

文章编号: 1006-9941(2006)03-0224-03

雷管在密实介质中殉爆特性的实验研究

赵耀辉, 焦清介, 臧充光, 刘 帅

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 在硬纸板中进行了雷管的殉爆实验, 采用敏感部分面积只有 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 PVDF 传感器, 测量了雷管受冲击波作用时的冲击波参数。实验得出, 雷管在密实介质中受冲击波作用殉爆与否取决于冲击波压力峰值及峰值持续时间的大小, 并认为冲击波压力峰值是决定雷管殉爆与否的首要因素, 当冲击波压力峰值达 1.29 GPa 以上时, 雷管都发生殉爆, 而压力峰值降到 1.0 GPa 以后, 即使冲击波作用的时间较长, 雷管也未发生殉爆。雷管受冲击波作用而被殉爆时, 存在一个延滞期, 且延滞期随冲击波压力下降而增长。

关键词: 爆炸力学; 殉爆; 雷管; PVDF 传感器; 冲击波; 压力峰值

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引 言

雷管爆炸输出能力主要表现在三个方面: 冲击波、破片、热爆炸气体。一般来说, 雷管在惰性介质中被另一发雷管殉爆是由于冲击波的作用。冲击波是一种脉冲式的压缩波, 其主要参数是压力和持续时间^[1], 因此被发雷管的殉爆与否应当与其受到的冲击波的压力和持续时间两者有关, 是两方面共同作用的结果。到目前为止, 这方面的研究国内外鲜有报道, 为此, 本实验从实际的应用背景出发, 研究了冲击波参数对硬纸板中雷管殉爆产生的影响。

2 实验原理与装置

2.1 PVDF 压电传感器测压原理

PVDF(聚偏二氟乙烯)压电传感器是利用材料在高压下的压电效应, 来测量雷管侧向输出的压力^[2]。当传感器受到的冲击载荷为 p 时, 其表面会产生电荷 Q 。已证明 p 和 Q 之间在 $0 \sim 20\text{ GPa}$ (或更大)的压力范围呈单值函数关系^[3]:

$$Q = f(p) = A \cdot K \cdot p \quad (1)$$

式中, $K = K(p)$ 为动态压电系数, A 为传感器敏感部分的面积。

PVDF 压电传感器的测试电路比较简单, 一般不需要电荷放大器之类的二次仪表, 这样提高了测试精度^[4]。本实验采用的测试电路为电荷模式(见图 1)。

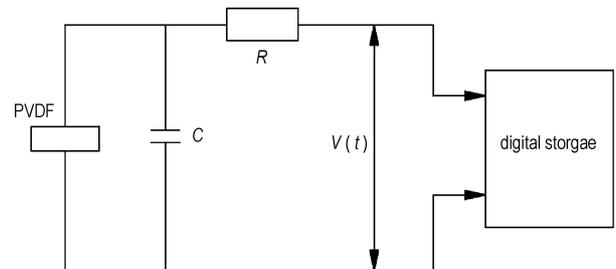


图 1 PVDF 传感器测量电路

Fig. 1 The measurement circuit of PVDF gauge

在实验中用示波器记录传感器的 $V(t)$, 则可得到 $Q(t)$:

$$Q(t) = CV(t) \quad (2)$$

式中, C 为并联在电路中的电容。

这样联立式(1)、(2), 再利用 PVDF 预先标定的动态压电系数 $K(p)$, 就可以得到冲击波的压力。

本实验中选用的 PVDF 压电传感器的敏感部分的面积为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 传感器厚度为 $0.13 \sim 0.15\text{ mm}$, 在激波管上标定的动态压电系数为^[3]:

$$K(p) = 17.6\text{ pC/N} \quad (3)$$

上式适用于低压范围, 在高压阶段采用轻气炮上得到的关系^[3]:

$$p = 0.8911Q + 0.4142Q^2 + 0.3505Q^3 \quad (4)$$

式中, p 的范围为 $0.46 \sim 6.64\text{ GPa}$, Q 单位为 $\mu\text{C} \cdot \text{cm}^2$ 。

2.2 实验装置

试验装置如图 2 所示。其中 1 为主爆雷管, 2 为被爆雷管, 所用的电雷管尺寸为 $\Phi 4.9\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 起爆药装药为羰铅 80 mg , 输出装药为泰安约 60 mg ; 纸板

收稿日期: 2005-10-13; 修回日期: 2005-12-06

作者简介: 赵耀辉(1979-), 男, 在读硕士研究生, 从事火工品防殉爆安全方面研究。e-mail: yaohui_2006@bit.edu.cn

焦清介, 男, 教授, 博士生导师, 从事武器系统安全技术、火工品技术等方面的研究。

中开孔孔径为 5.1 mm,稍大于雷管外径;孔深12 mm,高于雷管的高度。安装传感器时需保证传感器的敏感中心与雷管输出装药中心在同一水平线上。然后往孔中注入适量的 914 胶,以消除 PVDF 传感器与雷管外壳以及硬纸板壁面的空气隙。实验所用仪器为 TDS7000 示波器,带宽为 1 GHz,采样速率为 $20 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$,记录长度为 32 MB。测试中两雷管之间硬纸板的厚度分别为 2,4,5,6,8 mm,每个位置重复测量三次。

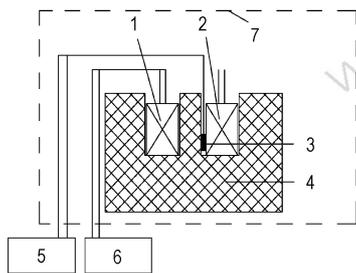


图 2 雷管殉爆实验装置示意图

1,2—雷管,3—PVDF 传感器,4—硬纸板,
5—接示波器,6—接恒流源,7—防爆器

Fig.2 Experimental set-up sketch of sympathetic detonation

1,2—detonator, 3—PVDF gauge, 4—chipboard,
5—to oscilloscope, 6—to invariable current, 7—flameproof container

3 结果与讨论

雷管殉爆时由示波器记录的典型波形如图 3 所示,从图 3 中可以看到,曲线前端有较陡的上升沿以及 $1.2 \mu\text{s}$ 的平台阶段,这个阶段就是雷管壳壁面受到冲击波作用至雷管发生殉爆前的一个过程。这个过程伴随着雷管外壳因冲击波作用而受压变形,以及雷管装药接受冲击波能量,导致装药中气泡吸热而膨胀的物理变化。经过平台阶段后,在极短的时间内压力达到 20 GPa 左右,而这个阶段表明雷管装药发生快速化学反应以至于达到爆轰使雷管壳膨胀、破裂。此时传感器也被雷管壳破片击坏,表现在 $p-t$ 曲线上是压力在峰值以后很快下降为零。

雷管受到冲击波的作用而未发生殉爆时,示波器记录的典型波形图如图 4 所示,在图 4 中电压最高处对应的压力也不到 0.2 GPa,由此得知雷管并未殉爆。在图中,由于时间轴上所取的单位较大($20 \mu\text{s}$),所以雷管受到主发雷管爆炸产生的冲击波作用的阶段表现的不很明显,根据实验中的记录(见表 1),我们可对图中的曲线做出如下分析:雷管受到冲击波的作用,压力开始上升,当冲击波压力达峰值时出现平台阶段,这是冲

击波的能量被雷管中的装药所吸收的原因。但由于冲击波的能量不大(压力峰值很低),不足以使雷管中的装药发生化学反应,只是装药中的气泡由于热的作用而发生膨胀,进而引起雷管壳的膨胀,所以表现在 $p-t$ 曲线上是,压力经过平台阶段后又开始上升,但这已经不是主爆雷管爆炸产生的冲击波对殉爆雷管的作用了。

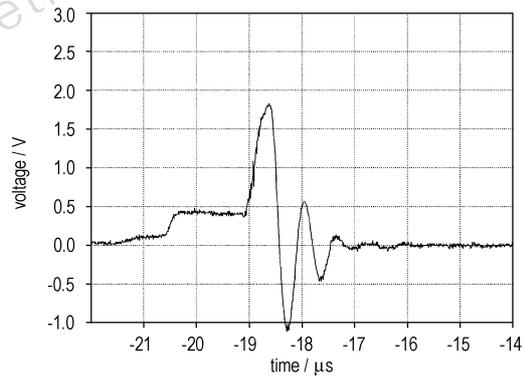


图 3 硬纸板厚度为 4 mm 雷管殉爆时的典型波形

Fig.3 Typical waveform of sympathetic explosion for detonator with the chipboard thickness of 4 mm

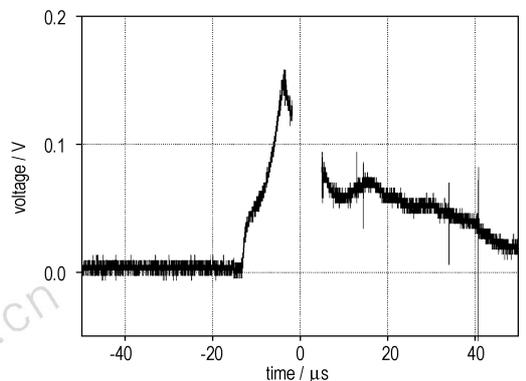


图 4 硬纸板厚度为 8 mm 时雷管未殉爆时的波形图

Fig.4 Typical waveform of unsympathetic explosion for detonator with the chipboard thickness of 8 mm

表 1 给出了雷管受到的冲击波压力峰值、压力峰值持续时间 τ_1 以及冲击波作用在雷管上总的时间 τ_2 ,从表中数据可以看出,硬纸板厚度在 2 mm 时,雷管受到的冲击波压力达 4.29 GPa 以上,这时冲击波只需作用 $0.5 \mu\text{s}$ 就可使雷管殉爆。随着硬纸板厚度的增加,冲击波压力峰值下降很快,当硬纸板厚度达 5 mm 时,冲击波压力峰值降到 1.49 GPa 以下,同时压力峰值持续时间明显增加,这时雷管也可以被殉爆。当硬纸板厚度达 6 mm 以上时,冲击波压力峰值很快降低到 1.0 GPa 以下,峰值也有一定的持续时间,虽然冲击波对雷管作用总的时间较长(几乎达 $3.2 \mu\text{s}$ 以上),但雷

管未发生殉爆。由此可知,在本文设计的雷管殉爆实验条件下,在侧向受到冲击波作用时,雷管殉爆与否起决定作用的是冲击波峰压力值及峰值持续时间的大小,且冲击波压力峰值是两者中的首要决定因素。另外,从雷管在受冲击波作用而被殉爆的情况来看,有一个延滞期的现象存在,且延滞期随冲击波压力下降而增长。文献[4]认为,炸药受冲击波作用被起爆,在 $2.5 \mu\text{s}$ 内冲击波压力才是有效的,本实验中雷管被殉爆时冲击波作用时间最长的为 $3.5 \mu\text{s}$,这是因为冲击波首先到达雷管壳壁面,经过一个自由反射的过程后,装药才会受到冲击波的作用,因此测得的时间稍长一些。

表1 在不同厚度硬纸板雷管受到冲击波作用时的冲击波参数

Table 1 The parameters of shock wave acting on detonator with different chipboard thickness

| chipboard thickness /mm | sympathetic explosion | shock wave | | |
|-------------------------|-----------------------|------------------------------|--|---|
| | | shock wave peak pressure/GPa | shock wave peak duration (τ_1)/ μs | shock wave duration (τ_2)/ μs |
| 2 | √ | 5.42 | 0.3 | 0.5 |
| 2 | √ | 4.29 | 0.3 | 0.5 |
| 4 | √ | 2.41 | 0.8 | 1.0 |
| 4 | √ | 2.09 | 1.2 | 1.5 |
| 4 | √ | 1.61 | 2.7 | 3.0 |
| 5 | √ | 1.49 | 3.0 | 3.5 |
| 5 | √ | 1.29 | 2.0 | 3.0 |
| 5 | × | 0.60 | 1.5 | 1.0 |
| 6 | × | 0.75 | 1.8 | 5.0 |
| 6 | × | 0.58 | 2.5 | 3.2 |
| 6 | × | 0.62 | 2.0 | 5.0 |
| 8 | × | 0.129 | 2.0 | 3.5 |
| 8 | × | 0.107 | 3.0 | 4.0 |
| 8 | × | 0.107 | 3.5 | 5.0 |

4 结论

(1) 雷管在密实介质中受冲击波作用殉爆与否,取决于冲击波压力峰值及峰值持续时间,而冲击波压力峰值更是两者中的首要决定因素。当冲击波峰值压力达 1.29 GPa 以上时,都可使雷管发生殉爆,而压力峰值降低到 1.0 GPa 后,即使冲击波作用的时间较长,雷管也未殉爆。

(2) 雷管在密实介质中受冲击波作用而被殉爆时,存在一个延滞期,且延滞期随冲击波压力下降而增长。

参考文献:

- [1] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社,1999. CAI Rui-jiao. The Principle of Initiators and Pyrotechnics Design[M]. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology,1999.
- [2] 王凯民. 传爆序列界面能量传递技术研究[D]. 北京: 北京理工大学,2002. WANG Kai-min. The study on the explosion energy transfer technology in explosion trains[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2002.
- [3] 李焰,王凯民,谭红梅,等. PVDF应力计在起爆试验研究中的应用[J]. 火工品,2003,(3): 6-10. LI Yan,WANG Kai-min,TAN Hong-mei, et al. PVDF stress gauge and its application in research of long-tube shock initiation[J]. *Initiators and Pyrotechnics*,2003,(3): 6-10.
- [4] 刘剑飞,胡时胜. PVDF压电计在低阻抗介质动态力学性能测试中的应用[J]. 爆炸与冲击,1999,19(3): 229-234. LIU Jian-fei,HU Shi-sheng. Application of PVDF gauges to determine dynamic mechanical behavior of low wave impedance material[J]. *Explosion and Shock Waves*,1999,19(3): 229-234.
- [5] 郭崇星. 隔板起爆器传爆特性研究及匹配设计[D]. 北京: 北京理工大学,2002. GUO Chong-xing. The study and match design on the propagation of detonation characteristics of through bulkhead initiator[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2002.

Characteristics of Detonator Sympathetic Explosion in Densified Medium

ZHAO Yao-hui, JIAO Qing-jie, ZANG Chong-guang, LIU Shuai

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Sympathetic explosion of detonators in chipboard was studied. The parameters of shock wave acting on detonator were measured by PVDF gauge with sensing position area $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. The results show that the sympathetic explosion of detonator depends on both the shock pressure peak and its duration, and the shock pressure peak is the chief factor. When the shock pressure peak exceeded 1.29 GPa , the sympathetic explosion happened. But when it fell to 1.0 GPa , the sympathetic explosion was not observed even the shock wave had a longer duration. The delay time was observed in sympathetic explosion of detonators, moreover, the delay time increased with the decreasing of shock wave pressure.

Key words: explosion mechanics; sympathetic explosion; detonator; PVDF gauge; shock wave; pressure peak