

极化状态与方向对单轴压缩下 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 铁电陶瓷畴变与相变行为的影响

蒋招绣 王永刚 聂恒昌 刘雨生

Effects of poling state and direction on domain switching and phase transformation of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ ferroelectric ceramics under uniaxial compression

Jiang Zhao-Xiu Wang Yong-Gang Nie Heng-Chang Liu Yu-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 024601 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.024601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多孔未极化 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 铁电陶瓷单轴压缩力学响应与相变

Mechanical properties and phase transformation of porous unpoled $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ ferroelectric ceramics under uniaxial compression

物理学报.2015, 64(13): 134601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134601>

铁电材料中发现等温相变

Isothermal phase transition was found in ferroelectric materials

物理学报.2016, 65(7): 070101 [http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070101\(R\)](http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070101(R))

Co 含量对 $\text{Bi}_6\text{Fe}_{2-x}\text{Co}_x\text{Ti}_3\text{O}_{18}$ 样品多铁性的影响

Effects of Co-doping on multiferroic properties of $\text{Bi}_6\text{Fe}_{2-x}\text{Co}_x\text{Ti}_3\text{O}_{18}$ ceramics

物理学报.2015, 64(21): 217701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.217701>

Pr 含量对 $\text{Bi}_5\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Ti}_3\text{O}_{15}$ 室温多铁性的影响

Effect of doping Pr on multiferroic properties of $\text{Bi}_5\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Ti}_3\text{O}_{15}$ ceramics at room temperature

物理学报.2014, 63(14): 147701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.147701>

Si 掺杂 HfO_2 薄膜的铁电和反铁电性质

Ferroelectric and antiferroelectric properties of Si-doped HfO_2 thin films

物理学报.2014, 63(11): 117703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.117703>

极化状态与方向对单轴压缩下 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 铁电陶瓷畴变与相变行为的影响*

蒋招绣¹⁾ 王永刚^{1)†} 聂恒昌²⁾ 刘雨生³⁾

1)(宁波大学, 冲击与安全工程教育部重点实验室, 宁波 315211)

2)(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

3)(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2016年7月20日收到; 2016年10月27日收到修改稿)

利用数字图像相关性分析方法发展了全场应变光学测量技术, 并原位实时测量了准静态单轴压缩下铁电 PZT95/5 陶瓷试件的轴向应变和横向应变. 基于轴向应变、横向应变随着轴向应力的变化关系, 讨论了极化状态和极化方向对 PZT95/5 铁电陶瓷的畴变与相变行为的影响. 实验结果显示: 单轴压缩下, 未极化和 Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷都会发生畴变, 而 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷则不发生畴变; 畴变促使 Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷的轴向应变和横向应变同时快速地增长, 而对未极化 PZT95/5 铁电陶瓷的应变增长的影响非常微弱, 这种差异性归因于电畴极轴不同的取向分布特征; 通过应变分解分析, 验证了畴变与相变过程是解耦的, 并界定了畴变应变和相变应变的影响范围; 与 Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷相比, 未极化 PZT95/5 铁电陶瓷的相变开始临界应力和相变结束应力减小, 而 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷则明显增大, 由此推论畴变对相变有一定促进作用. 基于放电特性的实测结果, 还讨论了极化方向对极化 PZT95/5 铁电陶瓷去极化机理的影响. 实验结果显示: Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷去极化机理是畴变和相变的共同作用, 其中畴变占主导地位, 而 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷的去极化机理仅是相变.

关键词: PZT95/5 铁电陶瓷, 畴变, 相变, 极化状态与方向

PACS: 46.80.+j, 77.80.B-, 77.80.-e

DOI: 10.7498/aps.66.024601

1 引言

具有优良的机电耦合性能和较高的居里温度的 PZT 铁电陶瓷在许多工业领域获得了非常广泛的应用^[1,2], 但 PZT 铁电陶瓷的脆性特征常常导致 PZT 铁电陶瓷器件在力、电载荷单独作用或协同作用下丧失功能, 甚至遭到破坏. 为了 PZT 铁电陶瓷材料制备的器件功能特性稳定, 人们不仅需要认识 PZT 铁电陶瓷电学特征, 还需关注其力学行为^[3,4].

电畴翻转是 PZT 铁电陶瓷宏观非线性行为的

细观物理机理. 近年来, 一些先进的原位微细观分析技术越来越多应用于研究力场作用下 PZT 铁电陶瓷的电畴翻转特性及其对宏观力学响应的影响. Li 等^[4]采用原位中子衍射技术研究了单轴压缩下两种多晶 PZT(40/60 和 49/51) 电畴翻转行为, 揭示了晶格对称性与电畴翻转能力之间的关系, 发现等轴晶粒(无论是四方晶系还是菱方晶系)不能发生电畴翻转. Jones 等^[5]也采用原位中子衍射技术观测了 PZT52/48 铁电陶瓷在应力场作用下畴变行为, 并计算了畴变应变. Okayasu 等^[6]采用 X 射线衍射(XRD)和电子背散射衍射(EBSD)观察技术研究了电畴翻转、电畴方向对极化和未极化 PZT

* 国家自然科学基金(批准号: 11272164, 11472142)、宁波大学王宽诚幸福基金和王宽诚教育基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn

陶瓷力学性能和断裂行为的影响,发现极化PZT陶瓷由于畴变而导致其力学性能得到明显改善.然而,对于处于铁电(FE)-反铁电(AFE)相界附近的PZT95/5铁电陶瓷而言,其非线性力学行为更为复杂,不仅仅取决于畴变,还与FE-AFE相变密切相关.人们对PZT95/5铁电陶瓷在静水压或冲击波压缩下铁电相到反铁电相的相变行为和去极化行为已开展较多研究工作[7-9].还有些学者关注孔隙率对PZT95/5铁电陶瓷去极化、冲击压缩行为以及畴变和相变行为的影响[10-12].本文将关注极化状态和方向对PZT95/5铁电陶瓷在单轴压缩下的畴变和相变行为的影响,这方面的研究工作甚少.

首先,采用粉末烧结方法制备了不同极化状态和极化方向的PZT95/5铁电陶瓷样品.随后,采用基于数字图像相关性分析方法(digital image correlation, DIC)的全场应变原位测量技术,对PZT95/5铁电陶瓷样品开展准静态单轴压缩实验研究.采用并联电容的方式监测PZT95/5铁电陶瓷样品去极化放电行为.最后,基于应变和放电量的实测数据,讨论极化状态及极化方向对PZT95/5铁电陶瓷的畴变、相变及去极化行为的影响.

2 实验

2.1 样品制备

委托中国科学院上海硅酸盐研究所制备了PZT95/5铁电陶瓷.简约的制备工艺如下:用球磨法对PZT95/5粉末球磨6 h,球磨后浆料在100 °C温度下干燥24 h,再添加粉料总重量6%的PVA液体作为黏接剂,并混合均匀,再将混合后的粉末过筛,压制成型.升温排塑,将排塑好的素坯放入三重倒置的氧化铝坩埚在富PbO环境下烧结2 h,烧结温度控制在1300 °C.烧结完成的PZT95/5铁电陶瓷经机械精密加工成6 mm × 6 mm × 12 mm长方体实验样品.选取部分样品分别在上下底面上镀银电极和前后表面上镀银电极,然后在120 °C的硅油浴中极化,极化时间为10 min,极化电场为3000 V/mm,分别得到Z轴极化和Y轴极化的铁电陶瓷样品.图1给出了典型的未极化PZT95/5铁电陶瓷样品的XRD图谱和SEM形貌照片.XRD图谱显示了PZT95/5铁电陶瓷具有单一的钙钛矿结构,而从SEM形貌照片上可统计出PZT95/5铁电陶瓷的平均晶粒尺寸约12 μm.

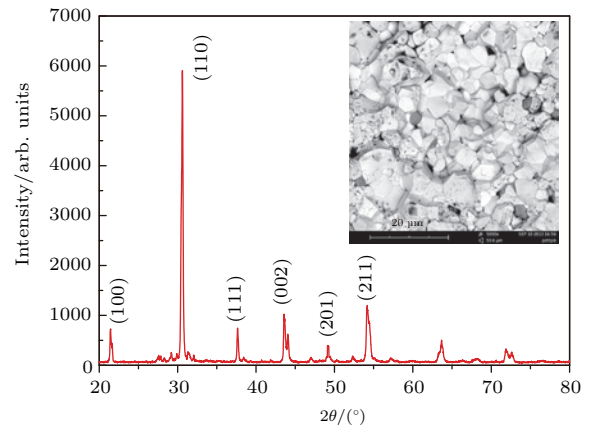


图1 未极化PZT95/5铁电陶瓷样品的XRD图谱和SEM形貌照片

Fig. 1. XRD pattern and SEM graph of unpoled PZT95/5 ferroelectric ceramic

2.2 实验方法

在MTS810液压万能试验机上,基于数字图像相关性分析方法,搭建了非接触式的试样表面原位全场应变光学测量系统,该系统硬件主要由两台高速数字相机(Photron Fastcam SA1.1)和NI同步数据采集仪(最高采样速率250 kHz)组成,实验装置示意图见图2.数字图像相关性分析方法的基本原理:首先获取试样表面散斑图像,散斑图像上的所有特征点以像素点为坐标,以像素灰度作为信息载体;然后,在试样表面上划分出若干个图像子区,类似于有限元计算中划分网格,在图像移动或变形过程中,基于图像子区灰度值不变的假定,追踪每个图像子区在变形后图像的位置,即可获得所有的图像子区中心点处的位移矢量,从而获得物体表面的变形信息.有关数字图像相关性分析方法中灰度计算的相关算法的详细介绍及其测量精度讨论请参考文献[12, 13].陶瓷试样变形位移非常小,位移控制加载模式较难实施,因此本实验中采用力控制加载模式,加载速率为10 kN/min.在低加载速率条件下,相机不需要很高的拍摄帧频,实验中采用60 帧/s进行拍摄,室内自然光即可满足拍摄光强要求.实验前,在样品两个侧表面(A面和B面)上人工喷涂哑光黑漆和哑光白漆来制作高质量的散斑.实验中,通过两台高速数字相机实时拍摄压缩过程中试样表面的散斑图像.实验结束后,再通过数字图像相关性分析软件(美国CSI公司VIC2D)对试样表面的散斑图像进行分析,精确获取试样A和B两个侧面上全场应变时程.实验过程中,还通

过NI同步数据采集仪(采样速率与相机拍摄帧频相同)记录万能试验机上测力传感器输出的加载力时程. 由加载力时程来计算试样的应力时程, 通过数字图像相关性分析来获取试样的应变时程. 在同步数据采集条件下, 消除掉时间, 即可获得试样的应力应变曲线. 另外, 为了监测极化PZT95/5铁电陶瓷放电行为, 首先在样品表面银箔电极之间并联一个电容器, 然后, 通过NI同步数据采集仪实时记

录压缩加载过程中电容器两端的电压, 记录的电压信号乘以电容器的电容, 即得到PZT95/5铁电陶瓷的放电量 Q . 若采用并联电阻方式测量, 需要首先计算电流, 然后对电流进行时间积分处理, 在积分处理过程中会产生较大误差, 影响测量精度. 最后, 还需要说明的是, 对于Z轴极化的样品, 加载方向与极化方向平行, 而对于Y轴极化的样品, 加载方向与极化方向垂直.

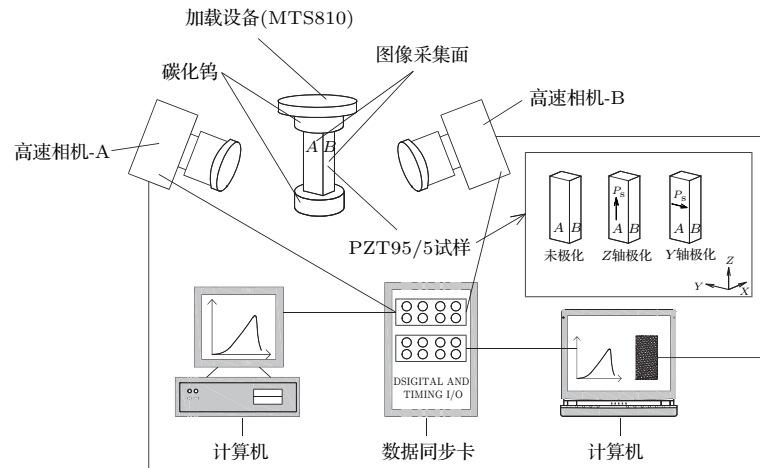


图2 耦合DIC全场应变测量系统的单轴压缩实验装置示意图

Fig. 2. The schematic graph of the experimental setup for uniaxial compression testing with DIC full field strain measurement system.

3 实验结果与讨论

3.1 极化状态的影响

图3给出了单轴压缩下未极化和Z轴极化PZT95/5铁电陶瓷轴向应变和横向应变随着轴向应力变化关系(注: 以压缩应变为正), 图中显示: 1) 在加载初期(B和F点之前), 极化和Z轴未极化PZT95/5铁电陶瓷的轴向应变和横向应变随着轴向应力呈线性增长关系(参见图中AB段和EF段), 并且两者重复性很好, 这表明极化状态对PZT95/5铁电陶瓷线弹性力学响应基本没有影响; 2) 在加载中期(B和F点之后), 未极化和Z轴极化的PZT95/5铁电陶瓷都呈现出明显的非线性力学响应特征, 特别是横向应变曲线上还出现了转折点; 3) 在加载后期, PZT95/5铁电陶瓷轴向应变轴向应力之间再次进入线性增长关系. 由此看来, 单轴压缩下PZT95/5铁电陶瓷非线性力学响应明显

依赖于极化状态, 主要表现在加载中期阶段, 其内在的物理机理值得详细讨论.

一般认为, 电畴翻转(简称畴变)是PZT铁电陶瓷宏观非线性力学响应的微观机理. 图3中显示: 在B点和F点之后, 未极化和Z轴极化PZT95/5

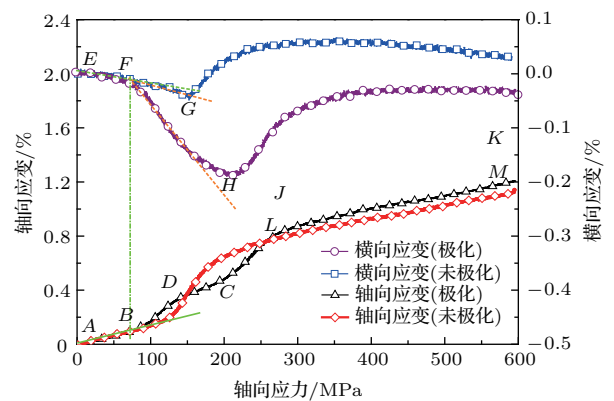


图3 (网刊彩色) 未极化和Z轴极化PZT95/5轴向和横向应变随轴向应力变化曲线

Fig. 3. (color online) The curve of axial and transverse strain versus axial stress for unpoled PZT95/5 and Z-axis poled PZT95/5.

铁电陶瓷轴向应变和横向应变随着轴向应力的增长开始偏离初始线弹性响应, 进入非线性增长阶段, 这主要是因为畴变引起了畴变应变; *B*点和*F*点所对应的应力(约70 MPa)可定义为畴变开始临界应力. 图3还清晰地显示畴变促使*Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷轴向和横向应变快速增长, 而对未极化PZT95/5铁电陶瓷的轴向和横向应变的影响是比较微弱的. 这种差异性的微观物理机理可以从内部电畴极轴取向特性来进行讨论. 未极化PZT95/5铁电陶瓷内部电畴极轴取向基本上是随机分布的, 而*Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷内部绝大多数电畴极轴取向是平行于极化方向的. 我们认为, 无论是随机分布还是取向一致, 电畴在压缩应力(*Z*轴方向)作用下都会趋向于*XY*平面内发生90°翻转^[14], 图4(a)和图4(b)给出了电畴翻转的示意图^[15]. 电畴翻转引起畴变应变主要取决于电畴极轴取向密度分布^[5]. 电畴极轴取向完全随机时,

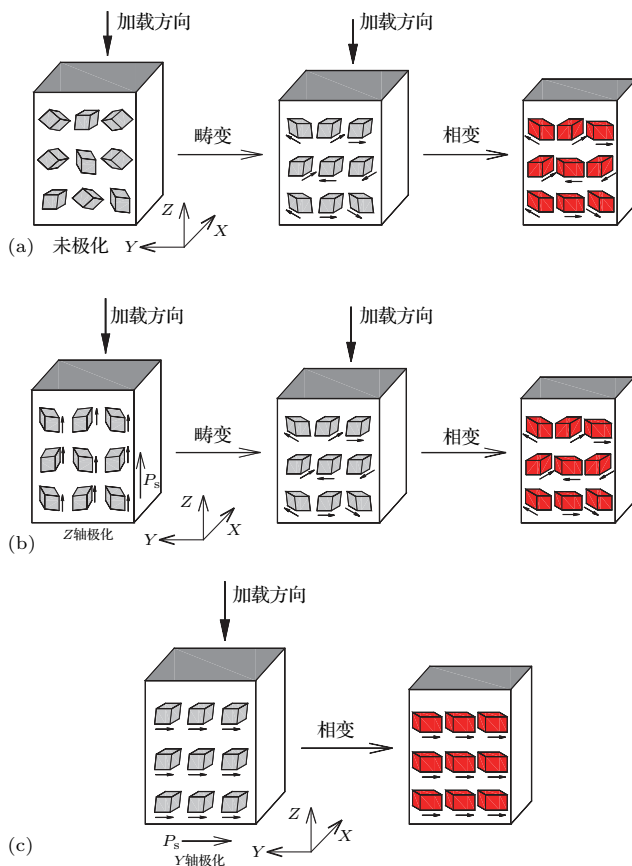


图4 单轴加载下PZT95/5铁电陶瓷的畴变与相变示意图 (a) 未极化PZT95/5铁电陶瓷; (b) *Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷; (c) *Y*-轴极化PZT95/5铁电陶瓷

Fig. 4. Schematic of domain switching and phase transformation of PZT95/5 ferroelectric ceramics under uniaxial compression: (a) Unpoled PZT95/5; (b) *Z*-axial poled PZT95/5; (c) *Y*-axial poled PZT95/5.

电畴翻转时所引起畴变应变在各个方向会发生相互抵消现象, 畴变应变的宏观表现非常微弱; 而当电畴极轴取向一致时(沿着极化方向), 所有电畴的畴变应变叠加在一起, 畴变应变的宏观表现则会比较强烈, 促进了轴向应变和横向应变快速地增长.

随着加载应力进一步增大, 图3显示: 未极化和*Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷的轴向应变一直保持增长, 而横向应变在*G*点和*H*点附近出现了反转, 即从横向膨胀转变为横向收缩, 这个异常现象显然不能够用电畴翻转来解释^[12]. 在应力场作用下, 处于FE-AFE相界附近的PZT95/5铁电陶瓷不仅会发生畴变, 而且会发生相变, 即从菱方晶系FE相转变正交斜方晶系AFE相. 相变会引起体积收缩, 从而导致轴向压缩下试样横向收缩这一异常的“负泊松比”现象. 由此看来, PZT95/5铁电陶瓷的非线性力学响应特征是由畴变和相变共同作用引起的. 如何界定畴变和相变的影响范围值得进一步探讨. 图3给出轴向应变 ϵ_Z 和横向应变 ϵ_Y 是宏观总应变, 可以分解为晶格应变 ϵ_{Ls} 、畴变应变 ϵ_{ds} 和相变应变 ϵ_{Pt} . 以*Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷为例, 探讨如何合理界定畴变和相变的影响范围. 首先, 忽略材料内部缺陷的影响, 弹性晶格应变增长率保持不变, 把初始弹性响应外推到整个变形过程中(这里假定FE相和AFE相的弹性响应是相同的, 事实上FE相和AFE相的弹性响应存在微弱的差异); 然后, 把总应变减去晶格应变, 即得畴变应变和相变应变之和, 如图5所示. 畴变仅是电畴极轴方向发生改变, 会引起晶格形状发生变化, 沿初始极化方向收缩, 沿新的极化方向伸长, 但不会引起体积变形^[14], 因此畴变应变满足下列关系:

$$\epsilon_{ds}Z + \epsilon_{ds}Y + \epsilon_{ds}X = 0, \quad (1)$$

试样横向变形是各向同性的, 即 $\epsilon_{ds}Y = \epsilon_{ds}X$, 代入(1)式得到

$$\epsilon_{ds}Z = -2\epsilon_{ds}Y = -2\epsilon_{ds}X, \quad (2)$$

式中 $\epsilon_{ds}Z$, $\epsilon_{ds}Y$, $\epsilon_{ds}X$ 分布表示*Z*(轴向), *Y*(横向), *X*(横向)方向的畴变应变. 图5给出了横向总应变减去横向晶格应变翻倍再正负反向之后与轴向总应变减去轴向晶格应变的对比, 结果显示: 1) *A*点之前, 两者的重复性非常好, 满足(2)式要求, 由此判断PZT95/5铁电陶瓷处于畴变阶段; 而在*A*点之后, 则出现了反向对称分离, 这又恰好满足相变应变特征; 这表明*A*点是畴变应变和相变应变分界

点, 由此推论, 畴变和相变是解耦的, 即畴变结束后相变才开始; 2) *A*点对应的应力(约195 MPa)可定义为PZT95/5铁电陶瓷相变开始的临界应力, 同时也是畴变结束应力, *A*点之前应变为畴变应变, 由此得到PZT95/5铁电陶瓷畴变应变约为0.24%; 3) *C*点之后, 相变应变随着轴向应力保持不变, 则说明FE-AFE相变结束, *C*点对应应力(约280 MPa)即为相变结束应力, 从*A*点到*C*点应变增量即为相变所贡献的相变应变, 约为0.28%. 对于未极化PZT95/5铁电陶瓷, 由于畴变应变的表现非常微弱, 因此轴向应变减去轴向晶格应变近似等于相变应变(约0.4%), 如图6所示, 这里把相变应变迅速增大的*A*点所对应应力(约115 MPa)定义为相变开始临界应力, *B*点对应应力(约230 MPa)即为相变结束应力. 与未极化PZT95/5铁电陶瓷相比, *Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷的相变开始临界应力和相变结束应力明显增大. 下面我们再从能量消耗角度来考虑相变过程. 对于*Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷, 相变消耗的能量密度为图5给出的应变应力曲线从*A*点到*C*点下方所包围的阴影面积, 通过积分计算得到0.32 MPa. 同样, 未极化PZT95/5铁电陶瓷相变消耗的能量密度为图6给出的应变应力曲线从*A*点到*B*点下方所包围的阴影面积, 通过积分计算得到0.31 MPa. 两者非常接近, 由此看来: 无论*Z*轴极化还未极化, PZT95/5铁电陶瓷从FE-AFE相变过程中所消耗的能量密度是近似相同的, 这将为后续相变过程物理模型的构建工作提供非常重要的实验信息.

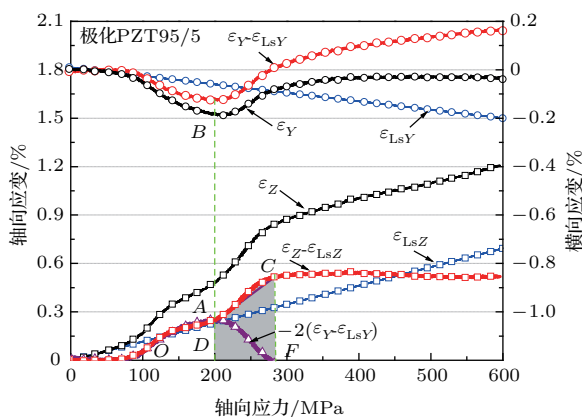


图5 (网刊彩色) *Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷宏观总应变分解关系

Fig. 5. (color online) Contributions to the total strains from lattice strain, domain switching strain and phase transformation strain in *Z*-axis poled PZT95/5.

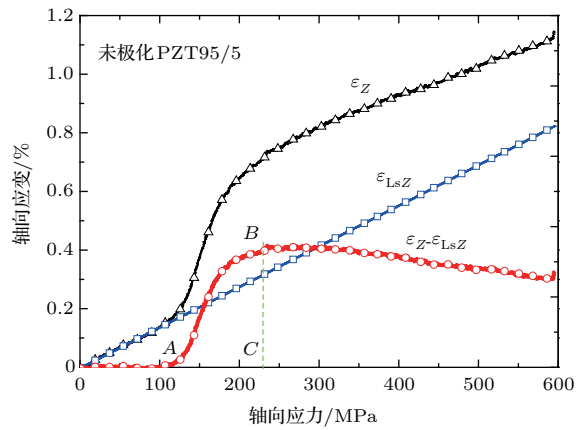


图6 未极化PZT95/5铁电陶瓷宏观总应变分解关系

Fig. 6. Contributions to the total strains from lattice strain and phase transformation strain in unpoled PZT95/5.

3.2 极化方向的影响

*Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷的极化方向与加载方向平行, 而*Y*轴极化PZT95/5铁电陶瓷极化方向与加载方向垂直. 图7为*Y*轴和*Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷的轴向应变、横向应变随着轴向应力变化的对比曲线. 在加载初期, *Y*轴极化PZT95/5铁电陶瓷的轴向应变和横向应变随着轴向应力线性增长关系与*Z*轴极化的结果完全一致(参见图7中*AB*段和*EF*段), 这说明极化方向对PZT95/5铁电陶瓷初始线弹性力学响应没有影响. 随着应力增大, 极化方向的影响开始清晰地显现. 与*Z*轴极化的结果不同, *Y*轴极化PZT95/5铁电陶瓷应变一直保持初始的线性增长趋势, 没有观察到畴变引起应变突然快速增长现象, 这是因为: *Y*轴极化PZT95/5铁电陶瓷内部电畴极轴方向与加载方向垂直, 在压缩应力作用下不会发生电畴90°翻转, 如图4(c)所示. 在*C*和*G*点之前, *Y*轴极化PZT95/5铁电陶瓷一直处于FE相的线弹性力学响应阶段. 在*C*和*G*点之后, 轴向应变增长加速, 同时横向应变开始出现反转, 这一现象清晰地表明此时相变开始, 因此*C*和*G*点所对应的轴向应力(约285 MPa)即为*Y*轴极化PZT95/5铁电陶瓷的相变开始临界应力. 与*Z*轴极化方向相比, *Y*轴极化的PZT95/5铁电陶瓷相变开始临界应力增大了约46%. *Y*轴极化PZT95/5铁电陶瓷在相变之前没有发生畴变, 所有电畴取向都沿着*Y*轴方向, 晶格处于稳定状态. *Z*轴极化PZT95/5铁电陶瓷在发生相变之前经历了畴变, 畴变过程导致晶格结构处于一种亚稳定状态, 畴变对相变起到了一定促进作用

用. 在加载后期, Y 轴极化 PZT95 应变增长速率减小, 这标志着 FE-AFE 相变已完成, K 点对应的应力可定义为相变结束应力(约 395 MPa).

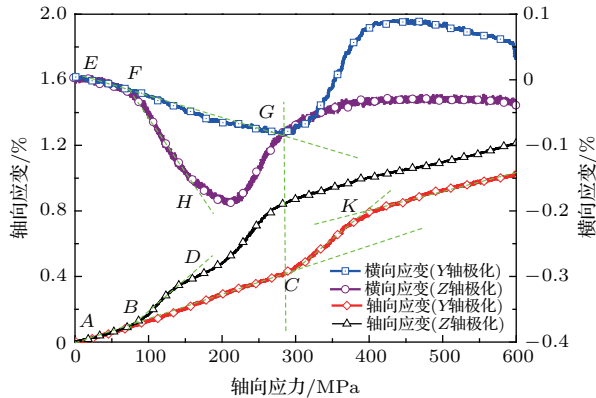


图 7 (网刊彩色) 不同极化方向的 PZT95/5 铁电陶瓷轴向和横向应变随着轴向应力变化关系

Fig. 7. (color online) The curve of axial and transverse strain versus axial stress for Z axial poled PZT95/5 and Y axial poled PZT95/5.

极化方向不仅影响 PZT95/5 铁电陶瓷的力学响应, 也影响其电学响应. 图 8 给出了 Z 轴极化和 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷的放电量随着轴向应力的变化关系曲线. 对于 Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷, 图中显示: 1) 初始 0—70 MPa 应力范围内, 放电量随着轴向应力增大缓慢释放, 放电的物理机理是 PZT95/5 铁电陶瓷的压电效应; 2) 当应力超过 70 MPa, 放电量随着轴向应力的增长迅速增大, 此时放电的物理机理发生了改变, 从压电机理转变为去极化机理; 3) 去极化放电起始应力 70 MPa 恰好对应于畴变开始临界应力, 明显低于相变开始临界应力(195 MPa); 4) 当应力达到相变开始临界应力时, 电量已释放了 4/5, 由此说明, Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷去极化放电机理是畴变和相变的共同作用, 其中畴变占主导地位. 与 Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷相比, Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷在 0—285 MPa 应力范围内没有观察到明显的放电行为, 这是因为 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷样品的压缩加载应力方向与电畴极化方向垂直, 抑制了电畴翻转, 从而阻止其出现压电效应和畴变. 当应力超过 285 MPa 后, 随着应力增大放电量迅速增大, 在大约 400 MPa 时电量释放达到饱和, 而 285 MPa 恰好为 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷相变开始临界应力, 由此推断 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷放电的物理机理是相变去极化.

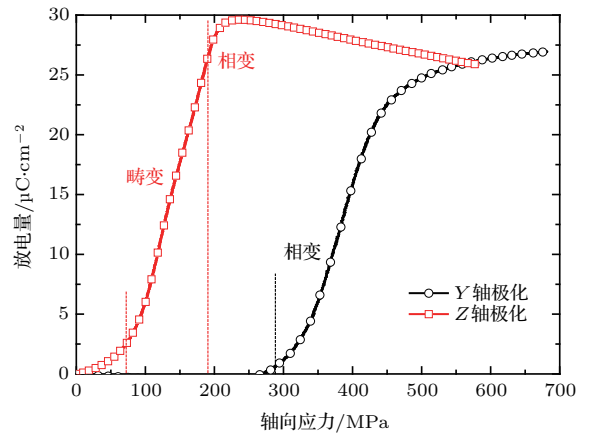


图 8 不同极化方向的 PZT95/5 铁电陶瓷放电量随着轴向应力变化曲线

Fig. 8. Influence of poling directions on the polarization released behaviors of PZT95/5.

4 结 论

本文研究了准静态单轴压缩下极化状态和极化方向对 PZT95/5 铁电陶瓷的畴变和相变行为的影响. PZT95/5 铁电陶瓷的畴变行为明显依赖于极化状态. 在压缩应力作用下, Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷产生明显的畴变应变; 未极化 PZT95/5 铁电陶瓷发生了畴变, 但没有观察到明显的畴变应变; Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷不发生畴变; 把宏观应变分解为晶格应变、畴变应变和相变应变, 再利用畴变应变和相变应变的特征求证了畴变与相变是相互解耦的, 界定了畴变应变和相变应变的影响范围, 同时合理定义了相变开始临界应力以及相变结束应力. 极化状态和极化方向对 PZT95/5 铁电陶瓷的相变行为也有显著的影响. 未极化 PZT95/5 铁电陶瓷的相变开始临界应力和相变结束应力最小, Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷次之, Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷最大, 由此可推论出畴变对相变有一定的促进作用. 极化方向对 PZT95/5 铁电陶瓷的电荷饱和和释放量没有影响, 但是电荷释放机理却是不同的, Z 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷去极化的物理机理是畴变和相变的共同作用, 其中畴变占主导地位, 而 Y 轴极化 PZT95/5 铁电陶瓷去极化物理机理仅仅是相变.

参考文献

[1] Haertling G H 1999 *J. Am. Ceram. Soc.* **82** 797
 [2] Wang Y L 2003 *Properties and Application of Functional Ceramics* (Beijing: Science Press) p54 (in Chi-

- nese) [王永龄 2003 功能陶瓷性能与应用 (北京: 科学出版社) 第54页]
- [3] Okayasu M, Sato K, Mizuno M 2011 *J. Eur. Ceram. Soc.* **31** 141
- [4] Li Y J, Rogan R C, Üstündag E, Bhattacharya K 2005 *Nat. Mater.* **4** 776
- [5] Jones J L, Hoffman M, Vogel S C 2007 *Mech. Mater.* **39** 283
- [6] Okayasu M, Sugiyama E, Mizuno M 2010 *J. Eur. Ceram. Soc.* **30** 1445
- [7] Tuttle B A, Yang P, Gieske J H, Voigt J A, Scofield T W, Zeuch D H, Olson W R 2001 *J. Am. Ceram. Soc.* **84** 1260
- [8] Setchell R E 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 573
- [9] Zhang F P, He H L, Liu G M, Yu Y, Wang Y G 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 183501
- [10] Feng N B, Gu Y, Liu Y S, Nie H C, Chen X F, Wang G S, He H L, Dong X L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8897 (in Chinese) [冯宁博, 谷岩, 刘雨生, 聂恒昌, 陈学锋, 王根水, 贺红亮, 董显林 2010 物理学报 **59** 8897]
- [11] Setchell R E 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 053525
- [12] Jiang Z X, Xing M Z, Sheng H T, Wang Y G, Nie H C, Liu Y S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 134601 (in Chinese) [蒋招绣, 辛铭之, 申海艇, 王永刚, 聂恒昌, 刘雨生 2015 物理学报 **64** 134601]
- [13] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H W 2009 *Image Correlation for Shape, Motion, and Deformation Measurements* (New York: Springer) p81
- [14] Yang W 2000 *Mechatronic Reliability* p87 (Beijing: Press of University of Tsinghua) (in Chinese) [杨卫 2000 机电失效学 (北京: 清华大学出版社) 第87页]
- [15] Okayasu M, Sato K, Kusaba Y 2011 *J. Eur. Ceram. Soc.* **31** 129

Effects of poling state and direction on domain switching and phase transformation of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ ferroelectric ceramics under uniaxial compression*

Jiang Zhao-Xiu¹⁾ Wang Yong-Gang^{1)†} Nie Heng-Chang²⁾ Liu Yu-Sheng³⁾

1) (Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ministry of Education of China, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

2) (Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

3) (Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyan 621900, China)

(Received 20 July 2016; revised manuscript received 27 October 2016)

Abstract

The digital image correlation technique is used for full field measurements of axial strain and transverse strain of PZT95/5 ferroelectric ceramics under uniaxial compression. Based on the variations of the axial strain and transverse strain with axial stress, the effects of poling state and poling direction of PZT95/5 ferroelectric ceramics on the domain switching and phase transformation behaviors are explored. Domain switching occurs in unpoled and Z -axis poled PZT95/5 ferroelectric ceramics separately, while domain switching in the Y -axis poled PZT95/5 ferroelectric ceramic is not observed. Domain switching strain in the Z -axis poled PZT95/5 ferroelectric ceramic has obvious influences on the developments of axial strain and transverse strain, but the influence of domain switching strain in the unpoled PZT95/5 ferroelectric ceramic is very weak, which can be attributed to the different random distribution characteristics of domain orientation. By the strain decomposition analysis, it is proved that the domain switching and the phase transition process can be decoupled, and domain switching strain and phase transformation strain can be distinguished successfully. Compared with the Z -axis poled PZT95/5 ferroelectric ceramic, the unpoled PZT95/5 ferroelectric ceramic has a small critical stress of phase transformation, while the critical stress of the Y -axis poled PZT95/5 ferroelectric ceramics is big, which may be concluded that the domain switching behavior favors the phase transformation process. The polarization released behavior of PZT95/5 ferroelectric ceramic also depends on the poling direction. The depolarization mechanism of Z -axis poled PZT95/5 ferroelectric ceramic is caused by both domain switching and phase transformation, and the Y -axis poled PZT95/5 ferroelectric ceramic is caused by only phase transformation.

Keywords: PZT95/5 ferroelectric ceramics, domain switching, phase transformation, poling state and direction

PACS: 46.80.+j, 77.80.B-, 77.80.-e

DOI: 10.7498/aps.66.024601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11272164, 11472142), the K. C. Wong Magna Foundation, and K. C. Wong Education Foundation of Ningbo University, China.

† Corresponding author. E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn