文章编号：1000-5773(2007)01-0083-06

钽铌合金材料的冲击压缩特性研究*

华劲松，谷 岩，张世文，王鹏来，冯东升

（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）

摘要：对一种新型的钽铌合金材料进行了冲击压缩特性实验研究，通过超声测量得到了其常态下的横波和纵波声速，进而计算得到了其相关的一些静态力学参量。通过二级轻气炮加载技术，得到其在 60～196 GPa 压力范围内的冲击 Hugoniot 线。这一测量结果与混合物叠加法估算的结果符合较好，并将这种新型合金材料的力学特性与两种钨合金材料进行了简单对比。比较结果显示，Ta-Nb 合金材料是一种具有较好工程应用前景的材料。

关键词：钽铌合金；冲击 Hugoniot 线；超声测量

中图分类号：O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

在众多的工程材料中，钨合金由于其较高的密度、高强度、高韧性及较强的抗腐蚀和抗氧化性，因而在众多的领域得到了较广泛的应用，如用于动能侵彻弹和穿爆弹等武器上。众所周知，钨合金是一种混合材料，由两相合金组成，一是基体材料的钨，二是 Fe、Ni、Co 等粘结材料。且钨合金材料的种类众多，根据钨在合金中所占质量的比例可分为 98 钨合金、95 钨合金、93 钨合金、90 钨合金和 78 钨合金等，由此也可见钨合金材料在实际的工程应用中的重要性[1]。但另一方面，由于钨合金材料是以 Fe-Ni-Co 为粘接剂的粉末冶金材料，因而在材料性能上存在不稳定性，如具有密度不均匀、易产生缺陷等缺点，且在动态加载下易形成物质喷射。这给钨合金材料的应用研究带来一些不利的影响。能否找到一种新的合金材料，既具有钨合金以上的一些优点，又能克服它的一些缺陷。通过初步的分析比较，Ta-Nb 合金材料可能是一种较好的合金材料。为此，我们委托西北有色金属研究院制备了一种新型的合金材料——钽铌合金材料，由于这是一种新型的合金材料，相关的一些材料性能参数均不清楚，这给数值模拟计算和实验设计带来不便。

在材料的动态特性参数中，冲击 Hugoniot 线具有十分重要的作用，它代表材料以初始状态开始的所有冲击压缩终态的集合，材料的所有其它冲击波特性，如声速、等熵卸载线、冲击波温度等特性均与它有关[2]。因此，研究材料的冲击绝热线具有重要意义。为此，我们开展了 Ta-Nb 合金材料静态力学参量测量及冲击 Hugoniot 线的测量工作。

2 基本原理

2.1 静态力学参量的获得

当弹性波经过各向同性材料时，在材料中传播两种形式的波，一种是在垂直于波传播方向上位移为零的纵波，另一种是沿着波传播方向上位移为零的横波。这两个波分别满足以下方程[3]

纵波
$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2}=\frac{L}{\rho}\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}x^2}$$

* **收稿日期**：2006-01-10；**修回日期**：2006-03-19

基金项目：国防科技预研资助项目

作者简介：华劲松(1967—)，男，博士，副研究员，主要研究方向为冲击波物理和爆轰物理的实验研究.

横波 $$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}t^2}=\frac{G}{\rho}\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}x^2}$$

式中：ρ 为材料密度，u 为位移，x 为参考系坐标，G 为剪切模量，L 为纵向模量。

这两种形式的波在实验上很容易得到，可通过专门的超声波发生器产生。由于

$$G=\rho c_{\mathrm{t}}^2 \tag{1}$$

$$L=\rho c_{\mathrm{l}}^2 \tag{2}$$

式中：c_{l}、c_{t} 分别为纵波和横波声速。

因此，知道了纵波和横波声速就可以知道纵向模量 L 和剪切模量 G，L 和 G 知道后，其它的弹性常数就可算出，它们是[4]

拉梅系数 $$\lambda'=L-2G \tag{3}$$

体积模量 $$B=\lambda'+\frac{2}{3}G \tag{4}$$

泊松比 $$\nu=\frac{\lambda'}{2(\lambda'+G)} \tag{5}$$

杨氏模量 $$E=G\frac{3\lambda'+2G}{\lambda'+G} \tag{6}$$

此外，根据纵波和横波声速还可算出常态体积声速 c_{b}，具体计算式为

$$c_{\mathrm{b}}^2=c_{\mathrm{l}}^2-\frac{4}{3}c_{\mathrm{t}}^2 \tag{7}$$

2.2 冲击 Hugoniot 线的测量

冲击 Hugoniot 线的实验测量基于冲击绝热线方程。我们知道，材料在受冲击压缩时，满足三个守恒方程

$$v/v_0=(D-u)/D \tag{8}$$

$$p=p_0+Du/v_0 \tag{9}$$

$$e-e_0=(p+p_0)(v_0-v)/2 \tag{10}$$

式中：p_0、v_0、e_0 分别为材料初始时的压力、比容和比内能，p、v、e 是压缩后的压力、比容和比内能，u 为粒子速度，D 为冲击波速度。

在冲击绝热线测量的 3 种常用方法中，我们采用对比法进行测量[5]。假设标准材料的冲击绝热线满足

$$D_{\mathrm{t}}=c_{0\mathrm{t}}+\lambda_{\mathrm{t}}u_{\mathrm{t}} \tag{11}$$

式中：c_0、λ 为标准材料的冲击 Hugoniot 系数。

根据动量守恒关系，对标准样品和待测样品分别有

$$p_{\mathrm{t}}=\rho_{0\mathrm{t}}D_{\mathrm{t}}u_{\mathrm{t}} \tag{12}$$

$$p_{\mathrm{i}}=\rho_{0\mathrm{i}}D_{\mathrm{i}}u_{\mathrm{i}} \tag{13}$$

式中：下标 i 代表被测样品的状态，下标 t 代表标准材料样品中的状态。

假设飞片撞击标准样品使标准样品中的粒子速度达到 u_1，冲击波进入被测样品中的粒子速度为 u_2，u_3 为冲击波在标准材料与被测样品材料界面反射后的粒子速度，且假设标准样品的等熵卸载线与冲击绝热线互为镜像线，用对比法求解的 p-u 关系见图 1[6]。

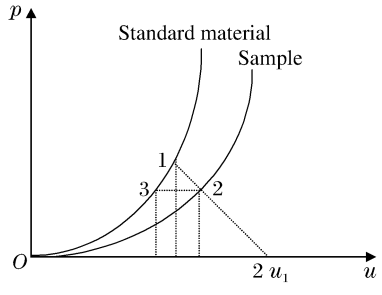


图 1 对比法求解的 p-u 关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of p-u for impedance mathing technique

根据图 1 所示，则有如下关系

$$u_2=u_3+2(u_1-u_3) \tag{14}$$

$$u_3=2u_1-u_2 \tag{15}$$

对标准材料有

$$p_3=\rho_{0t}(c_{0t}+\lambda_t u_3)u_3 \tag{16}$$

对样品材料有

$$p_2=\rho_{0i}D_i u_2 \tag{17}$$

根据界面连续条件有

$$p_2=p_3 \tag{18}$$

代入整理后有

$$\lambda_t\rho_{0t}u_2^2-(4\lambda_t\rho_{0t}u_1+\rho_{0t}c_{0t}+\rho_{0i}D_i)u_2+2\rho_{0t}c_{0t}u_1+4\lambda_t\rho_{0t}u_1^2=0$$

简化为

$$Au_2^2+Bu_2+C=0 \tag{19}$$

由此可得被测样品材料粒子的速度为

$$u_2=\frac{-B\pm\sqrt{B^2-4AC}}{2A} \tag{20}$$

其中

$$A=\lambda_t\rho_{0t} \tag{21}$$

$$B=-(4\lambda_t\rho_{0t}u_1+\rho_{0t}c_{0t}+\rho_{0i}D_i) \tag{22}$$

$$C=2\rho_{0t}c_{0t}u_1+4\lambda_t\rho_{0t}u_1^2 \tag{23}$$

由此可见,只要测得标准样品材料中的冲击波速度 D_t,就可知其粒子速度 u_1,再测得被测样品材料中的冲击波速度 D_i,则可得到被测样品中的粒子速度 u_2。

3　Ta-Nb 合金材料冲击绝热线的预估

混合物叠加法是预估冲击绝热线的一种常用方法,这种方法在以往的一些实际应用中均取得了较好的结果,特别是对于合金材料,预估结果与实测结果相差很小。由于 Ta-Nb 合金为 Ta 和 Nb 的混合物,成分比例为 94% Ta、6% Nb,因此也可用这种方法进行预估。具体的计算公式为[7]

$$\rho_0=\sum m_i\rho_{0i} \tag{24}$$

$$c_0=\sum m_i c_{0i} \tag{25}$$

$$\lambda=\sum m_i\lambda_i \tag{26}$$

$$\frac{v}{\gamma}=\sum m_i\left(\frac{v}{\gamma}\right)_i \tag{27}$$

式中:m_i 为组分的质量分数,ρ_{0i}、c_{0i}、λ_i、γ_i 分别为组分的密度、冲击 Hugoniot 参数及 Grüneisen 系数。

计算用到的 Ta、Nb 金属材料的基本 Hugoniot 参数见表 1。计算得到的 Ta-Nb 合金的基本 Hugoniot参数为:$\rho_0=15.73\ \mathrm{g/cm^3}$,$c_0=3.47\ \mathrm{km/s}$,$\lambda=1.20$,$\gamma=1.79$。

表 1　计算用到的 Ta、Nb 金属材料的基本 Hugoniot 参数

Table 1　Shock Hugoniot parameters of tantalum and niobium for calculation

Materials	ρ_0/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ	γ
Ta	16.65	3.41	1.20	1.80
Nb	8.95	4.44	1.21	1.70

4　实验结果

4.1　超声测量结果

超声测量实验是在成都理工大学油气藏地质及开发国家实验室的 MTS 超声测量设备上进行的。

实测 Ta-Nb 合金的纵波声速 $c_l=4.252$ km/s，横波声速 $c_t=2.205$ km/s。根据 Ta-Nb 合金材料的实测密度 $\rho_0=15.73$ g/cm^3 及(1)式～(7)式，可以计算得到 Ta-Nb 合金材料的静态力学参量及零压体积声速分别为：纵向模量 $L=284.4$ GPa；剪切模量 $G=76.5$ GPa；体积模量 $B=182.5$ GPa；杨氏模量 $E=201.3$ GPa；泊松比 $\nu=0.32$；拉梅系数 $\lambda=131.5$ GPa；零压体积声速 $c_b=3.41$ km/s。

4.2 冲击 Hugoniot 线的实测结果

实验中引入无氧铜作标准材料，测试主要采用电子学测试，飞片速度测量采用目前较为成熟的磁测速方法。冲击波走时测量主要由数字示波器记录，触发用靶板后面最外圈圆周上的 4 根触发探针，这 4 根探针由相互独立的 4 根同轴电缆连接至网络源，在网络源内部合成一个信号送至示波器，使用 4 个探针的目的在于提高触发的可靠性。共进行了 4 发实验，具体的实验情况及相关的一些处理结果一并列于表 2。

根据 4 发实验结果，将冲击波速度 D 与粒子速度 u 作直线拟合，可以得到 Ta-Nb 合金冲击 Hugoniot线为

$$D=3.42+1.18u$$

表 2 Ta-Nb 合金冲击 Hugoniot 线测量的具体实验情况及相关处理结果

Table 2 Experimental parameters and results for shock compression of Ta-Nb alloy

Experimental Parameter	Experimental shot			
	204-1	204-2	204-3	204-4
Sample thickness/(mm)	3.04	3.09	3.06	3.06
Velocity of flyer/(km/s)	2.04	3.20	3.97	4.87
Velocity of shock waves/(km/s)	4.43	4.97	5.54	5.87
Calculated particle velocity/(km/s)	0.86	1.38	1.71	2.13
Calculated pressure/(GPa)	59.9	107.9	149.1	196.7

5 讨 论

首先观察 93 钨合金和 Ta-Nb 合金的金相图，图 2 和图 3 分别是西北有色金属研究院观察到的 Fe-Ni-W合金和 Ta-Nb 合金的金相图，经过金相图的初步比较可见，在 Fe-Ni-W 合金中明显存在一些缺陷(图中黑斑点)，而由 Ta-Nb 合金的金相图可见，颗粒比较均匀，没有明显的类似钨合金照片中的黑斑点缺陷。因此，从两种合金金相图的比较可以得出结论，钽铌合金的金相组织比 Fe-Ni-W 合金的金相组织更加均匀，性能应当比钨合金稳定。

其次，从实测的 Ta-Nb 合金材料的冲击 Hugoniot 线可见 $c_0=3.42$ km/s 和 $\lambda=1.18$，而根据混合物叠加法估算的Ta-Nb合金材料的冲击Hugoniot线为$c_0=3.47$km/s和$\lambda=1.20$。从这两个数据比

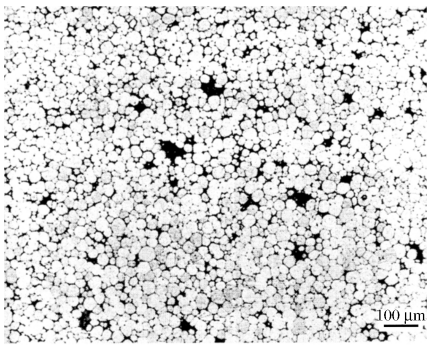


图 2 Fe-Ni-W 合金金相图

Fig. 2 TEM micrograph of Fe-Ni-W alloy

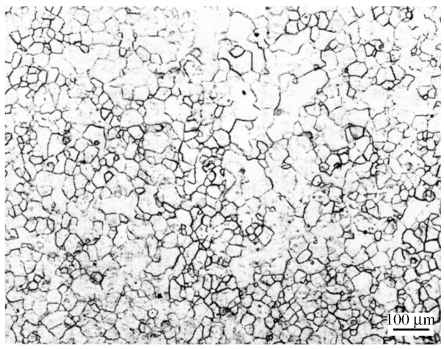


图 3 Ta-Nb 合金的金相图

Fig. 3 TEM micrograph of Ta-Nb alloy

较可见,在实验误差范围内,这两个结果符合得还是比较好的。此外从超声测量结果得到的 Ta-Nb 合金材料的零压体积声速 $c_b=3.41$ km/s,这与实测的 $c_0=3.42$ km/s 更为接近。从这两方面的比较可以确定,我们实测的 Ta-Nb 合金材料的冲击 Hugoniot 线是可信的。

为了更好地说明 Ta-Nb 合金材料的冲击压缩特性,将 Ta-Nb 合金材料的一些静态和动态力学性能与 93 钨合金和 78 钨合金材料作一简单比较,静态性能比较见表 3,其中 E 为杨氏模量,B 为体积模量,G 为剪切模量,σ_s 为屈服应力,σ_b 为破坏应力,δ 为延伸率,ν 为泊松比。

表 3　Ta-Nb 合金材料与两种钨合金材料静态力学性能的比较

Table 3　Static mechanical characteristic for Ta-Nb alloy and two kinds of tungsten alloy

Material	ρ/(g/cm^3)	E/(GPa)	B/(GPa)	G/(GPa)	σ_s/(GPa)	σ_b/(GPa)	δ/(%)	ν
78W	15.73	355.0	319.0	136.2	0.69	0.50	30	0.31
93W	17.64	394.0	260.0	157.6	0.75	0.97	22	0.25
Ta-Nb	15.73	201.3	182.5	76.5	0.16	0.27	55	0.32

从表 3 的 3 种合金材料的静态力学性能比较可见,Ta-Nb 合金材料的主要力学参数均比钨合金材料的小。93 钨合金的屈服应力和破坏应力最大,Ta-Nb 合金材料的最小。而延伸率则是 Ta-Nb 合金材料最大,93 钨合金最小。这说明 Ta-Nb 合金材料较钨合金材料软,韧性较好。

表 4 为 Ta-Nb 合金材料的冲击 Hugoniot 线与 93 钨合金和 78 钨合金材料的比较。其在 p-u 图上的比较见图 4。

表 4　Ta-Nb 合金的冲击 Hugoniot 线与 93 钨合金和 78 钨合金材料的比较

Table 4　Hugoniot parameters for Ta-Nb alloy compare with two kinds of Tungsten alloy

Material	ρ/(g/cm^3)	c_0/(km/s)	λ
78W	15.73	4.09	1.34
93W	17.64	4.01	1.28
Ta-Nb	15.73	3.42	1.18

从 3 种材料的 p-u 线比较可见,93 钨合金在最上面,Ta-Nb 合金在最下面。因此,Ta-Nb 合金材料要比钨合金材料容易压缩一些。

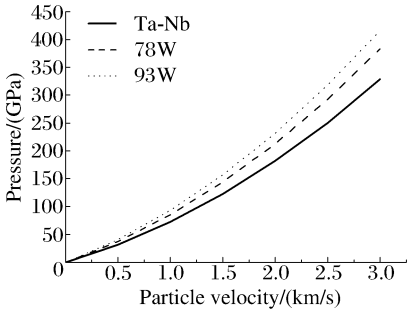


图 4　Ta-Nb 合金与 93 钨合金和 78 钨合金材料的冲击 Hugoniot 线比较

Fig. 4　Hugoniot curves for Ta-Nb alloy compare with two kinds of Tungsten alloy

6　结　论

对一种新型 Ta-Nb 合金材料进行了超声测量实验和冲击 Hugoniot 线测量实验,得到了其主要静态力学参量和冲击 Hugoniot 线。主要静态力学参量为:剪切模量 $G=76.48$ GPa;体积模量 $B=182.45$ GPa;杨氏模量 $E=201.31$ GPa;泊松比 $\nu=0.316$。实测冲击 Hugoniot 线为 $D=3.42+1.18u$。实测冲击 Hugoniot 线与由混合物叠加法估算的结果符合较好。Ta-Nb 合金材料的金相组织均匀,性能应比钨合金稳定。通过与两种钨合金材料的静态和动态力学性能比较可见,Ta-Nb 合金材料的静态力学参量比两种钨合金材料均小,冲击压缩性也较两种钨合金较容易压缩,且延伸率较好。总之,Ta-Nb合金材料作为一种新型的合金材料,与现有的一些工程合金材料相比具有较好的某些特性,目前所得到的一些实验结果为 Ta-Nb 合金材料的进一步应用提供了理论计算和实验设计依据。

感谢西北有色金属研究院提供的钽铌合金材料及金相分析图片,感谢成都理工大学油气藏地质及开发国家实验室所进行的超声测量实验,同时对在气炮实验中给予大力协助的方茂林、陈志云、向跃明、王为、傅秋卫等表示衷心感谢。

References:

[1] Huang Ch G, Dong Y X, Duan Zh P. Dynamic Behaviors of Tungsten Alloy and Its Denpendance on Micro- and Mesoscopic Structures [J]. Mechanic Development, 2003, 33(4): 433-445. (in Chinese)
黄晨光, 董永香, 段祝平. 钨合金的冲击动力学性质及细微观结构的影响 [J]. 力学进展, 2003, 33(4): 433-445.

[2] Trunin R F. Shock Compression of Condensed Materials (Laboratory Studies) [J]. Physics-Uspekhi, 2001, 44(4): 371-396.

[3] Shreiber E, Anderson O L, Soga N. Elastic Constants and Their Measurement [M]. New York: McGraw Hill Book Company Press, 1973: 5-34.

[4] Wang R J, Wang J F. Elastic Behavior of the Gadolinium Gallium Garnet Crystal under High Pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1987, 1(1): 32-38. (in Chinese)
王汝菊, 王积芳. 高压下 $Gd_3Gd_5O_{12}$ 晶体的弹性性能 [J]. 高压物理学报, 1987, 1(1): 32-38.

[5] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. Beijing: Science Press, 1986: 194-199. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 194-199.

[6] Mitchell A C, Nellis W J. Shock Compression of Aluminum, Copper and Tantalum [J]. J Appl Phys, 1981, 52(5): 3363-3374.

[7] Wang J G, Shi W F. Shock Copression and Equation of State for 4. 2Ni2. 45Fe0. 35CoW Alloy in Pressure Range 100 ~ 500 GPa [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1995, 9(3): 195-203. (in Chinese)
王金贵, 施卫丰. 100~500GPa 4. 2Ni2. 45Fe0. 35CoW 合金的冲击压缩性和物态方程 [J]. 高压物理学报, 1995, 9(3): 195-203.

Dynamic Behavior of Ta-Nb Alloy under Shock Compression

HUA Jin-Song, GU Yan, ZHANG Shi-Wen, WANG Peng-Lai, FENG Dong-Sheng

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

Abstract: A new kind of Ta-Nb alloy has been studied. By means of ultrasonic measurement, its sound velocities of longitudinal wave and transverse wave were obtained, and some of its static mechanical parameters were calculated. Through shock compression experiments with a two stage gas gun, its shock Hugoniot curve in pressure range from 60 GPa to 196 GPa was obtained. The result was in good agreement with the calculation by a mixture model. The mechanical characteristics of Ta-Nb alloy with two kinds of tungsten alloy have been compared, which shows the dynamic behavior of Ta-Nb alloy is better than that of tungsten alloy.

Key words: Ta-Nb alloy; shock Hugoniot curve; ultrasonic measurement