

应力,出现在 $x/h = 0.6-0.7$ 之间,并且应力值,增大 5—6 倍,从而说明,输入高频(相对基本周期 T_1) 对结构破坏在尖部起着决定性作用. 所以可以得出结论: 烟囱是由于高频输入地震波造成破坏的, 而低频不能引起烟囱上部或多道水平裂缝的破坏现象. 实验现象表明: 当用低频正弦波作为输入, 很难达到烟囱的破坏.

五、结语

本文初步实验, 证明了在水平地震输入下可以产生多道裂缝和上部裂缝. 对裂缝的形

成, 理论上作了分析, 分析与实验是一致的. 同时, 指出了地震波中高频成分的重要性. 本文只是初步结果. 对竖向与水平地震输入联合作用的研究, 需进一步探讨.

参 考 文 献

- [1] 海城地震震害, 地震出版社 (1967).
- [2] 论烟囱的地震力, 钱培风等, 中国科学院工程力学研究所研究报告 (1978).
- [3] Newmark, N.M. & Rosenbluth, E., Fundamentals of Earthquake Engineering (1971).

B.J1000 型压电式爆炸压力传感器¹⁾

严 忠 礼 郭 淳 义

(中国科学院力学研究所)

爆炸所形成的冲击波压力是确定水中兵器的实际爆炸威力以及研究水下爆炸物理现象的基本参数之一. 由于水下爆炸冲击波是一个压力范围相当宽, 频率相当高的随时间变化的过程, 而且水下工作环境条件恶劣, 用一般的测压仪器难以完成任务.

针对水下工程所提出的一系列要求, 我们完成了 BJ1000 型压电式爆炸压力传感器的研制定型. 其测压范围可达 3 千巴, 在自由场及有界面的壁压测试中, 均可适用, 并可用于空中爆炸的压力测定. 该传感器在各种使用条件下测得的波形与使用 Kistler 706A 型传感器在同类型测试中所得到的结果及波形质量相接近.

(一) 设计考虑及结构确定

为保证精确测定爆炸压力波的全过程, 传感器必须满足以下基本要求:

1. 较高的频率响应, 以保证所测压力波形具有陡峭的前沿. 它主要取决于传感器体片在传播方向上的尺寸. 如晶片片为一半径为 r 的圆片时, 传感器的相对灵敏度为

$$R(f) = \frac{A(f)}{A_0} = 2J_1(2\pi fr/c)/(2\pi fr/c)$$

式中, $J_1(2\pi fr/c)$ 为第一类一阶贝塞尔函数; f 为被测波的频率; c 为所测介质中的声速.

上式表明, 晶体片的几何尺寸愈小, 传感器的频响特性愈高.

2. 较好的低频特性 为了能测量如气泡脉动压力这类的低频信号, 应保证传感器具有良好的低频特性. 它必须满足以下两个条件:

(1) 高绝缘阻抗 在理想条件下, 只要在晶体表面有一个力持续作用, 就应该在晶体片表面之间产生一个与之相应的电位差. 但在实际使用中, 不可避免地由于存在有泄漏电阻而为压电电荷提供了传导的通路, 而引起信号的衰减. 其等效电路对于 $P_t = P_m \cdot e^{-t/\theta}$ 型的压力响应为:

$$V_t = P_m/(1 - \theta/\lambda) \left[e^{-t/\theta} - \frac{\theta}{\lambda} e^{-t/\lambda} \right]$$

式中, P_m 为冲击波峰值压力; θ 为冲击波时间常数; $\lambda = R(c_0 + c)$ 为低频时间常数; R 为传感器的阻抗; c_0 为传感器的电容; c 为

1) 先后参加本项工作的还有张金城、赵诚钧、周桂初、史毓香、黄立舜及北京市宣武测振仪器厂的庞景利同志. 本文于 1980 年 10 月 17 日收到.

等效电路的电容。

上式表明, θ/λ 愈小愈能反映真实情况, 如 λ 不够大时, 主要将引起冲量计量的误差。可推得 $P-t$ 曲线面积的相对误差:

$$\frac{\Delta A}{A} = 1 - \frac{e^{-t'/\lambda} - e^{-t'/\theta}}{\left(1 - \frac{\theta}{\lambda}\right)(1 - e^{-t'/\theta})}$$

$$\approx \frac{\theta t'}{\lambda(2\theta - t')}$$

t' 为积分的终止时间。

为保持传感器的高阻抗, 结构上必须保证良好的防水性。

(2) 较低的热电效应 水下爆炸压力波的持续时间很短, 所引起的周围介质瞬间温度变化极其微小, 对压电晶体材料的影响一般可忽略之。但在空爆测压中, 在无热防护条件下, 压电晶体材料由热电效应将引起较大的畸变, 尤其在近区测试时, 影响更为严重。因此, 传感器结构设计必须考虑热防护措施。

3. 较小的流场畸变 传感器的整体尺寸不应过大, 其外型更好地接近于流线型, 使对流场的影响限制到最小程度。

4. 良好的机电转换特性 由于传感器本体结构中机械量转换为电量不够完善而引起的波形畸变, 属于这类的有: 由晶片径向振荡而形成的“虚峰”及因晶体的侧向效应而引起的负峰等, 以及由传感器整体的谐振及由电屏蔽不良而引起的外部干扰等。

5. 较高的信噪比 为很好地抑制电缆效应, 并使之适于测量如气泡脉动压力等微弱信号, 要求传感器应具有较高的信噪比, 这在大药量条件下尤为突出。

6. 坚固性与结构的简易性 在使用条件比较恶劣的场合下, 对传感器坚固性的要求十分突出, 它是取得现场测试数据的保证条件。

综合上述要求, 经多次的设计改型及大量现场的试验及使用, BJ 1000 型压电式爆炸压力传感器的结构简图如图 1 所示。

为使所研制的传感器具有广泛的适应性, 共制成三种不同型式的传感器:

1. BJ1000-1 型传感器

它以中国科学院声学研究所制成的 PT741 压电晶片为压力敏感元件, 晶片尺寸为 $\phi 12$ 毫米。它具有较大的电荷灵敏度, 适用于大药量爆炸的工程现场以及低压测试的场合。

2. BJ1000-2 型传感器

它以天然晶体电气石为压力敏感元件, 晶片尺寸有 $\phi 12$ 及 $\phi 8$ 毫米, 适于中小药量条件下测量爆压之用。

3. BJ1000-3 型传感器

它以 4×4 [毫米]² 的电气石晶体制成的锥形传感器, 并设计了 SF-III 型水中前置放大器与之相配, 有效地克服了电缆信号的影响。由于采用了单芯电缆结构, 把信号电缆兼作为放大器电源的馈送电缆, 使得该放大器的使用极为简便。该型传感器在各种爆压测试中均可适用。

这三种型式传感器相配合测压范围可从 0.1 巴到 3 千巴, 药量可从 1 克到吨级 TNT 当量。结构设计中采取侧向保护措施, 以减小晶片侧向效应的影响, 并对本体的强度以及外型对流场的影响等方面均给予了必要的考虑。选用北京橡胶研究所研制的 GY-1 号胶进行了表面压胶, 从而保证了良好的防水性能。在空爆测压中, 表面橡胶膜可有效地起到热防护层的作用。

(二) 对几个问题的研讨

1. 电缆信号

传输电缆在测试系统中是个重要环节, 对

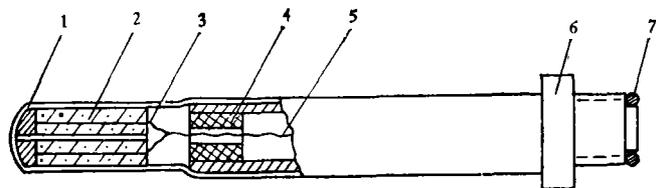


图 1 BJ1000 型传感器结构简图

1 硫化橡胶防水层 2 晶片 3 接地电极 4 绝缘管 5 引线
6 外壳 7 防水胶圈

于由它可引入的畸变必须加以十分慎重的考虑方可达到无失真地进行信号传递的要求。当对装药量较大的爆炸物进行水下测压时,电缆的机械效应将成为波形产生畸变的主导因素。这是由于电缆在受到冲击波等外力作用下,会在介质的外表面上形成静电荷。这种寄生电荷对压电信号将引起严重的畸变,通常把这种机械效应称之为电缆信号。

为了研究电缆信号的性质及其影响,我们进行了多次试验:

(1) 不同药量试验: 表明了小灵敏度的传感器在较大药量下将引入很大的波形畸变。

(2) 空电缆线试验: 用 SYV-50-2-2 同轴电缆及低噪音电缆两种空线在大药量条件下进行电缆信号试验。结果表明 SYV-50-2-2 电缆具有很大的电缆信号, 而低噪音电缆所产生信号畸变量就弱得很多。

(3) 增加传感器灵敏度试验: 表明传感器灵敏度愈高, 相对畸变量就愈小。

(4) 加跟随型前置放大器试验: 表明这是克服电缆信号的有效方法。

上述试验结果表明: 电缆信号的大小与冲击波的冲量成正比, 因此在小药量下, 电缆信号并不严重, 可忽略。而在较大药量时, 则会严重影响波形。

电缆信号造成的波形畸变程度与信噪比有关: $M = Q/q$ (Q 为压电电荷, q 为电缆信号电荷), M 愈大则畸变愈小。

另外, 电缆信号的大小与受机械应力作用的电缆长度成正比, 电缆端部逆向爆源比侧向爆源时的电缆信号小得多。电缆信号的极性和畸变形式因电缆品种、型号、使用历史不同会有很大区别。

我们采取消除电缆信号的途径有:

(1) 利用高信噪比, 采用高灵敏度的压电陶瓷以及其它如增大晶体片面积、多片组合式结构等增大压电电荷 Q , 从而提高信噪比 M , 压低电缆信号的影响。

(2) 用入水前置放大器可有效地降低电缆信号的影响。

(3) 用低噪音电缆代替同轴电缆, 可降低电缆信号。

另外, 也有采取特制的水下电缆以及用差动对称推挽电路等方法降低电缆信号的, 但都会给使用带来很多不便之处。

2. “虚峰”的实质及产生原因

研制的某些个别传感器在主冲击波波形中前沿上有较明显的过冲存在, 致使所得的波形在前沿部位发生严重的畸变。我们把这种过冲称之为“虚峰”。能否消除虚峰是影响传感器质量之关键。

将有虚峰的传感器所测的冲击波波形快速展开(见图 2), 可以看出, 虚峰是周期 $T \approx 3.3$ 微秒, 衰减持续时间约为 40 微秒的高频振荡。传感器的晶片尺寸为 $\phi 13$ 毫米, 晶体片的径向自振频率 $f_r = \frac{c_1}{D} = \frac{4000 \times 10^3 \text{mm/s}}{13 \text{mm}} \approx 300$

千赫, 其中 c_1 为晶体片的体积膨胀波波速, D 为晶片直径。这与实测的高频振荡频率 $f = 1/T = 1/3.3 \approx 300$ 千赫相吻合。我们认为这一高频振荡是由晶片径向振荡所引起的。

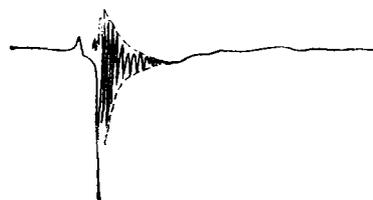


图 2 35#传感器 200 克 TNT $R_0 = 2.75$ 米 $P_m = 93$ 巴扫描全程 200 微秒

粘结晶体片用的粘结胶的强度不够是产生虚峰现象的主要原因。我们选用四种不同的粘结胶: 酚醛胶(抗剪强度约为 130 公斤/厘米²), 四官能环氧树脂(抗剪强度为 145—212 公斤/厘米²), DAD-5 型导电胶(100—150 公斤/厘米²), 以及 KH-802 胶(400 公斤/厘米²) 在尽量保证其余条件相同情况下制成一定数量的传感器。试验表明, 除高强度的 KH-802 胶制成的传感器没有虚峰外, 其它三种胶制成的传感器均有个别出现虚峰现象, 而酚醛胶则最为严重。这是由于粘结胶强度不够高, 晶片粘接欠牢

固,在高速高压大冲击作用下,容易激起高频的径向振荡而形成虚峰。

另外,试验结果表明,虚峰的大小正比于冲击波的冲量,在中等或大药量条件下具有虚峰的传感器,用于小药量条件下则看不出虚峰的存在,但在冲击波上升前沿处存在一明显的拐点(见图3)。基于这点,我们可将新制好的传感器在小药量条件下进行检测,这样可大大地缩短试验周期。



图3 35#传感器 8#铜壳雷管
 $P_m = 100$ 巴 扫描全程 200 微秒

出现拐点的机理在于,冲击波在所使用的晶体中的传播速度约为 4000 米/秒,而在水中传播速度为 1500 米/秒,冲击波首先打击传感器的晶片之侧面,先出现负峰,晶体片的径向振荡周期约为 3.3 微秒,而 $\phi 13$ 毫米晶体片的绕流时间为 8.7 微秒,由 300 千赫的径向振荡叠加到波形前沿上,其结果即将在前沿部分出现 1—2 个拐点。

(三) 传感器的标定及技术指标

通常是把标定分为动态标定与静态标定两种。动标是在时间域或频率域内确定系统或传感器的输出量对输入量之间的响应特性;而静标则是用以确定其输出量与输入量之间的刻度特性。所选用的标定方法与标定设备是与被标定的具体对象密切相关的。对于水下晶体压力传感器来说,迄今尚未能得到一个较完善的单一的标定方法。经比较,对 BJ1000 型传感器分别进行了静态与动态标定:

1. 使用二级标准活塞式压力计对各型传感器进行了不同量程范围内刻度特性的标定,取得了电荷灵敏度、线性度及稳定性等数据。

2. 为确定在各种瞬变压力的使用条件下传感器的灵敏度是否有别于静标灵敏度。我们通

过与准动态标定以及标准药球进行个别点校对的方法进行灵敏度对比试验。

3. 采用了在水池内通过对可变频率的标准声压发生器来测定传感器的幅频特性的方法,来确定传感器的沿压力波传播方向上的尺寸动态频响。

4. 在振动台上,测定了传感器的加速度效应。

经上述标定,BJ1000 型传感器的具体性能指标为:

1. 测压范围: 静标上限为 1000 巴,药球校核达 3000 巴。

2. 线性度: 1 型传感器在测压范围内的非线性误差不超过 3%,2 型及 3 型则优于 2%。

3. 传感器的重复性: 1 型在 3% 之内,2 型及 3 型在 2% 之内。

4. 传感器的电荷灵敏度: 1 型约为 2000 微微库仑/巴,2 型为 40—100 微微库仑/巴,3 型约为 10 微微库仑/巴。

5. 1 型的绝缘阻抗 $R \geq 10^{10}$ 欧姆,2 型及 3 型 $R \geq 10^{12}$ 欧姆。

6. 各型传感器的加速度效应约为 1×10^{-7} 巴/g。

7. 沿压力波传播方向传感器的尺寸频响如图 4、图 5。

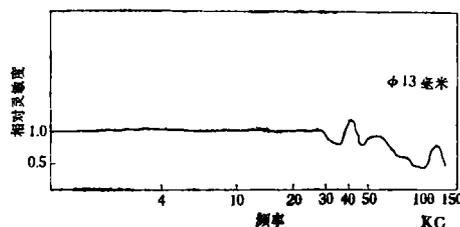


图4 1 型及 2 型频率特性曲线

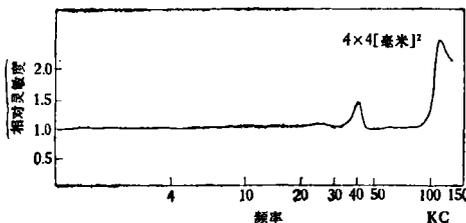


图5 3 型传感器频率特性曲线

(四) BJ1000 型传感器的几种典型应用

1. 自由场条件下爆炸冲击波压力的测定

(1) 雷管爆炸所形成的冲击波



图6 8#铜壳雷管 $P_m \approx 100$ 巴
扫描全程为 200 微秒

(2) 装药量为 760 公斤 TGA 的炸药包实测波形



图7 $P_m = 80$ 巴 扫描全程为 15 毫秒

2. 水下壁压测定



图8 8#铜壳雷管 扫描全程 200 微秒

3. 气泡脉动压力的测定



图9 1 公斤 TNT 药球扫描全程 50 微秒

4. 空中爆炸压力的测定



图10 空爆远区 0.5 公斤塑态炸药
距离 3.3 米 $P_m = 0.46$ 巴
扫描全程 10 毫秒

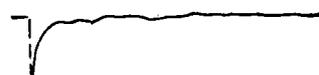


图11 空爆近区 0.5 公斤塑态炸药
距离 0.8 米 $P_m = 10.3$ 巴
扫描全程 10 毫秒

5. 与国外同类测试对比

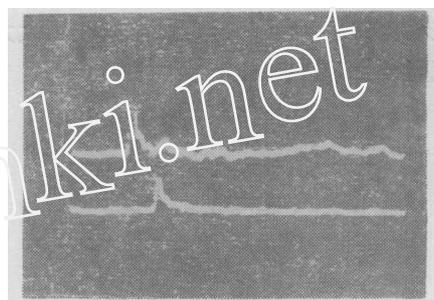


图12 由 Kistler 706A 型传感器测得压力波形 10 克炸药 压力 150 巴/每格 时间 0.2 毫秒/每格

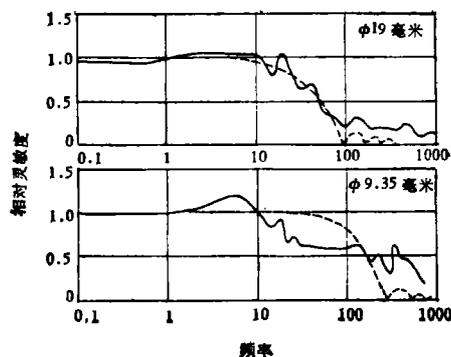


图13 UERL 型传感器沿压力波传播方向的尺寸频率特性曲线, 虚线是考虑到几何尺寸的影响而计算出来的

参 考 文 献

- [1] R. H. 库尔, 水下爆炸, 罗耀杰等译, 国防工业出版社 (1960).
- [2] Aron, A.B. and Cole, R.H., *Rev. Sci. Instru.*, **21**, 1(1950), 31-38.
- [3] Христофоров, Б. Д., 泰恩小药包在水下爆炸时的冲击波及气泡之参量, *Журнал П. М. Т. Ф.*, 2(1960), стр. 124-127.
- [4] 田中一三等, 構造体試験用低速火薬, *工業火薬*, **36**, 2 (1975), 76-85.
- [5] 永井保, 造船协会论文集, 117(1965), 184.
- [6] Schweppe, J.L., *Methods for the dynamic calibration of pressure transducers*, PB186426 (1963).
- [7] *Dynamic calibrator for airblast pressure gages to 10000 PS7*, AD-A029239 (1976).