

文章编号: 1001-1455(2009)03-0295-05

# 高导无氧铜圆柱-平板冲击实验 及不同本构模型效果比较\*

吴善幸<sup>1</sup>, 陈大年<sup>1,2</sup>, 胡金伟<sup>2</sup>, 张 铎<sup>1</sup>, 金扬辉<sup>2</sup>, 王焕然<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072;

2. 宁波大学力学与材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 利用一级气炮对高导无氧铜 (OFHC) 进行了圆柱以 205 m/s 速度冲击平板实验, 并进行了数值模拟。用锰铜应力计测试了靶中应力随时间的变化, 并进行了回收观测。采用 Johnson-Cook (J-C)、Zerilli-Armstrong (Z-A)、Steinberg-Cochran-Guinan (S-C-G) 3 种本构模型对实验进行了数值模拟。实验结果与数值模拟结果比较表明: 就峰值应力而言, 采用 J-C、Z-A 及 S-C-G 本构模型的计算结果都比较接近实验; 就圆柱变形而言, Z-A 及 S-C-G 模型的计算较 J-C 模型结果更符合实验。然而, 速度为 500 m/s 冲击实验的数值模拟结果表明: 3 种本构模型的计算结果差异明显。

**关键词:** 固体力学; 本构模型; 冲击实验; 高导无氧铜; 圆柱; 平板

**中图分类号:** O347.3      **国标学科代码:** 130·15      **文献标志码:** A

## 1 引 言

对高应变率本构模型的描述很多, 有基于经验的 Johnson-Cook (J-C) 模型<sup>[1]</sup>, 通过 Hopkinson 压杆或拉杆实验 (一维应力状态) 确定其参数; 也有具有物理背景的 Zerilli-Armstrong (Z-A) 模型<sup>[2]</sup>, 根据位错动力学理论确定其参数。高压、高应变率本构模型也正在发展中, 如 Steinberg-Cochran-Guinan (S-C-G) 模型<sup>[3]</sup>, 这种本构模型主要针对平面冲击波实验。各种本构关系有其建立的背景, 这些本构方程的适用范围是人们关注的问题。

G. R. Johnson 等<sup>[4]</sup>对高导无氧铜 (OFHC) 作了 Taylor 实验 (圆柱冲击刚壁), 用以考察由 Hopkinson 等实验确定的 J-C 或 Z-A 模型适用于复杂应力状态的可能性, 这是一种对本构关系的独立检验方法 (不同于本构关系导出时的应力状态)。事实上, 考虑的是以有效应力-有效应变表达本构关系的可行性。G. R. Johnson 等<sup>[4]</sup>的结论是: 用 Z-A 模型预估的 Taylor 实验试件的最终形状比用 J-C 模型预估的更符合实际情况。

本文中以 OFHC 的圆柱冲击平板为研究对象, 针对冲击速度为 205 m/s 的典型实验, 讨论 J-C、Z-A 以及 S-C-G 模型在数值模拟中的适用性, 不仅比较试件变形, 还与靶中应力记录比较。对冲击速度为 500 m/s 的实验进行的数值模拟结果表明, 3 种本构模型的结果差异明显。

## 2 实 验

圆柱体冲击平板是冲击工程中一类典型的基本问题, 与 Taylor 实验相比, 除具有对材料本构关系的检验性外, 还具有广泛性和复杂性。为此, 实验中不仅对试件进行了回收观测, 还记录了平面靶中的应力历史, 试图从瞬态及回收两方面取得实验与数值模拟结果的比较, 从而比较并讨论本构关系的适用性。实验在  $\varnothing 57$  mm 一级气炮上进行, 实验装置如图 1 所示。

\* 收稿日期: 2008-01-14; 修回日期: 2008-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10672082)

作者简介: 吴善幸 (1967—), 男, 博士研究生。

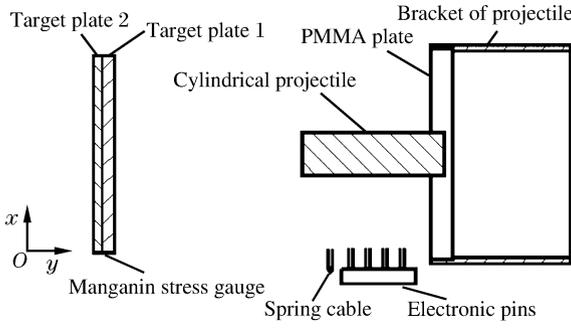


图 1 圆柱-平板冲击实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a cylindrical projectile-thin plate impact test

圆柱体和靶的材料均为 OFHC,圆柱体的直径为 10 mm、长度为 30 mm。圆柱体固定在有机玻璃片上,有机玻璃片和圆柱体由弹托推动,其速度由测速探针连接时间间隔测量仪测量。在圆柱体接触靶板的瞬间,有机玻璃片立即破碎,靶板只受到圆柱体的冲击效应。平板靶由 2 片 OFHC 试件组成,为测量平板中的应力历史,在 2 片 OFHC 之间埋设锰铜应力计,锰铜应力计两边有电绝缘层。平板靶直径为 46 mm,迎面冲击的 OFHC 厚度为 3 mm,另一片 OFHC 厚度为 2 mm。实验设计要求锰铜应力计测得的峰值应力不受来自旁

侧稀疏波的影响。锰铜计连接示波器,记录电压变化。当弹托碰到触发探针时,示波器受触发开始记录电信号。根据 Z. Rosenberg 等<sup>[5]</sup>的实验研究,由锰铜应力计的电压变化可计算得到锰铜应力计的压力  $p_g$ 。在有关锰铜计与试件间的应力平衡与应变关系假设下,可以确定试件中的纵向应力,得到平面靶中的应力  $\sigma_y$  随时间的变化情况<sup>[5]</sup>

$$\sigma_y = p_g + 2Y_g/3 \tag{1}$$

式中: $Y_g$  为锰铜应力计的屈服强度。

圆柱体以 205 m/s 的速度冲击平板的典型实验结果如图 2 所示,其中图 2(a)为锰铜应力计记录的平板中应力随时间的变化曲线,图中也列出了数值模拟结果。图 2(b)为圆柱体冲击平板后回收的试件照片。

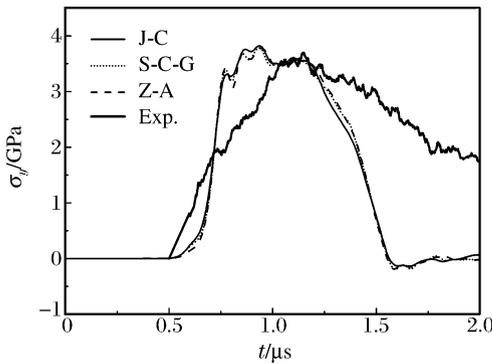


图 2(a) 实验和数值模拟的靶中的纵向应力历史

Fig. 2(a) Experimental and computed longitudinal stresses



图 2(b) 冲击实验后的回收试件

Fig. 2(b) Recovered samples after impact test

### 3 数值模拟

连续介质的质量、动量与能量守恒方程为

$$\dot{\rho} + \rho u_{i,i} = 0 \tag{2}$$

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{X}_i \tag{3}$$

$$\dot{e} = v S_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - (p + q) \dot{v} \tag{4}$$

式中：“·”表示随流微商。 $X_i = X_i(x_i, t)$ ,其中  $x_i$  为 Lagrangian 坐标, $\rho$  为密度, $v$  为比容, $e$  为比内能,能量方程不计及热流和热源; $u_i$  为速度;应变率  $\dot{\epsilon}_{ij} = (\partial \dot{X}_i / \partial X_j + \partial \dot{X}_j / \partial X_i) / 2$ ;应力  $\sigma_{ij} = -(p + q) \delta_{ij} + S_{ij}$ ,当  $i = j$  时, $\delta_{ij} = 1$ ,当  $i \neq j$  时, $\delta_{ij} = 0$ ,压力  $p = -\sigma_{kk} / 3$ , $q$  为 von Neumann 人为粘性, $S_{ij}$  为偏应力

$$\dot{S}_{ij} = \begin{cases} 2G[\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{v}/(3v)] + \delta_{ij}^* & i = j \\ G\dot{\epsilon}_{ij} + \delta_{ij}^* & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $G$  为剪切模量,  $\delta_{ij}^*$  为旋转修正参数。材料的屈服条件为

$$3S_{ij}S_{ij}/2 \leq Y^2 \quad (6)$$

式中:  $Y$  为屈服应力。Grüneisen 状态方程可表示为

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu [1 + (1 - \Gamma_0/2)\mu]}{[1 - (S_1 - 1)\mu]^2} + \Gamma_0 e \quad (7)$$

式中:  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ , 其中  $\rho_0$  为初始密度,  $\Gamma_0$  为 Grüneisen 参数。对于 OFHC,  $c_0 = 3.94$  km/s,  $S_1 = 1.49$ ,  $\Gamma_0 = 2.0$ 。

高应变率本构模型通常采用分离式 Hopkinson 压杆实验 (SHPB) 及拉、扭等动态实验确定。典型的高应变率本构模型有如下的 J-C 模型<sup>[1]</sup>

$$Y = (\sigma_0 + B\epsilon^{n_1})(1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))[1 - (T^*)^m] \quad (8)$$

式中:  $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ ,  $T$  为温度,  $T_m$  为熔化温度,  $\epsilon$  为有效塑性应变,  $\dot{\epsilon}$  为有效塑性应变率,

对于 OFHC,  $\sigma_0 = 90$  MPa,  $B = 292$  MPa,  $n_1 = 0.31$ ,  $C = 0.025$ ,  $m = 1.09$ ,  $T_r = 300$  K,  $\dot{\epsilon}_0 = 1.0$  s<sup>-1</sup>。

文献[2]中提出了基于微结构的高应变率本构模型。对于面心立方 (FCC) 金属

$$Y = C_0^* + k_1 \lambda^{-1/2} + C_2^* \epsilon^{1/2} \exp(-C_3^* T + C_4^* T \ln \dot{\epsilon}) \quad (9)$$

对于 OFHC,  $k_1 = 5.0$  MPa · (mm)<sup>1/2</sup>,  $\lambda = 0.075$  mm,  $C_0^* = 46.5$  MPa,  $C_2^* = 890.0$  MPa,  $C_3^* = 0.0028$  K<sup>-1</sup>,  $C_4^* = 0.000115$  K<sup>-1</sup>。

在高压高应变率状态, 剪切模量  $G$  是热力学状态量的函数, D. J. Steinberg 等<sup>[3]</sup>表达了  $G$  作为  $p$ 、 $T$  及  $\rho$  的函数关系并给出了相应的屈服强度  $Y$  的函数关系 (仅计及应变及热力学状态相关性)

$$G = G_0 \left[ 1 + \frac{G'_p}{G_0} \frac{p}{(\rho/\rho_0)^{1/3}} + \frac{G'_T}{G_0} (T - 300) \right] \quad (10)$$

$$Y = Y_0 (1 + \beta \epsilon)^n G / G_0 \quad (11)$$

$$Y_0 (1 + \beta \epsilon)^n \leq Y_{\max} \quad (12)$$

对于 OFHC,  $G_0 = 47.7$  GPa,  $Y_0 = 0.12$  GPa,  $Y_{\max} = 0.64$  GPa,  $\beta = 36$ ,  $n = 0.45$ ,  $G'_p/G_0 = 28$  TPa<sup>-1</sup>,  $G'_T/G_0 = 0.38$  kK<sup>-1</sup>。CHEN Dia-nian 等<sup>[6]</sup>指出, J-C 模型及 Z-A 模型虽然基于拉伸、扭转等不同应力状态的实验, 但是并不包括平面冲击波实验, 也就是说这些本构模型适用的应变率范围在  $10^2 \sim 10^4$  s<sup>-1</sup> 之间, 压力也并不高。事实上, J-C 模型和 Z-A 模型只阐述了屈服强度  $Y$  与应变、应变率及温度的相关性, 并没有论及剪切模量  $G$  的变化。文献[6]中基于  $Y/G = \text{const}$  及  $G/B = \text{const}$  ( $B$  为体积模量) 假设, 构建了 OFHC 的 7 种高压与高应变率的本构模型。鉴于本文中冲击速度并不高, 数值模拟中 J-C 与 Z-A 模型的  $G$  仍设为常数  $G_0$ 。

方程(2)~(7)及(8)或(9)或(10)~(12)构成了数值模拟 OFHC 圆柱体冲击平板实验的基本方程组。方程(8)~(10)中的温度按绝热升温计算。

#### 4 典型实验与数值模拟的比较

用 LS-DYNA 软件对上述典型实验进行数值模拟。选用二维轴对称单元, 将实验构形简化为由如图 3 所示的有限元单元组成。圆柱体单元边长为 0.5 mm, 共 600 个单元; 靶单元边长为 0.1 mm, 共 11 500 个单元。界面采用二维自动单面接触。数值模拟的冲击后平板靶和圆柱体变形如图 4 所示。

分别采用 J-C、S-C-G、Z-A 本构模型, 对于两靶板界面中心点计算所得的纵向应力  $\sigma_y$  随时间的变化过程如图 2(a) 所示。3 种计算结果非常接近, 实验结果也已表示在图 2(a) 中。由图可见, 数值模拟的峰值应力与实验结果基本一致。但是, 应力变化历史存在区别, 这种区别可能与实验的测试区域较宽以及应力计的响应等因素有关。

数值模拟的冲击后圆柱变形与回收试件的比较如图 5 所示。实测回收圆柱体中心线长度为

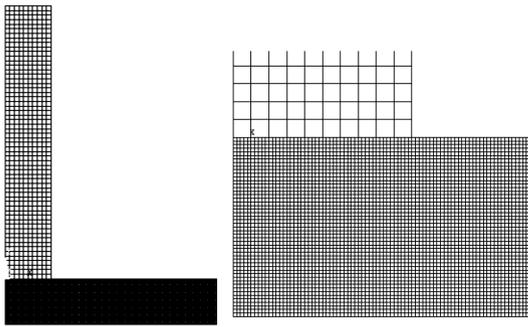


图 3 数值模拟的有限元网格  
Fig. 3 Finite element mesh for the numerical simulation

(a) Cylinder



(b) Plate



图 4 数值模拟的典型实验试件变形  
Fig. 4 Computed deformations of samples in the typical experiment

24.7 mm, 而根据 J-C、Z-A、S-C-G 模型计算圆柱体中心线长度分别为 27.2、26.5、26.4 mm。图中表示了圆柱体冲击后的纵向断面形状, 曲线所示为不同本构模型计算得到的终态构形, 圆点是基于冲击后回收的圆柱体实测的构形。实测平板靶中心点(外侧)凸起 11 mm, 而根据 J-C、Z-A、S-C-G 模型计算的结果分别为 11.7、12.5、12.0 mm。采用 S-C-G、Z-A 模型计算的试件变形较 J-C 模型更接近实测结果。

对冲击速度为 500 m/s 的情况也进行了数值模拟, 不同本构模型所得的两靶板界面中心点纵向应力历史计算结果的差别较大, 如图 6 所示。

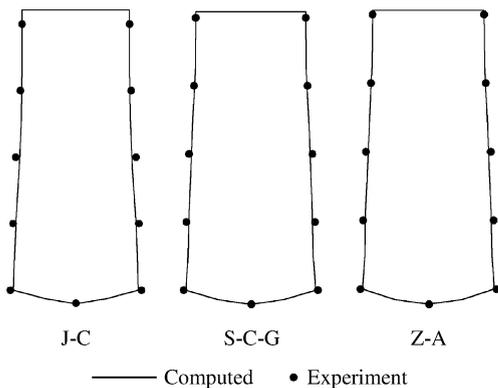


图 5 冲击后圆柱的纵向断面形状比较  
Fig. 5 Deformations of the cylinder after the impact test

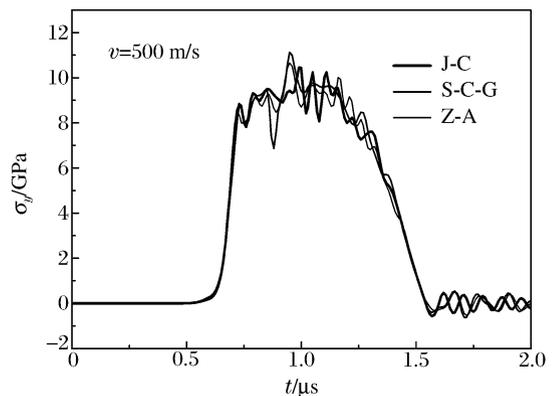


图 6 靶板界面中心点纵向应力随时间变化曲线  
Fig. 6 Stress-time curves at the centre of the plate

## 5 结论

(1) 进行了高导无氧铜圆柱体冲击高导无氧铜平板的实验。采用锰铜应力计, 记录了靶中纵向应力历史, 并对圆柱体及平板进行了软回收观测。为讨论不同本构关系的适用性提供了另一种实验依据。

(2) 分别采用 J-C 模型、Z-A 模型和 S-C-G 本构模型, 对冲击速度为 205 m/s 的典型冲击实验进行了数值模拟。数值模拟靶中的应力峰值与实验结果基本一致, 但是计算的应力历史与实验结果有区别。数值模拟的试件变形和实验结果相近。比较而言, 采用 S-C-G 模型和 Z-A 模型计算的试件变形较采用 J-C 模型计算结果更接近实验结果。

(3) 不同本构模型对于冲击速度为 500 m/s 的数值计算结果有较大的差别。因此, 对于高速冲击实验, 采用不同本构模型所作的预估差别较大。

## 参考文献:

- [1] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain-rates and high temperatures[C]//Proceeding of the Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, 1983:541-547.
- [2] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987,61:1816-1825.
- [3] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate[J]. Journal of Applied Physics, 1980,51:1498-1533.
- [4] Johnson G R, Holmquist T J. Evaluation of cylinder-impact test data for constitutive model constants[J]. Journal of Applied Physics, 1988,64:3901-3910.
- [5] Rosenberg Z, Partom Y. Lateral stress measurement in shock-loaded targets with transverse piezoresistive gauges [J]. Journal of Applied Physics, 1985,58:3072-3076.
- [6] CHEN Da-nian, FAN Chun-lei, XIE Shu-gang, et al. Study on constitutive relations and spall models for OFHC copper under planar shock tests[J]. Journal of Applied Physics, 2007,101:063532-1-9.
- [7] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985,21(1):31-48.

## A cylinder-plate impact test for oxygen-free high-conductivity copper and comparison of effects of three constitutive models

WU Shan-xing<sup>1\*</sup>, CHEN Da-nian<sup>1,2</sup>, HU Jin-wei<sup>2</sup>,  
ZHANG Duo<sup>1</sup>, JIN Yang-hui<sup>2</sup>, WANG Huan-ran<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University,  
Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Mechanics & Materials Science Research Center, Ningbo University,  
Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract:** An oxygen-free high-conductivity copper (OFHC) cylinder was driven by a single-stage gun to impact OFHC plates at the velocity of 205 m/s. The longitudinal stress-time traces in the plates were recorded by the manganin stress gauge and the recovered samples were observed. And the longitudinal stress-time traces in the plates were computed by using the Johnson-Cook (J-C), Zerilli-Armstrong (Z-A) and Steinberg-Cochran-Guinan (S-C-G) constitutive models. Comparison between the experimental and computational results indicates that the peak stresses in the plates computed by the three constitutive models are consistent with the experiments, while the deformations of the cylinder computed by the Z-A and S-C-G models, are more agreeable to the experiments than the J-C model. but, when the impact velocity is 500 m/s, the computed results by the three constitutive models appear markedly different from one another.

**Key words:** solid mechanics; constitutive models; impact test; oxygen-free high-conductivity copper; cylinder; plate

\* Corresponding author: WU Shan-xing  
Telephone: 86-574-87600981

E-mail address: wusxd@360sky.com