

冲击载荷作用下 PZT-5 压电陶瓷的力电特性

雷 霆^{1,2}, 陈 刚¹, 何颖波¹, 李尚昆¹

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 压电陶瓷是压电冲击传感器的核心元件。采用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 实验技术研究 PZT-5 压电陶瓷在冲击载荷作用下的力电特性, 进行了 4~14 m/s 不同速度的实验。实验中为保证试件与压杆绝缘, 采用了对试件影响较小的表面溅射 Al_2N_3 的工艺, 溅射厚度为 1~3 μm 。实验结果表明: 在冲击加载过程中, PZT-5 压电陶瓷的应变变化表现出黏性性质, 其产生的电荷与加载过程中试件的应力、应变均相关; 当加载速度超过一定值时, 加载过程中压电陶瓷可能产生损伤, 不同的损伤程度也影响电荷的产生; PZT-5 压电陶瓷的力学和电学性能具有明显的率相关性。

关键词: 压电陶瓷; 分离式霍普金森压杆; 损伤程度; 率相关性

中图分类号: O347.4

文献标识码: A

压电陶瓷具有响应迅速、灵敏度高、制备技术成熟、易于加工成型等特点。基于压电陶瓷特性制成的压电冲击传感器具有量程大、工作频带宽、体积小、重量轻、安装方便、性能稳定、适用于各种恶劣环境等特点^[1], 广泛应用于汽车、飞机、国防等领域。

针对压电陶瓷的冲击响应, 学者们开展了很多研究工作。在电学响应方面: 张智丹等^[2]利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 研究了 PZT-5 压电陶瓷在不同冲击载荷作用下的输出线性度、响应时间和灵敏度; Hu 等^[3]研究了冲击压电元件的电输出对冲击条件的依赖性, 基于压电本构方程和 Hertz 冲击理论, 对实验现象进行了理论解释和分析; Chure 等^[4]研究了冲击作用下压电陶瓷产生电能与冲击机械能的关系, 结果表明, 压电陶瓷体的开路输出电压和产生的电能随着机械能的增加而增加。在理论和仿真方面: 龚双^[5]研究了压电层合结构的瞬态响应和波动特性, 提出了一种适用于压电层合结构瞬态问题分析的半解析压电层单元模型; Shen 等^[6]基于热弹性模拟方法和非线性接触有限元方法, 提出了一种完整的瞬态模拟方法, 可以分析压电陶瓷的机电耦合、接触效应和波传播规律。一些学者也研究了压电陶瓷在冲击加载条件下的微观变化, 如钱霖等^[7]利用 SHPB 结合谐振频率、电滞回线、X 射线衍射 3 种方法, 对比分析了 PZT-5 压电陶瓷在冲击载荷作用前后电畴的变化。压电陶瓷在冲击加载条件下的响应具有明显的非线性和率效应^[8-9], 目前有关冲击加载条件下 PZT-5 压电陶瓷的力学和电学性能研究的文献较少。

本研究以某压电冲击传感器中使用的 PZT-5 压电陶瓷为对象。为了研究 PZT-5 压电陶瓷在冲击加载条件下的力电响应特性, 采用 SHPB 进行加载, 同时对试件和测试方法做改进, 进行 4~14 m/s 不同加载速度的实验, 从应力、应变和电荷等方面讨论冲击加载条件下 PZT-5 压电陶瓷的力电特性。

* 收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金 (11572299)

作者简介: 雷 霆 (1987—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事冲击动力学研究。

E-mail: lting80431@163.com

通信作者: 陈 刚 (1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: chengang@caep.cn

1 实 验

1.1 试 件

实验采用规格为 $\varnothing 14\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的PZT-5压电陶瓷。在压电陶瓷的两个表面上溅射金属Au($3 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$),以保证良好的导电性能,其密度为 $7.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,压电应变常数 d_{33} 为 $490\text{ pC}\cdot\text{N}^{-1}$ (静态测量数据)。

1.2 实验方法

采用SHPB技术进行实验,其中杆径为 14.5 mm ,入射杆和透射杆长度均为 1500 mm ,子弹长度为 300 mm ,材料均为高强度钢。实验示意图如图1所示。

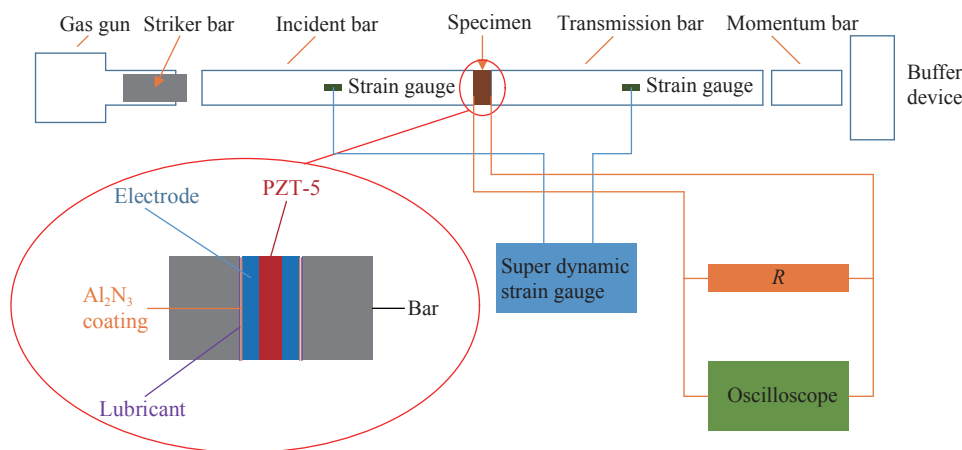


图1 SHPB实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of SHPB experimental setup

使用高强度钢制成规格为 $\varnothing 14.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的电极,测量冲击加载过程中PZT-5压电陶瓷的电学性能。电极的一个侧面溅射 Al_2N_3 ($1 \sim 3\text{ }\mu\text{m}$),使其与SHPB系统保持绝缘;另一侧面使用导电胶与PZT-5压电陶瓷粘接(导电胶厚度不超过 $10\text{ }\mu\text{m}$),电极引出导线进行电性能测量。由于PZT-5压电陶瓷的压电常数很大,在SHPB实验中产生的电荷很多,开路电压很高,直接测量电荷或用示波器测电压都超出测量设备量程,因此在PZT-5压电陶瓷两端并联一个阻值较小的电阻,使用示波器测量小电阻的电压变化,进而测试PZT-5压电陶瓷的电学特性。实验中为保证测试波形的完整性,令测试电压不超过 40 V ,按照(1)式~(3)式估算电阻阻值,阻值不超过 $67.1\text{ }\Omega$,考虑到PZT-5压电陶瓷在冲击加载条件下的材料参数可能和静态有区别,在实际实验中选择电阻为 $30\text{ }\Omega$ 。

$$\left| \frac{V}{V_s} \right| = \left| \frac{R}{(j2\pi fC)^{-1} + R} \right| \quad (1)$$

$$V_s = Q/C \quad (2)$$

$$Q = F \cdot d_{33} = \sigma \cdot A_s \cdot d_{33} \quad (3)$$

式中: V 为测试电阻上的电压, V_s 为根据静态 d_{33} 估算的PZT-5压电陶瓷的最大开路电压, j 为虚部单位, f 为加载的上升沿频率, C 为PZT-5压电陶瓷的静态电容, R 为测试电阻阻值, Q 为压电陶瓷产生的电荷, A_s 为试件横截面积, σ 为应力最大幅值, d_{33} 为静态压电应变常数。

在电极和入射杆以及透射杆之间涂抹少量润滑剂,以保证电极和杆的良好接触。

当子弹以一定速度撞击入射杆时,产生压缩波,压缩波以杆的弹性波速进行传播,当传播到PZT-5压电陶瓷时对其进行加载,在此过程中一部分波反射回入射杆,另一部分透射到透射杆中。杆中的应力波脉冲信号通过位于入射杆和透射杆中间的应变片测量得到。

在满足SHPB实验一维应力波和均匀化两个假设的前提下^[10],可根据应变片测量的应变信号求得试件中的应力 σ_s 、应变 ϵ_s ;同时,对PZT-5压电陶瓷两端的电压信号进行处理,可得到PZT-5压电陶瓷输

出电荷变化历程 $Q(t)$, 即

$$\sigma_s(t) = (EA/A_s)\varepsilon_T(t) \quad (4)$$

$$\varepsilon_s(t) = -(2C_0/l_s) \int_0^t \varepsilon_R(\tau) d\tau \quad (5)$$

$$Q(t) = \int_0^t \frac{V(\tau)}{R} d\tau \quad (6)$$

式中: ε_T 为透射杆应变片测得的透射波应变, ε_R 为入射杆应变片测得的反射波应变, E 为杆的弹性模量, A 为杆的横截面积, C_0 为杆的弹性波速, l_s 为试件长度, $V(\tau)$ 为示波器测得电压, R 为小电阻的阻值。

2 实验结果

通过调整气压, 分别开展了 4~14 m/s 不同速度的 SHPB 实验。实验后回收试件, 未观察到试件有明显的裂纹。典型的 SHPB 实验测试数据如图 2 所示, PZT-5 压电陶瓷的输出电压被完整地采集到。输出电压开始有个较窄的正向脉冲, 在下降沿的后段振荡减小, 直到输出电压负向增大, 产生负向脉冲电压。

根据应力波在杆中传播的速度和杆、电极的长度, 确定入射波、反射波、透射波和电压的起点和终点, 根据(4)式~(6)式得到应变、应力和电荷随时间的变化过程, 如图 3 所示。

图 3(a) 表明, 在 CD 段 PZT-5 压电陶瓷输出电压的振荡与应力的小幅波动有关。图 3(b) 表

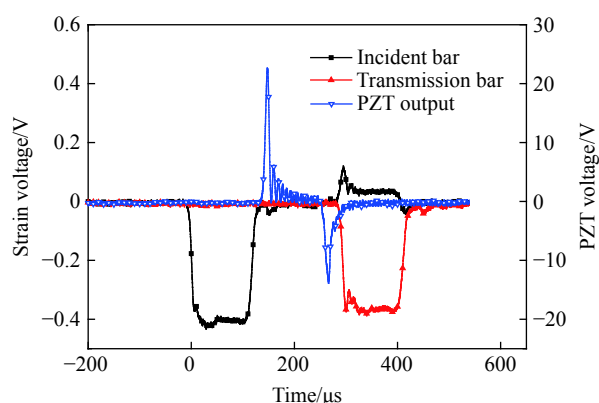


图 2 典型的 SHPB 实验测试数据(加载速度: 4.5 m/s)

Fig. 2 Typical SHPB experimental test data (Loading speed: 4.5 m/s)

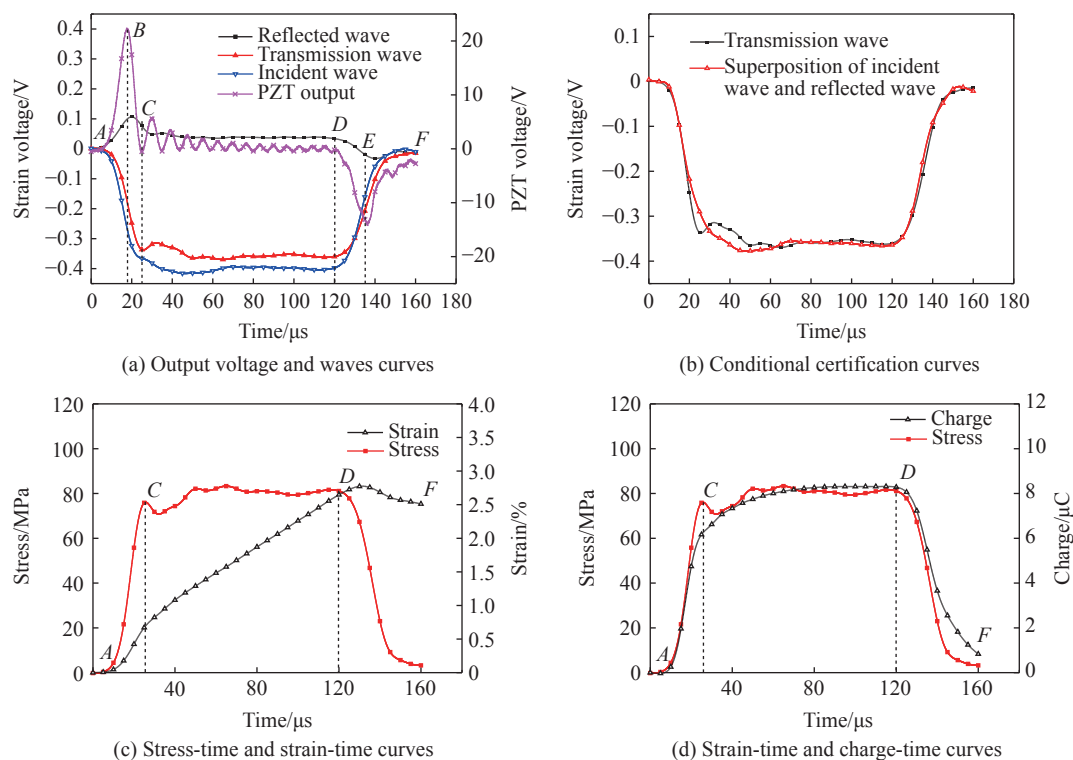


图 3 典型的应力、应变和电荷的时程曲线(加载速度: 4.5 m/s)

Fig. 3 Typical stress-time, strain-time and charge-time curves (Loading speed: 4.5 m/s)

明在加载过程中,试件两端应力满足 SHPB 实验假设。图 3(c)中:在 AC 段,应力急剧增大,试件应变也快速增大;在 CD 段,PZT-5 压电陶瓷处于均匀加载段,应力有小幅波动,应变仍在增大,但增大速率小于 AC 段;DF 段为卸载段,在 DF 段,应力快速减小,应变先增大后减小。图 3(d)中:在 AC 段,应力急剧增大,PZT-5 压电陶瓷产生大量电荷;在 CD 段,应力幅值小幅波动,电荷量缓慢增加;在 DF 段,应力快速减小,PZT-5 压电陶瓷产生大量反向电荷,电荷曲线快速下降。

3 分析和讨论

3.1 应力-应变关系

通过 SHPB 实验得到的应力-应变关系如图 4 所示。可以看出,试件的应力-应变曲线与韧性金属材料类似,具有明显的弹塑性特征,在 4.5 m/s 加载条件下的残余应变为 2.5%,7.0 m/s 加载条件下的残余应变为 4.0%,13.5 m/s 加载条件下的残余应变为 5.4%。在实验后对回收的试件分别进行了测量,发现 4.5 m/s 加载条件下试件的残余应变为 0.03%,7.0 m/s 加载条件下试件的残余应变为 0.02%,13.5 m/s 加载条件下试件的残余应变为 0.3%,远小于应力-应变测试结果。这一结果显示试件在卸载后仍存在变形恢复,即:在冲击加载条件下,PZT-5 压电陶瓷表现出黏性的性质。目前普遍认为畴变是压电陶瓷非线性行为的内在机理,电畴的运动与加载率相关^[8],因此 PZT-5 压电陶瓷在冲击加载下表现出的黏性性质可能与电畴运动的特性相关,PZT-5 压电陶瓷在冲击加载条件下的力学性能具有明显的率相关性。

3.2 电 荷

在冲击加载中,PZT-5 压电陶瓷可以等效为电容,电容的放电过程为

$$V = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

式中:时间常数 $\tau = RC$ 。本实验中 R 为 30Ω ,静态电容实测不超过 1 nF ,电荷释放的时间约为 90 ns (3 倍的时间常数),相对非常短,可以认为在电荷产生的瞬间就释放出去了。

分析 SHPB 实验中电荷的变化情况(见图 3):在应力较稳定的 CD 段,PZT-5 压电陶瓷产生的电荷量缓慢增加,表明电荷的产生与应变相关;在卸载的 DF 段,电荷随着应力卸载而马上产生负向电荷,表明电荷的产生也与应力相关。

由于实验中,电荷释放可以认为是瞬间释放,电荷产生由两部分组成,一部分是应变导致的电畴之间距离变化引起的,另一部分是应力导致的电畴翻转引起的:应力和应变共同影响电荷的产生。

实验中在应力的上升沿(AC 段)和下降沿(DF 段)PZT-5 压电陶瓷产生的电荷量绝对值随加载速度的变化关系如图 5 所示。随着加载速度的增加,PZT-5 压电陶瓷在 AC 段产生的电荷量增加,DF 段产生的电荷量减少。分析其原因:应力和加载速度成正比,加载速度增加,产生的应力幅值随之增大,PZT-5 压电陶瓷在 AC 段产

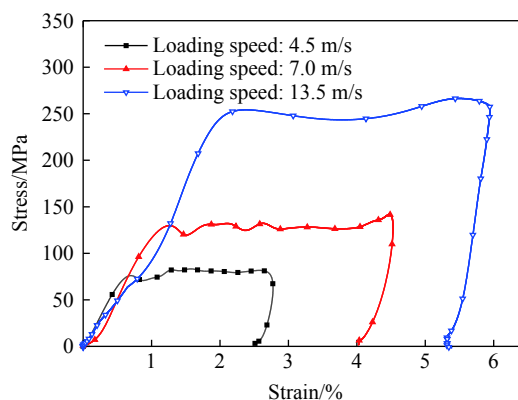


图 4 典型的应力-应变曲线

Fig. 4 Typical stress-strain curve

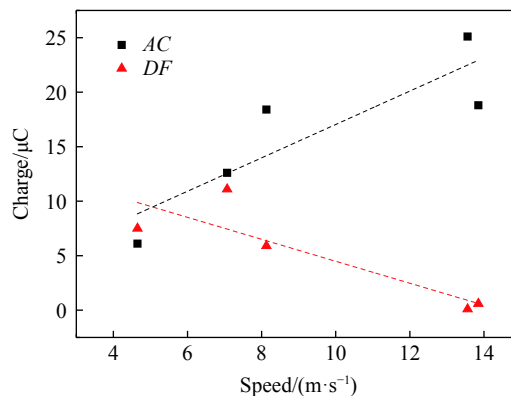


图 5 电荷随加载速度变化曲线

Fig. 5 Charge vs. loading speed

生的电荷量也有增大的趋势,但有一定的分散性;当加载速度达到一定程度时,应力超过了PZT-5压电陶瓷的极限应力,于是在加载段PZT-5压电陶瓷可能产生损伤,损伤使得PZT-5压电陶瓷产生电荷的能力下降,造成PZT-5压电陶瓷在DF段产生的电荷量减少。

3.3 电荷-应力关系

分析应力脉冲上升沿AC段和下降沿DF段电荷和应力的关系,典型的电荷随应力的变化曲线见图6,其中分别用正和负来表示电荷相反。

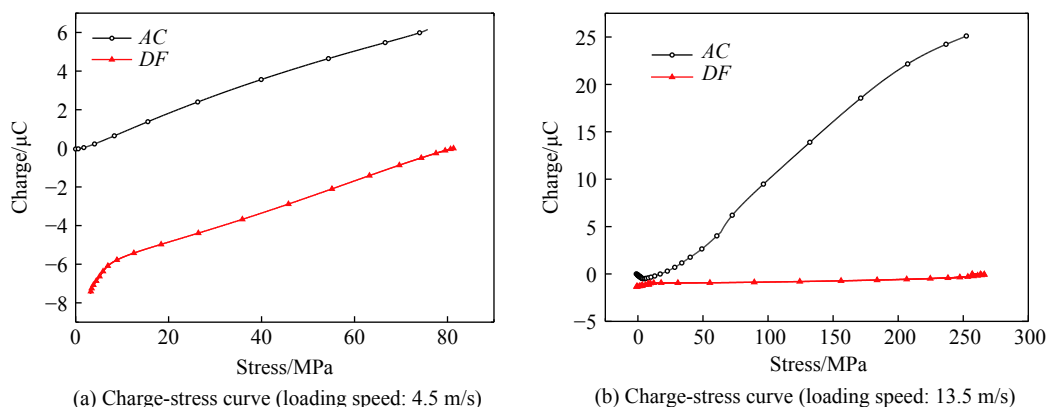


图6 典型的电荷-应力曲线

Fig. 6 Typical charge-stress curves

图6表明应力脉冲上升沿AC段和下降沿DF段电荷和应力近似呈线性变化。当加载速度较小时,AC段和DF段的斜率接近;当加载速度较大时,AC段和DF段的斜率相差较大,其中DF段斜率接近零,即DF段PZT-5压电陶瓷基本不产生电荷。利用无量纲数 $\beta = \frac{k_l - k_u}{k_l}$ (其中 k_l 、 k_u 分别表示加载斜率和卸载斜率)表示卸载段斜率相对于加载段斜率的偏差程度, β 随速度的变化关系如图7所示。

图7反映了不同加载速度下,应力脉冲上升沿AC段和下降沿DF段PZT-5压电陶瓷产生电荷能力的相差程度,可以看出:随着加载速度的增加, β 越来越大,表明DF段PZT-5压电陶瓷产生电荷的能力越来越弱,原因可能是随着加载速度的增加,PZT-5压电陶瓷在AC段产生了不同程度的损伤,加载速度越大,损伤程度越大, β 也就越大;当PZT-5压电陶瓷没有损伤时,AC段和BC段PZT产生电荷的能力相同, β 为零;当PZT-5压电陶瓷完全失去产生电荷能力时, β 为1。

PZT-5压电陶瓷的损伤可能由于两种原因导致:一是PZT-5压电陶瓷内部产生微裂纹,形成了电绝缘边界,如电压无法击穿绝缘层,则在外表现为产生电荷量减少;二是微裂纹的产生造成PZT-5压电陶瓷在损伤后受到的应力方向不沿着极化方向,且各不相同,总体表现为产生的电荷量减少。

电荷随应力的变化与压电应变常数 d_{33} 的关系如下

$$d_{33} = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{\sigma \cdot A_s} \quad (8)$$

根据(8)式,可以得到不同速度实验的AC段的压电应变常数 d_{33} ,如图8所示。图8表明:PZT-5压电陶瓷的压电应变常数 d_{33} 在冲击加载条件下会改变,且大于准静态测量结果;随着加载速度的增

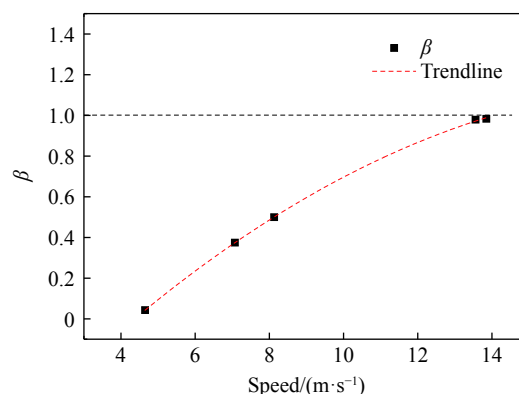


图7 β 随加载速度变化曲线

Fig. 7 β vs. loading speed

大, d_{33} 有逐渐增大的趋势, 即 PZT-5 压电陶瓷在冲击加载条件下的电学性能具有明显的率相关性。

4 结 论

利用 SHPB 实验技术研究了 PZT-5 压电陶瓷在不同冲击载荷下的力电动态特性, 结果表明: 在冲击加载过程中, PZT-5 压电陶瓷的应变变化表现出黏性性质, 力学性能具有明显的率相关性; PZT-5 压电陶瓷产生的电荷与应力及应变均相关, 随着加载速度的增加, PZT-5 压电陶瓷在卸载段产生电荷的能力逐渐降低, 原因可能为 PZT-5 压电陶瓷在加载过程中产生了一定程度的损伤, 加载速度越大, 损伤程度越大, 产生电荷的能力就越低, 当加载速度超过一定程度时, PZT-5 压电陶瓷将失去产生电荷的能力; 在冲击加载过程中, PZT-5 压电陶瓷的压电应变常数会改变, 且大于准静态测量结果, 随着加载速度的增大, d_{33} 有逐渐增大的趋势, PZT-5 压电陶瓷的电学性能具有明显的率相关性。

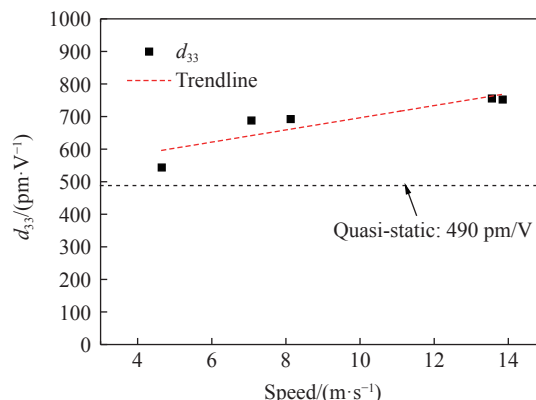


图8 d_{33} 随加载速度变化曲线

Fig. 8 Piezoelectric strain constant d_{33} vs. loading speed

参考文献:

- [1] 张福学, 王丽坤. 现代压电学 (下册) [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 337.
ZHANG F X, WANG L K. Modern piezoelectricity (Volume 3) [M]. Beijing: Science Press, 2001: 337.
- [2] 张智丹, 纪松, 张延松. 冲击载荷下 PVDF 和 PZT 压电材料的动态性能研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(2): 65–69.
ZHANG Z D, JI S, ZHANG Y S. Research of dynamic behavior of PVDF and PZT piezoelectric materials under shock loading [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(2): 65–69.
- [3] HU J, TJIU N. Dependence of electric energy output from a lead zirconate titanate ceramic piezoelectric element on impact conditions [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 128(1/2): 172–176.
- [4] CHURE M C, WU L, WU K K, et al. Power generation characteristics of PZT piezoelectric ceramics using drop weight impact techniques effect of dimensional size [J]. Ceramics International, 2014, 40(1): 341–345.
- [5] 龚双. 层合压电结构的瞬态响应和波动特性分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
GONG S. Transient response and characteristic waves of layered piezoelectric structures [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [6] SHEN Y N, ZHENG Y B. Full transient modelling for piezoelectric actuator with contact-impact [C]//Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, 2014: 98–101.
- [7] 钱霖, 张峰, 徐先洋, 等. 冲击荷载下 PZT5 电畴翻转研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2017, 48(7): 93–97.
QIAN L, ZHANG F, XU X Y, et al. Researches of PZT5 in domain switching under impact loading [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2017, 48(7): 93–97.
- [8] 董新龙, 周广宇, 祁振林, 等. 冲击压缩下 PZT 铁电陶瓷本构特性的实验研究 [C]//中国力学学会学术大会, 2005: 168.
DONG X L, ZHOU G Y, QI Z L, et al. Experimental study on constitutive properties of PZT ferroelectric ceramics under impact compression [C]// Academic Conference on Mechanics of China, 2005: 168.
- [9] KHAN A S, PROUD W G. Temperature and strain rate effects on the piezoelectric charge production of PZT 95/5 [C]//AIP Conference Proceedings 1793, 2017: 1–5.
- [10] 王礼立. 应力波基础 [M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 53.
WANG L L. Foundation of stress waves [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 53.

Dynamic Behavior of PZT-5 Piezoelectric Ceramics under Impact Loading

LEI Ting^{1,2}, CHEN Gang¹, HE Yingbo¹, LI Shangkun¹

(1. *Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China;*

2. *Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China*)

Abstract: Piezoelectric ceramics are the core components of piezoelectric impact sensors. The mechanical and electrical behaviors of PZT-5 piezoelectric ceramics were studied by split Hopkinson pressure bar (SHPB) experimental technique. The tests were carried out at speeds of 4–14 m/s. In order to ensure the insulation between specimen and pressure bar, a process of sputtering Al_2N_3 on the surface that with less influence on the test piece was used, and the sputtering thickness was 1–3 μm . The experimental results of SHPB were analyzed and discussed. The results show that the strain change of PZT-5 piezoelectric ceramics exhibits viscous properties during impact loading, and the charge generated is related to the stress and strain of the specimen during loading. When the loading speed exceeds a certain level, the piezoelectric ceramic may be damaged during the loading process, and the degree of damage also affects the generation of charge. The mechanical and electrical properties of PZT-5 piezoelectric ceramics have obvious rate correlation.

Keywords: piezoelectric ceramics; split Hopkinson pressure bar; degree of damage; rate correlation