

文章编号: 1001-1455(2013)02-0212-05

爆轰驱动飞片撞击铁电体爆电换能的放电特性*

顾林, 张合

(南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究铁电体作小型电磁脉冲弹高功率脉冲电源的放电特性, 提出了爆轰驱动飞片撞击铁电体的冲击波数值算法, 计算了不同装药长度下飞片对铁电体的冲击载荷, 建立了铁电体负载为高压储能电容的去极化放电模型, 设计了铁电体去极化放电装置, 并进行了实验。实验表明: 5 mm 的装药柱长度能够满足铁电体相变的压强条件; 负载为 0.2 Ω 、18 μH 时, 储能电容能够将放电脉宽拉伸至 20 μs , 去极化放电能量随着铁电体并联数目增加而增加, 放电损耗率大约 15%。

关键词: 爆炸力学; 去极化; 爆轰驱动; 铁电体; 飞片

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

小型电磁脉冲弹、磁爆加载弹药等常规武器装备为了提高毁伤效果, 要求弹上的磁通量压缩发生器 (MFCG) 获取尽可能大的初始磁通量。初始磁通量可由高压脉冲电容或者铁电体爆电电源瞬时放电电流产生的感生磁场获得^[1-2]。高压脉冲电容能量密度低、体积大, 且需要预充电, 往往应用于大型电磁脉冲弹或者航弹上。人工极化铁电体 $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ (PZT95/5) 在冲击波加载下发生去极化相变, 束缚的面电荷在负载上释放出来, 在数微秒内形成兆瓦级放电功率^[3]。因此高能量密度即时瞬发的铁电体爆电电源成为常规磁爆加载弹药和微型电磁脉冲弹首选。

W. Mock Jr 等^[4]、贺元吉等^[5-6]、杜金梅等^[7]都曾研究过冲击波加载下铁电体的物理现象, 其中贺元吉等采用平面爆轰直接冲击加载铁电体, 杜金梅等则选用空气炮冲击加载。这 2 种冲击加载方式都只适合于实验室研究铁电体去极化放电理论, 不适合常规弹药发射和飞行的恶劣环境。同时铁电体去极化过程只有数微秒, 而 MFCG 起爆时序精度受电雷管发火作用时间误差散布影响, 精度最高为 10 μs 。铁电体爆电电源直接对 MFCG 放电的时序控制难度太大, 难以实现。

本文中, 在研究爆轰驱动飞片撞击冲击波数值算法和 PZT95/5 的去极化放电模型基础上, 设计出一种利用爆轰波驱动铝质飞片撞击加载铁电体的方案, 并采用聚丙烯高压储能电容储存铁电体释放的电荷, 来延长放电时间, 便于起爆时序控制。最后通过实验研究爆轰驱动飞片撞击 PZT95/5 的去极化过程, 验证方案的可行性。

1 爆轰驱动飞片撞击冲击波数值算法

运动物体发生碰撞, 将在碰撞界面产生 2 个方向相反的冲击波并沿着两物体传播^[8]。将飞片与铁电体的碰撞简化为一维平面正碰撞的情况, 其物理过程图如图 1 所示。

假设飞片 I 与铁电体 II 分别以速度 u_{10} 和 u_{20} 向右运动, $u_{10} > u_{20}$, ρ_{10} 、 ρ_{20} 为初始密度参数, ρ_1 、 ρ_2 为冲击波后参数, 碰撞界面 J 上产生的冲击波 S_1 与 S_2 分别以速度 v_{D1} 、 v_{D2} 传播。

$$\text{由冲击波的基本关系式 } \begin{cases} u_2 - u_{20} = \sqrt{p_2(v_{20} - v_2)} \\ u_1 - u_{10} = \sqrt{p_1(v_{10} - v_1)} \end{cases}, \text{界面连续条件 } \begin{cases} u_1 = u_2 = u_x \\ p_1 = p_2 = p_x \end{cases} \text{ 及初值 } u_{20} = 0,$$

可得出界面处初始冲击波压力 p_x 和粒子速度 u_x 分别为

* 收稿日期: 2011-12-13; 修回日期: 2012-03-01

基金项目: 总装备部“十二五”预先研究项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CX LX11_0233)

作者简介: 顾林 (1986—), 男, 博士研究生。

$$p_x = \frac{\rho_{10} \rho_{20}}{\alpha_1 \alpha_2} \frac{u_{10}^2}{\left(\sqrt{\frac{\rho_{10}}{\alpha_1}} + \sqrt{\frac{\rho_{20}}{\alpha_2}}\right)^2} \quad (1)$$

$$u_x = \frac{\sqrt{\frac{\rho_{10}}{\alpha_1}}}{\sqrt{\frac{\rho_{10}}{\alpha_1}} + \sqrt{\frac{\rho_{20}}{\alpha_2}}} u_{10} \quad (2)$$

在铁电体中传播的冲击波波速

$$v_{D2} = \frac{\rho_2 u_x}{\rho_2 - \rho_{20}} \quad (3)$$

根据介质的冲击压缩关系式 $p = A [(\rho/\rho_0)^n - 1]$,

可以得到

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1 - v_1/v_0 = 1 - (p_x/A_1 + 1)^{-1/n_1} \\ \alpha_2 = 1 - v_2/v_0 = 1 - (p_x/A_2 + 1)^{-1/n_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: A, n 为实验确定的介质材料的特性常数。求解时,需先假定一系列的 p_x 值,代入式(4)中解得 α_1, α_2 ,将解得的值带回到式(1)中解得 p_x 值,迭代至此值与假设基本相等,从而解出其他未知量。

根据被驱动物体在爆轰产物作用下的运动规律以及爆轰产物流动的等熵关系,在以平面透镜起爆的爆轰系统中,被驱动飞片运动速度 u_f 近似用理想一维驱动条件下的简化模型计算,加以适当的修正因子 k (取值 $0.95 \sim 1.05$)^[9-10],得出

$$u_f = kD \left(1 - \frac{1 - \xi}{\eta \xi} - \frac{l \xi}{Dt} \right) \quad (5)$$

式中: t 为从雷管引爆开始计算的时间, l 为等效装药长度, $\eta = \frac{16m_e}{27m_f} = \frac{16\rho_e l}{27\rho_f l'}$, $\xi = \left[1 + 2\eta \left(1 - \frac{l}{Dt} \right) \right] - \frac{1}{2}$,其中 l' 为飞片厚度, m_e 为装药质量, m_f 为飞片质量。

对撞击模型进行数值模拟,装药药柱选择 TNT 炸药,爆速为 6 850 m/s,药柱直径 30 mm,装药密度为 1.6 g/cm³。铝制飞片的密度为 2.7 g/cm³,厚度取 2 mm。计算出 2 μ s 时不同装药量下的飞片速度与飞行行程 X ,并代入到冲击波压力和初始波速的算式中去。取 $k = 1$,得出结果如表 1 所示,表中 p 为撞击力。

表 1 中结果显示,飞片速度越大,在冲击波阵面处产生的撞击力越大,同时在被撞击物体内的冲击波初始波速也在增大。仅 5 mm 的有效装药长度就可以达到 20 GPa 的撞击压强,在被撞击的铁电体中产生的初始波速达到 4 744 m/s。而铁电体的相变初始应力约 0.5 GPa,相变完成压力约 1~3 GPa。因此飞片撞击式的冲击波加载方案不仅完全能够满足引起铁电体相变的初始条件,并且还可以根据工作空间的要求缩减装药量,减小飞片行程,完成小型化设计要求。

2 PZT 去极化放电模型

PbZr_xTi_{1-x}O₃ 是 PbZrO₃ 和 PbTiO₃ 的连续固溶体(0 ≤ x ≤ 1),呈钙钛矿结构。在室温时, $x < 0.53$ 为四方铁电相 FT,点群 4 mm, $0.53 < x < 0.95$ 为晶胞为菱面体的三角铁电相 FR,点群 3 m, $x > 0.95$ 为正交反铁电相 Ao。PbZr_{0.95}Ti_{0.05}O₃ (PZT95/5) 处于高铅区的铁电(F)-反铁电相(AF) 相界^[11]。在外

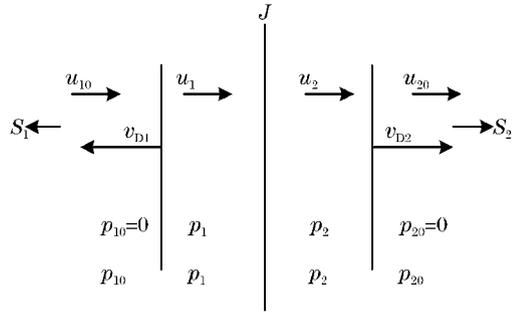


图 1 高速碰撞物理过程

Fig. 1 High velocity impact physical process

表 1 撞击模型数值模拟结果
Table 1 Simulation results of the impact model

l/mm	$u_f/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	X/mm	p/GPa	$v_{D2}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
3	1 212	2.00	14.05	4 509
5	1 646	2.80	20.16	4 744
8	2 142	3.21	27.8	5 017
10	2 355	3.47	31.3	5 135

施电场作用下, PZT95/5 中的偶极子重新取向, 形成单一的铁电相。在冲击波的作用下, PZT95/5 铁电陶瓷发生了从 F 到 AF 的相变。

为了获取大电流, PZT95/5 采用垂直加载模式, 冲击波加载方向与铁电体极化方向 P_r 垂直。贺元吉、杜金梅等^[5-7]研究过负载为短路、感性和阻性的铁电体放电特性。本文中研究中间加高压储能电容做放电缓冲, 负载为 μF 级容量电容的放电特性。图 2 是其等效电路图。铁电体等效为定值的电流源与定值电容并联的形式。在冲击波传播过程中, 由于波前界面与波后界面铁电陶瓷的面积发生变化, 等效的电容与电导也将发生变化。

等效电路模型将铁电体等效为随时间 t 变化的电流源 $I(t)$ 与电容 $C(t)$ 、电导 $G(t)$ 并联。MFCG 等效为电感和电阻串联^[2]。铁电体完全去极化后电荷 Q_0 经过 D_1 储存在电容 C_L 上, R_0 为电容等效电阻 ESR 和线路杂阻之和。电容 C_L 理论电压值为

$$U_0 = Q_0 / C_L = P_r A / C_L \quad (6)$$

爆炸开关 K_1 闭合后, 形成脉冲电流形成回路。忽略电容 $C(t)$ 、电导 $G(t)$ 以及 R_0 对放电回路的影响, 储能电容 C_L 对 MFCG 负载放电电流为

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega' L_m} e^{-\alpha t} \sin \omega' t \quad (7)$$

本文中电参数下放电波形为振荡衰减, 其中 $\alpha = (R_m + R_0) / 2L_m$, $\omega' = 1 / \sqrt{1/L_m C_L - \alpha^2}$ 。

3 实验设计

3.1 实验装置设计

实验装置包括底端盖、控制电路板、电雷管、雷管支撑座、高爆药、铝质飞片、环氧树脂、铁电体支撑座、铁电体等部分组成。环氧树脂将铁电体灌封在铁电体支撑座里面。

远程控制电路板点火电雷管, 引爆高爆药后产生爆轰波。爆轰波剪切并驱动铝质飞片加速运动, 使其高速撞击由环氧树脂包裹铁电体。铁电体在冲击载荷下发生去极化相变释放电荷, 电荷通过电极导线储存到聚丙烯高压储能电容 C_L (6 kV, 50.4 μF) 上。实验装置结构示意图和外观图如图 3 所示。

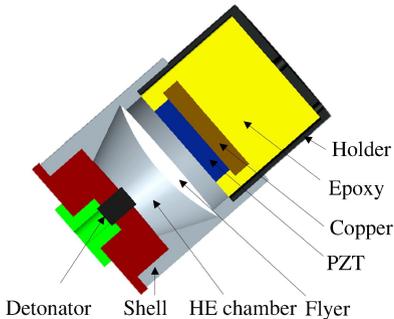


图 3 实验装置结构示意图和外观图

Fig. 3 Structure and appearance of the experimental device

然后通过万用表和高压衰减探头测量电容两端的储能电压。接着闭合爆炸开关 K_1 , 形成脉冲电容对负载的放电回路。通过罗格夫斯基线圈 (135 A/V) 和管式分流器 (93.8 A/V) 2 种脉冲大电流测试方法记录放电电流脉冲波形。

3.2 铁电体制备

PZT95/5 铁电体制备采用分析纯的金属氧化物作原料, 外加质量分数为 3% 的 PbO 原料, 球磨

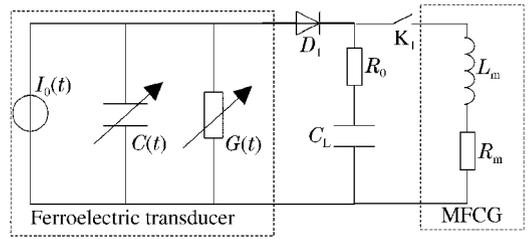


图 2 铁电体爆电换能等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of ferroelectric transducer

24 h; 烘干; 700~800 °C 预烧; 二次球磨; 外加质量分数为 5% 的 PVA 水溶液, 造粒, 在 140 MPa 的压力下成型; 在 600 °C 下排塑; 在 1 250~1 300 °C 下烧结出 PZT95/5 陶瓷。陶瓷减薄后, 烧银和极化。本文的铁电体薄片由南京理工大学材料科学与工程学院烧制提供, PZT95/5 剩余极化强度 $P_r = 33.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 尺寸为 2 mm×30 mm×10 mm。

4 实验结果与分析

设置装药长度分别为 3、5、10 mm, 铁电体并联数目 n 为 30、60、90、120, 实验测量储能电容实际储能电压 U_0' , 损耗率为 θ , 同时记录放电波形和放电电流峰值。实验采用螺旋线圈模拟 MFCG 负载, 电参数为 0.2 Ω 、18 μH 。放电过程电容 C_L 的两端电压近似线性规律增长。其中 6 次成功实现爆电换能的实验数据如表 2 所示。

表 2 爆轰驱动飞片撞击铁电体去极化放电实验结果

Table 2 Experimental results of depolarization discharge of PZT95/5 impacted by explosive-driven flyer

实验	l/mm	n	U_0/V	U_0'/V	$\theta/\%$	I_{max}	
						罗氏线圈(135 A/V)	分流器(93.8 A/V)
1	3	30	11.86	8.18	31.02	无波形	0.12 V/11.26A
2	5	30	11.86	10.06	15.17	无波形	0.14 V/13.13 A
3	5	60	23.71	19.73	16.75	0.20 V/27.00 A	0.28 V/26.26 A
4	10	60	23.71	20.25	14.55	0.22 V/29.70 A	0.32 V/30.02 A
5	10	90	35.58	29.40	17.41	0.28 V/37.80 A	0.42 V/39.40 A
6	10	120	47.44	38.74	18.26	0.38 V/51.30 A	0.56 V/52.53 A

注: 无波形原因是罗氏线圈和示波器测量电流最低 20 A。

当装药长度大于 5 mm 时, 药柱长度的增加几乎不改变储能电压值, 所以实际飞片冲击压强应该大于 2 GPa, 基本上能够使铁电体完全去极化。铁电爆电换能的能量损耗率大约为 15%, 主要损耗原因为电路的杂感杂阻、侧向稀疏波导致的去极化不完全、铁电体自身的等效电容与电阻等。在满足电流值要求的情况下, 储能电容的存在能明显拉宽放电脉宽。实验 6 的放电电流大于 40 A 的持续时间约 20 μs , 峰值大于 50 A, 如图 4 所示。电容储存的能量随着并联铁电体数目的增大而增大, 但是并联数目的提升增加了陶瓷片连接工艺的难度, 损耗率也随之增加。由于铁电体爆电换能过程会产生高压, 储能电容损伤较严重, 容易击穿, 因此适合单次使用。

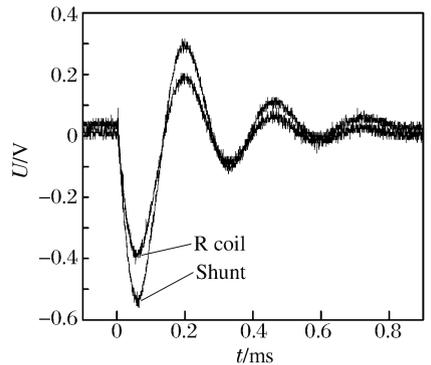


图 4 实验 6 的放电波形

Fig. 4 Discharge waveform of experiment 6

5 结束语

设计加工了铁电体爆电换能器冲击波加载实验装置, 进行爆轰驱动飞片撞击下的铁电体去极化放电实验, 负载为高压储能电容。得出如下结论: 5 mm 的装药柱长度能够满足铁电体相变的压强条件; 负载为 0.2 Ω 、18 μH 时, 储能电容能够将放电脉宽拉伸至 20 μs ; 铁电体 PZT95/5 去极化放电在储能电容上的充电电压近似线性增长, 能量随着陶瓷片数目的增加而增加, 放电损耗率大约为 15%。本实验可为常规弹载小型化高功率脉冲电源提供一种可行的技术途径。

参考文献:

[1] Altgilbers L L, Brown M D J, Grishnaev I, et al. 磁通量压缩发生器[M]. 孙承纬, 周之奎, 译. 北京: 国防工业出版社, 2008: 4.

- [2] 李红梅, 邱景辉, 贾世楼. 爆炸磁频率发生器电振荡特性分析[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2007, 31(4): 494-497.
Li Hong-mei, Qiu Jing-hui, Jia Shi-lou. Analysis of electric oscillations in explosive magnetic generators of frequency[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Nature Science, 2007, 31(4): 494-497.
- [3] Lysne P C, Percival C M. Electric energy generation by shock compression of ferroelectric ceramics: Normal-mode response of PZT95/5[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(4): 1519-1525.
- [4] Mock W Jr, Holf W H. Pulse charging of nanofarad capacitors from the shock depoling of PZT 56/44 and PZT95/5 ferroelectric ceramic[J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(4): 5846.
- [5] 贺元吉, 张亚洲, 李传庐. PZT95/5 铁电陶瓷脉冲源用于 nF 电容器充电[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 34-35.
He Yuan-jie, Zhang Ya-zhou, Li Chuan-lu. High power pulse supplier of PZT95/5 ferroelectric ceramics for charging of nanofarad capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 34-35.
- [6] 贺元吉, 张亚洲, 李传庐, 等. 冲击波加载下 PZT95/5 铁电陶瓷电响应的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2000, 14(3): 189-194.
He Yuan-ji, Zhang Ya-zhou, Li Chuan-lu, et al. The numerical simulation of electric response of PZT95/5 ferroelectric ceramics subjected to shock loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(3): 189-194.
- [7] 杜金梅, 张毅. 冲击加载下 PZT 95/5 铁电陶瓷的脉冲大电流输出特性[J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2584-2588.
Du Jin-mei, Zhang Yi. Large current out-put of PZT95/5 ferroelectric ceramics under shock loading[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2584-2588.
- [8] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993: 112-154.
- [9] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 187-199.
- [10] 赵峰. 炸药强爆轰驱动高速金属飞片的实验和理论研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005: 36.
- [11] 钟维烈. 铁电体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 22-27.

Discharge characteristics of ferroelectric ceramics explosive to electrical transducer impacted by explosive-driven flyer^{*}

Gu Lin, Zhang He

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To study the discharge characteristics of ferroelectric ceramics as high power pulse supply of miniature electromagnetic pulse bombs, the numerical algorithm of the shock wave on the ferroelectric ceramics impacted by an explosive-driven flyer was brought forward. The impact loads of different charging lengths were calculated. The depolarization discharge model for PZT95/5 loaded by a high voltage energy storage capacitor was established. The experimental device for the depolarization discharge of PZT95/5 was designed. The experimental results show that 5 mm charging length can meet the transition pressure of ferroelectric ceramics. The energy storage capacitor enlarges the discharge pulse width to 20 μ s when the electrical parameters of the load are 0.2 Ω and 18 μ H. The depolarization discharge energy increases with the growth of the number of the ferroelectric ceramics in parallel connection. The discharging loss rate is about 15%.

Key words: mechanics of explosion; depolarization; explosive-driven; ferroelectric ceramics; flyer

* Received 13 December 2011; Revised 1 March 2012

Corresponding author: Gu Lin, gulin_110@163.com