

文章编号: 1001-1455(2000)01-0045-07

钽-钨合金动态响应特性研究^①

张万甲

(中物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: 用冶金技术与冲击波物理实验相结合的方法, 研究了钽-钨合金不同初始状态和不同钨含量时的材料动态响应特性, 给出了 Ta12W 合金材料的动态断裂强度、Hugoniot 弹性极限、屈服强度以及理想弹-塑性本构关系中包含的其它本构参量。

关键词: 钽-钨合金; 动态特性; 断裂强度; 本构参量

中图分类号: O346.1 文献标识码: A

1 引言

钽-钨合金是一种高强度、高熔点、高冲击阻抗的重金属材料, 有很高的延展性, 较好的机械加工性能和抗腐蚀能力, 在高科技领域有着重要的应用。为此, 我们研究了冲击载荷条件下 Ta-W 合金的动态特性。

从材料学知道, 材料的力学和物理性质取决于它的微观结构, 而材料的内部结构则受控于它的力-热历史, 即它的冶金和加工处理条件以及合金元素的含量。已有的研究表明^[1], 在动载荷条件下, 在很宽的压力范围内, 材料强度起着控制作用。因此, 要取得最佳的材料动态性能, 就需对影响材料内部结构从而支配材料宏观性质的冶金和加工处理条件加以优化选择。我们用不同工艺条件和钨含量的样品, 在相同加载条件下, 通过软回收样品内部损伤度的比较, 对 Ta-W 合金作了研究。

材料对动载荷的响应完全受本构关系或动力学状态方程所控制, 本构关系把应力、应变、应变率及温度的现时值联系起来; 动态断裂是材料动态响应的重要特性之一, 断裂准则和本构关系是开拓材料在强动载荷下应用的基础。我们得出了经工艺优选后 Ta12W 材料的动态断裂强度和理想弹-塑性模型假设下的本构参量。

2 实验内容和实验方法

实验工作分两阶段进行: 第一阶段为动态软回收实验, 主要是分析比较具有不同钨含量和用不同冶金工艺成材的 Ta-W 合金样品内部的损伤程度和损伤机理; 第二阶段为动态测量实验, 对经优化选择后的 Ta-W 合金进行动态特性参量的实时测量。

2.1 动态软回收实验

实验用了 Ta0.5W、Ta12W 两种钨含量和加工态、部分再结晶态(1400℃保温一小时)、再结晶态(1500℃保温一小时)三种加工处理状态的样品。在100mm空气炮上, 用厚度2.5mm的钢

① 收稿日期: 1998-12-22; 修订日期: 1999-03-31
作者简介: 张万甲(1936—), 男, 副研究员。

飞片, 在 200~250m/s 的速度下与厚度 5mm 的钽-钨合金靶平面正碰, 实验装置如图 1 所示, 靶中应力脉冲的峰值为 6GPa 左右, 可使靶内部形成中度损伤。对软回收靶样品经解剖、抛光、腐蚀等制样工序, 用金相和扫描电子显微镜对截面进行损伤检测。

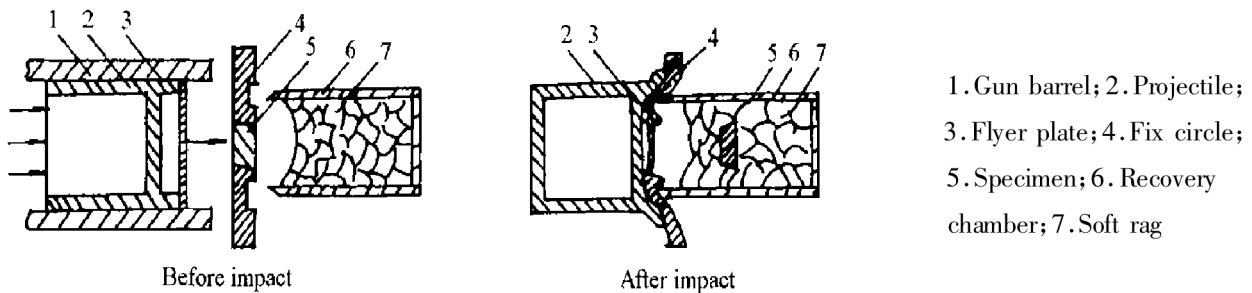


图 1 回收实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the recovery setup

2.2 动态测量实验

用 100mm 气体炮驱动弹丸与加工态 Ta12W 合金靶平面正碰, 用锰铜压阻技术连续测量靶背表面的应力历史, 实验装置如图 2 所示。应力波携带着波源(碰撞面)及传播介质(Ta12W 靶)的力学和物理特性的各种信息传到靶背表面, 通过靶背表面测得的波剖面的时间分辨测量, 就可得到材料动态响应的特征信息。实验选用的碰撞速度分别为 270、320、600、850、1000m/s。

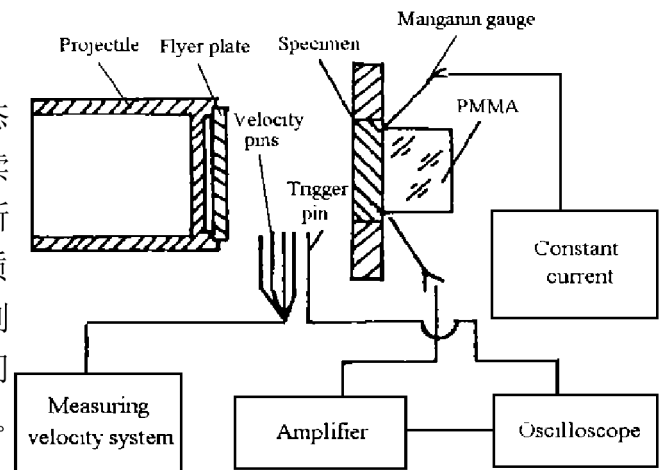


图 2 实验装置及测试系统

Fig. 2 Experimental setup and measuring system

3 实验结果和讨论

3.1 钨含量对钽基合金断裂性能的影响

回收样品的金相照片表明(如图 3), 在近似相同的加载条件下, Ta0.5W 样品内部的损伤程度轻于 Ta12W。Ta0.5W 样品只存在一些孤立的空洞, 而 Ta12W 则已经形成大量的较粗且长的裂纹, 这说明添加的钨元素促进了缺陷的成核与成长过程。这一现象可能的解释是: 从 Ta12W 的结晶构造来看, 它是一种固溶体, 呈单相(非机械混合物), 体心立方晶格, 但固溶体并非象化合物一样严格按一定的组元比时才存在, 而是在一个浓度范围内存在, 无论形成间隙固溶体或置换固溶体, 被溶元素的原子都依统计规律在一定浓度范围内无序地分布于溶剂晶体内部, 在一些极小体积范围内, 其成份与平均成份将出现涨落。此外, 由于溶剂和溶质原子半径的差异, 被溶物质使溶剂晶格发生歪扭, 正是由于材料内部这些不均匀性, 在强应力波作用下, 促进了缺陷的成核与增长过程。

3.2 添加元素钨对合金断裂机制转变的影响

如图 3 所示, Ta0.5W 样品截面显现的损伤是圆形孔洞, 这表明 Ta0.5W 是一种典型的延性断裂机制; Ta12W 样品截面呈现条状裂纹, 在较高的放大倍率下, 可看到条状裂纹两端呈半圆形, 这表明 Ta12W 样品也具有脆性断裂的特征, 但裂纹的尖端还有较大的塑性区。在钽基合金中, 随添加元素钨含量的增加将使钽基合金断裂的物理机制由延性断裂向脆性断裂变化,

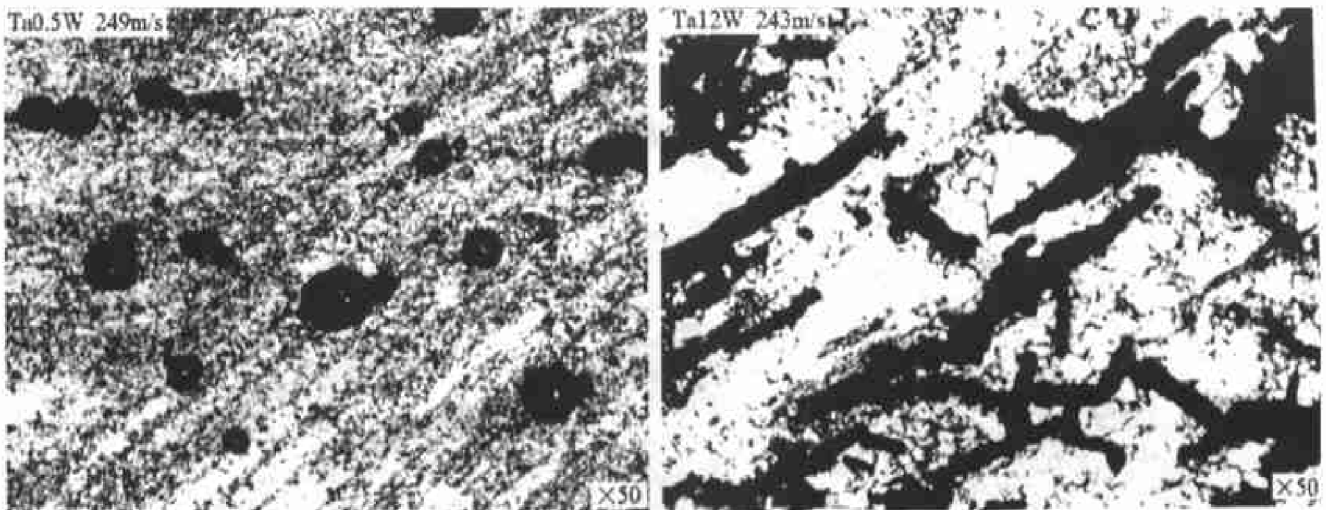


图 3 两种钨含量的 Ta-W 合金的金相显微照片

Fig.3 The metallurgical micrographs of Ta-W alloy with two tungsten content

这是因为，钽是一种很好的延性金属，钨则是一种高脆性材料，对 Ta12W 合金，由于钨含量增加，使合金材料的脆性增加，因而尽管应变速率和温度保持不变，但断裂的物理机制发生了转变。

3.3 不同工艺条件对钽基合金动态断裂性能的影响

如图 4 所示，在相同的碰撞速度下，再结晶态样品已形成了贯穿性断裂，且还有垂直于上下表面的裂缝，部分再结晶态样品内部也有比较多而且粗的裂纹，只有加工态样品内部的裂纹相对地少且细一些。实验证明，加工态 Ta12W 材料抗冲击破坏的能力相对地优于其它两种处理状态的材料。造成这一现象的原因可能是：加工态样品在冷加工时的塑性变形造成了晶粒细化，使金属的强度和硬度都相应地提高；而部分再结晶态和再结晶态退火处理之后晶粒长大，这说明晶粒的尺度和应变强化对材料动态断裂性能也存在明显的影响。

3.4 Ta12W 的动态断裂特性研究

平板撞击实验产生的弹-塑性波系如图 5 所示^[2]，撞击后分别在冲击器和靶板中产生一压缩波，当靶中压缩波达到靶-有机玻璃界面时，向靶内反射一束稀疏波，冲击器中的压缩波到达后界面（自由面）时，也向靶内反射一束稀疏波。这两束反向而行的稀疏波在靶中迭加，在靶内部引起局部的拉伸应力，当拉伸应力达到某一幅值时，材料便发生断裂，断裂一旦发生，材料内部出现新的自由面，使拉伸应力缓解，并向层裂片中传入一个压缩波，使压力回升到常压。由层裂效应产生的重复压缩波到达靶-有机玻璃界面时，使正在下降的界面应力回升，重复压缩讯号是材料内部发生了层裂断裂的标志，典型的实测波剖面如图 6 所示。由波剖面的时间分辨测量，可得到层裂强度、层裂片厚度

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \left[\sigma_1 \left[\frac{\rho_t c_t}{\rho_w c_w} - 1 \right] - \sigma_2 \left[\frac{\rho_t c_t}{\rho_w c_w} + 1 \right] \right] \quad (1)$$

$$\delta = \frac{1}{2} c_e \Delta t \quad (2)$$

式中： $\rho_t c_t$ 和 $\rho_w c_w$ 分别为 Ta12W 和有机玻璃的波阻抗， c_e 为靶材料的纵波声速。

初始入射压缩波幅度对层裂强度的影响，如图 7 所示。在应力脉冲的持续时间基本保持

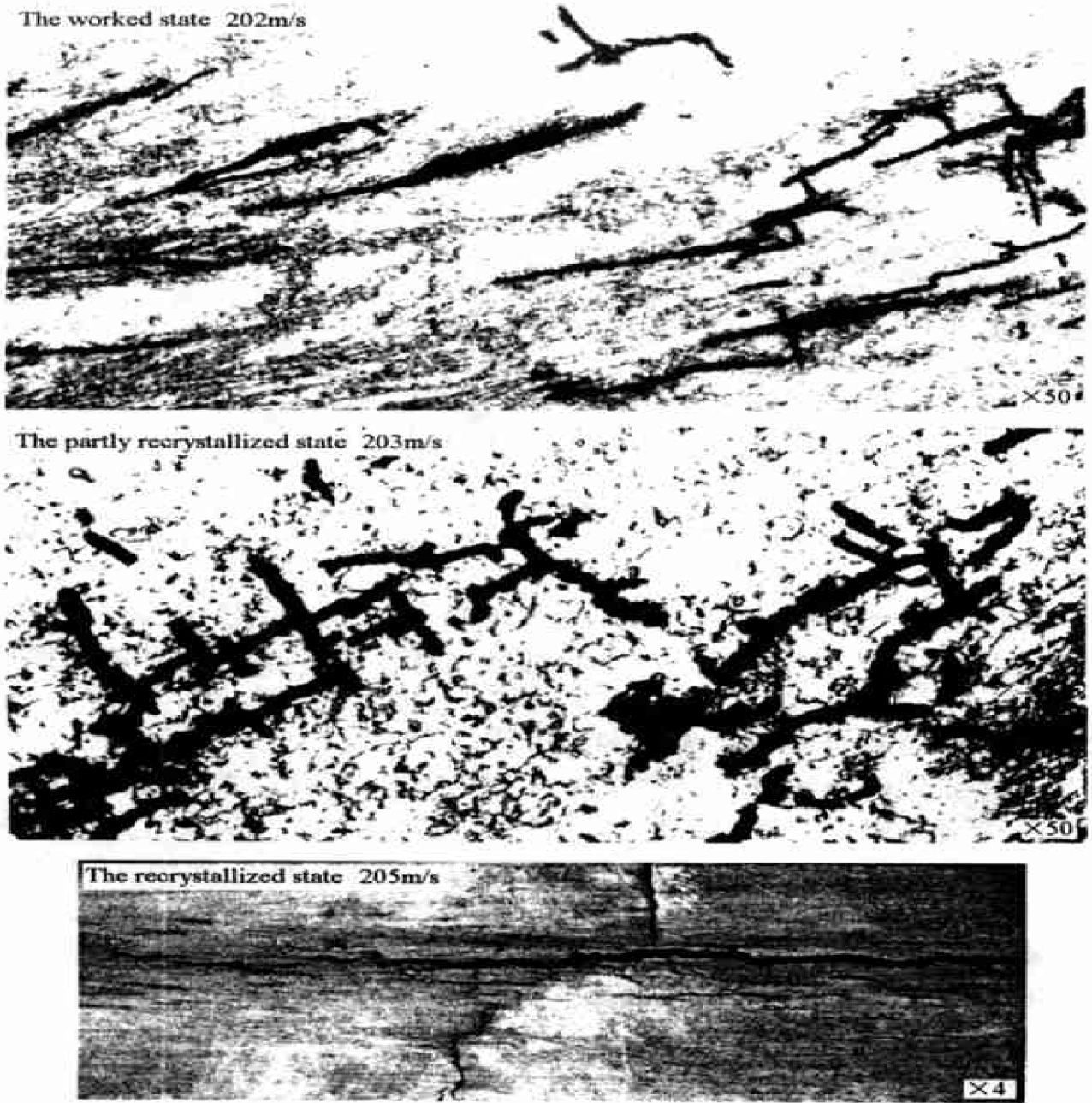


图 4 不同加工状态下 Ta12W 样品的金相显微照片

Fig.4 The metallurgical micrographs of Ta12W alloy under different state

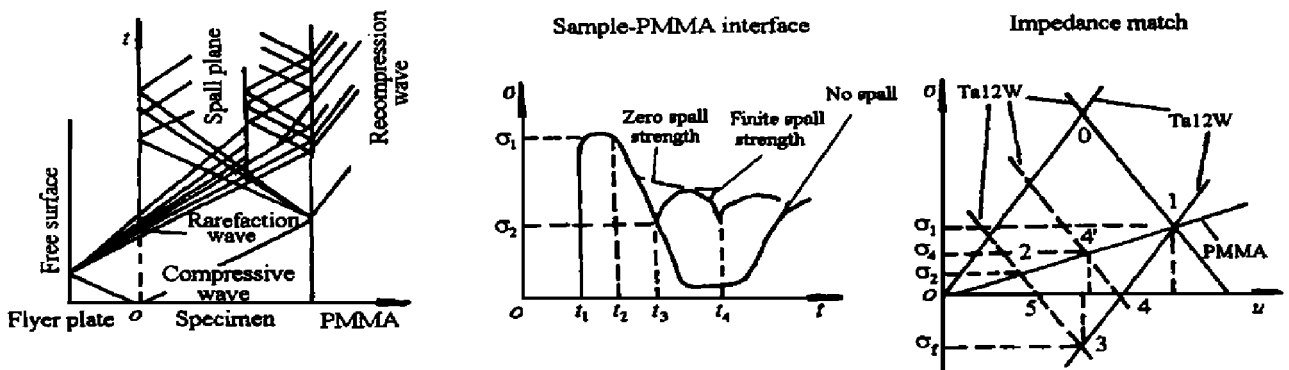


图 5 PMMA 作衬垫情况下的层裂示意图

Fig.5 Spall in PMMA backed target

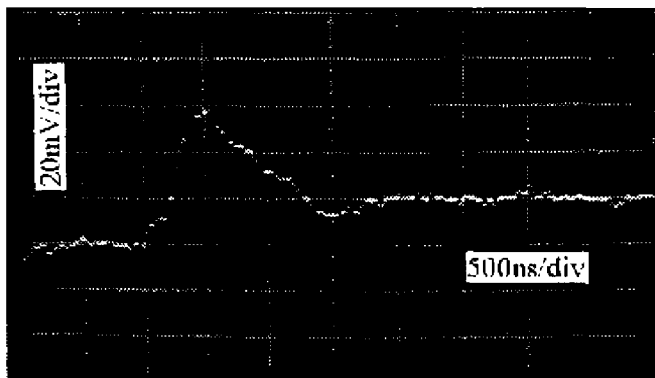


图 6 实测波剖面照片

Fig.6 Photograph of recorded wave profile

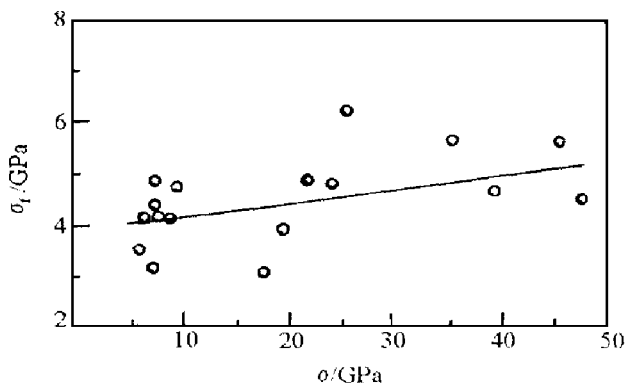


图 7 断裂强度与加载应力波幅度的关系

Fig.7 Spall strength versus loading peak stress

不变的情况下,变化应力波幅度,断裂强度随应力幅度略有增加。当压缩波幅度小于 10GPa 时, σ_f 的平均值为 4GPa,当加载幅度大于 40GPa 时, σ_f 的平均值约为 5GPa。由于断裂强度的分散性较大,断裂强度与加载幅度的相关性不明显。 σ_f 为 4.6GPa。在文献[3]中纯钽的 σ_f 为 6.23GPa,钽钨的 σ_f 为 1.76GPa。Ta12W 合金的层裂强度介于纯钽的纯钨之间是合理的。

3.5 Ta12W 本构参量研究

金属和合金在高应变率下的力学现象是十分复杂的,至今,对控制这些现象的物理机制还不是很清楚,因此,研究冲击载荷下材料的响应还没有一个统一的本构模型,而只有在某些限定条件下的本构模型。在中、低冲击压力下,工程上感兴趣的许多材料尤其是金属材料能够用理想弹-塑性模型来近似描述,在这种模型假设下,我们研究了 Ta12W 的本构参量。

在弹性区段,其本构关系可由 Hooke 定律给出

$$\sigma_x = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_x \quad (3)$$

式中: σ_x 、 ϵ_x 分别为纵向应力和应变, E 、 ν 为杨氏模量和泊松比。

在塑性区段,根据 Von Mises 准则,可得出其本构关系为

$$\sigma_x = K\epsilon_x \pm \frac{2}{3}Y = p(\epsilon_x) \pm \frac{2}{3}Y \quad (4)$$

式中: $p(\epsilon_x) = K\epsilon_x$, 为流体静压分量, K 为压缩模量, Y 为屈服强度。

下面讨论(3)、(4)式中 E 、 ν 、 Y 、 K 等本构参量的确定。纵向应力 σ_x 可由实验测定,我们测量了 0~47GPa 压力区间内 Ta12W 的 σ_x 。当 $p(\epsilon_x)$ 已知时,则可从(4)式得出屈服强度 Y 。但对 Ta12W 这种新的合金材料,现在还没有

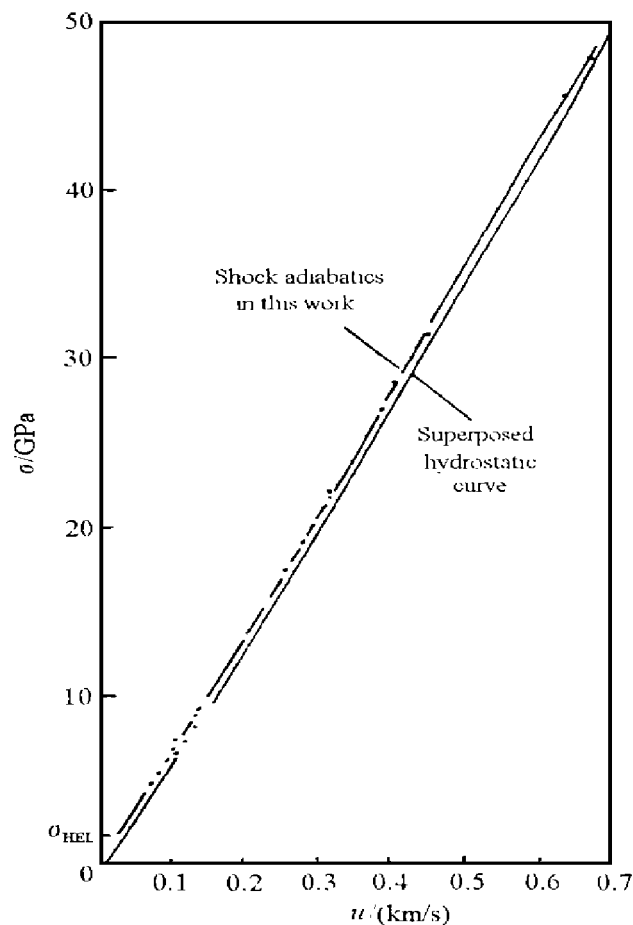


图 8 应力-质点速度曲线

Fig.8 Stress-particle velocity relation

$p(\epsilon_x)$ 曲线的实验结果, 作为一种近似, 采用描述理想流体的高压 Hugoniot 曲线, 并且利用多组元混合物材料物态方程叠加原理, 得到 Ta12W 合金材料的 Hugoniot 曲线, 如图 8 所示。因此

$$p(\epsilon_x) = \frac{\rho_0 c_0^2 \epsilon_x}{(1 - s\epsilon_x)^2} \quad (5)$$

式中: c_0 、 s 分别是冲击波速度-质点速度关系中的截距和斜率, ρ_0 为材料的初始密度。钽和钨的 c_0 、 s 分别取自文献[4]、[5], 对叠加后 Ta12W 合金材料, $c_0 = 3.45 \text{ km/s}$, $s = 1.17$ 。若采用工程上常用的理想塑性近似, 认为不存在应变硬化, 即 $Y = Y_0 = \text{const}$, 由(4)式得出 Y_0 , 便可分别确定其它参量

$$\begin{aligned} \text{剪切模量} & \quad G = Y_0 / (2\epsilon_x) \\ \text{体积模量} & \quad K = p / \epsilon_x \\ \text{杨氏模量} & \quad E = 9KG / (3K + G) \\ \text{泊松比} & \quad \nu = (3K - 2G) / (2(3K + G)) \end{aligned} \quad (6)$$

通过动态测量确定的 Ta12W 合金的特性参量: $\sigma_{\text{HEL}} = 2.07 \text{ GPa}$, $Y_0 = 0.975 \text{ GPa}$, $G = 70.36 \text{ GPa}$, $K = 204.95 \text{ GPa}$, $E = 189.41 \text{ GPa}$, $\nu = 0.35$ 。

由上述讨论可知, 材料特性常数确定之后, 便可确定材料的应力-应变曲线。只要本构关系已知, 根据应力波传播理论, 就可把靶中任一位置的应力和应变随时间的变化计算出来。更完整的本构模型还应考虑屈服强度是应变和应变率相关的, 还应计及粘性效应和温度效应, 对于这些更复杂的情况, 有待进一步研究。

4 结 束 语

用冲击波物理与冶金技术相结合的方法进行的研究结果表明: 合金元素的含量和制备材料的力-热历史对强动载荷下材料从损伤到破坏的演变发展过程有明显的影响。将材料学、冶金学和冲击波物理学相结合, 优化选择冶金条件, 以获得最佳的材料动态性能, 这种研究方法无疑将对相关学科的发展起到一定促进作用。

新合金材料 Ta12W 的断裂准则、本构关系及其材料特性参数, 为开拓该种材料在高科技领域中的应用提供了基础, 实验结果可供有关科技工作者参考。

杨中正同志参加了实验工作, 陶维东、李振藩、夏小菊等同志在多方面给予了大力的协作和支持。

参 考 文 献:

- [1] Asay J R, Chhabildas L C, Kerley G I. High Pressure Strength of Shocked Aluminum [A]. Gupta Y M. Shock Waves in Condensed Matter[C]. New York: Plenum Press, 1986. 145 ~ 149.
- [2] Bless S J, Yaziv D, Rosenberg Z. Spall Zones in Polycrystalline Ceramics [A]. Gupta Y M. Shock Waves in Condensed Matter[C]. New York: Plenum Press, 1986. 419 ~ 424.
- [3] Chhabildas L C, Barker L M, Asay J R, et al. Spall Strength Measurements on Shock-loaded Refractory Metals [A]. Schmidt S C, et al. Shock Compression of Condensed Matter-1989[C]. New York: Elsevier Science Publishers B V, 1990. 429 ~ 432.
- [4] 徐锡申, 张万箱. 实用物态方程理论导引[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 532.
- [5] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 88.

Studies on the Dynamic Response Behaviour for Tantalum-tungsten Alloy

ZHANG Wan-jia

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

Abstract: The influence on the dynamic response behaviour for Ta-W alloy with different initial states and tungsten contents have been performed by means of shock wave experiments and metallurgic technology. The dynamic fracture strength, Hugoniot elastic limit, yield strength and other constitutional parameters in the ideal elastic-plastic constitutional relations for Ta12W alloy are also given.

Key words: tantalum-tungsten alloy; dynamic behaviour; fracture strength; constitutional parameter