

# 超磁致伸缩材料高频磁能损耗特性测试与分析

黄文美<sup>1,2</sup> 郜春艳<sup>1,2</sup> 王博文<sup>1</sup> 翁玲<sup>2</sup> 李亚芳<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;

2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130)

**摘要:** 为进一步研究超磁致伸缩材料磁能损耗特性, 将棒状 Terfenol-D 材料沿着不同磁化方向进行切片, 制成多个方形环状薄片样品, 对比分析了材料磁化方向以及样品尺寸对磁能损耗的影响。在不同驱动磁场频率和磁密幅值下, 对磁能损耗进行测试, 分析损耗实测数值变化趋势。基于损耗分离法, 结合实测数据, 考虑了材料内部涡流集肤效应及动态磁滞特性等影响, 对高频磁能损耗进行了数值模拟, 研究各项损耗系数变化规律。结果表明, Terfenol-D 材料高频磁能损耗随着频率及磁密幅值增加, 整体呈数值增大、增速加快趋势。在高频下, 损耗系数为随着频率和磁密幅值变化的变量。当频率大于 5 kHz、磁密幅值大于 0.05 T 时, 数值模拟方法所得计算值与实测值的平均误差为 3%。

**关键词:** 超磁致伸缩材料; 磁能损耗; 频率; 磁密幅值; 损耗系数

**中图分类号:** TH142; TB552 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0420-07

## Test and Analysis of High Frequency Magnetic Energy Losses Characteristics for Giant Magnetostrictive Materials

HUANG Wenmei<sup>1,2</sup> GAO Chunyan<sup>1,2</sup> WANG Bowen<sup>1</sup> WENG Ling<sup>2</sup> LI Yafang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Experimental and calculating analysis of magnetic losses for giant magnetostrictive materials is necessary steps for the design of high power magnetostrictive transducer. In order to further research the magnetic energy losses characteristics, a Terfenol-D rod was sectioned along different directions, and these slices were made into several square annular sheet samples. The influences of magnetization direction and dimension parameter on the magnetic losses were compared and analyzed. Under different frequency and magnetic density of driving magnetic field, the magnetic energy losses were measured to analyze the variation trends of the losses. Based on the loss separation formula and measured data, the effects of eddy current skin effect and dynamic hysteresis characteristics were taken into consideration. The variation trends of the losses coefficients were investigated with numerical simulation. The results showed that the high frequency magnetic energy losses for Terfenol-D were increased rapidly in both value and growth rate with the increase of frequency and magnetic density. When the frequency was 5 kHz, the losses were increased from 2.742 W/kg to 153.890 W/kg as the flux density was varied from 0.01 T to 0.09 T. The losses were increased by 55.12 times. When the flux density was 0.05 T, the losses were increased from 8.138 W/kg to 319.428 W/kg as the frequency was increased from 1 kHz to 20 kHz. The losses were increased by 38.25 times. The losses coefficients varied with high frequency and magnetic density. When the frequency was above 5 kHz and the magnetic density was higher than 0.05 T, the average error of the model between the calculated value and the measured value was 3%. The numerical model was suitable for calculating high magnetic energy losses of Terfenol-D. It can provide a theoretical and experimental guidance for the high frequency applications of magnetostrictive materials.

**Key words:** giant magnetostrictive materials; magnetic energy losses; frequency; magnetic density; losses coefficients

收稿日期: 2018-08-30 修回日期: 2018-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777053)和河北省高层次人才项目(C2015003037)

作者简介: 黄文美(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事磁性材料与器件、电机电器及其控制研究,E-mail: 13752620879@163.com

## 0 引言

超磁致伸缩材料 Terfenol-D 是一种在磁场作用下能发生较大形变的金属功能材料,因其具有磁致伸缩应变大( $1.6 \times 10^{-3}$ )、响应速度快(纳秒级)、能量密度高( $2.5 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ )等优点,在大功率水声、超声应用领域优势十分显著<sup>[1-2]</sup>,这些应用都需要 Terfenol-D 工作于高频驱动磁场条件下。在高频驱动磁化过程中,驱动磁场频率会影响材料有效磁场的大小和滞后性。因此对高频下 Terfenol-D 磁能损耗进行数值计算及实验分析,是大功率超磁致伸缩换能器结构设计、多场耦合模型研究以及温控系统设计的重要前提和基础<sup>[3-5]</sup>。

传统意义上磁能损耗被分为磁滞损耗和涡流损耗,其大小是通过标准线圈在不同驱动频率和磁密幅值下的正弦波来进行计算与测量<sup>[6]</sup>,此方法适合于低频且不考虑涡流集肤效应的情况。传统损耗分离法得到的 Terfenol-D 高频磁能损耗计算值与实测值之间出现较大偏差。当考虑材料内部涡流集肤效应、动态磁滞特性以及磁畴运动等影响因素时,各项损耗系数不再为常数,而是能够反映频率和磁密幅值依赖关系的变量。

文献[7]在考虑驱动频率与磁化方向的基础上,通过改进 JA 模型来研究损耗动态磁滞特性,其数学表达式参数较多,公式复杂,不适用于实际工程。文献[8]研究了复杂激励条件下磁能损耗计算方法,对环形非晶和纳米晶磁芯进行了磁能损耗测量和实验验证,其适用于中低频激励条件下。文献[9]提出考虑涡流集肤效应的改进铁损计算公式,其计算值与实测值具有较好的一致性,适用于电工钢片损耗计算。

本文沿棒状 Terfenol-D 轴向和径向分别切片,制成多个方形环状薄片样品,测量在不同驱动磁场频率和磁密幅值下磁能损耗数值,分析磁化方向以及样品尺寸参数对损耗的影响。在损耗分离法的基础上,考虑材料内部涡流集肤效应及动态磁滞特性等影响因素,通过对实测数据进行数值模拟,获得能够反映材料中频率和磁密幅值依赖关系的高频磁能损耗及各项损耗系数变化曲线。通过磁能损耗实测值与计算值对比分析曲线,验证该数值模拟方法对高频下 Terfenol-D 磁能损耗计算的适用性和正确性。

## 1 磁能损耗计算方法

现有正弦激励下磁能损耗计算方法主要分为:

①以物理现象为依据的磁滞模型。②以实验数据拟

合为依据的经验公式法。③以假设损耗可分离为依据的损耗分离法。

### 1.1 磁滞模型

磁滞模型是以物理现象为基础的损耗模型,主要有 Preisach 模型和 Jiles-Atherton (J-A) 模型。Preisach 模型是基于磁畴运动在时间与空间上的统计,而 J-A 模型是基于宏观能量的计算。利用这两种模型来计算磁能损耗具有很高的精度,更适用于静态或准静态条件。由于模型复杂且参数识别过程繁琐,计算量大,使得这两种模型在工程实践尤其是中高频激励下使用较少<sup>[10-11]</sup>。

### 1.2 经验公式法

Steinmetz 在 1892 年提出以实验数据拟合为依据的单位体积内磁能损耗计算方法<sup>[12]</sup>,称之为经验公式法,即

$$p = \eta f^\alpha B_m^\beta \quad (1)$$

式中  $p$ ——磁能损耗  $f$ ——磁场频率  
 $B_m$ ——磁密幅值  
 $\eta, \alpha, \beta$ ——损耗系数

损耗系数与材料磁特性相关。经验公式法涉及的参数少,计算过程简单。此方法忽略了材料各项磁参数及尺寸对磁能损耗的影响,尤其在高频驱动条件下,由此计算的磁能损耗与实测值相差较大,误差不可忽略<sup>[13]</sup>。

### 1.3 损耗分离法

损耗分离法是 Bertotti 根据磁能损耗产生的不同机理提出的计算模型。该模型把损耗分为磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗,简化了磁能损耗的分析过程,其计算精度得到了较大的提高<sup>[14]</sup>。

磁滞损耗  $p_h$  是铁磁材料在磁化过程中用于克服磁畴旋转摩擦而损失的能量,计算公式为

$$p_h = k_h f B_m^\alpha \quad (2)$$

式中  $k_h$ ——磁滞损耗系数

损耗系数与材料的本征特性有关<sup>[15]</sup>。因此当磁密幅值和磁场频率一定时,多个样品之间的损耗差异主要是涡流损耗和异常损耗。

涡流损耗  $p_e$  与磁密幅值及材料电阻率  $\rho$  有关,其计算式为

$$p_e = \frac{\pi A_c V_c}{4\rho} f^2 B_m^2 \quad (3)$$

式中  $A_c$ ——材料横截面积

$V_c$ ——材料体积

异常损耗  $p_a$  是铁磁材料中的弛豫现象引发的损耗,与磁场频率、材料磁特性、电阻率等密切相关,其计算表达式为

$$p_a = 3.5V_c \sqrt{\frac{2\pi A_c a n_0}{\rho}} f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (4)$$

式中  $a$ 、 $n_0$ ——常数

当通入正弦驱动时,单位质量的磁能损耗计算式为

$$p = p_h + p_e + p_a \quad (5)$$

根据式(2)~(5)得出磁能损耗计算式为

$$p = k_h f B_m^\alpha + \frac{\pi A_c V_c}{4\rho} f^2 B_m^2 + 3.5V_c \sqrt{\frac{2\pi A_c a n_0}{\rho}} f^{1.5} B_m^{1.5} = k_h f B_m^\alpha + k_e (f B_m)^2 + k_a (f B_m)^{1.5} \quad (6)$$

式中  $k_e$ ——涡流损耗系数

$k_a$ ——异常损耗系数

涡流损耗系数和异常损耗系数变化规律与电阻率、材料尺寸等有关。在高频时,考虑材料内部涡流集肤效应及动态磁滞特性,此时损耗系数不再为常数,而是随频率和磁密幅值变化的变量。

同磁滞模型相比,损耗分离法简化了计算模型,涉及的参数较少;相比于经验公式法,损耗分离法将材料各项磁参数及尺寸对磁能损耗的影响考虑在内,计算精度得以提高,因此逐渐发展用于各类电磁材料及设备的磁能损耗计算<sup>[16-18]</sup>。

## 2 实验方法与测试系统

实验中 Terfenol-D 为薄片环状样品,首先沿着材料径向和轴向分别切片,将其制成外边长 10 mm × 10 mm,内边长为 4 mm × 4 mm,厚度为 2 mm 的方形薄片样品 1 和样品 2。样品 1 和样品 2 驱动线圈选用 20 匝、线径为 0.5 mm 的漆包线,取样线圈选用 10 匝、线径为 0.15 mm 的漆包线。再沿轴向切片,将其制成外边长为 20 mm × 10 mm,内边长为 14 mm × 4 mm,厚度为 2 mm 的长方形薄片样品 3,驱动线圈选用 66 匝、线径为 0.5 mm 的漆包线,取样线圈选用 10 匝、线径为 0.15 mm 的漆包线。如图 1 所示。

基于 Terfenol-D 薄片的动态磁特性测试系统如图 2 所示。其工作原理:为了给驱动线圈提供所需的正弦交变磁场,首先由信号发生器向功率放大器输入给定频率的正弦交变电流。同时感应电动势从取样线圈的两端产生。环中磁场强度的变化由采样电阻上的电压反映;同时积分放大电路和取样线圈相连,通过放大电路中电容电压来反映材料中磁感应强度的变化。用示波器同时采集通过积分放大电路的感应电动势和通过采样电阻的驱动线圈的信号,将采集到的数据导入计算机中,并绘制出动态磁滞回线。通过计算磁滞回线面积获得磁能损耗<sup>[19]</sup>。

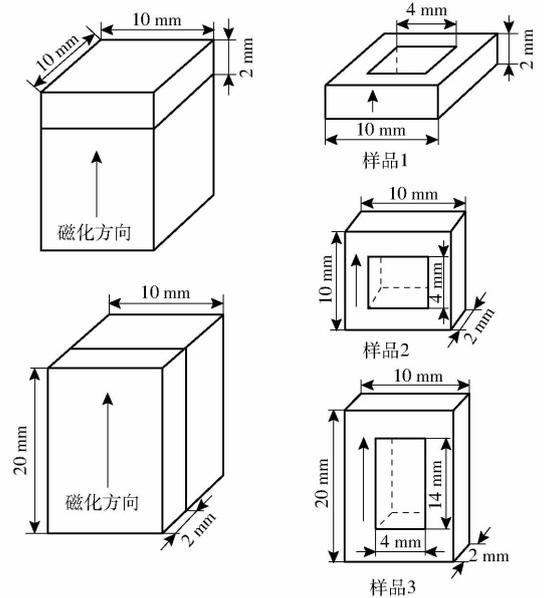


图 1 切片样品示意图

Fig. 1 Schematic of each sample

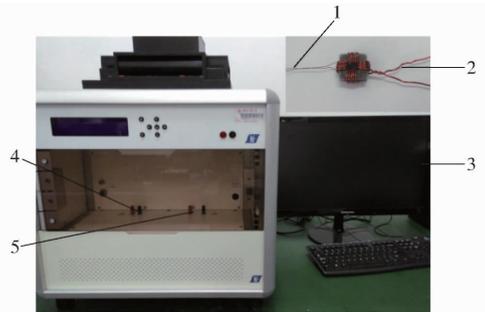


图 2 环状 Terfenol-D 样品的动态磁特性测试系统

Fig. 2 Dynamic magnetic measurement system for Terfenol-D

1. 取样线圈 2. 驱动线圈 3. 计算机 4. 取样线圈接线柱
5. 驱动线圈接线柱

## 3 损耗影响因素

### 3.1 磁化方向

为了研究磁化方向对 Terfenol-D 磁能损耗的影响,在驱动磁场频率  $f = 5$  kHz 时,在不同磁场强度  $H = 3$  kA/m 和磁密幅值  $B_m = 0.05$  T 时,分别测试样品 1 和样品 2 的动态磁滞回线,从曲线上可以获得振幅磁导率  $\mu_m$  及磁能损耗  $p$ 。

振幅磁导率计算公式为

$$\mu_m = B_m / (\mu_0 H_m) \quad (7)$$

式中  $\mu_0$ ——真空磁导率

$H_m$ ——磁场强度峰值

图 3 为 Terfenol-D 在驱动频率为 5 kHz 时,  $H = 3$  kA/m 时各个样品的动态磁滞回线。所测得的各个样品振幅磁导率及磁能损耗如表 1 所示。其中样品 2 与样品 1 相比,曲线上横向变宽、面积增大,其振幅磁导率较高,产生的磁密幅值较大。

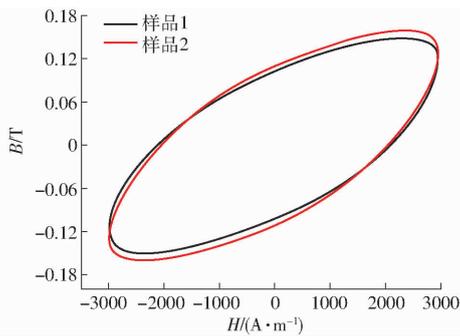
图 3 样品 1 和样品 2 的动态磁滞回线 ( $H = 3 \text{ kA/m}$ )

Fig. 3 Dynamic hysteresis loops of samples 1 and 2

( $H = 3 \text{ kA/m}$ )

表 1 各个样品的数据对比

Tab. 1 Data comparison of each sample

样品	$H = 3 \text{ kA/m}$		$B_m = 0.05 \text{ T}$	
	$\mu_m$	$p/(W \cdot \text{kg}^{-1})$	$\mu_m$	$p/(W \cdot \text{kg}^{-1})$
样品 1	39.8	358.986	27.3	53.693
样品 2	42.5	382.088	29.9	52.662
样品 3	18.8	203.542	16.5	120.702

图 4 为 Terfenol-D 在驱动频率为 5 kHz 时,  $B_m = 0.05 \text{ T}$  时各个样品的动态磁滞回线。所获振幅磁导率以及磁能损耗如表 1 所示。其中样品 1 与样品 2 相比, 曲线上横向变宽、面积增大。当磁密幅值一定时, 样品 2 所需磁场强度较小, 振幅磁导率较高且磁能损耗较低。

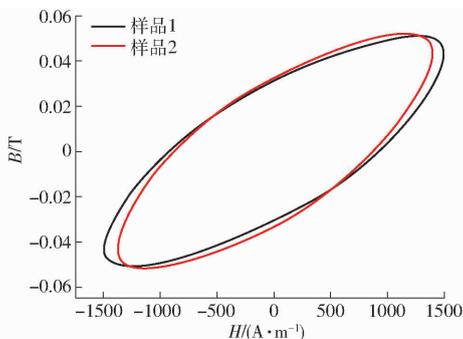
图 4 样品 1 和样品 2 的动态磁滞回线 ( $B_m = 0.05 \text{ T}$ )

Fig. 4 Dynamic hysteresis loops of samples 1 and 2

( $B_m = 0.05 \text{ T}$ )

由此可知材料磁化方向对材料本身包括振幅磁导率和磁能损耗等磁特性参数产生影响, 在沿着棒状材料的轴心方向(轴向), 即 Terfenol-D 易磁化方向上, 材料具有较好的导磁性和低损耗特性<sup>[20]</sup>。

### 3.2 尺寸参数

为了探究样品尺寸对 Terfenol-D 磁能损耗的影响, 在驱动磁场频率  $f = 5 \text{ kHz}$  时, 在不同磁场强度  $H = 3 \text{ kA/m}$  和磁密幅值  $B_m = 0.05 \text{ T}$  时, 分别测试样品 2 和样品 3 的动态磁滞回线。

图 5 为 Terfenol-D 在驱动频率为 5 kHz 时,  $H = 3 \text{ kA/m}$  时各个样品的动态磁滞回线。所获振

幅磁导率以及磁能损耗如表 1 所示。可以看出, 样品 2 和样品 3 相比而言, 其曲线横向变宽、面积增大, 振幅磁导率较高, 产生的磁密幅值较大。

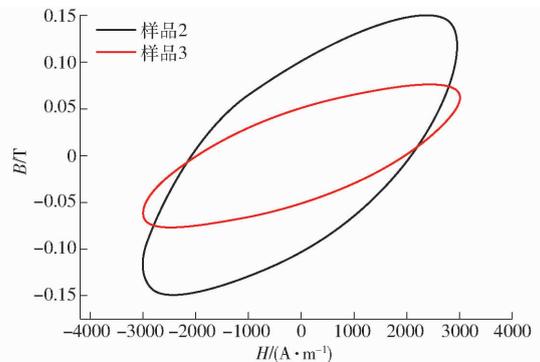
图 5 样品 2 和样品 3 的动态磁滞回线 ( $H = 3 \text{ kA/m}$ )

Fig. 5 Dynamic hysteresis loops of samples 2 and 3

( $H = 3 \text{ kA/m}$ )

图 6 为 Terfenol-D 在驱动频率为 5 kHz 时,  $B_m = 0.05 \text{ T}$  时各个样品的动态磁滞回线。所获振幅磁导率以及磁能损耗如表 1 所示。可知, 样品 3 与样品 2 相比而言, 其曲线上横向变宽、面积增大。当磁密幅值一定时, 样品 2 所需的磁场强度较低, 磁能损耗较低, 振幅磁导率较高。由此可知, 为保证高导磁特性的同时能够降低材料磁能损耗, 在设计以 Terfenol-D 为核心部件的超磁致伸缩换能器件时, 需考虑材料横截面积、叠片厚度以及体积等尺寸参数。

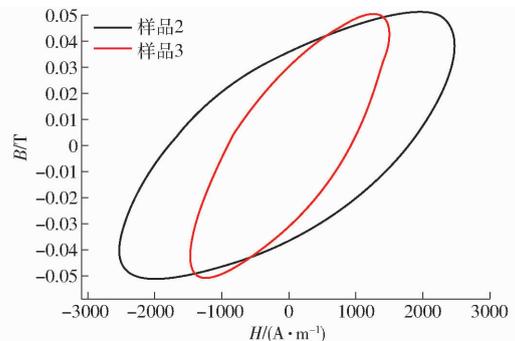
图 6 样品 2 和样品 3 的动态磁滞回线 ( $B_m = 0.05 \text{ T}$ )

Fig. 6 Dynamic hysteresis loops of samples 2 and 3

( $B_m = 0.05 \text{ T}$ )

## 4 磁能损耗实测值与计算值对比

### 4.1 损耗系数

以样品 1 的实测数据为例, 据 1 ~ 20 kHz 的实测损耗数据进行数值模拟获得各项损耗系数  $k_h$ 、 $\alpha$ 、 $k_e$ 、 $k_a$ , 分析其变化趋势。图 7 ~ 9 为各项损耗系数随着磁密幅值变化曲线。由图可知, 当考虑材料内部涡流集肤效应、动态磁滞特性以及磁畴运动等影响因素时, 各项损耗系数不再为常数, 而是能够反映频率和磁密幅值依赖关系的变量。

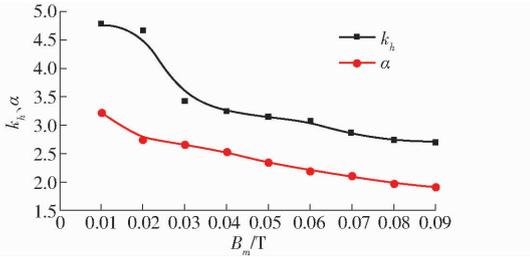
图7 磁滞损耗系数  $k_h$  和  $\alpha$  随磁密幅值变化曲线

Fig.7 Changing curves of hysteresis losses coefficients with magnetic density

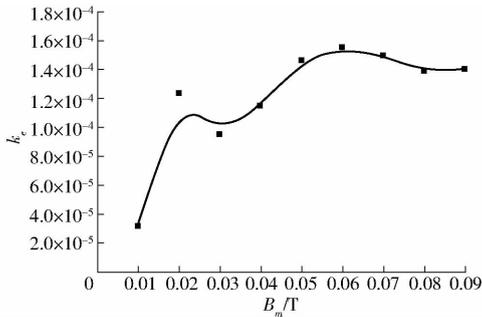
图8 涡流损耗系数  $k_e$  随磁密幅值变化曲线

Fig.8 Changing curves of eddy current losses coefficient with magnetic density

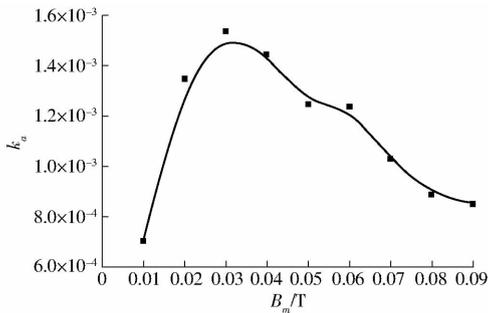
图9 异常损耗系数  $k_a$  随磁密幅值变化曲线

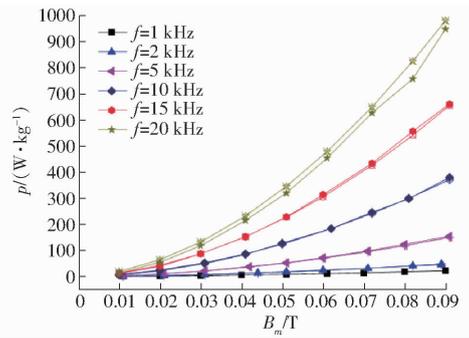
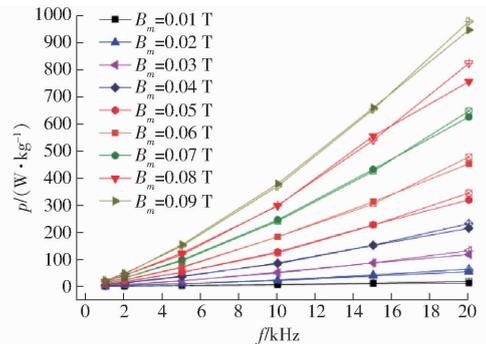
Fig.9 Changing curves of anomalous losses coefficient with magnetic density

磁滞损耗系数、涡流损耗系数及异常损耗系数虽然是通过曲线拟合获得的,但可通过变化关系对各项系数进行物理意义的解释。在考虑高频下涡流集肤效应以及动态磁滞特性的基础之上,磁滞损耗系数  $k_h$ 、 $\alpha$  随磁密幅值增大而减小(图7),反映了材料磁滞回线面积变化趋势及内部磁畴壁的运动情况。涡流损耗系数  $k_e$  受到涡流集肤效应的影响,涡流损耗系数逐渐增大(图8)。当材料在弱磁场驱动下,磁畴壁缓慢运动,强磁场驱动下磁畴快速运动,被磁化到饱和状态时,磁畴壁消失,异常损耗系数逐渐减小,与硅钢片  $k_a$  规律一致<sup>[3,9]</sup>(图9)。

#### 4.2 磁能损耗实测值与计算值对比与分析

在考虑材料内部涡流集肤效应及动态磁滞特性等影响因素的基础上,对高频磁能损耗实测数据进行数值模拟,得到模拟计算值与实测值对比曲线,如图10、

11所示,图中实心点为实测值,空心点为计算值。

图10 不同频率下损耗模拟值与实测值对比曲线  
Fig.10 Comparison curves of simulated and measured losses at different frequencies图11 不同磁密幅值下模拟值与实测值对比曲线  
Fig.11 Comparison curves of simulated and measured losses at different magnetic densities

不同频率下磁能损耗随磁密幅值的变化曲线如图10所示。可以看出,磁能损耗实测值随磁密幅值的变化趋势与数值模拟法所得计算值保持一致,变化趋势为数值增大,增速加快。当频率为5 kHz时,随着磁密幅值从0.01 T到0.09 T时,损耗实测值从2.742 W/kg变化到153.890 W/kg,增加了55.12倍。

不同磁密幅值下损耗数值模拟所得的计算值与实测值随频率变化对比曲线如图11所示,当磁密幅值为0.05 T时,频率从1 kHz到20 kHz,损耗从8.138 W/kg增加到319.428 W/kg,损耗增加了38.25倍。图10和图11表明,当频率低于5 kHz时,磁能损耗增速较缓。当频率大于5 kHz时,损耗增速较快。当峰值通量密度低于0.05 T时,损耗增长缓慢。当峰值通量密度高于0.05 T时,损耗增长较快。

图12为不同频率下损耗数值模拟的计算值与实测值的误差随磁密幅值变化曲线,由图可知,低频频低磁密幅值时损耗数值模拟的计算值和实测值之间最大误差为15%,随着频率的升高,误差逐渐变小,5~15 kHz之间平均误差为4%;随着磁密幅值的增大,误差逐渐变小,当磁密幅值高于0.05 T时,计算值和实测值的平均误差为3%,说明考虑涡流集肤

效应以及动态磁滞特性的数值模拟方法适用于高频磁能损耗的计算,可用于预测实验范围内其他频率段的 Terfenol - D 磁能损耗。

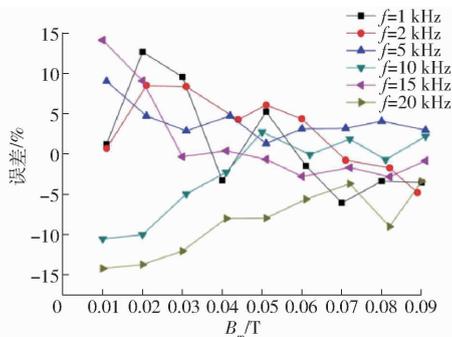


图 12 不同频率下误差随磁密幅值变化曲线

Fig. 12 Changing curves of error with magnetic density at different frequencies

## 5 结论

(1) 考虑磁化方向的影响时,当磁场强度为定

值时,沿易磁化方向切片的样品 2 相比样品 1 而言磁导率较高,磁密幅值较大。当磁密幅值为定值时,样品 2 所需的磁场强度较低,磁能损耗较小。考虑尺寸参数的影响时,当磁场强度为定值时,尺寸参数小的样品 2 相比于样品 3 而言磁导率较高,磁密幅值较大,当磁密幅值为定值时,样品 2 磁导率高,所需磁场强度较小。可用于指导高频磁致伸缩换能器件的电磁和机械结构设计。

(2) 通过对比磁能损耗数值模拟的计算值与实测值可知,各项损耗系数在高频下不为常数,而是随着频率和磁密幅值变化的变量,所采用的基于损耗分离法和少量实验数据的考虑涡流集肤效应及动态磁滞特性的损耗数值模拟方法适用于高频下磁致伸缩材料的磁能损耗计算,可作为建立磁致伸缩材料和器件在高频激励条件下多场耦合模型的基础。

## 参 考 文 献

- [1] 李立毅,严柏平,张成明. 驱动频率对超磁致伸缩致动器的损耗和温升特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2011, 31(18):124 - 129.  
LI Liyi, YAN Boping, ZHANG Chengming. Influence of frequency on characteristic of loss and temperature in giant magnetostrictive actuator [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 124 - 129. (in Chinese)
- [2] 李淑英,王博文,周严,等. 叠层复合磁致伸缩材料驱动器的输出位移特性[J]. 仪器仪表学报,2009,30(1):71 - 75.  
LI Shuying, WANG Bowen, ZHOU Yan, et al. Output displace of actuator based on Terfenol - D multilayered composite [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(1):71 - 75. (in Chinese)
- [3] ZHU J G, RAMSDEN V S. Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998,34(4):2234 - 2242.
- [4] HUANG Wenmei, SONG Guiying, SUN Ying, et al. Numerical dynamic strong coupled model of linear magnetostrictive actuators [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 391 - 394.
- [5] 鞠晓君,林明星,范文涛,等. 超磁致伸缩至动器结构分析及输出力特性研究[J]. 仪器仪表学报,2017,39(5):1198 - 1206.  
JU Xiaojun, LIN Mingxing, FAN Wentao, et al. Structure analysis and output force characteristic study of giant magnetostrictive actuators [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 39(5):1198 - 1206. (in Chinese)
- [6] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1):621 - 630.
- [7] LI Yang, ZHU Lihua, ZHU Jianguo. Core loss calculation based on finite-element method with Jiles - Atherton dynamic hysteresis model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3):1300105.
- [8] 张宁,李琳,魏晓光. 非正弦驱动下磁心损耗的计算方法及实验验证[J]. 电工技术学报,2016, 31(17):224 - 232.  
ZHANG Ning, LI Lin, WEI Xiaoguang. Calculation method and experimental verification of core losses under non-sinusoidal excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17):224 - 232. (in Chinese)
- [9] 李劲松,杨庆新,李永建,等. 高频高磁密时叠置硅钢片的铁芯损耗计算式改进[J]. 高电压技术,2016, 42(3):994 - 1002.  
LI Jingsong, YANG Qingxin, LI Yongjian, et al. Improved calculation formula of core losses for laminated silicon steels at high frequency and high flux density[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 994 - 1002. (in Chinese)
- [10] ZHU Y, LI Y. A hysteresis nonlinear model of giant magnetostrictive transducer [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(16):2242 - 2255.
- [11] 李长云,刘亚魁. 直流偏磁条件下变压器铁心磁化特性的 Jiles - Atherton 修正模型[J]. 电工技术学报,2017, 32(19): 193 - 201.  
LI Changyun, LIU Yakui. Modified Jiles - Atherton model of transformer iron core magnetization characteristics with DC bias [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19):193 - 201. (in Chinese)
- [12] SU W M, MAO S H, WANG P J. Core losses estimation in design of high speed electric machines [C] // Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 2016:320 - 323.

- [13] 李永建,王利祥,张长庚,等. 基于三维励磁结构的电工磁材料动态磁特性测试与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1):166-174.  
LI Yongjian, WANG Lixiang, ZHANG Changgeng, et al. Dynamic magnetic properties testing and analysis of the electric magnetic materials based on three-dimensional excitation structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1):166-174. (in Chinese)
- [14] 翁玲,曹晓宁,梁淑智,等. 棒状铁镓合金磁滞特性和功耗特性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2):411-418.  
WENG Ling, CAO Xiaoning, LIANG Shuzhi, et al. Analysis of hysteresis and power consumption characteristics of Fe-Ga rod alloy [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):411-418. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180253&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180253&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.053. (in Chinese)
- [15] 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5):344-349.  
SHU Liang, LI Chuan, WU Guichu, et al. Magnetization model of Fe-Ga alloy magnetostrictive force sensor and its characteristics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):344-349. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150548&flag=1&iournal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150548&flag=1&iournal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.048. (in Chinese)
- [16] LI J S, YANG Q X, LI Y J, et al. Anomalous loss modeling and validation of magnetic materials in electrical engineering [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):8800105.
- [17] 孔庆奕,程志光,李悦宁. 取向硅钢片在不同环境温度下的磁特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2743-2749.  
KONG Qingyi, CHENG Zhiguang, LI Yuening. Magnetic properties of oriented silicon steel sheet under different ambient temperatures [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9):2743-2749. (in Chinese)
- [18] 王博文,张露予,王鹏,等. 磁致伸缩位移传感器检测信号分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):358-364.  
WANG Bowen, ZHANG Luyu, WANG Peng, et al. Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2):358-364. (in Chinese)
- [19] TU J Z, ZHANG J, BU G Q, et al. Analysis of the sending-side system instability caused by multiple HVDC commutation failure [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4):37-44.
- [20] ZHANG T, YANG B T, LI H G, et al. Dynamic modeling and adaptive vibration control study for giant magnetostrictive actuators [J]. Sensors & Actuators a Physical, 2013, 190(2):96-105.

~~~~~

(上接第 410 页)

- [16] ZARGARBASHI S H H, MAYER J R R. Assessment of machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14):1823-1834.
- [17] JIANG L, DING G, LI Z, et al. Geometric error model and measuring method based on worktable for five-axis machine tools [J]. Proc IMech E Part B Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(1):32-44.
- [18] FU G, FU J, XU Y, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89:170-181.
- [19] 田文杰,郭龙真,刘海涛. 数控机床几何误差源的快速辨识方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(2):171-177.  
TIAN Wenjie, GUO Longzhen, LIU Haitao. Rapid identification method for geometric errors of CNC machine tools[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(2):171-177. (in Chinese)
- [20] ZHU S, DING G, QIN S, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 52(1):24-29.
- [21] CHEN D, DONG L, BIAN Y, et al. Prediction and identification of rotary axes error of non-orthogonal five-axis machine tool [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94:74-87.
- [22] LI H, GUO J, DENG Y, et al. Identification of geometric deviations inherent to multi-axis machine tools based on the pose measurement principle[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(12):125008.
- [23] HONG C, IBARAKI S, OYAMA C. Graphical presentation of error motions of rotary axes on a five-axis machine tool by static R-test with separating the influence of squareness errors of linear axes [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 59:24-33.
- [24] GUO S, JIANG G, ZHANG D, et al. Position-independent geometric error identification and global sensitivity analysis for the rotary axes of five-axis machine tools[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(4):045006.
- [25] XIANG S, ALTINTAS Y. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101:65-78.