doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.052

考虑附加涡流损失的 Galfenol 合金动态滞后建模与实验

翁　玲　赵　青　孙　英　黄文美　王博文
(河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室，天津 300130)

摘要：在 Galfenol 合金能量平均静态滞后模型基础上，考虑铁磁材料在动态磁场作用下的涡流损耗和附加损耗，建立了 Galfenol 合金动态滞后磁化强度模型和应变模型。利用 Galfenol 合金磁特性测试系统进行了应变和磁场静态特性测试，测试结果与模型计算结果吻合较好。利用该测试系统测试了〈100〉取向多晶 $Fe_{83}Ga_{17}$ 合金在动态磁场频率分别为 1、10、20、40、60、100、200、300 Hz 作用下的应变和磁场的关系。实验结果和模型计算结果对比表明，在磁场频率为 200 Hz 以下时，模型能准确反映应变与磁场的关系，频率为 200 Hz 以上时，计算结果与实验结果出现偏差。该模型能用于 Galfenol 合金的器件设计与应用。

关键词：Fe－Ga 合金；涡流损失；附加损失；滞后；磁化强度
中图分类号：TM274　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2016)04-0399-07

Dynamic Hysteresis Model and Experiment of Galfenol Alloy Considering Excess Eddy Current Losses

Weng Ling　Zhao Qing　Sun Ying　Huang Wenmei　Wang Bowen
(*Key Laboratory of Electro-magnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province*, *Hebei University of Technology*, *Tianjin* 300130, *China*)

Abstract: Iron-gallium (Galfenol) alloys are new classes of magnetostrictive material which have moderate strain under very low magnetic field intensity, low hysteresis, and high tensile strength. These unique mechanical properties and superior magnetic attributes motivate the use of Galfenol in various actuation and sensing applications. Galfenol systems are usually operated in dynamic magnetic field environment, in which the influence of dynamic loss cannot be neglected. When Galfenol is applied to dynamic magnetic field, the power losses are separated into hysteresis loss, classical eddy current loss and anomalous (or excess) loss. Based on static energy-averaged hysteresis model of Galfenol, the dynamic hysteresis strain and magnetization model considering eddy current losses and excess losses of ferromagnetic material under dynamic magnetic field was proposed. Static strain and magnetic field were measured using testing system of Galfenol magnetic properties. The results showed that the calculation results were in good agreements with experimental results. Relationships between strain and dynamic magnetic field under different frequencies of 〈100〉 oriented polycrystalline $Fe_{83}Ga_{17}$ were measured. The frequencies were 1 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz, 60 Hz, 100 Hz, 200 Hz and 300 Hz. The results of experiments and calculation agreed well when frequencies were below 200 Hz, and when frequencies were higher than 200 Hz, the results of experiments and calculation had deviations. The model can be used in dynamic application of Galfenol alloy under low frequency such as actuators and vibrators.

Key words: Galfenol; eddy current loss; excess loss; hysteresis; magnetization

收稿日期：2015－09－22　修回日期：2015－10－17
基金项目：国家自然科学基金项目(51201055)、河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2015085)、天津市高等学校科技发展基金计划项目(20140421)、河北省引进留学人员项目(CG2013003001)、教育部留学回国人员科研启动基金项目和河北省高等学校创新团队领军人才培育计划项目(LJRC003)
作者简介：翁玲(1978—)，女，副教授，博士，主要从事新型磁性材料建模和智能器件设计研究，E-mail：llweng@163.com

引言

Fe－Ga 合金(又称为 Galfenol)是继超磁致伸缩材料 Terfenol-D 之后由美国海军表面武器研究室研制的另一种新型超磁致伸缩材料[1-3],该材料在低磁场下能产生较高的应变(零预应力下 5 kA/m 外磁场可得到 2×10^{-4} 的应变)。Galfenol 合金还具有滞后小、应力灵敏度高等优点。Galfenol 合金比 Terfenol-D 抗拉强度高,易于加工,是致动器件、传感器件、振动发电机的基础材料[4-7]。

超磁致伸缩材料 Galfenol 在磁场和应力的作用下均会发生磁化强度的变化,建立能够描述其在磁场和应用作用下的磁化强度模型是 Galfenol 合金应用的一个关键,国内外学者进行了很多研究[8-15]。ATULASIMA 等[16]将 Armstrong 模型引入到 Galfenol 中,计算 98 个方向上的磁化强度,取平均值来模拟 Galfenol 在磁场和应力作用下的磁化强度,计算量大。EVANS 等[17-18]改进了 Atulasimha 模型,计算 6 个易磁化方向上的磁化强度,线性叠加后计算磁场和应力作用下 Galfenol 的磁化强度和应变。Evans 模型能够准确模拟 Galfenol 在静态磁场或者应力作用下的磁化强度和应变[19]。然而,当给 Galfenol 施加动态的磁场或者应力时,Evans 模型则不能描述。

本文在 Galfenol 局部自由能模型基础上,考虑铁磁材料 Galfenol 在动态磁场作用下的涡流损耗和附加损耗,建立 Galfenol 合金动态滞后模型,并进行不同频率磁场作用下 Galfenol 合金动态应变测试,比较模型计算结果和实验结果。

1 Galfenol 合金性能测试系统

图 1 为 Galfenol 合金性能测试系统示意图。整个系统由下回路模块、上回路模块、激励线圈、上极头、下极头、压力传感器、液压压片机、永磁体、被测 Galfenol 合金、固定用铝板、固定用螺栓等组成。动态测试时用永磁体产生偏置磁场,静态测试时去掉永磁体。Galfenol 合金棒外绕有感应线圈,用于测量磁感应强度。

利用图 1 的装置,配合其他设备,可以进行不同预应力下磁化强度和磁场、应变和磁场的静态测量。图 2 为 Galfenol 合金性能测试系统整体装置图。测量过程如下:取出永磁体,转动 769YP－24B 型液压压片机的手轮给 Galfenol 施加预应力,通过 JLBU－5T 型压力传感器读出预应力值。用直流电源给激励线圈通电流,Galfenol 合金中产生磁场,Galfenol 在磁场的作用下产生磁化强度和应变。将 A1321LUA 型霍尔芯片放置在 Galfenol 合金的中间位置,利用霍尔芯片测量磁场强度。Galfenol 棒上粘有应变片,通过 SDY2103 型应变仪测量应变。Galfenol 棒外绕有感应线圈,通过 HT701 型磁通计测量得到磁感应强度,由磁感应强度与磁场强度的差值得到磁化强度。用泰克 DPO3014 型示波器记录并存储实时数据,即得到不同预应力下磁化强度和磁场、应变和磁场的关系。

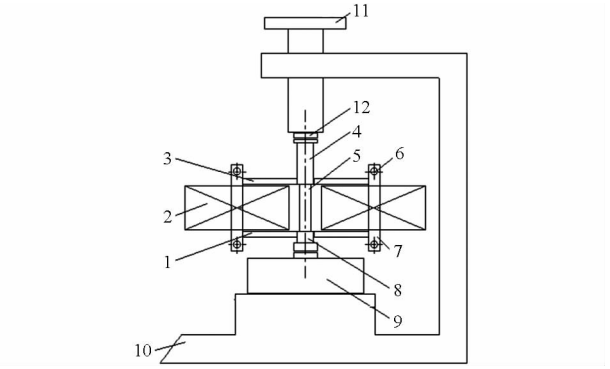

图 1 Galfenol 合金性能测试系统

Fig. 1 Experimental system of Galfenol alloy

1. 下回路模块 2. 激励线圈 3. 上回路模块 4. 上极头 5. Galfenol 合金 6. 固定螺栓 7. 铝板 8. 下极头 9. 压力传感器 10. 液压压片机 11. 压片机手轮 12. 永磁体

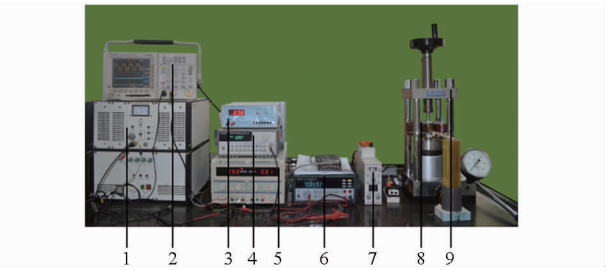

图 2 Galfenol 合金性能测试系统整体装置图

Fig. 2 Experiment setup of Galfenol alloy magnetic properties

1. 功率放大器 2. 示波器 3. 磁通计 4. 信号发生器 5. 直流电源 6. 万用表 7. 动态应变仪 8. 磁路部分 9. 压片机

动态测量过程如下:采用永磁体给 Galfenol 合金提供偏置磁场,利用信号发生器和 7101 型功率放大器给激励线圈通交变电流产生交变磁场,Galfenol 在交变磁场作用产生应变和磁化强度的动态变化,利用 SDY2103 型动态应变仪测量 Galfenol 的动态应变,利用霍尔芯片测量磁场强度,用示波器记录实时数据。改变交流电流的频率,即可得到不同频率下的动态应变与交变磁场的关系曲线。其中 SDY2103 型动态应变仪能测量最大频率为 10 kHz 的应变,灵敏度为 1 V/100 με;HT701 型磁通计数字磁通计灵敏度为 2 μWb,基本误差为 ±1%,可用于测量准静态磁通;A1321LUA 型霍尔芯片为集成芯片,有电源电压 50% 的静态输出电压,以及 2.5、3.125、5 mV/G 3 种输出灵敏度选择,可用于测试本次实验中的磁场;JLBU－5T 型压力传感器量程为 0.3 ~ 5 T,综合

精度为 0.05%。

2　考虑涡流损失的 Galfenol 合金动态滞后模型

2.1　Galfenol 合金滞后模型

磁致伸缩材料的自由能包括磁晶各向异性能、磁机械耦合能和磁场能。利用斯通纳-沃尔法特(Stoner－Wohlfarth，SW)模型对磁畴进行近似模拟，设合金中的磁畴由 r 组取向不同的 SW 粒子系组成，第 k 个粒子系的易磁化方向为 $\boldsymbol{c}^k$，局部自由能为[17]

$$G^k = G_A^k + G_c^k + G_Z^k \tag{1}$$

其中　$G_A^k = \frac{1}{2}K^k|\boldsymbol{m}^k - \boldsymbol{c}^k|^2$

$$G_c^k = \boldsymbol{S}_m^k\boldsymbol{T} \quad G_Z^k = -\mu_0 M_s \boldsymbol{m}^k\boldsymbol{H}$$

式中　G_A^k——把 SW 粒子从易磁化方向 $\boldsymbol{c}^k$ 旋转到方向 $\boldsymbol{m}^k$ 所需要的磁晶各向异性能

G_c^k——磁-机械耦合能　　G_Z^k——磁场能

K^k——磁晶各向异性系数

S_m^k——磁致伸缩

$\boldsymbol{T}$——应力矢量　　$\boldsymbol{H}$——磁场矢量

M_s——饱和磁化强度　μ_0——真空磁导率

CHAKRABARTI 在式(1)的基础上添加了一个常数项 K_0^k[20]，则第 k 个粒子系的自由能变成

$$G^k = \frac{1}{2}K|\boldsymbol{m}^k - \boldsymbol{c}^k|^2 + K_0^k - \boldsymbol{S}_m^k\boldsymbol{T} - \mu_0 M_s\boldsymbol{m}^k\boldsymbol{H} \tag{2}$$

把式(2)写成矩阵形式，即为

$$\boldsymbol{G}^k = \frac{1}{2}\boldsymbol{m}^k\boldsymbol{K}\boldsymbol{m}^k - \boldsymbol{m}^k\boldsymbol{B}^k + \frac{1}{2}\boldsymbol{K} + K_0^k \tag{3}$$

其中

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} K-3\lambda_{100}T_1 & -3\lambda_{111}T_4 & -3\lambda_{111}T_6 \\ -3\lambda_{111}T_4 & K-3\lambda_{100}T_2 & -3\lambda_{111}T_5 \\ -3\lambda_{111}T_6 & -3\lambda_{111}T_5 & K-3\lambda_{100}T_3 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{B}^k = [\,c_1^kK + \mu_0 M_s H_1 \quad c_2^kK + \mu_0 M_s H_2 \quad c_3^kK + \mu_0 M_s H_3\,]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

当局部自由能式(3)最小时，可以得到 SW 粒子的方向

$$\boldsymbol{m}^k = (\boldsymbol{K})^{-1}\left(\boldsymbol{B}^k + \frac{1 - \boldsymbol{c}^k(\boldsymbol{K})^{-1}\boldsymbol{B}^k}{\boldsymbol{c}^k(\boldsymbol{K})^{-1}\boldsymbol{c}^k}\boldsymbol{c}^k\right) \tag{6}$$

利用 Boltzmann 平均可以得到无滞后的体积比系数

$$\xi_{an}^k = \frac{\exp\left(-\frac{G^k}{\Omega}\right)}{\sum_{k=1}^{r}\exp\left(-\frac{G^k}{\Omega}\right)} \tag{7}$$

式中　Ω——Armstrong 平滑系数

磁致伸缩 $\boldsymbol{S}_m$ 和磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 为每个方向 $\boldsymbol{S}_m^k$ 和 $M_s\boldsymbol{m}^k$ 的求和与体积比系数的乘积得到

$$\begin{cases} \boldsymbol{S}_m = \sum_{k=1}^{r}\xi_{an}^k\boldsymbol{S}_m^k \\ \boldsymbol{M} = M_s\sum_{k=1}^{r}\xi_{an}^k\boldsymbol{m}^k \end{cases} \tag{8}$$

应变可以通过磁致伸缩 $\boldsymbol{S}_m$ 与 $\boldsymbol{T}$ 求和得到

$$\varepsilon = \boldsymbol{S}_m + s\boldsymbol{T} \tag{9}$$

式中　s——柔顺系数

磁致伸缩材料在静态磁场作用下，其磁化强度存在滞后，磁化过程中的能量平衡表达式为

$$\mathrm{d}E = \mathrm{d}E_{\mathrm{sta}} + \mathrm{d}E_{\mathrm{sta\text{-}loss}} \tag{10}$$

若不考虑涡流损耗和附加损耗，式(10)写成能量形式为[8]

$$\mu_0 M_s\xi_{an}^k\mathrm{d}H = \mu_0 M_s\xi^k\mathrm{d}H + \mu_0 M_s k_p\frac{\mathrm{d}\xi^k}{\mathrm{d}H}\mathrm{d}H \tag{11}$$

其中　$k_p = n\varepsilon/\Delta\boldsymbol{M}$

式中　k_p——材料中的钉扎密度

利用式(11)可以推导出体积比系数的微分表达式为

$$\mathrm{d}\xi^k = \frac{1}{k_p}(\xi_{an}^k - \xi^k)\,\mathrm{d}\boldsymbol{H} \tag{12}$$

Armstrong 利用式(12)计算得到体积比系数 ξ^k 的微变量 $\mathrm{d}\xi^k$，取代无滞后体积比系数，得到了磁致伸缩材料 Terfenol-D 的增量磁滞模型[8]。

2.2　涡流损耗与附加损耗

上述 Galfenol 合金滞后模型仅能描述磁场或者应力为静态或者准静态(频率低于 0.04 Hz)时 Galfenol 合金在磁场和应力作用下的磁化强度和应变[19]，当磁场或者应力的频率增加后，上述 Galfenol 合金滞后模型则无法描述。

当磁致伸缩材料在交变磁场作用时，其磁化过程中存在滞后现象。Galfenol 合金是铁磁材料的一种，铁磁材料的滞后损耗除了磁滞损耗外，还包括涡流损耗和附加损耗。忽略集肤效应，单位体积的瞬时涡流损耗与磁化强度变化率的平方呈正比[21]，即

$$\frac{\mathrm{d}E_e}{\mathrm{d}t} = \frac{d_1^2}{2\rho\beta}\left(\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\right)^2 = \frac{\mu_0^2 d_1^2}{2\rho_e\beta}\left(\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t}\right)^2 \tag{13}$$

式中　ρ_e——材料电阻率

E_e——涡流损耗

d_1——横截尺寸，对切片材料其为切片厚度，对圆柱体和球体其为直径

β——几何因子，当材料切片时 $\beta=6$，材料为圆柱体时 $\beta=16$，材料为球体时 $\beta=20$

附加损耗是磁畴结构变化的结果，其表达式为[21]

$$\frac{\mathrm{d}E_a}{\mathrm{d}t} = \left(\frac{Ad_1w_1H_0}{\rho_e}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{14}$$

式中 A——与铁磁材料尺寸无关的常数

E_a——附加损耗

w_1——切片宽度，对于柱状样品，$d_1 w_1$ 相当于材料的横截面积

H_0——与畴壁有关的参数，相当于磁场

2.3 Galfenol 合金动态滞后模型

磁致伸缩材料在交变磁场作用下，磁化过程除了要考虑磁滞引起的磁滞损耗外，还需要考虑涡流损耗和附加损耗，因此磁化过程中的能量平衡表达式还需要加上涡流能量损失和附加能量损失，即

$$dE = dE_{sta} + dE_{sta\text{-}loss} + dE_e + dE_a \tag{15}$$

将表征涡流损耗的式(13)写成微分形式，即

$$dE_e = \frac{d_1^2}{2\rho\beta}\left(\frac{dB}{dt}\right)^2 = \frac{\mu_0^2 d_1^2}{2\rho_e\beta}\left(\frac{dM}{dt}\right)^2 dt = \frac{\mu_0^2 d_1^2}{2\rho_e\beta}\left(\frac{dM}{dt}\right)\left(\frac{dM}{dH}\right)dH \tag{16}$$

将表征附加损耗的式(14)写成微分形式，即

$$dE_a = \left(\frac{Ad_1 w_1 H_0}{\rho_e}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{dB}{dt}\right)^{\frac{3}{2}} dt = \mu_0^{\frac{3}{2}}\left(\frac{Ad_1 w_1 H_0}{\rho_e}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{dM}{dt}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{dM}{dH}\right)dH \tag{17}$$

将式(16)、(17)代入式(15)，并写成积分形式

$$\mu_0 M_s \int \xi_{an}^k dH = \mu_0 M_s \int \xi^k dH + \mu_0 M_s \int k_p \frac{d\xi^k}{dH} dH + \frac{\mu_0^2 d_1^2}{2\rho_e\beta}\int\left(\frac{dM}{dt}\right)\left(\frac{dM}{dH}\right)dH + \mu_0^{\frac{3}{2}}\left(\frac{Ad_1 w_1 H_0}{\rho_e}\right)^{\frac{1}{2}}\int\left(\frac{dM}{dt}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{dM}{dH}\right)dH \tag{18}$$

式(18)在式(11)的基础上添加了涡流损耗和附加损耗。假定磁化强度的任何变化均由不同方向的体积比系数的变化引起[12]，即

$$dM^k = M_s d\xi^k \tag{19}$$

因此式(18)可变为

$$M_{an} = M + k_p \frac{dM}{dH} + \frac{\mu_0 d_1^2}{2\rho_e\beta}\left(\frac{dM}{dt}\right)\left(\frac{dM}{dH}\right) + \mu_0^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Ad_1 w_1 H_0}{\rho_e}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{dM}{dt}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{dM}{dH}\right) \tag{20}$$

结合式(19)，将式(20)推导成体积比系数的形式，则为

$$\xi_{an}^k = \xi^k + k_p \frac{d\xi^k}{dH} + M_s \frac{\mu_0 d_1^2}{2\rho_e\beta}\left(\frac{d\xi^k}{dH}\right)^2\left(\frac{dH}{dt}\right) + M_s^{\frac{1}{2}}\mu_0^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Ad_1 w_1 H_0}{\rho_e}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{d\xi^k}{dH}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{dH}{dt}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{21}$$

和式(12)相比，式(21)添加了表征涡流损耗和附加损耗的体积比系数。利用牛顿迭代方法求解式(21)即可得到体积比系数 ξ^k。在求解 ξ^k 时，采用体积比系数按不同权重求和的方法，即

$$d\xi^k = p_1 d\xi_{an}^k + p_2 d\xi_e^k + p_3 d\xi_a^k \tag{22}$$

其中 $p_1 + p_2 + p_3 = 1$

式中 p_1、p_2、p_3——体积比系数的权重系数

$d\xi_e^k$——涡流损耗引起的体积比系数变化

$d\xi_a^k$——附加损耗引起的体积比系数变化

将得到的体积比系数取代式(8)中的 ξ_{an}^k，即可得到 Galfenol 合金在交变磁场作用下的磁化强度和应变。

3 模型与实验结果比较

3.1 静态实验结果与滞后模型

利用图 2 的 Galfenol 合金磁特性测试系统进行 Galfenol 静态特性测试。Galfenol 成分为多晶 $Fe_{83}Ga_{17}$ 合金。得到的不同预应力下 Galfenol 合金应变与磁场的关系如图 3 所示。测量时磁场强度为轴向方向，预应力为 0、20、40、60 MPa。可见，其应变与磁场曲线是磁致伸缩材料的典型“蝶形”曲线，该材料在 0 MPa、5 kA/m 时达到饱和，饱和应变为 2.65×10^{-4}，磁滞后小。增加预应力至 20 MPa 时，9 kA/m 的磁场使材料饱和，饱和应变增加至 2.80×10^{-4}，随着预应力的增加，材料饱和需要的磁场增加。预应力为 60 MPa 时，18 kA/m 的磁场使材料饱和，饱和应变增加至 3.16×10^{-4}。

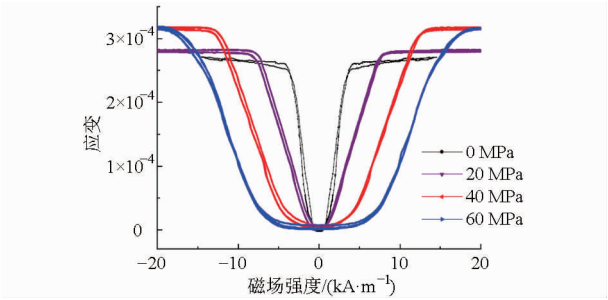

图 3 Galfenol 合金应变与磁场强度的静态关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of strain *vs* static magnetic field intensity of Galfenol alloy

图 4 为模型计算结果与图 3 中实验结果的对比。利用式(8)计算磁化强度和磁致伸缩，式(9)计算总应变，式(12)计算体积比系数的变化量，取代式(8)中的 ξ_{an}^k 即可得到应变曲线。在图 4 中，当预应力为 0、20 MPa 时，实线与虚线基本重合；当预应力为 40、60 MPa 时，实验与模型结果稍微出现偏差。这是因为在计算应变时，式(9)中的柔顺系数认为是常量，预应力小时，柔顺系数随磁场的变化可以忽略；当预应力较大时，在磁场的作用下，柔顺系数会

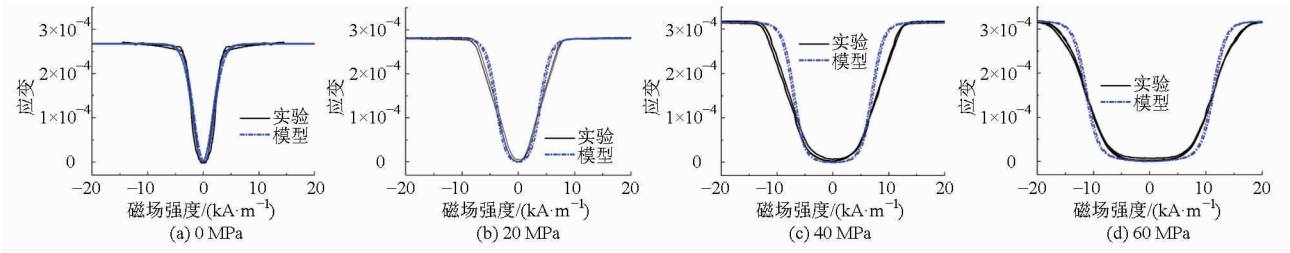

图 4　Galfenol 合金静态模型与实验结果对比

Fig. 4　Comparison of experimental and simulation results of Galfenol alloy

随之变化，因此，实验与模型出现稍微偏差。可见，该静态滞后模型能较准确地模拟 Galfenol 合金的静态应变与磁场的关系。计算过程中采用的参数为：①K、K_0、Ω、s 的选取与 $Fe_{81.6}Ga_{18.4}$ 一致[19]，K = 27.1 kJ/m^3，K_0 = 0.021 kJ/m^3，Ω = 776.7 J/m^3，s = 2×10^{-11} m^2/N。②由实验数据得到的参数为：$\mu_0 M_s$ = 1.55 T，λ_{100} = 2.167×10^{-4}。

3.2　动态实验结果与动态滞后模型

利用图 2 的测试系统进行 Galfenol 合金动态特性测试。动态测试前，根据静态测试结果，选定线性特性较好的一段区域为动态测试区域。由图 3 可见，在 0 MPa、磁场为 2.25 kA/m 时应变变化范围大，线性度好，因此 0 MPa 时进行动态测试，选用该磁场为偏置磁场，由永磁体提供。给激励线圈施加不同频率的交变电流产生交变磁场。交变磁场的幅值为 1.2 kA/m，即总磁场为 H_{ex} = 2.25 + 1.2sin(ωt)(kA/m)，ω 为角频率，改变交变磁场的频率即可得到不同频率下磁场与应变的关系曲线。

为了验证动态实验的正确性，把磁场频率为 1 Hz 时应变与磁场的动态特性实验结果(小环)和静态应变与磁场结果(大环)绘制于图 5 中，虚线为动态特性测试结果，实线为图 3 中 0 MPa 时静态特性测试结果。可见虚线在实线范围内，仅在低磁场时因滞后现象有部分虚线在实线范围外，即大环包含小环[19]。因此可知动态特性测试结果可靠。

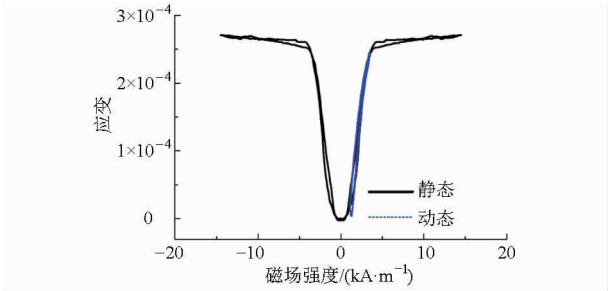

图 5　应变与磁场强度的静动态曲线

Fig. 5　Static and dynamic curves of strain *vs* magnetic field intensity

图 6 为 Galfenol 合金不同频率下应变与磁场的动态关系测试曲线。交变磁场的频率分别为 1、10、20、40、60、100、200、300 Hz。从图 6 可见，当激励磁场频率增加时，同样激励磁场下，磁场与应变之间的滞后增加，即小环的面积增大。随着频率的增加，应变与磁场曲线顺时针转动，当频率增加到 200 Hz 时，应变与磁场曲线转至与横坐标轴方向接近，当频率增加至 300 Hz 时，应变与磁场曲线方向几乎与横坐标轴方向平行。

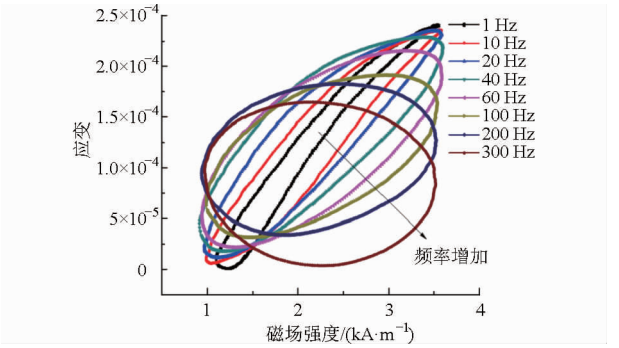

图 6　不同频率下材料应变与磁场强度的动态曲线

Fig. 6　Dynamic curves of strain *vs* magnetic field intensity under different frequencies

图 7 为 Galfenol 合金不同频率下应变与磁场动态模型计算结果与实验结果对比，蓝线为模型计算结果，黑线为实验结果。计算损耗时采用的参数：①与 Galfenol 合金棒尺寸、特性相关的参数：电阻率 ρ_e = 3.5×10^{-6} Ω/m，β = 16，A = 0.135 6，d_1 = 12.7 mm，H_0 = 10 A/m。②由实验结果优化得到的参数：p_1 = 0.2，p_2 = 0.4，p_3 = 0.4。

从图 7 实验与模型计算结果比较可见，当激励磁场频率为 200 Hz 以下时，模型与实验结果吻合较好，频率为 300 Hz 时，模型与实验结果之间出现偏差。说明该模型适用于激励磁场频率低于 200 Hz 的场合。文献[22]利用附加损耗(式(14))推导了附加涡流损耗电阻，以此为基础建立了棒状 Terfenol-D 致动器动态模型，其模型在计算频率为 250 Hz 以上位移与电流关系时出现偏差。在涡流损耗推导过程中，忽略了集肤效应，对于 Galfenol 这种电阻率低的材料，低频时忽略集肤效应的涡流损耗公式能模拟涡流损耗，当频率高时，集肤效应则不能忽略，因此频率超过 300 Hz 时计算结果和实验结

果出现了较大的偏差。论文下一步工作是寻找较高频率作用下 Galfenol 合金动态损耗模型。

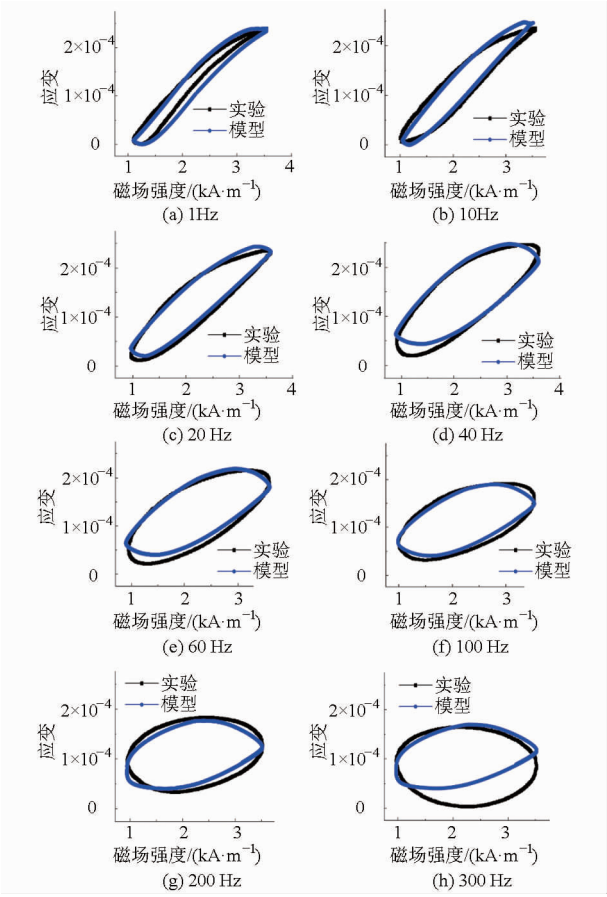

图 7 实验与模型计算结果比较

Fig. 7 Comparison of experimental and simulation results

图 8 为 Galfenol 合金在不同激励磁场幅值作用下动态模型计算结果与实验结果对比。图中激励磁场频率均为 10 Hz,激励磁场幅值分别为 1.2 kA/m(大环)和 0.6 kA/m(小环)。激励磁场幅值 1.2 kA/m 的计算结果和实验结果为图 7b 曲线。可见,当激励磁场幅值增加时,小环被大环包含,与图 5 类似。图 8 中的计算结果能较准确地模拟激励磁场幅值变化时应变与磁场的关系。

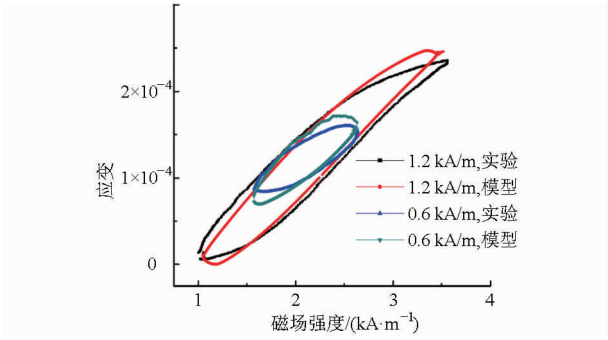

图 8 不同激励磁场作用下实验与模型计算结果

Fig. 8 Experimental and simulation results under different magnetic field intensity

4 结论

(1)在 Galfenol 合金局部自由能的基础上,考虑铁磁材料在交流激励磁场作用下的涡流损耗和附加损耗,建立了 Galfenol 合金动态磁化过程的能量平衡表达式,推导了 Galfenol 动态磁化强度表达式,计算体积比系数后计算了 Galfenol 合金在动态磁场作用下的应变。

(2)测试了 Galfenol 不同预应力作用下应变与磁场的关系。静态应变和磁场的计算结果和实验结果吻合较好。

(3)测试了 Galfenol 在动态磁场作用下的应变。比较了动态磁场作用下的应变测试值和计算值,结果表明,该动态模型在激励磁场频率为 200 Hz 以下时能准确模拟动态应变输出,频率增加时模型计算结果和实验结果出现偏差。当不同激励磁场幅值改变时,模型也能模拟 Galfenol 动态应变输出。

参 考 文 献

1 CLARK A E, MARILYN W F, RESTORFF J B, et al. Magnetostrictive properties of Fe－Ga alloys under compressive stress [J]. Materials Transactions, 2002, 43(5): 881－886.

2 WUN-FOGLE M, RESTORFF J B, CLARK A E, et al. Stress annealing of Fe－Ga transduction alloys for operation under tension and compression [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(10): 10M301－1－4.

3 WUN-FOGLE M, RESTORFF J B, CLARK A E. Magnetomechanical coupling in stress-annealed Fe－Ga (Galfenol) alloys [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3120－3122.

4 舒亮,李传,吴桂初,等. Fe－Ga 合金磁致伸缩力传感器磁化模型建立与特性分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 344－349.
SHU Liang, LI Chuan, WU Guichu, et al. Magnetization model of Fe－Ga magnetostrictive force sensor and its characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 344－349. (in Chinese)

5 舒亮,吴桂初,陈定方. 变频率条件下 Galfenol 驱动器参数辨识方法研究[J]. 功能材料, 2015, 46(17): 17027－17032.
SHU Liang, WU Guichu, CHEN Dingfang. Parameters ifentifications of Galfenol actuator at variable frequencies [J]. Journal of Function Materials, 2015, 46(17): 17027－17032. (in Chinese)

6 SHENG Dong, MARCELO Dapino. Wear reduction through piezoelectrically-assisted ultrasonic lubrication [J]. Smart Material Structure, 2014, 23(104005): 1－12.

7 ATULASIMHA J, FLATAU A B, SUMMERS E. A review of magnetostrictive iron-gallium alloys [J]. Smart Material Structure, 2011, 20(4): 043001－1－15.

8 ARMSTRONG WILLIAM D. An incremental theory of magneto-elastic hysteresis in pseudo-cubic ferro-magnetostrictive alloys [J].

Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2003,263(1 – 2):208 – 218.
9 BEHROOZ Rezaeealam, TOSHIYUKI Ueno, SOTOSHI Yamada. Finite element analysis of Galfenol unimorph vibration energy harvester[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(11):3977 – 3980.
10 GROSSINGER R, NASIR MEHBOOB, SUESS D, et al. An eddy-current model describing the frenquency dependence of the coercivity of polycrystalline Galfenol[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2012,48(11):3076 – 3079.
11 ZIRKA S Z, MOROZ Y I, MARKETOS P, et al. Evolution of the loss components in ferromagnetic laminations with induction level and frenquency [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2008,320(6):1039 – 1043.
12 XU Hao, PEI Yongmao, FANG Daining, et al. An energy-based dynamic loss hysteresis model for giant magnetostricitve materials [J]. International Journal of Solids and Structures,2013,50(5):672 – 679.
13 BARBISIO E, FIORILLO F, RAGUSA C. Predicting loss in mangetic steels under arbitrary induction waveform and with minor hysteresis loops [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2004,40(4):1810 – 1819.
14 BERTOTTI G. Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials [J]. Journal of Applied Physics, 1985, 57(6):2110 – 2117.
15 LYER R V, KRISHNAPRASAD P S. On a low-dimensinal model for ferromagnetism [J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications,2005,61(8):1447 – 1482.
16 ATULASIMA J, FLATAU A B, JAMES R, et al. Energy-based quasi-static modeling of the actuation and sensing behavior of single-crystal iron-gallium alloys [J]. Journal of Applied Physics,2008,103(1):014901 – 1 – 9.
17 EVANS P G, DAPINO M J. Efficient magnetic hysteresis model for field and stress application in magnetostrictive Galfenol [J]. Journal of Applied Physics,2010,107(6):063906 – 1 – 11.
18 EVANS P G, DAPINO M J. Measuremeat and modeling of magnetic hysteresis under field and stress application in iron-gallium alloys [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2013,330:37 – 48.
19 WENG Ling, WALKER Travis, DENG Zhangxian, et al. Major and minor stress-magnetization loops in textured polycrystalline $Fe_{81.6}Ga_{18.4}$ Galfenol [J]. Journal of Applied Physics,2013,113(2):024508 – 1 – 9.
20 CHAKRABARTI S, DAPINO M J. Parameter estimation of a discrete energy-averaged model from 1D measurements [J]. Smart Material Structure,2011, 20(10):105034 – 1 – 10.
21 JILES D C. Modeling the effects of eddy current losses on frequency dependent hysteresis in electrically conducting media [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994,30(6):4326 – 4328.
22 赵章荣,邬义杰,顾新建,等. 考虑附加涡流损失的超磁致伸缩执行器动态模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(24):136 – 140.
ZHAO Zhangrong, WU Yijie, GU Xinjian, et al. Dynamic model of giant magnetostrictive actuator considering excess eddy current loss [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(24):136 – 140. (in Chinese)

(上接第 371 页)

8 王海霞, 李文锦. 磁流变压力阀性能实验及数据分析[J]. 液压与气动, 2013(3): 100 – 102.
WANG Haixia, LI Wenjin. Performance test and data analysis for magnetorheological pressure valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(3): 100 – 102. (in Chinese)
9 SALLOOM M Y. Intelligent magneto-rheological fluid directional control valve [J]. International Journal of Innovation, Management and Technology, 2013, 4(4): 406 – 409.
10 SALLOOM M Y, SAMAD Z. Magneto-rheological directional control valve [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1 – 4): 279 – 292.
11 SALLOOM M Y, SAMAD Z. Design and modeling magneto rheological directional control valve [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(2): 155 – 167.
12 IMADUDDIN F, MAZLAN S A, ZAMZURI H, et al. Design and performance analysis of a compact magnetorheological valve with multiple annular and radial gaps [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(9): 1038 – 1049.
13 IMADUDDIN F, MAZLAN S A, RAHMAN M A A, et al. A high performance magnetorheological valve with a meandering flow path [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(6): 1 – 11.
14 AYDAR G, WANG X, GORDANINEJAD F. A novel two-way-controllable magneto-rheological fluid damper [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(6): 065024.
15 HU G, LONG M, YU L, et al. Design and performance evaluation of a novel magnetorheological valve with a tunable resistance gap [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12): 127001.
16 NGUYEN Q H, CHOI S B, LEE Y S, et al. Optimal design of high damping force engine mount featuring MR valve structure with both annular and radial flow paths [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(11): 115024.
17 NGUYEN Q H, CHOI S B, LEE Y S, et al. An analytical method for optimal design of MR valve structures [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9): 1088 – 1100.
18 NGUYEN Q H, CHOI S B, WERELEY N M. Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(2): 1 – 12.
19 NGUYEN Q H, HAN Y M, CHOI S B, et al. Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2242 – 2252.
20 HADADIAN A, SEDAGHATI R, ESMAILZADEH E. Design optimization of magnetorheological fluid valves using response surface method [J]. Journal of Intelligent Material System and Structures, 2014, 25(11): 1352 – 1371.