

DOI:10.13382/j.jemi.B2508336

基于磁环自升温的纳米晶材料磁热特性 测量方法研究*

王宁¹ 张鹏宁¹ 李坤诚¹ 程红¹ 王聪¹ 张荐²

(1. 中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院 北京 100083; 2. 中国电力科学研究院 北京 100192)

摘要:温度对软磁材料的磁特性存在一定的影响,高频变压器优化设计需重点考虑温升参量,但目前软磁材料在不同温度下磁特性测试,变温时间依赖实验者主观判断,加热时间不足,测试精度较低,加热时间过长,效率较低。因此,提出一种磁环自升温的磁特性测量方法,旨在保证磁特性测量精度的同时提高测量效率。以高频变压器的优选材料即纳米晶材料为研究对象,研究了纳米晶磁环温升的影响因素,并据此设计激励电路使磁环快速升温,当磁环温度达到指定温度后,使用低频交流衰减激励对纳米晶磁环进行去剩磁处理,以满足指定温度的测试条件,并通过励磁和测量电路得到其磁特性参数。最终,设计并搭建了纳米晶磁环的传统恒温箱和自升温磁热特性测试系统,通过两种方法的测量结果对比验证了所提方法在保证精度的前提下提高了测量效率。所提测量方法可模拟磁性材料实际温升变化,将升温时间缩短90%以上,且可对磁环温度进行定值改变,具有变温准确、可控、快速等优点,为高频变压器的多物理场耦合和优化设计提供了实验和数据基础。

关键词: 纳米晶; 温升; 磁环; 自升温; 去磁; 磁热特性

中图分类号: O441.5; TQ573+.6; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on measurement methods for magnetic and thermal properties of nanocrystalline materials based on magnetic ring self-heating

Wang Ning¹ Zhang Pengning¹ Li Kuncheng¹ Cheng Hong¹ Wang Cong¹ Zhang Jian²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Temperature has a certain impact on the magnetic properties of soft magnetic materials, and temperature rise parameters are crucial considerations in high-frequency transformer design optimization. However, in magnetic characteristics test of soft magnetic materials at different temperatures, the temperature variation time relies on subjective judgment of experimenters. If the heating time is insufficient, the testing accuracy is relatively low, while excessive heating results in low efficiency. Therefore, a self-heating magnetic property measurement method for magnetic rings was proposed, aiming to ensure the measurement accuracy while improving efficiency. Nanocrystalline materials, preferred materials for high-frequency transformers, are used as the study object in this paper, aiming to investigate factors influencing temperature rises of nanocrystalline magnetic rings, and an excitation circuit is subsequently designed to rapidly heat the magnetic rings. Once the magnetic rings reach the target temperatures, they are demagnetized through low-frequency AC attenuating excitations to meet the testing conditions at designated temperatures. The magnetic property parameters are then obtained by using the excitation and measurement circuit. Finally, a traditional constant temperature box of nanocrystalline magnetic rings and a self-heating magnetocaloric characteristic testing system are designed and built. The comparison between measurement results from the two methods validates the improved efficiency of the proposed method on the premise of ensuring the accuracy. By simulating actual temperature rises of magnetic materials, the proposed measurement method reduces the heating time by over 90%, and changes the temperature of the magnetic rings by a constant value, thus achieving advantages of precise, controlled, and rapid temperature changes. This method provides an experimental and data foundation for multi-physics coupling and design optimization in high-frequency

收稿日期: 2025-04-24 Received Date: 2025-04-24

* 基金项目: 国家自然科学基金(52007192)、国家电网公司总部攻关项目(SGAHDK00SPJS2200430)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(2023ZKPYJD09)项目

transformers.

Keywords: nanocrystalline; temperature rise; magnetic ring; self-heating; demagnetization; magnetic and thermal property measurement

0 引言

变压器、电抗器、电流互感器和电机等电力电子设备在实际工作中,受正弦以及复杂非正弦激励影响,会出现较为严重的温升问题^[1-2],温度的变化会使得其铁心磁性发生改变,进而影响电力电子设备安全稳定运行,在不同激励下对铁心材料进行不同温度下磁化特性的测量是准确模拟电力电子设备正常工作的前提^[3-4]。软磁材料磁特性测量方法按照激励信号空间结构的不同可分为一维、二维、三维磁特性测量^[5-8],其中二维、三维磁特性测量尚未形成通用国际标准,目前已形成一维磁特性测量的国际标准和中国国家标准,在此基础上,国内外学者开展了考虑温度、频率等复杂因素磁特性测量方法的研究,其主要分为爱泼斯坦方圈法、单片测试法和环形样件法^[9-11]。

软磁材料在不同温度下的磁特性测量的重点在于磁材料变温需均匀准确以及测量系统不受温度影响,现有研究中常用的方法是将磁材料置于恒温箱中进行加热。其中爱泼斯坦方圈法主要应用中低频测试领域,具有可重复性高的优点。文献[12-13]设计了可耐高温的爱泼斯坦框架测试系统,并将其置于恒温箱中,研究硅钢在不同温度下的磁特性。为测试电工钢在更高温度下的磁特性,文献[14]建立了一种耐高温的爱泼斯坦框架,并将其安装在可控炉中,测量通道由耐高温混凝土支撑,绕组镀有可耐受 260 ℃ 高温的涂层。在 1974 年,日本学者设计了首个单片测试仪^[15],与爱泼斯坦方圈法相比,单片测试法解决了有效磁路长度估算不精准的问题。文献[16]通过在液氮环境中放置耐低温和绝缘材质的单片测试仪,研究了硅钢在低温下的磁特性。文献[17]将单片测试法应用于高温超导领域,并制作了紧凑型单片测试仪,测量结果表明,哈氏合金和不锈钢的磁性在室温和液氮温度下几乎没有变化。文献[18]测试并分析了硅钢片不同温度下的磁特性。由上述研究可以看出爱泼斯坦方圈法和单片测试法要求磁材料和测试系统需构成一个整体,这导致必须对测试框架和测试仪的材质进行特殊的绝缘和耐高温处理,这种处理不仅增加了技术难度,也极大提高了制造成本。

相比爱泼斯坦方圈法和单片测试法,环形样件法中待测磁材料和测试系统可进行分离,这表明在温度实验中仅需对绕组进行耐高温和绝缘处理。文献[19]建立了一种可承受高温的陶瓷制环形试样测试方法,以无取向电工钢为对象,研究了其在高温下的磁特性。文

献[20]测试冷轧钢板和电工钢在高温下的矫顽力、剩磁、损耗等磁特性,对比发现冷轧钢板的损耗受温度影响较大。文献[21]分析了纳米晶磁芯高频软磁性能和热稳定性,研究表明纳米晶合金高频下具有低的磁芯损耗和良好的热稳定性。文献[22]测量了不同温度下纳米晶材料 B-H 曲线、B-P 曲线、磁导率、磁剩磁等多种磁特性,在此基础上,文献[23]针对纳米晶材料变温变频下的磁损耗进行了表征。文献[24-25]测量了铁氧体、非晶、纳米晶等多种软磁材料在不同温度和频率下的磁特性,为选择合适的应用场合提供指导。此外,有研究者针对磁致伸缩材料、坡莫合金、钕钴永磁材料等多种软磁材料进行不同温度下的磁特性测量^[26-29]以及考虑压力、温度等多种复杂因素的磁特性测量^[30]。在此基础上,学者们结合温度对软磁材料磁性能的影响,对不同软磁材料的损耗模型进行了温度机理的表征,使模型可更准确地反映材料在不同温度条件下的损耗特性^[31-32]。

爱泼斯坦方圈法和单片测试法因具有更高的测试成本,因此,软磁材料变温下磁特性测试中多采用环形样件法。国际标准 IEC60404-6 规定使用恒温箱加热磁环,通过在磁环表面贴附热电偶传感器测量温度以进行磁特性测量^[33],但是由于热传递存在滞后性,热电偶传感器所测量磁环表面温度可能并不等于磁环内部温度,且恒温箱具体加热时间尚无详细标准,多依赖于实验者主观判断,若加热时间不足,磁环表面和内部温度不均衡,容易影响测量精度,若加热时间过长,则容易导致导线绝缘层老化甚至磁性材料受损。因此,亟需一种能使磁环内外部温升均匀且快速升温的方法,在保证测量精度的情况下提高不同温度下磁特性的测量效率。

综上,现有变温磁特性测试研究采用恒温箱对磁环进行传热升温,升温时间具有主观性。为提高变温磁特性测试的测试效率,区别于现有方法,本文研究了磁材料的升温条件,通过对磁环施加激励来模拟磁性材料实际运行工况,达到磁环整体温升的效果,并可通过热传感器实时采集磁环温度,升温更加客观,为不同温度下软磁材料磁特性的准确测量奠定基础,进而为高频变压器材料选择、设计优化和性能提升提供重要的数据支持和理论依据。

1 基于磁环自升温的纳米晶材料测量系统与测量原理

1.1 基本原理

软磁材料在交变磁场激励下,因磁滞损耗和涡流损

耗等本征损耗,会将部分电磁能量转化为热能,使得材料温度升高。基于软磁材料因损耗升温的固有特性,本文分析了软磁材料增加损耗的有效方法,确定了采用非正弦激励、提高激励频率以及使材料工作在磁饱和区 3 种方法,以实现软磁材料的快速升温。为保证测量的准确性,采用去磁电路对软磁材料进行磁复位,保证测量时,软磁材料处于磁中性状态。最后,根据国际及国家标准规定的软磁材料磁特性测量方法,对不同温度下的软磁材料磁特性参数进行测量和分析,本文采用纳米晶磁环作为测量对象。

1.2 测量系统构成

本文所提测试系统包括激励电路、去磁电路、测试电路、温度控制电路 4 个模块组成,测试电路原理如图 1 所示。系统由直流电源、交流电源、逆变电路模块、温度控制系统、接触器、信号发生器、功率放大器、数字采样器、热电阻传感器、保温材料和待测磁环等组成,磁特性测试流程如图 2 所示。

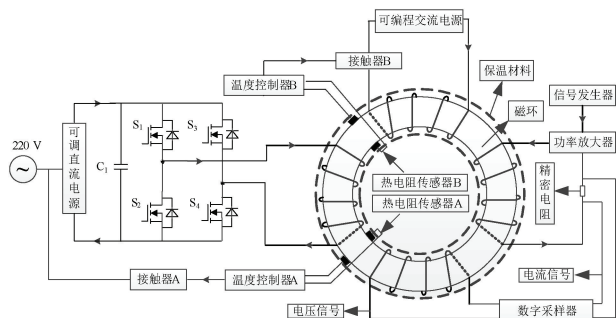


图 1 磁特性测量系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic property measurement system

1.3 测量模式

所提测量系统分为 3 个工作模式,分别为激励模式、去磁模式和测量模式。

激励模式:激励电路由可调直流电源、高频逆变电路、温度控制器 A、接触器 A、热电阻传感器 A 组成。直流激励经过高频逆变电路转化为高频交流激励,施加高频激励使得磁环产生的磁滞和涡流损耗迅速升温,当热电阻传感器检测到磁环温度超过设定值一定余量后,由温度控制器控制接触器断开高频激励电路,如图 3 所示。

去磁模式:去磁电路是由可编程交流电源、温度控制器 B、接触器 B、热电阻传感器 B 组成。采用低频交流衰减法对磁环进行去剩磁处理,去磁过程中,设置可编程电源使得输入电压从对应幅值逐渐减少到 0,磁环在保温材料的作用下温度损失较慢,当磁环温度降低到实验所需测量温度时,热电阻传感器将信号传递到温度控制器,控制接触器关断低频去磁电路,如图 4 所示。

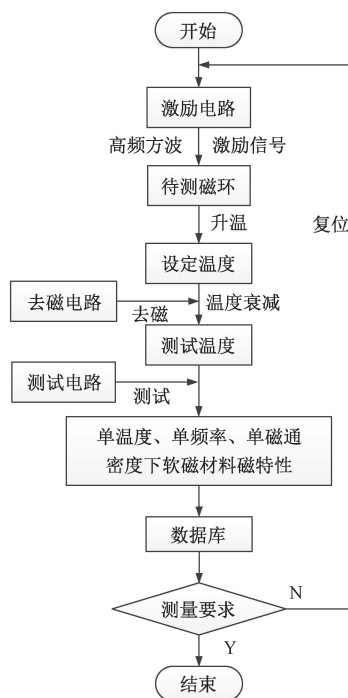


图 2 磁特性测量流程

Fig. 2 The flowchart of the magnetic property measurement system

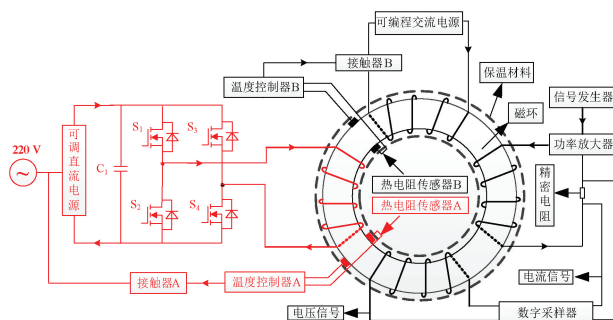


图 3 激励电路

Fig. 3 Excitation circuit

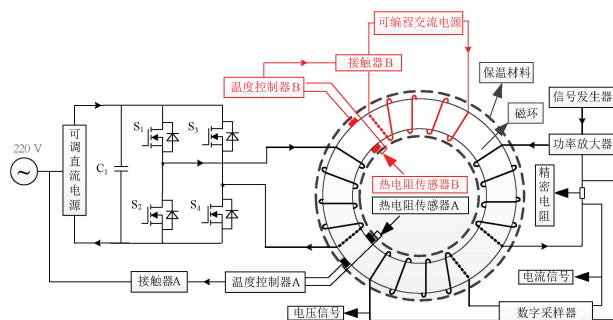


图 4 去磁电路

Fig. 4 Demagnetization circuit

测量模式:测试电路是由信号发生器、功率放大器、

精密电阻和数字采样器构成的环形样件测试系统。该系统通过采集磁环的一次侧电流和二次侧电压,利用安培环路定律和法拉第电磁感应定律计算磁滞回线,从而提取损耗。所提测试系统可测试不同温度下、不同激励波形下新型磁性材料的磁化和损耗特性,如图5所示。

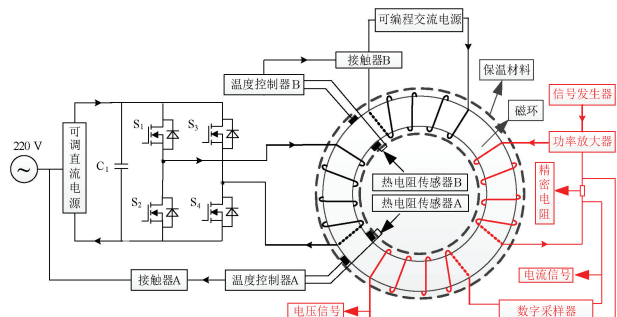


图5 测试电路

Fig. 5 Measurement circuit

2 设计方案

2.1 激励电路设计

激励电路的设计原理为根据软磁材料饱和磁通密度和磁环激励绕组匝数设置输入电压幅值,根据软磁材料频率特性设置开关管工作频率,通过对磁环施加高频电压激励,使磁环工作在高损耗状态,从而实现快速升温。

本文所研究的纳米晶软磁材料,在常温及低频条件下的饱和磁通密度在1.2 T左右,该材料在1~20 kHz频率范围具有低损耗的磁特性。文献[22]研究表明纳米晶材料工作在饱和区时,损耗呈高斜率上升趋势,且损耗与频率成正相关,因此,为使得磁环实现快速升温,可设定磁环工作在接近饱和磁密点(纳米晶材料为1.2 T左右)以及高频区域内来实现。设计输入电压时,可根据法拉第电磁感应电路和安培环路定则,结合测试频率,确保输入电压满足如式(1)所示。

$$U = k_f f N_1 B A_e \quad (1)$$

式中: f 为逆变电路开关管工作频率; B 为工作磁通密度; A_e 为磁芯有效截面积; k_f 为波形系数(方波为4,正弦波为4.4)。

在对磁性材料进行激励时,激励信号的类型对磁环升温速率有较大影响,根据傅里叶级数理论,方波可以等效为多个不同频率的正弦波加权叠加,相比正弦波激励,由于方波激励包含奇次谐波分量,使得磁环产生更大的磁滞损耗和涡流损耗,从而实现磁环快速升温,基于此,本文搭建了高频H桥逆变拓扑电路作为产生交流方波激励的电源,如图6所示,该电源模块最大交流输出电压为100 V,最大输出频率为80 kHz,可满足不同材料的磁特性激励。

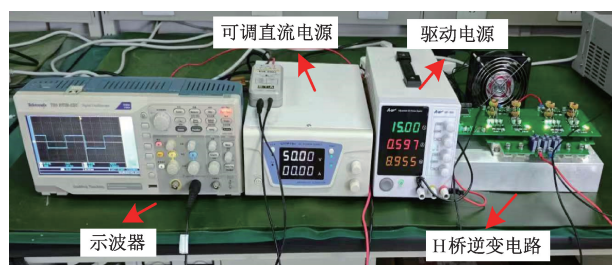


图6 高频逆变电路

Fig. 6 High-frequency inverter circuit

2.2 去磁电路设计

在进行磁特性测试时,根据国际标准和国家标准,每次测试之前都需要对磁材料进行去剩磁处理,保证待测磁材料磁感应强度 B 和磁场强度 H 均为0,达到磁中性状态,以保证测量精度。工业上常用的退磁方法主要包括交流衰减退磁、直流换向退磁以及热退磁等。基于此,本文参考了国际知名磁特性测试仪器供应商德国BROCKHAUS公司的退磁模块的技术方案,并基于实验室现有条件,设计了一种低频交流衰减退磁方法,基于可编程交流电源,产生幅值逐渐衰减至0的交流正弦信号,衰减频率设置为30 Hz,衰减次数设置为100次以上,初始衰减正弦电压满足式(1),其中去磁电路波形输出波形如图7所示,去磁实验电路如图8所示。

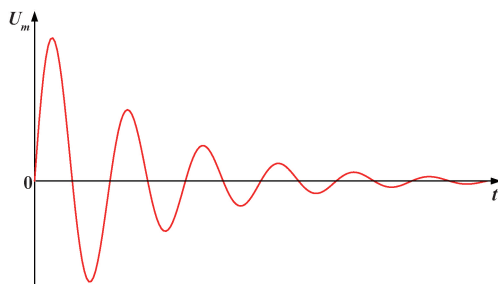


图7 去磁电路原理

Fig. 7 Schematic diagram of demagnetization circuit

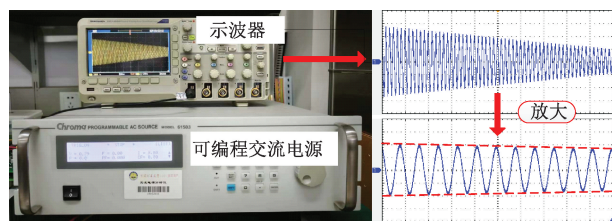


图8 去磁实验电路

Fig. 8 Experimental diagram of demagnetization circuit

2.3 测试电路设计

测试电路依照纳米晶磁环磁特性测试国家标准^[34]中规定进行设计,其基本原理为采用磁环样件法进行指

定温度下的磁测量,在磁环原副边分别缠绕一定匝数的绕组,通过采样磁环原边电流和副边电压,根据安培环路定理和法拉第电磁感应定律计算磁材料磁滞回线,从而提取损耗和磁导率等多种磁特性数据,测试电路实验图如图 9 所示。

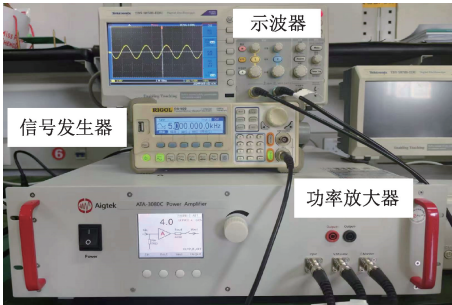


图 9 测试电路实验图

Fig. 9 Experimental diagram of measurement circuit

磁环样品在施加激励后,内部磁场分布并不完全均匀,从磁环内侧到外侧呈逐渐减小趋势,为有效计算磁环磁路长度和横截面,本文采用国际标准 IEC 60205^[34] 规定的磁环有效磁路长度 l_e 和有效横截面积 A_e 的计算公式,如式(2)和(3)所示。

$$l_e = \frac{\pi \cdot \ln(OD/ID)}{1/ID - 1/OD} \tag{2}$$

$$A_e = K_c \times \frac{h \cdot \ln^2(OD/ID)}{2 \times (1/ID - 1/OD)} \tag{3}$$

式中: K_c 为材料堆积系数; h 为磁环材料厚度。由于纳米晶材料为叠片材料,其横截面积需计算有效横截面积,即为总横截面积与堆叠系数的乘积。

磁环原边可通过电流探头采集原边电流,根据安培环路定律,通过原边电流可以计算出磁场强度:

$$N_1 \cdot I_1 = H \cdot l \tag{4}$$

式中: N_1 表示原边绕组匝数; I_1 表示原边电流; H 表示磁场强度; l 表示待测磁环磁路长度。

磁环副边可通过电压差分探头采集副边电压,根据法拉第电磁感应定律,对副边电压积分可求得磁环磁通密度 B :

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S} \cdot \int u(t) dt \tag{5}$$

式中: N_2 为副边绕组匝数; S 为待测磁环截面积; $u(t)$ 为副边感应电压。

2.4 温度控制系统设计

本文设计了基于自升温磁特性测试的温度控制系统,该系统由 PLC 控制器、接触器、PT100 热电阻传感器、变送器、温度显示屏组成。在测试前,选取相同精度的热电阻传感器,并对其进行平衡调节,由于磁环表面内外径温度略有差异,为精准测量,激励电路和去磁电路均使用

两个热电阻传感器分别采集磁环表面内径和外径的温度,并选取内外径温度的均值作为磁环实际温度,热电阻传感器将采集到的温度信号传输到变送器,由变送器将温度信号转化为电信号注入到 PLC 控制器中,当达到设定温度时(在多次预实验中,模式切换过程的温度损失 < 1℃,因此本文设置设定温度高于待测温度 1℃),PLC 控制器控制接触器来通断激励电路和去磁电路,实现测试系统的自动切换,其中,可通过温度显示屏中的开始和复位按键完成激励电路和去磁电路的开通和关断,可在屏幕面板中输入设定温度和测试温度达到对磁环温度的快速响应和精确控制,如图 10 所示。

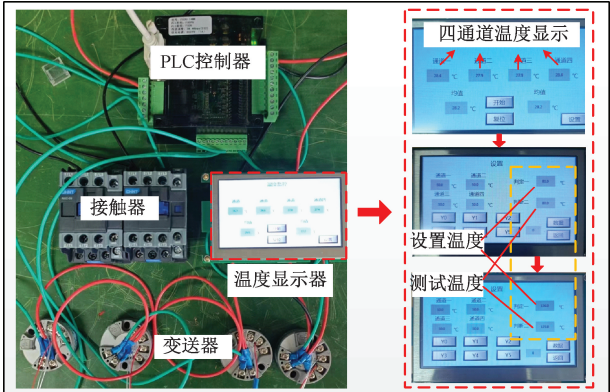


图 10 温度控制原理实验

Fig. 10 Experimental diagram of temperature control

3 实验验证

3.1 测试对象

铁基纳米晶(1K107B)具有高磁导率、高饱和磁通密度、低损耗,是一种新型的软磁材料,本文以纳米晶磁环为对象,测试磁环具体参数如表 1 所示。

表 1 纳米晶(1K107B)磁环参数

Table 1 Parameters of nanocrystalline magnetic rings

磁环参数	数值
外径 OD/mm	65
内径 ID/mm	55
高度 h/mm	10
堆叠系数 Stacking factor	0.78
横截面积 A_e /mm ²	38.9
重量 W/g	55.47
密度 Density/(g/dm ³)	7 200
外径 OD/内径 ID	1.18
原边匝数	6
副边匝数	6

文献[35]指出,根据式(6)可知,由于磁环内径小于外径,相同磁导率和激励电流下,磁环内径磁通密度大于外径,当磁环受到激励升温时,磁环内径温度会大于外

径,因此选择内外径差异较小的测试磁环,因其磁通分布近似均匀,自激励升温后,内外径温度差异较小,可近似为均匀升温,有助于减小因材料本身所产生的测量误差,提高测试准确性。本文选择外径内径比为 1.18 的磁环进行磁特性测试。

$$B = \mu \frac{I}{r} \quad (6)$$

式中: B 表示磁通密度; μ 表示磁导率; I 表示电流激励。

使用 FLUKE 热像仪采集自激励后磁环的温度,如图 11 所示,可以看出绕组温升远低于磁环温升,这表明在测试过程中可以忽略绕组温度对磁环温度的影响,且磁环内径温度略高于外径,与上述理论相符。

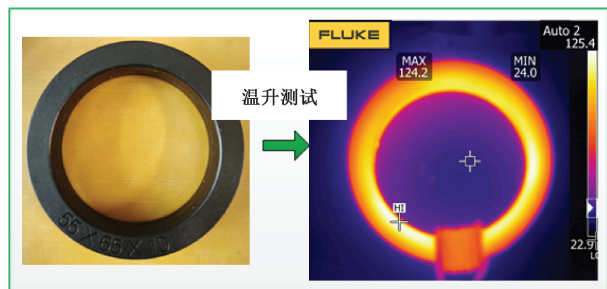


图 11 磁环升温测试

Fig. 11 Temperature rise test of magnetic ring

3.2 测量系统

如图 12 和 13 所示,分别搭建了恒温箱磁特性测量系统和磁环自升温磁特性测量系统。

3.3 测试时间对比

恒温箱变温测试系统测试流程总时长涵盖多个阶段:恒温箱升温时间、热电阻传感器变温时间、静置时间、去磁时间和测试时间。在实验中发现热电阻传感器变温时间滞后于恒温箱变温时间,这是由于纳米晶磁环存在护盒导致热传递滞后,根据国际标准所规定方法^[28],热电阻传感器实际检测温度为磁环表面温度,难以直接检测磁环内部温度,因此需将磁环在恒温箱中静置一段时间,以确保磁环整体温度均匀,该时间由实验者基于经验主观确定。表 2 为恒温箱测试系统变温时间,包括恒温箱升温时间、热电阻传感器变温时间和静置时间,为保证磁环整体受热均匀,本文将静置时间设为 30 min,并将磁环总变温时间定义为热电阻传感器变温时间和静置时间之和。

由表 2 可知,温度与恒温箱升温时间和热电阻传感器变温时间之间并无直接的正相关关系,这一现象的原因可能是由于恒温箱加热过程中需要提升箱内环境温度至预设值,而较高的设定温度会提高传热效率,因此即使设定温度较高,变温时间并不一定会随之线性增加,变温

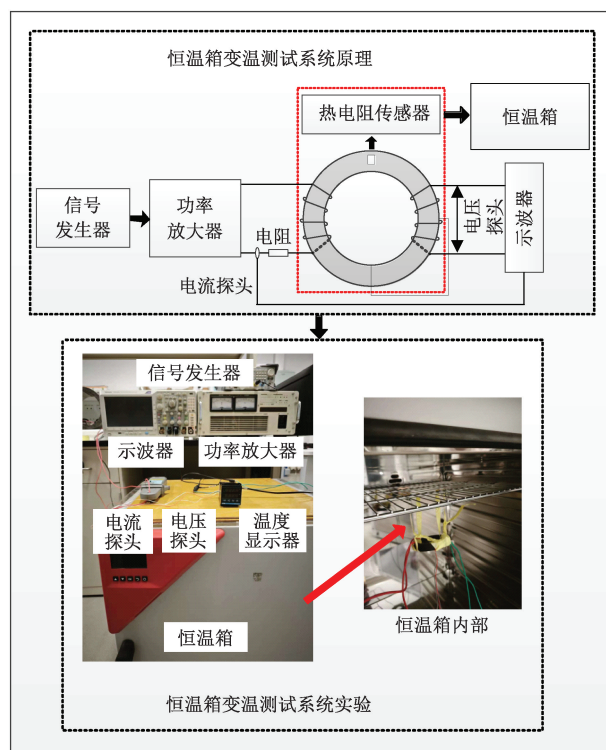


图 12 恒温箱变温测试系统原理图/实验图

Fig. 12 Principle diagram/experimental diagram of the temperature controlled chamber variable temperature measurement system

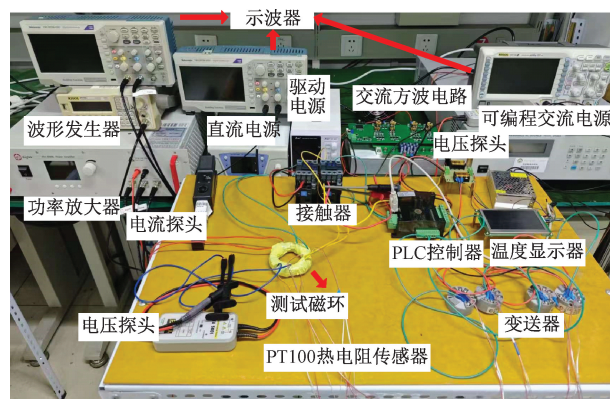


图 13 自升温变温测试系统实验

Fig. 13 Experimental diagram of the self-heating variable temperature measurement system

时间与温度之间并非直接正比关系。

本文所提自升温测试系统的测试总时间由 3 个阶段组成:自激励变温时间、去磁时间和测试时间。由于去磁时间和测试时间与恒温箱变温测试系统基本一致,本文设置去磁时间为 4 s,测试时,施加激励时间 <10 s,所以研究的重点在于比较磁环的升温时间。表 3 为在不同方波频率条件下磁环的升温时间对比。

表 2 恒温箱变温时间

Table 2 Consumption for various temperatures in temperature-controlled chamber (min)

温度	恒温箱升温时间	热电阻传感器变温时间	静置时间	总变温时间
50℃	42	68	30	98
75℃	59	77	30	107
100℃	59	69	30	109
125℃	58	66	30	106

表 3 自升温测试装置变温时间

Table 3 Time consumption of the self-heating system (min)

温度	40 kHz	50 kHz	60 kHz	70 kHz
50 ℃	1. 87	0. 84	0. 74	0. 47
75 ℃	4. 05	2. 09	1. 7	1. 02
100 ℃	7. 19	3. 44	2. 82	1. 65
125 ℃	11. 4	5. 49	4. 02	2. 49

表 3 给出了 40、50、60 和 70 kHz 4 个不同频率下的磁环升温变温时间对比数据。数据表明,随着频率的增加,磁环从 25 ℃ 升温至 125 ℃ 所需的时间显著减少。具体地,在 40 kHz 频率下,升温过程需要 11.4 min,而当频率提升至 70 kHz 时,仅需 2.49 min 即可完成同样的升温。与表中所示的恒温箱变温时间相比,自升温测试系统将磁环的升温时间大幅缩短了 90% 以上。此外,自升温测试系统中热电阻传感器所显示温度客观显示了磁环的整体温度,从而避免了实验者因主观判断而导致的实验误差。这种测试方法不仅提高了效率,而且增加了测试结果的准确性和可靠性。

3.4 磁特性对比分析

结合图 12 和 13 所搭建的两种方法测量不同温度下纳米晶合金在正弦波激励下的 B-H 特性和 B-P 特性,选取 50 ℃、75 ℃、100 ℃ 和 125 ℃ 4 个温度点的磁特性进行对比分析。本研究将恒温箱变温测试系统的静置时间设为 30 min,将自升温测试系统施加的升温激励设置为 40 kHz,测试磁环为同一磁环。图 14 和 15 中虚线为恒温箱变温磁特性测试系统,实线为自升温磁特性测试系统。

图 14 为纳米晶合金在 5 和 10 kHz 频率下,恒温箱变温测试系统和自升温测试系统在 4 个温度下的 B-H 曲线,其中,测试磁通密度点从 0.1~1.0 T 共 10 个测试点。由图 14(a) 和 14(b) 可知,在 4 个测试温度下,两种方法测试的磁化曲线接近重合但并不完全一致,这是由于两种升温方法下,磁环实际温度存在一定的差异以及仪器测试精度所产生的误差。由图 15 可知,相同频率下,随着温度的升高,纳米晶材料饱和磁通密度随之降低。相

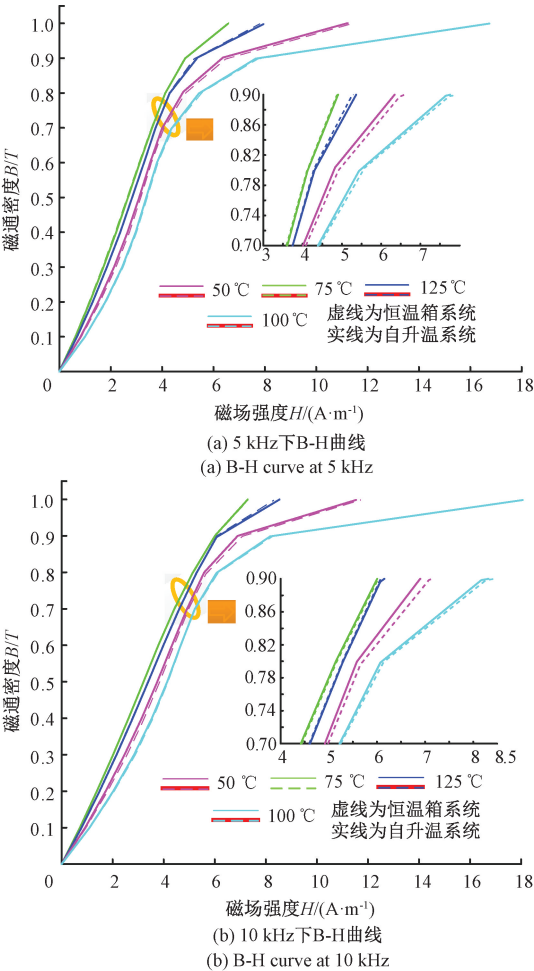


图 14 纳米晶 B-H 曲线对比
Fig. 14 Comparison of B-H curves

同温度下和磁通密度下,随着频率的升高,纳米晶材料磁场强度变大,这意味着,材料磁导率随频率增大而变小。

图 15 为纳米晶合金在 5 kHz 和 10 kHz 频率下,两种测试系统 B-P 曲线变化趋势。由图 15 可知,两种测试系统在不同频率下损耗的测量结果相接近。在相同频率下,纳米晶材料损耗与温度正相关。在相同温度下,纳米晶材料损耗随频率升高而变大。

综上,可以看出两种测试方法具有相近的测量结果和相同的测量趋势,测量结果的不完全一致可能是由于磁环实际温度不完全一致以及多次循环测量引起磁环内部结构的细微变化等所产生的测量误差。测量结果表明,所提自升温变温测试系统具有一定的实用性和可行性。

4 结 论

本文针对现有软磁材料变温磁特性测试效率较低的

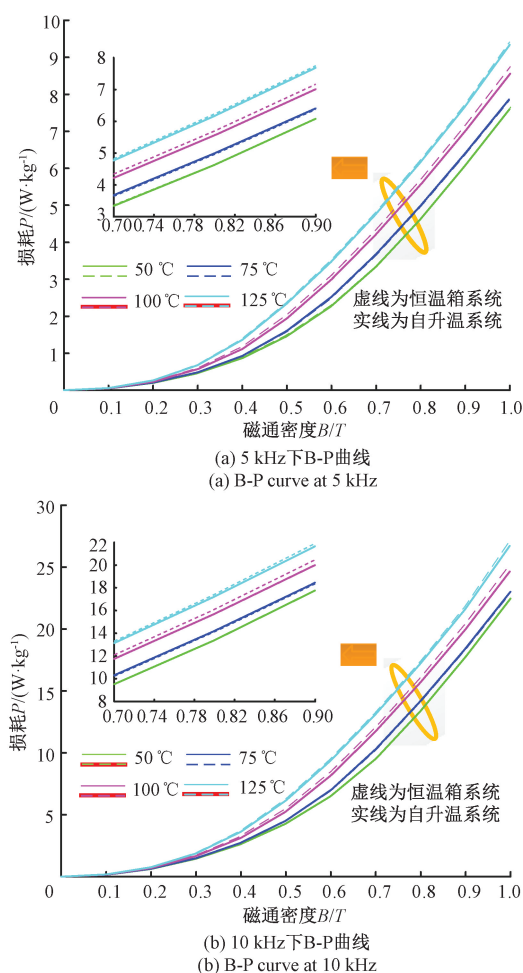


图15 纳米晶 B-P 曲线对比

Fig. 15 Comparison of B-P curves

问题,提出一种基于磁环自升温的磁特性测量方法,该方法包括激励电路、去磁电路、测试电路和温度控制电路。首先,研究软磁材料实际温升的影响条件,确定了饱和磁通密度工作区、频率、激励方式3个影响因素,并设计了一种方波逆变电路对磁环施加激励,使得磁环产生磁滞和涡流损耗快速升温。其次,根据现有工业界和国际知名设备商的去磁方法,结合实验室条件,设计了一种30 Hz低频交流衰减去磁电路对磁环进行去磁,使得磁环在测试前达到磁中性状态。最后,根据国家及国家标准中规定的磁特性测试方法测试磁环的多种磁特性。相比恒温箱测试法,自升温测试法在达到相似测量精度的基础上,可显著提高软磁材料的变温速度,磁环升温时间减少了90%以上,极大缩短了整体实验时间。同时考虑到磁环受到激励时,内径温度略高于外径,因而采用两个热电阻传感器采集磁环内外径温度的平均值作为磁环升温的整体温度,避免了恒温箱测试法中,由于实验者主观判断升温时间所导致的测量误差。需要注意的是,自升温测试方法虽可有效提高磁环升温的速度,不过在测量过程中仍会存在一定的热量损失,本文采用保温材料来

对磁环进行固温处理,减少测试过程中磁环的热量损失,以保证测量温度的准确性,未来将进一步研究磁环升温后的定温方法。此外,所提方法可用于升温测试,难以适用在低温以及极端环境下的测量。

参考文献

- [1] 马骁雨,张慧芬,王植,等. 基于 SSA-BPNN-ARIMA 残差校正的变压器套管温度预测[J]. 国外电子测量技术, 2022,41(2):151-156.
MA X Y, ZHANG H F, WANG ZH, et al. Transformer bushing temperature prediction based on SSA-BPNN-ARIMA residual correction [J]. Overseas Electronic Measurement Technology, 2022,41(2):151-156.
- [2] 江兵,杨春,杨雨亭,等. 基于 ACO 优化 BP 神经网络的变压器热点温度预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,36(10):235-242.
JIANG B, YANG CH, YANG Y T, et al. Transformer hotspot temperature prediction based on ACO-optimized BP neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(10): 235-242.
- [3] 汪晶慧,肖俊涛,陈为. 电感电压部分补偿交流功率法测量磁心损耗研究[J]. 仪器仪表学报, 2022,43(1):282-292.
WANG J H, XIAO J T, CHEN W. Research on core loss measurement using inductive voltage partial compensation AC power method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 282-292.
- [4] 吴卿,谭继东,郑阳,等. 磁晶各向异性材料磁巴克豪森噪声的非均匀分布特性研究[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(3):29-37.
WU Q, TAN J D, ZHENG Y, et al. Research on non-uniform distribution characteristics of magnetic Barkhausen noise in magnetocrystalline anisotropic materials [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 29-37.
- [5] YANG M, LI Y J, YANG Q X, et al. Design of novel high-frequency 2-d magnetic properties tester for nanocrystalline alloy [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-4.
- [6] LI Y J, YANG Q X, ZHU J G, et al. Design and analysis of a novel 3-d magnetization structure for laminated silicon steel [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2014, 50(2): 389-392.
- [7] ONO N, UEHARA Y, ONUMA T, et al. Multimodal iron loss analyses based on magnetization processes for various soft magnetic toroidal cores [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 603: 172222.
- [8] 曹永娟,张伟,许烨枫,等. 基于三维正交磁场的

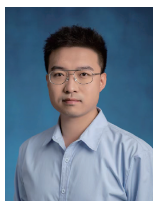
- AFPMMM 铁耗计算与分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(21): 16-22.
- WU Q J, ZHANG W, XU Y F, et al. Research on non-uniform distribution characteristics of magnetic Barkhausen noise in magnetocrystalline anisotropic materials [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (3): 29-37.
- [9] ZHANG X W, LI L, ZHANG Y, et al. Magnetic measurement of nanocrystalline alloy based on a single sheet tester [J]. Volume, 2020, 15 (1): 85-93.
- [10] DOU Y, LI Y J, CHEN T, et al. Vibration and noise characteristics of nanocrystalline cores under high-frequency and non-sinusoidal excitation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2024, 60 (9): 1-5.
- [11] MA G, CHENG L, HAN Y, et al. Analysis of the magnetic properties of ultra-thin grain-oriented silicon steel and fe-based amorphous alloys from power frequency to intermediate frequency [J]. Applied Sciences, 2024, 14: 3162.
- [12] CHEN J Q, WANG D, CHENG S W, et al. Modeling of temperature effects on magnetic property of non-oriented silicon steel lamination [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51 (11): 1-4.
- [13] CHEN J, CHEN Z, WANG D, et al. Influence of temperature on magnetic properties of silicon steel lamination [J]. AIP Advances, 2017, 7 (5): 056113.
- [14] REGNET M, SCHÄUFELE T, DIETZ A, et al. Temperature influence on core losses and magnetization demand of electrical steel sheets using adapted Epstein frame and ring probe [J]. 2023 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2023: 1-7.
- [15] YAMAMOTO T, OHYA Y. Single sheet tester for measuring core losses and permeabilities in a silicon steel sheet [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1974, 10 (2): 157-159.
- [16] MIYAGI D, OTOME D, NAKANO M, et al. Measurement of magnetic properties of non-oriented electrical steel sheet at liquid nitrogen temperature using single sheet tester [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 (2): 314-317.
- [17] KUME K, INOUE R, UEDA H, et al. Study on the magnetic properties of metal substrates at low temperature by fabricated compact SST [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32 (6): 1-4.
- [18] 陈德志, 张玉庸, 白保东, 等. 不同温度及谐波下硅钢片电磁-力特性与变频电机振动[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4647-4656.
- CHEN D ZH, ZHANG Y Y, BAI B D, et al. Magnetic-electric and mechanical properties of silicon steel sheets and vibration of variable frequency motors at different temperatures and harmonics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (22): 4647-4656.
- [19] YANG M, LI Y J, YANG Q X, et al. Magnetic properties measurement and analysis of high frequency core materials considering temperature effect [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30 (4): 1-5.
- [20] TAKAHASHI N, MORISHTA M, MIYAGI D, et al. Comparison of magnetic properties of magnetic materials at high temperature [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47 (10): 4352-4355.
- [21] CAO Y, YANG F, LI J, et al. High-frequency magnetic characteristics and operating thermal stability of industrialized Fe76Si13B8Nb2Cu1 nanocrystalline alloy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 526: 167691.
- [22] WANG N, ZHANG P N, CHENG H. Research of magnetic properties of nanocrystalline materials considering temperature effects [J]. AIP Advances, 2025, 15 (2): 025315.
- [23] 王宁, 张鹏宁, 苗登吉, 等. 变温条件下纳米晶材料的 Steinmetz 损耗模型研究 [J/OL]. 高电压技术, 1-14 [2025-07-08]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hev.20250295>.
- WANG N, ZHANG P N, MIAO D J, et al. Steinmetz loss model of nanocrystalline alloys under temperature-varying conditions [J]. High Voltage Engineering, 1-14 [2025-07-08]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hev.20250295>.
- [24] YANG M, LI Y J, YANG Q X, et al. Magnetic properties measurement and analysis of high frequency core materials considering temperature effect [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.
- [25] ZHANG W, YANG Q, LI Y, et al. Temperature dependence of powder cores magnetic properties for medium-frequency applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58 (2): 1-5.
- [26] HUANG W, XIA Z, GUO P, et al. Analysis and experimental research on high frequency magnetic properties of different magnetostrictive materials under variable temperature conditions [J]. AIP Advances, 2022, 12 (3): 035231.
- [27] SUN J, REN J, LI J, et al. Measurement and analysis of magnetic properties of permalloy for magnetic shielding devices under different temperature environments [J].

- Materials, 2023, 16: 3253.
- [28] PANAKHOV T M, ISAEVA A A, RAFIEV N M, et al. Magnetic thermocouples made of Co-Fe and Ni-Fe permalloys [J]. Technical Physics, 2019, 64: 987-989.
- [29] 李永建, 范子容, 张长庚, 等. 变温条件下钕钴永磁材料损耗特性测量与定量分析[J]. 电工电能新技术, 2025, 42(2): 68-77.
- LI Y J, FAN Z R, ZHANG CH G, et al. Measurement and quantitative analysis of loss characteristics of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ magnets under variable temperatures [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 42(2): 68-77.
- [30] XIAO L, YU G, ZOU J, et al. Experimental analysis of magnetic properties of electrical steel sheets under temperature and pressure coupling environment [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 475: 282-289.
- [31] GAO S, ZHAO X, ZHANG X, et al. Dynamic hysteresis model for predicting hysteresis property and iron loss for various soft magnetic materials under non-sinusoidal excitation [J]. Physica B: Condensed Matter, 2025, 699: 416875.
- [32] WANG W, FAN J, LI C, et al. Low-loss soft magnetic materials and their application in power conversion: progress and perspective[J]. Energies, 2025, 18(3): 482.
- [33] IEC 60404-6:2018+COR1:2018+AMD1:2021. Magnetic materials-Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 100 kHz by the use of ring specimens[S].
- [34] IEC 60205 Calculation of the effective parameters of

magnetic piece parts [S]. Geneva: IEC, 2016.

- [35] 天津大学. 实现多磁导率连续变化环形磁芯电感的装置及方法[P]. 201710635992. 9. 2018-11-27.
- Tianjin University. Device and method for achieving continuous variation of multi permeability annular magnetic core inductance[P]. 201710635992. 9. 2018-11-27.

作者简介



王宁, 2016 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2022 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 现为中国矿业大学(北京)博士研究生, 主要研究方向为软磁材料、高频变压器。

E-mail: wn_5245@163.com

Wang Ning received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2016, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. He is currently a Ph. D. candidate in China University of Mining and Technology. His main research interests include Magnetic materials and High-frequency transformer.



张鹏宁(通信作者), 2019 年于华北电力大学获得博士学位, 现为中国矿业大学(北京)副教授, 主要研究方向为软磁材料、高频变压器。

E-mail: zpn2014@163.com

Zhang Pengning (Corresponding author) received his Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2019. He is currently an associate professor in China University of Mining and Technology. His main research interests include Magnetic materials and High-frequency transformer.