

对称磁电层合板磁电转换效应理论研究*

万 红[†] 沈仁发 吴学忠

(国防科学技术大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

(2004 年 7 月 9 日收到 2004 年 8 月 19 日收到修改稿)

磁致伸缩和压电层合材料通过磁致伸缩和压电效应的乘积可以获得大的磁电效应.通过材料的力学本构方程,建立了对称磁电层合板磁电耦合的静态力学模型.采用 ANSYS 8.0 多物理场有限元分析软件,对层合结构的磁电转化效应进行了数值计算,并与理论计算值进行了对比.研究结果表明,磁致伸缩/压电的厚度比增加使磁电电压系数增大,所推导的磁电电压系数公式的计算值与等效电路模型推导的公式计算值符合很好,有限元数值计算结果介于两种模型的计算结果之间.

关键词:磁电效应,层合板,本构方程,有限元分析

PACC: 7580, 7280T

1. 引 言

磁电效应是指材料在外磁场 δH 的作用下产生电极化 δP 的现象,或材料在外电场作用下产生诱导磁化的现象,即 $\delta P = \alpha \delta H$,其中 α 称为磁电系数.若定义 $\alpha_E = \Delta E / \delta H$ 为磁电电压系数,则 $\alpha = \epsilon_0 \epsilon_r \alpha_E$ (ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数). α 和 α_E 为表征磁电转化效应大小的重要物理量.

具有磁电效应的材料可以分成两类:单相材料和复合材料.19 世纪末居里首先在单相材料中发现了磁电效应^[1],后来人们发现了多种具有有序亚结构的单相磁电材料(如 Cr_2O_3 , BiFeO_3 等),其磁电效应源于材料内有序的磁结构与铁电亚晶格间的局部交互作用^[2].但单相材料的磁电电压系数较小,在 1.25—25mV/A 范围,并且它们的居里温度大都远低于室温,这使得用单相磁电材料制造应用器件变得非常困难. Suchetelene^[3]最先提出通过复合材料的乘积效应获得磁电效应,即通过压磁相和压电相的复合或磁致伸缩和压电相的复合获得磁电效应:磁电 = 磁/机械 \times 机械/电.磁电复合材料主要有两种结构:一是颗粒混合结构^[4],一是层合结构.实验研究表明^[5],层状复合材料的磁电效应远大于混相复合材料. Srinivasan 等人^[6]利用薄膜层状复合技术制备

出了 NFO-PZT(镍铁氧体-锆钛酸铅压电陶瓷)磁电复合材料,其双层膜复合结构的磁电电压系数达到 575mV/A,多层膜复合结构的磁电电压系数达到 1.87V/A. Ryu 及其合作者^[7]在两层 TbDyFe₂ 合金之间夹一层 PLZT 压电材料,然后层与层之间通过粘接剂粘接在一起获得层状磁电材料,并且实验发现,利用这种层状复合方法制备出的磁电材料其磁电电压系数远高于混相法制备出来的磁电材料,其室温下的磁电电压系数最大值达到 5.85V/A.层状磁电复合材料的主要特点是材料结构和制备方法简单,而且磁电效应大.

由于影响复合材料磁电转化的因素很多,如各组元的性能、体积分数及界面耦合状态,因此,需要通过建立一定的物理模型及数值计算方法,对磁电效应的变化规律进行研究,以对磁电复合材料的性能及结构进行优化设计.层状磁电复合材料磁电效应的主要分析方法包括弹性力学方法^[8,9]、Green 函数方法^[10]及等效电路方法^[11].这些方法分别对磁电系数的数学解析式进行了推导,但由于假设条件及磁电转换模型的不同,这些磁电系数表达式具有不同的适用范围.本文采用弹性力学模型和有限元数值分析方法,对对称层合结构的 3—1 方向的磁电转换规律进行分析,并通过对比分析,确定模型的适用范围,为磁电材料应用于传感器件、优化结构设计打

* 国家自然科学基金(批准号 50375154)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wannhong@hotmail.com

下基础.

2. 对称磁电层合结构的理论模型与数值计算方法

2.1. 理论模型

磁电复合材料由压电和压磁(或磁致伸缩)两相组成.对于压电材料,其本构方程为

$$\begin{aligned} S_i &= s_{ij} T_j + d_{ki} E_k, \\ D_k &= d_{ki} T_i + \epsilon_{kn} E_n. \end{aligned} \quad (1)$$

对于磁致伸缩相而言,其本构方程为

$$\begin{aligned} S_i &= s_{ij} T_j + q_{ki} H_k, \\ B_k &= q_{ki} T_i + \mu_{kn} H_n, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 T, S, E, H, D, B 分别为应力、应变、电场、磁场、电位移和磁通量,它们均为矢量; s, d, q, ϵ, μ 分别为弹性柔度系数、压电系数、压磁系数、介电常数和磁导率.

建立如图 1 所示三层对称磁电层合板模型,即两层磁致伸缩材料中间夹一层压电材料.压电材料极化方向为厚度方向(3 方向),磁场方向平行于板长度方向(1 方向),此模型简称 3—1 模型.

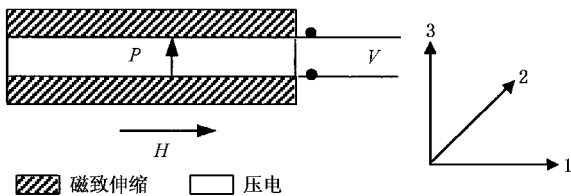


图 1 自由状态的磁致伸缩/压电对称三层板模型

根据层合板可能的实际应用情况,考虑在外加平行板长度方向(1 方向)的磁场 H 激励下,沿厚度方向(3 方向)产生电压的磁电转换效应.由于层合板的对称结构,在磁场作用下,层合板始终保持平板状态而不会产生弯曲,因此,通过本构方程及力学平衡条件,可以推导出 3—1 方向的磁电电压系数 $\alpha_{(E)31}$ 的数学表达式.输出电压值 $V = \alpha_{(E)31} \times {}^p b \times H$, 其中 ${}^p b$ 为压电相的厚度.

2.2. 对称层合板的有限元分析方法

有限元计算软件 ANSYS 可以对结构、热、流体及电磁场等多物理场进行分析,但它不能直接用于分析磁致伸缩效应.考虑到磁电层合板的磁性层在外磁场作用下,产生各向异性的伸长或收缩,为此,

利用 ANSYS8.0 多物理场有限元软件的热结构分析功能,将磁性层的磁致伸缩效应类比为各向异性的热膨胀效应,外磁场的作用类比为温度的作用.无约束条件下,材料在温度场 T 的作用下沿 X, Y, Z 方向所产生的应变量为 $\alpha_1 \times T, \alpha_2 \times T, \alpha_3 \times T$, 其中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为三个方向的热膨胀系数;当磁致伸缩材料在平行于 1 方向磁场 H 作用下,磁性薄膜所产生的应变量为 $q_{11} \times H, q_{12} \times H, q_{13} \times H$, 其中 $q = d\lambda/dH$ 称为磁致伸缩材料的压磁系数.若磁致伸缩材料为弹性各向同性,则有 $q_{11} = -2q_{12} = -2q_{13}$.

2.3. 理论计算与数值计算比较

选定 TbDyFe 薄膜为磁致伸缩相, PZT 压电陶瓷片为压电相,根据实验测定的材料常数值,分别利用理论推导公式和 ANSYS8.0 多物理场有限元分析软件对 TbDyFe/PZT/TbDyFe 磁电层合板的磁电电压系数进行计算,将公式推导值与数值计算值进行对比,并考察磁致伸缩相与压电相的厚度比对磁电转换系数的影响.

3. 对称磁电层合板磁电转化系数的理论推导与有限元计算结果

3.1. 磁电转化系数的理论推导

在图 1 的模型下,假设板间结合为理想结合,则根据弹性力学理论有以下力学平衡方程:

(1) 无体力情况下,磁致伸缩相和压电相在 3 方向上应力为零,即

$${}^m T_3 = {}^p T_3 = 0, \quad (3)$$

其中左上标 m 和 p 分别为磁致伸缩相和压电相;右下标为 3 方向,以下类似.

(2) 磁致伸缩相和压电相沿 1 和 2 方向的应变分别相等,即

$$S_1 = {}^m S_1 = {}^p S_1, \quad (4)$$

$$S_2 = {}^m S_2 = {}^p S_2. \quad (5)$$

(3) 在 1 和 2 方向的总外力为零.若磁致伸缩相和压电相的长和宽分别相等,则横截面的面积只取决于各自的高度 ${}^m b$ 和 ${}^p b$, 故

$${}^m T_1 {}^m b + {}^p T_1 {}^p b = 0, \quad (6)$$

$${}^m T_2 {}^m b + {}^p T_2 {}^p b = 0. \quad (7)$$

(4) 在开路情况下,3 方向的电位移为零,即

$$D_3 = 0. \quad (8)$$

假设磁致伸缩相中无压电相,压电相中无磁致伸缩相,且磁致伸缩相和压电相具有立方对称性,则通过将方程(3)~(8)代入本构方程(1)和(2),经整

理可以推出 3—1 方向的磁电电压系数的解析表达式为

$$\alpha_{(E)31} = \frac{E_3}{H_1} = - \frac{({}^m q_{11} + {}^m q_{12}) \times {}^p d_{31} \times {}^m b}{({}^m s_{11} + {}^m s_{12}) \times {}^p \epsilon_{33}^T \times {}^p b + ({}^p s_{11} + {}^p s_{12}) \times {}^p \epsilon_{33}^T \times {}^m b - \chi^p d_{31}} \times {}^m b$$

$$= \frac{({}^m q_{11} + {}^m q_{12}) \times {}^p d_{31}}{({}^m s_{11} + {}^m s_{12}) \times {}^p \epsilon_{33}^T \times {}^p b / {}^m b + ({}^p s_{11} + {}^p s_{12}) \times {}^p \epsilon_{33}^T - \chi^p d_{31}} \quad (9)$$

Harshe 等人^[9]利用上述弹性力学方法对磁致伸缩/压电双层板的 $\alpha_{(E)33}$ (即外磁场沿厚度方向施加) 表达式进行了推导. 考虑到对双层板而言, 磁场沿长度方向施加时, 板材为弯曲变形状态, 且沿厚度方向的应力不相同, 有拉压两种状态, 因此, 将 Harshe 方法直接应用于推导双层板的 $\alpha_{(E)31}$ 表达式会带来很大误差.

Dong 等人^[11]利用等效电路模型推导了图 1 所示对称层合板的磁电转换系数表达式, 得

$$\left. \frac{dV}{dH} \right|_{31}$$

$$= \frac{n(n-1)A \times {}^p d_{31}^2 \times {}^m q_{11}}{{}^p \epsilon_{33}^T \times {}^p s_{33} [n \times {}^p s_{33} (1 - {}^p k_{31}^2) + (1-n) \times {}^m s_{11}]}$$

(10)

其中 n 为磁致伸缩相的体积分数; A 为层合板总厚度; ${}^p k_{31}^2$ 为压电相的机电耦合系数. (10) 式可以变换为相应的磁电电压系数的表达式, 即

$$\alpha_{(E)31} = \frac{E_3}{H_1}$$

$$= \frac{{}^p d_{31}^2 \times {}^m q_{11}}{{}^p \epsilon_{33}^T \times {}^p s_{33} [{}^p s_{33} (1 - {}^p k_{31}^2) + {}^m s_{11} \times {}^p b / {}^m b]}$$

(11)

由(9)和(11)式可以看出, 磁电电压系数除与两组成相的材料性能有关外, 还与两组成相的层厚比有关.

考虑磁致伸缩层的材料常数为

$${}^m s_{11} = 18.87 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N},$$

$${}^m s_{12} = -5.66 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N},$$

$${}^m q_{11} = -2 {}^m q_{12} = 280 \times 10^{-11} \text{ m/A};$$

PZT 的参数为

$${}^p S_{11}^E = 13.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N},$$

$${}^p S_{12}^E = -3.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N},$$

$${}^p d_{31} = 180 \times 10^{-12} \text{ C/N},$$

${}^p \epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 2600$ ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), ${}^p k_{31}^2 = 0.37$. 分别由(9)和(11)式得到不同层厚比(${}^m b / {}^p b$)下的磁电电压系数值, 如图 2 所示.

由图 2 看出(9)式所得磁电电压系数远大于(11)式的计算值. 由于输出电压是由压电效应产生的, 在弹性力学推导过程中, 没有考虑压电材料的机电转化损耗, 而等效电路模型中考虑了压电材料的机电转化损耗, 因此, 在弹性力学模型中, 若考虑压电相的机电转化效率, 则对(9)式进行修正, 得到

$$\alpha'_{(E)31} = {}^p k_{33}^2 \times \alpha_{(E)31} \quad (12)$$

${}^p k_{33}^2$ 为压电相的机电耦合系数. 将修正后的结果同样列于图 2.

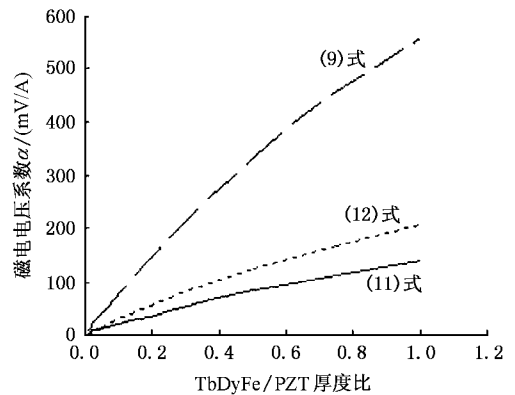


图 2 两种模型下 $\alpha_{(E)31}$ 与层厚比的关系曲线

对弹性模型的磁电转化系数公式进行修正后, 其理论计算值与等效模型十分接近.

3.2. 有限元计算方法结果及与理论值对比

对压电材料而言, 一般的有限元方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + e\phi = F,$$

$$e^T u + E\phi = Q, \quad (13)$$

其中 u, ϕ 分别为节点的位移和电势; M, C, e, E 分别为压电材料的质量矩阵、刚度矩阵、压电应力矩阵

和电场; F, Q 分别为等效的节点力和电位移。

有限元分析过程包括元素类型的确定、材料常数的输入、网格的划分、边界条件的确定、载荷的施加及求解几个过程。根据层合板的结构, 选用耦合场 SOLID5 单元类型求解热应力-电转换; 在材料常数输入时, 将磁致伸缩相的压磁系数输入为热膨胀系数, 压电材料则需输入弹性柔度矩阵、介电矩阵及压电应变矩阵; 通过层合面的粘接操作, 使界面为理想耦合; 通过耦合层合板两端面的位移, 使层合板协调变形。

在上述材料常数下所计算的磁电转换系数与层厚比的关系曲线如图 3 所示。

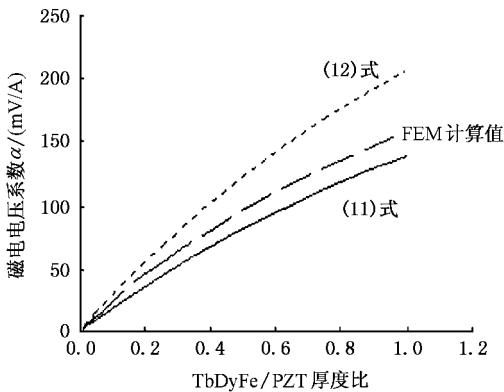


图 3 有限元数值计算与理论计算的磁电转换效应对比

图 3 结果显示, 有限元计算方法能有效地对层合结构的磁电复合材料的磁电效应进行分析, 且结果介于修正后的弹性力学模型和等效电路模型结果

之间。

磁电层合板在平行于板长度方向施加外磁场时, 磁致伸缩板产生各向异性的变形, 即沿长度方向产生伸长, 而沿宽度和厚度方向产生收缩。当磁致伸缩板与压电板耦合后, 由于板间的变形协调性, 磁致伸缩板的变形通过结合界面被约束, 而压电板通过结合界面产生形变, 因此, 即使在理想界面耦合下, 应力沿层合板的厚度方向发生变化, 当层合板厚度很小, 可以忽略应力沿厚度方向的变化影响。在弹性力学模型中, 假设同一层合板内, 各处的应力状态相同, 因此, 在一定的压电板厚度下, 随着磁致伸缩板厚度的增加, 理论计算的误差加大。而在等效电路模型中, 由于没有考虑沿板长度方向的磁致伸缩对板宽度和厚度方向的影响, 因此, 所得到的理论计算值偏大。

4. 结 论

以 TbDyFe/PZT/TbDyFe 层合板为算例, 对 3—1 方向的磁电电压系数的理论推导及有限元数值计算方法进行研究, 表明, 层合板的磁电转换效应随磁致伸缩/压电的厚度比增加而增大; 用弹性力学模型推导的磁电电压系数公式经修正后与等效电路模型符合较好, 但随着板厚度的增加, 两种模型的误差均增加。ANSYS 有限元数值计算方法能有效地分析磁电复合材料的磁电效应, 数值计算结果与理论推导结果符合。

[1] Curie P 1894 *J. Phys.* 3e series **3** 393
 [2] Schmid H 1994 *Bull. Mater. Sci.* **17** 1411
 [3] Suchetelene V 1972 *Phil. Res. Rep.* **27** 28
 [4] Cai N *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1348
 [5] Zhang H *et al* 2003 *Mater. Rev.* **17** 64 (in Chinese) [张 辉等 2003 材料导报 **17** 64]
 [6] Srinivasan V, Rasmussen E T, Gallegos J and Srinivasab R 2001 *Phys. Rev. B* **64** 214408

[7] Ryu J, Carazo A V, Uchino K and Kim H 2001 *Japan. J. Appl. Phys.* **40** 4948
 [8] Mori K and Wuttig M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 100
 [9] Harshe G, Dougherty J P and Newnham R E 1993 *Int. J. Appl. Electromagn. Mater.* **4** 145
 [10] Nan C W, Li M and Huang J H 2001 *Phys. Rev. B* **63** 144415
 [11] Dong S X, Li J F and Viehland D 2003 *IEEE Trans. Ultra. Ferroelect. Freq. Contr.* **50** 1253

A theoretical study on symmetrical magnetostrictive/piezoelectric laminated composite *

Wan Hong Shen Ren-Fa Wu Xue-Zhong

(*Institute of Aerospace and Material Engineering , National University of Defense Technology , Changsha 410073 , China*)

(Received 9 July 2004 ; revised manuscript received 19 August 2004)

Abstract

The magnetoelectric (ME) effect is a product property of the composite material consisting of individual piezoelectric and magnetostrictive phases . Based on the constitutive equations of the materials , the ME coupling of a symmetrical magnetostrictive/ piezoelectric laminated composite is modeled using a simple static elastic method . The ME coupling is also simulated by numerical technique employing the ANSYS 8.0/Multiphysics finite element software . It is found that the ME voltage coefficient in the static method is quite close to that in the equivalent circuit approach and increases with the increase of the magnetostrictive/ piezoelectric thickness ratio . Using the numerical modeling we can calculate the ME voltage coefficient of the magnetostrictive/ piezoelectric laminated composite effectively .

Keywords : magnetoelectric effect , laminate composite , constitutive equation , finite element analysis

PACC : 7580 , 7280T

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50375154).