

钨合金的高压本构研究

华劲松¹⁾ 经福谦¹⁾ 董玉斌¹⁾ 谭 华¹⁾ 沈中毅²⁾ 周显明¹⁾ 胡绍楼¹⁾

¹⁾中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 绵阳 621900)

²⁾中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2002 年 9 月 25 日收到, 2002 年 12 月 10 日收到修改稿)

通过静高压实验、动高压实验及理论计算相结合的方法, 确定了钨合金的一种高压本构方程(Steinberg 模型方程)中的各参数. 用数值模拟计算方法, 采用几种不同的本构模型进行了计算, 并与实测结果进行了比较. 结果显示, 确定的高压本构方程计算值与实测值符合最好.

关键词: 高压本构方程, Steinberg 模型, 数值模拟计算, 粒子速度波形

PACC: 6220

1. 引 言

对于每一种材料, 要建立它的高压本构方程, 一般都要考虑材料的应变硬化、应变率硬化及热软化机制等因素. 在材料的本构模型中, 最常用的有两种模型, 一种是把屈服强度 Y 考虑成应变 ϵ 、温度 T 及应变率的函数, 即一般表示为

$$Y = f(\epsilon, T, \dot{\epsilon}),$$

此称为率相关模型, 代表性的模型是 Johnson-Cook 模型^[1,2]. 另一种是不考虑应变率的效应, 即

$$Y = f(\epsilon, T),$$

此称为率无关模型, 代表性的模型是由 Steinberg 等^[3,4]提出的一个应变率适用范围较广(10^{-4} — 10^6)的 $Y(P, T)$, $G(P, T)$ 模型, 它的具体形式为

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

$$Y = Y_0 (1 + \beta \epsilon_i)^n \left[1 + \frac{Y'_p}{Y_0} \frac{P}{\eta^{1/3}} + \frac{Y'_T}{G_0} (T - 300) \right]. \quad (2)$$

应用范围是 $Y_0 [1 + \beta(\epsilon + \epsilon_i)]^n \leq Y_{\max}$. (1)(2) 式

中, η 为压缩比, $\eta = \frac{V_0}{V}$; β, n 为硬化功参数; ϵ_i 为初始应变; 下标“0”表示初始状态; G'_p, Y'_p 及 G'_T 分别表示 G, Y 对 P, T 的偏导数; 参量 G_0, G'_p 及 G'_T 可以通过超声实验确定. 上述 $Y(P, T), G(P, T)$ 模型应

用较为普遍.

但对于 Steinberg 模型中的 G'_p, Y'_p 及 G'_T 系数的确定, 过去常用的方法是通过静高压实验来定, 但静高压数据外推到动高压, 特别是在较高的动高压下将产生较大的偏差. 为此, 本文针对 Steinberg 模型高压本构方程, 采用静高压实验、动高压实验及与理论计算相结合的方法, 确定本构方程中的几个关键系数. 经与实测的 $Y(P_H)$ 和 $G(P_H)$ 及实测粒子速度波形的比较, 结果符合较好, 从而为确定材料的高压本构方程提供了一种手段.

2. 本构方程的确定

从以上的介绍可以看到, 要确定材料的 Steinberg 模型高压本构方程, 必须知道几个关键数据, 即 Y_0, G_0, G'_p 和 G'_T . 其中 Y_0, G_0, G'_p 可以通过静高压实验测得, G'_T 将通过动高压实验结合理论计算方法获得.

2.1. 静高压超声实验结果

静高压实验是在活塞-圆筒式高温高压容器上进行的, 活塞-圆筒式高温高压容器是早期发展起来的一种较简单的高压容器, 沈中毅等使用这种装置对钨合金材料进行了超声测量, 最高压力达到了 2.88 GPa, 主要测量结果见表 1.

表 1 活塞-圆筒式高压容器对 93W 合金的超声测量结果

密度 $\rho_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	纵波速度 $C_{10}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	横波速度 $C_{10}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	K'_p	G'_p
17.0	5.13	2.79	270	132	5.32	1.79

2.2. 动高压实验

利用两层组合飞片,可以实现对钨合金的冲击、再冲击及冲击、卸载实验^[5-7].在冲击、再冲击实验中,我们使用 W/Cu 飞片.因为铜的阻抗较大,第一次冲击能达到较高的压力,再用钨作反射飞片,由于

钨的阻抗更大,可以使受压样品再一次受到冲击压缩.在冲击、卸载实验中,我们采用 Al/93W 飞片.使用 93W 作第一层飞片,一是使样品受到较高的一次冲击,二是由于飞片与样品为同种材料,属于对称碰撞,在碰撞界面上不产生波的反射现象,有利于实验测试.靶/窗口材料为 93W/蓝宝石,实验结果见表 2.

表 2 冲击、再冲击和冲击、卸载的实验数据

实验号	碰撞速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	飞片组成	飞片尺寸/mm	靶厚度/mm
7024	2.98	93W/Cu	1.20/1.37	1.67
7025	2.93	93W/Cu	1.31/1.16	3.76
7029	2.45	Al/93W	1.11/1.26	1.71
7031	2.37	Al/93W	1.33/1.27	3.82
8001	3.51	93W/Cu	1.23/1.42	1.69
8002	3.51	93W/Cu	1.24/1.40	3.87
8008	3.46	Al/93W	1.35/1.36	1.62
8009	3.51	Al/93W	1.12/1.40	3.96

根据表 2 的实验数据及相关的一些计算方法,可以得到钨合金材料在高压下的纵波声速、屈服强度及剪切模量.再结合文献[8—10]的相关数据,可以得到钨合金材料在几个压力点的实验数据,列于表 3 中.

2.3. G'_T 的获得

获得剪切模量温度系数 G'_T 的方法是首先从 Birch^[11]的有限应变理论出发,用理论方法计算一个中间数据 $\alpha(P_S)$ (等熵压缩状态下的剪切模量),然后再与动高压实验数据 $\alpha(P_H)$ (冲击压缩状态下的剪切模量)结合在一起计算出 G'_T .由于 G'_T 的计算较为繁琐,将在另文详述,这里只直接应用计算结果.具体的 G'_T 计算式如下^[11-14]:

$$\frac{\partial G}{\partial T} \Big|_P \cong \frac{G_H - G_S}{T_H - T_S}, \quad (3)$$

式中 G_H , T_H 和 G_S , T_S 分别代表冲击压缩和等熵压

缩条件下的剪切模量和温度,对于钨合金材料 G'_T 计算结果为^[15]

$$G'_T = -0.04 \text{ GPa}/^\circ\text{C}. \quad (4)$$

2.4. 钨合金的本构方程

对于 93W 合金材料,我们通过对本文实验数据及他人提供的实验数据进行综合分析和理论计算,提出推荐值: $G_0 = 132 \text{ GPa}$, $G'_p = 1.794$, $G'_T = -0.04 \text{ GPa}/^\circ\text{C}$, $Y_0 = 1.4 \text{ GPa}$,

$$Y'_p = \frac{Y_0}{G_0} G'_p. \quad (5)$$

对于 β 和 n 这两个常数,可以通过把它们代入(1)(2)式,并把计算得到的 Y 值与实测值比较后得到.用这一方法得到的结果是

$$\begin{aligned} \beta &\approx 1.3, \\ n &\approx 0.1. \end{aligned} \quad (6)$$

表 3 冲击压缩状态下 93W 合金(欧拉坐标)的实验结果

压力 P_H/GPa	欧拉声速 $C_E/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	体积声速 $C_b/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	横波声速 $C_t/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	剪切模量 G/GPa	屈服强度 GPa
16	5.19	4.32	2.74	139.7	1.8
32	5.61	4.58	2.83	155.2	2.6
96	6.08	5.35	3.32	241.9	4.8
104	6.21	5.43	3.35	248.3	6.2
113	6.23	5.51	3.40	258.7	—
130	6.45	5.66	3.45	272.3	5.8
161	6.75	5.91	3.59	305.8	—

3. 本构方程的验证

为了验证 Steinberg 本构方程和由本文建议的该方程中用于 93W 合金有关参数值对描述 93W 合金本构性质的适用性和合理性,采用流体动力学方程组和本文讨论的物态方程及本构方程,计算 93W 合金的动力学行为并与实测波形进行比较。

采用流体弹塑性本构模型,应用 Von Mises 屈服条件,应力偏量 S 的计算方法如下^[16,17]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{4}{3} G \dot{\epsilon}, \quad \left(\text{当 } |S| \leq \frac{2}{3} Y \right),$$

$$S = \pm \frac{2}{3} Y, \quad \left(\text{当 } |S| > \frac{2}{3} Y \right),$$

式中 G 为剪切模量, Y 为屈服强度. 这里的 G, Y 的计算采用(1)(2)式,式中各系数采用本文对 93W 合金材料的推荐值,见(5)(6)式。

应用以上方程,我们计算了本实验的 93W/蓝宝石窗口界面粒子速度波形.与实验测量波形比较后可以看出,SCG 本构方程和本文经过综合分析提出的适用于 93W 合金材料有关参数的推荐值,基本上可以描述 93W 合金的本构特性(见图 1—图 3).图 3 的卸载波形的较大偏离可能与本文未考虑包兴格效应有关^[18,19],也可能与本文实验测量波形误差较大有关。

为了进一步分析 SCG 本构方程和本文对公式中有关参数推荐值对 93W 合金的适用性,下面用三种不同模型计算结果与实测波形作了进一步比较^[20].这三种本构模型是(1)取 $G = Y = 0$,即流体模型(2)取 $G = G_0, Y = Y_0$,即理想弹塑性方程^[20]; (3)SCG 方程与本文的参数推荐值.用这几种方法的计算结果与实验作了比较,结果见图 4。

从图 4 可以看出,与流体模型和理想弹塑性模

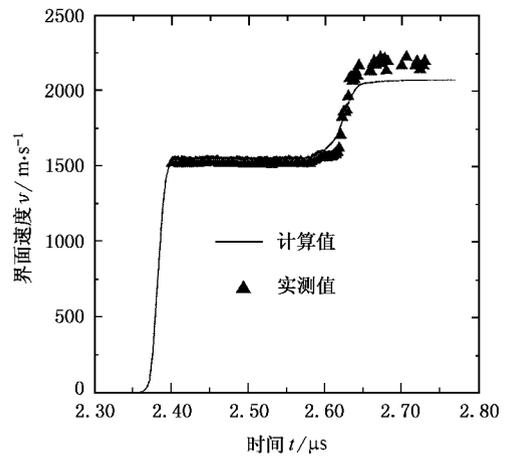


图 1 7024 号实验的实测波形与计算波形的比较

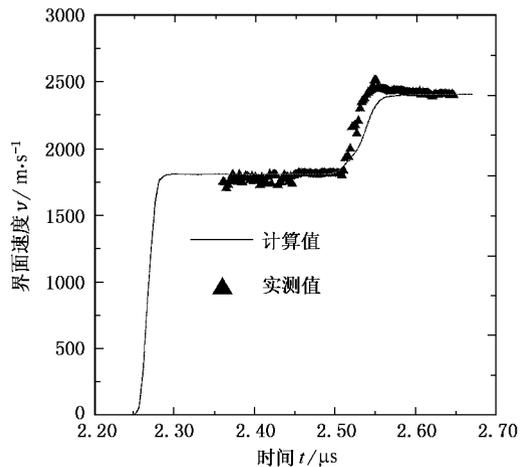


图 2 8001 号实验的实测波形与计算波形的比较

型相比,SCG 本构方程和本文为该式所提出的有关参数的推荐值,可以比较好地描述 93W 合金的本构性质。

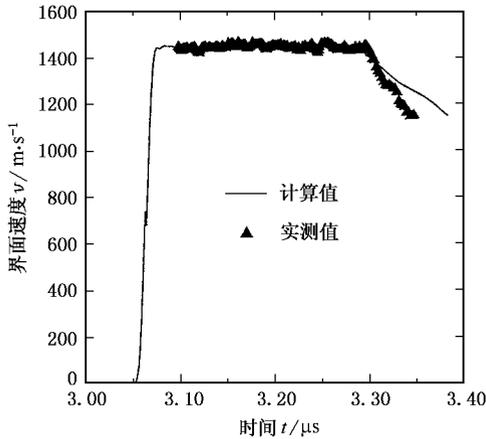


图3 8008号实验的实测波形与计算波形的比较

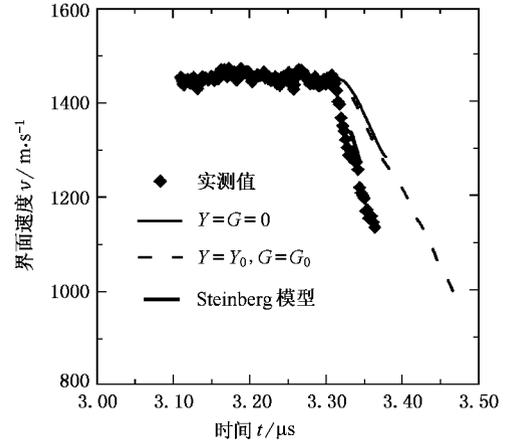


图4 8009号实验的实测波形与几种本构模型计算波形的比较

4. 结 论

通过以上实验、理论推导及数值模拟计算等几方面的分析和讨论,可以得到以下几个基本结论:

(1)通过静高压实验、动高压实验及理论计算相结合的方法,提出了确定材料的一种高压本构方程(Steinberg模型方程)。

(2)针对钨合金材料,确定了钨合金高压本构方程中的各参数.具体的值为 $G_0 = 132 \text{ GPa}$, $G'_p =$

$$1.794, G'_t = -0.04 \text{ GPa}/^\circ\text{C}, Y_0 = 1.4 \text{ GPa}, Y'_p = \frac{Y_0}{G_0} G'_p, \beta \approx 1.3, n \approx 0.1.$$

(3)通过数值模拟计算方法,采用以上的钨合金的高压本构方程,复现了实测的粒子速度波形,两者结果符合较好。

(4)用几种不同的本构模型计算值与实测值进行了比较,结果显示,我们确定的高压本构方程计算值与实测值符合最好。

[1] Johnson G R, Cook W H 1983 Proc. 7th. Intern. Symp. Ballistics, Am. Def. Prep. Org. (ADPO) Netherlands 971

[2] Rule W K, Jones S E 1998 *Int. J. Impact. Engng.* **21** 609

[3] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 1498

[4] Li M S, Wang Z Y, Cheng D Q *et al* 1992 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **6** 54 (in Chinese) [李茂生、王正言、陈栋泉等 1992 高压物理学报 **6** 54]

[5] Asay J R, Lipkin J 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 4242

[6] Moss W C 1984 *J. Appl. Phys.* **55** 2741

[7] Asay J R 1984 *SAND* **84** 2657

[8] Zhang W J, Zhang Y S, Song C X 1995 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **15** 44 (in Chinese) [张万甲、张玉松、宋春香 1995 高压物理学报 **15** 44]

[9] Zhang J Y, Yu J L, Tan H 1997 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **11** 254 (in Chinese) [张江跃、虞吉林、谭 华 1997 高压物理学报 **11** 254]

[10] Zhou X M, Jing F Q, Hu J B 1996 *Chin. Phys. Lett.* **13** 761

[11] Birch F 1978 *J. Geophys. Res.* **83** (B3) 1257

[12] Duffy T S, Ahrens T J 1992 *J. Geophys. Res.* **97** (B4) 4503

[13] Straub G K 1992 *Shock Compression of Condensed Matter* Schmidt S C, Dick R D, Forbes J W *et al* ed (New York: Elsevier Science Publisher) p391

[14] Hua J S, Jin F Q, Tan H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2443 (in Chinese) [华劲松、经福谦、谭 华 2000 物理学报 **49** 2443]

[15] Wang J G, Shi W F 1995 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **9** 195 (in Chinese) [王金贵、施卫丰 1995 高压物理学报 **9** 195]

[16] Dong Y B, Zhang W J, Jing F Q *et al* 1988 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **2** 305 (in Chinese) [董玉斌、张万甲、经福谦等 1988 高压物理学报 **2** 305]

[17] Dong Y B, Shu L X, Cheng D N *et al* 1989 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **3** 1 (in Chinese) [董玉斌、苏林祥、陈大年等 1989 高压物理学报 **3** 1]

[18] Steinberg D J 1987 *Int. Impact. Engng.* **5** 603

[19] Cochran S G, Guinan M W 1976 Bauschinger Effect in Uranium **UCID** 17105

[20] Jing F Q *et al* 1986 *Introduction to Experimental Equation of State* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [经福谦等 1986 实验物态方程导引(北京:科学出版社)]

Constitutive study for tungsten alloy under high pressure

Hua Jing-Song¹⁾ Jing Fu-Qian¹⁾ Dong Yu-Bin¹⁾ Tan Hua¹⁾
Shen Zhong-Yi²⁾ Zhou Xian-Ming¹⁾ Hu Shao-Lou¹⁾

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

²⁾*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

(Received 25 September 2002 ; revised manuscript received 10 December 2002)

Abstract

This article describes a method which combines the static pressure experiment, dynamic experiment and theoretical calculation to obtain the parameters in the SCG constitutive model for tungsten alloy under high pressures. By using the constitutive model we obtained in numerical simulation that the calculated profiles of particle velocity are in accordance with the experimental results. We also conducted some other simulations by using different constitutive models and compared them with experimental results. The results show that the constitutive model we obtained was the best.

Keywords : constitutive equation , Steinberg model , numerical simulation , profile of particle velocity

PACC : 6220