

磁致伸缩/压电层叠复合材料磁电效应分析

周勇 李纯健 潘昱融

Magnetolectric effect analysis of magnetostrictive/ piezoelectric laminated composites

Zhou Yong Li Chun-Jian Pan Yu-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 077702 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172307

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172307>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于环磁美特材料的无线传能系统](#)

Wireless power transfer system based on toroidal metamaterials

物理学报.2016, 65(16): 168801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168801>

[拟态物理学优化的认知无线网络频谱分配](#)

Spectrum allocation of cognitive radio network based on artificial physics optimization

物理学报.2014, 63(22): 228802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228802>

[极化电压对聚丙烯压电驻极体膜压电性能的影响](#)

Influence of polarization voltage on piezoelectric performance of polypropylene piezoelectret films

物理学报.2014, 63(15): 157703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.157703>

[膜量子蜂群优化的多目标频谱分配](#)

Membrane-inspired quantum bee colony algorithm for multiobjective spectrum allocation

物理学报.2014, 63(12): 128802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.128802>

[聚丙烯压电驻极体膜的压电和声学性能研究](#)

Piezoelectric and acoustic behavior of polypropylene piezoelectret films

物理学报.2013, 62(16): 167702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.167702>

磁致伸缩/压电层叠复合材料磁电效应分析*

周勇^{1)2)†} 李纯健¹⁾ 潘昱融¹⁾

1) (南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

2) (江苏省气象传感网技术工程中心, 南京 210044)

(2017年10月25日收到; 2018年1月19日收到修改稿)

采用有限元分析软件 COMSOL5.0 建立了三维悬臂梁模型, 分析了磁致伸缩/压电/磁致伸缩层叠复合材料的磁电系数 α_{ME} , 并就几何参数对复合结构磁电系数的影响进行了优化分析. 首先, 利用稳态求解器研究了磁电层状复合结构内部的应力、应变、位移以及电势分布情况, 利用瞬态求解器分析了磁电复合结构各变量动态分布规律; 其次, 应用小信号频域分析研究了该结构的谐振频率以及在不同偏置磁场对输出电压的影响, 结果表明, 随着直流偏置磁场的增加, 输出电压逐渐减小. 改变复合材料不同层的厚度, 分析了磁电层与压电层厚度比 t_m/t_p 对磁电系数的影响, 结果表明, 随着厚度比增加, α_{ME} 逐渐增大, 其增加速率逐渐减小; 最后, 分析了磁电系数 α_{ME} 随复合结构面积、长宽比的变化情况. 分析表明, α_{ME} 随磁电复合结构面积的增加逐渐增加, 其增加速率逐渐减小; 当磁电复合结构面积恒定时, 其磁电系数随长宽比 L/W 增加表现出先增加后减小的趋势, 存在最优值.

关键词: 叠层复合材料, 磁电效应, 压电效应, 磁电系数

PACS: 77.80.bg, 77.84.Lf, 85.70.Ec, 88.80.ht

DOI: 10.7498/aps.67.20172307

1 引言

磁电复合材料概念最早由法国物理学家 Pierre Curie 在 1894 年首先证明一个不对称的分子体在外加磁场的影响下有可能直接被极化的概念. 但是, 直到 1959 年, Landau 等^[1] 才在 Cr_2O_3 单晶中发现存在磁电效应, 并在理论上阐述了这一机理. 直到 1960 年, Astrov^[2] 终于在氧化铬单晶中观测到微弱的磁电效应, 至此才在实验中得到证实. 自从在 Cr_2O_3 单晶中发现磁电效应以来, 磁电复合材料的研究就一直深受各国关注. 目前, 国内外学者的实验研究多集中在设计并测试静态磁电系数^[3,4]. 为了实现更高的磁电系数, 很多学者尝试通过施加外应力、电磁场以及温度等环境来调控静态磁电响应, 并取得了一些研究成果. 比如, Lam

等^[5] 及北京理工大学 Chen 和 Su^[6] 分别通过施加预紧力研究了应力对于磁电谐振频率的调控, 并揭示其原因为应力产生的 ΔE 效应, 而谐振电压的变化则是由于应力对压磁系数的影响. Fetsev 等^[7] 研究了外加偏置电场对谐振频率和谐振磁电信号的调控, 得到了类似于铁电应变蝶形曲线的调控规律.

我国科学家在磁电复合材料研究领域一直非常活跃. 2012 年, 北京大学董蜀湘教授课题组研发了一种改进型的悬臂梁式磁电复合材料, 实验结果显示, 该材料磁电耦合系数比目前已有的磁电复合材料高出 10 倍左右. 目前, 美国和西欧等发达国家均在大力开发这种具备磁电效应的复合材料及其应用产品, 而我国在这方面的研究起步较晚, 目前还没有开发出实用性的产品, 但是由于这种复合材料具有独特的优点, 在微波通信、信息、计算机、航

* 国家自然科学基金 (批准号: 61601231)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20140999) 和江苏省气象传感网技术工程中心开放基金 (批准号: KDXG1302) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouyong@nuist.edu.cn

空航天等领域均有着广阔的应用前景.

对磁电层状结构的分析方法主要包括弹性力学法^[8-10]、格林函数法^[11]、等效电路法^[12]和有限元法等^[13-15]. 本文利用 COMSOL 5.0 有限元建模软件建立了三维悬臂梁结构, 弥补了传统的二维模型分析准确性低的不足, 更加真实模拟实际情况. 磁致伸缩材料采用线弹性材料, 引入 H - B 曲线模拟了磁致伸缩材料的非线性磁化过程, 压电材料采用应变-电荷型本构关系, 分析了一个有限大小的三层层压磁电结构的设计和优化.

2 模型和基本方程

由磁致伸缩层/压电层/磁致伸缩层组成的三层磁电复合材料结构如图 1 所示. 复合材料的磁电效应取决于材料间界面的耦合作用以及机械边界条件的应用^[16-18], 为简化分析, 界面视为理想耦合, t_m 和 t_p 分别代表磁致伸缩和压电层的厚度. 沿 Y 轴 (即长度方向) 施加磁场进行分析, 磁化沿长度方向, 极化垂直于压电层 (即沿厚度).

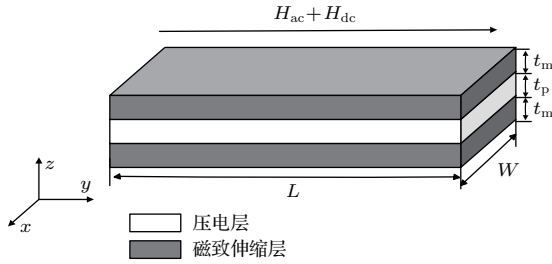


图 1 磁致伸缩/压电层合结构示意图
Fig. 1. The laminated structure of magnetostrictive/piezoelectric.

分析其磁电系数的主要应用方程如下.

2.1 平衡方程

层叠压电复合材料的动态平衡方程可以写成

$${}^i\rho \frac{\partial^2 {}^i\mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla^i \mathbf{S} + F_V \quad (i = m, p), \quad (1)$$

上标 i 表示不同的材料 ($i = m$ 是磁致伸缩层和 $i = p$ 是压电层, 以下同); ${}^i\rho$ 是密度, ${}^i\mathbf{u}$ 是主位移矢量, ${}^i\mathbf{S}$ 是应力张量, F_V 是外力的总和. 如果在层叠复合材料周围施加一个沿长度方向的磁场, 磁场力可以看作外力 F_V 的一部分. 然而, 磁场力对磁致伸缩材料的变形影响不大, 因此可以忽略磁力的影响^[19,20]. 此外, 在三层复合材料上没有外力作用,

因此 $F_V = 0$. 由磁场引起的磁电复合结构的变形用应力张量表示, 则

$${}^i\rho \frac{\partial^2 {}^i\mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla^i \mathbf{S} \quad (i = m, p). \quad (2)$$

当发生谐振时, 复合材料动态平衡方程可表示为

$$-\rho\omega^2 \mathbf{u} = \nabla \cdot \mathbf{S} + F_V e^{j\varphi}. \quad (3)$$

由于 F_V 为 0, 故上式可表示为

$$-\rho\omega^2 \mathbf{u} = \nabla \cdot \mathbf{S}. \quad (4)$$

2.2 本构方程

磁致伸缩材料对施加的磁场的磁化与应变响应是非线性的, 有许多理论来预测特定的行为. 考虑到磁致伸缩板在强磁场下的非线性, 因此采用非线性模型, 可以精确地描述磁场与磁化之间的非线性耦合关系, 用 H - B 曲线模拟磁致伸缩结构的非线性磁化行为. 磁致伸缩层的关系可以表示如下^[21].

假定磁致伸缩材料是各向同性的, 从而刚度矩阵 \mathbf{C} 可以用两个参数表示, 即杨氏模量和泊松比, 将磁致伸缩材料中的应力、应变建模为:

$${}^m\mathbf{S} - {}^m\mathbf{S}_0 = \mathbf{C} \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0), \quad \mathbf{C} = \mathbf{C}(E, \nu), \quad (5)$$

$${}^m\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla^m \mathbf{u})^T + \nabla^m \mathbf{u}], \quad (6)$$

${}^m\boldsymbol{\varepsilon}$ 是磁致伸缩层应变张量, ∇ 是梯度算子, 上标 T 代表变换. 磁致伸缩材料发生形变, 但其材料体积不发生变化, 研究中采用了沿长度方向磁化的磁致伸缩材料, 同时沿长度方向施加磁场, 故该复合材料主应变为长度方向, 发生长度方向上拉伸, 而沿厚度方向上变形则较小, 因此研究中假设材料沿长度上发生拉伸变形, 忽略其沿厚度方向上变形的影响.

压电材料本构关系采用应变电荷型. 因为压电层变化由磁致伸缩层的应变驱动, 外加磁场使磁致伸缩层发生应变, 然后传递给压电层, 压电材料极化沿 z 轴, X - Y 平面各向同性, 介电常数矩阵只取对角项. 压电层发生的形变小, 其应变依然在线性区域内变化^[22], 因此选择压电材料的线性本构方程. 压电层的线性本构方程通过应变电荷的形式写入, 表示为:

$${}^p\boldsymbol{\varepsilon} = {}^p\boldsymbol{\varepsilon}_0 + {}^p\mathbf{S}_E ({}^p\mathbf{S} - {}^p\mathbf{S}_0) + {}^p\mathbf{d}^T \mathbf{E}, \quad (7)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_r + {}^p\mathbf{d} ({}^p\mathbf{S} - {}^p\mathbf{S}_0) + {}^p\boldsymbol{\xi} \mathbf{E}; \quad (8)$$

电位移和电势有以下约束:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v, \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad (10)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon}_0$, \mathbf{S} , \mathbf{S}_0 分别表示应变张量、初始应变、应力张量和初始应力, \mathbf{S}_E 和 \mathbf{d} 表示柔度矩阵和压电系数矩阵, \mathbf{E} 和 \mathbf{D} 为感应电场和电位移矩阵, D_r 表示剩余电位移, $\boldsymbol{\xi}$ 表示介电常数矩阵, V 为电势.

2.3 边界条件

假设磁致伸缩层和压电层的界面连接是理想的. 电路开路时, 电位移为零, 磁电复合材料施加悬臂边界条件. 因此, 开路条件和机械边界条件被写为:

$$D_z = 0, \quad (11)$$

$$u|_{y=0} = 0. \quad (12)$$

磁电复合材料被磁场包围, 在磁机电系统中, 位移电流忽略不计, 为了方便地描述磁致伸缩材料的动态行为, 根据麦克斯韦方程组, 磁感应强度 B 满足关系:

$$\nabla \times B = 0. \quad (13)$$

由此根据数学上的矢量运算法则“一个矢量的旋度的散度总是等于0”, 引入磁矢势 A ,

$$\nabla \times A = B. \quad (14)$$

该设计中, 磁场是由安培定律、麦克斯韦方程和楞次定律相结合得到^[23]:

$$\nabla \times H = J, \quad (15)$$

$$J = \sigma E + J_e, \quad (16)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}, \quad (17)$$

即:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times H = J_e, \quad (18)$$

其中 B 和 J_e 分别为磁通密度和电流密度; $\sigma = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 是电导率, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, 是真空介电常数, ε_r 是相对介电常数. 在本文中, 由于施加的磁场沿 y 方向, 所以 $H = H_y$.

另外, 在一定的外加磁场作用下, 磁电系数是表征复合材料层间耦合性能的一个重要变量. 电场 $E_z = V/t_p$, V 是压电层上表面的平均电压. 根据定义, 磁电系数可以表示如下^[24]:

$$\alpha_{ME} = \frac{\partial E_z}{\partial H_y}. \quad (19)$$

3 有限元分析

利用 COMSOL 5.0 有限元建模软件建立了三维磁电复合结构, 其结构如图 1 所示, 其中复合结构尺寸参数为 $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ($L \times W$) 其中 t_p 和 t_m 均为 1 mm , 在其结构一端施加固定约束, 另一端处于自由状态, 分析中, 磁致伸缩材料参数如列于表 1. 压电材料采用 PZT-5H.

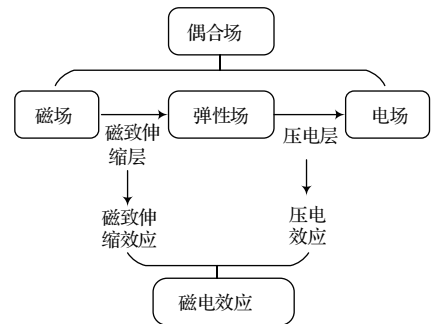


图 2 磁场、弹性场和电场之间的关系

Fig. 2. The relation between magnetic field, elastic field and electric field.

表 1 磁致伸缩材料参数

Table 1. Parameters of magnetostrictive materials.

材料参数	E/Pa	ν	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	σ	ε_r	λ_s	$M_s/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
描述	杨氏模量	泊松比	密度	电导率	相对介电常数	饱和磁致伸缩	饱和磁化强度
数值	60×10^9	0.45	7870	0	1	2×10^4	1.5×10^6

此分析过程是在 COMSOL 耦合场下实现的, 其包括电场、磁场和弹性场. 图 2 显示了三种物理场之间的关系, 其中磁致伸缩材料的磁致伸缩效应涉及到磁场和弹性场. 压电材料的压电效应

则与弹性场和电场有关, 复合材料的磁电效应则是在三者耦合场下实现. 在 COMSOL 中通过固体力学模块将这三个物理场关联在一起, 图 3 显示了 COMSOL5.0 分析的几何模型, 网格划分采用自由

部分四面体网格,并分别采用稳态求解和频域小信号求解,分析了恒定磁场和交变磁场下复合材料的磁电行为.

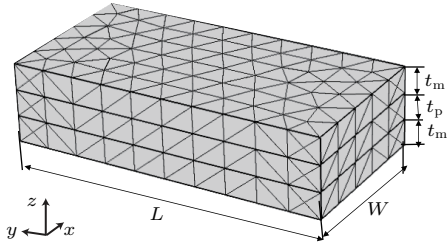


图3 磁电复合结构模型

Fig. 3. The model of magneto-electric composite structure.

4 结果讨论

4.1 稳态分析

利用上述方法,在COMSOL中建立几何模型,首先进行稳态分析,在复合材料周围沿Y轴方向施加 $H_{dc} = 200$ Oe 磁场,复合材料内部应力、应变位移以及电势分布结果分别如图4(a)—(d)所示.从

图中可以看到,在复合材料内部,其应力、应变及电势分布是不均匀的,在其边界处明显偏大,这是由于施加了固定约束以及磁场的边缘效应和退磁效应引起的,而在层压板中心其分布基本是均匀的.

图4(a)和图4(b)为复合结构各层所受应力图,从图中可以看出复合结构明显发生了拉伸.在固定端 ($y = 0$),由于固定约束的作用,使得各层在固定端应力大而自由端应力小;图4(c)和图4(d)为复合结构各层所受应变分布图,从图中可以发现,除了边缘外,其他位置应变均匀,这是由于磁场的边缘效应引起的;此外,磁致伸缩层自由端应变大,这是因为在本文中磁致伸缩材料的应变关系与位移梯度有关,位移梯度大的地方应变大,故磁致伸缩层自由端应变大与固定端.对于压电材料而言,在固定端,由于固定约束的作用,使得固定端应变大.图4(e)为复合材料位移分布图,可以看出在自由端位移扰度最大,可达到0.01 mm;图4(f)为压电层3D电压分布图,压电层下表面接地,上表面电压呈不均匀分布,其越接近固定端电压越大,这是由于压电层固定端应变较大所导致的.

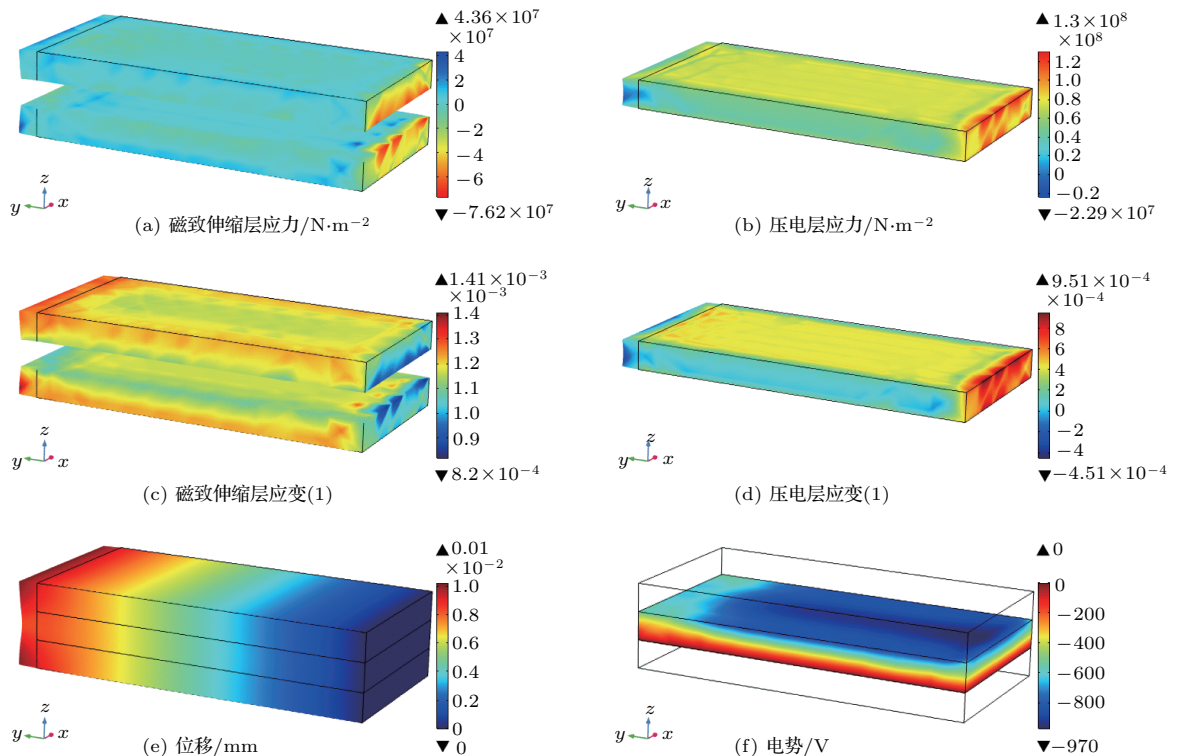


图4 磁电复合材料各变量分布 (a) 磁致伸缩层应力分布; (b) 压电层应力分布; (c) 磁致伸缩层应变分布; (d) 压电层应变分布; (e) 位移分布; (f) 电势分布

Fig. 4. Distribution of variables in magneto-electric composites: (a) The stress distribution of magnetostrictive layer; (b) the stress distribution of piezoelectric layer; (c) the strain distribution of magnetostrictive layer; (d) the strain distribution of piezoelectric layer; (e) displacement distribution; (f) potential distribution.

为了分析磁场与磁电系数的关系, 利用 COM-SOL 稳态求解器的辅助扫描功能, 使磁场从 0 到 10^5 A/m 条件下变化, 观察各分量随磁场变化情况, 结果如图 5 所示.

图 5 中分别给出了磁电复合材料自由端与固定端不同位值应力、应变、位移及电压随磁场变化情况, 其中 $Z = 0, 3$ 表示磁致伸缩层, $Z = 1, 2$ 表示压电层, 从图中可以看出, 压电层受到的应力大于磁致伸缩层, 约为磁致伸缩层 2.5 倍, 这是由于上下两层磁致伸缩材料都会产生一个沿 Z 方向的力, 使压电层处于挤压状态. 因此, 其压电层受到

压力较大, 相反压电层的位移也就相对较小, 约为 $0.68 \mu\text{m}$, 而磁致伸缩层位移约为 $0.83 \mu\text{m}$. 对于应变而言, 压电层应变是有磁致伸缩层引起, 所以压电层应变略小于磁致伸缩层; 压电层固定端最大应变约为 6.3×10^3 , 而自由端应变约为 6.1×10^3 , 这是由于机械约束的作用, 使得固定端应变略大于自由端. 图 5(d) 给出了自由端与固定端压电层电压随磁场变化曲线, 可以看出, 压电层的不同端电压分布是不均匀的, 其固定端电压要略大于自由端, 约为 49 V, 而其自由端约为 42 V.

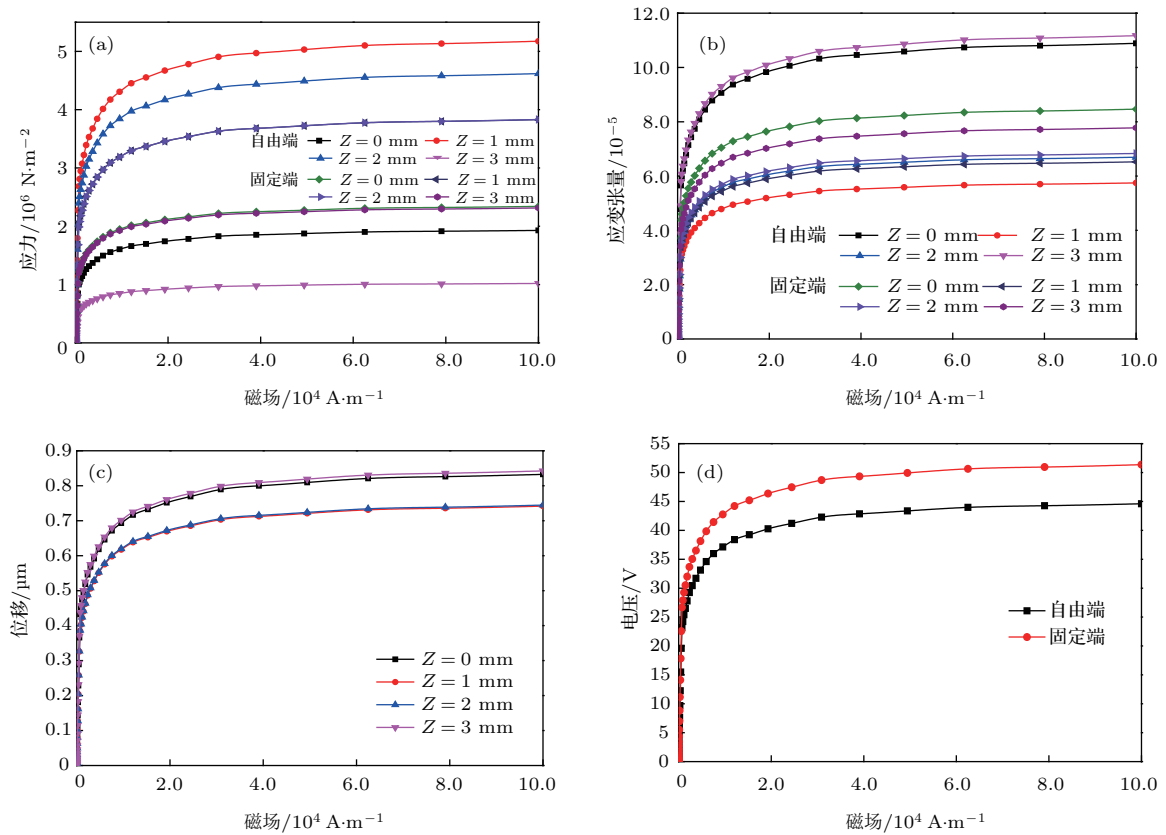


图 5 磁电复合材料各变量随磁场变化曲线 (a) 应力; (b) 应变; (c) 位移; (d) 电压

Fig. 5. The variation curves of variables in magnetolectric composites with magnetic field: (a) The stress; (b) the strain; (c) displacement; (d) voltage.

4.2 瞬态分析

为了分析复合材料的动态特性, 在磁电复合材料周围同样沿 Y 方向施加交变磁场, 频率为 1 kHz, 大小为 5 Oe, 分析了复合结构在该交变磁场下各分量变化情况. 结果如图 6 所示, 图中 $Z = 1, 2$ mm 为两种材料接触面处并不代表压电层, $Z = 0, 3$ mm 代表磁致伸缩层.

图 6(a) 为磁致伸缩层和压电层所受到磁通

密度的变化情况, 可以发现, 磁致伸缩层和两种材料接触面处受到磁通密度是不一样的, 磁致伸缩层所受最大磁通密度为 0.6 T, 而两层之间接触面处则为 0.3 T 左右, 这是由于不同层所采用的磁化方式不一样引起的, 对于磁致伸缩层, 采用 H - B 曲线描述其磁化特性, $H_{\text{eff}}(|B|)B/|B|$, 而对于压电层采用相对磁导率即 $B = \mu_0\mu_r H$, 式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 为真空磁导率, μ_r 为相对磁导率, 本文中取值为 1. 图 6(b) 为磁致伸缩层在

交流磁场下的磁致伸缩曲线, 因为磁场方向为Y方向, 所以绘出了Y方向的磁致伸缩曲线, 可以看到随着磁场的增加, 磁致伸缩近似线性增加, 当磁场反向逐渐增大时, 其变化趋势与正向时类似, 这是由于所磁致伸缩材料的饱和磁致伸缩大, 而施加的磁场较小, 使得其磁致伸缩仍在线性范围内变化. 图6(c)为复合材料在瞬态磁场下自由端不

同位置位移扰动曲线, 可以看出, 在几何结构不同位置的位移是不同的, 磁致伸缩层最大位移约为0.26 μm , 压电层约为0.23 μm , 这与前文所述原因一致; 图6(d)给出了自由端与固定端电压变化情况, 其输出电压同样按正弦形式变化, 由于两端应变不同, 使得其产生电压不同, 其固定端最大电压可达16 V, 自由端最大电压可达14 V.

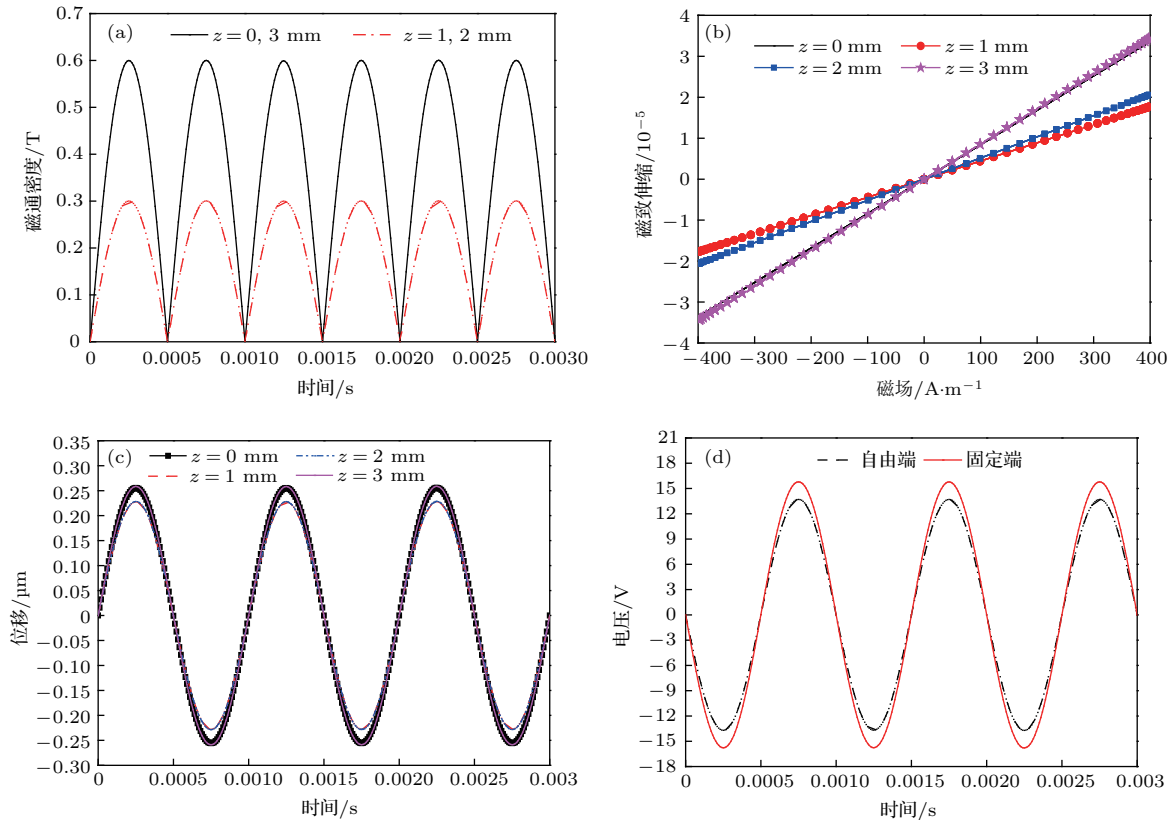


图6 交变磁场下磁电复合材料各变量随时间的变化 (a) 磁致伸缩层和压电层磁通密度分布; (b) 磁致伸缩层的磁致伸缩曲线; (c) 自由端位移; (d) 压电层电压

Fig. 6. The variation curves of variables in magnetolectric composites with time under alternating magnetic field: (a) The magnetic flux density distribution of magnetostrictive and piezoelectric layers; (b) magnetostrictive curve of magnetostrictive layer; (c) the free end displacement; (d) piezoelectric layer voltage.

4.3 小信号频域分析

对于磁电复合材料而言, 其结构尺寸、各材料体积分数、磁场方向等都会对它的谐振频率造成一定的影响^[24]. 为了求解磁电复合材料的谐振频率, 基于(3)—(4)式的理论模型, 采用COMSOL中的小信号频域分析方法. 研究中同样采用第3节所述模型的结构尺寸, 设置直流磁场 $H_{dc} = 200 \text{ Oe}$, 交流磁场 $H_{ac} = 1 \text{ Oe}$, 频率从1到500 kHz变化, 频段内取200个值, 结果如图7所示.

从图7(a)中可以看出, 复合结构在二阶谐振

率170.28 kHz时输出电压最大, 约为3.36 V, 在其他阶谐振频率处输出电压约为0.5 V, 远远小于二阶谐振频率输出电压. 由于偏置磁场通过影响磁致伸缩材料的弹性杨氏模量而影响磁电复合材料的磁电特性, 因此本文分析了在不同偏置磁场 H_{dc} 下该复合材料的磁电特性^[25]. 图7(b)给出了在 $H_{ac} = 1 \text{ Oe}$, 分别使 H_{dc} 为50, 100, 200, 400和600 Oe分析输出电压变化情况, 可以看出其偏置磁场 H_{dc} 的改变对输出电压的影响很明显, 随着偏置磁场的增大, 其谐振电压逐渐减小, 当 H_{dc} 为50 Oe时, 输出电压最大约18.9 V, 约为600 Oe时的30

倍. 图 7(c) 和图 7(d) 分别为在 $H_{dc} = 200$ Oe 时压电层的一阶和二阶振型的应变分布图. 由图可见,

在二阶谐振频率下压电层的应变远大于一阶, 因此在二阶谐振时输出电压较高.

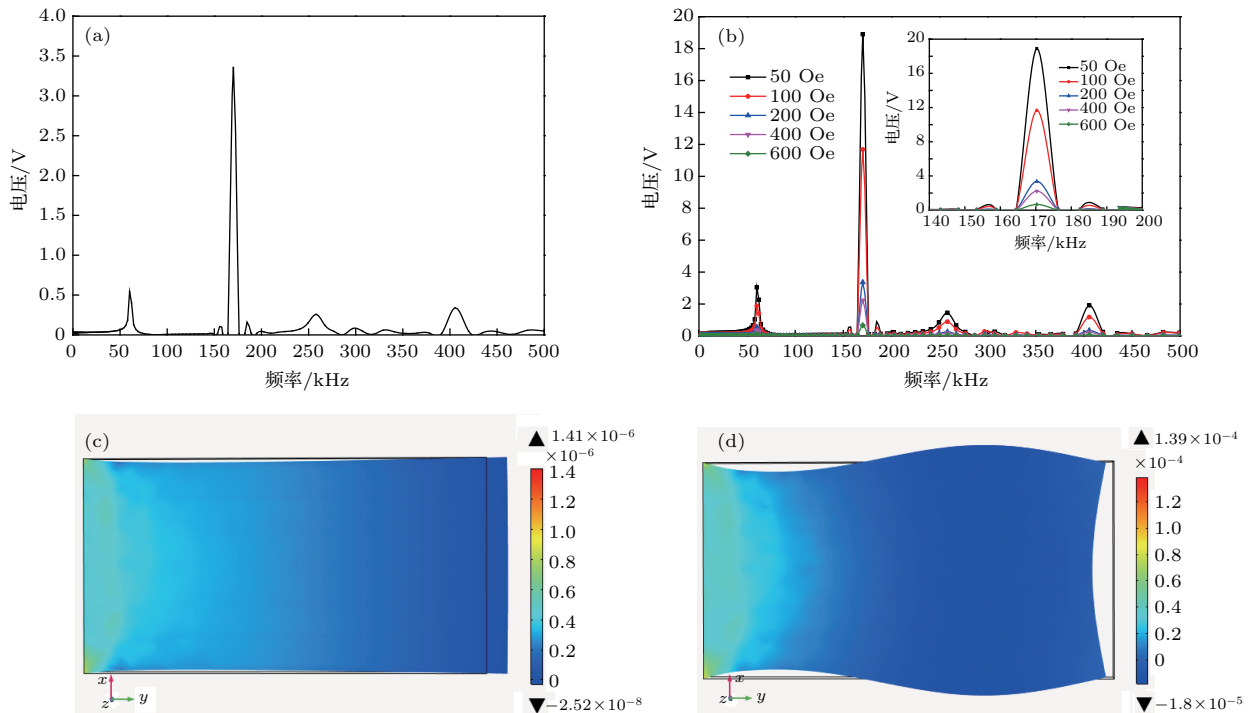


图 7 频率响应 (a) 电压随频率变化曲线; (b) 在不同偏置磁场下电压随频率变化; (c) 一阶振型; (d) 二阶振型
 Fig. 7. Frequency response: (a) The curve of output voltage varies with frequency; (b) the voltage varies with frequency under different bias magnetic fields; (c) first order mode; (d) second order mode.

4.4 磁电系数优化分析

为了研究复合材料对磁电系数的影响, 分析了复合材料厚度以及磁致伸缩层/压电层不同厚度比对磁电系数的影响, 其中电压为压电层上表面平均电压, 然后根据 (19) 式求出磁电系数 α_{ME} . 首先, 在 200 Oe 磁场下分析了 t_p 和 t_m 对磁电复合材料的磁电系数的影响, 复合材料结构长、宽分别为 12 mm, 6 mm, 结果如图 8 所示.

为了研究复合材料各层厚度变化对磁电系数的影响, 分别令 t_m 和 t_p 为 1 mm, 分析了两种情况下磁电系数随复合材料各层厚度变化的关系. 图 8(a) 给出了磁电系数 α_{ME} 随 t_p 变化曲线, 其中 t_m 为 1 mm, t_p 从 0.4—1.6 mm 变化. 从图中可以看出, 随着 t_p 的增加, α_{ME} 从 $4.3 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 逐渐减小到 $2.3 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$. 图 8(b) 给出了 t_p 为 1 mm, t_m 从 0.4—1.6 mm 变化时 α_{ME} 随 t_m 的变化曲线, 可以看出, 随着 t_m 的增加, α_{ME} 从 $2 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 逐渐增大到 $3.3 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$. 从上述结果看出, 增加磁致伸缩层厚度, 减小压电层

厚度, 可以增加整个结构的磁电系数. 这是由于压电层应变由磁致伸缩层引起, 当磁致伸缩层厚度不变, 压电层厚度增加时, 通过磁致伸缩层作用在压电层上的应变就会减小, 进而使输出电压减小, 磁电系数也就减小; 同理, 当压电层厚度不变, 磁致伸缩层厚度增加时, 通过磁致伸缩层作用在压电层上的应变就会增大, 进而使输出电压增大, 磁电系数也就增大.

其次, 为了分析了 t_m 与 t_p 比值对磁电系数的影响, 分别通过改变 t_p 和 t_m 两种方法来进行分析; 为了研究在不同的 t_m 或 t_p 条件下磁电系数变化情况, 分别探讨了 t_m 和 t_p 为 0.5, 1, 2, 3 mm 时磁电系数随厚度比变化情况, 结果如图 9 所示. 在图中所示范围内, 固定压电层厚度, 随着厚度比的增加, 其 α_{ME} 逐渐增大, 并趋于稳定, 表明厚度比的增加存在极限, 再继续增加厚度比对 α_{ME} 不再影响, 但固定磁致伸缩材料厚度, 增加厚度比, 其 α_{ME} 持续增加, 更大范围内的影响需要更多的数据支撑. 此外, 从图中曲线可以看出, 通过改变压电层厚度, 磁电系数曲线随厚度比 t_m/t_p 变化陡峭, 这表明通过改

变压电层的厚度来改变厚度比对磁电系数的影响更敏感.

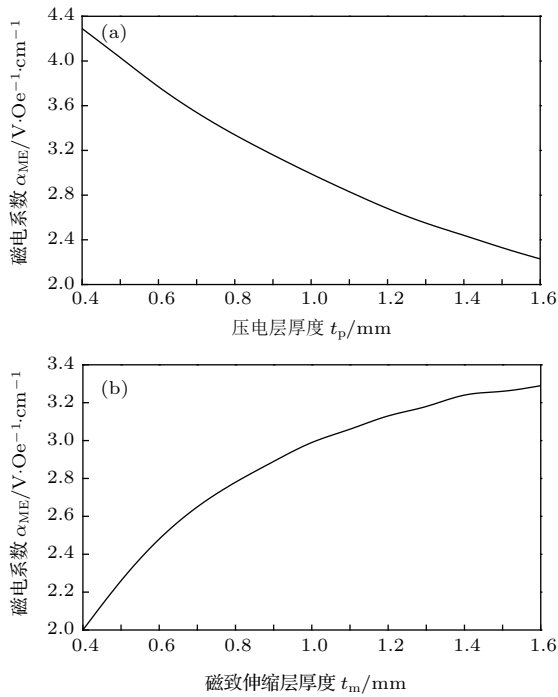


图8 磁电系数随压电层和磁致伸缩层厚度变化 (a) 随压电层厚度变化; (b) 随磁致伸缩层厚度变化

Fig. 8. The variation of magneto-electric coefficient with the thickness of (a) piezoelectric layer, (b) magnetostrictive layer.

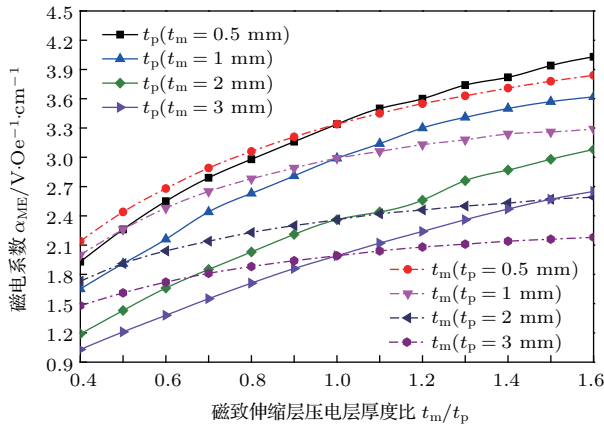


图9 磁电系数随磁致伸缩层和压电层厚度比的变化

Fig. 9. The magneto-electric coefficient varies with the thickness ratio of magnetostrictive layer and piezoelectric layer.

综上所述, 通过改变压电层的厚度来改变厚度比对磁电系数的影响大于改变磁致伸缩层厚度对磁电系数的影响, 说明压电层的厚度对磁电系数的影响更敏感. 这是因为压电层的应变由磁致伸缩层驱动, 由于不同材料之间的耦合, 使得传递到压电层的应变会有所变化, 但整体对于压电层而言, 通

过改变该层厚度对压电层应变的影响要大于通过改变磁致伸缩层厚度对压电层应变的影响.

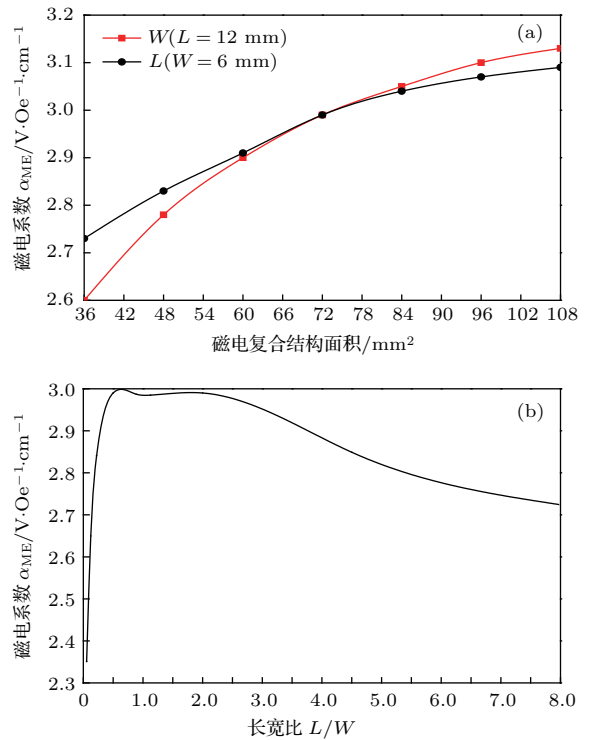


图10 磁电系数与磁电复合材料几何参数关系 (a) 磁电系数随磁电复合材料面积变化; (b) 磁电系数随磁电复合材料长宽比变化

Fig. 10. The relationship between magneto-electric coefficient and geometrical dimensions of magneto-electric composites: (a) The variation of magneto-electric coefficient with magneto-electric composite area; (b) the variation of magneto-electric coefficient with the aspect ratio of magneto-electric composite materials.

最后, 分析了复合材料磁电系数随磁电结构的表面积及长宽比 L/W 的变化情况, 结果如图10所示. 图10(a) 给出了分别通过改变复合结构长度 L 和宽度 W 两种方法下, 当磁电复合结构的上表面积从 $36-108 \text{ mm}^2$ 变化时, α_{ME} 随磁电复合结构上表面积的变化. 结果表明, 无论是改变 L 还是 W , α_{ME} 都随着结构表面积的增加而增大, 其增加速率逐渐减小, 且通过改变 W 对磁电系数的影响要略大于通过改变 L 对磁电系数的影响. 这主要是由于固定约束的作用, 当复合材料长度不变, 仅改变宽度时, 相当于沿着固定约束面方向拉长, 固定约束面增大, 而结构应变集中于约束处, 因此总应变增大, 输出电压增大, 磁电系数就相应增大. 而当复合材料宽度不变, 仅改变长度时, 相当于垂直固定约束面方向拉长, 固定约束面不变, 所以应变变化

量相对于改变宽度而言较小,所以磁电系数变化没有通过改变宽度时的变化大。

图 10(b) 描述了磁电复合结构上表面面积为 72 mm^2 时, α_{ME} 随磁电复合结构长宽比的变化规律, 结果表明当磁电复合材料长宽比从 0.056—0.5 变化时, α_{ME} 随磁电复合结构长宽比增加从 $2.35 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 急剧增大到 $3 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, 当磁电复合材料长宽比从 0.5 到 2 变化时, α_{ME} 基本保持不变, 为 $3 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$; 当磁电复合材料长宽比从 2 到 8 变化时, α_{ME} 逐渐从 $3 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 减小到 $2.72 \text{ V}\cdot\text{Oe}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, 这表明层叠式磁致伸缩/压电/磁致伸缩复合结构的长宽比 L/W 对磁电系数有影响, 其存在最优值. 当 $L/W < 0.5$ 时, 磁电系数 α_{ME} 随着 L/W 的增加而迅速增大, 这是由于此时结构宽度很大而长度很小, 为一根细长条, 长边被固定, 沿宽边拉伸, 所以结构应变很小, 磁电系数很小, 随着长度逐渐增大时, 应变迅速增大, 使得磁电系数也迅速增大; 在 $0.5 < L/W < 2$ 时, 当宽度大于长度时, 由于固定约束起主要作用, 使其应变大, 故而磁电系数较大, 当长度大于宽度时, 此时整个结构都在应变范围内, 虽然固定约束面减小, 但应变范围变大, 使其磁电系数仍然保持在最大值左右, 几乎没有变化; 当 $L/W > 2$ 时, 即长宽比继续增大, 由于长度变大, 宽度变小, 固定约束面减小, 进而其磁电系数减小, 但当长度增加到一定程度后, 为一根细长条, 宽边被固定, 沿长边拉伸, 在距离固定端较远的地方几乎没有应变, 而固定面也几乎不变, 故其磁电系数趋于稳定。

5 结 论

本文基于磁致伸缩材料和压电材料在物理场的本构关系, 用 COMSOL5.0 建立三维模型, 利用稳态求解器分析了磁电层状结构内部的应力、应变以及位移分布情况, 并分析了复合材料几何参数对磁电耦合系数的影响. 结果表明:

1) 由于边界效应, 复合结构两端应变不均匀, 使得输出电压也有不同, 相差 7 V;

2) 小信号频域分析发现, 当交变磁场确定时, 偏置磁场对输出电压影响较大, 当 H_{dc} 为 50 Oe 时, 输出最大电压约为 600 Oe 偏置磁场时的 30 倍;

3) 不同的几何尺寸对磁电系数影响较大, 压电层的厚度对磁电系数的影响要大于磁致伸缩层; 分

别通过改变磁电复合结构的长度或宽度对磁电系数的影响也有差异, 且当磁电复合结构上表面积相同时, 通过改变复合结构宽度对磁电系数的影响更敏感;

4) 当磁电复合结构面积为恒定时, 磁电复合材料的磁电系数随长宽比 L/W 增加表现出先增加后减小的趋势, 表明长宽比存在最优值, 使磁电系数达到最大, 因此应合理设计不同层材料尺寸, 以达到最佳磁电系数. 由于该模型层间耦合视为理想的, 并且也没有考虑预应力、预应变, 与实际中是有差别的, 因此后续可以考虑施加黏结层、加入预应力或预应变以近似模拟实际情况。

参考文献

- [1] Landau L D, Lifshitz E M, Skykes J B, Bell J S 1961 *Phys. Today* **14** 48
- [2] Astrov D N 1961 *Sov. Phys. JETP* **13** 729
- [3] Bichurin M I, Petrov V M, Srinivasan G 2003 *Phys. Rev. B* **68** 575
- [4] Bichurin M I, Filippov D A, Petrov V M 2003 *Phys. Rev. B* **68** 399
- [5] Lam K H, Lo C Y, Dai J Y, Chan H L W, Luo H S 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 031101
- [6] Chen Z, Su Y 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 3382
- [7] Fetisov Y K, Fetisov L Y, Srinivasan G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** R123
- [8] Filippov D A, Bichurin M I, Nan C W, Liu J M 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 145
- [9] Bichurin M I, Petrov V M, Srinivasan G 2003 *Phys. Rev. B* **68** 575
- [10] Bichurin M I, Kornev I A, Petrov V M, Tatarenko A S 2001 *Phys. Rev. B* **64** 115
- [11] Shi Z, Nan C W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2766 (in Chinese) [施展, 南策文 2004 物理学报 **53** 2766]
- [12] Dong S, Li J F, Viehland D 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2625
- [13] 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]
- [14] Liu Y X, Wan J G, Liu J M 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 5111
- [15] Wan J G, Li Z Y, Wang Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 266
- [16] Nan C W, Bichurin M I, Dong S 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 031101
- [17] Pan E, Wang R 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 245503
- [18] Martins P 2013 *Adv. Funct. Mater.* **23** 3371
- [19] Kannan K S 1997 *Ph. D. Dissertation* (Maryland Co: University of Maryland College Park)
- [20] Zhou H M 2007 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [周浩淼 2007 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [21] Zadov B, Elmalem A, Paperno E, Gluzman I, Nudelman A, Levron D, Grosz A, Lineykin S, Liverts E 2012 *Advances in Condensed Matter Physics* **2012** 448

- [22] Wen J B, Zhang J J, Gao Y W 2017 *Composite Structures* **166** 163
- [23] Evans P G, Dapino M J 2011 *IEEE Trans. Magn.* **47** 221
- [24] Ye J J 2014 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing Normal University) (in Chinese) [叶晶晶 2014 硕士学位论文 (南京: 南京师范大学)]
- [25] Yang C H, Wen Y M, Li P, Bian L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7292 (in Chinese) [阳昌海, 文玉梅, 李平, 卞雷祥 2008 物理学报 **57** 7292]

Magnetolectric effect analysis of magnetostrictive/piezoelectric laminated composites*

Zhou Yong^{1)2)†} Li Chun-Jian¹⁾ Pan Yu-Rong¹⁾

1) (Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

2) (Jiangsu Technology Engineering Center of Meteorological Sensor Network, Nanjing 210044, China)

(Received 25 October 2017; revised manuscript received 19 January 2018)

Abstract

Based on the finite element analysis software COMSOL5.0, a three-dimensional (3D) model of cantilever beam composed of magnetostrictive/piezoelectric/magnetostrictive laminated composites is established using the piezoelectric module and magnetic field module. The magneto electro coupling coefficient α_{ME} of the composite is analyzed. The effect of geometrical parameter on magnetolectric coefficient is studied, and the geometrical parameters are optimized. Firstly, the stress, strain, displacement and potential distributions of the magnetolectric layered structure are analyzed by the steady-state solver. The stress and strain concentrate on the fixed terminal while the maximum displacement exists in the free end of the structure. As a result, the potential appears between the upper and lower surface of the piezoelectric layer and the voltage distribution is not uniform. The output voltage in the fixed terminal is larger than that in the free end, which is about 49 V compared with 42 V in the free end. And the dynamic distributions of various variables in magnetolectric composite structure are analyzed by transient solution. Secondly, the resonance frequency of the structure and the influence of the bias magnetic field on the output voltage are studied by small signal analysis in frequency domain. The results show that the output voltage decreases with the increase of H_{dc} . Also, the maximum output voltage is about 3.36 V at the second-order resonance frequency, which is far higher than the voltage at the first-order resonant frequency in the condition of bias magnetic fields $H_{dc} = 200$ Oe and alternating magnetic fields $H_{ac} = 1$ Oe. The reason is that the composite structure has a larger deformation at the second-order resonance frequency. Furthermore, the effect of thickness ratio between magnetostrictive and piezoelectric layers t_m/t_p on coupling coefficient is analyzed by changing the thickness of magnetostrictive layer and piezoelectric layer, respectively. The results show that the magnetolectric coefficient increases with the augment of the thickness ratio, but the increasing rate decreases gradually. The research also shows that it has a greater influence on magnetolectric coefficient to change t_p rather than t_m . Finally, the variations of magnetolectric coefficient with the area of composite structure and the aspect ratio are analyzed. The results show that the magnetolectric coefficient increases gradually with the augment of magnetolectric composite area, but the increasing rate declines gradually. With the constant composite area, the magnetolectric coefficient first increases and then drops with the increase of aspect ratio L/W , demonstrating the existence of an optimized value. Besides, the width W acts more importantly than length L because strain concentrates on the fixed terminal along the width direction.

Keywords: laminated composite materials, magnetolectric effect, piezoelectric effect, magnetolectric coefficient

PACS: 77.80.bg, 77.84.Lf, 85.70.Ec, 88.80.ht

DOI: 10.7498/aps.67.20172307

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61601231), Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20140999), and the Open Fund of Jiangsu Technology and Engineering Center of Meteorological Sensor Network, China (Grant No. KDXG1302).

† Corresponding author. E-mail: zhouyong@nuist.edu.cn