

# 硅集成式压力传感器 设计和使用中的几个主要技术问题

周忠海

(1983年9月14日收到)

本文根据测量爆炸冲击波中对测压传感器的要求,提出高频动态硅集成式压力传感器结构及封装方式。在对动态试验的记录波形进行分析比较中,发现高频硅集成式压力传感器桥臂电阻阻值对记录波形响应的影响。进而对桥臂电阻阻值参数的选择提出见解。文中还叙述了传感器安装条件和为消除在化爆中观测到的干扰波形而对传感器结构做的改进。

## 前 言

在爆炸力学研究中,为了解决实际工作和理论工作中提出的各种问题,对爆炸测试技术提出了更高的要求。动态压力测量中,要求研制尺寸小、频带宽、响应快、抗干扰能力强的传感器。

近几年来,由于集成电路工艺的发展,利用半导体材料应变时的变阻效应原理,在硅片上直接扩散成惠斯登电桥的硅集成式压力传感器发展得很快,其应用范围也越来越广泛。由于它具有尺寸小、频带宽、精度高、输出幅度大、抗干扰能力强等特点,使它成为爆炸力学动态压力测量中理想的压力传感器。

下面仅就硅集成式压力传感器设计和使用中的几个技术问题提出一些看法。

## 一、传感器结构

在高频动态硅集成式压力传感器设计中,为了提高频响,在敏感元件——硅膜片前应避免空腔管道或其它介质存在。另外还需避免悬浮式引线,以提高传感器抗冲击振动能力。与硅膜片相联的底座材料,应选用热膨胀系数接近的材料(如硼硅玻璃)。硅膜片组合件与保护罩的间隙用环氧树脂充填,并保证与硅膜片表面齐平。否则将影响测值的真实性。

敏感元件一般设计成硅杯(或硅片与支座封接成硅杯形式)。由于敏感元件尺寸小,所以桥臂电阻直接扩散在硅杯底部内侧,在工艺上困难很大。为此,有些传感器桥臂电阻“图形”扩散在硅杯底面外侧。如图1所示。封接时有的传感器“图形”朝外。该结构桥臂电阻易受

机械损伤,同时防潮性能差,爆炸时受瞬间高温影响严重。

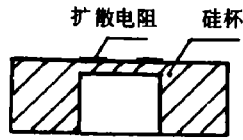


图 1

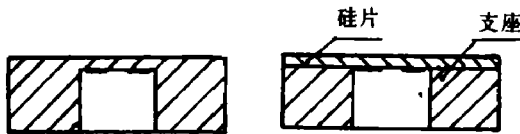


图 2

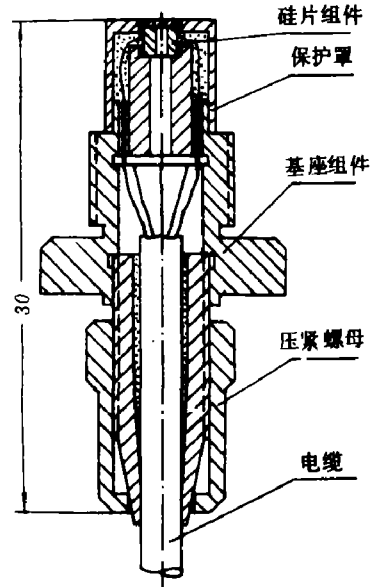


图 3 小型硅集成式压力传感器结构

为提高抗干扰能力和避免机械损伤,可将“图形”扩散在硅杯底部内侧,或者制成硅片与支座封接成硅杯。如图 2 所示。

图 3 为为我所研制的小型硅集成式压力传感器结构图。采用硅片与硼硅玻璃封接成硅杯。该传感器硅膜片有效直径  $1\text{ mm}$ , 固有频率大于  $500\text{ KHz}$ 。

## 二、传感器的动态响应

硅集成式压力传感器是以硅敏感元件为感受体的。它对变化压力的响应可近似以欠阻尼单自由度二阶线性系统来描述。其运动方程为:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = 0 \quad (1)$$

对阶跃压力响应的输出函数为:

$$p(t) = p_0 \left[ 1 - e^{-\xi\omega_n t} \left( \cos\omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin\omega_d t \right) \right] \quad (2)$$

式中:  $p_0$  —— 响应压力峰值。

$\omega_d$  —— 系统振动频率。

$\xi$  —— 系统阻尼度。

$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}}$  —— 系统无阻尼自由振动频率。

这种响应方式给数据处理带来许多麻烦。

在硅敏感元件运动上来实现对阻尼度  $\zeta$  的控制几乎是不可能的。故只能采用滤波电路来消除自由振动的干扰。使系统对压力的响应变成一个近似的一阶线性系统。当然, 把一个二阶线性系统降为一个一阶线性系统来使用, 必然降低了它的频响带宽, 增长了响应上升时间。

提高传感器响应上升时间应从两方面着手: 一方面是提高硅杯自振频率, 另一方面是减小压力感受面积。前者是为提高滤波器上限频率, 后者是为减小压力变化讯号在感受面上的渡越时间。

对周边刚性嵌固平膜, 在空气中自振频率可根据下式确定:

$$f_n = \frac{0.404}{R} \sqrt{\frac{E \cdot p}{\sigma_m \cdot \rho (1 - u^2)}} \quad (3)$$

式中:  $E$  ——杨式模量;  $R$  ——半径;  $\sigma_m$  ——硅危险点应力;  $\rho$  ——密度;  $p$  ——外加压力;  $u$  ——泊松比。从上式可知, 在压力量程定了以后, 唯一能提高自振频率的是敏感面直径, 它与频率成反比。

渡越时间是压力波走过敏感面所花的时间, 它体现了传感器的空间分辨能力。

$$t_s = \frac{d}{D} \quad (4)$$

式中:  $d$  ——敏感面直径;  $D$  ——击波速度。由(4)式可知, 为提高传感器空间分辨能力, 传感器的敏感面积应尽量小, 渡越时间应尽量与响应上升时间一致。

在硅敏感面直径选定以后, 还有两个电路环节同频响有关。一是滤波器, 一是前置线路。为消除自振和保证尽可能快的响应上升时间, 希望采用锐截止滤波。过渡型布——汤滤波器基本上可实现此目的。前置线路是一阻抗转换线路, 便于信号的长距离传输。对于这种高频响的传感器的桥臂电阻和到前置级的电缆长度应严格控制, 否则将影响波形的响应。

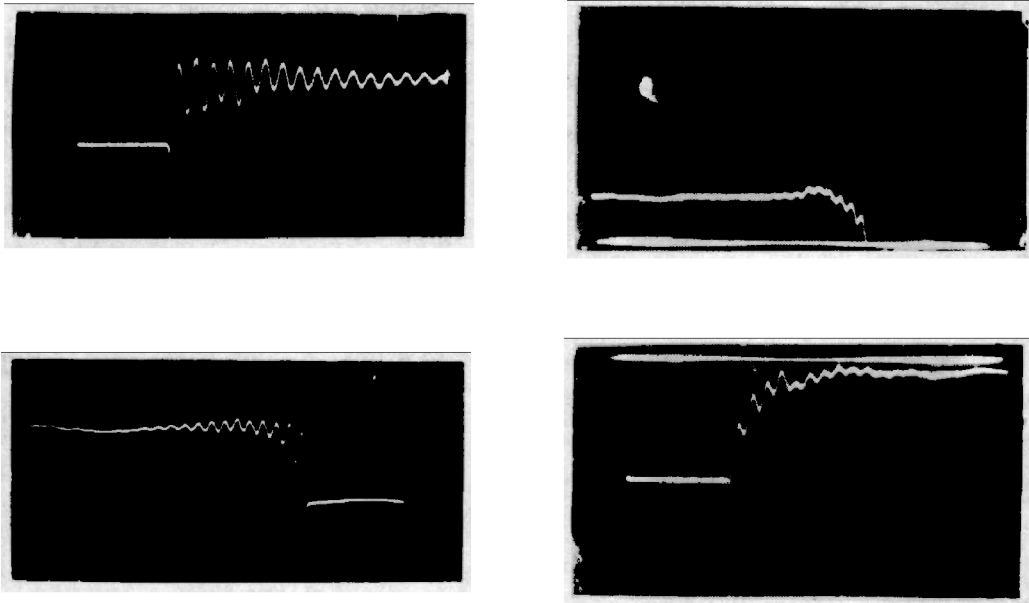
### 三、桥臂电阻阻值的选择

在硅集成式压力传感器的设计中, 桥臂电阻的选择是综合多种因素, 主要是从灵敏度和工艺条件来确定的。这在静态和低频响传感器中(频响在几十千周以下)是可行的。但对高频响动态传感器, 桥臂电阻阻值的大小对动态性能有很大影响。图4是不同桥臂电阻的传感器, 在相同测试条件下(传输电缆长3m)记录的击波管反射超压波形。从波形上明显看出: 随桥臂电阻阻值的增大, 波形上升变缓。在阻抗不匹配(同轴电缆特征阻抗为50 $\Omega$ 或75 $\Omega$ , 传感器阻抗很难做这么低)的传输情况下, 传输电缆的分布电容与惠斯登电桥的输出阻抗形成一RC充电网络。RC网络充电到稳态值的百分之九十时的充电时间常数 $\tau$ 的计算结果与实测结果基本符合。

为进一步查清阻抗不匹配对测试结果的影响, 对同一传感器(桥臂阻抗 $R = 3.2K\Omega$ ), 不同长度电缆(分布电容不同)进行了实验。图5记录的是击波管反射超压波形。

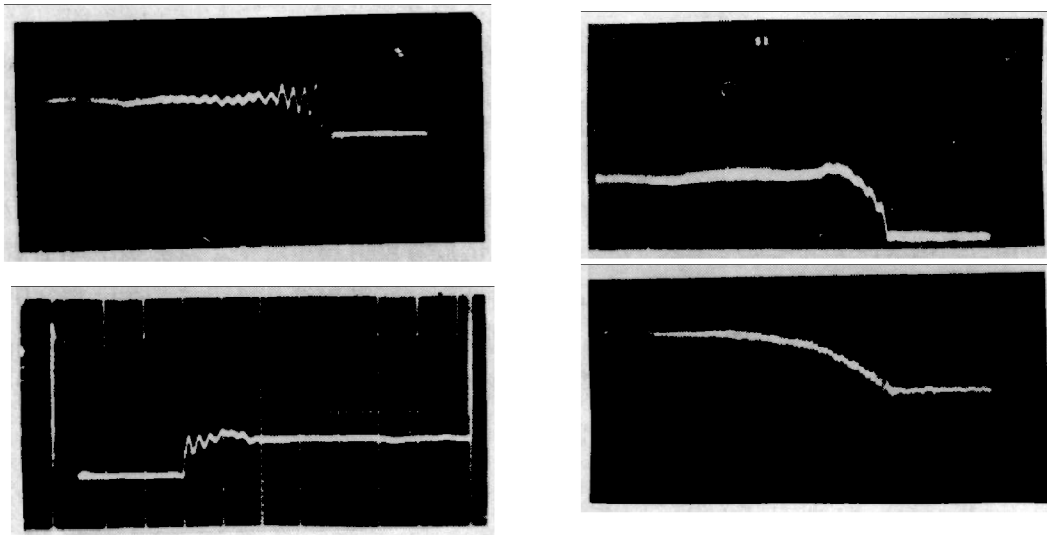
从两组实验结果可以看出: 对于这种高频响传感器, 桥臂电阻的阻值和到前置级的电缆长度对传感器记录波形的响应有很大影响。

兼顾传感器有满意的记录波形和满足要求的灵敏度, 对固有频率大于100KHZ的传感器桥臂电阻阻值应小于1K $\Omega$ , 到前置级的电缆长度应控制在几米以内。



(上)  $4.5 \mu s/div$   $R = 1.3 K\Omega$       (下)  $4.5 \mu s/div$   $R = 2.5 K\Omega$       (上)  $4.5 \mu s/div$   $R = 3.2 K\Omega$       (下)  $4.5 \mu s/div$   $R = 4 K\Omega$

图 4: 传感器桥臂电阻阻值对记录波形上升时间的影响



上:  $L = 0.3 M$   $C \approx 20 pf$   $4.5 \mu s/div$       下:  $L = 1.6 M$   $C \approx 110 pf$   $4.5 \mu s/div$       上:  $L = 3.2 M$   $C \approx 220 pf$   $4.5 \mu s/div$       下:  $L = 16 M$   $C \approx 1160 pf$   $4.5 \mu s/div$

图 5 传输电缆长度对记录波形上升时间的影响

## 四、传感器的防护

为使传感器经受得住恶劣环境的考验,传感器的坚固性和抗干扰能力显得更为重要。在化爆试验中也发现:在爆炸波到达之前基线上有一急骤上跳的波形,如图6所示。可能引起这个干扰脉冲的原因很多,诸如超前冲击加速度、电磁干扰、光及热等。研究结果认为<sup>[1]</sup>是因结晶材料本身的热电响应高,在爆炸光的作用下,瞬时温度梯度引起的。实验室模拟实验以及野外化爆试验都证明了这一点。因此,图3结构只能做为硅集成式压力传感器的一种形式。主要用于无光热干扰而又需极高频响的实验环境下使用。为此,设计了带外罩的、为硅敏感元件提供足够机械防护的野外用传感器。它是从牺牲部份频响来换取坚固性和抗干扰能力。

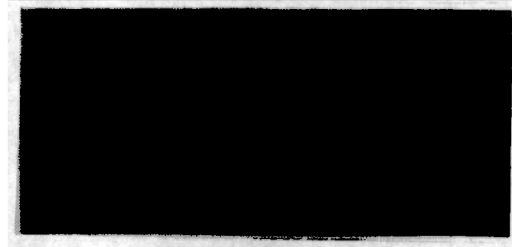


图6 化爆实测压力波形

防护罩的主要目的是保护硅杯免受光脉冲干扰和机械损伤。目前采用三种形式。其中一种是临时性防护铝箔,另两种是固态腔体和气腔。它们是永久性结构。

### 1、防护铝箔

这种方法很简单。把一张小铝箔(厚 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ )用油脂平贴在图3的硅敏感元件表面。这样爆炸光脉冲就不会照射到硅杯上,消除了瞬时温度梯度的影响,这种方法简便,可根据使用者实际需要采用。缺点是对机械损伤保护作用小,而且有些场合(如测量面不外露,需一次安装长久使用等)不便使用。

这种方法基本不影响传感器原有的响应特性。图7是贴 $0.05\text{mm}$ 厚铝箔前后的击波管实验波形。

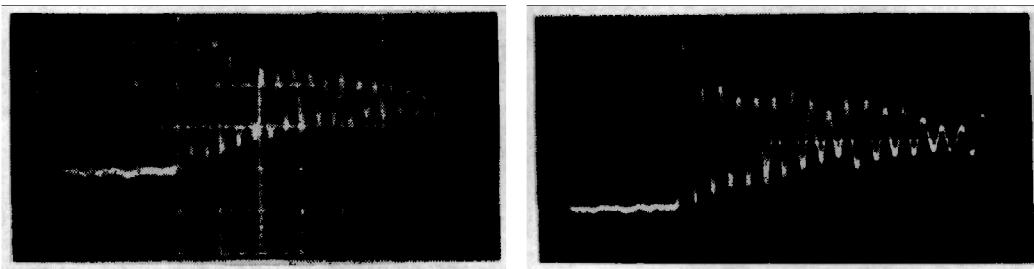


图7 传感器加铝箔前(左图)后(右图)的击波管实验波形

### 2、固态腔体

如图8所示,在硅杯顶面贴一层厚 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 厚的软橡胶板,罩上保护罩。这种结构既防光也起机械保护作用。国外也采用过类似措施。它用专配的硅胶,罩内不存在任何气隙,且胶面与保护罩面平整,从而减小传感器的动态特性和静态精度的损失。

固态腔体的材料需具有低的剪切模量  $G$  和足够高的体模量  $K$ 。使在压力的传递上具有类似的液体的作用，但不会象液体那样外溢，而能成为传感器的一个永久性组成部分。如工艺控制得好，这种腔体的精度损失可以忽略，但自振频率下降，使上升时间增长。

图 9 是加固态腔后的击波管实验记录波形。材料是  $0.5\text{ mm}$  厚耐油橡皮，电路滤波上限频率是  $50\text{ KHZ}$ 。波形的响应上升时间是  $10\ \mu\text{s}$ 。

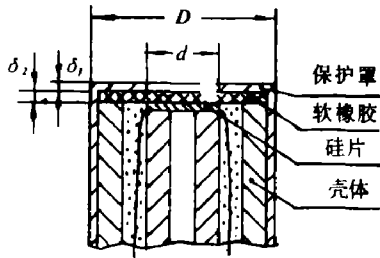


图 8 固态腔体传感器结构示意图

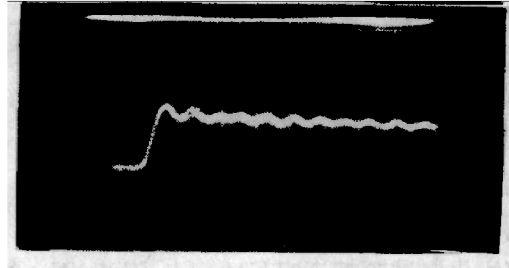


图 9 固态腔体击波管实验记录波形

### 3、气 腔

如图 10 所示。气腔的优点是不影响传感器的精度。可根据测量需要有效控制阻尼度。其频响可用声腔近似估计。气腔共振频率：

$$f_n = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}} \quad (4)$$

式中： $C$  —— 气体声速； $V$  —— 气腔体积； $S$  —— 出气孔面积 ( $S = n \frac{\pi d^2}{4}$ )； $n$  —— 气孔数；

$l$  —— 有效孔长 ( $l \approx \delta_1 + d$ )。

实验选用参数为：

$D = 5\text{ mm}$ ； $d = 1\text{ mm}$ ； $n = 4$ ； $\delta_1 = 0.3\text{ mm}$ ， $\delta_2 = 0.2\text{ mm}$ ， $\delta_3 = 0.3\text{ mm}$ ； $d = 3\text{ mm}$ ，设  $C = 400\text{ m/s}$ ，以此算得： $f_n = 15\text{ KHZ}$ 。

气腔是以孔数和孔径调节阻尼的。根据经验，在基本消除波动的情况下，其响应上升时间可做到：

$$t_r = \frac{1}{2 f_n} \approx 33\ \mu\text{s}$$

图 11 是气腔击波管实验波形。滤波器上限频率是  $30\text{ KHZ}$ 。所达响应上升时间  $27\ \mu\text{s}$ 。

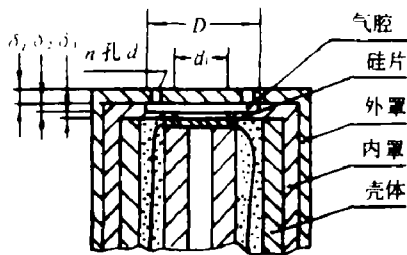


图 10 气腔传感器结构示意图

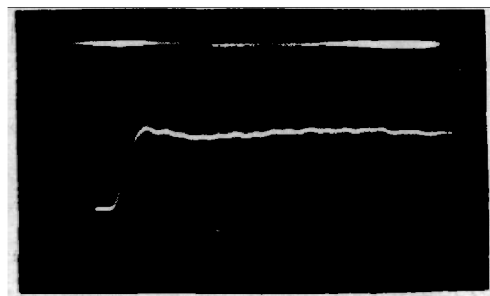


图 11 气腔击波管实验记录波形

采用上述防护措施，消除了由于瞬时温度梯度引起的干扰波形。图12是三种结构的化爆波形（75克TNT药柱，爆距0.85m，正反射超压）。

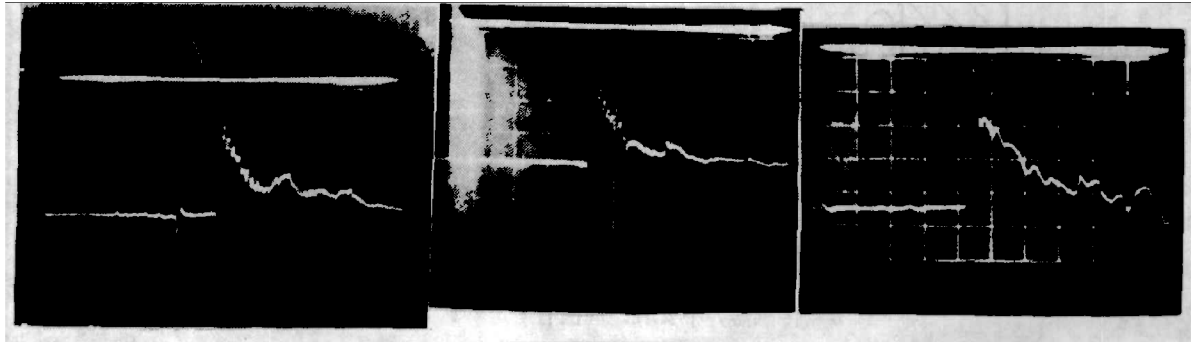


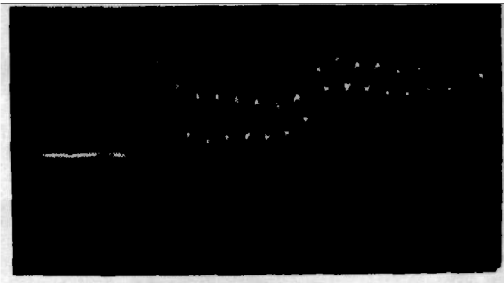
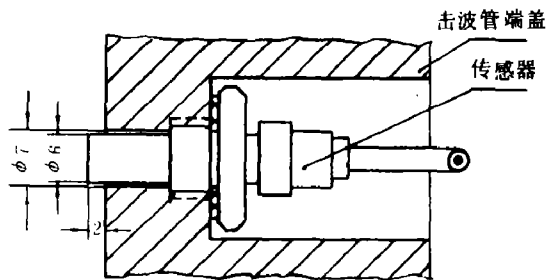
图12 化爆记录波形

- 左图：铝箔防护记录波形 100  $\mu$ s/div
- 中图：固态腔体记录波形 200  $\mu$ s/div
- 右图：气腔记录波形 100  $\mu$ s/div

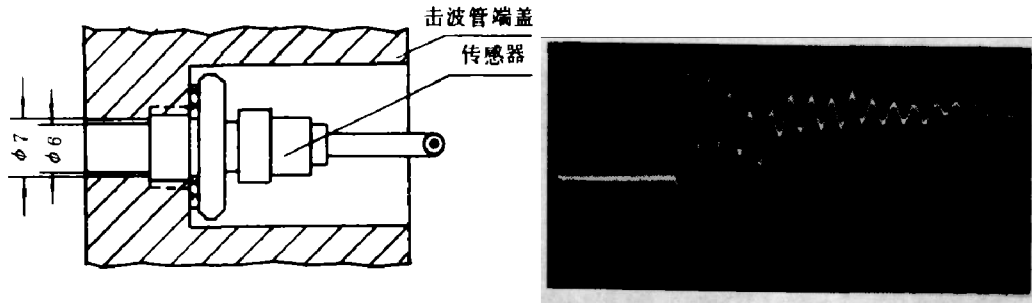
### 五、传感器的安装

高频响传感器安装条件对测试结果有很大影响。由于传感器频响高，分辨能力强，因安装表面不平带来的压力扰动能明显的反映出来。图13是小型硅集成式压力传感器在击波管实验中不同安装条件记录波形。从记录波形可见，安装条件不标准，在记录波形上将产生一个低频响应，严重影响测值的真实性。这对低频响传感器是不明显的。

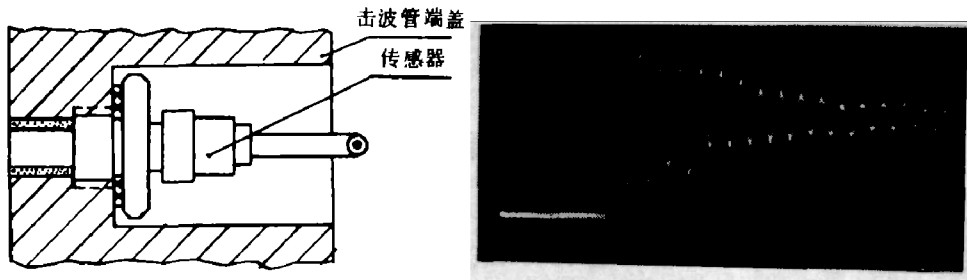
设计动态压力测量用的硅集成压力传感器，必须根据测试对象，综合其主要技术要求，适当调整其主要参数。在使用时严格控制安装条件。否则不能得到满意结果。



a 传感器高出安装面2mm，周围有 $\phi 6 \times \phi 7$ 环隙



b 传感器齐平安装，周围有  $\phi 6 \times \phi 7$  环隙



c 传感器齐平安装

图13 不同安装条件对记录波形的影响

在传感器的设计和实验过程中采纳了林俊德同志的一些重要建议。同传感器配合的电子线路是王梓余设计、装调的。实验是同王梓余、张炳田共同完成的。在实验过程中曾得到我室击波管组同志大力支持和热情帮助。在此对合作者和支持者一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Quintana, J. V., AD-A 086087, (1980).



## SOME TECHNICAL PROBLEMS IN THE DESIGN AND USE OF SILICON INTEGRATED PRESSURE TRANSDUCERS

Chow Zhonghai

### Abstract

According to the requirement for pressure transducers in blast wave measurement, in this paper, we present the configuration of a kind of high frequency dynamic silicon integrated transducer and its sealing technique. Having analysed and compared recorded waveforms obtained from dynamic experiments, we analyse the influence of the resistance value of bridge arm on the response and put forward our views on choosing the appropriate resistance value. In addition, the mounting technique of the transducer and an improvement on the transducer configuration, which can eliminate the disturbance caused in the explosion, are also described.