文章编号: 1000-5773(2002)04-0265-06

冲击波中横向、纵向应力计 响应初步研究

段卓平 关智勇

(北京理工大学机电工程学院,北京 100081)

摘要:采用低阻值锰铜压阻应力计,通过一维平板撞击实验和理论分析对横向、纵向应力 计在有机玻璃和陶瓷材料中的不同响应进行了研究。实验结果表明,在陶瓷等硬质材料中进 行横向应力测量时,可用康铜计补偿的方法,直接用锰铜计纵向标定的压阻系数计算,而在有 机玻璃中却不能简单地得到横向应力。

关键词:横向应力; 锰铜应力计; 动态响应 中图分类号: O348 **文献标识码**: A

1 引 言

在材料动力响应的研究领域中,最重要的问题之一是冲击加载固体材料中横向应力的精确测定。 直接测量这些应力的唯一技术是使用压阻应力计。将应力计嵌人材料中,其平面与冲击波传播方向平 行放置,称横向应力计。国外学者采用了这一技术,使用锰铜应力计测量玻璃和有机玻璃(PMMA)中 的横向应力。这些专家借助于应力计的标定曲线来分析他们的数据(标定曲线上阻值随压力的变化关 系),而这些标定曲线是由纵向应力计取向测定的^[1],在这种取向中,应力计平面与冲击波阵面是平行 的,与它的传播方向相垂直。显然,两种取向的压阻应力计响应很不同。1981年,Rosenberg 等人^[2]在 测量 PMMA 中横向应力时发现,与常规轴向应力计标定不同,横向应力传感器标定不能直接得出,需 要经过分析推演。1985年,Rosenberg^[3]进一步提出了一个相对简单易懂的解析模型,以一些应力计材 料的应力应变状态的假定为基础,解释了两种结构不同的应力计引起不同响应的原因。1987年, Rosenberg 等人^[4]利用横向应力测试技术测出了动态载荷下氧化铝的剪切强度,初步表现了横向应力 测试技术在动态参数测试领域的前景。

横向应力测试技术国外在 20 世纪 80 年代得到发展、应用,国内许多学者近年也积极展开应力波压 力传感器方面的研究,在镀膜锰铜压阻计^[5]和 PVDF 应力传感器^[6]研究方面取得了相当大的进展。但 在横向应力测试技术方面一直是空白。直接利用国外测得的锰铜材料参数进行横向应力测试存在这样 的问题:国内的锰铜合金与国外的锰铜合金其组分不会完全一致,直接使用国外数据会带来误差; Rosenberg 提出的横向应力测试方法是间接的方法,其中的假设和参数等的不确定因素也还需进一步 深入研究。我们试图通过实验研究,探索一种在一定条件下直接测量材料动态横向应力的新方法。

2 实验现象

在 \$37 mm 一级轻气炮上进行了有机玻璃材料和抗弹陶瓷材料的平板撞击实验。实验装置如图 1

收稿日期: 2002-04-12; 修回日期: 2002-06-03 作者简介: 段卓平(1965-),男,博士,副教授.

所示,靶板材料为待测材料。靶板中放置了锰铜纵向计和锰铜横向计,采用环氧树脂进行封装,为进一步分析锰铜横向计的应力应变状况,有的实验中同时放置了康铜横向计。实验的飞片速度为 200~600 m/s,飞片材料用 45[#] 钢、厚度为 2.5 mm,或抗弹陶瓷、厚度为 4 mm。实验中使用的锰铜应力计和康铜 应变计为同一版式,分别用 10 μm 厚的锰铜箔和康铜箔光刻而成,并封装在 40 μm 厚的环氧树脂内,所 以锰铜应力计和康铜应变计的尺寸一样。安装时用环氧树脂胶进行封装、固定,封装过程确保传感器周 围没有封入空气。横向计设计在对称中心附近,两边试件尺寸尽可能大,以防止侧向稀疏的影响。





图 2 为在有机玻璃材料中得到的典型实验记录,图中最下面的实验曲线为锰铜纵向计的,中间的实 验曲线为锰铜横向计的输出,上面的曲线为康铜横向计的输出。图 3 为抗弹陶瓷材料中得到的典型实 验记录,下面的实验曲线为锰铜纵向计的,上面的实验曲线为锰铜横向计的输出。从测得的数据可以看 到,在有机玻璃材料中,锰铜横向计的输出比锰铜纵向计的输出要大,而在抗弹陶瓷材料中,锰铜横向计 的输出比锰铜纵向计的输出要小。众所周知,在冲击载荷作用下,材料中的横向应力不可能大于纵向应 力,因此在有机玻璃中,锰铜横向计的输出不直接反映有机玻璃中的横向应力。

Rosenberg^[7]在横向应力测试中发现,对于不同的应力计材料和基体材料,横向计输出的电阻变化 率有时比纵向计输出的大,有时比纵向计输出的小,称之为 Crossover 现象。Gupta^[8]在镱传感器的研 究中也发现了这一现象。











3 理论解释

我们认为上述实验现象与应力计材料和被测材料的屈服强度有关,现将分析结论简要阐述如下。 图 4 为纵向计的敏感部分加载示意图,图 5 为横向计的敏感部分加载示意图。







图 5 横向计敏感部分加载示意图 Fig. 5 Schematic diagram of lateral gauge

因为对任何应力计的一个基本要求,就是它只应对相关应力产生响应,而不应被其周围介质的性能 所影响。由文献[9]可知,这时的横向应力计必须处于屈服状态。本文只考虑应力计处于屈服状态的情况,忽略应力计的响应时间,考虑应力计平衡状态,且只研究加载阶段,不考虑卸载。由文献[7]的假定 可得

对于纵向计有

$$\left. \sigma_x^{g} = \sigma_x^{m} \\ \sigma_y^{g} = \sigma_z^{g} = \sigma_x^{g} - Y_{g} \right\} \Rightarrow p_x^{g} = \sigma_x^{m} - (2/3)Y_{g}$$

$$(1)$$

对于横向计有

$$\sigma_{y}^{g} = \sigma_{y}^{m} = \sigma_{z}^{g}$$

$$\sigma_{x}^{g} = \sigma_{y}^{g} + Y_{g}$$

$$\Rightarrow p_{y}^{g} = \sigma_{y}^{m} + (1/3)Y_{g}$$

$$(2)$$

则

$$p_x^g - p_y^g = \sigma_x^m - \sigma_y^m - Y_g \tag{3}$$

式中:下标 x 表示纵向,y 表示横向,m 表示被测材料,g 表示应力计,Y 为动态屈服强度,p 为静水压。 由文献[3]可知,应力计的电阻变化与其体应变有一一对应关系,其体应变与其静水压有一一对应关系, 且电阻变化随应力计的静水压或体应变的增加而增加。

若被测材料在屈服区,则

$$\sigma_x^{\rm m} - \sigma_y^{\rm m} = Y_{\rm m} \tag{4}$$

此时

$$p_x^g - p_y^g = Y_m - Y_g \tag{5}$$

对 PMMA,由于 $Y_m = Y_{PMMA} = 0.24$ GPa, $Y_g = 0.75$ GPa^[7],通过分析计算可知,如果锰铜应力计屈 服,则被测材料 PMMA 一定屈服,此时

$$p_x^{\mathbf{g}} - p_y^{\mathbf{g}} = Y_{\mathbf{m}} - Y_{\mathbf{g}} < 0$$

说明在 PMMA 中,横向应力计电阻变化比纵向应力计电阻变化大,在测试中的表现为横向计信号比纵向计信号大。对于陶瓷材料,在屈服阶段,由于 $Y_m = Y_{Ceramic} > Y_g$,所以

$$p_x^{\mathbf{g}} - p_y^{\mathbf{g}} = Y_{\mathbf{m}} - Y_{\mathbf{g}} > 0$$

而在陶瓷材料的弹性阶段,由于锰铜应力计屈服,考察纵向计,这时 $\sigma_x^{e} \ge \sigma_{HEL}$,又锰铜材料的雨贡纽弹 性限 $\sigma_{HEL}^{e} = [(1 - \nu_g)/(1 - 2\nu_g)]Y_g$,所以 $\sigma_x^{m} = \sigma_x^{e} > [(1 - \nu_g)/(1 - 2\nu_g)]Y_g$,锰铜计材料的泊松比 ν_g $=1/3^{[7]}$,又 $\sigma_y^m = [\nu_m/(1-\nu_m)]\sigma_x^m$,通过静压实验,我们得到了抗弹陶瓷的泊松比 $\nu_m = 0.23$,所以

 $p_x^{g} - p_y^{g} = \sigma_x^{m} - \sigma_y^{m} - Y_g > \{ [(1 - 2\nu_m)/(1 - \nu_m)] [(1 - \nu_g)/(1 - 2\nu_g)] - 1 \} Y_g > 0$ 这说明在陶瓷材料中,横向应力计的电阻变化比纵向应力计的电阻变化小,在测试中表现为横向计信号 比纵向计信号小。

因此,横向计和纵向计的响应的相对关系与其动态屈服强度有关。从上面的分析可以看到,如果应 力计进入塑性区,当应力计的屈服强度比基体材料的屈服强度高时,横向计的输出大于纵向计的输出, 当应力计的屈服强度比基体材料的屈服强度低时,横向计的输出始终小于纵向计的输出,这就是实验现 象的产生机理,深入理解它对我们正确进行横向应力测试、分析实验现象有理论上的指导意义。上述的 分析只是定性的分析,对于有些假定,理由不是十分充分,但是已经可以对实验现象进行清楚的解释。

4 横向应力测试

在横向应力测试的具体计算中,Rosenberg的分析思路为利用已测知的锰铜材料体应变和静水压 的关系和分析确定的锰铜材料电阻变化和体应变的关系,由锰铜横向计的电阻变化计算得到其所处的 静水压,再根据已确定的锰铜动态屈服强度计算得到横向应力^[3],其本质上是一种间接计算。我们直接 利用国外测得的锰铜材料参数进行横向应力测试存在这样一个问题:国内的锰铜合金与国外的锰铜合 金其组分不会完全一致,直接使用国外数据会带来误差,但重做国外的所有标定实验又不太现实,因 此,最好能有更直接的途径来进行横向应力测试。

本研究采用康铜计补偿法,即用纵向锰铜计测量纵向应力,用横向锰铜计和横向康铜计测量各自的 横向响应,两者横向响应相减得到康铜计补偿过的横向锰铜计响应,再用纵向锰铜计压阻关系计算横向 应力。众所周知,对高弹性限的材料,根据在材料的弹性段其动态泊松比与其静态泊松比基本相同这一 特性,利用可以测知的材料中的纵向应力,由公式

$$\sigma_{\mathbf{v}}^{\mathrm{m}} = \left[\nu_{\mathrm{m}} / (1 - \nu_{\mathrm{m}}) \right] \sigma_{x}^{\mathrm{m}} \tag{6}$$

式中: vm 是材料的泊松比, σm 为材料中的纵向应力, σm 为材料中的横向应力, 可直接得到材料中的横向 应力。

本实验采用北京大华陶瓷厂生产的抗弹陶瓷作为试样材料,其主要成份为 Al_2O_3 ,工厂提供的参数 有:密度为 3.80 g/cm³;硬度(HV5)为 13.72 GPa;抗折强度为 350 MPa。从横向应力测试的角度出发, 必须准确测得抗弹陶瓷的弹性模量和泊松比,特别是泊松比,对横向应力的计算十分重要。通过静压实 验,我们得到了抗弹陶瓷的弹性模量和泊松比 $\nu_m = 0.23$ 。传感器采用双 π 型低阻值锰铜压阻应力计和 康铜应变计,其中锰铜应力计作为纵向计时本文中标定的压阻关系为

| $p = 39.17 \Delta R/R$ | (p < 1.5 GPa) | (7) | |
|------------------------------|----------------|-----|--|
| $p = 0.485 + 34.2\Delta R/R$ | (p > 1.5 GPa) | (1) | |
| | | | |

实验装置如图 1 所示,图 6 为典型的实验记录,上面的记录曲线为锰铜纵向计的输出,中间的曲线 为锰铜横向计的输出,下面曲线为康铜横向计的输出。得到的抗弹陶瓷处于弹性状态时的实验数据见 表 1 和图 7。

表 1 抗弹陶瓷处于弹性状态时的横向、纵向应力实验结果

Table 1 Longitudinal and lateral stress data for anti-shoot ceramic under elastic state

| No. (Δ | | | | | $\sigma_y/(\text{GPa})$ | | | |
|--------|------------------|--------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------|------------|----------|
| | $(\Delta R/R)_x$ | $(\Delta R/R)_{y}$ | $(\Delta R/R)$ | $\sigma_x/(\text{GPa})$ | Formula(7) | Formula(7)* | Formula(6) | Ref. [3] |
| 1 | 0.07764 | 0.02697 | 0.02538* | 3.140 | 1.056 | 0.993* | 0.936 | 0.640 |
| 2 | 0.11250 | 0.03611 | 0.03394* | 4.333 | 1.414 | 1.330* | 1.291 | 0.950 |
| 3 | 0.16398 | 0.04908 | 0.04614* | 6.059 | 1.922 | 1.807* | 1.806 | 1.390 |

Note: * These values are determined from the strain remedy by constantan gauge.



图 7 中带"■"的横向应力值由横向计电阻变化值(Δ*R*/*R*),采用纵向计的压阻系数(公式(7))计算 得到;带"▲"的横向应力值由康铜应变效应补偿后的横向计电阻变化值(Δ*R*/*R*),采用纵向计的压阻系 数(公式(7))计算得到;带"+"的横向应力值为公式(6)采用抗弹陶瓷的泊松比计算得到;带"●"的横向 应力值为采用 Rosenberg 方法^[3]计算得到。

5 分析及结论

由抗弹陶瓷的实验数据可以看出,在弹性阶段测量抗弹陶瓷材料的横向应力时,采用康铜计进行应 变补偿后,直接采用纵向计的压阻系数计算得到的横向应力与根据抗弹陶瓷的泊松比计算得到的横向 应力差别不大,其相对误差最大为 6.1%。说明在陶瓷等硬质材料中应用横向康铜计应变补偿技术,直 接采用纵向计的压阻系数进行横向应力测试是基本可行的。

采用 Rosenberg 等人^[3]的间接方法计算的横向应力值与用弹性阶段材料泊松比计算的结果相差较大,这可能是国内外锰铜材料参数不同所致。

而在 PMMA 等软质材料中的横向应力测试中,目前只能采用 Rosenberg 等人^[3]的间接方法计算 横向应力值,但应注意到国内外目前的锰铜应力计材料参数和基本关系(如静水压与体应变关系、电阻 变化与体应变关系)与文献[3]中的区别,这方面的工作,有待于进一步的研究。

本实验得到了北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室刘长林和池军智同志的大力支持和帮助,在此深 表感谢。

参考文献:

- [1] Rosenberg Z, Yaziv D, Partom Y. Calibration of Foil-Like Manganin Gauges in Planar Shock Wave Experiments [J].
 J Appl Phys, 1980, 51(7): 3702-3705.
- [2] Rosenberg Z, Partom Y, Yaziv D. The Response of Manganin Gauges Shock-Loaded in the 2-D Straining Mode [J].
 J Appl Phys, 1981, 52:755-758.
- [3] Rosenberg Z, Partom Y. Lateral Stress Measurement in Shock-Loaded Targets with Transverse Piezoresistance Gauges [J]. J Appl Phys, 1985, 58: 3072-3076.

- [4] Rosenberg Z, Yaziv D, Yeshurun Y, et al. Shear Strength of Shock-Loaded Alumia as Determined with Longitudinal and Transverse Manganin Gauges [J]. J Appl Phys, 1987, 62:5084-5086.
- [5] SHI Shang-chun, DONG Shi, HUANG Yue, et al. Crystallization of Plating-Manganin Piezoresistance Gauges [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4):254-258. (in Chinese)
 施尚春,董 石,黄 跃,等. 镀膜锰铜压阻计结晶问题研究 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4):254-258.

[6] WEN Dian-ying, LIN Qi-wen. Electrical Response of PVDF Film under Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(4): 291-297. (in Chinese)

温殿英,林其文.冲击波压缩 PVDF 膜的电响应研究 [J]. 高压物理学报,2000,14(4):291-297.

- [7] Rosenberg Z. Accounting for the Crossover Phenomenon in the Response of Longitudinal and Transverse Piezoresistance Gauge in Shock Wave Experiments [J]. J Appl Phys, 1988, 63(2): 349-354.
- [8] Gupta S C, Gupta Y M. Piezoresistance Response of Longitudinally and Laterally Oriented Ytterbium Foils Subjected to Impact and Quasistatic Loading [J]. J Appl Phys, 1985, 57:2464-2473.
- [9] Rosenberg Z, Brar N S. The Elasto-Plastic Response of Lateral Piezoresistance Gauges in Shock Wave Studies [J]. Appl Acoust, 1994, 41:377-386.

PRELIMINARY STUDIES ON RESPONSE OF LONGITUDINAL AND LATERAL GAUGES FOR SHOCK WAVE

DUAN Zhuo-ping, GUAN Zhi-yong

(Institute of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, different dynamic responses of longitudinal and lateral gauges in PMMA and anti-shoot ceramic were investigated by 1-D plate flying tests and theoretical analyses. The experimental results indicate that the lateral stresses can be calculated directly from the piezoresistance expression calibrated by longitudinal stresses with the method of strain remedy by constantan gauge as the lateral stresses in anti-shoot ceramic are measured. But the lateral stresses in PMMA can not be determined by this method.

Key words: lateral stress; manganin gauge; dynamic response

270