

# 薄膜式锰铜压阻计的动态标定

王长利<sup>1)</sup> 李 焰 刘文祥 王等旺 李 捷 王 惠

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要** 介绍了以飞片平面撞击标定某新型锰铜压阻计的过程及方法. 标定在  $\Phi 130$  mm 轻气炮上进行, 采用有机玻璃, Cu 和 W 3 种材料为飞片和靶板材料, 实现不同速度下的同种材料平面正撞击, 获得 0.66~25.4 GPa 范围的入射压力, 并利用几何修正和  $D-u$  关系修正两种方法对结果进行了修正, 给出了标定结果以及拟合曲线.

**关键词** 锰铜压阻计, 动态标定, 轻气炮, 应力波

中图分类号: O384.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)05-046-05

## DYNAMIC CALIBRATION OF THIN-FILM MANGANIN PIEZORESISTANCE GAUGES

WANG Changli LI Yan LIU Wenxiang WANG Dengwang LI Jie WANG Hui

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract** This paper discusses the dynamic calibration technique for a new kind of thin-film manganin piezoresistance gauge by means of planar impact. The calibration experiments were carried out on a  $\Phi 130$  mm gas-gun, with PMMA, Cu, and W as the materials of flyers and targets. The compact pressure was obtained in the range from 0.66 GPa to 25.4 GPa by the planar impact in different velocities. The experimental data are correlated by two kinds of methods, that is, geometry relation calibration and  $D-u$  relation calibration. The dynamic calibration and relation curves are obtained.

**Key words** manganin piezoresistance gauges, dynamic calibration, gas-gun, stress waves

### 引 言

锰铜压阻计被广泛地应用在平板撞击实验中测量材料中的应力. 锰铜压阻计既小又薄, 能较方便地嵌入被测样品材料内部而不明显影响原有压力场的分布, 因此, 被广泛用于炸药爆轰过程、材料动态响应等相关应力波剖面的测量中<sup>[1-2]</sup>. 作为动态传感器, 锰铜的主要优点是其压阻系数近似常值且与温度基本无关<sup>[3]</sup>. 由于不同批次的锰铜, 其成份有所不同, 锰铜压力传感器必须在标定压阻系数之后才能使用. 实验表明, 锰铜压阻计的响应与其所处的应力应变状态有关, 若锰铜压阻计满足一维应变条件, 那么同一组份的锰铜压阻计具有相同的压阻关系, 不同组份的锰铜压阻计压阻系数不同, 应分

别进行标定<sup>[4-5]</sup>.

实验室中, 对于 10 GPa 以上的压力通常采用平面波发生器 (高爆炸药) 或轻气炮来产生, 二者相比, 轻气炮的可控性、重复性、平面性都比平面波发生器好. 本文通过对飞片的材料和速度进行设计, 得到在 0.66~25.4 GPa 压力范围新型薄膜式锰铜压阻计的压阻关系.

### 1 标定原理

轻气炮在一维平面对称碰撞条件下, 可以产生峰值压力不衰减的方波, 实验中, 可以精确测量飞片速度以得到波后粒子速度, 因此可以用于薄膜式压

2011-01-28 收到第 1 稿, 2011-06-09 收到修改稿.

1) 王长利, 男, 1980 年生, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为爆炸与冲击动力学机电测试技术. E-mail: clivip0105@163.com

阻传感器的动态标定. 按对称碰撞原理<sup>[6]</sup>, 可知

$$u = v/2 \quad (1)$$

其中,  $v$  为飞片速度;  $u$  为靶中的粒子速度. 实验中, 将需要标定的锰铜压阻计埋设在已知厚度为  $L$  的靶的不同界面中, 通过测量应力波通过传感器的时间差  $\Delta t$ , 即可以得应力波的速度

$$D = L/\Delta t \quad (2)$$

按冲击波关系式, 靶中的碰撞应力

$$P = \rho_0 D u \quad (3)$$

其中,  $D$  为靶中应力波速度,  $\rho_0$  为靶材料的密度. 通过比较传感器的电量输出和应力波峰值压力就可以对传感器的动态灵敏度系数进行标定.

采用不同的材料对称碰撞, 可以在靶中产生不同的压力, 结合飞片的速度变化, 就可以实现标定实验所需要的压力范围. 实验中选择了有机玻璃 (PMMA)、硬铝 (LY12-Al)、铜 (Cu) 及钨 (W) 4 种不同的材料, 并对对称碰撞的压力进行了预估, 如表 1 所示. 根据表 1 中的材料和速度相结合的情况, 选择实验点来设计实验, 就可以在气炮上实现 0~30 GPa 的压力范围, 满足对锰铜压阻计的动态标定需要.

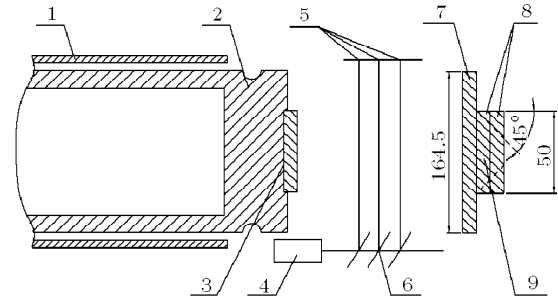
表 1 不同材料对称碰撞的弹速和应力数据理论估算

$v/(m \cdot s^{-1})$	$P/GPa$			
	PMMA	LY12-Al	Cu	W
100	0.148 0	0.772 0	1.779 2	3.932 4
200	0.305 4	1.561 8	3.625 3	7.984 0
300	0.472 0	2.369 5	5.538 2	12.154 7
400	0.648 0	3.195 1	7.518 0	16.444 6
500	0.833 3	4.038 5	9.564 6	20.853 7
600	1.027 9	4.899 8	11.678 0	25.381 9
700	1.231 8	5.778 9	13.838 3	30.029 3

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置及传感器安装

实验在西北核技术研究所的  $\Phi 130$  mm 轻气炮上进行, 如图 1 所示. 实验装置包括轻气炮、尼龙炮弹、由锰铜压阻计和碰撞材料制作的飞片和靶板、钢制靶架、飞片与靶板的测速探针及激光测速系统等<sup>[7]</sup>.



1. 炮管 2. 炮弹 3. 飞片 4. 激光管 5. 光电管 6. 光束分离镜 7. 首层靶板 8. 第二、三层靶板 9. 传感器布放区

图 1 实验装置示意图

锰铜压阻计阻值为约  $0.1 \Omega$ , 厚度约  $0.1$  mm, 靶板的第 1 个界面上安装两片待标定的锰铜压阻计, 在第 2 个界面上安装两片 PVDF 应力计, 作为时间探针. 在每个界面上安装两片传感器, 取得到时间的平均值, 可以提高时间测量的准确度. 实验中, 样品的安放要注意两点: 一是样品要正对飞片, 切忌让飞片撞击到靶托上; 二是样品表面一定要垂直撞击方向, 即所谓正入射, 这样的撞击才会在样品中产生沿样品法线方向传播的一维冲击波, 该冲击波只有压应力, 而无剪切应力. 若样品受到二维应力, 将难确定样品中应力的多少, 从而给传感器的标定带来困难.

### 2.2 靶板尺寸的确定

当平面冲击波进入样品之后, 由于实际样品的横向尺寸不可能无限大, 在边侧自由面要保持压力为零的边界压力连续条件, 因此在样品边侧的自由面上将发生侧向膨胀现象, 侧向膨胀现象对样品内的平面冲击波是一个稀疏干扰源, 它将以声速向样品内传播, 在它到达的范围内, 会导致冲击波强度的衰减, 并使原来的平面冲击波阵面变弯. 所以, 传感器应该放置在边侧稀疏尚未到达的平面波区间内. 如上所述, 为了避免边侧稀疏的影响, 样品的尺寸必须满足一定的宽厚比 (样品宽度和厚度之比), 才能保证传感器能够布置在冲击波的平面阵面范围内<sup>[8]</sup>. 因此, 在设计样品时, 为了保险起见,  $\alpha$  一般取  $45^\circ$ , 即样品的宽厚比的值应大于 2, 而所有传感器必需布置在卸载角之外. 根据上述的理论预估, 设计了飞片和靶板的材料及加工尺寸, 具体参数如表 2 所示.

表 2 飞片及靶材料、尺寸参数

材料	PMMA	LY12-Al	Cu	W
密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	1.18	2.773	8.37	17.45
厚度 /mm	4.0	4.0	4.0	4.0
直径 /mm	50	50	50	50

### 2.3 测量方法

系统采用恒流源法对锰铜压阻计的输进行测量, 测量电路如图 2 所示. 恒流源基本参数为: 输出电流 9A, 脉冲时间长度为 40μs, 较短的脉冲时间可以保证不会一次烧坏锰铜压阻计 [9-10]. 测量中采用阻抗 50Ω 的 SYV-50-3 电缆, 前端串联 50Ω, 后端并联 50Ω, 达到前后端的匹配, 消除信号振荡, 同时使示波器输入端的信号幅度在 1V 以内 (便于做电压偏移). 示波器输入阻抗设置为 1MΩ. 测量仪器为 Tek714L 示波器, 采样率 500 MHz. 弹速测量采用激光测速法, 相对误差小于 0.5%, 可以保证较高的粒子速度测量精度.

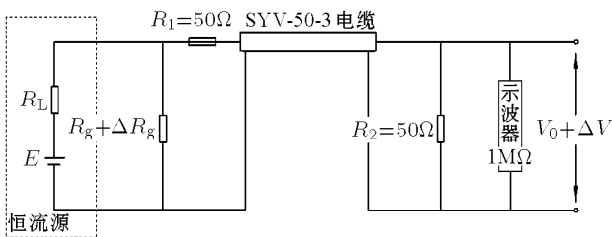


图 2 恒流源测量电路

为提高系统的测量精度, 测量过程中, 使用了电压偏移法. 按锰铜压阻计的灵敏度系数, 每 GPa 压力下锰铜压阻计输出电压增量约为 2%, 在 8bit 数字示波器测试条件下, 示波器满屏时数字化误差最小为 0.39%. 如果按照一般的测量方法, 对传感器输出电压的基线和电压变化部分同时显现进行测量, 则数字化误差就达 19.5%, 不能满足测试要求. 为了提高测量精度, 实验中采用了示波器偏移电压的方法, 可以对几个 mV 的信号进行比较精确地测量. 测量过程中, 首先对锰铜压阻计输出信号的基线幅度进行采集, 以确定示波器的电压偏移量, 在仪器中设置好偏移量后, 再设置示波器的垂直灵敏度, 以保证测到的信号增量达到示波器的一格以上, 提高测量的精度.

## 3 结果及分析

### 3.1 应力波速度的修正

#### (1) 几何修正

碰撞倾角不可避免, 在飞片与靶碰撞有一个较大角度时, 需要对应力波速度  $D$  进行修正. 根据几何关系可以推导出修正公式如下

$$\sin \theta = \frac{\Delta t}{S} D, \quad k = \cos \theta, \quad D' = kD \quad (4)$$

其中,  $S$  为同一截面两个传感器的间距,  $\Delta t$  为应

力波通过这两个传感器时间差,  $\theta$  为应力波与靶面的夹角,  $D'$  为修正后的应力波波速. 由于在同一平面中有两个传感器, 可以通过同一平面传感器信号的到时判断平面碰撞的情况, 并对结果进行修正.

#### (2) $D-u$ 关系修正

因为同种材料的  $D-u$  关系为一固定值, 所以我们可以用激光测速法得到的精度较高的粒子速度  $u$ , 去确定应力波速度  $D$ . 这里关键是确定材料的  $D-u$  关系, 一般手册上能得到  $D-u$  关系都有一定的针对性, 由于各种材料千差万别, 所以, 本文采用实际实验的数据来确定相关材料的  $D-u$  关系. 不同材料实验得到的  $D-u$  关系和文献中的对比情况如表 3 所示. 在标定过程中, 用这些数据对应力波速度  $D$  进行修正, 取得了较好的效果.

表 3 不同材料的  $D-u$  关系对比

材料	密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	实验得到的 $D-u$ 关系 / (km·s <sup>-1</sup> )	文献 [11] 中的 $D-u$ 关系 / (km·s <sup>-1</sup> )
PMMA	1.18	$D = 2.71 + 1.99u$	$D = 2.43 + 1.58u$
Cu	8.37	$D = 3.94 + 2.33u$	$D = 3.91 + 1.49u$
W	17.45	$D = 4.32 + 0.89u$	$D = 4.03 + 1.24u$

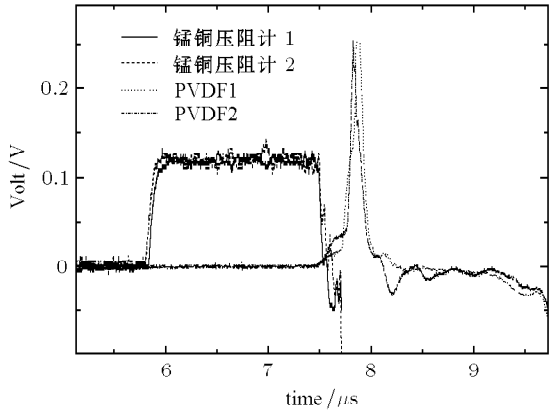
### 3.2 实验结果

标定过程中, 从低压段到高压段进行了多次实验, 实验获得的粒子速度和冲击波速度数据如表 4 所示. 典型波形如图 3 所示, 分别为 Cu 飞片弹速

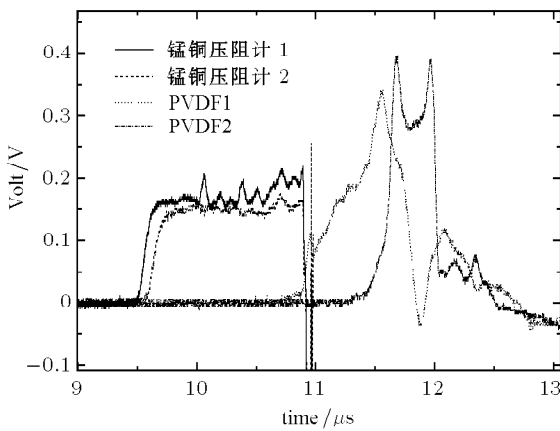
表 4 部分实验结果

No.	$\rho_0$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$u$ /(m·s <sup>-1</sup> )	$\Delta R/R$	$D$ /(m·s <sup>-1</sup> )	$P$ /GPa
1	1.18	175.0	0.0100	3055	0.631
2	1.18	183.0	0.0135	3071	0.663
3	1.18	203.0	0.0144	3113	0.746
4	1.18	220.0	0.0158	3143	0.816
5	2.79	233.8	0.0886	5500	3.763
6	8.37	170.8	0.1496	4338	6.200
7	8.37	194.3	0.1630	4393	7.146
8	8.37	196.7	0.1824	4399	7.240
9	8.37	221.0	0.1956	4455	8.241
10	8.37	229.6	0.1967	4475	8.601
11	8.37	275.4	0.2107	4582	10.560
12	8.37	289.0	0.2581	4614	11.161
13	8.37	292.5	0.2600	4622	11.316
14	17.45	224.1	0.4308	4524	17.690
15	17.45	231.0	0.4421	4530	18.260
16	17.45	264.6	0.4493	4560	21.059
17	17.45	308.4	0.6183	4599	24.746

注:  $\rho_0$  为材料密度,  $u$  为粒子速度,  $D$  为压阻传感器电阻变化量,  $D$  为按实验得到的波速,  $P$  为压力



(a)  $v = 459.2 \text{ m/s}$



(b)  $v = 341.6 \text{ m/s}$

图 3 典型波形图

459.2 m/s, 341.6 m/s 实验中靶板中的锰铜压阻计输出信号波形。图形中包括锰铜压阻计的输出信号波形以及作为时间探针的 PVDF 传感器输出波形，从波形可以看出传感器受压过程中的阶跃平台，锰铜压阻计的信号上升时间约为 100 ns，有可能是锰铜压阻计的封装介质聚酯薄膜和环氧树脂胶的声阻抗与靶板的声阻抗不同，应力波再分界面处来回反射，逐渐趋于平衡引起的，但它并不影响信号平台幅值<sup>[9]</sup>。从图 3(a) 可以看出，输出信号有着较为平坦的信号平台，同一平面的应力计信号到时基本一致，碰撞平面度较好。图 3(b) 的同一个平面传感器出现了时间差，约 90 ns，位于后面靶板中的 PVDF 传感器也出现了同样的时间差，这有可能是碰撞非完全平面造成的，在后续的数据处理中将对非平面碰撞的实验数据进行修正。

### 3.3 标定结果

把所有的实验数据都标注在图 4 上，横坐标为相对电阻变化值，纵坐标为冲击压力值。将数据进

行拟合后，得到该新型锰铜压阻计的标定曲线为

$$P = 51.067(\Delta R/R), \quad \Delta R/R \in (0 \sim 3.10 \text{ GPa}) \quad (5)$$

$$P = 0.630 + 40.688(\Delta R/R), \quad \Delta R/R \in (3.10 \sim 30 \text{ GPa}) \quad (6)$$

从图中可以看出，曲线由两段组成，其拐点出现在 3.10 GPa 附近，以拐点为界，两段均有较好的线性。将低压段和高压段的电阻相对变化率和冲击波压力值进行拟合，并与旧锰铜压阻计的标定曲线进行对比，从图中可以看出，两种锰铜压阻计的压阻特性比较相似。

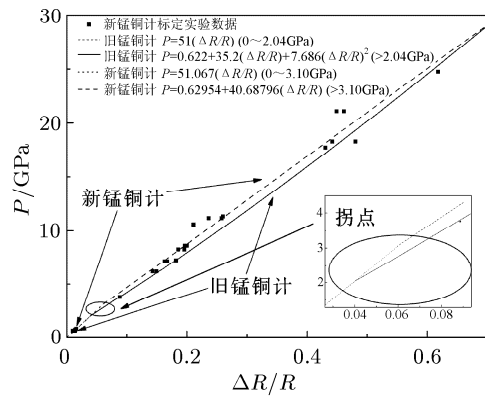


图 4 标定实验数据及拟合曲线

## 4 结 论

通过平板撞击实验标定了 0.66~25.4 GPa 范围内薄膜式锰铜压阻计的压阻关系。锰铜压阻计的标定曲线的拐点出现在 3.11 GPa，以往标定实验中皆发现锰铜在弹性范围和塑性范围的压阻系数不同，本次实验的拟合曲线趋势和其他研究者的研究结果吻合<sup>[12]</sup>。

(1) 实验给出了新锰铜压阻计的标定曲线，并与旧锰铜压阻计做了对比，实验结果表明，新旧锰铜压阻计的压阻特性比较接近。

(2) 利用不同材料在不同速度碰撞时产生的冲击波压力实现了较宽压力范围，从实验结果看，利用此种方法实现对锰铜压阻计全量程标定是可行的。

(3) 利用同一靶面安装两个探针的方式，提高了测量精度，并采用几何修正及实验  $D-u$  曲线修正的方法对结果进行修正，取得了较好的效果。

## 参 考 文 献

1 胡泽根, 吴光华, 曹述生. 气炮用锰铜应力计. 爆炸与冲击, 1988, 8(3): 249-254(Hu Zegen, Wu Guanghua, Cao Susheng.



- A manganin gauge used in gas gun. *Explosion and Shock Waves*, 1988, 8(3): 249-254 (in Chinese))
- 2 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理. 北京: 国防工业出版社, 2000 (Sun Chengwei, Wei Yuzhang, Zhou Zhikui. Applied Detonation Physics. Beijing: National Defence Industry Press, 2000 (in Chinese))
  - 3 Bernstein D, Keough DD. Piezoresistance of manganin. *J Appl Phys*, 1964, 35: 1471-1478
  - 4 Basis E, Williams E, Skoog C. Piezoresistivity coefficients in manganin. *J Appl Phys*, 1970, 41: 5155-5162
  - 5 Rosenberg Z, Yaziv D, Partom Y. Calibration of foil-like manganin gauges in planar shock wave experiments. *J Appl Phys*, 1980, 51(7): 3702-3705
  - 6 王礼立. 应力波基础. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005 (Wang Lili. Foundation of Stree Waves. 2nd edn. National Defence Industry Press, 2005 (in Chinese))
  - 7 王金贵. 气体炮原理及技术 (第 1 版). 北京: 国防工业出版社, 1997 (Wang Jingui. Principle and Technology of Gas Gun (1st edn). Beijing: National Defence Industry Press, 1997 (in Chinese))
  - 8 经福谦. 实验物态方程导引. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1999 (Jing Fuqian. Introduction to Experimental State Equation. 2nd. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese))
  - 9 黄正平. 爆炸与冲击电测技术. 北京: 国防工业出版社, 2006. 21-36 (Huang Zheng-ping. Electric Measurement Technical of Detonation and Impact. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. 21-36 (in Chinese))
  - 10 王翔, 傅秋卫. 一种锰铜压阻测量新方法. 高压物理学报, 1996, 10 (2): 157-160 (Wang Xiang, Fu Qiuwei. A new method of manganin piezoresistance measurement. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, 10 (2): 157-160 (in Chinese))
  - 11 张宝平. 爆炸物理基础. 北京: 北京理工大学出版社, 1991 (Zhang Baoping. Foundation of Explosions Physics. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991 (in Chinese))
  - 12 段卓平, 关智勇, 黄正平. 箔式高阻值低压锰铜压阻应力计的设计及动态标定. 爆炸与冲击, 2002, 22 (2): 169-173 (Duan Zhuoping, Guan Zhiyong, Huang Zhengping. High resistance foil-like manganin gauge design and dynamic calibration for lower shock pressure measurement. *Explosion and Shock Wave*, 2002, 22 (2): 169-173 (in Chinese))

(责任编辑: 周冬冬)

(上接第 100 页)

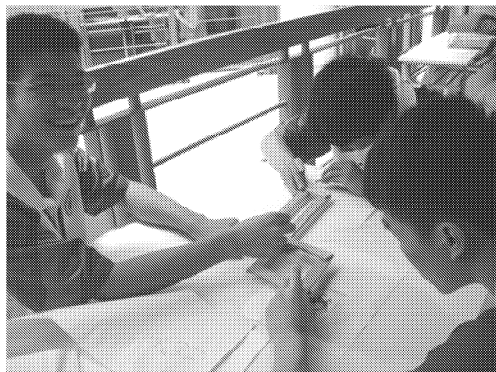


图 11 选手很享受图形变换的比赛

#### 4 总 结

作为协办单位, 清华大学教务处段远源处长和蒋子龙副处长非常支持赛事, 为了办好赛事, 教务处资助了部分经费,

并提供了 30 多间教室作为比赛场地, 清华大学航院组织了 10 多名教师和 40 多名志愿者为比赛提供服务。

在开幕式上, 龙勉副理事长代表中国力学学会, 蒋子龙副处长代表清华大学, 武际可教授代表仲裁委员会分别致辞。在闭幕式上, 武际可教授还应邀做了“周培源学术思想和贡献”的报告, 中国力学学会冯西桥秘书长做了总结讲话, 仲裁委员会的徐秉业教授, 《力学与实践》主编蒋持平教授, 和中国力学学会科普工作委员会主任委员朱克勤教授, 北京力学学会副秘书长岑松教授等为获奖团队颁发了奖状。

来自全国各高校的大学生们在比赛中享受竞争进取的快乐, 感受团结合作的氛围, 经受胜负结果的考验。比赛不是目的, 而推动力学学科的发展, 培养创新型人才是竞赛的宗旨。胜负是暂时的, 热爱力学, 享受力学, 追求力学的精神永驻在参赛学生的心中, 比赛难忘, 友谊长存。