*

材料、机械工程》

文章编号:1000-8608(2011)03-0346-05

超 磁 致 伸 缩 薄 膜 悬 臂 梁 静 力 学 分 析

王福吉*, 刘 巍。 贾振元,刘慧芳,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:静力学特性是超磁致伸缩薄膜(giant magnetostrictive thin film,GMF)的重要特性,对 其进行准确的分析是应用 GMF 的基础.结合材料力学的相关理论,求解了不同尺寸、不同基 底材料 GMF 双层悬臂梁的中性轴和等效惯性矩;将双层 GMF 悬臂梁的磁致伸缩作用等效 为分布弯矩作用,建立了静态磁致伸缩过程中薄膜悬臂梁的挠曲线方程,采用悬臂梁式 GMF 进行变形特性的实验研究,证实了挠曲线方程的正确性,同时表明磁致伸缩过程中薄膜的磁 学量与力学量呈一定的线性关系,为动态磁致伸缩效应的进一步分析研究奠定了理论基础.

关键词:超磁致伸缩薄膜;悬臂梁;挠曲线方程;静力学特性 文献标志码:A **中图分类号**.TB34

引 言 0

超磁致伸缩薄膜(GMF)是一种新型的功能 材料,具有能量密度高、响应速度快和可实现无缆 驱动等优点,在 MEMS 系统微执行器、传感器以 及其他功能元件中有着很好的应用前景. 国内外 科学家针对 GMF 进行了大量的研究工作,在其 变形机理、有限元仿真和微执行器、传感器设计上 取得了很多成果[1~6].

然而,目前仍然缺乏针对 GMF 的静力学特 性和动力学特性的分析研究,而对 GMF 的静、动 力学特性的准确分析是 GMF 微器件精确控制的 基础,所以,薄膜的静、动力学特性研究对其进一 步的应用研究有着非常重要的意义.

因此,本文选取福州大学采用磁控溅射方法 制备的正负复合 GMF 悬臂梁作为研究对象,通 过对其变形进行合理的简化建立简单实用的理论 模型,继而对以铜、聚酰亚胺为基片的两种 GMF 悬臂梁进行静力学特性实验研究,以期为进一步 研制开发 GMF 微型器件,推广 GMF 微型器件在 工程中的应用奠定基础.

薄膜悬臂梁静力学分析 1

1.1 弹性刚度的求解

如图 1 所示,本文研究的 GMF 悬臂梁为双 层悬臂梁,即在基片上下表面均溅射磁致伸缩材 料.其中,基片上表面溅射正磁致伸缩材料 (Tb_{0.27}Dy_{0.73})₄₃Fe₅₇,下表面溅射负磁致伸缩材料 Sm₁。Fe₂.这种正负复合薄膜悬臂梁较单层 GMF 悬臂梁具有更大的磁致伸缩力,可使悬臂梁结构 产生更大的弯曲变形.GMF 悬臂梁由不导磁的塑 料夹具固定在驱动磁场中,当施加沿薄膜悬臂梁 长度方向的激励磁场时,正磁致伸缩材料因磁致 伸缩效应沿磁化方向伸长,负磁致伸缩材料则缩 短.这样,正负磁致伸缩材料层对基片形成了弯矩 进而使其发生弯曲变形.



收稿日期: 2009-03-23; 修回日期: 2011-01-28. 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50275021,50605005).

作者简介: 王福吉*(1974-),男,博士,副教授, E-mail: wfjsll@dlut. edu. cn.

磁致伸缩的本质是磁能和机械能之间的转换 过程,弹性刚度是衡量材料机械能量转换能力的关 键参数.项目研究的薄膜悬臂梁是由正负磁致伸缩 材料溅射到基片上制备成的,3种材料各自的弹性 常数都不同,因此在进行薄膜悬臂梁的静力学分析 前,必须对其有效弹性刚度进行分析计算.

将项目研究的正负复合 GMF 悬臂梁视为由 正、负磁致伸缩单层膜和基片组成的复合梁. 假设 这 3 种材料的最大应力均不超过其比例极限,采用 当量宽度法求解其中性轴位置和等效抗弯刚度^[7]. 这里以聚酰亚胺基片正负复合 GMF 悬臂梁为例 说明当量截面法的求解过程,其结构如图 2(a)所 示,选用聚酰亚胺基片的弹性模量为当量模量,则 正、负磁致伸缩薄膜的当量宽度分别为 b_{Tb} 、 b_{Sm} ,如 图 2(b) 所示. 根据应变与应力关系,可以得到 GMF 中性轴位置 y 和等效惯性矩 \bar{I} 的计算式:



图 2 薄膜的当量宽度示意图

Fig. 2 Sketch of equivalent film width

$$y = [b_{\rm Tb}h_{\rm Tb}(h_{\rm Sm} + h_{\rm s} + h_{\rm Tb}/2) + b_{\rm s}h_{\rm s}(h_{\rm s}/2) + b_{\rm Sm}h_{\rm Sm}(h_{\rm Sm}/2)]/ (b_{\rm Tb}h_{\rm Tb} + b_{\rm s}h_{\rm s} + b_{\rm Sm}h_{\rm Sm})$$
(1)

$$\bar{I} = \frac{b_{\rm Tb}h_{\rm Tb}^3}{12} + b_{\rm Tb}h_{\rm Tb}\left(\frac{h_{\rm Tb}}{2} + h_{\rm s} + h_{\rm Sm} - \bar{y}\right)^2 + \frac{b_{\rm s}h_{\rm s}^3}{12} + b_{\rm s}h_{\rm s}\left(\frac{h_{\rm s}}{2} + h_{\rm Sm} - \bar{y}\right)^2 + \frac{b_{\rm Sm}h_{\rm Sm}^3}{12} + b_{\rm Sm}h_{\rm Sm}\left(\frac{h_{\rm Sm}}{2} - \bar{y}\right)^2$$
(2)

其中 h_{Tb}、h_{Sm}、h_s分别为正、负磁致伸缩薄膜和基 片的当量厚度; b_s为基片宽度,其值等于 b. 由式(1)可知,正负复合 GMF 悬臂梁中性轴 的位置与薄膜的宽度无关,分别将项目研究的聚 酰亚胺基片、铜基片复合 GMF 材料的相关参数 (见表 1)代入式(1),得到以下结果:

①不同宽度的聚酰亚胺基片 GMF 悬臂梁实 验样品的中性轴位置均为 $y_{Pl} \approx 20 \ \mu m$;

②不同宽度的铜基片 GMF 悬臂梁实验样品的中性轴位置均为 $y_{Cu} \approx 23 \ \mu m$.

- 表 1 正、负 GMF 靶材成分和基片的物理性 能参数
- Tab. 1 Physical parameters of positive and negative magnetostrictive GMF substrate and target material

| 材料种类 | 密度/ (kg・m ⁻³) | 弹性模量/ GPa | 厚度/ µm | 泊松比 |
|------------------------------------|------------------------------|--------------|-----------|-------|
| $(Tb_{0.27}Dy_{0.73})_{43}Fe_{57}$ | 9.25×10 ³ | 50 | 1 | 0 |
| 聚酰亚胺基片 | 1.30×10^{3} | 4 | 50 | 0.120 |
| 铜基片 | 8.90×10 ³ | 120 | 50 | 0.343 |
| $Sm_{1.9}Fe_2$ | 7.87 $\times 10^{3}$ | 140 | 1 | 0 |

在此基础上,将聚酰亚胺基片、铜基片 GMF 悬臂梁实验样品尺寸参数(见表 2)代入式(2),结 合式(1)的计算结果得到了各种尺寸实验样品的 等效惯性矩和等效抗弯刚度,如表 2 所示.

- 表 2 各种实验样品的尺寸参数及等效惯 性矩、等效刚度的计算结果
- Tab. 2 Calculation results of experiment sample sizes, equivalent inertia moment and equivalent stiffness

| 基片种类 | 宽度/ mm | 长度/ mm | 质量/ mg | 等效惯性矩/ (10 ⁶ µm ⁴) | , 等效抗 弯刚度/ (10 ⁻⁶ Pa・m ⁴) |
|------|-----------|-----------|-----------|--|--|
| 聚酰亚 | 3 | 42 | 13 | 113.8 | 0.46 |
| 胺基片 | 8 | 45 | 36 | 303.4 | 1.21 |
| 铜基片 | 3 | 39 | 39 | 60.48 | 0.73 |
| | 8 | 39 | 104 | 161.3 | 1.94 |

1.2 挠曲线方程的求解

磁致伸缩过程是一个非常复杂的过程,磁学 量与力学量的耦合系数是一个二阶分量,这使得 GMF磁-机械耦合过程的力学分析异常复杂^[8]. 本文采用直接考虑终端变形结果而忽略中间磁致 伸缩过程的方法,来研究 GMF 磁致伸缩过程中 力学参数的变化规律,以得出超磁致伸缩复合薄 膜磁致伸缩效应作用的机理.

正负复合 GMF 悬臂梁的结构如图 1 所示, 取其中长度为 dx 的微分单元结构进行磁致过程 中的受力分析^[9]. 假设磁致伸缩过程中,正、负磁 致伸缩薄膜产生的磁致伸缩力是绝对均匀分布 的,这时微分单元结构的受力情况如图 3 所示. 正磁致伸缩效应薄膜在微分单元两侧产生的拉应 力分别为 $f_{\text{Tb}}(x)$ 和 $f_{\text{Tb}}(x + \Delta x)$,负磁致伸缩效 应薄膜在微分单元两侧产生的压应力分别为 $f_{\text{Sm}}(x)$ 和 $f_{\text{Sm}}(x + \Delta x)$.



图 3 薄膜上微分单元的受力 Fig. 3 Stress of differential element on film

为了分析方便,本文引入集中力来代替正、负 磁致伸缩薄膜产生的均布力.由于正、负磁致伸缩 薄膜的弹性模量及产生力的大小不同,超磁致伸 缩复合薄膜中性轴的位置已不在薄膜中心轴线 上,其结果已在前面的计算中得出.进一步简化微 分单元结构上的受力情况,近似地将微分单元的 受力等效为作用在单元中性轴的一个弯矩,进而 可以得到微分单元所在悬臂梁截面应力分布情 况,如图 4 所示.根据以上的分析结果,可以近似 地将悬臂梁式 GMF 产生的磁致伸缩力简化为薄 膜中性轴均布弯矩 q 的作用.



图 4 悬臂梁薄膜单元结构受力分析

Fig. 4 Structural stress analysis of GMF cantilever beam finite element

对于均布弯矩 q 作用的等截面 GMF 悬臂梁, 根据材料力学的相关知识可导出其挠曲线微分方 程的一般形式[10]:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = M(x) \tag{3}$$

$$M(x) = \int_{l}^{0} q(x) \mathrm{d}x \tag{4}$$

其中 $\omega(x)$ 是挠曲线方程;M(x)是悬臂梁的弯矩方程.

分析 GMF 悬臂梁的受力变形情况,可得到 其边界条件为

$$(\boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{x}))_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}} = \boldsymbol{0} \tag{5}$$

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial \boldsymbol{x}}\right)_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}} = \boldsymbol{0} \tag{6}$$

求解上述微分方程,可以得出 GMF 悬臂梁的挠曲线方程为

$$\omega(x) = \frac{q(x)}{6EI}(x^3 - 3lx^2)$$
(7)

为了验证上述理论推导,本文首先从微观角度 对项目研制的 GMF 悬臂梁特性进行简要分析.利 用吉林大学研制的 Jdm-13 型振动磁强计进行测 量,得到了项目研制的铜基片、聚酰亚胺基片的正 负复合 GMF 平行易磁化轴方向的磁化曲线,如图 5 所示(σ为单位质量磁矩,*H*_{ext}为磁场强度).



图 5 铜基片和聚酰亚胺基片 GMF 的初始 磁化曲线

Fig. 5 Initial magnetization curves of Cu substrate thin film and polyimide substrate thin film 由图 5 可以看出,聚酰亚胺基片 GMF 的磁 致伸缩能力较强,其等效抗弯刚度较小,与前面求 得的结果是相同的.此外,从图上可以看出,这两 种 GMF 的初始磁化曲线呈现出了一定的线性关 系.

2 薄膜悬臂梁的静力学实验

为了进一步验证前面理论结果的正确性,项 目设计了相应的实验对 3 种不同结构尺寸的复合 薄膜悬臂梁的变形情况进行研究.实验系统结构 如图 6 所示,主要包括日本产高性能稳压电源 Bp4610、亥姆霍兹驱动线圈、美国产 MicrotrakII 激光测微仪、悬臂梁夹头、美国产 7030 高斯计、示 波器以及工作电脑等.其中亥姆霍兹驱动线圈为 自制设备,主要参数有:内孔半径 18 mm,外孔半 径 59.5 mm,单线圈宽度 100 mm,线圈间距 40 mm,单线圈匝数 1 665,组合线圈电阻 9.8 Ω.



实验对悬臂梁在同一磁化状态下不同位置的 偏移量进行了测量,并通过曲线拟合得出了悬臂梁 的挠曲线.在线圈驱动电压为 30 V,磁感应强度为 27.4 mT时,分别得到聚酰亚胺基片、铜基片 GMF 悬臂梁的挠度实验曲线与拟合曲线.其中,图 7(a) 是长度 38 mm、宽度 3 mm 的聚酰亚胺基片 GMF 悬臂梁磁致伸缩挠度的实验曲线与拟合曲线. 图 7(b)是长度 30 mm、宽度 3 mm 的铜基片 GMF 悬臂梁磁致伸缩挠度的实验曲线与拟合曲线.在驱 动电压 30 V、驱动磁场 192 mT时,得到长度 30 mm、宽度 3 mm 的铜基片 GMF 悬臂梁磁致伸缩 挠度的实验曲线与拟合曲线,如图 7(c)所示.

从图 7 中拟合曲线方程的形式可以看出,3 种情况下 GMF 悬臂梁磁致伸缩挠度方程的形式 均为 $\delta(x) = Ax^3 - Bx^2$ 的形式,其中A、B为与磁 致伸缩效应有关的常数. 拟合曲线形式与理论推导的超磁致伸缩复合薄膜悬臂梁挠度曲线方程式 (7)的形式是一致的,可以证明理论分析方法和结论是正确的. 在不考虑薄膜 ΔE 效应的前提下,根据悬臂梁超磁致伸缩复合薄膜结构挠度分析结果,可以认为薄膜的机械变形与薄膜产生的磁致 伸缩力呈线性关系,即磁致伸缩过程中薄膜的磁 学量与力学量呈一定的线性关系,研究的结果为 动态磁致伸缩效应的进一步分析研究奠定了理论 基础.





3 结 论

本文结合材料力学的相关理论,对 GMF 悬

臂梁进行了静力学特性分析.在求解不同材料双 层薄膜悬臂梁中性轴的基础上,建立了其在静态 磁场作用下的挠曲线方程;进一步对不同基底材 料和尺寸形状的悬臂梁进行了实验研究,结果表 明本文的理论分析是正确的,所以通过材料力学 的一般原理也可近似完成对 GMF 材料的理论分 析.此外,本文的研究也表明磁致伸缩过程中薄膜 的磁学量与力学量呈一定的线性关系,这一结论 为动态磁致伸缩效应的进一步分析研究奠定了理 论基础.

参考文献:

- [1] GUERRERO V H, WETHERHOLD R C. Strain and stress calculation in bulk magnetostrictive materials and thin films [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 271(2-3):190-206
- [2] DEAN J, GIBBS M R J, SCHREFL T. Finiteelement analysis on cantilever beams coated with magnetostrictive material [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(2):283-288
- [3] KAVIRAJ B, GHATAK S K. Simulation of stressimpedance effects in low magnetostrictive films [J].

Journal of Non-Crystalline Solids, 2007, 353(16-17): 1515-1520

- [4] LEE H S, CHO C. Study on advanced multilayered magnetostrictive thin film coating techniques for MEMS application [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3):678-682
- [5] ISHIYAMA K, YOKOTA C. Cantilevered actuator using magnetostrictive thin film [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(20): 2481-2484
- [6] TIERCELIN N, PREOBRAZHENSKY V, MORTET V. Thin film magnetoelectric composites near spin reorientation transition [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321(11): 1803-1807
- [7] ROARK R J, YONG W C. 应力应变公式[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1985
- [8] 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
- [9] 刘廷柱,陈文良,陈立群. 振动力学[M]. 北京:高等 教育出版社,1998
- [10] 王守新. 材料力学[M]. 大连:大连理工大学出版 社,2004

Statics analysis of cantilever beam coated with giant magnetostrictive thin film

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

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Statics characteristic is one of the most important application-related properties of the giant magnetostrictive thin films (GMF), and the accurate analysis about it is the base of the application of GMF. Neutral axes and equivalent inertia moments of bi-layer cantilever beams coated with GMF of different sizes and substrates are obtained according to the relative theory of material mechanics. The equation of deflection curve in static magnetostrictive process is also developed by assuming that the magnetostriction effect of bi-layer cantilever beam coated with GMF is equivalent to the effect of a uniformly distributed bending moment. Experimental results of deformation characteristics reveal that the equation of deflection curve developed is valid. In addition, approximately linear relationship between mechanical quantities and magnetic quantities of GMF cantilever beam in static magnetostrictive process is observed which lays a theoretical foundation for further analysis of dynamic magnetostrictive effect.

Key words: giant magnetostrictive thin film; cantilever beam; equation of deflection curve; statics characteristic