

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905045

TbDyFe 合金的高频动态磁特性及损耗特性分析*

黄文美^{1,2}, 吴晓晴^{1,2}, 李亚芳^{1,2}, 翁玲^{1,2}

(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: TbDyFe 合金可应用于高频乃至超声频率器件中, 高频磁场 ($f > 1$ kHz) 下 TbDyFe 合金 (Terfenol-D) 磁滞现象及损耗严重。研究不同厚度 TbDyFe 合金叠片的动态磁特性及损耗特性对于设计高频范围的器件至关重要。采用 AMH-1M-S 型动态磁特性测试系统测量了不同厚度 TbDyFe 合金叠片在不同驱动磁场频率和磁密幅值下的动态磁滞回线。基于动态磁性理论和损耗计算模型, 对比分析了不同厚度 TbDyFe 合金叠片的动态磁特性参数, 并对高频范围内的损耗机理进行了深入研究。实验结果表明, 当磁密幅值 $B_m = 0.05$ T、频率为 5 kHz 时, 1 mm 厚叠片结构样品与单片 2 mm 厚样品相比, 动态磁滞回线横向变窄, 所需磁场强度减小, 矫顽力和磁能损耗值分别减小了 26.4% 和 28.1%, 振幅磁导率增大了 11.7%。在一定磁密幅值下, TbDyFe 合金的复磁导率实、虚部和振幅磁导率随频率增大, 整体呈现出数值减小、减速变慢趋势; 在高频高磁密条件下 ($f > 5$ kHz、 $B_m > 0.06$ T), 厚度减小使 TbDyFe 合金损耗减小更为明显。

关键词: TbDyFe 合金; 叠片结构; 高频; 动态磁特性; 损耗特性

中图分类号: TM274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Analysis of high frequency dynamic magnetic properties and loss properties of TbDyFe alloy

Huang Wenmei^{1,2}, Wu Xiaoqing^{1,2}, Li Yafang^{1,2}, Weng Ling^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Province and Ministry Jointly Set Up), 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: TbDyFe alloy can be used in high frequency and even ultrasonic frequency devices. The hysteresis and loss of TbDyFe alloy (Terfenol-D) are serious under high frequency magnetic field ($f > 1$ kHz). It is very important to study the dynamic magnetic properties and loss properties of the TbDyFe alloy laminates with different thicknesses for designing the devices in high frequency range. The AMH-1M-S dynamic magnetic property testing system was used to measure the dynamic hysteresis loops of TbDyFe alloy laminates with different thicknesses under different driving magnetic field frequencies and magnetic density amplitudes. Based on the dynamic magnetic theory and loss calculation model, the dynamic magnetic property parameters of TbDyFe alloy laminates with different thicknesses were compared and analyzed, and the loss mechanism in high frequency range was deeply studied. The experiment results show that when the magnetic density amplitude B_m is 0.05 T and the frequency is 5 kHz, compared with that of a single 2 mm thickness sample, the dynamic hysteresis loop of the 1 mm thickness laminate sample becomes narrower laterally, the required magnetic field strength is reduced, the coercive force and magnetic energy loss values are reduced by 26.4% and 28.1%, respectively, and the amplitude permeability is increased by 11.7%. Under certain magnetic density magnitude, the value of the real part and imaginary part of the complex permeability, as well as the amplitude permeability of TbDyFe alloy present a tendency of data decreasing and speed slow down as the frequency increases. At the condition of high frequency and high magnetic density ($f > 5$ kHz, $B_m > 0.06$ T), the thickness decreasing makes the loss decreasing of TbDyFe alloy more obviously.

Keywords: TbDyFe alloy; laminated structure; high frequency; dynamic magnetic property; loss property

收稿日期: 2019-04-25 Received Date: 2019-04-25

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51777053) 项目资助

0 引言

稀土 TbDyFe 合金(Terfenol-D)作为一种新型功能材料,因其具有磁致伸缩大、能量密度高、响应速度快等特点^[1-4],为 TbDyFe 合金在高频乃至超声频率器件中的应用提供了技术保障^[5-6]。由于 TbDyFe 合金电阻率较小,高频条件下材料损耗严重,导致器件过热、输出功率低且性能不稳定。对 TbDyFe 合金进行切片处理是减小高频涡流损耗、扩大频率应用范围的有效途径。复磁导率这一动态磁性参数是器件磁路设计的一个重要参数,研究不同结构 TbDyFe 合金的动态磁特性及损耗特性变化规律是设计高频磁致伸缩器件的基础。

目前众多学者相继对 TbDyFe 合金进行了相关研究。文献[7]对比分析了整体与叠堆结构 Terfenol-D 的阻抗特性及振动输出特性,结果表明叠堆结构的 Terfenol-D 可更好的抑制涡流损耗,其模型与试验结果相吻合。文献[8]研究了 Terfenol-D 叠堆结构参数(切片厚度、环氧树脂黏贴厚度)对材料涡流损耗的影响,得到了抑制涡流损耗最优的结构参数。文献[9]采用 COMSOL 对叠片复合(2-2型)结构与纤维复合(1-3型)结构的 Terfenol-D 棒状材料进行了有限元仿真,计算了不同结构的涡流损耗理论值,得到最优化的复合结构。上述文献主要对不同结构 TbDyFe 合金进行理论分析和仿真计算,尚未就切片厚度对材料动态磁特性及损耗特性的影响进行准确测试与实验分析。文献[10]研究了叠层复合磁致伸缩材料驱动器的输出位移特性,通过对比块状材料温升值,表明叠层复合磁致伸缩材料驱动器的涡流损耗明显降低。但并没有对高频下损耗进行定量测试。文献[11]研究了 TbDyFe 合金不同磁化方向对磁能损耗的影响,基于实测数据和损耗分离公式对损耗进行分离,探究各项损耗变化规律。但未对 TbDyFe 合金动态磁特性进行分析研究。

本文将不同叠片厚度的 TbDyFe 合金方形环状样品采用 AMH-1 M-S 型动态磁特性测试系统测量了不同驱动磁场频率和磁密幅值下的磁滞回线,对比分析了不同结构 TbDyFe 合金的动态磁特性参数随频率的变化曲线,并对高频范围($f > 1$ kHz)的损耗机理进行了研究。为 TbDyFe 合金高频器件的结构设计及工作效率的提高奠定了基础。

1 动态磁性理论和损耗计算模型

1.1 动态磁性理论

在正弦交变磁场 H 条件下,由于磁滞效应,磁感应强度 B 的变化总是滞后于交变磁场 H ,两者之间存在相位差:

$$H = H_m \cos(\omega t) = H_m e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$B = B_m \cos(\omega t - \delta) = B_m e^{j(\omega t - \delta)} \quad (2)$$

式中: H_m 和 B_m 分别为磁场强度和磁感应强度的峰值; ω 为角频率; δ 为相位差; t 为时间。

在动态磁化过程中, H 和 B 的比值不再是实数。为了同时表示振幅和相位关系,复数磁导率这一概念被引入。复数磁导率是表征动态磁特性的参数,表示为:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m} e^{-j\delta} = \mu' - j\mu'' \quad (3)$$

式中:参数 μ_0 为真空磁导率; μ' 和 μ'' 分别是磁导率的实部和虚部。

$$\mu' = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m} \cos\delta = \mu_m \cos\delta \quad (4)$$

$$\mu'' = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m} \sin\delta = \mu_m \sin\delta \quad (5)$$

式中: $\mu_m = H_m/B_m$ 为振幅磁导率。 μ' 为磁导率实部,代表动态磁化过程中磁能的存储; μ'' 为磁导率虚部,表征磁能的损耗。

铁磁材料的损耗因子或者损耗角的正切值定义为磁导率虚部和实部之比,其倒数为品质因数 Q 。

$$\tan\delta = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (6)$$

$$Q = \frac{\mu'}{\mu''} \quad (7)$$

损耗因子和品质因数是反映铁磁性物质内禀磁性的物理量,是衡量材料磁性的重要指标之一。对高频以及超声频用材料,希望磁导率 μ' 越高,或 Q 值越高即 $\tan\delta$ 越小越好。

1.2 损耗计算模型

为了探索高频损耗行为的机理,必须了解各项损耗的比例。传统上,磁芯损耗根据产生机理可分为3个分量,即磁滞损耗 p_h 、涡流损耗 p_e 和异常损耗 p_a ^[12-13]。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,计算公式如下:

$$p_h = k_h f B_m^\alpha \quad (8)$$

式中: k_h 和 α 为磁滞损耗系数,与材料的本征特性有关。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在于涡流损耗和异常损耗。

涡流损耗 p_e 与材料尺寸、磁密幅值及材料电阻率 ρ 等有关,其计算式为:

$$p_e = \frac{\pi A_c V_c}{4\rho} f^2 B_m^2 \quad (9)$$

式中: A_c 为材料横截面积; V_c 为材料体积; ρ 为材料电阻率。

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

表达式为:

$$p_a = 3.5V_c \sqrt{\frac{2\pi A_c a n_0}{\rho}} f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (10)$$

式中: a 和 n_0 为相关常数。

涡流损耗与异常损耗都是动态损耗,两者在测试过程中极难分离。在磁致伸缩材料中,异常损耗占比很小^[14]。在高频范围内,共振异常损耗主要包括尺寸共振和畴壁共振。一般来说,异常损耗是在 1 MHz 的频率上考虑的。在本文测试中,测试频率的最大值是 0.3 MHz,故异常损耗可视为涡流损耗的一部分。因此, TbDyFe 合金的损耗计算公式可简化为^[15-16]:

$$p = p_h + p_e = k_h f B_m^\alpha + k_e f^2 B_m^2 \quad (11)$$

式(10)两边同除激励频率 f , 可变为:

$$p/f = p_h/f + p_e/f = k_h B_m^\alpha + k_e f B_m^2 \quad (12)$$

式(12)是频率的线性方程,根据不同磁密幅值下,样品测量的损耗数据绘制 p/f 与 f 的关系曲线。通过拟合多项式曲线得到系数 k_h 、 k_e 和 α 。计算出各项损耗值,探究各项损耗的变化趋势。

上述的损耗计算方法结合 TbDyFe 合金材料特性,将 Bertotti 3 项损耗分离法归纳为 2 项,并通过曲线拟合的方法得到不同磁密幅值下的损耗系数,在简化计算模型的同时考虑磁密幅值对损耗计算模型的影响,提高了计算精度。通过上述方法对 TbDyFe 合金的损耗进行分离,探究不同结构样品的各项损耗机理。

2 实验方法与测试系统

对 TbDyFe 合金沿着轴向方向分别切片制成方形环状样品,将样品 1 和 2 制成外边长为 10 mm×10 mm,内边长为 4 mm×4 mm 的方形环状样品。受限于材料的机械加工性能以及材料尺寸与现有加工工艺的限制,需要对材料的叠片厚度进行合理取值。其中,样品 1 为 1 片 2 mm 厚的方形环状样品;样品 2 为 2 片 1 mm 厚的叠片方形环状样品,两片之间间隔 0.2 mm 厚的环氧树脂粘剂,1 mm 厚叠层结构的 TbDyFe 合金在预压力为 2 MPa 时饱和磁致伸缩应变为 1.030×10^{-6} ^[10]。两个样品的驱动线圈均选用 20 匝、线径为 0.5 mm 的漆包线;感应线圈选用 10 匝、线径为 0.15 mm 的漆包线。

测量 TbDyFe 合金环状样品的测试系统是 AMH-1 M-S 动态磁特性测量系统,该实验测试平台为一个集成电气柜,主要用于测试铁磁材料交直流磁特性,如图 1 所示。为保证测量结果的准确性,使磁损耗的误差在 $\pm 3\%$,磁导率的误差在 $\pm 1.5\%$,对样品进行测量之前需对系统进行校准。该测量系统的工作原理如图 2 所示。其工作原理为:首先施加所需大小的激励磁场,通过信号发生器产生给定频率的正弦交流电,将其输入到功率放大器,进而从

感应线圈的两端产生感应电动势,通过采样电阻上的电压反映来环内磁场强度变化。将感应线圈与积分放大电路相连,材料中磁感应强度 B 的变化可由放大电路中的电容电压反映。同时示波器通过采样电阻的积分放大电路和驱动线圈信号同时接收感应电势,最后收集的数据被输入至计算机,通过相关程序绘制出所测得的动态磁滞回线。

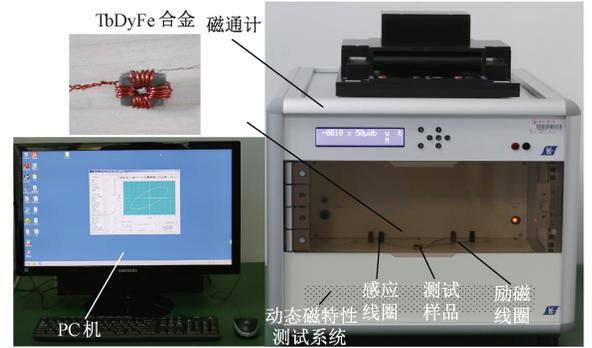


图 1 实验平台

Fig.1 Experiment platform

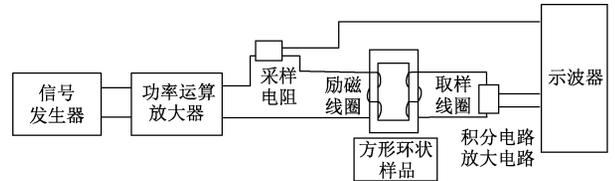


图 2 测量系统原理

Fig.2 Principle of the measurement system

3 结果与分析

考虑到 TbDyFe 合金复杂的磁滞特性和损耗特性与材料的结构尺寸有关,本文通过对数学模型推导和设备精度校验后,对同体积不同结构的 TbDyFe 合金进行磁特性和损耗特性测试。结合目前 TbDyFe 合金在清洗、脱硫、金属探伤、海底探测等领域的应用^[17],将实验测试频段选为 1~20 kHz。利用 AMH-1 M-S 测量不同结构的 TbDyFe 合金在不同频率和不同磁密幅值下的动态磁滞回线,从而获得复数磁导率及振幅磁导率。通过式(6)可以求得损耗因子变化规律。同时,利用损耗计算模型式(11)对其总损耗进行损耗分离,对不同厚度叠片样品高频范围内的损耗机理进行深入研究,对比分析不同叠片厚度 TbDyFe 合金的动态磁特性及损耗特性,为 TbDyFe 合金高频器件的结构优化设计提供数据指导。

3.1 动态磁滞回线测量与分析

图 3 所示为两种结构的 TbDyFe 合金在驱动频率为

5 kHz、 $B_m = 0.05$ T时的动态磁滞回线。样品1与2的动态磁滞回线相比,曲线横向变宽、面积增大,当磁密幅值一定时,样品2所需磁场强度较小。表1所示为两种样品的磁性参数,由表1可知,样品2的矫顽力、剩磁和磁能损耗值比样品1的小,其中矫顽力比样品1小26.4%,磁能损耗比样品1小28.1%;其振幅磁导率比样品1的大11.7%。

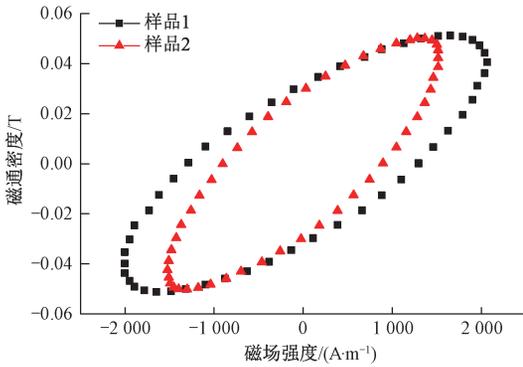


图3 样品1和样品2的动态磁滞回线($B_m = 0.05$ T)
Fig.3 The dynamic hysteresis loops of the sample 1 and sample 2 ($B_m = 0.05$ T)

表1 样品1和2的磁参数测量值

Table 1 The magnetic parameter measurement values for sample 1 and 2

样品	$H_c / (A \cdot m^{-1})$	B_r / T	μ_m	损耗 / ($W \cdot kg^{-1}$)
1	926.2	0.031	27.3	53.693
2	681.7	0.027	30.5	38.585

3.2 动态磁特性计算与分析

在磁密幅值 $B_m = 0.09$ T时,分别测试在不同驱动频率($f = 1 \sim 20$ kHz)时样品1和2的动态磁滞回线,从所测得的曲线上提取动态磁特性参数(复数磁导率)。图4和5所示分别为样品1和2利用实验结果得到的振幅磁导率、复数磁导率的实部和虚部与频率的关系。 μ' 表征动态磁化过程中磁能的存储, μ'' 表征磁能的损耗。当磁能损失大于磁储能时,铁磁材料往往会失效。

如图4所示,磁场频率由1 kHz变化到20 kHz,样品1的振幅磁导率减小了44.72%。随着频率升高,振幅磁导率和复数磁导率减小,但减少的幅度降低。由于随着频率的增加,涡流将减小其强度,并改变内部磁场相对于表面磁场的相位,故复数磁导率的实部随着频率的增加而降低。此外,在频率 $f = 20$ kHz附近实磁导率和虚磁导率有交点,交点频率值可以看作是铁磁材料的截止频率^[18]。

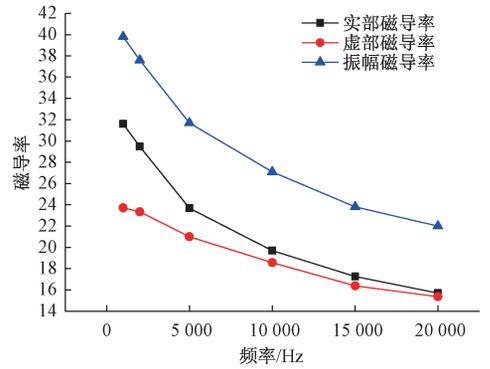


图4 磁导率振幅、复磁导率实部、虚部和频率的关系
Fig.4 The relationship of permeability amplitude, the real and imaginary parts of the complex permeability vs. frequency

由图5可知,1 mm厚叠片结构的TbDyFe合金振幅磁导率和磁导率的实部随频率变化趋势与样品1相同,其虚部磁导率在频率1~20 kHz时随频率增大而减小,20~30 kHz时随频率增大而增大,在频率为30 kHz附近实磁导率和虚磁导率存在交点,样品2的截止频率近似为30 kHz。相比于样品1,样品2应用的频率范围更广。

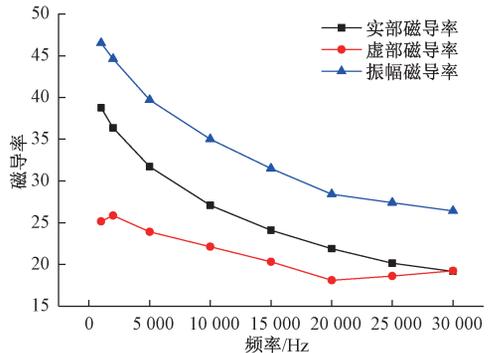


图5 磁导率振幅与复磁导率实部、虚部和频率的关系
Fig.5 The relationship of permeability amplitude, the real and imaginary components of the complex permeability vs. frequency

当高频乃至超声频段使用时,磁导率 μ' 越高,磁化过程中磁能存储越多,高频特性越好。对比样品1和2在 $B_m = 0.09$ T、频率1~20 kHz的实部磁导率 μ' ,如表2所示。随频率的增加,二者的实磁导率均减小,但样品2实磁导率值大于样品1的。在20 kHz时,样品2比样品1的实部磁导率值大39.5%。

结合图4和5,通过式(6)计算得到的样品1和样品2损耗因数随频率的变化曲线,如图6所示。损耗因子随频率增加先增大后趋于平稳。样品1在频率1~20 kHz内,损耗因子由0.75增加到0.98,变化了

表 2 样品 1 和 2 的实部磁导率

Table 2 The real part of the complex permeability for sample 1 and 2

频率/kHz	1	2	5	10	15	20
样品 1	31.6	29.5	23.7	19.7	17.3	15.7
样品 2	38.8	36.4	31.7	27.1	24.1	21.9

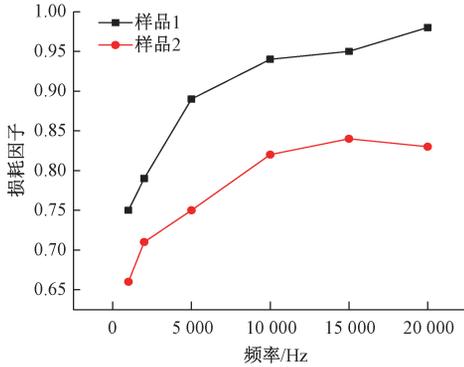


图 6 样品 1 和 2 不同频率下的损耗因数
Fig.6 The loss factors of sample 1 and sample 2 at different frequencies

30.7%; 样品 2 的损耗因子由 0.66 增大到 0.83, 变化了 25.8%。在 $f=20\text{ kHz}$ 时, 样品 2 比样品 1 的损耗因子小 15.3%。综上所述, 厚度小的样品截止频率高、磁导率大、损耗因数小, 故其高频特性更好, 应用频率范围更广。但对不同应用条件下的器件选定叠片厚度时, 需综合考虑材料的机械加工性能以及材料尺寸与现有加工工艺的限制。

3.3 磁能损耗测量与分离

对样品 1 和 2 在频率为 15 kHz 不同磁密幅值下的磁能损耗进行测量, 如图 7 所示。当频率为 15 kHz 时, 磁通密度从 0.03 T 变化到 0.09 T, 样品 1 的损耗增加了 573.08 W/kg, 样品 2 的损耗增加了 386.86 W/kg。

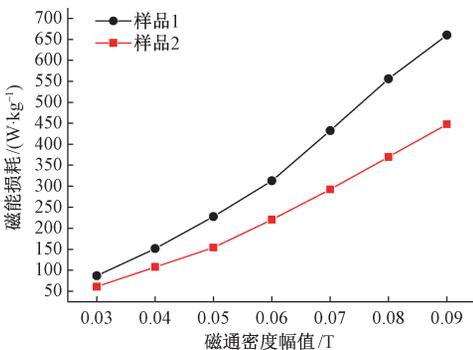


图 7 频率为 15 kHz 时损耗随磁密的变化曲线
Fig.7 The changing curve of losses vs. magnetic density at frequency of 15 kHz

图 8 所示为磁密幅值 0.05 T 时不同频率下的磁能损耗测量值。随着频率从 1 kHz 变化到 20 kHz, 样品 1 的损耗从 8.184 增加到 319.48 W/kg, 损耗增加了 38 倍; 样品 2 损耗从 6.324 增加到 226.61 W/kg, 损耗增加了 34.8 倍, 在 $f=20\text{ kHz}$ 、 $B_m=0.05\text{ T}$ 时, 样品 2 的相比样品 1 损耗减小了 29.1%。由图 7 和 8 可知, 样品 1 在磁密幅值大于 0.06 T 时损耗增速变快, 斜率变大, 而样品 2 损耗增速较缓, 近似正比关系。在 $f>5\text{ kHz}$ 、 $B_m>0.06\text{ T}$, TbDyFe 合金叠片结构样品可以使磁损耗更有效的减小。在设计高频 TbDyFe 合金器件时, 可优先选择叠片结构, 并且需要充分考虑 TbDyFe 合金的叠片厚度, 使材料磁损耗减小的同时保证其磁致伸缩性能和高导磁性。当驱动频率增加时磁能损耗快速增大, 这些损耗最终转换成热量影响超磁致伸缩换能器位移输出精度。测量的损耗值可为装置冷却系统的设计提供数据支持, 以保证其工作性能。

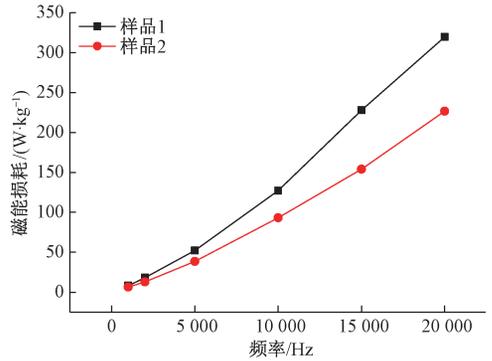


图 8 磁密为 0.05 T 时损耗随频率的变化曲线
Fig.8 The changing curve of losses vs. frequency at magnetic density of 0.05 T

利用磁能损耗计算式 (11) 对样品的测量损耗值进行损耗分离。利用频率范围为 1~20 kHz、 $B_m=0.05\text{ T}$ 的损耗测量数据绘制了 P/f 与 f 的关系曲线。通过拟合多项式曲线得到两个样品的两组损耗系数 k_h 、 k_e 和 α 。将得到的损耗系数代入式 (11), 得到各项损耗值, 探讨各项损耗的变化趋势, 如图 9 和 10 所示。

图 9 所示为样品 1 和 2 在 $B_m=0.05\text{ T}$ 时磁滞损耗、涡流损耗随频率的变化曲线。其中, 样品 1 的磁滞损耗在频率 1~20 kHz 下从 7.674 变化到 158.19 W/kg, 增加了 150.516 W/kg; 涡流损耗从 0.51 增加到 161.293 W/kg, 增加了 160.783 W/kg。在此频率段内磁滞损耗大于涡流损耗, 涡流损耗增速随频率增大变快, 在频率 20 kHz 时, 涡流损耗超过磁滞损耗。从变化量上可知, 涡流损耗受频率影响最显著。样品 2 的磁滞损耗在频率 1~20 kHz 下从 6.07 变化到 122.58 W/kg, 增加了

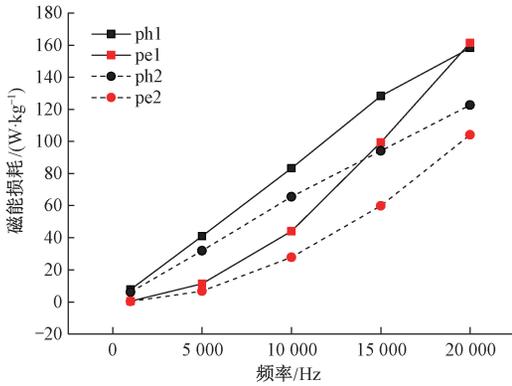


图9 磁密为0.05 T时各项损耗随频率的变化曲线
Fig.9 The changing curves of various losses vs. frequency at magnetic density of 0.05 T

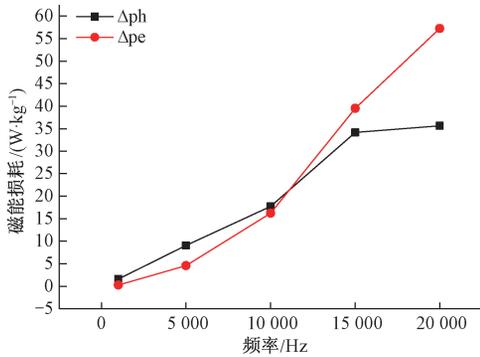


图10 磁密为0.05 T时各项损耗差值随频率的变化曲线
Fig.10 The changing curves of various loss differences vs. frequency at magnetic density of 0.05 T

116.51 W/kg; 涡流损耗从0.26增加到104.01 W/kg,增加了103.75 W/kg。分别对比 p_{h_1} 、 p_{h_2} 两条曲线和 p_{e_1} 、 p_{e_2} 两条曲线,样品2的 p_{h_2} 和 p_{e_2} 曲线斜率始终小于样品1的,说明厚度小的样品各项损耗随频率变化的增速小。在频率 $f=20$ kHz时,样品2的磁滞损耗相比样品1的减小了35.61 W/kg,样品2的涡流损耗相比样品1的减小了57.283 W/kg。

图10所示为 $B_m=0.05$ T时两个样品各项损耗差值随频率的变化曲线。图10中,涡流损耗差值随频率增大呈二次方增大,当频率大于11 kHz时,涡流损耗差值超过磁滞损耗差值。磁滞损耗差值在频率1~15 kHz范围内随频率增大而增大,在15~20 kHz内差值几乎不变。由图9和10可知,当频率小于11 kHz时,叠片厚度减小主要改变磁滞损耗量,当频率大于11 kHz时,叠片厚度对涡流损耗的影响愈发明显。

4 结 论

本文通过对不同厚度的 TbDyFe 合金叠片进行动态磁特性和磁能损耗的测试与分析,得出以下结论:

1) 在高频条件下通过对 TbDyFe 合金进行切片处理并用环氧树脂将薄片 TbDyFe 合金进行粘结,可以减小趋肤效应,提高涡流截止频率,增大了叠片 TbDyFe 合金的电阻,减小了涡流损耗,从而得以提升高频器件的工作效率。

2) 当磁密幅值和频率一定时,叠片厚度的减小,使得动态磁滞回线横向变窄、所需磁场强度减小,矫顽力、剩磁和磁能损耗随之减小。

3) 在一定磁密幅值下, TbDyFe 合金的复磁导率实、虚部和振幅磁导率随频率增大而减小。在 $B_m=0.09$ T时,2 mm厚样品可工作于驱动频率小于20 kHz的器件中,1 mm厚叠片样品工作的最高频率可提高至30 kHz。

4) 在高频高磁密条件下($f>5$ kHz、 $B_m>0.06$ T),叠片厚度减小使 TbDyFe 合金损耗减小更为明显,其中涡流损耗值在高频下减小的更为明显。上述理论分析和实验研究为高频超磁致伸缩器件系统的设计与研发提供数据支持。

参考文献

- [1] 鞠晓君,林明星,范文涛,等.超磁致伸缩致动器结构分析及输出力特性研究[J].仪器仪表学报,2017,38(5):1198-1206.
JU X J, LIN M X, FAN W T, et al. Structure analysis and output force characteristic study of giant magnetostrictive actuator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(5):1198-1206.
- [2] 纪良,朱玉川,杨旭磊,等.超磁致伸缩执行器热损耗模型与实验[J].航空动力学报,2017,32(5):1066-1073.
JI L, ZHU Y CH, YANG X L, et al. Theoretical analysis and experiment of power loss in giant magnetostrictive actuator [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1066-1073.
- [3] XUE G J, ZHANG P L, HE Z B, et al. Design and experimental study of a novel giant magnetostrictive actuator[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2016,420(15):185-191.
- [4] 黄文美,薛胤龙,王莉,等.考虑动态损耗的超磁致

- 伸缩换能器的多场耦合模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 173-178.
- HUANG W M, XUE Y L, WANG L, et al. Multi-field coupling model considering dynamic losses for giant magnetostrictive transducers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 173-178.
- [5] 曾海泉, 曾庚鑫, 曾建斌, 等. 超磁致伸缩功率超声换能器热分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 116-120.
- ZENG H Q, ZENG G X, ZENG J B, et al. Thermal analysis of giant magnetostrictive high power ultrasonic transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 124-129.
- [6] CAI W C, ZHANG J F, YU D W, et al. Investigation into the shift of electromechanical conversion efficiency with temperature for Giant magnetostriction ultrasonic processing system[C]. 2017 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), IEEE, 2017. DOI: 10.1109/IBCAST.2017.7868044.
- [7] 陶孟仑, 陈定方, 卢全国, 等. 超磁致伸缩材料动态涡流损耗模型及试验分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 146-151.
- TAO M L, CHEN D F, LU Q G, et al. Eddy current losses of giant magnetostrictors: modeling and experimental analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 146-151.
- [8] 阙焱彬, 李涛涛, 谢溪凌, 等. 叠堆结构对超磁致伸缩材料涡流损耗影响的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(9): 100-105.
- QUE Y B, LI T T, XIE X L, et al. Study of the influence of stack structure on the giant magnetostrictive material eddy current losses [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(9): 100-105.
- [9] 高震东, 卢全国, 陈珏, 等. 面向大功率超声应用的磁致伸缩材料涡流损耗分析[J]. 南昌工程学院学报, 2018, 37(4): 76-79.
- GAO ZH D, LU Q G, CHEN J, et al. Eddy current loss analysis of magnetostrictive materials for high power ultrasound applications [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2018, 37(4): 76-79.
- [10] 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 SH Y, WANG B W, ZHOU Y, et al. Output displacement of actuator based on Terfenol-D multilayered composite [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 71-75.
- [11] HUANG W M, GAO CH Y, LI Y F, et al. Experimental and calculating analysis of high-frequency magnetic energy losses for terfenol-D magnetostrictive material [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018; 1-4.
- [12] 刘刚, 孙立鹏, 王雪刚, 等. 正弦及谐波激励下的铁心损耗计算方法改进及仿真应用[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 4909-4918.
- LIU G, SUN L P, Wang X G, et al. Improvement of core loss calculation method and simulation application under sinusoidal and harmonic excitations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 4909-4918.
- [13] 赵志刚, 刘佳, 郭莹, 等. 非正弦励磁环境磁性材料改进损耗模型的研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2693-2699.
- ZHAO ZH G, LIU J, GUO Y, et al. Investigation on the improved loss model of magnetic materials under non-sinusoidal excitation environment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(13): 2693-2699.
- [14] MENG H, ZHANG T L, JIANG CH B. Frequency dependence of loss behavior in bonded anisotropic giant magnetostrictive materials [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(9): 1-4.
- [15] ZHU S, CHENG M, DONG J, et al. Core loss analysis and calculation of stator permanent-magnet machine considering dc-biased magnetic induction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5203-5212.
- [16] 赵青. 非晶纳米晶磁材料在复杂激磁条件下的损耗特性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- ZHAO Q. Predicting core loss of amorphous nanomaterials under complex excitation [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.
- [17] 杨庆新, 李永建. 先进电工磁性材料特性与应用发展研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 1-12.

YANG Q X, LI Y J. Characteristics and developments of advanced magnetic materials in electrical engineering: A review [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 1-12.

- [18] MENG H, ZHANG T L, JIANG CH B. Cut-off frequency of magnetostrictive materials based on permeability spectra [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2012, 324(12): 1933-1937.

作者简介



黄文美, 2005 年于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学教授和博士生导师, 主要研究方向为新型磁性材料与器件、电机电器及其控制。

E-mail: huzwm@hebut.edu.cn

Huang Wenmei received her Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2005. Now, she is a professor and Ph.D supervisor in Hebei University of Technology. Her main research interests include new magnetic materials and devices, electric motor and electric apparatus and their control.



吴晓晴, 2017 年于河北工业大学城市学院获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型磁性材料与器件。

E-mail: 1161267960@qq.com

Wu Xiaoqing received her B. Sc. degree from City College, Hebei University of Technology in 2016. Now, she is a M. Sc. candidate in Hebei University of Technology. Her main research interests include new magnetic material and device.