

自适应智能电磁防护材料测试方法研究

成伟, 王妍, 王贇, 赵敏, 曲兆明, 卢聘, 王庆国

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

摘要: **目的** 在强电磁场环境下研究自适应智能电磁防护材料的相变特性。**方法** 针对自适应智能电磁防护材料相变前后电导率的变化范围大、需要强场激励状况, 考虑测试系统强场生成、大动态范围、测试精度以及相应的绝缘性和较高的安全性要求, 采用电容充放电原理设计强场激励测试电路, 搭建绝缘环境, 确保操作的安全性和测试数据的可靠性。**结果** 利用测试系统对现有商业化电阻器进行验证试验, 得到的特性曲线与理论相一致。**结论** 测试系统能够满足自适应智能电磁防护材料相变特性试验的需求, 可获取有效且可靠的测试数据。

关键词: 智能电磁防护材料; 电容充放电方法; 强场环境

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.04.007

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)04-0032-04

Testing Method for Adaptive Intelligent Electromagnetic Shielding Material

CHENG Wei, WANG Yan, WANG Yun, ZHAO Min, QU Zhao-ming, LU Pin, WANG Qing-guo
(Research Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Mechanical Engineering College,
Shijiazhuang 050003, China)

ABSTRACT: Objective To study on the phase transition phenomenon of adaptive intelligent electromagnetic shielding material in electromagnetic field environment. **Methods** Based on large range of conductivity change, requirement of strong electromagnetic field motivation of adaptive intelligent electromagnetic shielding material and considering strong electromagnetic field generation of testing system, large dynamic range, precision, corresponding insulation and high safety requirement, the capacitance charge-discharge principle was adopted to design a test circuit for strong electromagnetic field motivation and create an insulation environment to guarantee safety of operation and reliability test data. **Results** The characteristic curve obtained in the verification test on commercial resistor with the testing system was in line with the theory. **Conclusion** The testing system meets the demands of phase transition property test on adaptive intelligent electromagnetic shielding material and can obtain effective and reliable test data.

KEY WORDS: intelligent electromagnetic shielding material; capacitance charging and discharging method; electromagnetic field environment

强电磁环境会对正常工作的电子设备产生极大的干扰, 甚至直接导致设备损坏。利用防护材料屏蔽强电磁场是较为常用的一种电磁防护技术。传统的电磁防护材料在屏蔽强电磁场影响的同时, 对于具备收

发功能的电子设备也会产生阻碍, 影响设备的正常运行。与传统电磁防护材料相比, 新型智能化电磁防护材料在感知外部电场强度的变化后能快速调节其电磁性能, 即刻发生绝缘/导电相变现象, 电导率可以

收稿日期: 2017-01-21; 修订日期: 2017-02-21

作者简介: 成伟 (1981—), 男, 河北石家庄人, 工程师, 主要研究方向为高电压技术、高压电器及其智能化。

通讯作者: 王庆国 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁防护理论与技术。

提升 $10^2 \sim 10^5$ 倍。具有电场敏感、相变前后的电导率变化范围大、相变时间短、相变可逆等特点。能极大提高复杂电磁环境下电子设备的工作效率。

当前具有相变特性的金属氧化物晶体材料主要有 ZnO 和 VO_2 以及在它们的基础上掺杂各种添加剂的氧化物材料。对于 ZnO 及其掺杂氧化物的测试方法相对比较成熟，已经有标准可以参照。IEC1051-1:1991 和对应的 GB/T 10193—1997 就定义了氧化锌压敏电阻器的测试指标和测试方法。根据标准的规定，已经有研究人员开发出多种自动化测试系统^[1-4]，国外学者比如 E.J.Yoo, J.H.Kim 等人在研究 ZnO 相变机理时，使用了原子力显微镜 (AFM, atomic force microscope) 配合铬电极、电流放大器，形成 Cr/ZnO/Cr 结构，测试得到材料的伏安特性^[5]。二氧化钒 (VO_2) 是一种金属半导体相变氧化物，在 68°C 附近会发生相变效应，其电导率、透光率、磁化率等发生突变^[6-7]。2000 年研究发现，二氧化钒除了焦耳热效应外，电场也可以使其电阻发生非线性突变。哈佛大学的研究小组在文献[8]中综述了近年来各种阻态变换氧化物的机理、制备、测试等研究状况。

以上测试方法中材料厚度只有纳米级，属于小尺寸测量，所以不能满足测试大尺寸材料的要求。另外这些测试方法对于电场效应测试存在不足。比如，四探针法不能产生 MV/m 级别的均匀强场环境，对于大多数高临界场的材料无法测试；表面覆金属电极的方法存在金属原子扩散渗透到材料中导致材料性能变化的问题，有研究者提出 VO_2 相变导电的铜丝模型^[9]；对于电容测试方法，存在着由于薄膜极薄带来的电容变化非常微小以及相应的测试灵敏度偏小的问题。因此，迫切需要探索新的场致相变电磁防护材料的测试方法。鉴于笔者在后续研究中需要研究材料的动态快沿电磁脉冲辐射场的响应特性和防护性能，文中探索研究了一种基于电容充放电路理的大尺寸自适应智能电磁防护材料相变特性的测试方法，可以在保证被测材料和测试设备安全的情况下确定智能自适应相变材料的临界相变阈值、相变前后的变化规律等，为材料研制和评价提供了一种有效方法。

1 测试原理与系统设计

1.1 测试原理

智能材料的特性测试是研究电导率随场强变化的规律，智能材料的预估阻值在 $\text{M}\Omega$ 以上，属于高电阻。根据测量标准，高电阻的测量方法有两种：伏安法和比较法。经分析比较，伏安法测量高电阻的测试方法更直接、方便。根据场致相变材料的普遍特性，对测试系统提出如下要求。

- 1) 系统可提供强场范围： $0 \sim 3 \text{ MV/m}$ 。
- 2) 绝缘要求：绝缘强度满足 $2 \text{ MV}/(\text{cm} \cdot \text{MPa})$ ，避免沿面放电、空气击穿等环境因素的影响，保证能够正常测试及人员和设备安全。
- 3) 大动态范围： $0 \sim 600 \text{ A}$ 或 $1 \sim 6000 \text{ V}$ 。
- 4) 小电流小电压测量：采样电压精度为 $1 \mu\text{V}$ ，采样电流精度为 1 nA 。

根据自适应智能材料的相变特性设计了如图 1 所示电路，作为智能材料测试系统的基本原理电路。

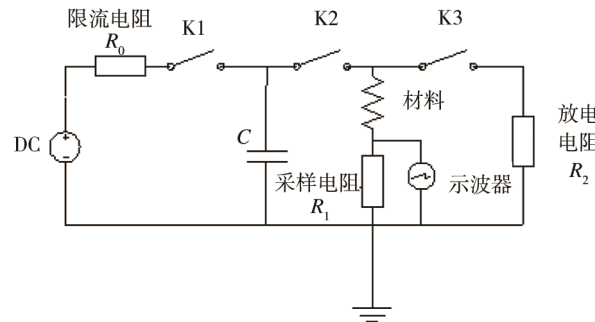


图 1 测试系统原理

1.2 测试系统设计

1.2.1 系统组成设备的选取

从图 1 可知，测试系统包含高压直流电源、高压电容器、采样电阻、限流电阻、放电电阻、高压开关及高压绝缘导线。

电路中的电容器既要作储能装置，又要能承载电路中大动态电流变化，所以不能选取普通电容器，而应选用高压无感脉冲电容器。以防护高空核电磁脉冲为目标，目前最新的 HEMP 标准为 IEC61000-2-9，即幅度为 50 kV/m 的 $2.5/25 \text{ ns}$ 波形^[10]。测试系统每次向材料施加的电场时间应近似于最新 HEMP 标准的半脉宽，因此电容器放电时间常数最大为 25 ns 。

假设材料相变时的采样电阻为 10Ω ，则根据电容器时间常数^[12]可知， C 最大为 2.5 nF （忽略材料相变后的阻值）。因系统的设计测试范围为 $0 \sim 3 \text{ MV/m}$ ，则电容器的充电电压 $U=6 \text{ kV}$ （材料厚度为 2 mm ）。结合工程实际，电容器采用 100 kV ， $0.03 \mu\text{F}$ 的高压无感脉冲电容器。

采样电阻选用水电阻。水电阻阻值不受电压变化的影响，改变水溶液的浓度、电极的截面积或电阻的长度，可以制作阻值在 $10 \Omega \sim 100 \text{ k}\Omega$ 的电阻^[11]。

电源采用 NHWY6000-1 系列直流高频开关电源，输出电压 $0 \sim 6000 \text{ V}$ 连续可调，功率为 6 kW 。此电源输出电压稳定，输出电流较大，能快速完成电容器充电。

限流电阻和放电电阻的功率大小取决于电容器的储能、放电时间等，电容器储能 $Q = \frac{1}{2} CV^2$ ，纯电

阻热能 $Q = P \cdot t = UI t$ 。工程实际中, 限流电阻和放电电阻采用 $6\text{ k}\Omega$ 、 500 W 的高压无感电阻。

1.2.2 系统结构的设计

1) 气动开关。该测试系统属于高压测试, $K1$, $K2$, $K3$ 不能使用普通开关。为保证实验安全和避免电器串扰, 设计了一款气动开关, 如图 2 所示。此开关可允许大电流通过, 由于触点为半圆设计, 降低了电晕放电影响。通过气体推动气缸带动触点, 实现电路的闭合与断开功能。电路中的连接点间均采用 50 kV 高压绝缘导线。

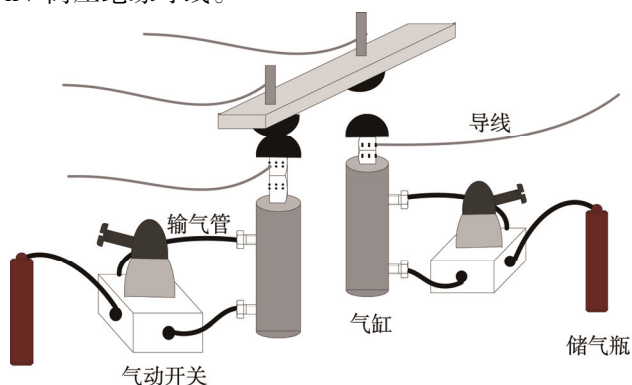


图2 气动开关

2) 材料夹具。夹具经 CST 仿真结果如图 3 所示。当材料两端施加 1 kV 电压, 距离为 10 mm 时, 获得的场强为 97 kV/m 。

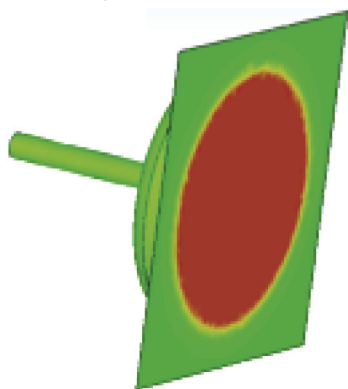


图3 夹具仿真

材料夹具设计为可移动式, 如图 4 所示。能够固定材料并施加稳定的压力, 通过紧固手柄的定位销保证电极与试样的良好接触, 被测材料的最小有效接触面积应大于电极的接触面积, 以便将接触电阻降至最低。两电极接触面平行一致, 必要时可在电极上加铜编织网或是在被测材料上涂导电胶, 避免接触不良, 影响测试结果。为了避免尖端放电, 电极各面沿、边均做倒角。

3) 绝缘环境。测试箱如图 5 所示, 其中充入六氟化硫绝缘气体, 避免材料沿面放电。六氟化硫绝缘气体是一种无毒、不燃烧、具有优异绝缘和灭弧性能

的气体^[13]。相同状态下是空气相对密度的 5 倍, 不易挥发, 易于实现绝缘测试环境。测试箱中加入调温板, 保证测试环境温度统一, 保证测试的准确性。

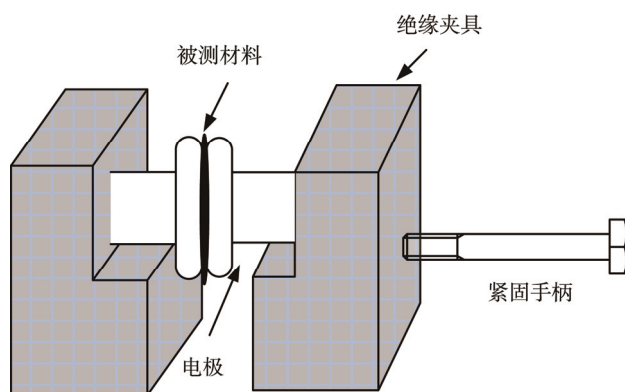


图4 夹具

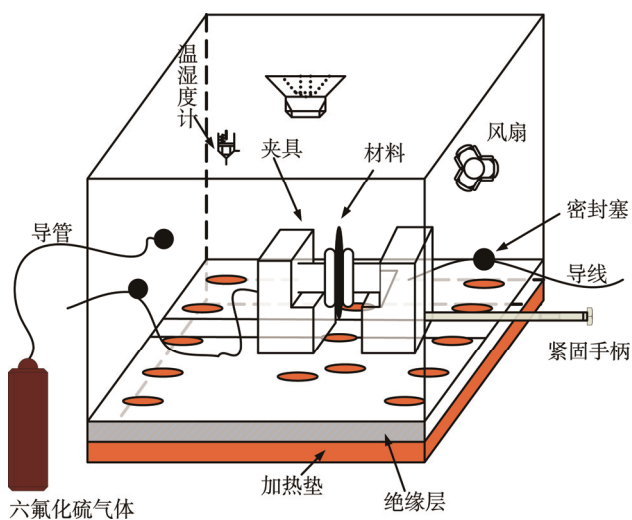


图5 测试箱

1.2.3 测试系统的工作流程

如图 1 所示, 高压直流电源通过限流电阻 R_0 经 $K1$ 对脉冲电容器充电 U , 当电容器充满后, 断开 $K1$ 闭合 $K2$, 电容 C 对材料进行放电, 若材料不能导通, 则示波器无读数, 此时加在材料两端的电压即为电容器输入电压 U 。若材料导通但未发生相变, 则示波器的峰值电压很小, 根据欧姆定律即可算出材料相变前的电导、电阻、材料两端的场强等参数; 若材料发生相变, 则示波器的峰值电压很大, 此时示波器峰值电压的数值与相变前的峰值电压之比在 10^2 倍以上。通过以上分析可得知, 可以调节电源输出电压 U , 直至材料发生相变。通过示波器的峰值电压数据、材料的厚度等参数可以得出材料相变前后电导与场强的变化曲线。材料测试结束后, 或需要进行更换材料时, 防止电容器未完全放电完毕, 此时应闭合 $K2$, $K3$ (常开开关), 先将电容器放电完毕, 保证人身安全。

2 系统验证

利用研制的系统对掺杂的 ZnO 电阻片进行测试, 测试结果如图 6—8 所示。

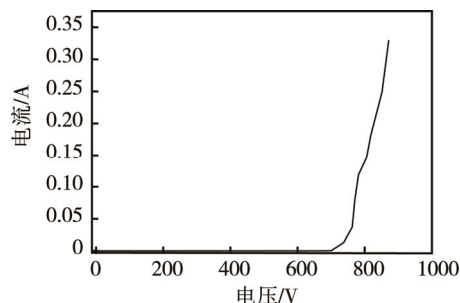


图6 氧化锌电阻片特性曲线

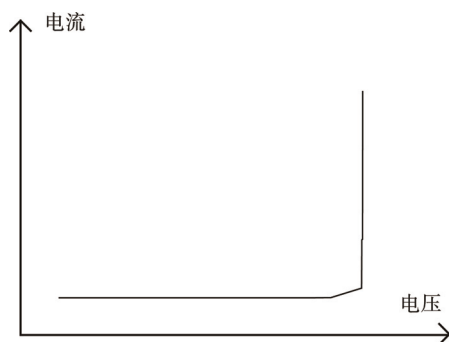


图7 金属氧化锌伏安曲线

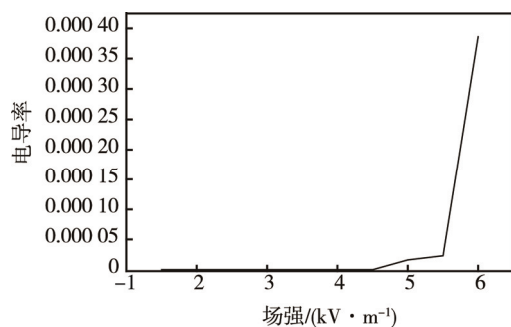


图8 银纳米线复合材料特性曲线

通过测试数据和特性曲线可以分析出, 材料的导电性能发生了量级变化。利用研制的系统和测试方法, 经过实验实际测试与掺杂 ZnO 电阻片的特性曲线、银纳米线复合材料特性曲线对比发现, 测试曲线与被测材料的特性相符。此测试方法能正确表征被测

材料的特性, 并且在测试过程中, 没有出现放电等现象, 说明绝缘设计满足要求。

3 结语

基于电容充放电原理的自适应智能电磁防护材料测试方法, 满足测试要求, 达到了设计目标, 可以作为大尺寸相变材料的一种测试方法, 有利于自适应智能电磁防护材料实验研究工作的进展。

参考文献:

- [1] 刘东社, 陈景亮, 弄菊仙, 等. 10 kV 避雷器直流参数测试仪的研制[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 63—64.
- [2] 宋爱民, 陈景亮, 姚学玲, 等. 智能型氧化锌电阻片交流参数测试系统的研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(12): 45—47.
- [3] 康会峰, 牛亚洲, 魏彩乔. 避雷器电阻片测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 3956—3961.
- [4] 李小建, 王赋. 金属氧化物避雷器阻性电流测试仪校验装置[J]. 云南电力技术, 2005, 33(2): 36—37.
- [5] YOO E J, KIM J H, SONG J H, et al. Resistive Switching Characteristics of the Cr/ZnO/Cr Structure[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2013, 13(9): 6395—6399.
- [6] 纳杰. 二氧化钒薄膜制备及掺 Au 对其相变性能影响的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [7] 范晓曦. 电场诱导二氧化钒薄膜相变研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [8] YANG Zheng, KO Chang-hyun, Ramanathan Shriram. Oxide Electronics Utilizing Ultrafast Metal -Insulator Transitions[J]. Annual Review of Materials Research, 2011, 41(1): 337—367.
- [9] 张凯亮, 韦晓莹, 王芳, 等. 氧化钒薄膜的制备及电致开关特性的研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(5): 656—659.
- [10] IEC61000-2-9, Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 2: Environment-section 9: Description of HEMP Environment -Radiated Disturbance[S].
- [11] 刘尚合. 静电理论与防护[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999: 382.
- [12] 张宝玲. 电子学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 236.
- [13] 周宝峰. 六氟化硫绝缘气体应用之我见[J]. 城市建设理论研究, 2014(22): 1—8.