

Study on the Effect of Curing on the Soft Magnetic Properties of Nanocrystalline Core

Sensheng Ren¹, Chunyu Guo¹, Xiaojia Xu¹, Xuan'ang Lu¹, Nutor Raymond Kwesi¹, Xiaohong Yang², Yunzhang Fang^{1*}

¹Institute of Condensed Matter Physics, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

²Jinhua Polytechnic, Jinhua Zhejiang

Email: *fyz@zjnu.cn

Received: Jan. 19th, 2018; accepted: Feb. 7th, 2018; published: Feb. 14th, 2018

Abstract

In this paper, the Fe base amorphous ribbons prepared by the single roll fast quenching method are wound into magnetic cores, and nanocrystalline cores are made by annealing at 500°C for 2 hours. Then 3 kinds of curing agents, organosilicon, polyurethane and epoxy resin, are used to solidify nanocrystalline cores. Using TD8120 soft magnetic AC test system and TD8220-A soft magnetic DC test system, the AC and DC soft magnetic properties of nanocrystalline core before and after curing were respectively tested. The effects of 3 different curing agents on the coercivity, permeability, loss and other soft magnetic parameters of the nanocrystalline core are compared and analyzed. The results show that the soft magnetic properties of the nanocrystalline core with organosilicon solidified are the least affected by curing, and the best DC soft magnetic properties are obtained; the soft magnetic properties of the nanocrystalline core with polyurethane solidified are the least affected by curing, and the best AC soft magnetic properties are obtained. Solidification is the key technology for the preparation of nanocrystalline core; it is of great significance to reduce the effect of curing on the properties of nanocrystalline core. The results of this study have value for the improvement of the solidification process of nanocrystalline core.

Keywords

Curing Agent, Nanocrystalline Core, Soft Magnetic Property, Coercivity, Permeability

固化对纳米晶磁芯软磁性能影响的研究

任森生¹, 郭春羽¹, 许校嘉¹, 陆轩昂¹, Nutor Raymond Kwesi¹, 杨晓红², 方允樟^{1*}

¹浙江师范大学凝聚态物理研究所, 浙江 金华

²金华职业技术学院, 浙江 金华

Email: *fyz@zjnu.cn

*通讯作者。

文章引用: 任森生, 郭春羽, 许校嘉, 陆轩昂, Nutor Raymond Kwesi, 杨晓红, 方允樟. 固化对纳米晶磁芯软磁性能影响的研究[J]. 材料科学, 2018, 8(2): 68-80. DOI: 10.12677/ms.2018.82009

收稿日期：2018年1月19日；录用日期：2018年2月7日；发布日期：2018年2月14日

摘要

本文将单辊快淬法制备的Fe基非晶薄带绕成磁芯，经500℃退火2小时制成纳米晶磁芯，然后选用有机硅、聚氨酯和环氧树脂3种固化剂分别固化纳米晶磁芯。采用TD8120型软磁交流测试系统和TD8220-A型软磁直流测试系统，分别测试固化前后纳米晶磁芯的交、直流软磁性能。对比分析采用3种不同固化剂固化对纳米晶磁芯的矫顽力、磁导率、损耗等软磁参数的影响。研究表明，采用有机硅固化的纳米晶磁芯的直流软磁性能受固化影响最小，其直流软磁性能最好；采用聚氨酯固化的纳米晶磁芯的交流软磁性能受固化影响最小，其交流软磁性能最佳。固化成型是纳米晶磁芯制备的关键工艺，降低固化对纳米晶磁芯性能的影响具有重要的现实意义。本文研究结果对于纳米晶磁芯固化成型工艺的改进具有参考价值。

关键词

固化剂，纳米晶磁芯，软磁性能，矫顽力，磁导率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Finemet 合金具有磁导率高、矫顽力低、电导率高、损耗低等优异的软磁性能，其在互感器、变压器、开关电源、电机等诸多软磁电子器件中有较好的应用前景[1] [2]。由于纳米晶薄带较脆、易折断，所以难以直接应用在电子器件当中。而在工业使用当中，先将非晶带材进行粘接固化，然后再将其进行切割，从而得到适用于各种器件的不同的形状。

由于环氧树脂固化剂具有化学稳定性好、绝缘性好、粘合力强、电性优良等特点，所以成为了目前使用的最多的、最广泛的固化剂[3]。然而由于环氧树脂的伸缩率较大，在环氧树脂烘烤固化过程中会产生较大的形变，纳米晶软磁性能对应力十分敏感[4]，环氧固化所产生的应力会对磁芯的磁性能造成较大的影响[5]。所以寻找在固化过程中尽量引入小应力的新固化剂对于提升磁芯软磁性能具有重要的意义。

聚氨酯固化剂在变压器、电感器、电磁铁、LED、反渗透膜组件等诸多电子器件中得到了广泛的应用。聚氨酯固化剂和环氧树脂一样，具有化学稳定性好、防水、绝缘性好、粘合力强等优点[6] [7]。相比环氧树脂，聚氨酯拥有较低的收缩率[8]，在磁芯固化过程中引入的应力小，有可能提高磁芯的软磁性能。有机硅固化剂在太阳能电池板、LED、电路板等器件的灌封工艺中被广泛应用。其同样具有较好的化学稳定性、防水性、绝缘性、粘和性[9] [10]。有机硅固化剂在固化后具有橡胶弹性，可在高于 200℃的高温下保持稳定。同时有机硅固化剂具有比聚氨酯固化剂更低的收缩率[11]，能有效减弱固化过程中引入的应力。本文尝试使用聚氨酯、有机硅固化剂替代环氧树脂固化磁芯，研究磁芯的软磁性能。

2. 实验

本文使用单辊快淬法制备的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_2\text{Nb}_3\text{Si}_{12.5}\text{B}_9$ (Fe 基合金)非晶薄带[12]，宽 15 mm，厚 19 μm 。将其盘绕成内直径 29.5 cm，外直径 39.495~39.505 cm，质量约为 49.7 g 的环状磁芯。在氮气保护下，500℃

退火 2 h。将要固化的磁芯分别放入调配好的环氧树脂、聚氨酯、有机硅固化剂中，在真空中浸泡，直至表面没有气泡溢出后，放入鼓风式干燥箱中 100℃ 烘干 2 h。

实验使用环氧树脂固化剂为得益环氧树脂 AB 胶与丙酮按照 1:4 的比例混合液，聚氨酯固化剂为 Ausbond130 聚氨酯 AB 胶，有机硅固化剂为 Ausbond195 有机硅 AB 胶。

使用天恒测控 TD-8220A 软磁直流测试系统测试样品在 $H_m = 220 \text{ A/m}$ 下的直流软磁特性，得到磁滞回线、饱和磁感应强度 B_m 、起始磁导率 μ_i 、最大磁导率 μ_{\max} 、矫顽力 H_c 。

使用天恒测控 TD-8120 软磁交流测试系统测试样品在 $B_m = 0.1 \text{ T}$ ， $f = 1、2、5、10、20、60、120、200 \text{ kHz}$ 的交流软磁特性，得到交流磁滞回线、饱和磁导率 μ_s 、矫顽力 H_c 、以及损耗 P 。将得到的固化后的矫顽力 H_c 、磁导率 μ_s 、损耗 P 与固化前的相应量 (H_{c0} 、 μ_{s0} 、 P_0) 做比值，得到 H_c/H_{c0} 、 μ_s/μ_{s0} 、 P/P_0 。

3. 结果与讨论

3.1. 固化剂对纳米晶磁芯直流软磁特性的影响

图 1 为固化前后各磁芯的直流磁滞回线，其中曲线 a 为未固化磁芯样品磁滞回线，曲线 b 为环氧树脂固化磁芯样品磁滞回线，曲线 c 为聚氨酯固化磁芯磁滞回线，曲线 d 为有机硅固化磁芯样品磁滞回线，表 1 为固化前后各磁芯的直流软磁参数。固化对磁芯饱和磁感应强度影响较小，使磁芯磁导率降低，矫顽力升高，直流软磁特性减弱。其中环氧树脂固化磁芯软磁性能最差，矫顽力为 1.75 A/m (相比固化前升高 42%)，起始磁导率为 48.16 mH/m (相比固化前降低 40%)，最大磁导率为 227.57 mH/m (相比固化前降

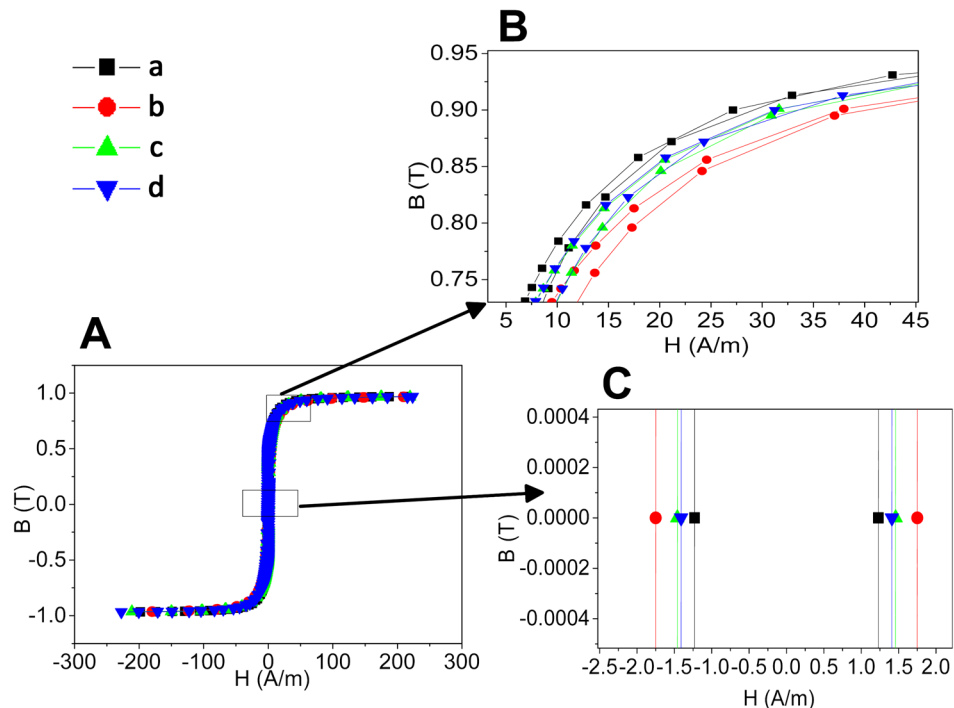


Figure 1. DC B-H loops for Fe base alloy core samples. (A) DC B-H loops of core samples; (B) The magnified display of the DC B-H loops of core samples at $B = 0.85 \text{ T}$; (C) The magnified display of the DC B-H loops of core samples at $B = 0 \text{ T}$ (a—without solidified core; b—epoxy resin solidified core; c—polyurethane solidified core; d—organosilicon solidified core)

图 1. Fe 基合金磁芯样品的直流 B-H 回线。(A) 磁芯样品的直流 B-H 回线；(B) 磁芯样品 B-H 回线在 $B = 0.85 \text{ T}$ 处的放大展示图；(C) 磁芯样品 B-H 回线在 $B = 0 \text{ T}$ 处的放大展示图 (a——未固化磁芯；b——环氧树脂固化磁芯；c——聚氨酯固化磁芯；d——有机硅固化磁芯)

低 4.8%)。其次是聚氨酯固化磁芯, 矫顽力为 1.46 A/m (相比固化前升高 18%), 起始磁导率为 63.34 mH/m (相比固化前降低 21%), 最大磁导率为 231.89 mH/m (相比固化前降低 3%)。软磁性能最好的是有机硅固化磁芯, 矫顽力为 1.42 A/m (相比固化前升高 15%), 起始磁导率为 66.56 mH/m (相比固化前降低 17%), 最大磁导率为 232.65 mH/m (相比固化前降低 2.7%)。

3.2. 磁芯样品交流磁滞回线

图 2 为环氧树脂固化磁芯样品的交流磁滞回线, (a) 图为磁芯样品固化前的 B-H 回线, (b) 图为磁芯样品环氧树脂固化后的 B-H 回线。图 3 为聚氨酯固化磁芯样品固化前后的交流磁滞回线, (a) 图为磁芯样品固化前的 B-H 回线, (b) 图为磁芯样品聚氨酯固化后的 B-H 回线。图 4 为有机硅固化磁芯样品固化前后的交流磁滞回线, (a) 图为磁芯样品固化前的 B-H 回线, (b) 图为磁芯样品有机硅固化后的 B-H 回线。从以上图中可以看出, 磁芯磁滞回线随着频率升高磁导率减小, 矫顽力增大, 软磁特性明显减弱。

3.3. 固化磁芯样品矫顽力的频率特性

图 5 为环氧树脂固化前后磁芯样品的矫顽力的频率特性曲线以及环氧树脂固化前后 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线, 曲线 a 为磁芯样品固化前矫顽力的频率特性曲线, 曲线 b 为磁芯样品环氧树脂固化后矫顽力的频率特性曲线, 曲线 c 为磁芯样品固化后矫顽力与固化前矫顽力的比值 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线。f = 1 kHz~5 kHz 时磁芯 H_c/H_{c0} 值随频率升高而增大, f = 5 kHz~200 kHz 时磁芯 H_c/H_{c0} 值随频率升高而减小。其中 f = 1 kHz 时矫顽力增加 15%, f = 5 kHz 时矫顽力增加幅度最大为 27%, f = 200 kHz 时矫顽力增加幅度最小为 6%, 平均增加 16%。

Table 1. DC soft magnetic parameters of Fe base alloy core samples

表 1. Fe 基合金磁芯样品直流软磁参数

	起始磁导率 μ_i (mH/m)	矫顽力 H_c (A/m)	饱和磁感应强度 B_s (A/m)	最大磁导率 μ_{max} (mH/m)
未固化磁芯	79.78	1.231	0.968	239.16
环氧树脂固化磁芯	48.16	1.749	0.967	227.57
聚氨酯固化磁芯	63.34	1.458	0.967	231.89
有机硅固化磁芯	66.56	1.416	0.968	232.65

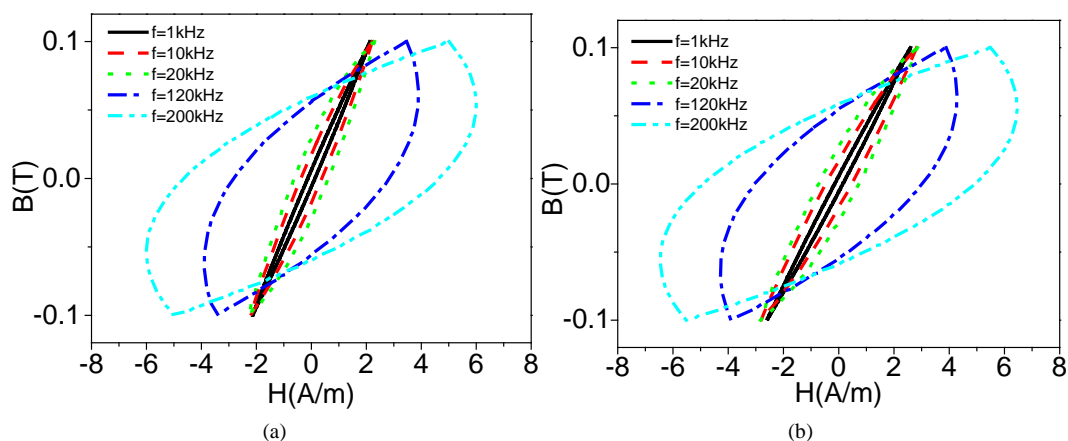


Figure 2. AC hysteresis loop of epoxy resin core samples. (a) B-H loops of core sample before solidification; (b) B-H loops of core sample after curing with epoxy resin

图 2. 环氧树脂固化磁芯样品的交流磁滞回线。(a) 磁芯样品固化前的 B-H 回线; (b) 磁芯样品环氧树脂固化后的 B-H 回线

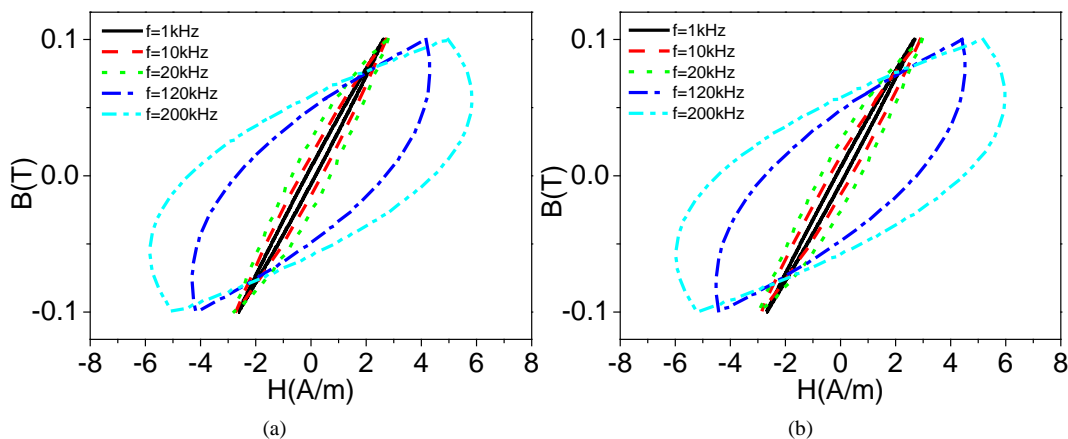


Figure 3. AC hysteresis loop of polyurethane core samples. (a) B-H loops of core sample before solidification; (b) B-H loops of core sample after curing with polyurethane

图 3. 聚氨酯固化磁芯样品的交流磁滞回线。(a) 磁芯样品固化前的 B-H 回线；(b) 磁芯样品聚氨酯固化后的 B-H 回线

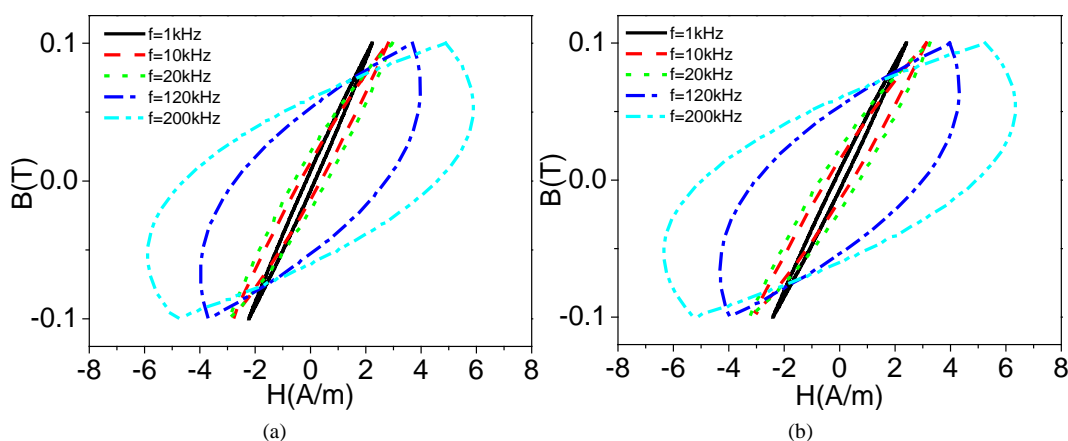


Figure 4. AC hysteresis loop of organosilicon core samples. (a) B-H loops of core sample before solidification; (b) B-H loops of core sample after curing with organosilicon

图 4. 有机硅固化磁芯样品的交流磁滞回线。(a) 磁芯样品固化前的 B-H 回线；(b) 磁芯样品有机硅固化后的 B-H 回线

图 6 为聚氨酯固化前后磁芯样品的矫顽力的频率特性曲线以及聚氨酯固化前后 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线，曲线 a 为磁芯样品固化前矫顽力的频率特性曲线，曲线 b 为磁芯样品聚氨酯固化后矫顽力的频率特性曲线，曲线 c 为磁芯样品固化后矫顽力与固化前矫顽力的比值 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线。随着频率升高磁芯样品的 H_c/H_{c0} 值变化不明显，矫顽力增加约为 3%。

图 7 为有机硅固化前后磁芯样品的矫顽力的频率特性曲线以及有机硅固化前后 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线，曲线 a 为磁芯样品固化前矫顽力的频率特性曲线，曲线 b 为磁芯样品有机硅固化后矫顽力的频率特性曲线，曲线 c 为磁芯样品固化后矫顽力与固化前矫顽力的比值 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线。F = 1 kHz~10 kHz 时磁芯 H_c/H_{c0} 值随频率升高而增大，f = 10 kHz~200 kHz 时磁芯 H_c/H_{c0} 值随频率升高而减小。其中 f = 1 kHz 时矫顽力增加幅度最小为 6%，f = 10 kHz 时矫顽力增加幅度最大为 22%，f = 200 kHz 时矫顽力增加 8%，平均增加 14%。

图 8 为三种固化剂固化前后磁芯样品的 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线。曲线 a 为环氧树脂固化磁芯样品固化后矫顽力与固化前矫顽力的比值 H_c/H_{c0} 的频率特性曲线，曲线 b 为聚氨酯脂固化磁芯样品固化后矫顽

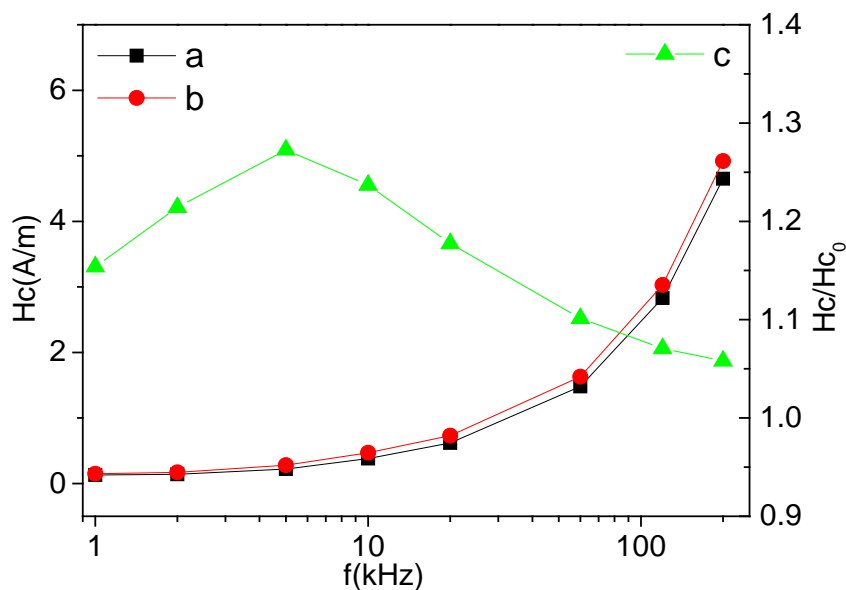


Figure 5. Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the epoxy resin solidified core sample: a—Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the core sample before curing; b—Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the core sample after epoxy resin curing; c—Frequency characteristic curve of H_c/H_{c_0} of core sample before and after epoxy resin curing

图 5. 环氧树脂固化磁芯样品矫顽力 H_c 的频率特性曲线: a——磁芯样品固化前矫顽力 H_c 的频率特性曲线; b——磁芯样品环氧树脂固化后矫顽力 H_c 的频率特性曲线; c——磁芯样品环氧树脂固化前后 H_c/H_{c_0} 的频率特性曲线

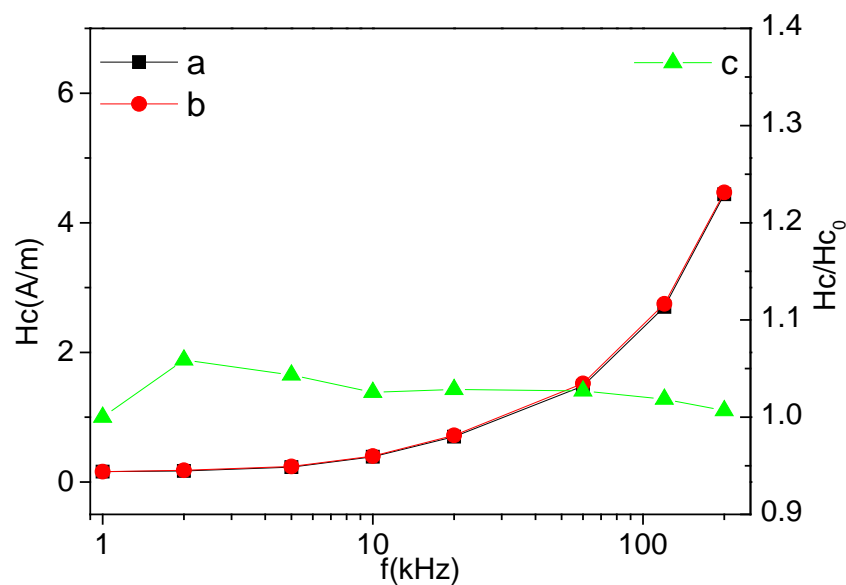


Figure 6. Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the polyurethane solidified core sample: a—Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the core sample before curing; b—Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the core sample after polyurethane curing; c—Frequency characteristic curve of H_c/H_{c_0} of core sample before and after polyurethane curing

图 6. 聚氨酯固化磁芯样品矫顽力 H_c 的频率特性曲线: a——磁芯样品固化前矫顽力 H_c 的频率特性曲线; b——磁芯样品聚氨酯固化后矫顽力 H_c 的频率特性曲线; c——磁芯样品聚氨酯固化前后 H_c/H_{c_0} 的频率特性曲线

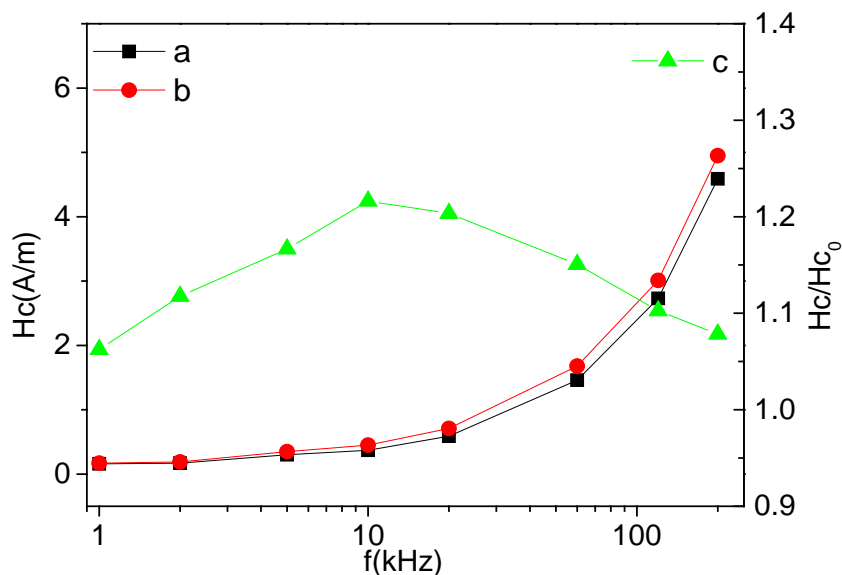


Figure 7. Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the organosilicon solidified core sample: a—Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the core sample before curing; b—Frequency characteristic curve of the coercivity H_c of the core sample after organosilicon curing; c—Frequency characteristic curve of H_c/H_{c_0} of core sample before and after organosilicon curing

图 7. 有机硅固化磁芯样品矫顽力 H_c 的频率特性曲线: a——磁芯样品固化前矫顽力 H_c 的频率特性曲线; b——磁芯样品有机硅固化后矫顽力 H_c 的频率特性曲线; c——磁芯样品有机硅固化前后 H_c/H_{c_0} 的频率特性曲线

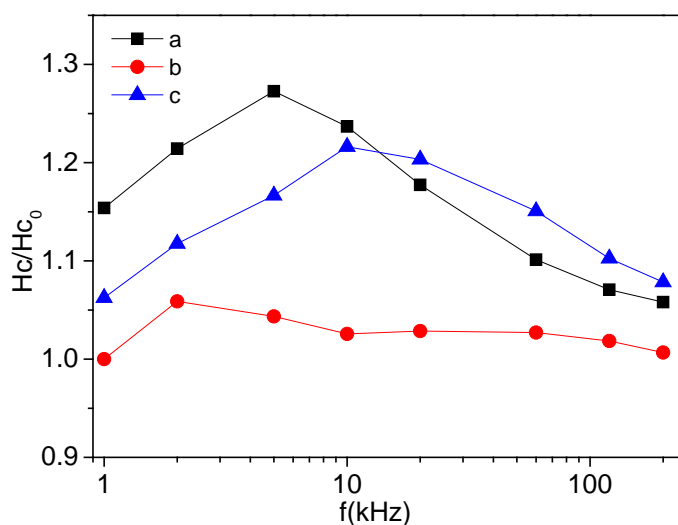


Figure 8. Frequency characteristic curves of H_c/H_{c_0} of core samples after curing: a—Epoxy resin cured core sample; b—Polyurethane cured core sample; c—Organosilicon cured core sample

图 8. 磁芯样品 H_c/H_{c_0} 的频率特性曲线: a——环氧树脂固化磁芯样品; b——聚氨酯固化磁芯样品; c——有机硅固化磁芯样品

力与固化前矫顽力的比值 H_c/H_{c_0} 的频率特性曲线, 曲线 c 为有机硅固化磁芯样品固化后矫顽力与固化前矫顽力的比值 H_c/H_{c_0} 的频率特性曲线。固化过后矫顽力增加最小的是聚氨酯固化剂固化的磁芯, $f = 1$ kHz~20 kHz 时有机硅固化磁芯矫顽力增量小于环氧树脂固化磁芯, $f = 20$ kHz~200 kHz 时环氧树脂固化

磁芯矫顽力增量小于有机硅固化磁芯。总体来说，固化对磁芯矫顽力的影响最小的是聚氨酯固化剂，其次是有机硅固化剂，最大的是环氧树脂固化剂。

3.4. 固化磁芯样品的磁谱

图 9 为环氧树脂固化前后磁芯样品的磁谱以及环氧树脂固化前后 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线，曲线 a 为磁芯样品固化前磁谱，曲线 b 为磁芯样品环氧树脂固化后磁谱，曲线 c 为磁芯样品固化后磁导率与固化前磁导率的比值 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线。f = 1 kHz~10 kHz 时磁芯 μ_s/μ_{s0} 值随频率升高而减小，f = 10 kHz~200 kHz 时磁芯 μ_s/μ_{s0} 值随频率升高而增大。f = 1 kHz 时磁导率减小 16%，f = 10 kHz 时磁导率减小幅度最大为 21%，f = 200 kHz 时减小幅度最小为 10%，平均减小 16%。

图 10 为聚氨酯固化前后磁芯样品的磁谱以及聚氨酯固化前后 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线，曲线 a 为磁芯样品固化前磁谱，曲线 b 为磁芯样品聚氨酯固化后磁谱，曲线 c 为磁芯样品固化后磁导率与固化前磁导率的比值 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线。随着频率升高磁芯样品的 μ_s/μ_{s0} 值变化不明显，磁导率降低约 4%。

图 11 为有机硅固化前后磁芯样品的磁谱以及有机硅固化前后 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线，曲线 a 为磁芯样品固化前磁谱，曲线 b 为磁芯样品有机硅固化后磁谱，曲线 c 为磁芯样品固化后磁导率与固化前磁导率的比值 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线。随着频率升高磁芯样品的 μ_s/μ_{s0} 值变化不明显，磁导率降低约 9%。

图 12 为三种固化剂固化前后磁芯样品的 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线。曲线 a 为环氧树脂固化磁芯样品固化后磁导率与固化前磁导率的比值 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线，曲线 b 为聚氨酯固化磁芯样品固化后磁导率与固化前磁导率的比值 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线，曲线 c 为有机硅固化磁芯样品固化后磁导率与固化前磁导率的比值 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线。固化过后磁导率减小幅度最小的是聚氨酯固化磁芯，其次是有机硅固化磁芯，磁导率减小幅度最大的是环氧树脂固化磁芯。

3.5. 固化磁芯样品损耗的频率特性

图 13 为环氧树脂固化前后磁芯样品的损耗 P 的频率特性曲线以及环氧树脂固化前后 P/P_0 的频率特性

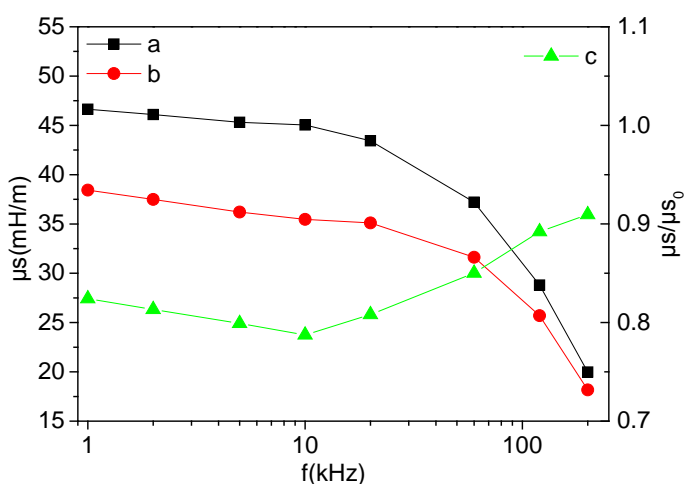


Figure 9. Magnetic spectrum of the epoxy resin solidified core sample: a—Magnetic spectrum of the core sample before curing; b—Magnetic spectrum of the core sample after epoxy resin curing; c—Frequency characteristic curve of μ_s/μ_{s0} of core sample before and after epoxy resin curing

图 9. 环氧树脂固化磁芯样品磁谱: a——磁芯样品固化前磁谱; b——磁芯样品环氧树脂固化后磁谱; c——磁芯样品环氧树脂固化前后 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线

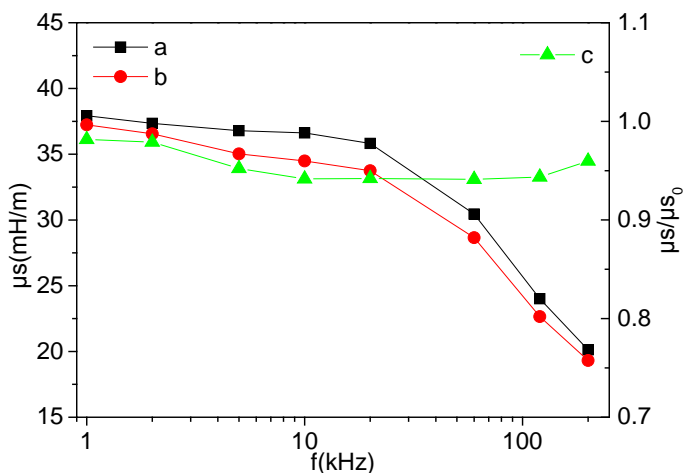


Figure 10. Magnetic spectrum of the polyurethane solidified core sample: a—Magnetic spectrum of the core sample before curing; b—Magnetic spectrum of the core sample after polyurethane curing; c—Frequency characteristic curve of μ_s/μ_{s_0} of core sample before and after polyurethane curing

图 10. 聚氨酯固化磁芯样品磁谱: a——磁芯样品固化前磁谱; b——磁芯样品聚氨酯固化后磁谱; c——磁芯样品聚氨酯固化前后 μ_s/μ_{s_0} 的频率特性曲线

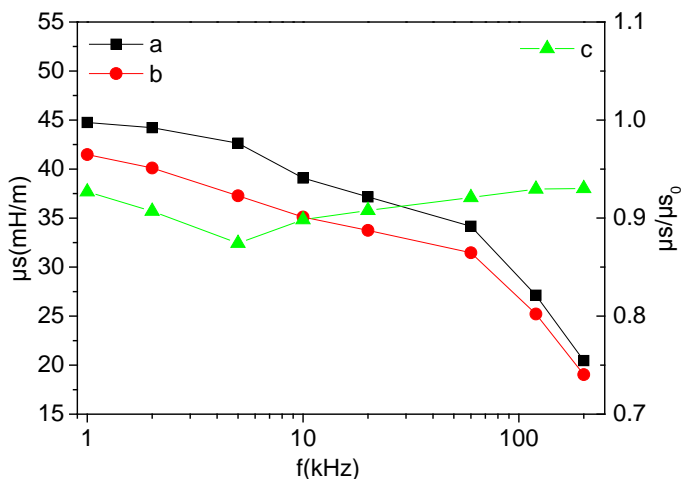


Figure 11. Magnetic spectrum of the organosilicon solidified core sample: a—Magnetic spectrum of the core sample before curing; b—Magnetic spectrum of the core sample after organosilicon curing; c—Frequency characteristic curve of μ_s/μ_{s_0} of core sample before and after organosilicon curing

图 11. 有机硅固化磁芯样品磁谱: a——磁芯样品固化前磁谱; b——磁芯样品有机硅固化后磁谱; c——磁芯样品有机硅固化前后 μ_s/μ_{s_0} 的频率特性曲线

曲线, 曲线 a 为磁芯样品固化前损耗的频率特性曲线, 曲线 b 为磁芯样品环氧树脂固化后损耗的频率特性曲线, 曲线 c 为磁芯样品固化后损耗与固化前损耗的比值 P/P_0 的频率特性曲线。f = 1 kHz~5 kHz 时磁芯 P/P_0 值随频率升高而增大, f = 5 kHz~200 kHz 时磁芯 P/P_0 值随频率升高而减小。其中 f = 1 kHz 时损耗增加 23%, f = 5 kHz 时损耗增加幅度最大为 34%, f = 200 kHz 时损耗增加幅度最小为 5%, 平均增加 20%。

图 14 为聚氨酯固化前后磁芯样品的损耗 P 的频率特性曲线以及聚氨酯固化前后 P/P_0 的频率特性曲线,

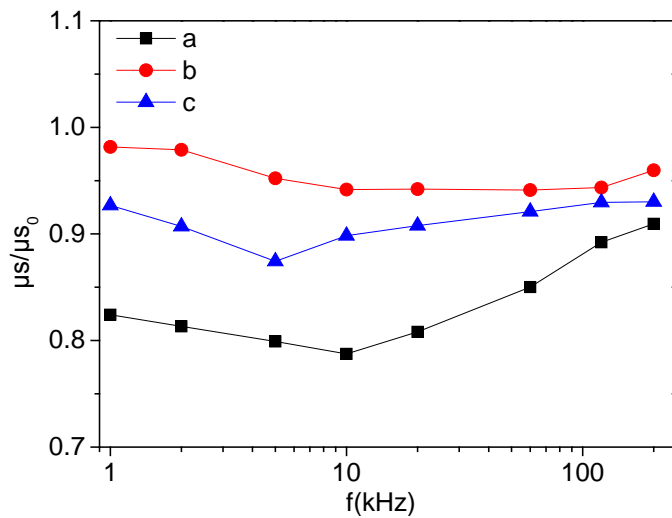


Figure 12. Frequency characteristic curves of μ_s/μ_{s0} of core samples after curing: a—Epoxy resin cured core sample; b—Polyurethane cured core sample; c—Organosilicon cured core sample

图 12. 磁芯样品 μ_s/μ_{s0} 的频率特性曲线: a—环氧树脂固化样品; b—聚氨酯固化样品; c—有机硅固化样品

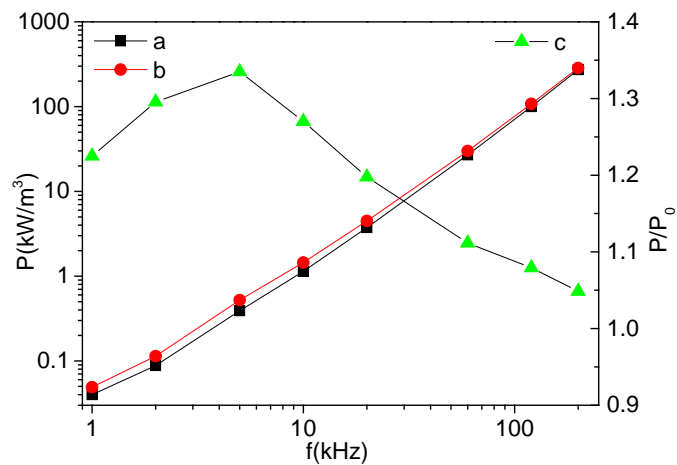


Figure 13. Frequency characteristic curve of the loss P of the epoxy resin solidified core sample: a—Frequency characteristic curve of the loss P of the core sample before curing; b—Frequency characteristic curve of the loss P of the core sample after epoxy resin curing; c—Frequency characteristic curve of P/P_0 of core sample before and after epoxy resin curing

图 13. 环氧树脂固化磁芯样品损耗 P 的频率特性曲线: a—磁芯样品固化前损耗 P 的频率特性曲线; b—磁芯样品环氧树脂固化后损耗 P 的频率特性曲线; c—磁芯样品环氧树脂固化前后 P/P_0 的频率特性曲线

曲线 a 为磁芯样品固化前损耗的频率特性曲线, 曲线 b 为磁芯样品聚氨酯固化后损耗的频率特性曲线, 曲线 c 为磁芯样品固化后损耗与固化前损耗的比值 P/P_0 的频率特性曲线。随着频率升高磁芯样品的 P/P_0 值变化不明显, 损耗减小约 1%。

图 15 为有机硅固化前后磁芯样品的损耗 P 的频率特性曲线以及有机硅固化前后 P/P_0 的频率特性曲线,

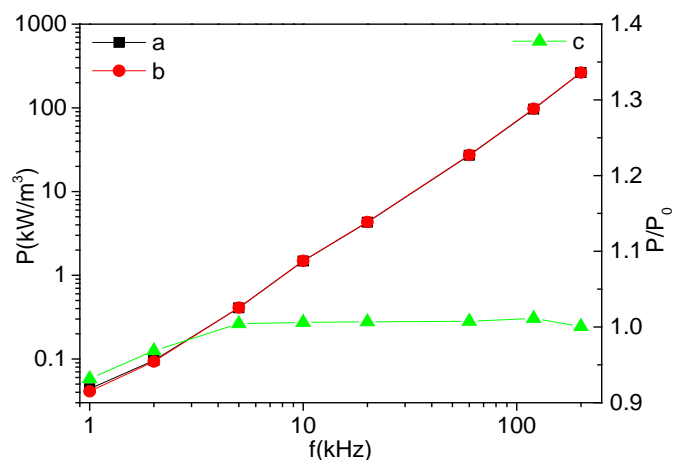


Figure 14. Frequency characteristic curve of the loss P of the polyurethane solidified core sample: a—Frequency characteristic curve of the loss P of the core sample before curing; b—Frequency characteristic curve of the loss P of the core sample after polyurethane curing; c—Frequency characteristic curve of P/P_0 of core sample before and after polyurethane curing

图 14. 聚氨酯固化磁芯样品损耗 P 的频率特性曲线: a——磁芯样品固化前损耗 P 的频率特性曲线; b——磁芯样品环氧树脂固化后损耗 P 的频率特性曲线; c——磁芯样品环氧树脂固化前后 P/P_0 的频率特性曲线

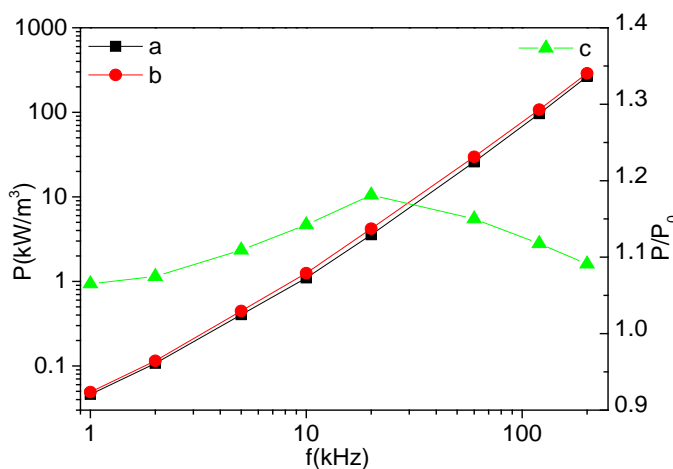


Figure 15. Frequency characteristic curve of the loss P of the organosilicon solidified core sample: a—Frequency characteristic curve of the loss P of the core sample before curing; b—Frequency characteristic curve of the loss P of the core sample after organosilicon curing; c—Frequency characteristic curve of P/P_0 of core sample before and after organosilicon curing

图 15. 有机硅固化磁芯样品损耗 P 的频率特性曲线: a——磁芯样品固化前损耗 P 的频率特性曲线; b——磁芯样品有机硅固化后损耗 P 的频率特性曲线; c——磁芯样品有机硅固化前后 P/P_0 的频率特性曲线

曲线 a 为磁芯样品固化前损耗的频率特性曲线, 曲线 b 为磁芯样品有机硅固化后损耗的频率特性曲线, 曲线 c 为磁芯样品固化后损耗与固化前损耗的比值 P/P_0 的频率特性曲线。 $f = 1 \text{ kHz} \sim 20 \text{ kHz}$ 时磁芯 P/P_0 值随频率升高而增大, $f = 20 \text{ kHz} \sim 200 \text{ kHz}$ 时磁芯 P/P_0 值随频率升高而减小。其中 $f = 1 \text{ kHz}$ 时损耗增加最小为 7%, $f = 20 \text{ kHz}$ 时损耗增加幅度最大为 18%, $f = 200 \text{ kHz}$ 时损耗增加 9%, 平均增加 12%。

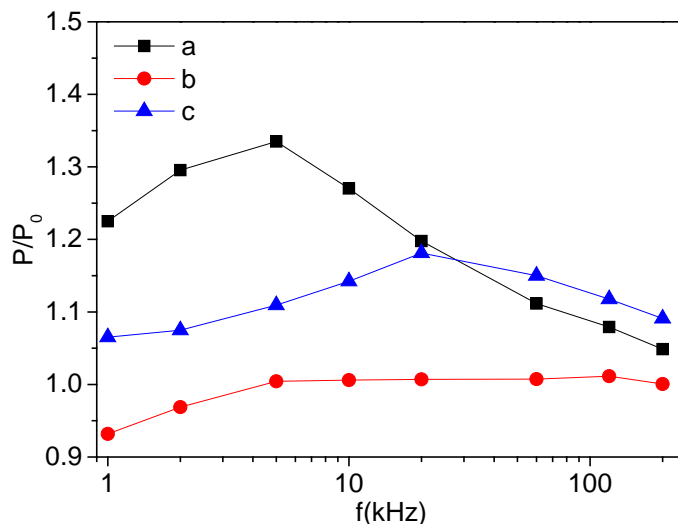


Figure 16. Frequency characteristic curves of P/P_0 of core samples after curing: a—Epoxy resin cured core sample; b—Polyurethane cured core sample; c—Organosilicon cured core sample

图 16. 磁芯样品 P/P_0 的频率特性曲线: a——环氧树脂固化样品; b——聚氨酯固化样品; c——有机硅固化样品

图 16 为三种固化剂固化前后 P/P_0 的频率特性曲线。曲线 a 为环氧树脂固化磁芯样品固化后损耗与固化前损耗的比值 P/P_0 的频率特性曲线，曲线 b 为聚氨酯固化磁芯样品固化后损耗与固化前损耗的比值 P/P_0 的频率特性曲线，曲线 c 为有机硅固化磁芯样品固化后损耗与固化前损耗的比值 P/P_0 的频率特性曲线。固化过后损耗增加幅度最小的是聚氨酯固化剂固化的磁芯， $f = 1 \text{ kHz} \sim 20 \text{ kHz}$ 时有机硅固化磁芯损耗增量小于环氧树脂固化磁芯， $f = 60 \text{ kHz} \sim 200 \text{ kHz}$ 时环氧树脂固化磁芯损耗增量小于有机硅固化磁芯。固化对磁芯损耗的影响最小的是聚氨酯固化剂，其次是有机硅固化剂，最大的是环氧树脂固化剂。

4. 结论

1) 对于直流软磁特性而言，固化效果最好的是有机硅固化剂，其次是聚氨酯固化剂，最差的是环氧树脂固化剂。对于交流软磁特性而言，固化效果最好的是聚氨酯固化剂，其次是有机硅固化剂，最差的是环氧树脂固化剂。综合各实验条件，聚氨酯、有机硅固化剂优于环氧树脂固化剂。

2) Fe 基纳米晶薄带对应力较为敏感，环氧树脂在固化过程中收缩率较大，导致磁芯软磁性能下降。聚氨酯，有机硅固化剂收缩率较小，使用聚氨酯，有机硅固化剂代替环氧树脂固化磁芯，在磁芯固化过程中引入的应力小，削弱固化对软磁性能的影响。

3) 有机硅固化剂的交流固化效果比直流固化效果差，导致这种现象的原因可能是有机硅固化剂的弹性比环氧树脂、聚氨酯好，由磁致伸缩导致的铁芯机械振动影响了交流软磁性能。

基金项目

国家重点基础研究发展计划(973 计划) 2012CB825705; 浙江省自然科学基金项目 LY14A040003。

参考文献 (References)

- [1] Yoshizawa, Y., Ohuma, S. and Yamauchi, K. (1988) New Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *Journal of Applied Physics*, **64**, 6044-6046.
- [2] 姚可夫. 铁基软磁非晶/纳米晶合金研究进展及应用前景[J]. 物理学报, 2018, 67(1): 1-8.

- [3] 王德中. 环氧树脂生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 453.
- [4] 李文忠, 郑建龙, 方允樟, 等. 退火工艺对 Fe 基薄带纵向驱动应力阻抗效应的影响[J]. 浙江师范大学学报, 2011, 34(2): 154-157.
- [5] 宋翀昉. 纳米晶薄带固化成型磁芯在中高频功率变压器上的应用[J]. 金属功能材料, 2013, 20(4): 33-35.
- [6] 吴素霞. 聚氨酯复合材料的制备及性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [7] 袁毅, 郭建民, 申开智. 浅谈聚氨酯硬泡在建筑业上的应用[J]. 聚氨酯工业, 2001, 16(4): 10-11.
- [8] 段飞. 聚氨酯弹性体模塑成型收缩规律的可视化实验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [9] 范志山. 增强导热阻燃有机硅灌封胶粘接性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [10] 范元蓉, 徐志君, 唐颂超. 加成型液体硅橡胶[J]. 弹性体, 2001, 11(3): 44-48.
- [11] 刘佳. LED 封装用环氧改性有机硅树脂的制备及性能[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州师范大学, 2016.
- [12] 徐晓瞳. 新型铁基非晶 - 纳米晶合金软磁性能与宽带材制备技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ms@hanspub.org