文章编号：1000-5773(2008)01-0030-05

PZT 95/5 铁电陶瓷的冲击压缩 Hugoniot 特性研究*

刘高旻，杜金梅，刘雨生，谭 华，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：采用一级气体炮加载装置，利用加窗 VISAR 技术，对极化和未极化两种状态的 PZT 95/5 铁电陶瓷进行了逆向冲击实验，在 0.52～3.8 GPa 冲击压力范围内，得到了 PZT 95/5铁电陶瓷两种状态的 σ-u 关系。对比文献已有实验数据显示，PZT 95/5 铁电陶瓷的 Hugoniot 曲线与初始密度值密切相关，高密度的 PZT 95/5 铁电陶瓷在 0～3.0 GPa 压力范围内的 σ-u 关系接近线弹性，较低压力下不同极化状态的 Hugoniot 数据表明，PZT 95/5 铁电陶瓷发生了冲击相变。

关键词：PZT 95/5；逆向冲击；VISAR；冲击压缩

中图分类号：O521.2；O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

$Pb_{0.99}(Zr_{0.95}Ti_{0.05})_{0.98}Nb_{0.02}O_3$（简称 PZT 95/5）是冲击驱动脉冲能源装置中的核心功能陶瓷[1-3]，常温下未极化 PZT 95/5 陶瓷是反铁电正交相（A_O），但处于 A_O 和铁电三角相（F_R）相界附近，在直流电场的作用下，PZT 95/5 陶瓷由 A_O 相转变为亚稳的 F_R 相，电极面储存电荷，有剩余极化强度 P_r 存在。在一定冲击加载条件下，PZT 95/5 陶瓷发生 $F_R \rightarrow A_O$ 相变，剩余极化强度消失，释放出被束缚的电荷，电荷流经外电路，形成电流。PZT 95/5 陶瓷冲击相变导致了脉冲放电，因此对 PZT 95/5 陶瓷冲击响应特性的研究具有重要的意义。

PZT 95/5 铁电陶瓷的冲击压缩特性长期以来受到人们的关注：Doran 在早期用爆炸加载技术和高速扫描相机研究了未极化 PZT 95/5 铁电陶瓷的 Hugoniot 状态[4]；1984 年，Chhabildas[5] 也对未极化 PZT 95/5 铁电陶瓷进行了非轴向应变实验，测试了 0.6～3.2 GPa 应力范围陶瓷的 Hugoniot 状态；2003 年，Setchell[7] 更系统地研究了由于加工方法的可变性所造成的不同密度、不同细观晶体结构的 PZT 95/5 铁电陶瓷的冲击实验结果。综合国内外 40 余年对 PZT 95/5 铁电陶瓷冲击压缩特性的研究结果，得出了密度为 7.30 g/cm^3 的 PZT 95/5 铁电陶瓷的多项式拟合的应力-粒子速度 Hugoniot 曲线，如图 1 所示。对资料的收集与分析后发现，有关 PZT 95/5 铁电陶瓷冲击相变的研究结果很少，且在图 1 拟合的 Hugoniot 曲线上，冲击相变发生的压力区间（约 2 GPa）的数据点较少，不能完整反映陶瓷在冲击加载下的相变过程。PZT 95/5 铁电陶瓷 Hugoniot 性能的研究，特别是低压下冲击相变的研究，对其在冲击驱动脉冲能源装置的合理应用有重要意义。

由于原材料和制作方法的不同，PZT 95/5 铁电陶瓷的密度可以相差很大，密度较高（7.66 g/cm^3）的 PZT 95/5 铁电陶瓷的 σ-u 数据仍非常有限，如图 2 所示。

本文介绍密度为 7.76 g/cm^3 的 PZT 95/5 铁电陶瓷材料在约 0.52～3.8 GPa 压力范围段的冲击压缩性能。

* **收稿日期**：2007-03-05；**修回日期**：2007-04-26

作者简介：刘高旻（1973—），女，博士研究生，副研究员，主要从事冲击波物理研究. E-mail：cqh_bijet@sohu.com

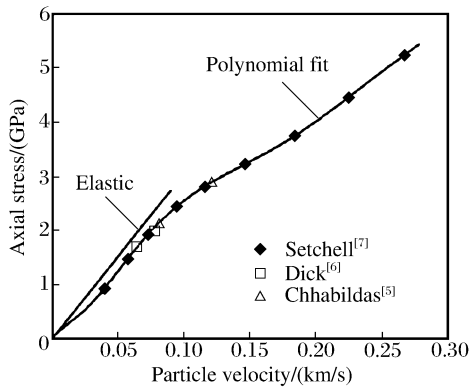


图 1　密度为 7.30 g/cm³ 的 PZT 95/5 铁电陶瓷冲击压缩数据及 Hugoniot 拟合曲线

Fig. 1　Hugoniot data for the PZT 95/5 ceramics of 7.30 g/cm³ density

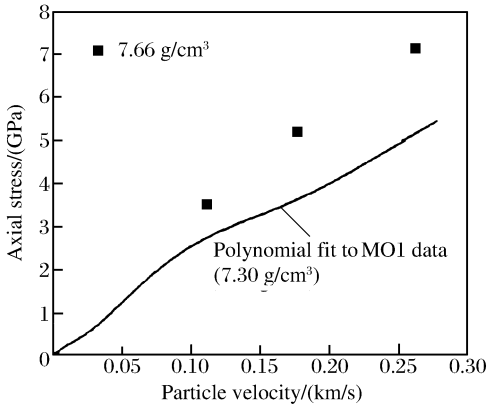


图 2　不同密度的 PZT 95/5 铁电陶瓷冲击压缩数据比较[7]

Fig. 2　Hugoniot data for the different PZT 95/5 ceramics

2　实验方法及技术

2.1　Hugoniot 状态测量实验原理

“逆向冲击”实验是测试材料 Hugoniot 状态的一种简单而准确的技术,实验中的待测材料被加速,碰撞已知 Hugoniot 性能的标准材料,碰撞界面的两边都产生冲击波。由于碰撞界面的轴向应力和粒子速度连续,因此通过测试标准材料的粒子速度和轴向应力,即可以确定待测材料的应力-速度 Hugoniot状态。

图 3 是本研究中采用的逆向冲击实验装置结构和测试应力-速度 Hugoniot 状态的阻抗匹配图解示意。实验中,激光干涉技术被用来测试 PZT 样品加速撞击熔融石英窗口的冲击界面速度。

窗口材料熔融石英的 Hugoniot 弹性极限为 9.8 GPa,弹性段内 σ-u 关系为四阶多项式关系[8]

$$\sigma = 131.7u - 73.61u^2 + 99.47u^3 - 41.63u^4 \tag{1}$$

式中:σ 的单位为 0.1 GPa;u 的单位为 km/s。

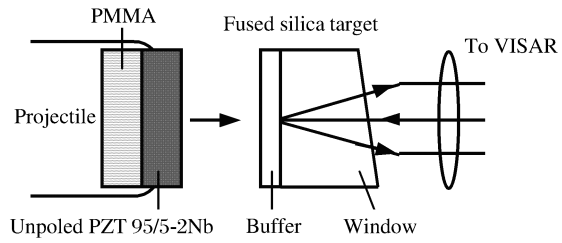


图 3(a)　逆向冲击实验装置结构图

Fig. 3(a)　Experimental configuration for reverse-impact experiments

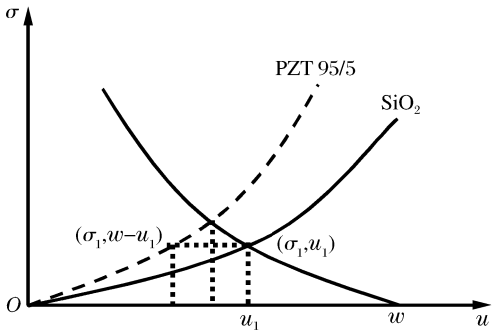


图 3(b)　Hugoniot 测量原理示意图

Fig. 3(b)　Schematic of Hugoniot measurements using the reverse-impact approach

2.2　实验装置

逆向冲击实验时 PZT 95/5 铁电陶瓷被加速,碰撞已知 Hugoniot 性能的标准材料熔融石英,利用激光干涉技术测试缓冲层与窗口间界面的冲击波剖面,用熔融石英的 σ-u 关系可以计算出 PZT 95/5 陶瓷与熔融石英界面之间的应力,最终确定 PZT 95/5 陶瓷的应力-粒子速度 Hugoniot 状态。实验使用的装置参数见表 1。熔融石英材料的基本参数是:ρ_0 为 2.201 g/cm³,c_1 为 5.944 km/s,c_s 为 3.769 km/s。

研究中使用的 PZT 95/5 铁电陶瓷采用了氧化物混合法制备：按配方比例设计的 ZrO_2、Nb_2O_5、PbO 和 TiO_2 粉末被紧密地混合起来，并在大约 1 000 ℃下烧结，形成固溶体；将烧结好的粉末湿磨成最佳的粒子尺寸，然后烘干；再添加少量的化学纯 $PbTiO_3$，加入有利于成型的有机粘结剂。随后材料被干压成坯并二度烧结，以排除有机添加物。坯在大约 1 350 ℃下烧结 6 h，形成最后的陶瓷。PZT 95/5 陶瓷的初始密度为 7.76 g/cm^3。

表 1 实验装置参数

Table 1 Experimental configuration parameters

PZT 95/5 flyer /(mm×mm)	Fused silica buffer /(mm×mm)	Fused silica window /(mm×mm)	PZT 95/5 flyer /(mm×mm)	Fused silica buffer /(mm×mm)	Fused silica window /(mm×mm)
52×6	35×2	35×12	35×2	35×2	35×12

Note: All elements are disks; the first dimension is diameter(mm), and the second is thickness(mm).
The window/buffer interface was coated with approximately 2 μm of vapour-deposited aluminum.

3 实验结果及分析

3.1 极化 PZT 95/5 陶瓷的应力-速度 Hugoniot 状态

表 2 列举了极化后 PZT 95/5 铁电陶瓷在∅100 mm 气体炮实验的冲击条件下测得的粒子速度和计算的 Hugoniot 结果。图 4 是用 VISAR 测试的波形。图 5 是密度为 7.76 g/cm^3 的 PZT 95/5 陶瓷材料在极化状态下的 Hugoniot 数据。

表 2 极化 PZT 95/5 陶瓷逆向冲击实验中的实验条件及结果

Table 2 Reverse-impact experimental conditions and results of poled PZT 95/5 ceramics

Exp. No.	PZT thickness /(mm)	Impact velocity /(m/s)	Measured window velocity /(m/s)	Hugoniot conditions	
				Stress/(GPa)	Velocity/(m/s)
1	2.028	56.7	46.6	0.60	10.2
2	2.050	104.4	80.6	1.02	23.8
3	2.034	200.9	139.6	1.72	61.3
4	6.017	306.0	218.4	2.62	87.7
5	6.013	447.5	324.8	3.80	122.7

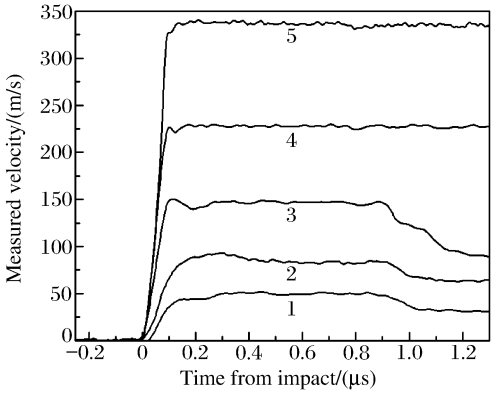


图 4 极化 PZT 95/5 陶瓷的界面粒子速度剖面

Fig. 4 Particle velocity profiles recorded for the poled PZT 95/5 ceramics

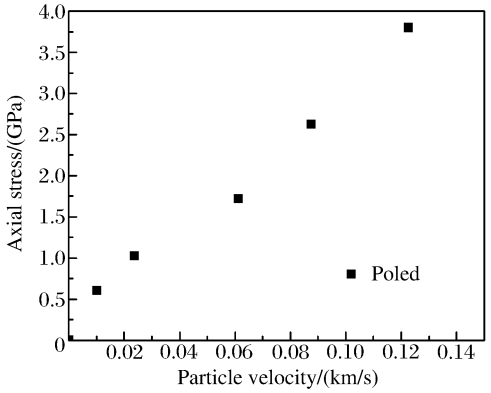


图 5 极化 PZT 95/5 的 Hugoniot 状态

Fig. 5 Hugoniot data for the poled PZT 95/5 ceramics

3.2 未极化 PZT 95/5 陶瓷的应力-速度 Hugoniot 状态

表 3 列举了未极化 PZT 95/5 陶瓷在∅100 mm 气体炮实验的冲击条件下测得的粒子速度和计算的 Hugoniot 结果。图 6 是用 VISAR 测试的波形。图 7 是未极化 PZT 95/5 陶瓷的 Hugoniot 数据与极化 PZT 95/5 陶瓷的 Hugoniot 数据的比较图。

表 3　未极化 PZT 95/5 陶瓷逆向冲击实验中的实验条件及结果

Table 3　Reverse-impact experimental conditions and results of unpoled PZT 95/5 ceramics

Exp. No.	PZT thickness /(mm)	Impact velocity /(m/s)	Measured window velocity /(m/s)	Hugoniot conditions	
				Stress/(GPa)	Velocity/(m/s)
1	1.999	55.5	40.7	0.52	14.8
2	1.999	126.5	86.1	1.09	40.4

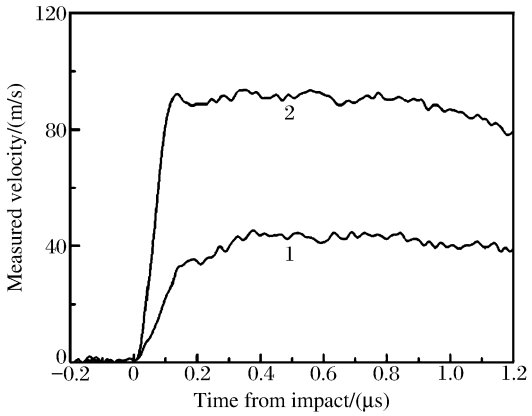


图 6　未极化 PZT 95/5 陶瓷的界面粒子速度剖面

Fig. 6　Particle velocity profiles recorded for the unpoled PZT 95/5 ceramics

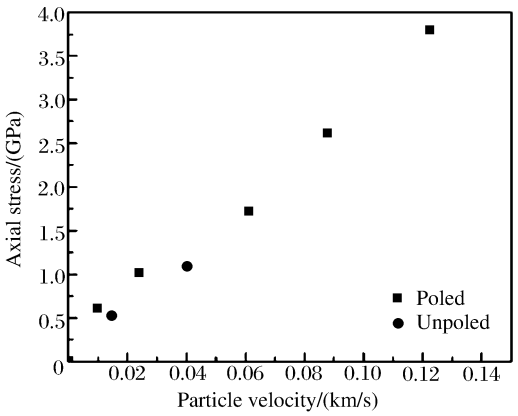


图 7　两种极化状态的 PZT 95/5 的 Hugoniot 状态

Fig. 7　Hugoniot data for the different PZT 95/5 ceramics

3.3　实验结果分析

本工作研究的密度为 7.76 g/cm^3 的 PZT 95/5 铁电陶瓷的 Hugoniot 数据与文献报道的密度为 7.66 g/cm^3 和 7.30 g/cm^3 的 PZT 95/5 陶瓷的 Hugoniot 数据对比如图 8 所示。

数据对比结果表明,PZT 95/5 陶瓷的 Hugoniot 曲线与初始密度值密切相关,密度为 7.30 g/cm^3 的 PZT 95/5 陶瓷由于孔隙率高达 8.75%,冲击压力大于 2.6 GPa 后的波结构显示出明显的动态孔压实的特征。密度为 7.66～7.76 g/cm^3 的陶瓷在 0～3 GPa 压力范围内的 σ-u 关系接近线弹性,更高压力下的 σ-u 关系可用多项式描述。

图 9 是 PZT 95/5 陶瓷材料在极化状态下的 Hugoniot 数据,从图 9 中可以看到,应力值为 1.72、2.62、3.80 GPa 3 个点的线性较好,而应力为 0.60、1.02 GPa 的两点则偏离这条线。将未极化陶瓷的实验结果加入分析,可以看到未极化陶瓷低压下的两点与极化陶瓷在 1.72、2.62、3.80 GPa 3 个压力点的线性拟合很好。如果陶瓷在 1.7 GPa 压力下已完全去极化,则陶瓷在 1.72、2.62、3.80 GPa 时与未极化陶瓷一样,都处于 A_O 相。

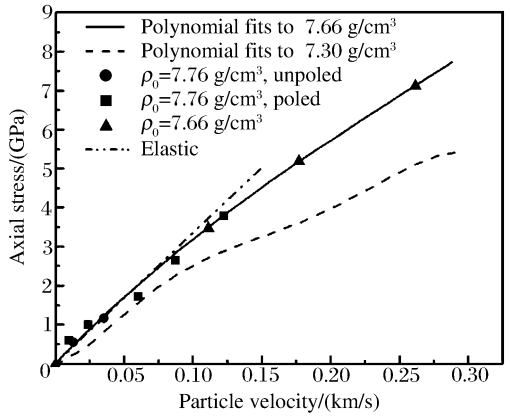


图 8　不同 PZT 95/5 陶瓷 Hugoniot 数据对比

Fig. 8　Hugoniot data for the different PZT 95/5 ceramics

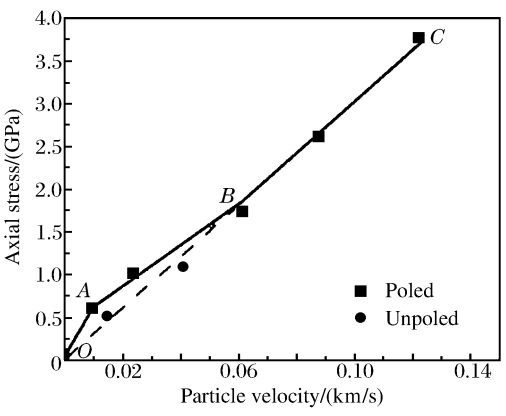


图 9　PZT 95/5 陶瓷相变示意图

Fig. 9　Phase transition of PZT 95/5 ceramics

PZT 95/5 陶瓷相变过程分析:相变时 PZT 95/5 从弹性段直接进入相转变,图 8 为 PZT 95/5 陶瓷冲击相变过程简单示意图。Hugoniot 线分为 OA、AB、OC 3 个直线段,分别对应于 F_R 相(三角相)、混合相和 A_O 相(四方相)。图 9 的结果与文献数据[7]给出的拟合线低压部分的趋势是相似的。

4 结 束 语

采用逆向冲击装置和 VISAR 技术,研究了高密度 PZT 95/5 铁电陶瓷在 3.8 GPa 压力下的 Hugoniot 数据。研究结果表明,PZT 95/5 铁电陶瓷在约 2 GPa 压力以内发生了冲击相变,与文献中同类材料的 Hugoniot 研究结果相比,基本能符合其在低压部分的相变拐折趋势,并且明显地反映出材料初始密度越大,Hugoniot 曲线越陡。

感谢王海晏、陈志云、汪小松、李加波、叶素华、方茂林、卢敏等同志对实验工作的协助与支持。

References:

[1] Neilson F W. Effects of Strong Shocks in Ferroelectric Materials [J]. Bull Am Phys Soc,1957,2:30.

[2] Fleddermamm C 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.

[3] Прищепенко А Б, Третьяков Д В. Функционирование Генератора Частоты с Рабочим Теломиз Ферромагнетика и Сегнетоэлектрика [J]. Электричество,2000,4:61-66. (in Russian)

[4] Doran D G. Shock-Wave Compression of Barium Titanate and 95/5 Load Zirconate Titanate [J]. J Appl Phys,1968,39(1):40-47.

[5] Chhabildas L C. Dynamic Shock Studies of PZT 95/5 Ferroelectric Ceramic [R]. SAND84-1729,1984.

[6] 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.

[7] Setchell R E. Shock Wave Compression of the Ferroelectric Ceramic $Pb_{0.99}(Zr_{0.95}\ Ti_{0.05})_{0.98}\ Nb_{0.02}\ O_3$: Hugoniot States and Constitutive Mechanical Properties [J]. J Appl Phys,2003,94(1):573-588.

[8] Barker L M, Hollenbach R E. Shock-Wave Studies of PMMA, Fused Silica, and Sapphire [J]. J Appl Phys,1970,41(10):4208-4226.

Shock Wave Compression of PZT 95/5 Ferroelectric Ceramic

LIU Gao-Min, DU Jin-Mei, LIU Yu-Sheng, TAN Hua, HE Hong-Liang

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

Abstract: Reverse-impact experiments were conducted on a gas-gun facility to determine the poled and unpoled PZT 95/5 ceramic Hugoniot states. Instrumented VISAR recorded the u-t profile at the interface between the buffer and window. Comparisons between the obtained results and reference data indicated that Hugoniot curves for PZT 95/5 ceramic are quite sensitive to the differences in initial density. Hugoniot curve of higher density PZT 95/5 ceramic shows that the σ-u curve is in linearity below 3.0 GPa. The Hugoniot curves for the unpoled PZT 95/5 ceramic and poled PZT 95/5 ceramic have also been obtained. In addition, the phase transition of F_R/A_O has been identified over the stress range of interest.

Key words: PZT 95/5; reverse-impact; VISAR; shock compression