

$\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体畴壁运动阻力函数的研究^{*}

徐 生 辉

(中山大学中山医学院, 广东 广州 510089)

摘 要: 研究表明在室温下匀速加场的不同成分 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体, 其磁化强度的时间变化率曲线随加场速率的变化而不同, 这些曲线可用具物理意义的诸参数拟合, 依理论分析获得了畴壁运动阻力函数的表达式。

关键词: $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体; 畴壁运动; 阻力函数

中图分类号: O482.54 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 06-0030-03

镍锌铁氧体主要用于制作高频、大功率器件的磁芯, 是性能最好的高频软磁铁氧体材料^[1]。在畴壁运动的匀速率加场下的驰豫研究中, 人们发现磁化强度时间变化率曲线的表达是很关键的^[2,3]。对镍锌铁氧体, 已有测量并将磁化强度时间变化率曲线用 $c_1 \exp(-b_1 H) - c_2 \exp(b_2 H)$ 来表述^[4], 然而此关系式在磁场较大时, 曲线偏离实验结果较明显, 虽然对该文分析影响很小, 但本文认为有必要对磁化强度时间变化率曲线的准确表达作进一步研究; 通过对不同成分 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体, 不同加场速率的磁化强度时间变化率曲线拟合, 本文获得了完全吻合实验的结果, 同时用畴壁运动理论得到了畴壁阻力函数的表达式, 对结果作了分析。

1 材料和实验方法

1.1 试样

按照镍、锌、铁元素的不同配比混合, 利用固态反应方法制成 3 种名义成分分别为 $\text{Ni}_{0.34}\text{Zn}_{0.66}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.31}\text{Zn}_{0.69}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{0.28}\text{Zn}_{0.72}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 的铁氧体试样, 其尺寸为 $1.75 \text{ mm} \times 4.85 \text{ mm} \times 50.20 \text{ mm}$, 扫描电镜观察晶粒线度平均为 $10 \mu\text{m}$, X 射线衍射表明它们为立方结构, 用常规测量得样品电导率均小于 $2.61 \times 10^{-5} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, 居里温度分别为 400, 373, 328 K, 密度依次为 $5.234, 5.158, 5.183 \text{ g/cm}^3$ 。

1.2 实验装置

由恒流源产生的直流电在调速装置的控制下通过密绕螺线管, 在螺线管内产生匀速增加的磁场, 从磁化电流电路上的电阻取得的瞬时磁场值信号输入记录仪的 X 轴; 试样上绕有探测线圈且每次测量前均作缓慢交流退磁处理, 在加场过程中探测线

圈将获得的信号输入放大器后, 接入记录仪的 Y 轴, 这样每一瞬时的感应电动势 E 与磁场 H 的关系便由记录仪描绘。

由电磁感应定律 $E = NS \frac{dB}{dt} \approx \mu_0 NS \frac{dM}{dt}$ 可见, 记录仪描绘的 $E-H$ 曲线即为 $M-H$ 关系曲线, 其中 NS 为磁通匝链数; 对不同 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体试样, 本文测量了在室温下多个不同外场速率下的 $M-H$ 关系曲线。

2 结果与讨论

对同一成分的试样, 其曲线的特点是随着加场速率 H' 减小, 曲线降低。根据曲线形状, 可将它按下面的方程进行拟合。

$$M = \frac{b_1}{1 + \exp[c_1(H - H_0)]} - b_2 \exp(-c_2 H) \quad (1)$$

其中, b_1, b_2, c_1, c_2 和 H_0 为拟合参数, H 为磁场强度。室温下居里温度为 400 和 328 K 试样在不同加场速率下的 $M-H$ 关系如图 1, 2 所示, 限于篇幅 T_c 为 373 K 试样的 $M-H$ 图此处不再画出, 这不影响后面的分析讨论; 图中实线是拟合曲线, 标记点是记录仪结果数字化的点; 各样品拟合参数如表 1 所示。

2.1 参数意义与材料畴壁特性

与文献 [4] 的处理不同, 显然本文拟合方程 (1) 式完全吻合实验结果, 没有任何偏离; 且从下面讨论知拟合参数具更为清晰的物理意义。由结果知表达式 (1) 中的参数 b_1 为 $M-H$ 曲线的峰值 $(M)_{\max}$, 它与最大微分磁化率的值相对应; 由后面的分析知 $M \propto X$, 可见参数 b_1 意义反映畴壁移动的最大平均速度; 对同一样品, $M-H$ 曲线随着外

^{*} 收稿日期: 2002-04-10

基金项目: 中山大学中山医学院 CMB 启动基金资助项目 (4209348)

作者简介: 徐生辉 (1964 年生) 男, 讲师; E-mail: shxu@gzsums.edu.cn

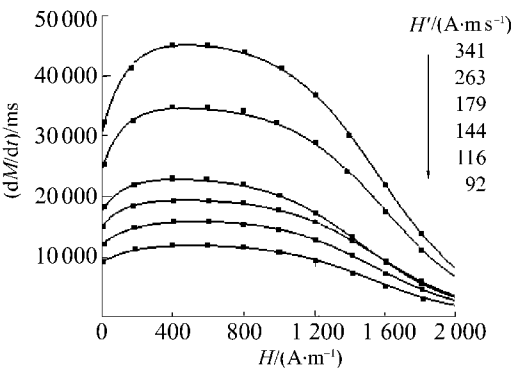


图 1 $T_c=400\text{ K}$ 试样不同 H' 下的 dM/dt 曲线

Fig 1 The dM/dt curves of $T_c=400\text{ K}$ sample in various H'

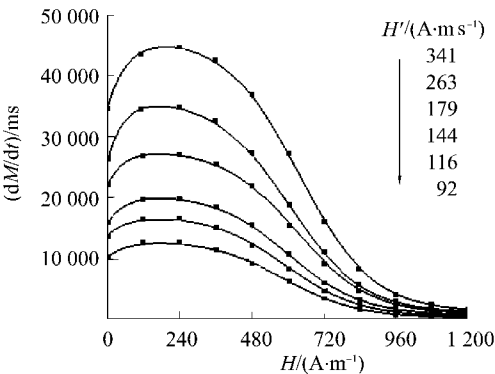


图 2 $T_c=328\text{ K}$ 试样不同 H' 下的 dM/dt 曲线

Fig 2 The dM/dt curves of $T_c=328\text{ K}$ sample in various H'

场速率 H' 增加而升高, 由表 1 同一试样不同 H' 的参数 b_1 值的变化亦可看出, H' 增大, b_1 增大, 反映畴壁移动的最大平均速度增加; 对相同 H' 不同试样的 b_1 值则变化不大, 表明 b_1 与材料本身的特性无关或关系不大, 而与加场速率关系密切。参数 H_0 是 $M-H$ 曲线高度降到一半时对应的磁场值, 它是表征畴壁移动过程的参量, 随着 H_0 增加, 到达畴转阶段所需磁场越大; 由表 1 可见, 同一试样不同 H' 下的拟合参数 H_0 变化不大, 相同 H' 不同试样的 H_0 值则变化明显, 说明参数 H_0 与材料本身有关, 随着 $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 铁氧体材料配比 x 减少, H_0 减少, 表现在关系图中是曲线由宽变窄。参数 c_1 与 $M-H$ 曲线下落快慢有关, 随着 c_1 增大曲线下落越快, 即畴转过程很快完成而进入饱和磁化阶段; 同一试样的 c_1 不变, 可见 c_1 与加场速率无关, 不同试样 c_1 则不同, 它随材料配比 x 减少而增大。 b_2 和 c_2 是表征起始磁化过程的参数, 当 $H=0$ 时由 (1) 式得 $M \approx b_1 - b_2$, 它反映起始微

分磁化率, 相应于畴壁移动刚开始的平均速度, 显然 b_1 应是畴壁驱动力相关的因子, b_2 是畴壁阻力相关的因子。从上面分析及表 1 拟合参数值的变化可看出, 对同一成分样品, 随着 H' 增大 c_1 , c_2 及 H_0 的变化均不明显, 表明畴壁移动和畴转均在较恒定的磁场区间内完成; 而参数 b_1 则随加场速率 H' 增大而明显增大, 反映畴壁驱动力随 H' 增大而增加, 畴壁移动平均速度增大; 同样 b_2 亦随着 H' 的增大而增大, 表明畴壁运动的阻力亦随加场速率 H' 增大而增加。

表 1 不同 H' 下的拟合参数值¹⁾

Tab 1 The fitting parameters in various H'

试样	H'	$b_1 \times 10^4$	$c_1 \times 10^{-3}$	$b_2 \times 10^3$	$c_2 \times 10^{-3}$	$H_0 \times 10^2$
1	92	1.21	3.77	3.29	5.74	15.28
	116	1.62	3.77	4.42	5.23	15.37
	144	1.94	3.77	4.68	7.33	15.60
	179	2.30	3.77	5.78	7.75	14.72
	263	3.48	3.77	10.71	8.29	15.91
	341	4.54	3.77	15.70	7.56	15.60
2	92	1.27	4.40	2.54	7.89	12.18
	116	1.62	4.40	3.19	6.71	12.41
	144	2.04	4.40	3.95	9.02	12.10
	179	2.75	4.40	4.89	9.41	11.78
	263	3.76	4.40	10.73	8.27	12.73
	341	4.23	4.40	13.52	8.62	13.29
3	92	1.29	8.17	2.95	14.07	5.89
	116	1.68	8.17	3.41	13.82	5.97
	144	2.01	8.17	4.96	16.08	6.01
	179	2.73	8.17	6.04	17.22	6.29
	263	3.53	8.17	10.40	18.60	6.01
	341	4.53	8.17	11.81	14.70	6.37

1) H' , b_1 , b_2 的单位为 $\text{A}^\circ\text{ms}^{-1}$; c_1 , c_2 的单位为 $\text{m}^\circ\text{A}^{-1}$; H_0 的单位为 $\text{A}^\circ\text{m}^{-1}$

2.2 畴壁阻力函数

为了对畴壁运动阻力作定量描述, 考虑本文匀速率加场下准静态技术磁化, 根据磁化过程中单位面积畴壁运动方程^[5]可得

$$\alpha dX/dt + \beta X + \gamma X = f(t)$$

此式为畴壁在外场力 $f(t)$ 作用下离开势能谷位移 X 及速度、加速度关系式, 这里 α 为单位面积畴壁的有效质量, 一般铁氧体 $\alpha \approx 10^{-10} \text{ g/cm}^2$; β 是阻尼系数, γ 为回复力系数。我们采用等效畴壁的统计概念^[3,6], 对比 β 、 γ 而言, 由于畴壁有效质量很小, 又样品是细长状并作多晶退火处理, 考虑到本文加场速率较慢, 畴壁在较高磁场下仍近似平直移动, 忽略加速度项, 则畴壁运动方程可表为 $\beta X + \gamma X = f(t)$, 此阶段关系式 $X = (M/M_s) L$ 成立,

因此有

$$\beta M + \gamma M = (M_s / L) f(t) \tag{2}$$

这里, L 为畴壁间距。可见由实验测定的 $M-H$ 关系相应于 $X-H$ 关系, 亦即反映了 $X-t$ 关系。设阻力为 $CM_s H_R$, 则畴壁运动的有效驱动力因子 $f(t)$ 可表为 $CM_s (H-H_R)$, 由于 $H=H't$, 因而一般畴壁阻力函数 H_R 亦是与 t 有关的函数, 也即为与 H 有关的函数。利用拟合的关系式 (1) 代入 (2) 式便可得到 H_R 的表达式为

$$H-H_R = (\beta M + \gamma M) \frac{L}{CM_s^2} = H_\beta + H_\gamma \tag{3}$$

式中,

$$H_\beta = \frac{\beta L}{CM_s^2} \left[\frac{b_1}{1 + \exp[C_1(H-H_0)]} - b_2 \exp(C_2 H) \right]$$

$$H_\gamma = \frac{\gamma L}{CH'M_s^2} \circ$$

$$\left[b_1 H + \frac{b_1}{c_1} \ln \frac{1 + \exp(-C_1 H_0)}{1 + \exp[C_1(H-H_0)]} + \frac{b_2}{c_2} (\exp(-c_2 H) - 1) \right]$$

由表 1 各参数的量级和本文 H' 的范围, 以及其它参数的数量级关系^[2], 取 $\beta \approx 10^{-2}$, $\gamma \approx 10^6$; $C=1$, $M_s \approx 10^2$ Gs, $L \approx 10^{-5}$ cm, 得 H_β 比 H_γ 小 10^8 A/m 的量级, 故而由 (3) 式可得畴壁阻力函数近似为

$$H_R = H - \frac{\gamma L}{CH'M_s^2} \circ$$

$$\left[b_1 H + \frac{b_1}{c_1} \ln \frac{1 + \exp(-C_1 H_0)}{1 + \exp[C_1(H-H_0)]} + \frac{b_2}{c_2} (\exp(-c_2 H) - 1) \right]$$

3 结 论

室温下不同成分 $Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ 铁氧体, 依不同加场速率具不同的 $M-H$ 曲线, 这些曲线可用

$$M = \frac{b_1}{1 + \exp[C_1(H-H_0)]} - b_2 \exp(C_2 H)$$

的形式拟合; 依外磁场下畴壁运动理论获得畴壁阻力函数的表达式为

$$H_R = H -$$

$$\frac{\gamma L}{CH'M_s^2} \left[b_1 H + \frac{b_1}{c_1} \ln \frac{1 + \exp(-C_1 H_0)}{1 + \exp[C_1(H-H_0)]} + \frac{b_2}{c_2} (\exp(-c_2 H) - 1) \right]$$

致谢: 本文实验是在曾文光、周若珍及张介立等老师支持下完成的, 特表谢意。

参考文献:

[1] RAMMAMOORTHY R, RAMASAMY S, NARAYANASAMY A. Impedance and magnetization studies of ultrafine Ni-Zn ferrite[J]. J Mater Sci Technol, 1997, 13: 289-292.
[2] 李荫远, 李国栋. 铁氧体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
[3] ZENG W G, ZHANG J X, SIU G G. Studies of domain wall motion II. Models of the dynamic internal friction[J]. J Phys Cond Mat, 1991, 3: 4783-4785.
[4] 曾文光, 徐生辉. Ni-Zn 铁氧体微分磁化率曲线特征的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1994, 33(1): 42-48.
[5] 戴道生, 钱昆明, 钟文定, 等. 铁磁学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
[6] ZENG W G, LAM C C, LUO Y L, et al. The behaviour of damping motion of domain wall in (BiTm)₃(FeGa)₅O₁₂ thin film[J]. Sol Stat Comm, 1997, 101(6): 407-411.

The Resistance Function Research of Domain Wall Motion in Ni_xZn_{1-x}Fe₂O₄ Ferrite

XU Sheng Hui

(Zhongshan Medical College, Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510089, China)

Abstract: The research shows that Ni_xZn_{1-x}Fe₂O₄ ferrites with different composition and different rate of H' have different $M-H$ curves at room temperature. These curves can be fitted with some meaningful parameters. The DW resistance function expression were educed from the domain wall motion theory in magnetic field.

Key words: Ni_xZn_{1-x}Fe₂O₄ ferrite; domain wall motion; resistance function