

# TbDyFe 磁致伸缩薄膜悬臂梁弯曲性能的研究

Study on the Bending Property of TbDyFe  
Magnetostrictive Cantilever

万红, 斯永敏

(国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410073)

WAN Hong, SI Yong-min (Academy of Aerospace and Material Engineering,  
National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

**摘要:** 以 TbDyFe 磁致伸缩薄膜悬臂梁为研究对象, 采用有限元分析方法 (FEM) 对薄膜厚度及薄膜与衬底材料的弹性模量比对悬臂梁最大挠度值的影响规律进行了研究。通过 FEM 计算发现: 当薄膜厚度小于衬底厚度的十分之一时, 最大挠度值随薄膜厚度线性增加, 计算结果与文献的理论计算结果吻合很好; 当薄膜厚度为衬底厚度的一半时, 悬臂梁的自由端挠度值达到最大。磁性薄膜与衬底材料有效弹性模量比值的增加可以显著地提高悬臂梁的挠度值, 同时挠度最大值向薄膜/衬底厚度比减少的方向移动。

**关键词:** 磁致伸缩薄膜; 悬臂梁; 有限元计算; 挠度

**中图分类号:** TM27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2004) 07-0032-03

**Abstract:** The bending property of TbDyFe magnetostrictive film cantilever was studied by finite-element modeling (FEM). The calculated results show that the deflection is direct proportion to the film thickness when the film thickness is less than one tenth of that of the substrate, which is totally comparable to the results proposed by other researchers, and the deflection reaches to the maximum value when the film thickness is half of the substrate. The modeling also reveals that the increase of the elastic modulus ratio between the film and the substrate can improve the deflection value of the cantilever obviously.

**Key words:** magnetostrictive film; cantilever; finite element modeling; deflection

超磁致伸缩材料由于具有非常强的磁致伸缩效应、很高的机电耦合系数、较高的响应速度及非接触式驱动等优点而倍受关注, 其典型代表 Terfenol-D 合金, 正被广泛地应用于航海声纳、大功率超声、精密机械以及智能材料/结构等领域。超磁致伸缩材料的薄膜化使其在微型化器件上的应用成为可能<sup>[1,2]</sup>。将超磁致伸缩材料沉积于衬底材料上即得到薄膜化磁致伸缩双层膜片, 在外加磁场作用下, 由于薄膜的磁致伸缩效应而导致膜片产生弯曲, 利用这一现象可以将磁致伸缩膜片用于微传感器和微驱动器领域。近年来, 有许多研究者对 Tb-Fe、Dy-Fe、Sm-Fe、Tb-Dy-Fe (Terfenol-D) 等超磁致伸缩薄膜的制备、磁致伸缩性能及应用进行了一些研究, 取得了较大的进展, 并开展了超磁致伸缩薄膜微位移控制器、微流量器、微磁场强度计等器件的研制工作<sup>[3-5]</sup>。

在磁致伸缩薄膜的性能表征及元器件设计中, 膜片往往采用一端紧固, 一端自由的悬臂梁夹持方式。将磁致伸缩薄膜悬臂梁作为传感器元件, 需要有高的灵敏度, 即自由端挠度随外场的变化尽可能地大; 将

磁致伸缩薄膜悬臂梁作为驱动器元件, 需要自由端在外场变化时, 能提供足够大的力。悬臂梁自由端的挠度值和驱动力的大小除与磁致伸缩薄膜的磁致伸缩系数和弹性模量有关外, 还与薄膜/衬底厚度比、薄膜的几何尺寸、衬底的弹性模量等性能有关。因此, 分析悬臂梁的弯曲性能的变化规律是磁致伸缩微传感器的设计基础。最早 Klokholm<sup>[6]</sup> 基于薄膜各向同性磁致膨胀的假设, 通过分析膜片中的弹性能及磁弹性能的大小, 采用能量最小原理推导出自由端中心挠度与磁致伸缩系数关系的解析表达式。考虑到外磁场的方向性导致磁致伸缩效应的各向异性, 此后, 一些作者<sup>[7,9]</sup> 基于各向异性的磁致膨胀假设, 对 Klokholm 的结论进行修正。在这些修正结果中, 悬臂梁沿膜片宽度方向是否发生弯曲的假设不同, 所得出的磁致伸缩系数的数值解析表达式有所不同。而公式推导过程中均假设薄膜的厚度远小于衬底厚度, 且薄膜的长宽比较大, 使用起来有较大的局限性。

本工作以磁控溅射法制备的 TbDyFe 薄膜为研究对象, 采用 ANSYS 有限元分析软件分析了薄膜厚

度、弹性模量等参数对 TbDyFe 悬臂梁挠度值的影响, 并与数值计算公式结果进行了对比。

## 1 研究方法

### 1.1 磁致伸缩薄膜悬臂梁的尺寸与性能

磁致伸缩悬臂梁的结构与尺寸如图 1 所示, 假设薄膜的磁致伸缩系数大于零, 则在外磁场作用下, 悬臂梁向下弯曲, 在自由端处的挠度值最大。

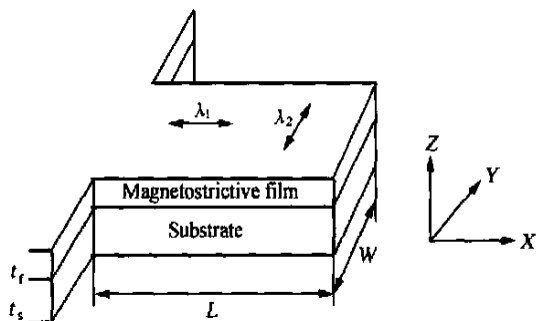


图 1 磁致伸缩悬臂梁的结构

Fig. 1 Structure of magnetostrictive cantilever

以磁控溅射制备的 TbDyFe 超磁致伸缩薄膜为研究对象, 衬底材料为 Si (111) 单晶片, 采用电容-位移法所测定的薄膜磁致伸缩性能<sup>[10]</sup>。

### 1.2 FEM 分析方法

有限元计算软件包 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, 为此, 利用 ANSYS 软件的热结构分析功能, 认为磁性薄膜的磁致伸缩效应类似于薄膜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, 薄膜在温度场 \$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; 当薄膜在平行于 \$X\$ 轴方向磁场 \$H\$ 作用下, 磁性薄膜所产生的应变量为 \$(\beta \times H, -\beta \times H/2, -\beta \times H/2)\$, 其中, \$\beta = dN/dH\$, 称为磁性薄膜的压磁系数。在平行于 \$Y\$ 轴方向磁场 \$H\$ 作用下, 磁性薄膜所产生的应变量为 \$(-dN/dH \times H/2, dN/dH \times H, -dN/dH \times H/2)\$。根据悬臂梁的弯曲约束条件, 采用 shell99 二维壳层单元模型分析膜片沿长度和宽度方向均可产生弯曲且 \$\sigma\_z = 0\$ 时的挠度值大小, 采用 solid191 三维固体单元分析膜片只可沿长度方向产生弯曲且薄膜与衬底材料之间的剪切应力为零时的挠度值大小, 计算结果分别与理论计算公式值进行对比; 在两种单元模型下, 考虑了薄膜厚度和长宽比的影响规律; 考虑了薄膜和衬底材料的有效弹性常数的影响规律。

## 2 计算结果与讨论

### 2.1 磁致伸缩悬臂梁自由端挠度的数学计算公式

根据弹性力学原理, 许多学者对磁致伸缩薄膜悬臂梁的磁致伸缩系数与弯曲挠度之间的关系进行了研究, 在假设衬底厚度 (\$t\_s\$) \$\gg\$ 薄膜厚度 (\$t\_f\$), 薄膜长度 (\$L\$) \$\gg\$ 薄膜宽度 (\$W\$), 悬臂梁沿 \$Z\$ 轴的应力为零的条件下, 得到以下磁致伸缩悬臂梁的饱和磁致伸缩系数 \$\lambda\$ 与自由端挠度 \$\Delta\$ 的关系表达式:

(1) 假设磁致伸缩薄膜的磁致伸缩效应为各向同性, 即外磁场作用下, 沿 \$X\$ 和 \$Y\$ 轴方向的磁致伸缩效应相同 (\$\lambda\_1 = \lambda\_2\$), 且薄膜沿长度方向和宽度方向均能产生自由弯曲, 则有<sup>[6]</sup>:

$$\Delta = \frac{9 L^2 t_f \lambda E_f / (1 + \nu)}{2 t_s^2 E_s / (1 - \nu)} \quad (1)$$

(2) 假设磁致伸缩薄膜的磁致伸缩效应为各向异性, 即在平行于 \$X\$ 轴方向的外磁场作用下, 沿 \$X\$ 和 \$Y\$ 轴方向的磁致伸缩效应不相同 (\$\lambda\_y = -1/2\lambda\_x\$) 薄膜沿长度方向和宽度方向均能产生自由弯曲, 则有<sup>[7]</sup>:

$$\Delta = \frac{9 L^2 t_f \lambda E_f / (1 + \nu)}{2 t_s^2 E_s / (1 - \nu)} = \frac{9 L^2 t_f \lambda E_f^*}{2 t_s^2 E_s^*} \quad (2)$$

其中: \$E\_f, E\_s, \nu, \nu\$ 分别代表薄膜和衬底的弹性模量和泊松比。

且令: \$E\_f^\* = E\_f / (1 + \nu)\$, \$E\_s^\* = E\_s / (1 + \nu)\$, \$E\_f^\*, E\_s^\*\$ 分别为薄膜和衬底材料的有效弹性模量。

(3) 假设磁致伸缩薄膜的磁致伸缩效应为各向异性, 悬臂梁沿长度方向上自由弯曲, 而宽度方向保持平直, 则有<sup>[8]</sup>:

$$\Delta = 9 \times \frac{L^2 t_f \lambda E_f / (1 + \nu)}{t_s^2 E_s / (1 - \nu)} \quad (3)$$

值得注意的是, 上面公式中所用的磁致伸缩系数 \$\lambda\$ 为外磁场分别平行于 \$X\$ 轴和垂直于 \$X\$ 轴方向下, 沿 \$X\$ 方向的磁致伸缩系数差, 即:

$$\lambda = \lambda_{||} - \lambda_{\perp} \quad (4)$$

若只考虑外磁场平行于 \$X\$ 轴方向的情况时, 悬臂梁自由端的挠度值 \$\Delta\$ 为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta = \frac{2}{3} \Delta \quad (5)$$

采用数学解析的方法, 难以推导出任意尺寸条件下的磁致伸缩悬臂梁的挠度值的数学表达式。可以看出, 上述公式不适用于较厚磁致伸缩薄膜的情况, 但可以作为判断有限元分析计算方法准确性的依据。

### 2.2 FEM 计算值与公式计算结果的对比

外磁场作用下, 磁性薄膜的磁致伸缩效应为各向异性。对 TbDyFe 薄膜而言, 平行于薄膜长度的外磁场将使薄膜长度增加, 而厚度和宽度减小。因此根据实验结果所得出的 TbDyFe 膜片的压磁系数值, 分别

采用数值计算公式和有限元方法对薄膜悬臂梁的挠度值进行计算。取:  $E_t = 80 \text{ GPa}$ ,  $E_s = 130 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $\nu_s = 0.28$ ,  $t_s = 300 \mu\text{m}$ ,  $t_f = 5 \mu\text{m}$ ,  $L = 20 \text{ mm}$ , 压磁系数  $d\lambda/dH = 1.2 \times 10^{-6} / (\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$ , 外磁场大小为  $H = 200 \text{ kA/M}$ 。

当外磁场平行于薄膜长度方向时, 由公式(2)和(5), 可得长度和宽度方向均可以产生弯曲的薄膜悬臂梁的最大挠度值为:

$$\Delta = 3L^2 \lambda \frac{t_f E_t / (1 + \nu)}{t_s^2 E_s / (1 + \nu_s)} = 3 \times 20^2 \times 240 \times 10^{-6} \times \frac{0.005}{0.3^2} \times \frac{80 / (1 + 0.3)}{130 / (1 + 0.28)} = 9.68 (\mu\text{m}) \quad (6)$$

由公式(3)和(5), 可得只沿长度方向产生弯曲的薄膜悬臂梁的最大挠度值为:

$$\Delta = 6L^2 \lambda \frac{t_f E_t / (1 + \nu)}{t_s^2 E_s / (1 - \nu_s^2)} = 3 \times 20^2 \times 240 \times 10^{-6} \times \frac{0.005}{0.3^2} \times \frac{80 / (1 + 0.3)}{130 / (1 - 0.28^2)} = 13.96 (\mu\text{m}) \quad (7)$$

有限元计算中, 在同样的参数条件下, 采用 shell99 壳层单元结构, 计算得悬臂梁最大挠度为 9.5, 与(6)式的相对误差大小为 1.96%。采用 solid191 单元结构, 计算得悬臂梁最大挠度为 14.4, 与(7)式的误差大小为 3.05%。对比结果说明, 有限元计算值与公式计算结果吻合较好。

### 2.3 磁致伸缩薄膜厚度对悬臂梁最大挠度值的影响

在一定的衬底厚度 ( $300 \mu\text{m}$ ) 的条件下, 分别采用 shell99 和 solid191 单元模型计算了不同挠度薄膜厚度的悬臂梁最大挠度值, 结果如图2所示。可以看

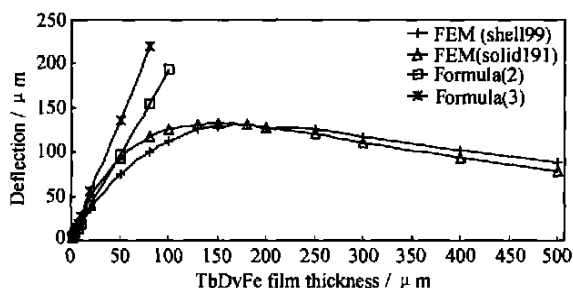


图2 薄膜厚度对自由端挠度的影响

Fig. 2 Variation of deflection with the thickness of TbDyFe film

出, 当薄膜厚度值较小时, 随着薄膜的厚度的增加, 自由端的挠度值增大, 且薄膜厚度低于衬底厚度的十分之一时(数值计算公式的假设之一), 挠度值与薄膜厚度成正比, 与公式计算值吻合较好; 存在一最佳厚度值, 使得薄膜的挠度值达到最大。shell99 和 solid191 两种单元模型计算出的挠度与薄膜厚度的关系曲线相似, 随着薄膜厚度的增加, 悬臂梁沿宽度方向的弯曲量减少, 两曲线的差值减少, 当薄膜厚度为  $200 \mu\text{m}$

时, 两种单元模型所计算的自由端挠度值相等。随着薄膜厚度的增加, 采用壳单元 shell99 进行计算将会增大计算误差, 体单元 solid191 单元更适合厚膜悬臂梁的分析计算, 从图3的曲线上可以知道, 当薄膜厚度为衬底厚度的一半时, 悬臂梁的自由端挠度值达到最大。

### 2.4 薄膜与衬底的厚度比及膜量比对悬臂梁最大挠度的影响

考虑薄膜有效弹性模量大于、等于和小于衬底有效弹性模量的情况下, 薄膜与衬底的厚度比对悬臂梁最大挠度的影响, 计算结果如图3所示。

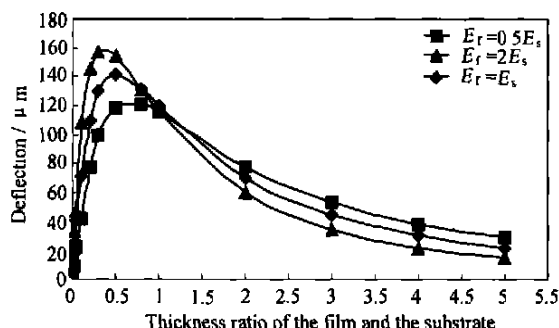


图3 薄膜与衬底厚度对自由端挠度的影响

Fig. 3 Variation of deflection with the thickness ratio of the film and the substrate

计算结果显示, 薄膜和衬底有效弹性模量比值增加, 自由端的最大挠度值增大, 且最大值的位置朝薄膜/衬底厚度比减少的方向移动。因此, 采用弹性模量低的衬底有利于提高自由端的最大挠度值, 有利于提高磁致伸缩薄膜传感器的灵敏度。

## 3 结论

(1) 在薄膜/衬底厚度比较小的情况下, 悬臂梁自由端挠度值随薄膜厚度的增加而线性增加, 理论计算公式与有限元计算公式吻合较好。

(2) 当薄膜厚度为衬底厚度的一半时, 薄膜悬臂梁自由端的挠度值最大。

(3) 薄膜与衬底材料的有效弹性模量值对悬臂梁的挠度值有很大的影响。采用高弹性模量磁性薄膜、低弹性模量衬底材料有利于提高膜片的传感灵敏度。

### 参考文献

- [1] 杨大智. 智能材料与智能系统 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 318.
- [2] A Ludwig and E Quandt. Giant Magnetostrictive Thin Film for Application in Micro-electromechanical Systems [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87 (9): 4691.
- [3] Y Hayashi, T Honda, K I Arai. Dependence of Magnetostriction

(下转第39页)

300000 步时,柱状晶已经长得很大,而在柱状晶与柱状晶之间溶质浓度仍然较其它部位溶质浓度高,由于溶质扩散只能在很小的范围内,因而在短时间内溶质不能扩散到很远的区域内,导致这部分区域平均溶质浓度能高达 10% 左右,而远离界面区域平均溶质溶度在 7% 左右。这就使得固液界面前沿溶质浓度梯度很大。如图 3 所示,在定向凝固过程中,在柱状晶之间将出现晶间显微偏析,而且由于这部分液体富集了大量的溶质,导致这部分液体凝固速度缓慢。

### 3 结论

应用连续性方法模拟了定向凝固过程中组织演变,通过模拟可以得出以下结论:

(1) 这种方法能够处理凝固过程中固液界面两侧不连续物理性质变化。

(2) 这种方法能够模拟凝固过程中组织演变过程,同时也能够模拟出凝固过程中产生的晶间偏析。

#### 参考文献

- [1] M Gaumann, R Trivedi and W Kurz. Nucleation ahead of the advancing interface in directional solidification [J] . Material Science and Engineering, 1997, A226- 228: 763- 769.
- [2] W J Boettinger, S R Coriell, A L Greer, et al. Solidification microstructures: recent developments, future direction [J] . Acta Mater, 2000, 48: 47- 70.
- [3] A Jacot and M Rappaz. A pseudo-front tracking technique for the modeling of solidification microstructures in multi-component alloys [J] . Acta Mater, 2002, 50: 1909- 1926.
- [4] L Nastac. Numerical modeling of solidification morphologies and segregation patterns in cast dendritic alloys [J] . Acta mater, 1999, 47: 4253- 4262.
- [5] Yung-Tae Kim, Nigel Goldenfeld and Jonathan Dant. Computation of dendritic microstructure using a level set method [J] . Physical Review E, 2000, 62: 2471- 2474.
- [6] E Brener . Pattern formation in three-dimensional

- dendritic growth [J] . Physical A, 1999, 263: 338- 344.
- [7] H S Udaykumar and L Mao. Sharp-interface simulation of dendritic solidification of solutions [J] . Int J Heat&Mass Transfer, 2002, 45: 4793- 4808.
- [8] Damir Juric and Gretar Tryggvason. A front tracking method for dendritic solidification [J] . Journal of Computational Physics, 1996, 123: 127- 148.
- [9] Christof Eck, peter Knabner and Segrey Korotov. A two-scale method for the computation of solid-liquid phase transitions with dendritic microstructure [J] . Journal of Computational Physics, 2002, 178: 58- 80.
- [10] M F Zhu J M Kim and C P Hong. Modeling of globular and dendritic structure evolution in solidification of an Al-7mass% Si alloy [J] . ISIJ Inter, 2001, 41: 992- 998.
- [11] M F Zhu and C P Hong. A three dimensional modified cellular automaton model for the prediction of solidification microstructure [J] . ISIJ Inter, 2002, 42: 520- 526.
- [12] Sang-Hyun Cho, Toshimitsu Okane and Takaeru Umeda. The contribution of the nucleation process to grain formation in calculating solidification microstructure by CADFD [J] . Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2: 241- 245.
- [13] Ditley U, Pavlik K. Numerical simulation dendritic solidification with modified cellular automata [A] . B G Thomas, C Beckermann. Modelling of casting, welding and advanced solidification processes VIII [C] . Warrendale: TMS, 1998. 589 - 596.
- [14] W kurz, B Giovanola and R Trivedi. Theory of microstructure development during rapid solidification [J] . Acta Mater, 1986, 34: 823- 830.
- [15] Britta Nestler, Adam A Echeleer and Harald Garcke. Modeling of microstructure formation and interface dynamics [J] . Computational Materials Science, 2003, 26: 111- 119.

收稿日期: 2003-10-28; 修订日期: 2004-04-15

作者简介: 李强 (1973- ), 男, 博士研究生, 从事凝固组织演变模拟, 联系地址: 沈阳市文化路 72 号, 中国科学院金属研究所 8 室 (110016)。

Material Structure, 2000, 9: 918.

- [8] P M Marcus. Magnetostriction Bending of a Film-substrate System [J] . Physic Review B, 1996, 53 (5): 2481.
- [9] CWRobert, DCHarsh. BeamModelforCalculating Magnetostriction Strains in Thin Film and Multilayers [J] . Applied Physics Letter, 2001, 79 (23): 3818.
- [10] 万红, 邱轶, 谢海涛, 斯永敏. 电容位移法精确测量磁性薄膜的磁致伸缩系数 [J] . 功能材料, 2002, 33 (3): 262.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59971064)。

收稿日期: 2003-11-24; 修订日期: 2004-04-20

作者简介: 万红 (1966- ), 女, 副教授, 主要从事金属基复合材料及磁性功能薄膜的研究工作, 发表论文三十余篇, 联系地址: 湖南长沙国防科技大学航天与材料工程学院 (410073)。

(上接第 34 页)

of Sputtered Tb-Fe Films on Preparation Conditions [J] . IEEE Transactions on Magnetism and Magnetism, 1993, 29 (6): 3129.

- [4] C Prados, I P Panagiotopoulos, G C Hadjipanayis. High Magnetostriction in Low Applied Magnetic Fields in Amorphous Tb-Fe (Hard) / Fe-B (Soft) Multilayers [J] . IEEE Transactions on Magnetism and Magnetism, 1997, 33 (5): 3712.
- [5] E Quandt. Multitarget Sputtering of High Magnetostrictive TbDyFe Films [J] . Journal of Applied Physics, 1994, 75 (10): 15.
- [6] EKloholm. The Measurement of Magnetostriction in Ferromagnetic Thin films [J] . IEEE Transactions on Magnetism and Magnetism, 1976, 12 (6): 819.
- [7] G A Gehring, M D Cooker, I S Gregory, et al. Cantilever Unified Theory and Optimization for Sensors and Actuators [J] . Smart