

商业纯钛拉压塑性变形行为与机理

陶智君, 李恒, 马俊, 杨恒, 杨合, 张晓丽

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 通过拉伸和压缩试验, 获得了商业纯钛在不同温度和不同应变速率下的拉伸和压缩应力-应变关系, 对比分析了拉压变形路径、变形温度和应变速率对商业纯钛塑性变形行为的影响; 建立了 Zener-Hollomon 模型, 获得了变形温度和应变速率对商业纯钛压缩变形加工硬化的作用规律及商业纯钛压缩变形加工图; 基于电子背散射衍射技术, 获得了商业纯钛晶粒取向分布, 结合拉压变形特性阐明了商业纯钛拉伸塑性变形机理主要是滑移, 压缩塑性变形机理主要分为滑移-孪生-滑移 3 个阶段。

关键词: 商业纯钛; 拉压塑性变形; 温度; 变形机理

中图分类号: TG386

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)09-2470-06

商业纯钛具有比强度高、生物相容性好、耐腐蚀等优良性能, 应用前景广阔, 受到航空航天、石油化工、海洋船舶等装备制造业的青睐和重视。然而, 商业纯钛由于其非对称密排六方结构, 可动滑移系少, 加工硬化效应弱, 室温成形性能有限。通过将商业纯钛加热到再结晶温度以下特定温度区间的温热成形方式, 可显著降低材料变形抗力, 有效提高材料延伸率, 使其具有更加优良的塑性变形能力, 已成为提高商业纯钛成形极限和成形精度的重要途径。因此, 深入研究商业纯钛不同温度拉伸和压缩塑性变形行为和变形机理, 对于丰富商业纯钛塑性变形理论具有科学意义, 对于纯钛构件温热成形温度区间和成形工艺参数确定具有重要应用价值。

针对商业纯钛塑性变形行为和变形机理问题, 国内外学者已经进行了一定研究。Schweibold 等^[1]研究了商业纯钛管的屈服强度、强度极限和延伸率随温度的变化趋势, 表明其在 177~260 °C 温度范围内具有较好的延伸率。Nemat-Nasser 等^[2]研究了商业纯钛的力学性能及变形机理, 发现其流动应力与温度、变形速率和变形量有着强烈而复杂的相关性。Ungár 等^[3]通过 X 射线衍射宽化法研究了商业纯钛的各滑移系激活能及位错密度, 认为商业纯钛的变形机理随温度的增加由高度孪晶向非孪晶的模式转变, 但未考虑应变速率的影响。Liu 等^[4]研究表明, 当温度由室温升至 400 °C 时激活了更多的滑移系, 商业纯钛的拉伸性能提升近两倍。Zhang 等^[5]研究了商业纯钛板半球形曲面的冷

拉深成形性能, 发现变形量越大, 形变孪晶越多、组织形貌越复杂, 强度越高和塑性越低。彭剑等^[6]研究了商业纯钛室温下的拉伸性能, 发现拉伸性能存在显著的应变速率敏感性, 随着应变速率的增加, 材料的强度提高、塑性降低, 应变速率敏感性指数也增大。许峰等^[7]通过动态塑性变形和准静态压缩变形试验研究了商业纯钛圆柱试样压缩变形行为以及不同应变速率下商业纯钛变形过程中形变孪晶和微观结构演变规律, 表明大应变速率有助于形变孪晶的产生。Zeng 等^[8]通过 Gleeble 热模拟压缩试验研究了商业纯钛在 673~973 K 温度范围内, 0.001, 0.01, 0.1 和 1 s⁻¹ 应变速率下的压缩变形行为, 并建立 Zener-Hollomon 模型获得了 Z 参数将 T-log $\dot{\epsilon}$ 图分为 3 个区域, 且研究了 3 个区域的变形特点。Zhang 等^[9]研究了大口径商业纯钛管不同温度和不同应变速率下的拉伸变形行为, 发现温度和应变对应变速率敏感系数影响较大, 且和温度区间相关。Zhang 等^[10]研究了大口径商业纯钛管数控温热弯曲过程中弯管内外侧塑性变形机理, 表明弯管外侧的形变孪晶较少, 而弯管内侧则产生大量的拉伸孪晶。然而, 上述研究主要集中于商业纯钛的单纯拉伸或者单纯压缩变形行为, 对于商业纯钛在不同温热条件和不同应变速率下拉伸和压缩塑性变形行为以及拉压变形机理系统对比分析研究尚少。

本研究以商业纯钛 Grade 2 (CP-2) 为对象, 通过拉伸试验和压缩试验, 获得不同温度和不同应变速率下商业纯钛的拉伸和压缩应力-应变曲线, 研究拉压变形

收稿日期: 2016-11-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51275415); 国家自然科学基金优秀青年科学基金 (51522509)

作者简介: 陶智君, 女, 1989 年生, 博士生, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, E-mail: 15929550612@163.com

路径、变形温度和应变速率对商业纯钛加工硬化行为的影响规律，进而基于变形行为特性研究建立商业纯钛压缩变形加工图；并基于电子背散射衍射（EBSD）技术，获得商业纯钛晶粒取向分布，进而阐明商业纯钛在不同温度和不同应变速率下的拉伸和压缩塑性变形机理。

1 商业纯钛拉压性能测试

本研究材料为商业纯钛 CP-2 棒材，采用单向拉伸和单向压缩试验研究商业纯钛不同温度和不同应变速率下的塑性变形行为。拉伸试样如图 1 所示，试样设计遵循 GB/T 4338-2006 标准，为直径 10 mm，标距 50 mm 的棒状拉伸试样。试验温度分别为 293, 423, 473, 523 和 573 K，拉伸应变速率分别为 0.001 和 0.01 s⁻¹。试样以 10 °C s⁻¹ 的速度加热到变形温度，保温 10 min 使其温度均匀，然后进行拉伸试验。单向拉伸试验设备为 Instron 3382 电子万能试验机，使用 Epsilon 3448 高温引伸计测量应变。

压缩试验在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行，图 2 为 Φ6 mm×9 mm 圆柱压缩试样，试样设计遵循 GB/T 7314-2005 标准。等温热模拟压缩试验温度分别为 293, 423, 473, 523 和 573 K，应变速率分别为 0.001, 0.01 和 0.1 s⁻¹。试验时在试样与压头之间垫一个石墨薄片以减小端面摩擦，试样以 10 °C s⁻¹ 的速度加热到变形温度后保温 3 min 使其温度均匀，然后进行等温热压缩试验获得相应的压缩应力-应变曲线。

2 商业纯钛不同温度拉压变形行为

2.1 不同温度拉伸变形行为

图 3 为商业纯钛在不同温度和不同应变速率下拉伸变形工程应力-应变曲线，由图可知，商业纯钛对变

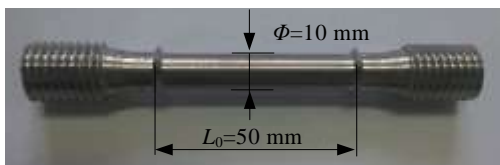


图 1 商业纯钛拉伸试样
Fig.1 Sample for tension test



图 2 商业纯钛压缩试样
Fig.2 Sample for compression test

形温度和变形速率均表现出了很强的敏感性。商业纯钛拉伸变形流动应力随着变形温度的升高而降低，随着变形速率的增大而增大，且所有的拉伸应力-应变曲线均为光滑的凸曲线。在相对较低的应变速率下，温度对商业纯钛应力-应变曲线的影响更显著。

2.2 不同温度压缩变形行为

图 4 和图 5 分别为商业纯钛在不同温度和不同应变速率下压缩真实应力-应变曲线（图中负号代表应力应变方向，正为拉伸负为压缩）。类似于拉伸变形，商业纯钛的压缩真实应力-应变曲线同样对变形温度和变形速率十分敏感。商业纯钛的压缩变形流动应力随着变形温度的升高以及变形速率的降低而降低。在 293 K 下压缩变形过程中，商业纯钛的真实应力随着应变量的增加持续增加；在 423, 473, 523 和 573 K 下压缩变形过程中，商业纯钛的真实应力随着应变量的增加先增加（0 ≤ ε ≤ 0.6），再趋于稳定（0.6 ≤ ε ≤ 0.9）。

对比分析拉伸和压缩应力-应变曲线，可以发现拉伸应力-应变曲线差异很大。压缩变形过程中商业纯钛真实应力-应变曲线呈现明显的 3 阶段形式：第一阶段，在 ε ≤ 0.05 时，商业纯钛的真实应力-应变曲线为凸函数；第二阶段，在 0.05 ≤ ε ≤ 0.3 时，商业纯钛的真实应力-应变曲线为凹函数，该阶段在热变形条件下更为明显；第三阶段，在 ε ≥ 0.3 时，商业纯钛的真实应力-应变曲线为凸函数。

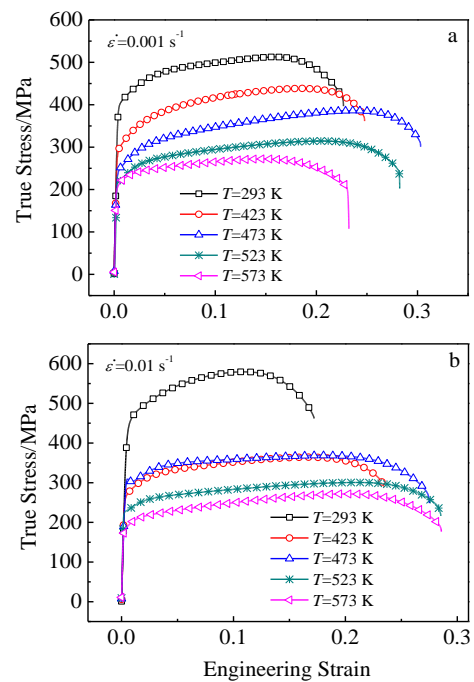


图 3 不同温度下商业纯钛拉伸变形工程应力-应变曲线
Fig.3 Engineering stress-strain curves of CP-Ti at different temperatures: (a) ε̇=0.001 s⁻¹ and (b) ε̇=0.01 s⁻¹

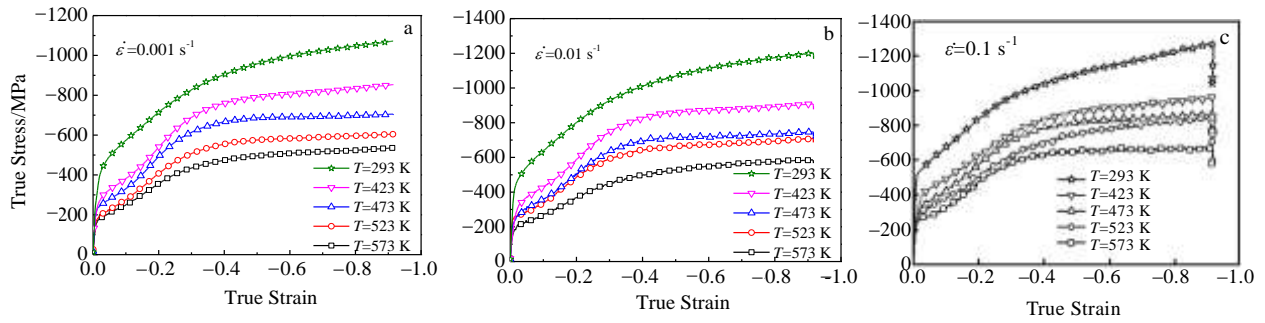


图 4 不同温度下商业纯钛的压缩真实应力-应变曲线

Fig.4 True stress-strain curves of CP-Ti at different temperatures: (a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$, and (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$

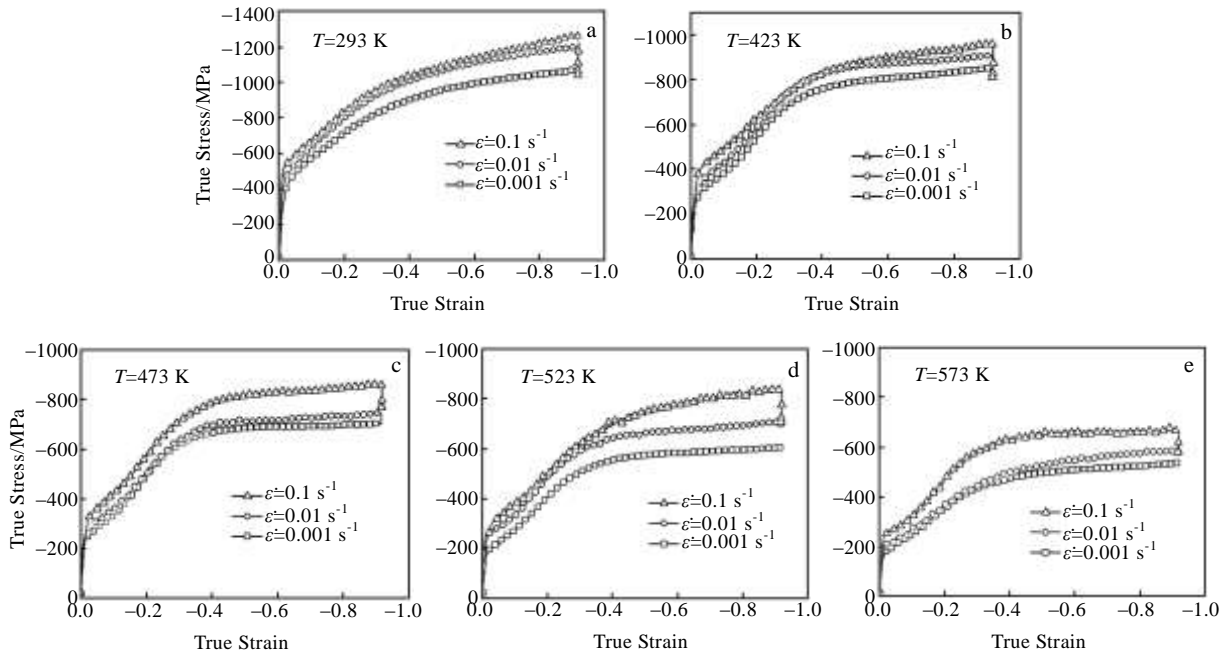


图 5 不同应变速率下商业纯钛压缩真实应力-应变曲线

Fig.5 True stress-strain curves of CP-Ti under different strain rates: (a) $T=293 \text{ K}$, (b) $T=423 \text{ K}$, (c) $T=473 \text{ K}$, (d) $T=523 \text{ K}$, and (e) $T=573 \text{ K}$

由真实应力-应变关系可知，商业纯钛压缩变形的加工硬化现象在变形温度较低、应变速率较高的情况下更加显著。为了研究温度和应变速率对商业纯钛加工硬化的影响，对不同温度和不同应变速率下的真实应力-应变曲线进行多项式拟合，并将多项式对真实应变求导，获得了商业纯钛不同温度和不同应变速率下的压缩变形加工硬化率变化规律，如图 6 所示。

由图 6 可知，商业纯钛的压缩变形加工硬化率曲线呈现明显的 3 阶段：第一阶段，随着流动应力的增加，商业纯钛的加工硬化率呈现快速的线性下降；第二阶段，随着流动应力的增加，商业纯钛的加工硬化率在降至一个极低值后，迅速回升至一个峰值；第三阶段，随着流动应力的增加，商业纯钛的加工硬化率继续下降。这种现象与文献[11]中所提到的在温度与应变速率较

低情况下纯钛易出现三阶段的硬化相一致。

为了进一步研究温度和应变速率对商业纯钛加工硬化的影响，在此基础上，本实验建立了 Zener-Hollomon 模型（或称 Zener-Hollomon 参数，简称 Z 参数）。Zener-Hollomon 模型是衡量温度和应变速率对加工硬化率综合影响的函数，其物理意义为温度补偿的应变速率因子，其定义如下：

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

其中 R 为常数， $R=8.31447 \text{ cm}^3 \text{ MPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ， Q 为热变形激活能， $Q=242 \text{ K J mol}^{-1}$ [8,11]。通过公式(1)，并且对 Z 求对数，获得了温度和应变速率对加工硬化率的影响参数，如图 6 所示。由图可知，在 3 种变形速率下，最高峰值的曲线，均没有出现在室温（293 K）

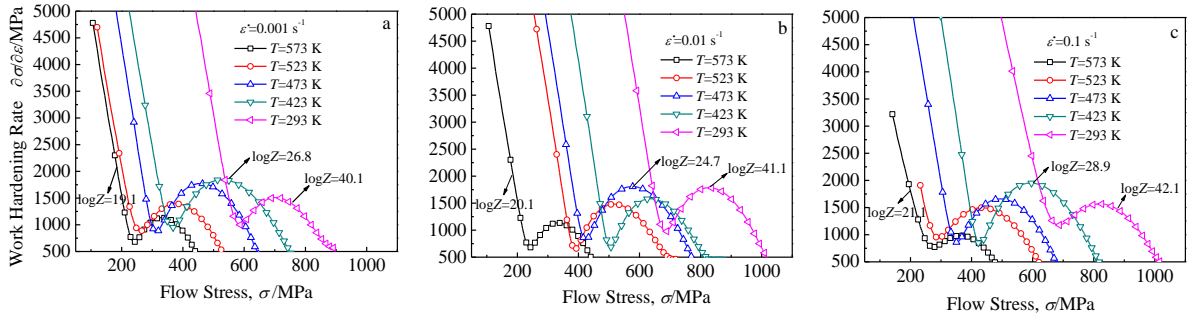


图 6 不同温度下商业纯钛压缩流动应力-加工硬化率曲线

Fig.6 Strain hardening curves of CP-Ti at different temperatures: (a) $\dot{\epsilon}=0.001 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$, and (c) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$

情况下。对于加热条件下应变速率为 0.001 和 0.1 s^{-1} 的三阶段硬化曲线，logZ 值越大，曲线的峰值越高；对于应变速率为 0.01 s^{-1} 的加工硬化率曲线，变形温度为 473 K 时曲线的峰值最高。

综合上述研究并结合文献报道结果，将所有数据整合到 $T\text{-}\log \dot{\epsilon}$ 图中，得到如图 7 所示的商业纯钛压缩变形加工图。其中，黑色的点为文献[2,8,11,12]研究结果，红色点为本研究结果（见网络版）。

根据每种变形条件下 logZ 值的不同，在商业纯钛压缩变形加工图中作等高线，其中 $\log Z=16.2$ 和 $\log Z=12.7$ 这两条等高线将所有的数据划分为 3 个不同的区域。其中， $\log Z \leq 12.7$ 的为流动软化区域， $12.7 \leq \log Z \leq 16.2$ 的区域为两阶段的加工硬化区域， $\log Z \geq 16.2$ 为三阶段的加工硬化区域。由图 7 可知，低温

且任意应变速率的数据处于三阶段加工硬化区域，高温时可以发现二阶段加工硬化区域，在极高温度和低的应变速率下可以发现流动软化区域。本实验所有研究结果均落入了三阶段加工硬化区域。

3 商业纯钛拉压变形机理

图 8 为用标准反极图色标标记的未变形商业纯钛晶粒取向分布图，其中垂直纸面的方向为商业纯钛的长度方向，即为 LD 方向。在图 8 右上角为晶粒取向着色原理图，该图中红色表示该晶粒的 (0001) 晶面与纸面平行，绿色表示该晶粒的 ($\bar{1}2\bar{1}0$) 晶面与纸面平行，蓝色表示该晶粒的 (01 $\bar{1}0$) 晶面与纸面平行（见网络版）。由图可知，商业纯钛未变形状态下其组织为晶粒度为 30 μm 左右的等轴组织，图中大部分晶粒显示红色，表示大部分晶粒的基轴 $\langle 0001 \rangle$ 与纸面垂直，即密排六方的 C 轴与 LD 方向平行。图 9 为用标准反极图色标标记的未变形商业纯钛 EBSD 等高线图，

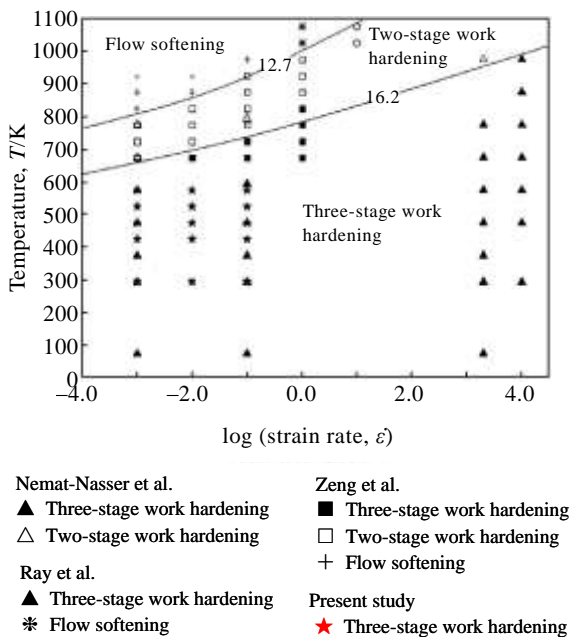


图 7 商业纯钛压缩变形加工图

Fig.7 Compression processing map of CP-Ti

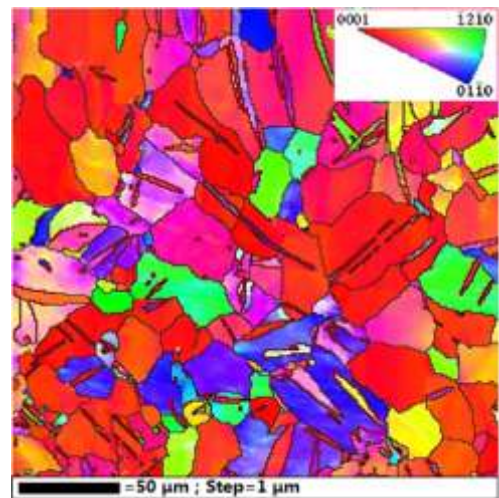


图 8 商业纯钛晶粒取向分布

Fig.8 Grain orientation of CP-Ti

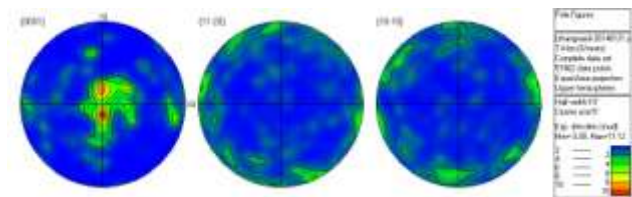


图 9 商业纯钛极图

Fig.9 Polar graph of CP-Ti

从图中{0001}极图同样可以发现，各晶粒取向较为一致，即多晶体商业纯钛的晶粒择优取向基本上都出现在 LD 方向上。

商业纯钛属于密排六方结构材料，其主要塑性变形机制为滑移和孪生。滑移和孪生两种机制是相互竞争、相互促进关系。商业纯钛在拉伸和压缩变形过程中的真实应力-应变曲线差异可以通过其内部的变形机制进行解释。关于纯钛拉伸和压缩变形机制问题，蔡盛强等^[13]通过拉伸、压缩试验，并结合金相分析，研究了孪晶对多晶纯钛塑性变形的影响，发现纯钛在拉伸变形过程中，几乎没有出现孪晶；而在压缩变形中，呈现三阶段的硬化，第一硬化阶段对应几乎没有孪晶出现的过程，第二硬化阶段对应孪晶密度逐渐增大的过程，第三硬化阶段对应孪晶密度趋于饱和的过程。这与本文的研究结果基本一致。

商业纯钛在不同应力状态下出现不同的变形机理与其初始组织密切相关。由图 9 可知，在商业纯钛的初始组织中，多晶体大部分晶粒的基轴都沿着 LD 方向，即变形过程中的拉伸、压缩方向。

如图 10 所示拉伸塑性变形过程中，试样多晶体组

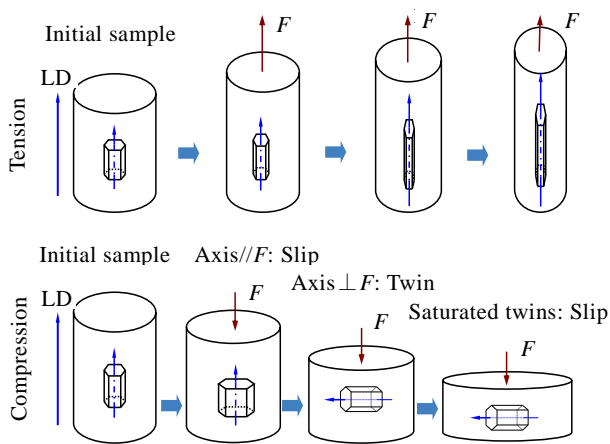


图 10 商业纯钛拉压变形机理

Fig.10 Mechanism of tension and compression of CP-Ti

织大部分晶粒的基轴与受到的拉应力方向平行，随着拉伸变形的进行，多晶体内部晶粒沿着拉伸方向伸长。这种变形状态下，多晶体内部晶粒的基轴不易发生偏转，可以认为在整个拉伸变形过程中，多晶体内部大部分晶粒的基轴与拉应力方向处于平行状态。在应力状态与晶粒基轴平行的情况下，较容易产生压缩孪晶，但产生压缩孪晶所需的剪切应变大。因此，商业纯钛在拉伸变形过程中，几乎没有孪晶产生，多晶体内部的主要变形机理为滑移。

如图 10 所示压缩塑性变形过程中，压缩变形初期，类似于拉伸变形初期，商业纯钛内部多晶体大部分晶粒的基轴与压缩方向处于平行状态，因此多晶体几乎没有产生形变孪晶，滑移为主要变形机理。随着压缩变形的进行，多晶体内部晶粒开始沿着压缩方向压扁，有些晶粒的基轴发生了偏转，这些基轴发生旋转的晶粒开始与应力状态处于垂直位置，这种应力状态与晶粒基轴垂直的位向关系，有利于拉伸孪晶的产生。而产生拉伸孪晶所需的临界剪切应变小，只需要几个原子的滑动，因此多晶体内部开始产生拉伸孪晶。随着压缩变形的进行，越来越多的晶粒基轴产生偏转，随之越来越多的晶粒内部产生了拉伸孪晶，直至多晶体内部的孪晶量达到饱和。因此，第二阶段中，孪生为主要变形机理。在第三阶段，由于孪晶含量达到饱和，孪晶界的产生使得原始晶粒破裂，晶粒细化，细化的晶粒不易于孪生的进一步发生，而大量不易于滑移的位错开始处于有利于滑移的位向，位错的滑移又开始成为主导的变形机理。

4 结 论

1) 商业纯钛的拉伸和压缩变形行为差异明显，拉伸变形真实应力-应变曲线为光滑幂指数上升趋势，而压缩变形真实应力-应变曲线分为凸-凹-凸 3 个不同阶段。

2) 变形温度、拉压变形路径和应变速率对商业纯钛应力-应变关系影响显著，其中压缩变形加工硬化率随流动应力变化呈三阶段：线性下降阶段、迅速回升阶段和持续下降阶段，且具有较强的温度敏感性。

3) 建立了 Zener-Hollomon 模型，定量描述了温度和应变速率对商业纯钛加工硬化的综合影响；结合文献结果，丰富了商业纯钛压缩变形加工图。

4) 商业纯钛拉伸和压缩塑性变形机理显著不同，拉伸主要变形机理为滑移，而压缩主要变形机理与其真实应力-应变曲线三阶段相对应，第一、三阶段主要是滑移，第二阶段变形机理以孪生为主。

参考文献 References

- [1] Schweibold D J. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*[J], 1989, 61(12): 8
- [2] Nemat-Nasser S, Guo W G, Cheng J Y. *Acta Materialia*[J], 1999, 47(13): 3705
- [3] Ungár T, Glavicic M G, Balogh L *et al. Materials Science and Engineering: A* [J], 2008, 493(1): 79
- [4] Liu J M, Chou S S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1999, 95(1-3): 65
- [5] Zhang Xialu(张下陆), Kou Hongchao(寇宏超), Li Hongwei(李宏伟) *et al. Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2010, 17(3): 93
- [6] Peng Jian(彭剑), Zhou Changyu(周昌玉), Dai Qiao(代巧) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2013, 42(3): 483
- [7] Xu Feng(许峰), Zhang Xiyun(张喜燕), Cheng Youming(程佑铭). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(7): 1730
- [8] Zeng Z, Jonsson S, Zhang Y. *Materials Science & Engineering A*[J], 2009, 505(1-2):116
- [9] Zhang Z Y, Yang H, Li H *et al. Materials Science and Engineering: A* [J], 2013, 569: 96
- [10] Zhang X L, Yang H, Li H *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2014, 24(10): 3257
- [11] Zeng Z, Zhang Y, Jonsson S. *Materials & Design*[J], 2009, 30(8): 3105
- [12] Ray K, Poole W J, Mitchell A *et al. Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing*[M]. Warrendale: TMS, 1997: 201
- [13] Cai Shengqiang(蔡盛强), Wang Yang(汪洋), Xia Yuanming(夏源明). *Journal of Experimental Mechanics(实验力学)*[J], 2007, 22(2): 97

Plastic Deformation Behavior and Mechanisms of Commercial Pure Titanium under Tension and Compression

Tao Zhijun, Li Heng, Ma Jun, Yang Heng, Yang He, Zhang Xiaoli

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: By tensile and compressive tests of commercial pure titanium (CP-Ti), the relationships between tension and compressive stress-strain at various deformation temperatures and strain rates were obtained. Then, the influences of deformation temperatures, tension/compression loading paths and strain rates on the stress-strain relationships were investigated. With Zener-Hollomon model, the influencing rules of the temperatures and strain rates on work hardening were achieved and the compressive deformation processing map was constructed. Based on the EBSD analysis, the grain orientations of CP-Ti were obtained and the plastic deformation mechanisms for tension and compression were clarified: the slipping dominates the tension plastic deformation and the mechanism of compression plastic deformation is mainly slipping-twinning-slipping.

Key words: CP-Ti; tension and compression; temperatures; deformation mechanism

Corresponding author: Li Heng, Ph. D., Professor, School of Materials Science & Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-86460212, E-mail: liheng@nwpu.edu.cn