

新型锆钛合金的动态拉伸力学性能与 微观断裂机制试验研究

刘崧¹, 覃金贵², 陈荣², 龚自正^{1,3}, 张品亮¹

(1. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 成都 610039; 2. 国防科技大学 理学院, 长沙 410073;
3. 北京卫星环境工程研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 采用直接撞击式 Hopkinson 拉杆装置对新型锆钛合金材料在动态冲击载荷作用下的力学性能进行了试验研究, 得到了典型动态拉伸真应力-真应变曲线。试验结果表明, 在室温、应变率为 $800\sim 4000\text{ s}^{-1}$ 的情况下, 材料的动态强度 (包含屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_b)、失稳应变、伸长率以及应变能密度均随应变率的增大而增大。采用扫描电子显微镜 (SEM) 对试件断口进行分析, 研究了合金材料在不同应变率状态下的失效断裂特征。结果发现, 随应变率的增大, 材料的断裂方式由准解理断裂变为韧性断裂。

关键词: Hopkinson 杆; 动态拉伸; 应变率; 锆钛合金

中图分类号: TB302.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2013)03-0310-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.03.016

0 引言

随着生产和科技的发展, 工程材料在动态载荷作用下的力学性能越来越受到人们的重视, 成为固体力学和材料科学中的一项重要课题。Hopkinson 杆试验技术是测试材料动态力学性能的重要手段。其中, 主要以 Kolsky^[1] 于 1949 年提出的分离式 Hopkinson 压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 技术最为典型, 其优势在于试验结构简单、操作方便、易于数据处理和试验成本低, 可以获得材料在高应变率 ($10^2\sim 10^4\text{ s}^{-1}$) 加载下的动态力学性能。

然而, Hopkinson 压杆试验技术主要侧重于用于材料的动态压缩性能的研究, 较少考虑材料的动态拉伸性能的测试。动态拉伸性能测试中存在两个困难: 一是不易产生理想的拉伸加载脉冲; 二是试样设计及其连接困难且易产生附加干扰^[2]。围绕这两个难题, 国内外学者开始探索新的、更理想的试验技术。20 世纪 60 年代, 人们开始对 SHPB 技术进行延伸发展, 研制出分离式 Hopkinson 拉杆 (SHTB) 试验技术, 开始对材料动态拉伸性能进行研究。

分离式 Hopkinson 拉杆试验技术按拉伸加载方式的不同, 分为反射式、旋转盘式和直接撞击式

3 类。Harding 等^[3]首先提出反射式 Hopkinson 拉杆技术, 该技术优点在于操作简单, 可以得到应变率在 10^3 s^{-1} 以上时的试验结果, 但在试验中易出现偏心载荷且试件连接处容易产生干扰信号, 从而使得到的真应力-真应变曲线不能真实反映材料的拉伸性能。20 世纪 80 年代初, Nicholas^[4]提出了一种改进的反射式 SHTB 技术, 该技术设计思想新颖, 克服了信号干扰的缺点, 已被用于一些工程材料的动态拉伸性能研究。旋转盘式 SHTB 技术^[7]是在反射式 SHTB 技术基础上改进的, 该技术产生的拉伸脉冲平稳, 且脉冲的幅值、宽度和上升沿十分容易控制, 信号稳定, 目前已用于对钛合金^[8-12]、纯钛^[13-14]、合金钢^[15-16]等材料的动态拉伸性能研究。直接撞击式 SHTB 技术^[17]具有结构简单、易操作的特点, 它是利用爆炸加载装置和快速断裂夹具使得加载应力波在入射杆的自由末端面反射形成拉伸波, 直接对试样施加动态拉伸载荷。不足之处在于利用爆炸产生脉冲的难度较大, 在试验室中不便于使用。Ogawa^[18]在此基础上进行改进, 设计了一种全新的冲击-拉伸-压缩测试技术, 并得到广泛应用。目前, 国内外研究人员大多采用直接撞击式

收稿日期: 2013-02-25; 修回日期: 2013-05-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (编号: 2010CB731600)

作者简介: 刘崧 (1986—), 男, 硕士学位, 研究方向为材料动态力学响应。E-mail: liusong198608@163.com。

SHTB 试验技术。

新型锆钛合金 (Zr-Ti-Al-V 四元合金系) 与传统合金钢材料相比, 具有比强度高、密度小、耐高温、耐腐蚀的特点, 可替代传统合金钢, 在航天领域有可观的应用前景, 未来可作为结构和承重材料用于空间活动构件。Liang 等人^[19-20]对新型锆钛合金在常规条件下的力学性能进行研究, 发现其综合性能优异。然而, 锆钛合金尽管在常规条件下具有较好的力学性能, 但是在空间环境下的动态力学性能还有待进一步研究^[21], 尤其对其动态拉伸性能研究目前还处于空白状态。

在本文中, 利用直接撞击式 Hopkinson 拉杆技术对新型锆钛合金进行常温、应变率为 800~4000 s⁻¹ 下的动态拉伸试验, 以揭示应变率对锆钛合金动态力学性能的影响。在测试过程中使用脉冲整形技术^[22]来保证加载试样两端处于应力平衡态。利用扫描电子显微镜 (SEM) 从微观角度来揭示不同应变率对拉伸试样断口的影响, 探索该合金在高应变率下的动态断裂行为及其微观断裂机制。

1 试样制备及试验方法

1.1 试样

本文研究的新型锆钛合金由燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室提供, 其化学成分为 47Zr-45Ti-5Al-3V, 以纯海绵态 Zr、Ti、Al 和 V 为原料, 采用自耗式真空电弧炉熔炼。浇铸成铸锭后经 1050 °C 粗锻 2 次、930 °C 精锻 2 次制成直径 48 mm 的棒材。

在传统的 SHTB 加载装置中^[2], 试样与加载杆之间是通过螺纹连接的, 在螺纹间的间隙以及试样与拉杆螺孔底部的间隙处必然会产生干扰信号, 最后导致试验数据不准确。因此在本试验中采用片状哑铃型试样, 其板状部分与入射杆和透射杆的插口之间采用无机胶连接。与传统的螺纹连接相比, 这种连接方式将接触界面所引起的误差降至最低。

图 1 为试样的形状和尺寸。

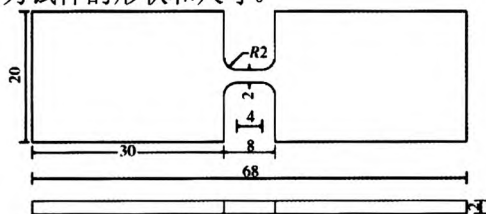


图 1 动态拉伸试样的尺寸

Fig. 1 The specimen for the dynamic tensile test

1.2 试验方法

直接撞击式 Hopkinson 拉杆试验装置以及测试原理如图 2 所示。整个装置由子弹、入射杆、透射杆和其他一些附加设备构成。试验时, 由安装在发射管里的空心环子弹对法兰进行撞击, 在法兰盘中产生一个压缩应力波。由于法兰与入射杆末端直接相连, 压缩波在入射杆末端反射形成反射拉伸波并且向入射杆方向传播。假定入射杆和透射杆仅发生弹性变形, 杆中应力波沿一维细长杆传播。当应力波到达试样界面时, 一部分反射回入射杆中, 另一部分穿过试样进入到透射杆中。通过安装在入射杆和透射杆上的应变片分别测量入射波、反射波和透射波信号, 再利用一维应力波传播理论推导出试样的应力-应变关系。

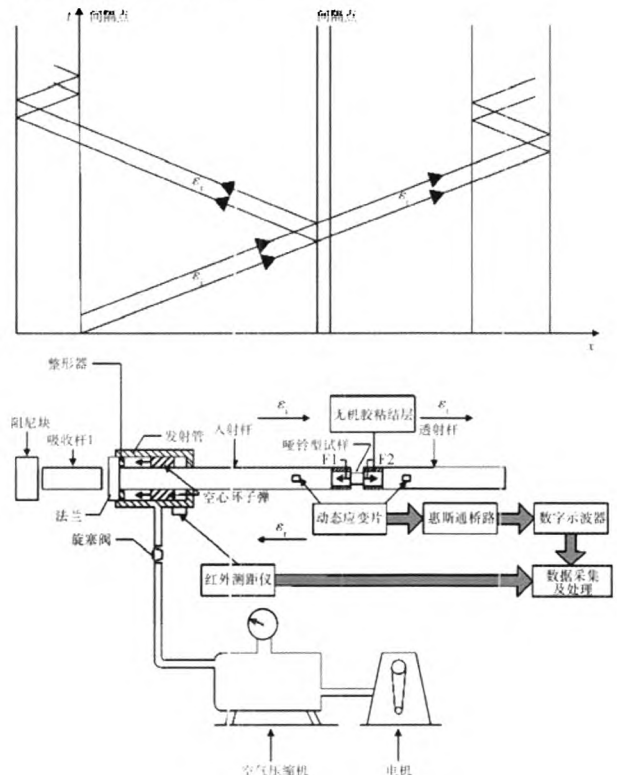


图 2 试验装置及测试原理

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic tensile test set-up and its measurement principle

子弹、入射杆和透射杆的直径都为 20 mm, 长度分别为 400 mm、3300 mm 和 1500 mm。安装在入射杆和透射杆上的动态应变片与试样的距离分别为 1000 mm 和 500 mm。在压杆的轴向上用一排套筒固定。套筒内采用轴承或尼龙圆环, 这样减少了与杆之间的摩擦, 使得杆在撞击过程中能够无约束地移动。此外在法兰端贴上两个橡皮整形器, 目的是增加入射

应力脉冲的上升沿时间,使加载波形变得平滑,从而令试样处于应力平衡状态。

由于入射杆和透射杆都选用相同材料且具有相同的横截面尺寸。依据一维线弹性应力波理论并假设试件中的应力和应变均匀,利用测得的杆上的应变信号可得到试件中的工程应力 $\sigma_s(t)$ 、工程应变 $\varepsilon_s(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}_s(t)$:

$$\sigma_s(t) = E \frac{A}{A_s} \varepsilon_T(t); \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_r(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C_0}{L} \dot{\varepsilon}_r(t). \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: E 、 A 分别为杆的杨氏模量和横截面积; C_0 为杆的弹性波速度; A_s 和 L 分别为试样的横截面积和长度; ε_T 和 ε_r 分别为试样的透射应变和反射应变。真应力和真应变与工程应力和工程应变之间的换算可通过以下公式得到:

$$\sigma_T(t) = [1 + \varepsilon_s(t)] \sigma_s(t); \quad (4)$$

$$\varepsilon_T(t) = \ln[1 + \varepsilon_s(t)]. \quad (5)$$

通过改变注气压力来改变子弹撞击速度,可以得到不同高度、宽度或上升沿的入射应力脉冲波,从而很容易在不同应变率下进行动态拉伸试验。本文实测

加载应变率分别为 800 s^{-1} 、 2000 s^{-1} 和 4000 s^{-1} 。

2 试验结果及分析

2.1 锆钛合金的宏观力学试验结果

图3为锆钛合金典型的动态拉伸真应力-真应变曲线。从图中可以看出,在3种工况下的拉伸真应力-真应变曲线均未出现明显屈服点,即弹性段和塑性段没有明显的转折点,我们把对应0.2%塑性应变的应力 $\sigma_{0.2}$ 定义为屈服应力(也称屈服强度)。由图3可得到室温各个工况下的屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 、失稳应力 σ_b (也称为抗拉强度,为真应力-真应变曲线中的最大应力值)、失稳应变 ε_b (与失稳应力相对应的应变)和断裂伸长率 ε_f ,如表1所示。

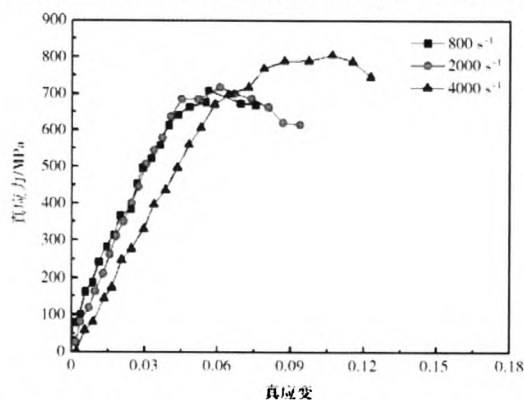


图3 锆钛合金在室温不同应变率下的真应力-真应变曲线
Fig. 3 True stress-strain curves of Zr-Ti alloy at different strain rates

表1 不同应变率下锆钛合金的 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 、 ε_b 和 ε_f
Table 1 Values of $\sigma_{0.2}$, σ_b , ε_b and ε_f for Zr-Ti alloy under different strain rates

试样编号	应变率/ s^{-1}	屈服应力 $\sigma_{0.2}$ / MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	失稳应变 ε_b / %	断裂伸长率 ε_f %	应变能密度/ MPa
1#	800	419.9	709	5.6	7.5	37.5
2#	2000	663.4	717	6.1	9.4	49.4
3#	4000	680.2	816	11.0	12.9	73.2

2.2 试件动态强度与应变率的关系

由表1可以看出,锆钛合金的动态强度(屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和抗拉强度 σ_b) 随应变率的增加而提高。锆钛合金为应变率敏感材料,应变率越高,屈服强度和抗拉强度越大。由位错动力学理论可知:金属材料的塑性应变率 $\dot{\varepsilon}$ 与位错运动速率 v 和柏氏矢量 b 的关系为

$$\dot{\varepsilon} = \rho b v, \quad (6)$$

式中 ρ 为可动位错密度。材料在屈服变形前可动位错密度较小,为了满足一定的塑性应变率 $\dot{\varepsilon}$, 必须

增大位错运动速率 v 。但位错运动速率取决于应力大小,其关系为

$$v = K \sigma^m, \quad (7)$$

式中 m 为位错运动速率应力敏感系数。

可动位错运动速率增加时,所需外力也相应增大。因此,随着应变率的增大,必然导致材料的强度增加。

2.3 失稳应变和断裂伸长率与应变率的关系

同样,由表1可见,失稳应变和断裂伸长率也随应变率的增加而增大。在动态拉伸加载下,材料

呈现出“高速韧性”的特点。其原因经分析在于动态拉伸过程中发生动态重结晶,使晶粒得到细化。晶粒细化后,材料的比表面积变大,有利于晶界滑移,使 α 片层晶粒逐渐朝拉伸轴方向排列,从而提高了材料的断裂伸长率。而动态拉伸过程中材料温升对断裂伸长率的影响较小:根据计算得到温升的平均值 $\Delta T \approx 25^\circ\text{C}$,拉伸后试样的最高温度不超过 57°C ,这个温度远远低于合金的相变温度。因此,可以认为,在动态拉伸过程中,晶粒细化是导致失稳应变和断裂伸长率提高的主要因素。

2.4 应变能密度与应变率的关系

由表1可知,材料发生拉伸断裂时,应变能密度随应变率增加而增大。应变率 $\dot{\varepsilon}=4000\text{ s}^{-1}$ 下的破坏应变能密度值最大,材料抗拉伸断裂的能力最强,综合力学性能最优。图4给出了在应变率为 4000 s^{-1} 的情况下,通过真应力-真应变曲线(图3)计算材料应变能密度的取值, σ - ε 曲线下的面积代表了断裂出现前试件内储存的应变能密度。

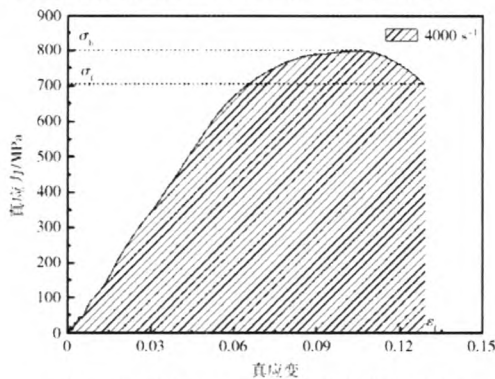


图4 应变率为 4000 s^{-1} 下的应变能密度

Fig. 4 Schematic diagram of strain energy density at a strain rate of 4000 s^{-1}

2.5 动态拉伸断口的形貌分析

图5是试样动态拉伸断裂后,用SEM观察到的断口形貌。从图5(a)中可看到,室温、较低应变率($\dot{\varepsilon}=800\text{ s}^{-1}$)下,试样的断口表面由撕裂峰小面与韧窝破裂混合组成,此时的断裂方式为穿晶准解理断裂。随着应变率增大,撕裂峰组成的小面消失,材料的断口表面出现大量等轴韧窝,韧窝底部出现一些空洞(见图5(b))。空洞连接最后形成裂纹带(见图5(c)),表明此时锆钛合金的断裂方式主要为穿晶韧性断裂,断裂机理为空洞的形核、长大和聚集。韧窝的直径和深度随应变率的增大而增大,

在较大应变率($\dot{\varepsilon}=4000\text{ s}^{-1}$)下,断口出现了多条断裂带,使得材料的韧性增加。

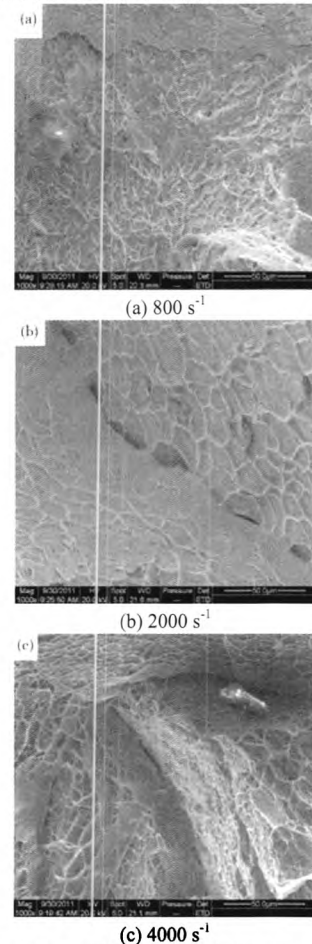


图5 室温不同应变率下的断口SEM照片

Fig. 5 SEM fractographs of Zr-Ti alloy at different strain rates

3 结论

1) 锆钛合金的动态强度(包含屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和抗拉强度 σ_b)具有明显的应变率相关性:它们都随应变率的增加而增大。

2) 锆钛合金的失稳应变 ε_b 和断裂伸长率 ε_f 具有明显的应变率相关性:在室温下,它们均随应变率的增加而增大,呈现出“高速韧性”的特点。

3) 在高应变率下,材料的应变能密度有明显的应变率相关性:应变能密度随应变率的增加而增大。

4) 对试样的拉伸断口进行扫描分析表明:随应变率的提高,材料的断裂方式由准解理断裂变为韧性断裂,断裂机理主要是空洞的形核、长大和聚集。

参考文献 (References)

- [1] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and

- Engineering Sciences, 1949, B62: 676-700
- [2] 胡时胜, 邓德涛, 任小彬. 材料冲击拉伸试验的若干问题探讨[J]. 实验力学, 1998, 13(1): 9-14
Hu Shisheng, Deng Detao, Ren Xiaobin. A study on impact tensile test of materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(1): 9-14
- [3] Harding J, Wood E O, Campbell J D. Tensile testing of materials at impact rates of strain[J]. Journal of Mechanics Engineering Science, 1960, 2(1): 88-96
- [4] Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain[J]. Experimental Mechanics, 1981, 21(5): 177-185
- [5] 王晓峰. 205A 铝合金动态断裂性能试验研究[D]. 长沙: 国防科技大学硕士学位论文, 2008
- [6] 许泽建. 40Cr 和 30CrMnSiNiZA 材料高应变率动态起裂特性的研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2005
- [7] Xia Y M, Wang Y. Dynamic testing of materials with the rotating disk indirect bar-bar tensile impact apparatus[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2007, 35(1): 1-5
- [8] Zan X, He Y H, Xia Y M, et al. Dynamic behavior and fracture mode of TiAl intermetallics with different microstructures at elevated temperatures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 45-51
- [9] Zan X, Wang Y, Xia Y M, et al. Strain rate effect on the tensile behavior of Duplex Ti-46.5Al-2Nb-2Cr intermetallics at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 498: 296-301
- [10] Zhou Y X, Xia Y M. Tensile mechanical behavior of TiAl(FL) at high strain rate[J]. Journal of Materials Science, 2000, 34: 925-929
- [11] Gong X H, Wang Y, Xia Y M, et al. Experimental studies on the dynamic tensile behavior of Ti-6Al-2Sn-2Zr-3Mo-1Cr-2Nb-Si alloy with Widmanstatten microstructure at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 523: 53-59
- [12] 宫旭辉, 王宇, 夏源明, 等. TC21 钛合金的高温动态拉伸力学行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 647-654
Gong Xuhui, Wang Yu, Xia Yuanming, et al. Dynamic tensile behavior of TC21 titanium alloys at elevated temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 647-654
- [13] 黄文, 汪洋, 李子然, 等. 温度和应变率对多晶纯钛孪晶变形的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(8): 1440-1445
Huang Wen, Wang Yang, Li Ziran, et al. Influences of temperature and strain rate on deformation twinning of polycrystalline titanium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(8): 1440-1445
- [14] Yuan J M, Shim V P. Tensile response of ductile titanium at moderately high strain rates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39: 213-224
- [15] 张方举, 谢若泽, 胡文军, 等. 一种改进的金属材料的高温动态拉伸实验技术[J]. 实验力学, 2011, 26(6): 750-754
Zhang Fangju, Xie Ruoze, Hu Wenjun, et al. An improved high temperature dynamic tensile experimental technique for metal materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(6): 750-754
- [16] 李运良, 门朝举, 谭书舜, 等. 摆锤式间接杆-杆型 SHTB 装置的研制及 FEM 仿真分析[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 245-250
Li Yunliang, Men Chaoju, Tan Shushun, et al. Development and simulation analysis by FEM of the pendulum impact tensile test apparatus of bar-bar[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 245-250
- [17] Albertini C, Montagnani M. Testing techniques based on the split Hopkinson bar[M]. London: Institute of Physics, 1974
- [18] Ogawa K. Impact-tension compression test by using a split Hopkinson bar[J]. Experimental Mechanics, 1984, 24(2): 81-86
- [19] Liang S X, Ma M Z, Jing R, et al. Microstructure and mechanical properties of hot-rolled ZrTiAlV alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 532: 1-5
- [20] Liang S X, Ma M Z, Jing R, et al. Preparation of the ZrTiAlV alloy with ultra-high strength and good ductility[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 539: 42-47
- [21] 王杰, 张宏伟, 王爱民, 等. 一种新型锆钛合金的动态力学行为研究[J]. 金属学报, 2012, 48(5): 636-640
Wang Jie, Zhang Hongwei, Wang Aimin, et al. Investigation of dynamic mechanical behavior of a new Zr-Ti alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(5): 636-640
- [22] Frew D J, Forrestal M J, Chen W. Pulse shaping techniques for testing elastic-plastic materials with a split Hopkinson pressure bar[J]. Society for Experimental Mechanics, 2005, 45(2): 186-195

Tests of dynamic tensile properties and microscopic fragment mechanism for a new zirconium-titanium alloy

Liu Song¹, Qin Jingui², Chen Rong², Gong Zizheng^{1,3}, Zhang Pinliang¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610039, China;

2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Dynamic tension tests were conducted by employing the SHTB(split Hopkinson tension bar) to study the dynamic mechanical properties of a new zirconium-titanium alloy. The dynamic mechanical properties of the alloy were determined at high strain rates ranging from 800 s^{-1} to 4000 s^{-1} at room temperature. The results show that the mechanical behavior of zirconium-titanium alloy depends on the strain rate, the dynamic strengths(including $\sigma_{0.2}$ and σ_b), the unstable strain, the elongation, and the strain energy density all increase with the increase of the strain rates. The SEM fractographic observation shows that there exists a strain rate dependence of the fracture mode for the alloy sample. At room temperature and 800 s^{-1} , the sample is brittle, but its fracture modes changes from a quasi-cleavage one to a ductile one with increased strain rates.

Key words: Hopkinson bar; dynamic tension; strain rate; zirconium-titanium alloy

(编辑: 闫德葵)

名词解释

世界计量日

1875年5月20日, 17个国家在法国巴黎签署了“米制公约”, 这是一项在全球范围内采用国际单位制和保证测量结果一致的政府间协议。100多年来, 国际米制公约组织对保证国际计量标准的统一、促进国际贸易和加速科技发展发挥了巨大作用。

1999年10月11日至15日, 第21届国际计量大会在法国巴黎国际计量局召开。为了使各国政府和公众了解计量, 鼓励和推动各国计量领域的发展, 加强各国在计量领域的国际交流与合作, 大会确定每年5月20日为世界计量日, 并得到国际法制计量组织(OIML)的认同。世界计量日的确定, 使人类对计量的认识跃上一个新的高度, 也使计量对社会的影响进入一个新的阶段。

从2000年5月20日起, 世界各国开始了宣传世界计量日一系列活动。国际法制计量组织在2001年OIML主席理事会上宣布, 鼓励各国的国家计量机构利用世界计量日开展活动。

2013年世界计量日的主题是“计量与生活”(Metrology and daily life)。

(摘自百度百科)