文章编号：1000-5773(2007)01-0066-05

并联铁电体冲击去极化输出电流实验和计算*

陈 朗，滕晓琴，鲁建英，冯长根

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：为分析不同数量铁电体的输出电流特征，进行了多片并联 PZT95/5 铁电体冲击去极化实验，测量了电阻负载下铁电体的输出电流；建立了并联铁电体输出电流的计算模型，计算了并联铁电体的输出电流。通过比较计算和实验结果，分析了铁电体数量和冲击波状态对铁电体输出电流的影响。结果表明：若进入铁电体的冲击波为平面波，铁电体输出电流的波形接近方波，电流峰值随铁电体并联数量的增加成比例增加，冲击波波形和侧向稀疏波对铁电体输出电流波形和去极化率有很大的影响。

关键词：铁电体；冲击波；去极化

中图分类号：O521.2；O347.5 **文献标识码**：A

1 引 言

1957 年 Neilson[1] 最早提出了铁电体在冲击波作用下会快速释放出电能的概念，根据此原理可研究小型高效的功率脉冲电源。铁电体的输出电流大小是衡量这类脉冲功率源的一个重要指标，如何有效地提高铁电体输出电流是人们关心的问题。铁电体输出电流的大小主要与铁电体材料的几何尺寸、排列方式、冲击波强弱及负载等多种因素有关。在一定的负载条件下，铁电体输出电流主要取决于铁电体的几何尺寸、排列方式和加载冲击波状态等。很多研究主要围绕在冲击波压力与铁电体电荷释放率的关系上[2-3]。对铁电体排列方式与铁电体输出电流关系方面研究的比较少。1983 年上海硅酸盐研究所的王永令等人采用并联铁电体，在负载电阻上获得了大电流输出，采用串联铁电体获得了高电压输出[4]。

本工作对 PZT95/5 并联铁电体进行了冲击加载实验，测量了输出电流；建立了并联多片铁电体输出电流的理论计算模型，计算了铁电体的输出电流，并与实验结果进行了分析和比较。

2 实 验

铁电体冲击波去极化实验装置如图 1 所示。实验装置由雷管、炸药透镜（50 mm 直径）、有机玻璃隔板、铁电体和连接负载的导线等部分组成。实验中，雷管起爆炸药透镜产生平面冲击波，经有机玻璃隔板衰减后作用于铁电体，使铁电体去极化，通过金属电极在导线上输出电流。铁电体为 PZT95/5 陶瓷材料，其参数见表 1，实验中使用了同一批铁电体材料，铁电体材料的质量和各项参数相差很小。表 1 中 x_0 为铁电体电极面间距，y_0 为铁电体电极面长，z_0 为铁电体电极面宽。铁电体为并联排列，即每片铁电体的正极与正极相联，负极与负极相联。

实验中，采用罗果夫斯基线圈测量铁电体的输出电流。图 2 是铁电体输出电流测量电路图，罗果夫斯基线圈测量的电流信号由示波器记录。

* **收稿日期**：2005-12-09；**修回日期**：2006-01-19

作者简介：陈 朗（1965—），男，博士，教授，主要从事爆轰、燃烧和冲击动力学研究. E-mail：chenlang@bit.edu.cn

表 1　PZT95/5 铁电体参数

Table 1　Sizes and parameters of PZT95/5 ferroelectric ceramic

x_0/(mm)	y_0/(mm)	z_0/(mm)	Average remanent polarization/(μC/cm^2)	Average capacitance/(pF)
2	40	10	32.86	508

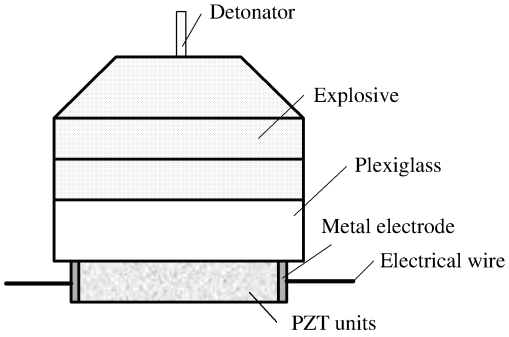


图 1　冲击波去极化实验装置

Fig. 1　The experimental device of depolarization by shock waves

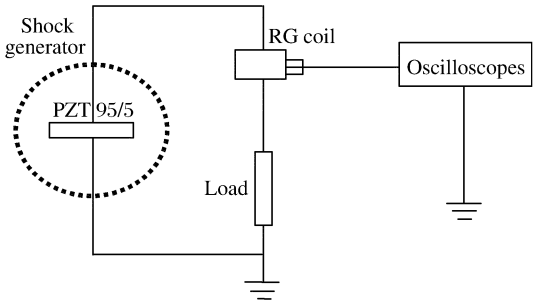


图 2　输出电流测量电路图

Fig. 2　Measuring system of output current

3　多片铁电体冲击去极化输出电流计算

计算中假设每片 PZT95/5 铁电体为电导和电容并联的单元,冲击波在铁电体中以恒定速度传播,铁电体不发生击穿现象,冲击波对铁电体去极化有一定的弛豫时间,假设回路电感对电流计算没有影响。图 3 为并联铁电体单元对电阻负载放电的等效电路图,其中 N 为并联铁电体片的数量,$C(t)$、$G(t)$ 为单片铁电体的电容及电导。

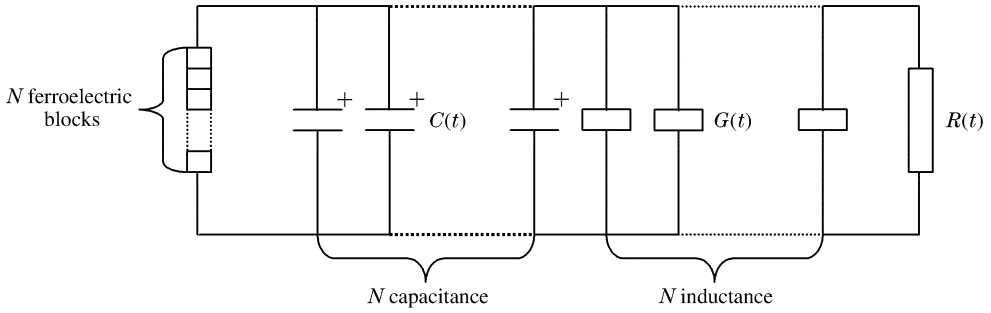


图 3　并联铁电体单元对电阻负载放电的等效电路图

Fig. 3　Diagram of equivalent circuit of PZT units in parallel connection loaded by shock waves

根据假设,冲击波穿过铁电体的时间为

$$\tau = z_0 / u \tag{1}$$

式中:z_0 为铁电体电极面间距;u 为进入铁电体的冲击波速度。在时刻 t,电极面上释放的总电流为[5]

$$I_0 = \begin{cases} y_0 u P_r \left[1 - e^{-(t/t_s)}\right] & t \leqslant \tau \\ y_0 u P_r \left[1 - e^{-(\tau/t_s)}\right] \cdot e^{\left[-(t-\tau)/t_s\right]} & t > \tau \end{cases} \tag{2}$$

式中:y_0 为铁电体电极面长度,P_r 为铁电体剩余极化强度,t_s 为冲击波去极化铁电体的弛豫时间。

在 t 时刻释放的总电量等于单片释放的电量之和[6]。设在时刻 t,单片铁电体释放的电荷量为 $q(t)$,电容上的电量为 $q_C(t)$,流经电导的电量为 $q_G(t)$,流经电阻的电量为 $q_R(t)$,则有

$$Nq(t) = Nq_C(t) + Nq_G(t) + q_R(t) \tag{3}$$

式中：$q_G(t)=\int_0^t i_G(t)\mathrm{d}t$，$i_G(t)$为流经电导的电流；$q_R(t)=\int_0^t i_R(t)\mathrm{d}t$，$i_R(t)$为流经负载电阻的电流。所以

$$Nq(t)=Nq_C(t)+\int_0^t i_R(t)\mathrm{d}t+N\int_0^t i_G(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

上式两边对时间 t 求导可得

$$NI_0=N\mathrm{d}[q_C(t)]/\mathrm{d}t+i_R(t)+Ni_G(t) \tag{5}$$

又因为

$$\begin{aligned} q_C(t)&=C(t)\cdot U_C(t)=C(t)\cdot U_R(t)=C(t)\cdot i_R(t)\cdot R\\ i_G(t)&=U_G(t)\cdot G(t)=R\cdot i_R(t)\cdot G(t)\end{aligned} \tag{6}$$

式中：$U_C(t)$为电容两端电压，$U_G(t)$为电导两端电压，$U_R(t)$为电阻两端电压。将(6)式代入(5)式得

$$NI_0=NC(t)\cdot R\frac{\mathrm{d}i_R(t)}{\mathrm{d}t}+NR\cdot i_R(t)\frac{\mathrm{d}C(t)}{\mathrm{d}t}+NR\cdot i_R(t)\cdot G(t)+i_R(t) \tag{7}$$

而

$$\frac{\mathrm{d}C(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}C_1(t)}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}C_2(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{y_0u}{x_0}(\varepsilon_1-\varepsilon_2) \tag{8}$$

将(2)式～(6)式和(8)式代入(7)式，整理得

$$\frac{\mathrm{d}i_R(t)}{\mathrm{d}t}=\left\{I_0-\left[\frac{1}{N}+G(t)\cdot R+R\cdot\frac{y_0u}{x_0}(\varepsilon_2-\varepsilon_1)\right]i_R(t)\right\}\Big/R\cdot C(t) \tag{9}$$

对(9)式通过 MATLAB 编制程序，用四-五阶龙格库塔法求解，可以得到不同数量并联铁电体在电阻负载下的输出电流。

4 结果与讨论

选用不同并联数量的铁电体在炸药透镜冲击波加载下进行实验，实验条件和结果见表 2。表中铁电体表面电量是根据铁电体电极面积与剩余极化强度的乘积计算而得，即

$$Q=P_r\cdot S$$

式中：S 为铁电体电极面的面积，P_r 为平均剩余极化强度。根据示波器记录的铁电体输出电流曲线，进行电流对时间的积分，得到流经外电路的电量

$$Q=\int_0^\tau i\mathrm{d}t$$

去极化率为流经外电路的电量与表面电量的比值。

表 2 铁电体输出电流计算值与实验值

Table 2 Calculated and experimental results of output current

Number of ferroelectric blocks N	Observed peak current/(A)	Calculated peak current/(A)	Charge transferred to load/(μC)	Charge available for release/(μC)	Charge releasing ratio/(%)
3	135	178.0	292.66	402	75.0
5	225	298.2	573.46	670	89.5
7	613	417.5	940.00	938	100.0

表 2 中的实验结果显示，随着铁电体并联数量的增加，铁电体输出电流呈增大趋势。与计算电流峰值比较，3 片铁电体和 5 片铁电体并联时输出电流的实验值均小于计算值，去极化率分别为 75%和 89.5%。而 7 片铁电体并联时输出电流的实验值高于计算值，铁电体被完全去极化。这是因为片数少的铁电体在冲击波极化过程中，容易受到侧向稀疏波的影响，使冲击波压力降低，影响了去极化的效率，同时，多片组装工艺对输出电流波形也有一定的影响。

从多片铁电体输出电流波形(图 4、图 5 和图 6)来看，3 片铁电体并联时实验测量的输出电流波形接近方波，与输出电流的计算波形一致，而 5 片和 7 片铁电体并联时实验测量的输出电流波形出现双

峰。这是由于冲击波在有机玻璃隔板中传播时,受到侧向稀疏波的作用,在传递到有机玻璃下表面时,已成为曲面波,只有在有机玻璃下表面中心小部分区域保持平面性。若仅对 3 片铁电体,由于铁电体尺寸较小,冲击波去极化时平面性还可以保证,铁电体输出电流波形基本为方波形状;若冲击波对 7 片铁电体去极化,由于铁电体尺寸较大,进入铁电体的冲击波为一曲面波,在进入铁电体后,单位时间内曲面冲击波扫过的电极面积大于平面波扫过的面积,导致 7 片铁电体并联时前期输出电流的峰值高于计算值。随着冲击波在铁电体中的传播,单位时间内曲面冲击波去极化扫过的铁电体面积逐渐减少,因此,在 5 片和 7 片铁电体中,输出电流上升到峰值后逐渐降低。实验中,在 5 片和 7 片铁电体下面垫了有机玻璃,冲击波进入有机玻璃后发生反射,使未完全去极化的铁电体发生了二次去极化,从而导致电流第二次升高。美国的 R. E. Setchel[7] 在研究冲击波压力与铁电体输出电流的关系时,观察到类似的实验现象,如图 7 中的曲线所示。从实验结果来看,电流波形有一定的振荡,这是由于回路电感的影响。

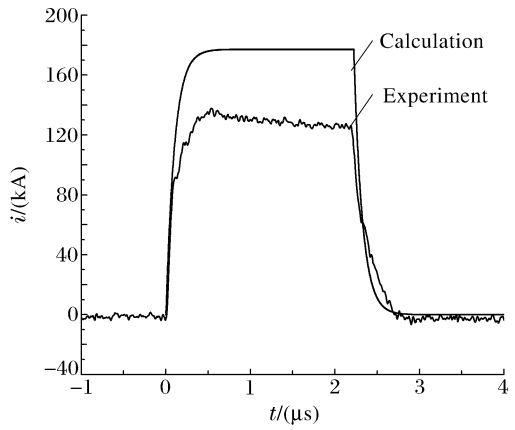


图 4　3 片铁电体并联输出电流理论和实验曲线

Fig. 4　Calculated and experimental current histories for the three PZT units

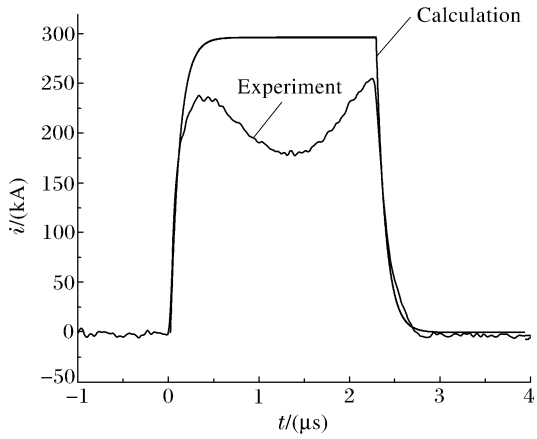


图 5　5 片铁电体并联输出电流理论和实验曲线

Fig. 5　Calculated and experimental current histories for the five PZT units

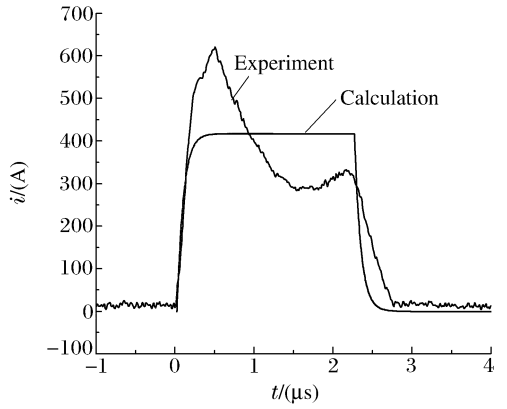


图 6　7 片铁电体并联输出电流的理论和实验曲线

Fig. 6　Calculated and observed current histories for the seven PZT units

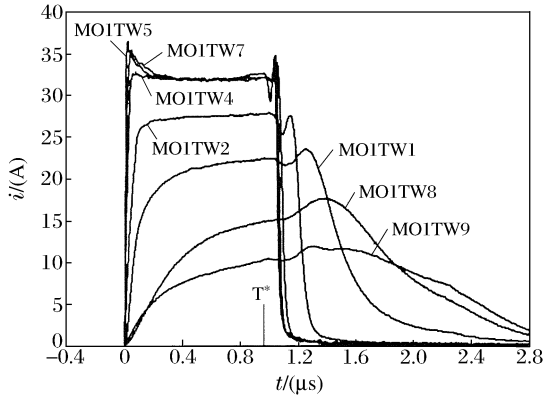


图 7　文献[7]中不同冲击波压力下铁电体输出电流与时间关系

Fig. 7　Observed current histories under different values of shock in Ref. [7]

5　结　论

采用本工作给出的铁电体冲击去极化的理论计算模型,能够计算电阻负载下多片并联铁电体的输出电流。计算结果表明,若进入铁电体的冲击波为平面波,铁电体输出电流的波形接近方波,电流峰值随铁电体并联数量的增加成比例增加。多片铁电体输出电流实验结果表明:冲击波波形和侧向稀疏波对铁电体输出电流波形和去极化率有很大的影响。减少侧向稀疏波的影响才能保证铁电体完全去极化。

References:

[1] Neilson F W. Effects of Strong Shocks in Ferroelectric Materials [J]. Bull Am Phys Soc,1957,2:302.

[2] Bauer F,Vollrath K,Fetiveau Y,et al. Ferrolectric Ceramics:Application to Mechanical Electrical Energy Conversion under Shock Compression[R]. N76-3066,1974.

[3] Shkuratov S I,Kristiansen M,Dickens J C. Experimental Study of Compact Explosive Driven Shock Wave Ferroelectric Generators [J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2002,30(5):959.

[4] Wang Y L,Yuan W Z. Study on Shock Waves-Explosive Energy Convertion of Ferroelectrics [J]. Acta Physica Sinica,1983,32(6):780-785. (in Chinese)
王永令,袁万宗. 铁电体爆-电换能的实验研究 [J]. 物理学报,1983,32(6):780-785.

[5] He Y J,Zhang Y Zh,Li Ch L,et al. The Numerical Simulation of Electric Response of PZT95/5 Ferroelectric Ceramic Subjected to Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2000,14(3):189-194. (in Chinese)
贺元吉,张亚洲,李传胪,等. 冲击波加载下 PZT95/5 铁电体电响应的数值模拟 [J]. 高压物理学报,2000,14(3):189-194.

[6] Hu X J. Circuits Analysis [M]. Beijing:Higher Education Press,2001. (in Chinese)
胡翔骏. 电路分析 [M]. 北京:高等教育出版社,2001.

[7] Setchell R E,Tuttle B A,Voigt J A. Effects of Microstructural Variables on the Shock Wave Response of PZT 95/5 [R]. SAND2003-0537,2003.

Experiment and Calculation of Output Current of Ferroelectric Ceramics in Parallel Connection Loaded by Shock Waves

CHEN Lang,TENG Xiao-Qin,LU Jian-Ying,FENG Chang-Gen

(*State Key Laboratory Explosion Science and Technology,*
Beijing Institute of Technology,Beijing 100081,*China*)

Abstract: To analyze the characters of out current of different number ferroelectric ceramics,the tests of PZT95/5 ferroelectric ceramics in parallel connection loaded by the shock waves were carried out. The output currents of ferroelectric ceramics for the resistance loads were measured. A model calculating the output current of ferroelectric blocks in parallel connection was developed. The currents under different number of ferroelectric blocks were calculated numerically with this model. By comparing the calculated results and experimental results,the effects of the number of ferroelectric and shock wave on output of current were analyzed. The results indicated that if the planar shock waves load the ferroelectric blocks,the shape of the output current will be quadrate and the current will increase along with the number of the ferroelectric blocks increasing. The shape of shock waves and the sparse waves influence on the output current and the depolarization ratio.

Key words: ferroelectric ceramic; shock waves; depolarization