

文章编号:1001-4888(2008)04-0311-06

多晶纯钛在高应变率不同温度下 的拉伸力学行为实验研究^{*}

段中林, 王宇, 汪洋

(中国科学技术大学近代力学系, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 利用 MTS809 和自行研制的旋转盘冲击拉伸试验机, 对多晶纯钛进行了应变率为 0.001s^{-1} 和 300s^{-1} 、温度为 298K 至 973K 的拉伸试验和应变率为 300s^{-1} 不同温度下的冲击拉伸复元试验, 得到了多晶纯钛的拉伸应力应变曲线和高应变率等温应力应变曲线。试验结果表明, 多晶纯钛的拉伸力学行为具有应变率和温度相关性。采用修正的 Johnson-Cook 模型进行数值拟合, 结果表明, 该本构模型能较好地表征多晶纯钛在试验应变率和温度范围内的拉伸力学行为。

关键词: 多晶纯钛; 应变率; 高温; 本构模型

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A

0 引言

钛及其合金具有密度小、比强度高等优点, 被广泛应用于航空、航天、军事和汽车等领域。随着其应用日益深入, 人们对纯钛动态力学行为和变形机制的研究也越来越重视, 但目前这方面的研究主要集中在压缩变形行为上^[1,2], 在拉伸方面的工作开展的并不多。

目前关于纯钛动态拉伸力学行为的研究工作主要有: J. Harding^[3]对 α 钛进行了温度为 77~298K、应变率为 $10^{-3} \sim 2.5 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 范围内的拉伸试验; Wen Huang^[4]等在温度为 298~973K、应变率为 $10^{-3} \sim 1400 \text{s}^{-1}$ 范围内进行了多晶纯钛的拉伸试验。试验结果表明: 纯钛的拉伸力学性能具有应变率和温度相关性; 其拉伸力学行为表现出明显的应变硬化效应、应变率强化效应和温度软化效应; 拉伸变形过程中伴随着孪生机制, 且孪晶密度随应变率的升高而增大, 随温度的升高而减小。因应变率相关性是对比准静态和动态试验结果而得, 但准静态过程被看作是等温过程, 而动态试验过程是一个热力耦合过程, 所以有必要对动态条件下的试验结果进行热力解耦以得到高应变率下的等温应力应变曲线。

本文对多晶纯钛不同温度下的准静态和动态拉伸力学行为进行实验研究, 并采用冲击拉伸复元试验技术获得多晶纯钛在高应变率下的等温应力应变曲线, 最后用一个粘塑性本构模型来表征多晶纯钛的拉伸力学行为。

1 试验

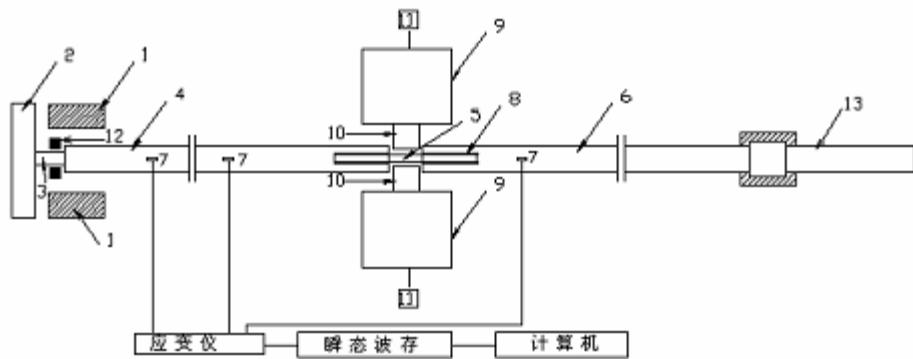
试验采用自行研制的旋转盘式间接杆杆型冲击拉伸试验机, 试验原理和装置示意图详见文献[5]。在原有试验装置基础上添加吸波器就得到了所谓的加卸载试验装置, 吸波器的作用是吸收杆中的二次

* 收稿日期: 2008-05-14; 修订日期: 2008-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10472110)

通讯作者: 王宇(1976—), 男, 副教授。研究方向: 固体力学。E-mail: wyu@ustc.edu.cn

加载波,保证在第一个拉伸脉冲产生之后反射的二次加载波幅值足够小,不至于引起试件的二次塑性变形。基于该加卸载试验装置,并结合快速接触加温技术^[6],便可以实现不同温度下的加卸载试验(图1所示)。通过控制入射脉冲宽度对同一个试件连续地进行多次加卸载试验,就可以得到不同应变区间的加卸载应力应变曲线,从而实现不同温度下的冲击拉伸复元试验。试件形状为扁平状哑铃形,厚度1.2mm,尺寸见图2。



1. 锤头; 2. 撞块; 3. 前置金属短杆; 4. 入射杆; 5. 试件; 6. 透射杆; 7. 半导体应变片; 8. 耐高温抗冲击无机胶;
9. 高温炉; 10. 加热芯轴; 11. 温控系统; 12. 入射波吸波器; 13. 透射波吸波器

图1 加卸载试验装置

Fig. 1 The loading-unloading apparatus

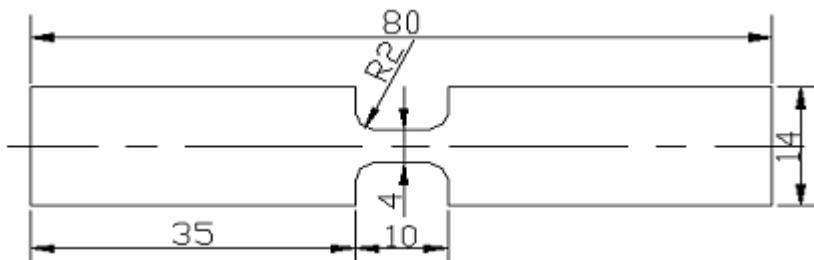


图2 试件形状和尺寸

Fig. 2 Specimen geometry

试件材料为西北有色金属研究所提供的轧制多晶纯钛板,其成分如表1所示。在加工试样之前将热轧钛板在977K下真空退火2小时,然后在真空环境中冷却至室温。本文利用MTS809材料试验机和自行研制的旋转盘式间接杆型冲击拉伸试验装置对多晶纯钛进行了应变率为0.001 s⁻¹和300 s⁻¹,温度为298K~973K下的单向拉伸试验以及应变率为300 s⁻¹,温度为298K~973K下的拉伸复元试验。

表1 试验材料的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of tested material

成分	Fe	C	N	H	O	Si	Ti
质量含量	0.12%	0.04%	0.02%	0.007%	0.07%	<0.04%	其余

2 试验结果与分析

图3为应变率0.001 s⁻¹和300 s⁻¹不同温度下的真应力真应变曲线;图4为不同应变率下多晶纯钛的屈服应力 σ_s 和极限强度 σ_b 随温度的变化(对无明显屈服点的取 $\sigma_s=\sigma_{0.2}$,有明显屈服点的取下屈服应力为 σ_s)。从图3可以看出,纯钛在准静态加载条件下断裂应变随温度呈现先增大后减小再增大的趋势,且在773K时呈现极小值,对试样断口进行观察发现呈深蓝色,这与文献[4]中提到的“蓝脆”现象相一致。另外还可以看出除973K下由蠕变效应引起流动应力下降外,纯钛的流动应力随应变的增加而

增大,表现出明显的应变硬化效应;同一温度下随应变率升高,流动应力增加,表现出应变率强化效应;同一应变率下随温度的升高,流动应力下降,表现出温度软化效应。从图4中也可以看出屈服应力 σ_s 和极限强度 σ_b 随应变率的升高而增大,但随温度的升高而减小。

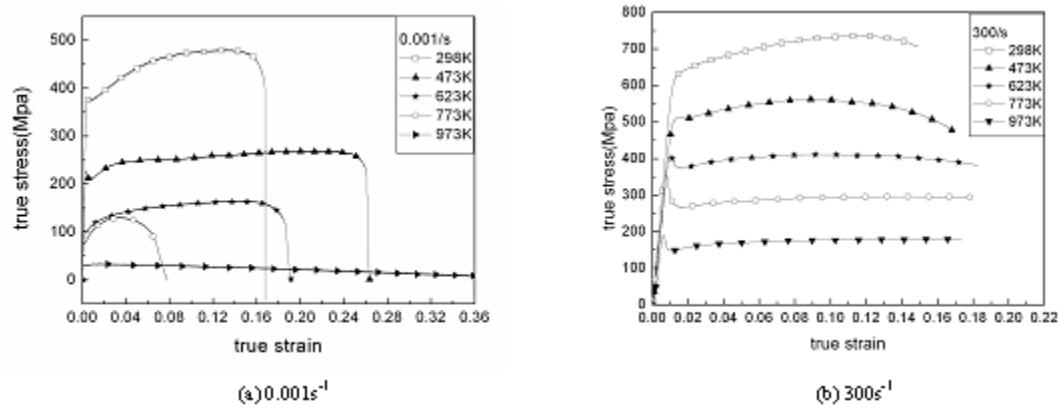


图3 不同应变率和温度下的拉伸应力应变曲线

Fig. 3 The tensile stress-strain curves at different strain rates and temperatures

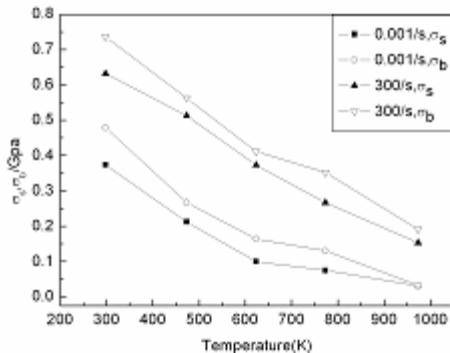


图4 σ_s 和 σ_b 随温度的变化

Fig. 4 Temperature dependence of σ_s and σ_b

材料在弹性变形阶段外界所作的功都转化成弹性能,不存在绝热温升,依次连接图5中各次加卸载曲线的屈服应力 σ_s 所得到的包络线可以认为是动态加载条件下的等温应力应变曲线。从图5中可以看出,热力解耦得到的试验环境温度为298K~773K的等温应力应变曲线均高于绝热曲线,但973K下的等温应力应变曲线出现反常。通过对不同温度下拉伸复元试验的试样断口进行能谱分析发现,973K下试样中的氧含量明显比其他温度高很多,这表明复元试验过程中材料已经出现了氧化,从而引起了后续加卸载过程中材料强度的下降。这与文献[7]中提到氧含量的增加会引起纯钛强度下降的结论是一致的。

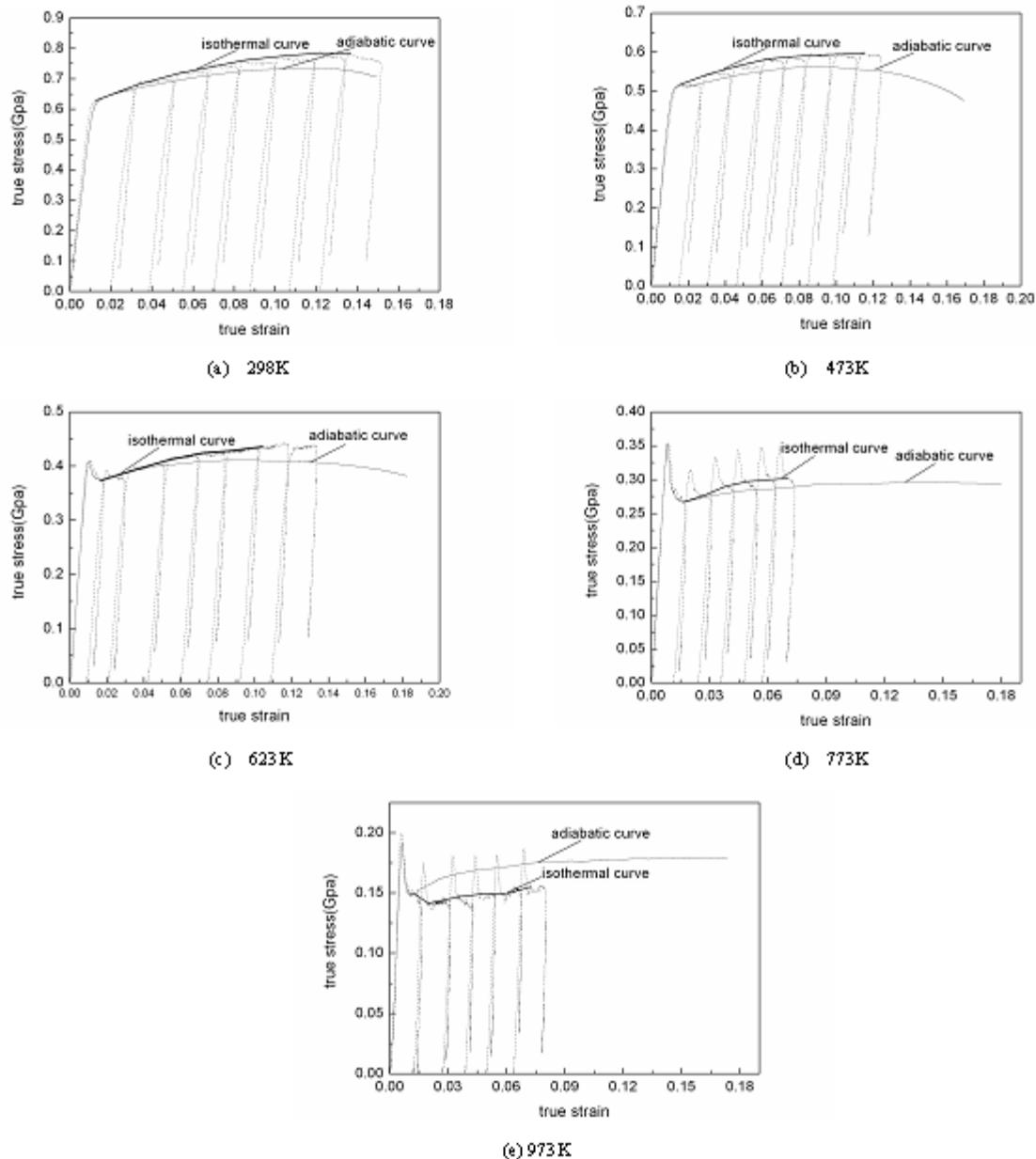
3 拉伸力学行为的表征

上述试验结果表明,多晶纯钛的拉伸力学行为存在应变硬化效应、应变率强化效应和温度软化效应。由于Johnson-Cook模型可以较好地表征同时存在上述三种效应的应力应变关系,故采用文献[8]中基于Johnson-Cook模型的修正模型来表征多晶纯钛的拉伸力学行为。

该模型为:

$$\sigma = (\sigma_0 + B\dot{\epsilon}_p^n)(1 + C \lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) e^{-\lambda(T - T_r)} \quad (1)$$

式中, σ 为流动应力; σ_0 为初始屈服应力; B 为应变硬化系数; n 为应变硬化因子; $\dot{\epsilon}_p$ 为塑性应变; C 为应变率强化系数; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; T 为材料温度; T_r 为参考温度; λ 为温度软化系数。式(1)中第一项表征应变硬化效应,第二项表征应变率强化效应,第三项表征温度软化效应。

图 5 300 s^{-1} 应变率不同温度下的等温应力应变曲线Fig. 5 Isothermal stress-strain curves at a strain rate of 300s^{-1} and different temperatures

3.1 材料温度 T 的确定

所谓材料温度就是材料在变形过程中的实时温度。由于准静态过程可以看作是等温过程,其材料温度就等于环境温度;而动态过程近似可看作是绝热过程,必须考虑绝热温升的影响。本文采用文献[9]中的方法,考虑塑性功转化系数为 0.9 拟合得到绝热温升与塑性应变的一个线性关系,材料温度等于环境温度加上绝热温升 ΔT ,从而建立了动态加载条件下材料温度与塑性应变的一一对应关系。

3.2 σ_0 、 λ 和 C 的初值的确定

取参考应变率 $\dot{\epsilon}_0 = 0.001\text{s}^{-1}$,参考温度 $T_r = 298\text{K}$ 。对于准静态过程,由于可以看作等温过程,不存在绝热温升。则(1)式可以变为:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\lambda(T-T_r)} \quad (2)$$

两边取自然对数得:

$$\ln \sigma = -\lambda(T - T_r) + \ln \sigma_0 \quad (3)$$

拟合准静态不同温度下的屈服应力得: $\sigma_0 = 0.374\text{GPa}$, $\lambda = 0.0036$ 。

再对动态加载条件下屈服应力随温度的变化予以考虑:

$$\sigma = \sigma_0 (1 + C \lg \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) e^{-\lambda(T-T_r)} \quad (4)$$

联立(2)式和(4)式,即可通过准静态和动态下的屈服应力确定C的初值为0.126。

3.3 B 和 n 初值的确定

考虑参考温度、参考应变率下的应力应变关系,(1)式可以简化为:

$$\sigma = 0.374 + B \dot{\epsilon}_p^n \quad (5)$$

两边取自然对数得:

$$\ln(\sigma - 0.374) = \ln B + n \ln \dot{\epsilon}_p \quad (6)$$

对准静态常温下的试验曲线进行拟合可得: B=0.40, n=0.59。

把上述各个参数的初值作为拟合的起始值,对各种工况下的应力应变曲线进行迭代拟合,得到最终参数值为: $\sigma_0=0.338$, $B=0.25$, $n=0.40$, $C=0.18$, $\lambda=0.0025$ 。

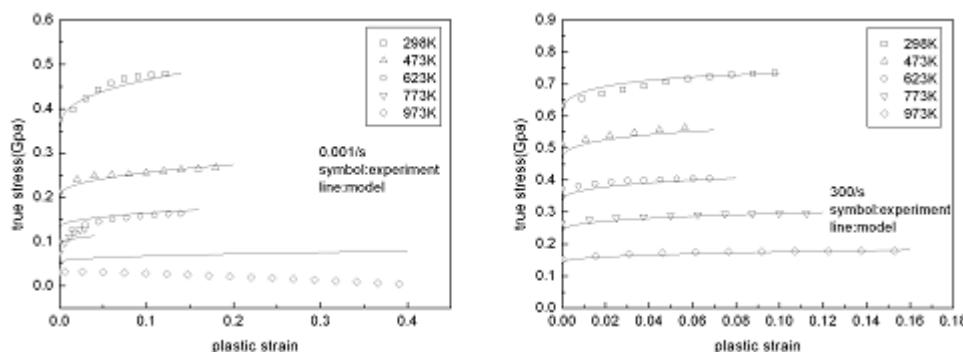


图6 拟合曲线与试验曲线的比较

Fig. 6 Comparison of model curves and experimental curves

图6为两种应变率不同温度下的单调拉伸试验结果和模型拟合的比较,可以看出,除准静态773K材料出现“蓝脆”现象和973K发生蠕变外,其他工况均拟合较好。表明该模型较好地表征了多晶纯钛在试验应变率和温度范围内的拉伸力学行为。

4 结论

本文通过对多晶纯钛开展的一系列试验研究可以得出以下结论:

- (1) 多晶纯钛拉伸力学行为在试验应变率和温度范围内具有明显的应变硬化效应、应变率强化效应和温度软化效应。
- (2) 高应变率试验过程可以近似为一个绝热过程,区别于低应变率试验。通过冲击拉伸复元试验获得了多晶纯钛不同温度下的高应变率等温应力应变曲线,实现了应变硬化效应与绝热温升软化效应的解耦。
- (3) 本文采用修正的Johnson-Cook模型对纯钛的应力应变曲线进行数值拟合,结果表明,该模型能较好地表征多晶纯钛在试验应变率和温度范围内的拉伸力学行为。

致谢:感谢西北有色金属研究所为本文提供了试验材料。

参考文献:

- [1] Nemat-Nasser S, Guo W G, Cheng J Y. Mechanical properties and deformation mechanisms of a commercially pure titanium[J]. Acta Materialia, 1999, 47:3705–3720.
- [2] Chichili D R, Ramesh K T, Hemker K J. The High-strain-rate response of alpha-titanium: experiments, deformation mechanisms and modeling[J]. Acta Metall, 1998, 46(3):1025–1043.
- [3] Harding J. The temperature and strain rate sensitivity of α -titanium[J]. Arch Mech, 1975, 27:715–732.
- [4] Huang Wen, Xia Yuan-ming. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperature [J]. Material Science and Engineering, 2006, A443:33–41.

- [5] 黄文, 周元鑫, 马钢, 夏源明. 工业纯铝 L2 应变率相关的拉伸力学性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(3): 263—267 (HUANG Wen, ZHOU Yuanxin, MA Gang, XIA Yuanming. An experimental study on strain rate-dependent tensile properties of alumiunium L2. Materials Science and Technology, 2002, 10 (3): 263 — 267 (in Chinese))
- [6] 眭祥, 陈晓宏, 黄文, 夏源明. 高温冲击拉伸试验中的快速接触加温技术[J]. 实验力学, 2005, 20(3): 321—327 (ZAN Xiang, CHEN Xiaohong, HUANG Wen, XIA Yuanming. Rapid-contact Heating Technique in Tensile Impacts at Elevated Temperatures. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3):321—327(in Chinese))
- [7] 鲍利索娃 E A 等著. 钛合金金相学[M]. 国防工业出版社, 1980 (Борисова Е А. Metallography of titanium alloys. Beijing: National Defence Industry Press, 1980 (in Chinese))
- [8] Meyers M A, Chen Y J, Mariquis F D S, Kim D S. High-strain, high-strain-rate behavior of tantalum[J]. Metall. Mater Trans, 1995, 26A: 2493—2501.
- [9] 宫旭辉, 黄胜, 汪洋, 夏源明. 多晶纯钛中应变率拉伸力学行为实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37 (10):1220—1224 (GONG Xu-hui, HUANG Sheng, WANG Yang, XIA Yuan-ming. Experimental study of tensile property of cp-Ti at intermediate strain rates. Journal of University of Science and Technology of China, 2007,37 (10),1220—1224(in Chinese))

Experimental Study on Tensile Properties of CP-Ti at High Strain Rate and Different Temperatures

DUAN Zhong-lin, WANG Yu, WANG Yang

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of ChinaKey Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials CASHe fei, Anhui 230027, China)

Abstract: Quasi-static and dynamic monotonic tensile experiments and loading-unloading tests were performed on MTS809 testing machine and self-designed rotating disk impact apparatus, respectively. Tensile stress-strain curves at strain rates of 0.001 s^{-1} and 300 s^{-1} , and isothermal stress-strain curves at a strain rate of 300 s^{-1} were obtained within a wide temperature range from 298K to 973K. Experimental results indicate that the tensile properties of CP-Ti are dependent on strain rate and temperature. A modified constitutive model based on Johnson-Cook model was used to describe the tensile behavior of CP-Ti. The simulation results are in good agreement with the experimental ones.

Keywords: CP-titanium; strain rate; high temperature; constitutive model