

Fe-Ni 软磁合金质子辐照效应研究

姜利祥^{1,2}, 易忠^{1,2}, 甄良^{1,3}, 孟立飞^{1,2}, 邵文柱³, 杨丽³, 刘宇明²

(1. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;
3. 哈尔滨工业大学 材料学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 采用质子加速器对 Fe-Ni 软磁合金进行 8 MeV 质子辐照, 研究其磁性能及组织结构与缺陷变化情况。研究表明, 随质子辐照吸收剂量的增加, Fe-Ni 合金的矫顽力增大, 磁导率下降, 饱和磁感应强度未受影响。X 射线衍射 (XRD) 结果表明辐照未引起相结构的变化, 但晶格发生了畸变。正电子湮没分析表明, 辐照导致了空位等材料缺陷。

关键词: Fe-Ni 软磁合金; 质子辐照; 材料缺陷; 试验研究

中图分类号: O483; V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012) 03-0312-03

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.03.015

0 引言

Fe-Ni 合金是一种应用十分广泛的软磁合金, 具有高磁导率、低矫顽力等特性, 目前已用作小卫星磁力矩器的棒体材料。卫星磁力矩器暴露于空间辐照环境下, 其辐照稳定性直接关系到卫星的正常运行, 因此开展磁力矩器棒体材料辐照稳定性研究具有重要的意义。国外的研究者开展过软磁材料的辐照效应研究, 结果表明软磁合金经辐照后磁性能会产生较大变化^[1-3]; 而国内在此方面的研究较少, 尤其是对软磁材料磁稳定性机理问题的研究还不够透彻^[4-6]。

本文主要根据空间带电粒子环境, 采用地面模拟技术利用质子加速器对有关材料进行质子辐照, 得到材料在质子辐照下的损伤规律; 同时从组织结构及缺陷的角度对其辐照稳定性进行研究, 为改善和提高材料辐照稳定性提供理论基础。

1 试验方案

试验材料的化学成分为 53.6% 的 Fe 和 45.3% 的 Ni, 其余为 Mn、Cr、Si 等合金元素。辐照试样为 4 mm × 4 mm 的薄片。辐照前用金相制样的方法对辐照表面进行处理, 得到光洁表面。利用 SRIM 软件计算材料中质子的剂量-深度分布, 以此确定辐照试样

的厚度。本文中试样的厚度为 0.2 mm, 与质子在试验材料中的贯穿深度一致。采用 2×6MVEN 型串列静电加速器进行质子辐照, 辐照能量为 8 MeV, 束流强度为 30 nA, 束流密度为 1.9×10^{11} p/(cm²·s)。

磁性能测量采用 Lake Shore 7410 型振动样品磁强计 (VSM)。材料物相分析采用 Rigaku Rotaflex D/max-rB 型 X 射线衍射仪。正电子湮没分析采用快-慢符合的正电子湮没寿命谱仪, 正电子源是以 Kapton 薄膜为衬底的无载体 ²²Na 源, 活度约为 0.5×10^6 Bq。

2 试验结果及讨论

2.1 磁性能变化

图 1、图 2 给出 Fe-Ni 合金在 8 MeV 质子辐照前后矫顽力和饱和磁感应强度随质子吸收剂量变化的规律。图 3 为起始磁化曲线斜率随质子吸收剂量变化的规律, 用来表示 Fe-Ni 合金磁导率的变化。由图 1 可以看出, Fe-Ni 合金的矫顽力随吸收剂量增加而增大, 当吸收剂量为 750 Mrad 时, 矫顽力的增加量为 39.2%。从图 2 可以看出, 辐照对 Fe-Ni 合金饱和磁感应强度的影响不大。从图 3 可以看出, Fe-Ni 合金的磁导率随吸收剂量增加而下降。

收稿日期: 2011-09-22; 修回日期: 2012-03-20

基金项目: “十一五” 国家级预先研究项目 “长寿命卫星空间磁性效应试验评价技术研究” 支持

作者简介: 姜利祥 (1971—), 男, 博士学位, 研究员, 主要从事空间环境效应及可靠性技术研究工作。E-mail: jlx8972@163.com。

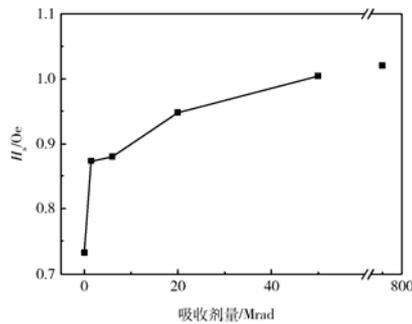


图1 8 MeV 质子辐照对 Fe-Ni 合金矫顽力的影响
Fig. 1 Coercivity curve for Fe-Ni alloy under 8 MeV proton irradiation

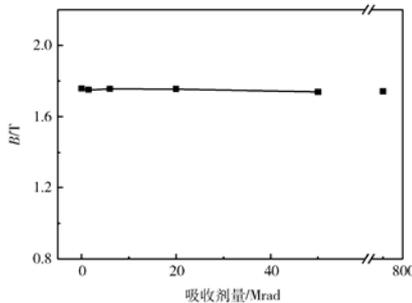


图2 8 MeV 质子辐照对 Fe-Ni 合金饱和磁感应强度的影响
Fig. 2 Saturation magnetic induction curve for Fe-Ni alloy under 8 MeV proton irradiation

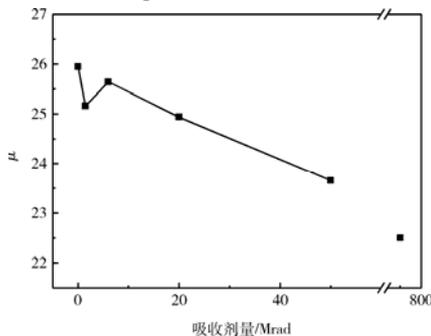


图3 8 MeV 质子辐照对 Fe-Ni 合金磁导率的影响
Fig. 3 Permeability curve for Fe-Ni alloy under 8 MeV proton irradiation

软磁合金的饱和磁感应强度是结构不敏感参数, 只与材料成分有关, 因而辐照产生的缺陷等结构变化对它影响不大。而软磁合金的矫顽力和磁导率是结构敏感参数, 受到内应力、饱和磁感应强度以及磁弹性等因素的影响。Goldman 曾提出矫顽力 H_c 、磁导率 μ 与各影响因素间满足如下关系:

$$H_c = P_c \frac{\lambda_s \sigma_i}{M_s} ; \quad (1)$$

$$\mu = 1 + \frac{KM_s^2}{\lambda_s \sigma_i} 。 \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: λ_s 是磁滞伸缩系数; σ_i 是内应力; M_s 是饱和磁感应强度; P_c 是与张区长度和布洛赫畴壁有关的参数; K 是磁晶各向异性常数。

在固体内慢化过程中, 质子通过弹性碰撞方式将部分能量传输给被击点阵原子; 这些初级碰撞原子还会经历一系列级联碰撞, 形成点阵空位和离位原子; 这种空位-离位原子对会凝聚成团, 导致固体产生点阵缺陷。合金中的辐照缺陷使晶格发生变形, 从而增大合金的微观内应力。由式(1)可知, 这种微观内应力的增加会导致材料矫顽力增大。软磁合金的反磁化过程主要是通过畴壁位移来实现。畴壁位移磁化过程中的平衡条件为: 动力(磁场作用力)=阻力(由内应力或杂质等不均匀性所产生)。材料的内应力起伏会阻碍畴壁位移, 从而使矫顽力增大。由式(2)可知, 合金微观内应力的增加会使材料的磁导率下降。

2.2 物相分析

图4给出8 MeV 质子辐照前后 Fe-Ni 合金的 XRD 分析图, 对应的质子辐照吸收剂量为 750 Mrad。Fe-Ni 合金为单相的面心立方结构。XRD 分析显示 Fe-Ni 合金经质子辐照后各峰位没有变化, 说明辐照没有改变材料的相结构; 然而其(200)、(220)、(311)晶面衍射峰相对强度下降较明显, 半高宽也明显增大, 这主要是由于辐照后产生的点阵缺陷使晶格畸变, 晶粒排列的规整性受到破坏所致。

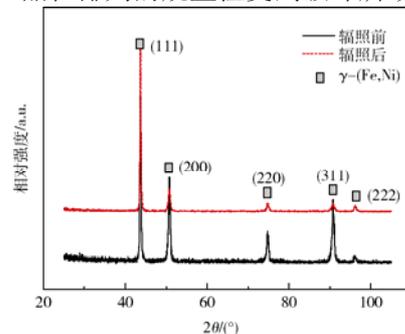


图4 8 MeV 质子辐照前后 Fe-Ni 合金的 XRD 分析
Fig. 4 XRD analysis of Fe-Ni alloy before and after the 8 MeV proton irradiation

2.3 正电子湮没寿命谱分析

在固体物理和材料科学辐照损伤的研究中, 正电子湮没技术得到广泛应用。表1为8 MeV 质子辐照前后 Fe-Ni 合金的正电子湮没寿命谱参数变化情况, 对应的质子辐照吸收剂量为 750 Mrad。表1中: 短寿命 τ_1 对应于单空位自由体积的寿命; 中寿命 τ_2 对应于正电子在空位团中的寿命, 空位团可视为由 10~15 个单空位聚集而成的集团; 长寿命 τ_3

可归结为较大空隙处所形成的正电子素即三重电子素，它是正电子在样品表面湮没的结果； I 值表示各种缺陷类型所占的比例； τ_e 为正电子湮没前的平均寿命，计算结果由测试单位提供。

表1 8 MeV 质子辐照前后 Fe-Ni 合金的正电子湮没寿命谱参数变化情况

Table 1 Variation of positron annihilation lifetime parameters for Fe-Ni alloy before and after the 8 MeV proton irradiation

状态	辐照前	辐照后
τ_1/ns	0.12	0.15
τ_2/ns	0.34	0.38
τ_3/ns	1.78	1.93
$I_1/\%$	67.2	68.8
$I_2/\%$	28.25	26.6
$I_3/\%$	4.55	4.6
τ_e/ns	0.26	0.29

从表1数据可以看出，Fe-Ni合金经质子辐照后正电子湮没前的平均寿命 τ_e 明显增大，说明辐照后合金总的缺陷数量是增多的。代表单空位的 τ_1 和代表空位团的 τ_2 都有所增加， I_1 略有增大， I_2 有所降低，说明增加的缺陷是以单空位为主，也有部分单空位聚集使一些空位团体积增大。另有研究者采用正电子湮没的方法，对纯铁金属经中子辐照后的缺陷变化进行了研究，发现辐照后材料中的空位团体积与其所占的比例都有所增加^[7-8]。

3 结论

试验研究表明，Fe-Ni合金在经8 MeV质子辐照后随质子吸收剂量增加，其矫顽力明显增大，饱和磁感应强度基本没有变化，磁导率下降。XRD分析和正电子湮没寿命谱分析表明，辐照后合金没

有发生相结构变化，只产生了单空位缺陷及少部分聚集的空位团，并使晶格发生畸变。对于矫顽力、磁导率这样的结构敏感参数，辐照产生的材料缺陷是其产生变化的主要原因。

致谢

感谢北京大学核物理与核技术国家重点实验室在质子辐照试验中给予的大力支持；感谢中国科学院高能物理研究所核分析技术重点实验室在正电子湮没试验中对作者的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Harara W. The effect of γ -ray irradiation on magnetic properties of electromagnetic Fe-Si(97%-3%) sheets[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1999, 50: 677-684
- [2] Gordon D I, Sery R S. Irradiation of iron and 5-79 Mo permalloy with 2 MeV electrons[J]. Journal of Applied Physics, 1964, 313: 879
- [3] Sery R S, Gordon D I. Irradiation of magnetic materials with 1.5- and 4-MeV protons[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 344: 1311
- [4] 刘艳红. 铁基软磁合金辐照效应研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008
- [5] 杨丽. 几种磁性材料的辐照效应及结构演变研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2010
- [6] 王楠. Alnico 永磁材料的辐照效应研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2009
- [7] Eldrup M, Singh B N, Zinkle S J, et al. Dose dependence of defect accumulation in neutron irradiated copper and iron[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002: 912-917
- [8] Zinkle S J, Matsukawa Y. Observation and analysis of defect cluster production and interactions with dislocations[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002: 88-96

The effects of the proton irradiation on Fe-Ni soft magnetic alloy

Jiang Lixiang^{1,2}, Yi Zhong^{1,2}, Zhen Liang^{1,3}, Meng Lifei^{1,2}, Shao Wenzhu³, Yang Li³, Liu Yuming²

(1. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Satellite Environment Engineering, Beijing 100094, China;

3. School of Materials Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A radiation experiment with 8 MeV proton was carried out with an accelerator to study the magnetic property and the microstructure as well as the flaw distribution of the Fe-Ni soft magnetic alloy. It is shown that after the proton radiation, the coercivity of the Fe-Ni soft magnetic alloy goes up with the increase of the absorbed dose and the decrease of the magnetic permeability. The saturation magnetic induction remains stable. The XRD results show that irradiation does not cause phase changes in the structure, but causes lattice distortions. The positron annihilation analysis shows that the irradiation leads to vacancies and other flaws.

Key words: Fe-Ni soft magnetic alloy; proton irradiation; material flaw; experimental study