

## 退火对非晶合金磁特性及铁心磁致振动的影响

石永恒, 祝丽花, 韩天衡, 李维铮

(天津工业大学 工程电磁场与磁技术天津市重点实验室, 天津 300387)

摘要: 为研究退火处理对非晶合金磁特性及非晶铁心振动的影响, 采用磁性测量设备对退火前非晶带材及退火后非晶铁心的磁化特性和磁致伸缩特性进行了测量, 基于测量数据建立了非晶合金卷形铁心磁-机械多物理场耦合模型, 计算得出退火前后两种状态铁心各处的磁通密度分布及振动情况, 并与样机振动测量数据进行了比较。结果表明: 退火可提高非晶合金饱和磁感应强度, 改善磁导率, 并可减小磁致伸缩系数, 从而有效地抑制变压器铁心的振动。

关键词: 非晶合金; 磁性测量; 电磁振动

中图分类号: TM15 文献标志码: B 文章编号: 0254-6051(2020)04-0171-05

### Effect of annealing on magnetic properties and core magneto-induced vibration of amorphous alloy

Shi Yongheng, Zhu Lihua, Han Tianheng, Li Weizheng

(Tianjin Key Laboratory of Engineering Electromagnetic Field and Magnetic Technology, Tiangong University of Technology, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In order to study the effect of annealing treatment on the magnetic properties and the vibration of amorphous core, the magnetization and magnetostriction properties of amorphous strip before annealing and amorphous core after annealing were measured by using the magnetic property measuring equipment. Based on the measured data, the magnetic mechanical multi physical field coupling model of amorphous roll core was established. The flux density distribution and vibration of the two kinds of iron core before and after annealing were calculated and compared with the vibration measured data of the prototype. The results show that annealing can increase the saturation magnetic induction strength of the amorphous alloy, improve the magnetic permeability, and reduce the magnetostrictive coefficient, thereby effectively suppressing the transformer core vibration.

**Keywords:** amorphous alloy; measurement of magnetic properties; electromagnetic vibration

非晶合金材料比硅钢片单位损耗低, 用其制作电力变压器铁心可有效降低空载损耗<sup>[1]</sup>。但其磁致伸缩系数大, 由此引发的噪声问题制约了非晶变压器的发展<sup>[2]</sup>。因此, 对非晶合金材料特性及其铁心振动特性的研究是非晶合金变压器应用推广中一个亟待解决的问题。

非晶带材的退火处理可消除其急速冷却及卷绕过程中产生的内应力, 使其获得最佳性能。张德芬等<sup>[3]</sup>用电化学方法研究了退火工艺对纳米晶带材耐腐蚀性能的影响。结果表明, 经过不同温度退火后的纳米晶带材的耐腐蚀性能随退火温度的升高呈先增加后降低的趋势。Park 等<sup>[4]</sup>在横向磁场作用下, 通过对非晶及纳米晶带合金进行退火, 研究了其高频软磁性能和组织结构。结果表明经过优化退火, 两种合金均获得了非常高的有效磁导率和兆赫兹范围内的优异磁芯损耗特性。李山红等<sup>[5]</sup>通过改变退火过程中磁场的方

向, 施加复合磁场等方式来研究磁场退火对非晶合金磁性能的影响, 为满足不同应用要求的铁心退火条件提供了参考方法。铁心的磁致伸缩效应是非晶变压器噪声较大的根源, 李晓雨等<sup>[6]</sup>从其主要组成材料非晶带材出发, 首先分析了对非晶配电变压器噪声产生影响的各因素, 继而讨论在不影响带材磁性能的前提下, 制带过程中的卷取张应力及非晶带材卷取后的保温时间与带材磁致伸缩系数之间的变化关系, 从而得到磁致伸缩系数最小时对应的最佳带材卷取条件。

针对非晶合金磁致伸缩系数较大引发的振动噪声问题, 国内外学者对其振动特性进行了研究。Du 等<sup>[7]</sup>以 10 kV AAMDT 和 24 匝线圈中的两个磁芯为测试对象, 根据磁芯表面的磁通密度分布, 在磁芯表面设置传感器, 建立了用于信号测量的微机数据采集平台。结果表明 AMDT 铁心振动信号的基频比电源频率高 2 倍, 并提出在铁心表面涂覆一层绝缘胶时, 表面张力可以有效地抑制非晶态合金带的磁致伸缩。吴胜男等<sup>[8]</sup>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

收稿日期: 2019-09-29

作者简介: 石永恒(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事非晶合金变压器减振降噪研究, E-mail: 467698159@qq.com。通讯作者: 祝丽花, 副教授, 硕士生导师, E-mail: zhulihua@tjpu.edu.cn

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2020.04.036

行测量研究, 并对分析在铁心底部加入不同减振材料时铁心的振动变化。

为研究退火对非晶合金磁特性及磁致伸缩的影响, 本文对未退火的非晶带材磁化及磁致伸缩特性进行测量, 针对退火后非晶合金易碎的材料特性, 通过小型非晶变压器样机完成其退火后磁化特性的测量, 并借助多普勒激光测振仪测出磁致伸缩单值曲线, 基于测量数据并考虑铁心磁致伸缩效应实现了非晶变压器磁-机械多物理场耦合分析, 得出其磁通分布及其振动情况, 并测量了样机振动情况与数值计算结果比较, 验证了模型的准确性。

## 1 退火前后非晶合金的磁特性测量

### 1.1 退火前非晶合金的磁特性测量

试验用非晶合金带材单片的厚度为 0.02 ~ 0.03 mm, 在不受力的情况下, 其形态较为平整, 故非晶合金带材单片的磁化特性可通过单片磁化特性测量系统 (SST) 测量; 由于非晶合金带材单片极薄且质软, 进行磁致伸缩测量时不能保持其固定形状, 测量结果不够精准。为便于测量, 本文采用环氧树脂通过多片粘合的形式使其能够保持固定形状, 依据 IEC/TR 62581—2010《电工钢用单个薄片和艾普斯坦试样的磁致伸缩特性的测量方法》国际标准, 借助实验室的磁致伸缩特性测量设备对加工后的非晶合金样片进行磁致伸缩测量。该设备主要包括激磁装置, 激光发射接收端及底部隔振台, 如图 1 所示。该装置对测量样品的尺寸有效要求为 100 mm × 600 mm。激磁装置给待测样片励磁, 通过对粘贴在样片上反射片的反射光进行处理可得出磁致伸缩量, 施压装置可对样片实现 0 ~ 200 N 的拉力, 整套装置工作在用空气压缩机充气的悬浮工作平台上, 以实现隔断外部振动干扰。

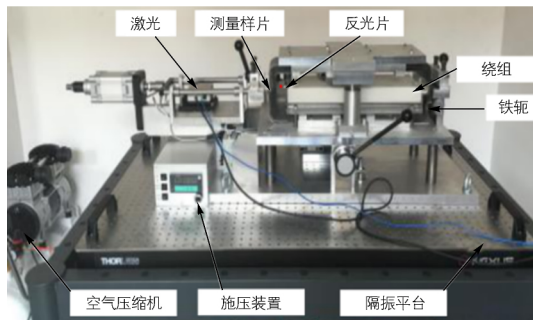


图 1 磁致伸缩测量装置

Fig. 1 Magnetostriuctive measuring device

### 1.2 退火后非晶合金的磁特性测量

在高温磁场环境中对非晶带材进行退火处理, 非晶

带材经热处理可以消除铁心的内在应力, 恢复其磁特性, 同时会使材料呈脆性, 随着退火温度的升高材料脆性增强。将铁心在最佳退火温度下进行保温处理对于调整铁心性能具有重要作用。国产非晶带材及进口材料其最佳退火温度多集中在 340 ~ 380 °C。铁基非晶合金在高温热处理时受温度和湿度影响易被氧化, 铁心表面的氧化层会直接导致铁心的空载损耗增大, 因此在整个热处理退火过程中必须通入工艺保护气体实现气氛保护。

鉴于退火后非晶合金易碎的材质特点, 传统的电工钢片磁特性测量标准方法难以对其实现测量。为准确分析退火后非晶合金磁特性及磁致伸缩的变化, 本文选取与带材同型号退火后的非晶合金卷形铁心搭建磁特性测量平台, 测量装置如图 2 所示。非晶样机铁心两柱用铜线设置绕组, 分别为激励侧与测量侧, 采用交流程控电源对其提供工频正弦激励, 通过功率分析仪对感应侧电压电流进行测量。

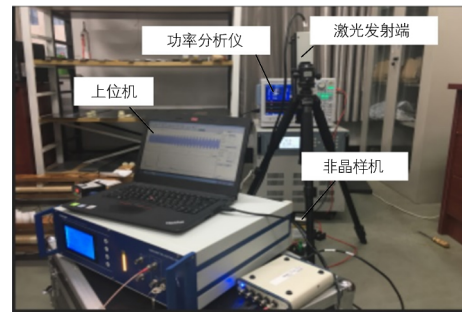


图 2 退火后磁特性测量装置

Fig. 2 Magnetic characteristic measuring device for annealed sample

非晶铁心的磁场强度  $H$  是通过励磁电流的测量代入公式 (1) 计算得出

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

式中:  $l_c$  为铁心有效磁路长度;  $I$  为励磁侧电流;  $N_1$  为励磁侧线圈匝数。

非晶铁心的磁感应强度  $B$  是通过测量感应侧绕组的感应电压并代入公式 (2) 计算得出

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

式中:  $U$  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。

对励磁侧电流与感应侧电压的测量结果并结合铁心参数可拟合出退火后非晶铁心的  $B-H$  曲线; 磁致伸缩通常以  $\lambda$  或  $\varepsilon$  表示在交变磁场下呈现的长度变化, 定义  $\lambda$  为电工钢片磁化时长度的增量  $\Delta L$  与其原长  $L$  的比值, 即

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

在实际工程应用中,材料的磁致伸缩特性蝴蝶曲线难以直接应用。为方便分析,本文采用定义伸缩量峰值  $\lambda_{pp}$  的方法,使用多普勒激光测振仪对退火后非晶铁心磁致伸缩进行测量;通过测量两点间的相对位移  $\Delta L$  与两点间距离  $L$  在不同磁通密度下的比值可得出非晶合金退火后的磁致伸缩单指曲线。

### 1.3 磁特性测量结果

通过 1.2 节描述的方法对退火前后非晶合金磁特性及磁致伸缩的测量结果如图 3 所示。由测量结果可见,非晶合金的磁导率高于常规电工钢片,非晶带材的饱和磁密约为 1.5 T,退火后的非晶合金饱和磁密可达到 1.56 T,低磁密时其磁化特性相近,当磁通密度高于 1.2 T 时退火后的非晶合金特性明显优于非晶带材。磁致伸缩特性测量结果表明退火后的非晶合金伸缩系数小于带材。由此可得出非晶合金的退火处理一方面可提高其饱和磁感应强度、改善磁导率,另一方面可减小其磁致伸缩效应,测量结果与实际工况符合。

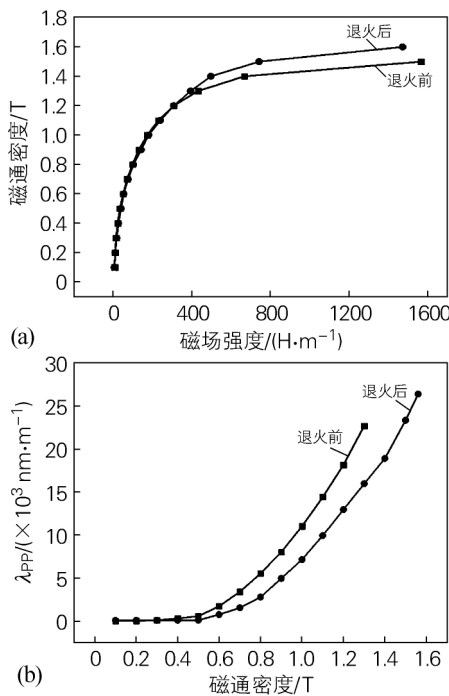


图 3 退火前后非晶合金的磁化特性曲线 (a) 和磁致伸缩特性曲线 (b)

Fig. 3 Magnetization characteristics (a) and magnetostrictive properties (b) of the amorphous alloys before and after annealing

## 2 计算理论分析

通常情况下,非晶变压器铁心区域中交变磁场产生感应电场,该电场产生感应电流即涡流,而工频交流激励下,位移电流可忽略不计,麦克斯韦方程组可表示为

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

式中:  $H$  为磁场强度,  $A/m$ ;  $E$  为电场强度,  $V/m$ ;  $B$  为磁通密度,  $T$ ;  $J$  为电流密度,  $A/m^2$ 。

引入磁矢位定义矢量磁位  $A$ , 满足  $B = \nabla \times A$ , 经过变换可得到求解铁心电磁场的微分方程

$$\nabla \times v \nabla \times A = J \quad (6)$$

式中:  $v$  为非晶铁心磁阻率, 磁感应强度与磁场强度满足  $H = vB$ ;  $J$  为激磁电流密度。

在交变磁场作用下,非晶铁心产生磁致伸缩效应

$$\lambda_{pp} = kB \quad (7)$$

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,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插值拟合得出

$$\sigma = D\varepsilon \quad (8)$$

$$\varepsilon = \lambda_{pp} = \frac{\sigma}{D} \quad (9)$$

式中:  $\sigma$  为磁致伸缩力,  $\varepsilon$  为磁致伸缩应变,  $D$  为弹性张量。

本文仅考虑自由状态下其磁特性及磁致伸缩效应,采用弱耦合的形式,由于非晶合金各向同性的材料特性,其铁心各处磁致伸缩系数不变。

## 3 非晶合金变压器的计算分析

基于上述理论分析,考虑磁致伸缩效应对变压器铁心的影响,建立非晶合金样机的有限元分析模型,样机铁心类型为卷绕式,如图 4 所示,并对非晶合金卷形铁心进行磁场-应力场的计算。

将测得的非晶合金退火前后磁化特性参数分别代入模型中计算,分析相同激励下铁心的磁感应强度见图 5。结果表明铁心内角磁密最高,外角磁密最低,两柱磁密分布均匀。在铁心模型上选取参考点(见图 6)的磁通密度计算结果如表 1 所示,表明在相同激励条件下,退火后非晶合金磁通密度明显高于退火前。

表 1 图 6 中各参考点处磁通密度计算结果 (T)

Table 1 Flux calculation results at the reference points in Fig. 6 (T)

参考点	退火前	退火后
1	1.23	1.34
2	1.26	1.39
3	1.23	1.34

调整铁心模型的输入激励,使其铁心两柱磁密约

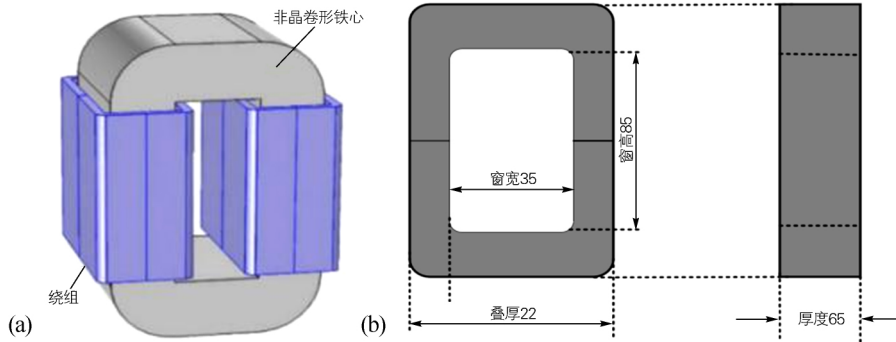


图4 铁心结构参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of structural parameters of iron core

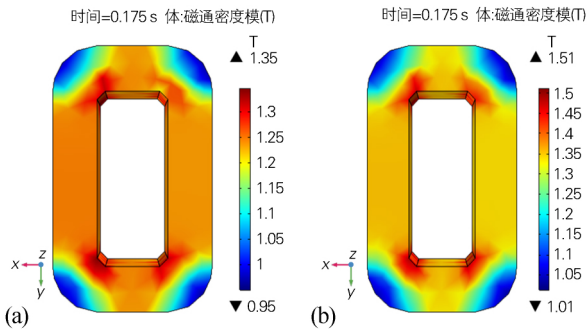


图5 铁心磁密计算结果

(a) 退火前; (b) 退火后

Fig. 5 Calculation results of the core magnetic density

(a) before annealing; (b) after annealing

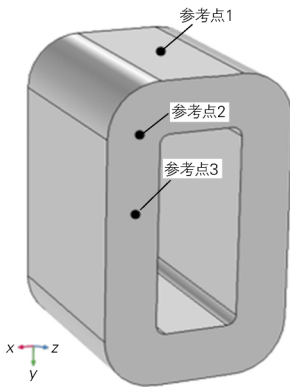
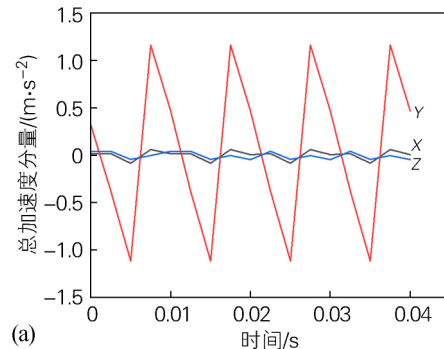


图6 参考点示意图

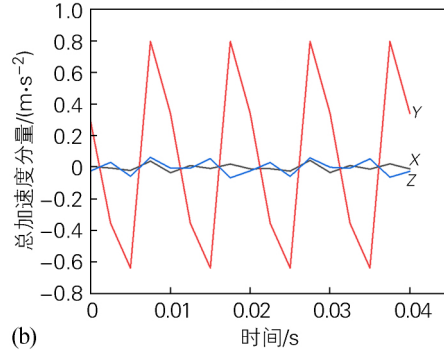
Fig. 6 Reference point diagram

为 1.2 T, 代入非晶合金退火前后的磁致伸缩单值曲线计算铁心上各处振动加速度, 参考点 1 的三轴(方向如图 6 标识) 振动加速度计算结果如图 7 所示。可见 参考点 1 处沿 Y 轴方向振动加速度幅值最大, 沿 X 轴、Z 轴方向振动加速度幅值较小, 其对铁心整体振动贡献较小。磁通密度约为 1.2 T 时, 退火前铁心沿 Y 轴振动加速度峰值约为  $1.2 \text{ m/s}^2$ , 而退火后为  $0.8 \text{ m/s}^2$ , 表明经过退火处理后非晶铁心的振动明显减小。

由于 Y 轴方向振动对铁心总体振动贡献最大, 为



(a)



(b)

图7 振动加速度计算结果

(a) 退火前; (b) 退火后

Fig. 7 Calculation results of the vibration acceleration

(a) before annealing; (b) after annealing

更好分析 Y 轴方向振动情况, 提取两模型中 Y 轴方向振动加速度分布如图 8 所示。由图 8 可知, 两模型底部加有固定约束处振动加速度值最低, 由底部向上铁心的振动加速度逐渐递增, 顶部振动加速度最大。根据两模型的颜色分布结合右侧图例可直观看到铁心各区域振动加速度值。

#### 4 非晶变压器振动特性测量及分析

为验证非晶合金卷铁心振动计算结果的合理性及退火前后磁致伸缩特性测量结果的准确性。本文借助振动测量分析设备(如图 9 所示) 对非晶铁心振动特性进行研究。在样机上部选取与模型中参考点 1 处位

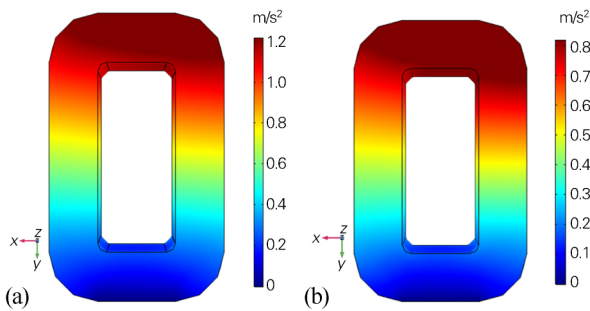


图 8 Y 轴振动加速度分布情况

(a) 退火前; (b) 退火后

Fig. 8 Distribution of Y-axis vibration acceleration

(a) before annealing; (b) after annealing

置相同的点。对其在磁通密度为 1.2 T 时的三轴振动加速度特性进行测量, 探头三轴方向与模型中方向保持一致, 对振动加速度测量数据低通滤波处理后的结果如图 10 所示。

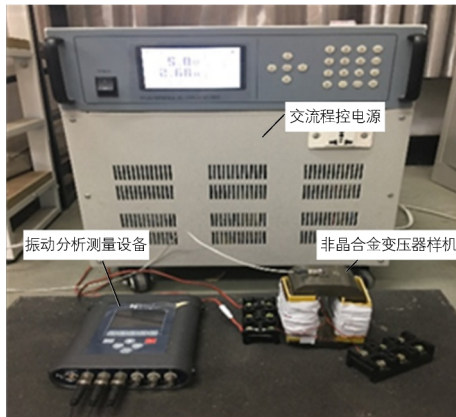


图 9 振动特性测量装置

Fig. 9 Vibration characteristics measuring equipment

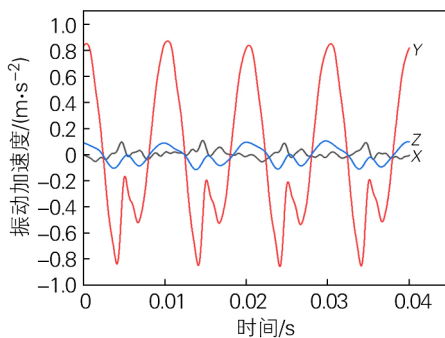


图 10 振动加速度测量结果

Fig. 10 Measurement results of vibration acceleration

可见, 其 Y 轴振动加速度峰值约为  $0.83 \text{ m/s}^2$ , 与退火后铁心振动计算结果基本一致, X 轴、Z 轴振动相对较小。由于模型中对变压器样机底部加有固定约束, 而试验样机体积较小, 其底部直接放于地面时难以达到理想的固定约束要求, 因此试验与计算结果的波

形存在差异; 工频正弦激励条件下磁致伸缩引起振动的主振频率为 100 Hz, 试验与计算结果的振动周期皆为 0.01 s, 由此可验证结果的准确性。

## 5 结论

在高温磁场环境中对非晶带材进行退火处理可以有效改善其磁特性, 本文通过磁特性测量设备对退火前后非晶合金的基础磁化及磁致伸缩特性进行测量, 基于磁特性测量结果在有限元分析软件中完成小型非晶样机磁-机械多物理场耦合模型。通过数值模型计算结果和实验测量数据的对比分析可得出结论如下:

1) 根据退火前后铁心各参考点处的数据计算结果, 表明非晶合金的退火处理可提高材料的饱和磁感应强度, 改善磁导率, 降低其磁致伸缩系数。

2) 退火后非晶铁心磁致伸缩的测量结果表明经过模型计算与样机振动的实验验证可有效地为非晶合金变压器铁心振动预测提供支持。

### 参考文献:

[1] 刘燕, 黎剑锋, 蔡定国. 非晶合金干式变压器的特点及性能分析[J]. 电力设备, 2006(11): 14-16.  
Liu Yan, Li Jianfeng, Cai Dingguo. Characteristics and performance analysis on amorphous alloy dry-type transformer [J]. Electrical Equipment, 2006(11): 14-16.

[2] 刘建华, 李永新, 杨国新. 浅谈降低非晶合金变压器噪声的措施[J]. 变压器, 2018, 55(6): 39-40.

[3] 张德芬, 陈孝文, 龙光文, 等. 退火工艺对  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  纳米晶带材耐腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(12): 86-89.  
Zhang Defen, Chen Xiaowen, Long Guangwen, et al. Influence of annealing process on corrosion resistance of  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  nano-grained ribbon [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(12): 86-89.

[4] Park J Y, Suh S J, Kim K Y, et al. The effect of magnetic field annealing on magnetic properties in ultrathin Fe-based nanocrystalline alloys [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(5): 3799-3801.

[5] 李山红, 卢志超, 李德仁, 等. 磁场退火对  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_9\text{B}_{11}$  非晶合金铁芯磁性能的影响[J]. 物理测试, 2008, 26(3): 18-20.  
Li Shan hong, Lu Zhichao, Li Deren, et al. Effect of magnetic field annealing on magnetic properties of  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_9\text{B}_{11}$  amorphous metallic cores [J]. Physics Examination and Testing, 2008, 26(3): 18-20.

[6] 李晓雨, 庞靖, 王玲, 等. 非晶带材卷取参数对非晶配电变压器噪声影响的研究[C]//第十二届中国电工钢学术年会. 2012.

[7] 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): 1-8.

[8] 吴胜男, 唐任远, 韩雪岩, 等. 非晶合金卷绕定子铁心振动噪声的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 13-21.  
Wu Shengnan, Tang Renyuan, Han Xueyan, et al. Research on vibration and noise of amorphous metal wound cores [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 13-21.