

文章编号: 1003-1480 (2003) 03-0006-05

PVDF 应力计在起爆试验 研究中的应用

李焰¹, 王凯民², 谭红梅¹, 严楠²

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安, 710024; 2. 北京理工大学机电工程学院, 北京, 100081)

摘 要: 自制了 2mm×2mm 的 PVDF 应力计, 给出了动态测试技术和动态标定曲线, 并对传爆序列长通道起爆传爆试验中的压力波形进行了测量, 对测量结果进行了定性分析。文章还指出了 PVDF 应力计测试中的若干注意事项。

关键词: PVDF; 压电薄膜; 传爆序列; 长通道; 冲击波

中图分类号: TJ450.6 **文献标识码:** A

PVDF Stress Gauge and Its Application in Research of Long-tube Shock Initiation

LI Yan¹, WANG Kai-min², TAN Hong-mei¹, YAN Nan²

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: PVDF stress gauge has been made. The dynamic measurement technology and calibration curve has been given. Measurement for pressure wave profile in the experiment research of long-tube shock initiation has been made. Test results and qualitative analysis were given. Points for attention in the measurement of PVDF have been put forward.

Key words: Polyvinylidene fluoride; Piezoelectric film; Explosive train; Long-tube; Shock wave

自从 1969 年 H. Kawai 发现 PVDF (Polyvinylidene fluoride) 薄膜经过拉伸和极化处理具有强压电特性以来, PVDF 压电薄膜在许多领域里都得到了很好的应用。在爆炸和冲击等动态测量领域, PVDF 应力计以其优良的性能, 如: 薄而柔软, 响应快, 测压范围大, 无源, 灵敏度高, 得到了众多研究者的关注。国外对 PVDF 应力计的研究已相当深入。早在十多年前, Bauer 解决了 PVDF 应力计生产的重复性问题后^[1], 就逐渐形成了 PVDF 应力计的标准和商业化的产品^[2], 并广泛应用于高速撞击、爆炸、高能束流辐照等动态测量领域。我国与国外相比, 在 PVDF 应力计的制作和

标定上还有相当的差距, 目前还没有形成标准化、商业化的产品, 在应用上也有待于进一步发展。

在雷管输出能力的动态测试中, 国内外的研究者用锰铜压阻法已经进行了大量的工作^[3]。但由于电源的同步性要求及难以降低的成本费等制约了该方法的推广应用。目前, 还广泛采用铅板试验、钢块凹痕试验等定性、间接的方法测试雷管的输出能力。寻找一种准确、方便、经济的动态测试方法十分需要。PVDF 压电应力计这种新型的传感器, 在这方面是一个很好的选择。

收稿日期: 2003-03-13

作者简介: 李焰 (1969-), 男, 副研究员, 主要从事爆炸与冲击测试技术研究。

在长通道起爆传爆机理的实验研究中,小型雷管爆炸后的冲击波在几十到几百毫米的长通道里进行传播时,其压力可以从几个吉帕到几个兆帕范围内变化,一般的传感器很难完全满足这个范围内的压力测量。常用的锰铜计由于灵敏度低一般比较适合于测试输出压力在 2~19GPa 范围内的雷管爆压^[4]。PVDF 应力计在 0~20GPa 范围内都可以有很好的信号输出,而且可以做得很小,因而特别适合于测量雷管爆炸冲击波在长通道中的传播与衰减。

本文首先研究了 PVDF 应力计应用的基础性问题,即测试技术和动态标定等,然后在长通道起爆传爆机理的实验研究中进行了具体的测量应用。传爆序列是引信设计的核心内容之一。引信瞬发装定时,常使用首发针刺雷管通过较长距离的直通道完成对敏感继发针刺雷管的起爆,这种所谓的长通道起爆传爆技术在一些引信中已有应用,但相关的机理性研究报道却很少。这一技术的研究对新型引信传爆序列的设计或改进具有实际的指导意义。

1 PVDF 应力计测试技术

1.1 PVDF 应力计的制作和标定

采用锦州电子材料厂生产的 PVDF 压电薄膜(厚约 50μm,两面镀 2μm 厚的铝),自制了 PVDF 应力计,结构如图 1 所示。制成的应力计厚 0.13~0.15mm。敏感部分尺寸为 2mm×2mm,小于实验中的长通道尺寸(Φ3.2mm)。

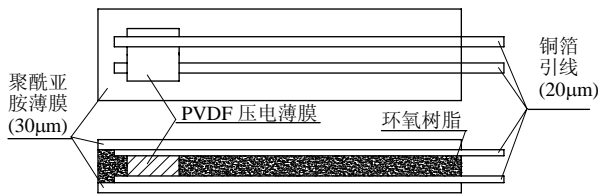


图 1 PVDF 应力计结构示意图

这种结构的 PVDF 应力计制作工艺较为简单。由于敏感部分是由大片 PVDF 薄膜切割成的,因而制作成本可以大大下降。

对该 PVDF 应力计,采用轻气炮进行了标定,用最小二乘法拟合成多项式形式如下:

$$P=0.891 1q+0.414 2q^2+0.350 5q^3 \quad (1)$$

式中 P 的范围: 0.46~6.64GPa。单位: P 为 GPa, q

为 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。

1.2 PVDF 应力计的测试技术

PVDF 应力计受到冲击载荷 P 时,其表面会产生电荷 Q 。已证明 P 和 Q 之间在 0~20GPa(或更大)的压力范围呈单值函数关系:

$$Q = f(P) = A \cdot K \cdot P \quad (2)$$

式中, $K=K(P)$ 为动态压电系数, A 为应力计敏感部分面积。

PVDF 应力计的测试电路一般有两种模式,即电流模式(图 2)和电荷模式(图 3)。

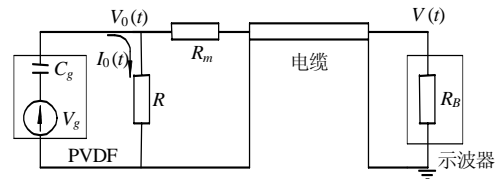


图 2 电流模式测量电路

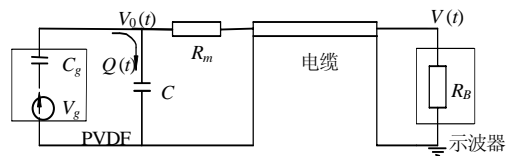


图 3 电荷模式测量电路

图 2 和图 3 中, PVDF 应力计等效为一个电压源与一个电容 C_g 的串联。在电流模式中,它产生的电荷通过与 PVDF 应力计并联的电阻 R 放电,而在电荷模式中,则是通过并联的电容 C 放电(短时期)。 R_m 为匹配电阻 ($R_m=50\Omega$ 或 $R_m+R=50\Omega$), 与特性阻抗为 50Ω 的电缆匹配, 以免在长电缆传输时引起波形振荡。设示波器输入电阻 $R_B=1M\Omega$, $R_B \gg R_m$, $R_B \gg R$, $C \gg C_g$, 则

$$Q(t) = \begin{cases} \int_0^t I(t') dt' = \int_0^t \frac{V(t')}{R} dt' & \text{电流模式} \\ CV(t) & \text{电荷模式} \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式和 (2) 式给出了 PVDF 应力计测量的原理。通过对 $V(t)$ 积分(电流模式)或直接计算(电荷模式), 即可以计算出相应的压力 $P(t)$ 。

这两种模式测量电路的时间响应常数为: 对电流模式电路, 有 $\tau_1 = (R+R_1)C_g$, 对电荷模式电路有 $\tau_2 = R_1C_g$ ($C \gg C_g$), (R_1 为 PVDF 应力计的引线电阻, 对镀膜型引线 $R_1 \approx 5 \sim 10 \Omega$, 对本文的金属箔型引线 $R_1 \approx 0.01 \sim 0.1 \Omega$)。一般 R 的取值范围为 $0.01 \sim 50 \Omega$ 。取 $C_g = 100 \text{pF}$, $R = 0.1$, $R_1 = 1 \Omega$, 则 $\tau_1 \approx \tau_2 \approx 0.1 \text{ns}$ 。即这两种电路的响应时间在同一量级, 约为 0.1ns 。

PVDF 应力计对应力波的响应时间为 $T = n(d/U_g)$ 。其中, d 为 PVDF 应力计的厚度, U_g 为应力波在 PVDF 应力计中的传播速度, n 为应力波在应力计中来回反射而达到应力平衡的次数。取 $d = 25 \mu\text{m}$, $U_g = 2.5 \text{mm}/\mu\text{s}$, 则 PVDF 应力计对应力波的最快响应时间 (即 $n=1$ 的无反射情况) $T_{\min} = 10 \text{ns}$ 。对更薄的 PVDF 膜, 如 $d = 9 \mu\text{m}$, 则 $T_{\min} = 3.6 \text{ns}$ 。所以说, PVDF 应力计对应力波的最快响应时间在纳秒量级。

由此可知, $\tau_1 \approx \tau_2 \gg T_{\min}$, 所以电流模式和电荷模式在对应力波的响应时间上不分优劣。相比较而言, 后者由于直接反映了应力波的结构, 无需积分处理, 因而更方便直观实用一些。

2 在长通道冲击起爆试验中的应用

引信瞬发装定时, 常使用雷管-长通道-针刺雷管 (继发元件) 这样的传爆序列来起爆。为此, 设计一定的试验装置, 通过测定传爆序列的作用时间, 以及不同长度通道位置的压力波形, 来研究并了解其起爆传爆机理, 确定传爆序列高瞬发度下的有效作用距离。

2.1 试验装置及方法

试验装置采用模拟实际引信的长通道传爆序列结构 (图 4)。通道直径为 $\Phi 3.2 \text{mm}$, 除缓冲垫圈和火工元件外, 其余零件均选用 LY12-Al 材料。整个传爆序列均装入上下具有封口盖的套筒内。

序列的作用时间采用探针和 PVDF 应力计相结合的测量方法。电探针采用 $\Phi 0.1 \text{mm}$ 铜漆包线制作。其优点是成本低廉, 测量方便。缺点是可靠性较差。因为靠爆炸产物的导通而触发, 探针的制作和安装工艺影响探针的导通能力, 而且爆炸产物随传播距离的增加很快稀疏, 在试验的中远距离已无法使探针导通。因而本文结合 PVDF 应力计测量时间。

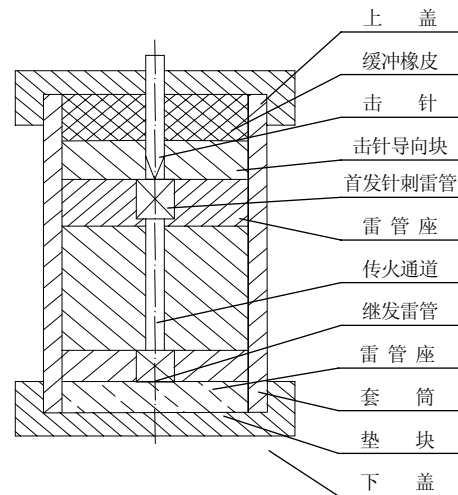


图 4 长通道传爆模拟试验装置

PVDF 应力计同时也得到了作用在垫块上的压力波形。压力波形中包含了冲击波、爆炸产物、破片或飞片等到达的时间和幅度方面的信息, 通过分析, 可以了解长通道起爆传爆机理。

2.2 实测压力波形的分析

试验中, 选用了 M55、M94、M99 等多种雷管。其中, M55 属敏感型针刺雷管, 和 M94 同为薄盖片型铝壳雷管, 后者装药量更大一些; M99 为厚底壳针刺雷管, 其输出端盖片实际为带有空腔的铝支撑体, 在爆炸后会形成自锻弹丸。

图 5、图 6 分别给出了 M55 雷管和 M94 无底壳雷管在不同通道位置处的典型压力波形 (电荷法测量), 表 1 给出了相应的若干波峰的压力和峰与峰间隔时间的计算结果。从图 5 可见, M55 雷管产生的压力波形有明显的 3 个波峰, 从物理过程上可以推断, 最先到达的是雷管爆炸冲击波, 其次为爆炸产物和雷管破片的作用。图 6 中无底壳 M94 雷管的波形, 只有 2 个明显的波峰, 分别对应爆炸冲击波和爆炸产物的作用。冲击波、爆炸产物和雷管破片的作用, 随着距离的加大都很快衰减。冲击波的衰减较其余两者慢, 表现在: 近距离时, 冲击波幅度较其余两者低, 而远距离时 3 者的幅度接近 (图 5 (c)), 甚至冲击波的幅度更高 (图 6 (c))。传播过程中, 3 个 (或 2 个波峰) 的时间间隔逐渐拉大 (表 1)。M 9 4 雷管

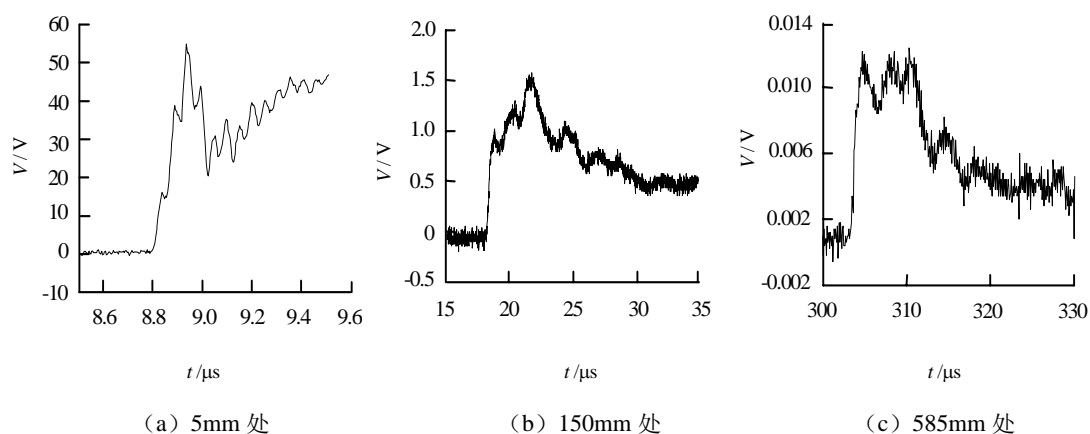


图5 M55雷管在不同距离处的输出压力波形

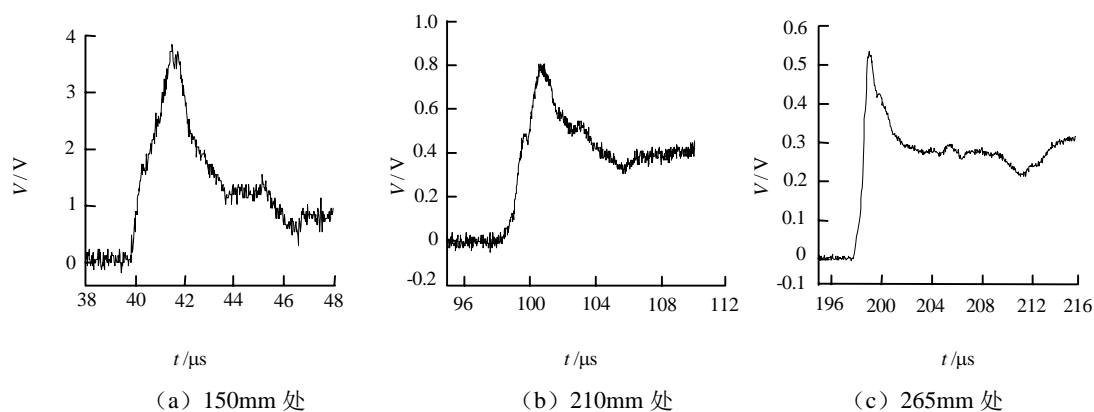


图6 M94无底壳雷管在不同距离处的输出压力波形

表1 压力波形测量结果

雷管	试验号	距离/mm	峰值电压/V	峰值压力/GPa*	峰-峰时间
M55	36	5	15.8/38.6/54.8	1.14/5.8/12.8	0.06/0.056
	53	150	0.89/1.14/1.44	0.048/0.061/0.077	1.25/1.61
	27	585	0.01/0.01/0.01	0.000 1/0.000 1/0.000 1	3.3/3.2
M94 (无底壳)	49	150	1.66/3.66	0.126/0.305	0.74
	50	210	0.49/0.81	0.036/0.060	1.44
	51	265	0.52/0.43	0.038/0.020	1.92

*——压力的计算在高压段采用了公式(1); 低压段采用了激波管上的标定关系 $K(P) = 17.6\text{pC/N}$ 。

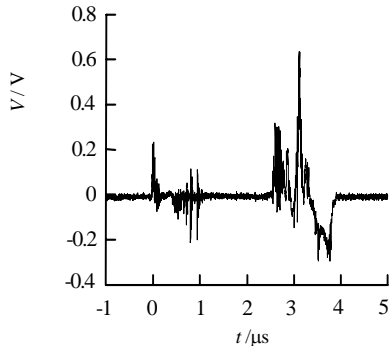
(有底壳)的波形与M55的类似。

图7给出了M99厚底壳雷管的典型压力波形。其特征为: 压力波形明显具有2个或3个波峰, 其中第1个峰值较小, 传播速度较慢。随着通道长度增加, 第1个峰与后面波峰的时间间隔从 $1\mu\text{s}$ 扩大到 $5\mu\text{s}$ 。试验中发现, 测压后的应力计表面一般都被1~2个小型弹丸击穿, 并停留在垫块内。因此可以推断, 压力波形的第1个波峰为高速弹丸在通道

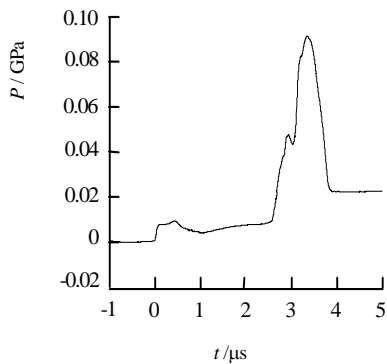
中运动形成的空气冲击波, 并随距离增加和弹丸速度下降而迅速衰减。第2个波峰值远大于第1个波峰, 其压力表现为大幅度的突跃, 然后快速下降, 这主要是弹丸撞击应力计并使其破坏所致。

以上给出了对几种雷管的压力波形测量结果的定性分析。进一步的分析表明, 薄底壳雷管M55和M94与厚底壳雷管M99的起爆机理是不同的。

其基本结论为: 在有效作用距离内, 前者引爆继发雷管是以冲击波和爆炸产物的综合作用为主; 后者则是以自锻破片的作用为主。



(a) 示波器记录的电压波形



(b) 积分后的压力波形

图 7 M99(厚底壳) 雷管的典型波形

2.3 PVDF 应力计测试中的主要注意事项

(1) 测量中采用了长约 10m 的 50Ω 低噪声电缆, 相对于本试验测试信号的上升前沿 (最短十几纳秒) 属于长电缆, 因而测量电路必须考虑匹配。

(2) 电流模式测量方法对信号的前沿十分敏感, 对较远距离的信号进行测量时, 电压信号只有几十毫伏量级, 而且量程很难准确预估。因而, 此时以电荷模式测量方法为好。这种方法的好处是输出电压与压力成正比, 测量结果直观、不用数字积

分。

(3) 在这种长通道的测量中, 应力计不可避免的是局部受到很大的冲击压力, 其测量引线受到很大的剪切力, 极易遭到破坏。雷管破片和自锻飞片也会对应力计造成穿孔破坏。因而必需进行适当的防护, 以保证应力计在测量时间内不被破坏。

采用铜箔 (0.02mm) 或铝箔 (0.1mm) 进行防护, 对自锻飞片采用更厚的双面胶带 ($\sim 0.6\text{mm}$) 防护。防护层的厚度, 视信号大小而定, 在远距离信号较弱的地方, 可以不加防护。

3 结论

(1) 在时间的测量上, PVDF 应力计比探针具有更高的时间分辨率, 而且准确、可靠。

(2) 在压力波形的测量上, PVDF 应力计响应快, 分辨率高, 因而可以捕捉到雷管爆炸后冲击波、破片等方面的细微信息, 对于起爆传爆机理的研究十分有利。

(3) PVDF 应力计的制作成本可以大大低于传统的锰铜计, 而且是无源的, 因而有希望在火工品的动态输出能力测试中得到一定的应用推广。

参考文献:

- [1] Bauer F. Method and device for polarizing ferroelectric materials [P]. US Patent, No.4,611,26, 1986.
- [2] Reed R P, Graham R A, and Moore L M, et al. The Sandia standard for PVDF shock sensors [C]. Shock Compression of Condensed Matter-1989. Schmidt S C, Davison L W. Elsevier Science Publishers B V, 1990:825~828.
- [3] 段卓平, 李丹. 雷管内部爆轰波压力测量技术[J]. 中国安全科学学报, 2001,11(3):75~79.
- [4] 李国新, 程国元, 焦清介等. 火工品实验与测试技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998. 8.