文章编号：1000-5773(2010)01-0049-06

Ta-10W 合金压缩力学性能实验研究*

钟卫洲[1,2]，宋顺成[1]，谢若泽[2]，黄西成[2]

(1. 西南交通大学应用力学与工程系，四川成都 610031；
2. 中国工程物理研究院总体工程研究所，四川绵阳 621900)

摘要：利用 MTS 材料试验机和分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)实验装置对非退火状态 Ta-10W 合金进行了准静态和动态压缩实验，给出了材料的静态压缩屈服强度和应变率在 700～3 100 s^{-1} 范围内的动态压缩应力-应变曲线，并获得了不同应变率下材料的动态屈服强度。通过对实验结果的分析可以发现，非退火状态 Ta-10W 合金具有较好的韧性，在所进行的实验中试件表面均未出现可见裂纹；试件材料具有较高的静、动态屈服强度，静态屈服强度达到 930 MPa，动态屈服强度在 1 GPa 以上，在所进行的 700～3 100 s^{-1} 应变率范围内，材料的动态屈服强度随应变率的增加略有提高。

关键词：Ta-W 合金；力学性能；应变率；压缩实验
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

Ta 和 Ta 合金具有高密度、高熔点、耐腐蚀、优异的高温强度、良好的加工性和可焊性以及低的塑-脆转变温度等优良性能，而广泛应用于电子、化工、武器等多种行业[1-2]。在难熔金属中，Ta 的低温塑性是最好的，其塑性-脆性转变温度低于－196 ℃，同时其对腐蚀介质干氯、湿氯、氯水、次氯酸、次氯酸盐以及盐酸等均具有优异的抗腐蚀性能[3]，美国 Los Alamos 国家实验室利用 Ta 合金对熔融钚良好的耐腐蚀性，将其作为核原料钚的熔炼坩埚和搅拌器原料[4]。

作为一种典型的 BCC(Body Centered Cubic)结构金属，Ta 和 Ta 合金的力学性能受微量杂质含量、结晶结构等内在因素的影响，对温度及应变率的变化比较敏感，引起了国内外许多学者的关注。S. Nemat-Nasser[5-6] 通过对 Ta 和 Ta-2.5W 材料的动态力学性能实验结果进行分析发现，W 成分增加使 Ta-2.5W 具有更高的流动应力，但降低其应变率敏感性。彭建祥[7] 利用所测得的应力-应变曲线拟合了 Ta 在不同应变率和不同温度下的 Johnson-Cook 与 Zerilli-Armstrong 本构方程，并对 Johnson-Cook 本构方程中的应变率强化项作了修正。张林[8] 通过平面对称碰撞实验，给出了 Ta 在低压下的冲击特性参数和层裂强度。L. M. Hsiung[9] 研究了平板冲击实验对 Ta 和 Ta-10W 材料微结构排列的影响。Q. Wei[10] 研究了等通道拉伸后 Ta 材料的微结构和力学特性。丁旭[11] 通过 X 射线衍射实验方法测定了较高 W 含量的 Ta-W 二元合金的晶格常数，采用 3 种不同方法计算了 Ta-W 密度，并对结果之间的差异进行了分析。本工作采用 MTS 试验机和 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)装置对非退火状态 Ta-10W 合金进行准静态和动态压缩实验，获得了其准静态压缩屈服强度和动态压缩应力-应变关系曲线，并对其力学特性及应变率敏感性进行了分析。

* **收稿日期**：2009-05-03；**修回日期**：2009-08-15
基金项目：国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划，2010CB832700)；国家自然科学基金(50874095)
作者简介：钟卫洲(1978—)，男，博士研究生，助理研究员，主要从事冲击动力学研究. E-mail：wz_zhong@sina.com

2 准静态压缩实验

利用 MTS 材料实验机以 1 mm/min 的加载速度对直径为 10 mm、轴向长度为 15 mm 的圆柱形非退火状态 Ta-10W 试件进行准静态压缩，经压缩后试件的变形如图 1 所示。

从图 1 中可以看出，在准静态压缩过程中，试件呈鼓状变形，随着载荷增加试件变粗，在本实验中加载的最大载荷约为 9 t，此载荷使试件发生了明显的塑性变形，但还未达到试件破坏的载荷极限，试件表面没有明显的裂纹产生，说明试件材料具有良好的韧性。由实验测试计算得到的试件应力随加载头下降位移的关系曲线如图 2 所示，从图中可知，非退火状态 Ta-10W 合金具有较高的强度，其准静态压缩屈服强度约为 930 MPa。



图 1 试件变形图

Fig. 1 Deformation of specimen

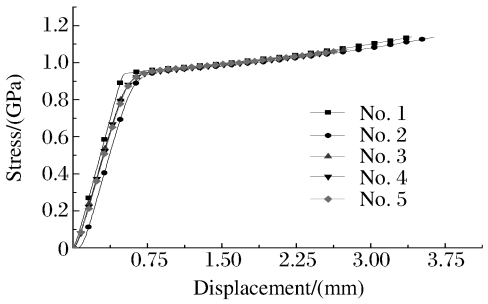


图 2 应力-加载位移曲线图

Fig. 2 Stress-displacement history under loading

3 动态压缩实验方法

3.1 SHPB 实验原理

Ta-10W 动态压缩实验在直径为 25 mm 的分离式 Hopkinson 压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)实验系统上完成，其加载装置如图 3 所示，其中子弹长度为 300 mm，输入杆与输出杆的长度均为 1 000 mm，应变片粘贴于输入杆和输出杆的中部。

SHPB 实验装置的原理如图 4 所示[5]，实验过程中子弹以一定速度撞击输入杆，在输入杆内产生一个入射脉冲 ε_i，当入射脉冲传播至输入杆与试件的接触界面时，一部分脉冲被反射在输入杆中，形成反射脉冲 ε_r，另一部分脉冲传入试件内部，该部分脉冲在试件与输出杆的接触界面部分被反射，另一部分将在输出杆中形成透射脉冲 ε_t，这些脉冲信号通过分别粘贴在输入杆和输出杆上的应变片来测得。试件在应力脉冲的作用下发生变形，通过输入杆和输出杆上采集得到的信号，结合一维应力假定和均匀假定，则可确定试件材料在应力波作用下的应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$、应变 $\varepsilon_s(t)$ 和应力 $\sigma_s(t)$ 曲线。

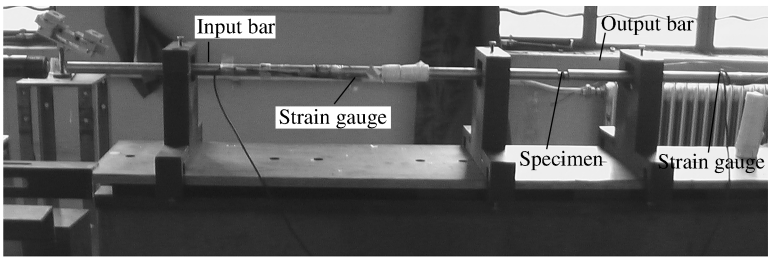
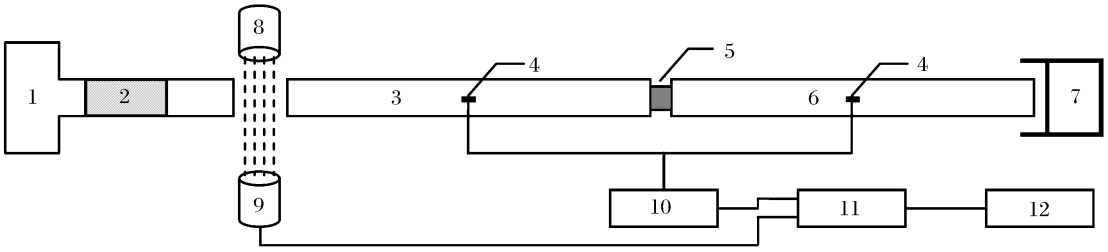


图 3 SHPB 实验装置图

Fig. 3 SHPB experiment equipment



1. Ball launcher; 2. Ball; 3. Input bar; 4. Strain gauge; 5. Specimen; 6. Output ball;
7. Recovery box; 8. Laser generator; 9. Velocity measuring device;
10. Strain instrument; 11. Oscillograph; 12. Computer

图 4　SHPB 实验装置图

Fig. 4　Configuration of SHPB device

3.2　实验数据处理方法

根据一维波传播理论，入射波与反射波信号之和等于透射波信号，因此可以选择任两波信号或采用三波信号进行处理，以获得试件的应力、应变和应变率曲线。从文献[12]可知，基于绝对时间下的试件应力及应变计算的三波处理法具有很好的可信度，且能最大程度地避免数据处理过程中的人为因素，传统二波法不是优选的方法，但对于只有两个波信号的数据（输出杆应变片坏或反射波信号异常情况）可采用二波法分析获得试件的动态力学性能。

三波法是将实验采集的入射波、反射波和透射波信号进行综合分析，计算试件材料的应变率、应变和应力曲线，计算公式为(1)式～(3)式

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_0}{l_0}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \tag{1}$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_0}{l_0}\int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)\,\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\sigma_s = \frac{EA}{2A_s}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \tag{3}$$

式中：C_0 为压杆的弹性波速；l_0 为试件的初始长度；E 为压杆的弹性模量；A 为压杆的横截面积；A_s 为试件的横截面积。

两波法是在试件两端应力平衡公式(4)的基础上对三波法的简化，采用 3 个波中采集到的两个波信号进行分析，以此来获取试件材料的动态力学性能。在此以反射波和透射波信号为例计算材料的动态应力、应变，其具体的处理公式为(5)式～(7)式

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t \tag{4}$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{-2C_0}{l_0}\varepsilon_r \tag{5}$$

$$\varepsilon_s = \frac{-2C_0}{l}\int_0^t \varepsilon_r\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

$$\sigma_s = \frac{A}{A_s}E\varepsilon_t \tag{7}$$

(5)式～(7)式中的参量与(1)式～(3)式中的参量一致，按上述公式对实验数据进行进一步分析，可以得到试件的动态压缩应力-应变曲线以及数值模拟中所需的材料参数。

4 动态压缩实验

4.1 实验测试典型曲线

实验中分别以不同子弹速度对 Ta-10W 试件进行了动态压缩实验，实验记录的典型原始波形如图 5所示，该波形是子弹速度为 16.27 m/s 时的测试结果。图中横坐标为时间，纵坐标为电压信号，电压值与导杆上应变大小的关系为每 1 V 电压值所对应的应变值为 0.01。

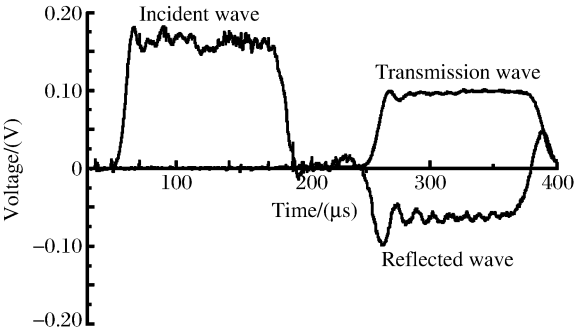


图 5 典型波形图(v=16.27 m/s)

Fig. 5 Typical wave curve(v=16.27 m/s)

4.2 动态压缩实验结果

对 14 件直径为 10 mm、厚度为 5 mm 的 Ta-10W 试件进行了动态压缩实验，实验中子弹速度为 13～30 m/s，试件经历的应变率为 700～3 100 s^{-1} 5 种应变率，相关实验条件及实验测试分析结果如表 1所示。在整个实验中试件沿轴向压缩变形，试件表面并未产生可见裂纹。从表 1 中可知，试件在弹丸速度为 13.06 m/s 时，试件沿轴向的压缩变形约为 6%；随着弹速提高试件的压缩量增大，当弹速为29.29 m/s时，试件的压缩变形达到 37%，由于试件均未破坏，因此试件的动态破坏应变大于 0.37。

在本实验中，入射、反射和透射波采集完整的实验数据按(1)式～(3)式三波法进行分析，对只采集到两个有效波形的数据按(5)式～(7)式两波法进行处理，以获得 Ta-10W 合金的动态应力-应变关系，经分析处理得到的试件材料在不同应变率下的动态应力-应变曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出，不同应变率下获得的动态应力-应变曲线的形状基本一致，材料在高应变率下所获得的塑性流动应力值略高。由于图 6 的动态应力-应变曲线在塑性阶段所对应的应变包括弹性应变和塑性应变，而表 1 试件的压缩表征为塑性变形百分比，因此不同应变率下试件的动态应力-应变曲线在卸载阶段所对应的应变略大于表 1 中的压缩变形百分比，低应变率下材料产生的变形较小，即进入卸载阶段时对应的应变较小。

图 7 为准静态和动态实验中试件屈服应力随应变率的变化趋势图，从图中可以看出，非退火状态 Ta-10W 合金动态屈服应力(>1 GPa)比静态屈服强度(930 MPa)大，虽然在相同应变率下由实验获得的动态屈服应力有一定的分散性，但不难看出随着应变率的增加，其动态屈服应力呈上升趋势，因此在实验应变率为 700～3 100 s^{-1} 的范围内，材料的屈服强度具有率敏感性，随应变率的提高而略有增加。

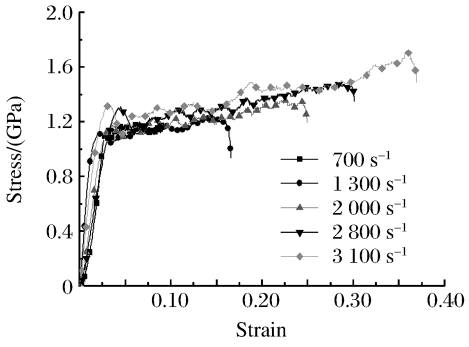


图 6 动态压缩应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain history under dynamic compression

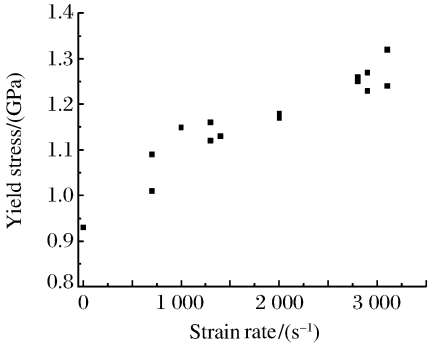


图 7 屈服应力-应变率关系

Fig. 7 Yield stress-strain rate history

表 1　动态压缩实验结果

Table 1　Dynamic compression experimental results

No.	Before experiment		After experiment		Compression ratio/(%)	Velocity /(m/s)	Strain rate /(s^{-1})	Yield strength /(GPa)
	Diameter /(mm)	Thickness /(mm)	Diameter /(mm)	Thickness /(mm)				
01	10.04	4.99	10.43	4.67	6.4	13.06	700	1.01
02	10.06	5.00	10.40	4.72	5.6	13.06	700	1.09
03	10.06	4.98	10.48	4.54	8.8	14.44	1 000	1.15
04	10.07	5.09	10.83	4.42	13.2	15.89	1 300	1.12
05	10.06	5.03	10.88	4.36	13.3	16.27	1 300	1.16
06	10.07	5.02	10.93	4.23	15.7	17.67	1 400	1.13
07	10.05	4.97	11.49	3.99	19.7	19.71	2 000	1.18
08	10.04	5.01	11.22	3.93	21.6	20.50	2 000	1.17
09	10.04	5.00	11.76	3.73	25.4	22.04	2 800	1.26
10	10.07	5.07	11.48	3.73	26.4	23.03	2 800	1.25
11	10.04	5.00	11.90	3.41	31.8	25.95	2 900	1.23
12	10.05	5.05	11.80	3.56	29.5	25.95	2 900	1.27
13	10.05	5.04	12.26	3.20	36.5	29.29	3 100	1.24
14	10.06	4.99	12.39	3.11	37.7	29.29	3 100	1.32

5　结　论

利用 MTS 材料试验机和 SHPB 实验装置,对非退火状态 Ta-10W 合金进行了准静态和动态压缩实验,给出了材料的静态压缩屈服强度和应变率在 700～3 100 s^{-1} 范围内的动态压缩应力-应变曲线,并获得了不同应变率下材料的屈服强度。通过对实验结果的分析可以得到以下结论:

(1) 非退火状态 Ta-10W 合金具有较高的静、动态压缩屈服强度,静态屈服强度约为 930 MPa,动态流变应力在 1 GPa 以上,其动态压缩强度大于静态强度。

(2) 在应变率为 700～3 100 s^{-1} 动态压缩实验中,材料的动态屈服强度由 1.0 GPa 增加到 1.3 GPa,屈服强度随应变率的增加而提高,具有率相关性。

(3) 在本工作所涉及的实验应变率和应力范围内,Ta-10W 试件发生了大变形,表面均未出现可见裂纹,试件材料具有较好的韧性,其动态破坏应变大于 0.37。

References:

[1] Zhang T J, Zhang D Y, Ding X. Plastic Deformation Characteristic of Ta-W alloy at Shock Loading [J]. Rare Metal Mater Eng, 1997, 26(2): 12-17. (in Chinese)
张廷杰,张德尧,丁　旭. 强冲击载荷下 Ta-W 合金的塑变特征 [J]. 稀有金属材料与工程 1997, 26(2): 12-17.

[2] Peng J X. Study on Constitutive Ralationship of Tantalum [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001. (in Chinese)
彭建祥. 钽的本构关系研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2001.

[3] Huang Y L, Li Y D. Effect on Ta2W Alloy Spring Property by Tungsten [J]. Rare Metal, 1997, 21(6): 415-418. (in Chinese)
黄勇玲,李永德. 钨对 Ta2W 合金弹簧性能的影响 [J]. 稀有金属, 1997, 21(6): 415-418.

[4] Hu Z W, Li Z K, Zhang T J, et al. New Developments and Applications of Tantalum and Tantalum Alloys [J]. Rare Metals Cemented Carbides, 2003, 31(3): 34-36, 48. (in Chinese)
胡忠武,李中奎,张廷杰,等. 钽及钽合金的新发展和应用 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2003, 31(3): 34-36, 48.

[5] Nemat-Nasser S, Rajeev K. Deformation Behavior of Tantalum and Atantalum Tungsten Alloy [J]. Inter J Plasticity, 2001, 17: 1351-1366.

[6] Nemat-Nasser S, Isaacs J B. Direct Measurement of Isothermal Flow Stress of Metals at Elevated Temperatures and High Strain Rates with Application to Ta and Ta-W Alloys [J]. Acta Mater, 1997, 45(3): 907-919.

[7] Peng J X, Li Y L, Li D H. An Experimental Study on the Dynamic Constitutive Relation of Tantalum [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 183-187. (in Chinese)
彭建祥, 李英雷, 李大红. 纯钽动态本构关系的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2): 183-187.

[8] Zhang L, Cai L C, Wang W, et al. The Dynamic Mechanic Characteristics of Tantalum under Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physic, 2001, 15(4): 265-270. (in Chinese)
张 林, 蔡灵仓, 王 悟, 等. 钽在冲击载荷下的动态力学特性 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4): 265-270.

[9] Hsiung L M, Lassila D H. Shock-Induced Displacive Transformations in Tantalum and Tantalum-Tungsten Alloys [J]. Scripta Materialia, 1998, 39(4): 603-609.

[10] Wei Q, Jiao T, Mathaudhu S N, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Tantalum after Equal Channel Angular Extrusion (ECAE) [J]. Mater Sci Eng, 2003, A358: 266-272.

[11] Ding X, Zhang D Y, Zhang T J. Study on the Densities of Ta-W Alloys [J]. China Molybdenum Industry, 1997, 23 (Suppl): 34-36. (in Chinese)
丁 旭, 张德尧, 张廷杰. Ta-W 合金的密度分析 [J]. 中国钼业, 1997, 23(增刊): 34-36.

[12] Song L, Hu S S. Two-Wave and Three-Wave Method in SHPB Data Processing [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 368-373. (in Chinese)
宋 力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 368-373.

Experimental Research on Compression Mechanical Properties of Ta-10W

ZHONG Wei-Zhou[1,2], SONG Shun-Cheng[1], XIE Ruo-Ze[2], HUANG Xi-Cheng[2]

(1. *Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 610031, *China*;
2. *Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Quasi-static and dynamic compression experiments of unannealed Ta-10W alloy specimen are implemented by MTS and split Hopkinson pressure bar equipments. Quasi-static compression yield strength is gained. In addition, the stress-strain history and dynamic compression yield strength are obtained when strain rate ranges from 700 s^{-1} to 3 100 s^{-1}. The experiment results indicate that unannealed Ta-10W is preferably flexile. There is no crack on the surfaces of specimen after experiments. The quasi-static and dynamic compression strength of unannealed Ta-10W alloy is quite large. Quasi-static compression yield strength is about 930 MPa, and the dynamic compression yield strength is over 1 GPa. Dynamic compression yield strength of Ta-10W is dependent on strain rate, and it grows from 1.0 GPa to 1.3 GPa when strain rate increases from 700 s^{-1} to 3 100 s^{-1}.

Key words: tantalum tungsten alloy; mechanical property; strain rate; compression experiment