文章编号：1000-5773(2008)01-0079-06

无氧铜平面冲击波实验的锰铜应力计测试*

范春雷[1,2]，胡金伟[2]，陈大年[2]，王焕然[2]，谢书港[2]

(1. 南洋职业技术学院建筑工程系，浙江嘉兴 314003；
2. 宁波大学力学和材料科学研究中心，浙江宁波 315211)

摘要：利用纵向锰铜应力计，对无氧铜(OFHC)材料进行了层裂实验，得到了典型的层裂信号；同时测量试件中的纵向应力和横向应力，直接确定了其流动应力。对实验结果与理论计算结果进行了比较，讨论了高压、高应变率下的强度模型以及横向应力计测试问题。

关键词：平面冲击波；层裂；纵向应力；横向应力；流动应力
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

对于无氧铜(OFHC)材料，利用锰铜应力计记录其试件发生层裂的瞬态信息已有报导[1]，关于OFHC材料的高压与高应变率本构关系也有报导[2-4]，然而，对应于发生层裂的加载条件究竟应该采用什么样的本构关系，却缺乏深入的研究。本工作试图探讨此问题。

本工作利用纵向锰铜应力计，对 OFHC 材料进行了层裂实验，得到了典型的层裂信号。同时记录试件中的纵向与横向应力，从而确定其流动应力。文中讨论了强度的实验确定问题。

目前用于测量冲击波载荷下固体流动应力的唯一直接技术是采用压阻计记录纵向(σ_x)与横向(σ_y)应力。这种方法最早是由 Bernstein 等[5]提出的，屈服强度 Y(流动应力)可直接确定

$$Y=\sigma_x-\sigma_y \tag{1}$$

已有一系列研究致力于此种冲击波载荷下材料流动应力的直接测量，其中包括 Dremin 等[6]、Kanel 等[7]、Chartagnac[8]、Gupta[9]以及 Rosenberg 等[10]的工作。

随着冲击波实验中横向应力计测试技术与分析的改进，直接测量冲击波载荷下流动应力的研究有了可喜的进展。1996 年 Millett 等[11]评论了冲击波实验横向应力计数据的分析，指出必须考虑应力计经受的应力与应变状态，他们研究了锰铜应力计随纵向应力或压力的硬化，也估计了应力计的几何效应、绝缘厚度影响等。2001 年 Greewood 等[12]讨论了锰铜应力计的保真度问题，提出了产生最终破坏模式干扰的原因，也描述了入射冲击波前沿初始接触产生的不良信号，并报道了一种减小或消除干扰的装置。1999～2003 年间 Millett、Bourne 等[13-15]发表了有关直接测量不同材料在平面冲击波实验中的流动应力的结果，其中包括钨合金、铝合金、Ti-Ta 合金、钽等材料在不同纵向应力范围(2～14 GPa)的流动应力变化规律，也给出了不同纵向应力下的 Hugoniot 弹性极限。

2 锰铜应力计测无氧铜层裂信号

对无氧铜材料做了层裂实验，实验是在∅57 mm 一级气体炮上进行的。实验装置如图 1 所示。在采用压阻应力计测试的平面冲击波实验中，最重要的问题之一就是压阻信号的精确记录，为了真实记录实验数据，对信号记录系统做了适当的调整。在靶室内有很多线路，其中包括测速线路和信号传输线

* **收稿日期**：2007-02-20；**修回日期**：2007-05-18
基金项目：国家自然科学基金项目(10472048)；中国工程物理研究院专项基金；浙江省教育厅科研项目(20061673)
作者简介：范春雷(1978—)，男，硕士，主要从事工程力学研究. E-mail：Fchl_1978@yahoo.com.cn

路,在实验过程中,会产生不确定的电磁干扰信号,使得最后的实验信号不准确;另外在信号线与信号记录端(示波器)的连接点,由于示波器内外电阻相差太大(测试线路电阻 50 Ω,而示波器内部电阻1 000 Ω),当电信号到达示波器接受端的时候,会发生反射,引起波形的周期性振荡,使最终的结果与实际信号差距很大。

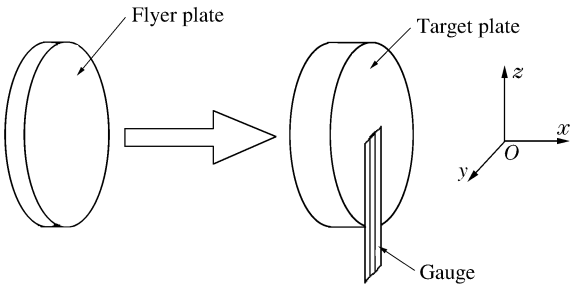


图 1 试样结构与应力计的放置

Fig. 1 Specimen configuration and gauge placement

由于上述原因,首先在靶室的各个线路端口都用铜片包裹,以达到屏蔽的效果,并且在靶室内壁引出接地零线,尽可能减少干扰信号;在示波器接收端引入 50 Ω 的匹配电阻,使 50 Ω 的匹配头和 1 000 Ω 的内部电阻并联,所以内外电阻达到耦合,信号基本完全通过,不再发生反射,波形没有了周期性振荡。

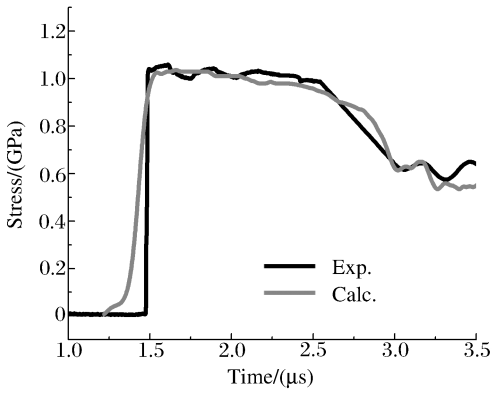


图 2 锰铜应力计实测的应力计应力历史与采用空穴聚集层裂模型数值模拟结果的比较

Fig. 2 Comparison of recorded stress trace from manganin gauge with computed stress trace using void coalescence-based spall model

飞片与靶的材料均为无氧铜,且直径均为 53 mm,厚度分别为 3 mm 和 6 mm,锰铜计厚度(含锰铜计封装件的绝缘层部分)为 0.174 mm。在安装过程中,要使锰铜应力计的敏感元处于靶板的中心位置,以避免因碰撞的非平面性而导致的数据分散。实验采用环氧树脂固封,以便使锰铜应力计与样品牢固结合,同时还使得在靶后为波阻抗远小于无氧铜的环氧树脂,相当于靶后为自由面。

图 2 表示无氧铜层裂实验的典型结果,飞片碰撞速度为 320.0 m/s,锰铜应力计实测的应力历史与采用空穴聚集层裂模型[16]数值模拟的结果在图中作了比较。图 3(a)显示该实验回收试样横截面的层裂现象;图 3(b)是按空穴聚集层裂模型[16]数值计算的试件横截面的损伤分布,图 3(b)中纵坐标为微空穴的体积比。

从图 3(a)与图 3(b)可以看出,数值模拟的试样中层裂片厚度与回收观测结果基本一致。

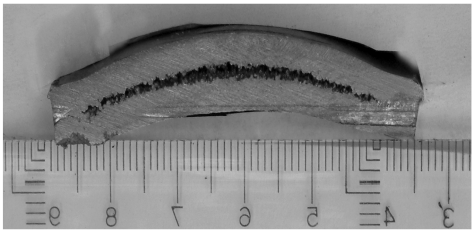


图 3(a) 样品回收照片

Fig. 3(a) Macrograp of the etched cross section orthogonal to the spall plane of recovered sample from experiments

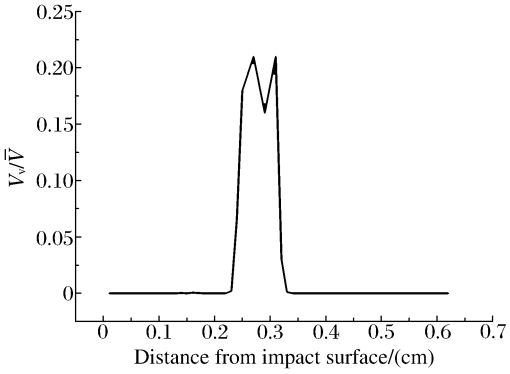


图 3(b) 计算得到的试样中的损伤分布

Fig. 3(b) Computed damage distribution in spalled samples

3 锰铜应力计测无氧铜材料的流动应力

采用横向应力计测试的重要问题是如何对横向应力计进行标定。通常考虑试件与应力计都处于塑

性状态。此时横向应力计的标定方法已由 Rosenberg 等[17]给出。确定应力计封装件材料中的横向应力 σ_y^{m} 包括如下步骤。

首先,确定横向压阻应力计的标定曲线

$$\frac{\Delta R}{R_0}=f(\varepsilon_V^{\mathrm{g}})=g(p_{\mathrm{g}}) \tag{2}$$

式中:$\Delta R/R_0$ 为横向应力计的电阻变化实验值,$\varepsilon_V^{\mathrm{g}}$ 是应力计的体积应变,p_{g} 是横向应力计中的压力。然后,假设横向应力计处于塑性状态,其应力张量设为

$$\sigma_{ij}^{\mathrm{g}}=\begin{pmatrix}\sigma_y^{\mathrm{g}}+Y_{\mathrm{g}} & & 0\\ & \sigma_y^{\mathrm{g}} & \\ 0 & & \sigma_y^{\mathrm{g}}\end{pmatrix} \tag{3}$$

式中:Y_{g} 为横向应力计的屈服强度。由此

$$p_{\mathrm{g}}\equiv\frac{\sigma_x^{\mathrm{g}}+\sigma_y^{\mathrm{g}}+\sigma_z^{\mathrm{g}}}{3}=\sigma_y^{\mathrm{g}}+\frac{1}{3}Y_{\mathrm{g}} \tag{4}$$

通过方程(2)及方程(4),由实验值 $\Delta R/R_0$ 以及 Y_{g} 可以确定 σ_y^{g},为得到横向应力计封装件材料中的 σ_y^{m},Rosenberg 等[17]又作了 3 个假设

$$\sigma_y^{\mathrm{g}}=\sigma_y^{\mathrm{m}} \tag{5}$$

$$\varepsilon_z^{\mathrm{g}}=0 \tag{6}$$

$$\varepsilon_x^{\mathrm{g}}=\varepsilon_x^{\mathrm{m}} \tag{7}$$

并由此导出

$$\tilde{g}(\Delta R/R_0)=p_{\mathrm{g}}=\sigma_y^{\mathrm{m}}+\tilde{a}Y_{\mathrm{g}} \tag{8}$$

式中:$\tilde{a}=1/2$ 或 $1/3$,取决于 σ_z^{g} 取 σ_y^{m} 或 $\sigma_y^{\mathrm{m}}+Y_{\mathrm{g}}$。

在平面冲击状态下,采用纵向、横向锰铜应力计同时记录应力计的纵向和横向响应,实验装置如图 4所示。由锰铜计的压力、体积应变与电阻变化关系,以及应力计压力与试件横向、纵向应力的关系,得到试件的流动应力。

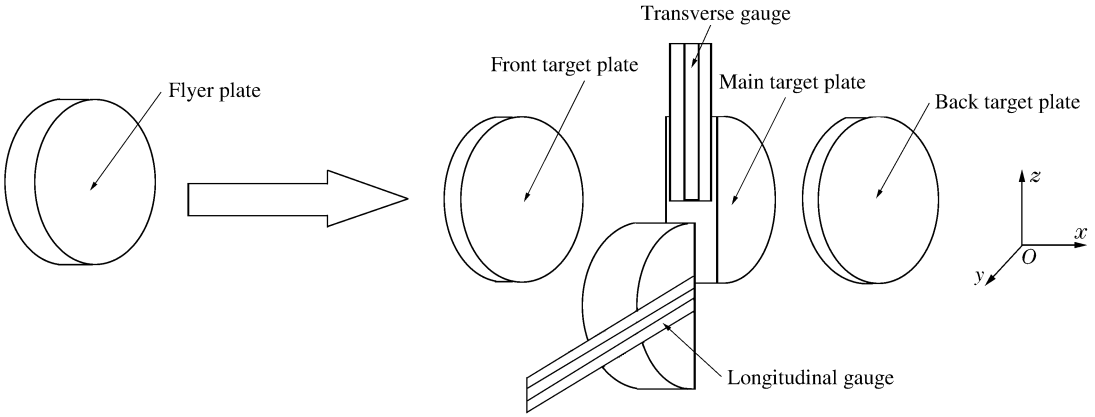


图 4　试样结构与应力计的放置

Fig. 4　Specimen configuration and gauge placement

飞片与靶的材料均为无氧铜,且直径均为 53 mm,其中飞片厚度 6 mm,前靶板厚度 3 mm,后靶板厚度 10 mm,锰铜计厚度(含锰铜计封装件的绝缘层部分)分别为 0.172 mm(横向)和 0.173 mm(纵向)。

实验中,飞片以 249.0 m/s 的速度碰撞靶板,示波器记录了锰铜计上的电压变化($\Delta U/U_0$),因为实验采用的是恒流源,所以有($\Delta R/R_0$)=($\Delta U/U_0$),根据 Rosenberg 等[17]的标定方法,由方程(2)表达的关系,采用文献[17]中的关系式

$$\varepsilon_V=-0.1744+\sqrt{0.03042+\frac{\Delta R/R_0}{9.89}} \tag{9}$$

$$p_g = 116\varepsilon_V + 412\varepsilon_V^2 \tag{10}$$

分别求出 $p_g^x = 4.02$ GPa(纵向锰铜计中的压力峰值)和 $p_g^y = 4.57$ GPa(横向锰铜计中的压力峰值),由方程(8)($\tilde{a}$ 取 1/3,Y_g 取 0.75 GPa)及(5)式、(6)式、(7)式得到 σ_x^m 和 σ_y^m,最后由方程(1)得到流动应力 Y。

我们采用下列 4 种不同的强度模型[18]进行数值模拟,4 种强度模型分别基于 Y/G 为常数[4]及 G/B 为常数[19](Y、G、B 分别为屈服强度、剪切模量、体积模量),其中也采用了 Straub[20]的剪切模量模型及 Johnson-Cook[2]的流动应力模型。

模型 1

$$G_{SCG} = G_0[1 + bpV^{1/3} - h(T - 300)] \tag{11}$$

$$Y_{SCG} = Y_0(1 + \beta\varepsilon_p)^n G_{SCG}/G_0 \tag{12}$$

式中:b、h 为材料常数。

模型 2

$$G_T = C^*\{\rho_0\Gamma_0 D^2\eta(1-\eta) + \rho_0 C_0^2(1-\eta)[1 + (s - \Gamma_0)\eta](1 - s\eta)^{-3}\} \tag{13}$$

$$Y_T = Y_0(1 + \beta\varepsilon_p)^n G_T/G_0 \tag{14}$$

式中:$C^* = 0.35$,为材料常数。

模型 3

$$G_s = G_0^* + g_1(a - a_0)/a^2\exp[-g_2(a - a_0)] \tag{15}$$

$$Y_S = Y_0(1 + \beta\varepsilon_p)^n G_S/G_0 \tag{16}$$

模型 4

$$G_T = C^*\{\rho_0\Gamma_0 D^2\eta(1-\eta) + \rho_0 C_0^2(1-\eta)[1 + (s - \Gamma_0)\eta](1 - s\eta)^{-3}\} \tag{17}$$

$$Y_{JC} = (\sigma_0 + B\varepsilon^{n_1})(1 + C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)[1 - (T^*)^m] \tag{18}$$

计算中所用的无氧铜材料参数列于表 1 中,实测结果与数值模拟结果的比较如图 5 所示。

表 1 无氧铜材料参数

Table 1 Material parameters for OFHC

ρ_0/(g/cm^3)	C_0/(km/s)	s	Γ_0	Y_0/(GPa)	β	Y_{max}/(GPa)	n	G_0/(GPa)	b/(0.1 TPa)$^{-1}$	h
8.93	3.9	1.49	1.99	0.12	3.6	0.6	0.45	47.7	3	3.8×10^{-4}
σ_0	B	n_1	C	m	ξ	G_0^*/(GPa)	X_0	$g_1(Mba-\alpha)$	$g_2(1/\alpha)$	
0.09	0.292	0.31	0.025	1.09	4	51.8	3.73	−39.47	0.601 3	

由图 5(a)与图 5(b)可以看出,实测与数值模拟的应力峰值比较接近,至于图 5(a)中的纵向应力实测曲线,由于在后靶板的缝间产生了稀疏波,因而导致上升沿较缓;而应力平台不够宽则是锰铜计破坏的缘故。选取图 5(c)中纵向和横向应力实测曲线的平台值计算流动应力,结果显示,实测结果与数值模拟结果比较接近,只有模型 4 的计算结果与实验结果偏差较大,因此,在所研究的应力范围内,不宜采用此强度模型(Johnson-Cook 模型)。

事实上,作为锰铜应力计绝缘层的封装件聚合材料,具有非常低的屈服强度,在冲击波作用下是流体。值得指出的是,Al'tshuler 等[21]及 Bakhrakh 等[22]对横向锰铜计的标定有不同的观点,他们数值模拟了横向应力计中流体所处的状态。结果表明,其中的压力 p_m 并不趋于试件中的应力 σ_y^s。对于铝

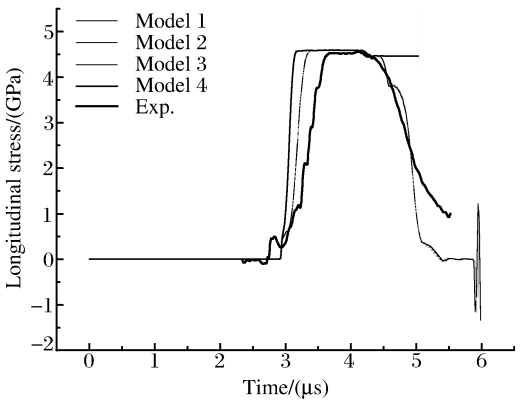


图 5(a) 纵向应力:实验与计算的应力-时间变化

Fig. 5(a) Longitudinal stress: Experimental and computed stress-time plot

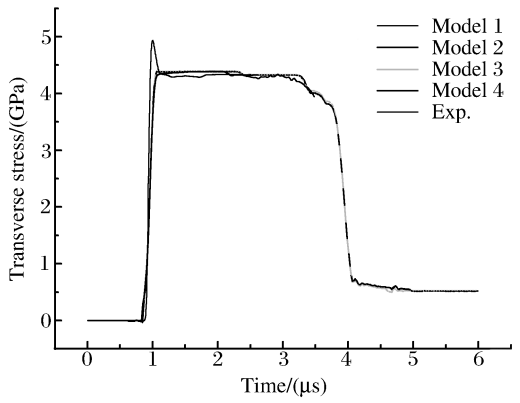


图 5(b)　横向应力:实验与计算的应力-时间变化

Fig. 5(b)　Transverse stress: Experimental and computed stress-time plot

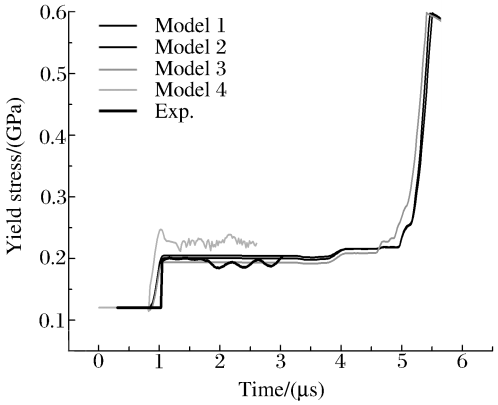


图 5(c)　屈服应力:实验与计算的应力-时间变化

Fig. 5(c)　Yield stress: Experimental and computed stress-time plot

试件而言，$p_m-\sigma_y^s$ 为 $0.2Y_s$;对于铜试件而言 $p_m-\sigma_y^s$ 为 $-0.8Y_s$。换言之,由于压力的不平衡,试件中的屈服应力的测量误差可达−20%或+80%。实际上,由于横向应力计的存在,横向应力计的应力平衡远迟于纵向应力计的应力平衡[23]。因此,平面冲击波载荷下试件应力状态的直接测量比预期复杂得多,要求附加分析冲击波作用下的应力计、封装件和试件中的应力状态。

4　结　论

(1) 利用纵向锰铜应力计进行了无氧铜材料的层裂实验,得到了典型的层裂信号,对用锰铜应力计实测的应力历史与空穴聚集层裂模型的数值模拟结果进行了比较,并将回收样品的观测结果与按空穴聚集层裂模型数值计算的试样中层裂片的厚度进行了比较。结果显示,实验结果与数值模拟结果基本一致。

(2) 利用纵向、横向锰铜应力计进行了组合实验,同时记录了平面冲击状态下锰铜应力计的纵向与横向响应,由锰铜计的压力、体积应变与电阻变化关系,以及应力计压力与试件横向、纵向应力的关系,得到了试件的流动应力。

(3) 从图 5(a)与图 5(b)可以看出,计算结果与实测结果比较接近。在图 5(c)中,模型 1 及模型 2 的计算结果与实验值基本一致,模型 3 的计算结果与实验值稍差,而模型 4 则相差很大。平面冲击波载荷下试件应力状态的直接测量比预期复杂得多,要求附加分析冲击波作用下的应力计、封装件以及试件中的应力状态。

References:

[1] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic Failure of Solid [J]. Phys Rep Rev Sec Phys Lett, 1987, 147(5-6): 253-388.

[2] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain-Rates and High Temperatures [A]//Proc 7th Int Nat Symposium on Ballistics [C]. The Hague, The Netherlands, 1983: 541.

[3] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations [J]. J Appl Phys, 1987, 61: 1816.

[4] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High-Strain Rate [J]. J Appl Phys, 1980, 51: 1498-1533.

[5] Bernstein D, Godfrey C, Klein A, et al. Research on Manganin Pressure Transducers Behavior of Dense Media under High Dynamic Pressure [M]. New York: Gordan and Breach, 1968: 461-467.

[6] Dremin A N, Kanel G I. Compression and Rarefaction Waves in Shock-Compressed Metals [J]. J Appl Mech Tech Phys, 1976, 17: 263-267.

[7] Kanel G I, Molodets A M, Dremin A N. Investigation of Singularities of Glass Strain under Compression Waves [J]. Comb Expl Shock Waves, 1977, 13: 772-779.

[8] Chartagnac P F. Determination of Mean and Deviatoric Stresses in Shock Loaded Solids [J]. J Appl Phys, 1982, 53: 948-953.
[9] Gupta T M. Stress Measurements Using Piezoresistive Gauge: Modelling the Gauge as an Elastic-Plastic Inclusion [J]. J Appl Phys, 1983, 54: 6256-6266.
[10] Rosenberg Z, Partom Y. Lateral Stress Measurement in Shock-Loaded Targets with Transverse Piezoresistive Gauges [J]. J Appl Phys, 1985, 58: 3072-3076.
[11] Millett J C F, Bourne N K, Rosenberg Z. On the Analysis of Transverse Stress Gauge Data from Shock Loading Experiments [J]. J Appl, D: Appl Phys, 1996, 29: 2466-2472.
[12] Greenwood D, Forbes J, Garcia F, et al. Improvements in the Signal Fidelity of the Manganin Stress Gauge [A]// Furnish M D, Thadhani N N, Norie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: Melville, 2002: 1157-1159.
[13] Millett J C F, Bourne N K, Rosenberg Z, et al. Shear Strength Measurements in a Tungsten Alloy during Shock Loading [J]. J Apply Phys, 1999, 86: 6707-6709.
[14] Millett J C F, Bourne N K, Graylll G T, et al. The Response of TiAl Based Alloys to One Dimensional Shock Loading [J]. Acta Materiala, 2002, 50: 4801-4811.
[15] Graylll G T, Bourne N K, Millett J C F. Shock Response of Tantalum: Lateral Stress and Shear Strength througth the Front [J]. J Appl Phys, 2003, 94: 6430-6436.
[16] Chen D N, Tan H, Yu Y Y, et al. A Void Coalescence-Based Spall Model [J]. Int J Imp Eng, 2006, 32: 1752-1767.
[17] Rosenberg Z, Partom Y. Lateral Stress Measurement in Shock-Loaded Targets with Transverse Piezoresistive Gauges [J]. J Appl Phys, 1985, 58: 3072-3076.
[18] Chen D N, Fan C L, Xie S G, et al. Study on Constitutive Relations and Spall Models for Oxygen-Free High-Conductivity Copper under Planar Shock Tests [J]. J Appl Phys, 2007, 101: 063532.
[19] Tonks D L. Deviatoric Stresses and Plastic Strain Rates in Strong Shock Wave for Six Metals [R]. LA-12641, 1993.
[20] Straub G K. Elastic Shear Modulus: Fits to Data and Extrapolation to Large Compressions and Negative Pressure [R]. LA-11806-MS, 1990.
[21] Al'tshular L V, Pavlovsky M N, Komissarov V V, et al. On Shear Strength of Aluminium in Shock Waves [J]. Comb Expl Shock Waves, 1999, 35: 92-96.
[22] Bakhrakh S M, Knyazev V N, Nizovtzev P N, et al. Computational and Theoretical Analysis of the Method of Main Stresses, Problems of Atomic Science and Technology [J]. Series: Theoretical and Applied Physics, 2001: 13-17. (in Russ)
[23] Kanel G I, Razorenov S V, Fortov V E. Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter [M]. New York: Springer-Verlag Inc, 2004: 55-58.

Measurements in Planar Shock Wave Experiments for OFHC Using Manganin Gauges

FAN Chun-Lei[1,2], HU Jin-Wei[2], CHEN Da-Nian[2], WANG Huan-Ran[2], XIE Shu-Gang[2]

(1. *Department of Architectural Engineering, Jiaxing Nanyang Vocational and Technical College, Jiaxing* 314003, *China*;
2. *Mechanics & Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo* 315211, *China*)

Abstract: The typical spall signals are obtained in planar shock wave experiments of oxygen-free high-conductivity copper(OFHC) using manganin gauges. The yield stresses of OFHC under planar shock loading are also obtained from longitudinal and transverse stresses recorded by manganin gauges. The experimental data are compared with numerical simulations. The influence of strength models for OFHC at high strain rate and high pressure on the simulated results are revealed. The determination of transverse stresses by using manganin gauges are also discussed.

Key words: planar shock wave; spallation; longitudinal stress; transverse stress; yield stress