文章编号:1000-5773(2006)04-0403-05

爆电换能脉冲大电流输出研究*

杜金梅,张福平,张 毅,王海晏

(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:基于爆电换能原理,使用掺铌的 PZT 95/5 陶瓷组装换能器件,在垂直工作模式下,对爆电电源 *LRC* 电路响应进行了理论分析,并开展了脉冲大电流输出实验研究。实验采用多组 PZT 95/5 铁电陶瓷并联,利用平面波发生器作为冲击加载手段,获得了峰值 5 kA 以上的脉冲大电流,初始电流上升速率可达 10～20 GA/s。实验结果与理论设计符合较好。

关键词:PZT 95/5 铁电陶瓷;脉冲电流;冲击波;换能器;爆电电源

中图分类号:O482.4 **文献标识码**:A

1 引 言

自 20 世纪 50 年代后期发展了一种基于铁电体爆电换能原理[1-2]工作的脉冲电源发生器(常常被称为“爆电电源”,即“Explosive-to Electric Transducer”[3]或“Ferroelectric Power Supply”[4])以来,国内外进行了大量的研究[5-14],发现 PZT 95/5($PbZr_{0.95}Ti_{0.05}O_3$)铁电陶瓷作为换能元件具有独特的优点,换能压力稳定,电能输出不受压电效应干扰。对于 PZT 95/5 铁电陶瓷换能器输出高电压、大电流的研究,Jr. Mock[7]等人以空气炮作为冲击手段,在电容负载上获得了 81 kV 的峰值电压;Hart[8]等人用炸药爆炸冲击环状器件,在电感负载上获得了 440 A 的峰值电流;王永龄[10]等人用炸药爆炸冲击长方体状器件,在电感-电容并联负载上获得了前沿 5 μs、峰值 1 360 A 的电流。

目前国外应用研究多见于阻性负载输出研究,对于爆电换能输出前沿陡的大电流的研究未见公开报道。本工作针对低感、低阻负载的要求,采用 PZT 95/5 铁电陶瓷组装换能器,对等效的 *LRC* 电路进行了分析,并开展了爆电换能脉冲大电流输出实验研究。利用平面波发生器作为冲击加载手段,进行了爆炸冲击实验,实现了以 PZT 95/5 铁电陶瓷为核心器件的爆电电源 5 kA 以上电流输出。

2 爆电换能脉冲电流输出理论分析

2.1 爆电换能原理

爆电换能原理就是利用 PZT 95/5 铁电陶瓷的结构相变来进行换能,即在冲击波作用下发生铁电→反铁电相变。因为 PZT 95/5 铁电陶瓷的固溶体组分在相图上处于铁电相与反铁电相的相界附近,在压力和电场作用下发生铁电相和反铁电相之间的相互转换,所以它也叫相变铁电陶瓷[2],在常态下基本上是反铁电相,电场有利于铁电相,在外加电场作用下由稳定的反铁电相转变为亚稳铁电相,即 PZT 95/5铁电陶瓷被极化,外加电场撤除后,铁电相被保留下来,贮存静电能于 PZT 陶瓷内部;压力有利于反铁电相,在外加压力作用下,铁电相转变为反铁电相,从而,极化过程中贮存于铁电陶瓷内部的静电能释放出来。在冲击波作用下,铁电体去极化而释放能量的过程,实际上就是释放束缚电荷流经外负载的过程[10-11],通常在所关心的几何尺寸内,可以认为冲击波以常速传播,通过形状尺寸的设计,很容易获得典型的恒流或恒压输出。

* **收稿日期**:2005-12-07;**修回日期**:2006-01-17

基金项目:中国工程物理研究院科学技术基金(20040101)

作者简介:杜金梅(1974—),女,硕士,助理研究员,主要从事爆轰波与冲击波、铁电体材料应用研究. E-mail:jinmeidu@sina.com

长方体状的 PZT 95/5 铁电陶瓷换能器垂直工作模式的爆电换能原理如图 1 所示。图 1 中，P_r 为剩余极化强度，冲击波速度 u 垂直于剩余极化强度 P_r，即为垂直工作模式。冲击波强致相变压力约为 1.6 GPa[14]。如果控制冲击波略高于该值，假设冲击波前后 PZT 95/5 铁电陶瓷换能器的电容率变化可以忽略，又因为冲击应力脉冲的宽度大于相变时间，相变过程可以看作是瞬间完成的，这样爆电电源可以等效为恒流源和阻抗电容并联，从而得到负载为电阻、电感串联时的等效电路，如图 2 所示。

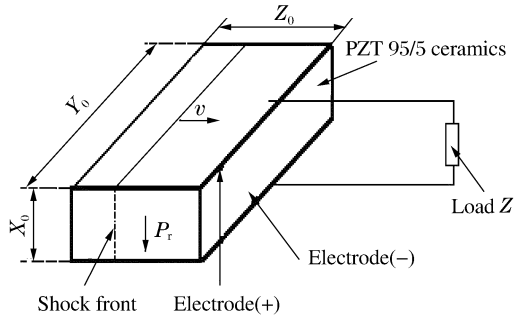


图 1 爆电电源换能原理图

Fig. 1 Working schematic of the shock-activated energy transducer

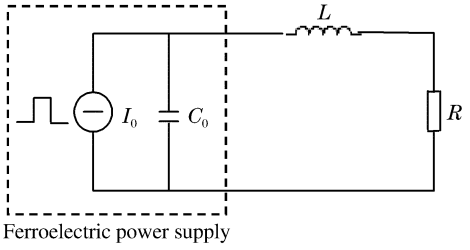


图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent electric circuit of Fig. 1

2.2 PZT 95/5 铁电陶瓷 *LRC* 电路响应分析

图 2 中，I_0 为恒流源，C_0 为换能器件电容，L、R 分别为电路中的等效电感和等效电阻，定义 i_L 为流过负载的电流、u_{C_0} 为换能器件两端电压(即电容 C_0 两端电压)，其中，I_0 恒流源为

$$I_0=\begin{cases}q_0/\tau & 0\leqslant t\leqslant\tau\\ 0 & t\geqslant\tau\end{cases} \tag{1}$$

τ 为冲击波从换能器前界面传播到后界面所需的总时间，即常称为电源输出的“脉冲宽度”；t 为换能器前界面为起点的传播时间；$q_0=P_rY_0Z_0$ 为电极面上的束缚电荷。

由图 2，根据 Kirchhoff's 电流定律，当 $t\leqslant\tau$ 时，等效电路方程为

$$LC_0\frac{\mathrm{d}^2i_L}{\mathrm{d}t^2}+RC_0\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}+i_L=I_0 \qquad t\leqslant\tau \tag{2}$$

初始条件，即 $t=0$ 时，有 $i_L=0$，$\mathrm{d}i_L/\mathrm{d}t=0$。微分方程(2)的两个特征根为

$$\lambda_{1,2}=-\frac{R}{2L}\pm\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2-\frac{1}{LC_0}} \tag{3}$$

因此，爆电电源对负载的电输出不仅依赖于换能器的 I_0、C_0 值(I_0 及 C_0 的大小取决于陶瓷换能器的组装)，同时依赖于回路电阻 R、电感 L 的变化。在目前的应用研究中，在特殊负载(低感、低阻)下的电路中，有 $(R/2L)^2-1/LC_0<0$，即电路属于欠阻尼情况，这样方程(2)的解(即电流 i_L 在脉冲时间 τ 内)为

$$i_L=I_0\left[1-\frac{\omega_0}{\omega_d}\mathrm{e}^{-\alpha t}\cos(\omega_d t-\theta)\right] \qquad t\leqslant\tau \tag{4}$$

式中：阻尼角频率 $\omega_d=\sqrt{1/LC_0-R^2/4L^2}$；谐振角频率 $\omega_0=\sqrt{\omega_d^2+\alpha^2}$；阻尼系数(或振幅衰减常数)$\alpha=R/2L$；$\theta=\arctan(\alpha/\omega_d)$。

由于 $u_{C_0}=L\mathrm{d}i_L/\mathrm{d}t+i_LR$，因此可求得

$$u_{C_0}=RI_0+I_0\omega_0\mathrm{e}^{-\alpha t}\left[L\sin(\omega_d t-\theta)-\frac{R}{2\omega_d}\cos(\omega_d t-\theta)\right] \qquad t\leqslant\tau \tag{5}$$

当 $t\geqslant\tau$ 时，等效电路方程为

$$LC_0\frac{\mathrm{d}^2i_L}{\mathrm{d}t^2}+RC_0\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}+i_L=0 \tag{6}$$

初始条件，$t=\tau$ 时，$I_L(\tau)$、$U_{C_0}(\tau)$ 分别由(4)式、(5)式所得到的 u_{C_0} 和 i_L 的值。

微分方程(7)的解可表示为

$$i_{\mathrm{L}}=\left\{I_{\mathrm{L}}(\tau)\cos[\omega_{\mathrm{d}}(t-\tau)]+\frac{U_{C_0}(\tau)+RI_{\mathrm{L}}(\tau)/2}{L\omega_{\mathrm{d}}}\sin[\omega_{\mathrm{d}}(t-\tau)]\right\}\mathrm{e}^{-\alpha(t-\tau)}\qquad t\geqslant\tau\qquad(7)$$

I_0及 C_0的大小取决于陶瓷换能器的组装,可以分别根据 PZT 95/5 铁电陶瓷的剩余极化强度、介电常数与陶瓷尺寸计算而得,组装好的陶瓷换能器 C_0也可以通过电桥测得。电感、静态回路电阻可以通过电桥测得。在低感、低阻特殊负载要求下,如选用表 1 参数,按照公式(4)、公式(7),理论计算的电流波形如图 3 所示。定义初始电流信号上升时间为"前沿",即电流从零上升到峰值所需时间,用 t_{r} 表示。

由图 3 可以看到,当冲击波未进入换能器件时,输出电流为零;当冲击波进入换能器件在其中进行传播时,相当于瞬间加载电流为 I_0的恒流源,对电路中的储能元件进行充电,输出电流迅速增大,表现为 I_0附近的欠阻尼振荡,如果换能器件尺寸足够大,输出电流将最终稳定在 I_0;而当冲击波通过换能器件后,相当于瞬间切断恒流源,电路中的储能器件对电阻放电,输出电流迅速减小,表现为零附近的欠阻尼振荡,最终趋于零。

表 1　电路参数及计算结果

Table 1　Calculated state and results

I_0 /(kA)	C_0[1] /(nF)	L /(μH)	R /(Ω)	$I_{\max}$ /(kA)	t_{r} /(ns)
4.5	30	0.33	1.2	7.0	300

Note:(1) C_0 was calculated by $\varepsilon=10$ nF/m[15-16].

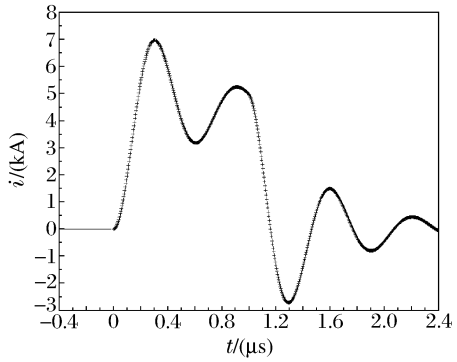


图 3　计算电流波形

Fig. 3　Calculated current waveform

在实际应用中,关心的是脉冲宽度 τ、脉冲前沿 t_{r} 和电流峰值 $I_{\max}$。τ 由换能器件的尺寸决定,因此可以根据需要进行设计,而 t_{r} 和 $I_{\max}$则与电路参数有关,由公式(4)、公式(7)可得

$$t_{\mathrm{r}}=\pi/\omega_{\mathrm{d}}\qquad(8)$$

$$I_{\max}=I_0(1+\mathrm{e}^{-\alpha\pi/\omega_{\mathrm{d}}})\qquad(9)$$

由(8)式和(9)式可以看出,在换能器件一定时,t_{r} 和 $I_{\max}$取决于负载 L 和 R,因此设计时要综合考虑 L 和 R 的取值以获得所需的 t_{r} 和 $I_{\max}$。

3　实验装置

实验装置示意图如图 4 所示,通过 Rogowski 线圈可以监测放电回路上的电流。在低阻抗负载下,电路中的电感来自电流输出导线和扁平电缆,电阻 R 值在 0.3～2.0 Ω 范围内,包括回路电阻。

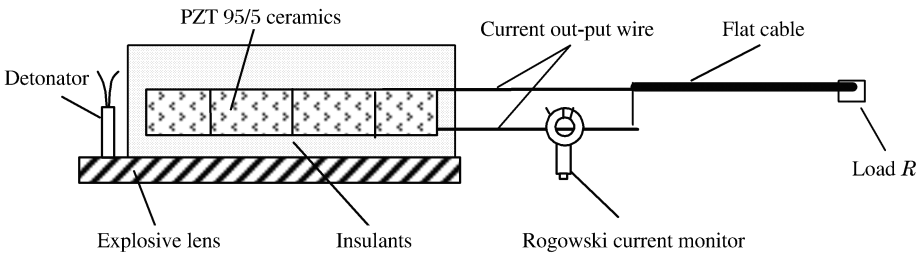


图 4　实验装置示意图

Fig. 4　Schematic diagram of experimental arrangements

实验所用陶瓷样品尺寸为 $X_0\times Y_0\times Z_0=2$ mm×20 mm×4 mm 或 $X_0\times Y_0\times Z_0=2$ mm×30 mm×4 mm,$P_{\mathrm{r}}=(33\sim35)\mu\mathrm{C/cm^2}$,为了获得大电流,换能器采用陶瓷并联组装。为了消除换能过程中沿样品表面的放电或电晕,组装后的换能器用变压器油或环氧树脂封装。

冲击装置可以采用轻气炮或平面波发生器加载,按照图 1 所示的方向对换能器进行冲击。平面波

的平面性控制在 0.2 μs 以内，冲击装置与换能器之间，通过有机玻璃和封装介质等阻抗失配来控制冲击波强度，使得在换能器中形成的冲击应力脉冲的宽度远大于 1 μs、冲击应力脉冲的幅度为 3.0 GPa 左右，这个应力低于样品的 Hugoniot 弹性极限[6]，在 PZT 95/5 铁电陶瓷中的传播速度 $u\approx4.0$ mm/μs，因此，本实验中电流脉冲宽度为 1 μs 左右。

4 实验结果与讨论

表 2 给出了 3 次实验结果及相应实验条件，相应的电流输出波形如图 5 所示。表 2 给出了静态回路电阻 R、电感 L 的测量值，实验中，负载 R 为特殊设计，电流流过时电阻是变化的，变化范围在 0.3～2.0 Ω 内。换能器件的电容 C_0 为计算值[15-16]。

表 2 实验条件及电流结果

Table 2 Experimental state and results

Experiment No.	I_0/(kA)	C_0/(nF)	L/(μH)	R/(Ω)	I_{max}/(kA)	t_r/(ns)
20030410	4.5	30	0.33	1.3	6.5	350
20030507	4.5	30	0.30	1.2	7.1	350
20040929	4.0	25	0.33	1.2	5.7	400

按照前文定义：电流信号上升时间为“前沿”，那么从表 2 和图 5 给出的实验结果可以看出，爆电电源产生 5 kA 以上的脉冲电流时，电流前沿小于 500 ns，电流变化(增加)速率为 10～20 GA/s，可见爆电电源能量释放速率大，实际应用中还可以根据需要调整回路电感、电路电容来获得更大电流(近似于$2I_0$)输出。

图 6 给出了实验与理论计算比较的结果，两者符合较好，但实测电流信号前沿比理论预估的要偏大，理论预估时，把爆电电源作为恒流源 I_0 来处理，而在实验时，换能器的组装、平面波发生器的平面性等因素会影响爆电电源 I_0 的恒流输出，近而影响电流输出的前沿。本实验中选取了冲击波方向尺寸为 4 mm 的陶瓷，因此电流脉冲宽度均为 1 μs 左右，在实际应用中，可以根据需要调整该方向的陶瓷尺寸而获得所需要的电输出脉宽。

同时，研究中发现即使在这种低阻抗负载下，爆电电源输出大电流的同时，也会产生较高电压(10 kV 左右)输出，易于获得兆瓦级峰值功率的电脉冲。

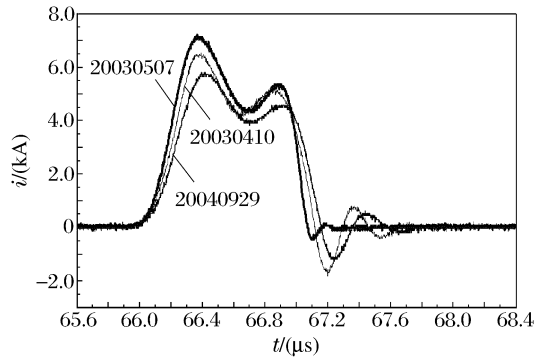


图 5 实验电流波形

Fig. 5 Experimental results

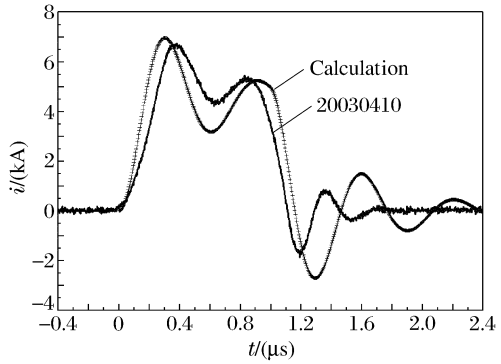


图 6 实验与理论计算比较

Fig. 6 Experimental result compared with the calculation

5 结 论

针对低感、低阻负载的要求，对相应的 LRC 电路进行了理论分析，建立了爆电换能脉冲大电流输出的理论预估方法。实验上进行了 PZT 95/5 铁电陶瓷组装的爆电电源 5 kA 以上脉冲大电流输出设计，并成功输出，获得的信号波形好，电荷释放速率快，初始电流上升速率可达 10～20 GA/s。

同时，研究结果也验证了 PZT 95/5 铁电陶瓷组装的爆电电源具有结构简单、参数容易调节等优点，可以实现同时输出高电压、大电流。

References:

[1] Neilson F W. Ferromagnetic and Ferroelectric One-Shot Explosive-Electric Transducers [R]. TID-4500,1956.

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

[3] Anderson G W,Whitcomb S E. The Study of a New Explosive-to-Electric Transducer [R]. SCTM50-58(51),1958.

[4] Lysne P C. Analysis of Shock-Wave-Actuated Ferroelectric Power Supplies [J]. Ferroelectrics,1976,10:129-133.

[5] Doran D G. Shock-Wave Compression of Barium Titanate and 95/5 Lead Zirconate Titanate [J]. J Appl Phys,1968,39:40-47.

[6] Lysne P C,Percival C M. Prediction of Dielectric Breakdown in Shock-Loaded Ferroelectric Ceramics [J]. J Appl Phys,1975,46:1519-1525.

[7] Mock W,Jr ,Holf W H. Pulse Charging of Nanofarad Capacitors from the Shock Depoling of PZT 56/44 and PZT 95/5 Ferroelectric Ceramics [J]. J Appl Phys,1978,49:5846.

[8] Hart E J. Power Supply:US,985078 [P]. 1976-03.

[9] Novitsky E Z. Converters of Mechanical Energy of a Shock Wave to an Electrical one through Ferroelectrics [J]. Ferroelectrics,1980,23:19-22.

[10] Wang Y L,Yuan W Z,He G R,et al. Study on Shock Wave Explosive Energy Conversion of Ferroelectrics [J]. Acta Phys Sin,1983,32(6):780-785. (in Chinese)
王永龄,袁万宗,何国荣,等. 铁电体爆-电换能的实验研究 [J]. 物理学报,1983,32(6):780-785.

[11] Yuan W Z. Study on Shock Wave Explosive Energy Conversion of PZT-95/5 Ferroelectrics [R]. Mianyang:CAEP,1985. (in Chinese)
袁万宗. PZT-95/5 型铁电体爆电换能器研究 [R]. 绵阳:中国工程物理研究院,1985.

[12] Wen D Y,Ling Q W. Dielectric Breakdown of Ferroelectric Ceramics PZT-95/5 under Shock Compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,1998,12(3):199-201. (in Chinese)
温殿英,林其文. 冲击波压缩 PZT-95/5 铁电陶瓷的电介质击穿 [J]. 高压物理学报,1998,12(3):199-201.

[13] Zhang F P,He H L,Du J M,et al. Influence of Grain Size on Breakdown Voltage of PZT95/5 Ferroelectric Ceramics under Shock Compression [J]. Journal of Inorganic Materials,2005,20(4):1019-1024. (in Chinese)
张福平,贺红亮,杜金梅,等. PZT95/5 铁电陶瓷晶粒度对冲击波作用下击穿电压的影响 [J]. 无机材料学报,2005,20(4):1019-1024.

[14] Dick J J,Vorthman J E. Effect of Electrical State on Mechanical and Electrical Response of a Ferroelectric Ceramic PZT 95/5 to Impact Loading [J]. J Appl Phys,1978,49(4):2494-2498.

[15] Setchell R E,Montgomery S T,Chhabildas L C,et al. The Effect of Shock Stress and Field Strength on Shock-Induced Depoling of Normally Poled PZT 95/5 [A]//Furnish M D,Chhabildas L C,Hixson R,et al. Shock Compression of Condensed Matter-1999 [C]. New York:AIP Melville,2000:979-982.

[16] Lysne P C. Dielectric Properties of Shock-Wave-Compressed PZT 95/5 [J]. J Appl Phys,1977,48(3):1020-1023.

Study of Pulsed Large Current Out-Put of Shock-Activated Energy Transducer

DU Jin-Mei,ZHANG Fu-Ping,ZHANG Yi,WANG Hai-Yan

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang* 621900,*China*)

Abstract: The PZT 95/5 ferroelectric ceramics with niobium doped was assembled into the shock-activated energy transducer. Based on the explosive-to-electric energy transfer theory, the large pulse of electrical current output was investigated under the action of shock wave in "normal mode", and the electrical response of *LRC* load was discussed, especially for the small resistance (R) and small inductance (L) load. Several shock wave tests were conducted, and the PZT 95/5 ceramic stacks in parallel were devised to generate large pulses of electrical current. The maximum output current reaches above 5 kA, and the rising rate of the initial current is to 10～20 GA/s. The experimental results accord very well with the calculations.

Key words: PZT 95/5 ferroelectric ceramic; pulsed current; shock wave; energy transducer; ferroelectric power supply