

研究简报

铁电体爆-电换能的实验研究

王永令 袁万宗 何国荣 林盛卫 凌荣华 瞿翠凤

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

1982 年 3 月 16 日收到

提 要

使用掺铌 PZT97.5/2.5 铁电陶瓷样品在垂直工作模式下,进行了爆-电换能的实验研究. 在电感-电容并联负载上获得了 1360 安的峰值电流;在电阻负载上获得了 145×10^3 伏的峰值电压. 实验结果与理论预计符合得比较好.

一、引 言

1956 年 Neilson 提出,使人工极化的铁电体在冲击波的作用下去极化,释放束缚电荷,可以获得一次性的高功率脉冲电能^[1]. 自此以后,廿多年来,不少研究者^[2-6]在这方面进行了大量的工作. Mock Jr. 和 Holf 以空气炮作为冲击手段,在电容负载上获得 81×10^3 伏的峰值电压^[7]; Hart 等人用炸药爆炸冲击环节状器件,在电感负载上获得了 440 安的峰值电流^[8].

近年来,我们以掺铌 PZT 97.5/2.5 铁电陶瓷为样品,利用它的压力强致相变效应^[3],以爆炸作为冲击手段,进行了爆-电换能问题的研究. 在爆炸冲击系统的设计、工作模式的选取、各种负载下的换能特性以及常态参数对换能特性的影响等方面都进行了探索. 这些探索的部分结果已有报道¹⁾.

二、原 理

掺铌 PZT 97.5/2.5 陶瓷的成份位于铁电相和反铁电相相界附近的反铁电相一侧. 电场有利于铁电相,在外施电场进行人工极化时,转变成铁电相,同时贮存极化能;外施压力有利于反铁电相,在爆炸冲击应力作用下,转变成反铁电相,同时把极化时贮存的极化能,以电能的形式,在外接负载上释放出来. 这就是在爆炸冲击下,掺铌 PZT 97.5/2.5 铁电陶瓷释放电能时所发生的物理过程.

图 1(a) 为长方体样品,垂直工作模式的爆-电换能原理图. 其中, P_r 为剩余极化强度. 这里,冲击波速度 u 垂直于剩余极化强度 P_r , 即谓垂直工作模式.

冲击波强致相变的应力约为 16 千巴^[2]. 如果控制冲击波略高于该值,假设冲击波前后样品的电容率和电阻率没有差别,又因为冲击应力脉冲的宽度大于铁电相到反铁电相

1) 上海硅酸盐研究所 1982 年所刊报告.

转变的相变时间; 这样相变过程可以看作是瞬时完成的, 那么爆-电换能过程的等效电路可用图 1(b) 表示. 其中, C_0 为样品自身的电容, 而矩形脉冲电流源为

$$i_r = \begin{cases} q_0/\tau & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0 & t \geq \tau, \end{cases}$$

$\tau = z_0/u$ 为冲击波从样品前界面传播到后界面所需的总时间; t 为以样品前界面为起点的传播时间; $q_0 = P_r z_0 y_0$ 为电极面上的束缚电荷.

从电路理论知道, 这个换能过程可以通过解一个负载 Z 和电容 C_0 相并联对于矩形脉冲电流源 i_r 的零状态响应问题而解析地得到. 如此, 当负载 Z 为电感 L 和电容 C 相并联时, 流经电感 L 的电流

$$I_L = \begin{cases} (q_0/\tau)[1 - \cos \omega t] & 0 \leq t \leq \tau, \\ (2q_0/\tau) \sin \frac{\omega\tau}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\omega\tau}{2}\right) & t \geq \tau, \end{cases}$$

$$\omega = 1/\sqrt{L(C_0 + C)}.$$

电感 L 两端的电压

$$V_L = \begin{cases} (q_0/\tau) \sqrt{\frac{L}{C_0 + C}} \sin \omega t & 0 \leq t \leq \tau, \\ (2q_0/\tau) \sqrt{\frac{L}{C_0 + C}} \sin \frac{\omega\tau}{2} \cos\left(\omega t - \frac{\omega\tau}{2}\right) & t \geq \tau. \end{cases}$$

当负载 Z 为电阻 R 时, 电阻 R 两端的电压

$$V_R = \begin{cases} (q_0/\tau)R[1 - e^{-t/RC_0}] & 0 \leq t \leq \tau \\ (q_0/\tau)R[e^{\tau/RC_0} - 1]e^{-t/RC_0} & t \geq \tau \end{cases}$$

三、实 验

1. 样品

试验所用的瓷料是用组成为 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.975}\text{Ti}_{0.025})\text{O}_3 + 1\text{wt}\% \text{Nb}_2\text{O}_5$ 的粉料, 采用常规陶瓷制备工艺, 在 1300°C 下烧结而成. 各项试验所用的单个或组合元件, 是从尺寸为 5 厘米 $\times$ 12 厘米 $\times$ 1.2 厘米的大块瓷料经过切割、细磨、上极、极化制备的. 一般性能见表 1.

在静压应力作用下, 电荷释放特性的实测曲线示于图 2. 从图 2 的电荷-应力曲线上, 很明显地可以看出, 在 0.8—2.2 吨/(厘米)² 的应力范围内有相变发生.

实验样品是按照图 1(a) 的形式组装起来的. 具体组装方法依实验目的不同而异, 详

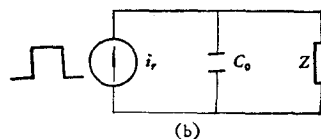
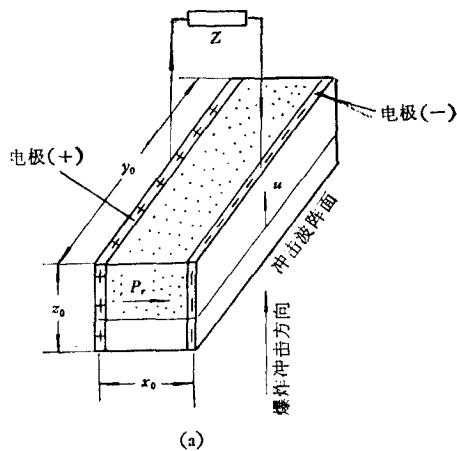


图 1

表 1

密 度	相对电容率		损耗因子	压电常数 d_{33}	机电耦合系数 R_p	居里温度	剩余极化 P_r
	(10伏, 10^3 赫)	强场平均*					
>7.6 克/厘米 ³	250	1500	3×10^{-2}	70×10^{-6} 微库仑/牛顿	<0.1	250°C	30×10^{-6} 微库仑/厘米 ²

* 由 0.1 赫, 25°C 准静态电滞回线 P_r 点的斜率算得。

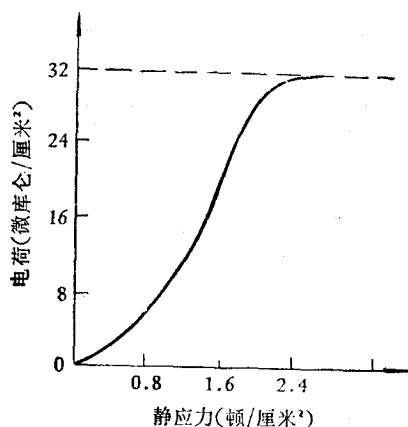
表 2 实验样品组装方式表

样品编号	单件尺寸(厘米)			样品组合	组 合 方 式 图 示	组件尺寸(厘米)		
	x_1	y_1	z_1			x_0	y_0	z_0
I	0.6	2.5	2.0	单片		0.6	1×2.5	2.0
II	1.0	5.0	1.0	五件并联		1.0	5×5.0	1.0
III	1.0	8.0	1.8	七件并联		1.0	7×8.0	1.8
IV	0.5	2.5	2.0	单片		1×0.6	2.5	2.0
V	0.5	4.0	1.0	八件串联		8×0.5	4.0	1.0
VI	1.0	5.0	1.0	七件串联		7×1.0	5.0	1.0

见表 2。对电感-电容并联为负载的实验,以获得大电流为目的,采用并联组装。对电阻负载实验,以获得高电压为目的,采用串联组装。为了减少边缘的影响,加了力学匹配铜条。为了消除换能过程中沿样品表面的放电或电晕,将组装起来的样品浸在硅油中。对于 III 号样品,由于尺寸太大,组装成两部分,实验时分别用两个爆炸冲击装置同时进行冲击。

2. 爆炸冲击装置

爆炸冲击装置为一个平面波发生器,按照图 1(a) 所示的方向对样品进行冲击。经高速扫描相机实测,平面波的平面性在 0.15 微秒以下,两个发生器同时使用时,同步性在



第2 释放电荷-静应力关系曲线

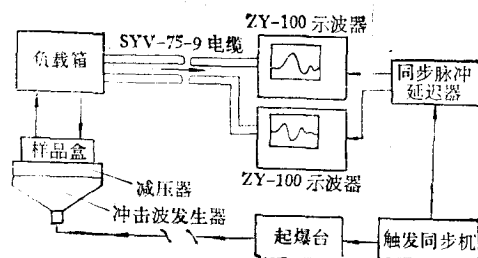


图3 测量系统连接示意图

0.1 微秒以下。

为了降低冲击应力脉冲的幅度,在冲击装置与样品之间,设置了阻抗失配多层减压器。这样,据计算,在样品中形成的冲击应力脉冲的宽度远大于 10^{-6} 秒,冲击应力脉冲的幅度约 30 千巴。这个应力低于样品的 Hugoniot 弹性极限^[9],经测量它在样品中传播速度 $u = 3.85$ 毫米/微秒。

3. 测试系统

测试系统如图 3 所示。触发同步机同时输出两个脉冲,一个经同步脉冲延迟器,启动 ZY-100 示波器开始扫描,另一个脉冲激发起爆台,引爆爆炸冲击装置。当样品受到冲击时,通过负载释放电能。负载放在距样品 1.5 米处的钢制保护箱内。

四、结果与讨论

示波器记录到的实验信号,分别示于图 4(a) 至 (g) 中,对 II 号样品实验的电压监测信号示于图 4(c),从这些信号得到的实验数据以及相应的样品状况、负载条件、理论计算数据列于表 3 和表 4。

1. I、II、III 号样品以电感-电容并联为负载,其信号应该具有振荡性质。I 号样品和 II 号样品的信号,包括 II 号样品的电压监测信号,是电感-电容并联负载对矩形脉冲电流源的零状态响应的典型信号,二者之间的差别在于,对于前者, $\omega\tau \gg \pi$,而对于后者, $\omega\tau \approx \pi$ 。这种信号正是理论上预计应当得到的。III 号样品实验得到的信号与零状态响应相比较,上升前沿及顶部,除去“毛刺”,是一致的,而后沿部分面貌不同,这种情况可能是由于波后电阻下降所致。然而峰值电流是确信无疑地达到了 1360 安,与理论计算值非常接近。

2. IV, V, VI 号样品以电阻为负载。从这三个实验信号也能看出,样品尺寸增大及其内部电场强度较高时,容易发生电晕和击穿。IV 号样品的信号与理论预计符合得相当好,而 V 号样品的实验,由于样品尺寸较大,其内部场强较高,且到 $\frac{1}{2}\tau$ 时便下降。尽管

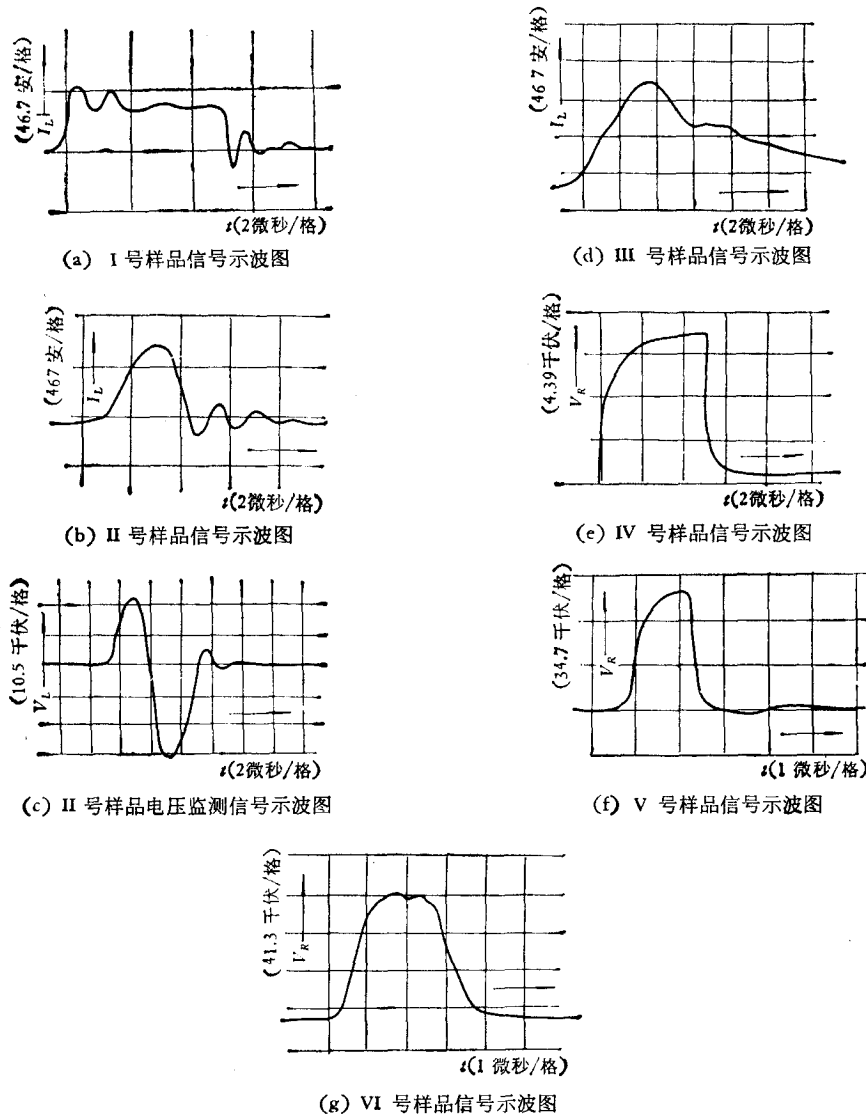


图 4

这样,峰值电压还是接近理论计算值。VI 号样品的最高峰值电压达到 145×10^3 伏。

表 3 电感-电容并联负载实验数据表

样 品 编号	电极面积 $y_0 z_0$ (厘米 ²)	束缚电荷 $q_0 = P_r y_0 z_0$ (微库仑)	电容量 $C_0 = \frac{\epsilon y_0 z_0}{x_0}$ (微微法)	负 载		τ $\frac{z_0}{U}$ (微秒)	ω $\frac{1}{\sqrt{L(C_0 + C)}}$ (兆赫)	$\omega \tau$	样品中峰值电场 (千伏/厘米)		峰值电流 (安)	
				并联 电感 L (微亨)	并联电 容 C (微微法)				实验 值	计算值 $V_L \left(\omega t = \frac{\pi}{2} \right)$	实验值	计算值 $I_L \left(\omega t = \frac{\pi}{2} \right)$
I	5	160	1250	59	0	5.2	3.68	19	/	11.1	48.3	61.5
II	25	800	3750	59	7800	2.6	1.21	3.1	22.2	22.0	702	615
III	100.8	3225.6	15120	59	31200	4.7	0.60	2.8	/	24.0	1360	1370

表 4 电阻负载实验数据表

样 品				负载电阻	τ	峰值电压 (千伏)		样品中峰值电场 (千伏/厘米)	
编号	电极面积 $y_0 z_0$ (厘米 ²)	束缚电荷 $q_0 = P_0 y_0 z_0$ (微库仑)	电容量 $C_0 = \frac{\epsilon y_0 z_0}{x_0}$ (微微法)	R (欧)	$\frac{z_0}{U}$ (微秒)	实验值	计算值 $V_R(\tau)$	实验值	计算值 $V_R(\tau)/x_0$
IV	5	160	1250	447.3	5.2	14.5	13.8	24.2	23.0
V	4	128	150	2098	2.6	93.4	103	23.4	25.8
VI	5	160	107	2544	2.6	145	156	20.7	22.3

参 考 文 献

- [1] F. W. Neilson, SC-TM 230B-56 (51), (1956).
- [2] W. Mock Jr., W. H. Holt, *Ferroelectrics*, **23**(1980), 39.
- [3] P. C. Lysne, C. M. Percival, *J. Appl. Phys.*, **46**(1975), 1519.
- [4] P. C. Lysne, *J. Appl. Phys.*, **46**(1975), 230.
- [5] P. C. Lysne, *J. Appl. Phys.* **48**(1977), 1024.
- [6] P. C. Lysne, *J. Appl. Phys.* **48**(1977), 1020.
- [7] W. Mock, Jr., W. H. Holt, *J. Appl. Phys.* **49**(1978), 5846.
- [8] E. J. Hart *et al.* Power Supply, US Patent 3,985, 078 (1976).
- [9] D. G. Doran, *J. Appl. Phys.*, **39**(1968), 40.

STUDY ON SHOCK WAVE-EXPLOSIVE ENERGY CONVERSION OF FERROELECTRICS

Wang Yong-ling Yuan Wan-zong He Guo-rong

Lin Sheng-wei Ling Rong-hua Qu Cui-feng

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The phase transition properties of Nb doped PZT 95/5 type ferroelectric ceramics under the action of shock wave in "normal mode" condition have been investigated. Under the condition of parallel inductance-capacitance load, the maximum current 1360A has been obtained. Under the condition of resistance load, the maximum voltage 145 10^3 V was obtained. These results are in good agreement with theory.