

温度对非晶合金卷形铁心磁特性及振动的影响分析

韩天衡¹, 祝丽花¹, 沙 瑞¹, 石永恒¹, 张露予²

(1. 电工电能新技术天津市重点实验室, 天津工业大学, 天津 300387;
2. 天津市特变电工变压器有限公司, 天津 300308)

摘要: 非晶合金作为新型节能铁心材料,其低损耗特性使其在铁心电力设备中拥有广泛的应用前景。非晶合金变压器实际运行环境复杂,铁心工作温度会随环境温度而升高,同时铁心自身也存在温升效应,因此铁心温度对非晶材料磁特性和振动特性的影响不能忽视。为更准确分析非晶铁心振动,本文首先对未退火的非晶带材进行了磁特性测量,并对比分析不同温度下退火后的非晶卷形铁心的磁化特性;在此基础上考虑磁致伸缩效应,建立非晶卷形铁心的磁-机械耦合有限元模型,对非晶铁心磁通密度和应力进行了仿真计算。最后,利用振动分析仪测量铁心振动加速度验证计算值,并研究分析了该铁心在不同温度下的振动加速度变化。

关键词: 非晶卷形铁心; 温度影响; 磁特性测量; 振动分析

DOI: 10.12067/ATEEE1808018 **文章编号:** 1003-3076(2019)11-0066-08 **中图分类号:** TM15

1 引言

非晶合金材料具有高导磁、低损耗的特性,以非晶合金作为铁心的电力设备节能效果显著,运行成本低^[1],十分符合我国的发展要求。但由于其磁致伸缩效应相比传统硅钢大很多,非晶铁心在运行时产生的电磁振动难以控制,较大的电磁振动不仅导致非晶电力设备噪声增大,并且影响其运行寿命。因此,对非晶铁心设备的电磁振动研究也成为相关领域亟待突破的热点问题。

非晶合金变压器的振动主要来源于铁心的磁致伸缩效应^[2],实现非晶合金磁化特性以及磁致伸缩特性的准确测量是分析铁心振动的基础^[3]。同时,变压器实际运行环境复杂,进一步考虑磁致伸缩振动影响因素,在更贴近设备实际运行工况下分析铁心振动是当前的研究趋势。

国内外学者对非晶合金磁特性以及非晶设备振动已开展研究^[4-7]。日本 Takashi Todaka 等学者利用二维磁化特性测量装置对退火后的 2605HB1 非晶样片的磁特性进行测量,验证了退火后的非晶磁

化各向异性很小,并且易磁化方向发生改变^[4]。文献[5]自主研制了非晶合金应力-磁特性实验测量平台,实现了对非晶合金带材以及叠片非晶块 50MPa 拉力及 50MPa 压力下的磁特性测量,并通过对比测量数据,提出非晶带材励磁过程中的最大磁场强度会随拉应力增大而减小,随压应力增大而增大;同时,由于内部每片非晶带材的收缩而导致的内部压应力会使叠片形式的非晶块磁化特性发生改变。文献[6]为分析非晶铁心的振动特性,将两个高度相同、宽度不同的 2605SA1 非晶卷形铁心框用绝缘胶带固定,利用振动分析仪对铁心各个测点振动加速度值进行测量研究,并对比分析在铁心底部加入不同减振材料时铁心的振动变化。文献[7]建立了考虑磁致伸缩效应的非晶电机定子铁心磁-机械耦合数学模型,采用非晶合金定子铁心模态实验对卷绕结构铁心弹性模量进行修正的方法研究非晶合金定子铁心卷绕结构对振动的影响,并确定了铁心在不同供电频率时振动随磁通密度变化曲线,指出定子铁心噪声随磁通密度呈对数函数规律变化。

虽然非晶合金变压器铁心损耗相比传统硅钢

收稿日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51507110; 51577131)、天津市高等学校创新团队培养计划项目(TD13-5040)

作者简介: 韩天衡(1992-),男,河北籍,硕士研究生,研究方向为非晶合金变压器减振降噪;
祝丽花(1984-),女,河南籍,副教授,博士,研究方向为现代工程电磁场与磁技术、电工设备减振降噪技术。

低,但其仍存在一定程度的温升,另外考虑实际非晶变压器运行环境的复杂性,绕组的温升较大^[8],研究不同温度下非晶铁心的磁特性以及振动具有一定实际应用意义。本文首先从非晶合金带材以及卷形铁心磁特性测量着手,搭建了非晶合金卷形铁心磁化特性测量系统,并实验测量不同温度下铁心磁化特性的变化。同时借助于单片磁化和磁致伸缩测量装置对未退火的相同型号非晶带材进行测量并对比分析实验数据;基于测量数据,考虑铁心磁致伸缩效应,实现了对该非晶铁心的磁场、应力场的三维有限元数值分析,得到了铁心应力场分布,并对实际铁心进行振动实验验证计算结果。最后,对比研究该铁心在不同温度时的振动加速度变化,分析温度对卷形铁心振动的影响。

2 非晶合金磁特性测量

2.1 未退火的非晶带材测量

非晶合金单片带材在未退火的情况下,质地较软,容易弯曲,但硬度较大,不易断裂,形态较为平整,故采用传统电工钢片磁特性测量的标准和方法易实现对其准确测量。本文利用符合 IEC-60404^[9] 国际标准的单片磁化特性测量系统 (SST) 对 2605SA1 型非晶带材进行测量,测量设备如图 1 所示。关于磁致伸缩特性的测量,依据 IEC/TR-62581^[10] 国际标准,本文借助单片磁致伸缩特性测量设备 (MST) 对非晶带材进行特性测量,如图 2 所示。



图 1 磁化特性单片测量装置

Fig.1 Single sheet measuring device for magnetizing feature

磁致伸缩测量设备主要包括磁致伸缩磁路装置、激光发射接收端以及底部隔振台,磁路装置给待测样片励磁,激光发射接收端投射激光至粘贴在样片上的反射片上,并接收反射片反射的光来感应样片上的磁致伸缩效应。磁致伸缩磁路装置和激光发射接收端工作在用空气压缩机充气的悬浮的工作平台上,以实现隔断外部振动干扰。该装置对测量样

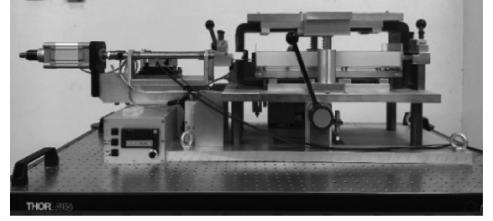


图 2 磁致伸缩测量装置

Fig.2 Magnetostriction measurement device

品的尺寸有效要求为 100mm×600mm。

通过符合国际标准的磁特性测量设备对未退火的非晶合金带材磁特性进行测量实验,并将磁化特性测量结果与退火后非晶合金磁化特性对比分析,以此实现非晶铁心退火工艺对其磁化性能的影响研究。同时将磁化特性 $B-H$ 曲线应用于磁场计算,研究相同激励下,温度升高时非晶铁心的磁通密度的变化。而非晶合金磁致伸缩特性测量结果将直接应用于磁-机械耦合模型,基于磁致伸缩量与磁通密度的关系实现对非晶铁心的磁致伸缩振动的仿真计算。

2.2 退火后的非晶卷形铁心磁特性测量

目前非晶合金变压器铁心大多采用卷形结构,而在卷形铁心的制备过程中,需要退火工艺消除非晶合金铁心的内部应力^[11],这样将会改变非晶合金的磁特性;同时,退火后的非晶带材质脆易碎,传统的电工钢片磁特性测量标准方法很难对其实现测量,因此为更接近非晶变压器实际运行工况并准确计算分析铁心振动数据,对不同温度下退火后的非晶卷形铁心进行磁测量十分必要。

本文选取与带材同型号 (2605SA1) 退火后的非晶合金卷形铁心搭建磁化测量平台。铁心两柱用铜线制作绕组,绕组分别为励磁侧与感应侧,两侧线圈匝数相同,励磁侧连接交流稳压源提供工频正弦激励,并借助功率分析仪对感应侧的电压电流信号进行采集,恒温控制箱实现铁心温度调节。测量原理如图 3 所示。

基于励磁电流和感应电压测量数据,计算不同磁场强度下非晶铁心的磁通密度,并拟合得出磁化特性 $B-H$ 曲线,计算原理如式 (1)、式 (2) 所示^[12]:

$$H = \frac{N_1 I}{l_c} = k_1 I \quad (1)$$

$$B = \frac{U}{4.44 f A_c N_2} = k_2 U \quad (2)$$

式中, l_c 为铁心有效磁路长度; I 为励磁侧电流; N_1

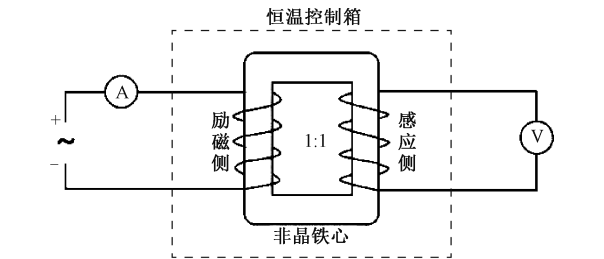


图 3 卷形铁心磁化特性测量原理

Fig.3 Measuring principle of magnetic properties of roll-core

为励磁侧线圈匝数; U 为感应侧电压; f 为激励频率; A_c 为铁心横截面积; N_2 为感应侧线圈匝数。

在铁心励磁同时,利用电热恒温箱对铁心加热处理,同时借助红外热成像仪对铁心温度进行实时监测,在各温度条件下对非晶铁心磁化特性测量。热成像仪观测图及磁化测量系统如图 4 所示。

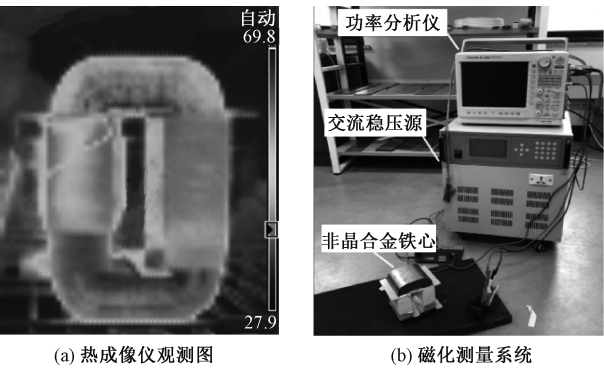


图 4 热成像仪观测图及铁心磁化特性测量系统

Fig.4 Thermal imaging monitoring and measurement system of magnetic properties of iron core

2.3 磁特性结果分析

依据 2.2 节描述方法,对非晶合金单片带材及铁心进行磁特性测量,分别绘制了退火前非晶带材与退火后各温度下卷形铁心的磁化 $B-H$ 曲线,对比结果如图 5 所示。

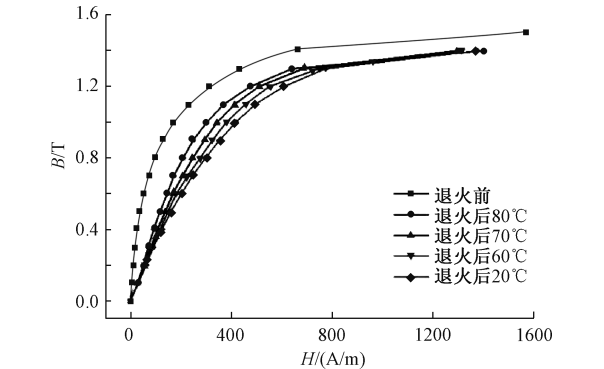


图 5 磁化特性测量结果对比

Fig.5 Comparison of $B-H$ curve measurement results

对比分析非晶合金在各条件下的 $B-H$ 曲线,可见 2605SA1 型的非晶退火卷形铁心与未退火的非晶单片带材磁化特性在饱和磁通密度以及磁化过程上均存在差别。未退火的非晶单片带材饱和磁通密度可达 1.5T 以上,而退火后的卷形铁心饱和磁通密度约为 1.4T。同时,温度对非晶铁心磁化特性也存在一定影响,当非晶卷形铁心的温度升高时,其在相同励磁强度下非晶铁心的磁通密度随之增大,但非晶铁心的饱和磁通密度随温度变化没有明显改变。相同激励条件下,非晶铁心磁通密度的变化会导致铁心磁致伸缩的变化,从而影响铁心振动。

非晶带材磁致伸缩单值曲线测量结果如图 6 所示,其中 λ_{pp} 为磁致伸缩峰峰值。非晶合金的磁致伸缩特性异于常规硅钢,当励磁磁通密度达到 0.5T 后,其磁致伸缩量峰峰值呈快速增长的趋势,并在接近饱和时达到最大,而在励磁磁通密度较小时,峰峰值变化略小。

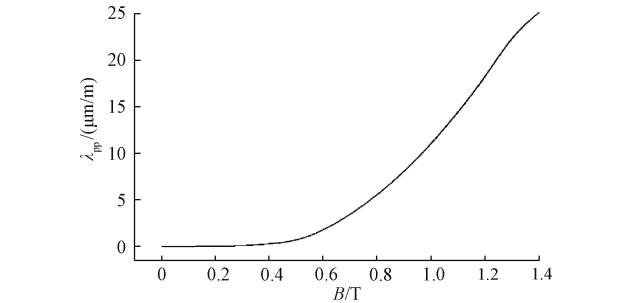


图 6 非晶合金磁致伸缩特性测量结果

Fig.6 Measurement results of magnetostrictive properties of amorphous alloys

3 计算理论分析

基于磁特性数据,该铁心为工频正弦交流激励,交变电场在铁心中产生交变磁场,同时产生感应电场,感应电场产生感应电流即涡流,忽略位移电流,电磁场计算满足麦克斯韦方程组,如式(3)、式(4)所示:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} \tag{3}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = - \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{4}$$

式中, \boldsymbol{H} 为磁场强度 (A/m); \boldsymbol{E} 为电场强度 (V/m); \boldsymbol{B} 为磁通密度 (T); \boldsymbol{J} 为电流密度 (A/m²)。

定义磁矢量磁位 \boldsymbol{A} , 满足 $\boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A}$, 经过变换可得到求解铁心电磁场的微分方程^[13]:

$$\nabla \times \boldsymbol{v} \nabla \times \boldsymbol{A} = \boldsymbol{J} \tag{5}$$

式中, ν 为非晶铁心磁阻率,磁通密度与磁场强度满足 $H = \nu B$ 。

在交变磁场作用下,非晶铁心产生磁致伸缩效应,磁致伸缩应变由求解得到的铁心磁通密度与磁致伸缩特性曲线差值拟合得出,如式(6)所示。并将该值以初始应变的形式加入有限元求解中。

$$\varepsilon_{ms} = \lambda_{pp} = k B$$

(6)

式中, ε_{ms} 为磁致伸缩应变; k 为曲线拟合系数。

根据弹性力学的基本原理,非晶铁心中磁致伸缩应变与磁致伸缩应力的关系满足广义胡克定律,其线性关系如式(7)所示^[14]:

$$\sigma_{ms} = D \varepsilon_{ms}$$

(7)

式中, σ_{ms} 为磁致伸缩应力; D 为弹性张量。

4 非晶合金卷形铁心的磁-机械耦合计算分析

4.1 非晶合金卷形铁心的有限元模型

基于上述计算原理,本文利用多场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics 建立非晶卷形铁心磁-机械有限元分析模型,考虑磁致伸缩效应对非晶卷形铁心进行磁场-应力场的计算,卷形铁心样机主要参数如表 1 所示。实际非晶变压器产品铁心工作磁通密度约为 1.2T,为模拟实际工况,本文计算应力及振动加速度均在铁心磁通密度为 1.2T 的条件下。非晶铁心有限元模型如图 7 所示。

表 1 非晶卷形铁心样机主要参数

Tab.1 Main parameters of amorphous roll-core	
参数	数值
绕组匝数	60
铁心高度/mm	159
激励电压/V	37.3
工作磁通密度/T	约 1.2

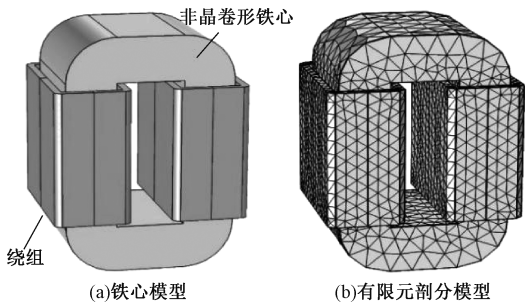


图 7 非晶铁心模型和有限元剖分模型

4.2 磁场结果分析

基于不同温度下的 $B-H$ 磁化曲线计算得到非

晶卷形铁心分别在 20℃ 与 70℃ 时,相同激励下的磁通密度分布,如图 8 所示。由图 8 可见,在铁心激励相同时,70℃ 下非晶铁心主工作磁通密度略高于常温。通过截取铁心柱内部中心位置三维截点处的磁通密度值可知,70℃ 的铁心截点磁通密度为 1.272T,而 20℃ 的磁通密度值为 1.233T。

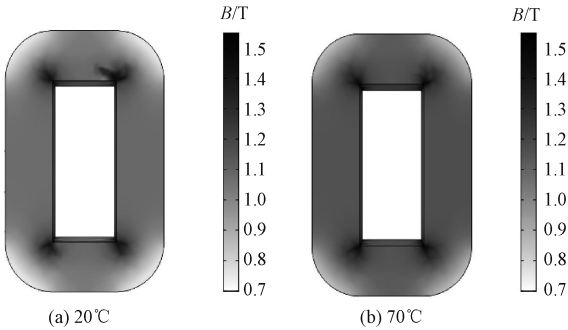


图 8 20℃ 与 70℃ 下非晶铁心磁通密度分布计算结果
Fig.8 Flux density distribution result of amorphous core under 20℃ and 70℃

4.3 振动结果分析

在工频正弦激励周期内 0.01s 时刻,磁化曲线分别为 20℃ 和 70℃ 时铁心瞬态应力计算结果如图 9 所示。固定约束为铁心底面,并可视化形变结果,将形变量放大 4327 倍。

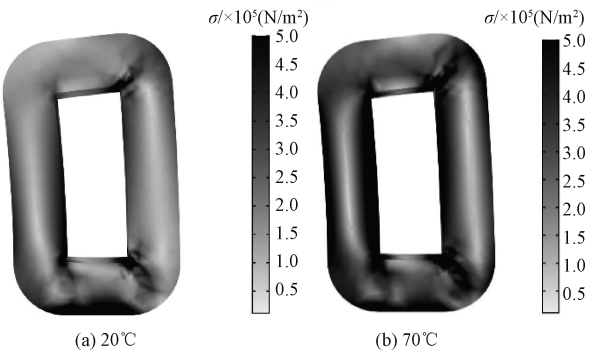


图 9 20℃ 与 70℃ 下非晶铁心应力计算结果
Fig.9 Stress result of amorphous core under 20℃ and 70℃

由图 9 可直观看出铁心振动趋势。当铁心温度升高,磁通密度增大,其应力分布值亦相对较大。应力分布在铁心边缘处相对较高,由于铁心底部设为固定约束,左侧线圈为激励端,铁心应力在底部出现激增。铁心形变主要集中在上轭及两侧,形变趋势随磁通方向变化。

为直观对比分析非晶铁心振动计算结果,本文截取铁心顶面中心位置的三维截点并计算顶面三个方向上加速度值,20℃ 与 70℃ 时截点加速度时域计

算结果如图 10 所示。由图 10 可见,20℃ 下顶面中心点 x 方向的振动加速度峰值平均在 0.71m/s^2 左右。而由于数值计算中仅改变了铁心 $B-H$ 磁化特性,70℃ 下振动趋势基本相同,三个方向加速度幅值升高并不明显,这说明温度升高改变非晶合金材料 $B-H$ 磁化特性对振动的影响不大。

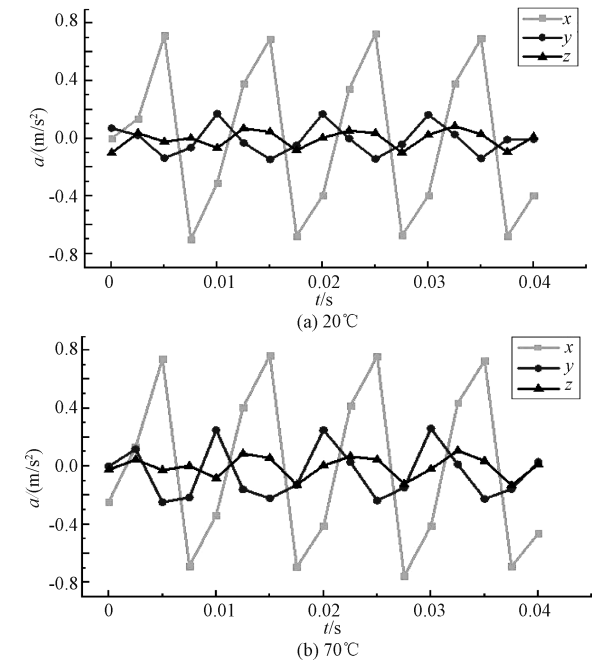


图 10 20℃ 与 70℃ 下非晶铁心加速度计算结果
Fig.10 Acceleration result of amorphous core under 20℃ and 70℃

5 非晶合金卷形铁心振动实验及结果分析

为验证非晶合金卷形铁心振动计算结果的合理性并研究温度变化对铁心振动的影响,本文借助德国 Head Acoustic 公司生产的振动测量分析设备,对非晶铁心振动随温度变化的规律进行研究。实验测量系统如图 11(a) 所示。实验选取铁心顶部中心位置为振动测点,利用三维振动加速度传感器对测点三个方向的加速度进行测量,测点位置及加速度 x 、 y 、 z 方向如图 11(b) 所示,加速度方向与数值计算加速度方向相同。

非晶铁心温度通过恒温控制箱调节,并在红外成像仪检测到各温度时,采集铁心磁通密度在 1.2T 时测点的振动情况。图 12(a) ~ 图 12(c) 分别为铁心 0.05s 内 20℃、40℃、70℃ 的振动加速度时域图。

20℃ 下测点的振动加速度幅值测量结果与仿真计算结果对比分析如表 2 所示。20℃ 下加速度幅值与实验测量振动趋势基本相符,验证了磁-机械耦合

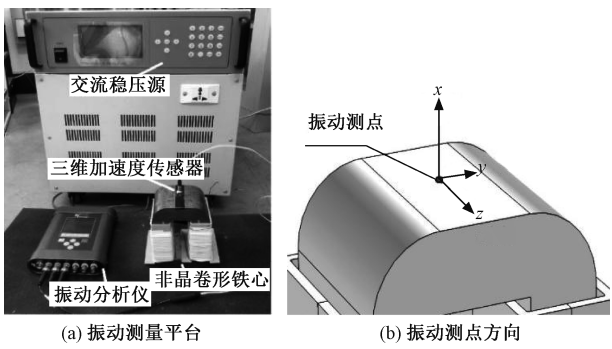


图 11 振动测量平台与振动测点方向示意图
Fig.11 Vibration measuring platform and schematic diagram of vibration measuring point

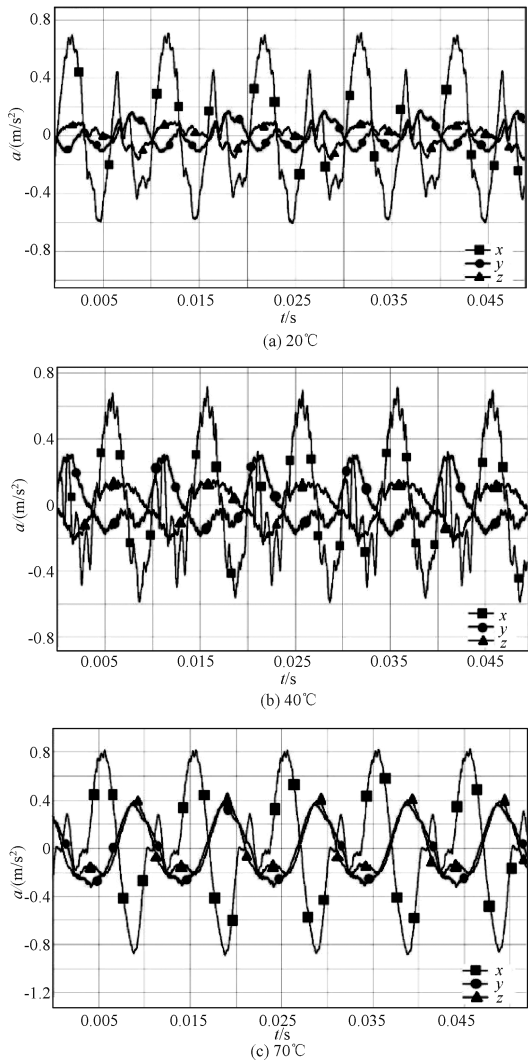


图 12 各温度下非晶铁心测点振动加速度时域图
Fig.12 Time domain diagram of measurement points vibration acceleration at various temperatures

计算的合理性。而 70℃ 时,振动加速度幅值差别较大, y 、 z 方向幅值差分别达到 31.2% 和 68%。这是

由于非晶铁心振动大小由铁心的磁化特性与磁致伸缩特性共同影响,而本文铁心振动数值计算主要考虑不同温度下铁心磁通密度变化对非晶铁心振动加速度大小的影响,20℃与70℃采用相同的磁致伸缩特性曲线。从数值计算结果看,当非晶铁心温度升高,磁化特性的改变对铁心振动影响不大,振动实验结果表明温度达到70℃铁心振动增强明显。由此可知,温度变化对非晶合金磁致伸缩效应的升高是振动增强的主要原因。

表 2 加速度幅值计算值与测量值对比

Tab.2 Acceleration amplitude comparison of calculated value with the measured value

数据结果	<i>x</i> 幅值	<i>y</i> 幅值	<i>z</i> 幅值
20℃ 计算值/(m/s ²)	0.707	0.161	0.092
20℃ 测量值/(m/s ²)	0.702	0.176	0.085
20℃ 误差 (%)	0.7	8.5	8.4
70℃ 计算值/(m/s ²)	0.757	0.249	0.126
70℃ 测量值/(m/s ²)	0.827	0.362	0.402
70℃ 误差 (%)	8.5	31.2	68.7

本文对非晶铁心温度每增加10℃时的测点振动加速度幅值进行测量整理,加速度幅值随温度变化如表3所示。由测点的振动加速度数据可知,铁心振动随温度上升有明显增大,但*x*方向的振动加速度在70℃以下无明显变化,加速度幅值维持在0.7m/s²左右。*y*方向加速度略微增加,*z*方向加速度随温度增加较为显著,非晶铁心温度达到60℃,*z*方向的加速度幅值较常温可增大约0.3m/s²。

表 3 振动测点加速度幅值随温度变化结果

Tab.3 Results of vibration measurement point acceleration amplitude changing with temperature

铁心温度/℃	<i>x</i> 幅值/(m/s ²)	<i>y</i> 幅值/(m/s ²)	<i>z</i> 幅值/(m/s ²)
20	0.702	0.176	0.085
30	0.696	0.245	0.153
40	0.710	0.291	0.204
50	0.719	0.298	0.321
60	0.732	0.318	0.367
70	0.827	0.362	0.402
增幅	0.125	0.186	0.319

根据实验测量数据可见,非晶卷形铁心的振动量与铁心温度成正比关系,各方向的振动加速度随铁心温度升高而增大,*x*方向仅在温度达到70℃后略微增加。图13为三个方向的振动加速度对温度变化拟合曲线,直观反映非晶铁心振动加速度与温度变化关系。

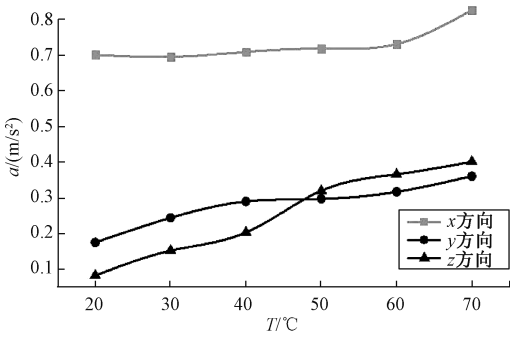


图 13 测点振动加速度幅值随温度变化曲线

Fig.13 Curve of vibration acceleration amplitude versus temperature

通过对非晶合金卷形铁心的振动测点进行不同温度下的振动加速度分析,可看出铁心温度的变化会影响其相同工作状态下的电磁振动。而依据本文研究结果,温度影响下磁化特性的改变导致铁心振动的增加很小,因此可进而得出推论,非晶材料的磁致伸缩量会随温度的升高而增大,从而导致铁心振动加剧。从非晶卷形铁心的结构角度分析,铁心框由多片非晶合金带材层叠而成,其内部磁化方向与带材面方向平行,每片带材磁致伸缩量的增大,宏观上表现为铁心*y*方向与*z*方向的振动加速度增大。因此,本文对铁心振动加速度的测量实验结果验证了上述结论,并为实际工程中非晶合金铁心变压器的振动噪声分析及限制提出了可靠的参考依据。

6 结论

本文首先实现了不同温度下非晶合金磁化特性测量,分析研究了温度变化对非晶合金磁化特性的影响,并在测量数据的基础上,实现了单框非晶卷形铁心在不同温度下磁场和应力场的计算分析。最后通过对非晶卷形铁心在各温度条件下的振动加速度测量实验,分析研究了非晶卷形铁心振动随温度变化规律,并得出以下结论:

- (1)非晶合金材料的退火工艺将对磁化特性产生影响,退火后的非晶合金铁心磁化特性相比未退火的非晶带材饱和磁通要低,磁化过程发生改变。而退火后的非晶铁心磁化特性会受到铁心温度的影响而变化,当铁心温度升高,相同激励条件下的磁通密度随之增大,但铁心温度对饱和磁通密度(约为1.4T左右)无明显影响。
- (2)通过不同温度下非晶铁心振动测量实验,验证了磁-机械耦合数值计算结果的合理性。计算

与实验结果对比分析可知,非晶合金铁心在温度升高的情况下 $B-H$ 磁化特性的改变对铁心振动影响很小,温度升高时非晶合金磁致伸缩特性的变化是影响铁心振动的主要因素。

(3)对比不同温度下非晶合金卷形铁心的振动测量数据可知,铁心在工作磁通密度时,振动与铁心温度呈正比关系,且 y 方向与 z 方向振动加速度幅值变化较为明显, x 方向幅值变化很小,仅在 70°C 以上发生变化。由此得出,非晶合金材料的磁致伸缩量随材料温度的升高而增大,平行于带材方向的增大相对较大,垂直方向无明显变化。

本文重点针对非晶合金卷形铁心的磁化特性及磁致伸缩振动随铁心温度变化规律进行研究分析,后期工作将进行非晶合金磁致伸缩特性与材料温度关系的进一步研究,为非晶合金铁心设备的减振降噪研究提出新思路。

参考文献 (References):

- [1] Ng H W, Hasegawa R, Lee A C, et al. Amorphous alloy core distribution transformers [J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79 (11): 1608-1623.
- [2] Hu Jingzhu, Liu Dichen, Liao Qingfen, et al. Electromagnetic vibration noise analysis of transformer windings and core [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10 (4): 251-257.
- [3] 田聪, 李琳, 宋雅吾, 等 (Tian Cong, Li Lin, Song Yawu, et al.). 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究 (Model experiment and simulation of core vibration for shunt reactor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 64-70.
- [4] Ueno S, Todaka T, Enokizono M. Measurement of vector magnetic properties of Fe-Si-B amorphous material [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47 (10): 3188-3191.
- [5] Mizuta T, Tani Y, Fujiwara K. Magnetic property of amorphous magnetic thin ribbon and its laminated bulk under tensile and compressive stresses [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (11): 6001005.
- [6] Du B X, Liu D S. Dynamic behavior of magnetostriction-induced vibration and noise of amorphous alloy cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51 (4): 7208708.
- [7] 吴胜男, 唐任远, 韩雪岩, 等 (Wu Shengnan, Tang Renyuan, Han Xueyan, et al.). 非晶合金卷绕定子铁心振动噪声的研究 (Experimental research on the vibration of amorphous alloy transformer core) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (11): 13-21.
- [8] 管银军, 李岩, 刘乃胜 (Guan Yinjun, Li Yan, Liu Naisheng). 非晶合金干式变压器温升计算 (Calculation of temperature rise of amorphous alloy dry type transformer) [J]. 变压器 (Transformer), 2018, 55 (6): 1-5.
- [9] IEC-60404-3, Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester [S].
- [10] IEC/TR-62581, Electrical steel - Methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens [S].
- [11] Alvarez K L, Martin J M, Ipatov M, et al. Magnetic properties of annealed amorphous Fe72.5Si12.5B15 alloy obtained by gas atomization technique [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (11): 1-5.
- [12] Dadic M, Jurcevic M, Petrovic K, et al. Automated system for the measurement of AC magnetization characteristics [A]. 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) [C]. 2018. 139-143.
- [13] 闫荣格, 郜玉香, 贲彤, 等 (Yan Rongge, Gao Yuxiang, Ben Tong, et al.). 直流偏磁下磁饱和电抗器铁心电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of magnetic saturation reactor iron-core under DC magnetic bias) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 27-33.
- [14] 杨意妹, 祝丽花, 王斌, 等 (Yang Yimei, Zhu Lihua, Wang Bin, et al.). 考虑磁致伸缩效应的可控饱和电抗器电磁振动分析 (Analysis of electromagnetic vibration of controllable saturated reactor considering magnetostriction effect) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 40-45.

Effects of temperatures on magnetic properties and vibration of amorphous alloy roll-core

HAN Tian-heng¹, ZHU Li-hua¹, SHA Rui¹, SHI Yong-heng¹, ZHANG Lu-yu²

(1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Tebian Electric Apparatus Transformer Stock Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: Amorphous alloy as a new type of energy-saving core material has a wide application prospect in electrical equipment because of its low loss characteristic. The actual operating environment of amorphous transformer is complex, and the operating temperature of the core will increase with the ambient temperature. Meanwhile, the core itself has a temperature rise effect, so the influence of the core temperature on the magnetic properties and vibration characteristics of amorphous materials cannot be ignored. In order to analyze the vibration of amorphous core more accurately, the magnetic properties of amorphous steel strip without annealing are measured first, and the magnetization characteristics of amorphous roll-core after annealing at different temperatures are compared and analyzed. Based on the magnetostrictive effect, the magneto-mechanical coupled finite element model of amorphous roll-core is established, and the magnetic density and stress of amorphous core are simulated. Finally, the vibration acceleration of the amorphous core is measured by a vibration analyzer, and the vibration acceleration changes of the amorphous core at different temperatures are analyzed.

Key words: amorphous alloy roll-core; temperature influence; magnetic properties measurement; vibration analysis