文章编号：1000-5773(2006)02-0217-03

斜入射冲击波加载下 PZT95/5 铁电陶瓷的放电特性研究*

张福平，张 毅，杜金梅，王海晏，贺红亮

（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：研究了冲击波倾斜入射 PZT95/5 铁电陶瓷时的放电特性。结果表明，在小负载条件下，随着入射倾斜角的增加，PZT95/5 铁电陶瓷放电电流波形前沿变缓，脉宽时间增加，波形从单脉冲方波演变成梯形波，甚至锐变成三角波。

关键词：PZT95/5 铁电陶瓷；斜入射；冲击波；放电特性

中图分类号：O521.2 **文献标识码**：A

1 引 言

Zr：Ti 为 95：5 的 PZT 铁电陶瓷（简称 PZT95/5 铁电陶瓷）在冲击波作用下，由铁电相转变成反铁电相去极化产生脉冲电流，可以作为脉冲电源发生器[1-2]，PZT95/5 铁电陶瓷在冲击波作用下的放电特性是这种脉冲电源发生器工作的基础。目前，国内外对于 PZT95/5 铁电陶瓷在冲击波作用下的放电特性的研究主要集中在正碰的情况下[3-4]，对于冲击波斜入射条件下的 PZT95/5 铁电陶瓷放电特性的研究还未见公开报道。而在实际情况下，由于加工、安装、热膨胀系数不匹配等因素的影响，存在冲击波斜入射 PZT95/5 陶瓷的可能，值得我们去研究。

本工作从理论和实验上分析了冲击波斜入射条件下的 PZT95/5 铁电陶瓷放电特性，结果表明随着入射角的增加，PZT95/5 铁电陶瓷放电电流波形前沿变缓，脉宽时间增加，波形从方波演变成梯形波，直至锐变成三角波。

2 斜入射冲击波加载下 PZT95/5 铁电陶瓷的放电过程

实验装置如图 1 所示，在气炮加速下，铝飞片以 500 m/s 速度正碰环氧树脂产生冲击波（环氧树脂的主要作用是电学绝缘），冲击波斜入射 PZT95/5 陶瓷，入射角为 θ。在入射角比较小的条件下，忽略斜击波入射的折射以及马赫效应的影响。入射到PZT95/5陶瓷的压力约为 3 GPa，高于 1.6 GPa 完全去极化压力[5]。为了得到 PZT95/5 陶瓷的放电特性，PZT95/5 陶瓷两电极面与 1 Ω 负载相连，负载上所获得的电压用示波器监测。由于 1 Ω 负载远小于

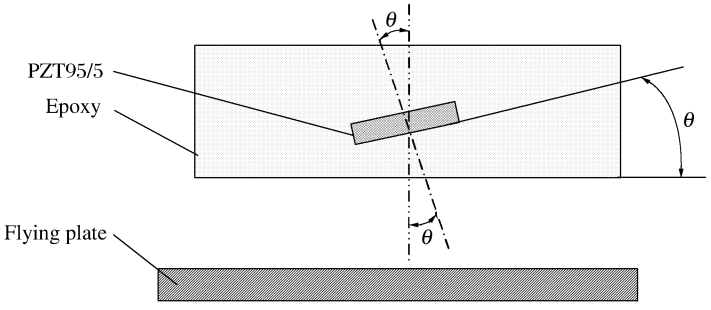

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the experimental arrangement

* 收稿日期：2004-12-12；修回日期：2005-03-23

基金项目：中国工程物理研究院科学技术面上基金(20040101)

作者简介：张福平(1977—)，男，硕士，主要从事 PZT 铁电陶瓷特性研究.

通讯作者：贺红亮(1963—)，男，研究员，主要从事极端条件下材料的物性研究. E-mail：honglianghe@263.net

PZT95/5本身阻抗,为小负载条件,在小负载条件下,冲击波作用下的 PZT95/5 陶瓷等效于理想电流源。

为了便于实验分析,假设冲击波的波阵面仍为平面,这在 θ 较小时是成立的。以波阵面为水平面,对冲击波在陶瓷中传播及电荷的释放进行分析,其结果如图 2 所示。

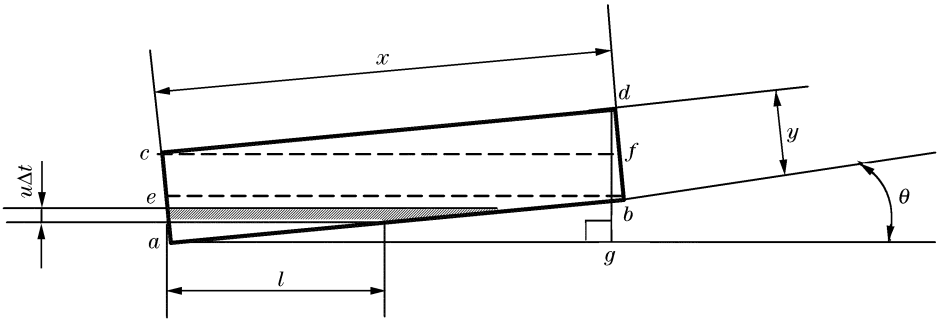

图 2 PZT95/5 陶瓷中冲击波传播示意图

Fig. 2 Propagation of shock wave in titled PZT95/5 ceramic plate

从图 2 可以看出,当冲击波波阵面在 t 时刻(冲击波到达 a 点开始记时),与 PZT95/5 陶瓷侧面的交线长度为 l,冲击波在 PZT95/5 陶瓷的传播速度为 D。冲击波在 $t \to t+\Delta t$ 时间,扫过的面积为 $l\times D\times \Delta t$(图 2 中阴影部分面积),所释放的电荷量为 $P_r\times l\times D\times \Delta t$($P_r$ 为 PZT95/5 剩余极化强度),电流强度为 $P_r\times l\times u$。由于剩余极化强度 P_r 和冲击波传播速度 D 为常数,只有 l 随时间变化而变化。故当波阵面到达 eb 线之前,其电流随时间增加而增加;到达 eb 线之后未到达 cd 线,电流保持恒定值;当波阵面扫过 cf 线后,其电流强度随时间增加而减少,直至零。电流强度随时间变化的表达式如下

$$i=\begin{cases}\dfrac{2Dt}{\sin 2\theta}P_r & t\leqslant \dfrac{x\sin\theta}{D}\\ \dfrac{xD}{\cos\theta}P_r & \dfrac{x\sin\theta}{D}\leqslant t\leqslant \dfrac{y\cos\theta}{D}\\ \dfrac{2x\sin\theta+2y\cos\theta-2Dt}{\sin 2\theta}P_r & \dfrac{y\cos\theta}{D}\leqslant t\leqslant \dfrac{\sqrt{x^2+y^2}\sin[\arctan(y/x)+\theta]}{D}\\ 0 & t\geqslant \dfrac{\sqrt{x^2+y^2}\sin[\arctan(y/x)+\theta]}{D}\end{cases} \tag{1}$$

从公式(1)可以得出,当 $\theta=0$ 时,电流波形为单脉冲方波;当 $\theta>0$ 时,电流波形为单脉冲梯形波;θ 继续增加到 $\theta=\arctan(y/x)$ 时,也就是 eb 线与 cf 线重合时,锐变成三角波。

3 实验结果与分析

实验采用样品尺寸为 20 mm×4 mm×2 mm 长方体试样,20 mm 为长度方向尺寸(也就是图 2 中的 x),4 mm 为高度方向尺寸(图 2 中的 y),2 mm 为厚度方向尺寸(也是极化方向尺寸,在图 2 中为垂直于纸面方向尺寸)。采用不同倾斜角 θ 得到的实测信号波形(由于电阻为 1 Ω,故信号波形为电流波形)与理论计算波形如图 3、图 4、图 5 所示。

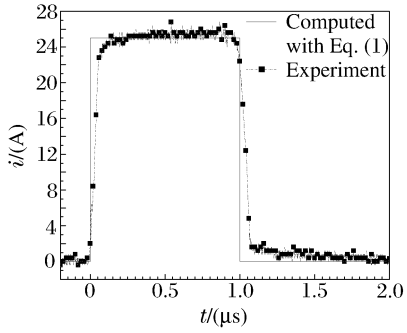

图 3 入射角 θ 为 0 时的电流计算波形与实测波形

Fig. 3 Computed and measured current waveform at incident angle equal to zero

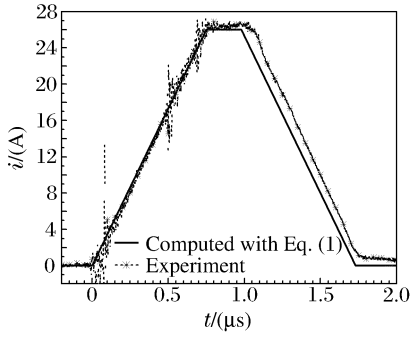

图 4 入射角 θ 为 8.5°时的电流计算波形与实测波形

Fig. 4 Computed and measured current waveform at incident angle equal to 8.5°

从图 3 至图 5 可以看出,当 $\theta=0$ 时,电流波形为方波,前沿上升很快,脉宽为 1 μs;当 θ 增加到 8.5°时,电流波形成为梯形波,前沿上升变缓,脉宽增加为 1.7 μs;当 θ 增加到 11.3°时,电流波形已经锐化成三角波。实验结果与公式(1)描述的电流波形符合很好。对于样品尺寸为 20 mm×4 mm×2 mm长方体试样,在电流波形完全锐化成三角波以前,所有的电流波形的峰值是一致的,不随入射角的改变而改变,但是电流波形的底宽却能大幅度调整,因此通过引入不同的入射角 θ,可以很方便的实现不同电流波形,以满足不同的使用要求。

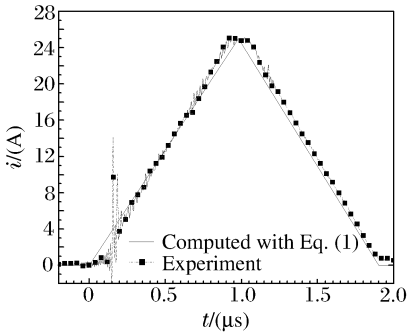

图 5　入射角 θ 为 11.3°时的电流计算波形与实测波形

Fig. 5　Computed and measured current waveform at incident angle equal to 11.3°

4　结　论

在冲击波倾斜入射 PZT95/5 铁电陶瓷的条件下,随着倾斜角的增加,其放电电流波形上升前沿变缓、脉宽变宽,波形从单脉冲方波演变成梯形波,甚至锐化成三角波。

References:

[1] Setchell R E. The Effect of Shock Stress and Field Strength on the Shock-Induced Depoled of Normally Poled PZT95/5 [A]. //Furnish M D. Shock Compression of Condensed Matter-1999 [C]. NewYork: Elsevier Science Publishers B V, 2000: 979-982.

[2] Viogt J A, Sipola D L. Solution Synthesis and Processing of PZT Materials for Neutron Generate Applications [R]. SAND98-2750, 1998.

[3] Setchell R E. Effect of Initial Porosity on the Shock Response of Normally Poled PZT95/5 [A]. //Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. NewYork: Elsevier Science Publishers B V, 2002: 209-212.

[4] Wen D Y, Lin 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.

[5] 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): 1020-1024. (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): 1020-1024.

Charge Release Characterization of PZT95/5 Ferroelectric Ceramics under Tilted Shock Wave Compression

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

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

Abstract: The current waveform of Ferroelectric ceramics PZT95/5 depoling under tilted shock wave compression has been studied. Analytic model was established to analyze the effects of incident angle on the rising time, duration and peak amplitude of the depoling current. Experiments were conducted as well to confirm these effects. Results indicted that with the increasing of incident angle, the depoling current rises with longer time, pulse duration becomes broad and the peak amplitude keeps constant until the waveform decays into triangular form.

Key words: PZT95/5 ferroelectric ceramics; tilt incident; shock wave; deploing curve