

# 在冲击载荷作用下锰铜压力传感器的压阻特性

王 诚 洪 等

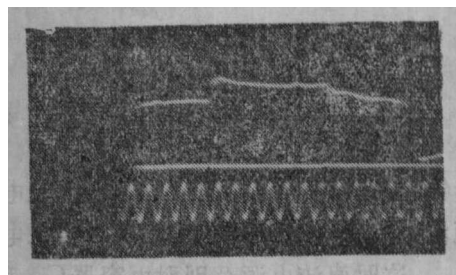
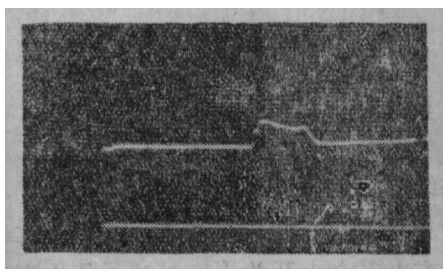
**提 要** 本文从实验上确定锰铜压力传感器在12kb~420kb压力范围内的标定曲线。

实验中采用空气炮和化爆两种加载手段,锰铜压力传感器是用氟化乙烯丙烯作为粘结剂,聚四氟乙烯作为绝缘层进行热压封装。

## 引 言

在冲击波研究中,广泛地使用压力传感器来测量凝聚介质中的冲击波压力。而锰铜作为一种压阻合金,由于它的温度系数较小,它的比电阻对周围介质的压力变化又有较高的敏感性。所以可以利用它制成锰铜压力传感器<sup>[1]</sup>,来测量冲击波的压力剖面,以及炸药中的起爆冲击波的压力剖面。

为了研究锰铜的度量衡特性,国外已报导了各种锰铜压力传感器的压阻特性<sup>[2,3,4]</sup>。我们从1975年开始,学习国外的经验研制锰铜压力传感器,并且在科研任务中用来



测量冲击波的压力剖面<sup>[5]</sup>。1976年我们测得了在绝缘材料和金属材料中传播的冲击波压力剖面(图1)。

1980年我们用锰铜压力传感器测量凝聚炸药(TNT)的爆轰压力<sup>[6]</sup>,成功地测到了

爆轰波的压力剖面(图2)。最近,我们对自己热压封装的锰铜压力传感器进行了冲击加载的标定。本文就是介绍标定的实验技术和结果。

## 一、传感器的制造与封装

我们采用上海合金厂生产的锰铜薄材(11~13%Mn, 2~3%Ni, 0.5%Si等杂质,余量为铜)将其按技术要求碾成预定厚度和宽度的锰铜箔并将其退火。我们使用的锰铜压力传感器是由厚度为0.015mm的锰铜箔制成的。我们亲自参加了锰铜压力传感器的制造和封装。

制造和封装的过程简述如下:

1. 按照设计图形刻蚀锰铜箔;
2. 以氟化乙烯丙烯作为粘剂,聚四氟乙烯作为绝缘层,在抽真空夹具上对锰铜压力传感器进行热压封装。

根据需要,传感器的总厚度为0.1~0.2mm,传感器的阻值约为0.2欧姆。

我们设计的传感器是四端的,这使得记录不受引线电阻变化的影响,而且传感器的四端线是从一侧引出的(图3),这样既可以把传感器做的比较小,又可以在试件同一截面上进行多点测量。

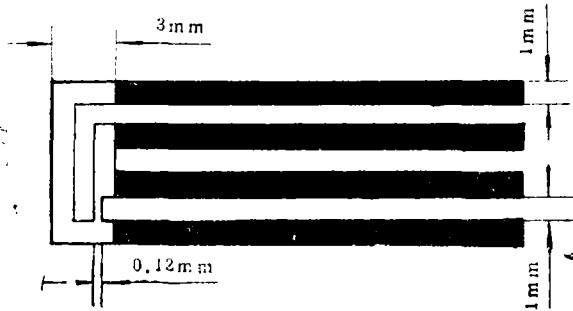


图3. 锰铜压力传感器图

## 二、供电系统

锰铜压力传感器是由图4所示的恒流电源供给恒定电流。

恒流源的工作过程是:实验前,合上电源开关 $K_1$ 、 $K_4$ 和短路开关 $K_2$ ,切断放电开关 $K_3$ ,这时直流电源分别对电容器 $C_1$ 和 $C_2$ 充电。合上开关 $K_2$ 是为了防止充电过程中电加热烧毁锰铜压力传感器 $R_0$ 。充电后打开开关 $K_2$ 。在冲击波到达量计前1~2微秒,触发探针接通, $C_2$ 放电,输出一高幅度脉冲信号触发示波器使其工作(开始扫描)。与此同时,输出一个低幅度脉冲信号通过脉冲变压器耦合,触发开启可控硅 $S_1$ 。这时电容器 $C_1$ 通过可控硅 $S_1$ 、镇流电阻和锰铜压力传感器放电,对锰铜压力传感器提供一个恒定的脉冲电流。

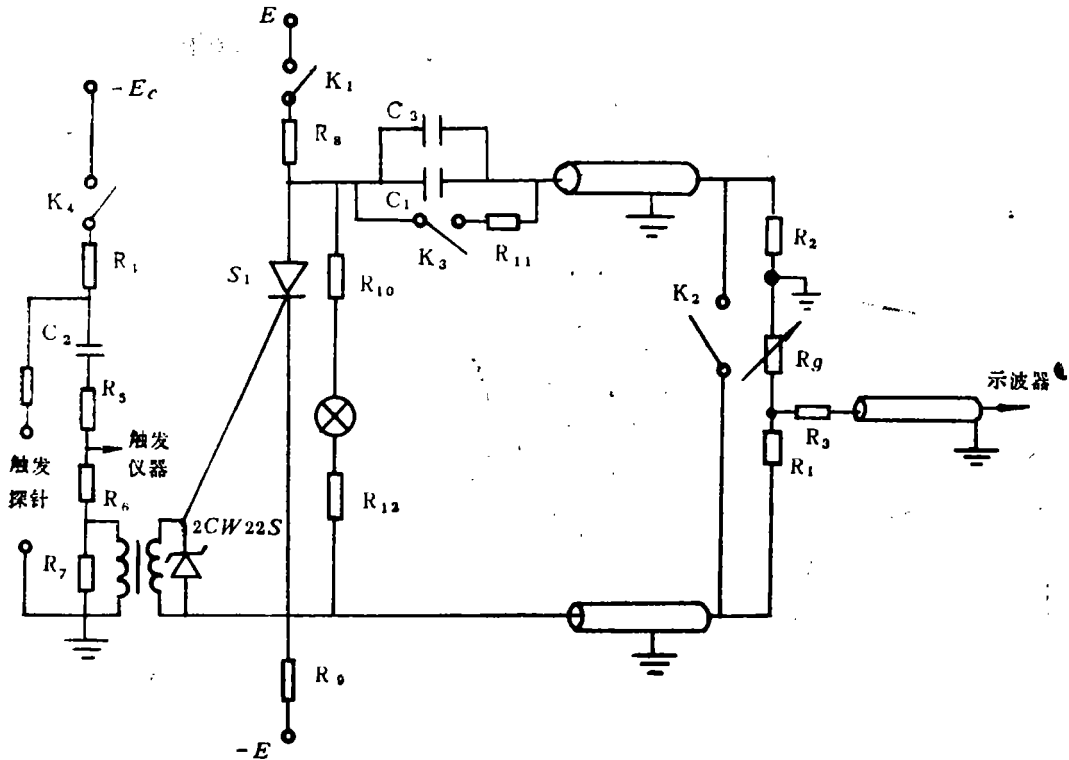


图 4

由于电容器  $C_1$  固有频率较低，因而使电源频响较差。为了提高电源频响，即提供一个迅速上升到稳定值的恒定电流，用一个低值高品质因素的电容器  $C_3$  并联在大体积、大容量的放电电容器  $C_1$  上，以减少电容器  $C_1$  的电感，从而使得系统中的电流迅速上升。

设恒流源提供的恒定电流为  $I_0$ 。锰铜压力传感器的初始电阻为  $R_0$ ，在沒有受到冲击压缩时，锰铜压力传感器两端的电压  $U_0 = I_0 \cdot R_0$ ，当锰铜压力传感器受到冲击压缩时，其阻值有所增加，设增量为  $\Delta R$ 。这样锰铜压力传感器两端的电压也相应地增加，

设增量为  $\Delta U$ ，故  $\Delta U = I_0 \cdot \Delta R$ ，由此得  $\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta R}{R_0}$ 。  $\Delta U$  和  $U$  由 CS-2100 示波器测

量，在测得  $\Delta U$  和  $U$  后，就可以知道传感器电阻的相对变化  $\frac{\Delta R}{R_0}$ 。

### 三、实验技术

锰铜压力传感器的标定是在 12kb~420kb 压力范围内进行的，实验中采用空气炮和化爆两种加载手段。采用空气炮标定时，冲击波是通过使用头部是平的炮弹来碰撞靶板而产生。压缩空气炮有一个 5700mm 长的炮管和内径为  $\phi 100^{+0.05}$ mm 的炮膛，炮弹的外径  $\phi 100^{-0.05}$ mm，炮弹长度为 180mm，最高弹速可达 600m/s。根据需要可采用塑料

炮弹或金属炮弹,对塑料弹来说,碰撞板是贴在炮弹上的,对金属炮弹而言,碰撞板就是炮弹的头部。由于采用精密的机械加工,炮管内径和炮弹外径公差很小,并且炮弹本身比较长,这就使得炮弹在炮膛内飞行时稳定。因此炮弹撞击靶板时,碰撞板与靶板的倾角就较小,两者的平行度得到了较好的保证。炮弹的平行度和弹速是用电探针测试的,使用的仪器是E324计数器。

测试装置如图5所示,图中靶板材料为116铝(或有机玻璃),尺寸为 $\phi 135 \times 4 \text{ mm}$ ,四根测试炮弹端面平行度的电探针(a、b、c、d),电探针e和f为测量弹速的探针。

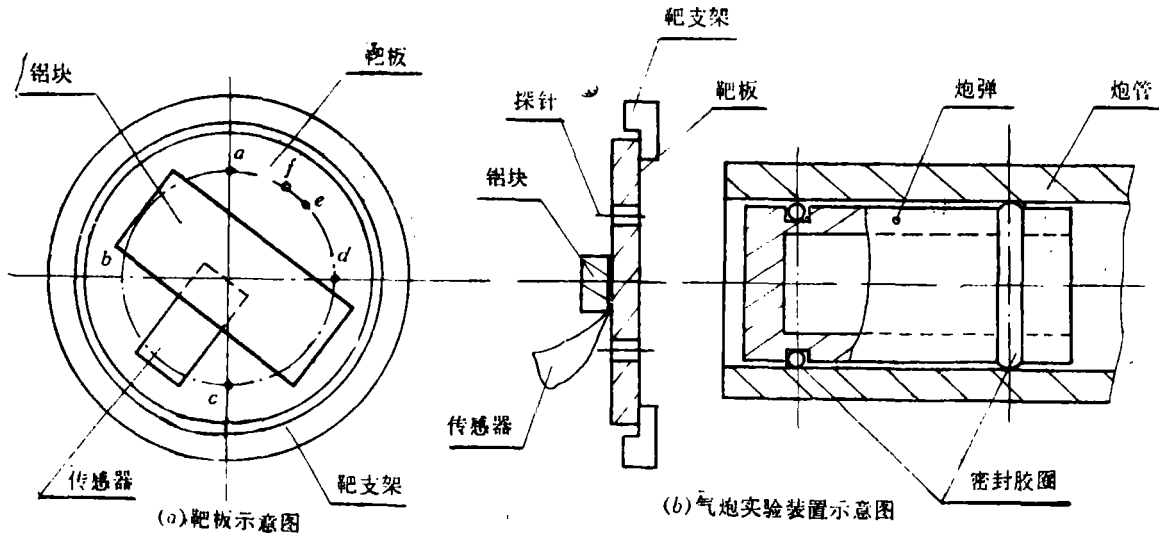
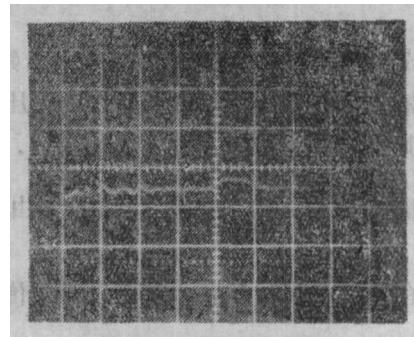


图5. 气炮测试装置示意图

锰铜压力传感器贴在靶板后面的中心位置,然后在锰铜压力传感器上面再贴一块与靶板材料相同的试件,测得的冲击波压力剖面如图6所示。

根据测得的弹速和各种靶板材料的雨贡纽曲线,计算出靶板材料中冲击波压力剖面的峰值。

采用化爆方法标定时,冲击波是由爆轰波通过衰减片或者由飞板碰撞而产生的。在测压装置的靶板上装有锰铜压力传感器和光探针,可在测试冲击波压力剖面的同时,测定冲击波速度和自由表面速度。测试装置见图7a,其中光探针是用来测定冲击波速度和自由表面速度,有机玻璃的底面上粘有硝酸银颗粒,两侧的两块有机玻璃紧贴在靶板上,它在冲击载荷下发出的光信号作为测试的基准信号。根据冲击波到达中间铝块和有机玻璃介面所发出的光信号与基准信号的时间差,就可以分别算出冲击波速度和自由表面速度。图7b是装置中光探针部分的剖面图。右侧两条狭缝测出冲击波速度;左侧两条狭缝测出自由表面速度。



$P = 44 \text{ kb}$ ,  $(0.1 \text{ v/div}, 1 \mu\text{s/div})$

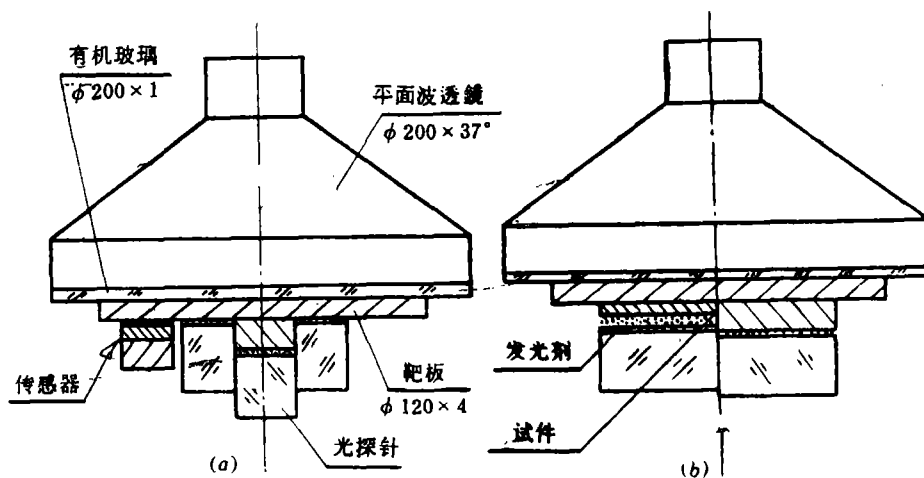
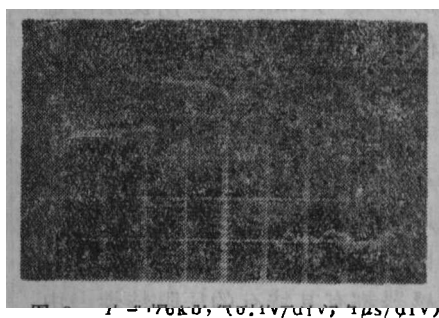
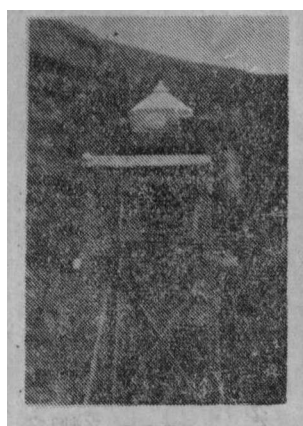


图 7. 化爆实验装置示意图

测试时，锰铜压力传感器放置在与测自由表面速度高度相同的(3mm)铝块（或有机玻璃）试件上，传感器上再粘结一块同样材料的试件，但高度为6mm，测得的压力剖面如图 9 所示。

根据测得的冲击波速度和自由表面速度，就可以计算出试件中的冲击波压力剖面的峰值。



对不同的冲击波压力，装置有所改变，图 7 为测试 150kb 压力时的装置。压力低时要加衰减片；压力高时要加主药柱；压力更高时，则要用飞板增压。冲击波速度和自由表面速度是用 GSI 高速摄影机来测试的。

在整个标定实验过程中，锰铜压力传感器电阻的相对变化是通过测量传感器上电压的相对变化来确定的，所使用的仪器为 CS-2100 示波器，照相机为苏制卓尔基 6 型。

#### 四、测量结果和讨论

根据使用空气炮和化爆方法所得到的测量结果,我们可以作出锰铜压力传感器在12kb~420kb压力范围内的标定曲线,标定曲线的形式为:

$$P(10\text{kb}) = 0.24 + 35.70 \left( \frac{\Delta R}{R_0} \right) + 5.85 \left( \frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 - 3.18 \left( \frac{\Delta R}{R_0} \right)^3,$$

实验数据与关系式的标准偏差为3%。

在上述的计算过程中,用到的有关材料的雨贡纽方程  $D = C_0 + \lambda u_p + s u_p^2$  的参数列于表 I 中。

有关材料的雨贡纽参数

表 1

材 料	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	$C_0(\text{mm}/\mu\text{s})$	$\lambda$	$S(\mu\text{s}/\text{mm})$
有机玻璃	1.184	2.87	1.88	0
铝	2.78	5.30	1.55	-0.1442[7]

为了进行比较,在图10中同时画出 Канелб[3] 等和 Vantine 等[4] 所标定的曲线。至所以列出他们所标定的曲线,主要是因为他们与我们所标定的压力范围相当。Канелб等标定的压力范围是5.8~46.5万巴, Vantine 等所标定的压力范围是1.0~40万巴。

从图中可以看出,我们的标定曲线接近于 Канелб 等[3]的标定曲线,这是因为我们使用的锰铜合金成份(含11~13% Mn, 2~3% Ni)与 Канелб 等所使用的锰铜合金成份(含12.17% Mn, 3.26% Ni)相近,而与 Vantine 等所使用的锰铜合金成份(含9.5% Mn, 4% Ni)相差较大。

当然,锰铜的压阻特性除了与锰铜的成份有关以外,还与绝缘材料、元件的制做过程等因素有关。因此,对于每一种锰铜压力传感器都有其特有的压阻特性。由于上述原因,所进行的比较只能是定性的。

从标定实验中发现,用氟化乙烯丙烯作为粘结剂,聚四氟乙烯作为绝缘层来封装锰铜元件是较为成功的。在压力低于

100kb 的情况,我们使用总封装厚度(包括锰铜箔本身厚度)为0.1mm的传感器就能

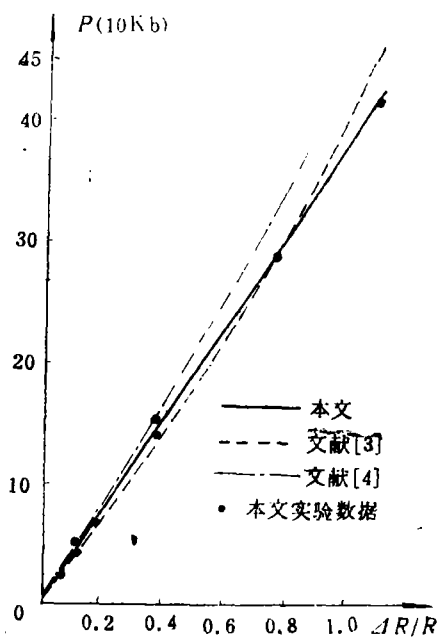
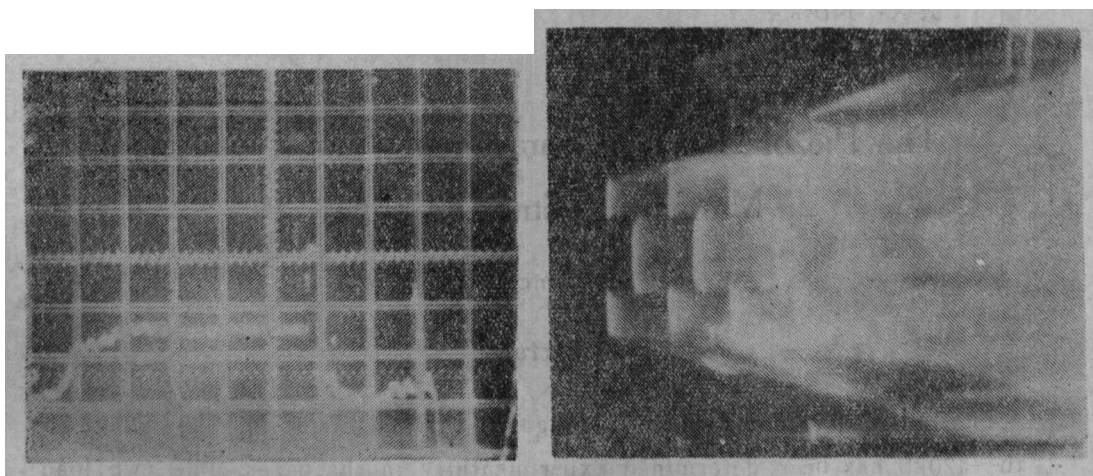


图 10. 锰铜传感器标定曲线

记录完整的冲击波压力剖面（持续时间大于2微秒），这对于一般用其它材料封装的锰铜传感器是难以实现的。即使在较高的压力下，用这种材料封装的锰铜传感器也是比较好的。我们在整个标定过程中，使用的锰铜传感器的总厚度不超过0.2mm。由于使用的传感器比较薄，所以测得的结果要比使用较厚的传感器精确。然而，聚四氟乙烯和氟化乙烯丙烯在高压下仍然流动性很高，为了防止元件边缘的二维流动引起短路和电击穿现象，绝缘厚度不能太薄。特别是在测量炸药爆轰波的压力剖面时，由于元件和炸药产物之间的电导路程很短，电导面积等于元件处在炸药中那部分表面面积，电导路程上的电阻仍然很低。这时，锰铜传感器的封装厚度（绝缘厚度）要适当加厚。我们曾用总厚度为



(0.1V/div, 1 $\mu$ s/div)

0.2mm（锰铜片厚为0.015）的锰铜传感器测量TNT爆轰波的压力剖面，记录时间约1微秒。另外，在标定实验中，虽然记录到高达420kb的压力峰值，但是持续时间很短，这是绝缘层厚度太薄而造成的。因为我们使用的传感器的总厚度只有0.2mm。文献[3]和[4]虽然分别在465kb和400kb的高压下，对锰铜压力传感器进行标定，但是他们没有给出实验的示波记录，所以不知道他们的传感器在高压下的寿命如何。

另外，从实验中我们还发现，实验装置的安装对传感器的寿命有很大影响。例如，把试件的边缘倒角会增加传感器寿命，因为倒角消除试件对传感器引线的剪切效应

## 五、结束语

参加本工作的同志有：王诚洪、陈生玉、鲍武臣、杨建民、张振宇。本文由王诚洪执笔整理。

洛阳89002部队四分队的同志与我们一起做了化爆实验和空气炮实验；锰铜压力传感器的刻蚀工作是由我校四〇八实验室的同志承担的。五系刘成民同志参加了传感器封装工作；标定工作得到薛鸿陆教授的关心和支持，我们在此表示衷心地感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Dougias D. Keough., AD—839983.
- [2] L. M. Lee, J.A.P.Vol.44.,No,9, 1973.
- [3] Г.И.Канель, Г.Г.Вахцгова, А.Н.Дрецин, фГБ.14.2. 1978.
- [4] Harry Vantine et al, Rev.Sci. Instrum 51(1), 1980.
- [5] 陈生玉, 王诚洪: “动态压阻测试技术”, 工学学报, 1978—4.
- [6] 王诚洪, “爆轰压力的锰铜压阻量计测定”, 1980, 全国第一次高能量密度会议, 长沙。
- [7] UCRL—50108, 1966.

## The Piezoresistance Character of Shock-loaded Manganin Stress Gauge

Wang Chenghong et al

### Abstract

The calibration curve of the manganin stress gauge in the range of 12kb—420kb has been determined experimentally in the paper. The two load techniques of gas-gun and chemical explosion are used in the experiment. The manganin stress gauge is encapsulated by heating and pressing with polytetra-fluoroethylene(PTFE) as the dielectric layer and flucroethylene propylene(FEP) as the bonding agent.