

文章编号: 1001-1455(2006)06-0532-05

无氧铜层裂的实验与数值研究*

谢书港, 范春雷, 陈大年, 王焕然

(宁波大学力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用一级气体炮对国产的无氧铜(OFHC)进行了平板撞击致层裂实验, 3 mm 厚的 OFHC 飞片撞击 6 mm 厚的 OFHC 靶, 采用锰铜应力计记录试样/有机玻璃(PMMA)界面附近的应力历史, 获得试样发生层裂的信息。软回收试样, 观测回收试样的层裂片。采用基于空穴聚集的层裂模型, 数值模拟这些平板撞击致层裂实验。数值模拟的应力剖面以及试样层裂片厚度与实验结果基本一致。此外, 对于国外相关的 OFHC 层裂实验, 采用基于空穴聚集的层裂模型也作了相应的数值模拟, 并进行了比较。

关键词: 固体力学; 层裂; 平板撞击; 无氧铜; 数值模拟

中图分类号: O347.1

国标学科代码: 130 · 3530

文献标志码: A

1 引言

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 T. H. Autoun 等^[1] 已对层裂研究的现状作了权威性评论。在此之前, L. Davison 等^[2] 及 D. R. Curran 等^[3] 已对近几十年来在层裂研究领域的各种实验技术、测量诊断以及层裂过程的本构模型作了全面的进展报道。然而, 描述层裂的微损伤成核、增长与聚合的过程复杂, 需要从不同损伤程度的一系列实验确定众多参数, 因此目前仍然缺乏真正能应用的层裂模型。无氧铜(OFHC)是典型的延性材料, 关于这种材料的层裂, D. R. Curran 等^[3] 采用微空穴的成核与增长模型(NAG)已进行过详细研究。然而, 这些研究涉及大量参数, 这些参数还不能确定能否适用于国产 OFHC 材料。本文中对国产 OFHC 在气炮上进行平板撞击致层裂实验, 利用锰铜应力计记录试样/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。采用文献^[4]中提出的基于空穴聚集的层裂模型, 数值模拟平板撞击致层裂实验。数值模拟结果与实测的试样/PMMA 界面附近应力历史以及观测的回收试样层裂进行比较。

2 实验设计及结果

实验在 $\varnothing 57$ mm 一级气体炮上进行。实验装置如图 1 所示。图中飞片与试样均为 OFHC, 飞片的尺寸为 $\varnothing 53$ mm \times 3 mm, 试样尺寸为 $\varnothing 53$ mm \times 6 mm。在试样后置有 2 mm 和 20 mm 厚的有机玻璃片(PMMA), 锰铜应力计夹在有机玻璃片中间, 用于记录应力随时间的变化, 从而得到层裂信息。

所用锰铜应力计, 应力按 $p = K\Delta V/V$ 计算, 其中 $\Delta V/V$ 为电压相对变化, $K = 40$ GPa。对于飞片碰撞速度为 320 m/s(实验 1)和 297 m/s(实验 2)的应力 σ_x 测试结果如图 2 所示。在图 2 中可以看到明

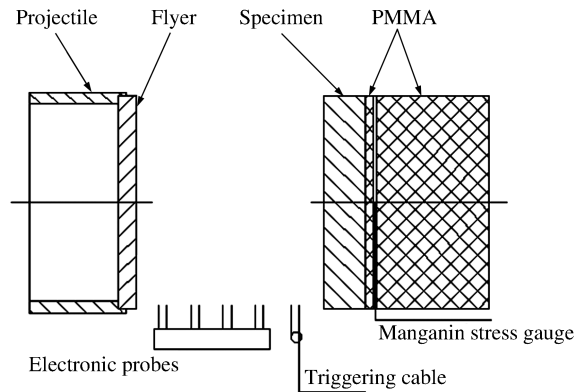


图 1 平板撞击致层裂实验示意图

Fig. 1 Schematic of a plate-impact spall experiment

* 收稿日期: 2005-09-14; 修回日期: 2006-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272058); 中国工程物理研究院专项基金项目

作者简介: 谢书港(1977—), 男, 硕士研究生。

显的拉回信号,这些信号对应于试样中发生层裂分离后压缩波传到应力计所致。由于实验 2 中所用的锰铜应力计的封装层厚度明显大于实验 1 中所用的锰铜应力计的封装层厚度,实验 2 应力信号的上升前沿缓于实验 1 的上升前沿。采用基于空穴聚集的层裂模型^[4],数值模拟得到的应力计位置的应力历史也示于图 2 中。图 3 显示回收试样中的层裂现象。

对样品的软回收分析是必要的,前提是要设计好可靠的回收装置,确保样品在回收过程中不受再次冲击。图 3 所示为实验 1 和实验 2 软回收样品的剖面图。从图 3 中可以看出明显的层裂裂缝。

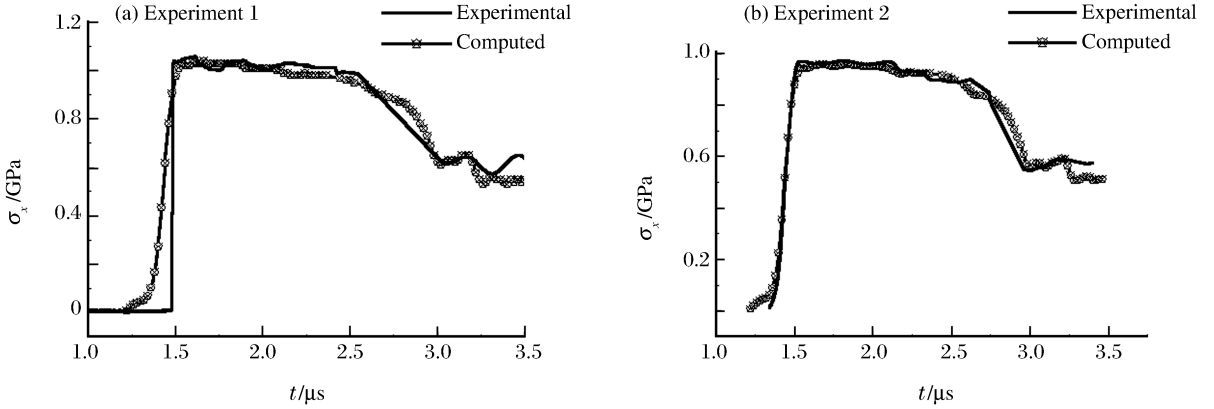


图 2 锰铜应力计实测的应力计位置应力历史与采用空穴聚集层裂模型数值模拟结果比较

Fig. 2 Comparison of recorded stress from manganin gage in PMMA behind copper with computed stress by using void coalescence-based spall model

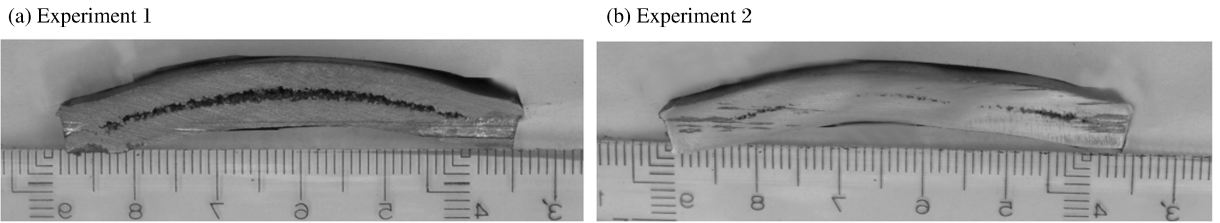


图 3 交于层裂面的回收试样横截面照片

Fig. 3 Macrograph of the etched cross section orthogonal to the spall plane of recovered sample

3 数值模拟与结果

文献[4]中曾提出一种基于空穴聚集的层裂模型。该模型基于如下假设:在空穴聚集早期,微空穴的主要效应仍是减小应力的作用面积;在空穴聚集后期,应力按空穴聚集时的应力-空隙度依赖关系减小。此模型的核心是引入空穴聚集的应力松弛方程,与计及损伤的守恒方程、状态方程以及本构方程一起构成求解全部变量包括损伤的封闭联立方程组,在初、边值条件下数值模拟延性层裂的全过程。

这些方程组包括应力松弛方程

$$-(\bar{p} + \bar{q}) + \bar{S}_1 = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{v_v/\bar{v}}{D_0} \right)^{2/3} \right] \bar{\Sigma} & v_v/\bar{v} \leq \frac{2.53}{(1 + \bar{\Sigma}/\bar{Y})^3} \\ \bar{Y} \left\{ \left[\frac{2.53}{(v_v/\bar{v})} \right]^{1/3} - 1 \right\} & v_v/\bar{v} > \frac{2.53}{(1 + \bar{\Sigma}/\bar{Y})^3} \end{cases} \quad (1)$$

计及损伤的能量守恒方程

$$\dot{\bar{e}} = \bar{v} \bar{S}_1 \dot{\bar{\epsilon}}_1 - (\bar{p} + \bar{q}) \dot{\bar{v}} \quad (2)$$

式中: $\dot{\bar{\epsilon}}_1 = \frac{\partial \bar{u}}{\partial X}$, $X = X(x, t)$ 。

计及损伤的状态方程

$$\bar{p} = (1 - v_v/\bar{v}) p_s \quad (3)$$

$$p_s = k_1 \eta + k_2 \eta^2 + k_3 \eta^3 + \Gamma e_s \quad (4)$$

式中: $k_1 = \rho_0 c_0^2$, $k_2 = \rho_0 c_0^2 (2\lambda - \Gamma/2)$, $k_3 = \rho_0 c_0^2 \lambda (3\lambda - \Gamma)$, $\eta = 1 - \rho_0/\rho_s$ 。

计及损伤的本构方程

$$\bar{Y} = (1 - F^* v_v/\bar{v}) [Y_0 (1 + \beta \epsilon_{eq}^p)^n] [1 + b p_s (\rho_0/\rho_s)^{1/3} - h(T - 300)] \quad (5)$$

$$\bar{G} = (1 - F^* v_v/\bar{v}) G_0 [1 + b p_s (\rho_0/\rho_s)^{1/3} - h(T - 300)] \quad (6)$$

式中: $F^* = 15 \frac{1-\mu}{7-5\mu}$, $v_v = \bar{v} - v_s$, $\dot{S}_1 = 2\bar{G} \left(\dot{\epsilon}_1 - \frac{1}{3} \frac{\dot{v}}{\bar{v}} \right)$, $\dot{S}_2 = \dot{S}_3 = -\frac{2}{3} \bar{G} \frac{\dot{v}}{\bar{v}}$, $(\bar{S}_1^2 + \bar{S}_2^2 + \bar{S}_3^2) - \frac{2}{3} \bar{Y}^2 \leq 0$ 。其中, “ \cdot ”表示随流微商, “-”表示密实固体与空穴组成的含损伤固体的量, 下标 0 表示初始值, 下标 s 表示密实固体的量。x 为微元的 Lagrange 坐标, $\rho, v, v_v, p, S_1, S_2, S_3$ 分别为密度、比容、空穴比体积、压力、偏应力。Y 和 G 分别为屈服强度和剪切模量, μ 为泊松比, Σ 为层裂强度。

应力松弛方程(1)基于由 S. Cochran 等^[5]及 D. L. Tonks 等^[6]提出的关于空穴聚集时的应力松弛理论。在方程(4)中, 采用了基于 Hugoniot 冲击绝热方程 $u_s = c_0 + \lambda u$ 的 Grüneison 状态方程^[7], 其中 u_s, u 分别为冲击波速度及波后粒子速度, c_0, λ 为材料常数, Γ 为 Grüneison 参数。在方程(5)及(6)中, 空穴间固体的本构方程采用 D. J. Steinberg 等^[8]提出的方程, 其中 ϵ_{eq}^p, T 分别为等效塑性应变与温度。 $\beta, n, b, T_{m0}, G_0, Y_0, Y_{max}$ 为材料常数。

人为粘性

$$\bar{q} = \begin{cases} \frac{(2\rho_0 \Delta x)^2}{\bar{v}} (\dot{v})^2 & \dot{v} < 0 \\ 0 & \dot{v} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

应该指出, \bar{v} 在有限差分计算中, 已由如下动量及质量守恒方程确定

$$\frac{\dot{u}}{\bar{v}} = \frac{\partial [-(\bar{p} + \bar{q}) + \bar{S}_1]}{\partial X}, \quad \frac{\dot{v}}{\bar{v}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial X} \quad (8)$$

一旦拉伸应力达到层裂强度 Σ , $\bar{u}(x, t), X(x, t), \bar{v}(x, t), \bar{q}(x, t), \bar{p}(x, t), \bar{e}(x, t), v_v(x, t)$ 由方程(1)至(8)求解。当 $D(x, t) = v_v(x, t)/\bar{v}(x, t)$ 达到临界值 D_0 , 层裂过程完成。这种基于空穴聚集的层裂模型仅包含两个参数: 层裂强度 Σ 及临界损伤度 D_0 。关于 Σ 的初始选取, 可以依据 D. E. Grday^[9]的理论

$$\Sigma = (2\rho_0 c_0^2 Y \epsilon_c)^{1/2} \quad (9)$$

式中: ϵ_c 为空穴聚集时的体积应变(D. E. Grday^[9]取为常数 0.15)。

临界损伤度 D_0 与层裂过程 t_s 有关。按 D. E. Grday^[9]的理论

$$t_s = \left(\frac{2Y\epsilon_c}{\rho c_0^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Σ 与 D_0 的最终确定, 应该通过数值模拟, 使计算的应力历史以及试样中的损伤分布与实验结果基本一致。大量实验结果已表明, 用传统测定方法由试样自由面速度历史或试样/低阻抗材料界面应力历史确定的层裂强度 Σ 并不是材料常数, 而是应变率、温度等的函数。陈大年等^[10]已指出, 传统测定方程所确定的层裂强度仅对采用瞬时层裂准则所得到的数值模拟的靶板自由面速度历史或靶板/低阻抗材料界面应力历史有效, 而对实验测得的相应历史并非有效。就本文中的观点而言, 损伤的演化并非个体行为, 而是由整个问题的初、边值问题决定的。因此, 损伤演化特征量 Σ 和 D_0 也并非材料常数, 由冲击波致层裂的事件确定。本文中已发现, 数值模拟结果对于 Σ 和 D_0 的敏感性比较强, 也许是物理实质, 也可能与方程(1)表达的应力松弛特性函数有关, 这是需要进一步研究的问题。

对于上述实验, 本文中进行了数值模拟。所用状态方程参数见表 1。Steinberg-Guinan 本构方程参数^[8] $Y = 0.12 \text{ GPa}$, $Y_{max} = 0.60 \text{ GPa}$, $\beta = 36.0$, $n = 0.45$, $b^* = 3.0$, $h = 3.8 \times 10^{-4}$, $T_{m0} = 1.79 \times 10^3 \text{ K}$, $G_0 = 47.7 \text{ GPa}$ 。层裂模型参数 $\Sigma = 1.3 \text{ GPa}$, $D_0 = 0.2$ 。数值模拟的距试样/PMMA 界面 2 mm 处的应力

历史与实测应力历史比较见图 2。计算的试样中损伤分布见于图 4。图 4 中纵坐标为微空穴的比体积，横坐标 X 为离撞击面的距离。从图 3~4 可看出，数值模拟的试样中层裂片厚度与回收观测基本一致。

表 1 Grüneisen 状态方程参数^[7]

Table 1 Parameters^[7] of Grüneisen equation of state

材料	$\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	$c_0 / (\text{km/s})$	λ	Γ	k_1 / GPa	k_2 / GPa	k_3 / GPa
无氧铜	8.93	3.90	1.49	1.99	138.00	274.9	511.3
PMMA	1.18	2.28	2.43	0.75	6.15	27.5	97.7

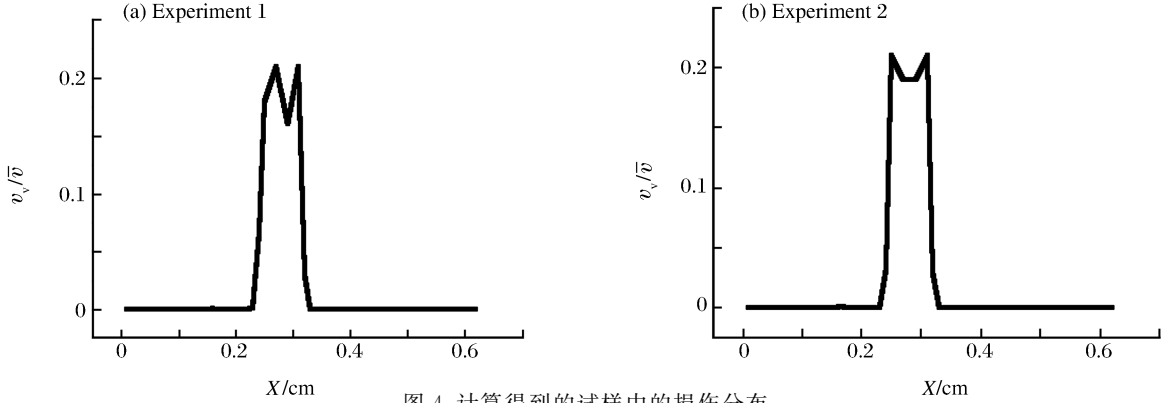


图 4 计算得到的试样中的损伤分布
Fig. 4 Computed damage distribution in sample

为比较起见，对于国外 OFHC 的有关层裂实验^[3]（如下例 1 与例 2），也采用基于空穴聚集的层裂模型进行了数值模拟。

例 1 0.62 mm 厚的 OFHC 飞片以速度 0.159 km/s 撞击 1.59 mm 厚的 OFHC 试样^[3]。试样后贴有 PMMA 板，并嵌有锰铜应力计。数值模拟结果与实验结果比较示于图 5(a) 中。

例 2 1.14 mm 厚的铜飞片以速度 0.129 km/s 撞击 3.18 mm 厚的铜试样^[3]，试样后贴有 PMMA 板并嵌入锰铜应力计。实验结果与数值模拟结果比较示于图 5(b) 中。

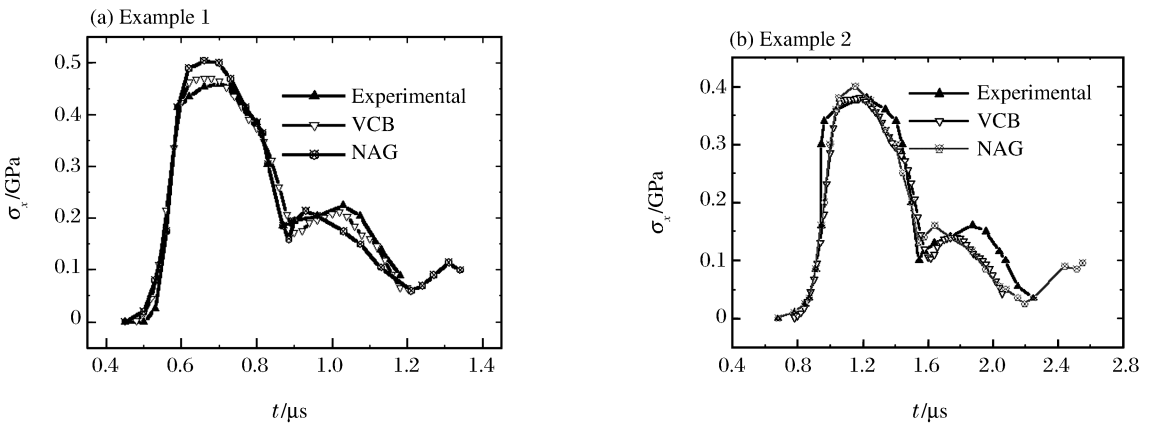


图 5 实测应力历史与计算应力历史的比较

Fig. 5 Comparison of stress recorded from manganin gage in PMMA behind copper with computed stress

图 5 中，VCB 为采用基于空穴聚集的层裂模型^[4]的计算结果。其中 $\Sigma=1.3 \text{ GPa}$, $D_0=0.2$ 。NAG 为 D. R. Curran 等^[3]采用成核与增长模型的计算结果。

4 结 论

(1) 采用基于空穴聚集的层裂模型，数值模拟平板撞击致层裂实验。数值模拟的试样/PMMA 界面附近的应力历史以及层裂片厚度与实验结果基本一致。

(2)对于国外的 OFHC 层裂相关实验也作了相应的数值模拟,研究表明,国产的 OFHC 材料与国外的 OFHC 材料的特性包括层裂性能基本一致,在所研究的范围内,层裂强度 $\Sigma=1.3$ GPa,临界损伤度 $D_0=0.2$ 。

参考文献:

- [1] Antoun T H, Seaman L, Curran D R, et al. Spall Fracture[M]. New York: Springer, 2003.
- [2] Davison L, Grady D E, Shahinpoor M. High Pressure Shock Compression of Solids II: Dynamic Fracture and Fragmentation[M]. New York: Springer, 1996.
- [3] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solid[J]. Physics Reports, A Review Section of Physics Letters, 1987,147(5-6):253-388.
- [4] Chen D N, Tan H, Yu Y Y, et al. A void coalescence-based spall mode[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32:1752-1767.
- [5] Cochran S, Banner D. Spall studies in uranium[J]. Journal of Applied Physics, 1977,48:2729-2737.
- [6] Tonks D L, Zurek A K, Thissell W R. Void coalescence model for ductile damage[A]. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter[C]. 2001:611-614.
- [7] Wilkins M L. Calculation of elastic-plastic flow[A]. Alder B. Methods in Computational Physics V. 3[M]. New York: Academic Press, 1964:211-263.
- [8] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51:1498-1504.
- [9] Grady D E. The spall strength of condensed matter[J]. Journal of The Mechanics and Physics of Solids, 1988,36: 353-384.
- [10] Chen D N, Yu Y Y, Yin Z H, et al. On the validity of the traditional measurement of spall strength[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31:811-824.

Experimental and numerical studies on spall of OFHC

XIE Shu-gang, FAN Chun-lei, CHEN Da-nian^{*}, WANG Huan-ran
(Mechanics & Materials Science Research Center, Ningbo University,
Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: The planar spall experiments for OFHC were performed on the gas gun facility. 6 mm thickness OFHC sample with PMMA buffer was mounted in a stationary target holder and impacted by 3 mm thickness OFHC flyer carried within the head of the projectile body. The stress history at the interface between the OFHC sample and PMMA was measured by using manganin gage and the OFHC sample was recovered for post-test evolution. A void coalescence-based spall model proposed by Chen et al was used to simulate these experiments numerically. The computed results were compared with the stress recorded by manganin gage and the observed spall plane in recovered samples. The planar spall experiments for OFHC performed by Curran et al were simulated numerically by using the void coalescence-based spall model.

Key words: solid mechanics; spall; plate impact; OFHC; numeral simulation

^{*} Corresponding author: CHEN Da-nian
E-mail address: chdnch@nbu.edu.cn
Telephone: 0574-87600981