

100~500GPa 4.2Ni2.45Fe0.35CoW 合金 的冲击压缩性和物态方程

王金贵 施卫丰

(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, 成都523信箱 610003)

摘要 用二级轻气炮驱动飞片技术及对称碰撞技术, 测量了两相合金4.2Ni2.45Fe0.35-CoW(以下简称93W)的雨贡纽线。其压力范围为100~500GPa。实测的冲击波速度 D 和粒子速度 u 可用直线关系式

$$D = 4.008 + 1.277u \quad (\text{km/s})$$

描述。实验结果与用混合物雨贡纽线叠加原理的计算结果符合甚好。文中还给出了由实验数据计算得到的物态方程数据。

关键词 钨合金 冲击压缩性 物态方程 二级轻气炮 对称碰撞

中图法分类号 O414.12

1 引言

钨是一种高密度、高熔点、高硬度、高脆性和难加工的材料。为了克服机械加工的困难,工业上常用其合金材料。93W 是以93%的钨再加上少量的铁、锰、镍、钴等元素构成的合金材料。该合金仍具有高密度和高硬度的特性,但改善了机械加工的性能,易于在工业上得到实际应用。例如在国防工业上常用钨合金制造穿甲弹弹头,因为它有高密度和高硬度的特点,在发射速度相同的条件下,具有更大的动能,可穿透更厚的装甲。因此系统地研究93W 材料的冲击压缩性和物态方程数据,对于常规兵器战斗部的设计和充实材料高压性质数据库都是有意义的。

一般认为,混合物材料物态方程服从叠加原理。阿尔特舒勒等^[1]对叠加原理所做的基本假设是:当混合物受到冲击压缩时,组成混合物的各组元将沿各自冲击绝热线压缩,然后经过一定的平衡过程,各组元将处于同一个平均压力之下。此时,混合物的平均比体积等于在这一平均压力下,各组元按初始重量比加权的分比体积之和。因此,本文将首先根据叠加原理预估出93W 合金的雨贡纽线,然后进行实验设计。最后通过实验方法确定93W 合金的真实冲击压缩线,并进一步计算出它的物态方程。

2 实验研究方法和技术

93W 合金各组元重量百分比列于表1。原材料由西安交大金属材料及强度研究所提

供。实测初始密度为 $\rho_0 = 17.64 \text{ g/cm}^3$ 。

表 1 93W 合金各组元重量百分比

Table 1 Weight percent of the components in 93W alloy

Component	W	Ni	Fe	Co	Mn
wt%	92.95	4.20	2.45	0.35	0.05

2.1 雨贡纽线的预估

文献[2]中给出的对混合物雨贡纽物态方程的计算公式为

$$u^2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i^2 \quad (1)$$

$$\frac{V_0^2}{D^2} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i V_{i0}^2}{D_i^2} \quad (2)$$

式中： α 是混合物各组元的重量百分比； n 为组元个数； V 为比体积； u 为粒子速度； D 为冲击波速度。下标 $i, 0$ 分别为第 i 组元的值和初始值。计算时先假定某一压力 p_i ，然后据此通过已知各组元的冲击压缩性关系式，求出相应的 u_i 及 D_i 。由于 α_i, V_{i0} 的值是已知的，故由 (1)、(2) 两式可以求出对应于压力 p_i 的混合物的雨贡纽关系

$$D = C_0 + \lambda u \quad (3)$$

93W 合金各组元的雨贡纽参数值列于表 2。计算时，因缺少 Mn 的雨贡纽数据，且由于它所占的重量百分比很小，密度与 Fe 较相近，故用 Fe 的雨贡纽数据代替。作为一种估算，这种近似应该是可以接受的。

表 2 93W 合金各组元的雨贡纽参数值^[3]

Table 2 Hugoniot data for the components in 93W alloy^[3]

Parameters	W	Ni	Fe	Co
$\rho_{0i}/(\text{g/cm}^3)$	19.235	8.875	7.873	8.820
$C_{0i}/(\text{km/s})$	4.04	4.59	3.80	4.77
λ_i	1.23	1.44	1.58	1.28

由表 1、表 2 所列参数及有关的冲击波关系式，求出对应于不同压力下的数据组 (D_i, u_i) 即可通过下式

$$C_0 = \frac{\sum D_i \sum u_i^2 - \sum u_i \sum D_i u_i}{n \sum u_i^2 - (\sum u_i)^2} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{n \sum D_i u_i - \sum D_i \sum u_i}{n \sum u_i^2 - (\sum u_i)^2} \quad (5)$$

求出 93W 合金的雨贡纽参数 C_0, λ 。计算得到的 C_0, λ 代入 (3) 式后有

$$D = 4.013 + 1.282u \quad (\text{km/s}) \quad (6)$$

2.2 实验技术

2.2.1 实验方法

实验原理图示于图1。用二级轻气炮作为驱动飞片的设备,使飞片达到几千米每秒的

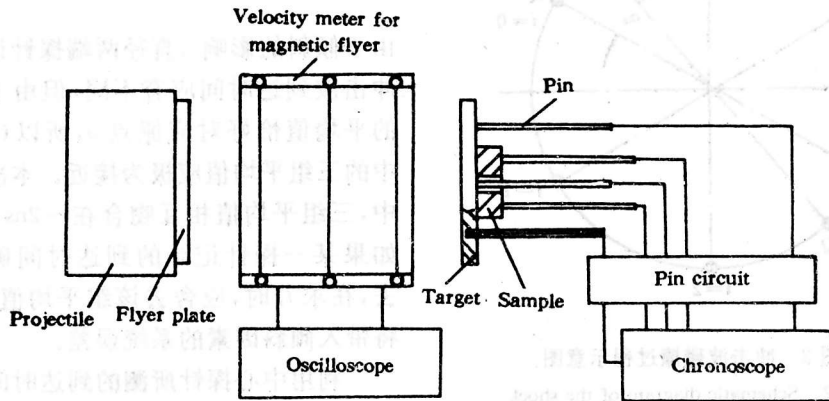


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental assembly

高速度,然后与靶样品碰撞,对靶样品进行冲击压缩。冲击压缩数据可用 Rankine-Hugoniot 守恒关系求出,即

$$\rho_0(D - u_0) = \rho(D - u) \quad (7)$$

$$p - p_0 = \rho_0(D - u_0)(u - u_0) \quad (8)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(p + p_0)\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\right) \quad (9)$$

式中: ρ 、 u 、 p 和 E 分别为冲击波阵面后密度、粒子速度、压力和比内能。 D 为冲击波速度。下标“0”表示已知的初始状态量。用实验方法测得上述各参量中的任意两个量,便可通过(7)~(9)式计算出其余的状态量,从而确定出冲击压缩线上某一点的状态参数。只要测出对应于同一初始状态下各个压力点上的这些参数值,就可以得到与之相应的冲击压缩线。在 ρ 、 u 、 p 、 E 和 D 这五个未知量中,本文实验测定的量为 D 和 u 。冲击波速度 D 可以直接测量。粒子速度 u 的测量拟采用对称碰撞方式,即飞片材料与靶样品材料均为93W合金。因此飞片碰撞速度 w 等于靶样品粒子速度 u 的两倍值,即 $w = 2u^{[2]}$ 。故 u 值测量可以转化为 w 值测量。

2.2.2 冲击波速度的数据处理^[4]

对每一个测量平面上的探针,可以表示为图2的形式。假设最先碰撞点为 P 点,最后碰撞点为 Q 点,定义 PQ 为倾斜轴,它与最先响应的探针 A 的夹角 α_0 为方位角。令 A 探针为 $i=0$,其余探针分别为 $i=1,2,3,4,5$ 。如果飞片是一个带有倾斜碰撞角 θ 的平面,那么靶内冲击波平面将以 θ 角传播。此时凡是沿 PQ 轴上分布的探针所记录的冲击波到达时间应该线性增加;而位于 PQ 轴任一条垂线上的所有探针都应记录到相同的时间。

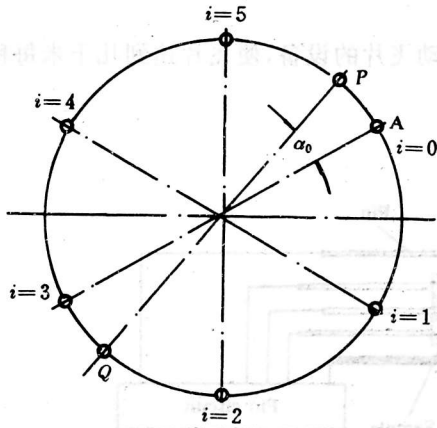


图 2 冲击波碰撞过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the shock wave impact history

令 t_j 为冲击波到达 j 平面原点 o 的时间, 根据上述分析, 它应由下式求出

$$t_j = \frac{1}{3} \left[\frac{t_{i0} + t_{i3}}{2} + \frac{t_{i1} + t_{i4}}{2} + \frac{t_{i2} + t_{i5}}{2} \right] \quad (10)$$

由于倾斜的影响, 直径两端探针记录的冲击波到达时间应有不同, 但由于它们的平均值恰好对应原点 o , 所以 (10) 式中的三组平均值应极为接近。本次实验中, 三组平均值相互吻合在 $\sim 2\text{ns}$ 左右。如果某一探针记录的到达时间确应舍去, 在求 t_j 时, 应舍去该组平均值, 否则将带入倾斜因素的系统误差。

利用中心探针所测的到达时间 t_c 以及第 1 平面上 6 根探针所得冲击波平均到达时间 t_1 , 可以对冲击波的弯曲阵面

作出修正。文献 [4] 实验证明, 畸变的影响可以用旋转抛物线拟合, 并对两平面间的传播时间给出如下修正公式

$$\Delta t_c = (t_c - t_1)(1 - R_2^2/R_1^2) \quad (11)$$

t_1 是由 (10) 式给出的第 1 平面上的冲击波平均到达时间, t_c 是中心探针测得的到达时间。 R_1, R_2 分别为两平面上探针所处的圆周半径。

最后, 两平面间冲击波传播时间 Δt 应由下式计算

$$\Delta t = (t_2 - t_1) - \Delta t_c \quad (12)$$

根据已知的样品厚度除以 (12) 式确定的 Δt , 就可得到样品中的冲击波速度值。

3 实测雨贡纽线及物态方程计算

3.1 雨贡纽线参数确定

表 3 D, u 及 p 的实验处理结果

Table 3 Experimental results

Shock wave parameters	Experimental number				
	94-6	94-2	94-3	94-4	94-5
$D/(\text{km/s})$	5.323	6.380	7.035	7.611	8.390
$u/(\text{km/s})$	1.034	1.840	2.395	2.814	3.426
$p/(\text{GPa})$	97.1	207.1	297.2	377.8	507.0

根据混合物叠加原理预估的 93W 雨贡纽关系 (6) 式, 进行了实验测量装置设计和测

量结果的预估。按照(10)式和(12)式对样品内冲击波的倾斜和弯曲做出修正。实验测量结果汇总于表3。由(4)、(5)两式对 D, u 作直线拟合得到

$$D = 4.008 \pm 0.031 + 1.277 \pm 0.013u \quad (\text{km/s}) \quad (13)$$

将(13)式与93W合金雨贡纽线的预估结果(6)式相比较,并注意到实测值 C_0 及 λ 的误差范围可以发现,两者的符合程度十分好。

由实测雨贡纽数据拟合的 $D \sim u$ 线和 $p \sim V/V_0$ 曲线分别示于图3和图4。从图中可以看出,实验数据都落在拟合线上,说明实验数据的测量精度也十分令人满意。

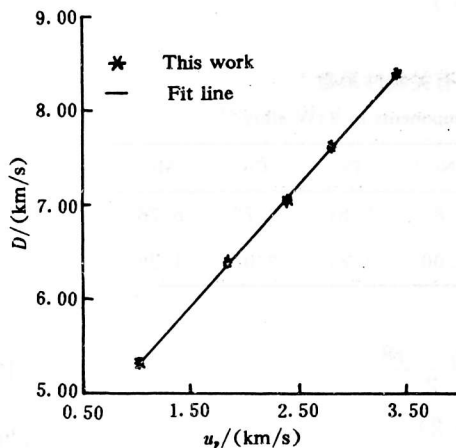


图3 冲击波速度与粒子速度的关系

Fig. 3 The relation between shock wave velocity and particle velocity

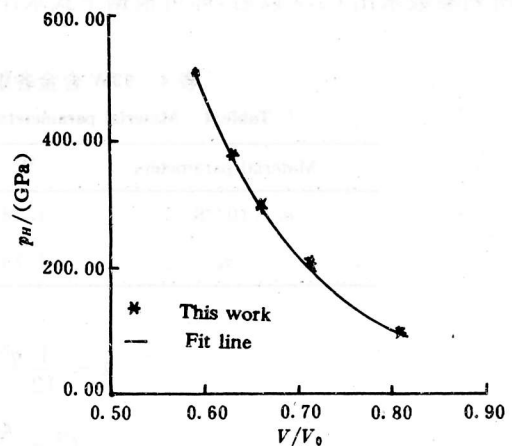


图4 冲击压力与压缩比之间的关系

Fig. 4 The relation between shock pressure and ratio of compression

3.2 物态方程

3.2.1 Grüneisen 物态方程

一般认为,金属材料的冷能 E_z 可以用Born-Meyer势描述^[2]

$$E_z = \frac{3Q}{\rho_{0K}} \left\{ \left[\frac{1}{q} \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - \delta^{1/3} \right] - \left(\frac{1}{q} - 1 \right) \right\} \quad (14)$$

式中: $\delta = V_{0K}/V = \rho/\rho_{0K}$ (下标0K表示绝对零度下的值), Q, q 为表征材料特性的两个常数。确定物态方程的首要步骤是确定(14)式中的材料常数 Q 和 q 。

93W合金是一种导电性极好的金属材料混合物,但由于它是一种两相合金,无法确定其严格物理意义的 Q 和 q 。这里只能按上述要求求出一个等效意义的 Q 和 q 值,即视其作为一种等效的均值材料处理。

文献[5]提出了从实测雨贡纽参数计算 Q, q 的解析方法。该方法从 C_0 和 λ 的零温值出发,如对室温下(一般为300K)的值分别记为 C_0' 和 λ' (本文给出的就是这种条件下的值),则两者间可用下式换算

$$C_0 = C_0' [1 + (2\lambda' - \gamma_0^2/4 - 1)\alpha_V T_0] \quad (15)$$

$$\lambda = \lambda' \left[1 + \left(\frac{\lambda'}{2} - \frac{\gamma_0^2}{8\lambda'} - 1 \right) \alpha_V T_0 \right] \quad (16)$$

对于混合物,以下关系^[2]

$$\frac{V}{\gamma_0} = \sum_i \frac{\alpha_i V_i}{\gamma_{0i}} \quad (17)$$

$$\alpha_V V = \sum_i \alpha_i \alpha_{Vi} V_i \quad (18)$$

成立,式中: α_V 为热胀系数, γ 为 Grüneisen 参数,其余符号同前面的说明。

利用(11)式中实测的有关参数(在(15)、(16)式中记为 C_0 和 λ')及表 1、表 2 和表 4 中所列参数求出 C_0 , λ 以后,即可根据下式求出 Q 和 q 。

表 4 93W 合金各组元的有关物性系数^[6]

Table 4 Material parameters of components in 93W alloy^[6]

Material parameters	W	Ni	Fe	Co	Mn
$\alpha_V / (10^{-5} \text{K}^{-1})$	1.38	3.81	3.51	3.72	6.78
γ_0	1.78	2.00	1.81	2.07	1.28

$$\lambda = \frac{1}{12} \frac{q^2 + 6q - 18}{q - 2} \quad (19)$$

$$C_0^2 = \frac{Q(q - 2)}{2\rho_{0K}} \quad (20)$$

式中的 ρ_{0K} 可从其常态下密度值 ρ_0 通过下式计算得到

$$\rho_{0K} = \rho_0 (1 + 300\alpha_V) \quad (21)$$

最后得到 Q 和 q 的计算值为

$$Q = 152.94 \quad (\text{GPa}) \quad (22)$$

$$q = 7.62 \quad (23)$$

因此,Grüneisen 物态方程可表示为

$$E = E_x + E_T = \frac{3Q}{\rho_{0K}} \left\{ \left[\frac{1}{q} \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - \delta^{1/3} \right] - \left(\frac{1}{q} - 1 \right) \right\} + \frac{3RT}{\mu} f\left(\frac{\Theta}{T}\right) \quad (24)$$

$$p = p_x + p_T = Q\delta^{2/3} \left\{ \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - \delta^{2/3} \right\} + \frac{3RT\rho_{0K}}{\mu} \gamma(\rho) \delta f\left(\frac{\Theta}{T}\right) \quad (25)$$

式中: Θ 为德拜温度; R 为气体常数; μ 为摩尔质量。当 $\Theta/T \ll 1$ 时, $f(\Theta/T) \rightarrow 1$ 。

3.2.2 Grüneisen 参数 γ 的计算

Grüneisen 参数的达-麦公式为^[2]

$$\gamma(V) = - \frac{V}{2} \frac{d^2(p_x V^2)/dV^2}{d(p_x V^2)/dV} \quad (26)$$

把(25)式的冷压部分代入(26)式得

$$\gamma = \frac{1}{6} \frac{q^2 \delta^{-1/3} \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - 6\delta}{q \exp[q(1 - \delta^{-1/3})] - 2\delta} \quad (27)$$

计算结果绘于图 5。从图 5 可以看出 Grüneisen 参数与压缩比 V/V_0 近似成直线,即 $\gamma V =$

const 的近似关系式成立。

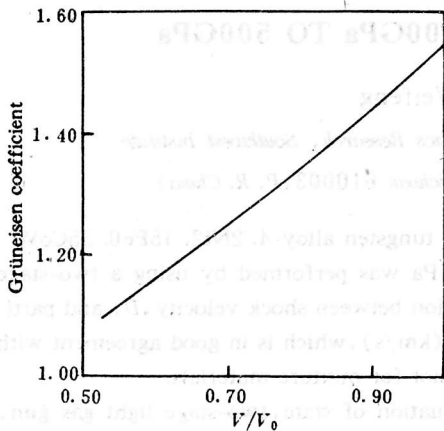


图5 计算的压缩比 V/V_0 与格临爱森参数 γ 的关系

Fig. 5 The computed relation between V/V_0 and Grüneisen coefficient

4 结束语

本文用冲击压缩方法测量了 100~500 GPa 范围内 93W 合金的雨贡纽参数,其冲击波速度和粒子速度关系式可表示为

$$D = 4.008 + 1.277u \quad (\text{km/s})$$

该结果与用各组元在同一平衡压力雨贡纽比容积叠加原理预估的结果符合程度在实验误差以内。这说明对钨基合金,利用阿尔特舒勒^[1]叠加原理的假设可以作出冲击绝热线的预估,而且预估结果与实验结果相差不大。还可以进一步将这种预估方法推广到以其它金属为基体的合金中,估计预估情况也不会太差,但本工作没有去做验证。今后,可以对合金材料先做出预估,再做少量验证性实验,这样可以节约大量的实验费用;或者在某些近似估算时,直接用预估结果,也不致引起重大的

误差。

本文还从实测的雨贡纽参数 C_0 和 λ 出发,按均匀材料处理,求出了其等效 Born-Meyer 势中两个材料参数 Q 和 q 的值,它们是

$$Q = 152.94 \quad (\text{GPa})$$

$$q = 7.62$$

并相应求出了等效 Grüneisen 参数。结果表明,平时常常使用的条件 $\gamma V = \text{const}$ 的近似关系成立。

对张晓刚在实验装置安装中所做的出色工作,方茂林、王智毅承担二级轻气炮的发射;王翔、傅秋卫、黄强在电子学仪器的精确使用所做的努力深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Альтшулер Л В, Алексеев ЮФ ПМТХ, 1971, 4:152
- 2 经福谦,等著.实验物态方程导引.北京:科学出版社,1986
- 3 徐锡申,张万箱著.实用物态方程理论导引.北京:科学出版社,1986
- 4 Mitchell A C, Nellis W J. Rev Sci Instrum, 1981, 52(3):347
- 5 胡金彪,经福谦.高压物理学报,1990, 4(3):175
- 6 Gschneider K A. Solid State Physics. v. 16. New York: Academic press, 1964

COMPRESSIVE PROPERTY AND EQUATION OF
STATE OF 4. 2Ni2. 45Fe0. 35CoW ALLOY
UNDER PRESSURE FROM 100GPa TO 500GPa

Wang Jingui, Shi Weifeng

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Southwest Institute
of Fluid Physics, P. O. Box 523, Chengdu, Sichuan 610003, P. R. China)

ABSTRACT Investigation of compressive property for tungsten alloy 4. 2Ni2. 45Fe0. 35CoW (93W) in the pressure ranging from 100GPa to 500GPa was performed by using a two-stage light-gas gun and symmetric impact technique. The relation between shock velocity, D , and particle velocity, u , can be expressed by $D=4.008+1.277u$ (km/s), which is in good agreement with the Hugoniot prediction by a different method of Hugoniot for mixture materials.

KEY WORDS tungsten alloy, shock compression, equation of state, two-stage light gas gun, symmetric impact.