

# 强冲击压电陶瓷结构的应力波传播及电压输出特性

王睿智, 相升海, 唐恩凌, 韩雅菲, 贺丽萍, 李振波, 宋继秋, 李 月

(沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁沈阳 110159)

**摘 要:** 为了研究强冲击作用下应力波在压电陶瓷复合结构(前基板-压电陶瓷-后基板)中的传播规律和压电陶瓷的电压输出特性,利用自行构建的聚偏氟乙烯(PVDF)冲击压力测试系统和压电陶瓷的电压输出测试系统并结合一级轻气炮加载系统,开展了2A12柱状铝弹丸分别以313m/s、326m/s、379m/s和397m/s的速度正碰撞压电陶瓷复合结构(不同材料的后基板)实验,采集压电陶瓷与后基板间压力传感器产生的电压信号和压电陶瓷的电压输出信号.同时,基于一维弹性波的传播理论,推导了应力波在弹体与压电陶瓷复合结构接触界面所形成的变截面问题中传播时的碰撞速度与压力峰值的计算关系式,得到了不同碰撞速度条件下压电陶瓷后表面处的应力峰值;利用压电陶瓷输出电压与冲击压力峰值间的理论计算关系式并结合Matlab编程对冲击压力的实验数据处理所得到的冲击压力峰值,计算得到了压电陶瓷的电压输出峰值.研究表明:通过理论计算得到的冲击压力峰值、电压输出峰值与实验测量所得结果均基本吻合;在碰撞速度接近时,后基板的材料性质(有机玻璃和铝合金)对应力脉冲峰值特征的影响显著,有机玻璃作为后基板的应力脉冲峰值高于后基板为铝合金时的应力脉冲峰值,且有机玻璃作为后基板的脉冲持续时间长于后基板为铝合金时的脉冲持续时间;压电陶瓷的电压输出峰值随冲击压力峰值的增加而增大且二者呈非线性关系.

**关键词:** 压电陶瓷; 强冲击; PVDF; 瞬态高电压

**中图分类号:** TJ430.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2018)01-0190-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.026

## Propagation of Stress Wave and Characteristics of Voltage Output During Strong Shock Piezoelectric Ceramic Structure

WANG Rui-zhi, XIANG Sheng-hai, TANG En-ling, HAN Ya-fei,

HE Li-ping, LI Zhen-bo, SONG Ji-qi, LI Yue

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China)

**Abstract:** In order to research the propagating rules of stress wave in piezoelectric ceramic composite structure (front substrate-piezoelectric ceramic-rear substrate) and characteristics of the output voltage for piezoelectric ceramics under strong shock loading. The Polyvinylidene Fluoride(PVDF) pressure test system, the output voltage test system and the one-stage light gas gun loading system were built by ourselves and used in the laboratory. Experiments were carried out by 2A12 aluminum cylindrical projectile at the velocities of 313m/s, 326m/s, 379m/s and 397m/s, respectively, against piezoelectric ceramic composite structures (rear substrates of different materials). The voltage signal generated by the PVDF pressure sensor between the piezoelectric ceramic and the rear substrate and the voltage output signal of the piezoelectric ceramic were collected. At the same time, based on the propagating theory of one-dimensional elastic wave, the relationship between the collision velocity and the pressure peak of the stress wave in the variable cross-section problem formed by the contact between the projectile and the piezoelectric ceramic composite structure is deduced. The stress peaks at the rear surface of the piezoelectric ceramic were obtained at different collision speeds based on the relationship deduced. The peaks of the voltage output for the piezoelectric ceramics are calculated by the theoretical relationship between the peak of output voltage for pie-

zoelectric ceramic and the peak value of the impact pressure. The peak value of the shock pressure is obtained by the experimental data processing from the voltage signals measured programmed by Matlab. The results show that the peak values of the impulse pressure and the voltage output are basically consistent with the experimental results. When the impact speed is close, the material properties (plexiglas and aluminum alloy) of the rear substrate have a significant effect on the peak value of the stress pulse. The peak value of the stress pulse of the plexiglass as the rear substrate is higher than the peak value of the pulse stress when the rear substrate is an aluminum alloy. And the pulse duration of the plexiglass as the rear substrate is longer than the duration of the pulse when the rear substrate is an aluminum alloy. The peak value of the voltage output of the piezoelectric ceramic increases with the increase of the impulse pressure and it is non-linear.

**Key words:** Piezoelectric ceramics; Strong shock; PVDF; Transient high voltage

## 1 引言

随着智能化高新武器的不断发展,世界各国对武器安全性能及其命中精度的要求越来越高,同时对其自身的点火起爆方式也提出了更高的要求.目前大多数国家采用化学电源起爆,但是化学电源具有体积大,响应时间长等缺点;而压电陶瓷电源具有稳定性好,响应时间短,输出电压高等优点,成为近年来研究的热点.

国内外诸多学者已经开展了机械振动载荷作用下压电陶瓷电输出特性的相关研究. Neilson 等<sup>[1]</sup>研究表明, PZT95/5 压电陶瓷在冲击波载荷作用下可完全去极化,若极化能完全转化为电能则可获得一次性的高功率脉冲电能输出. Mock W 等<sup>[2]</sup>利用气炮的加载手段冲击压电陶瓷堆,在电容负载上获得了 81 kV 的电压输出和 140 μC 的放电电荷脉冲输出. Hart 等<sup>[3]</sup>人利用炸药爆炸产生的冲击波驱动环形压电陶瓷器件,在负载电感上获得了 440 A 的峰值电流. Oberlin<sup>[4]</sup>在专利中描述了一次性高输出压电电源的可行性,说明了存储电容与陶瓷电容的比率对输出能量的影响且压电陶瓷电容与负载电容之比为 1:1 时的能量转化率最高. 李映平, 陈荷娟等<sup>[5,6]</sup>通过静态和动态试验对压电陶瓷电源的激活时间、能量释放作了定量分析,得出了储能电容上的充电电压与压电电源的层数成正比,与电容值成反比的结论. 2016 年, Seungmoon 等<sup>[7]</sup>采用轻气炮加载弹丸碰撞压电陶瓷,研究了弹性波作用下压电陶瓷的电输出特性. 军械工程学院的黎辉<sup>[8]</sup>设计并制作了一种引信自维持压电电源,该电源能够将外部冲击载荷转换为自维持激励源,延长作用于压电换能器上载荷的持续时间.

虽然研究人员很早就已经认识到压电陶瓷自供能技术的广阔应用前景,但是在该方面的研究仍然较少.其原因主要是由于高速撞击作用下冲击波在压电陶瓷中的传播规律十分复杂,实验条件的限制极大地阻碍了该技术在弹药系统工程和航天领域的广泛应用.目前,国内外鲜见极端载荷作用下冲击波在压电陶瓷中的传播及压电陶瓷电输出特性研究方面的报道.本文利用柱状 2A12 铝弹丸高速正碰撞压电陶瓷复合结构,

分析了高速撞击下压电陶瓷复合结构中应力波传播规律、压电陶瓷电压输出脉冲特征以及冲击压力对电压输出的影响.

## 2 实验

实验在沈阳理工大学强动载研究中心的一级轻气炮上完成.该一级轻气炮可将直径为 15.3 mm 的弹丸加速至 800 m/s<sup>[9]</sup>.实验系统由加载系统和测试系统两部分组成.加载系统由一级轻气炮承担;测试系统由冲击压力测试系统和电压输出测试系统组成.图 1 为实验系统示意图.

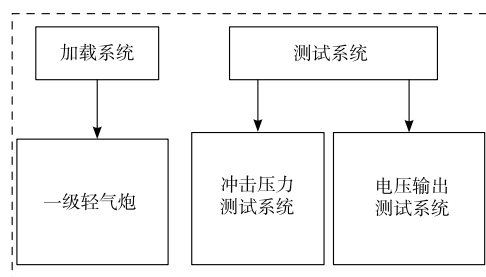
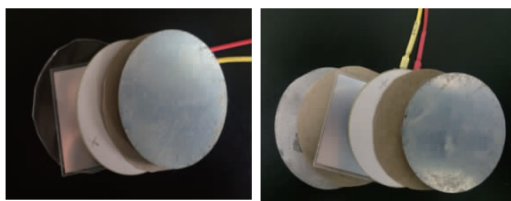


图1 实验系统示意图

### 2.1 靶板及约束

实验采用直径为 15.3 mm、长 10 mm 的柱状实心 2A12 铝弹体垂直碰撞压电陶瓷复合结构靶,弹丸的质量为 4.84 g.复合结构靶由前基板、压电陶瓷、PVDF 压力传感器和后基板依次叠放构成.其中,前基板材质为 45#碳钢,后基板的材质为 2A12 铝合金或有机玻璃,前后基板均为  $\Phi 40 \times 2 \text{mm}^2$  的均质圆片,前后基板与压电陶瓷之间用绝缘纸绝缘.压电陶瓷采用 PZT-5H 圆形陶瓷,几何尺寸为  $\Phi 40 \times 0.4 \text{mm}^2$ .实验以聚偏氟乙烯 (PVDF) 作为压力传感器,安装在压电陶瓷与后基板间,其厚度为 20 μm.图 2 为压电陶瓷复合结构靶的实验排布实物图.

靶板后方采用与压电陶瓷复合结构等径的长铝柱约束,四周采用钢管约束并在内壁用硬纸筒绝缘.实验 1~4 的碰撞速度分别为 313 m/s、326 m/s、379 m/s 和 397 m/s.4 组实验的前基板均为 45#碳钢片,实验 1、4 以有机玻璃作为后基板,实验 2、3 以铝合金作为后基板.



(a) 后基板为有机玻璃 (b) 后基板为铝合金

图2 压电陶瓷复合结构靶的实验排布实物图

## 2.2 实验测试系统

实验测试系统主要由冲击压力测试系统和输出电压测试系统构成。

### 2.2.1 冲击压力测试系统

冲击压力测试系统由 PVDF 压力传感器、外部电路和示波器构成。图 3 为 PVDF 电流模式测试电路。

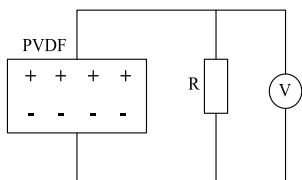


图3 压力传感器测试电路

采用 PVDF 压力传感器作为冲击压力测试系统的数据采集单元。试验中将 PVDF 置于压电陶瓷的后侧，与测试电阻  $R$  并联，信号经同轴电缆输送到 TEK4104B 示波器中。

弹丸作用靶板时应力波作用于 PVDF，PVDF 由于压电效应形成电流脉冲，电流脉冲再通过测试电阻  $R$ ，在电阻两边形成电势差，示波器记录加载在测试电阻两端的压电电压历程。将示波器记录的电压信号通过式(1)计算得到应力历程

$$\sigma(t) = \frac{\int_0^t U(t) dt}{kRA} \quad (1)$$

式中： $\sigma(t)$  为  $t$  时刻对应的应力， $U(t)$  为示波器采集到的  $t$  时刻的电压， $k$  为 PVDF 压力传感器的动态压电系数， $R = 52\Omega$  为测试电阻， $A$  为 PVDF 的有效承载面积。动态压电系数由霍普金森压杆实验确定，实验共进行 6 组，实验的入射速度范围均在  $200 \sim 400\text{m/s}$  间，每组实验分别进行 6 次重复实验，通过对每组实验求平均值的方法得到实验工况下的动态压电系数为  $k = 21\text{pC/N}$ 。

### 2.2.2 输出电压测试系统

输出电压测试系统由外部电路、电压探头和示波器构成。图 4 为输出电压测试系统示意图。

如图 4 所示，用导电铜箔将压电陶瓷正负电极引出，由于示波器的量程有限，采用外部串联采压电阻的测试电路。通过对采压电阻两端的电压值确定电路中的电流，进而反推作为电源的压电陶瓷两极间的电压输出。试验

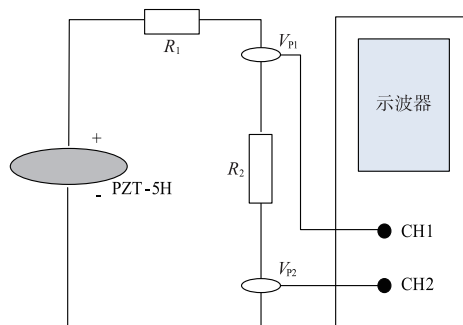


图4 输出电压测试系统示意图

中分压电阻  $R_1 = 47\text{k}\Omega$ ，采压电阻  $R_2 = 52\Omega$ 。电压探头  $V_{p1}$ 、 $V_{p2}$  分别测量采压电阻  $R_2$  两端的对地电压，将采集到的电压信号输入示波器 CH1、CH2 两个通道。通过对 CH1 和 CH2 两通道的数据作差可得到采压电阻两端的电压历程，进而确定压电陶瓷两极间的输出电压历程。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 碰撞后靶板的形貌分析

图 5 为实验 1 碰撞后靶板的形貌。

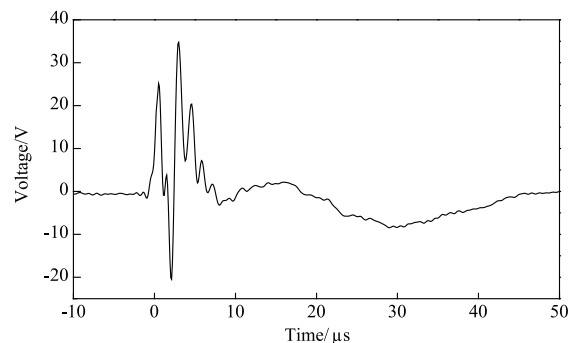


图5 撞击后靶板的形貌

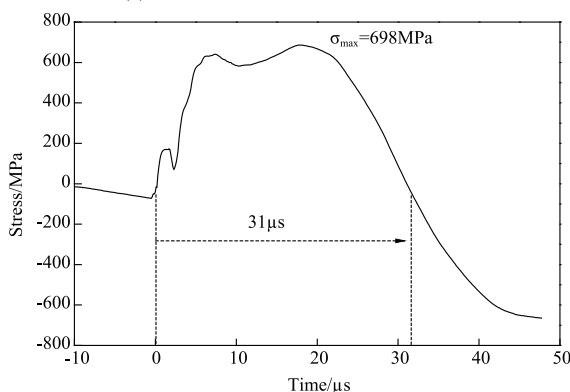
由图 5 可以看出，碰撞后前基板出现了明显的弹型凹陷，压电陶瓷及有机玻璃后基板呈网状粉碎。该现象可作如下解释：就 Al 合金、碳钢、PZT-5H 和有机玻璃而言，其波阻抗的关系为：碳钢  $>$  PZT-5H  $>$  Al 合金  $>$  有机玻璃。在碰撞过程中，铝弹丸首先与碳钢片接触，产生的应力波由疏介质铝合金进入密介质钢片，在碳钢片内产生强的透射波将其破坏并形成弹型凹陷；由于压电陶瓷为致密的软质颗粒状物质，入射的应力波在压电陶瓷内发生耗散并向周围扩散将压电陶瓷在稀疏波的作用下撕裂；此外，在应力波作用的极短时间内，压电陶瓷尚完好，应力波由密介质压电陶瓷进入疏介质有机玻璃时，在界面上产生强的反射波再次加载压电陶瓷；应力波在传播中的剩余能量在有机玻璃与后方铝柱间继续传播，将有机玻璃完全粉碎。

### 3.2 典型碰撞参数下压电陶瓷的应力分析

以实验 1 和实验 2 为例，讨论相近碰撞速度条件下不同后基板材料对压电陶瓷冲击压力的影响规律。图 6、图 7 分别为 2 组实验中 PVDF 的电压输出及经 Matlab 软件编程处理得到的应力历程曲线。



(a) PVDF 的电压输出随时间的变化关系曲线



(b) 应力随时间的变化关系曲线

图6 实验1中 PVDF 的压电输出电压及应力时程曲线  
(撞击速度为313m/s)

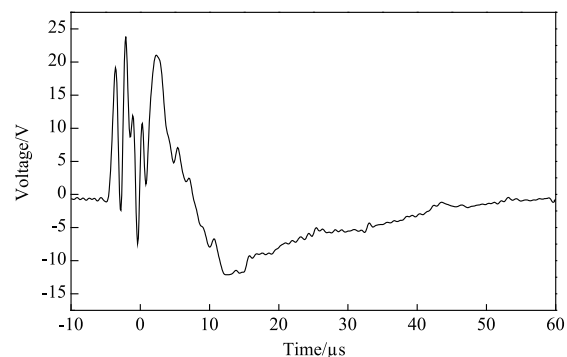
高速碰撞时,固体中产生的应力波的传播计算十分复杂,由于实验中压电陶瓷复合结构靶内不同材料的界面较多,精确计算压电陶瓷感知的冲击压力较为困难.为分析应力波传播规律,将复合结构简化为简单的模型,不考虑应力波的横向效应,忽略绝缘纸界面及 PVDF 界面对应力波传播的影响,仅对碰撞产生的弹性波进行定量计算.弹靶作用的简化结构模型如图 8 所示.

基于应力波传播理论<sup>[10]</sup>,弹体以速度  $V$  垂直碰撞前基板,应力波在接触界面①处发生反射和透射,由于弹体垂直作用于压电陶瓷复合结构,反射波和透射波均沿弹体与靶板作用的轴线传播.根据平面波的基本方程,波阵面上的垂直应力为

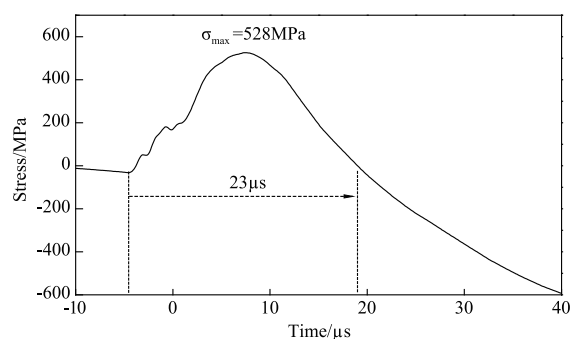
$$\sigma_z = \rho_0 D u \quad (2)$$

其中,  $\rho_0$  为材料的初始密度,  $D$  为应力波波阵面的速度,  $u$  为被扰动介质的质点速度.在计算中,不考虑碰撞造成的材料密度变化.

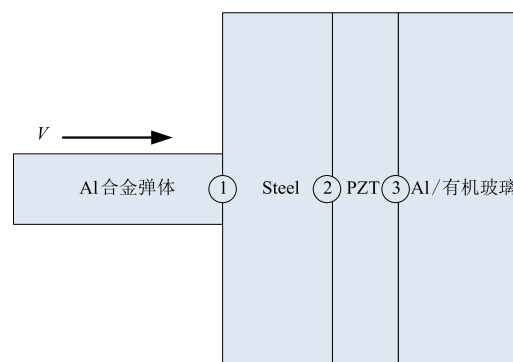
在接触界面①处,将弹体与前基板接触的界面视为变截面.设碰撞后接触面质点速度为  $v_m$ ,由于前基板的质点初始速度为 0,在欧拉坐标系中,弹体与压电陶瓷前基板接触的变截面处质点经过固定坐标的速度分别为



(a) PVDF 的电压输出随时间的变化关系曲线



(b) 应力随时间的变化关系曲线

图7 实验2 PVDF 的压电输出电压及应力时程曲线  
(撞击速度为326m/s)

注: ①表示弹丸与前基板之间的接触界面; ②表示前基板与PZT之间的接触界面; ③表示PZT与后基板之间的接触界面

图8 弹靶作用的简化结构模型

$$u_1 = V - v_m \quad (3)$$

$$u_2 = v_m \quad (4)$$

基于弹性波在变截面中的传播规律,应力波传播过程在变截面位置处接触面质点速度相同和互为作用与反作用的性质,得出

$$(\rho_0 D)_1 u_1 A_1 = (\rho_0 D)_2 u_2 A_2 \quad (5)$$

其中:  $A_1 = 184 \text{mm}^2$  为弹体的横截面积,  $A_2 = 1256 \text{mm}^2$  为前基板的横截面积.在冲击载荷作用下且在一定压力范围内所产生的应力波波速与波后质点速度之间服从线性函数关系.根据  $D-u$  平面内的雨果尼奥方程有

$$D = a + bu \quad (6)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为实验确定的常数. 将式(3)、式(4)和式(6)代入式(5)可得

$$\begin{aligned} & \rho_{01} [a_1 + b_1(V - v_m)](V - v_m)A_1 \\ & = \rho_{02}(a_2 + b_2v_m)v_mA_2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $\rho_{01}$  为弹体材料的初始密度,  $a_1$ 、 $b_1$  为弹体材料的实验常数.  $\rho_{02}$  为前基板材料的初始密度,  $a_2$ 、 $b_2$  为前基板材料的实验常数. 求解方程(7)可得到弹体与前基板接触面处的质点速度  $v_m$ . 则碰撞时前基板的应力  $\sigma_1$  为

$$\sigma_1 = \rho_{02}(a_2 + b_2v_m)v_m \quad (8)$$

根据弹性波在不同介质界面处的透射规律可知, 在接触界面②处, 作用于压电陶瓷的应力  $\sigma_2$  为

$$\sigma_2 = T\sigma_1 \quad (9)$$

其中:  $T = 2/(1 + n_1)$  为透射系数,  $n_1 = (\rho_0C_0)_2/(\rho_0C_0)_3$ ,  $(\rho_0C_0)_2$  为前基板材料的波阻抗;  $(\rho_0C_0)_3$  为压电陶瓷的波阻抗. 由压电陶瓷向后基板传播的应力波峰值为  $\sigma_2$ , 到达接触界面③时, 向压电陶瓷中反射回一系列应力波, 设该列应力波的峰值为  $\sigma_3$ , 则

$$\sigma_3 = F\sigma_2 \quad (10)$$

其中:  $F = (1 - n_2)/(1 + n_2)$  为反射系数,  $n_2 = (\rho_0C_0)_3/(\rho_0C_0)_4$ ,  $(\rho_0C_0)_4$  为后基板材料的波阻抗. 根据弹性波叠加原理, 两波相遇后相互叠加的应力峰值为  $\sigma_4$

$$\sigma_4 = \sigma_3 + \sigma_2 \quad (11)$$

$\sigma_4$  即为压电陶瓷中冲击压力峰值. 材料的相关参数如表 1 所示.

基于上述计算关系式, 对实验 1、2 分别进行应力波峰值的近似计算, 计算结果如表 2 所示.

表 1 材料参数

材料	实验常数		$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_0$ (m/s)	$\rho_0C_0$ (kg/s · m <sup>2</sup> )
	$a$ (m/s)	$b$			
45#碳钢	3574	1.92	7850	5900	$4.63 \times 10^7$
铝合金	5250	1.40	2700	6300	$1.70 \times 10^7$
有机玻璃	2430	1.58	1180	3080	$0.36 \times 10^7$
PZT-5H			7500	4560	$3.42 \times 10^7$

表 2 冲击压力计算结果与实验结果的比较

实验编号	碰撞速度 $V$ (m/s)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_4$ (MPa)	PVDF 测量的压力峰值 (MPa)	误差百分率
NO.1	313	653	555	449	1004	698	31%
NO.2	326	682	580	195	775	528	32%

冲击波的衰减不能简单视为头波单独与界面之间的相互作用, 这种相互作用完全由事件的规模决定, 取决于层状材料中各层的相对厚度以及它们与初始脉冲宽度的关系. 在理论计算中忽略了绝缘纸、PVDF 的厚

度及界面对应力波传播的影响, 因此基于应力波的传播关系计算压电陶瓷在接触面处的冲击压力与 PVDF 测得的实际冲击压力存在约 30% 的误差且理论计算值高于实验测量值.

由图 6、图 7 可以看出, 碰撞速度相近时, 在有机玻璃作为后基板的压电陶瓷复合结构中作用于压电陶瓷的冲击压力峰值为 698 MPa, 应力波持续时间为 31  $\mu$ s; 在铝合金片作为后基板时作用于压电陶瓷的冲击压力峰值为 528 MPa, 应力波持续时间为 23  $\mu$ s. 由实验结果可以看出, 后基板材料对作用于压电陶瓷产生冲击波的波形特征影响显著, 与铝合金后基板相比, 采用有机玻璃作为后基板更有利于提高压电陶瓷冲击压力峰值同时延长了应力脉冲的持续时间. 主要是由于有机玻璃的波阻抗小于铝合金的波阻抗, 应力波在压电陶瓷与后基板界面上发生反射时, 有机玻璃的反射系数大于铝合金片的反射系数, 因此导致实验 1 中由压电陶瓷与后基板界面返回的反射波  $\sigma_{31}$  大于实验 2 中由压电陶瓷与后基板界面返回的反射波  $\sigma_{32}$ .

### 3.3 典型冲击压力下压电陶瓷电压输出特性分析

当压电陶瓷受到沿极化方向的外力作用时, 会释放极化时吸附的电荷, 当电路中有电阻等负载存在时, 自由电荷会通过负载释放. 压电陶瓷工作在线性区时, 压电特性方程为

$$Q = d_{33}F \quad (12)$$

其中:  $Q$  为释放的电荷量,  $d_{33}$  为压电应变常数,  $F$  为受到的压力. 由于压电陶瓷可视为电容, 所以有  $Q = CU$ , 其中  $U$  为输出电压,  $C$  为压电陶瓷的电容. 由于  $C = \epsilon_0\epsilon A/h$ , 得

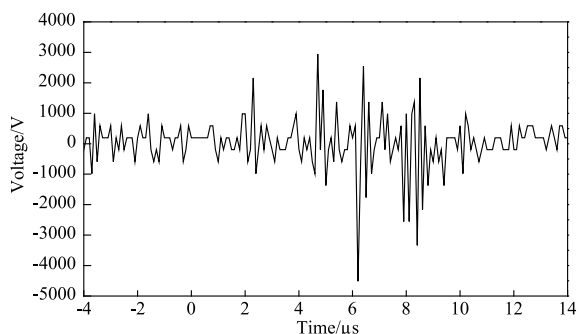
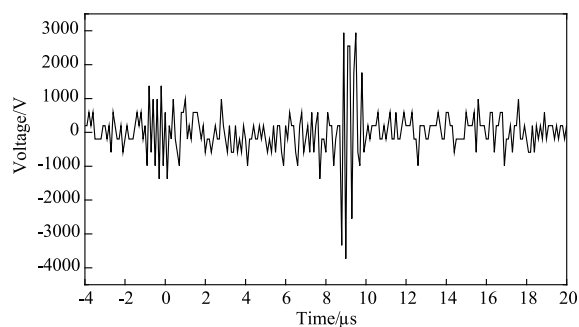
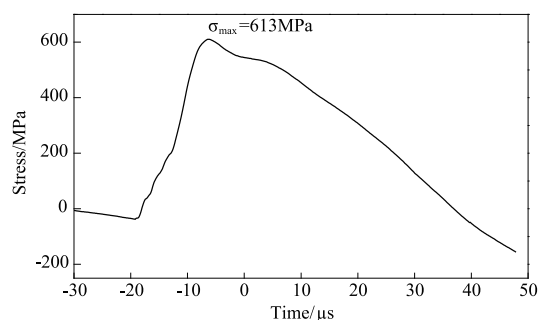
$$U = \frac{Qh}{\epsilon_0\epsilon A} \quad (13)$$

式中:  $\epsilon$  为介质的相对介电常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $A$  为压电陶瓷的面积,  $h$  为压电陶瓷的厚度. 将式(12)代入式(13)得

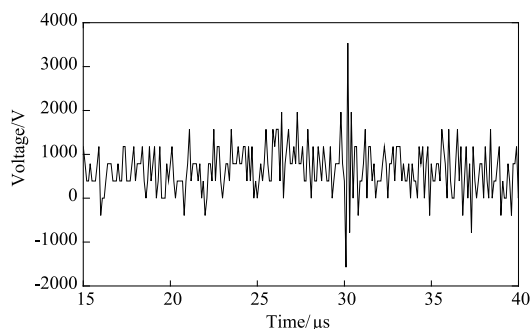
$$U = P \cdot h \cdot g_{33} \quad (14)$$

式中:  $P = F/A$  为压电陶瓷的作用压力,  $g_{33} = d_{33}/\epsilon_0\epsilon$  为压电电压常数. 由式(14)可以看出, 压电陶瓷的电压输出与陶瓷的压电电压常数、厚度及所作用的冲击压力有关, 与电容无关. 实验选用 PZT-5H 压电陶瓷, 其压电电压常数  $g_{33} = 19.7 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m}/\text{N}$ , 厚度  $h = 0.4 \text{ mm}$ . 由式(14)结合实验所得到的冲击压力峰值可以求出不同实验条件下压电陶瓷的理论输出电压峰值.

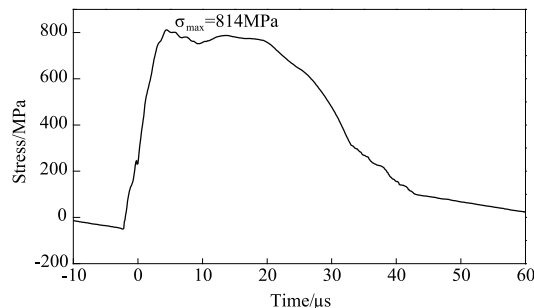
图 9、图 10 分别为实验 1、2 中的电压输出时程; 图 11、图 12 分别为实验 3、4 中压电陶瓷的冲击压力时程及对应的电压输出时程.

图9 实验1中的电压输出时程曲线( $V=313\text{m/s}$ )图10 实验2中的电压输出时程曲线( $V=326\text{m/s}$ )

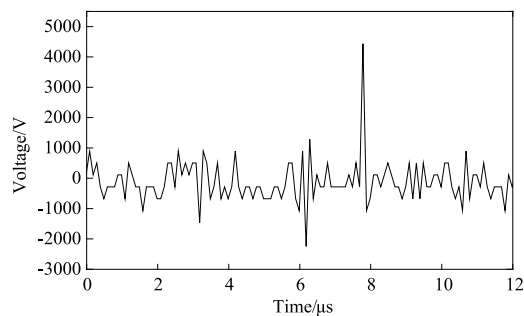
(a) 应力随时间的变化关系曲线



(b) 电压输出随时间的变化关系曲线

图11 实验3中冲击压力及压电陶瓷的电压输出时程曲线( $V=379\text{m/s}$ )

(a) 应力随时间的变化关系曲线



(b) 电压输出随时间的变化关系曲线

图12 实验4中冲击压力及压电陶瓷的电压输出时程曲线( $V=397\text{m/s}$ )

将电压输出脉冲峰值的理论计算结果与实验测量结果进行对比,比较结果如表3所示。

表3 冲击试验参数及电压输出结果

实验编号	碰撞速度 $V / \text{m/s}$	冲击压力 峰值/MPa	理论计算电 压输出峰值 $V_t / \text{Volt}$	实验测量电 压输出峰值 $V_s / \text{Volt}$	电压输出 峰值的误 差百分率
NO.1	313	698	5500	4505	18%
NO.2	326	528	4160	2908	30%
NO.3	379	613	4830	3534	27%
NO.4	397	814	6414	4516	30%

由于实验所用采压电阻的阻值远小于分压电阻的阻值,测量结果中噪声被放大,但实验结果仍然可以得出定性结论:当电路中的负载电阻( $R_{\text{总}} = 47052\Omega$ )较大

且PZT-5H压电陶瓷受到压力峰值为几百兆帕的强冲击波作用时,可产生数千伏的高电压脉冲。

冲击波在不同介质中发生反射与透射时,压电陶瓷的两极受到压缩波和稀疏波的交替作用,输出电压脉冲呈正负交替。对比分析图9和图12(b)、图10和图11(b),正如式(14)所揭示的:压电陶瓷的负载电阻较大时,输出电压峰值随着冲击压力峰值的增加而增大,但两者并非呈线性关系。此外,通过对实验结果的分析表明,弹体碰撞速度相近时,以有机玻璃作为后基板的复合结构比以铝合金作为后基板的复合结构中压电陶瓷应力波峰值大、应力脉冲持续时间长,导致前者输出电压脉冲峰值更大。

表3中压电陶瓷输出电压脉冲峰值实验结果与理论计算结果存在约30%的误差,除测量误差外,其可能

的原因如下:首先,实验碰撞过程中,由于弹体与压电陶瓷直径不同,压电陶瓷的受力不均匀,边缘部分实际受到的冲击压力小于中心弹体作用位置的冲击压力值,而理论计算中认为变截面位置处受到的压力是均匀分布的,导致电压输出脉冲峰值小于理论计算值。其次,理论模型的成立基于压电陶瓷工作在线性区内,实际实验中可能有部分压电陶瓷在碰撞瞬间完全去极化,此时理论模型存在较大偏差。最后,由于碰撞速度较大,靶板被破坏瞬间可能存在漏电现象。

#### 4 结论

本文通过一级轻气炮加载系统,利用自行构建的冲击压力测试系统和输出电压测试系统,开展了强冲击产生的应力波在压电陶瓷复合结构中的传播规律及压电陶瓷电压输出特性研究。通过对应力波在复合结构靶中的传播及电压输出特性的分析,得出如下结论:

(1) 冲击压力峰值和输出电压峰值的理论计算结果与实验结果均基本吻合;

(2) 碰撞速度接近时,后基板材料对作用于压电陶瓷的冲击波特征影响明显:与铝合金作为后基板相比,以有机玻璃作为后基板时压电陶瓷应力脉冲峰值较大且持续时间较长;

(3) 压电陶瓷在几十微秒内受到压力峰值为几百兆帕的强冲击波作用时产生数千伏的高电压脉冲,且由于压缩波与稀疏波的交替作用,导致电压呈正/负电压脉冲的形式输出;

(4) 弹体碰撞速度相近时,压电陶瓷的电压输出峰值随冲击压力峰值的增加而增大,且两者呈非线性关系。

#### 参考文献

- [1] Neilson F W. Ferromagnetic and Ferroelectric One-Shot Explosive-Electric Transducers[R]. TID-4500,1956.
- [2] Mock W Jr, Holt W H. Analysis of the ideal response of shock-depoled ferroelectric ceramics [J]. Ferroelectrics, 1980,23(1):39-46.
- [3] Hart E J. Power Supply[P]. US Patent 3985078,1976-10-12.
- [4] Oberlin. One-Short High-Output Piezoid Power Supply [P]. US Patent 6198205,2001.
- [5] 李映平,赖百坛,陈荷娟,等.一种新型的可蓄能压电电源原理研究[J].兵工学报,2004,25(4):421-423.  
LI Yingping, LAI Baitan, CHEN Hejuan, et al. A study on the principle of a new energy piezoelectric power supply [J]. Acta Armamentarii,2004,25(4):421-423. (in Chinese)
- [6] 陈荷娟,孙加存.高能多层压电陶瓷电源设计[J].弹道学报,2003,15(4):82-86.  
CHEN Hejuan, SUN Jiacun. Design of the high-output multilayer piezoid power supply [J]. Journal of Ballistics, 2003,15(4):82-86. (in Chinese)
- [7] Seungmoon Han, Chang-Su Huh. Study of high-voltage impulse generation using piezoelectric materials under elastic wave[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2016,44(8):1429-1434.
- [8] 黎辉,高敏.基于压电陶瓷的引信物理电源的建模与设计[J].功能材料,2011,48(S2):292-295.  
LI Hui, GAO Min. Model building and design of fuze physical power supply based on piezoelectric ceramic [J]. Journal of Functional Materials,2011,48(S2):292-295. (in Chinese)
- [9] 唐恩凌,施晓涵,王猛,等.高速碰撞下圆柱壳自由梁的穿孔特性[J].爆炸与冲击,2016,36(1):121-128.  
TANG Enling, SHI Xiaohan, WANG Meng, et al. Perforation characteristic of cylindrical shell free beam under high-speed impact [J]. Explosion and Shock Waves,2016,36(1):121-128. (in Chinese)
- [10] 张庆明.材料的动力学行为[M].北京:国防工业出版社,2006.  
ZHANG Qingming. Dynamic Behavior of Materials[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press,2006. (in Chinese)

#### 作者简介



王睿智 男,1992年出生于安徽,2015年毕业于沈阳理工大学攻读硕士学位,现为硕士研究生,主要从事高速撞击下压电陶瓷的应力波传播和电输出特性方面的研究工作。  
E-mail:13195667136@163.com



相升海 男,1960年出生,博士,教授、硕士生导师。主要从事强动载下材料的电磁效应和闪光效应、压电陶瓷的压电效应等领域研究。  
E-mail:13624036601@139.com



唐恩凌(通讯作者) 男,1971年出生,博士,教授,南京理工大学博士生导师。主要从事强动载下材料及结构的力电效应、激光加载及测试技术等领域研究。  
E-mail:tangenling@126.com