

坡莫合金纳米粉的恒导磁性及其 磁导率的压力、频率特性

苏 昉^{1,2} 谢 斌¹ 陈允鸿³

(1. 中国科学院结构分析开放实验室, 合肥 230026)

(2. 中国科学技术大学基础物理中心, 合肥 230026)

(3. 扬州大学师范学院物理系, 扬州 225002)

摘要 用蒸发冷凝法制备了 Fe-50wt%Ni 和 Fe-84wt%Ni 坡莫合金的纳米微粉。经透射电镜 X 光能谱微区成分分析证实: 微粉的成分与原材料的一致; 微粉的平均粒径分别为 16nm (Fe-50Ni) 和 19nm (Fe-84Ni)。在室温和 36 个不同的流体静压力 (0.0001~2.205GPa) 下原位测量了它们的磁化和起始磁化曲线。结果表明: 1) Fe-50wt%Ni 和 Fe-84wt%Ni 合金纳米微粉均具有恒导磁特性; 2) 这两种纳米粉的起始磁导率随静水压的变化分别为 $\mu = 8.16 + 18.2p - 24.7p^2 + 18.1p^3 - 6.55p^4 + 0.908p^5$ (Fe-50Ni 合金) 和 $\mu = 5.38 - 0.169p + 0.232p^2 - 0.0786p^3$ (Fe-84Ni 合金); 3) 纳米粉的起始磁导率 μ 在频率高于 10MHz 才降低, 而 Fe-50Ni 合金片的 μ 在频率高于 1MHz, Fe-84Ni 高于 100kHz 时就开始下降, 故纳米压粉磁芯可应用的频率范围可以比相应组分合金片的大 1~2 个数量级。

关键词 镍铁合金 超微粉 磁导率 流体静压力 频率特性

中图法分类号 O521.1 TM276

1 引言

粉末磁芯的磁导率 μ 虽然降低到大块原材料的 1/10 左右, 但瑞利 (Rayleigh) 常数 η 、涡流损耗系数 l 、剩余损耗系数 c 、磁滞损耗系数 a 等都显著降低, 适用于高频^[1]。近年来由于电子器械小型化和轻量化, 要求磁芯在更高频率下具有优良的动态磁性, 新一代的非晶和超微晶压粉磁芯应运而生。例如用表面附有绝缘薄膜的 $Fe_{78}Cr_2P_{14}C_6$, 添加耐热粘结剂的 $(Fe_{1-x}Co_x)_{1-y-z}M_zSi_yB_z$ ($M = Cu, Mo, Nb, \dots$), 表面有耐热有机绝缘涂层的 $Fe_{79}Si_9B_{12}$ 等非晶合金粉压成的磁芯^[2]。目前超微晶压粉磁芯的性能已优于非晶压粉磁芯, 因而受到很大关注。例如: ①以镓为超微晶化元素的 Fe-Ga-Si-B 系合金压粉磁芯; ②以铜为超微晶化元素的 Fe-Cu-P-C 系合金压粉磁芯; ③有高耐蚀性、低 λ_s 的超微晶 (Fe-Ni)-Cu-Si-B-Cr-M'-M'' ($M' = V, Mn, M'' = Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Mo, W$) 系合金的压粉磁芯等^[2]。

本文先用原位测量压力对 Fe-50wt%Ni、Fe-84wt%Ni 坡莫合金和 Fe-30wt%Ni 因瓦合金片磁性的影响。再用蒸发冷凝法分别制备出它们的纳米微粉 (由于微粒表面有氧化物薄膜^[3], 故不需涂绝缘涂层)。然后在室温和 0.0001~2.205GPa 不同静水压下原位测量这

些纳米微粉的磁化曲线,并与相应合金片的磁化曲线比较,研究它们的恒导磁及起始磁导率的压力、频率特性,为合金纳米微粉的压粉磁芯的研制和应用,提供一些科学依据。

2 实验方法

2.1 铁镍合金纳米粉的制备

系统经抽真空后,充入不同压力的氮气。用钨丝蒸发铁镍合金片,冷凝成超细微粉。为避免分馏,我们采用快速蒸发,使超细微粉的成分与合金的相同。通过 X 射线能谱微区成分分析,证实微粒与相应原合金的成分一致。

用固定加热源的功率及其至收集器距离的方法控制微粉的粒径分布。由于微粒的平均尺寸随氮气压的增加而增大,在 5×10^1 、 5×10^2 和 3×10^3 Pa 氮气压下分别得到较细、中等和较粗的铁镍合金超微粉,分别称为 5T、5H 和 3K 纳米微粉。微粉各自装进 $\phi 3.0$ mm 软塑管中,管两端用环氧树脂固化密封,制成待测样品。

2.2 流体静压力的产生和测量

采用 4MN(400tf)四柱双缸液压机,由同步箍紧式活塞圆筒型高压装置产生静水压。装置剖面图详见文献[4]。液体传压介质为石油醚。压力腔内装有锰铜丝压力计。用高纯铂丝在 2.55 GPa 发生相变来校正锰铜丝的电压力系数。用 QJ-36 型两用电桥(0.02 级)和 LZ3-204 型函数记录仪测量压力,测压的相对误差 $\Delta p/p < \pm 1.2\%$ 。

2.3 磁化曲线的测量

采用交流感应法测量磁化曲线。高压腔内的结构及测量电路图详见文献[5]。4# 初级线圈是内径 $\phi 6$ mm 的 13 层密绕螺线管。它与标准电阻 R 及 XFD-7A 型电子管低频信号发生器串联。选用 400 Hz 正弦波测量。用 7150 型数字电压表测量 R 两端电压 V ,然后算出初级线圈内的磁场强度 $H = \sqrt{2} CV/R$ 。其中线圈的磁场常数 $C = 427 \times (1000/4\pi)/m (\times 1000, \times 10 \text{ 挡})$ 和 $434 \times (1000/4\pi)/m (\times 100 \text{ 挡})$ 。

样品上绕有 50 匝次级探测线圈 N_2 。它与截面积相同的反绕补偿线圈(50 匝)相接,以抵消探测线圈空隙中的磁通量。用 LDJ-710 型数字积分仪,在同一“门时间”下测量次级感应电压的积分计数值, $A = k\Phi_2$, 积分仪常数 k 的标定方法见文献[5]。样品中磁感应强度 $B = A/2kN_2S_2$ 。样品的有效截面积 $S_2 = m(\text{质量})/\rho(\text{密度}) \cdot l(\text{样品长度})$,其中 $\rho = 8.25 \text{ g/cm}^3$ (Fe-50Ni) 和 8.62 g/cm^3 (Fe-84Ni)^[6]。

计算 B 时,压力对微粉样品 ρ 和 l 有影响,即引起 S_2 变化,修正如下。设在室温和常压下的磁感应强度 $B_0 = A_0/2kN_2S_{20}$,在室温和高压下的磁感应强度 $B = A/2kN_2S_2$,则 $B/B_0 = (A/A_0)[1/(1-\epsilon)^2]$,即加压前后 B 的相对变化由两部分相乘。前者由实验得知, $A/A_0 = 1.13$ (Fe-84Ni) ~ 1.90 (Fe-50Ni)。而后者估算如下:因为受静水压 p 各向同性,其三向平均压应力^[7] $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 = p$,体积应变 $\theta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \doteq 3\epsilon$,体积弹性模量 $K \equiv \sigma/\theta \doteq 164 \text{ GPa}$ (钢),故 $\epsilon = 2.4 \text{ GPa}/(3 \times 164 \text{ GPa}) = 4.88 \times 10^{-3}$, $1/(1-\epsilon)^2 = 1.01$,即样品尺寸因子的变化不过 1%,远小于 (A/A_0) ,因此可以忽略不计。

2.4 最大磁导率 μ_{\max} 的测量

μ_{\max} 通常在 $H = (0 \sim 13)(1000/4\pi) \text{ A/m}$ 范围内出现,较难测准。我们利用积分仪较灵敏的 $\times 100$ 测量挡,并改进信号发生器输出电压的衰减率,从而增加 H 的测量数目,能直

接测得准确的 μ_{\max} 。

2.5 起始微分磁导率 μ_i 的测量

μ_i 通常需测磁化曲线的最起始部分 ($H = (0 \sim 1.5)(1000/4\pi) \text{ A/m}$)。我们利用积分仪最灵敏的 $\times 1000$ 测量挡 (最大 0.01 V , 门限 0.025 mV), 并增加 H 的测量数目, 可准确测得线性的起始磁化曲线, 并由其斜率得出 $\mu_i = \Delta B(\text{T}) / \mu_0 \Delta H(\text{A/m})$ 。

2.6 高频特性的测量

由于频率高于 50 kHz 时 LDJ-710 积分仪的线性标定曲线变坏, 故改用 QBG-3 型高频 Q 表测量更高频率范围的起始磁导率。

3 结果与讨论

3.1 铁镍合金片室温常压下的交流磁性

为了与纳米微粉对比, 我们先测定室温 (23°C) 和常压下两种坡莫合金 (Fe-50Ni、Fe-84Ni) 以及 Fe-30Ni 因瓦合金片的磁化经过, 结果见图 1。

图 1(a) 是 Fe-50Ni 合金片的磁化曲线。磁场 $H = 132 \times (1000/4\pi) \text{ A/m}$ 时的磁感应强度 $B_s = 1.420 \text{ T}$ 。(b) 是 Fe-84Ni 合金片的磁化曲线。 $H = 132 \times (1000/4\pi) \text{ A/m}$ 时的 $B_s = 0.538 \text{ T}$ 。这两种坡莫合金片的磁化曲线在 $H = 132 \times (1000/4\pi) \text{ A/m}$ 时均达到接近饱和的程度, 其 B_s 值与文献 [1] 的一致。但由于 Fe-30Ni 属于因瓦型合金, 故其 $B_s = 0.168 \text{ T}$, 饱和磁化强度偏离 Slater-Pauling 曲线 [1] 较远。

根据相对磁导率定义: $\mu_r = B / \mu_0 H$ (μ_0 是真空磁导率), 我们求出这三种合金片在室温和常压下磁导率 μ_r 随磁场在 $(0 \sim 20)(1000/4\pi) \text{ A/m}$ 内变化的曲线。结果示于图 2。

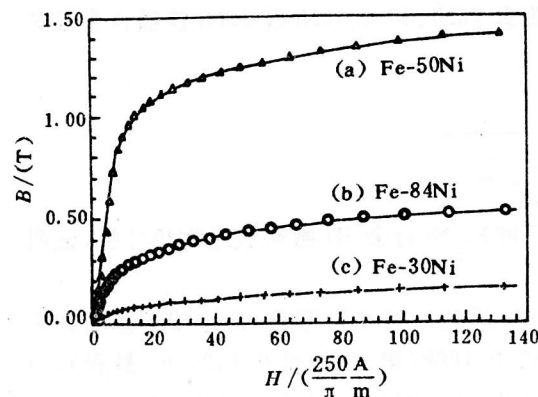


图 1 三种 Fe-Ni 合金片在室温常压下的磁化曲线

Fig. 1 Magnetization curves of three kinds of nickel-ferro alloys at 23°C and 1 atm

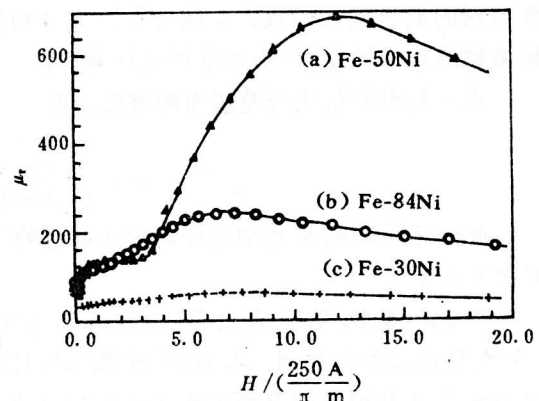


图 2 三种 Fe-Ni 合金片在室温常压下的磁导率随磁场变化的曲线

Fig. 2 Magnetic permeability curve of three kinds of nickel-ferro alloys at 23°C and 1 atm

图 2(a) 是 Fe-50Ni 合金片磁导率随磁场变化的曲线。它的最大磁导率 $\mu_m = 690$, (b) 是 Fe-84Ni 合金片的 $\mu_r(H)$ 曲线, 其 $\mu_m = 242$, (c) 是 Fe-30Ni 合金片的 $\mu_r(H)$ 曲线, 其 $\mu_m = 62$ 。

另外,我们利用积分仪最灵敏的一挡测量室温常压下这三种合金的起始磁化曲线,结果见图3。由图可见,这些曲线都具有很好的线性。

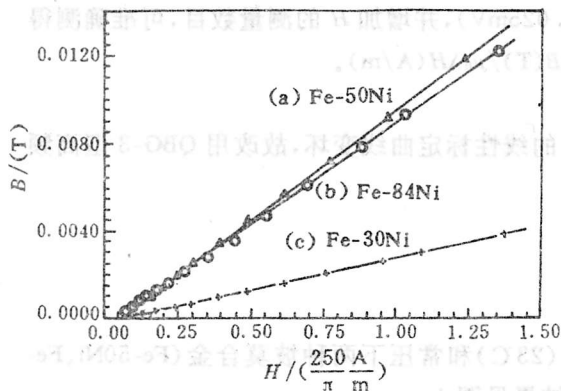


图3 三种 Fe-Ni 合金片在室温常压下的起始磁化曲线

Fig. 3 Initial magnetization curves of three kinds of nickel-ferro alloys at 23°C and 1 atm

铁镍合金片热处理后急冷至室温所得的磁导率比随炉冷却的要高得多,若经磁场热处理后 μ_m 和 μ_i 都会显著增高。本结果 Fe-84Ni 的 μ_i 比 Fe-50Ni 的略低,恰好符合文献[8]的随炉冷却规律,很可能是前者未经过磁场热处理所造成的。

3.2 铁镍合金片及纳米粉的成分和物相分析

为了测量 Fe-Ni 合金 5H 超微粒的大小,我们用透射电镜(TEM)观测其颗粒直径及均匀性,照片见图4。由此可见,它的最大粒径约为 80nm,最小的约 10nm,平均粒径约为 20nm。

同时还利用 TEM 中的 X 射线能谱对三种纳米微粉及原合金材料做微区成分分析,结果详见表1,其中 F_i 是最高峰强度所对应的 X 光光子总计数。它表明纳米微粉与原合金材料的成分基本一致。文献[9]、[10]分别测量 78Ni、30Ni、10Ni 及 88Ni 铁镍合金及其超微粒的化学成分,均未观察到成分偏析。

表1列出的正负误差值为均方根误差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

此外还用转靶 X 光衍射仪对加压前后的三种 Fe-Ni 合金 5H 微粉做过物相分析,证明其物相未变。

图5(a)是 Fe-84Ni 合金 5H 粉加压 2.205GPa 后的 X 光衍射图谱。五个峰的晶面间距 d 分别是:0.2053(最强),0.1773(次强),0.1253,0.1068(第三强)和 0.1024nm(最弱),与镍的面心立方相应的晶面间距 $d=0.2034, 0.1762, 0.1246, 0.1062$ 和 0.1017nm ($I/I_0=100, 42, 21, 20, 7$) 十分接近。但前者 d 值均稍大,可归因于约有 1/6 的 Fe 原子掺入 Ni 的面心立方晶格所致。根据谢乐方程式(峰值半高宽 $\beta=0.94\lambda/D\cos\theta$),算出该微粉平均粒径 $D=19\text{nm}$ 。

(b)是 Fe-50Ni 合金 5H 粉加压 2.205GPa 后的 X 光衍射图谱。五个峰的晶面间距分别为 $d=0.2070, 0.1794, 0.1268, 0.1080$ 和 0.1036nm ,恰好与 γ -(Fe, Ni) 合金相的吻合。根据谢乐方程式算出这种微粉的平均粒径为 16nm。

表 1 三种铁镍合金纳米微粉的 X 光能谱微区成分分析值

Table 1 Composition of super-fine grains of three kinds of nickel-ferro alloys in micro-zone analysis by X-ray energy spectrum

Composition of mother alloy (wt%)	Molar ratio of nickel (at%)	Measured value of super-fine grains			Average value	
		Total count N_s	Fe (at%)	Ni (at%)	Fe (at%)	Ni (at%)
Fe-30Ni	29.0	1541	69.923	30.077	70.15±0.27	29.85±0.27
		1528	70.375	29.625		
Fe-50Ni	48.76	1534	50.413	49.587	51.24±0.44	48.76±0.44
		1510	51.409	49.591		
Fe-84Ni	83.40	1518	51.898	48.110	18.29±0.32	81.71±0.32
		1570	17.932	82.068		
		1518	18.452	81.548		
		1550	18.021	81.979		
		1530	18.818	81.182		
		1609	18.248	81.752		

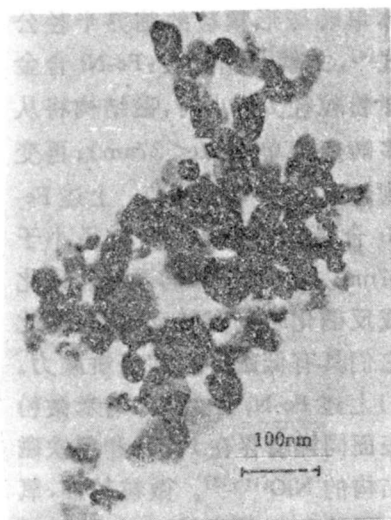


图 4 铁镍合金 5H 纳米微粉的 TEM 照片

Fig. 4 TEM photograph of super-fine grains 5H of nickel-ferro alloy

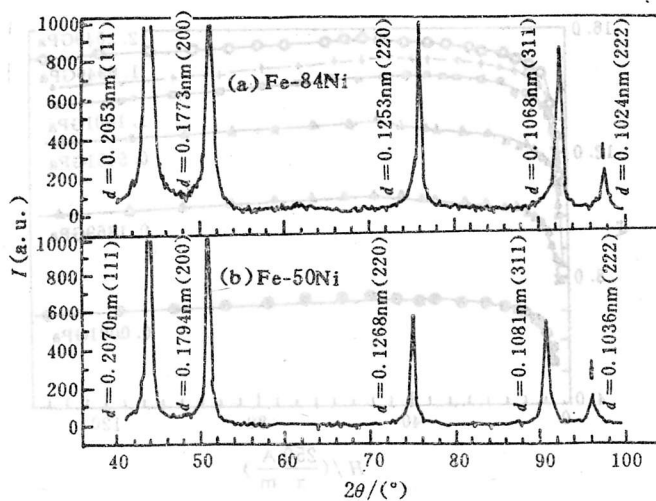


图 5 坡莫合金纳米微粉加压前后的 X 光衍射图

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of super-fine grains of Permalloy before and after being pressed

3.3 坡莫合金纳米粉的恒导磁特性

在室温和 0.0001~2.205GPa 不同静水压下分别测量 Fe-50Ni 和 Fe-84Ni 坡莫合金 5H 纳米粉的磁化曲线。这些曲线的形状相似,以图 6 为代表。

图 6 表明:在各种压力下纳米粉的磁化曲线和相应组分合金片的磁化曲线不同,当 H

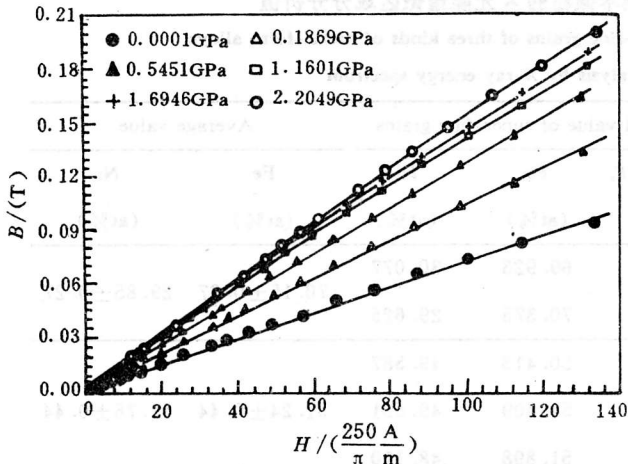


图6 Fe-50Ni合金5H纳米粉在室温和不同压力下的磁化曲线

Fig. 6 Magnetization curves of super-fine grains 5H of Fe-50Ni alloy under room temperature and different hydrostatic pressure

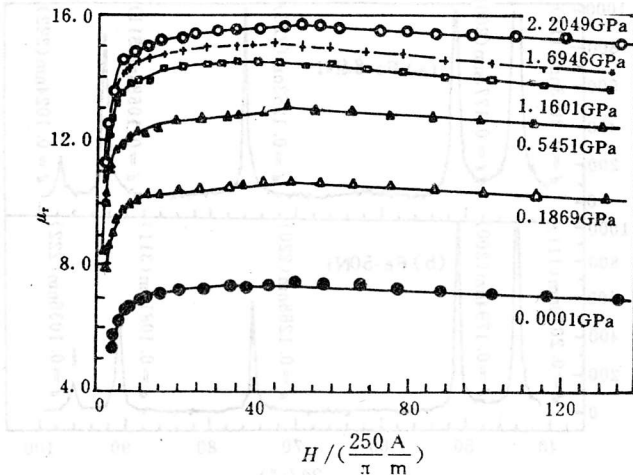


图7 Fe-50Ni合金5H纳米粉在室温和不同压力下的磁导率曲线

Fig. 7 Magnetic permeability curve of super-fine grains 5H of Fe-50Ni alloy under room temperature and different hydrostatic pressure

感应电压很小,若截去其低于0.25mV的部分将对积分值A影响较大,导致 μ_r 偏小,而使测量磁导率曲线的起始部分不够准确。为了能够做定量比较,我们在 $H=(40\sim 132)(1000/4\pi)\text{A/m}$ 范围内取最后十点,算出 μ_r 的平均值,称为该磁导率曲线的恒磁导率 μ_H 。

我们在室温(23℃)和0.0001~2.205GPa的不同静水压下测量坡莫合金片及其5H

$<132\times(1000/4\pi)\text{A/m}$ 时,它的磁感应强度B随磁场H增大而线性增加。

Fe-50Ni和Fe-84Ni合金5H纳米粉的磁导率曲线形状亦类似,仍以Fe-50Ni合金5H粉为例,画于图7。

图7表明:(1)在交流磁场 $H=(10\sim 132)\times(1000/4\pi)\text{A/m}$ 宽范围内,磁导率不变,具有恒磁特性。(2)恒磁导率随压力的增加而增大;当压力从0.0001GPa升高至2.205GPa时,它从7增大至16。

但纳米粉的起始磁导率比相应组分合金的约低一个数量级。我们做如下解释:1)根据立方晶体单畴球形颗粒的临界半径公式^[8],文献^[10]证实:Fe-Ni合金微粉粒径 \bar{D} 减小时,磁结构将从多畴变到单畴($\bar{D}<37\text{nm}$);再变到超顺磁性($\bar{D}\approx 5\text{nm}$)。上述Fe-Ni合金5H粉的平均粒径小于37nm,多数属于单畴颗粒。磁化或反磁化时只有转动过程,因此它们具有低磁导率和高矫顽力。2)上述Fe-Ni合金5H纳米微粉表面同样会存在 Fe_3O_4 和反铁磁结构的NiO^[11~13]。微粒越细,氧化层越多, μ 越降低。

3.4 压力对坡莫合金纳米粉磁导率的影响

由于积分仪的 $\times 100$ 挡的门限电压为0.25mV,当H很小时

纳米粉的起始微分磁导率 μ_i 和恒磁导率 μ_L , 结果画于图 8。

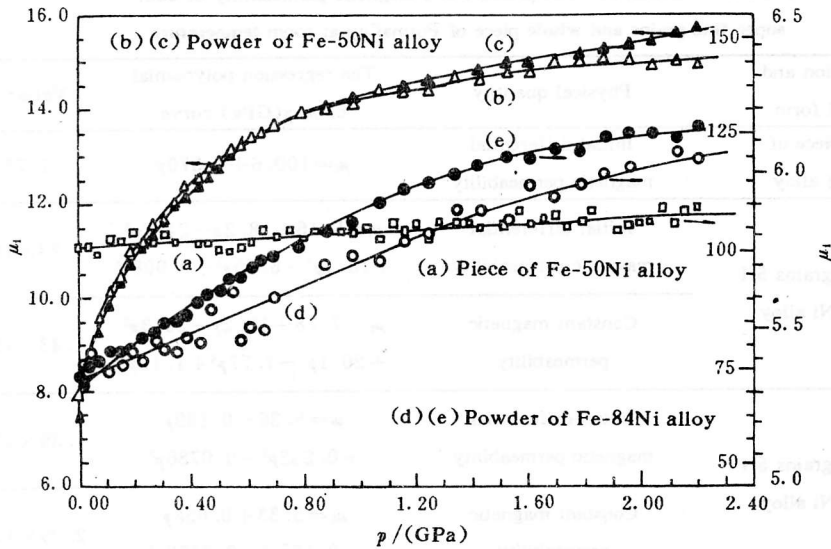


图 8 坡莫合金片及 5H 纳米粉室温磁导率随压力的变化

Fig. 8 Pressure dependence of magnetic permeability of super-fine grains 5H of Pormalloy at room temperature

图 8(a) 是 Fe-50Ni 合金片的起始微分磁导率 μ_i 的压力曲线。 μ_i 随压力增加而近似线性地微弱增大。

(b) 和 (c) 分别是 Fe-50Ni 合金 5H 纳米粉的起始微分磁导率和恒磁导率随压力变化的曲线(用左侧纵坐标)。两者的数值及变化基本相同, 表明该材料在磁场很小时的起始磁导率与磁场较大时的恒磁导率非常接近。而且在高压下趋于稳定, 当 $p > 1.0 \text{ GPa}$ 后 μ_i 随压力的变化很小。

(d) 和 (e) 分别是 Fe-84Ni 合金 5H 纳米粉的起始微分磁导率和恒磁导率随压力变化的曲线(用右外侧坐标)。两者都随压力增加而较均匀地变大, 但前者数值比后者略低一点。

表 2 同时列出合金片和相应纳米粉的起始微分磁导率 μ_i 和恒磁导率 μ_L 随压力变化的拟合多项式和方差值。

由表 2 可见: 纳米粉的起始微分磁导率随压力的变化规律, 与相应组分合金片的明显不同。压粉磁芯一般采用热压成型, 再热处理消除内应力以提高其磁性^[2]。我们的超微粉未经热压成型, 故在 1.0 GPa 以下 μ_i 随压力的变化较大。可见成型压力至少应高于 1.0 GPa , 恒磁导率才有较稳定的压力特性。

3.5 起始磁导率的频率特性

起始磁导率与测量的频率有密切的关系。我们在四种典型压力下选用 50, 100, 400 Hz 和 1, 4, 10 kHz 等不同频率测量 Fe-50Ni 和 Fe-84Ni 合金 5H 纳米粉的起始磁导率, 得到 μ_i 的频率特性, 见图 9。

在更高的频率范围改用高频 Q 表测量, 所得结果见图 10。

表 2 坡莫合金片及其纳米微粉室温磁导率与压力的关系
Table 2 Relation between pressure and magnetic permeability of both super-fine grains and whole piece of Formalloy at room temperature

Composition and external form	Physical quantity	The regression polynomial of μ_i-p (GPa) curve	Variance
Whole piece of Fe-50Ni alloy	Initial differential magnetic permeability	$\mu_i = 100.6 + 1.370p$	1.73
Super-fine grains 5H of Fe-50Ni alloy	Initial differential magnetic permeability	$\mu_i = 8.16 + 18.2p - 24.7p^2 + 18.1p^3 - 6.55p^4 + 0.908p^5$	1.23×10^{-2}
	Constant magnetic permeability	$\mu_c = 7.78 + 19.2p - 26.3p^2 + 20.1p^3 - 7.77p^4 + 1.19p^5$	1.43×10^{-2}
Super-fine grains 5H of Fe-84Ni alloy	Initial differential magnetic permeability	$\mu_i = 5.38 - 0.169p + 0.232p^2 - 0.0786p^3$	1.39×10^{-3}
	Constant magnetic permeability	$\mu_c = 5.33 + 0.658p - 0.105p^2 - 0.0132p^3$	2.29×10^{-4}

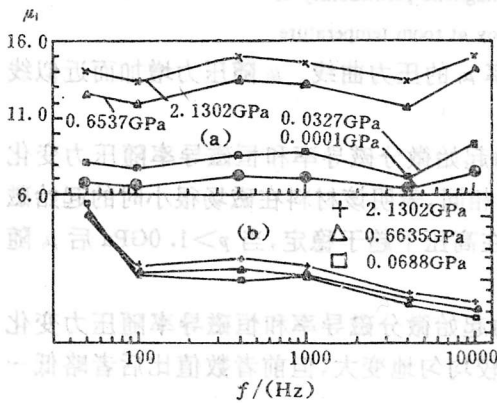


图 9 (b)Fe-50Ni 合金片及(a)纳米粉起始磁导率在不同压力下的频率特性
Fig. 9 Frequency characteristic of initial magnetic permeability of super-fine powder (a) and piece (b) of Fe-50Ni alloy under different pressure

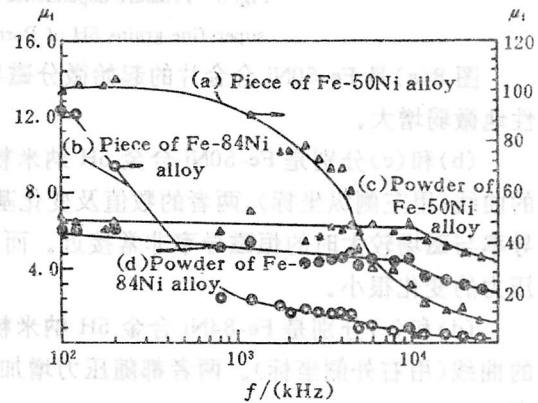


图 10 坡莫合金片及纳米粉在室温常压下的磁导率的频率特性
Fig. 10 Frequency characteristic of initial magnetic permeability of both super-fine powder and whole piece of Pormalloy under room temperature and 1 atmosphere

图 10(a)和(b)分别是 Fe-50Ni 和 Fe-84Ni 合金片起始磁导率的频率曲线。由图可见, Fe-50Ni 合金片的 μ_i 在 1000kHz 左右才开始急剧下降。而 Fe-84Ni 合金片的 μ_i 在 100kHz 以上已开始下降。后者磁导率开始下降的频率比前者的约低一个数量级。

(c)和(d)分别是 Fe-50Ni 和 Fe-84Ni 合金 5H 纳米粉起始磁导率的频率曲线。两种坡莫合金纳米粉的 μ_i 均在 10^4 kHz 以上才开始降低, μ_i 下降的频率比相应组合合金片的高 1~2 个数量级。Fe-50Ni 合金纳米粉 μ_i 的频率特性比 Fe-84Ni 合金纳米粉的更好。

为什么两种坡莫合金纳米粉的频率特性比相应成分合金片的好? 我们认为可能的原因如下: 当频率增高时, 由于涡流效应导致材料的磁导率减低。而材料的粒度愈大, 涡流效应也愈显著, 磁导率下降愈大。因 Fe-50Ni 和 Fe-84Ni 坡莫合金片的晶粒约为微米数量级, 涡流比微粉的大, 故在高频下其磁导率明显下降。而相应组分合金纳米粉的颗粒尺寸小, 因此高频时涡流效应的影响较小, 故即使频率高达 10MHz 也未见其磁导率有明显的降低。

5 结 论

(1) Fe-50Ni 合金 5H 粉 ($\bar{D}=16\text{nm}$) 和 Fe-84Ni 合金 5H 粉 ($\bar{D}=19\text{nm}$), 在 $H=(10\sim 132)(1000/4\pi)\text{A/m}$ 范围内的磁化曲线是直线, 其磁导率保持为常数。

(2) 上述两种坡莫合金 5H 纳米粉的起始磁导率与恒磁导率, 随静水压的增加而增大。热压成型压力至少需高于 1.0GPa, 磁导率才有较稳定的压力特性。

(3) Fe-50Ni 和 Fe-84Ni 坡莫合金 5H 纳米粉的磁导率开始下降的频率要比相应组分合金片的高 1~2 个数量级。

本工作在高频 Q 表测量中承蒙中国科学技术大学物理系磁学专业卢国荣工程师提供仪器及有益的讨论, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 近角聪信等编, 磁性体手册, 韩俊德, 杨膺善译, 北京: 冶金工业出版社, 1985. 108, 412, 422, 424
- 2 杜毓铎, 快速凝固(总第 3 期). 北京: 冶金部钢铁研究总院非晶和急冷技术研究开发中心, 1993. 35~49
- 3 李建雄, 余 平, 等. 第八届全国磁学磁性材料会议论文集, 山东省烟台市, 1993. 487
- 4 苏 昉, 车荣钰, 许 伟, 等. 高压物理学报, 1990, 4(1): 63
- 5 苏 昉, 苏 骏, 许 伟. 高压物理学报, 1993, 7(1): 11~21
- 6 大森丰明主编, 磁性材料手册. 刘代琦等译. 北京: 机械工业出版社, 1987. 168
- 7 徐 灏, 等. 机械设计手册(第 1 卷). 北京: 机械工业出版社, 1991. 4~55
- 8 钟文定. 铁磁学(中册). 北京: 科学出版社, 1992. 147, 265
- 9 Akira Tasaki, Masatoshi Takao, Hideaki Tokunaga. Jap J Appl Phys, 1974, 13(2): 271~276
- 10 王锦辉, 陆怀先. 第八届全国磁学磁性材料会议论文集. 山东省烟台市, 1993. 505, 509
- 11 王文鼎, 都有为, 臧文成. 全国第二届纳米固体学术讨论会论文集. 安徽省合肥市, 1991. 70
- 12 陆怀先, 刘荣川, 王连卫, 等. 全国第二届纳米固体学术讨论会论文集. 安徽省合肥市, 1991. 76
- 13 李 华, 赵中仁. 全国第二届纳米固体学术讨论会论文集. 安徽省合肥市, 1991. 21

CONSTANT MAGNETIC PERMEABILITY AND ITS BOTH PRESSURE AND FREQUENCY CHARACTERISTIC IN NANOMETER—SCALE ULTRAMICRON OF PORMALLOY

Su Fang^{1,2}, Xie Bin¹, Chen Yunhong³

(1. *Structure Research Laboratory, USTC, Academia Sinica, Hefei 230026*)

(2. *Center of Fundamental Physics,*

University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3. *Department of Physics, Normal College, University of Yangzhou, Yangzhou 225002*)

ABSTRACT By means of vacuum evaporation and condensation technique, nanometer-scale ultramicrons of Pormalloy (Fe-50wt%Ni, Fe-84wt%Ni) were prepared. It is found out with the method of TEM and X-ray diffraction that the composition of the ultramicroton coincides with that of its mother alloy, and the average grain size is 16nm (Fe-50Ni) and 19nm (Fe-84Ni). Under room temperature and hydrostatic pressure of 3.6 various magnitudes ranging from 0.0001 to 2.205GPa the magnetization curve and initial magnetization curve were measured to reveal their relation with pressure. It is concluded: 1) The nanometer-scale ultramicroton of both Pormalloy Fe-50wt%Ni and Fe-84wt%Ni possesses constant magnetic permeability. 2) Initial differential magnetic permeability, μ_i varies with the pressure as follows: $\mu_i = 8.16 + 18.2p - 24.7p^2 + 18.1p^3 - 6.55p^4 + 0.908p^5$ (for Fe-50wt%Ni), $\mu_i = 5.38 - 0.169p + 0.232p^2 - 0.0786p^3$ (for Fe-84wt%Ni). 3) μ_i of these ultramicrons decreases when $f \geq 10\text{MHz}$, but μ_i of alloy Fe-50Ni goes down when $f \geq 1\text{MHz}$, μ_i of alloy Fe-84Ni drops when $f \geq 100\text{kHz}$, so applied frequency range of magnetic ultramicroton core is one-two order of magnitude more than that of Pormalloy with the same composition.

KEY WORDS nickel-ferro alloys, super-fine grain, magnetic permeability, hydrostatic pressure, frequency characteristic.