

## 温度和应变率对多晶纯钛孪晶变形的影响

黄文<sup>1,2,3</sup>, 汪洋<sup>1,2</sup>, 李子然<sup>1,2</sup>, 夏源明<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 合肥 230027;
2. 中国科学院 中国科学技术大学 材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027;
3. 深圳大学 土木工程学院, 深圳 518060)

**摘要:** 在自行研制的杆杆型高温冲击拉伸实验装置上对多晶纯钛在不同温度(298~973 K)、高应变率(3 00 和 1 400 /s)下的拉伸力学行为进行研究, 并通过与准静态下(0.001 和 0.01 /s)的实验结果相比较, 揭示纯钛中孪晶变形在拉伸载荷下与温度和应变率的相关性。结果表明, 孪晶变形与温度和应变率有着明显的相关性, 其密度随着应变率的增加而增大, 随着温度的升高而锐减。基于上述实验结果, 考虑位错运动和孪晶变形对纯钛塑性变形的影响, 建立纯钛温度和应变率相关的宏观本构模型。数据拟合结果表明, 该本构模型能够很好地描述纯钛的温度和应变率相关的拉伸力学行为。

**关键词:** 纯钛; 孪晶变形; 动态拉伸; 高温

中图分类号: TB 31 文献标识码: A

## Influences of temperature and strain rate on deformation twinning of polycrystalline titanium

HUANG Wen<sup>1,2,3</sup>, WANG Yang<sup>1,2</sup>, LI Zi-ran<sup>1,2</sup>, XIA Yuan-ming<sup>1,2</sup>

- (1. Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230027, China;
3. College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The influences of temperature and strain rate on the deformation twinning of polycrystalline titanium were studied by tensile experiments in a temperature range of 298–973 K and a strain rate range of 0.001–1 400 /s. The tests at elevated temperatures and high strain rates were carried out using a modified split Hopkinson tension bar apparatus. The experimental results show that deformation twinning is dependent on both temperature and strain rate. The density of deformation twinning increases with increasing test strain rate. However, it decreases with increasing test temperature. A constitutive model based on the dislocation kinetics and twinning effect was used to describe the stress-strain relationship of commercially pure titanium (CP-Ti) at the investigated temperatures and strain rates. The simulated results show that the model can well describe the stress-strain relationship of CP-Ti in tensile deformation.

**Key words:** polycrystalline titanium; deformation twinning; dynamic tension; elevated temperature

钛在 882 K 以下具有密排六方(hcp)的晶体结构, 六方晶体在晶体学上具有较低的对称性, 因此具有比较复杂的变形模式。对于单晶纯钛和具有粗晶粒的多

晶纯钛滑移系统的研究表明, 在纯钛变形中一般可以观察到的滑移模式有: 3 个对等的底面滑移系  $\{0001\} \langle 11 \bar{2} 0 \rangle$ , 3 个对等的棱柱形滑移系  $\{10 \bar{1} 0\} \langle 11 \bar{2} 0 \rangle$  以

及6个对等的锥形滑移系 $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 。上述12个滑移系的滑移方向都在(0001)面内,不能提供垂直于该平面方向的变形,所以这12个滑移系实际上只有4个独立的变形模式<sup>[1]</sup>。对于晶体材料,如果要维持连续变形,则必须要5个独立的变形模式,因此除了上述滑移系之外,还必须存在其他变形模式以协调纯钛的变形。其中孪晶变形是一种非常重要的变形模式<sup>[2]</sup>,在纯钛中主要的孪晶变形模式为 $\{10\bar{1}2\}\langle \bar{1}011\rangle$ 和 $\{11\bar{2}2\}\langle 11\bar{2}\bar{3}\rangle$ 。

目前已经发现孪晶变形与应变率具有明显的相关性<sup>[2-3]</sup>,但对于此种力学行为及其机理的研究还很不充分。由于实验技术的限制,已有的研究主要集中在对准静态不同温度下孪晶变形的影响上<sup>[4-5]</sup>,对动态条件下孪晶变形影响的研究则相对较少。另外,在少量关于应变率相关性能的研究中,几乎所有的研究都是针对其压缩性能进行的<sup>[2-3,6]</sup>,对于拉伸性能尤其是高温动态拉伸性能的研究则鲜有报道<sup>[7]</sup>。然而,已有的研究显示孪晶变形存在明显的拉压不对称性,例如,在纯钛中平行于晶粒底面的拉伸和压缩载荷会分别激发不同的孪晶<sup>[8]</sup>,而这种不对称性对于了解材料的力学性能至关重要。

关于孪晶变形对塑性变形的影响也缺乏有效的本构描述,现有很多文献都认为孪生是纯钛塑性变形的一个重要机制,但关于孪晶对流动应力的影响至今仍然没有统一的认识,对整个塑性变形过程中滑移机制和孪生机制的相互作用与竞争的研究还有待深化。

为此,本文作者试图通过分析不同温度和应变率下纯钛拉伸的实验结果,研究孪晶变形在拉伸载荷下与温度和应变率的相关性。在此基础上,在以位错运动为变形机理的本构模型上,加入孪晶变形对流动应力的影响,建立一个同时考虑位错运动和孪晶变形的本构模型。

## 1 实验结果与分析

试件所用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所列。对多晶纯钛进行了不同温度(298~973 K)的动态(应变率为300和1400 /s)和准静态(应变率为0.001和0.01 /s)拉伸实验。动态实验在自行研制的旋转盘式杆杆型高温冲击拉伸实验系统上进行<sup>[9-11]</sup>,准静态实验在MTS809实验机上进行。试件的形状和几何尺寸如图1所示。纯钛在不同温度和应变率下的真应力—真应变实验曲线如图2所示。

表1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of CP-Ti(mass fraction, %)

Fe	C	N	H	O	Si	Ti
0.12	0.04	0.02	0.007	0.07	< 0.04	Bal

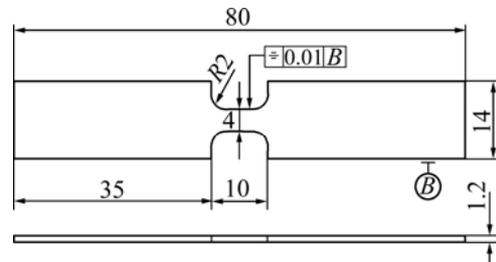


图1 拉伸试件几何尺寸

Fig.1 Specimen dimension of tensile sample

由图2可见,随着温度增加,纯钛的流动应力迅速下降;而应变硬化率除了在准静态较高温度( $\dot{\epsilon}=10^{-3}$  /s,  $T>873$  K)和 $\dot{\epsilon}=10^{-2}$  /s,  $T>973$  K)和动态常温两种情况外基本保持不变。RAMESH等<sup>[6]</sup>对钛的高温高应变率压缩实验的结果表明,其流动应力和应变硬化率都随温度的增加而持续下降。他们认为这种力学行为是HCP结构的金属材料区别于BCC和FCC金属材料的特征之一,并认为孪晶对此行为起了很重要的作用。由于孪晶对于拉伸和压缩载荷的响应是不同的,拉压下应变硬化率的温度敏感性的差异很可能是由孪晶的拉-压不对称性所造成的。

为了探索孪晶对纯钛拉伸行为的影响,对试件的断口沿拉伸方向进行金相观察,图3所示为应变率为0.01和1400 /s时不同温度下的观察结果。在常温时不论在动态或准静态下都出现了大量的孪晶,且孪晶的密度随着应变率的增加而增大。随着温度升高孪晶的密度锐减,至423 K时应变率为1400 /s的试样上只有小部分晶粒种出现孪晶,而应变率为0.01 /s的试样上仅有很少量的晶粒中出现孪晶。当温度高于523 K时,应变率为1400 /s的试样上仅剩很少量的孪晶,而应变率为0.01 /s的试样上基本看不到孪晶。虽然本研究中拉伸试样的孪晶密度随温度升高和应变率减小而减小,其趋势和NEMAT-NASSER等<sup>[3]</sup>的压缩实验结果基本一致,但是在他们的压缩实验中,孪晶在各个实验温度(77~1000 K)下都可以看到。对比本研究的结果,可以认为压缩载荷和拉伸载荷相比可能更有利于孪晶的出现。

当材料变形出现孪晶时,晶格的取向产生变化,这会使得原来处于不利取向的滑移系得以启动,从而

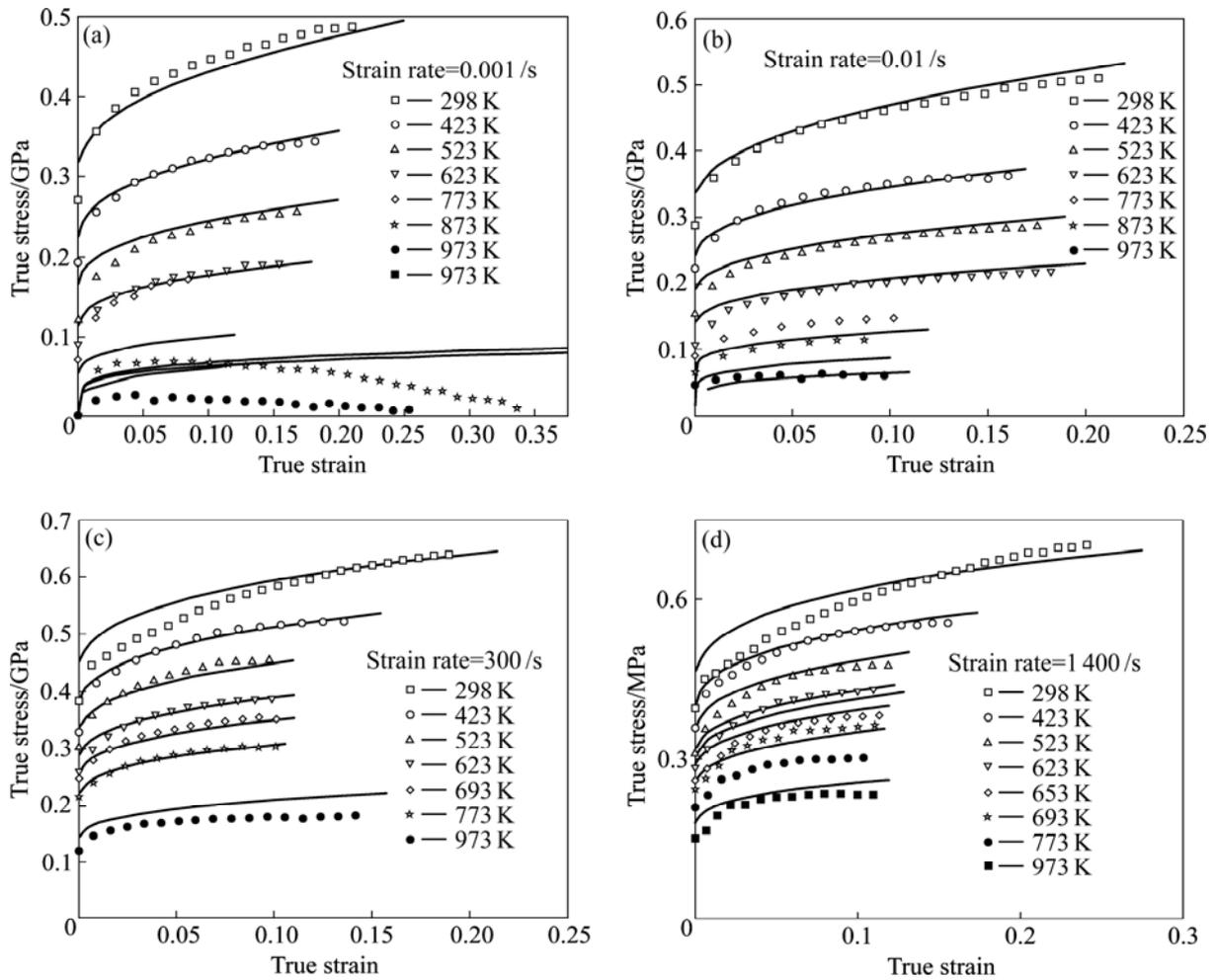


图2 不同温度和应变率下多晶纯钛的应力—应变曲线

Fig.2 True stress—true strain curves of poly-crystal titanium at various temperatures and strain rates (Solid lines are simulated results based on model in section 3.1)

降低了位错滑移的阻力，同时孪晶引起的剪切应变可能会导致硬化率的减小<sup>[12]</sup>，即孪晶对材料变形存在软化效应；另一方面，孪晶同时会细分晶粒而使位错滑移的有效距离减小，从而提高塑性流动的硬化率<sup>[13]</sup>，即孪晶对材料变形同时也存在硬化效应。比较图2中高应变率下298 K和423 K的应力—应变曲线可以看到，298 K时的屈服强度和423 K时的屈服强度差别较小，而随着应变的增加，两个温度的流动应力的差值明显增大。结合图3中常温 and 高温下孪晶密度的差异，可以认为在动态条件下小应变时(孪晶密度较小)孪晶的影响主要表现为软化效应，而在较大应变时(孪晶密度较大)孪晶的影响主要表现为硬化效应，从GRAY等<sup>[13]</sup>的动态压缩实验中也可以观察到类似的现象。必须指出，在准静态时没有观察到上述的硬化率的变化现象，这可能由于孪晶变形在动静态下的演化规律不同所致，具体原因有待进一步研究。

## 2 本构模型

### 2.1 考虑位错运动的本构

基于位错动力学的原理并结合拉伸实验结果，本研究采用一个以位错热激活运动为主导机制的塑性本构模型来描述纯钛在不同应变率和温度下的拉伸力学行为<sup>[14]</sup>。

$$\tau_d(\dot{\gamma}, \gamma, T) =$$

$$\begin{cases} \tau_0 \dot{\gamma}^n + \tau^0 \left[ \left( 1 - \frac{kT}{G_0} \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_r} + \ln f(\gamma, T)^{1/q} \right) \right]^{1/p} f(\gamma, T) & (T < T_c) \\ \tau_0 \dot{\gamma}^n & (T > T_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\tau_d$ 、 $\gamma$ 、 $\dot{\gamma}$  为流动应力、应变和应变率。流动应力由与热激活无关的应力  $\tau_0 \dot{\gamma}^n$  和与热激活相关的应

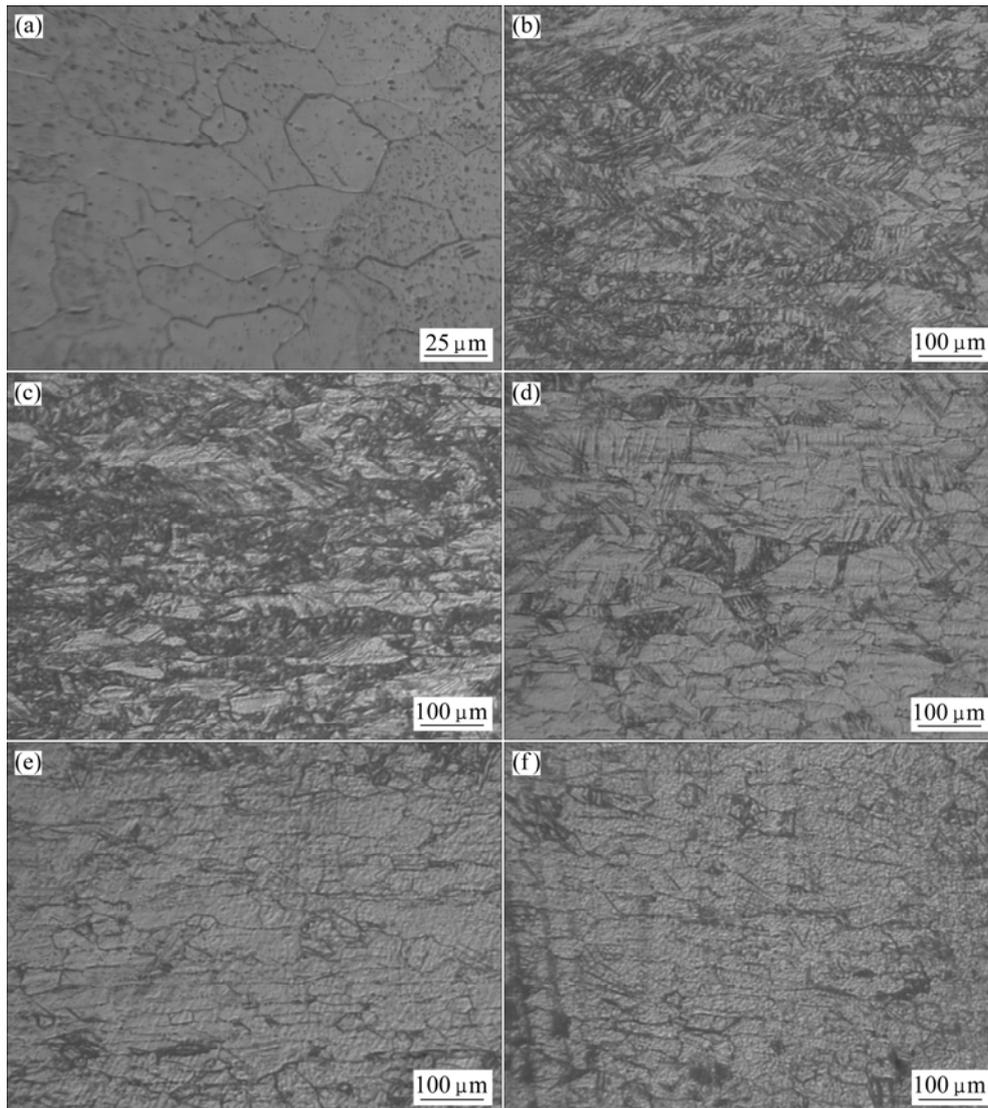


图 3 试件断口在不同温度和应变率下的显微组织

Fig.3 Microstructures of fracture surface at various temperatures and strain rates: (a) undeformed; (b) 1 400 s<sup>-1</sup>, 298 K; (c) 0.01 s<sup>-1</sup>, 298 K; (d) 1 400 s<sup>-1</sup>, 423 K; (e) 0.01 s<sup>-1</sup>, 423 K; (f) 1 400 s<sup>-1</sup>, 523 K

$$\text{力 } \tau^0 \left[ 1 - \left( -\frac{kT}{G_0} \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_r} + \ln f(\gamma, T)^{1/q} \right) \right]^{1/p} f(\gamma, T) \text{ 两 部}$$

分组成,  $T_c$ 为临界温度;当温度高于 $T_c$ 时,只有与热激活无关的应力对流动应力产生贡献。 $f(\gamma, T)$ 用以描述位错增殖/湮灭和温度变化对热激活相关应力的影响。 $\tau_0$ 、 $n$ 、 $p$ 、 $q$ 、 $\tau^0$ 、 $k/G_0$ 和 $\alpha_0$ 为材料参数,取值如表 2 所列,具体取值过程可参见文献[14]。

采用上述模型得到的拟合曲线如图 2 所示,可以看到在大部分情况下拟合曲线和实验结果吻合很好,但在以下几种情况拟合结果较差:1) 孪晶的影响显著的情况,如( $\dot{\epsilon}=300$  /s,  $T=298$  K和 $\dot{\epsilon}=1\ 400$  /s,  $T=298$  K)。2) 动态应变时效<sup>[12]</sup>对流动应力有较大影响时,如

( $\dot{\epsilon}=10^{-3}$  /s,  $T=773$  K)、( $\dot{\epsilon}=10^{-2}$  /s,  $T=773-873$  K)和( $\dot{\epsilon}=1\ 400$  /s,  $T=653-773$  K)。3) 松弛效应很明显(如( $\dot{\epsilon}=10^{-3}$  /s,  $T=973$  K),此时拟合曲线的硬化率明显高于实验曲线。通过加卸载实验可以剔除这种松弛效应的影响,如图 2 所示,具体方法可参见文献[14]。

表 2 本构方程各参数的值

Table 2 Parameters in constitutive model

$\tau_0$ /GPa	$n$	$p$	$q$	$\alpha_0$
0.094 65	0.171 2	2/3	1	1
$\tau^0$ /GPa			$(k/G_0)/10^{-5}s^{-1}$	
0.51(quasi-static)			4.22(quasi-static)	
0.58(dynamic)			4.8(dynamic)	

### 2.2 考虑孪晶影响的修正

为了更好的描述纯钛在高应变率下的力学行为，本节拟考虑孪晶的影响，对本文 3.1 节中的本构方程进行修正。

由本文第 2 节的讨论可以知道，孪晶变形对流动应力既存在软化机制，又存在硬化机制，在小变形阶段主要表现为软化作用，而随着变形增大硬化作用逐渐明显。由于在变形过程中孪晶的硬化作用主要是通过细化晶粒来实现的，因此可以将孪晶变形硬化作用的影响写为<sup>[13]</sup>

$$\Delta\tau_1 = kd^{-1/2} \tag{2}$$

式中  $k$  为常数， $d$  为晶粒的平均直径。假设孪晶的密度为  $\rho_T$ ，且一个晶粒中没有孪晶交叉，则晶粒被孪晶细分后的个数  $N$  和孪晶的密度  $\rho_T$  成正比，由此可以得到  $d \propto \rho_T^{-1/2}$ 。孪晶密度随着应变的增大而增加，RAMESH 等<sup>[2]</sup>的实验显示孪晶密度和应变成幂次关系，也即  $\rho_T \propto \gamma^m$ ，因此孪晶硬化效应最终可以写为  $\Delta\tau_1 = k\gamma^m$ 。

对于孪晶的软化效应，由于孪晶改变晶格取向后导致某些不可动的滑移系变成可动，相当于在原来的

取向向下减小了滑移系的启动应力，所以本研究将孪晶的软化效应写成

$$\Delta\tau_1 = -\tau_s \tag{3}$$

式中  $\tau_s$  为一个常数。

如果唯象地引入  $\ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)\exp(1-(T/T_0)^2)$  描述孪晶影响的应变率和温度相关性，则修正后的本构方程可以写成

$$\tau = \tau_d(\gamma, T, \dot{\gamma}) + (-\tau_s + k\gamma^m)\ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)\exp(1-(T/T_0)^2) \tag{4}$$

通过 298 K 下应变率为 1 400 /s 的曲线可以求出孪晶影响中的 3 个参数  $\tau_s$ 、 $k$  和  $m$ 。取  $\dot{\gamma}_0 = 0.001$  /s、 $T_0 = 298$  K，比较图 2 中实验曲线和拟合曲线屈服点之差可以求出参数  $\tau_s$ ，通过将实验曲线减去  $[\tau_d - \tau_s \ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)]$  再对差值进行曲线拟合可得参数  $k$  和  $m$ 。最终得到的本构方程为

$$\tau = \tau_d(\gamma, T, \dot{\gamma}) + (-0.004 + 0.016\gamma^{0.7})\ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)\exp(1-(T/T_0)^2) \tag{5}$$

拟合曲线如图 4 所示，可以看到修正后的结果能够较好描述动态常温下孪晶对应变硬化率的影响。

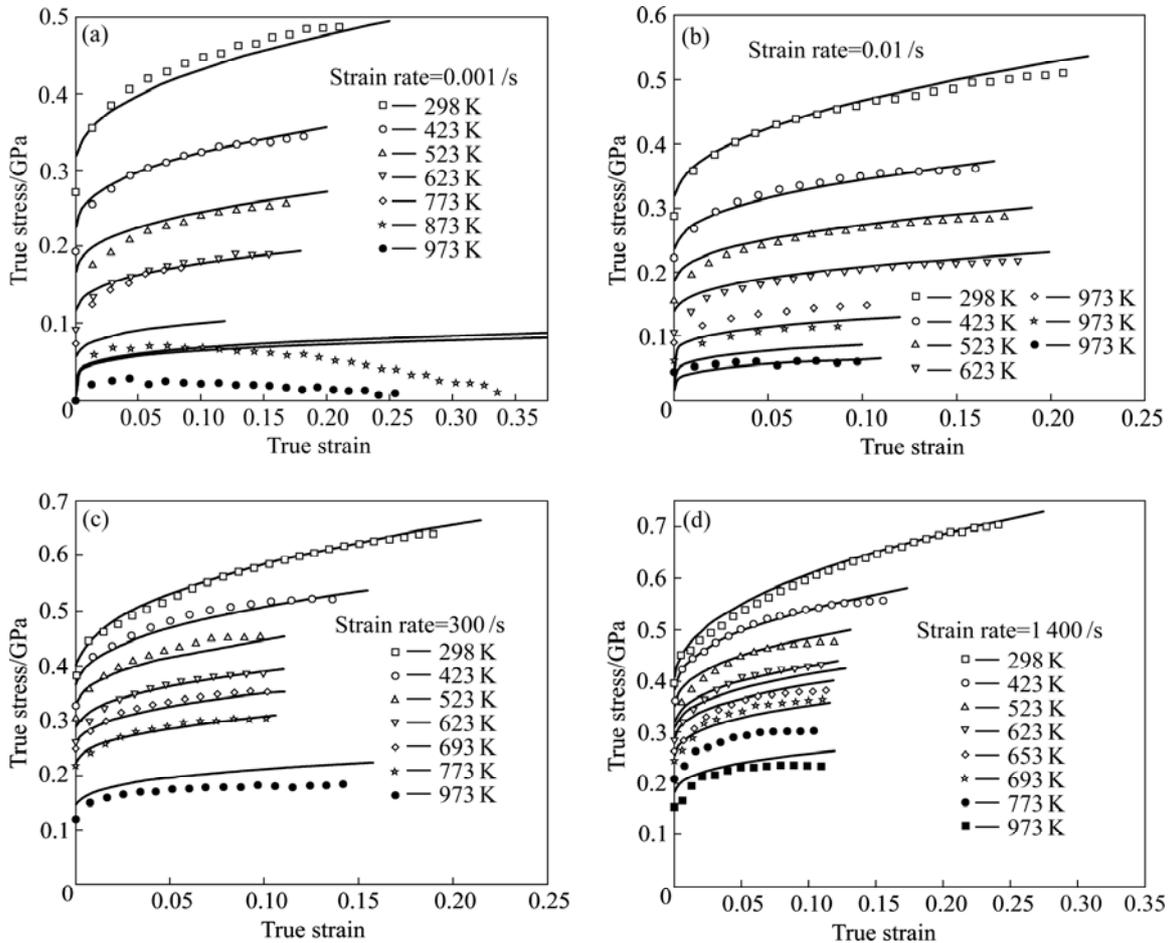


图 4 考虑孪晶影响后不同温度和应变率下的拟合结果

Fig.4 Simulated stress—strain curves of poly-crystal titanium at various temperatures and strain rates (incorporating twinning effect)

### 3 结论

1) 在拉伸载荷下,纯钛中的孪晶变形有着明显的温度和应变率相关性,其密度随着应变率的增加而增大,随着温度的升高而锐减。

2) 本文作者提出的本构模型能够很好的描述在位错运动和孪晶变形两种机理作用下纯钛的温度和应变率相关的拉伸力学行为。

### REFERENCES

- [1] BALASUBRAMANIAN S, ANAND L. Plasticity of initially textured hexagonal polycrystals at high homologous temperatures: Application to titanium[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50: 133–148.
- [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 Mater*, 1998, 46(3): 1025–1043.
- [3] NEMAT-NASSER S, GUO W G, CHENG J Y. Mechanical properties and deformation mechanisms of a commercially pure titanium[J]. *Acta mater*, 1999, 47: 3705–3720.
- [4] 李炎. 多晶体钛拉伸变形表面褶皱的形成及晶粒变形[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(7): 1078–1083.  
LI Yan. Surface roughening and deformation of grains in uniaxial tension of polycrystalline titanium[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(7): 1078–1083.
- [5] 孙巧艳, 朱蕊花, 刘翠萍, 于振涛. 工业纯钛机械孪晶演化及其对纯钛低温力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(4): 592–598.  
SUN Qiao-yan, ZHU Rui-hua, LIU Cui-ping, YU Zhen-tao. Twinning behavior and its effect on mechanical behavior of commercial titanium at cryogenic temperature[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(4): 592–598.
- [6] LENNON A M, RAMESH K T. The influence of crystal structure on the dynamic behavior of materials at high temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2004, 20: 269–290.
- [7] YUAN J M, SHIM V P W. Tensile response of ductile titanium at moderately high strain rates[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(1): 213–224.
- [8] CHRISTIAN J W, MAHAJAN S. Deformation twinning[J]. *Progress in Materials Science*, 1995, 39: 1–157.
- [9] CHEN Xiao-hong, WANG Yang, GONG Ming, XIA Yuan-ming. Dynamic behavior of SUS304 stainless steel at elevated temperatures[J]. *Journal of Materials Science* 2004, 39: 4869–4875.
- [10] 咎祥, 陈晓宏, 黄文, 夏源明. 高温冲击拉伸实验技术中的快速接触加热技术[J]. *实验力学*, 2005, 20(3): 3–9.  
ZAN Xiang, CHEN Xiao-hong, HUANG Wen, XIA Yuan-ming. Rapid contact heating technique in tensile impacts at elevated temperatures[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(3): 3–9.
- [11] HUANG W, ZAN X, NIE X, GONG M, WANG Y, XIA Y M. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperatures[J]. *Mater Sci Eng A*, 2007, 443: 33–41.
- [12] MEYERS M A. *Mechanical metallurgy: Principles and application* [M]. Prentice Hall, 1983.
- [13] GRAY G T. Influence of strain rate and temperature on the structure/property behavior of high-purity titanium[J]. *J Phys*, 1997: 423–428.
- [14] 黄文. 纯钛高温动态拉伸力学性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.  
HUANG Wen. Study on the dynamic behavior of polycrystalline titanium at elevated temperature[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006
- [15] OKAZAKI K, CONRAD H. Effects of interstitial content and grain size on the strength of titanium at low temperatures[J]. *Acta Metallurgica*, 1973, 21: 1117–1129.

(编辑 陈爱华)