

# 静电场中多孔 PZT95/5 铁电陶瓷的 通道电-机械击穿模型及分析\*

蒋一萱<sup>1</sup>, 王省哲<sup>1</sup>, 贺红亮<sup>2</sup>

(1. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃兰州 730000;  
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川绵阳 621999)

**摘要:** 作为爆电电源的多孔 PZT95/5 铁电陶瓷具有极为重要的工程应用背景, 但它在强电场作用下易发生电击穿失效, 从而影响其放电效率, 甚至造成电源失效。基于多孔 PZT95/5 铁电陶瓷材料在外电场作用下内部形成导电通道以致电失效的机制, 通过通道内部局部放电及通道电-机械击穿机理, 建立了导电通道诱导的多孔铁电陶瓷的电击穿模型并进行了相关的理论分析。基于本模型, 给出了不同孔隙率下铁电陶瓷的电击穿临界电场强度, 预测结果与实验测试结果吻合良好, 且材料孔隙率越大, 内部电击穿通道的特征尺寸越大, 导致铁电陶瓷材料的电击穿临界场强显著降低。

**关键词:** 多孔 PZT95/5 铁电陶瓷; 击穿电场强度; 导电通道; 孔隙率

**中图分类号:** O521.23

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11858/gywlxb.2014.06.006

## 1 引 言

铁电陶瓷( $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ ) PZT95/5 是指 Zr 和 Ti 的物质的量之比约 95/5、铁电相(Ferroelectric Phase, FE)和反铁电相(Anti-Ferroelectric Phase, AFE)共存的一类铁电功能性材料。经过电极化的 PZT95/5 铁电陶瓷在外部高压机械加载的作用下, 能够发生从铁电相到反铁电相的转变, 释放束缚电荷并形成高功率的瞬态电源, 因此 PZT95/5 铁电陶瓷广泛用于脉冲能源装置中<sup>[1-3]</sup>。近些年, 人们为了提高 PZT95/5 铁电陶瓷用作爆炸铁电体电源时的放电效率, 在材料制备过程中加入造孔剂, 从而制备出低密度的多孔 PZT95/5 陶瓷材料, 具有较优的电学和力学性能<sup>[4-9]</sup>。

与致密材料相比, 多孔 PZT95/5 铁电陶瓷材料的抗冲击能力增强, 铁电-反铁电冲击相变压力降低, 从而其放电效率得到提高<sup>[10-11]</sup>; 然而, 由于放电过程中所处的强电场, 及自身内部的孔隙、缺陷等因素影响, 多孔 PZT95/5 铁电陶瓷比致密材料更易产生电击穿失效现象, 从而影响其放电效率, 甚至导致电源失效。多孔 PZT95/5 铁电陶瓷在强电场作用下的电击穿现象是一个非常复杂的瞬态过程, 贯穿于材料内部, 往往难以观察。同时, 影响铁电陶瓷材料电击穿失效的临界电场强度的因素很多, 如制备工艺、微观结构、点缺陷、气孔、密度等<sup>[12-14]</sup>。目前, 关于多孔铁电陶瓷的研究主要集中在采用不同制备工艺提高材料的抗击穿能力上。Shin 等人<sup>[14]</sup>在研究  $\text{BaTiO}_3$  陶瓷的电击穿强度时发现, 随着烧结温度的

\* 收稿日期: 2012-06-25; 修回日期: 2012-09-09

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2010A0201005); 中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2010-17)

作者简介: 蒋一萱(1980—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事冲击波加载下铁电陶瓷力学特性研究. E-mail: jyix@lzu.edu.cn

通讯作者: 王省哲(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事电磁固体力学研究. E-mail: xzwang@lzu.edu.cn

提高,孔洞的尺寸增大,材料的电击穿强度降低;杨洪<sup>[15]</sup>利用传统固相法、非均相沉淀法、热压和陶瓷复合技术等方法,制备出不同微观结构和性能的 PZT95/5 型铁电陶瓷,其中利用热压烧结方式制备的 PZT95/5 陶瓷抗击穿强度最高。也有部分工作对多孔铁电陶瓷材料的击穿特性进行了描述。Geis 等人<sup>[16]</sup>发现,PZT53/47 铁电陶瓷的抗击穿能力随材料孔隙率的增加而线性降低;曾涛<sup>[17]</sup>通过实验测试不同造孔剂、不同孔隙率铁电陶瓷材料的击穿电场强度,给出了击穿场强随孔隙率变化的规律,并采用 Gerson 等人提出的串联孔洞模型<sup>[18]</sup>解释孔隙率对多孔 PZT95/5 铁电陶瓷的抗电击穿强度的影响,指出微裂纹和不规则的本征孔洞是容易发生电击穿的弱点处。近年来,基于实验观测的固体介电质材料的电击穿通道等微观图像,一些学者从电击穿机制(如热击穿、电-机械击穿、弱点击穿、本征击穿等)入手,研究电击穿失效的机理<sup>[19-20]</sup>,给出了定性解释<sup>[21]</sup>。但由于材料内部缺陷的随机性及多样性,相关理论和模型对临界电场的预测往往与实验结果不符,甚至相差几个数量级,定量预测模型的研究也少有开展。

基于固体电介质的通道电-机械击穿机理,及铁电陶瓷孔洞局部放电理论,本研究拟建立一种多孔铁电陶瓷导电通道诱导的电击穿模型,通过分析铁电陶瓷材料的通道裂纹扩展所需克服的总电-机械能量,预测静电场中多孔铁电陶瓷材料的临界击穿电场强度,并与材料孔隙率、介电常数、微观机制通道特征半径等建立关联。

## 2 静电场中多孔铁电陶瓷的电击穿失效模型

考虑一静电场作用下的多孔铁电陶瓷材料,假设击穿通道从材料内部的孔洞或裂纹、缺陷处开始,端部呈半径为  $r$  的半球形。记通道扩展方向的长度为  $dl$ ,体积为  $dV$ ,则导电通道内部的静电能  $W_{es}$  可表示为

$$W_{es} = \frac{1}{2} \mathbf{D} \mathbf{E} dV = \frac{1}{2} \mathbf{D} \mathbf{E} \pi r^2 dl \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}$  为导电通道端部孔洞处的电场强度; $\mathbf{D}$  为电位移矢量,且有  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ ,  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_r$  分别是真空介电常数和铁电陶瓷材料的相对介电常数。

一般而言,由于材料内部存在裂纹,使电场非均匀分布,因此通道裂纹内部的电场与外加电场的分布不同。在外加电场的作用下,通道内的气体被电离为导体,导致孔洞表面产生感应电荷,同时孔洞内也存在空间自由电荷。这两部分电荷使孔洞周围的电场发生变化,从而引起孔洞局部放电<sup>[22-23]</sup>。为了分析方便,不妨假设通道内的电场  $\mathbf{E}$  均匀分布,且与外电场  $\mathbf{E}_0$  存在如下关系

$$\mathbf{E} = h \mathbf{E}_0 \quad (2)$$

式中: $h$  为电场局部分布因子。它与铁电陶瓷材料的介电常数及通道形状有关,可以表示为<sup>[24]</sup>

$$h = \frac{k \epsilon_r}{1 + (k - 1) \epsilon_r} \quad (3)$$

式中: $k$  为无量纲常数,与通道尺寸和取向有关。考虑一般情形,可将通道看作椭球形状( $a, b$  分别为长、短半轴),当  $a/b \ll 1$  时,表示一沿电场方向的微裂纹通道,即

$$k = \begin{cases} \frac{\left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left( \frac{b}{a} \right)^2 \left\{ \sqrt{\left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1} - \arctan \left[ \sqrt{\left( \frac{b}{a} \right)^2 - 1} \right] \right\}} & a/b < 1 \\ 3 & a/b = 1 \end{cases} \quad (4)$$

进一步,通道裂纹的电-机械能可表示为

$$W_{em} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\gamma} dV = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\gamma} \pi r^2 dl \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}^2 / 2$ ,为静电场引起的 Maxwell 应力; $\boldsymbol{\gamma} = \boldsymbol{\sigma} / Y$  为应变, $Y$  为杨氏模量。结合(1)式~(5)式,通道处的总能量可表示为静电能与电-机械能之和,即

$$W_{es} + W_{em} = \frac{1}{2} \mathbf{DE} \pi r^2 dl + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\gamma} \pi r^2 dl = \left( \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r h^2 \mathbf{E}_0^2 + \frac{\epsilon_0^2 \epsilon_r^2 h^4}{8Y} \mathbf{E}_0^4 \right) \pi r^2 dl \quad (6)$$

固体介质的通道电-机械击穿模型认为,材料内部存在通道裂纹,在外电场作用下,导电通道裂纹的能量为静电能和电-机械能(弹性能)之和。随着外加电场的增强,通道裂纹开裂、蔓延扩展,此时需要克服通道的表面能  $W_{fs}$ 。当外部静电能和电-机械能高于通道裂纹的表面能时,电介质被击穿破坏<sup>[25-26]</sup>,相应的表面能表示如下

$$W_{fs} = 2G\pi r dl \quad (7)$$

式中: $G$  为铁电陶瓷材料的机械能释放率。铁电陶瓷的临界机械能释放率  $G_c$  一般为  $10 \sim 20 \text{ J/m}^2$ <sup>[27]</sup>。

导电通道扩展以致铁电陶瓷材料击穿破坏的临界准则为

$$W_{es} + W_{em} \geq W_{fs} \quad (8)$$

结合(6)式、(7)式,并求解(8)式,不难得到电击穿的临界电场强度  $E_c$  为

$$E_c = \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \left[ \frac{2}{r\epsilon_0\epsilon_r} (\sqrt{r^2 Y^2 + 4G_c r Y} - rY) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

为了表征多孔材料的相关电性参数和力学参数,以致密 PZT95/5 铁电陶瓷的相关参数为基准,采用多孔材料性能表征方法<sup>[28-29]</sup>,获得多孔 PZT95/5 陶瓷的相对介电常数及等效杨氏模量

$$\epsilon_r = \epsilon_r^0 \left[ 1 - \left( \frac{p}{k_s} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (10)$$

$$Y = Y^0 (1 - \alpha p)^n \quad (11)$$

式中: $\epsilon_r^0$ ,  $Y^0$  分别对应于致密 PZT95/5 铁电陶瓷的相对介电常数和杨氏模量; $p$  为多孔材料的孔隙率; $k_s$  为孔的形状因子,对球形孔一般取  $k_s = 1$ ,不规则形状孔取  $k_s = 0.5$ ;  $\alpha, n$  为材料常数。对于一些多孔 PZT95/5 铁电陶瓷,已有实验表明,等效杨氏模量与孔隙率近似呈线性关系,即  $n=1$ <sup>[8]</sup>。

将(10)式代入临界电场强度表达式(9)式,可得不同孔隙率下 PZT95/5 的击穿临界电场强度

$$E_c = \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \left\{ \frac{2k_s^{2/3}}{r\epsilon_0\epsilon_r^0 (k_s^{2/3} - p^{2/3})} [\sqrt{r^2 (Y^0)^2 (1 - \alpha p)^2 + 4G_c r Y^0 (1 - \alpha p)} - rY^0 (1 - \alpha p)] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

对于致密材料(即  $p=0$ ), (12)式可以进一步简化为

$$E_c = \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \left\{ \frac{2}{r\epsilon_0\epsilon_r^0} [\sqrt{r^2 (Y^0)^2 + 4G_c r Y^0} - rY^0] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

### 3 结果分析与讨论

基于第 2 节建立的多孔 PZT95/5 铁电陶瓷材料在静电场作用下的电击穿模型,预测不同孔隙率的铁电陶瓷材料的击穿临界电场强度,并与实验测量值进行对比分析。

在外加电场作用下,材料内部的裂纹尖端处往往由于电势分布梯度大而出现局部电场增强现象,故最易发生电击穿,其次是不规则气孔。取铁电陶瓷内部的椭球形气孔,其长、短轴比  $a/b=0.1$ ,可近似视为一裂纹。此外,已有的多孔铁电陶瓷材料内部微观特征及击穿通道的扫描电子显微镜图像表明:通道特征尺寸一般为微米级,而且随着材料孔隙率的增加而增大<sup>[17]</sup>。我们据此来选取计算预测中的通道特征半径。

表 1 给出了不同孔隙率条件下,静电场中铁电陶瓷的电击穿实验结果以及模型预测结果。可以看出:电击穿临界电场强度的预测值和实验值处于同一数量级,且有部分结果在数值上吻合良好;随着材料孔隙率的增加,电击穿临界电场强度降低;采用热烧结方式制备的致密陶瓷孔隙率近似为零,电击穿临界场强值最大,甚至比正常烧结的致密(实际上仍有一定的孔隙率)PZT95/5 陶瓷高 1 个数量级;此外,加入球形聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethylmethacrylate, PMMA)造孔剂的多孔 PZT95/5 陶瓷比加入不规则形状糊精(Dextrin)的多孔 PZT95/5 陶瓷具有更高的抗电击穿强度。

表 1 不同孔隙率及不同造孔剂的 PZT95/5 铁电陶瓷材料的击穿临界电场强度

Table 1 Dielectric breakdown strength of PZT95/5 ceramics with different porosities and pore formers

| Material <sup>[17]</sup>                 | Porosity/<br>(%) | Relative dielectric<br>constant | Young's<br>modulus/(GPa) | Path<br>size/(μm) | Predicted breakdown<br>strength/(kV/m) | Experimental breakdown<br>strength/(kV/m) |
|------------------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| Dense material<br>by hot-press<br>method | 0.4              | 314                             | 148                      | 1.00              | 16 500                                 | 15 000                                    |
| Dense                                    | 4.1              | 309                             | 148                      | 5.00              | 7 460                                  | 6 800                                     |
| PMMA<br>(Spherical shape)                | 7.2              | 281                             | 136                      | 6.00              | 7 140                                  | —                                         |
|                                          | 11.2             | 252                             | 121                      | 7.00              | 6 980                                  | —                                         |
|                                          | 13.5             | 241                             | 112                      | 8.00              | 6 680                                  | 6 600                                     |
| Dextrin                                  | 8.9              | 249                             | 121                      | 7.50              | 6 790                                  | 6 650                                     |
| (Irregular pores)                        | 10.7             | 236                             | 112                      | 8.00              | 6 750                                  | 6 550                                     |

一般而言,固体材料的内部微结构特征及电学、力学性能均能影响到其电击穿特性。多孔铁电材料的电击穿临界场强表达式((12)式或(13)式)也清晰地表明,材料的孔隙率、介电常数、杨氏模量及导电通道特征尺寸等均能影响其电击穿临界场强。

图 1 和图 2 分别给出了电击穿临界场强随材料孔隙率及导电通道特征尺寸变化的曲线。计算时,取造孔剂为球形,即  $k_s=1$ 。从图 1 可以看出,对于同一通道半径,随着孔隙率的增加,电击穿临界场强变化不大;而图 2 则表明对于某一孔隙率,随着导电通道特征尺寸的增大,电击穿强度显著降低。铁电陶瓷临界电击穿场强随电击穿通道特征尺寸变化明显,材料孔隙率越大,内部电击穿通道特征尺寸越大,由此导致铁电陶瓷材料的电击穿场强显著降低。该结果与已有的一些实验结果定性上一致。

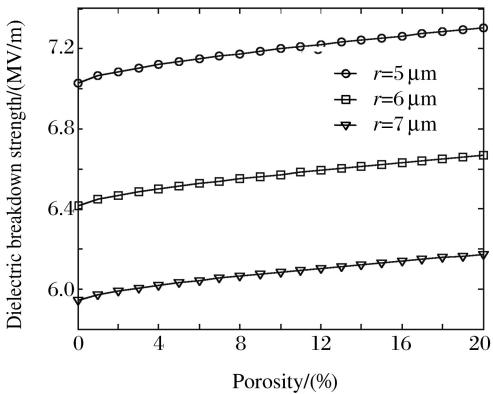


图 1 PZT95/5 陶瓷电击穿场强随孔隙率的变化曲线  
Fig. 1 Dielectric breakdown strength of PZT95/5 ceramics as a function of porosity

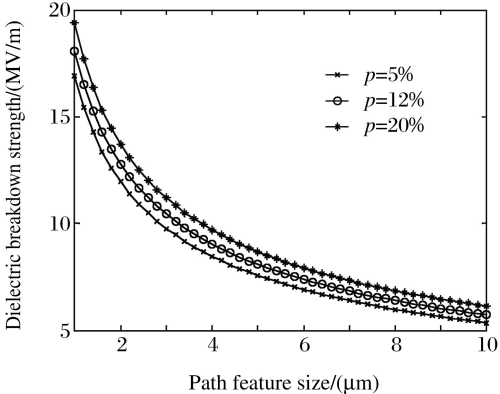


图 2 PZT95/5 陶瓷电击穿场强随通道特征尺寸的变化曲线  
Fig. 2 Dielectric breakdown strength of PZT95/5 ceramics as a function of path feature size

4 结 论

- (1) 成功建立了材料内部存在导电通道时多孔铁电陶瓷的电击穿模型,并基于此模型,给出了不同孔隙率下铁电陶瓷的电击穿临界场强,其预测结果与实验测试结果吻合良好,证实了本模型的可靠性;
- (2) 铁电陶瓷的临界电击穿场强随电击穿通道特征尺寸变化明显,材料孔隙率越大,内部电击穿通道特征尺寸越大,电击穿场强显著降低;
- (3) 本模型可进一步推广到冲击波作用下铁电陶瓷材料的去极化和电失效分析中。

## References:

- [1] Setchell R E. Shock wave compression of the ferroelectric ceramic  $\text{Pb}_{0.99}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}_3$ : Microstructural effects [J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(5): 053525.
- [2] Liu G M, Zhang Y, Du J M, et al. Electrical output of PZT95/5-2Nb pulsed power supply [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2007, 13(4): 371-374. (in Chinese)  
刘高旻, 张毅, 杜金梅, 等. PZT95/5-2Nb 铁电陶瓷脉冲换能电输出 [J]. *功能材料与器件学报*, 2007, 13(4): 371-374.
- [3] Chen X F, Liu Y S, Feng N B, et al. Effects of shock pressure and temperature aging on the discharge behavior of PZT95/5 ferroelectric ceramics [J]. *Electronic Components and Materials*, 2009, 28(7): 1-4. (in Chinese)  
陈学峰, 刘雨生, 冯宁博, 等. 冲击压力和温度老化对 PZT95/5 铁电陶瓷放电的影响 [J]. *电子元件与材料*, 2009, 28(7): 1-4.
- [4] Storz L J, Dungan R H. A study of the electrical, mechanical, and microstructural properties of 95/5 PZT as a function of pore former type and concentration, SAND 85-1612 [R]. USA: Sandia National Laboratories, 1986.
- [5] Tuttle B A, Yang P, Gieske J H, et al. Pressure-induced phase transformation of controlled-porosity  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$  ceramics [J]. *J Am Ceram Soc*, 2001, 84(6): 1260-1264.
- [6] Yang H, Dong X L, Zhong N, et al. Dielectric breakdown properties of Zr-rich lead zirconate titanate ceramics [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2004, 43(11A): 7579-7582.
- [7] Zeng T, Dong X L, Mao C L, et al. Effects of porosity and grain sizes on the dielectric and piezoelectric properties of porous PZT ceramics and their mechanism [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(6): 3073-3079. (in Chinese)  
曾涛, 董显林, 毛朝梁, 等. 孔隙率及晶粒尺寸对多孔 PZT 陶瓷介电和压电性能的影响及机理研究 [J]. *物理学报*, 2006, 55(6): 3073-3079.
- [8] Zeng T, Dong X L, Mao C L, et al. Effects of pore shape and porosity on the properties of porous PZT 95/5 ceramics [J]. *J Eur Ceram Soc*, 2007, 27(4): 2025-2029.
- [9] Nie H C, Feng N B, Chen X F, et al. Enhanced ferroelectric properties of intragranular-porous  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$  ceramic fabricated with carbon nanotubes [J]. *J Am Ceram Soc*, 2010, 93(3): 642-645.
- [10] Setchell R E. Shock wave compression of the ferroelectric ceramic  $\text{Pb}_{0.99}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}_3$ : Depoling currents [J]. *J Appl Phys*, 2005, 97(1): 013507.
- [11] Feng N B, Nie H C, Chen X F, et al. Depoling of porous  $\text{Pb}_{0.99}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}_3$  ferroelectric ceramics under shock wave load [J]. *Current Appl Phys*, 2010, 10(6): 1387-1390.
- [12] Sindeyev Y G, Yurkevich V E. Electrical breakdown in ferroelectric ceramics (a review) [J]. *Ferroelectrics*, 1990, 110: 193-218.
- [13] Zhou Y X, Yoshimura N. Short-time DC breakdown phenomena in  $\text{BaTiO}_3$ -based multilayer ceramic capacitors [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38: 1412-1417.
- [14] Shin B C, Kim S C, Nahm C W, et al. Nondestructive testing of ceramic capacitors by partial discharge method [J]. *Mater Lett*, 2001, 50(2): 82-86.
- [15] Yang H. Fabrication and breakdown mechanism research of PZT95/5 ceramics with high dielectric breakdown properties [D]. Shanghai: Shanghai institute of ceramics, 2006: 50-78. (in Chinese)  
杨洪. 高抗电强度 PZT95/5 型铁电陶瓷的研制及击穿机理的研究 [D]. 上海: 上海硅酸盐研究所, 2006: 50-78.
- [16] Geis S, Fricke J, Löbmann P. Electrical properties of PZT aerogels [J]. *J Euro Ceram Soc*, 2002, 22(7): 1155-1161.
- [17] Zeng T. Fabrication and properties of porous PZT based piezoelectric and ferroelectric ceramics [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics, 2007: 65-83. (in Chinese)  
曾涛. 多孔 PZT 压电和铁电陶瓷的制备与性能研究 [D]. 上海: 上海硅酸盐研究所, 2007: 65-83.
- [18] Gerson R, Marshall T C. Dielectric breakdown of porous ceramics [J]. *J Appl Phys*, 1959, 30(11): 1650-1653.
- [19] Feng N B, He H L, Dong X L. Damage and broken laws of materials in the high strain rate loading [J]. *High Energy Density Physics*, 2007, (4): 152-164. (in Chinese)  
冯宁博, 贺红亮, 董显林. 高应变率加载下材料的损伤破碎规律 [J]. *高能量密度物理*, 2007, (4): 152-164.

- [20] Zhang F P, Du J M, Liu Y S, et al. Failure mechanism of PZT95/5 under direct current and pulsed electric field [J]. *Acta Phys Sinica*, 2011, 60(5): 057701. (in Chinese)  
张福平, 杜金梅, 刘雨生, 等. PZT95/5 陶瓷电致失效机理研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(5): 057701.
- [21] Coelho R, Aladenize B. The Dielectric Material and Its Dielectric Properties [M]. Translated by Zhang Z W. Beijing: Science Press, 2000: 162-192. (in Chinese)  
Coelho R, Aladenize B. 电介质材料及其介电性能 [M]. 张治文, 译. 北京: 科学出版社, 2000: 162-192.
- [22] Crichton G C, Karlsson P W, Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids [J]. *IEEE Trans Electr Insul*, 1989, 24(2): 335-342.
- [23] Mcallister I W, Crichton G C. Influence of bulk dielectric polarization upon partial discharge transients effect of heterogeneous dielectric geometry [J]. *IEEE T Dielect El In*, 2000, 7(1): 124-132.
- [24] Pedersen A, Crichton G C, Mcallister I W. The theory and measurement of partial discharge transients [J]. *IEEE Trans Electr Insul*, 1991, 26(3): 487-497.
- [25] Stark K H, Garton C G. Electric strength of irradiated polythene [J]. *Nature*, 1955, 176(4495): 1225-1226.
- [26] Fothergill J C. Filamentary electromechanical breakdown [J]. *IEEE Trans Electr Insul*, 1991, 26(6): 1124-1129.
- [27] Schneider G A. Influence of electric field and mechanical stresses on the fracture of ferroelectrics [J]. *Annu Rev Mater Res*, 2007, 37: 491-538.
- [28] Banno H. Effects of shape and volume fraction of closed pores on dielectric elastic and electromechanical properties of dielectric and piezoelectric ceramics: A theoretical approach [J]. *Am Ceram Soc Bull*, 1987, 66(9): 1332-1337.
- [29] Phani K K, Niyogi S K. Young's modulus of porous brittle solids [J]. *J Mater Sci*, 1987, 22: 257-263.

## Channel Induced Electro-Mechanical Breakdown Model for Porous PZT95/5 Ceramics in Quasi-Static Electric Fields

JIANG Yi-Xuan<sup>1</sup>, WANG Xing-Zhe<sup>1</sup>, HE Hong-Liang<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Mechanics on Environment and Disaster in Western China, Ministry of Education of China, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)*

**Abstract:** As a promising candidate material in explosive power supplies, the porous PZT95/5 ferroelectric ceramics exhibit attractive advantages in engineering applications. However, the electrical breakdown of ferroelectric ceramics usually reduces their discharge efficiency, and even results in failure of the explosive power supply. In this paper, we presented a theoretical model of electro-mechanical breakdown for the porous PZT95/5 ferroelectric ceramics in quasi-static electric fields. The model is based on the mechanism of electro-mechanical breakdown and partial discharges in conducting channels generated inside the ceramics. Theoretical predictions of the critical electric-field breakdown strength of the ferroelectric ceramics with different porosities are carried out, and show good agreements with the experimental results. The characteristic size of the conducting channel increases with the porosity, which causes a significant reduce in the critical electric-field breakdown strength.

**Key words:** porous PZT95/5 ferroelectric ceramics; electric-field breakdown strength; conducting channel; porosity