

文章编号 1004-924X(2011)08-1832-06

复合薄膜磁致伸缩系数求解及悬臂梁结构优化

王福吉*, 贾振元, 刘 巍, 赵显嵩

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:建立了超磁致伸缩薄膜(GMF)的磁致伸缩系数求解模型用于分析磁机耦合转化关系,研究了模型的建立过程、推演机理及仿真结果。通过合理简化复合 GMF 变形,并以单层 GMF 的磁致伸缩系数表达式为基础,推演得出了复合 GMF 的磁致伸缩系数表达式。以具有正负磁致伸缩效应的复合 GMF 为研究对象,利用推演得出的复合 GMF 的磁致伸缩系数表达式,讨论了磁致伸缩镀层厚度对悬臂梁式 GMF 自由端挠度的影响规律。研究表明:在镀层总厚度一定且正磁致伸缩材料层与负磁致伸缩材料层厚度比为 2.3 时,不论是 Cu 基薄膜还是 PI 基薄膜,其变形能力均达到最大值,从而实现了正负复合薄膜悬臂梁的结构优化。

关键词:超磁致伸缩复合薄膜;磁致伸缩系数;结构优化

中图分类号:TG132.2;TB381 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111908.1832

Calculation of magnetostrictive coefficient of composite thin film and structure optimization of cantilever

WANG Fu-ji*, JIA Zhen-yuan, LIU Wei, ZHAO Xian-song

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

** Corresponding author, E-mail: w f j s l l @ d l u t . e d u . c n*

Abstract: A model to solve the magnetostrictive coefficient of a Giant Magnetostrictive Film(GMF) was established to analyze the coupling relations of GMFs. Then, the building process, deduction mechanism and simulation results of the model were investigated. On the basis of magnetostrictive coefficient expression of a single layer GMF, the magnetostrictive coefficient expression of a composite GMF was obtained by simplifying the deformation of the composite GMF reasonably. By taking the compound GMF with positive and negative magnetostrictive effects as the research object, the impact of magnetostrictive coating thickness on the deflection of the free end of the cantilever GMF was discussed by using the deduced magnetostrictive coefficient expression. The results show that the deformation capability for both Cu-based thin film and PI-based thin film can reach the maximum when the total thickness ratio of the positive and negative magnetostrictive material layers is 2.3, which realizes the structure optimization of positive and negative cantilevers.

收稿日期:2010-12-07;修订日期:2011-02-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50775021, No. 50605005)

Key words: composite Giant Magnetostrictive Film(GMF); magnetostrictive coefficient; structure optimization

1 引言

超磁致伸缩材料是一种新型的功能材料,具有能量密度高、响应速度快和可无缆驱动等优点,在 MEMS 系统微执行器、微传感器以及其它功能元件中有很好的应用前景。最近几年,国内外学者对超磁致伸缩材料器件及其控制理论与方法进行了大量的研究,为其工程应用奠定了基础^[1-3]。随着对超磁致伸缩材料器件研究的深入,研究人员发现了超磁致伸缩薄膜(Giant Magnetostrictive Film,GMF)不仅具有合金材料的特点,而且还具有可集成化、微型化的特点,在智能驱动和控制方面具有良好的应用价值,目前,国内外学者已在 GMF 的变形机理、有限元仿真和微执行器、传感器设计方面取得了很多成果^[4-9]。

在实际应用中,传感器和执行器都要求驱动元件 GMF 在外磁场的驱动下能产生大的响应,因此,研究在外磁场作用下材料参数对悬臂梁式 GMF 弯曲特性、自由端挠度等的影响是 GMF 应用设计和优化的基本问题之一^[10]。此类问题研究的前提是得到正确的悬臂梁磁致伸缩系数表达式。对于单层 GMF 而言,这方面的研究已经非常深入^[11];而对于复合超磁致伸缩薄膜悬臂梁而言,利用先前的办法无法求解多层材料的耦合,因此这方面的研究仍属空白,制约了复合 GMF 悬臂梁的应用。因此,研究复合 GMF 悬臂梁的应力应变关系,并在此基础上进行结构优化有很重要的意义。

本文对复合 GMF 变形特性进行了详细的分析,通过合理的简化,在 H. Victor^[12]等人给出的单层 GMF 悬臂梁应力应变关系式的基础上通过数学变形推演出了复合 GMF 悬臂梁的磁致伸缩应变关系式。在此基础上,研究了悬臂梁系统作为弯曲型微传感器器件的应用优化问题,并重点分析了构成 GMF 几种材料的几何参数和物理参数对悬臂梁式 GMF 自由端最大挠度值的影响。

2 正负复合 GMF 的磁致伸缩系数

超磁致伸缩系数是表征超磁致伸缩薄膜变形能力的基本参数,能够反映超磁致伸缩薄膜在变形过程中的磁机转化关系。对于单层超磁致伸缩材料,磁致伸缩系数为磁致伸缩材料层的单位长度伸长量,如图 1 所示。

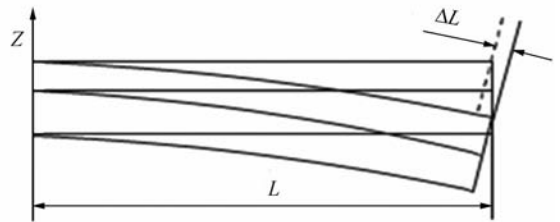


图 1 单层 GMF 的变形示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-layer GMF deformation

对于正负复合超磁致伸缩薄膜,由于其存在两层磁致伸缩材料,理论上需要两个超磁致伸缩系数分别表征其在单位长度上的变形量。在前期的研究中发现^[7],正负复合 GMF 磁致伸缩变形过程中,薄膜的弯曲变形极小,中性层的曲率半径极大,因而两层超磁致伸缩材料沿同一方向的单位长度伸长量相同,即两层材料的超磁致伸缩系数相同,如图 2 所示。因此本文只采用一个磁致伸缩系数来表示正负复合超磁致伸缩薄膜的变形能力。

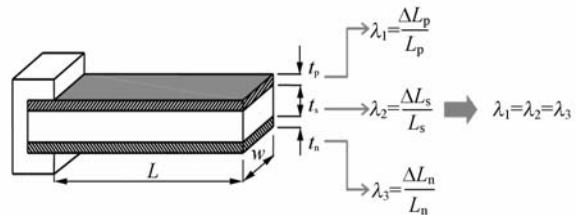


图 2 双层薄膜结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of double-layer GMF

3 正负复合薄膜的磁致伸缩系数求解

复合 GMF 存在多层能量的复杂耦合,传统

的能量最小化方法已不适用于求解正负复合 GMF 磁致伸缩系数。本文以单层 GMF 的磁致伸缩系数求解方法为基础,对正负复合 GMF 的磁致伸缩系数表达式进行了数学推导。

3.1 正负复合 GMF 的变形分析

正负复合超磁致伸缩薄膜在平行于易磁化轴方向的激励磁场作用下,正磁致伸缩材料伸长,负磁致伸缩材料收缩,总的应力作用结果使悬臂梁向下发生弯曲。因此,可对双层超磁致伸缩薄膜悬臂梁的变形做以下几点假设:

(1) 梁变形前垂直梁轴线的横截面在变形后仍为平面。近似认为三层材料的沿悬臂梁长度方向的单位长度伸长量相等,即

$$\lambda_p = \lambda_s = \lambda_n$$

式中, $\lambda_p = \Delta L_p / L$, $\lambda_s = \Delta L_s / L$, $\lambda_n = \Delta L_n / L$, 下标 p, n 分别表示正磁致伸缩层和负磁致伸缩层。

(2) 横截面变形后的平面仍与变形后的轴线垂直,即在 GMF 悬臂梁变形前后,只考虑弹性变形忽略 GMF 变形中的剪切应变。

(3) 正负超磁致伸缩薄膜悬臂梁末端位移变形量等效于正磁致伸缩层单独作用时变形量和负磁致伸缩层单独作用时变形量的和,即 $\Delta = \Delta_p + \Delta_n$ 。

3.2 正负复合 GMF 磁致伸缩系数求解模型

根据前面的假设可知,将双层 GMF 悬臂梁沿特定方向上的磁致伸缩变形等效为正磁致伸缩薄膜层和负磁致伸缩薄膜层单独作用时分别产生的变形和。因此,在易磁化轴方向上,复合超磁致伸缩薄膜悬臂梁的末端位移量等效为正、负磁致伸缩薄膜层单独作用时产生的变形和,即

$$\Delta_{//} = \Delta_{p//} + \Delta_{n//}. \quad (1)$$

在计算正、负磁致伸缩材料层单独作用产生的变形时,将正磁致伸缩薄膜层与基底作为一种单层 GMF,负磁致伸缩材料层作为另一种单层 GMF。因此,可以套用单层 GMF 的末端位移量与磁致伸缩系数的关系式分别求出正、负磁致伸缩层材料单独作用时所产生的末端位移量。单层 GMF 的磁致伸缩系数表达式为^[9]:

$$\Delta_{//} = -3\chi\zeta\lambda_s \cdot \frac{L^2(1-v_f v_s) - (v_f - v_s)/2}{t_s(1-v_s^2)}, \quad (2)$$

$$\Delta_{\perp} = \frac{3}{2}\chi\zeta\lambda_s \cdot \frac{L^2(1-v_f v_s) - 2(v_f - v_s)}{t_s(1-v_s^2)}, \quad (3)$$

其中, $\chi = E_f(1-v_s^2) / [E_s(1-v_f^2)]$, $\zeta = t_f / t_s$ 。

将 GMF 各层材料的参数代入式(2)得:

$$\Delta_{p//} = -3\chi_p \zeta_p \lambda_s \cdot \frac{L^2(1-v_p v_s) - (v_p - v_s)/2}{t_s(1-v_s^2)}, \quad (4)$$

$$\Delta_{n//} = -3\chi_n \zeta_n \lambda_s \cdot \frac{L^2(1-v_n v_s) - (v_n - v_s)/2}{t_s(1-v_s^2)}. \quad (5)$$

由假设(3)可知,正负复合超磁致伸缩薄膜的正、负磁致伸缩层材料在薄膜发生弯曲变形时的磁致伸缩系数近似相等。因此,式(4)、(5)中的 λ_s 相等,将两式代入式(1)并合并 λ_s , 进行整理可得:

$$\Delta_{//} = \frac{-3L^2\lambda}{t_s(1-v_s^2)}(K_p + K_n), \quad (6)$$

其中, $K_i = \chi_i \zeta_i [(1-v_i v_s) - (v_i - v_s)/2]$ 。

同理可求得难磁化轴方向正负复合 GMF 末端位移与磁致伸缩系数的关系式为:

$$\Delta_{\perp} = \frac{3L^2\lambda}{2t_s(1-v_s^2)}(L_p + L_n), \quad (7)$$

式中, $L_i = \chi_i \zeta_i [(1-v_i v_s) - 2(v_i - v_s)]$ 。

此式即为难磁化轴方向正负复合 GMF 末端位移与磁致伸缩系数的关系式。

将式(6)、(7)关于 λ 进行合并可得出双层超磁致伸缩薄膜的磁致伸缩系数表达式为:

$$\lambda = -\frac{2(\Delta_{//} - \Delta_{\perp})t_s}{3L^2(Q_p + Q_n)}, \quad (8)$$

$$Q_i = \frac{E_i t_i}{E_s t_s} \left[\frac{(1-v_i v_s) + (v_i - v_s)}{(1-v_i)^2} \right]. \quad (9)$$

对于多层复合 GMF 而言,由于镀膜的厚度很薄(纳米级别),且在磁致伸缩过程中属于小挠度弹性变形,因此可依据本文提出的三点假设,采用同样的方法得出:

$$\Delta_{//} = \frac{-3L^2\lambda}{t_s(1-v_s^2)} \sum K_i, \quad (10)$$

其中, $K_i = \chi_i \zeta_i [(1-v_i v_s) - (v_i - v_s)/2]$ 。

此式为易磁化轴方向多层复合 GMF 的磁致伸缩系数求解公式,则难磁化轴方向的求解公式为:

$$\Delta_{\perp} = \frac{3L^2\lambda}{2t_s(1-v_s^2)} \sum L_i, \quad (11)$$

式中, $L_i = \chi_i \zeta_i [(1-v_i v_s) - 2(v_i - v_s)]$ 。

将式(10)、(11)进行合并计算,得到最终的多层膜磁致伸缩系数表达式为:

$$\lambda = -\frac{2(\Delta_{//} - \Delta_{\perp})t_s}{3L^2 \sum Q_i}, \quad (12)$$

$$Q_i = \frac{E_i t_i}{E_s t_s} \left[\frac{(1 - \nu_i \nu_s) + (\nu_i - \nu_s)}{(1 - \nu_i)^2} \right]. \quad (13)$$

4 正负复合薄膜悬臂梁的结构优化

本文使用的超磁致伸缩薄膜为正负复合薄膜,基底材料为 Cu 或聚酰亚胺 (Polyimide, PI), 其具体的物理参数如表 1 所示。

表 1 正负超磁致伸缩薄膜靶材成份和基片物理性能参数

Tab.1 Target composition of double-layer GMF and physical property parameters of substrate

	密度/kg · m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比
TbDyFe	9 250	50	0
SmFe	7 870	140	0
PI	1 420	4	0.12
Cu	8 900	105	0.343

以 PI 基薄膜为研究对象,将三层材料的泊松比系数代入式(6),得:

$$\Delta = \frac{-3.18L^2\lambda}{t_s} \left(\frac{E_p t_p}{E_s t_s} + \frac{E_n t_n}{E_s t_s} \right), \quad (14)$$

对上式进行参数约化处理,得:

$$y = \frac{\Delta}{L^2\lambda} = \frac{-3.18}{t_s} \left(\frac{E_p t_p}{E_s t_s} + \frac{E_n t_n}{E_s t_s} \right). \quad (15)$$

利用上式研究超磁致伸缩薄膜厚度与其变形能力之间的关系。对镀膜总厚度一定的 PI 超磁致伸缩薄膜进行仿真,将三层材料的杨氏模量代入式(15),计算结果如图 3 所示。结果表明,镀膜总厚度一定时,当 TbDyFe 厚度与 SmFe 厚度比值约为 2.3 时,超磁致伸缩薄膜具有最佳的变形能力。

对镀膜总厚度一定的铜基薄膜进行仿真,将三层材料的杨氏模量代入式(15),计算结果如图 4 所示。结果表明,与 PI 胺基薄膜相同,镀膜总厚度一定时, TbDyFe 厚度与 SmFe 厚度比值约为 2.3 时,超磁致伸缩薄膜具有最佳的变形能力。从图中可以看出,PI 基薄膜的变形能力要比铜基薄膜的变形能力强。

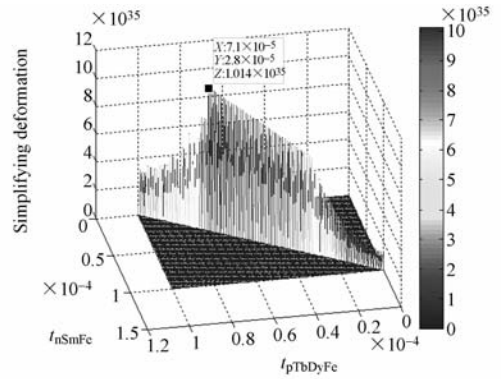


图 3 不同镀层厚度聚酰亚胺基薄膜的变形能力
Fig. 3 Deformation of GMF with different coating thicknesses based polyimide substrate

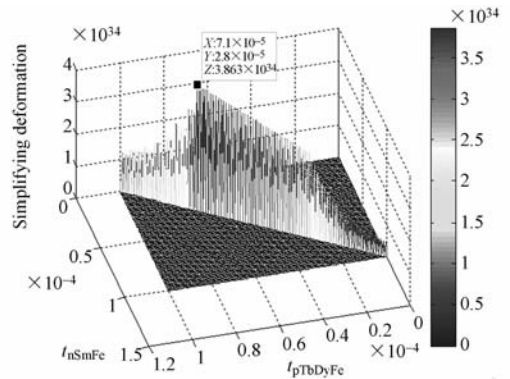


图 4 不同镀层厚度时的铜基片薄膜的变形能力
Fig. 4 Deformation of GMF with different coating thicknesses based copper substrate

5 结 论

本文在对复合 GMF 的变形特性进行分析的基础上对其进行了合理的简化,以单层超磁致伸缩薄膜的磁致伸缩系数表达式为基础,通过数学推导得出了复合 GMF 的磁致伸缩系数表达式。以正负复合 GMF 为研究对象,讨论了镀膜厚度对悬臂梁自由端挠度的影响。结果表明:在镀膜厚度和一定时,正磁致伸缩材料层与负磁致伸缩材料层厚度比为 2.3 时,不论是 Cu 基薄膜还是 PI 基薄膜,其变形能力均达到最大值。

参考文献:

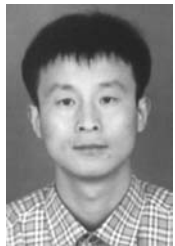
[1] 李欣欣,王文,陈戩恒,等. 超磁致伸缩致动器的广义最小方差-模糊 PID 控制方法[J]. 光学精密工

程,2008,16(4):642-650.

LI X X, WANG W, CHEN J H, et al.. Generalized minimum variance-fuzzy PID control method for giant magnetostrictive actuator [J]. Opt. Precision

- Eng., 2008, 16(4):642-650. (in Chinese)
- [2] 贾振元, 王晓煜, 王福吉. 超磁致伸缩微位移执行器的矢量阻抗分析模型[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5):870-877.
JIA ZH Y, WANG X Y, WANG F J. Vector impedance analysis model for giant magnetostrictive micro-displacement actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5):870-877. (in Chinese)
- [3] 赵章荣, 邬义杰, 顾新建, 等. 用神经网络结构实现超磁致伸缩智能构件滑模控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4):778-786.
ZHAO ZH R, WU Y J, GU X J, et al.. Implementation of sliding mode control of giant magnetostrictive smart component by neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):778-786. (in Chinese)
- [4] DEAN J, GIBBS M R J, Schrefl T. Finite-element analysis on cantilever beams coated with magnetostrictive material[C]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(2):283-288.
- [5] KAVIRAJ B, GHATAK S K. Simulation of stress-impedance effects in low magnetostrictive films[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007 (353): 1515-1520.
- [6] LEE S H, CHONGDU C. Investigation on the magnetomechanical behavior of trilayered GM actuator[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008(201): 678-682.
- [7] ISHIYAMA K, YOKOTA C. Cantilevered actuator using magnetostrictive thin film [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008 (320): 2481-2484.
- [8] TIERCELIN N, PREOBRAZHENSKY V, MORTET V. Thin film magnetolectric composites near spin reorientation transition[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 321(11): 1803-1807.
- [9] 王福吉. 正负超磁致伸缩复合薄膜静动态特性及控制关键技术[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
WANG F J. *The Static and Dynamic Characteristics and Key Control Techniques of the Positive/Negative Giant Magnetostrictive Composite Thin Films* [D]. Dalian; Dalian University of technology, 2005. (in Chinese)
- [10] 那日苏, 云国宏, 荣建红. 磁致伸缩薄膜-基底悬臂梁微致动器的设计与优化[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(7):914-922.
NA R S, YUN G H, RONG J H. Design and optimization of microactuator with magnetostrictive thin film cantilever [J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2007, 37(7): 914-922. (in Chinese)
- [11] E. du Trémolet de Lacheisserie. *Magnetostriction: Theory and Applications of Magneto-elasticity*[M]. Boca Raton; CRC Press, 1993.
- [12] VICTOR H G, ROBERT C W. Strain and stress calculation in bulk magnetostrictive materials and thin films[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004(271):190-206.

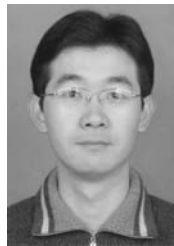
作者简介:



王福吉(1970—),男,辽宁大连人,博士,副教授,2001年于江西理工大学获得硕士学位,2005年于大连理工大学获得博士学位,主要从事精密测量、功能材料器件、精密加工与特种加工等方面的研究。E-mail: wfjsll@dlut.edu.cn



贾振元(1963—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,博士生导师,1987年、1990年于大连理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事精密加工与特种加工、精密测量与控制等方面的研究。E-mail: jzyxy@dlut.edu.cn



刘 巍(1978—),男,内蒙赤峰人,博士,副教授,2007年于大连理工大学获得博士学位,主要从事光学测量、六维力测量及加工过程控制等方面研究。
E-mail:lw_2007@dlut.edu.cn



赵显嵩(1987—),男,大连瓦房店人,硕士研究生,2009年于大连理工大学获得学士学位,主要从事精密加工、功能材料器件方面的研究。E-mail:xian-song61111@126.com

●下期预告

空气自呼吸式微型直接甲醇燃料电池

王路文¹,张宇峰^{1,2},何 洪¹,赵悠然¹,刘晓为^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心,黑龙江 哈尔滨 150001

2. 微系统与微结构制造教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

本文以丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)共聚物材料作为流场基体,以不锈钢薄片作为集流板,设计制作了一种新型空气自呼吸式的微型直接甲醇燃料电池。采用线切割、激光切割等微加工技术制作集流板;并在集流板表面溅射金作防电蚀处理并降低接触电阻。通过对电池阳极传质的建模仿真以及性能测试,均发现该阳极结构与传统微型 DMFC 的阳极结构相比有效地提高了甲醇传质阻力,减小了甲醇渗透,更适用于高浓度的甲醇燃料的应用。稳定性测试显示该微型 DMFC 在较高浓度(7 mol/L)、很小流速(0.1 mL/min)的条件下可以稳定工作。这对于便携式电源高能量密度的需求有较高的应用价值。该电池还具有轻质、可批量化生产等优点,对于便携式电源应用具有较高的参考价值。