

新型高灵敏度动态压力传感器 — 镱 压 阻 传 感 器

戴 溪

提 要 本文给出了采用国产稀土金属元素镱 (Yb, Ytterbium) 作为动态压力传感器的实验结果, 实验是分别利用炸药爆炸加载装置和在本实验室的四万焦耳电炮装置上进行的。与锰铜压阻传感器、碳压阻传感器在相应装置上所得数据作了初步比较。结果表明, 镱作为动态压力传感器比锰铜和碳压阻传感器灵敏度高, 使用的压力范围可低至千巴。

一、引 言

研究材料在强动态载荷下的特性一直是人们十分感兴趣的课题。尤其是随着现代科学技术的发展, 各种巨型激光器和高功率的强流相对论性带电粒子束的出现, 以及它们与物质相互作用的机制和效果, 如产生能量沉积、形成热击波、造成破坏效应等更为人们所关注。人们采用各种最先进的技术对此进行研究, 测量热击波的压力对认识和了解材料的本构关系和破坏机制有着十分重大的作用和意义。现今广泛采用着埋入式压阻传感器。它的特点是体积小, 能直接测量出材料在强动载作用下内部任一位置的压力历史, 测量系统简单、工作可靠。

文献 [1] 中指出可以作压阻传感器的材料有锰铜、碳、钙、锂、铟、铅、镉、铋、和镱等, 其中镱的压阻系数最大, 灵敏度最高, 还能用于非一维流场的环境, 特别是在千巴压力范围内是如此, 而这正是最容易发生材料断裂破坏及研究材料本构关系很感兴趣的压力范围。在国外, W. Smith 等 [2] 已把镱制成传感器用于实验室的研究, 并在美国内华达核试验场测量出模拟核爆冲击波条件下各种材料的压力—时间关系。

本文给出了用国产原材料制作的镱压阻传感器分别在炸药爆炸加载和电炮加载条件下进行实验的情况, 证明镱作为一种新型的动态高压测压元件是十分有前途的。

二、动载实验

1. 炸药爆炸加载实验

实验装置：炸药爆炸加载实验装置（如图 1 所示）是由电雷管、传爆药柱、直径为 100mm 的压装炸药平面波发生器、直径 100mm TNT 主药柱、泡沫塑料、铜、有机玻璃组成的衰减层，及埋在有机玻璃中的压阻传感器组成的。

传感器采用四端引线形式，由一个 5 安培恒流源向传感器供电，用 CS-2100 型 100MHz 示波器记录。镱传感器的初始电阻为 0.2 欧姆。

为了与锰铜传感器对比，在同一测压剖面上安置了一个镱传感器和一个锰铜传感器。锰铜传感器初始电阻为 0.2 欧姆。

装置的具体尺寸（厚度，mm）如表所示。

表 1

装置号	TNT 主装药	泡沫塑料	铜板	有机玻璃
I	10	10	10	9.9
II	20	/	20	8.04

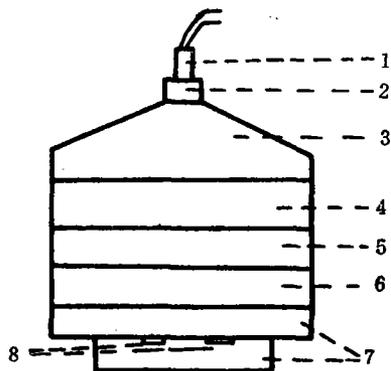


图 1. 炸药加载实验装置

1—电雷管，2—传炸药，3—平面波发生器，
4—主药柱，5—泡沫塑料，6—铜，7—有机玻璃，8—传感器。

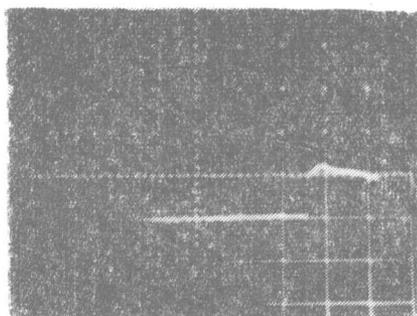
实验测量结果如表 2 所示。

表 2

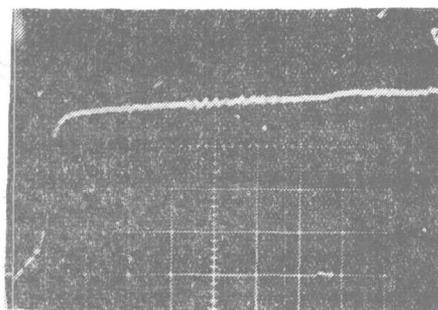
装置号	镱传感器 $\frac{\Delta R}{R_0}$	锰铜传感器 $\frac{\Delta R}{R_0}$	压力 P (千巴)
I	0.7	0.025	10
II	0.28	0.10	40

锰铜压阻系数 $\alpha = 0.00251/\text{千巴}$ ，计算压力的公式如下：

$$P = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)$$

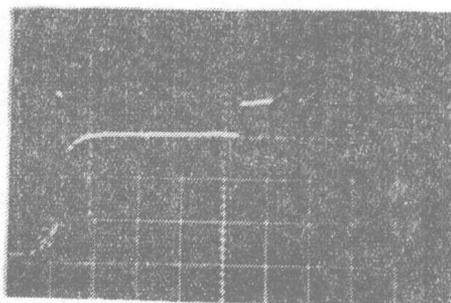


a) 镱传感器的波形
垂直 $0.5\text{V}/\text{div}$ ，水平 $2\mu\text{s}/\text{div}$

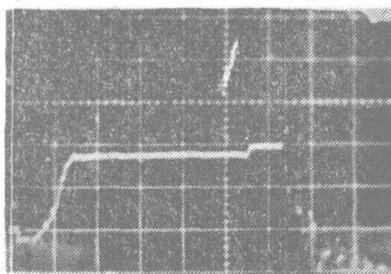


b) 锰铜传感器的波形
垂直 $0.1\text{V}/\text{div}$ ，水平 $2\mu\text{s}/\text{div}$

图 2 I 号装置波形照片



a) 镱传感器的波形
垂直 $0.2\text{V}/\text{div}$ ，水平 $2\mu\text{s}/\text{div}$



b) 锰铜传感器的波形
垂直 $0.2\text{V}/\text{div}$ ，水平 $2\mu\text{s}/\text{div}$

图 3 II 号装置波形照片

2. 电炮加载实验

实验装置：该实验所用的电炮装置是本文作者所在实验室研制的，它的储能为四万焦耳。电炮装置是由直流高压充电系统、电容器组、真空触发开关、爆炸箔、飞片、靶板、操作系统组成的。电炮装置的电容器容量为53微法，最高工作电压为40千伏，内电感为40毫微亨，爆炸箔用0.04mm厚铝箔制成工字形桥箔，桥部 $35 \times 35(\text{mm})$ ，飞片用2mm厚商用玻璃钢制成直径35mm圆片状。镱压阻传感器用国产618环氧树脂粘在两层玻璃钢靶板之间。飞片与靶板间距离用有机玻璃支架控制在6mm左右（见图4所示）。实验时电容器充电电压为12kV，镱传感器初始电阻为 0.1Ω ，由3.5A恒流源向传感器供电。用100MHz的SS-5711型示波器记录。

在相同条件下，用碳压阻传感器作对比实验，碳传感器的初始电阻为 65Ω 。电炮实验测量结果为：

传感器	镍	碳
$\Delta R/R_0$	0.054	0.068

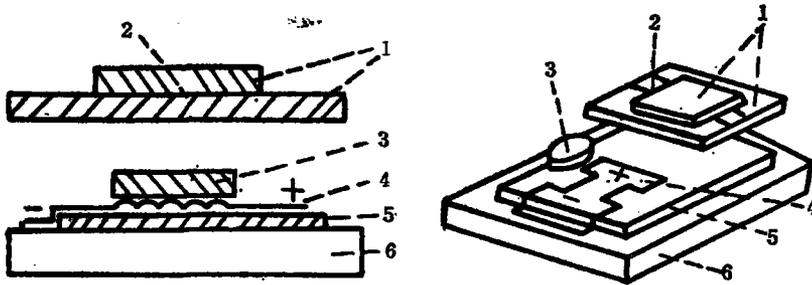
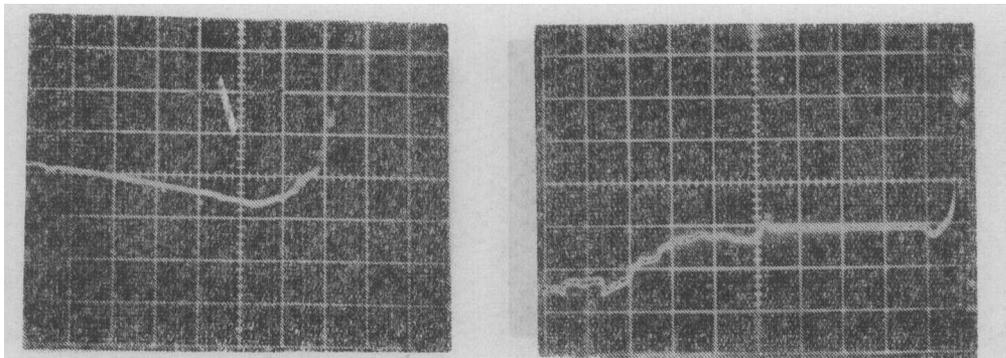


图4 电炮加载实验装置

1—靶板, 2—传感器, 3—飞片,
4—爆炸箔, 5—绝缘衬底, 6—接地底板



a) 镍传感器波形

垂直 0.1V/div, 水平 5μs/div

b) 碳传感器波形

垂直 50V/div, 水平 10μs/div

图5 电炮实验结果照片

9. 电雷管加载实验

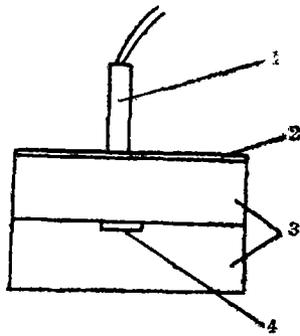
实验装置：由 8 号电雷管、铝箔屏蔽层、有机玻璃衰减层、传感器（如图 6）。有机玻璃厚度大于 10mm，实验的典型结果是 $\Delta R/R_0 = 0.143$ 。

实验记录的波形是传感器通过恒定电流后在两端产生的电压降。当压力作用于传感器上时，传感器自身电阻随压力不同产生相应的变化；这种变化产生一个电压的变化，叠加在初始电阻产生的电压波形上。

$$V_0 = I_0 R_0 \quad (V_0, I_0, R_0 \text{ 分别为初始电压、电流、电阻})$$

$$\Delta V = I_0 \Delta R \quad (\Delta V, \Delta R \text{ 是电压、电阻的变化值})$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta R}{R_0}$$



1. 8号电雷管; 2. 0.1mm厚铝箔;
3. 有机玻璃; 4. 传感器。

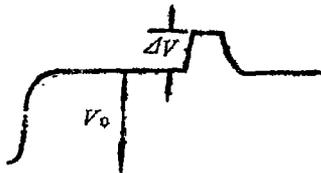
图6 雷管加载装置

当压力与 $\Delta R/R_0$ 成线性关系时;

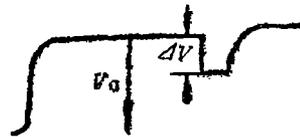
$$\alpha P = \frac{\Delta R}{R_0}, \quad \therefore P = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\Delta R}{R_0}$$

当 $P = f(\Delta R/R_0)$ 时, 就用实验测出 $P \sim \Delta R/R_0$ 标定曲线, 用于测压力时计算压力值。 $\alpha > 0$ 为正压阻系数, 对应材料为 MnCu, Yb 等金属或合金, $\alpha < 0$ 为负压阻系数, 对应材料为碳压阻元件。

实验波形为图8的a)、b)。



a) 正压阻系数波形



b) 负压阻系数波形

图8

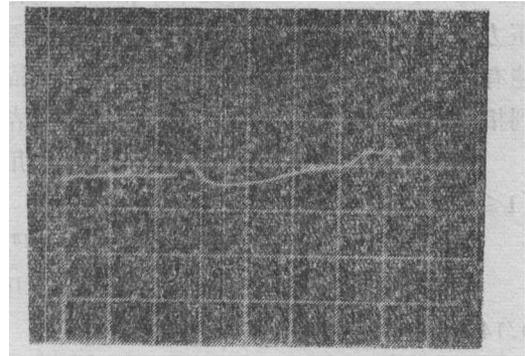
三、结果讨论

本文由 I 号装置测得: 锆传感器的 $\Delta R/R_0 = 0.7$, 由锰铜传感器测得对应压力为: $P = 10 \text{ kb}$.

由 D.Keough^[3] 给出的数据, 锆的动态压力与 $\Delta R/R_0$ 的关系是:

$\Delta R/R_0$	0.65	0.90	4.05
$P(\text{kb})$	9.6	10.8	39.5

在 10kb 压力点, 我们的结果与 D.Keough 的数据基本一致。在这个压力水平锰铜 $\Delta R/R_0 = 0.025$, 锆的电阻相对变化率是锰铜的 28 倍。



垂直 0.2V/div, 水平 2μs/div

图7 雷管加载实验波形

本文由Ⅰ号装置测量的压力 $P > 39.5 \text{ kb}$, 这时镱的 $\Delta R/R_0 = 0.28$, 出现反常现象。在 P.C.Souers^[4] 的文章中指出: 镱在室温静高压下, $P = 40 \text{ kb}$ 时, $\Delta R/R_0 = 11$, 压力再增大, 镱的电阻率就急剧下降到室温常压电阻率的79%。这是由于在 40kb 附近镱有一个多晶相变点, 相变是由面心立方晶格转变为体心立方晶格。我们的实验正好达到相变的压力范围, 就造成了反常的实验结果。

对于电炮实验和雷管加载实验, 我们用 W.Smith 给出的镱的标定曲线计算压力 ($1 \leq P \leq 7 \text{ kb}$)

$$P(\text{kb}) = 0.922[1 - e^{-52.585(\Delta R/R_0)}] + 9.812(\Delta R/R_0).$$

电炮实验镱的 $\Delta R/R_0 = 0.054$, 计算压力为 $P = 1.4(\text{kb})$. 雷管加载实验 $\Delta R/R_0 = 0.143$; $P = 2.3(\text{kb})$

在与镱相同条件下, 在电炮加载实验中, 用碳压阻传感器测得的 $\Delta R/R_0 = 0.068$, 由于不是同一发实验, 所测压力不完全相同。根据 P.Kreh^[5] 给出的低压冲击波的碳压阻标定曲线, 计算碳压阻传感器的测量压力(0.5~97千巴)

$$P(\text{kb}) = -0.732 + 47.766\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right) - 312.908\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2 \\ + 1543.2574\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^3 - 2744.064\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^4 + 1850.629\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^5$$

计算得碳压阻器测量压力为 $P = 1.5(\text{kb})$ 。

由实验测得的压力波形可知, 镱和碳传感器的压力信号都是出现在示波器扫描线的同样时刻(48 μs 处), 虽然不是同一发实验(在电炮加载时), 压力峰值也是接近的。碳压阻传感器的初始电阻为镱的300多倍, 因此碳压阻传感器输出信号的信噪比也是镱的300多倍, 即使这样, 镱传感器仍然能显示出低压力信号, 说明它的灵敏度很高。在这里要特别强调的是, 为了保证镱阻元件值的稳定, 它的制造和封装技术与工艺是至关重要的。通过二年的摸索和实践, 我们采用了专门的技术措施, 取得了较好的效果。

参加本实验的还有谢柏林。在炸药加载实验中得到鲍武臣、杨建民的大力协助, 在传感器加工方面得到了金星的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Wentorf, R. H. Jr, Advances in High-Pressure Research, V. 4, Ed, bV, R. H. Wentorf, Jr, London Academic pr., (1974), P.71.
- [2] Smith, W, Dynamic Measurements of Stress Pulses in Tuff at Nevada Test Site, AD 740146(1971).
- [3] Keough, D, Development of a High-Sensitivity Piezo-Resistive Shock Transducer for the Low Kelobar Range, AD 709438(1970).
- [4] Souesu, P.C, Semiconducting Region of Ytterbium, Science, Vol, 140, (3), (May 1963).
- [5] Krehl, P, Measurement of Low Shock Pressures with Piezoresistive Carbon, Rev, Sci, Instrum, Vol, 49, (10), PP, 1477-1484(1978).
- [6] R.Bailly-Salins, Thermoshock Generation in Solide Irradiated by an Intense Pulsed Relativistic Electron Beam, High Pressure Science and Technology, V, 2 Ed, bV, B.Vodar and Ph. Marteau, Oxford, Pergamon, (1980), p, 986.

New Type High-Sensitive Dynamic Pressure Transducer-Ytterbium Piezoresistive Transducer

Dai Xi

Abstract

The experimental results of adopting the Chinese rare-earth element Ytterbium as the dynamic pressure transducer are given in this paper. The experiment was done on an electric gun (40kJ) in our laboratory and by using the explosive loading device independently. Initial comparison has been made with those data derived from the manganin piezoresistive and carbon piezoresistive transducers in corresponding devices. The results show that as for the dynamic pressure transducer, Ytterbium has a higher sensitivity than manganin and carbon ones. The pressure range for Ytterbium transducer can be as low as kb.