

磁电弹固体中弹性波传播问题的研究进展

刘金喜

(石家庄铁道大学 工程力学系, 河北 石家庄 050043)

摘要: 简要介绍了磁电弹材料的特征和基本方程, 评述了这类材料中弹性波传播问题的研究进展, 主要包括表面波、界面波和导波等。

关键词: 磁电弹固体; 压电材料; 压磁材料; 弹性波; 磁电效应

中图分类号: O346 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)02-0012-05

0 引言

磁电弹(magneto-electro-elastic)固体是一类新型的多功能复合材料, 这类材料由具有力-电耦合效应的压电介质和具有力-磁耦合效应的压磁介质按照一定的方式复合而成, 其最新奇的特征是能够实现电能和磁能之间的相互转换, 即宏观上具有磁电(magnetoelectric)耦合效应, 因而也称为磁电复合材料。磁电弹固体中电场和磁场之间的耦合是一个积效应, 它来源于压电相和压磁相之间的相互作用, 其机理可以简单地描述为: 受电场作用的压电相因逆压电效应产生机械变形后, 界面将这种变形传递给压磁相, 进而由压磁效应在压磁相中诱发磁场, 反之亦然。磁电弹材料的多场耦合特性, 特别是强磁电耦合效应的存在, 使其在传感与控制技术、信息技术和新兴的智能材料系统与结构等高新技术领域呈现出广泛的应用前景。磁电弹材料可以用于制作磁电控制装置^[1]、传感器、滤波器、延迟线、可调相移器等微波器件和其它电子产品等^[2,3], 这些应用引起了应用物理、材料科学和固体力学等领域的研究人员对磁电弹材料磁电效应的实验确定和理论预报以及一些基本物理力学问题的浓厚兴趣。

磁电弹材料或结构的许多应用是与它们的动力学性能, 尤其是弹性波的传播性能, 密切相关^[2,3]。因此, 研究弹性波在这种新材料或结构中的传播, 不仅可以揭示多场耦合效应所可能导致的一些新的物理力学现象, 也可以为其在声波或微波器件中的应用提供有参考价值的理论支持。目前, 人们已经对磁电弹材料中弹性波传播的一些基本问题进行了理论研究, 主要包括: 表面波、界面波和导波等。本文在介绍了磁电弹材料的基本方程之后, 对其弹性波传播问题的研究进展进行了评述。

1 磁电弹材料的基本方程

在直角坐标系下, 描述机械变形、电场和磁场之间耦合特征的本构方程为^[4]

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} - e_{ijk} E_k - h_{ijk} H_k \\ D_i = e_{ikl} \varepsilon_{kl} + \kappa_{ik} E_k + \alpha_{ik} H_k \\ B_i = h_{ikl} \varepsilon_{kl} + \alpha_{ik} E_k + \mu_{ik} H_k \end{cases} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中, ε_{ij} 、 E_i 和 H_i 分别为应变、电场强度和磁场强度; σ_{ij} 、 D_i 和 B_i 分别为应力、电位移和磁感应强度; κ_{ij} 、 μ_{ij} 和 α_{ij} 分别为介电常数、磁导率和磁电耦合系数; c_{ijkl} 、 e_{ijk} 和 h_{ijk} 分别为弹性、压电和压磁常数。

应变、电场和磁场可以用位移 u_i 、电势 φ 和磁势 ϕ 表示为

收稿日期: 2010-05-23

作者简介: 刘金喜, 男, 1961 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 智能材料结构的变形与控制; 新型电磁材料的变形与断裂; 复合材料及其结构的拓扑优化设计。发表学术论文 50 余篇, 其中 38 篇分别被 SCI、EI 和 ISTP 收录。获教育部自然科学一等奖、河北省自然科学二等奖各 1 项。

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972147)

$$u_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2, E_i = -\varphi_{,i}, H_i = -\phi_{,i} \quad (2)$$

式中,下标“,”表示对坐标 x_i 的偏微分。

在准静态电磁近似下,应力、电位移和磁感应满足下面的平衡方程

$$\sigma_{ij,j} = \rho \partial^2 u_i / \partial t^2, D_{i,i} = 0, B_{i,i} = 0 \quad (3)$$

式中, t 表示时间。

方程(1)~(3)为磁电弹材料的基本方程。将(2)代入(1)后再代入(3),便得到以位移、电势和磁势为未知量的控制微分方程如下

$$\begin{cases} c_{ijkl} u_{k,lj} + e_{ijk} \varphi_{,kj} + h_{ijk} \phi_{,kj} = \rho \partial^2 u_i / \partial t^2 \\ e_{ikl} u_{k,lj} - \varepsilon_{ik} \varphi_{,ki} - \alpha_{ik} \phi_{,ki} = 0 \\ h_{ikl} u_{k,lj} - \alpha_{ik} \varphi_{,ki} - \mu_{ik} \phi_{,ki} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

研究磁电弹材料的弹性波传播问题就是寻求满足给定边界条件下方程(4)的解,一旦获得了位移、电势和磁势,便可以通过方程(1)和(2)得到其他场量。

2 磁电弹材料与结构中的弹性波传播

2.1 表面波和界面波

表面波通常指沿半无限大介质表面传播的波,感兴趣的问题是什么样的边界条件支持表面波的传播。Alshits 等人^[4]最早系统地研究了各向异性磁电弹弹性半空间中表面波的存在性问题。在半空间的表面上,他们假定:(A)表面是机械固支的($u_i = 0, i = 1, 2, 3$)或自由的($\sigma_{3i} = 0, i = 1, 2, 3$);(B)表面是电学短路($\varphi = 0$)、或电学开路($D_3 = 0$)、或者是与半无限大自由空间相邻接的($\varphi = \varphi_0, D_3 = D_{30}$),这里 φ_0 和 D_{30} 是自由空间在边界上的电势和法向电位移;(C)表面是磁学开路($\phi = 0$)、或磁学短路($D_3 = 0$)、或者是与半无限大自由空间相邻接的($\phi = \phi_0, B_3 = B_{30}$), ϕ_0 和 B_{30} 是自由空间在边界上的磁势和法向磁感分量;这些机械、电学和磁学条件可以组合成 10 种混合的力-电-磁边界条件。Alshits 等人^[4]严格地证明了 10 种边界条件下表面波存在的个数。最近, Feng 等^[5]结合具体算例数值分析了横观各向同性磁电弹半空间中在 16 种边界下 Rayleigh 型表面波的存在性。Wang 等人^[6]和 Liu 等人^[7]几乎同时表明,与真空邻接的横观各向同性磁电弹半空间允许 SH 型表面波的传播,其传播速度为

$$c = c_{SH} \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa_0 \eta_a^2 + \mu_0 \eta_b^2 + \kappa_0 \mu_0 (\mu_{11} e_{15}^2 + \kappa_{11} h_{15}^2 - 2e_{15} h_{15} \alpha_{11})}{\tilde{c}_{44} (\mu_0 \kappa_{11} + \kappa_0 \mu_{11} + \kappa_0 \mu_0 + \eta) \eta} \right)^2} \quad (5)$$

式中, $c_{SH} = \sqrt{\tilde{c}_{44}/\rho}$ 是剪切体波的波速, $\tilde{c}_{44} = c_{44} + (\mu_{11} e_{15}^2 + \kappa_{11} h_{15}^2 - 2e_{15} h_{15} \alpha_{11})/\eta$ 是计入压电、压磁和磁电效应的弹性刚度常数, κ_0 和 μ_0 分别是真空的介电常数和磁导率, $\eta = \kappa_{11} \mu_{11} - \alpha_{11}^2$, $\eta_a = e_{15} \mu_{11} - h_{15} \alpha_{11}$, $\eta_b = h_{15} \kappa_{11} - e_{15} \alpha_{11}$ 。如果令式(5)中的压电常数 $h_{15} = 0$ 和磁电耦合常数 $\alpha_{11} = 0$, 则得到

$$c = c_{SH} \sqrt{1 - \frac{e_{15}^4 \kappa_0^2}{[\tilde{c}_{44} \kappa_{11} (\kappa_0 + \kappa_{11})]^2}} \quad (6)$$

这是横观各向同性压电半空间与真空邻接时的 SH 型表面波的速度^[8]。Wei 等人^[9]进一步表明,表面电学短路-磁学开路、电学短路-磁学短路和电学开路-磁学开路三种边界条件下的横观各向同性磁电弹半空间也支持 SH 型表面波的传播。

界面波是指沿无限大双材料界面传播的波,所关心的问题是两种材料性能满足什么条件时界面波是可以存在的。Soh 和 Liu^[10]首先研究了横观各向同性压电-压磁双材料空间中 SH 型界面波的存在性,给出了 SH 波存在时压电和压磁材料的性能所应满足的条件。假定上、下半空间是相同的横观各向同性磁电弹材料, Melkumyan^[11]分析了上半空间机械自由、下半空间机械固支时 25 种电磁边界条件下 SH 界面波传播的可能性,他发现 12 种界面电磁条件支持 SH 型波的传播。Feng 等^[12]研究了横观各向同性双材料空间中 Stoneley 型界面波的传播问题。

上述工作研究的是半无限大空间中的表面波和双材料空间中的界面波,两种波的传播速度与频率无关,因而是非频散的。假定界面是非理想粘结的, Melkumyan 和 Mai^[13]研究了横观各向同性压电-压磁双

材料空间中 SH 界面波的存在性,结果表明,非理想界面导致 SH 界面波是频散的,而且界面电磁条件和材料性能对传播速度和存在条件有重要的影响;Huang 等人^[14]也分析了同样的问题。

2.2 层状半空间结构中的导波

层状磁电弹半空间结构中弹性波的传播性能不仅是磁电传感器、延迟线和可调滤波器等声波装置设计的基础,也可以用于评价材料的性能。使用电学短路-磁学开路或与真空临界的两种电磁边界条件,Du 等人^[15-16]研究了均匀初应力存在或不存在时压磁层/压电半空间中 Love 波的传播,以 CoFe_2O_4 层/ BaTiO_3 半空间结构为例,数值计算了初应力对传播速度、群速度和磁电弹场的影响。假定初应力是非均匀的,Zhang 等人^[17]分析了类似于 Du 等人所研究的问题。使用电学开路-磁学短路边界条件,Liu 等人^[18]研究了压电层/压磁半空间以及相反构形中 Love 波的频散特性,重点讨论了压电材料的性能对相速度和群速度的影响,结果发现压电材料的磁导率对传播性能的影响是可以忽略不计的。Pang 等人^[19]研究了压电层/压磁半空间结构中 Rayleigh 型表面波的传播,考查了压电覆层自由表面 4 种不同的电磁学边界条件以及压电层的材料特性对频散曲线和模态分布的影响。他们的结果表明:结构频散特性和模态分布由压电层表面的电学条件控制,磁学条件主要影响最低阶模态的磁电弹场分布;压电材料的剪切体波波速越大,相应的层状半空间结构中表面波的传播速度也就越大。

2.3 多层结构中的导波

由压电、压磁材料交替复合而成的层状结构是磁电弹材料的重要结构形式之一,其优点是制作工艺简单,并具有很强的磁电转换能力,研究弹性波在其中的传播对于换能器等器件设计是非常有用的。2006 年,陈江义和陈花玲^[20]基于横观各向同性磁电弹材料反平面问题的基本方程,研究了 Love 波在多层介质中的传播;他们选 CoFe_2O_4 为压磁层、 BaTiO_3 为压电层,计算了由这两种材料组成的三层板的频散特性,发现叠层顺序和层厚比对传播速度有重要的影响。使用状态空间方法,陈江义和陈花玲^[21]分析了多层柱壳沿轴向传播的导波,数值表明了 CoFe_2O_4 和 BaTiO_3 三层柱壳中导波的传播规律。Chen 等人^[22]研究了多层磁电弹结构中平面波的传播。在他们的工作中,均假定外层表面是机械自由、电学开路和磁学短路的。Pang 等人^[23]研究了弹性波沿压电/压磁周期层状结构中铺层方向的传播,讨论了不同的压电相体积份数以及压电材料特性对频散曲线和模态分布的影响,结果表明:复合结构的频散曲线类似于自由板中 Lamb 波的对称模态,每条连续的频散曲线并不代表一个单一的振动模态,相邻两阶模态的频散曲线存在着交叉点,在交叉点附近发生波模态转换现象。将状态空间法和传递矩阵相结合,Chen 等^[24]计算了多层压电/压磁结构中弹性波的反射和透射。Pang 等人^[25]分析了弹性波在压电/压磁双材料界面上的反射和折射。他们分析了准纵波(QP 波)和准横波(QSV 波)分别从压电介质和压磁介质单独入射时各散射体波的反射、折射系数以及能量系数随入射角的变化规律,讨论了波型转换以及入射波在界面上的能量转换和分配。Wang 等^[26]用平面波展开法研究二维压电/压磁声子晶体中弹性波的传播。其数值计算结果显示:在 BaTiO_3 填充比为 0.5 条件下, BaTiO_3 夹杂和 CoFe_2O_4 基体的复合结构 Γ -X 方向只观察到 xy 模态很窄的方向带隙, z 模态没有带隙出现,这是因为组分材料 BaTiO_3 夹杂和 CoFe_2O_4 材料的弹性常数比较相近,所以很难观察到较宽的带隙。

3 结束语

对磁电弹材料中弹性波传播的研究现状进行了评述,从已有的成果来看,研究还处于开始和理论阶段,一些理论结果需要实验的证实。因而,今后应结合实验开展研究,这也是实际应用的需要。

参 考 文 献

- [1] Ueno T, Qiu J, Tani J. Magnetic force control with composite of giant magnetostrictive and piezoelectric materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39: 3534-3540.
- [2] Fiebig M. Revival of the magnetoelectric effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(8): R123-R152.
- [3] Nan CW, Bichurin MI, Dong SX, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103: 031101.

- [4] Alshits VI, Darinskii AN, Lothe J. On the existence of surface waves in half-infinite anisotropic elastic media with piezoelectric and piezomagnetic properties[J]. Wave Motion, 1992, 16: 265-283.
- [5] Feng WJ, Pan E, Wang X, et al. Rayleigh waves in magneto-electro-elastic half planes[J]. Acta Mechanica, 2009, 202: 127-134.
- [6] Wang BL, Mai YW, Niraula OP. A horizontal shear surface wave in magneto-electro-elastic materials[J]. Philosophical Magazine Letters, 2007, 87: 53-58.
- [7] Liu JX, Fang DN, Liu XL. A shear horizontal surface wave in magnetoelectric materials[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54: 1287-1289.
- [8] Bleustein J L. A new surface wave in piezoelectric materials[J]. Applied Physics Letters, 1968, 3: 412-413.
- [9] Wei WY, Liu JX, Fang DN. Existence of shear horizontal (SH) surface waves in a magneto-electro-elastic material[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26: 104305.
- [10] Soh AK, Liu JX. Interfacial shear horizontal waves in a piezoelectric-piezomagnetic bi-material[J]. Philosophical Magazine Letters, 2006, 86: 31-35.
- [11] Melkumyan A. Twelve shear surface waves guided by clamped/free boundaries in magneto-electro-elastic materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44: 3594-3599.
- [12] Feng WJ, Jin J, Pan E. Stoneley (interfacial) waves between two magneto-electro-elastic half planes[J]. Philosophical Magazine, 2008, 88: 1801-1810.
- [13] Melkumyan A, Mai YW. Influence of imperfect bonding on interface waves guided by piezoelectric/piezomagnetic composites[J]. Philosophical Magazine, 2008, 88: 2965-2977.
- [14] Huang Y, Li XF, Lee KY. Interfacial shear horizontal (SH) waves propagating in a two-phase piezoelectric/piezomagnetic structure with an imperfect interface[J]. Philosophical Magazine Letters, 2009, 89: 95-103.
- [15] Du JK, Jin XY, Wang J. Love wave propagation in layered magneto-electro-elastic structures with initial stress[J]. Acta Mechanica, 2007, 192: 169-189.
- [16] 杜建科, 金小英, 王骥. 电磁弹性层状结构中的 Love 波传播[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2007, 37: 789-803.
- [17] Zhang J, Shen YP, Du JK. The effect of inhomogeneous initial stress on Love wave propagation in layered magneto-electro-elastic structure[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17: 025026.
- [18] Liu JX, Fang DN, Wei WY, et al. Love waves in layered piezoelectric/piezomagnetic structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315: 146-156.
- [19] Pang Y, Liu JX, Wang YS, et al. Propagation of Rayleigh-Type surface waves in a transversely isotropic piezoelectric layer on a piezomagnetic half-space[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103: 074901-8.
- [20] 陈江义, 陈花玲. Love 波在电磁弹性多层结构中的频散特性[J]. 复合材料学报, 2006, 23: 181-184.
- [21] 陈江义, 陈花玲. 多层电磁弹性圆柱壳内波的轴向传播[J]. 应用力学学报, 2007, 24 (2): 174-179.
- [22] Chen JY, Pan E, Chen HL. Wave propagation in magneto-electro-elastic multilayered plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44: 1073-1085.
- [23] Pang Y, Liu JX, Wang YS, et al. Wave propagation in piezoelectric/piezomagnetic layered periodic composites[J]. Acta Mechanica Sinica, 2008, 21: 483-490.
- [24] Chen JY, Chen HL, Pan E. Reflection and transmission coefficients of plane Waves in magnetoelastoelectric layered structures[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2008, 130: 031002-1.
- [25] Pang Y, Wang YS, Liu JX, et al. Reflection and refraction of plane waves at the interface between piezoelectric and piezomagnetic media[J]. International Journal of Engineering Science, 2008, 46: 1098-1110.
- [26] Wang YZ, Li FM, Huang WH, et al. Wave band gaps in two-dimensional piezoelectric/piezomagnetic phononic crystals[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45: 4203-4210.

情况,因此,该桥需要在保证桥面不开裂条件下完成吊杆更换。

通过对该桥移动加载,发现当挂车-100 前轮作用于 1[#]吊杆位置时,桥面铺装将产生最不利转角。此状态下桥面铺装产生的位移折线图如图 2 所示。

由图 2 可以看出,在 2[#]、4[#]吊杆处桥面铺装负弯矩转角较大,但是该吊杆附近桥面铺装作用于移动荷载,不能够反映在吊杆更换过程中桥面铺装受力状态,因此不作为制定控制条件依据。在 2[#]吊杆处桥面铺装在吊杆间距范围内没有移动荷载作用,其桥面铺装受力状态符合吊杆更换过程中的实际情况。因假设移动荷载作用时桥面铺装不开裂,所以 2[#]吊杆处桥面铺装产生的转角可以作为制定控制条件的依据。根据式(1),即可计算出保证桥面铺装不开裂时的转角 $[\theta] = 0.007\ 186\ 67$ 弧度,再利用式(3)计算出控制条件 $[\Delta] = 10.78\ \text{mm}$ 。在具体施工时,要求吊杆处桥面标高变化不能超过 10 mm。以此做为施工控制条件,城西大桥成功地完成了全部吊杆更换,并且桥面没有发生开裂,实现了桥面无损更换^[4]。建立的方法可作为今后简支桥面系杆拱桥更换吊杆,且保证桥面不开裂提供依据。

参 考 文 献

- [1]姚志强,阮小平,邓清. 拱桥吊杆变形差异引发桥面断裂及类似事故的预防措施[J]. 桥梁建设,2002(7):73-75.
- [2]李文琪,贺立新. 对宜宾小南门桥事故的思考[J]. 中国公路,2002(22):47-48.
- [3]钟启宾. 系杆拱桥吊杆、系杆设计寿命及相关问题[J]. OVM 通讯,2002(2):2-5.
- [4]聂磊. 危旧吊杆拱桥加固改造关键技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学土木工程学院,2010.

Arch Bridge Hanger Diseases and Replacement Control Standards

Zhang Zhiguo, Nie Lei

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In view of bridge disaster risk accidents, usual diseases of arch bridge hanger are analyzed, and the conditions to ensure bridge no-cracking of deck pavement and the control method during hangers change are researched. The calculation method for bridge deck elevation control according to no cracking of bridge pavement under normal service load is brought forward. Based on the actual hanger change project, the control standards for elevation variation limit of 10 mm during hanger change are obtained through calculations from the established methods in this paper, and its rationality and security are testified through the example. The conclusion in this paper provides theory basis for hanger change with no cracking of bridge pavement.

Key words: arch bridge; hanger change; bridge deck pavement; hanger change standards with no pavement damage

(上接第 15 页)

Propagation of Elastic Waves in Magneto-electro-elastic Solids

Liu Jinxi

(Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Magneto-electro-elastic solids are a class of new multifunctional composites. The novel characteristic and basic equations of magneto-electro-elastic solids are briefly introduced. The research progress of elastic waves (surface waves, interfacial waves and guided waves, etc.) propagating in magneto-electro-elastic materials or structures is reviewed.

Key words: magneto-electro-elastic; piezoelectric material; piezomagnetic material; elastic wave; magnetoelectric effect