

等静压力下 MnZn 铁氧体的压磁导效应和压阻抗效应

高剑森¹, 张宁²

(1. 江苏省宿迁学院 基础教学部, 宿迁 223800; 2. 南京师范大学 磁电子学实验室, 南京 210097)

摘要: 研究了高磁导 MnZn 铁氧体在等静压力下的压磁导效应、以及相应器件中不依赖于趋肤效应的压阻抗效应。在几个兆帕的压力下同时观测到其巨大的压磁导效应及压阻抗效应。当频率低于 1kHz 时, 随信号频率的增大, 上述压磁导效应及压阻抗效应会分别经历一个最大值。对于磁导率介于 5000 ~ 15000 范围内的 MnZn 铁氧体, 在 6MPa 的压力下, 压阻抗效应均可超过 60%。分析显示, 上述压力效应是由于外部压力导致铁氧体内应力改变, 以致磁化状态改变所致。

关键词: 压磁导效应; 压阻抗效应; 高磁导材料

中图分类号: TG111

文献标识码: A

Giant Piezomagnetism and Piezoiimpedance Effects in MnZn Ferrite Device under Hydrostatic Pressure

GAO Jian-Sen¹, ZHANG Ning²

(1. Basic Teaching Department, Suqian College of Jiangsu Province, Suqian 223800, China; 2. Magnetoelectronic Lab, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: The effects of hydrostatic pressure on the magnetism and impedance of a manganese zinc ferrite device were investigated. Both giant piezopermeability and piezoiimpedance which were independent of skin effect were observed simultaneously under pressure of a few million-pascals (MPa). With increasing frequency of the current applied across the search coil of the ferrite device, these pressure effects are found to undergo a maximum at frequency of about 1kHz. Under pressure of 6MPa, piezoiimpedance over 60% is observed for the ferrite devices with the permeabilities ranging from 5000 to 15000. Analysis shows that these pressure effects result from the variation of the interior stress and the magnetization of the ferrite induced by the applied pressure.

Key words: piezopermeability effect; piezoiimpedance effect; materials with high permeability

在外磁场作用下, 通有交流电流的磁性材料的阻抗有可能产生巨大的变化, 此现象称为巨磁阻抗效应 (GMI-Giant magnetoimpedance)^[1]。一般认为 GMI 效应是由于趋肤效应引起的。即由于外磁场变化诱导的磁性材料磁导率的改变, 从而改变趋肤深度, 以至改变阻抗^[2]。另外发现, 通过对磁性材料施加应力也会引起材料的磁导率的改变。因此, 通过对 GMI 材料施加外部应力亦可改变其阻抗。这种现象称之为巨应力阻抗效应 (GSI-Giant stress-impedance)^[3,4]。近十多年来, Co 基非晶丝 (带或膜) 及 Fe 基纳米晶中的 GMI 和 GSI 效应得到广泛地研究^[5-8], 并已经应用于高灵敏

的磁性传感器的制备。

由于 GSI 效应依赖于趋肤效应, 所以通常要求较高的信号频率, 一般不低于 100kHz。另外, 由于 GSI 效应一般只发生在一些金属丝或者带状的材料上, 因此通常须施加一个张应力^[9-11]。GSI 效应的这些特点限制了其用途。

最近, 本研究在高磁导铁氧体中观察到不依赖于趋肤效应的 GSI 效应。在一个不太大的等静压力下施加一个低频交流信号就可观察到该效应, 为了区别于前述的依赖于趋肤效应的 GSI 效应, 称其为压阻抗效应。大约十年前就有过关于磁体压磁导效应的相关报

道^[12]，但迄今有关压阻抗效应及基于压磁导效应的其他压力效应尚未见报道. 本工作系统地研究了高磁导铁氧体的压磁导效应以及与此相关的压阻抗效应.

1 压磁导效应及相关的压阻抗效应

多数磁性材料都具有压磁导效应. 对于高磁导率材料而言, 其磁化主要是(磁)畴壁移动的结果. 因此, 在外应力下该类磁性材料的可逆磁化过程的起始磁导率可表达为

μ_i = (2μ_0 M_s^2 l / (3π^2 δ λ_s σ)) + 1 (1)

其中 M_s 是饱和磁化强度, λ_s 是磁致伸缩系数, l 及 δ 分别是畴壁的宽度和厚度, σ 是内应力, 可通过外压力加以改变, 因此, 当磁导率 μ ≫ 1 时, 高磁导材料在可逆磁化过程中的压磁导效应可表示为

(Δμ_i / μ_i) = ((μ_i - 1) / μ_i) (Δσ / σ) ≈ - (Δσ / σ) (2)

式(2)表明, 压磁导效应与 μ 和 Δσ 成正比, 但与内应力 σ 成反比. 通常可以通过测量绕在该磁性材料上的探测线圈的电感变化来观察压磁导效应. 由于线圈电感与磁芯磁导率之间有关系 L = Vn^2 μ_eff, 其中 n (单位长度线圈匝数) 和 V (线圈所包围的磁芯的体积) 均为常数, 因此, 有 Δμ / μ_i = ΔL / L_0, 其中 L_0 为零压力下的线圈电感. 即压磁导效应在数值上等于压电感应.

除电感以外, 线圈还存在电阻和分布电容^[13]. 当在线圈上施加一个交流信号时, 这些参数将互为函数, 并与交流信号频率 f = ω / 2π 密切相关. 一般地讲, 线圈的(外部)等效电路由其电感和电容并联后再与其电阻串联构成^[14], 该等效电路中阻抗可以表示为:

Z = (ωLR_p) / (√(ω^2 L^2 + R_p^2 (1 - ω^2 C_p L))) (3)

(3)式中 R_p 是线圈的直流电阻, C_p 是不依赖于电流频率(即, 静电场中)的电容. C_p 通常可以通过无外磁场或外压力情况下测出的 C_s 随频率变化曲线的反向延长线推出.

另外, 在交变磁场中, 磁体内的磁弛豫可导致磁导率的色散, μ_i = μ' - iμ'', 其中 μ' 和 μ'' 分别称之为弹性磁导率和粘滞磁导率. 它们可分别表示为:

μ' = (μ_i + (ω/ω_c)^2) / (1 + (ω/ω_c)^2), μ'' = ((μ_i - 1)(ω/ω_c)) / (1 + (ω/ω_c)^2), (4)

其中 ω_c 是弛豫频率^[15]. 于是有效磁导率可以表示为:

μ_eff = √(μ_i^2 + (ω/ω_c)^2) / √(1 + (ω/ω_c)^2) (5)

(5)式表明, 交变磁场中的磁导率依然是外磁场频率的函数. 考虑到关系式 L = Vn^2 μ_eff 和式(3), 可望同时从探测线圈中观察到压磁导效应及压阻抗效应. 且压阻抗效应可表示为

ΔZ = - (ωLR_p^3 (1 - ω^2 C_p L) / [ω^2 L^2 - R_p^2 (1 - ω^2 C_p L)^2]^(3/2)) (Δσ / σ) (6)

式(6)显示, 随着外压力的增大, 分布电容增加, 而阻抗减小.

通常, 任何一种铁磁体都会产生压磁导效应, 但为了获得明显且可重复的压磁导效应则需要具有较高磁导率的软磁性材料. 高磁导率使得其可压范围大, 软磁性使得其压力效应的重复性好. 从这个角度上讲, 镍锌铁氧体和锰锌铁氧体是比较理想的压磁导材料. 锰锌铁氧体的初始磁导率可达 15000 ~ 20000, 而镍锌铁氧体的磁导率可从几十至 2000 左右, 但更适于在高频电磁场中使用^[16].

2 实验

本研究采用了初始磁导率介于 5000 ~ 15000 的 MnZn 铁氧体做为压磁导材料, 并着重讨论了初始磁导率为 15000 的 MnZn 铁氧体的压力效应. 所采用的铁氧体样品高为 7mm, 外径为 10mm 的环状. 在磁环上绕上 10 圈的探测线圈, 并用胶水固定. 以一个装有活塞的圆筒作为压力容器, 其内径是磁环外径的 5 ~ 6 倍. 将绕有探测线圈的环形铁氧体置入充满二氧化硅粉末的容器中央. SiO_2 粉末的平均粒径约为 1.5 ~ 2.0 μm. 于是对活塞施加压力就会有一个准等静压力施加在铁氧体磁环上. 整个实验装置见图 1. 其中, 容器中心的深色部分为样品.

采用带压力表的油压机给压力装置施加压力 F (见图 1), 并换算为 SiO_2 粉体中的压强. 采用宽频交流电桥测量了样品的电感随压力及频率的变化, 并由

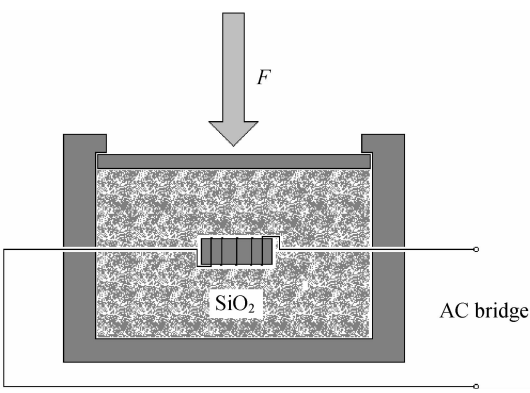


图 1 压电感及压阻抗效应测量装置简图 Fig. 1 Schematic draft of the equipment for the experiments of piezoelectricity and piezoresistance

此估计样品的压磁导效应. 其次采用该交流电桥测量了样品阻抗随压力和频率的变化. 样品阻抗的测量亦可以采用一台信号发生器和伏特表并联的方式进行, 且测量中保持交流电流 I_0 不变. 于是阻抗 $Z = V/I_0$.

3 结果和讨论

首先测量了磁导率为 15000 的 MnZn 铁氧体样品的压磁导效应. 图 2 的左(纵)轴给出了不同频率下该器件的电感(L)随外压力的变化,右(纵)轴给出了频率为 1、10 及 100kHz 情况下压磁导效应. 这里压磁导 $\Delta\mu_{\text{eff}}/\mu_0 = (\mu_{\text{eff}} - \mu_0)/\mu_0$,并在数值上等于压电感效应 $\Delta L/L_0 = (L_0 - L)/L_0$,其中 μ_0 为初始磁导率, L_0 是零压力下的电感. 图 2 显示:电感随压力的增大而减小;电感随频率的增加亦减小,这两点与方程(2)的预计是吻合的;而压磁导效应似乎正好相反,这也符合方程(5)的预计(μ_{eff} 随 ω 的增加而减小);6MPa 压力下,频率为 1kHz 时,压磁导效应可达约 90%. 由方程(3),在该压磁导效应的诱导下,器件阻抗也将发生变化.

图 3 分别显示了零压力和 6MPa 压力下电感和阻抗以及相应的压磁导及压阻抗($\Delta Z/Z_0$)效应随频率的变化. 其中 $\Delta Z/Z_0 = (Z_0 - Z)/Z_0$, Z_0 为零压力下的阻抗. 由图 3 可见,压磁导效应和压阻抗效应存在于几乎所有频率下; $\Delta\mu_{\text{eff}}/\mu_0$ 及 $\Delta Z/Z_0$ 在频率约为 1.0 ~ 1.2kHz 时会经历一个极大值,两者的极大值均接近 90%;当信号频率小于 200kHz 时,压磁导效应基本上可保持在 81% 以上,而当频率介于 100Hz ~ 200kHz 之间时压阻抗效应可保持在 82% 以上. 其次,阻抗随着压力的增大而减小. 这一结果分别与式(6)的预计吻合.

图 4 显示了不同频率下阻抗随压力的变化. 阻抗随压力的变化显示出与压磁导效应的规律基本相同,即反比关系(式(6));所有的压力效应主要发生在压力低于 3 MPa 的区域,这段区域可称之为敏感区,

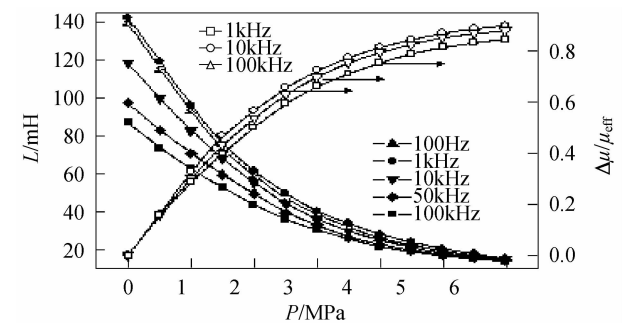


图 2 不同频率下铁氧体样品的电感及压磁导效应随外压力的变化
Fig. 2 Pressure dependent inductance and the corresponding piezopermeability of the ferrite samples under different frequencies

在敏感区内单位压强变化所导致的阻抗变化—压阻抗灵敏度可达 0.22/MPa (见图 5).

图 5 给出了不同频率下压阻抗随压力的变化. 可见,除了频率低于 1kHz 的情况,压阻抗效应均可大于 80%,而频率为 1kHz 时有最大压阻抗. 这再次验证了最大压阻存在于频率为 1kHz 附近.

实验还显示不同磁导率的磁体的压磁导效应是不同的,以致压阻抗效应也不同. 图 6 给出了压阻抗效应最大值 ($\Delta Z/Z_0$)_{max} 随磁导率的变化. 可见压阻

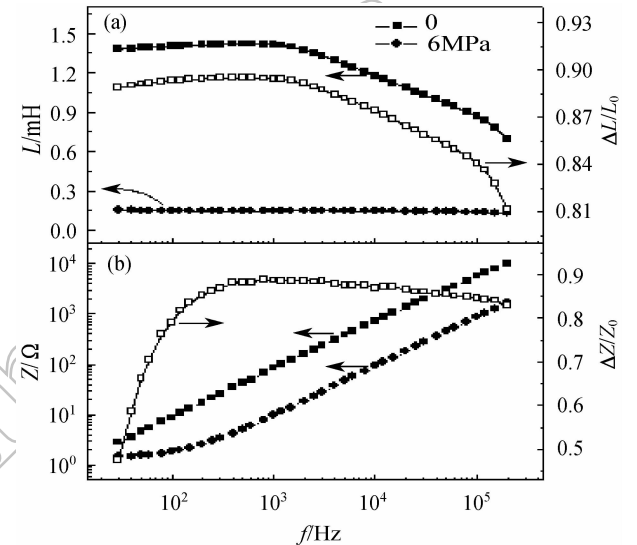


图 3 零压力和 6MPa 压力下电感 (a) 和阻抗 (b) 以及相应的压磁导 (a) 和压阻抗 (b) 随频率的变化曲线
Fig. 3 Frequency dependent inductance and the corresponding piezopermeability (a), as well as the frequency dependent impedance and the corresponding piezoresistance (b) under zero and 6MPa pressure, respectively, for the ferrite samples

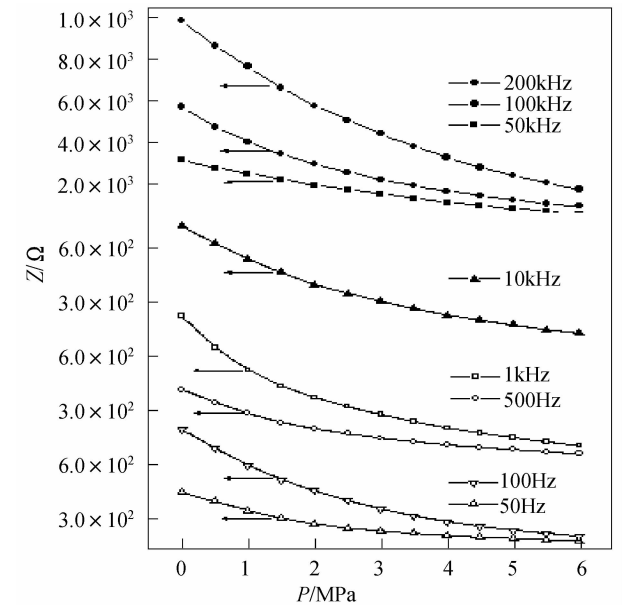


图 4 不同频率下的阻抗随压力的变化
Fig. 4 Pressure dependent impedance under different frequencies

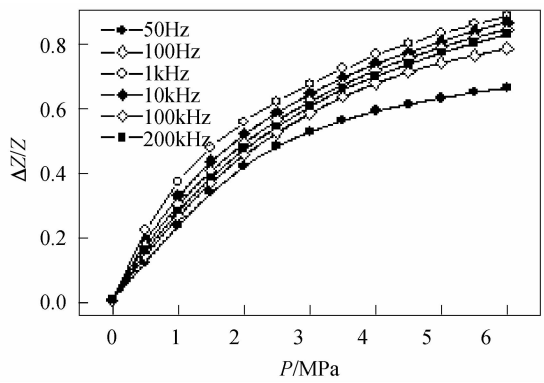


图 5 不同频率下压阻抗随压力的变化关系
Fig. 5 Pressure dependent piezoeimpedance under different frequencies

抗效应随磁导率的增大近似呈线性增大,即磁导率越高压阻抗效应也越大. 另外,压阻抗取得最大值的频率(f_p)随磁导率的增大也略有增大. 当磁导率从 5000 增加到 15000 时, f_p 约从 500Hz 增加到 1kHz 左右(见图 6).

显然,上述一系列实验结果均来源于压磁导效应. 根据铁磁学,在外压力下,单位面积的(磁)畴壁能可以写为

$$\gamma = 2\delta \left(K_1 + \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \right) \tag{7}$$

其中 K_1 为晶格各向异性常数. 另外,在外压力下还存在磁弹性能

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \cos^2 \theta \tag{8}$$

在高磁导磁体中, K_1 及 λ_s 一般都比较小. 因此,根据方程(7)、(8),磁体的畴壁能和磁弹性能均只与磁体内应力 σ 有关,而后者会受到外加应力影响. 这样,增大压力就可以增大 γ 和 E_σ ,从而抑制或增加了畴壁的移动,以致影响磁体的磁化.

另外,压力磁效应不依赖于趋肤效应,它可以发生在数十到数十万赫兹的宽频范围内,并且在低于

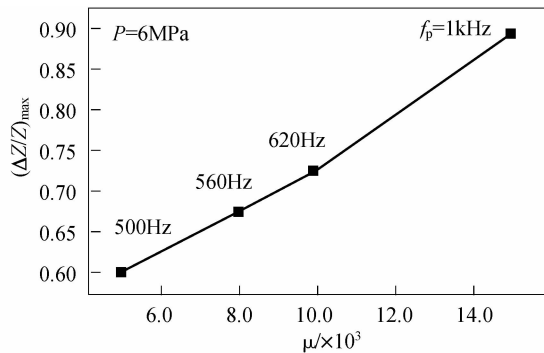


图 6 6MPa 压力下压阻抗最大值随材料磁导率的变化
Fig. 6 The maximum of the piezoeimpedance under pressure of 6MPa as a function of the permeability

1kHz 时可经历一个最大值. 这些频率都远远低于依赖于趋肤效应的 GSI 效应所需要的频率^[9-11]. 因此,该类压磁导效应比非晶丝或者膜中的压磁导效应更加稳定.

4 结论

在几个兆帕的等静压力下,具有闭合磁路的高磁导铁氧体样品能够表现出很高的压磁导效应. 在此基础上,在探测线圈上施加一个交流信号,可同时观察到巨大的压磁导效应及压阻抗效应. 当材料的磁导率介于 5000 ~ 15000 范围内时,在 6MPa 的压力下,压阻抗效应均可超过 60%. 在灵敏区内,其压阻抗灵敏度可达 22%/MPa. 另外,这类压磁导效应及压阻抗效应均在 $10^2 \sim 10^3$ Hz 内获得其最大值,表明这些效应不依赖于趋肤效应.

参考文献:

[1] Machado F L A, Martins C S, Rezende S M. *Phys. Rev. B*, 1995, **51**(6): 3926-3929.
[2] Panina L V, Mohri K. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(9): 1189-1191.
[3] Shen L P, Uchiyama T, Mohri K, et al. *IEEE Trans. Magn.*, 1997, **33**(5): 3355-3357.
[4] Knobel M, Vazquez M, Sanchez M L, et al. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1997, **169**(1-2): 89-97.
[5] Panina L V, Mohri K, Bushida K, et al. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(10): 6198-6203.
[6] Tejedor M, Hernando B, Sanchez M L, et al. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1999, **196-197**: 330-332.
[7] Hernando B, Sánchez M L, Prida V M, et al. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(9): 4783-4790.
[8] Knobel M, Sánchez M L, Gómez-Polo C, et al. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(3): 1646-1654.
[9] Shin Kwang-Ho, Inoue Mitsuteru, Arai Ken-Ichi. *J. Appl. Phys.*, 1997, **85**(8): 5465-5467.
[10] Barandiaran J M, Gutierrez J. *Sensors and Actuators A*, 1997, **59**(1-3): 38-42.
[11] Ludwig A, Tewes M, Glasmachers S, et al. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2002, **242-245**: 1126-1131.
[12] Schweiger A. *Siemens Components*, 1997, **1**: 16-18.
[13] Romero-Talamás C A, Bellan P M, Hsu S C. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(8): 2664-2667.
[14] Dill H G. *Electronic Design*, 1964, **17**(1): 52-58.
[15] Jiang Z, Excell P S, Hejazi Z M. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1997, **45**(1): 139-142.
[16] Stoppels D. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1996, **160**: 323-328.