

冲击压缩下铝、铜、钨的剪切模量和屈服强度 与压力和温度的相关性*

彭建祥¹⁾ 经福谦¹⁾ 王礼立²⁾ 李大红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波物理实验室 绵阳 621900)

²⁾ 宁波大学力学与材料科学研究中心, 宁波 315211)

(2004 年 5 月 25 日收到, 2004 年 9 月 20 日收到修改稿)

对铝、铜和钨在冲击压缩状态下的剪切模量和屈服强度的实验数据进行了综合分析, 并与 Steinberg-Cochran-Guinan (SCG) 模型的计算结果进行了比较. 结果表明, 铝在 50 GPa、铜在 100 GPa、钨在 200 GPa 冲击压力以内, 三种材料的剪切模量和屈服强度随温度和压力的变化趋势基本相似, 即 SCG 模型的假设 $\frac{Y_p}{Y_0} = \frac{G'_p}{G_0}$, $\frac{Y_T}{Y_0} = \frac{G'_T}{G_0}$ 对这三种材料在上述冲击压力范围内近似成立. 利用该模型可以较好地描述材料在冲击压缩下的本构行为.

关键词: 剪切模量, 屈服强度, 压力, 温度

PACC: 6250, 6200D, 6200F

1. 引 言

对金属受平面冲击波压缩下的响应特性研究, 通常是忽略金属在冲击压缩高温高压下的强度效应, 直接利用流体力学方法研究金属的高压状态方程^[1]. 但现有的实验和理论计算表明^[2-5], 如果材料尚未发生冲击熔化, 即使在近百吉帕的冲击压力下, 金属的强度效应仍是可观的. 因为反映金属强度性质的剪切模量和屈服强度会随压力的升高而增大, 尽管两者也会随温度的升高而降低, 但压力的影响更为显著.

在理论和数值计算中一般都利用某种本构模型来描述材料的剪切模量和屈服强度, 1980 年代 Steinberg 等人^[6]提出了一种适用于冲击压缩高温高压情况的本构模型 (SCG 模型), 模型中考虑剪切模量和屈服强度与压力和温度的相关性. 他们提出了 14 种材料的本构参数, 但基本都是基于静高压超声测量结果得到的剪切模量的相关参数, 而高温高压下屈服强度的参数则相当缺乏. 此后许多研究者利用波剖面测量的方法得到了一些金属在冲击压缩高

温高压下的声速、屈服强度等, 如铝^[7,8]、铜^[9,10]和钨等^[11]. 本文试图通过对这些实验结果进行综合分析, 借以考察冲击压缩下这些材料的剪切模量和屈服强度与压力和温度的关系, 同时也可对利用 SCG 模型来描述这种关系的可行性进行考证.

2. 利用冲击波波剖面获得剪切模量和屈服强度

2.1. 利用高压声速数据计算剪切模量

在平面冲击压缩一维应变下, 各向同性固体正应力 σ_x 可以表示为

$$\sigma_x = p + \frac{4}{3}\tau, \quad (1)$$

式中压力 $p = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$, 剪应力 $\tau = (\sigma_x - \sigma_y)/2$. 按照声速的定义, 应力点 σ_x 的声速为

$$c_1^2 = \left(\frac{d\sigma}{d\rho}\right)_s = \left(\frac{dp}{d\rho}\right)_s + \frac{4}{3}\left(\frac{d\tau}{d\rho}\right)_s = c_b^2 + \frac{4}{3}c_t^2, \quad (2)$$

式中 c_1 为纵波声速, c_b 为体波声速, c_t 为横波声速, 三者均为欧拉声速. 如果实验测量到冲击压缩后

* 中国工程物理研究院科学技术基金(批准号 20020101)资助的课题.

卸载时的纵波声速和体波声速,则可由此计算高温高压下的剪切模量

$$G = \rho c_t^2 = \frac{3}{4}(\alpha c_l^2 - c_b^2), \quad (3)$$

式中 ρ 为压缩后的密度。

如果实验测量未能得到体波声速 c_b ,则可以利用 Grüneisen 状态方程进行估算^[1]

$$c_b = V^2 \left(\frac{\gamma}{V} \right) \frac{p_H}{2} - V^2 \frac{dp_H}{dV} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma}{V} \right) (V_0 - V) \right]. \quad (4)$$

结合文献中测量的铝^[7,8]、铜^[9,10]和钨^[11]冲击压缩下的纵波声速和体波声速,利用(3)式计算可得到相关材料的剪切模量。

2.2. 利用波剖面计算屈服强度

Asay 等人^[7]提出一种基于率无关 Lagrange 分析方法可以由冲击波波剖面卸载部分计算材料在冲击压缩状态下的屈服强度,即

$$Y = -\frac{3}{4} \rho_0 \int_{e_0}^{e_1} (c^2 - c_b^2) de \quad (5)$$

式中 e_0 和 e_1 分别表示弹性和塑性卸载起始点的应变。

利用这一方法,一些研究者得到了铝^[7,8]、铜^[10]和钨^[11]在冲击压缩下的屈服强度。

3. 冲击压缩下剪切模量和屈服强度与压力和温度的关系

3.1. 沿 Hugoniot 线冲击温度的计算

材料受冲击压缩时温度会升高,温度的升高将导致剪切模量和屈服强度的降低,前面提到的实验中没有测量冲击温度,不过也可以利用 Grüneisen 状态方程进行估算^[1],即

$$T_H = T_0 e^{-\frac{\gamma_0}{V_0}(V_0 - V)} + \frac{\rho_0 C_0^2}{C_V} e^{-\frac{\gamma_0}{V_0}(V_0 - V)} \times \int_{V_0}^V \left[\frac{-\lambda \eta^2}{(1 - \lambda \eta)^2} e^{\frac{\gamma_0}{V_0}(V_0 - V)} \right] dV, \quad (6)$$

式中 $T_0 = 300\text{K}$, γ_0 为 Grüneisen 参数, C_0 , λ 为冲击波速度和粒子速度线性关系的参数, C_V 为比热容, $\eta = \frac{V_0}{V}$ 为压缩比。

3.2. 利用 SCG 本构模型描述高温高压剪切模量和屈服强度

Steinberg 等人^[6]提出的用以描述冲击高温高压下剪切模量和屈服强度随温度和压力变化关系的 SCG 本构模型具体形式为

$$G = G_0 \left[1 + \left(\frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} \left(\frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right], \quad (7)$$

$$Y = Y_0 \left[1 + \beta (\epsilon + \epsilon_i) \right]^n \times \left[1 + \left(\frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{Y'_T}{Y_0} \right) (T - 300) \right], \quad (8)$$

其中 $\eta = \frac{V_0}{V}$ 为压缩比, β , n 为应变硬化参数, ϵ 为塑性应变, ϵ_i 为初始塑性应变, G_0 为常温常压下的剪切模量, Y_0 取最高应变率或最低温度实验的初始屈服强度, G'_p , G'_T 和 Y'_p 为 G 和 Y 对压力 p 或温度 T 的一阶偏导数。

G'_p 和 G'_T 的值一般可以由静高压实验测量,但 Y'_p 的值难以作实验测量,实际使用 SCG 模型时通常假设 $\frac{Y'_p}{Y_0} = \frac{G'_p}{G_0}$, $\frac{Y'_T}{Y_0} = \frac{G'_T}{G_0}$ 成立,这样就只需要 G'_p 和 G'_T 的值即可构建描述高温高压剪切模量和屈服强度的 SCG 本构模型。

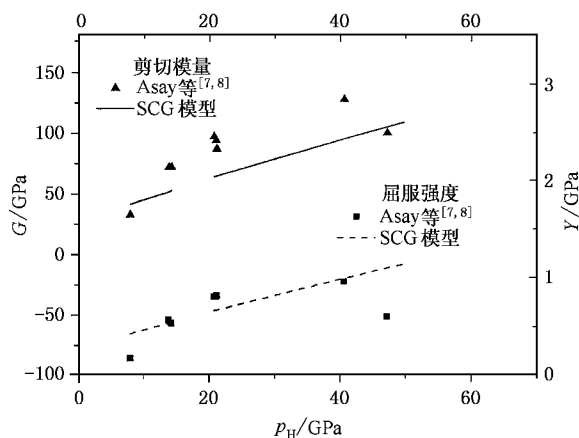


图1 铝的高温高压剪切模量和屈服强度实验值与计算值的比较

$$G_0 = 27.6\text{GPa}, \frac{G'_p}{G_0} = 6.5 \times 10^{-11} \text{Pa}^{-1}, \frac{G'_T}{G_0} = -6.2 \times 10^{-4} \text{K}^{-1} \text{ [6]}$$

文献[6]给出了这三种材料的相关参数,我们利用这些参数计算了三种材料在冲击压缩下的剪切模量和屈服强度,与前面由实验得到的数据一并表示在图1至图3中,其中 p_H 为冲击压力。由计算值和实验值的比较看来,两者基本上是一致的,表明SCG

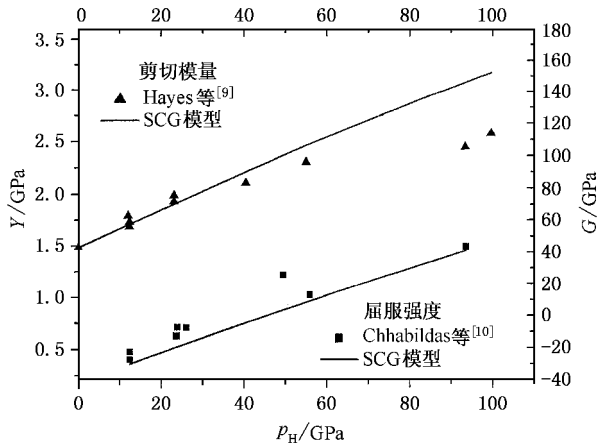


图2 铜的高温高压剪切模量和屈服强度实验值与计算值的比较

$$G_0 = 47.7 \text{ GPa}, \frac{G'_p}{G_0} = 2.8 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}, \frac{G'_T}{G_0} = -3.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} [6]$$

模型可以较好地描述金属材料在冲击压缩高温高压下的剪切模量和屈服强度,同时也验证了 $\frac{Y'_p}{Y_0} = \frac{G'_p}{G_0}$, $\frac{Y'_T}{Y_0} = \frac{G'_T}{G_0}$ 的假设在未发生冲击熔化的前提下是基本成立的.但铜在接近 100 GPa、钨接近 200 GPa 压力附近,模型计算值与实验值的差异明显增大,这可能是由于材料非常接近冲击熔化压力,材料内部可能已有局部熔化导致剪切模量快速下降.

4. 讨 论

本文研究表明,铝在 50 GPa、铜 100 GPa、钨 200

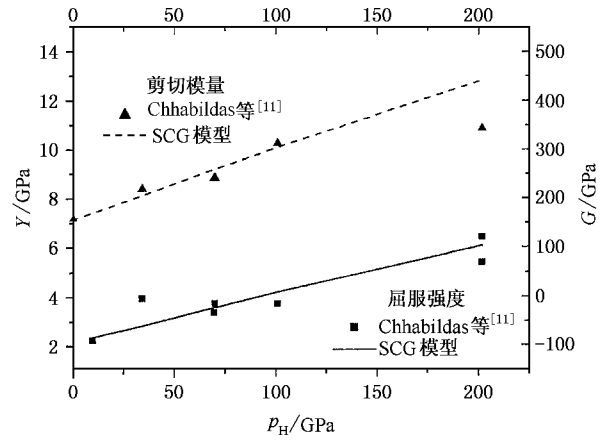


图3 钨的高温高压剪切模量和屈服强度实验值与计算值的比较

$$G_0 = 160 \text{ GPa}, \frac{G'_p}{G_0} = 9.4 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}, \frac{G'_T}{G_0} = -1.4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} [6]$$

GPa 冲击压力以内,三种材料的剪切模量和屈服强度随温度和压力的变化趋势基本相似,即 $\frac{Y'_p}{Y_0} = \frac{G'_p}{G_0}$, $\frac{Y'_T}{Y_0} = \frac{G'_T}{G_0}$ 在以上冲击压力范围内近似成立,这样在缺乏 Y'_p 和 Y'_T 的实验测量数据时,就可以利用静高压下实验测量的 G'_p 和 G'_T 来构建 SCG 模型,以描述材料在冲击压缩高温高压下的本构关系.但是当金属受冲击压缩发生熔化时,剪切模量和屈服强度会发生迅速软化直至变为零,显然 SCG 模型不适于描述这一过程的本构行为的变化,如何描述这一过程在实验和理论上还有待进一步研究.

- [1] Jing F Q 1999 *Introduction of experimental equation of state* (Beijing: Science Press) 191 (in Chinese) 经福谦 1999 实验物态方程导引(北京:科学出版社)第 191 页]
- [2] Chua J O and Ruoff A L 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 4659
- [3] Spitzig W A and Richmond O 1984 *Acta Metall.* **32** 457
- [4] Söderlind P and Moriarty J A 1998 *Phys. Rev B* **57** 10340
- [5] Holian B L and Lomdahl P S 1998 *Science* **280** 2085
- [6] Steinberg D J, Cochran S G and Guinan M W 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 1498
- [7] Asay J R, Chhabildas L C 1981 *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals*. Edited by Meyer M A, Murr L E (New York:

Plenum Press) 417

- [8] Asay J R et al 1985 *Shock waves in condensed matter*, Edited by Gupta Y M (New York: Plenum Press) 145
- [9] Hayes D, Hixson R S, and McQueen R G 2002 *Shock Compression of Condensed Matter-2001*. Edited by M. D. Furnish, N. N. Thadhani and Y. Horie (New York: American Institute of Physics) 26
- [10] Chhabildas L C and Asay J R 1982 *High pressure in research and industry V1*. Edited by Backman C M, Johansson T, and Tegner L (Uppsala, Sweden) 183
- [11] Chhabildas L C, Asay J R and Barker L M *Sandia National Laboratories Report* No. SAND-88-0306

Pressure and temperature dependence of shear modulus and yield strength for aluminum , copper and tungsten under shock compression *

Peng Jian-Xiang¹⁾ Jing Fu-Qian¹⁾ Wang Li-Li²⁾ Li Da-Hong¹⁾

¹⁾ *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research , Southwest Institute of Fluid Physics , Mianyang 621900 , China)*

²⁾ *Mechanics and Material Science Research Center , Ningbo University , Ningbo 315211 , China)*

(Received 25 May 2004 ; revised manuscript received 20 September 2004)

Abstract

Experimental data of shear modulus and yield strength of shocked aluminum , copper and tungsten were analyzed systematically. Comparison between these data and the results calculated by using SCG (Steinberg-Cochran-Guinan) constitutive model (J. Appl. Phys. 51(3) :1498) shows that shear modulus and yield strength have similar dependence on pressure and temperature under conditions for aluminum below 50 GPa , copper below 100 GPa and tungsten below 200 GPa shock pressures.

So the assumptions in the SCG model $\frac{Y'_p}{Y_0} = \frac{G'_p}{G_0}$, $\frac{Y'_T}{Y_0} = \frac{G'_T}{G_0}$, are approximately correct in these pressure ranges , and the SCG model can be used to describe the shear modulus and yield strength of these metals at high shock pressure and high temperature.

Keywords : shear modulus , yield strength , pressure , temperature

PACC : 6250 , 6200D , 6200F