



磁性材料及器件

Journal of Magnetic Materials and Devices

ISSN 1001-3830, CN 51-1266/TN

## 《磁性材料及器件》网络首发论文

题目: Terfenol-D 棒多场耦合 J-A 模型建模与仿真分析  
作者: 张生艳, 鲁怀伟, 方雪欣, 杨旭鹏  
收稿日期: 2019-12-15  
网络首发日期: 2020-11-25  
引用格式: 张生艳, 鲁怀伟, 方雪欣, 杨旭鹏. Terfenol-D 棒多场耦合 J-A 模型建模与仿真分析[J/OL]. 磁性材料及器件.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1266.TN.20201125.0903.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# Terfenol-D 棒多场耦合 J-A 模型建模与仿真分析

张生艳<sup>1</sup>, 鲁怀伟<sup>1,2</sup>, 方雪欣<sup>1</sup>, 杨旭鹏<sup>3</sup>

1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃兰州 730070;
2. 兰州交通大学 数理与软件工程学院, 甘肃兰州 730070;
3. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃兰州 730050)

**摘要:** 在简单总结现有的磁滞模型基础上, 综合考虑温度、应力和磁场磁滞模型的影响, 对磁滞模型的参数和有效场进行修正后, 建立了磁-力-热多场耦合 J-A 模型。采用欧拉法与牛顿法对所建新模型进行数值模拟, 分析在不同温度和应力的作用下二者对 Terfenol-D 棒磁滞回线非线性特性的影响。结果表明, 温度和应力对 Terfenol-D 棒的  $M-H$  曲线和磁致伸缩系数  $\lambda$  和  $\lambda-H$  曲线影响较大, 在两者的作用下  $M-H$  曲线主要呈现“翻转效应”, 而  $\lambda$  和  $\lambda-H$  的线性区间随着温度的升高减小, 随着压应力的增大而增大。与已有的模型进行比较, 结果表明, 所搭建的模型不仅能够很好地描述 Terfenol-D 棒磁滞回线的温度特性与其非线性特性, 而且在相同的: 温度和应力作用下, 该模型的  $M-H$  曲线和  $\lambda-H$  曲线的线性区间增大。

**关键词:** Terfenol-D 棒; 磁致伸缩; 磁-力-热耦合; J-A 模型;  $M-H$  曲线;  $\lambda-H$  曲线  
**中图分类号:** TP212; TM933.1

## Modeling and simulation analysis of Terfenol-D rod with multi-field coupling J-A model

ZHANG Sheng-yan<sup>1</sup>, LU Huai-wei<sup>1,2</sup>, FANG Xue-xin<sup>1</sup>, YANG Xu-peng<sup>3</sup>

1. College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. College of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

**Abstract:** Based on a brief summary of the existing hysteresis model, considering the influence of temperature, stress and magnetic field, the parameters and effective magnetic field of the hysteresis model are modified, and the magneto-mechanical-thermo multi field coupling J-A model is established. The new model is simulated by Euler and Newton method. The influence of temperature and stress on the nonlinear characteristics of the hysteresis loop of Terfenol-D rod is analyzed. The results show that temperature and stress have great influence on  $M-H$  curve and magnetostriction coefficient  $\lambda$  and  $\lambda-H$  curve of Terfenol-D rod. Under the both actions, the  $M-H$  curve mainly presents "overturning effect", while the linear range of magnetostriction coefficient  $\lambda$  and  $\lambda-H$  curve decreases with the increase of temperature and increases with the increase of compressive stress. Compared with the existing models, the results show that the model can not only describe the temperature characteristics and nonlinear characteristics of the hysteresis loop of Terfenol-D rod, but also increase the linear range of  $M-H$  curve and  $\lambda-H$  curve under the same temperature and stress.

**Key words:** Terfenol-D rod; magnetostriction characteristics; magneto-mechanical-thermo coupling; J-A model;  $M-H$  curve;  $\lambda-H$  curve

## 1 引言

超磁致伸缩材料(Terfenol-D 棒)是一种新型功能材料, 具有高响应速度、宽工作频域、大输出应变等优异特性<sup>[1]</sup>, 其与光纤布拉格光栅结合构成的光学电流互感器广泛应用于电力系统中<sup>[2-4]</sup>。然而 Terfenol-D 棒在磁场、应力场和温度场多场耦合的作用影响下, 具有非常复杂的非线性响应特性<sup>[1-2]</sup>。研究超磁致伸缩材

料的磁滞特性，是以其为核心的器件设计的关键。

Jiles 等<sup>[5-6]</sup>提出了一种基于畴壁理论的磁化强度磁滞模型，推导了静态 J-A 模型，且随后又推导了动态 J-A 模型。兰州大学郑晓静等<sup>[1]</sup>推导了 Z-L 模型，能够很好地描述材料的磁致伸缩应变与磁场强度的关系。熊兰等<sup>[7]</sup>对经典 J-A 模型存在的非物理解问题进行修正，同时验证了经改进的 J-A 模型能更准确地描述铁磁材料材料的磁滞特性。该方法比较简单，但没有考虑温度的影响。李超等<sup>[8]</sup>通过对 J-A 模型参数的修正，减小了由于温度对用经典 J-A 模型所描述的磁滞回线造成的误差，经实验证明修正后的 J-A 模型能很好地描述磁致伸缩材料的磁滞回线的温度特性。万永平等<sup>[11]</sup>建立了标准型和双曲正切型两个超磁致伸缩材料的本构关系，并且指出磁弹性系数在一定预应力范围内趋于常数。但这些模型都没有考虑温度对磁滞回线的影响。李超等<sup>[8]</sup>对硅钢片的磁滞回线进行仿真验证，而没有采用超磁致伸缩材料 Terfenol-D 棒。

本实验在考虑温度、磁场与预压力多场耦合的作用下在经典的 J-A 模型基础上构建 Terfenol-D 棒的磁-热多场耦合 J-A 模型。用欧拉法和牛顿法数值模拟分析 Terfenol-D 棒的磁滞特性和应变特性。为以 Terfenol-D 棒为核心的传感器等器件的设计研究提供参考。

## 2 参数对磁滞特性的影响：基于经典 J-A 模型

### 2.1 经典 J-A 模型的基本理论

Jiles 和 Latherton 于 1983 年运用磁畴壁的概念，将磁畴磁化过程分解成有摩擦效应的不可逆分量  $M_{\text{irr}}$  和弹性可逆分量  $M_{\text{rev}}$ ，提出经典 J-A 模型。利用修改的 Langvin 函数描述磁化强度  $M$  与磁场强度  $H$  之间的关系，获得磁感应强度  $B$  与  $H$  之间的关系。

在恒温条件下 J-A 模型表述为<sup>[5-6, 10]</sup>：

$$\begin{cases} H_e = H + \alpha M \\ M_{\text{an}} = M_s \left( \coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right) \\ \frac{dM_{\text{irr}}}{dH} = \frac{M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}}{\delta k} \\ M_{\text{rev}} = c(M_{\text{an}} - M_{\text{irr}}) \\ M = M_{\text{rev}} + M_{\text{irr}} \\ B = \mu_0(H + M) \end{cases} \quad (1)$$

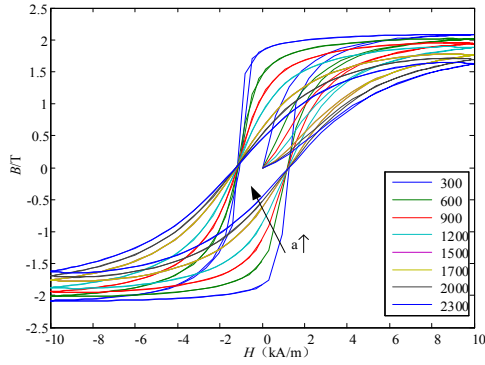
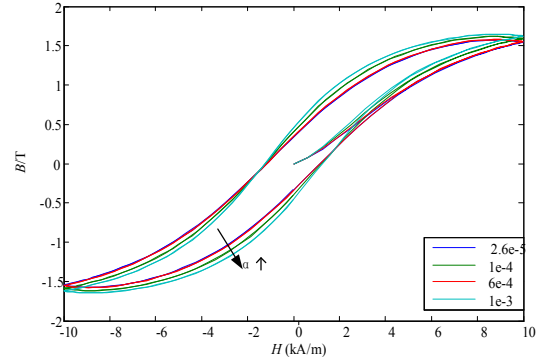
磁化强度  $M$  与磁场强度  $H$  的微分方程为：

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1-c)(M_{\text{an}} - M) + \delta k c \frac{dM_{\text{an}}}{dH}}{\delta k - \alpha(1-c)(M_{\text{an}} - M)} \quad (2)$$

式中， $M_{\text{an}}$  是无磁滞磁化强度， $M_s$  是饱和磁化强度， $H_e$  是有效磁场强度， $H$  是磁场强度， $\alpha$  是耦合系数， $k$  是损耗系数， $c$  是不可逆损耗系数， $a$  为磁畴壁相互作用系数。其中  $M_s$ 、 $a$ 、 $c$ 、 $k$ 、 $\alpha$  为待定参数，确定这五参数后通过求解 J-A 模型便可得  $M$ - $H$ 、 $B$ - $H$ 、 $\lambda$ - $H$  曲线。 $\delta$  是磁场强度的方向系数，可用符号函数  $\text{sign}$  表示，即  $\delta = \text{sign}(dH/dt)$ 。

### 2.2 不同参数下的磁滞回线分析

图 1 和图 2 分别展现了在不同的磁畴壁相互作用系数( $a$ )和耦合系数( $\alpha$ )作用下，磁感应强度与磁场强度的关系。图 1 表明  $a$  对  $B$ - $H$  曲线的影响较大，随着  $a$  取值的增大， $B$ - $H$  曲线的线性段的斜率逐渐减小。图 2 表明  $\alpha$  对  $B$ - $H$  曲线的影响不是很大，随着  $\alpha$  取值的增大， $B$ - $H$  曲线出现翻转效应。从图 1 和图 2 看出 J-A 经典模型的参数对磁滞回线的影响不容忽略。

图1 磁畴壁相互作用系数  $\alpha$  取不同值时的  $B-H$  曲线图2 耦合系数  $\alpha$  取不同值时的  $B-H$  曲线

### 3 磁-力-热耦合的静态 J-A 模型

#### 3.1 J-A 模型参数修正

J-A 模型参数对超磁致伸缩材料的磁滞回线影响不容忽视,对 J-A 模型参数的修正,可以减小其对磁滞回线的影响。饱和磁化强度随着温度的升高而降低,当温度升高至居里温度  $T_C$  后,饱和磁化强度  $M_s$  降低至零附近<sup>[7]</sup>。温度对  $M_s$ 、 $c$ 、 $\alpha$ 、 $k$  参数有影响<sup>[13-14]</sup>,考虑温度的影响对经典 J-A 模型的参数进行修正如下:

$$M_s(T) = M_s(T_r) \left( 1 - \frac{\Delta T}{T_C - T_r} \right)^x \quad (3)$$

$$c(T) = c(T_r) \left( 1 - \frac{\Delta T}{T_C - T_r} \right)^x e^{\frac{2\Delta T}{x T_C}} \quad (4)$$

$$k(T) = k(T_r) e^{\frac{2\Delta T}{x T_C}} \quad (5)$$

$$a = \frac{N k_B T}{\mu_0 M_s^2} \quad (6)$$

$$\alpha(T) = \alpha(T_r) \left( 1 - \frac{\Delta T}{T_C - T_r} \right)^x e^{\frac{2\Delta T}{x T_C}} \quad (7)$$

其中  $\Delta T$  为实际温度  $T$  与参考温度  $T_r$  之间的温度差:

$$\Delta T = T_r - T \quad (8)$$

式中:  $T_C$  为居里温度(Terfenol-D 棒的居里温度为 340~420 °C),  $T_r$  为参考温度;  $N$  为磁畴密度;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $x$  是表征饱和磁化强度  $M_s$  随实际温度  $T$ (开氏温度)变化程度的放大系数,  $x$  越小则该材料  $M_s$  随  $T$  变化越缓慢。

#### 3.2 磁-力-热耦合的 J-A 模型的推导

考虑到温度对磁致伸缩材料中的磁场和应力场均有影响,并且已由磁场和应力场构造出了相应的有效场,因而温度对磁场和应力场的影响应当等效为温度对已有的有效场整体的影响,则考虑温度和应力作用下的有效磁场强度为:

$$H_e = H + \alpha M + H_\sigma + H_{T,\sigma} \quad (9)$$

式中  $H = H_a + H_b$ ,  $H_a$  为被测电流产生的励磁磁场,  $H_a = N I \sin(2\pi f t)$  ( $N$  为线圈匝数,  $I$  为激磁电流幅值,  $f$  为驱动频率);  $H_b$  为偏置磁场;  $\alpha M$  为材料磁畴间相互作用产生的磁场;  $H_\sigma$  是由应力与磁场耦合诱发的有效磁场;  $H_{T,\sigma}$  是由应力、温度、磁化耦合诱发的有效磁场。且其通过弹性 Gibbs 自由能函数按泰勒级数展开可得<sup>[2]</sup>:

$$H_\sigma = \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \frac{\partial \lambda}{\partial M} \quad (10)$$

$$H_{T,\sigma} = \frac{2\beta\Delta T\sigma M}{\mu_0 M_s^2} \quad (11)$$

式中  $\beta$  为与温度无关的磁-力-热耦合常数,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\sigma$  为应力。

超磁致伸缩材料的磁致伸缩系数  $\lambda$  与磁场强度  $H$  的关系为<sup>[15]</sup>:

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \left( \frac{M}{M_s} \right)^2 \quad (12)$$

式中,  $\lambda_s$  是饱和磁致伸缩系数。(12)式给出的  $\lambda$  为  $M$  的单值函数, 呈二次方的关系, 其虽与物理现象一致, 但当畴壁运动显著时, 如作用于 Terfenol-D 材料的工作应力不显著时, 则不够普遍, 为了提供一个更通用的磁致伸缩模型, Dapino M J 等人<sup>[14]</sup>给出一个关于  $M = 0$  对称的级数展开式:

$$\lambda = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma_i M^{2i} \quad (13)$$

一般  $i$  取到 2, 即

$$\lambda = \gamma_1 M^2 + \gamma_2 M^4 \quad (14)$$

则

$$\frac{\partial \lambda}{\partial M} = 2\gamma_1 M + 4\gamma_2 M^3 \quad (15)$$

对  $\gamma_i(\sigma, T)$  在  $(\sigma, T) = (\sigma_r, T_r) = (0, T_r)$  ( $i$  取 1, 2) 处作一阶泰勒展开并舍去常数项和余项, 则有

$$\gamma_i(\sigma, T) = \gamma_{i1} + \sigma\gamma_{i2} + \Delta T\gamma_{i3} \quad (16)$$

将 (11)、(12)、(15) 式代入(10)式得有效场

$$H_e = H + \alpha M + \frac{\sigma}{\mu_0} (3\gamma_1 + 6\gamma_2 M^2 + \frac{2\beta\Delta T}{\mu_0 M_s^2}) M = H + \tilde{\alpha} M \quad (17)$$

式中  $\tilde{\alpha} = \alpha + \frac{\sigma}{\mu_0} (3\gamma_1 + 6\gamma_2 M^2 + \frac{2\beta\Delta T}{\mu_0 M_s^2})$ 。

当方向系数  $\delta = \text{sign}(dH/dt)$  时, 经典的 J-A 模型存在非物理解<sup>[6, 7-13]</sup>, 这在实际中是不存在的, 本文通过引入无磁滞磁化强度  $M_{\text{an}}$ , 从而消除经典 J-A 模型存在的非物理解, 其修正公式为当  $\delta(M_{\text{an}} - M) < 0$  时,  $\delta_m = 0$ ; 当  $\delta(M_{\text{an}} - M) > 0$  时,  $\delta_m = 1$ , 即可将该修正公式表示为:  $\delta_m = 0.5[1 + \text{sign}(\delta(M_{\text{an}} - M))]$ 。则引入  $\delta_m$  后的能量守恒方程为:

$$\mu_0 k \delta \int \frac{dM_{\text{irr}}}{dH} dH_e = \delta_m \left( \mu_0 \int M_{\text{an}} dH_e - \mu_0 \int M_{\text{an}} dH_e \right) \quad (18)$$

则可得不可逆磁化强度  $M_{\text{irr}}$  对磁场强度  $H$  的微分方程为:

$$\frac{\partial M_{\text{irr}}}{\partial H} = \frac{\delta_m (1 - c(T))(M_{\text{an}} - M)}{\delta k(T)} \quad (19)$$

非磁滞磁化强度

$$M_{\text{an}} = M_s(T_r) [\coth(H_e / a) - (a / H_e)] \quad (20)$$

磁场强度  $H$  与磁化强度  $M$  的偏微分方程为

$$\frac{\partial M}{\partial H} = \frac{\delta_m (c(T)-1)(M - M_{an}) + \delta c(T)k(T) \frac{\partial M_{an}}{\partial H}}{\delta k(T) - \tilde{\alpha}(T)\delta_m (c(T)-1)(M - M_{an})} \quad (21)$$

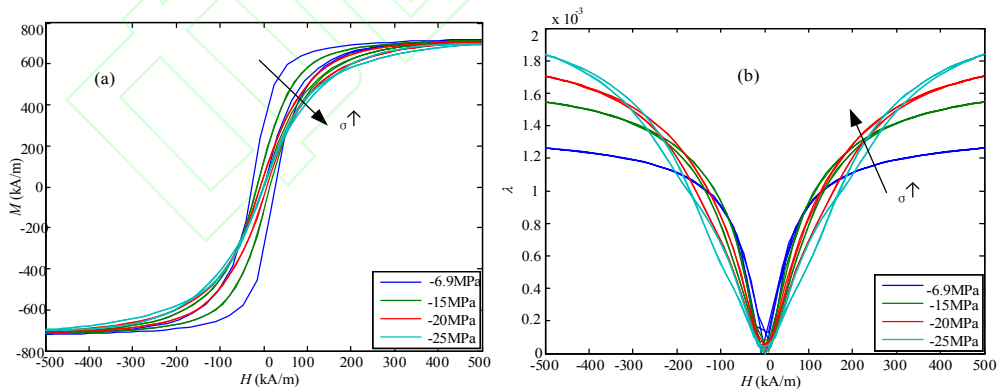
当 J-A 模型参数确定后, 用欧拉法和牛顿法对(20)和(21)式求解可求出磁化强度  $M$ , 绘出  $M-H$  曲线, 求出  $M$  值后可用(14)式求解出 Terfenol-D 材料的磁致伸缩量。其中 Terfenol-D 材料的 J-A 模型参数取值<sup>[2]</sup>如表 1 所示。

表 1 Terfenol-D 材料的 J-A 模型参数取值

参数	数值	参数	数值
饱和磁化强度 $M_s$	765 kA/m	玻尔兹曼常数 $K_B$	$1.38 \times 10^{-23}$ J/K
真空磁导率 $\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m	居里温度 $T_C$	380 °C
畴壁相互作用系数 $\alpha$	0.65	磁-力-热耦合系数 $\beta$	$2.5 \times 10^{-6}$
损耗系数 $k$	7000	可逆磁化系数 $c$	0.2
$\gamma_{11}$	$1.68 \times 10^{-15}$ A <sup>-2</sup> m <sup>2</sup>	$\gamma_{12}$	$-1.18 \times 10^{-23}$ A <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> Pa <sup>-1</sup>
$\gamma_{13}$	$-9.93 \times 10^{-19}$ A <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> /°C	$\gamma_{21}$	$4.73 \times 10^{-28}$ A <sup>-4</sup> m <sup>4</sup>
$\gamma_{22}$	$-1.19 \times 10^{-34}$ A <sup>-4</sup> m <sup>4</sup> Pa <sup>-1</sup>	$\gamma_{23}$	$-2.95 \times 10^{-30}$ A <sup>-4</sup> m <sup>4</sup> /°C

#### 4 J-A 模型计算结果与分析

用欧拉法和牛顿法进行数值求解, 将表 1 中 J-A 模型参数值代入迭代程序中, 即可求解出磁化强度  $M$  的数值解。对 Terfenol-D 棒材在  $T = 20$  °C 时分别求解  $\sigma$  为 -6.9 MPa、-15.3 MPa、-23.6 MPa、-32 MPa 对应的  $M-H$  曲线和  $\lambda-H$  曲线。以及求出  $\sigma = 0$ ,  $T$  为 40 °C、60 °C、80 °C、100 °C 所对应的  $M-H$  曲线和  $\lambda-H$  曲线。在  $T = 20$  °C 时,  $\sigma$  取上述不同值, 对应的  $M-H$  曲线、 $\lambda-H$  曲线如图 3 所示。图 3a 表明, 在不同的压应力作用下,  $M-H$  曲线随着应力  $\sigma$  的增大呈现“翻转效应”。且随着压应力  $\sigma$  的增大,  $M-H$  曲线面积逐渐减小。图 3b 表明, 外加磁场较小时, 压应力  $\sigma$  对 Terfenol-D 棒的磁致伸缩系数  $\lambda$  影响不是很显著; 但外加磁场增强时, 磁致伸缩系数  $\lambda$  随着压应力  $\sigma$  的增大变化显著。且图 4b 表明, 适当的施加压应力可增大  $\lambda-H$  曲线的线性区间。这种线性区间增大的效果在提高以 Terfenol-D 材料为核心的传感器等其他器件的测量精度时, 具有重要意义。

图 3 对应不同压应力( $T = 20$  °C)Terfenol-D 棒的(a) $M-H$  曲线和(b) $\lambda-H$  曲线

在外加预应力  $\sigma = 0$  时,  $T$  取 20 °C、30 °C、40 °C、50 °C、60 °C 不同温度时, 对应的  $M-H$  曲线、 $\lambda-H$  曲线如图 4 所示。图 4a 表明, 磁化强度  $M$  的最大值减小; 不同温度下磁化强度  $M$  随磁场  $H$  的变化趋势与其在不同压应力下随磁场  $H$  的变化趋势相似, 即在不同的温度  $T$  作用下,  $M-H$  曲线随着温度的增高呈现“翻转效应”, 且  $M-H$  曲线面积减小。图 4b 表明, 在不同温度  $T$  下, Terfenol-D 棒的磁致伸缩系数  $\lambda$  在中低磁场中随着磁场  $H$  的增大快速增大, 在高磁场中随着磁场  $H$  的增大趋于饱和。在相同的磁场强度下, 随着温度  $T$  的升高, 所对应的磁化强度  $M$  和磁致伸缩系数  $\lambda$  的值减小。从这一结果中可以看出, 以 Terfenol-D 材料为核心

的传感器等其他器件的测量精度随着温度  $T$  的升高而降低。

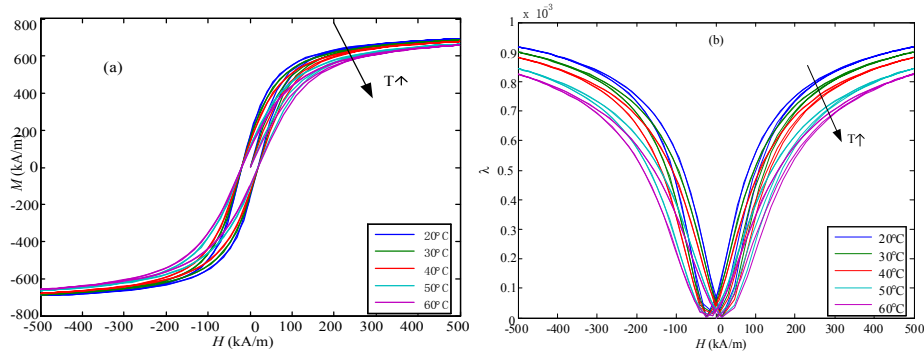


图 4 对应不同温度( $\sigma=0$ )Terfenol-D 棒的(a) $M-H$  曲线和(b) $\lambda-H$  曲线

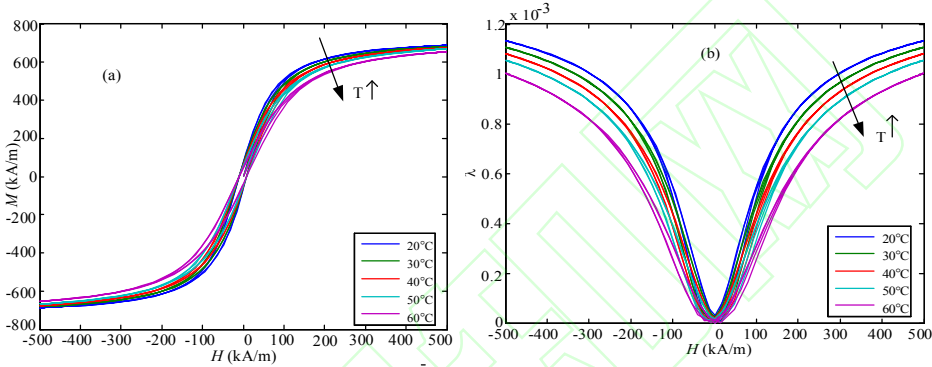


图 5 6.9 MPa 压应力下对应不同温度 Terfenol-D 棒的(a) $M-H$  曲线和(b) $\lambda-H$  曲线

压应力  $\sigma$  取 6.9 MPa、不同温度下的  $M-H$  曲线、 $\lambda-H$  曲线与压应力  $\sigma$  取 0 MPa 时的结果进行对比分析，结果如图 5 所示。

比较图 4 和图 5 可知，对于相同的磁场强度  $H$  和相同的温度，图 5 所对应的 Terfenol-D 棒的磁化强度  $M$ 、磁致伸缩系数  $\lambda$  及  $\lambda-H$  线性区间均比图 4 的大，在相同的磁场、不同温度作用下， $\lambda-H$  线性区间小，这说明，可通过施加一定的压应力来增大 Terfenol-D 棒  $\lambda-H$  的线性区间，从而减小温度对以 Terfenol-D 材料为核心的传感器等其他器件的测量精度的影响。

为了验证所搭建的模型在温度、应力和磁场的耦合作用下，比现有的模型更能体现 Terfenol-D 棒的温度特性。结合以上的仿真分析结果，在此取相同应力、不同温度对比分析本文搭建的模型与比较全面的文献[2]模型 Terfenol-D 棒的温度特性。

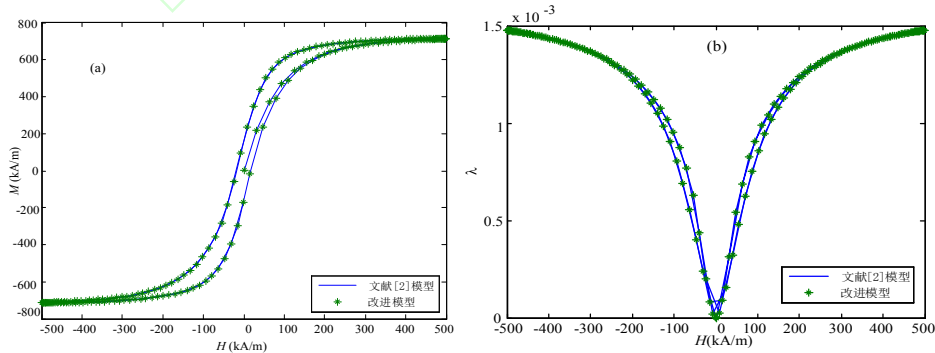


图 6  $\sigma = -6.9$  MPa、 $T = 20$  °C 的(a) $M-H$  曲线和(b) $\lambda-H$  曲线

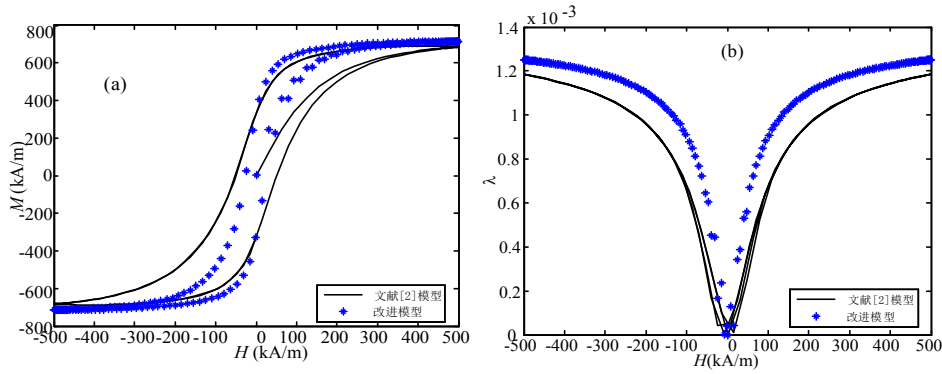
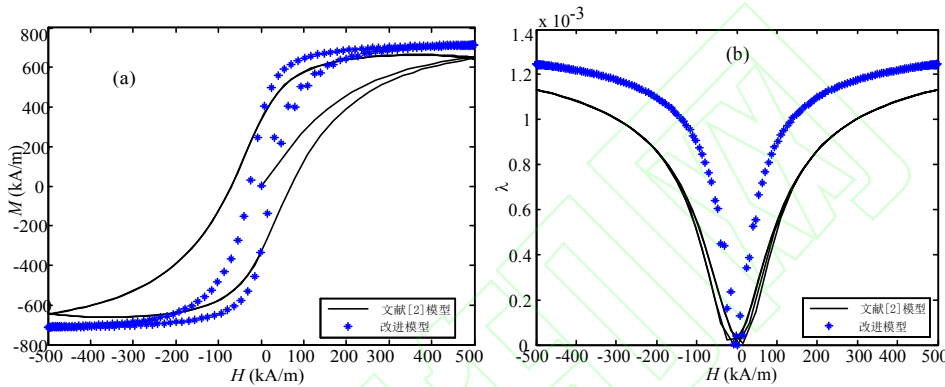
图 7  $\sigma = -6.9 \text{ MPa}$ 、 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  的(a) $M-H$  曲线和(b) $\lambda-H$  曲线图 8  $\sigma = -6.9 \text{ MPa}$ 、 $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  的(a) $M-H$  曲线 和(b) $\lambda-H$  曲线

图 6、7、8 为  $\sigma = -6.9 \text{ MPa}$ 、 $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$  时用本文构建的应力-温度-磁场耦合 J-A 模型与文献 [2] 建的模型求解出的  $M-H$  曲线  $\lambda-H$  曲线的对比。由图 6 可以看出, 用本文构建的应力-温度-磁场耦合 J-A 模型在应力的作用下, Terfenol-D 棒的  $M-H$  曲线与前人搭建的 J-A 模型的所描绘的磁滞回线基本一致, 但本文模型描的  $\lambda-H$  曲线中磁滞伸缩系数  $\lambda$  最大值与其线性区间有所增大。由图 7 和图 8 可看出, 本文搭建的磁力-热耦合的 J-A 模型求解的  $M-H$  曲线的线性区间更大, 其面积更小, 磁化强度  $M$  的最大值也在增大;  $\lambda-H$  曲线的线性区间和磁致伸缩系数  $\lambda$  也在增大, 温度越高这种效果越明显。出现这种线性区间的增大主要原因是本文模型考虑了磁场-应力-温度耦合对有效场有贡献。

## 5 结论

超磁滞伸缩材料的磁滞特性的建模一直是以其为核心传感器件研究的关键, 所以该文在经典 J-A 模型及前人的工作基础上, 在温度、磁场和应力场多场耦合的作用下, 搭建出多场耦合 J-A 模型, 其仿真结果表明:

(1) 在室温下随着压应力  $\sigma$  的增大, Terfenol-D 棒的磁致伸缩系数  $\lambda$  增大; 在无压应力 ( $\sigma = 0$ ) 作用下, 随着温度的升高, Terfenol-D 棒的磁致伸缩系数  $\lambda$  减小且  $\lambda-H$  线性区间减小。则表明在温度的影响下通过施加一定的压应力  $\sigma$  可以增大 Terfenol-D 棒的磁致伸缩系数和  $\lambda-H$  线性区间。

(2) 在温度的影响下, 通过将所搭建的多场耦合 J-A 模型与现有 J-A 模型相比, 新模型下的  $M-H$  曲线和  $\lambda-H$  曲线的线性区间比较大, 从而表明本文模型优于现有的模型, 且对提高以 Terfenol-D 棒为核心的传感器等其他器件的测量精度的意义重大。

## 参考文献:

- [1] 梁铁瑞, 郑晓静. Terfenol-D 力-磁-热耦合动态特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(6): 112-118.
- [2] 王莉. 基于超磁致伸缩材料与光纤光栅的电流传感理论及实验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [3] 何汉林. GMM 动态迟滞特性建模及其参数辨识[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [4] 宋道军. 电流互感器的建模及其在输电线路取能电源中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.



- [5] Jiles D C. Modelling the effects of eddy current losses on frequency dependent hysteresis in electrically conducting media [J]. IEEE Trans Magn, 1994, 30(6): 4326-4328.
- [6] Jiles D C, Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis [J]. J Magn Magn Mater, 1986, 61(1): 48-60.
- [7] 熊兰, 周健瑶, 宋道军, 等. 基于改进 J-A 磁滞模型的电流互感器建模及实验分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 482-488.
- [8] 李超, 徐启峰. J-A 模型误差修正和温度特性仿真[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 232-238.
- [9] 汪淑容. 基于超磁致伸缩材料和光纤光栅的电流传感技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [10] 李青峰. 基于混合算法的 J-A 磁滞模型的实现[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2010.
- [11] 万永平, 万岱山, 黄克智. 磁致伸缩材料的非线性本构关系[J]. 力学学报, 2001, (6): 749-757.
- [12] 袁惠群, 孙华刚. 超磁致伸缩材料磁滞回非线性特性分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 180-18.
- [13] 李超, 徐启峰. J-A 模型误差修正和温度特性仿真[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 232-238.
- [14] Dapino M J, Smith R C, Faidley L A E, et al. A coupled structural-magnetic strain and stress model for magnetostrictive transducers [J]. J Intell Mater Sys Struc, 2000, 11(2): 135-152.
- [15] Dapino M J, Smith R C, Flatau A B. Structural magnetic strain model for magnetostrictive transducers [J]. IEEE Trans Magn, 2000, 36(3): 545-556.

作者简介: 张生艳(1994—), 女, 甘肃靖远人, 汉族, 硕士研究生, 研究方向为光纤光栅传感。