

文章编号:1001-5132(2009)02-0293-04

无氧铜的平面冲击波实验研究

范春雷¹, 陈大年²

(1.嘉兴南洋职业技术学院 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, 对于无氧铜(OFHC)进行了层裂实验, 得到了典型的层裂信号; 同时测量了试件中的纵向应力和横向应力, 以直接确定材料的流动应力. 采用构建的2种本构模型对无氧铜平面冲击波试验进行了数值模拟, 比较并分析了相关的实验与理论计算结果.

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

层裂是一种典型的动态断裂现象, 涉及材料的动态本构与损伤演化特性. 由于层裂研究的复杂性, 层裂研究一直是冲击动力学研究的前沿课题. 2003年Autoun等^[1]已对层裂研究的现状作了权威性的评论. 此前, Davison等^[2]及Curran等^[3-4]已对近几十年来的层裂研究作了全面的进展报导.

材料在平面冲击波载荷下的流动应力测试是研究高压、高应变率本构模型的关键问题, 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与横向应力, 这种方法最早是由Bernstein等^[5]提出的, 并有一系列研究致力于此, 其中包括Dremin^[6], Kanel^[7], Millett等^[8-10]以及Rosenberg^[11]发表的很多有关直接测量不同材料在平面冲击波试验中的流动应力的结果. 国内的Dai Lanhong^[12]等也发表了类似试验的结果.

利用纵向锰铜应力计, 对无氧铜材料进行了层裂实验, 记录无氧铜/PMMA界面附近的应力历史, 获得试样的层裂信息, 并通过回收试样, 观测试样的层裂及损伤分布. 采用基于空穴聚集^[4]的层

裂模型, 进行数值模拟平板撞击致层裂试验. 并且以OFHC平面冲击波试验中记录OFHC的纵向与横向应力随时间变化的过程为基础, 得到屈服强度随时间的变化历程. 对OFHC平面冲击波试验进行数值模拟, 并与试验结果作了比较, 从而论及高压、高应变率本构模型.

1 OFHC平面冲击波致层裂试验

OFHC的层裂实验在宁波大学浙江省冲击与安全工程重点实验室的 $\Phi 57$ mm一级气炮上进行, 相应装置如图1所示. 在采用压阻应力计测试的平面冲击波实验中, 为使实验数据精确真实地被记录, 对信号记录系统做了适当的调整. 由于在实验过程中, 靶室内的测速线路和信号传输线路会产生不确定的电磁信号干扰; 在信号线与信号记录端(示波器)连接点, 由于示波器内外电阻相差太大(测试线路电阻 50Ω , 而示波器内部电阻 1000Ω), 当电信号到达示波器接受端时, 会发生反射, 引起

波形的周期性振荡. 因此, 对靶室的各个线路端口用铜片包裹, 以达到屏蔽的效果; 并在靶室内壁引出接地零线以减少信号干扰; 在示波器接收端使用 $50\ \Omega$ 电阻匹配, 使 $50\ \Omega$ 匹配头和 $1000\ \Omega$ 内部电阻并联, 内外电阻达到耦合, 以消除波形的周期性振荡.

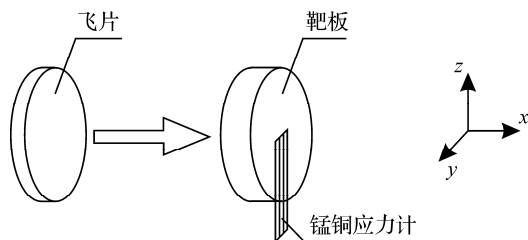


图1 试样结构与应力计的放置

飞片与靶的材料均为无氧铜, 且直径均为 $53\ \text{mm}$, 厚度分别为 $3\ \text{mm}$ 和 $6\ \text{mm}$, 锰铜计厚度(含锰铜计封装件的绝缘层部分) $0.174\ \text{mm}$. 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导致数据分散. 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为无氧铜层裂实验的典型结果, 锰铜应力计实测应力历程, 实验飞片碰撞速度为 $320.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 采用[4]文献提出的空穴聚集层裂模型, 数值模拟无氧铜的平面冲击波致层裂试验, 其中层裂强度 $\Sigma=1.3\ \text{GPa}$, 临界损伤 $D_0=0.2$. 数值模拟结果与实验结果比较如图2及图3所示. 图3是按空穴聚集层裂模型^[4]数值计算的试件横截面的损伤分布, 图4显示该实验回收试样横截面的层裂现象. 从图3和图4的比较可以看出, 数值模拟的试样中层裂片厚度与回收观测基本一致.

2 OFHC 平面冲击波测定屈服强度

靶由2片OFHC试件组成, 迎撞击的OFHC试件厚 $10\ \text{mm}$, 被横向剖开后设置于横向锰铜应力计中, 距撞击面 $3\ \text{mm}$, 锰铜应力计两边具有电绝缘

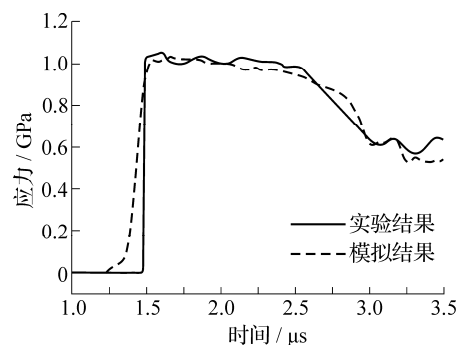


图2 锰铜应力计实测应力与模型数值模拟结果比较

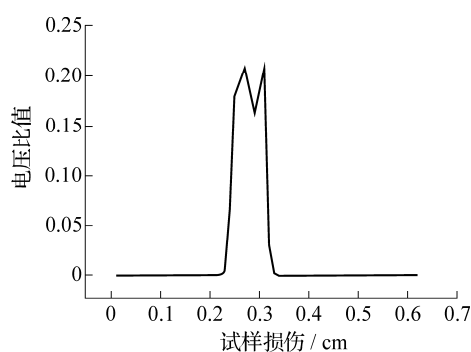


图3 计算得到的试样中的损伤分布



图4 样品回收照片

层, 纵向锰铜应力计置于前后2片OFHC之间, 锰铜计厚度(含绝缘层部分)分别为 $0.172\ \text{mm}$ (横向)和 $0.173\ \text{mm}$ (纵向). $6\ \text{mm}$ 厚的OFHC飞片在一级气炮的驱动下高速冲击上述OFHC靶, 具体实验装置及锰铜应力计的布局如图5所示. 图6显示了所记录的典型试验的纵向应力与横向应力历史, 其中飞片速度为 $249\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 在图6(a)中, 所记录的纵向应力峰值约 $4.5\ \text{GPa}$, 历时约 $2\ \mu\text{s}$. 至于图6(a)中的纵向应力实测曲线, 由于后靶板的缝间产生稀疏波, 导致上升沿较缓; 而应力平台不够宽是锰铜计破坏的缘故. 在图6(b)中, 所记录的横向应力在趋于稳态的平台值前有一个很小的尖峰, 笔者认为, 主要原因是电信号的脉冲跳增, 并非试件的力学

响应. 此现象也已由 Millett 等^[8]指出.

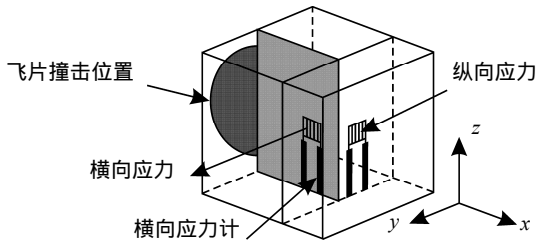


图 5 试样结构与应力计的放置

实验中, 示波器记录了锰铜计上的电压变化 $\Delta V / V_0$, 因实验采用的是恒流源, 所以 $\Delta R / R_0 = \Delta V / V_0$, 采用文献^[11]中的关系式:

$$\varepsilon_v = -0.1744 + \sqrt{0.03042 + \Delta R / 9.89R_0}, \quad (1)$$

$$p_g = 116\varepsilon_v + 412\varepsilon_v^2, \quad (2)$$

分别求出 $p_g^x = 4.02 \text{ GPa}$ (纵向锰铜计中的压力峰值) 和 $p_g^y = 4.57 \text{ GPa}$ (横向锰铜计中的压力峰值), 根据 Rosenberg 等^[11]的标定方法, 得到 σ_x^m 和 σ_y^m , 最后由下式得到流动应力 Y .

$$Y = \sigma_x^m - \sigma_y^m. \quad (3)$$

采用下列 2 种不同的强度模型^[13]进行数值模拟:

模型 1:

$$G_{SCG} = G_0[1 + bpV^{1/3} - h(T - 300)], \quad (4)$$

$$Y_{SCG} = Y_0(1 + \beta\varepsilon_p)^n G_{SCG} / G_0. \quad (5)$$

模型 2:

$$G_T = C^* \{ \rho_0 \Gamma_0 D^2 \eta (1 - \eta) + \rho_0 C_0^2 (1 - \eta) \cdot [1 + (s - \Gamma_0)\eta](1 - s\eta)^{-3} \}, \quad (6)$$

$$Y_{JC} = (\sigma_0 + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)[1 - (T^*)^m], \quad (7)$$

其中, $C = 0.025$, $C^* = 0.35$ 为材料常数.

计算中所用的无氧铜(OFHC)材料参数列于表 1, 实测结果与数值模拟结果比较如图 6 所示.

表 1 OFHC 材料参数

$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_0 / (\text{k} \cdot \text{ms}^{-1})$	s	Γ_0	Y_0 / GPa	β	m
8.93	3.9	1.49	1.99	0.12	3.6	1.09
$b / (\text{MPar}^{-1})$	G_0 / GPa	n	h	σ_0	B	n_1
3	47.7	0.45	3.8×10^{-4}	0.09	0.292	0.31

虽然由图 6(a)与图 6(b)可以看出, 实测的与采用 2 种不同本构的数值模拟纵向与横向应力峰值比较接近, 但是由(3)式得到的流动应力是不一样的. 如图 6(c)所示, 模型 1 的数值模拟结果与实测比较接近, 模型 2 的计算结果与实验偏差较大. 事实上, 模型 2 中的 Y_{JC} 表达式是 Johnson-Cook 本构, 来自 Hopkinson 实验, 其并不适合描述平面冲击波试验.

3 结论

(1) 利用纵向锰铜应力计, 进行了层裂实验, 得到了典型的层裂信号. 并作了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^[4]数值模拟结果的比较, 以及按空穴聚集层裂模型^[4]数值计算的试样中层裂片的厚度与回收观测的比较. 结果显示, 实测与数值模拟基本一致.

(2) 利用纵向、横向锰铜应力计进行的组合实验, 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, 得到试件的流动应力.

(3) 对于 OFHC 平面冲击波试验进行了数值模拟. 结果显示, 虽然实测的纵向、横向应力与采用 2 种不同本构所得到的数值模拟的纵向、横向应力

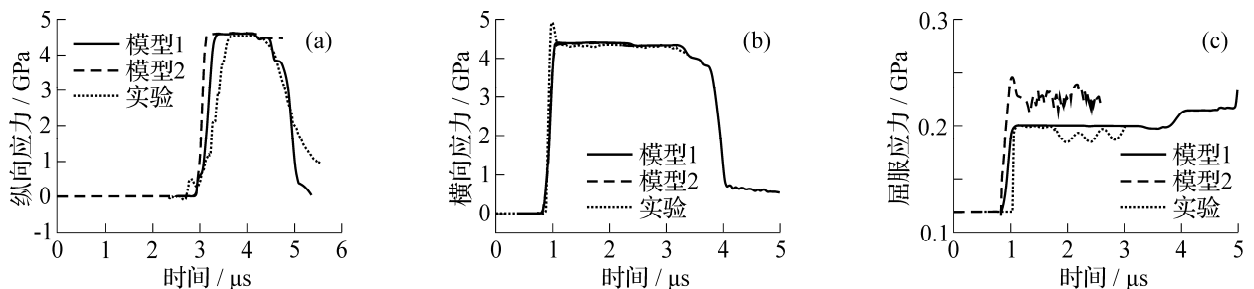


图 6 实验与计算的应力 - 时间变化

峰值比较接近,但是由(3)式得到的流动应力是不一样的,采用本构模型1的模拟结果与实测基本一致,模型2的计算结果与实验偏差较大.

参考文献:

- [1] Antoun T H, Seaman L, Curran D R, et al. Spall Fracture [M]. New York: Springer Press, 2003.
- [2] Davison L, Grady D E, Shahinpoor M. High pressure shock compression of solids II: Dynamic fracture and fragmentation[M]. New York: Springer Press, 1996.
- [3] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solid[J]. Phys Rep Rev, 1987, 147(5/6):253-388.
- [4] Chen Danian, Tan Hua, Yu Yuying, et al, Yin Zhihua. A void coalescence-based spall model[J]. Int J Imp Eng, 2006, 32:1 752-1 767
- [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: Gordon and Breach, 1968.
- [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] Millett J C F, Bourne N K, Rosenberg Z. On the analysis of transverse stress gauge data from shock loading experiments[J]. J Apply Phys, 1996, 29:2 466-2 472.
- [9] Millett J C F, Bourne N K, Rosenberg Z. Shear strength measurements in a tungsten alloy during shock loading[J]. J Apply Phys, 1999, 86:6 707-6 709.
- [10] Millett J C F, Bourne N K, Graylll G T. The response of TiAl based alloys to one dimensional shock loading[J]. Acta Materiala, 2002, 50:4 801-4 811.
- [11] Rosenberg Z, Partom Y. Lateral stress measurement in shock-loaded targets with transverse piezoresistive gauges[J]. J Appl Phys, 1985, 58:3 072-3 076.
- [12] Dai Lanhong, Yan Min, Shen Letian. Shear strength measurements in Ly-12 Aluminium alloy during shock loading[J]. Chin Phys Lett, 2004, 21(4):707-709.
- [13] Chen Danian, Fan Chunlei, Hu Jinwei. Mechanical yielding and strength behavior of OFHC copper in planar shock waves[J]. Chin Phys Lett, 2007, 24(3):786-789.

Research on Experiment for OFHC Under Planar Shock Loading

FAN Chun-lei¹, CHEN Da-nian²

(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 for 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 numerical simulations of the planar shock tests for OFHC (copper) are performed using the two constructed models and compared with the experimental results.

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

CLC number: O347.3

Document code: A

(责任编辑 章践立)