

气炮用锰铜应力计

胡泽根 吴光华 曹述生
(西北核技术研究所)

摘要 本文介绍一种气炮用锰铜应力计测量系统,并给出了两种锰铜计的标定实验数据和曲线。

关键词 气炮, 锰铜计, 压阻特性。

1. 前言

六十年代初, Fuller P. J. 和 Price J. H.^[1,2] 将锰铜丝用作动态应力传感器之后的二十多年里,许多研究人员对锰铜计的冲击响应、制作工艺、压阻特性、滞后效应等进行了广泛深入的研究,并成功地将其应用于炸药爆轰、材料本构关系、动态断裂、地下核爆炸等的测量中。锰铜应力计的压阻系数很低,为获得足够的信噪比,工作应力通常都大于2 GPa。八十年代初, Rosenberg Z.^[3,4] 应用气炮装置对锰铜计低应力段的性能进行了研究,最低应力做到0.5 GPa,并在材料的动力学实验中获得良好测量结果。他们指出:在应力低于1.5 GPa时,锰铜应力计的压阻系数是个常量;应力在1.5~18.1 GPa区间,锰铜计的压阻系数是变化的。

为满足 $\phi 57$ mm 气炮上材料力学实验的需要,我们建立了一套可测应力低至0.1 GPa的箔式锰铜应力计测量系统。在0.1 GPa至10 GPa应力下,对两种锰铜应力计作了标定实验。并按 Rosenberg Z. 的方法对测量数据作了处理。

2. 自制锰铜应力计

自制锰铜应力计是螺旋形对称引线的箔式计,如图1所示。锰铜箔厚度为0.01 mm,敏感元件布设区最大直径为5 mm,元件线条宽和间距皆为0.2 mm,用0.02 mm厚的聚四氟乙烯薄膜包封成型后的锰铜应力计总厚度为0.08 mm。锰铜应力计原材是锰铜合金带,其主要成分重量百分比为:铜85~87%;锰11~12%;镍2~3%。

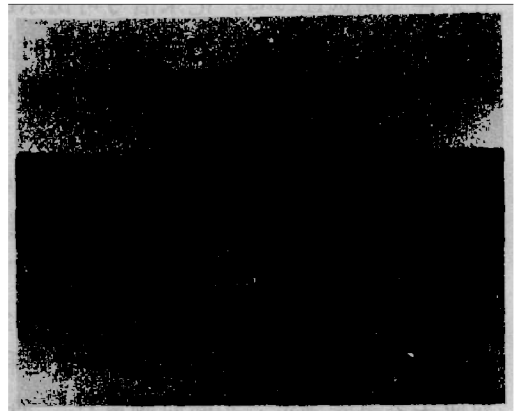


图1 螺旋形对称引线箔式锰铜计

3. 实验技术

1. 测量系统工作原理简述

气炮实验装置和测量系统见图2。其工作过程如下:先将过渡段粘接在弹体端面,然后

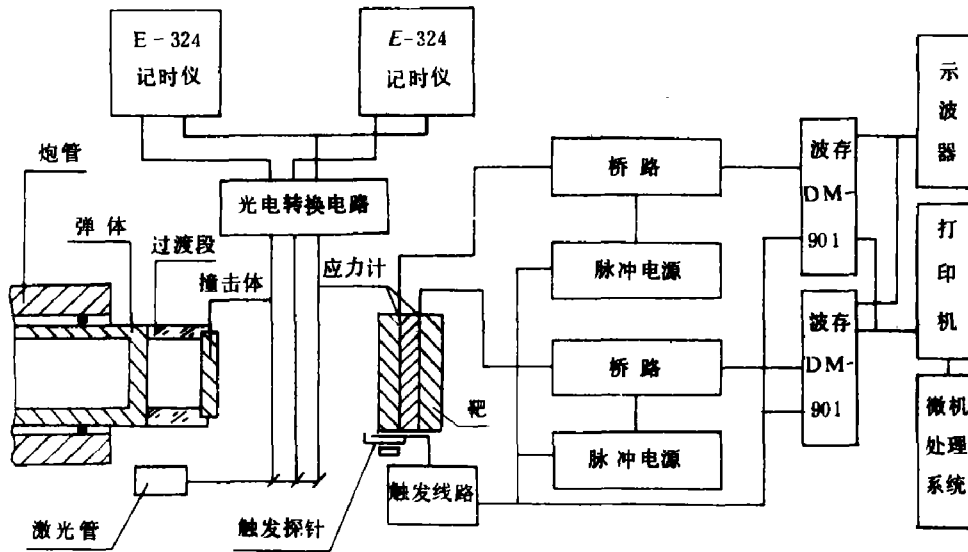


图2 实验装置和测量系统示意图

再将厚度在 3 ~ 13 mm 之间的冲击体粘接在过渡段上，装配成一发实验弹。冲击体在飞行中依次遮着激光管发出经分光镜反射的三束光，在相应时刻光电转换电路输出三个记时负脉冲触发两台 E-324 记时仪，从而测出冲击体击靶平均速度，其测速精度优于 0.5%^[5]。本次实验集中在 $\phi 57$ mm 轻气炮的低速段，速度范围是 50 ~ 600 m/s。

冲击体击靶前先接通触发探针，触发线路输出一个与之相应的正触发脉冲启动两路脉冲电源和两台采样速率为 100 MHz 的波形存储器。冲击体与靶相碰（碰撞角小于 0.5 m rad）在靶中产生平面应力波。调节触发探针的长度，使接通时间提前应力波到达第一应力计（7 μ s），这样就能保证波形存储器完整地记录前后布置的两个应力计的压阻信号。实验中波存采样周期选置 10 ns。记录信号可由示波器回放显示，也可由打印机输出数据。根据数据判读出应力波在靶中两应力计间的传播时间差，从而测定应力波速，其测量精度优于 2.5%。数据亦可输入微计算机处理系统，以便处理波形和使波形再生。

2 脉冲电源和桥路

根据实验低应力，小讯号测量的特点，选用了如图 3 所示具有四个对称平衡臂的恒压源式脉冲电源线路。工作过程如下：触发线路输出的正阶跃脉冲使可控硅 3CT5F 导通，电容 C 通过它给桥路充电，同时可控硅 3CT7K 导通，继电器 J 工作，常闭触点断开。继电器触点动作时间为 4 ms，足以保证力学作用全过程（约为 5 μ s）结束。在整个测量过程中，脉冲顶降小于 0.5%。桥路电压 U_0 的测量是利用测量电容充电电压 U_c 代替的。 $U_0 \sim U_c$ 之间一一对应关系事先测定，实验时测量 U_c ，查出 U_0 ，其测量精度优于 1%。锰铜应力计的电阻变化率 $\Delta R/R_1$ 与测量压阻讯号 ΔU 和测量系统中电路各参数的关系为

$$\Delta R/R_1 = R_0^2 \Delta U / [R_1 R_2 Z R_{34} (R_0 - R_2 R_3) U_0 - R_1 R_0 R_{03} \Delta U] \quad (1)$$

式中， $R_{34} = R_3 + R_4$ ， $R_0 = (R_3 + R_4)(Z + R_2) + R_3 R_4$ ， $R_{03} = (R_1 + R_2 + R')R_0 - R_2^2 R_{34}$ ， U_0 ——

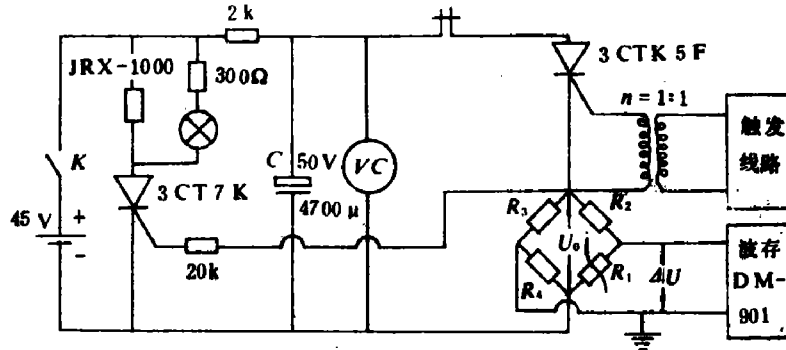


图3 恒压电源线路

桥路电压, R_1 ——锰铜应力计初始电阻值, R' ——锰铜应力计和桥路之间引线电阻 (本实验为 0.04Ω), ΔR ——应力波作用下锰铜应力计的电阻变化量, Z ——讯号传输电缆特征阻抗 (实验电缆为 SYV-50-2-2, 其 $Z = 50 \Omega$)。

3. 锰铜应力计的标定

由于锰铜应力计的压阻系数与锰铜箔的成分, 杂质元素含量及冶炼, 制作过程等因素有关, 因此, 每生产一批锰铜计后均应进行标定, 待测定其压阻特性后才能用于材料动力学实验中使用。锰铜应力计标定所需平面应力波是用 $\phi 57 \text{ mm}$ 轻气炮作平面对称碰撞获得的, 其应力 σ 为

$$\sigma = \rho_0 D u \tag{2}$$

式中, ρ_0 ——材料平均初始密度, D ——击波速度, u ——粒子速度。密度 ρ_0 用感量为 0.1 mg 的 TG-4023 型天平, 水浮法测定。由于是对称碰撞, 粒子速度 u 为碰撞弹速的一半。击波速度的确定, 在低压段依据文献 [6] 中 $D \sim u$ 关系数据表, 用内插法查出; 高压段利用 H-62 铜作实验材料, 由本测量系统测定。

4. 结果与讨论

在标定实验中, 对自制锰铜应力计在 $0.105 \sim 9.57 \text{ GPa}$ 范围内, 对 MBP-5-60BA 锰铜应力计在 $0.085 \sim 10.11 \text{ GPa}$ 范围内作了标定。有机玻璃在低压段的实验波形见图 4, H-62 铜在高压段的实验波形见图 5。自制锰铜应力计的标定实验数据见表 1, MBP-5-60BA 锰铜应力计的标定实验数据见表 2。

从标定数据看出, 低压 (小于 1.5 GPa) 部分压阻系数变化不大, 可以当成一个常量。而应力大于 1.5 GPa , 则是呈规律性的增大。依据数据的这一特征, 采用 Rosenberg Z. 的方法, 在 1.5 GPa 以下用线性关系表征锰铜应力计的压阻特性, 两种锰铜应力计的压阻系数如下

自制锰铜计

$$K = \frac{1}{\sigma} \frac{\Delta R}{R_1} = 2.45 \times 10^{-2} \Omega / \Omega \cdot \text{GPa} \tag{3}$$

MBP-5-60BA

$$K = \frac{1}{\sigma} \frac{\Delta R}{R_1} = 2.46 \times 10^{-2} \Omega / \Omega \cdot \text{GPa} \tag{4}$$

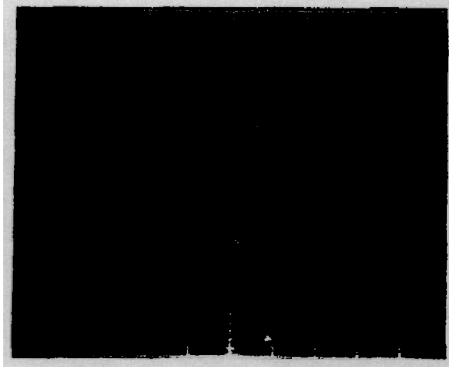


图4 435炮波形

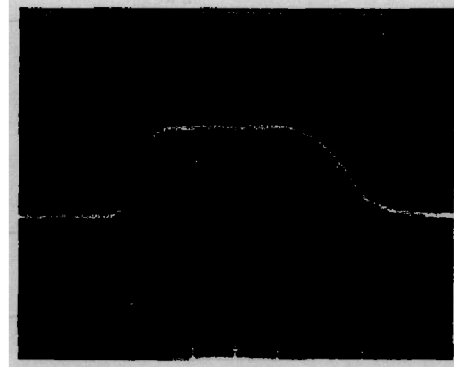


图5 411炮波形

表 1 自制锰铜应力计实验数据表

炮号	实验材料	碰撞速度 (m/s)	压力 (GPa)	桥压 (v)	讯号幅度 (mv)	电阻变化率 ($\Delta R/R$)	压阻系数 $\times 10^{-2} \text{GPa}^{-1}$	备注
452	PMMA	64.1	0.105	44.3	21.6	0.0025	2.42	* 弹速 w
432	PMMA	142.0	0.243	44.9	52.0	0.0060	2.47	查气炮
430	PMMA	215.4	0.369	45.0	84.0	0.0093	2.52	$p-w$ 曲
429	PMMA	300.8	0.542	45.1	116.8	0.0135	2.48	线得到
431	PMMA	395.2	0.720	44.9	153.6	0.0177	2.46	$Z = 11.58$
434*	PMMA	588	1.08	44.5	132	0.0263	2.43	Ω
461	PMMA	604	1.13	44.5	228	0.0275	2.43	
435*	PMMA	710	1.32	44.6	160	0.0327	2.48	
450	H-62	104.2	1.57	44.7	336	0.040	2.55	
449	H-62	146.5	2.26	44.7	480	0.059	2.59	
389	H-62	197.2	3.09	45.0	672	0.081	2.62	
460	H-62	258.6	4.16	44.6	880	0.109	2.63	
447	H-62	283.5	4.59	44.6	976	0.123	2.68	
451	H-62	588.5	9.57	44.7	2000	0.268	2.80	

在 1.5 GPa 以上、用最小二乘法拟合得三阶曲线为：自制锰铜应力计

$$\sigma = 0.04 + 38.51 \left(\frac{\Delta R}{R_1} \right) - 9.36 \left(\frac{\Delta R}{R_1} \right)^2 - 6.18 \left(\frac{\Delta R}{R_1} \right)^3 \quad (5)$$

MBP-5-60BA 锰铜应力计

$$\sigma = 0.12 + 36.19 \left(\frac{\Delta R}{R_1} \right) - 6.33 \left(\frac{\Delta R}{R_1} \right)^2 + 5.50 \left(\frac{\Delta R}{R_1} \right)^3 \quad (6)$$

标准偏差为 2%，误差主要来自应力计，测量仪器，波速、粒子速度、密度的测量和数据处

表 2 MBP-5-60BA 锰铜应力计实验数据表

炮号	实验材料	碰撞速度 (m/s)	压力 (GPa)	桥压 (v)	讯号幅度 (mv)	电阻变化率 $\Delta R/R$	压阻系数 $\times 10^{-2} \text{ GPa}^{-1}$	备注
453	PMMA	52.1	0.085	44.4	10.4	0.0021	2.47	• 弹速w 查气炮 p~w曲 线得到
384	PMMA	100.6	0.169	44.8	21.4	0.0042	2.49	
385	PMMA	112.7	0.190	44.8	23.2	0.0047	2.41	
381	PMMA	200.8	0.343	44.4	42	0.0085	2.45	
383	PMMA	209	0.357	45.2	44	0.0087	2.41	
375	PMMA	308.5	0.557	44.8	70.4	0.0142	2.51	
386	PMMA	311.2	0.562	44.8	71.2	0.0144	2.51	
457	H-62	52.6	0.790	44.6	100	0.0199	2.52	
378	PMMA	609.9	1.141	44.8	137.6	0.0276	2.42	
379	PMMA	609.5	1.140	44.8	137.6	0.0275	2.41	
428*	PMMA	700	1.30	45.0	160	0.0319	2.45	
436*	PMMA	730	1.38	44.8	168	0.0337	2.44	
455	H-62	104	1.57	44.6	204	0.0413	2.63	
445	H-62	133.2	2.05	44.8	268	0.0543	2.65	
442	H-62	144.9	2.24	44.7	288	0.0589	2.63	
444	H-62	155.4	2.36	44.8	300	0.0610	2.59	
441	H-62	207.5	3.29	44.7	432	0.0901	2.74	
456	H-62	208.4	3.30	44.6	432	0.0901	2.73	
439	H-62	300.1	4.89	44.5	624	0.134	2.73	
459	H-62	302.8	4.93	44.5	640	0.136	2.80	
446	H-62	589	10.11	44.8	1232	0.287	2.84	

理等环节。两种锰铜应力计的压阻特性见图6、图7。标定实验数据见表1、表2。

测量信号的前沿时间除与碰撞倾角、锰铜应力计厚度、测量系统频响有关外,还和实验材料有关。实验中,测量波形上升沿时间均在100~400 ns之内。

锰铜应力计在有机玻璃、铜和铝三种材料中的实验表明,只要安装时注意保持锰铜应力计与实验材料(铜、铝)之间良好绝缘,则锰铜应力计的生存时间能达到5 μs 以上。这对通常材料的动力学实验是必要的。

为使测量系统能在实验中获得良好的结果,对干扰源的抑制与回避,路际窜扰的消除,地电位和地电流干扰的防护及提高系统测量精度采取了多种有效措施。使测量系统信噪比大于20 dB,压阻系数标准误差约为4%。

实验中,我们观测到锰铜计的滞后效应在小于1.4 GPa时即基本消失。由于我们对锰铜计的研究还刚开始,今后还将对锰铜计的特性作进一步研究。

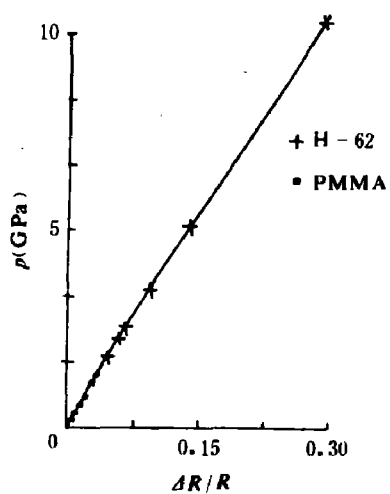


图6 MB P-5-60BA 压阻特性

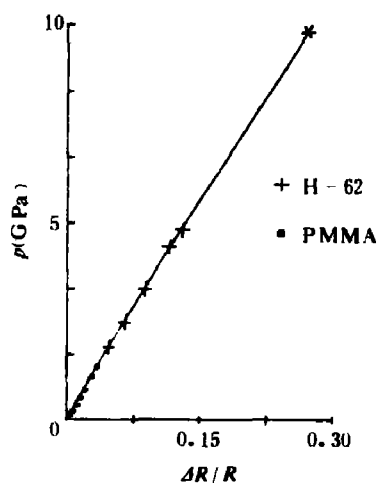


图7 自制锰铜计压阻特性

本项工作得到林俊德同志的指导。参加这项工作的有李孝兰、郑学峰、张喜华等同志，在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Fuller, P. J. A., Price, J. H., *Br. J. Appl. Phys.* **15** (1964), 751.
- [2] Fuller, P. J. A., Price, J. H., *Br. J. Appl. Phys.* **2** (1969), 275.
- [3] Rosenberg Z. et al., *J. Appl. Phys.* **51** (1980), 3702.
- [4] Rosenberg Z. et al., *J. Appl. Phys.* **52** (1981), 4000.
- [5] 史有程、刘凤琴, 爆炸与冲击, **6** (1) (1986), 71.
- [6] 李孝兰, 有机玻璃和玻璃钢低压动态特性实验研究, 私人通讯.
- [7] 吴国栋等, 爆炸与冲击, **3** (1) (1983), 79.

A MANGANIN GAUGE USED IN GAS GUN

Hu Zegen Wu Guanghua Cao Shusheng

(Northwest Institute of Nuclear Technology)

ABSTRACT A manganin gauge measurement system used in gas gun is introduced in this paper and a set of calibrated data and curves of manganin gauges are given.

KEY WORDS gas gun, manganin gauge, piezoresistance characteristics.