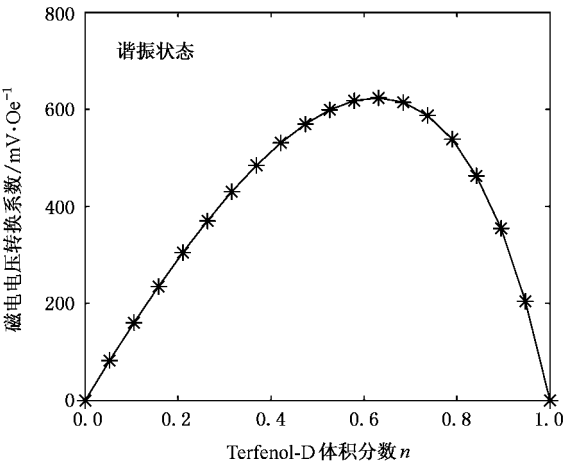


图8 理论谐振磁电电压转换系数

约为 6.3 kHz, $Q = 16$. 由于磁电层合材料在谐振时的磁损耗和电损耗都比较小,可以近似认为 $Q_{\text{mech}} = Q$. 可以看到,这里的 Q_{mech} 较前面计算值偏小,这主要是由于实验系统的附加机械损耗(如样品的固定、焊点、引线等)过高造成的. 将 $Q_{\text{mech}} = 17$ 代入(16)式,利用表1的数据,可计算得到在不同几何尺寸参数 n 的条件下,层合材料在低频和共振时的理论磁电电压系数,计算结果如图7、8所示. 当 $n = 1/1.8 = 0.56$ 时,材料的理论低频磁电转换系数为 44.3 mV/Oe,理论谐振磁电转换系数约为 610.8 mV/Oe. 对比可知,低频磁电转换系数的计算由于没有考虑损耗,理论值是实际值的 5—8 倍左右,而对于考虑了机械损耗的理论谐振磁电电压转换系数与实验值相差不大.

根据交流磁场下考虑涡流损耗的铁磁薄板的极限频率公式^[13],可计算得 1 mm 厚 Terfenol-D 薄板的极限频率为 122 kHz. 再次观察图6,当工作频率大于 120 kHz 以后,磁电电压转换系数仍然保持在一个较高的数值,约为 100 mV/Oe,并未因涡流的增大而迅速降低. 这说明在大的 H_{bias} 作用下,涡流损耗并不在损耗中起主要作用,本文忽略涡流损耗的假设是合理的. 但是,当 H_{bias} 较小时,涡流损耗对谐振磁电电压转换系数影响还是较为显著的. 如图9所示的是不同 H_{bias} 下的谐振磁电电压转换系数,当 H_{bias} 在 390—800 Oe 之间时,谐振磁电转换系数在 500—600 mV/Oe 之间,而当 $H_{\text{bias}} < 300$ Oe 后,谐振磁电耦合系数会迅速降低. 因此,在谐振状态下,强偏置磁场会降低涡流损耗,提高材料的磁电转换效率.

PZT-8 的压电常数 d_{31} 大约是 PZT-5H 的 1/3,所

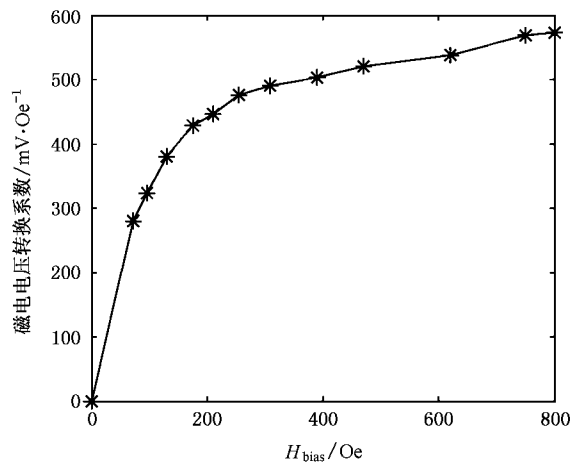


图9 H_{bias} 与谐振磁电电压转换系数关系曲线

系数为 525 mV/Oe,且在 100 kHz 时谐振,3 dB 带宽

以在低频时 Terfenol-D/PZT-5H 的磁电转换系数比 Terfenol-D/PZT-8 大^[18]。但是, PZT-8 的机械品质因数 $Q_{\text{mech piezo}}$ 高达 1000 以上, 远高于 PZT-5H 的机械品质因数, 而且 PZT-8 的介电品质因数也较高, 因此可以预测, 在相同几何尺寸下, Terfenol-D/PZT-8 层合材料在谐振条件下会有较高的磁电转换能力。

4. 结 论

(1) 分析得到了谐振状态下磁致/压电层合材料的等效电路图, 并在此基础上得到了谐振状态下磁致/压电层合材料磁电转换系数的理论公式, 为材料的设计和 optimization 提供了理论分析工具。

(2) 详尽的分析了磁致/压电层合材料在谐振点附近的各种损耗, 并给出了各种损耗相应的计算方法及大小。经过分析, 发现谐振状态下, 材料的主要损耗来自其机械损耗。

(3) 制作了 Terfenol-D/PZT-5H 实验样片并在不同偏置磁场下进行了相关实验, 实验数据可以较好地理论推导结果解释。

附录 A

强偏置磁场作用下铁磁薄板的涡流分析

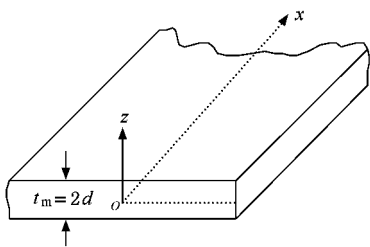


图 A-1 无限大导电铁磁薄板

已知麦克斯韦方程组如下

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E}, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (\text{A-1})$$

其中 \mathbf{E} 为电场, μ 为磁导率。

由 (A-1) 式可得出 \mathbf{H} 的传播方程为

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (\text{A-2})$$

则对如图 A-1 所示的无限大铁磁薄板, 磁场平行于表面, 由 (5) 式有 $H = H_x = H_{ac} + H_{bias}$, 则 (A-2) 式可简化为

$$\frac{\partial^2 H_{ac}}{\partial z^2} = \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial H_{ac}}{\partial t}. \quad (\text{A-3})$$

根据式 (A-3) 以及相关边界条件, 可解得

$$H_{ac}(z, t) = H_0 \frac{\cosh[b(1+i)z]}{\cosh[b(1+i)d]} e^{i\omega t}, \quad (\text{A-4})$$

其中 $b = \sqrt{\frac{\omega \sigma \mu_0 \mu}{2}}$.

那么薄板内平均磁感应强度的幅值为

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \frac{\mu_0 \mu}{2d} \int_{-d}^d H_x dz \\ &= \frac{\mu_0 \mu}{2d} \int_{-d}^d (H_{ac} + H_{bias}) dz \\ &= \frac{\mu_0 \mu H_0}{db(1+i)} \frac{\sinh[b(1+i)z]}{\cosh[b(1+i)z]} + \mu_0 \mu a H_0. \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

利用关系式 $\cosh^2 x \cos^2 x + \sinh^2 x \sin^2 x = \frac{1}{2}(\cosh 2x + \cos 2x)$, 上式重写为

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \frac{\mu_0 \mu H_0}{2db} \\ &\times \frac{\sinh 2bd + \sin 2bd - i(\sinh 2bd - \sin 2bd)}{\cosh 2bd + \cos 2bd} \\ &+ \mu_0 \mu a H_0. \end{aligned} \quad (\text{A-6})$$

由此可得出由涡流效应引起的导电铁磁薄板内的平均复磁导率的实部和虚部分别为

$$\mu' = \frac{\mu_0 \mu}{2db} \left(\frac{\sinh 2bd + \sin 2bd}{\cosh 2bd + \cos 2bd} + 2a_0 bd \right) \quad (\text{A-7})$$

$$\mu'' = \frac{\mu_0 \mu}{2db} \frac{\sinh 2bd - \sin 2bd}{\cosh 2bd + \cos 2bd}, \quad (\text{A-8})$$

取近似: $\sinh x \approx x + \frac{x^3}{3!}$, $\cosh x \approx x + \frac{x^2}{2!}$, $\sin x \approx x - \frac{x^3}{3!}$, $\cos x \approx x - \frac{x^2}{2!}$, 那么

$$\mu' = (a + 1)\mu_0 \mu \approx a\mu_0 \mu \quad (a \gg 1), \quad (\text{A-9})$$

$$\mu'' = \frac{2}{3} \pi (\mu_0 \mu)^2 d^2 \sigma f. \quad (\text{A-10})$$

- [1] Dong S X , Cheng J R , Li J F , Viehland D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4812
- [2] Dong S X , Li J F , Viehland D , Cheng J , Cross L E 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 3534
- [3] Dong S X , Li J F , Viehland D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2309
- [4] Dong S X , Li J F , Viehland D 2006 *J. Mater. Sci.* **41** 97
- [5] Wan J G , Li Z Y , Wang Y , Zeng M , Wang G H , Liu J M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 202504
- [6] Yu H , Zeng M , Wang Y , Wan J G , Liu J M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 032508
- [7] Bichurin M I , Filippov D A , Petrov V M , Laletsin V M , Paddubnaya N , Srinivasan G 2003 *Phys. Rev. B* **68** 132408
- [8] Filippov D A , Bichurin M I , Petrov V M , Laletsin V M , Srinivasan G 2004 *Phys. of the Solid State* **46** 1674
- [9] Laletsin U , Padubnaya N , Srinivasan G , Devreugd C P 2004 *Appl. Phys. A* **78** 33
- [10] Yang F , Wen Y M , Li P , Zheng M 2006 *IEEE International Conference on Information Acquisition* , Weihai , China p1010
- [11] Wan H , Shen R F , Wu X Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1426 (in Chinese) [万 红、沈仁发、吴学忠 2005 物理学报 **54** 1426]
- [12] Wan H , Xie L Q , Wu X Z , Liu X C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3872 (in Chinese) [万 红、谢立强、吴学忠、刘希从 2005 物理学报 **54** 3872]
- [13] Jiang S T , Li W 2003 *Condensed State Magnetism Physics* (Beijing : Science Press) p386 (in Chinese) [姜寿亭、李 为 2003 凝聚态磁性物理(北京 : 科学出版社) 第 386 页]
- [14] Rabinovici R 1991 *IEEE Trans. on Magn.* **27** 3704
- [15] Or S W , Nersessian N , Carman G P 2002 43rd *AIAA Structures , Structural Dynamics , and Materials Conference* , Denver USA 1552
- [16] Luan G D , Zhang J D , Wang R Q 2005 *Piezoelectric Transducer and Transducer Array* (Revised Editon) (Beijin : Peking Univ. Press) p94 (in Chinese) [栾桂冬、张金铎、王仁乾 2005 压电换能器和换能器阵(修订版)(北京 : 北京大学出版社) 第 94 页]
- [17] Zhuang P L , Zhang Z Y 1983 *Piezoelectric Measure* (National Defence Industry Press) p23 (in Chinese) [张沛霖、张仲渊 1983 压电测量(国防工业出版社) 第 23 页]
- [18] Dong S X , Li J F , Viehland D 2003 *IEEE Trans. on Ultrasonics , Ferroelectrics , and Frequency Control* **50** 1253

The resonant magnetoelectric response of magnetostrictive/piezoelectric laminated composite under the consideration of losses *

Yang Fan Wen Yu-Mei[†] Li Ping Zheng Min Bian Lei-Xiang

(College of Opto-electronic Engineering , The Key Laboratory for Optoelectric Technology & Systems , Ministry of Education , Chongqing University , Chongqing 400030 , China)

(Received 13 November 2006 ; revised manuscript received 26 January 2007)

Abstract

The theoretical analysis of resonance magnetoelectric(ME) performances in longitude-transverse type magnetostrictive/piezoelectric laminated composite is presented in this paper based on the equivalent circuit method , and the formula of ME voltage coefficient is obtained , which is useful to the composite design and optimization. To evaluate the ME voltage coefficient near the resonance , the losses such as eddy-current loss , mechanical loss , and dielectric loss are considered and formulated , which indicates that the mechanical loss plays the key role in dissipation. The analysis , which takes losses into account , gives better explanations to current experimental values.

Keywords : magnetostrictive/piezoelectric laminated composite , magnetoelectric effect , resonance , dissipation analysis

PACC : 7580 , 7540F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60374045 , 50677072) and the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (Grant No. 2006AA04Z337).

[†] Corresponding author. E-mail : ymwen@cqu.edu.cn