



## F4/203A型锰铜压力计对撞击载荷的响应

池家春 吴国栋

(1982年8月17日收到)

通过一组撞击载荷实验建立了F4/203A型锰铜压力计在2—19万巴应力范围上的标定曲线。

应用此标定曲线从锰铜压力计的首次响应确定了一组在2—10万巴应力范围上的PTFE(聚四氟乙烯)两贡组状态点,结果与PTFE标准两贡组曲线非常一致;把我们的标定曲线与国外最新结果进行了比较,这两者都进一步肯定了我们的标定结果。

### 一、引言

近年来,以电阻随压力变化为基础的锰铜压力计技术日趋完善。它的特点是:可以嵌在材料中直接测量材料内部的应力—时间剖面 $\sigma(t)$ ,方便地检测诸如加、卸载弹塑性效应,正、逆相变效应、动态断裂和多次冲击等动力学过程而又不受界面或自由面上的波相互作用的影响;在不同波传播距离上的一组应力剖面测量配合拉格朗日分析还可以提供惰性材料的本构关系和凝聚炸药的反应速率资料。锰铜压力计在这些领域的研究中正起着有力的推动作用。

文献调研表明<sup>(1-6)</sup>:不同的锰铜压力计有着不同的冲击应力响应曲线,对具体的锰铜压力计必须进行单独的标定。但也已表明<sup>(7-8)</sup>:包括绝缘薄层在内的相同的锰铜压力计组合件对嵌它的样品材料的性质不敏感。于是,对于它们的冲击应力响应来说,一次标定即够。

几年来,我们使用F4/203A型锰铜压力计替代过去的锰铜丝压力计测量各种应力剖面,但没有进行过系统的标定研究。本文叙述这种标定实验的第一部分——它对撞击加载的响应。有关它对卸载过程的响应(或电阻滞后效应)的量度有待于进一步积累实验资料。

### 二、实验

实验装置如图1所示,平面爆轰波经由黄铜板或轻材料板与黄铜板组成的衰减器驱动2或3mm厚的Ly12铝飞片,它脱离黄铜板以几乎恒定的速度撞击靶。靶由抛光的大PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)基板和嵌在其中的横向尺寸足够大的样品组成。锰铜压力计安装在样品撞击面上的中心位置。由变化飞片速度(变换主药柱种类和衰减器组成)和变换样品材料

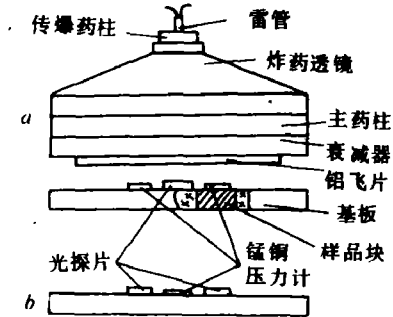


图1 实验装置示意图  
(a)正视图 (b)靶侧视图

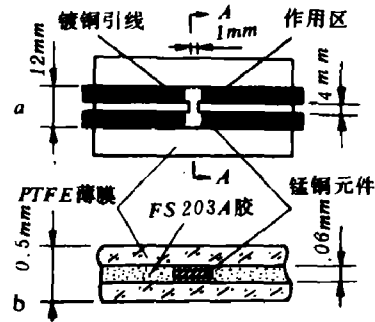


图2 锰铜压力计结构  
(a)俯视图 (b)A-A剖视图

获得不同的撞击界面应力。样品有PMMA、Ly12铝和H62黄铜。

在基板上安装若干抛光的已知厚度小光探片 (PMMA),用高速相机记录飞片撞击两者表面之间的时间间隔确定出飞片撞靶速度。一发中取 4—6 个数据的平均值作为撞击速度值  $u_0$ 。一般  $u_0$  精确到 1% 以内。然后利用撞击界面上的连续性条件和现有的各样品材料的两页组曲线从  $u_0$  计算出撞击界面应力  $\sigma_x$ 。

F4/203A 型锰铜压力计结构如图 2。工字形四端元件是按镀铜—光刻程序用滚轧成 0.02 mm 厚的锰铜箔 (11—13%Mn, 2—3.5%Ni, 1.1%Fe 等杂质, 余量为铜) 制造的,再用 FS203A 胶把它粘接在两层 0.22mm 厚的 PTFE 薄膜之间, 组合件总厚度约为 0.5mm。元件作用区尺寸为 1mm × 4mm, 阻值约为 0.15Ω。

锰铜压力计由图 3 所示的恒流电源供给恒定的电流, 用图 4 所示的电路记录在冲击应力

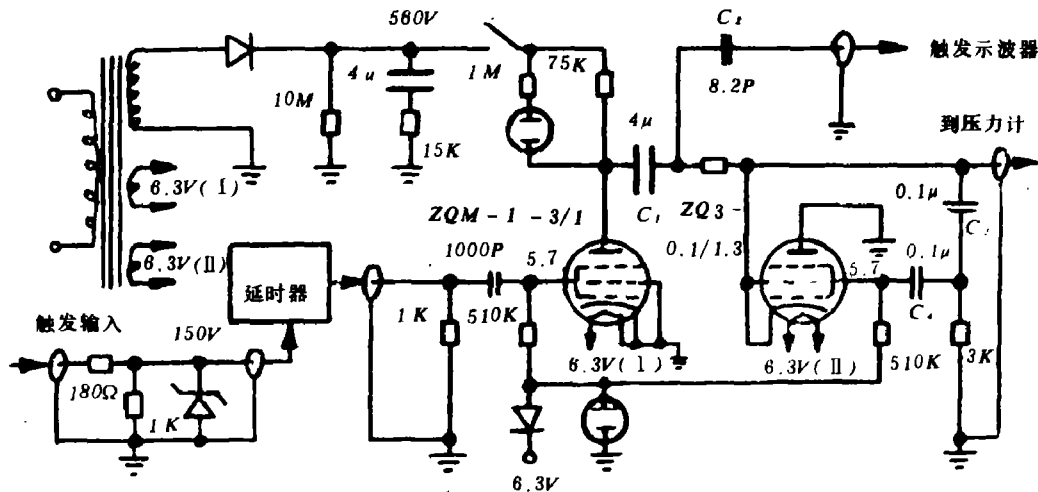


图3 恒流电源简图

作用下元件电阻改变所引起的元件两端的电压改变。电源动作是: 外触发脉冲经延时器使闸流管 ZQM1-3/1 导通, 已充电到 560V 的主电容器  $C_1$  经过它和压力计回路放电。通过元件的电流约 5A。主电容器放电还经电容器  $C_2$  输出一个负压尖脉冲触发示波器。附属电路 ( $C_3$ 、

C,等)在电源导通之后约 $20\mu\text{s}$ 使闸流管ZQ3-0.1/1.3导通,于是通过元件的电流被旁路,这是为炮前检验中为防止元件过热而设计的。调节延时器的延时时间使压阻讯号出现在电源导通之后 $2 - 2.5\mu\text{s}$ ,此后元件电流的总自然增加不超过 $0.3\%$ ,而在实验应力范围内元件电阻增加引起的电流减小不超过 $0.15\%$ ,两者是相抵消的,因此,在测量期间元件电流实际上是恒定的。

示波扫迹表现为:扫描基线;与元件初始电阻 $R_0$ 成正比的初始电压台阶 $V_0 = I_0 R_0$ ;与元件电阻改变 $\Delta R$ 成正比的附加电压台阶 $\Delta V = I_0 \Delta R$ 。于是,相对电阻改变为: $\Delta R/R_0 = \Delta V/V_0$ 。

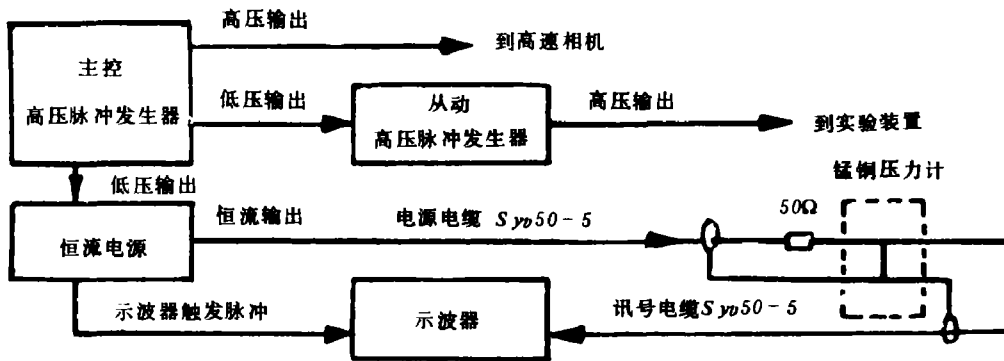


图4 锰钢压力计记录电路示意图

### 三、实验结果和讨论

我们共进行了11发实验。典型波形如图5和图6,当样品为PMMA时,压力计中的应力幅度首先过冲到铝飞片撞击PTFE的界面应力 $\sigma_x^f$ ,然后经几次稀疏—冲击反响松弛到铝飞片直接撞击PMMA时的界面应力 $\sigma_x$ 。当样品为Ly12铝或H62黄铜时,应力幅度首先跃变到 $\sigma_x^f$ 后经几次冲击反响达到铝飞片直接撞击相应样品时的界面应力 $\sigma_x$ 。在记录中,首次反响清楚可辨,其后几次幅度小、持续时间短,比较模糊,最后是与 $\sigma_x$ 相对应的较宽的平台。

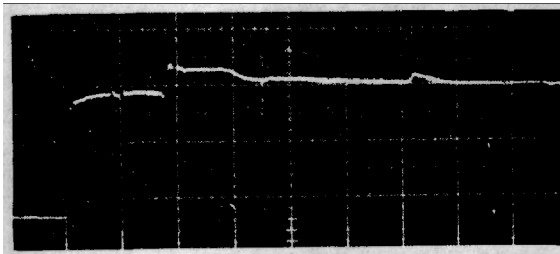


图5 Ly12铝撞击PMMA的锰钢压力计记录  
 $\sigma_x = 67 \text{ kb}$ ,  $200\text{mV/div}$ ,  $500\mu\text{s/div}$

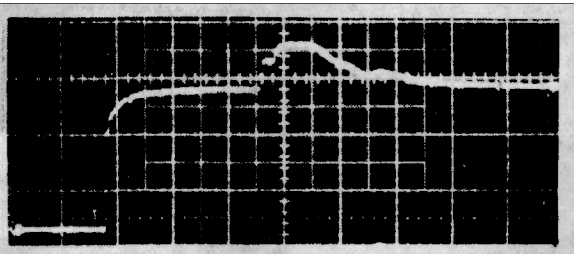


图6 Ly12铝撞击Ly12铝的锰钢压力计记录  
 $\sigma_x = 132 \text{ kb}$ ,  $200\text{mV/div}$ ,  $500\mu\text{s/div}$

$\sigma_x$ 及对应的相对电阻改变( $\Delta R/R_0$ )见图7,仿照Vantine等<sup>(7)</sup>的作法用三次多项式拟合实验数据,按最小二乘法得到下述标定曲线:

$$\sigma_r(10kb) = 0.60 + 30.86(\Delta R/R_0) + 21.16(\Delta R/R_0)^2 - 6.61(\Delta R/R_0)^3$$

标准偏差为 2%。正如 Vantine 等<sup>(7)</sup>所指出的,这误差大体指示由实验和样品材料雨贡纽曲线不确定性所引进的误差,而实验误差来源有压力计加工、撞击速度测量、电记录和数据处理(包括拟合)等。

由  $\sigma_r^f$  对应的相对电阻改变  $(\Delta R/R_0)_f$  数据应用标定曲线计算出  $\sigma_r^f$ , 再利用  $u_0$  和 Ly12 铝的雨贡纽曲线计算出对应的粒子速度  $u_r^f$ 。得到的一组 PTFE 雨贡纽数据与它的标准雨贡纽曲线<sup>(9)</sup>比较在图 8。我们的数据合理地分布在标准曲线两旁, 相对偏离不超过 2%。这充分表明: 我们的标定曲线及精度是可信的。

在上述计算和比较中用到的有关材料的形式为  $D = C_0 + \lambda u_r$  的雨贡纽参数列于表 1。

表 1 有关材料的雨贡纽参数

材 料	$\rho_0(g/cm^3)$	$C_0(mm/\mu s)$	$\lambda$
PMMA	1.18	2.87	1.88
Ly12 铝	2.78	5.33	1.34
H62 黄铜	8.52	3.96	1.46
PTFE	2.15	1.68	1.82

图 7 中也示出了 Vantine 等<sup>(7)</sup>和 Канель 等<sup>(10)</sup>得到的最新标定曲线, 它们的标准偏差是: 前者 1%, 后者 2.5%。我们的标定曲线处在它们之间而更接近前者, 偏离前者为 2—6%, 仍比实验误差大。如果从电阻应力系数  $k = (\Delta R/R_0)/\sigma_r$  考虑问题, 我们的稍比前者高而明显低于后者。

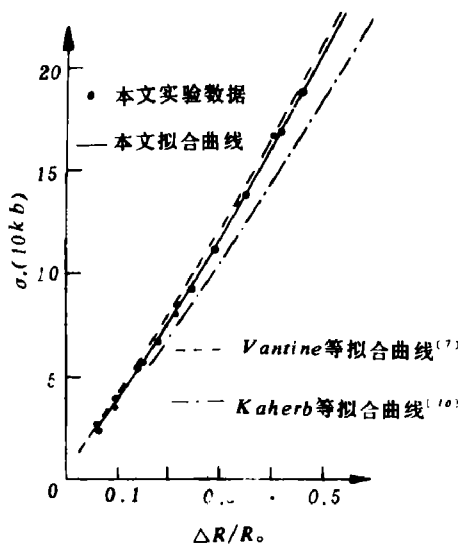


图 7 锰铜压力计标定曲线

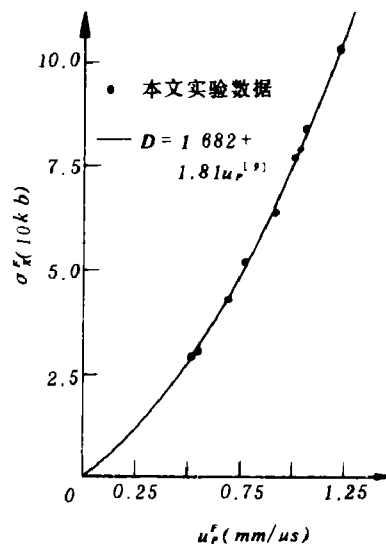


图 8 PTFE 雨贡纽状态比较

影响锰铜电阻应力系数的因素有: 合金成份<sup>(1-3)</sup>冶金历史(包括制造元件的工序)<sup>(3-4)</sup>、毗邻绝缘介质<sup>(5-6)</sup>和元件所受到的应变模式<sup>(3)</sup>(它受厚度相关的达到应力平衡所需时间和元件在此期间所经历的加载、卸载过程的影响而主要由元件的宽厚比和它相对波阵面的取向<sup>(12)</sup>决定)。

三种情况中, 绝缘介质和元件取向相同; 箔的厚度都在 0.018mm 以上, 据 Barsis 等<sup>(3)</sup>的

结果,制造工序的差别已不再影响电阻应力系数。则差别主要来自合金成份和元件宽厚比的不同。

在我们和Vantine等<sup>(7)</sup>之间,元件宽厚比相近(50对60),应变都是准一维的,但合金成份相差较大(11—13%Mn对9.5%Mn)。早期研究表明锰铜正压阻性质归因于锰元素,含锰量高,电阻应力系数也大。Barsis等<sup>(3)</sup>得到:含10.5%Mn的锰铜电阻应力系数比含12%Mn的低2—8%,这与我和Vantine等锰铜之间的差别(2—6%)相当。因此,差别可以合理地归因于合金成份的不同。

在我们和Канель等<sup>(10)</sup>之间,合金成份相近(后者为12.7%Mn),电阻应力系数的明显差别只能归因于应变模式不同。据Канель等<sup>(10)</sup>所用元件的形状、面积、阻值范围和箔的厚度推测:宽厚比不会超过6。元件所受到的应变大体上是二维的。据Barsis等<sup>(10)</sup>的分析,其电阻应力系数明显地比一维情况高。Канель等自己也指出:他们的标定数据(高于5万巴)与Lee<sup>(11)</sup>的相似成份锰铜丝结果完全相符并利用Lee<sup>(11)</sup>的低应力数据把他们的标定曲线外推到58 kb以下。因此,差别主要归因于应变模式不同。上述比较又一次证明我们的标定曲线是合理的。

最后必须指出:F4/203A型锰铜压力计在170 kb应力以下能完整地记录到峰值应力持续、卸载细节、黄铜板的二次撞击事件和电阻滞后效应,寿命超过3 μs。但对最高应力炮,卸载过于迅速,扫描扫迹很快降到几乎零电阻的水平。显然元件电流在卸载过程中被短路了。因为PTFE仍然是好的绝缘体<sup>(13)</sup>,短路是FS 203A胶在卸载过程中电导率成数量级增加造成的。因此对于更高应力的研究,有必要制造用FEP(氟化乙丙烯)作粘接剂的热压封装的锰铜压力计<sup>(7)</sup>。

#### 四、结 论

我们成功地标定了F4/203A型锰铜压力计对撞击加载的响应,产生了一条20—190 kb应力范围上的标定曲线。利用标定曲线从压力计首次响应得到的一组PTFE两贡组状态点与标准曲线的一致性和与国外最新标定资料的比较结果都进一步肯定了我们的标定结果。

姚炳玲等电测组同志、韩立石等光测组同志和刘洪清、庄丽娟、马冰、常红等同志参加了本实验场地工作,李印同志设计和制造了所用的恒流电源,表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- (1) Bernstein, D. et al, *J. Appl. Phys.*, **35** (1964), 1471.
- (2) Дремин, А.Н.И Др, Ф.Г.В., **1** (1972), 147.
- (3) Barsis, E. et al, *J. Appl. Phys.*, **41** (1970), 5155.
- (4) Rosenberg, J. T., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **17** (1972), 1099.
- (5) Keough, D. D et al, *J. Appl. Phys.*, **41** (1970), 3508.
- (6) Charest, J. A. et al, EGG1183-2280 (1971).
- (7) Vantine, H. C. et al, *Rev. Sci. Instrum.*, **51** (1980), 116. *J. Appl. Phys.*, **51** (1980), 957.
- (8) Rosenberg, Z. et al, *J. Appl. Phys.*, **51** (1980), 3720.

- (9) McQueen, R. G. et al, *High Velocity Impact phenomena*, (1970), 530.  
 (10) Канель, Г. И. и др, Ф. Г. В., 2 (1978), 130.  
 (11) Lee, L. M., *J. Appl. Phys.*, 44 (1973), 4017.  
 (12) Rosenberg, Z. et al, *J. Appl. Phys.*, 52 (1981), 755.  
 (13) Champion, A. R. et al, *J. Appl. Phys.*, 43 (1972), 2216.

## RESPONSE OF F4/203A TYPE MANGANIN PRESSURE GAUGE TO IMPACT LOADING

Chi Jiachun Wu Guodong

A calibration curve of F4/203A type manganin pressure gauge has been established through a set of impact loading experiments in 2 - 19 Gpa stress range.

Using the calibration Curve, a set of Hugoniot states of PTFE in 2 - 10 Gpa stress range has been determined by the first response of the manganin pressure gauge. They are excellent consistent with the standard Hugoniot of PTFE. Moreover, the comparison between our calibration curve and the latest calibration curves from abroad also shows this calibration curve to be justifiable.

## 激 光 在 金 属

### 薄膜中产生的应力波的测量

方青 宋海法 叶子观 曾凡群

(1983年1月22日收到)

将铝、铋、铟、铬、铜、金、银七种金属在K<sub>2</sub>O玻璃基片上真空蒸镀成十二种厚度的薄膜,接受Q开关钕玻璃激光束的照射。激光脉冲宽度为70ns,在直径为10mm的面积上最大照射光能为2.2J。用10mm直径的X轴切割石英晶体压电传感器测量激光激励的应力波。本文叙述了峰值应力与薄膜材料、厚度以及光通量的关系,并对实验结果作了简单的分析。

### 引 言

近年来,我们采用了多种方法以降低高能炸药激光引爆的临界能量。方法之一是在激光