

冲击加载下 PZT 95/5 铁电陶瓷的脉冲 大电流输出特性^{*}

杜金梅 张毅 张福平 贺红亮 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波物理实验室 绵阳 621900)

(2005 年 11 月 4 日收到 2005 年 12 月 6 日收到修改稿)

极化了的 PZT 95/5 铁电陶瓷在冲击波作用下发生铁电相到反铁电相的结构相变, 释放出被束缚的电荷, 流经外电路, 形成脉冲电流. 基于这一原理, 针对低感、低阻负载的要求, 对 PZT 95/5 铁电陶瓷 LRC 电路响应进行了理论分析, 并开展了实验研究. 实验采用多组 PZT 95/5 铁电陶瓷并联, 获得了前沿小于 500ns, 峰值大于 5kA 的大电流.

关键词: PZT 95/5 铁电陶瓷, 冲击波, 爆电电源

PACC: 7780, 6250

1. 引 言

20 世纪 50 年代后期发展了一种爆炸铁电体电源^[1-3](爆电电源), 它基于铁电体爆电换能原理^[1]工作, 是一种利用炸药爆炸的化学能诱导产生脉冲电能的装置. 其储能器件和换能器件为一体, 由铁电体元件组装而成. 以经过极化而具有剩余极化强度的铁电体作为能量储存器件, 在工作中不需要外加充电电源, 且其储能密度高, 电源体积小, 抗电磁干扰能力强, 在特殊应用中显示了优于传统脉冲电源的特性. 为了研制适用于军事和民用的铁电体储能器件, 国内外进行了大量的研究^[4-17], 发现 PZT 95/5 ($\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$) 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 铁电陶瓷换能器件输出高压、大电流的研究, Mock Jr 等人^[8]以空气炮作为冲击手段, 在电容负载上获得了 81kV 的峰值电压; Hart 等人^[9]用炸药爆炸冲击环状器件, 在电感负载上获得了 440A 的峰值电流; 王永令等人^[13]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 1360A 的电流.

本文针对低感、低阻负载的要求, 采用 PZT 95/5 铁电陶瓷组装换能器件, 对等效的 LRC 电路进行了

分析, 并开展了爆电电源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 5kA 以上电流输出.

2. 冲击加载下 PZT95/5 铁电陶瓷的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 PZT95/5 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 \rightarrow 反铁电相变. 因为 PZT95/5 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的铁电相, 即 PZT95/5 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, 实际上就是束缚电荷变成自由电荷流经外负载的过程, 通常在所关心的几何尺寸内, 可以认为

^{*} 中国工程物理研究院科学技术基金(批准号 20040101)资助的课题.

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。

长方体状的 PZT95/5 铁电陶瓷换能器件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 v 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 $1.6\text{GPa}^{[16]}$ 。如果控制冲击波略高于该值,假设冲击波前后 PZT95/5 铁电陶瓷换能器件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。

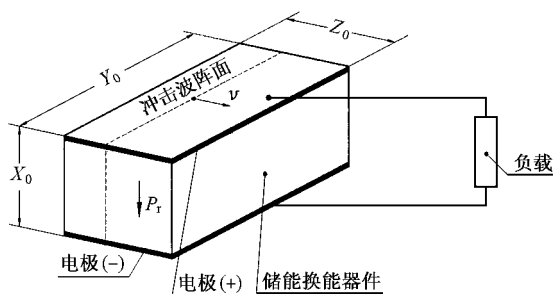


图 1 爆电电源换能原理图

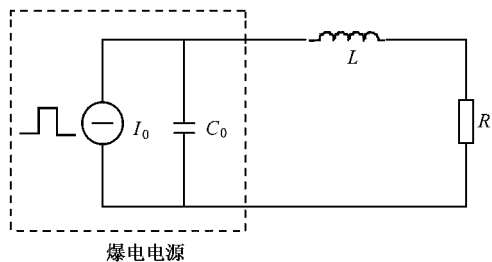


图 2 等效电路

2.2. PZT95/5 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

$$I_0 = \begin{cases} q_0/\tau & 0 \leq t \leq \tau, \\ 0 & t \geq \tau, \end{cases} \quad (1)$$

τ 为冲击波从换能器件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 为换能器件前界面为起点的传播时间; $q_0 = P_r Y_0 Z_0$ 为电极

面上的束缚电荷。

由图 2,当 $t \leq \tau$ 时,等效电路方程为

$$LC_0 \frac{d^2 i_L}{dt^2} + RC_0 \frac{di_L}{dt} + i_L = I_0 \quad t \leq \tau. \quad (2)$$

初始条件为 $t = 0$ 时

$$\begin{aligned} i_L &= 0, \\ \frac{di_L}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

微分方程(2)的两个特征根为

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_0}}. \quad (4)$$

因此,爆电电源对负载的电输出不仅依赖于换能器件的 I_0, C_0 值(I_0 及 C_0 的大小取决于陶瓷换能器件的组装),同时依赖于回路电阻 R 、电感 L 的变化。目前应用研究中,特殊负载(低感、低阻)下,电路中有 $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC_0} < 0$,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

$$i_L = I_0 \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega_d} e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t - \theta) \right] \quad t \leq \tau, \quad (5)$$

其中 $\omega_d = \sqrt{\frac{1}{LC_0} - \frac{R^2}{4L^2}}$, $\omega_0 = \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2}$, $\alpha = \frac{R}{2L}$, $\theta = \arctg \frac{\alpha}{\omega_d}$ 。

由于 $u_{C_0} = L \frac{di_L}{dt} + i_L R$,因此可求得

$$\begin{aligned} u_{C_0} &= RI_0 + I_0 \omega_0 e^{-\alpha t} \left[L \sin(\omega_d t - \theta) \right. \\ &\quad \left. - \frac{R}{2\omega_d} \cos(\omega_d t - \theta) \right] \quad t \leq \tau. \end{aligned} \quad (6)$$

$t \geq \tau$ 时,等效电路方程为

$$LC_0 \frac{d^2 i_L}{dt^2} + RC_0 \frac{di_L}{dt} + i_L = 0. \quad (7)$$

初始条件, $t = \tau$ 时

$$\begin{aligned} i_L &= I_L(\tau) \\ u_{C_0} &= U_{C_0}(\tau) \end{aligned} \quad (8)$$

即 $U_{C_0}(\tau), I_L(\tau)$ 为 $t = \tau$ 时,分别由(5)式和(6)式所得到的 u_{C_0} 和 i_L 的值。微分方程(7)的解可表示为

$$\begin{aligned} i_L &= \left\{ I_L(\tau) \cos[\omega_d(t - \tau)] + \frac{U_{C_0}(\tau) + \frac{R}{2} I_L(\tau)}{L\omega_d} \right. \\ &\quad \left. \times \sin[\omega_d(t - \tau)] \right\} e^{-\alpha(t-\tau)} \quad t \geq \tau, \end{aligned} \quad (9)$$

因此有

$$i_L = \begin{cases} I_0 \left[1 - \frac{\omega_0}{\omega_d} e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t - \theta) \right] & t \leq \tau, \\ \left\{ I_L(\tau) \cos[\omega_d(t - \tau)] + \frac{U_{C_0}(\tau) + \frac{R}{2} I_L(\tau)}{L\omega_d} \sin[\omega_d(t - \tau)] \right\} e^{-\alpha(t-\tau)} & t \geq \tau. \end{cases} \quad (10)$$

I_0 及 C_0 的大小取决于陶瓷换能器件的组装, 可以分别根据 PZT95/5 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

器件 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(10)式, 理论计算的电流波形

表 1 电路参数及计算结果

换能器件 I_0/kA	换能器件电容 C_0/nF	电流脉宽 $\tau/\mu\text{s}$	电感 $L/\mu\text{H}$	静态电阻 R/Ω	电流峰值 I_{\max}/kA	电流前沿 t_r/ns
4.5	30	1.0	0.3	1.2	7.0	300

注: C_0 为计算值, 电容 $\epsilon = 10\text{nF}/\text{m}^2$ [17], 定义电流信号上升时间为“前沿”.

如图 3 所示.

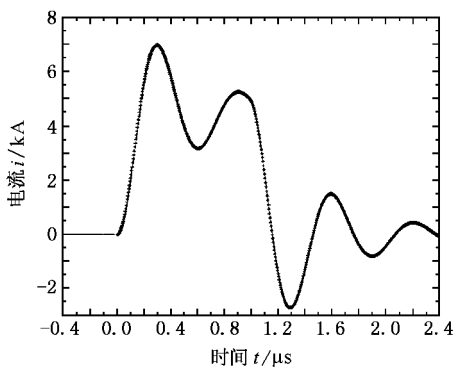


图 3 计算电流波形

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 0 附近的欠阻尼振荡, 最终趋于 0.

在实际应用中, 我们关心的是脉冲宽度 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(10)式可得

$$t_r = \frac{\pi}{\omega_d}, \quad (11)$$

$$I_{\max} = I_0 \left(1 + e^{-\alpha \frac{\pi}{\omega_d}} \right). \quad (12)$$

由(11)和(12)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} .

显然, 当 $\alpha \rightarrow 0$, $I_{\max} \rightarrow 2 I_0$, 即最大电流接近于 2 倍恒流源, 所以电感负载又叫大电流模型.

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. 本文低阻抗负载下, 电路中的电感来自电流输出导线; 电阻 R 值在 0.3—2 Ω 范围内, 包括回路电阻.

实验所用陶瓷样品尺寸为 $X_0 \times Y_0 \times Z_0 = 2\text{mm} \times 30\text{mm} \times 4\text{mm}$, 为了获得大电流, 换能器件采用并联组装. 组装后的换能器件用封装介质(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件进行冲击. 平面波的平面性控制在 0.2 μs 以内, 冲击装置与换能器件之间, 通过有机玻璃和封装介质等阻抗失配来控制冲击波强度, 使得在换能器件中形成的冲击应力脉冲的宽度远大于 10^{-6}s , 冲击应力脉冲的幅度为 2.0GPa 左右. 这个应力低于样品的 Hugoniot 弹性极限^[4], 在 PZT-95/5 铁电陶瓷中的传播速度 $v \approx 4.0\text{mm}/\mu\text{s}$, 这样, 本文实验中电流脉冲宽度为 1 μs 左右.

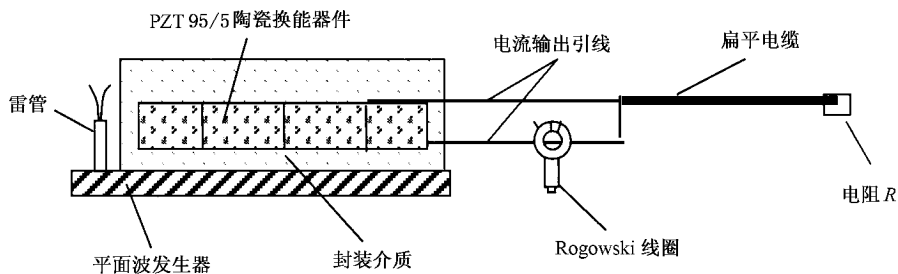


图 4 实验装置示意图

4. 实验结果与讨论

表 2 给出了 2 次实验结果及相应实验条件, 其电流输出波形如图 5 所示.

我们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 5kA 以上的脉冲电流时, 电流前沿小于 500ns, 电流变化(增加)速率为 10^{10} A/s 左右, 由此可以看出, 爆电电源能量释放速率较大. 实际应用中还可以根据需要进行调整回路电感、电路电容获得更大电流, 近似于 $2I_0$ 输出.

表 2 实验条件及电流结果

实验编号	换能器件 I_0/kA	换能器件电容 C_0/nF	电感 $L/\mu\text{H}$	静态电阻 R/Ω	电流峰值 I_{\max}/kA	电流前沿 t_r/ns
20040410	4.5	30	0.35	0.54	7.0	330
20040507	4.5	30	0.33	0.71	6.6	330

注: 这里只给出了静态回路电阻的测量值, 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—2Ω 内. 换能器件的电容 C_0 受粘接条件影响, 这里给出了计算值.

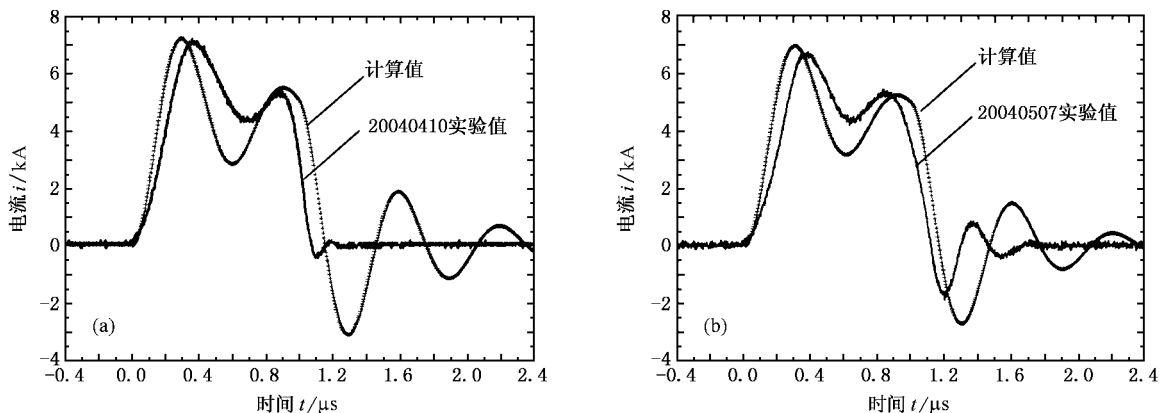


图 5 电流波形

实验结果与理论计算比较, 两者符合较好, 表明理论计算可以对实验进行较好的预估. 实测信号前沿比理论预估的要偏大, 在理论预估时, 把 I_0 作为恒流源来处理, 而在实验时, 换能器件的组装、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, 进而影响电流的输出前沿. 实际应用研究中, 在电流流经电路时电阻会瞬间发生变化, 同时

PZT 95/5 铁电陶瓷的电容在冲击波作用下也是瞬间发生变化, 使得实测的欠阻尼振荡的电流信号与理论计算值稍有偏差, 这些参数的变化规律有待深入研究.

本文实验中选取了冲击波方向尺寸为 4mm 的陶瓷, 因此电流脉冲宽度均为 $1\mu\text{s}$ 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 (10kV 左右) 输出, 易于获得高功率 (MW 级) 输出.

5. 结 论

本文针对低感、低阻负载的要求, 对爆电电源的脉冲电流输出特性进行了理论分析, 建立了爆电电

源大电流脉冲输出理论预估方法. 实验上进行了 PZT95/5 铁电陶瓷组装的爆电电源 5kA 以上脉冲大电流输出设计, 并成功输出, 获得的信号波形好, 前沿陡, 电荷释放速率快, 进一步验证了 PZT95/5 铁电陶瓷作为爆电电源核心部件的应用价值.

同时, 研究结果也验证了 PZT95/5 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, 表明爆电电源有望成为高功率电源.

-
- [1] Neilson F W 1956 SC-TM 230B-56(51)
- [2] Neilson F W 1957 *Bull American Physics Soc.* **2** 302
- [3] Anderson G W and Whitcomb S E 1958 Copy-1837 Project Dehenry SCTM50-58(51)
- [4] Doran D G 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 40
- [5] Lysne P C and Percival C M 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 1519
- [6] Lysne P C 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 1020
- [7] Bauer F 1980 *Journal of American Ceramics Soc.* **63** 268
- [8] Mock Jr W, Holf W H 1980 *J. Appl. Phys.* **49** 5846
- [9] Hart E J 1976 *Power Supply* US Patent 3,985,078
- [10] Novitsky E Z, Kolesnikov V V 1980 *Ferroelectrics* **23** 19
- [11] Xu Z, Feng Y J, Zheng S G, Jin A, Wang F L, Yao X 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1787 (in Chinese) [徐 卓、冯玉军、郑曙光、金安、王方林、姚 熹 2001 物理学报 **50** 1787]
- [12] Qiang F, Zhu J, Mao X Y, Chen X B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5422 (in Chinese) [羌 锋、朱 骏、毛翔宇、陈小兵 2005 物理学报 **54** 5422]
- [13] Wang Y L, Yuan W Z, He G R, Lin S W, Ling R H, Qu C F 1983 *Acta Phys. Sin.* **32** 780 (in Chinese) [王永令、袁万宗、何国荣、林盛卫、凌荣华、瞿翠凤 1983 物理学报 **32** 780]
- [14] Lin Q W 1984 *Explosion, Shock Waves* **8** 111 (in Chinese) [林其文 1984 爆炸与冲击 **8** 111]
- [15] Wen D Y, Lin Q W 1998 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **12** 199 (in Chinese) [温殿英、林其文 1998 高压物理学报 **12** 199]
- [16] Dick J J, Vorthman J E 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 2494
- [17] Setchell R E, Montgomery S T, Chhabildas L C, Furnish M D 1999 *Shock Compression of Condensed Matter* 979-982

Large current out-put of PZT 95/5 ferroelectric ceramics under shock loading^{*}

Du Jin-Mei Zhang Yi Zhang Fu-Ping He Hong-Liang Wang Hai-Yan

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

(Received 4 November 2005 ; revised manuscript received 6 December 2005)

Abstract

The poled PZT 95/5 ferroelectric ceramic is in ferroelectric (FE) phase , it can be transformed into the antiferroelectric (AFE) phase by shock compression , so the bound charge can be liberated into an external circuit to generate pulses of electrical current . Based on this FE/AFE transition theory , the electrical response of *LRC* load was discussed , especially for the small resistance (*R*) and small inductance (*L*) load in this paper . A set of PZT 95/5 ceramics in parallel connection was devised to generate large pulses of electrical current in two plane-wave tests . The maximum output current reaches above 5 kA , and the corresponding rise time of the front edge is under 500ns .

Keywords : PZT 95/5 ferroelectric ceramic , shock wave , ferroelectric power supply

PACC : 7780 , 6250

^{*} Project supported by the Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 20040101).