文章编号：1000-5773(2005)04-0361-04

无氧铜动态卸载行为的数值模拟*

彭建祥[1]，周显明[1]，宋 萍[1]，张 林[1]，王礼立[2]，经福谦[1]

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900；
2. 宁波大学力学与材料科学研究中心，浙江宁波 315211)

摘要：分别利用 Johnson-Cook(JC)本构模型和 Steinberg-Cochran-Guinan(SCG)本构模型对无氧铜在 10～20 GPa 冲击压力下的卸载过程进行了数值模拟，与冲击-卸载实验结果比较表明，在这样的冲击压力下无氧铜的应变率效应仍然明显，JC 模型对无氧铜的动态卸载行为有较好的描述。

关键词：爆炸力学；数值计算；无氧铜；JC 模型；SCG 模型

中图分类号：O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

在利用一维应变平面冲击波对固体材料进行冲击压缩时，对这种强冲击波的分析通常是在流体力学近似的条件下进行的。这一近似忽略了固体的抗剪切变形的能力，为了更加准确地描述材料在冲击载荷作用下复杂的力学行为或精细的波剖面结构，就必须考虑这一过程中固体在非各向同性应力状态下的应力、应变、应变率和温度的变化，以及它们相互之间的关系，即本构关系。

JC 模型[1]是一种应用十分广泛的动态本构模型，该模型中屈服强度是应变率相关而与压力无关的。JC 模型是由应变率在 10^4 s^{-1}以下的一维应力实验得到的，一般认为只适用于应变率在 10^4 s^{-1}以下。利用 JC 模型来描述一维应变下的冲击波剖面少有报道，JC 模型能否描述更高应变率的一维应变冲击波剖面，有待通过实验与数值计算来考证。而 SCG 模型[2]是专门针对高温高压环境提出来的一个应变率无关的本构模型。研究表明[2]，对铝来说在 10 GPa 以上应变率效应可以忽略，剪切模量和屈服强度只是压力与温度的函数，但对其他金属(如无氧铜)是否也是如此，同样需要实验结果与数值计算进行对比来考证。

2 数值计算与实验结果的比较

2.1 实验条件

利用一级气体炮对无氧铜进行冲击-卸载实验，实验装置示意图如图 1 所示，相关实验参数见表 1[3]。一级气体炮加载飞片与样品碰撞倾角小于 0.1°，飞片击靶速度由安装在炮口的刷子探针测量，误差小于 1%，两发实验均利用 VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)记录样品-窗口界面速度历史[4]。

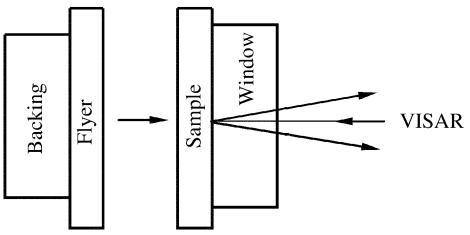


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Experimental configuration

* **收稿日期**：2004-03-05；**修回日期**：2004-10-08
基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金(20020101)；中国工程物理研究院重大基金(2000z0307)
作者简介：彭建祥(1971—)，男，博士研究生，助理研究员. E-mail：pengjx@caep.ac.cn

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

No.	Flyer(copper) /(mm×mm)	Sample(copper) /(mm×mm)	Window(LiF) /(mm×mm)	Impact velocity /(m/s)	Shock stress* /(GPa)
1015	∅90×2	∅35×2	∅25×7	610	11.75
1016	∅90×2	∅35×2	∅25×7	900	18.53

Note: * Shock stress means shock Hugoniot pressure in sample.

2.2 数值计算与实验结果的比较

LS-DYNA 是一个以显式为主、隐式为辅的通用非线性动力分析有限元程序,可以求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞问题,本研究的数值计算利用 LS-DYNA 有限元程序,本构模型则分别采用了 JC 模型和 SCG 模型,状态方程都采用 Grüneisen 状态方程。材料 Grüneisen 状态方程参数见表 2,LiF 窗口和有机玻璃 PMMA 弹托采用流体模型,不考虑剪切本构关系。

表 2 材料 Grüneisen 状态方程参数[5]

Table 2 Parameters of Grüneisen EOS[5]

Material	ρ/(g/cm^3)	c_0(km/s)	λ	γ	c_V/(J/g·K)
Copper	8.93	3.933	1.50	1.96	0.386
PMMA	1.18	2.602	1.51	0.85	0.146
LiF	2.64	5.148	1.35	1.50	1.500

JC 模型等效流动应力 σ_y 表示为

$$\sigma_y=(A+B\varepsilon_p^n)(1+C\ln\dot{\varepsilon}_p^*)(1-T^{*m}) \tag{1}$$

式中:ε_p 为等效塑性应变,$\dot{\varepsilon}_p^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲的等效塑性应变率($\dot{\varepsilon}_0$ 一般取为 1.0 s^{-1}),而约化温度

$$T^*=\frac{T-T_r}{T_m-T_r} \tag{2}$$

式中:T_r 为参考温度(一般取为室温),T_m 为熔化温度。JC 模型中的三项分别表示应变强化、应变率强化和温度软化效应。无氧铜的 JC 模型参数取自文献[1],分别为:$A=90$ MPa,$B=292$ MPa,$C=0.025$,$n=0.31$,$m=1.09$,$T_m=1356$ K。

SCG 模型的具体表达式为

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

$$Y=Y_0[1+\beta(\varepsilon+\varepsilon_i)]^n\cdot\left[1+\left(\frac{Y'_p}{Y_0}\right)\frac{p}{\eta^{1/3}}+\frac{G'_T}{G_0}(T-300)\right] \tag{4}$$

同时规定的限定条件是

$$Y_0[1+\beta(\varepsilon+\varepsilon_i)]^n\leqslant Y_{max} \tag{5}$$

$$Y=0,\quad \text{当 } T\geqslant T_m \text{ 时} \tag{6}$$

式中:$\eta=V_0/V$ 为压缩比,Y_p'、G_p'和 G_T'代表该物理量对 p 或 T 的导数。SCG 模型考虑了静水压力对剪切模量和屈服强度的强化以及温度对它们的软化作用,但忽略了屈服强度的应变率效应。由于 Y_p'/Y_0的值难以由试验获得,一般取 $Y_p'/Y_0=G_p'/G_0$。无氧铜的 SCG 模型参数取自参考文献[2],分别为:$G_0=47.7$ GPa,$Y_0=0.12$ GPa,$Y_{max}=0.64$ GPa,$\beta=36$,$n=0.45$,$G_p'/G_0=28\times10^{-12}$ Pa^{-1},$G_T'/G_0=-0.38\times10^{-3}$ K^{-1}。

压力由 Grüneisen 状态方程计算,状态方程形式为

$$
\begin{aligned}
p &= p_{\mathrm{H}} + \frac{\gamma}{V}(E - E_{\mathrm{H}}) \\
p_{\mathrm{H}} &= \frac{c_0^2(V_0 - V)}{[V_0 - \lambda(V_0 - V)]^2} \\
E_{\mathrm{H}} &= E_0 + \frac{1}{2}p_{\mathrm{H}}(V_0 - V)
\end{aligned} \tag{7}
$$

利用 JC 本构模型进行数值计算的结果与实验数据比较的结果如图 2、图 3 所示。可以看出,JC 本构模型对无氧铜在强度为 10～20 GPa 的冲击加载后的动态卸载行为能较好地描述,尤其是弹性卸载和塑性卸载过渡的弥散性质得到了较好的复现。采用 SCG 本构模型进行数值计算的结果如图 4、图 5 所示,数值计算与实验结果的吻合程度明显不如 JC 本构模型,尽管塑性卸载部分符合程度还不错,但由于该模型没有考虑应变率效应,弹塑性卸载转变过程的弥散性质未能得到再现。根据这一点我们认为,在这样的冲击压力下,无氧铜冲击温度不是很高,率效应仍很明显,利用率相关的模型描述更为合适。

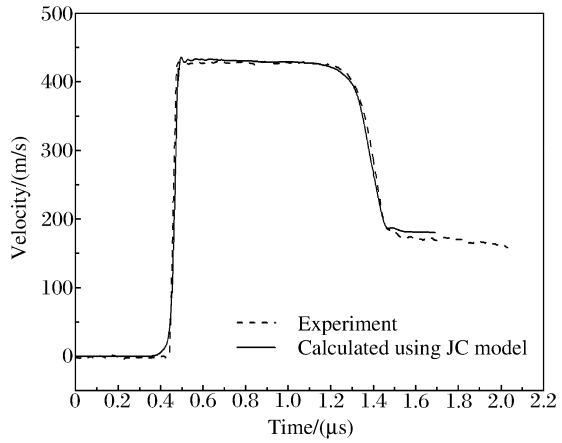


图 2　JC 模型模拟无氧铜在 11.75 GPa 冲击压力下的卸载

Fig. 2　Simulation the release of copper under 11.75 GPa shock pressure using JC model

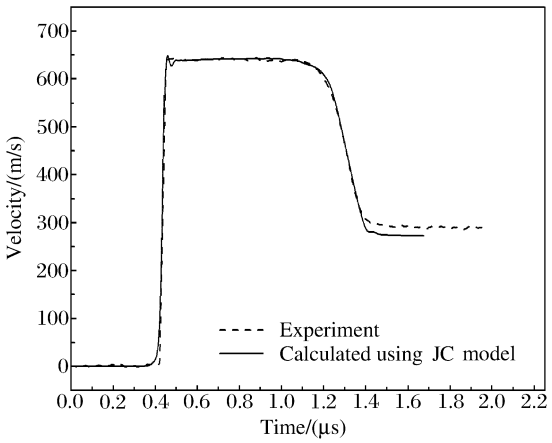


图 3　JC 模型模拟无氧铜在 18.53 GPa 冲击压力下的卸载

Fig. 3　Simulation the release of copper under 18.53 GPa shock pressure using JC model

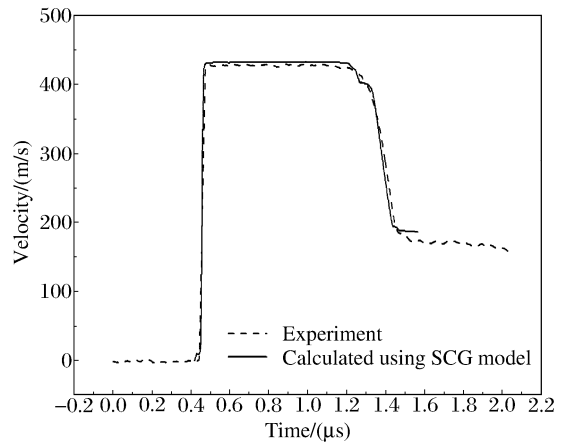


图 4　SCG 模型模拟无氧铜在 11.75 GPa 冲击压力下的卸载

Fig. 4　Simulation the release of copper under 11.75 GPa shock pressure using SCG model

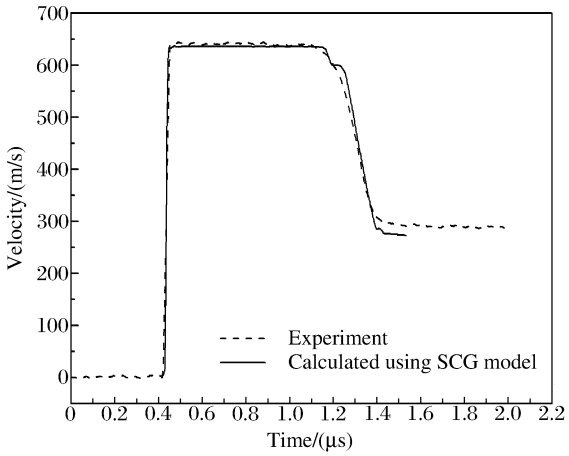


图 5　SCG 模型模拟无氧铜在 18.53 GPa 冲击压力下的卸载

Fig. 5　Simulation the release of copper under 18.53 GPa shock pressure using SCG model

3 讨 论

从本研究的数值计算结果与实验数据相比较的情形来看,JC本构模型对无氧铜在中低冲击压力(10～20 GPa)作用后的动态卸载有令人满意的描述,尤其是由弹性卸载至塑性卸载转变过程中表现出来的弥散现象能得到很好的模拟。而SCG本构模型由于忽略了率效应,对这种弥散现象则无法复现。因此对无氧铜来说,即使冲击压力达20 GPa,其力学性质的率效应仍不可忽略,而静水压力的影响则尚不太明显。但考虑到SCG本构模型主要针对高温高压情形,因此有必要在更高的冲击压力下对这两种模型作进一步的比较研究,通过实验与数值模拟比较,对这两种模型在高温高压下的适用性作更深入的研究。

References:

[1] Johnson G R,Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain,High Strain Rates and High Temperatures [A]. Proc 7th Int Symp Ballistics [C]. The Hague:the Netherlands,1983.

[2] 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(3):1498－1503.

[3] Song P. Study on High Pressure Release of OFHC Copper [D]. Mianyang:Graduate School of China Academy of Engineer Physics,2003. (in Chinese)
宋 萍. 无氧铜高压卸载研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2003.

[4] Ma Y,Hu S L,Wang X S,et al. VISAR Measurement on Interface Velocity between Shocked Specimen and Window [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2003,17(4):290－294. (in Chinese)
马 云,胡绍楼,汪小松,等. 样品-窗口界面运动速度的VISAR测试技术 [J]. 高压物理学报,2003,17(4):290－294.

[5] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. California:University of California,1980.

Simulating the Dynamic Release Behavior of Copper

PENG Jian-Xiang[1],ZHOU Xian-Ming[1],SONG Ping[1],
ZHANG Lin[1],WANG Li-Li[2],JING Fu-Qian[1]

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *Mechanics and Material Science Research Center, Ningbo University, Ningbo* 315211, *China*)

Abstract: The dynamic release behavior of OFHC copper under 10～20 GPa shock pressure was simulated by using the Johnson-Cook(JC) constitutive model and Steinberg-Cochran-Guinan(SCG) constitutive model, respectively. Comparisons between the simulations and the experimental results show that the strain rate effect during the release process of copper under such shock pressure ranges is still obvious. And the simulation of JC model gives better agreement with experimental results than the simulation of SCG model in which the strain rate effect is ignored.

Key words: mechanics of explosion; numerical simulation; OFHC copper; JC model; SCG model