高速撞击压电陶瓷过程中储能电容 对电输出特性的影响研究

唐恩凌, 王利, 王睿智, 韩雅菲, 林晓初, 高国文, 贺丽萍, 相升海, 王猛

(沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘 要:为了揭示 PZT-5H 压电陶瓷电源复合结构在高速撞击载荷下电源外部电路中储能电容对输入电压、输入能量的影响规律,利用自行构建的一级轻气炮加载系统、电源外部电路及电输出测试系统,分别开展了长径比为 1:1 的柱状弹丸在相近碰撞速度、不同储能电容容量条件下高速撞击单片和多片压电陶瓷复合结构实验。实验结果表明:储能电容越大,压电陶瓷输出电压峰值越小、储能电容充电电压越小,存储能量值越小;随着储能电容量与压电电容量比率的增大,压电陶瓷的能量转换率减小;此外,储能电容的存储能量随压电陶瓷层数的增加而增大;压电陶瓷的电容与储能电容的匹配对储能电容的输入电压和储能电容的输入能量有较大影响。

关 键 词:PZT-5H 压电陶瓷电源;高速撞击;储能电容;电特性;实验设计

中图分类号:TJ430.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2018)05-0949-06

自 20 世纪 80 年代以来,美国、荷兰、西班牙及日本等国家相继开展了压电陶瓷的压电特性和压电电源的相关研究^[1-3]。1980 年,Mock 等^[4-5]利用落锤的加载手段撞击叠堆压电陶瓷,在电容负载上获得了输出电压为 81 kV 的脉冲电压。Hart^[6]利用炸药爆炸产生的冲击波驱动环形压电陶瓷器件,在电感负载上获得了 440 A 的峰值电流。1998 年,美国科学家 Kyrmis 等曾对压电发电装置电容储能电路进行了深入研究,并设计了一种专门为微电子设备供能的电容储能电路。1999 年,Oberlin^[7]在发明专利中提出了利用弹丸发射时产生的后坐力作用于压电陶瓷发电的压电式电源,该压电电源可为高速运动弹体中的电子元器件供电。2005 年,King 等^[8]利用聚偏氟乙烯(PVDF)压电材料的压电效应,通过实验研究了雨滴以不同的速度落在不同厚度的 PVDF 薄膜上所产生的电能特性。同年,Ericka 等^[9]进行了圆盘式压电振子发电性能的研究。Mateu 等^[10]对矩形和三角形悬臂梁结构压电振子进行了对比实验研究。2006 年,美国学者 Caroline

等^[11]设计了一种叠堆压电陶瓷的脉冲发电电源。2016 年,Seungmoon 等^[12]采用轻气炮加载弹丸低速撞击压电陶瓷,研究了弹性波作用下压电陶瓷的电输出特性,同年,Ren 等^[13]开展了 BiFeO₃ 铁电陶瓷在小机械载荷作用下的电转化率研究。2017 年,Chen 等^[14]开展了 MnO₂ 掺杂(Ba,Ca)TiO₃ 内部产生的偏压电场研究。然而,关于高速撞击载荷对 PZT-5H 压电陶瓷的电输出特性研究鲜见报道。本文围绕自供能技术为引信电桥点火、高过载微小型热电池的激活、运载火箭点火以及飞行器逃逸救生系统供电等弹药系统工程和航天领域的重大需求,为了更好地模拟自供能技术为引信电桥点火、高过载微小型热电池激活的真实工况,利用一级轻气炮加载技术和电性能输出的相关测试系统,开展了利用高速撞击压电陶瓷模拟弹药发射过程中的高过载膛压或者弹体与目标交汇过程中产生的高过载对压电陶瓷的作用而转化为电能中对储能电容的输入电压、输入能量的影响规律研究。

收稿日期:2017-09-09

基金项目:国家自然科学基金(11272218,11472178)与辽宁省兵器科学与技术重点实验室开放基金资助

作者简介:唐恩凌(1971—),沈阳理工大学教授、博士生导师,主要从事高速撞击压电效应及超高速碰撞的力电效应研究。

1 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 的柱状弹丸加速至 800 m/s。实验系统由加载系统、电源外电路系统和电输出性能测试系统 3 部分组成。加载系统由一级轻气炮及其测速系统组成;电源外电路系统由桥式电路和电容器组成;电输出测试系统由绝缘系统、电压探针、电流探针、负载电阻、开关和示波器系统组成。图 1 为实验系统图。

图 1 实验系统图

1.1 实验基本参数

实验中,直径为 15.3 mm 且长径比均为 1 : 1 的实心柱状铝合金弹丸垂直撞击复合结构靶,为增加密封性,弹体刻凹槽并嵌入密封胶圈。弹丸以不同的速度分别正撞击由 45# 碳钢圆片前基板、压电陶瓷圆片和有机玻璃圆片后基板组成并依次叠放的复合结构靶。其中前后基板几何尺寸均为 $\Phi 40\text{ mm}\times 2\text{ mm}$;前后基板与压电陶瓷的接触面用 10 μm 厚的绝缘纸绝缘;压电陶瓷圆片为 PZT-5H 材料,其几何尺寸为 $\Phi 40\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ 。表 1 为实验基本参数。

表 1 实验基本参数

实验 编号	撞击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	压电陶 瓷数	压电陶瓷 电容/ $C_0(\text{nF})$	储能电容 器 C_1 的 容量/ μF
1	351	1	83	0.1
2	355	1	90	0.47
3	350	1	85	1
4	347	1	89	3
5	343	1	91	10
6	344	2	177	0.47
7	351	2	181	0.1
8	339	3	287	0.47
9	346	3	279	1

图 2 为复合结构靶及夹具的实物图。

图 2 复合结构靶及夹具实物图

1.2 压电陶瓷电源及电输出测试系统

压电陶瓷电源由 PZT-5H 压电陶瓷、4 个高频二极管组成的全桥整流电路、不同电容值的电容以及外电路组成;电输出测试系统由电压探头、电流探头和示波器组成。图 3 为压电陶瓷电源和电输出测试系统电路图。利用导电铜箔将压电陶瓷片正负电极引出,外部串联有 4 个二极管组成的全桥电路且与储能电容并联,负载电阻 R_s 均为 120 Ω 。 C_p 为电流探头, V_{p1} 和 V_{p2} 均为电压探头。试验中电压、电流探头分别经同轴电缆输入示波器,通过示波器采集记录电压、电流脉冲时程。

图 3 压电陶瓷电源和电输出测试系统电路图

2 实验结果与分析

2.1 压电陶瓷输出特性分析

当压电晶体受到沿极化方向的外力作用时,由于正压电效应,在电极面上感应出电荷,电荷聚集在压电陶瓷的两侧并形成电势差。当作用有外力 F 时,压电材料出现变形,2 个极面间产生的电压为 V 。其值为

$$V = g_{33} \frac{l}{A} F$$

(1)

式中, g_{33} 为压电材料的压电电压常数,其值为 19.7 $\times 10^{-3}\text{ V}\cdot\text{m/N}$; l 为压电材料的厚度; A 为压电材料的极面面积。在 2 个极面间感应出的电荷量 Q 为

$$Q = VC \tag{2}$$

C 为压电材料的极间电容, $C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{A}{l}$ 。代入(2) 式得出

$$Q = \varepsilon \varepsilon_0 g_{33} F \tag{3}$$

式中, ε 为压电材料的介电常数,其值为 4 500; ε_0 为真空中的介电常数。图 4 为实验 1~5 中单片压电陶瓷的电压输出时程曲线。

图 4 实验 1~5 中单片压电陶瓷的电压输出时程曲线

由图 4 可以看出:在相近撞击条件下,由单片压电陶瓷构成电源的储能电容对电压输出有较大影响。随着电容容量的增加,电路中的电压输出减小且趋势较为明显。由图 4 还可以看出:随着储能电容的增加,压电陶瓷电源对电容的充电过程由近乎稳定充电向抖动充电的趋势变化,且电容容量越大,抖动的趋势越明显。

2.2 储能电容两端的电压分析

图 5 为压电陶瓷电源对储能电容的输入电压。

由图 5a)可知:在相近撞击条件下,由单片压电陶瓷构成的电源对电容两端的电压有较大影响。随着电容容量的增加,储能电容的输入电压明显减小,当储能电容为 10 μF 时,储能电容两端的电压降到了 5 V。由图 5b)还可以看出:在相近撞击条件下,储能电容均为 0.47 μF 时,由 2 层和 3 层压电陶瓷构成的电源,储能电容两端的电压上升并不明显,由 184 V 升至 190 V。对于由 2 层压电陶瓷构成的电源,电容分别为 0.1 μF 和 0.47 μF 时,储能电容两端的电压由 123 V 升为 184 V,进一步说明储能电容的容量对储能电容两端的电压有较大影响。对于由 3

图 5 压电陶瓷电源中储能电容两端的电压

层压电陶瓷构成的电容,电容分别为 0.47 μF 和 1 μF 时,储能电容两端的电压由 190 V 降至 148 V,说明储能电容为 1 μF 时,电容尚未饱和。由图 5 还可看出:对于单片压电陶瓷,在 15 μs 内将储能电容两端的输入电压达到稳定,然而,对于由 2 层压电陶瓷构成的电容,在 25 μs 内将储能电容两端的输入电压达到稳定,对于由 3 层压电陶瓷构成的电容,在 20 μs 内将储能电容两端的输入电压达到稳定。进一步说明,压电陶瓷电源的电容与储能电容容量的匹配关系对储能电容两端的电压和充电达到稳定需

要的时间影响较大。

2.3 储能电容的输入能量分析

压电陶瓷电源的输出能量计算关系式满足

$$E_1 = \frac{1}{2} (C_0 + C_1) V^2 \tag{4}$$

式中, E_1 为压电陶瓷电源的输出能量; C_0 为压电陶瓷电源的电容; C_1 为储能电容; V 为储能电容两端的电压。图 6 为压电陶瓷电源对储能电容的输入能量。

图 6 压电陶瓷电源对储能电容的输入能量

图 7 压电陶瓷片数与储能电容输入能量的关系

由图 7 可知:对于 0.1 μF , 0.47 μF 和 1 μF 的储能电容,储能电容的存储能量随压电陶瓷片数的增加而增大;就 0.1 μF 的存储电容而言,随压电陶瓷

片数的增加,其存储电容的能量增加显著。

2.4 能量转换率与储能电容的关系

表 2 为能量转换率与电容比率的关系。

表 2 能量转换率与电容比率的关系

实验编号	输出电压 峰值/V	实验计算输出 能量 E_1 /mJ	实验计算存储电容 器的存储能量 E_2 /mJ	能量转换率 (E_2/E_1)/%	电容比(C_1/C_0)
1	204	3.8	1.0	26.3	1.2
2	198	11.0	4.7	42.7	4.9
3	135	9.9	4.2	42.4	11.8
4	100	15.5	0.9	5.8	33.7
5	63	20.0	0.1	0.5	119.9
6	180	10.5	5.4	51.4	2.7
7	131	10.1	5.0	49.5	5.5
8	185	13.0	6.3	48.5	1.6
9	154	15.2	5.6	36.8	3.6

由表 2 可以看出,在本文给定的实验参数条件下,总体的能量转化率介于 26.3%~51.4%,只有储

能电容容量为 3 μF 和 10 μF 时,能量转化率较低。进一步说明电源电容与储能电容的匹配关系对能量

的转化具有重要影响。

3 结 论

本文利用一级轻气炮加载系统、电源外电路系统和电输出性能测试系统,开展了长径比为 1 : 1 的柱状铝弹丸以相近的撞击速度、不同储能电容的压电陶瓷复合结构实验。得出如下结论:

1) 储能电容越大,压电陶瓷输出电压峰值越

小、储能电容充电电压越小,存储能量值越小;

2) 随着储能电容量与压电电容量比率的增大,压电陶瓷的能量转换率减小;此外,储能电容的存储能量随压电陶瓷的层数的增加而增大;

3) 压电陶瓷的电容与储能电容的匹配对储能电容的输入电压和储能电容的输入能量有较大影响;在储能电容储能尚未饱和的条件下,压电陶瓷的电容与储能电容的匹配应满足二者的比率为 1 : 1。

参考文献:

- [1] Chen Shihnung, Wang Goujen, Chien Mingchun. Analytical Modeling of Piezoelectric Vibration-Induced Micro Power Generator [J]. Mechatronics, 2006, 16: 379-387
- [2] Allameh S M, Akogwu O, Collinson M, et al. Piezoelectric Generators for Biomedical and Dental Applications; Effects of Cyclic Loading[J]. Mater Sci; Mater Med, 2007, 18: 39-45
- [3] Choi W J, Jeon Y, Jeong J H, et al. Energy Harvesting MEMS Device Based on Thin Film Piezoelectric Cantilevers[J]. Electroceram, 2006, 17: 543-548
- [4] Neilson F W. Ferromagnetic and Ferroelectric One-Shot Explosive-Electric Transducers[R]. TID-4500, 1956
- [5] Mock W J, Holt W H. Analysis of the Ideal Response of Shock-Depoled Ferroelectric Ceramics[J]. Ferroelectrics, 1980, 23 (1): 39-46
- [6] Hart E J. Power Supply[P]. US Patent 3985078, 1976
- [7] Oberlin. One-Short High-Output Piezoid Power Supply[P]. US Patent 6198205, 2001
- [8] King Vanessa, Coelho Guigon J. Analytical Solution for Transient Temperature Field around a Cased and Cemented Wellbore [C]//Society of Petroleum Engineers, 2005
- [9] Ericka M, Vasic D, Costa F, et al. Energy Harvesting from Vibration Using a Piezoelectric Membrane[J]. Physique Coll, 2005,128: 187-193
- [10] Mateu I, Moll F. Optimum Piezoelectric Bending Beam Structures for Energy Harvesting Using Shoe Inserts[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16: 835-845
- [11] Caroline S P, Engel T G. Maximum Charge Generation in a Piezoelectric Generator. Power Modulator Symposium[C]//Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International, 2006
- [12] Seungmoon H, Chang-Su H. Study of High-Voltage Impulse Generation Using Piezoelectric Materials under Elastic Wave[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2016,44(8): 1429-1434
- [13] Ren X, Fan H, Zhao Y, et al. Investigation of MnO₂-Doped(Ba,Ca)TiO₃ Lead-Free Ceramics for High Power Piezoelectric Applications[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100(8): 3568-3576
- [14] Chen L, Fan H Q, Zhang S J. Flexible Lead-Free BiFeO₃/PDMS-Based Nanogenerator as Piezoelectric Energy Harvester[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(39): 26190-26197

Influence of the Storage Energy Capacitance on Their Electrical Output Characteristics of Piezoelectric Ceramic during the Process of High-Velocity Impact

Tang Enling, Wang Li, Wang Ruizhi, Han Yafei, Lin Xiaochu,

Gao Guowen, He Liping, Xiang Shenghai, Wang Meng

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

Abstract: In order to reveal influence of external capacitance on the voltage input and input energy provided by the PZT-5H piezoelectric ceramic composite structure under high-speed impact loading, experiments have been performed by using one-stage light gas gun loading system combining with a power supplier circuit and power output testing system, which the aspect ratio of 1:1 column projectile impact monolithic and multi-piece piezoelectric ceramic composite structure at the near impact velocity and different storage capacity. The experimental results show that the more larger storage capacitance is, the smaller the piezoelectric ceramic output voltage is. However, the smaller of the capacitor voltage is, the smaller the value of energy storage is; with the energy storage capacitance increasing, the piezoelectric capacitance ratio and the energy conversion rate of piezoelectric ceramics decreases; In addition, the storage energy capacitor increases with the increasing of the piezoelectric ceramic layers; the relationships of storage energy capacitor and piezoelectric ceramic capacitor has a great influence on the input voltage and storage energy for storage energy capacitor.

Keywords: PZT-5H piezoelectric ceramic power supplier; high-speed impact; storage energy capacitor; electrical characteristics; design of experiments