

# 立方结构铁磁材料中畴壁阻力函数的研究\*

曾文光 张进修  
(物理学系)

## 摘 要

测定了镍、坡莫42、4%硅钢线(片)和铁、15号及45号优质碳素结构钢棒在匀速率增加外磁场下的微分磁化率—— $dM/dH-H$ 关系曲线。结果表明,线(片)状试样与棒状试样具有不同的 $dM/dH-H$ 关系曲线,这些曲线可用磁场速率 $\alpha$ ,以及 $A_{01}$ ,  $A_{02}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 等参数拟合,每个参数均具有确定的物理意义。用磁畴壁运动理论得到了阻力函数的形式及其与材料性质、外场条件的关系。

**关键词** 微分磁化率, 磁场速率, 磁畴, 阻力函数

## 1 引 言

已用冲击法测量了大量铁磁材料的磁化曲线<sup>[1,2,3]</sup>。这种传统方法的特点是:在高的外加磁场速率下,每个给定的磁场 $H$ 值对 $dM/dH$ 积分,得到逐点连接的 $M-H$ 曲线。这里 $M$ 表示磁化强度。这样,对于同一实验者来说,掀动开关所需时间可近似为常数,因而每一 $(M, H)$ 点的 $\alpha = dH/dt$ 不同,所得的 $M-H$ 曲线实际上对应于不同的磁场速率 $\alpha$ ,  $H$ 越大,  $\alpha$ 越高。对于这类 $M-H$ 曲线,目前仍然只有低场近似的瑞利关系和高场近似的表达式<sup>[4]</sup>。在用直流磁性测量仪测量磁性能参数时,激励电流连续变化<sup>[2]</sup>,它对应于较小的磁场速率;而在动态测量中, $M-H$ 曲线与频率的关系实际上和磁化场的变化率有关,在高频场合下相应于较大的磁场速率。从这个意义上说,实际使用的磁性材料,在使用中的磁场速率也可能不同。因此,应该研究 $\alpha$ 对 $dM/dH-H$ 曲线的影响。

在技术磁化方面,人们习惯于将磁化过程和磁畴壁的运动联系起来,并以畴壁为研究对象,用牛顿运动方程来描述<sup>[5-8]</sup>,以单位质量来表示时,方程的形式是

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + p^2x = f(t) \quad (1)$$

它表示在外场力 $f(t)$ 的作用下,处于势能谷中的畴壁能够离开其平衡位置的位移 $x$ 以及

本文1988年5月20日收到

●国家自然科学基金资助项目

瞬时速度、加速度的关系,  $2n$ 是阻尼系数, 单位为  $1/s$ ;  $p^2$ 是回复力系数, 单位是  $1/s^2$ 。影响  $2n$  及  $p^2$  的因素很多, 例如材料中的缺陷及其分布、夹杂、成份等<sup>[4]</sup>。以往文献中的习惯处理方法是: 忽略加速度项 $x$ 把  $2n$  与  $p^2$  都看作常数, 从而得到畴壁运动速度正比于  $M_s/2n \cdot (H-H_0)$  的关系,  $H_0$  是一个平均阻力场, 外场  $H > H_0$  时畴壁才能运动。这一关系在传统的框架试样中, 由直接的观测得到验证<sup>[3,6]</sup>。显然, 对于可辨认的畴壁(金相显微镜或电子显微镜下), 这一关系简单, 但也存在不同的  $H$  相应于由不同的  $dH/dt$  达到的问题。目前使用的许多材料, 还不是象磁泡或磁光材料那种畴壁易辨认的薄片, 也不是象做框架试验的硅钢或坡莫薄片(特殊变压器等除外)。我们选用线(片)状和棒状多晶退火试样, 采用匀速率加场的方法, 考虑到当加场速率较慢时畴壁能在较高的磁场(例如2奥斯特)下仍近似平直运动, 因而关系式<sup>[3]</sup>

$$x = (M/M_s)l \quad (2)$$

成立, 其中  $l$  是畴壁间距。因此可由实验测定的  $M-H$  关系, 得到  $x-H$  关系(因  $H = at$ , 即  $x-t$  关系)。根据内耗实验对  $2n$  和  $p^2$  的数量级估计<sup>[6]</sup>, 将  $f(t)$  表示为有效驱动力形式  $C_0 M_s (H - H_R)$ , 数值常数  $C_0$  包含了畴壁类型及取向平均值系数<sup>[5]</sup>,  $H_R$  是等效阻力磁场; 利用(1)式, 便可得到  $H_R$  与外场、材料性质的函数关系。在低的磁场速率下,  $H_R$  明显地与  $dH/dt$  有关,  $\alpha$  愈大,  $H_R$  愈大。同时, 由(1)式还可得到反映畴壁平均动性的速度和加速度的等效磁场与  $dH/dt$ 、材料性质及形状的关系。

## 2 试样和实验方法

所用的试样有: (1)含镍99%的工业用镍线, 直径2.82mm; (2)含硅4%(余铁)的硅钢片, 截面尺寸为  $0.48 \times 7.71 \text{mm}^2$ ; (3)含镍42%(余铁)的坡莫线, 直径2.02mm。以上试样的长度均大于160mm。(4)含碳量小于0.05% 直径为6.76mm的电工铁棒; (5)直径7.94mm的15号优质碳素钢; (6)直径7.37mm的45号优质碳素钢。以上棒状试样的长度均大于190mm。所有试样的最终热处理是  $860^\circ\text{C}$  2小时真空退火两次。

实验主体装置如图1所示。恒流电源①产生的直流电, 在调速装置②控制下, 通过密绕水冷螺线管③, 在线圈③的轴线方向产生匀速率  $\alpha = dH/dt$  增加的均匀磁场  $H = at$ 。磁场与电流的关系经过实验标定,  $H$  (奥斯特) =  $32.24I$  (安培), 在本实验数值范围内遵从严格的线性关系。经过50Hz交流缓慢退磁后的试样④在匀速率增加的直流磁场中被逐渐磁化, 绕在试样上的探测线圈⑤将所检测到的信号输入放大器⑥, 放大器是由AD524AD仪用芯片组成的, 它具有低漂高转换 ( $5 \text{V}/\mu\text{V}$ ) 直流瞬态响应及共模抑制能力、温度特性均良好的特点。经放大后的信号输入记录仪的Y轴。磁场瞬时值信号通过电阻  $R$  取得并输入记录仪的X轴。所得

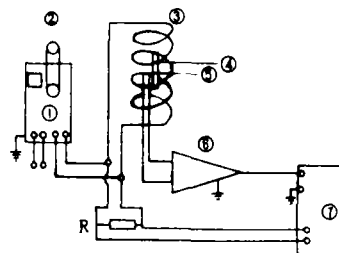


图1 试验装置: ①恒流源, ②调速机构, ③螺线管, ④试样, ⑤探测线圈, ⑥放大器, ⑦记录仪

Fig.1 Schematic of measurement equipment

曲线上的每一点对应着某一瞬时的感应电动势  $\epsilon$  与该时刻磁场  $H$  的关系。

测试前后对放大器放大倍数进行标定,放大倍数由10—4000可调。每条曲线获得前后都作了无试样时系统的  $H-t$  曲线、放大器漂移曲线测量,结果表明,不必对此作出修正。时间测量采用最小分度值为0.01s的秒表。

### 3 试验结果

根据法拉第电磁感应定律,感应电动势的大小为  $NS dB/dt$ ,  $NS$  是磁通链数。对于铁磁材料,不区分  $M$  与磁感应强度  $B$ 。因此有

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dB}{dt} = C \cdot \epsilon / (ANS) \tag{3}$$

其中  $C$  是单位制转换系数,  $A$  是放大倍数。本文采用CGS制。由于  $H = at$ ,  $dM/dH = (1/a) dM/dt$ , 因此,给定  $a$  后,同一试样的  $(ANSa)$  的值恒定,记录曲线上  $\epsilon-H$  关系即  $dM/dH$  随  $H$  变化规律。图2、3分别给出4%硅钢片和纯铁棒的  $\epsilon-H$  原始记录曲线,对照漂移及标定曲线(均系光滑线),曲线上的波动应是试样引起的,可能与Barkhausen效应有关。在43mOe/s(毫奥/秒)至75mOe/s速率范围内,其它线状试样的  $\epsilon-H$  曲线都具有图2的形状,在15—75mOe/s区间,其它棒状试样的  $\epsilon-H$  曲线都与图3的形状相同。

相同材料的  $\epsilon-H$  曲线的特点是:随着  $a$  增大,曲线升高。线(片)状试样的峰值在  $H$  小于1 Oe处,棒状试样有一个  $\epsilon$  几乎不随  $H$  增大而变化的水平阶段,相应磁场区间为3—6 Oe,过了水平段,  $\epsilon$  才随  $H$  增大而稍下降。

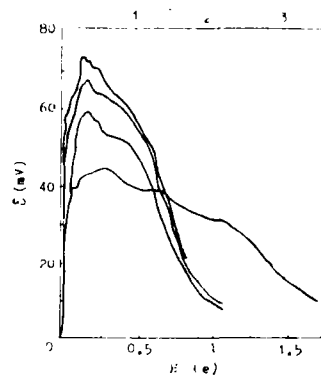


图2 硅钢片  $\epsilon-H$  记录曲线。上方三条曲线按上方横座标。由下至上的  $dH/dt$  依次是: 43, 62, 72, 75 mOe/s

Fig.2 Recorded curves of silicon steel

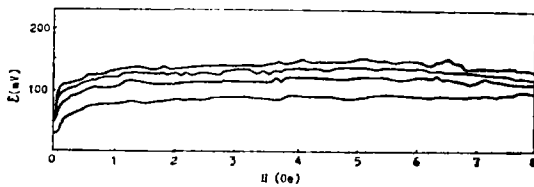


图3 铁棒的  $\epsilon-H$  记录曲线。  $H > 8$  Oe 的  $\epsilon-H$  曲线下降部分没有画出。由下至上的  $dH/dt$  依次是: 43, 62, 72, 75 mOe/s

Fig.3 Recorded curves of iron bar

在  $a$  为4—9 Oe/s 磁场速率区间,  $H-t$  仍为直线,此时的  $\epsilon-H$  曲线为过原点的上凸光滑曲线。

根据曲线形状,图2类型的曲线可用

$$\frac{dM}{dt} = A_0 + A_1 H^{11} \exp(-C_1 H^2) \tag{4}$$

来拟合,除了  $H$  大于  $\epsilon-H$  曲线下降部分的  $H$  值以外的磁场区间,(4)式几乎与实验

曲线重合。图3类型曲线的上升和水平阶段可以用

$$\frac{dM}{dt} = A_{02} + A_2 \exp(-C_2/H) \quad (5)$$

来拟合,拟合曲线与实验点几乎全部重合。拟合参数 $A_{01}$ ,  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ 和 $A_{02}$ ,  $A_2$ ,  $C_2$ 见表1和表2。

$A_{01}/\alpha$ 和 $A_{02}/\alpha$ 分别表示线(片)状试样和棒状试样的起始微分磁化率。

(2)式的 $M$ 与(3)式的 $M$ 差一体积常数,不作区分,由(2)式和(4)式以及由(2)式和(5)式可得畴壁运动平均速度表达式。对线(片)状试样,  $B_1/C_1$ 表示畴壁平均速度最大时的磁场值,也即最大微分磁化率 $(\frac{dM}{dH})_{max} = M_0$ 下的磁场值,由(4)式,  $H = B_1/C_1$ 时,最大微分磁化率为  $M_0 = [A_{01} + A_1(B_1/C_1)^{B_1} \exp(-B_1)]/\alpha$ 。由表1可见,  $M_0$ 随 $\alpha$ 增加而减少,呈反变关系。对棒状试样,当 $H = C_2$ 时,微分磁化率上升到 $(A_{02} + A_2/e)/\alpha$ 。如取 $M_s = 10^4 \text{Gs}$ ,  $l = 10^{-3} \text{cm}$ ,线(片)状试样的畴壁最大平均速度是  $\dot{x} = \frac{l}{M_s} M_0 \alpha$ ,为 $10^{-3} \text{cm/s}$ 量级,棒状试样当 $H = C_2$ 时的畴壁平均速度为 $(l/M_s)(A_{02} + A_2/e)$ ,由表2,在 $10^{-4} \text{cm/s}$ 量级范围。可见低的磁场速率加场时畴壁平均速度比框架薄片试样的低<sup>[3,6]</sup>,棒状比线状的更低。

表1 线状试样拟合参数\*

Tab.1 The linear regression parameters of wire specimen

$\dot{H} \times 10^{-3} \frac{\text{Oe}}{\text{s}}$	43			62			67			72			75			$4-9 \times 10^3$		
	SF	NI	PM	SF	NI	PM	SF	NI	PM	SF	NI	PM	SF	NI	PM	SF	NI	PM
$A_{01} \times 10^3$	0.56	0.49		1.0	1.3	0.77	0.88	1.3	0.57	0.75	1.3	0.76	0.73	1.5	0.64	1.4	0.04	0.40
$A_1 \times 10^4$	3.7	1.1		3.2	0.96	2.1	3.7	0.81	2.2	3.4	0.96	2.3	4.0	1.2	2.8	7.3	5.5	2.0
$B_1$	0.46	0.32		0.55	0.13	0.27	0.50	0.09	0.28	0.45	0.14	0.31	0.50	0.48	0.39	1.0	0.98	0.56
$C_1$ 1/Oe	1.6	1.4		1.5	0.57	1.2	1.7	0.39	1.3	1.6	0.59	1.2	1.8	0.81	1.4	1.8	1.6	0.74
$\frac{B_1}{C_1}$ Oe	0.29	0.23		0.37	0.23	0.22	0.29	0.23	0.22	0.28	0.24	0.26	0.28	0.59	0.29	0.56	0.61	0.76
$M_0 \times 10^5$	3.2	1.3		1.9	1.3	1.9	1.9	1.2	1.7	1.8	1.1	1.6	1.8	1.0	1.6	0.03	0.03	0.01

\*  $A_{01}$ 、 $A_1$ 、 $M_0$ 的单位分别是Gs/s、Gs/Oe<sup>1/2</sup>S、Gs/Oe。表中SF表示硅钢片,PM表示坡莫线

表2 棒状试样拟合参数<sup>+</sup>

Tab.2 The linear regression parameters of bar specimen

$\dot{H} \times 10^{-3} \frac{\text{Oe}}{\text{s}}$	15			43			62			67			72			75		
	Fe	15*	45*	Fe	15*	45*	Fe	15*	45*	Fe	15*	45*	Fe	15*	45*	Fe	15*	45*
$A_{02} \times 10^3$	0.77	0.87	0.36	0.67	0.84	0.38	0.69	0.71	0.45	0.86	0.79	0.49	0.90	0.75	0.48	1.0	0.65	0.45
$A_2 \times 10^4$	1.4	0.46	0.38	1.6	0.46	0.35	2.1	0.61	0.31	1.3	0.57	0.29	1.4	0.66	0.32	1.2	0.69	0.34
$C_2$ Oe	0.13	0.18	0.25	0.08	0.16	0.14	0.16	0.16	0.20	0.17	0.13	0.31	0.18	0.18	0.26	0.19	0.15	0.15

<sup>+</sup>  $A_{02}$ 、 $A_2$ 的单位为Gs/S。 \*钢号

## 4 等效阻力磁场

将(2)式代入(1)式便有

$$\dot{M} + 2n\dot{M} + p^2M = (M_s/l)f(t) \quad (6)$$

如前面所述,  $f(t)$  应是畴壁运动有效驱动力. 设阻力为  $CoMsH_R$ , 则  $f(t)$  为  $CoMs(H - H_R)$ , 其中  $H = \alpha t$ , 一般地,  $H_R$  也是  $t$  的函数, 也即是  $H$  的函数. 采用通常解微分方程的办法, 即便  $2n$  及  $p^2$  确认为常数, 求解(6)式也是困难的. 为此, 用实验拟合的关系式(4)和(5), 通过微分求得  $d^2M/dH^2 = \frac{1}{\alpha^2} \cdot \dot{M}$ , 由积分求得  $M$ , 代入(6)式的等效方程

$$\frac{d^2M}{dH^2} + \frac{2n}{\alpha} \frac{dM}{dH} + \frac{p^2}{\alpha^2} M = C_0 M_s^2 (H - H_R) / l \cdot \alpha^2 \quad (7)$$

将  $H_R$  的函数形式确定.

由(4)式, 在  $t=0$  (即  $H=0$ ) 时  $M=0$  (退磁良好) 和  $B_1$  较小的条件下,  $M$  可近似表示为

$$M = [A_{01}H + FA_1H^{B_1}/C_1 \cdot (B_1 + 1)] / \alpha \quad (8)$$

其中  $F = (B_1 + 1)[1 - \exp(-C_1H)] - B_1C_1H + (B_1 + 1)B_1(C_1H)^2 / (B_1 + 2) \cdot 2$

对(4)式微分后, 将(8)式代入(7)式便有

$$H_n + H_p = H - H_R \quad (9)$$

其中

$$H_n = \left\{ A_1 H^{B_1} \exp(-C_1H) \left[ \frac{B_1}{H} - C_1 + \frac{2n}{\alpha} A_{01} \exp(C_1H) + \frac{2n}{\alpha} \right] \right\} \cdot \frac{l\alpha}{C_0 M_s^2} \quad (9.1)$$

$$H_p = \left[ \frac{A_1 H^{B_1}}{C_1 (B_1 + 1)} \cdot F + A_{01} H \right] \cdot \frac{p^2 l}{C_0 M_s^2 \alpha} \quad (9.2)$$

根据内耗实验对  $2n$  和  $p^2$  的数量级估计<sup>[5]</sup>, 取  $2n = 5 \times 10^{-3}/s$ ,  $p^2 = 8 \times 10^5/s^2$ , 由表1各参数的量级和本实验中  $\alpha$  的范围可得,  $H_p \gg H_n$ , 因此(9)式可近似表示为

$$H_R = H \left\{ 1 - \frac{p^2 l}{C_0 M_s^2 \alpha} \left[ \frac{A_1 H^{B_1}}{C_1 (B_1 + 1)} \cdot F + A_{01} H \right] \right\} \quad (10)$$

图4是取  $C_0$  为1时  $H_R-H$  关系曲线, 图5的上部给出了  $\ln H_n$  与  $\ln H$  的关系.

由图4可见, 等效阻力磁场与外磁场基本上呈线性关系(在0.2—1.8Oe范围), 随  $\alpha$  增大,  $H_R$  增大; 同一磁场速率下, 例如75mOe/s下, 硅钢片的  $H_R$  最小, Ni的  $H_R$  最大. 如果将  $\alpha = 4 - 9$  Oe/S的数据按(10)式处理,  $H_R-H$  关系曲线在2位有效数字下除个别点外几乎与图4的  $H_R = H$  线重合, 这表明在0.2—1.8Oe磁场范围内, 有效驱动力  $(H - H_R)$  几乎为0, 畴壁所受合外力几乎为0, 因此维持原来的运动状态. 比较(10)式与图4说明, 影响畴壁运动的起始阻力因素很多, 包括材料性质 ( $A_1, B_1, C_1$  以及  $p^2, l, M_s$ , 后三个量在此取作常数. 实际上不同材料应有所不同), 外场  $H$  以及加场速率  $\alpha$ . 但在体试样中由于畴壁间的相互作用和制约, 在平均处理下, 仍有图4的简单关系.

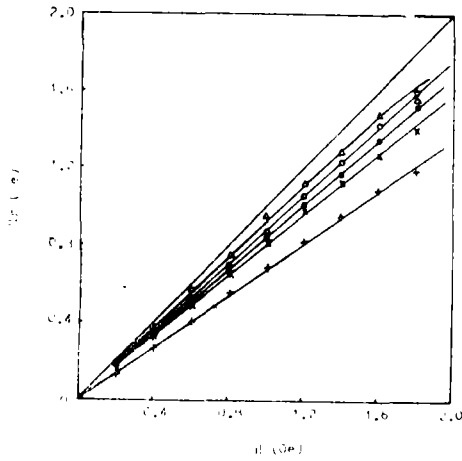


图4 线(片)状试样的 $H_R-H$ 关系。由下至上: 硅钢片43(+ )和75( $\times$ ), 坡莫62-75( $\cdot$ ), 镍43(o)和75( $\Delta$ )mOe/s

Fig.4 The relation between  $H_R$  and  $H$  of wire specimens

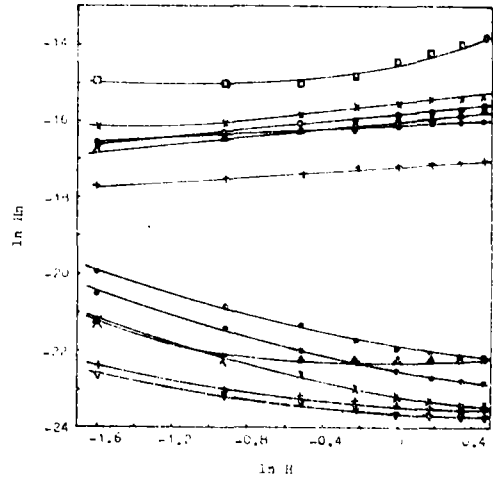


图5  $\ln H_n - \ln H$ 关系, 上部是线状试样, 下部是棒状试样。由下至上: 45号钢15( $\nabla$ ), 15号钢15(+), 45号钢75( $\times$ ), 15号钢75( $\cdot$ ), 铁15( $\Delta$ )和铁75(o)mOe/s。上部由下至上: 镍43(+), 坡莫62-75( $\cdot$ ), 镍75( $\Delta$ ), 硅钢43(o), 硅钢75( $\times$ ), 硅钢5700( $\square$ )Ome/s

Fig.5 The relation between  $\ln H_n$  and  $\ln H$ . The low part corresponds to the bar specimen and the above part corresponds to the wire specimen

由(5)式, 在 $t=0, M=0$ 条件下可得

$$M = [A_{02}H + A_2H \exp(-C_2/H) + A_2C_2E_1(-C_2/H)]/\alpha \tag{11}$$

其中 $E_1(-C_2/H)$ 是指数积分。与得到(10)式的处理方法相同, 分别有:

$$H_n = \left[ \frac{C_2}{H_2} + \frac{2n}{\alpha} \cdot \frac{A_{02}}{A_2} \cdot \exp(C_2/H) + \frac{2n}{\alpha} \right] \cdot A_2 \exp(-C_2/H) \cdot \frac{l\alpha}{C_0 M_s^2}$$

$$H_p = \left[ \frac{A_{02}H}{A_2} \exp(C_2/H) + H + C_2 E_1(-C_2/H) \exp(C_2/H) \right] A_2 \exp(-C_2/H) \cdot \frac{p^2 l}{C_0 M_s^2}$$

$$H_n + H_p = H - H_R \tag{12}$$

$$H_R = H \left\{ 1 - \frac{p^2 l}{C_0 M_s^2 \alpha} \left[ A_{02} + A_2 \exp(-C_2/H) + \frac{A_2 C_2}{H} E_1(-C_2/H) \right] \right\} \tag{13}$$

这里取 $2n=0.01$ , 其余 $p^2, l, M_s$ 与前述相同, 同样有 $H_p \gg H_n$ 。图5下部给出了 $\ln H_n - \ln H$ 关系, 图6给出了按(13)式计算的 $H_R - H$ 关系。

图6表示的关系与图4的相似, 说明了碳含量的增加, 同一磁场速率下的 $H_R$ 增大。

图5所示的 $H_n$ 虽然很小,即由畴壁运动的速度及加速度项引起的等效磁场很小( $10^{-9} - 10^{-11}$ Oe量级。若将4-9Oe/s速率下的数据计算也只有 $10^{-7}$ Oe量级),但从速度加速度的意义上看, $H_n$ 反映了畴壁的平均动性,从有效驱动力 $=H_n + H_p$ 上看, $H_n$ 反映了等效动态阻力场与材料参量及外场条件的关系。由图5可见,线(片)状的 $H_n$ 比棒状的大,即由于约束小,平均动性大。随 $H$ 增加,线(片)状的 $H_n$ 增加,棒状的 $H_n$ 减小,随 $\alpha$ 增加,所有试样的 $H_n$ 都增加。因此,对薄膜试片或在高频条件下使用的材料,应该考虑 $H_n$ 项。

由 $H - H_R = H_p + H_n$ 可见,只有当 $H > H_R$ 时, $(H_p + H_n)$ 才有正值,因此, $H_R$ 是起始等效阻力磁场,在低的磁场速率下, $H$ 总能大于 $H_R$ (图4,6),在高的磁场速率下则不一定能满足。 $H_p$ 来自回复力项,即当 $H - H_R > 0$ 时畴壁离开平衡位置(最低能谷)爬势能坡受到的等效回复磁场<sup>[3]</sup>,从力学上说属于弹性范畴,并且只要爬势能坡一开始,就有 $H_n \neq 0$ (虽然很小), $H_n$ 是动态阻尼范畴。因此,我们将 $H_R$ 看作静态阻力场, $H_n$ 看作动态阻力场,阻力函数应是 $H_R + H_n$ 。

## 5 结论

在磁场速率不大于75mOe/s的外场速率范围内,线状镍、坡莫、片状硅钢的微分磁化率具有 $dM/dH = [A_{01} + A_1 H^p \exp(-C_1 H)]/\alpha$ 的形式;棒状铁,15号及45号钢的微分磁化率具有 $dM/dH = [A_{02} + A_2 \exp(-C_2/H)]/\alpha$ 的形式, $H$ 是磁场, $\alpha$ 是磁场速率,其它符号是参数。根据畴壁运动方程,得到阻力场函数为 $H_R + H_n$ , $H_R$ 是起始等效阻力磁场, $H_n$ 是等效动态阻力场,它们与材料性质和外场条件相关。随着磁场速率增大,起始微分磁化率减小,阻力场增大。

本文在实验设计中得到黄燧基先生的指导,钟森设计了放大器并与刘大卫参加了部分测试。

## 参 考 文 献

- [1] R.M.Bozorth, *Ferromagnetism*, 上海交通书店, 1953
- [2] 孙玉魁等, 金属软磁材料及其应用, 冶金工业出版社, 1986
- [3] B.D.Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison—Wesley, 1972

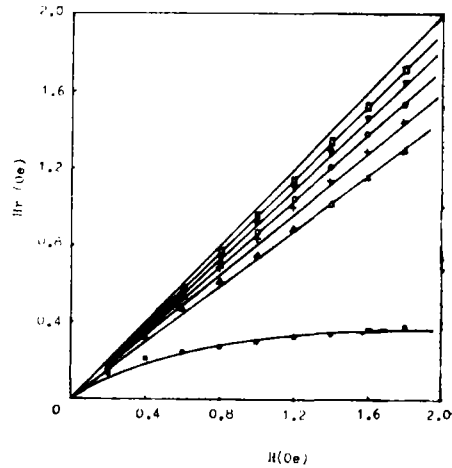


图6 棒状试样 $H_R-H$ 关系。由下至上:铁15( $\bullet$ ), 15号钢15( $\Delta$ ), 45号钢15( $+$ ), 铁75( $\circ$ ), 15号钢75( $\nabla$ )和45号钢75( $\square$ )mOe/s

Fig.6 The relation between  $H_R$  and  $H$  of iron and steel bar

- [4] 北京大学物理系, 铁磁学, 科学出版社, 1976  
[5] 曾文光等, 物理学报, 36(1987), 1, 37  
[6] T.H.O'Dell, *Ferromagnetodynamics*, New York, Wiley, 1981

## A Study of Resistance Function of Magnetic Domain Wall in the Cubic Ferromagnetic Material

Zeng Wenguang\*      Zhang Jinxiu

### Abstract

While the applied magnetic field  $H$  being increased at constant rate  $\alpha$  ( $H = \alpha t$ ), the curves of differential permeability  $dM/dH$  VS  $H$  were determined for the following annealed cubic ferromagnetic material: nickel and permalloy 42 wires, 4% silicon steel sheet, pure iron bar and some carbon steel bars. The experimental results show that the curves of  $dM/dH-H$  are raised with an increasing of  $\alpha$  for the same specimen. These curves can be represented as a function of  $\alpha$ ,  $H$  and some constants which have physical meanings such as the initial permeability. On the basis of the domain wall theory and the relationship of  $dM/dH-H$ , the expression of resistance function of magnetic domain wall has been obtained.

**Keywords** differential permeability, rate of applied magnetic field, domain wall, resistance function

\* Department of Physics