

文章编号: 1001-1455(2010)06-0641-06

V-5Cr-5Ti 的常温动态压缩力学性能*

谢若泽¹, 胡文军¹, 陈成军¹, 潘晓霞¹,

何鹏¹, 张方举¹, 陈杰²

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置, 在常温下对 V-5Cr-5Ti 合金分别进行了应变率效应试验、限制应变试验和应变累积的动态压缩试验; 分析了应变率、应变累积对 V-5Cr-5Ti 合金动态压缩性能的影响; 并对压缩试验后的试件进行了金相分析。结果表明, V-5Cr-5Ti 合金具有明显的应变率和应变历史效应, 而应变历史对材料的动态压缩性能的影响更明显。在高应变率下, 应变低于 0.20 时, 出现孪晶组织; 而应变高于 0.20 时, 孪晶组织急剧减少甚至消失。

关键词: 固体力学; 力学性能; 动态压缩; V-5Cr-5Ti 合金; 分离式霍普金森压杆

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

金属钒是典型的 BCC 结构金属, 而钒合金由于具有低的辐照活化性、优良的机械性能、与锂的强兼容性、高的热传导率以及优良的抗辐照性能, 因而在核聚变反应堆的壁层设计和壳体设计中具有较强的优势^[1-2]。对钒及钒合金已进行的研究工作多集中于材料制备和环境因素对材料性能的影响, 如合金、杂质元素以及热处理工艺对合金性能的影响, 钒合金的氢脆、氦脆性能, 钒合金的高温氧化问题, 中子辐照、离子辐照等^[1-6]。在力学性能方面, H. A. Aglan 等^[7]对钒合金的疲劳破坏行为进行了研究, A. F. Rowcliffe 等^[8]研究了应变率对 V-4Cr-4Ti 拉伸性能的影响, S. Nemat-Nasser 等^[9]、郭伟国^[10]研究了商业纯钒在 77~880 K 温度范围内的静、动态压缩力学性能。研究表明: 初始微结构对纯钒的初始流动影响强烈; 低温、高应变率下, 有绝热剪切带出现; 应变率为 10^{-3} s^{-1} 时, 温度超过 500 K 时出现动态应变时效现象。目前对钒合金的动态力学性能研究报道较少, 而在产品全寿命周期中, 结构和材料将不可避免地经受动态加载。了解钒合金等材料的动态力学性能对产品设计及产品安全有重要意义。

本文中, 以钒合金 V-5Cr-5Ti 为研究对象, 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)探讨该材料在常温下的动态压缩力学性能, 分别进行应变率效应试验、限制应变试验和应变累积试验, 给出钒合金 V-5Cr-5Ti 的动态压缩应力应变曲线、不同应变时的组织形貌, 并分析应变历史对材料性能的影响。

2 试验

2.1 试验设备

试验在 $\varnothing 22 \text{ mm}$ 的 SHPB 系统上进行。子弹的撞击速度由激光测速系统测定, 试验信号由粘贴于波导杆上的应变片接受, 通过动态应变仪的电路放大后由示波器记录。应变片位于压杆的中部, 敏感栅丝方向与杆的轴线方向一致, 应变片电阻为 120Ω , 灵敏因数为 2.14。采用 K54 超动态应变仪进行信号放大, 频带宽为 $10 \text{ Hz} \sim 1 \text{ MHz}$; 采用 TDS540D 数字存储示波器记录波形, 频带宽为 $\text{DC} \sim 500 \text{ MHz}$, 系统频响可以满足 SHPB 的测试要求。

* 收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2010-03-13

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目(2007A04001)

作者简介: 谢若泽(1970—), 男, 硕士, 副研究员。

2.2 应变冻结法

试验中,部分试件的变形采用应变冻结法加以限制,以获得指定的应变值。即用1个高度略小于试件原始长度的钢制限位环,套在试件外面;冲击加载使试件产生变形,当试件长度与限位环高度相同时,加载由限位环承受,试件不再产生大的变形,从而实现对比件变形的限制,见图1。

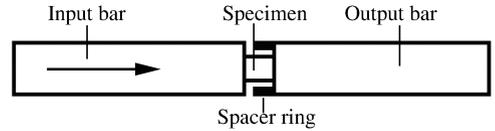


图1 应变冻结法示意图

Fig. 1 Schematic of strain freezing in the test

2.3 试验设计

根据Hopkinson压杆的具体情况,将试件设计为直径10 mm、长5 mm的圆柱形试件。根据试件尺寸,设计了多种高度的限位环。首先,测试了材料在不同应变率范围内的动态压缩力学性能;然后,在一种设定的应变率下,利用应变冻结法进行了不同变形的动态压缩试验,并进行了试验后材料的解剖和光学显微镜观察,以期获得材料在不同变形下的组织特性;最后,采用应变冻结法对试件进行多次压缩加载,研究材料的应变累积效应。

3 结果与讨论

3.1 应变率效应

在10~30 m/s的弹速范围内,测试了材料在不同应变率范围内的动态压缩力学性能。根据1维应力波理论,对所得的入射波、透射波和反射波进行处理,得到试件的工程应力和工程应变,再利用下列式子

$$\sigma_t = (1 - \epsilon_s)\sigma_s, \quad \epsilon_t = -\ln(1 - \epsilon_s)$$

计算得到试件的真实应力 σ_t 和真实应变 ϵ_t ,从而获得材料的应力-应变-应变率关系。式中: ϵ_s 为试件的工程应变,以压为正; ϵ_t 以压为正。

试验得到了V-5Cr-5Ti在 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的动态压缩应力应变关系。图2为试验前后试件的形貌。不同应变率下的动态压缩应力应变曲线如图3所示。由图3可见,V-5Cr-5Ti具有明显的应变率效应,材料的流变应力随着应变率的升高而升高。如应变率为 770 s^{-1} 时,材料的流变应力(此处均指材料发生0.05应变时的应力)为661 MPa;在应变率为 2020 s^{-1} 时,流变应力为730 MPa;在应变率为 3560 s^{-1} 时,流变应力为784 MPa,比应变率 770 s^{-1} 时提高了19%;而材料在 $5.56 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 应变率下发生0.05应变时的应力为543 MPa。材料的流变应力应变率关系曲线如图4所示。

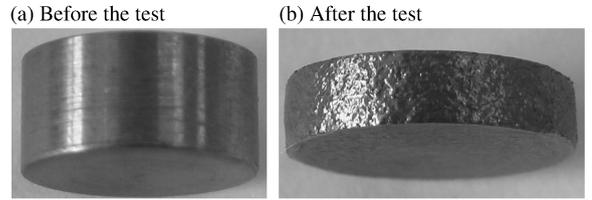


图2 试验前后试件的形貌

Fig. 2 Specimens before and after the test

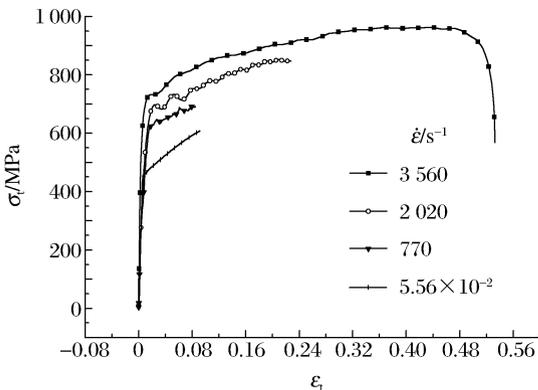


图3 动态压缩下V-5Cr-5Ti的真实应力应变曲线
Fig. 3 True stress-true strain curves of V-5Cr-5Ti

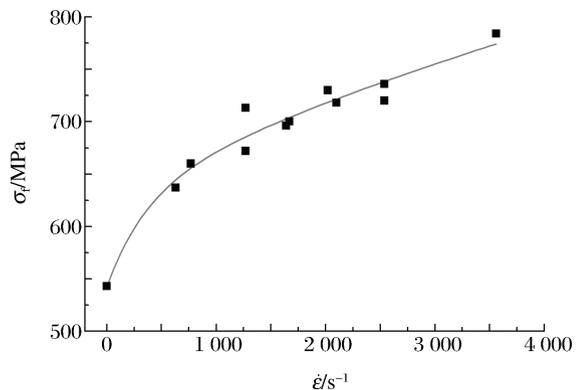


图4 V-5Cr-5Ti流变应力应变率关系曲线
Fig. 4 Flow stress-strain rate curve of V-5Cr-5Ti

3.2 限制应变试验

在子弹速度为 30.15 m/s 的加载条件下 (试件应变率为 $3\,560\text{ s}^{-1}$), 利用名义高度分别为 4.8、4.4、4.0、3.6 mm 的限位环对几个不同试件进行了限制应变试验。各限位环对应的名义应变分别为 0.04、0.12、0.20 和 0.28; 不加限位环的试验中, 试件自由变形, 应变可达 0.50 以上。

图 5 为限制应变试验中各试件的应力应变曲线。当限制应变较小(0.04)时, 获得的应力应变曲线不理想, 图中没有给出。图 5 中 3 条曲线的尾部上扬部分表示试件变形达到限制应变, 限位环对变形产生限制, 曲线是试件和限位环共同作用的结果, 并不是真实的应力应变曲线, 前面部分才是真实有效段。

图 6 为进行不同应变压缩后的金相形貌。由图可见, 0.20 应变以下的试件金相组织中出现了大量的准静态下没有的孪晶组织, 但是应变为 0.28 和 0.50 的试样中的孪晶组织急剧减少甚至消失了。这表明: 在常温、准静态下, 钒合金的塑性变形与常规的体心立方金属相同, 以位错滑移的方式进行。而在高应变率下, 应变较小时, 塑性变形则以孪生变形的方式为主; 随着应变的增大, 由于孪生后变形部分的晶体位向发生改变, 可使原来处于不利取向的滑移系转变为新的有利取向, 这样就可以激发起晶体的进一步滑移, 导致孪生的概率减小^[11]。

3.3 应变累积试验

为了了解应变历史对材料性能的影响, 进行了应变累积试验, 即针对同一试件, 进行多次压缩加载, 以考察应变历史对材料力学性能的影响。分别进行了几种形式

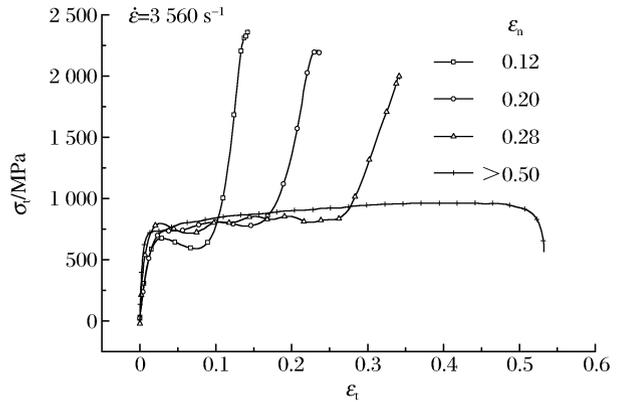


图 5 在不同的名义应变下限制变形试验中 V-5Cr-5Ti 试件的应力应变曲线

Fig. 5 True stress-true strain curves of the V-5Cr-5Ti specimens in the limited deformation test at different nominal strains

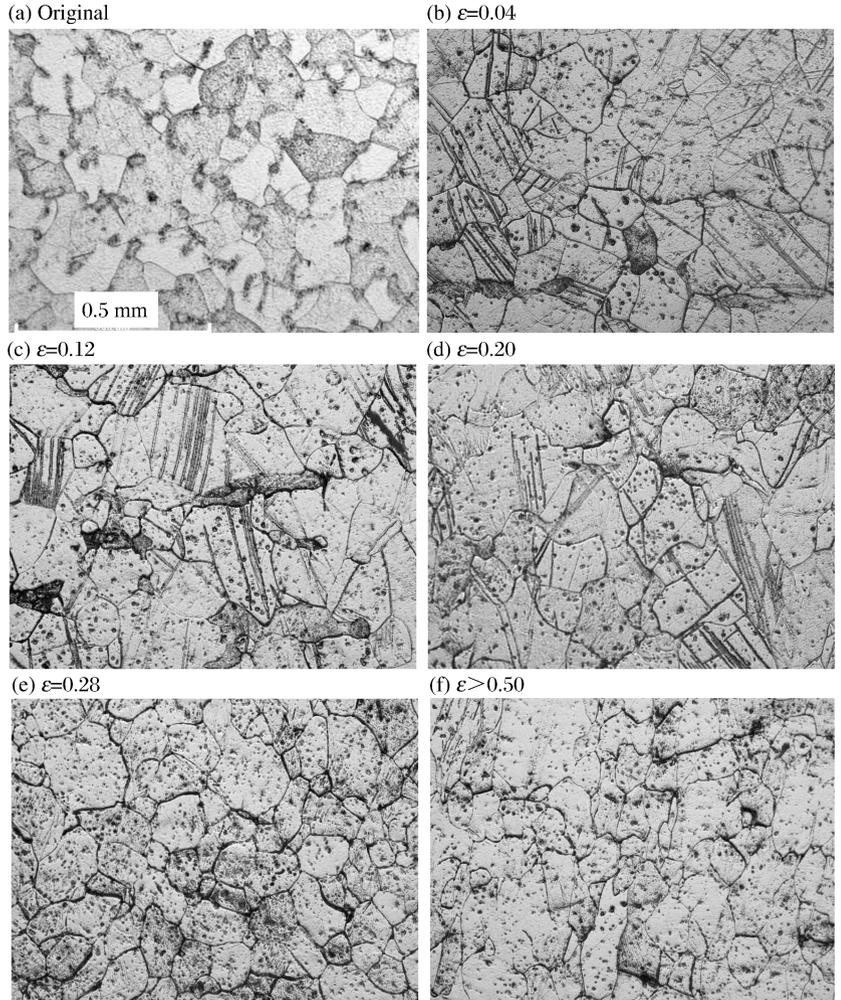


图 6 应变率为 $3\,560\text{ s}^{-1}$ 时不同应变压缩后 V-5Cr-5Ti 试件的金相形貌

Fig. 6 Metallurgical structures of the V-5Cr-5Ti specimen in the cases of different strains at the strain rate of $3\,560\text{ s}^{-1}$

的试验:1种是采用相同加载速度,控制应变,进行多次加载;另1种则是控制应变,加载速度先低后高或者先高后低。通过这几种形式,形成了不同的应变加载历史。

第1组试验针对同一试件进行了2次加载。首次加载使用了高度为4.60 mm的限位环,应变率为 $1\ 320\ \text{s}^{-1}$;第2次加载使用了高度为4.00 mm的限位环,应变率为 $1\ 860\ \text{s}^{-1}$ 。图7(a)为2次加载与应变率效应试验中单次加载的应力应变曲线对比图。当应变率从 $1\ 320\ \text{s}^{-1}$ 升至 $1\ 860\ \text{s}^{-1}$ 时,按照前面应变率效应试验所揭示的规律(见图4),应力水平应略有提高,但与以 $3\ 560\ \text{s}^{-1}$ 应变率进行的单次加载的应力水平应有较大的差距。而图7(a)显示,第2次加载应变率提高不大,其应力水平却已与 $3\ 560\ \text{s}^{-1}$ 时的单次加载相当,其增量远大于应变率效应引起的变化。

第2组试验针对同一试件进行了3次加载。首次加载使用了高度为4.60 mm的限位环,应变率为 $1\ 890\ \text{s}^{-1}$;第2次加载使用了高度为4.00 mm的限位环,应变率为 $2\ 210\ \text{s}^{-1}$;第3次加载则在无限限位环的情况下进行,应变率为 $2\ 460\ \text{s}^{-1}$ 。图7(b)为3次加载与单次加载的应力应变曲线对比图。当应变率从 $1\ 890\ \text{s}^{-1}$ 升至 $2\ 210\ \text{s}^{-1}$ 和 $2\ 460\ \text{s}^{-1}$ 时,按照应变率效应试验所揭示的规律(见图4),应力水平应有提高,与以 $3\ 560\ \text{s}^{-1}$ 应变率进行的单次加载的应力水平尚有一定的差距。但从图7(b)中可以看到,第2次加载时其应力已与 $3\ 560\ \text{s}^{-1}$ 时的单次加载相当,第3次加载时的应力水平则超过了以 $3\ 560\ \text{s}^{-1}$ 应变率进行的单次加载。

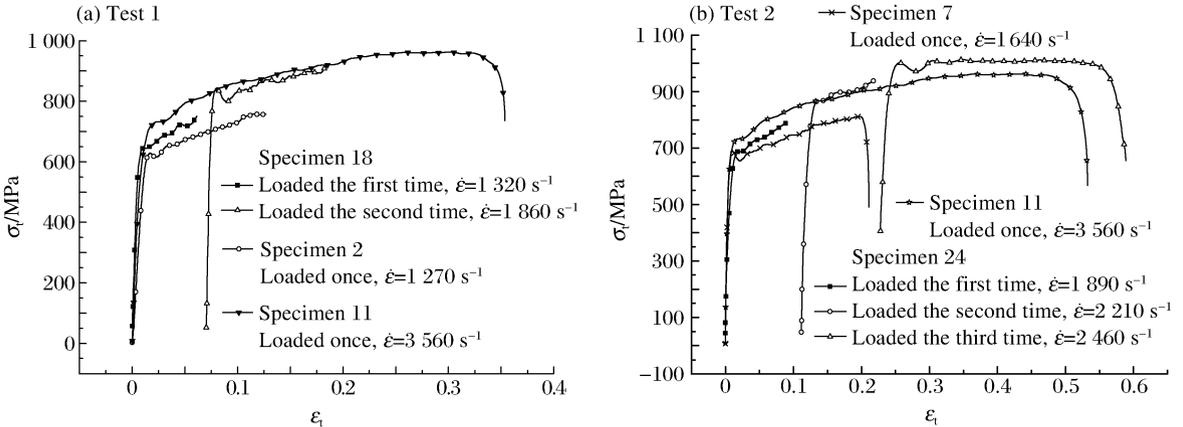


图7 不同加载次数试件的应力应变曲线比较

Fig. 7 Comparison of true stress-true strain curves of the V-5Cr-5Ti specimens loaded different times

另1组试验第2次加载的应变率从 $2\ 960\ \text{s}^{-1}$ 降到 $1\ 410\ \text{s}^{-1}$,但应力不仅没有依照应变率效应试验中揭示的规律下降,反而有较大的提高,甚至超过 $3\ 560\ \text{s}^{-1}$ 时的应力,如图8所示。

从以上现象可以看到,经过加载以后的钒合金再次加载时,其应力水平有较大的提高,甚至超过了应变率的影响,也即钒合金的应变历史对应力应变曲线产生的影响较大。试图从细观角度来寻求产生这一现象的原因,分别对原始试件、1次加载、2次加载和3次加载后的试件进行了金相显微观察,图9为各试件的金相形貌图。可以看到,各试件的金相组织均为等轴的钒基固溶体,晶粒大小没有明显的变化。也即,加载历史对钒合金细观金相形貌的影响不明显。进一步进行了透射电镜的观察,但也未获得有价值的结果。应变历史对应力应变曲线产生较大影响的原因,需作更深入的研究。

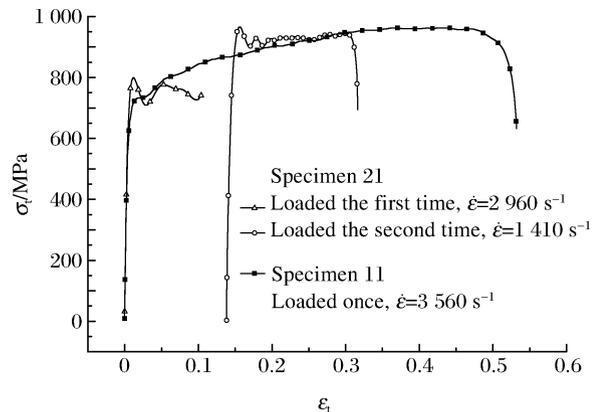


图8 应变率向下跳跃对应力应变曲线的影响

Fig. 8 Effect of strain rate jump from $2\ 960\ \text{s}^{-1}$ to $1\ 410\ \text{s}^{-1}$ on stress-strain curves

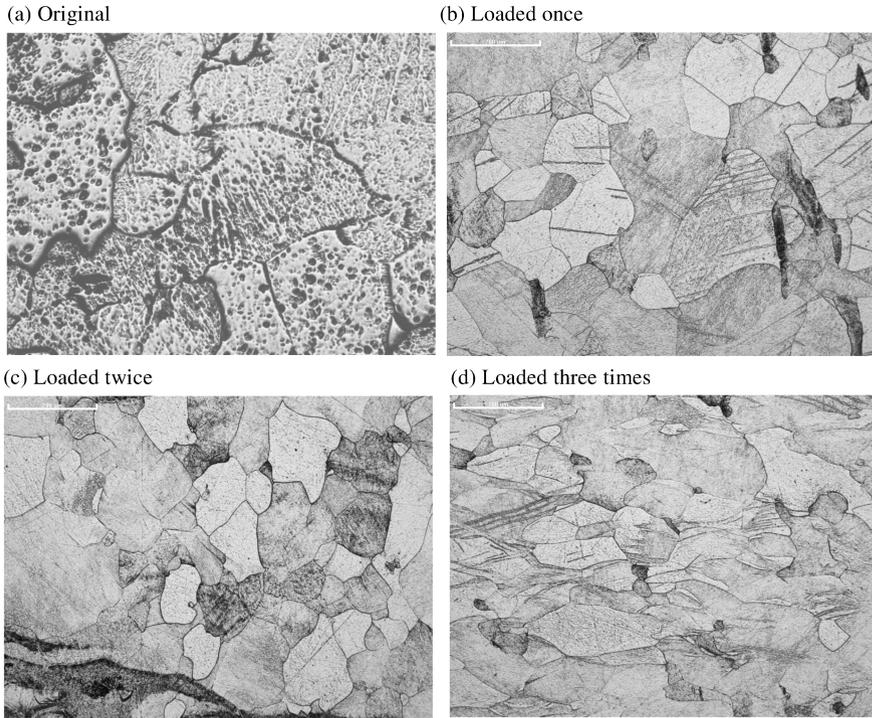


图9 经历不同加载次数的试件的金相形貌

Fig. 9 Metallurgical structures of the V-5Cr-5Ti specimens loaded different times

4 结 论

以钒合金 V-5Cr-5Ti 为研究对象,采用霍普金森压杆(SHPB)研究了材料在常温下的动态压缩力学性能,分别进行了应变率效应试验、限制应变试验和应变累积试验,给出了钒合金 V-5Cr-5Ti 的动态压缩应力应变曲线、不同应变时的金相形貌,得到以下结论:

(1) V-5Cr-5Ti 具有明显的应变率效应。应变率为 $3\ 560\ \text{s}^{-1}$ 时的流变应力比应变率 $770\ \text{s}^{-1}$ 时提高了 19%;与准静态下相比,提高了 44%。

(2) 在高应变率下,应变较小时, V-5Cr-5Ti 晶体的滑移较难进行,塑性变形以

孪生变形为主。随着应变的增大,由于孪生后变形部分的晶体位向发生改变,使原来处于不利取向的滑移系转变为新的有利取向,激发起晶体的进一步滑移,导致孪生的概率减小。

(3) 经过加载以后的钒合金再次加载时,应力水平有较大的提高,甚至超过了应变率的影响。但加载历史对钒合金细观金相形貌的影响不明显,各试件的金相组织均为等轴的钒基固溶体,晶粒大小没有明显的变化。应变历史对应力应变曲线产生较大影响的原因,需作进一步研究。

对北京有色金属研究总院崔瞬研究员提供的试验材料以及中国工程物理研究院环境试验中心国家认可实验室陈勇梅、牛伟提供的静态测试数据,谨表感谢!

参考文献:

- [1] Smith D L, Chung H M, Loomis B A, et al. Reference vanadium alloy V-4Cr-4Ti for fusion application[J]. Journal of Nuclear Materials, 1996,233-237:356-363.
- [2] Smith D L, Billone M C, Natesan K. Vanadium-base alloys for fusion first-wall/blanket applications[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2000,18:213-224.
- [3] 谌继明,杨霖,邱绍宇,等. 钒合金的高温氧化特性和氢致脆性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003,32(2):113-116. CHEN Ji-ming, YANG Lin, QIU Shao-yu, et al. Characteristics of the high-temperature oxidation and hydrogen embrittlement for vanadium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003,32(2):113-116.
- [4] 谌继明. 中子辐照对钒合金强塑性的影响及其温度效应[J]. 核聚变与等离子体物理, 2002,22(4):209-214. CHEN Ji-ming. Influence of temperature and neutron irradiation on the strength and ductility of vanadium alloys [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2002,22(4):209-214.
- [5] 谌继明. 合金元素和氢、氧对钒合金拉伸性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2002,10(4):366-370. CHEN Ji-ming. Influence of alloying elements and hydrogen and oxygen on tensile properties of vanadium alloys [J]. Materials Science & Technology, 2002,10(4):366-370.
- [6] 徐颖,谌继明,邓颖. 含氢 V4Cr4Ti 合金的力学性能和断裂特征[J]. 理化检验:物理分册, 2002,38(9):369-373.

- XU Ying, CHEN Ji-ming, DENG Ying. Mechanical properties and fracture features of a hydrogen bearing V4Cr4Ti alloy[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2002,38(9):369-373.
- [7] Aglan H A, Gan Y X, Chin B A, et al. Effect of composition on the fatigue failure behavior of vanadium alloys[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000,278(2-3):186-194.
- [8] Rowcliffe A F, Zinkle S J, Hoelzer D T. Effect of strain rate on the tensile properties of unirradiated and irradiated V-4Cr-4Ti[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000,283-287:508-512.
- [9] Nemat-Nasser S, Guo W G. High strain rate response of commercially pure vanadium[J]. *Mechanics of Materials*, 2000,32:243-260.
- [10] 郭伟国. BCC 金属的塑性流动行为及其本构关系研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [11] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2009:165-173.

Dynamic compressive mechanical properties of V-5Cr-5Ti at room temperature*

XIE Ruo-ze¹, HU Wen-jun¹, CHEN Cheng-jun¹, PAN Xiao-xia¹,
HE Peng¹, ZHANG Fang-ju¹, CHEN Jie²

(1. *Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics,*
Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. *School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology,*
Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Strain rate effect tests, limited strain tests and cumulated strain tests were conducted on a vanadium-based alloy (V-5Cr-5Ti) respectively by using a split-Hopkinson pressure bar (SHPB) system at room temperature. The effects of strain rate and strain cumulating on the dynamic compressive mechanical properties of V-5Cr-5Ti were analyzed. The microstructures of the specimens before and after dynamic compression were investigated by applying an optical microscope. The experimental results show that the dynamic properties of V-5Cr-5Ti exhibit obvious sensitivity to the strain rates and the strain history, and the effect of strain history is more obvious. For specimens at high strain rates, the twins appear when the strain is smaller than 0.20, and the twins decrease while the strain is larger than 0.20.

Key words: solid mechanics; mechanical properties; dynamic compression; V-5Cr-5Ti; SHPB

* Received 26 October 2009; Revised 13 March 2010

Corresponding author: XIE Ruo-ze, xierz@caep.ac.cn