

## 微型屏蔽线圈式的磁电效应测试方法研究

施展, 黄群, 徐明月, 刘兴军  
(厦门大学 材料学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 磁电效应是施加磁场产生电极化的物理效应, 动态法测量磁电转换系数, 是测量磁电材料的磁电效应的一类主要方法。本文尝试设计了一种屏蔽线圈式的微型磁电测试方法, 改变了以往的电磁屏蔽方式, 从屏蔽样品改为屏蔽线圈, 并采用单线圈的设计, 从而扩大了样品空间, 提供一种可以微型化, 便于嵌入低温系统的动态法磁电效应测试方法。

**关键词:** 磁电效应; 测试方法; 动态法; 屏蔽; 微型测试系统; 低温系统

**doi:** 10.14106/j.cnki.1001-2028.2017.07.012

**中图分类号:** O482.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-2028 (2017) 07-0062-04

## A miniature dynamic magnetoelectric test method by shielding coil

SHI Zhan, HUANG Qun, XU Mingyue, LIU Xingjun

(College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China)

**Abstract:** Magnetoelectric effect is the effect that applied magnetic field induces an electric polarization. The dynamic method is the main test method of magnetoelectric coefficient. Here, this article attempted to design a miniature test system by shielding coil. In this design, shielding method was changed from sample-shielding to coil-shielding and the coil was changed from dual-coils to single-coil. After changing, the sample space is enhanced obviously, while the test system size is very small. This study provides a miniature dynamic magnetoelectric test method which can be easily embedded into general cryogenic system.

**Key words:** magnetoelectric effect; measurement method; dynamic method; shielding; miniature test system; cryogenic system

材料的磁电效应通常指的是施加磁场后材料产生电极化的效应。产生的电极化除以施加磁场的值, 称为材料的磁电转换系数, 是衡量材料的磁电效应大小的一个性能指标。

最早磁电效应是在  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  单晶体<sup>[1-4]</sup>中被发现的, 后来一大类单相的化合物都被发现具有磁电效应。磁电效应和材料的晶体学对称性、d 轨道电子的排布都有关系, 通常要求化合物同时具有铁磁或者反铁磁性, 以及压电效应。至今为止, 只有很少的十几种化合物中发现具有磁电效应, 而且通常要在很低的温度下才能被检测到。这是因为这些化合物的铁磁居里温度或者反铁磁奈尔温度都较低, 低于居里温度/奈尔温度才能具有铁磁、反铁磁性。另一大类具有磁电效应的材料是通过复合磁致伸缩材

料和压电材料产生的。这类复合型的磁电效应是一种间接效应, 实现过程是施加磁场导致磁致伸缩材料发生磁致伸缩效应, 产生的应变传递给压电材料, 压电材料产生电极化(电压)。磁致伸缩材料和压电材料都很容易在室温下获得, 因此复合型的磁电效应很容易在室温下实现。

磁电效应的检测具有很多不同原理, 大致可以分为两大类, 一类是静态法<sup>[5]</sup>, 一类是动态法<sup>[6-9]</sup>。静态法的原理是直接利用磁电效应的定义来检测, 即施加一个直流磁场  $H_{DC}$ , 测量样品产生的电极化(或者极化电荷累积产生的电压  $V$ )。静态法十分简单直接, 但是实际实现有一定技术困难。主要原因在于电极化属于静电电荷积累, 对测量线路的绝缘度要求很高。实际上检测线路都有一定的直流电阻,

收稿日期: 2017-04-17      通讯作者: 施展

作者简介: 施展 (1980 - ), 男, 福建晋江人, 副教授, 主要从事电子器件、复合材料研究, E-mail: shizhan@xmu.edu.cn。

网络出版时间: 2017-06-29 10:24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1241.TN.20170629.1024.012.html>

材料本身也会有一定的电阻，因此采用静态法测量到的电极化很容易通过线路和材料本身形成漏电流通道，导致测量结果随时间发生明显衰减。为了避免这一缺陷，后来出现了动态法，即在一个大直流偏置磁场  $H_{DC}$  上，叠加一个很小的微扰磁场  $dH$ ，然后通过电荷放大器测量产生的电极化，或者通过高阻抗电压表测量电极化累积产生的电压  $dV$ 。采用动态法具有明显的优势，大直流偏置磁场产生的电极化迅速被衰减，而小微扰磁场通常是正弦变化的交变磁场，可以连续地激励样品产生连续的电荷/电压输出，大大降低了对测量仪表的绝缘度的要求。动态法大大降低了对检测设备的需求，成为磁电转换系数的一种通用测试方法。国内多家单位都报道了采用动态法进行磁电转换系数的测试。比如清华大学的南策文课题组建立了采用电荷放大器、亥姆赫兹线圈、电磁铁为主要部件的动态法磁电测试系统，并带有样品旋转功能<sup>[6]</sup>。北京科技大学潘德安课题组报道了采用类似的方法，结合 LabVIEW 信号处理程序建立的虚拟锁相放大器，组建的动态法测试系统<sup>[9]</sup>。厦门大学施展课题组报道了采用动态法建立的快速测试系统<sup>[7]</sup>和多参数同步测试系统<sup>[8]</sup>。这些测试系统都采用了动态法的基本测试原理，不同的地方在于一些样品角度、信号采集、磁场扫描方式的具体实现方式有所区别。

长期以来，动态法检测磁电转换系数时，都采用对样品进行电磁屏蔽的做法，以消除激励线圈自身产生的电场在样品上引起的电压。以往的测试系统中，广泛采用亥姆赫兹线圈产生微扰磁场<sup>[6-9]</sup>。亥姆赫兹线圈是一对完全一样的线圈，线圈之间的距离等于线圈半径，可以在两个线圈的中心位置产生均匀的磁场。为了获得较大的样品空间，屏蔽腔的体积也必须相应增大，亥姆赫兹线圈的尺寸也需要增加，并且亥姆赫兹线圈的尺寸基本上为样品空间的两倍。当测量装置需要放入体积较小低温测试装置（如 Quantum Design 公司的物性综合测试系统 PPMS）中时，以往的动态法测试方法将很难实现。为了增加样品空间，实现测量装置的小型化，本文设计了一种新的测试方法，通过改变屏蔽方式，选择单线圈的方式，制作了能够放入低温系统的测量单元。

## 1 设计原理

根据法拉第电磁感应定律，不论屏蔽材料的形状和拓扑结构如何，导体内部的电场为零。根据这一原理，采用屏蔽线圈式的测试装置，屏蔽层之外

的空间，也相当于一个被屏蔽层包裹的封闭空间，满足电场为零的条件。屏蔽线圈的原理如图 1 所示，屏蔽罩完全包裹电磁线圈，屏蔽罩与驱动电源的地线相连，构成了对线圈产生电场的屏蔽。处于线圈外部的样品，不会接收到电场的影响，只感受到线圈产生的磁场的影响。

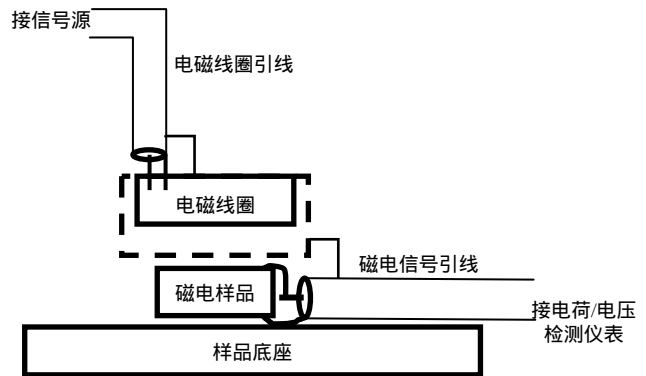


图 1 测试系统组成方框图

Fig.1 Block diagram of the test system

图 2 给出了测试装置的示意图。测试装置的底座完全设计成为与 PPMS 系统多功能样品测试杆匹配的插针式底座。电磁线圈设计为扁平的单层线圈，完全包裹在屏蔽罩内。单层线圈的设计与之前报道的测试装置中常用的亥姆赫兹线圈具有显著不同。亥姆赫兹线圈是常见的可以提供较小均匀磁场的线圈装置，相比之下，单层线圈只在中心位置提供比较均匀的磁场。但在狭小的空间内（小于 20 mm 的低温腔体内），如果采用亥姆赫兹线圈，样品实际可以提供的均匀磁场区，也依旧只有 5 mm 左右，并且较为封闭的双线圈将使样品的装卸十分困难。综合考虑，本设计采用了扁平的单线圈，大大提升了样品空间的开放性，方便了样品的安装。

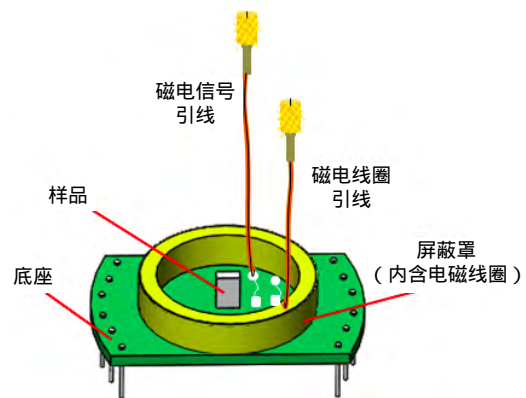


图 2 屏蔽线圈式的磁电微型测试单元示意图

Fig.2 Illustration of a miniature dynamic magnetoelectric test device by coil shielding

测量单元安装在 PPMS 多功能测试杆后的效果示意图如图 3 所示。从图中可以看出，在 20 mm 的空间里，线圈加屏蔽层只占用了 2 mm 的空间，依旧保留了 18 mm 的样品空间。扁平线圈的高度也只有 2 mm，几乎不影响样品的装夹。

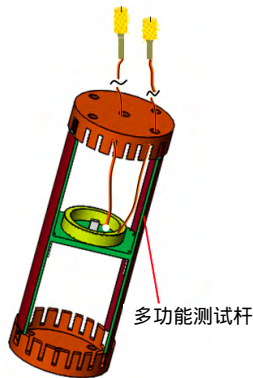


图 3 测试单元安装在 PPMS 系统后的示意图

Fig.3 Illustration of the test device installed in PPMS system

## 2 结果与讨论

图 4 为采用有限元方法模拟的线圈在静态电流的激励下产生的磁场。线圈的直径为 20 mm，厚度为 2 mm，激励条件为 4.08 安匝。从图 4 中可以看出，在靠近线圈的部位，磁场具有较大的值，而在线圈的中心部位，有一个直径大约为 6 mm 的均匀磁场区，磁感应强度的值为 119.4 A/m。由于磁场的大小随线圈直径的减小而增加，因此，虽然单线圈的匝数不能做得很多，但是减小的直径依旧保证了能产生和原有亥姆赫兹线圈相当的磁场强度(127.36 A/m)。模拟结果表明，所设计的电磁线圈，可以提供较大的样品空间，而且保证了一定的磁场强度。

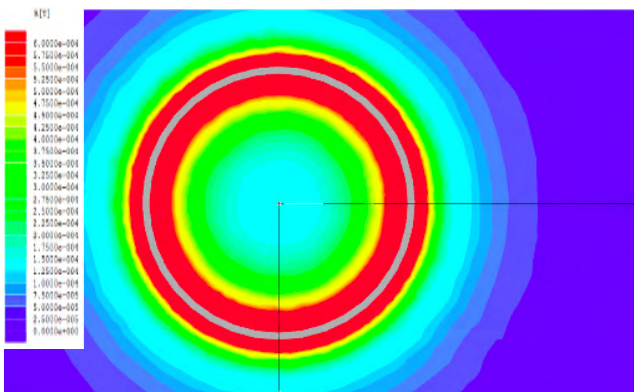


图 4 有限元模拟的磁场空间分布 (灰色为电磁线圈)

Fig.4 Spatial distribution of static magnetic field by finite element simulation

微型磁电测试单元实际的中心磁场随电压频率的变化关系，如图 5 所示。在电压频率为 1 kHz 时，中心磁场强度为 111.44 A/m，这与图 4 模拟的中心磁场强度 119.4 A/m 十分接近。

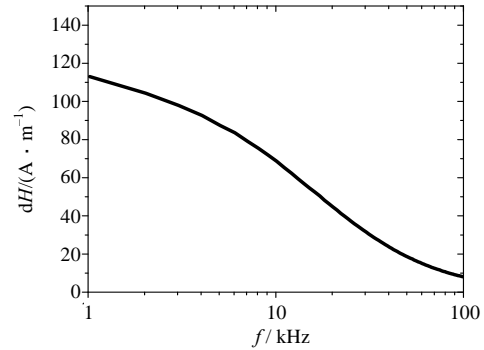


图 5 实际测得的磁场强度随频率变化关系

Fig.5 The actual measured magnetic field intensity changed with voltage's frequency

采用该测试单元，对 3 mm×3 mm×5 mm Ni/PZT 磁电材料的测试结果如图 6 所示。在 1 kHz 下，激励磁场强度为 111.44 A/m。采用 PPMS 系统对样品施加 -0.2~0.2 T 的扫描磁场，采用锁相放大器测量样品产生的电压。调用 PPMS 自带的 LabVIEW 例程，可以同步采集温度、磁场，形成如图 6 所示的磁电回线。从图 6 中可以看出，测量结果与传统屏蔽样品式的测量结果在误差范围内十分吻合，表明了屏蔽线圈式的屏蔽方式，也起到了同样的屏蔽效果，实现了准确的测量。变换不同的温度，可以得到不同温度下的磁电回线。该测试方法实现了与 PPMS 系统兼容，大大提高了该测试方法的通用性。作为一种新型的性能测试拓展模块，该方法可以依托已有的 PPMS 系统，迅速得到推广应用，成为磁电性能的通用测试方法。

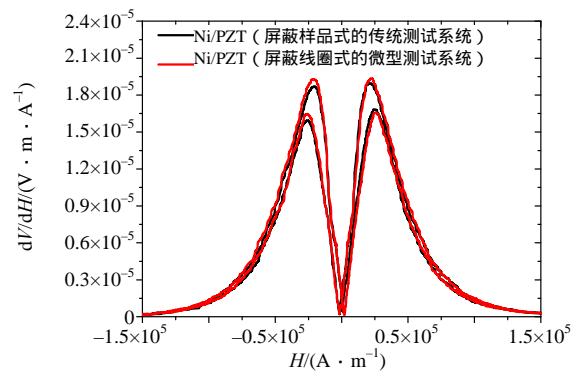


图 6 Ni/PZT 磁电转换系数  $dV/dH$  随外加直流磁场  $H_{DC}$  的变化趋势

Fig.6 The change of Ni/PZT magnetoelectric coefficient  $dV/dH$  with DC magnetic field  $H_{DC}$



### 3 结论

根据法拉第感应定律，本文设计了屏蔽线圈式的微型动态磁电效应的测量方法。通过扁平线圈、屏蔽线圈的设计，有效地实现了电场的屏蔽，并扩大了样品的测试空间。实际检测结果表明，该测试方法可以很好实现与 PPMS 系统的兼容，作为 PPMS 的拓展功能，成为磁电性能测试的通用方法。

#### 参考文献：

- [1] ASTROV D. The magnetoelectric effect in antiferromagnetics [J]. Sov Phys JETP, 1960, 11(3): 708-9.
- [2] ASTROV D. Magnetoelectric effect in chromium oxide [J]. Sov Phys JETP, 1961, 13(4): 729-33.
- [3] FOLEN V, RADO G, STALDER E. Anisotropy of the magnetoelectric effect in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. Phys Rev Lett, 1961, 6(11): 607.
- [4] RADO G, FOLEN V. Observation of the magnetically induced magnetoelectric effect and evidence for antiferromagnetic domains [J]. Phys Rev Lett, 1961, 7(8): 310.
- [5] WEI W, JINGJING Y, JIE W, et al. Single dc magnetic field tunable electromechanical resonance in Terfenol-D/PZT/Terfenol-D trilayer composites [J]. J Magn Magn Mater, 2014, 36 ( 366 ): 40-43.
- [6] 施展, 南策文, 蔡宁, 等. 磁电材料的磁电系数测试仪及其测试方法: CN200610165250.6 [P]. 2006-12-15.
- [7] 施展, 邓数文, 陈来柱, 等. 一种磁电材料磁学性能同步测试装置: CN103344926A [P]. 2013-10-09.
- [8] 施展, 曾德武, 金大军, 等. 一种连续施加扫描磁场的磁电回线测试方法及其装置: CN101788653A [P]. 2010-07-28.
- [9] LU J, PAN D A, YANG B, et al. Wideband magnetoelectric measurement system with the application of a virtual multi-channel lock-in amplifier [J]. Meas Sci Technol, 2008, 19(4): 045702.

(编辑：陈丰)

• 国家百种重点期刊    • 国家一级电子精品期刊    • 中国科技核心期刊  
 • 美国 CA 收录        • 英国 IEE INSPEC 收录    • Electr Electron Abstr 收录    邮发代号：62—36

# 电子元件与材料

## 月刊

## 您

想找到世界新技术，优性能的电子元件、电子材料吗？  
 想掌握本行业发展动态，了解国内外同行在做什么吗？  
 想知道新的国际市场信息，寻求好的合作伙伴吗？  
 ——请关注本刊相关栏目。

## 本

刊集权威性、前瞻性和实用性为一体，贴近市场，贴近企业，  
 本行业中从事管理、决策、科研、设计、制造、销售、采购  
 部门和大专院校不可缺少的读物。

主  
要  
栏  
目

发展动态  
专家论坛  
市场调研  
元器件应用  
企业之窗

研究与试制  
博士生论文  
经验点滴  
技术快讯  
标准与可靠性

## 欢迎订阅 2018 年 《电子元件与材料》期刊！

**订阅** 全年 12 期，每期定价 16 元，全年 192 元（免邮资费），如需挂号请另加挂号费每件每次 3 元。  
 请到本部邮购或到 当地邮局订阅

**汇款** 成都市一环路东二段 8 号宏明商厦 702 室    电子元件与材料杂志社    邮编：610051  
 或中国工商银行成都市沙河支行营业室    户名：电子元件与材料杂志社    帐号：4402211009006993354

发行热线：028-84399669    发行主管：朱 蓓    手机：13618058457    传真：028-66130269    E-mail: zhubei5148@163.com

### —> 您的信息 <—

姓名 \_\_\_\_\_ 职称/职务 \_\_\_\_\_ 主要产品 \_\_\_\_\_  
 公司 \_\_\_\_\_ 地址 \_\_\_\_\_  
 网址 \_\_\_\_\_ E-mail \_\_\_\_\_  
 电话 \_\_\_\_\_ 传真 \_\_\_\_\_ 邮编 \_\_\_\_\_