

# Ni-Zn 铁氧体微分磁化率曲线 特征的研究

曾文光

徐生辉

(中山大学物理学系, 广州 510275) (中山医科大学物理教研室, 广州 510089)

**摘要** 用匀速率增加的直流磁场  $H$  磁化不同居里温度的镍锌铁氧体试样, 测得磁化强度  $M$  的时间变化率曲线表明: 同一温度下随外场速率  $\dot{H}$  增加, 曲线升高; 同一外场速率下随温度升高, 曲线降低; 微分磁化率  $dM/dH$  可以采用等效畴壁运动表示.

**关键词** 微分磁化率, 磁畴壁, 镍锌铁氧体, 回复力系数

**分类号** O482.54

在镍锌铁氧体磁畴壁运动的高频行为的研究中, 运动阻尼系数和回复力系数通常都是间接估算的<sup>[1,2]</sup>. 在匀速率外场下铁磁材料的弛豫研究中, 发现动态内耗与外场速率以及  $dM/dH$  关系密切, 用畴壁运动观点描述这些关系时, 表达式中的关键因子是  $dM/dH-H$  关系<sup>[3,4]</sup>. 对于立方结构铁磁材料, 已经测量并按等效畴壁运动观点将  $dM/dt-H$  关系用  $c_1 \exp(-b_1 H) - c_2 \exp(-b_2 H)$  来描写, 利用这个观点, 处理了圆柱体螺纹钢的残余应力沿径向分布问题<sup>[1]</sup>. 本文仍然利用这个观点, 测量并处理了不同条件下镍锌铁氧体试样的  $dM/dH-H$  曲线, 得到起始微分磁化率、饱和磁化强度、运动阻尼及回复力系数的表达式以及它们与温度的关系.

## 1 实验方法

### 1.1 试样

用普通固态反应法制备了 4 种不同名义成份的镍锌铁氧体试样, 尺寸为  $1.7 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm} \times 50.2 \text{ mm}$ . 用常规磁化率-温度曲线测定它们的居里点分别为 400, 373, 328, 255 K; 密度依次为 5.234, 5.158, 5.183, 5.110 ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ). 所有试样的电阻率均大于  $3 \times 10^6 \text{ } \Omega\text{cm}$ . X-射线衍射结果表明它们属立方结构. 用扫描电镜观测, 它们的平均晶粒线

收稿日期: 1992-06-19

1) 曾文光, 董宇辉, 邓雪儿等. 物理测试, 待发表

度为 10 μm.

### 1.2 微分磁化率的测量

用自制的调速装置,使恒流电源产生匀速率变化的直流电,电流通过水冷螺线管在其轴线方向产生以速率  $\dot{H}$  变化的磁场  $H = \dot{H}t$ . 磁场与电流的关系由纵向高斯计标定. 当电流逐渐增加或减小时,绕在试样上的探测线圈得到信号,输入 X-Y 记录仪的 Y 轴,记录仪的灵敏度为 5 μV/cm. 磁场瞬时值由磁化电流电路上串联的电阻上得到,输入记录仪的 X 轴. 记录曲线上每一点反映某一瞬时  $t$  感应电动势的大小  $\varepsilon$  与该时刻磁场  $H$  的关系. 试样退磁因子粗略地采用长椭球的公式计算(这对下面分析没有大的影响,只是数值方面会引入差异. 每次测量前均用 50 Hz 交流退磁,并作空线圈情况的测量. 在 296 K 下对居里温度高于室温的 3 个试样,在 77 K 下对居里温度为 255 K 的试样,进行了外加磁场速率  $\dot{H}$  在 1.16~4.29( $\times 79.6$  A/m.s)范围的  $\varepsilon$ - $H$  曲线测量,由于

$$\varepsilon = NS \frac{dB}{dt} \approx NS \frac{dM}{dt} \tag{1}$$

$NS$  是磁通链数,实验中已给定, $B$  是磁感应强度,由(1)式, $\varepsilon$ - $H$  曲线的形状即是  $dM/dt$ - $H$  曲线形状. 本文条件下  $dM/dt = \dot{H}dM/dH$ ,因此给定  $\dot{H}$  的  $\varepsilon$ - $H$  曲线形状也即是  $dM/dH$ - $H$  曲线形状.

### 1.3 不同温度下 $\varepsilon$ - $H$ 曲线测量

用硅油作为传热介质,分别加热居里点为 400 K、373 K 和 328 K 3 个试样,在不同的给定温度下按上述方法测量各试样的  $\varepsilon$ - $H$  曲线,便得到相应的  $dM/dt$ 、 $dM/dH$  曲线.

## 2 结果和讨论

室温下居里点为 400 K 的试样,不同  $\dot{H}$  的  $dM/dt$ - $H$  关系如图 1 所示,图中实线是拟合曲线(见下面讨论),其它 3 个试样的  $dM/dt$ - $H$  关系曲线与图 1 相似,但拟合参量的大小不同(见表 1). 不同温度下居里点为 400, 373 和 328 K 3 个试样的  $dM/dt$ - $H$  曲线如图 2~4 所示. 由图可以看出.

(1) 室温 296 K 下所有试样的  $dM/dt$ - $H$  曲线都随外加磁场速率增加而升高.

(2) 在居里温度以下,同一外加磁场速率时, $dM/dt$ - $H$  曲线随温度升高而降低.

(3)  $H = 0$  时  $dM/dt \neq 0$ ;  $H$  趋于较大值时, $dM/dt$ - $H$  曲线变平. 除了接近居里点的温度外,所有曲线都有一个极大值.

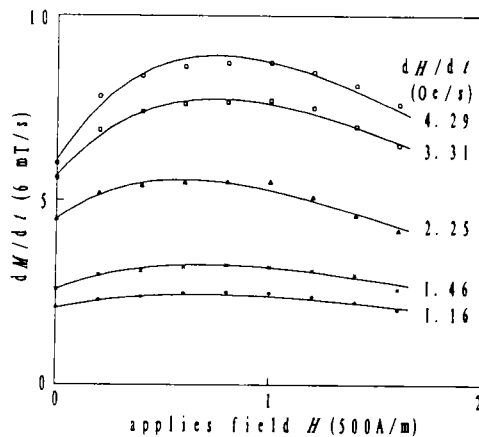


图 1 不同外加磁场速率下居里温度 400K 的试样的  $dM/dt$ - $H$  曲线

Fig. 1 The curves of  $dM/dt$ - $H$  in various  $H$  for sample with  $T_c = 400K$

表 1 不同  $\dot{H}$  下的拟合参量值  
Tab. 1 Paramaters  $b_1, b_2, c_1, c_2, \beta, \alpha,$  and  $M_s$ , in various  $dH/dt$

样品	$dH/dt$ (A/m)	$c_1-c_2$ (mT/s)	$b_1$ (km/A)	$b_2$ (km/A)	$M_s$ (T)	$(dM/dH)m$ (mT/Am <sup>-1</sup> )	$\beta$ (NSm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ kNm <sup>-3</sup>	$\beta/\alpha$ (10 <sup>-6</sup> s)
1# 296 K	341	37.08	1.567	1.573	0.28	0.17	0.044	5.93	7.43
	263	30.00	1.537	1.543	0.38	0.17	0.062	6.60	9.45
	179	21.30	1.541	1.554	0.26	0.16	0.092	7.51	12.28
	144	18.42	1.412	1.4178	0.31	0.17	0.161	9.69	16.61
	116	14.76	1.280	1.288	0.34	0.17	0.266	11.65	22.86
	92	10.68	1.437	1.442	0.28	0.16	0.218	8.29	26.33
2# 296 K	341	36.54	1.703	1.712	0.24	0.16	0.033	5.13	6.46
	263	33.96	1.608	1.622	0.28	0.18	0.060	7.31	8.21
	179	27.18	1.026	2.377	0.32	0.19	0.128	11.03	11.63
	144	18.18	1.015	1.016	0.22	0.17	0.064	5.28	12.10
	116	15.54	1.555	1.565	0.27	0.17	0.155	8.90	17.39
	92	12.54	1.403	1.407	0.28	0.16	0.270	12.15	22.21
3# 296 K	341	39.66	1.474	1.517	0.27	0.16	0.053	7.62	6.93
	263	30.54	1.470	1.580	0.27	0.16	0.059	6.77	8.68
	179	25.74	1.386	1.395	0.33	0.18	0.162	11.88	12.83
	144	18.00	1.454	1.477	0.29	0.17	0.142	8.83	16.10
	116	15.84	1.372	1.422	0.31	0.17	0.220	11.27	19.53
	92	11.82	1.542	1.563	0.27	0.17	0.192	8.53	22.77
4# 77 K	341	38.64	1.939	1.942	0.18	0.14	0.023	4.99	4.63
	263	31.20	2.059	2.064	0.17	0.14	0.026	4.79	5.47
	179	21.42	2.033	2.041	0.18	0.15	0.040	4.81	8.37
	144	15.54	2.154	2.304	0.16	0.14	0.035	3.47	9.99
	116	14.10	2.246	2.255	0.16	0.15	0.047	4.03	11.59

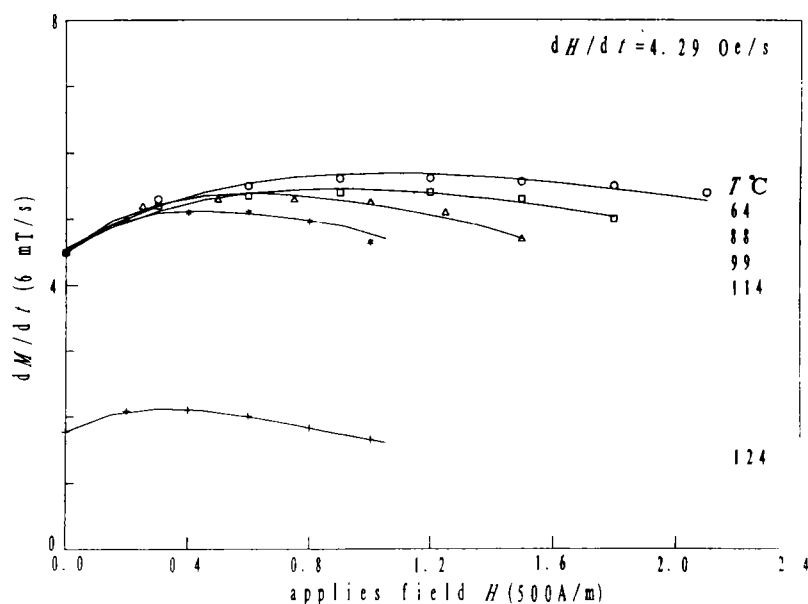


图 2 居里温度 400K 的试样在不同温度下的  $dM/dt-H$  曲线

Fig. 2 The curves of  $dM/dt-H$  in various temperature for sample with  $T_c=400K$

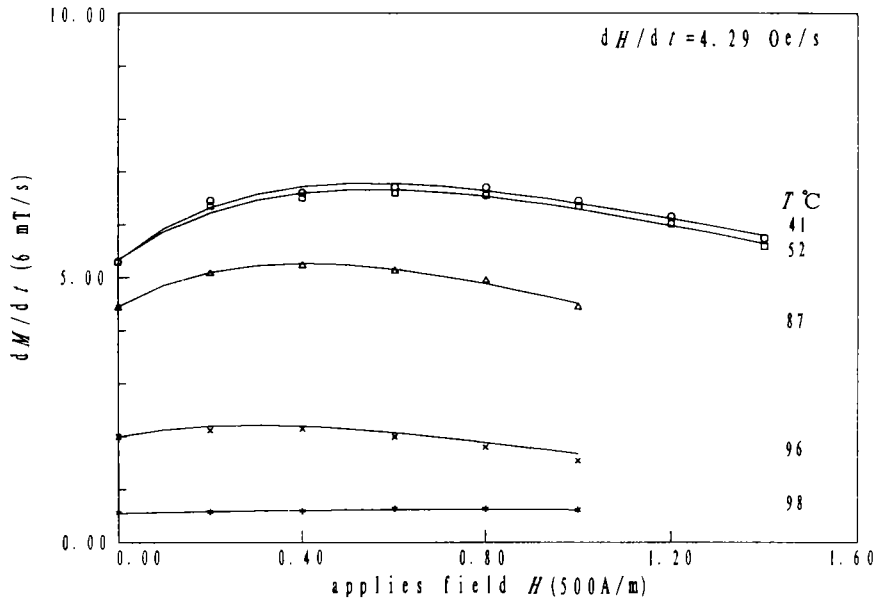


图 3 居里温度 373K 的试样在不同温度下的  $dM/dt-H$  曲线

Fig. 3 The curves of  $dM/dt-H$  in various temperature for sample with  $T_c=373K$

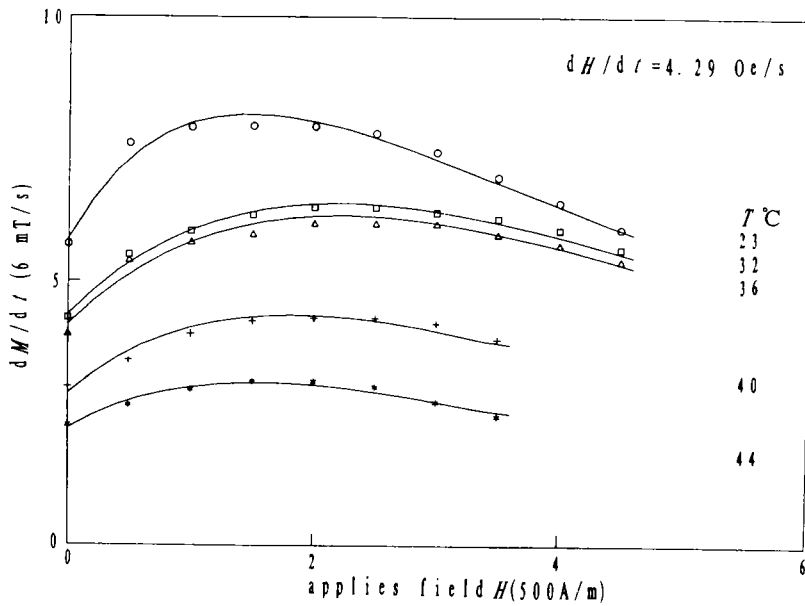


图 4 居里温度 328K 的试样在不同温度下的  $dM/dt-H$  曲线

Fig. 4 The curves of  $dM/dt-H$  in various temperature for sample with  $T_c=328K$

(4) 图中的分散点是由实验记录曲线数字化的点,实验曲线与拟合曲线是基本上重合的.拟合曲线(实线)按照

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\varepsilon}{N_s} = c_1 \exp(-b_1 H) - c_2 \exp(-b_2 H) \quad (2)$$

关系,采用 MaLab 软件得到.其中  $c_1, c_2, b_1$  和  $b_2$  是拟合参数.由(2)式,  $H=0$  时  $\frac{dM}{dH} = \frac{dM}{H dt} = \frac{(c_1 - c_2)}{H}$  是起始微分磁化率;按照求极值方法可以得到  $dM/dt$  为极大值的磁场  $H_m = \left[ \ln \left( \frac{c_2 b_2}{c_1 b_1} \right) \right] / (b_2 - b_1)$ , 代回(2)式得到微分磁化率的极大值.由(2)式进行  $0 \sim H$  积分并外推  $H \rightarrow \infty$  得到饱和磁化强度  $M_s; M_s = \left( \frac{c_1}{b_1} - \frac{c_2}{b_2} \right) / H$ , 而  $M$  为

$$M = M_s - \left[ \left( \frac{c_1}{b_1} \right) (1 - \exp(-b_1 H)) - \left( \frac{c_2}{b_2} \right) (1 - \exp(-b_2 H)) \right] / H \quad (3)$$

表 1 给出了室温试样及 77 K 测量的居里点为 255 K 试样在不同  $\dot{H}$  下的拟合参数,表 2 给出了变温试样的拟合参数.  $c_1, c_2$  各自变化规律不明显,表中以  $c_1 - c_2$  及  $M_s$  的形式给出.由表中拟合参数可见:①起始微分磁化率与加场速率有关,  $(c_1 - c_2) = \dot{H} \left( \frac{dM}{dH} \right)_{H=0}$  随  $\dot{H}$  增加而增加,但不是线性的;在同样  $\dot{H}$  下,随温度升高,起始微分磁化率有所降低,接近居里点时急剧下降.②对于相同试样,室温下  $M_s, \left( \frac{dM}{dH} \right)_{\max}$  在本文  $H$  范围内与  $\dot{H}$  关系不大,但与温度有关,随温度升高到接近居里点而急剧下降.

本文研究的多晶试样存在大量畴壁、晶界、其它晶体缺陷,各个畴壁所处的能量状态及周围环境不同,在缓慢匀速加场条件下,不可能所有畴壁同时运动,运动着的畴壁也不可能同时停止运动.可以设想:刚开始加场时,处于有利能量状态的那些畴壁开始加速运动,使  $dM/dt$  增大;当它们遇到其它畴壁或晶体缺陷引起的阻力时,可能减速或停止运动.使  $dM/dt$  沿相反方向增大;那些曾经运动过但停止了运动的畴壁在恰当外场中还有可能重新运动;只当外磁场达到某一个值时,才能使大量畴壁作加速运动,使  $dM/dt$  达到最大值即  $\varepsilon$  达到最大值(见(1)式).在足够高的磁场下,试样趋近饱和磁化,运动着的畴壁数目趋于 0,  $dM/dt$  也趋于 0.实验测到的是取决于材料内部性质(如畴类型,晶体缺陷)的平均结果.我们借用建立在统计规律上的磁性物体  $MO$  的概念<sup>[5]</sup>,将上述在不同时刻(即不同磁场  $H = \dot{H}t$ )的运动畴壁的数目(有加速与减速之分)分布,用一个等效畴壁在  $H = \dot{H}t$  场中的运动状态来描写,参照文献[1,4]的处理方法,注意到本实验轴向外场条件以及畴壁有效质量很小<sup>[1]</sup>,我们把单位面积  $MO$  沿  $X$  方向运动的运动方程表示为  $\beta \dot{x} + \alpha x = \mu_0 M_s \dot{H} t$ .作壁移运动的  $\dot{x}$  可以用  $l \dot{M} / M_s$  来表示<sup>[6]</sup>,  $l$  是畴壁线度,  $M_s$  是饱和磁化强度,采用国际单位制.因此有

$$\beta dM/dt + \alpha M = \mu_0 M_s^2 \dot{H} t / l \quad (4)$$

$\beta, \alpha$  分别是单位面积  $MO$  运动的阻尼系数和回复力系数.将(2),(3)式代入(4)式可得一指数方程,取  $b_1 \dot{H} t$  及  $b_2 \dot{H} t$  较小时指数函数展开式的头两项,数值计算表明当  $H < 700$  A/m 时头两项值比其余项值大两个数量级,在这个  $H$  范围内比较指数方程两边系数,得到以  $\alpha, \beta$  为待求量的方程组,解得

表 2 不同温度下的拟合参量值

Tab. 2 Parameters  $b_1, b_2, c_1, c_2, \beta, \alpha$  and  $M_s$ , in various temperature

样品	温度 (K)	$c_1-c_2$ (mT/s)	$b_1$ (km/A)	$b_2$ (km/A)	$M_s$ (T)	$(dM/dH)_m$ (mT/Am <sup>-1</sup> )	$\beta$ (NSm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ kNm <sup>-3</sup>	$\beta/\alpha$ (10 <sup>-6</sup> s)
1# dH/dt= 341 A/m	337	27.38	0.962	0.966	0.33	0.12	0.141	11.52	12.21
	361	27.17	0.431	2.575	0.30	0.10	0.173	15.68	11.03
	372	27.13	0.498	4.302	0.24	0.09	0.080	9.10	8.82
	387	26.94	2.038	2.038	0.08	0.08	0.015	4.95	3.11
	397	10.63	1.490	5.584	0.04	0.04	0.003	0.75	3.52
1# 263 A/m	335	22.88	0.291	4.573	0.42	0.08	0.314	21.91	14.33
	362	22.90	0.746	1.844	0.23	0.08	0.122	15.81	7.72
	373	22.82	0.424	3.256	0.29	0.08	0.219	21.92	9.98
	386	22.85	1.338	2.778	0.13	0.07	0.027	6.23	4.26
	397	8.48	2.948	2.950	0.04	0.03	0.002	0.72	3.39
2# 341 A/m	314	32.00	0.624	5.186	0.24	0.12	0.047	6.11	7.64
	325	32.01	0.726	4.418	0.22	0.12	0.041	5.97	6.82
	360	26.67	1.336	3.996	0.11	0.09	0.012	2.85	4.14
	369	11.94	2.652	2.656	0.05	0.05	0.003	0.73	3.90
	371	3.80	1.222	1.230	0.02	0.01	0.008	1.23	6.40
2# 263 A/m	317	23.07	1.280	3.006	0.18	0.10	0.027	4.63	5.73
	345	21.70	2.386	2.394	0.14	0.14	0.012	2.52	4.85
	355	22.67	1.776	4.326	0.11	0.11	0.009	2.47	3.62
	365	12.71	2.844	2.856	0.05	0.05	0.004	1.21	3.34
	370	3.99	4.094	4.100	0.01	0.01	0.000	0.18	2.37
3# 341 A/m	296	34.78	0.632	3.720	0.31	0.14	0.066	7.34	9.04
	305	26.19	1.064	1.292	0.25	0.11	0.074	7.66	9.70
	309	25.00	1.176	1.184	0.21	0.10	0.067	8.14	8.21
	313	17.18	1.440	1.452	0.12	0.07	0.025	3.64	6.88
	317	13.23	1.572	1.588	0.08	0.05	0.015	2.52	5.82
3# 263 A/m	296	30.47	0.912	2.572	0.30	0.12	0.074	9.91	7.52
	305	20.03	1.172	1.176	0.24	0.08	0.093	10.22	9.10
	309	16.54	0.712	2.428	0.25	0.08	0.071	6.17	11.49
	312	14.88	1.668	1.673	0.14	0.07	0.025	3.36	7.52
	317	9.81	1.704	1.724	0.12	0.06	0.017	1.85	9.32

$$\alpha = \mu_0 M_s^2 \dot{H} b_1 b_2 (c_1 - c_2) / [l(b_2 - b_1)^2 c_1 c_2] \quad (5)$$

$$\beta = \mu_0 M_s^2 (b_2 c_1 - b_1 c_2) / [l(b_2 - b_1)^2 c_1 c_2]$$

以及  $\beta/\alpha = (b_2 c_1 - b_1 c_2) / [H b_1 b_2 (c_1 - c_2)]$ . 由(5)式得到的这些值分别列于表 1 和表 2. 计算中取  $l$  为  $10^{-6}$  m. 由表中数值可见: ①  $\alpha$  的数量级为  $10^3 \sim 10^4$  Nm<sup>-3</sup>,  $\beta$  则为  $10^{-2} \sim 10^{-1}$  Nm<sup>-3</sup>s,  $\beta/\alpha$  为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  s; ②除个别样品外, 随  $\dot{H}$  增大或温度升高,  $\beta/\alpha$  减少, 这表示在单位回复力系数下畴壁运动阻尼随  $\dot{H}$  的增大或温度升高而减少, 畴壁动性增大.

### 3 结 论

匀速率缓慢加场条件下镍锌铁氧体的微分磁化率曲线特征可以用  $[c_1 \exp(-b_1 H) - c_2 \exp(-b_2 H)] / \dot{H}$  来表示, 其中分量组合  $(c_1 - c_2) / \dot{H}$  表示起始微分磁化率,  $(c_1 / b_1 - c_2 / b_2) / \dot{H}$  表示饱和磁化强度. 根据等效畴壁运动观点, 得到  $\beta/\alpha$  数量级为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  s.

本文的实验工作是在周若珍、张介立等老师支持下完成的, 特表谢意.

## 参 考 文 献

- 1 北京大学物理系. 铁磁学. 北京: 科学出版社, 1976
- 2 李荫远, 李国栋. 铁氧体物理学, 北京: 科学出版社, 1978
- 3 Zeng W G, Lin H Q, Zhang J X *et al.* J Phys: Condens Matter, 1990 (2): 9531
- 4 Zeng W G, Zhang J X, Siu G G, *ibid.*, 1991(3):4783
- 5 Bertotti G, Proc 3rd Int Conf on the Physics of Magnetic Materials. Singapore: World Science, 1987. 489
- 6 Cullity B D. Introduction to Magnetic Materials, Reading, MA: Addison—Wesley, 1972

## The Characteristics of Magnetization Differential and Magnetic Intensity in Ni-Zn Ferrite

Zeng Wenguang \* Xu Shenghui

**Abstract** The relations of magnetization differential with magnetic intensity described by  $dM/dt - H$  curves are studied in Ni-Zn ferrite with a constant rate of increasing  $H$ . It is shown that  $dM/dt - H$  curves depend on the rate to increase  $H$  and  $dM/dt$  increases with increased  $\dot{H}$  for a fixed temperature. For fixed  $\dot{H}$ ,  $dM/dt - H$  curves are lower for higher temperature. Analytic expression for  $dM/dt$  is derived and the ratio of damping coefficient to restoring coefficient is measured to be in order of the  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  s.

**Keywords** differential susceptibility, domain wall, Ni-Zn ferrite, coefficient of restoring force

---

\* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275