

文章编号: 1000-324X(2005)04-1019-06

PZT95/5 铁电陶瓷晶粒度对冲击波作用下击穿电压的影响

张福平, 贺红亮, 杜金梅, 王海晏, 刘高旻

(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 621900)

摘 要: 在气炮加载条件下, 分别测试了两种晶粒度的 PZT95/5 铁电陶瓷样品在冲击波作用下的击穿电压, 并采用 Weibull 分布分析了所获得数据. 结果表明, PZT95/5 铁电陶瓷在冲击波作用下的击穿电压分布可以用二参数 Weibull 分布模型描述, 从击穿电压密度分布函数和失效率函数来看, 晶粒度为 $2.5\mu\text{m}$ 的 PZT95/5 样品的击穿电压分布优于晶粒度为 $7\mu\text{m}$ 的 PZT95/5 样品击穿电压分布.

关 键 词: PZT95/5 铁电陶瓷; 击穿电压; 冲击波; 晶粒度

中图分类号: TB34, TM21 **文献标识码:** A

1 引言

Zr:Ti 比为 95:5 的 PZT 陶瓷 (简称 PZT95/5 陶瓷) 在冲击波作用下由铁电相转变成反铁电相去极化产生脉冲电流, 可以作为脉冲电源发生器^[1,2]. 这种电源是基于 PZT 陶瓷在冲击波作用下去极化释放出束缚电荷而工作的, 只有在冲击波作用下其内部不发生电击穿的条件下, 才能在外电路形成电能输出, 因此, PZT95/5 陶瓷在冲击波作用下的电击穿问题在其中起着非常关键的作用.

目前, 国内外对于冲击波作用下 PZT95/5 陶瓷的击穿研究主要集中在冲击波效应对电击穿强度的影响, 所使用的 PZT95/5 陶瓷均为同种陶瓷^[3,4]. 本文研究了两种晶粒度的 PZT95/5 陶瓷在冲击波作用下的击穿电压, 为了简化问题, 冲击波压力采用固定压力 (3GPa), 并采用气炮加载方式, 避免了化爆加载条件下冲击波平面性差、重复性差以及化爆产物对实验结果的影响. 初步结果表明, 晶粒细化能改善 PZT95/5 陶瓷在冲击波作用下的电击穿性能.

2 实验

2.1 样品制备

PZT95/5 铁电陶瓷样品采用常规的电子陶瓷工艺制备, 共两类. I 类 PZT95/5 陶瓷样品采用亚微米级的氧化锆原料 ($D_{50} \sim 0.7\mu\text{m}$, 江苏宜兴新兴铝业公司提供), 所合成的 PZT95/5 陶瓷粉体活性相对较低, 陶瓷烧结温度为 1330°C , 样品平均晶粒度约为 $7\mu\text{m}$ (见图

收稿日期: 2004-07-06, 收到修改稿日期: 2004-09-17

作者简介: 张福平 (1977-), 男, 硕士, 实习研究员. E-mail: zfpittt@hotmail.com

1); II 类 PZT95/5 样品采用纳米级的氧化锆原料 ($D_{50} \sim 50\text{nm}$, 湖北地大纳米材料有限公司提供), 所合成的 PZT95/5 陶瓷粉体活性相对较高, 其陶瓷烧结温度为 1200°C , 样品平均晶粒度约为 $2.5\mu\text{m}$ (见图 2). 样品的晶粒度采用扫描电镜 (Hitachi S530, Japan) 进行测量.



图 1 I 类 PZT95/5 陶瓷样品 SEM 照片

Fig. 1 SEM photo of I class PZT95/5 ceramic samples



图 2 II 类 PZT95/5 陶瓷样品 SEM 照片

Fig. 2 SEM photo of II class PZT95/5 ceramic samples

2.2 冲击波作用下击穿电压测试

实验所用样品为 $20\text{mm} \times 4\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的长方形块体 (2mm 为极化方向尺寸、4mm 为冲击波传播方向尺寸、20mm 为样品长度), 满电极.

气炮加载条件下测试其在冲击波作用下击穿电压, 样品在气炮中冲击压缩加载如图 3 所示. 极化的 PZT95/5 陶瓷正极与负载相连, 所有负极与示波器共地, 电极之间用未极化

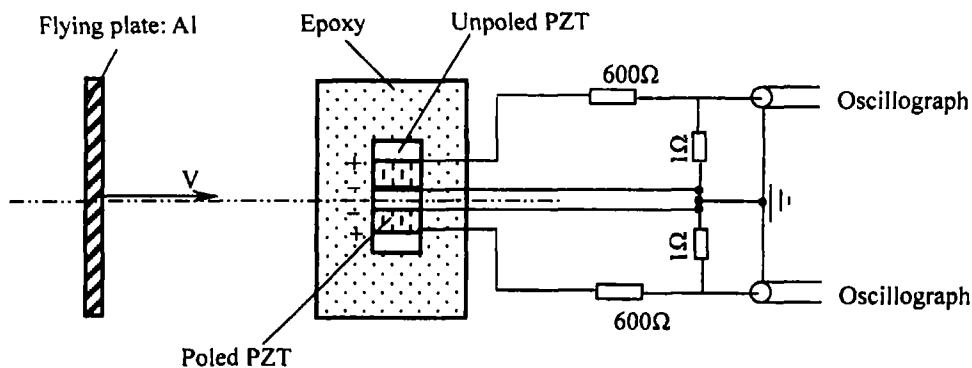


图 3 PZT95/5 陶瓷样品在气炮中垂直加载示意图

Fig. 3 Schematic of shock experiments for poled PZT95/5 ceramics

的 PZT95/5 陶瓷进行绝缘和力学匹配, 周围用环氧树脂灌封. 实验过程是: 气炮驱动铝飞片以 500m/s 的速度碰撞靶面产生冲击波, 入射到 PZT95/5 陶瓷表面压力大约为 3GPa [5], 高于 PZT95/5 陶瓷充分去极化压力 (PZT95/5 陶瓷充分去极化压力大约为 2GPa [6]), 冲击波传播方向垂直于极化方向, 负载电阻采用 600Ω , 取样电阻采用 1Ω , 所产生的信号用 TEK684C 型示波器记录 (泰克公司, 美国).

3 实验结果及分析

PZT95/5 样品在如图 3 所示的工作条件下, 其等效电路如图 4 所示.

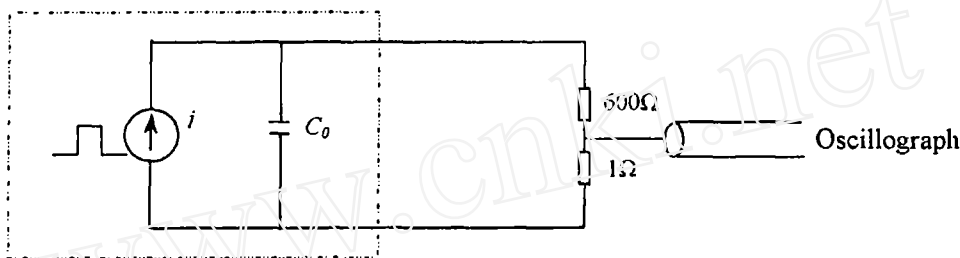


图 4 PZT95/5 陶瓷样品的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of PZT95/5 ceramics

在冲击波通过 PZT95/5 陶瓷的传播过程中, 冲击波扫过 PZT95/5 陶瓷部分去极化, 释放束缚电荷, 在不发生电击穿的状况下, 样品两端的电压 U 为^[4]:

$$U = \begin{cases} \frac{P_r y_0 z_0}{\tau} R (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{P_r y_0 z_0}{\tau} R (e^{\frac{t}{\tau}} - 1) e^{-\frac{t}{\tau}} & t \geq \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中, t 为时间, y_0 、 z_0 为样品尺寸 ($y_0=20\text{mm}$, $z_0=4\text{mm}$), $\tau = z_0/u$ 为冲击波在 PZT95/5 样品中传播时间 ($u \approx 4\text{km/s}$ 为冲击波在 PZT95/5 陶瓷中的传播速度, $z_0=4\text{mm}$, 故 $\tau = 1\mu\text{s}$), C_0 为 PZT95/5 样品的电容, $R=(600+1)\Omega$ 为无感负载电阻, P_r 是样品剩余极化强度. 当样品 P_r 介于 $30 \sim 36 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 样品两端所能达到的最高电压为 $14.4 \sim 17.6\text{kV}$, 略高于 2mm 厚的样品在以往实验中冲击波作用下的击穿电压^[5].

图 5 为典型的冲击波作用下 PZT95/5 陶瓷的击穿波形. 从公式 (1) 可以看出, 样品未击穿时的波形应为信号起跳呈指数上升, 到峰值电压时间为 $1\mu\text{s}$ (也就是时间 τ), 而图 5 的信号从起跳到峰值电压时间只有 $0.70\mu\text{s}$, $< 1\mu\text{s}$, 也就是说样品在 $0.70\mu\text{s}$ 时发生了击穿. 本实验击穿电压 U 定义为击穿发生时的电压, 即每个信号的峰值电压. 实验所获得数据按升序排列, 并进行 Weibull 变换^[7]:

$$\begin{aligned} Y_j &= \ln\{-\ln[1 - j/(n+1)]\} \\ X_j &= \ln(U_j) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, n 是样本容量, j 是样本序号.

实验结果如表 1、2 所示.

对于二参数 Weibull 分布, 函数 $Y(X)$ 在坐标纸上应为直线, 该直线的斜率为形状参数 β , 在 X 轴上的截距为 $\ln(\eta)$, η 为尺寸参数. 将表 1、2 的 $X-Y$ 数据分别作图得到图 6 和 7.

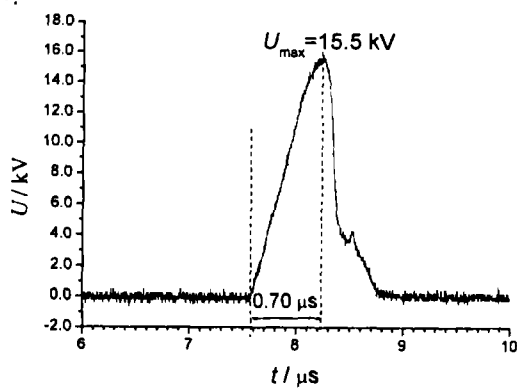


图 5 冲击波下 PZT95/5 陶瓷样品的击穿波形
Fig. 5 Breakdown curve of PZT95/5 ceramics under shock waves

表 1 PZT95/5陶瓷样品击穿电压的 Weibull 分布分析 (I 类)

Table 1 Weibull distribution analysis of breakdown voltage of PZT95/5 samples (I class)

Number(<i>j</i>)	U_j/kV	$X_j=\ln(U_j)$	$Y_j=\ln(-\ln(1-j/(n+1)))$
1	9.2	2.2192	-2.6738
2	13.1	2.5726	-1.9442
3	14	2.6391	-1.4909
4	14.1	2.6462	-1.1707
5	14.3	2.6695	-0.9027
6	14.5	2.6741	-0.6717
7	14.9	2.7014	-0.4642
8	15.9	2.7663	-0.2716
9	16	2.7726	-0.0874
10	16.1	2.7788	0.094
11	16.4	2.7973	0.279
12	16.6	2.8094	0.4759
13	16.8	2.8214	0.7006
14	17.1	2.8391	0.9962

表 2 PZT95/5陶瓷样品击穿电压的 Weibull 分布分析 (II 类)

Table 1 Weibull distribution analysis of breakdown voltage of PZT95/5 samples (II class)

Number(<i>j</i>)	U_j/kV	$X_j=\ln(U_j)$	$Y_j=\ln(-\ln(1-j/(n+1)))$
1	14.6	2.681	-2.3506
2	16.1	2.7788	-1.6061
3	16.5	2.8034	-1.1443
4	17.5	2.8622	-0.7941
5	16.7	2.8154	-0.5007
6	15.6	2.7473	-0.2377
7	15.5	2.7408	0.0115
8	17.3	2.8507	0.2618
9	17.6	2.8679	0.5334
10	17.7	2.8736	0.8746

图 6 是 I 类 PZT95/5 样品击穿电压 Weibull 概率纸图 (简称 WPP 图), 图 7 是 II 类 PZT95/5 样品击穿电压 WPP 图. 从图 6 和 7 可以看出, I 类和 II 类样品击穿电压数据分布都符合二参数 Weibull 分布, 对于 I 类样品, 从图 6 可以得出 $\beta=10.185$, $\eta=15.84$; 对于 II 类样品, 从图 7 可以得出 $\beta=15.29$, $\eta=17.03$. 对于二参数 Weibull 分布, 其密度函数 $f(U)$ 与失效率函数 $R(U)$ 表达式如下式所示 (对于击穿问题, 失效率就是击穿概率).

$$f(U) = (\beta/\eta)(U/\eta)^{\beta-1} \exp[-(U/\eta)^\beta] \quad (3)$$

$$R(U) = 1 - \exp[-(U/\eta)^\beta] \quad (4)$$

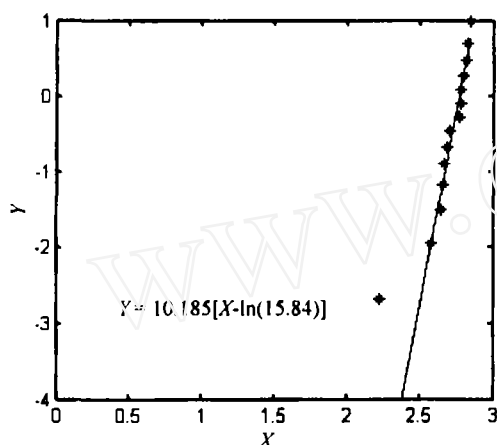


图 6 I 类 PZT95/5 陶瓷击穿电压 WPP 图

Fig. 6 Weibull probability paper figure of breakdown voltages of I class PZT95/5 samples

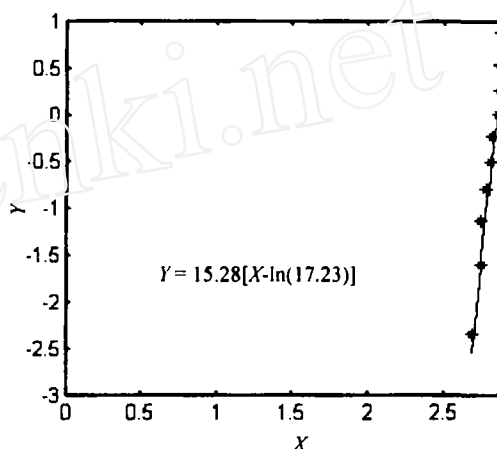


图 7 II 类 PZT95/5 陶瓷击穿电压 WPP 图

Fig. 7 Weibull probability paper figure of breakdown voltages of II class PZT95/5 samples

I 类和 II 类样品击穿电压 Weibull 分布密度函数如图 8 所示, 失效率函数如图 9 所示.

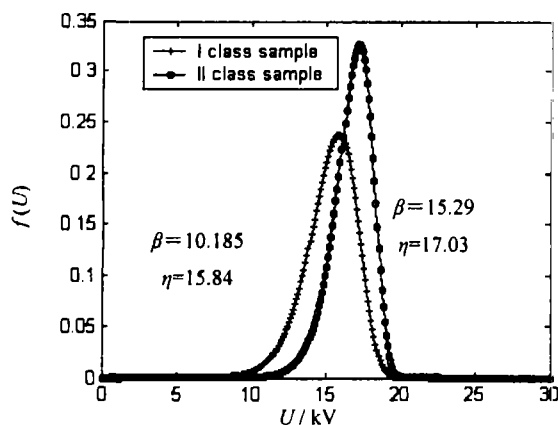


图 8 击穿电压 Weibull 分布密度函数图

Fig. 8 Weibull distribution density function of breakdown voltages

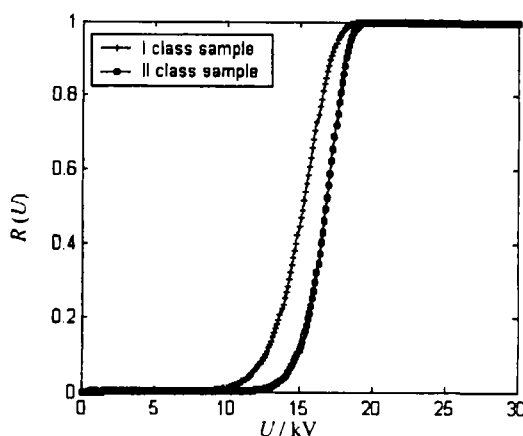


图 9 击穿概率与电压关系图

Fig. 9 Probability of breakdown *versus* voltages

从图 8 可以看出, II 类样品的击穿电压分布相对于 I 类样品的击穿电压分布高且集中; 从图 9 可以看出, 在同一电压下, II 类样品的击穿概率低于 I 类样品的击穿概率, 也就是说 II 类样品的击穿电压的分布优于 I 类样品的击穿电压分布. 其原因就在于晶粒细化后, 击穿时所需跨越的晶界势垒较多, 所需能量就越高, 导致击穿电压相对较高, 分布相对集中.

4 结论

1. PZT95/5 铁电陶瓷样品在冲击波作用下的击穿电压服从二参数 Weibull 分布. 样品尺寸为 $20\text{mm}\times 4\text{mm}\times 2\text{mm}$ 时, 晶粒度为 $7\mu\text{m}$ 样品的击穿电压分布参数为 $\beta=10.19$, $\eta=15.84$, 而晶粒度为 $2.5\mu\text{m}$ 样品的击穿电压分布参数为 $\beta=15.9$, $\eta=17.23$.

2. 细晶粒的 PZT95/5 陶瓷的击穿电压分布优于粗晶粒的 PZT95/5 陶瓷的击穿电压.

参考文献

- [1] Voigt J A, Sipola D L, *et al.* SAND98-2756, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1998.7-8.
- [2] Storz L J, Dungan R H. SAND85-1612, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1985.3-4.
- [3] Lysne P C. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(1): 4565.
- [4] 温殿英, 林其文 (Wen Dian-Ying, *et al.*). 高压物理学报 (Chinese Journal of High Pressure Physics), 1998, **12**(3): 199-201.
- [5] 贺红亮. 中国工程物理研究院流体物理研究所内部资料. 2003.
- [6] Setchell R E, Montgomery S T, Chhabildas L C, *et al.* in Shock Compression of Condensed Matter-1999, In: Furnish M D, *et al.* ed. AIP Conference Proceedings 429, 2000. 979-982.
- [7] 蒋仁言. 威布尔模型族特性、参数估计和应用. 北京: 科学出版社, 1998. 251-258.

Influence of Grain Size on Breakdown Voltage of PZT95/5 Ferroelectric Ceramics under Shock Compression

ZHANG Fu-Ping, HE Hong-Liang, DU Jin-Mei, WANG Hai-Yan, LIU Gao-Min
(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Breakdown voltages of two kinds of PZT95/5 ferroelectric ceramics with different grain sizes were investigated under shock compression. Weibull distribution model was used to analyze the experimental data. The results show that the breakdown voltage of PZT95/5 samples can be described by two parameter Weibull distribution. According to the density function and failure probability function of the Weibull distribution, PZT95/5 ceramics with fine grains possess more optimum breakdown voltage distribution than PZT95/5 ceramics with coarse grains.

Key words PZT95/5 ferroelectric ceramics; shock compression; breakdown voltage; grain size