

Current Properties with the Phase Transition of PZT 95/5 Ferroelectric Ceramic under Dynamic Loading

Gao-min Liu, Qing-hai Xie, Yi Liu, Hai-yan Wang, Hong-liang He

National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.Box 919-102 Mianyang, Sichuan, P.R. China

Email: cqh_bijet@sohu.com

Abstract: Shock-induced depoling process and electric current releasing of the high density PZT 95/5 ceramics were studied. The current-releasing behavior in the phase transition stress region was studied by comparing the released polarization (P_{rs}) under shock compression and the initial remanent polarization (P_r). Results show that the magnitude of the current released increases with the shock stress. Analysis of the current data further confirms that the phase transition should start at stress about 0.23~0.43 GPa and almost complete at 1.78~2.05 GPa.

Keywords: PZT 95/5; shock loading; phase transition; depoling current

PZT 95/5 陶瓷 FE→AFE 相变区冲击放电规律研究

刘高旻, 谢庆海, 刘艺, 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 919 信箱 102 分箱, 621900

Email: cqh_bijet@sohu.com

摘 要: 采用一级气体炮加载手段, 对高密度 PZT 95/5 陶瓷 FE→AFE 相变引起的去极化过程中的电流释放性能进行了研究。实验结果表明: 在陶瓷相变区内, 冲击压力幅值越大, 电流幅值越大。通过比较冲击释放剩余极化强度 P_{rs} 与陶瓷的初始剩余极化强度 P_r , 确定了该陶瓷的相变起始的冲击压力范围为 0.23~0.43 GPa, 陶瓷相变完成的冲击压力范围为 1.78~2.05 GPa。

关键词: PZT 95/5; 冲击加载; 相变; 电释放

1 引言

自二十世纪五十年代以来, 由于优良的压电和铁电性能, 具有各种不同组分比例、并添加有不同改性剂的锆酸铅和钛酸铅的固溶体, 受到了广泛的研究和关注。经过 40 多年的研究, 有一种特殊组分的锆钛酸铅铁电陶瓷, 其锆(Zr)钛(Ti)原子组分之比为: Zr: Ti=95:5, 添加 2%质量比的铌(Nb)进行改性, 被确认为最有应用前景的脉冲能源材料^[1~5]。这种陶瓷简称为 PZT 95/5。其化学组成为 $\text{Pb}_{0.99}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}_3$ 。

常温-常压下的 PZT 95/5 陶瓷具有反铁电相 (AFE) 结构, 在外加电场作用下 PZT 95/5 陶瓷易于被极化。极

化 PZT 95/5 陶瓷具有铁电相 (FE) 结构, 但处于反铁电相和铁电相的相界附近。当撤去电场后, 受到电场极化作用的 PZT 95/5 陶瓷材料仍能保留一定程度的初始剩余极化强度 P_r , 即在材料表面有束缚电荷存在。处于亚稳态的极化 PZT 95/5 陶瓷受到弱冲击波作用时, 从铁电相 (FE) 迅速转变为反铁电相 (AFE), 剩余极化强度消失, 释放出面束缚电荷, 电荷流经外电路, 形成电流输出。冲击波压缩使极化 PZT 95/5 陶瓷发生铁电相→反铁电相相变 (简称为 FE→AFE 相变), 为我们提供了一种使材料迅速去极化和释放束缚电荷的新型脉冲能源。研究 PZT 95/5 陶瓷的去极化电释放性能, 掌握陶瓷的冲击相变效应, 有助于理解陶瓷的冲击相变过程及影响因素。

PZT 95/5 陶瓷在强直流电场的作用下进行极化储

基金来源: 中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理国防重点实验室基金 (9140C6702030904)

存电能。撤去直流电场后，PZT 95/5 陶瓷保留剩余极化强度 P_r 。初始剩余极化强度 P_r 是 PZT 95/5 陶瓷储存能量的标志和度量，反映了陶瓷电极面储存的电荷量。本文实验使用的 PZT 95/5 陶瓷剩余极化强度 P_r 为 $(30 \pm 1.5) \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。

2 PZT 95/5 陶瓷冲击相变导致的电释放性能实验设计

研究中使用一级气体炮加载技术研究相变压力区 PZT 95/5 陶瓷电输出性能。实验中利用不同的飞片、不同的碰撞速度来调整陶瓷受到的冲击压力。

在 PZT 95/5 陶瓷的正负电极面上外接负载电路用于测量 PZT 95/5 陶瓷电输出性能。电路使用了纯电阻短路负载条件，即负载的 R 远小于陶瓷的阻抗。实验装置如图 1 所示。在一级气体炮上对垂直极化模式^[6]的 PZT 95/5 陶瓷进行了冲击压力为 0.23~2.05 GPa 六个压力点的平面冲击实验。为了避免边侧稀疏波的影响，保证冲击压力脉冲的持续时间大于相变时间，

飞片的直径设计为 $\Phi 95 \text{ mm}$ ，厚度 5 mm，PZT 95/5 陶瓷布置于靶面中心 $\Phi 35 \text{ mm}$ 内。实验中飞片的速度为 47~357 m/s。六发 PZT 95/5 陶瓷冲击释放电荷的实验装置的基本参数列于表 1。

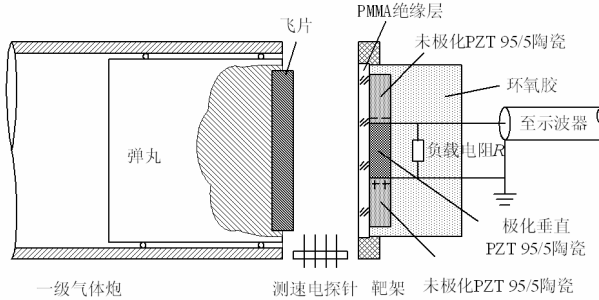


Figure 1. Schematic of shock current-release experiments on normally poled PZT 95/5 ceramics

图 1. 一级气体炮 PZT 95/5 陶瓷冲击放电实验装置

Table 1. Experimental configuration parameters
表 1. 标准试验系统结果数据

实验号	飞片材料	飞片速度 (km/s)	陶瓷受冲击压力 (GPa)	PZT 95/5 陶瓷电极面尺寸		负载电阻 R (Ω)
				y_0 (mm)	z_0 (mm)	
Released1	Ly12 铝	0.047	0.23	30.00	20.00	0.99
Released2	铜	0.129	0.43	29.98	20.00	1.01
Released3	Ly12 铝	0.200	1.06	29.98	19.98	1.00
Released4	铜	0.257	1.30	30.00	20.00	1.01
Released5	Ly12 铝	0.318	1.78	29.98	20.02	1.00
Released6	Ly12 铝	0.357	2.05	30.00	20.04	1.01

3 实验结果与分析

图 2 是实验测得的不同冲击压力下 PZT 95/5 陶瓷释放脉冲电流的波形。在相变压力区内的陶瓷脉冲放电电流波形显示，冲击压力幅值越大，输出电流幅值越大，这说明了冲击加载压力对电荷释放有重要影响。

在低冲击压力下，PZT 95/5 陶瓷并未完全释放出电极面束缚的电荷，在 $0 \sim \tau$ 时间内陶瓷放电总电荷量为 Q' （以区别陶瓷静态储存的电荷 Q ）：

$$Q' = \int_0^{\tau} i(t) dt = \int_0^{\tau} \frac{U(t)}{R} dt \quad (1)$$

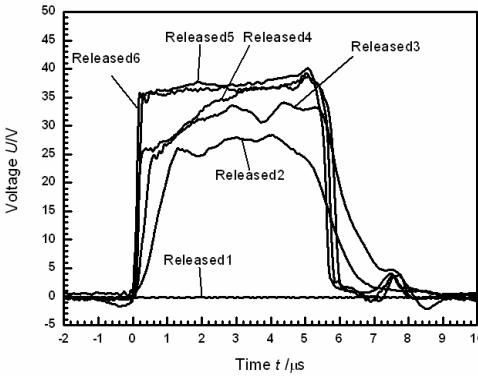


Figure 2. The depoling current signal of PZT 95/5 ceramics

图 2. 冲击加载下 PZT 95/5 陶瓷释放的脉冲电流信号

式(1)中， $i(t)$ 是流经负载电阻 R 的电流； $U(t)$ 是

示波器记录到 R 上的电压信号。将 Q' 对应的剩余极化强度定义为冲击释放的剩余极化强度 P_{rs} :

$$P_{rs} = \frac{Q'}{S_{\text{电极}}} \quad (2)$$

其中 $S_{\text{电极}}$ 为 PZT 95/5 陶瓷的银电极表面积。冲击加载条件下, $0 \leq P_{rs} \leq P_r$, 即冲击压力小于陶瓷相变起始压力时, $P_{rs}=0$; 冲击压力大于陶瓷相变完成压力时, $P_{rs}=P_r$; 冲击压力处于陶瓷相变压力范围内时, $0 < P_{rs} < P_r$ 。

六发垂直极化模式实验 PZT 95/5 陶瓷释放的总电荷量 Q' 及计算的冲击释放剩余极化强度列于表 2。随着冲击加载压力的增加, 当出现 $Q' > 0$ 或 $P_{rs} > 0$ 时, 相应的冲击压力就可以认为是陶瓷相变的起始压力; 当 P_{rs} 值达到最大或者接近静态下的初始剩余极化强度 P_r 的数值时, 就可以认为陶瓷相变基本完成, 相应的冲击压力就是陶瓷完全相变的压力。

Table 2. Results of poled PZT 95/5 ceramics for the current-release experiments

表 2. 垂直极化 PZT 95/5 陶瓷冲击释电结果

实验号	陶瓷受冲击压力 (GPa)	$i_{\max}$ (A)	放电总电荷量 Q' (μC)	冲击释放极化强度 P_{rs} ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)
Released1	0.23	0	0	0
Released2	0.43	29.26	118.87	19.81
Released3	1.06	35.10	157.24	26.25
Released4	1.30	40.29	168.66	28.11
Released5	1.78	41.43	186.58	31.09
Released6	2.05	40.11	179.73	29.90

国产 PZT 95/5 陶瓷的冲击释放极化强度随冲击加载压力的变化见图 3。

从图 3 可以看出: PZT 95/5 陶瓷冲击相变的起始压力大约在 0.23~0.43 GPa 之间; 在 1.78~2.05 GPa 冲击压力之间, 陶瓷冲击释放的剩余极化强度 P_{rs} 达到恒定值, 大小与陶瓷的初始剩余极化强度 P_r 基本一致, 这说明在此压力范围内陶瓷的 FE→AFE 相变接近完成。

根据高密度 PZT 95/5 陶瓷的冲击放电实验结果, 分析 P_{rs} 、 P_r 与冲击压力 σ 的关系满足:

$$\frac{P_{rs}}{P_r} = \frac{0.53}{-0.19 - \sigma} + 1.25 \quad (3)$$

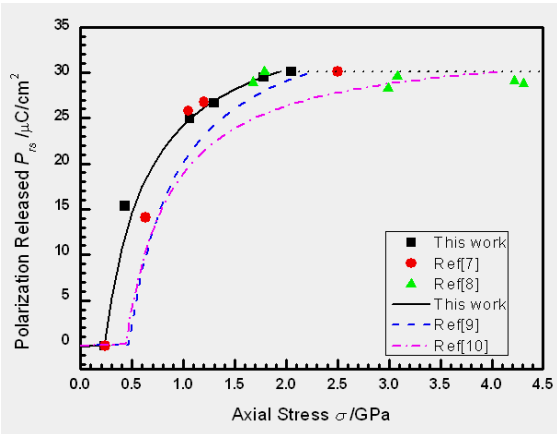


Figure 3. P_{rs} comparison for the different PZT 95/5 ceramics
图 3. 不同压力下 PZT 95/5 陶瓷冲击释放剩余极化强度

式(3)显示的冲击释放剩余极化强度与冲击压力的规律与国外对低密度 PZT 95/5 陶瓷材料的研究结果^[9-10]基本是一致的。

4 结束语

本文从实验上研究了 PZT 95/5 陶瓷相变区内电流输出性能: 陶瓷相变区电流波形显示, 冲击波压力幅值越大, 电流幅值越大, 这说明了陶瓷的相变对电荷释放有重要影响。通过冲击释放的剩余极化强度 P_{rs} 与极化后陶瓷的初始剩余极化强度 P_r 的比较, 得到了陶瓷的相变起始压力范围为 0.23~0.43 GPa, 陶瓷相变完成压力范围为 1.78~2.05 GPa。

PZT 95/5 陶瓷 FE→AFE 相变区电释放规律研究是定量揭示铁电陶瓷冲击相变效应的一种方法, 为指导该材料在冲击波作用下的电性能应用提供了参考数据。

5 致谢

感谢陈志云、叶素华、方茂林、卢敏等同志对实验工作的协助与支持。

References (参考文献)

- [1] Neilson F W. Ferromagnetic and Ferroelectric Explosive-Electric On Shot Explosive-Electric Transducers [J]. SCTM230B-56-51, 1956.
- [2] Halpin W J. Current from a Shock-Loaded Short-Circuited Ferroelectric Ceramic Disk [J]. J Appl Phys, 1966; 37(1): 153-163.
- [3] Novitsky Ye Z, Sadunov V D, Karpenko G Ya. Behaviour of Ferroelectrics in Shock Waves [J]. Russian: FGV, 1978; 14(4): 115-129.
- [4] Fleddermamm Charles B. Nation J A. Ferroelectric Sources and their Application to Pulsed Power: A Review [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1997, 25(2): 212-220.

- [5] Прищепенко А. Б., Третьяков Д. В. Функционирование генератора частоты с рабочим телом из ферромагнетика и сегнетоэлектрика [J]. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, 2000, 4: 61-66.
- [6] Setchell R. E. Shock Wave Compression of the Ferroelectric Ceramic $\text{Pb}_{0.99}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}_3$: Hugoniot States and Constitutive Mechanical Properties [J]. J Appl Phys, 2003, 94(1): 573-588.
- [7] Dongdong Jiang. Electrical Behavior of $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Sn}, \text{Ti})\text{O}_3$ Ferroelectric Ceramic under Shock Wave Compression. Ph. M. Thesis. Xi'an Jiaotong University (Ch)
蒋冬冬. 冲击波作用下锆锡钛酸铅铁电陶瓷放电性能研究. 硕士学位论文. 西安交通大学, 2008.
- [8] Yusheng Liu, Gaomin Liu, Fupin Zhang. Experimental Study of the Depoling Property of PZT-95/5 Ferroelectric Ceramic under Shock Wave Loading [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics. 2008, 30(1): 58-60 (Ch).
刘雨生, 刘高旻, 张福平等. 不同加载压力下 PZT-95/5 铁电陶瓷放电特性研究. 压电与声光, 2008; 30(1): 58-60.
- [9] Anderson M. U., Setchell R. E., and Cox D. E. in Shock Compression of S. T. Montgomery and J. D. Keck, presented at the APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, Williamsburg, VA, 1991 (unpublished).
- [10] Setchell R. E. Shock wave compression of the ferroelectric ceramic $\text{Pb}_{0.99}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})_{0.98}\text{Nb}_{0.02}\text{O}_3$: Depoling currents [J]. J Appl Phys, 2005; 97: 01350701-01350716.