

镍锌和锰锌铁氧体材料的声学谐振效应研究

王天阳*, 王宇健, 翁雨燕, 汤如俊#

苏州大学, 物理科学与技术学院, 江苏 苏州
Email: 1814401091@suda.stu.edu.cn, #rjuntang@163.com

收稿日期: 2021年4月9日; 录用日期: 2021年5月12日; 发布日期: 2021年5月19日

摘要

部分铁氧体材料凭借其磁致伸缩效应, 能有效地将电磁能转化为机械能和声能。针对这一现象, 本文从实验上定量研究了商用镍锌和锰锌在交流磁场信号下的磁致伸缩现象, 采集了相应的磁声信号, 并系统研究了交流磁场频率、铁氧体棒的长度、材料类型、线圈电压等实验变量对磁声共振现象的影响。研究结果表明铁氧体的声学磁力谐振效应与交流磁场频率、铁氧体棒的几何形状、材料类型等参数精密相关, 会对材料在具体应用时产生明显的影响。

关键词

铁氧体, 磁致伸缩, 声磁共振

Acoustic Resonance Effect of Ni Zn and Mn Zn Ferrites

Tianyang Wang*, Zijian Wang, Yuyan Weng, Rujun Tang#

School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou Jiangsu
Email: 1814401091@suda.stu.edu.cn, #rjuntang@163.com

Received: Apr. 9th, 2021; accepted: May 12th, 2021; published: May 19th, 2021

Abstract

Some ferrite materials can effectively convert electromagnetic energy into mechanical energy and acoustic energy by virtue of their excellent magnetostrictive effect. In view of this phenomenon, the magnetostriction of commercial nickel zinc and manganese zinc under AC magnetic field signal

*第一作者。

#通讯作者。

is quantitatively studied experimentally, and the corresponding magnetoacoustic signals are collected. The effects of AC magnetic field frequency, ferrite rod length, material type, coil voltage and other experimental variables on the magnetoacoustic resonance phenomenon are systematically studied. The results show that the acoustic magnetic resonance effect of ferrite is closely related to the frequency of AC magnetic field, the shape of ferrite rod and the type of material. It will have a significant impact on the material in the specific application.

Keywords

Ferrite Material, Magnetostriction, Acoustic Resonance Effect

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁致伸缩效应,是指铁磁体在被外磁场磁化时,其体积和长度将发生变化的现象。磁致伸缩效应在微观上表现为材料内部磁畴的位移以及旋转带来材料晶体长度的变化。在交变磁场作用下,磁致伸缩材料会在某些频率下发出响亮的声音。其物理本质是磁致伸缩效应下产生的声学磁力谐振效应。当外加磁场频率和磁致伸缩材料自身固有力学振动频率接近的时候,二者会产生谐振,使得磁致伸缩材料机械振动的振幅加大。从而产生声压级较高、振动频率与交变磁场频率接近的声音。

磁致伸缩材料的声学磁力谐振效应在很多领域有着重要的应用,比如振动换能器和扬声器等。特别是磁流变弹性体的磁致伸缩效应,近年来再次引起人们的关注[1]。然而,在很多其他领域,声共振效应需要避免。例如用于高频电感器和微波器件中的铁氧体材料,声学共振效应会导致驱动磁场的能量损失,从而降低器件性能。在以往的研究中,有很多关于磁致伸缩材料声共振效应在换能器和扬声器中的应用的报道[2] [3] [4] [5]。然而,对于磁致伸缩铁氧体材料声共振效应的研究相对较少,尤其缺乏对磁声共振现象的分析[6]。同时铁氧体材料应用广泛,因其独特的磁性和电气特性,在微波吸收[7]和高压电源等领域而得到了广泛的研究[8] [9] [10]。因此需要对铁氧体材料的磁声共振现象进行研究。

软磁铁氧体可预期的发展前景使其成为各铁氧体公司研究的热点[11],因此本文以镍锌和锰锌铁氧体材料为研究对象,研究了其声学波段的磁共振效应。在实验上定量研究了镍锌和锰锌在交流磁场信号下的磁致伸缩现象,采集了相应的磁声信号,并系统研究了交流磁场频率、铁氧体棒的长度、材料类型、线圈电压等实验变量对磁声共振现象的影响。

2. 实验装置

本文建立了一套用于观察铁氧体棒在交变电场中发出的声音声强级变化的装置,如图1所示[12]。为了获得更明显的声磁共振现象,我们选择了绝缘的 Zn 磁致伸缩铁氧体材料作为我们实验装置的材料[13]。我们采用了不同长度的 Mn-Zn 铁氧体和 Ni-Zn 铁氧体作为实验材料,材料参数如表1所示,定制了不同规格的线圈与信号发生器连接[9],所用线圈如图2所示,线圈参数如表2所示。在静音室里放置了麦克风,利用麦克风采集声音,并导入电脑进行声音分析。最后提取声强级的平均值作为结果进行记录。

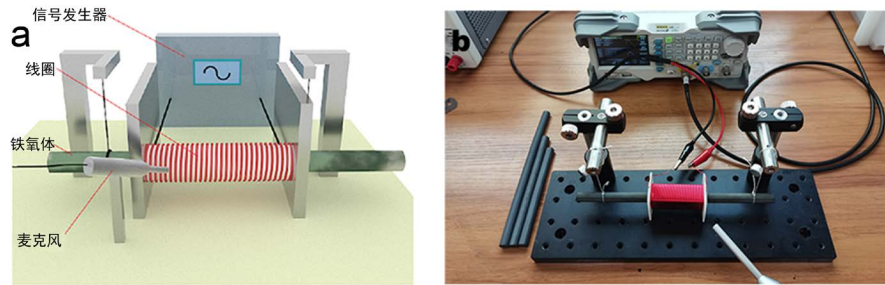


Figure 1. (a) Schematic diagram of magnetic resonance effect test apparatus; (b) Magnetic resonance effect test apparatus
图 1. (a) 磁声谐振效应测试实验装置示意图; (b) 磁声谐振效应测试实验装置

Table 1. Parameters of ferrite bar [14] [15]

表 1. 铁氧体棒参数表[14] [15]

实验材料	长度 (cm)	截面直径 (mm)	密度 (g/cm ³)	杨氏模量 (10 ⁶ .psi)	磁致伸缩系数 ($\Delta l/l_0 \cdot 10^{-6}$)	磁导率 (10 ⁻⁶ .H/m)
Ni-Zn 铁氧体	12	10	4.8	20	-9	300
Ni-Zn 铁氧体	14	10	4.8	20	-9	300
Ni-Zn 铁氧体	18	10	4.8	20	-9	300
Ni-Zn 铁氧体	20	10	4.8	20	-9	300
Mn-Zn 铁氧体	20	10	4.7	18	-12.5	800

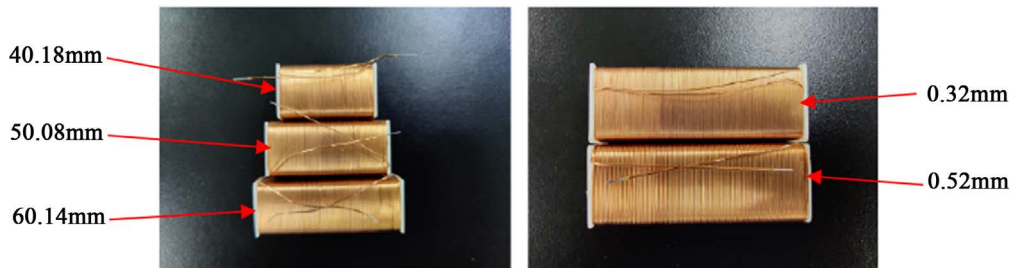


Figure 2. Coils with different lengths of the same wire diameter and coils with different lengths of the same wire diameter
图 2. 同线径不同长度的线圈与同长度不同线径的线圈

Table 2. Coil parameters

表 2. 线圈参数

编号	导线材质	长度(mm)	线径(mm)	截面形状	截面面积(mm ²)
1	铜	40.18	0.52	正方形	225
2	铜	50.08	0.52	正方形	225
3	铜	60.14	0.52	正方形	225
4	铜	60.14	0.32	正方形	225

3. 结果和讨论

3.1. 信号频率的影响

实验材料为 18 cm 镍锌铁氧体棒，其内部固有频率为 11,602 Hz，材料内部声速大小为 4709 m/s。从图 3 中可以看到随着频率的增加，当信号线圈中的驱动频率与材料自身固有频率接近的时候，会有一个声压级的最大值，其本质是机械振动频率与固有频率形成了谐振，同时伴随着磁相的变化[15] [16]。

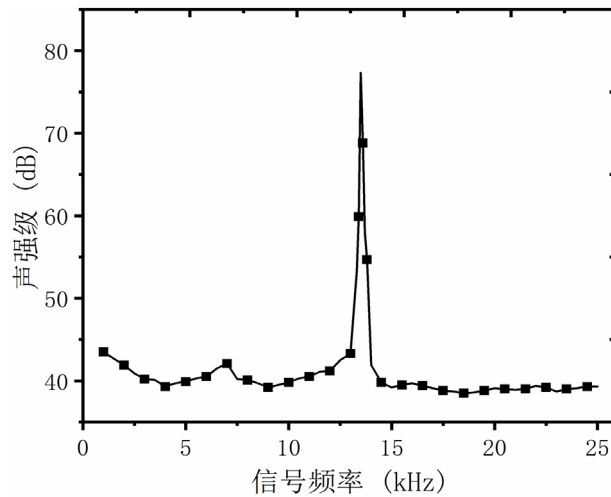


Figure 3. Variation of magnetoacoustic resonance characteristics of 18 cm ferrite bars with frequency
图 3. 18 cm 铁氧体棒磁声谐振特点随频率的变化

3.2. 长度的影响

从图 4(a)中可以看到减小铁氧体棒的长度，共振峰会向高频移动。即改变铁氧体棒的长度会改变固有频率也就是共振基频，从图 4(b)中可以看出固有频率与长度成反比。

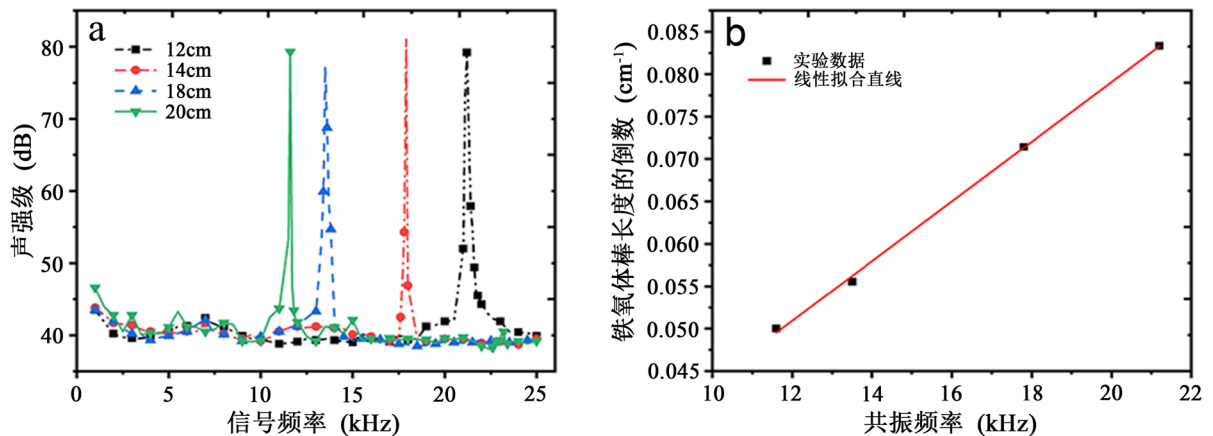


Figure 4. (a) Variation of magnetoacoustic resonance characteristics of ferrite bars with different lengths (12 cm, 14 cm, 18 cm, 20 cm) with frequency; (b) Relation between resonant frequency and length of ferrite rod

图 4. (a) 不同长度(12 cm、14 cm、18 cm、20 cm)铁氧体棒的磁声谐振特点随频率的变化；(b) 铁氧体棒的共振频率与长度的关系(12 cm、14 cm、18 cm、20 cm)

3.3. 材质的影响

从图 5 可以看出，同样长度的镍锌和锰锌铁氧体由于杨氏模量和密度的不同，故其内部声速不同，进而固有频率不同，所以谐振峰的位置不同。同时二者磁致伸缩系数以及磁导率也不同，锰锌铁氧体的磁致伸缩系数与磁导率较高，使得二者声压级的最大值不同。

3.4. 线圈电压的影响

实验材料为 20 cm 的镍锌铁氧体棒，信号频率为 10,000 Hz。

从图 6 可以看出, 当线圈电压增大的时候, 内部磁场会随之增大, 当磁场增大到一定程度, 磁致伸缩趋于饱和, 声压级趋于一个最大值。

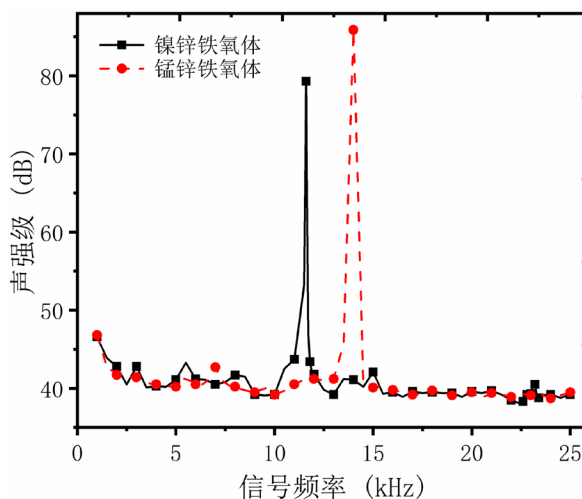


Figure 5. Variation of magnetoacoustic resonance characteristics of 20 cm nickel-zinc and manganese-zinc ferrite bars with frequency

图 5. 20 cm 镍锌和锰锌铁氧体棒磁声谐振特点随频率的变化

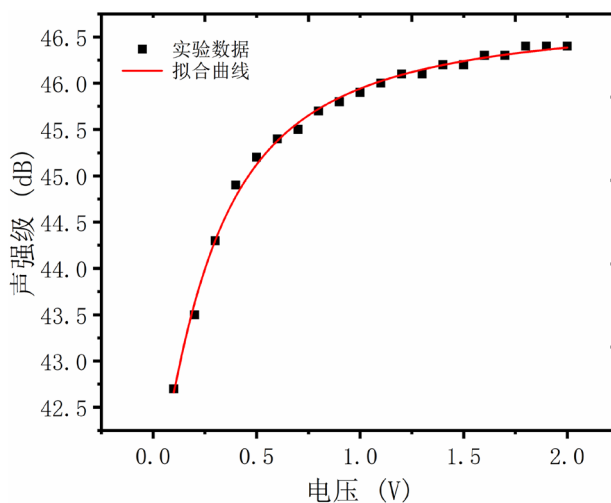


Figure 6. Variation of magnetoacoustic resonance intensity level with voltage for 20 cm nickel-zinc ferrite rods

图 6. 20 cm 镍锌铁氧体棒磁声谐振声强级随电压的变化

3.5. 线圈参数

实验材料均为 20 cm 镍锌铁氧体棒, 采用同线径不同长度的线圈以及同长度不同线径的线圈。线圈参数如表 2 所示, 实验结果如表 3 所示。

从实验结果上来看, 改变线圈参数, 并不会对结果造成明显影响。其本质在于软磁铁氧体通过两个过程完成磁化, 磁畴位移和磁畴旋转, 磁畴位移发生在前, 然后才是磁畴旋转。磁致伸缩效应主要就是由磁畴位移和磁畴旋转造成的, 此时由于软磁铁氧体良好的磁导率, 内部大部分磁畴的方向已经趋于同向了。故改变线圈参数除了改变磁场大小外并不会对于磁致伸缩效应产生太大的影响。不同的线圈参数只是提供了不同的磁场大小, 以及进一步帮助磁化均匀, 降低噪声。

Table 3. Variation of magnetoacoustic resonance characteristics of ferrite bars with different coils
表 3. 不同线圈下铁氧体棒的磁声谐振特点变化

编号	长度(mm)	线径(mm)	线圈电压(V)	共振频率(kHz)	声强级(dB)
1	40.18	0.52	1.50	11.6	78.9
2	50.08	0.52	1.50	11.6	79.2
3	60.14	0.52	1.50	11.6	79.2
4	60.14	0.32	1.50	11.6	79.3

由于实验条件的限制,关于声音的结构性损耗,以及整个铁氧体棒发声的声场分布仍需要进一步研究解决,并会进一步研究磁致伸缩薄膜材料的声磁共振现象[17]。同时由于磁偶极子旋转是需要响应时间的,故当频率过高的时候,会出现磁偶极子旋转速度跟不上磁场变化的频率,进而导致的该效应的减弱,需要进一步探究[18] [19]。

4. 结论

本文研究了铁氧体材料在高频信号发生器供电线圈中的声学磁力谐振效应。从实验上定量研究了镍锌和锰锌铁氧体在交流磁场信号下的磁致伸缩现象,采集了相应的磁声信号,并系统研究了交流磁场频率、铁氧体棒的长度、材料类型、线圈电压等实验变量对磁声共振现象的影响。研究结果表明磁声共振现象的本质是磁致伸缩效应引起的机械振动频率与固有频率形成了谐振体系,进而产生了声学磁力谐振效应。铁氧体的声学磁力谐振效应与交流磁场频率、铁氧体棒的几何形状、材料类型等参数精密相关,需要进行系统地分析,会对材料在具体应用时产生明显的影响。

致 谢

本论文感谢秦惠箬与李政道中国大学生见习进修基金的资助。

参考文献

- [1] Guan, X., Dong, X. and Ou, J. (2008) Magnetostrictive Effect of Magnetorheological Elastomer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **320**, 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.05.043>
- [2] Turner, R.C., Fuierer, P.A., Newnham, R.E., et al. (1994) Materials for High Temperature Acoustic and Vibration Sensors: A Review. *Applied Acoustics*, **41**, 299-324. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(94\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0003-682X(94)90091-4)
- [3] Hurkala, M. (2013) Noise Analysis of High Voltage Capacitors and Dry-Type Air-Core Reactors. Doctoral Dissertation, Aalto University, Espoo.
- [4] Bian, L., Wen, Y., Wu, Y., et al. (2018) A Resonant Magnetic Field Sensor with High Quality Factor Based on Quartz Crystal Resonator and Magnetostrictive Stress Coupling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **65**, 2585-2591. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2827382>
- [5] Annareddy, V., Palneedi, H., Yoon, W.H., et al. (2017) A pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Sensitivity ac Magnetic Field Sensor Based on Magnetolectric Composites Using Low-Loss Piezoelectric Single Crystals. *Sensors and Actuators A: Physical*, **260**, 206-211. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.017>
- [6] Jiles, D.C. and Atherton, D.L. (1984) Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Journal of Applied Physics*, **55**, 2115-2120. <https://doi.org/10.1063/1.333582>
- [7] Tyagi, S., Baskey, H.B., Agarwala, R.C., et al. (2011) Synthesis and Characterization of Microwave Absorbing SrFe₁₂O₁₉/ZnFe₂O₄ Nanocomposite. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **64**, 607-614. <https://doi.org/10.1007/s12666-011-0068-7>
- [8] Singh, J.P., Payal, R.S., Srivastava, R.C., Agrawal, H.M. and Chand, P. (2010) Effect of Thermal Treatment on the Magnetic Properties of Nanostructured Zinc Ferrite. *Journal of Physics: Conference Series*, **217**, Article ID: 012108. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/217/1/012108>
- [9] Qin, M., Shuai, Q., Wu, G., et al. (2017) Zinc Ferrite Composite Material with Controllable Morphology and Its Applications. *Materials Science and Engineering: B*, **224**, 125-138. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.07.016>

-
- [10] Sutka, A., Stingaciu, M., Jakovlevs, D. and Mezinskis, G. (2014) Comparison of Different Methods to Produce Dense Zinc Ferrite Ceramics with High Electrical Resistance. *Ceramics International*, **40**, 2519-2522. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.07.093>
- [11] 关小蓉, 张剑光, 朱春城, 等. 锰锌, 镍锌铁氧体的研究现状及最新进展[J]. 材料导报, 2006, 20(12): 109-112.
- [12] Astrov, D.N. (1960) The Magnetoelectric Effect in Antiferromagnetics. *Soviet Physics JETP*, **11**, 708-709.
- [13] Ryu, J., Priya, S., Uchino, K., *et al.* (2002) Magnetoelectric Effect in Composites of Magnetostrictive and Piezoelectric Materials. *Journal of Electroceramics*, **8**, 107-119. <https://doi.org/10.1023/A:1020599728432>
- [14] Martienssen, W. and Warlimont, H. (2006) Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data. Springer Science & Business Media, Berlin.
- [15] Fiorani, D. (2005) Surface Effects in Magnetic Nanoparticles. Springer, New York.
- [16] Fiorani, D., Testa, A.M., Lucari, F., D'Orazio, F. and Romero, H. (2002) Magnetic Properties of Maghemite Nanoparticle Systems: Surface Anisotropy and Interparticle Interaction Effects. *Physica B*, **320**, 122-126. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(02\)00659-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(02)00659-2)
- [17] Chen, C.H., Niu, H., Yan, D.C., *et al.* (2012) Ferromagnetic GeMn Thin Film Prepared by Ion Implantation and Ion Beam Induced Epitaxial Crystallization Annealing. *Applied Physics Letters*, **100**, Article ID: 242412. <https://doi.org/10.1063/1.4729752>
- [18] Kodama, R.H. and Berkowitz, A.E. (1999) Atomic-Scale Magnetic Modeling of Oxide Nanoparticles. *Physical Review B*, **59**, 6321. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.6321>
- [19] Kodama, R.H., Berkowitz, A.E., McNiff, E.J. and Foner, S. (1996) Surface Spin Disorder in NiFe₂O₄ Nanoparticles. *Physical Review Letters*, **77**, 394. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.394>