

# Current Annealing Induced Magnetic Anisotropy Joule Heat Tempering Features

Fanxue Meng<sup>1,2</sup>, Fengmin Wu<sup>1,2</sup>, Ming Chen<sup>1,2</sup>, Guwei Wang<sup>1,2</sup>, Sensheng Ren<sup>1,2</sup>, R. K. Nutor<sup>1,2</sup>, Xiaozhen Fan<sup>1,2</sup>, Xiaohong Yang<sup>3</sup>, Yunzhang Fang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Condensed Matter Physics Institute, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

<sup>2</sup>Zhejiang Province Key Laboratory of Solid State Photoelectric Device, Jinhua Zhejiang

<sup>3</sup>Jinhua Polytechnic, Jinhua Zhejiang

Email: \*fyz@zjnu.cn

Received: Jan. 2<sup>nd</sup>, 2016; accepted: Jan. 19<sup>th</sup>, 2017; published: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2017

Copyright © 2017 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

---

## Abstract

In this article, the strain behavior of Fe based ribbons which have been subjected to joule-heat stress annealing and multiple tempering is observed. The magnetic anisotropy field of the sample which has been annealed and tempered multiple times and the change in behavior of the joule-heat stress induced magnetic anisotropy during the tempering process is also studied. Using Gao-suo video *in-situ* monitoring system, the macro-elongation of the Fe based ribbon samples subjected to joule-heat stress annealing and multiple tempering is observed. The magnetic impedance of the samples was measured using an HP4294 impedance instrument and the magnetic anisotropy field was calculated from the giant magnetic impedance curve. The results showed that the joule-heat stress annealing affects significantly magnetic anisotropy, and the induced magnetic anisotropy using the same conditions reduces, but cannot be totally eliminated even after multiple tempering. The results also indicate that induced stress in amorphous soft magnetic devices produced by the joule-heat stress annealing method affects the performance of these devices. Therefore, to improve the performance of amorphous soft magnetic devices, new methods of production which does not induce longitudinal stresses need to be developed.

## Keywords

Stress, Magnetic Anisotropy, Joule Heat, Annealing, Tempering

---

\*通讯作者。

文章引用: 孟繁雪, 吴锋民, 陈明, 王古伟, 任森生, R. K. Nutor, 范晓珍, 杨晓红, 方允樟. 电流应力退火感生磁各向异性焦耳热回火特性[J]. 应用物理, 2017, 7(1): 21-30. <http://dx.doi.org/10.12677/app.2017.71004>

# 电流应力退火感生磁各向异性焦耳热回火特性

孟繁雪<sup>1,2</sup>, 吴锋民<sup>1,2</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>, 王古伟<sup>1,2</sup>, 任森生<sup>1,2</sup>, R. K. Nutor<sup>1,2</sup>, 范晓珍<sup>1,2</sup>, 杨晓红<sup>3</sup>, 方允樟<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>浙江师范大学凝聚态物理研究所, 浙江 金华

<sup>2</sup>浙江省固态光电器件重点实验室, 浙江 金华

<sup>3</sup>金华职业技术学院, 浙江 金华

Email: \*fyz@zjnu.cn

收稿日期: 2017年1月2日; 录用日期: 2017年1月19日; 发布日期: 2017年1月22日

## 摘要

本文采用跟踪观测Fe基合金薄带焦耳热应力退火及多次回火过程中样品应变, 并测量经退火和各次回火样品的磁各向异性场的方法研究焦耳热应力感生磁各向异性在多次回火过程的变化行为。利用Gaosuo视频录像原位监测Fe基合金薄带在焦耳热应力退火及多次回火过程的宏观伸长量, 由HP4294阻抗仪分别测量经焦耳热应力退火和不同次数回火样品的纵向驱动巨磁阻抗曲线, 并由巨磁阻抗曲线计算各样品的磁各向异性场。研究结果表明, 焦耳热应力退火产生显著的磁各向异性, 而感生的磁各向异性采用多次回火只能减小不能被完全消除。这项研究结果表明, 非晶软磁器件生产过程中采用退火方法消除应力对器件性能影响的做法存在严重缺陷, 因为存在应力作用的退火过程会感生不可消除的感生磁各向异性。欲提高非晶软磁器件的性能, 需要开发在生产过程中不引入或少引入纵向应力作用的新工艺。

## 关键词

应力, 磁各向异性, 焦耳热, 退火, 回火

## 1. 引言

Finemet 合金[1], 因其磁导率高、矫顽力低、电导率高、损耗低等优异的软磁性能, 被誉为人类人工合成的最佳材料。理论预测, Finemet 合金相比硅钢等传统软磁材料具有显著优势, 将使变压器、互感器、开关电源、电机等电力电子领域的软磁器件性能大幅提升[2]。但是, 在实际应用中, 采用非晶合金薄带制备的变压器、互感器和电机铁芯等非晶软磁器件的性能并未达到理论预计的优异性能[3]。除了因高电阻率导致的涡流损耗降低得以较充分体现外, 非晶合金高磁导率的优势并未得到充分的体现。尤其是采用非晶合金薄带制备的非晶电机铁芯和大功率非晶变压器, 除了明显降低涡流损耗外, 综合效率的提升并未得到体现。按理论预测, 采用非晶合金薄带制备铁芯替代硅钢铁芯的非晶电机应有 10%~25%的效能提升[4], 但是, 迄今, 世界最高水平的非晶电机最高只能提升 3% [5], 远远没有达到理论预计。

由于现有的非晶软磁器件制备工艺普遍采用将非晶合金薄带进行盘绕的方法制备铁芯, 为了实现较高的填充系数, 通常都在较大的应力作用下才能使薄带紧密盘绕, 这就不可避免地在非晶磁芯盘绕过程中引入很大的应力作用。李文忠等人研究表明非晶纳米晶材料的磁性能对应力敏感, 存在巨应力效应(GSI) [6]。为了消除应力的影响, 现有工艺, 普遍采用退火的方法试图消除应力的作用。但是, Herzer [7]和 Ohnuma [8]等人研究表明, 非晶软磁材料在应力作用下退火会感生显著的磁各向异性, 严重影响非晶软

磁器件的性能。退火是否是消除应力影响提升非晶软磁器件性能的好方法,是本文将要回答的科学问题。该科学问题的回答,对于寻求提升非晶软磁器件性能的新工艺具有重要意义。遗憾的是,迄今未见有报道明确回答该问题,业界普遍存在一个认识误区——适当温度退火可以消除制备过程引入的应力作用,导致现实非晶软磁器件生产过程中普遍采用退火工艺试图消除应力作用,忽略了应力存在条件下会感生不可消除的磁各向异性而严重影响器件性能。众所周知,电机、变压器的耗能占人类总耗能的70%以上,其效能每提高1个百分点所能节省的用电量,就相当于一个长江三峡的总发电量[9]。可见本文所研究科学问题,对于非晶软磁器件性能提升,和节能减排环境友好型新技术研发,具有重要意义。

## 2. 实验

本文使用单辊快淬法制备的 Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> 非晶薄带,宽 1 mm,厚 40 μm,截取长 14 cm 的薄带。退火装置如图 1 所示,调整夹具之间的距离,使在夹具两端之间非晶薄带的长度为 10 cm。在两端夹具之间的非晶薄带通以直流电,利用电流产生的焦耳热对样品实现退火,同在退火过程在两端的夹具上施加张应力实现电流应力退火。

电流应力退火感生的磁各向异性的定义根据杨燮龙等人[10]定义:横向磁各向异性场( $H_k$ )等于纵向驱动巨磁阻抗(LDGMI)曲线下降沿斜率变化最大处的外加磁场。定义 LDGMI 比如下:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(H_{ex}) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})}$$

式中  $Z(H_{ex})$  和  $Z(H_{max})$  分别是在任意外磁场和最大外磁场下测得的阻抗值。

图 2 是经应力退火样品典型的 LDGMI 曲线,定义磁各向异性场  $H_k$ 。

$$H_k = \frac{H^+ - H^-}{2}$$

$H^+$  与  $H^-$  的取值如图 2 所示,取半高宽对应的磁场为下降沿斜率变化最大处。

伸长量:  $\Delta L = L' - L_0$  其中  $L$  为样品退火后的实际观测值,  $L_0$  是样品退火前的原长。

Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> 非晶薄带在电流密度为 30 A/mm<sup>2</sup>,应力为 198 MPa 条件下保温 30 min,测量其 LDGMI 曲线。再将该样品通以密度为 30 A/mm<sup>2</sup> 的电流持续 30 min 进行回火处理,然后测量其 LDGMI 曲线。随后再用相同条件对同一样品重复回火 13 次,并在每次回火后测量样品的 LDGMI 曲线。

## 3. 实验结果与讨论

图 3 是 Fe 基金属薄带经应力退火及回火样品的典型 LDGMI 曲线,a 曲线是经应力退火样品的 LDGMI 曲线, b 曲线是经第 1 次回火样品的 LDGMI 曲线, c 曲线是经第 3 次回火样品的 LDGMI 曲线, d 曲线是经第 10 次回火样品的 LDGMI 曲线, e 曲线是经 14 次回火样品的 LDGMI 曲线。由图 3 可见,经应力退火的样品的 LDGMI 曲线经前几次回火有明显变化,表现为回火使 LDGMI 曲线往中心收缩和升高的行为,即样品的磁各向异性场明显减少和最大巨磁阻抗比增加,但是,随着回火次数的增加,这种变化迅速减缓。回火 10 次和回火 14 次样品的 GMI 曲线基本重叠在一起,表明 10 次以上回火样品的磁各向异性场和巨磁阻抗基本不变。

根据杨燮龙等人给出的磁各向异性场的计算公式,得出样品的磁各向异性场  $H_k$  随回火次数的关系曲线如图 4 所示,图中 N 为零时是样品应力退火的磁各向异性场,回火 1 次磁各向异性场减小了 60%。图 5 即回火一次到十四次的磁各向异性场的变化曲线,从图中可以看出,磁各向异性场的变化大致分为两个阶段,回火四到六次磁各向异性场平均减小了 2.2%,回火六到十三次磁各向异性场平均减小了 0.9%,

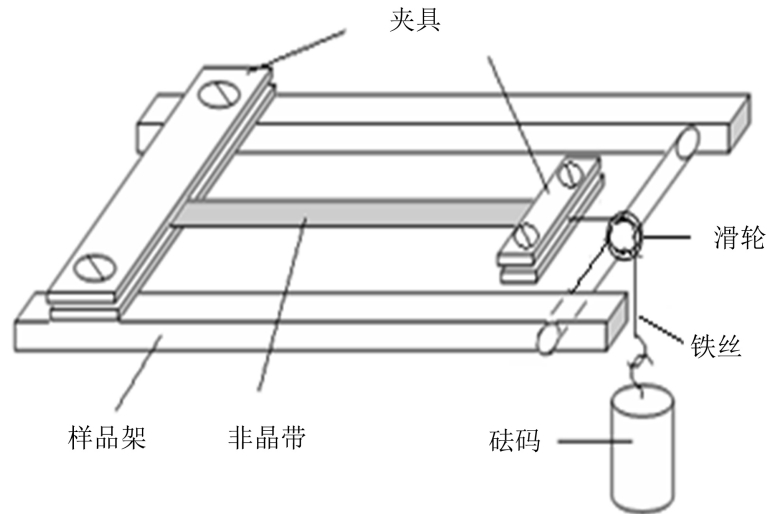


Figure 1. Curve: device of stress annealing  
图 1. 应力退火装置示意图

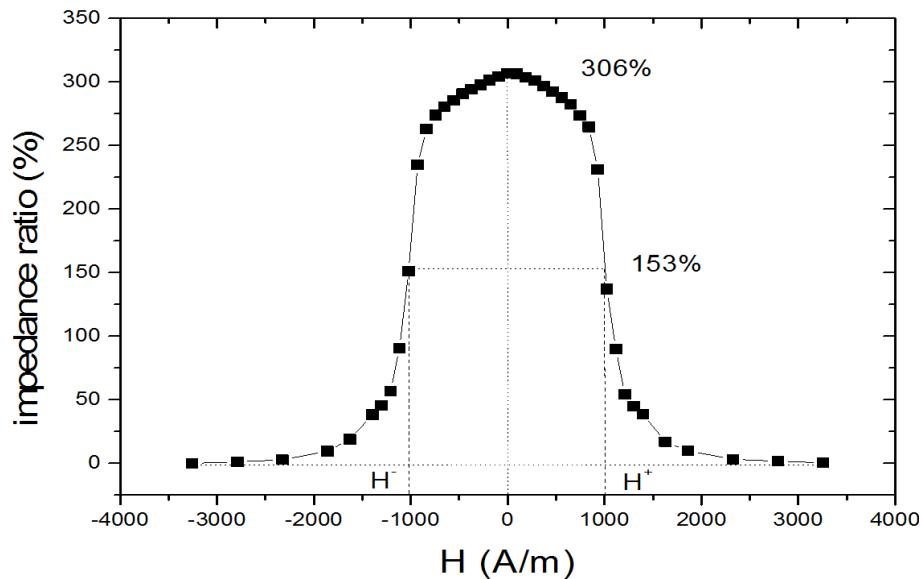


Figure 2. Curve: after annealing of  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$  GMI curve and theory of the magnetic anisotropy  
图 2.  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$  退火后 GMI 曲线图及各向异性场计算原理

可以看出多次回火后磁各向异性场趋于稳定。图 6 是回火四到六次的磁各向异性场的变化曲线，其变化规律经过线性拟合后符合  $y = 1328 - 29x$ ；图 7 是回火六到十三次的磁各向异性场的变化曲线，其变化规律经过线性拟合后符合  $y = 1247 - 11.8x$ ，从以上两个变化规律发现前六次回火磁各向异性场减小呈现一个规律，后几次回火磁各向异性场变化很缓慢。样品 14 次回火后磁各向异性场剩余 27%。

图 8 是样品的宏观伸长量随回火次数的变化曲线，其中 N 为零的点是样品经过退火后的伸长量，样品经过退火后伸长了 5.4%。图 9 是样品回火的收缩量随回火次数的变化曲线，回火第一次后样品的回缩了 0.1%，回火第二次后回缩了 0.02%，回火第三次后样品回缩了 0.015%，回火第四次后样品回缩了 0.01%，回火第五次后样品不再回缩。

所以为了提高软磁器件的性能，应采用叠片式非晶磁环。图 10 是非晶态叠片式磁环和盘绕式磁环的

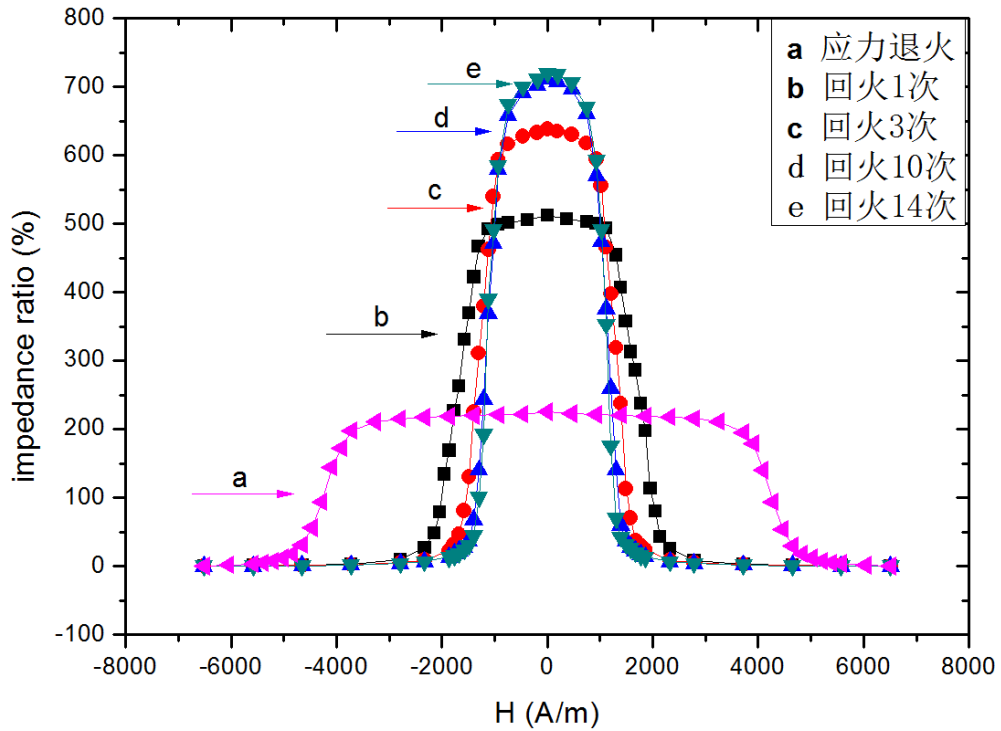


Figure 3. Curve: Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> annealing and several typical tempering GMI curve  
 图 3. Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub> 退火以及几种典型回火过程的 GMI 曲线

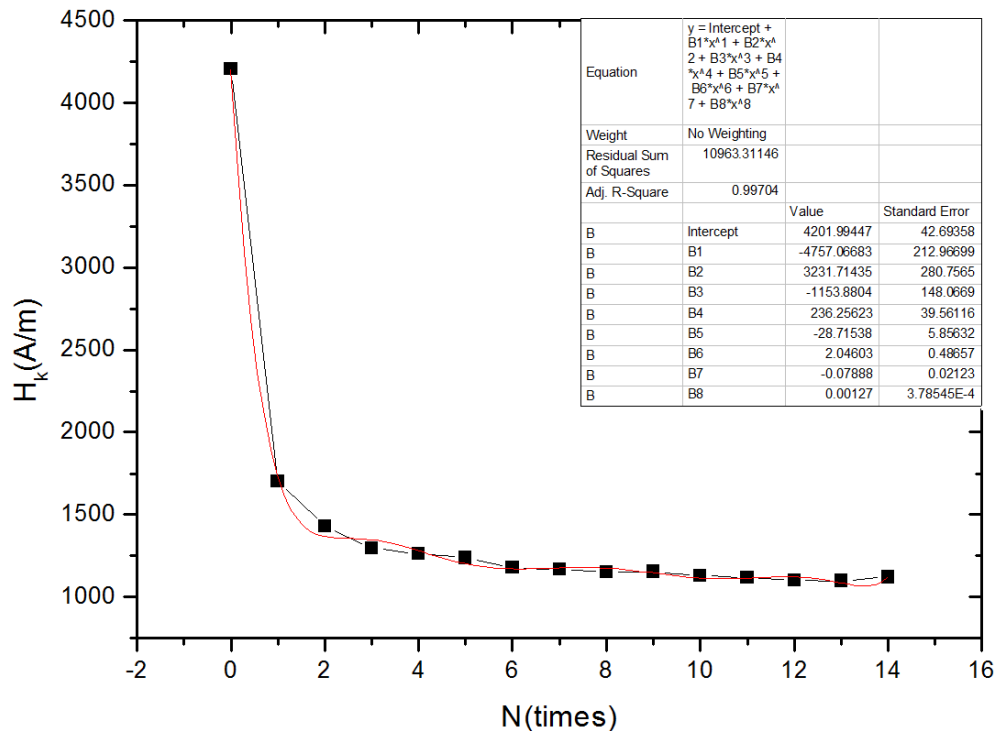
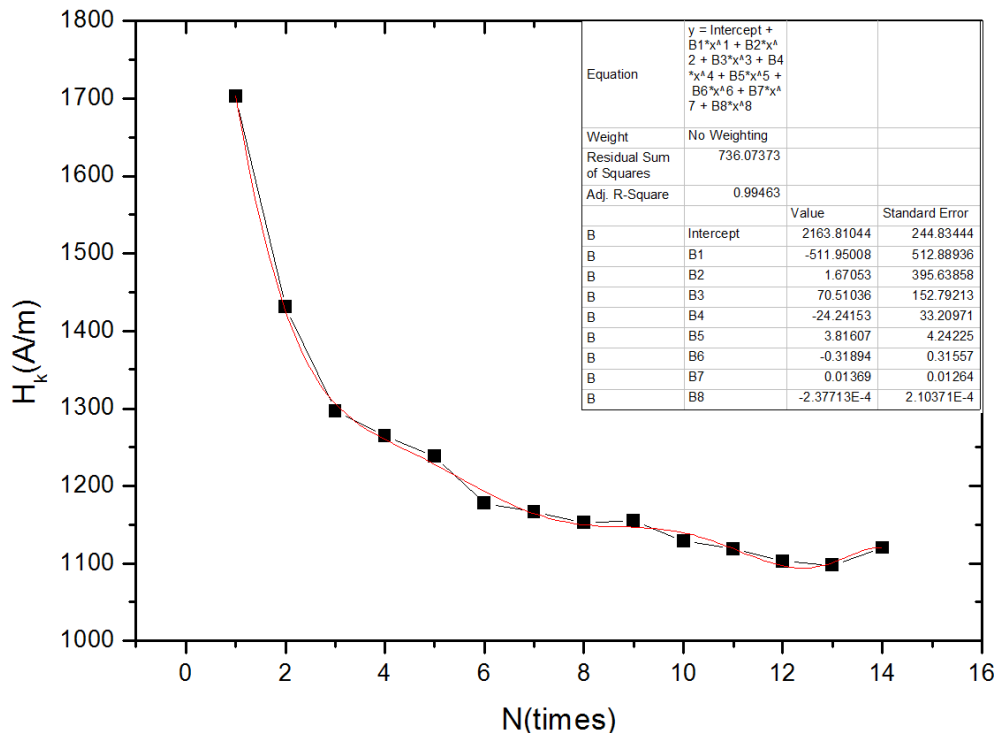
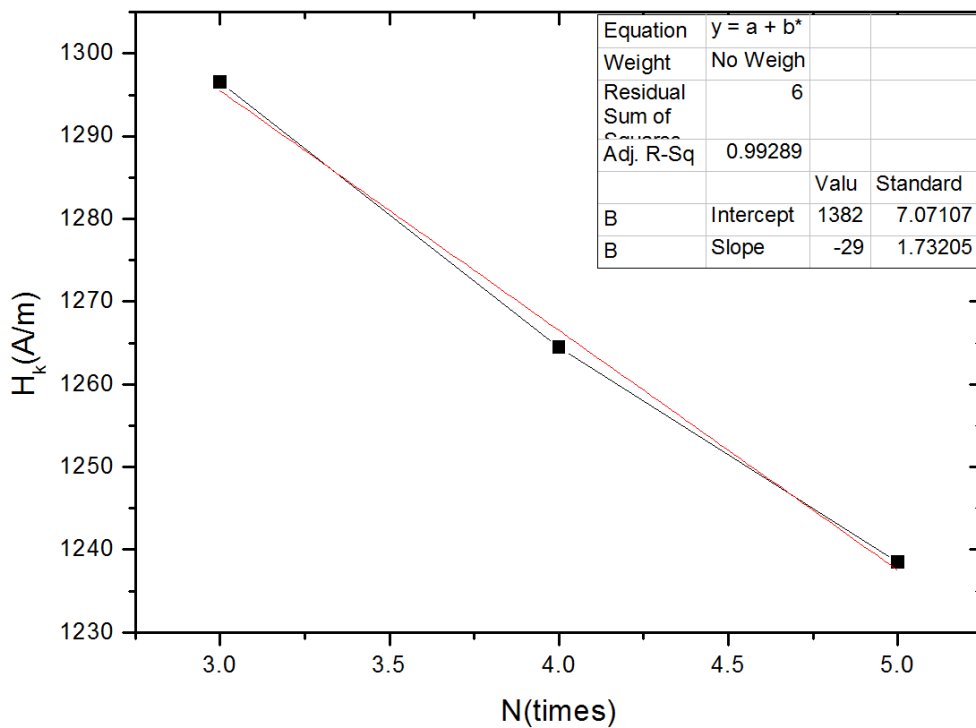


Figure 4. Curve: the magnetic anisotropy field and times of tempering  
 图 4. 回火次数与磁各向异性场的关系曲线

磁导率随频率的变化曲线, l 是叠片式磁环的磁导率随频率的变化曲线, c 是盘绕式磁环的磁导率随频率



**Figure 5.** Curve: the magnetic anisotropy field and times of tempering  
**图 5.** 回火次数与磁各向异性场的关系曲线



**Figure 6.** Curve: the magnetic anisotropy field and times (three to five) of tempering  
**图 6.** 回火次数(3~5)与磁各向异性场的关系曲线

的变化曲线，从图中看出，非晶态叠片式磁环的磁导率高于非晶态盘绕式磁环的磁导率[11]；图 11 是叠

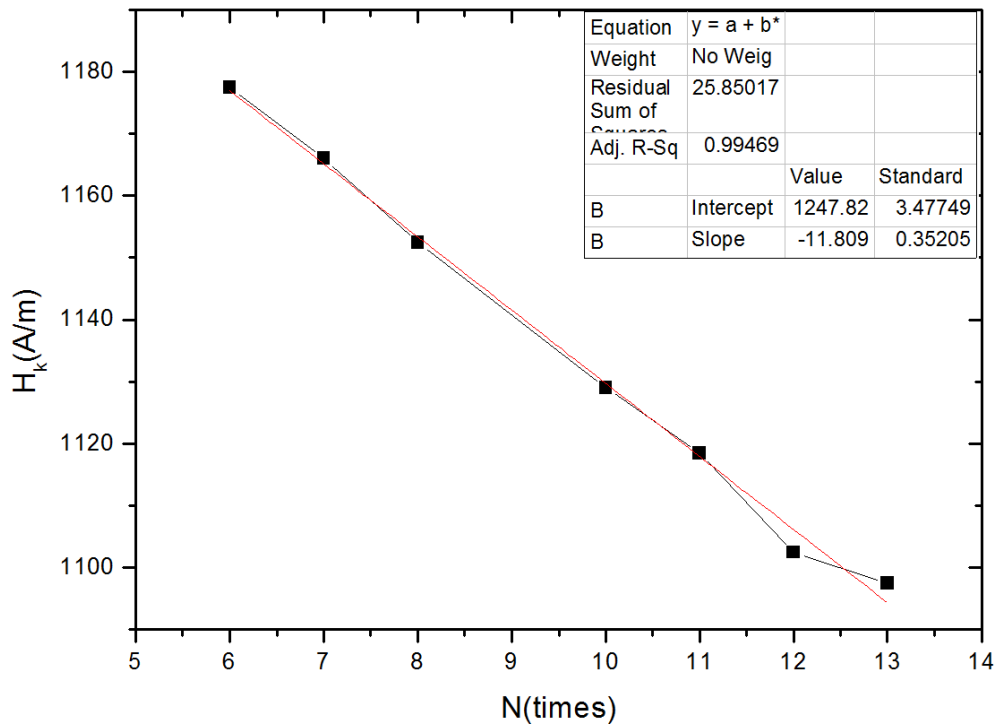


Figure 7. Curve: the magnetic anisotropy field and times (six to thirteen) of tempering  
 图 7. 回火次数(6~13)与磁各向异性场的关系曲线

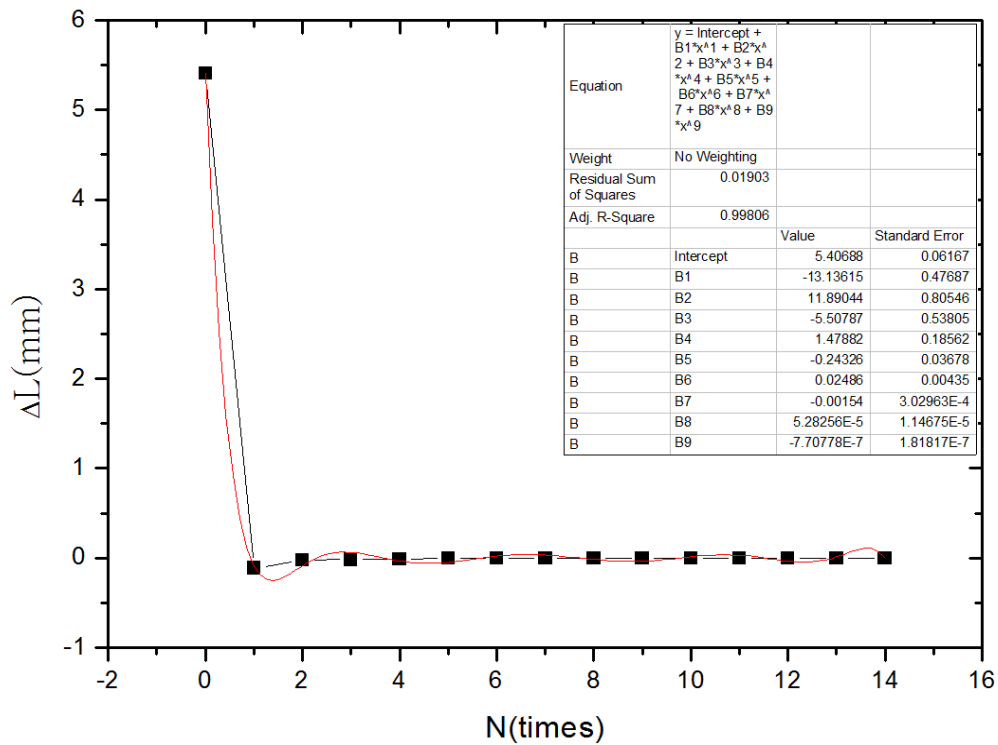
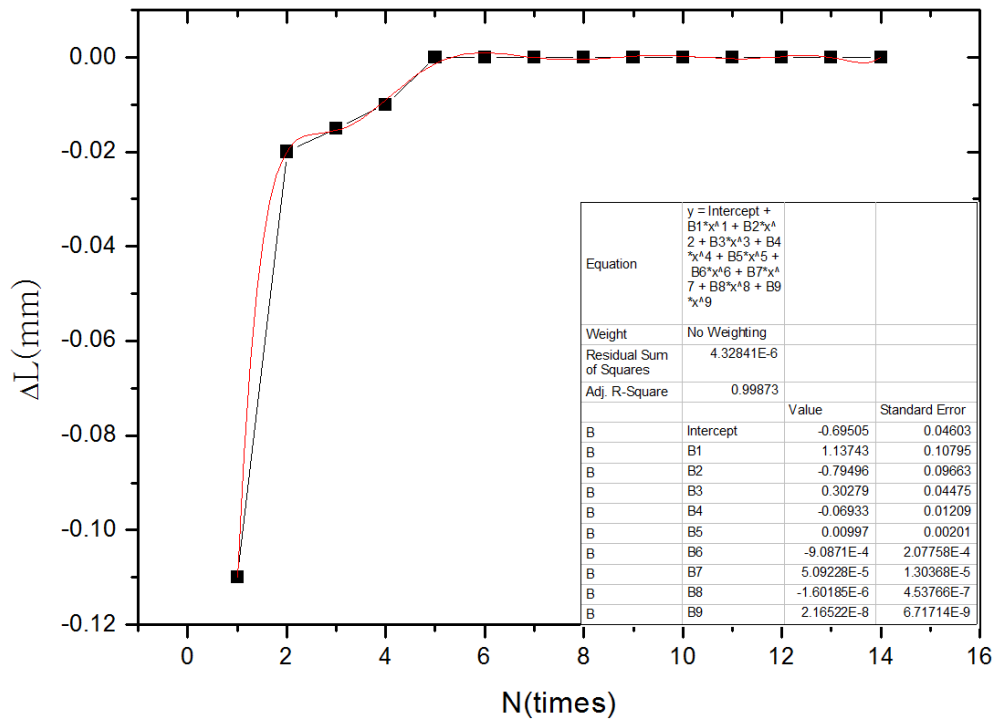
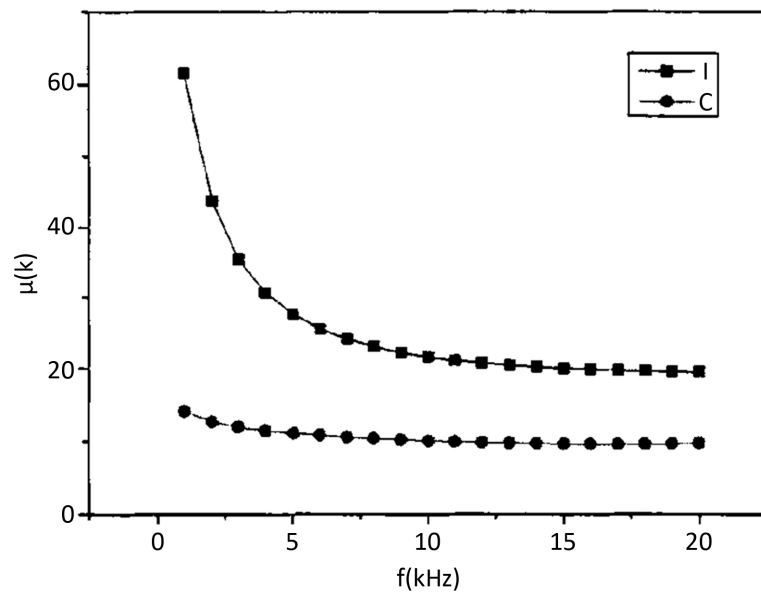


Figure 8. Curve: the elongation and times (three to five) of tempering  
 图 8. 应力退火及回火次数与伸长量的关系曲线

片式和盘绕式磁环经过热处理后的磁导率随频率的变化曲线, 1 是经过热处理后叠片式磁环的磁导率随频



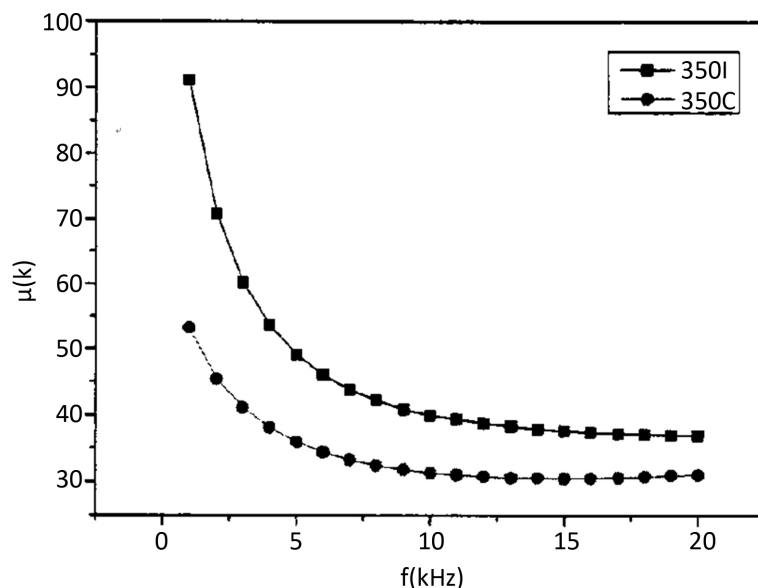
**Figure 9.** Curve: the elongation and times (three to five) of tempering  
**图 9.** 回火次数(3~5)与伸长量的关系曲线



**Figure 10.** Curve: change of magnetic permeability of the two cores with frequency variation  
**图 10.** 两种磁环的磁导率随频率的变化曲线

率的变化曲线，c是经过热处理后盘绕式磁环的磁导率随频率的变化曲线，由图可以看出经过热处理后的叠片式非晶磁环的磁导率明显高于盘绕式磁环的磁导率。叠片式的饱和磁感应强度、磁导率均高于盘绕式磁环，叠片式磁环的矫顽力、损耗均低于盘绕式磁环。所以非晶态和退火态的叠片式非晶磁环性能优于盘绕式磁环。





**Figure 11.** Curve: the magnetic permeability of laminated and coiled core annealed

**图 11.** 经退火后的叠片式与盘绕式磁环的磁导率两种磁环的磁导率随频率的变化曲线

#### 4. 结论

Fe 基合金薄带经电流应力退火后感生显著的磁各向异性场，采用相同的退火电流对经电流应力退火的样品进行回火只能消除部分感生的磁各向异性场，难以完全消除，经 10 次以上回火样品的感生磁各向异性场趋于稳定，不再随回火次数的增加而下降，仍残余 27%。这是导致盘绕式磁环的性能不如叠片式磁环的性能的主要原因，是导致非晶软磁器件性能提升难以达到理论预期的重要原因。本研究结果表明，现行采用退火手段消除非晶软磁器件制造过程中引入应力的做法，不够科学。本研究结论对于非晶软磁器件的性能提升具有重要指导意义。

#### 基金项目

国家重点基础研究发展计划(973 计划) 2012CB825705; 浙江省重点科技创新团队 2011R50012; 浙江省自然科学基金项目 LY14A040003。

#### 参考文献 (References)

- [1] Yoshizawa, Y., Oguma, S. and Yamauchi, K. (1988) New Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *Journal of Applied Physics*, **64**, 6044-6046. <https://doi.org/10.1063/1.342149>
- [2] 宋翀昉, 时红昊, 王立军, 等. 纳米晶薄带固化成型铁芯在中高频功率变压器上的应用[J]. *金属功能材料*, 2013(4): 33-35.
- [3] 周少雄, 卢志超, 陈金昌, 等. 非晶态物理与软磁材料的产业化[J]. *维普资讯*, 2002, 31(7): 431-436.
- [4] 石松耀, 等. 实用铁磁非晶材料的若干问题的讨论[J]. *上海钢研*, 1983(4): 1-10.
- [5] 韩雪岩, 佟文明, 唐任远, 等. 非晶合金在电机中的应用[J]. *电工电能新技术*, 2014, 33(12): 46-52.
- [6] 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.
- [7] Herzer, G. (1994) Creep Induced Magnetic Anisotropy in Nanocrystalline Fe-Cu-Nb-Si-B Alloy. *IEEE Transactions on Magnetics*, **30**, 4800-4802. <https://doi.org/10.1109/20.334226>

- 
- [8] Ohnuma, M., Herzer, G., Kozikowski, P., Polak, C., Budinsky, V. and Koppoju, S. (2012) Structural Anisotropy of Amorphous Alloys with Creep-Induced Magnetic Anisotropy. *Acta Materialia*, **60**, 1278-1286.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.11.017>
- [9] 陈国均, 涂国超, 卢玮, 等. 非晶纳米晶软磁材料在高效电机中的应用[J]. 金属材料研究, 2012, 43(2): 23-29.
- [10] 杨介信, 杨燮龙, 陈国, 等. 一种新型的纵向驱动巨磁致阻抗效应[J]. 科学通报, 1998, 10, 1051-1053.
- [11] 郝少倩. 叠片式非晶磁环的工艺与机理[D]: [硕士学位论文]. 浙江: 浙江师范大学, 2014: 1-41.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)