

文章编号: 1001-4888(2022)05-0649-08

# 不同温度和应变率下的 Ti-xNb ( $x=5, 10, 15$ ) 合金压缩力学性能研究\*

赵帅<sup>1</sup>, 王鹤峰<sup>1,2</sup>, 冯晓飞<sup>1</sup>, 王宇迪<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西太原 030024; 2. 太原清泽智成科技合伙企业, 山西太原 030024)

**摘要:** 为了探究温度、应变率和 Nb 元素质量分数对 Ti-Nb 合金力学性能的影响, 采用 Zwick 万能材料试验机和 Gleeble-3800 型热模拟试验机对 Ti-xNb ( $x=5, 10, 15$ ) 合金在应变率为  $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $0.01\text{s}^{-1}$ 、 $0.1\text{s}^{-1}$  的室温和高温准静态下进行测试。结果表明: 三种 Ti-Nb 合金均为温度和应变率敏感材料, 其屈服应力均随着温度的减小和应变率的增加而增大; 随着 Ti-Nb 合金中 Nb 元素质量分数的增加, 合金在准静态下的屈服应力逐渐增加, 塑性逐渐减弱。在高温准静态变形下, Ti-5Nb 和 Ti-10Nb 合金分别在  $800^\circ\text{C}$ 、 $0.001\text{s}^{-1}$  和  $760^\circ\text{C}$ 、 $0.001\text{s}^{-1}$  条件下的回复机制以动态回复为主, 其余条件以动态再结晶为主; Ti-15Nb 合金的回复机制均以动态再结晶为主。

**关键词:** Ti-Nb 合金; 准静态压缩; 热压缩; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2; TB31      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-182

## 0 引言

$\beta$  钛合金具有优异的冷热加工性能、易锻造性能和深硬化能力, 同时可以通过热处理等手段使合金达到更高强度。Ti-Nb 合金是备受关注的  $\beta$  钛合金, 具有形状记忆性能和弹性模量小等优点, 在航空航天、舰船工业和生物医用等领域得到广泛应用<sup>[1-6]</sup>。目前研究集中于 Ti-Nb 合金拉伸力学性能、表面改性和 Nb 含量对微观组织、弹性模量的影响等<sup>[7-13]</sup>, 而忽略了压缩力学性能, 尤其是低 Nb 含量的 Ti-Nb 合金。然而 Ti-Nb 合金在室温条件下成形较为困难, 在实际制造中通常选用热成形工艺, 因此研究 Ti-Nb 合金在室温和高温下的力学响应和变形行为可作为其加工工艺参数制定的理论依据, 具有重要的意义。

在不同钛合金高温压缩下的流动应力和微观组织演变机制方面, 国内外学者已开展相关研究。罗媛媛等<sup>[14]</sup>对 Ti-25Al-15Nb-1Mo 合金进行了温度为  $1100\sim 1200^\circ\text{C}$ , 加载应变率为  $0.1\sim 0.5\text{s}^{-1}$  的高温压缩测试; 段中林等<sup>[15]</sup>开展了对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; 咎祥等<sup>[16]</sup>开展了对三种微观组织的 Ti-46.5Al-2Nb-2Cr 高温动态力学行为的实验研究; Abbasi 等<sup>[17]</sup>对  $\beta$  型 Ti-6V-6Mo-6Fe-3Al 进行了热压缩测试, 研究了该合金在高温下的微观结构演变和流动行为; Kikuchi 等<sup>[18]</sup>进行了 Nb 含量为  $0\sim 18\text{ wt.}\%$  Ti-Nb 合金的显微组织实验; Hon 等<sup>[19]</sup>研究了 Nb 元素质量分数为  $14\%\sim 40\%$  的 Ti-Nb 合金相结构的组成和力学性能。综合分析上述研究结果可知: 钛合金的高温屈

\* 收稿日期: 2021-08-11; 修回日期: 2021-10-23

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2020-030); 山西省留学人员科技活动择优资助项目(20200028); 山西省关键技术和共性技术研发攻关专项项目(2020XXX017)

通信作者: 王鹤峰(1978-), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 材料表面改性与防护。Email: 461546903@qq.com

服应力和微观组织变化与温度、应变率有关。不同温度下的微观结构变化和动态回复机制不同,且高温屈服应力与应变率成正比,与温度成反比。此外,Nb含量对Ti-Nb合金的力学特性和微观组织均有一定的影响。低Nb含量的Ti-Nb合金与人体骨组织的弹性模量接近,在骨科和牙科种植方面具有广泛的应用前景<sup>[18-20]</sup>。Nb是一种熔点高、熔融性差的稀有金属,从制造和成本效益考虑,低Nb含量的Ti-Nb合金将是首要选择。因此,本文在室温和高温下对三种不同低Nb含量的Ti-Nb合金进行了三种应变率下的压缩实验,分析了温度、应变率和Nb含量对Ti-Nb合金压缩力学性能的影响。

## 1 实验方法

实验所用Ti-xNb( $x=5, 10, 15$ )合金原始棒材取自西北有色金属研究院,其Ti-xNb( $x=5, 10, 15$ )合金化学成分见表1。采用线切割等加工方式将合金棒材加工成直径 $\Phi$ 为8.0mm,高度H为12.0mm的圆柱体试样。在实验前,将试样上下表面经碳化硅砂纸逐级打磨后,放入无水乙醇中超声清洗10min,烘干备用。

表1 Ti-xNb合金化学成分表(wt.%)

Tab.1 Chemical compositions of Ti-xNb alloys (wt.%)

合金名义成分	Nb	O	C	N	H	Ti
Ti-5Nb	5.071	0.072	0.021	0.007	0.001	Bal.
Ti-10Nb	9.730	0.097	0.019	0.014	0.001	Bal.
Ti-15Nb	14.703	0.120	0.008	0.003	0.001	Bal.

### 1.1 室温准静态压缩测试

采用Zwick万能材料试验机对Ti-xNb( $x=5, 10, 15$ )合金试样进行准静态单轴压缩测试,测试温度为室温,压缩应变率分别为 $0.001s^{-1}$ 、 $0.01s^{-1}$ 和 $0.1s^{-1}$ 。将实验得到的载荷-位移数据进行处理,得到试样不同应变率下单轴压缩应力-应变关系。

### 1.2 高温准静态压缩测试

钛合金的 $\beta$ 相变点温度可由两种方式确定:连续升温金相法和计算法。本文采用计算法通过经验公式来计算钛合金 $\beta$ 相变点温度,计算公式为<sup>[21]</sup>

$$T_{\beta} = 882.5^{\circ}\text{C} + \sum \text{元素质量分数} \times \text{元素对}\beta\text{相变点影响效果} \quad (1)$$

式中 $882.5^{\circ}\text{C}$ 是纯钛的 $\beta$ 相变点温度,在Ti-Nb合金中,Nb元素的添加会使钛合金内部 $\beta$ 相的稳定性增大,其扩散会对Ti-Nb合金的 $\beta$ 相变点温度产生降低效果,即每增加1.0%的Nb含量, $\beta$ 相变点温度下降 $8.5^{\circ}\text{C}$ <sup>[21]</sup>。此外,由式(1)计算得到的相变点温度值一般偏高,与实际值相差 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ <sup>[21]</sup>,由钛合金 $\beta$ 相变点温度的计算公式可以得到Ti-xNb( $x=5, 10, 15$ )合金的 $\beta$ 相变点温度分别为 $825^{\circ}\text{C}$ 、 $782.5^{\circ}\text{C}$ 和 $740^{\circ}\text{C}$ 。

高温压缩实验变形量设置为60%,温度升高速度设置为 $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。当温度升高至实验设置压缩温度后恒温保持3min,随后开始对试样进行压缩。为保证各合金试样均处于同一相区,不同Nb含量Ti-Nb合金的压缩温度与压缩应变率见表2。

表2 Ti-xNb合金高温压缩测试方案

Tab.2 High temperature compression test of Ti-xNb alloy

试样	温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变率/ $s^{-1}$
Ti-5Nb	680,720,760,800	0.001,0.01,0.1
Ti-10Nb	640,680,720,760	0.001,0.01,0.1
Ti-15Nb	600,640,680,720	0.001,0.01,0.1

## 2 结果与讨论

### 2.1 室温下 Ti-Nb 合金压缩力学性能

对 Ti-xNb(x=5, 10, 15) 合金在室温下开展了应变率为 0.001s<sup>-1</sup>、0.01s<sup>-1</sup>和 0.1s<sup>-1</sup>的准静态压缩测试。三种 Ti-Nb 合金试样均变形为鼓形, Ti-15Nb 合金试样发生断裂(图 1)。

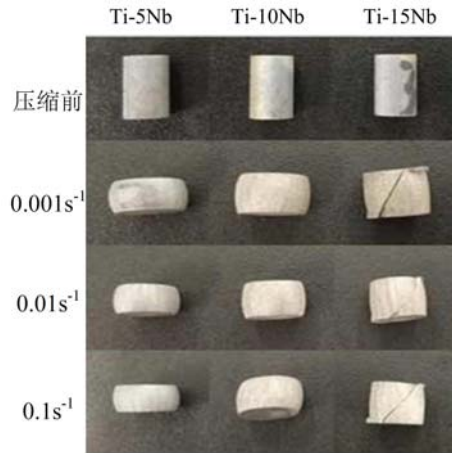


图 1 Ti-xNb 合金准静态压缩试样图片

Fig. 1 Graph of Ti-xNb samples under quasi-static compression

Ti-xNb(x=5, 10, 15) 合金准静态压缩变形下的应力-应变曲线如图 2 所示。由图可知, Ti-xNb(x=5, 10, 15) 合金的应力-应变曲线具有相同趋势, 符合双线性塑性强化力学模型。Ti-5Nb、Ti-10Nb 合金应力经过明显的应变强化段后趋于平稳, 而 Ti-15Nb 合金应力则在较平滑塑性段后迅速下降最终断裂。同时, 同一应变率下 Ti-Nb 合金的屈服强度随着 Nb 含量的增加而增大, 实验结论与孟庆宇<sup>[22]</sup>、李海峰<sup>[23]</sup>等的研究结果相同, 即在钛合金中适量增加 β 稳定元素可以提高合金的屈服应力。Ti-xNb 合金准静态压缩屈服应力见表 3, 从表中可以看出, Ti-Nb 合金无明显的应变率效应。

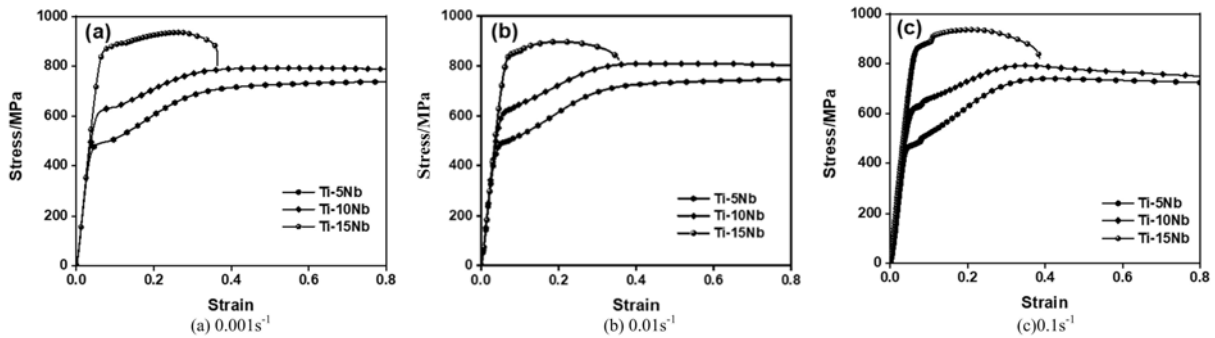


图 2 Ti-Nb 合金准静态压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of Ti-Nb alloys under static compression

表 3 Ti-xNb 合金准静态压缩屈服应力(σ<sub>s</sub>)

Tab. 3 Yield stress of Ti-xNb alloys under quasi-static compression(σ<sub>s</sub>)

Ti-Nb 合金	σ <sub>s</sub> /MPa		
	0.001s <sup>-1</sup>	0.01s <sup>-1</sup>	0.1s <sup>-1</sup>
Ti-5Nb	498.17	499.46	502.77
Ti-10Nb	634.67	635.01	640.22
Ti-15Nb	867.96	869.63	889.80

### 2.2 高温下钛铌合金压缩力学性能

用 Gleeble-3800 型热模拟试验机开展了 Ti-xNb(x=5, 10, 15) 合金在其各自 α+β 温度区间内的高

温压缩实验,实验温度低于 $\beta$ 相变点温度,从而保证了试样均处于同一相区。Ti-Nb合金在高温压缩变形后的试样如图3所示。

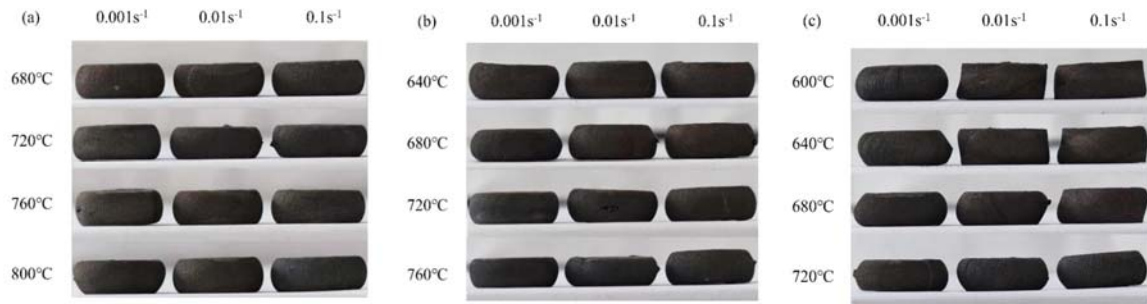


图3 Ti-Nb合金高温压缩后试样图片:(a)Ti-5Nb;(b)Ti-10Nb;(c)Ti-15Nb

Fig. 3 Graphs of Ti-Nb samples after hot compression:(a)Ti-5Nb;(b)Ti-10Nb;(c)Ti-15Nb

Ti-5Nb、Ti-10Nb合金在不同温度和应变率下的应力-应变曲线如图4、图5所示。在 $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 和 $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $760^\circ\text{C}$ 压缩条件下,Ti-5Nb和Ti-10Nb合金应力-应变曲线变化特征均与动态回复型应力-应变曲线相符,即应力上升至峰值之后便保持为一水平直线<sup>[24, 25]</sup>,原因是应变率较低,温度较高,从而使合金内部的位错运动在更长的时间内受到热激活作用的影响,导致软化作用进行的较为充分。在其余条件下,应力-应变曲线变化特征则与动态再结晶型应力-应变曲线相符,即初始阶段流变应力在很小的应变内增长到最大值,然后逐渐降低达到平稳状态<sup>[26, 27]</sup>。由图4和图5的曲线特征对比结果可知:Ti-5Nb合金在 $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 条件下以及Ti-10Nb合金在 $0.001\text{s}^{-1}$ 、 $760^\circ\text{C}$ 条件下的回复机制都以动态回复为主,而其余条件下的回复机制以动态再结晶为主。

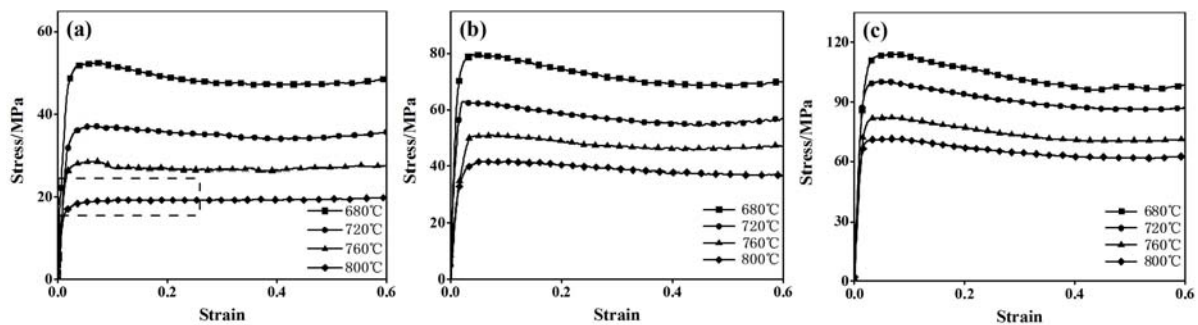


图4 Ti-5Nb合金高温不同应变率下的应力-应变曲线:(a) $0.001\text{s}^{-1}$ ;(b) $0.01\text{s}^{-1}$ ;(c) $0.1\text{s}^{-1}$

Fig. 4 Stress-strain curves of Ti-5Nb alloys at different strain rates:(a) $0.001\text{s}^{-1}$ ;(b) $0.01\text{s}^{-1}$ ;(c) $0.1\text{s}^{-1}$

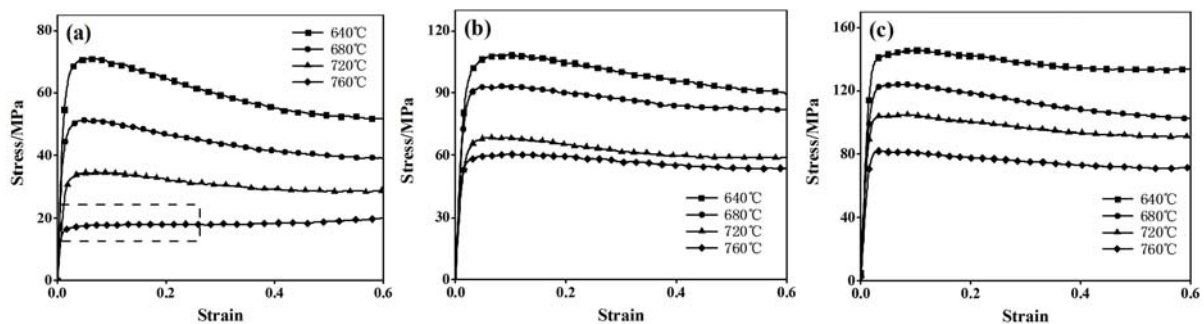


图5 Ti-10Nb合金高温不同应变率下的应力-应变曲线:(a) $0.001\text{s}^{-1}$ ;(b) $0.01\text{s}^{-1}$ ;(c) $0.1\text{s}^{-1}$

Fig. 5 Stress-strain curves of Ti-10Nb alloy at different strain rates:(a) $0.001\text{s}^{-1}$ ;(b) $0.01\text{s}^{-1}$ ;(c) $0.1\text{s}^{-1}$

Ti-15Nb合金在不同温度和应变率下的应力-应变曲线如图6所示。从图中可以看出,与Ti-5Nb和Ti-10Nb合金不同,Ti-15Nb合金在测试温度范围内各应变率下的应力-应变曲线均符合钛合金发生动态再结晶时的应力变化趋势<sup>[26, 27]</sup>,因此,Ti-15Nb合金在高温下的回复机制以动态再结晶为主。

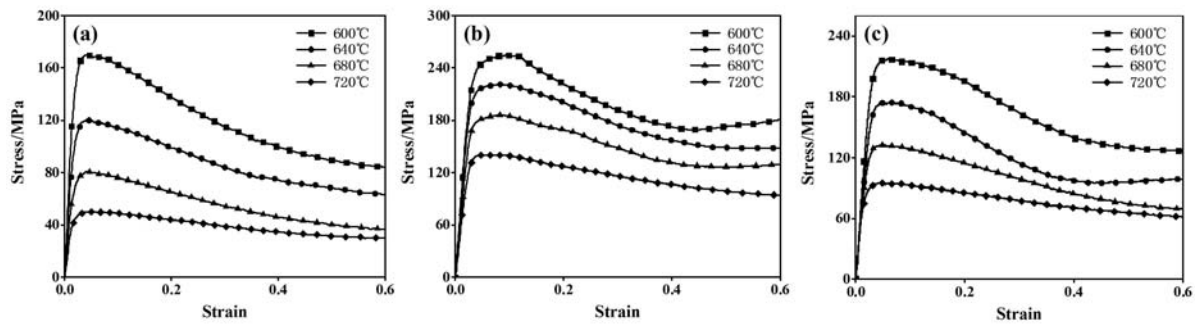


图 6 Ti-15Nb 合金高温不同应变率下的应力-应变曲线:(a)0.001s<sup>-1</sup>; (b)0.01s<sup>-1</sup>; (c)0.1s<sup>-1</sup>

Fig. 6 Stress-strain curves of Ti-15Nb alloys under hot compression:(a)0.001s<sup>-1</sup>; (b)0.01s<sup>-1</sup>; (c)0.1s<sup>-1</sup>  
对图 1~图 6 综合分析可知,Ti-Nb 合金在高温准静态压缩下具有以下力学特征:

(1)温度对 Ti-Nb 合金流变应力的影响

1)由图 7 可知,当应变率相同时,Ti-Nb 合金的屈服应力与温度呈负相关。其原因可能包括:①压缩温度的增加使 Ti-Nb 合金内部的热激活能有所增大,使得内部原子得到更多的能量转化为动能,原子振动幅度增大,导致原子间的临界切应力减小,从而使位错运动更容易进行,合金的屈服应力有所降低<sup>[28]</sup>。②压缩温度的升高加强了 Ti-Nb 合金高温变形时的软化作用,促进了由动态回复或动态再结晶作用的进行,使加工硬化作用得到了更大程度的削弱,合金的应力水平因此减小<sup>[29]</sup>。③压缩温度的升高使得 Ti-Nb 合金内部 α 相到 β 相的转变更充分,而高塑性的 β 相也会促使合金的变形抵抗力下降。

2)当应变率相同时,随着压缩温度的增加,Ti-Nb 合金的高温应力在达到最大值时对应的应变逐渐减小。

3)与室温压缩相比,高温压缩下 Ti-Nb 合金的塑性有所提高。三种 Ti-Nb 合金在各温度和应变率下压缩后的试样均为鼓形,且均未出现明显的裂纹。

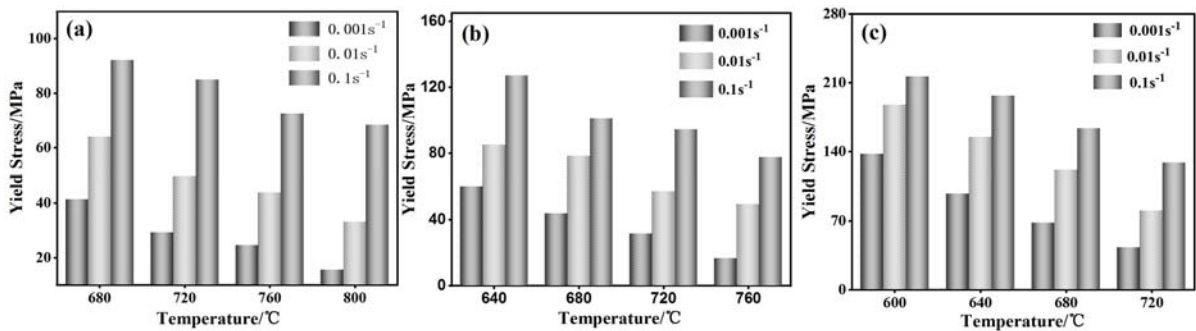


图 7 Ti-Nb 合金高温屈服应力随温度的变化:(a)Ti-5Nb;(b)Ti-10Nb;(c)Ti-15Nb

Fig. 7 Yield stress of Ti-Nb alloys versus temperature:(a)Ti-5Nb;(b)Ti-10Nb;(c)Ti-15Nb

(2)应变率对 Ti-Nb 合金流变应力的影响

1)由图 8 可知,当变形温度一定时,三种 Ti-Nb 合金的高温屈服应力与压缩应变率成正相关,说明三种 Ti-Nb 合金存在应变率强化效应。造成这一现象的主要原因有:①根据位错动力学的理论和公式可知<sup>[30]</sup>,若压缩应变率增加,Ti-Nb 合金内部位错的移动速度导致外加应力也相应增大。②变形应变率的增加使得变形时间大幅度减小,因而在变形时内部动态回复和动态再结晶的软化作用不能充分进行。

2)对于 Ti-5Nb 合金,在同一温度下,随着压缩应变率的增加,合金高温屈服应力提升的幅度也随之增加,这说明 Ti-5Nb 合金在高温下具有更强的应变率相关性。

(3)Nb 含量对 Ti-Nb 合金流变应力的影响

1)由图 9 可知,同一变形温度和应变率下,高温屈服应力与合金中 Nb 元素质量分数呈正相关,Nb 元素的增加在高温下对 Ti-Nb 合金仍有强化效果,与室温下合金屈服应力的变化趋势一致。

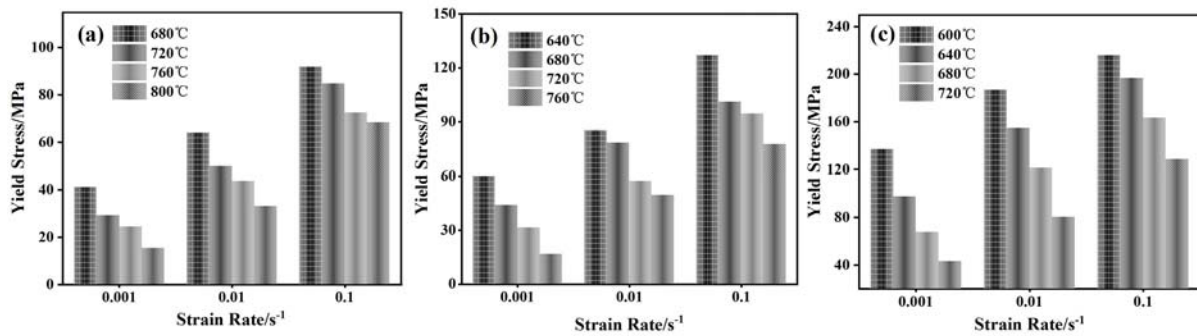


图8 Ti-Nb合金高温屈服应力随应变率的变化:(a)Ti-5Nb;(b)Ti-10Nb;(c)Ti-15Nb

Fig. 8 Yield stress of Ti-Nb alloys versus strain rates:(a)Ti-5Nb;(b)Ti-10Nb;(c)Ti-15Nb

2)同一温度和应变率下,Ti-Nb合金的高温屈服应力增量均随着Nb含量的增加而增大。

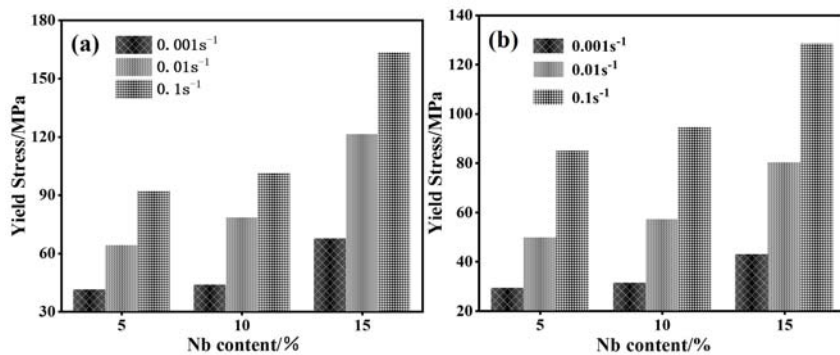


图9 Ti-Nb合金屈服应力随Nb含量的变化曲线:(a)680°C;(b)720°C

Fig. 9 Yield stress of Ti-Nb alloys versus Nb content:(a)680°C;(b)720°C

### 3 结论

(1) 在室温准静态压缩条件下,Ti- $x$ Nb ( $x=5, 10, 15$ )合金无明显的应变率效应;而在高温准静态压缩条件下,Ti- $x$ Nb ( $x=5, 10, 15$ )合金则表现出明显的应变率效应,屈服应力均随着应变率的增加而增大。

(2) Ti- $x$ Nb ( $x=5, 10, 15$ )合金的屈服应力对温度敏感,且随着温度的升高而减小。Ti-Nb合金中Nb元素的增加可以提高其在室温和高温下的屈服应力,但同时也会逐渐减小其塑性。

(3) 在高温准静态压缩条件下,Ti-Nb合金的流变应力在很小的应变范围内快速上升至峰值,随后在加工硬化与动态软化的共同作用下逐渐降低或保持动态稳定。Ti-5Nb和Ti-10Nb合金分别在800°C、0.001s<sup>-1</sup>和760°C、0.001s<sup>-1</sup>条件下的回复机制以动态回复为主,在其余条件下以动态再结晶为主;Ti-15Nb合金在所有条件下的回复机制均以动态再结晶为主。

#### 参考文献:

- [1] 汶建宏,杨冠军,葛鹏,等.β钛合金的研究进展[J].钛工业进展,2008,25(1):33-39(WEN Jianhong, YANG Guanjun, Ge Peng, et al. The research progress of βtitanium alloys[J]. Titanium industry progress, 2008, 25(1):33-39 (in Chinese))
- [2] 段洪涛,李海涛,赵杰,等.低弹性模量Ti-Nb-Zr合金的显微组织与力学性能[J].机械工程材料,2008(8):64-67(DUAN Hongtao, LI Haitao, ZHAO Jie, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-Nb-Zr alloys with low elastic modulus[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008(8):64-67 (in Chinese))
- [3] Hao Y L, Li S J, Sun S Y, et al. Elastic deformation behaviour of Ti-24Nb-4Zr-7.9Sn for biomedical applications [J]. Acta Biomaterialia, 2007, 3(2):277-286.

- [4] Geetha M, Singgh A K, Asokamani R, et al. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review[J]. *Progress in Materials Science*, 2009, 54(3):397—425.
- [5] Niinomi M, Boehlert C J. Titanium alloys for biomedical applications[M]. Heidelberg:Springer Berlin, 2015.
- [6] Xu L J, Xiao S L, Tian J, et al. Microstructure and dry wear properties of Ti-Nb alloys for dental prostheses[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19(3):639—644.
- [7] 蔡盛强, 汪洋, 夏源明. 孪晶对多晶纯钛塑性变形影响的实验研究[J]. *实验力学*, 2007, 22(2):97—103 (CAI Shengqiang, WANG Yang, XIA Yuanming. Experimental study for the influence of twinning on the plastic deformation of pure polycrystalline titanium[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(2):97—103 (in Chinese))
- [8] 任家陶, 李冈陵, 豆志武, 等. 双向拉伸试验的进展与钛板双向拉伸的强化研究[J]. *实验力学*, 2001, 16(2):196—206 (REN Jiatao, LI Gangling, DOU Zhiwu, et al. Biaxial tension test and the strengthening of titanium sheets under biaxial tension[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2001, 16(2):196—206 (in Chinese))
- [9] 朱建雷. 钛铌合金表面(TiNb)C强化层的形成机制与性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020 (ZHU Jianlei. Investigation on the formation mechanism and mechanical properties of (TiNb)C surface reinforced layer in titanium-niobium alloy[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020 (in Chinese))
- [10] 陈成龙. 铌合金表面 MoSi<sub>2</sub>-B<sub>4</sub>C 复合涂层的快速烧结行为及抗高温氧化性能[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020 (CHEN Chenglong. Rapid sintering behavior and high temperature oxidation resistance of MoSi<sub>2</sub>-B<sub>4</sub>C composite coatings on Nb alloy[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020 (in Chinese))
- [11] 李永林, 刘彦昌, 陈胜川. 钛铌合金的热处理工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(14):124—127 (LI Yonglin, LIU Yanchang, CHEN Shengchuan. Study on heat treatment technology of titanium-Nb alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(14):124—127 (in Chinese))
- [12] Mantani Y, Tajima M. Phase transformation of quenched  $\alpha''$  martensite by aging in Ti-Nb alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 438(11):315—319.
- [13] Mantani Y, Tajima M. Effect of ageing on internal friction and elastic modulus of Ti-Nb alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 442(1):409—413.
- [14] 罗媛媛, 张菁丽, 赵圣泽, 等. Ti-25Al-15Nb-1Mo 合金的高温变形行为研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2019, 47(6):63—67 (LUO Yuanyuan, ZHANG Jingli, ZHAO Shengze, et al. Research on high temperature deformation behavior of Ti-25Al-15Nb-1Mo alloy[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2019, 47(6):63—67 (in Chinese))
- [15] 段中林, 王宇, 汪洋. 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[J]. *实验力学*, 2008, 23(4):311—316 (DUAN Zhonglin, WANG Yu, WANG Yang. Experimental study on tensile properties of CP-Ti at high strain rate and different temperatures[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(4):311—316 (in Chinese))
- [16] 咎祥, 汪洋, 夏源明, 等. 三种微观组织的 Ti-46.5Al-2Nb-2Cr 高温动态力学行为的实验研究[J]. *实验力学*, 2008, 23(6):477—484 (ZAN Xiang, WANG Yang, XIA Yuanming, et al. Experimental study of Ti-46.5Al-2Nb-2Cr with three different microstructures under elevated temperatures and high strain rate[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(6):477—484 (in Chinese))
- [17] Abbasi S M, Momeni A, Akhondzadeh A, et al. Microstructure and mechanical behavior of hot compressed Ti-6V-6Mo-6Fe-3Al[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 639:21—28.
- [18] Kikuchi M, Takahashi M, Okuno O. Mechanical properties and grindability of dental cast Ti-Nb alloys[J]. *Dental Materials Journal*, 2003, 22(3):328.
- [19] Hon Y H, Wang J Y, Pan Y N. Composition/phase structure and properties of Titanium-Niobium alloys[J]. *Materials Transactions*, 2003, 44(11):2384—2390.
- [20] Zhang Yuqing, Sun Danni, Cheng Jun, et al. Mechanical and biological properties of Ti-(0~25wt%) Nb alloys for biomedical implants application[J]. *Regenerative Biomaterials*, 2020(1):1.
- [21] 中国有色金属工业协会. 钛合金  $\beta$  转变温度测定方法: GB/T 23605—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021 (China Nonferrous Metals Industry Association. Method for determination of  $\beta$  transformation temperature of titanium alloy: GB/T 23605—2020[S]. Beijing: China Standard Press, 2021 (in Chinese))

- [22] 孟庆宇, 路新, 徐伟, 等. 粉末冶金 Ti-Fe 合金的显微组织及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 46(8): 36–40 (MENG Qingyu, LU Xin, XU Wei, et al. Microstructure and mechanical properties of powder metallurgy Ti-Fe alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 46(8):36–40 (in Chinese))
- [23] 李海峰, 董福宇, 张悦, 等. 低成本 Ti-Al-Fe-Cr 合金的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4):65–67, 71 (LI Haifeng, DONG Fuyu, ZHANG Yue, et al. Research on microstructure and mechanical properties of low-cost Ti-Al-Fe-Cr alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(4):65–67, 71 (in Chinese))
- [24] Zhang W F, Li X L, Sha W, et al. Hot deformation characteristics of a nitride strengthened martensitic heat resistant steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 590:199–208.
- [25] Quan G Z, Luo G C, Liang J T, et al. Modelling for the dynamic recrystallization evolution of Ti-6Al-4V alloy in two-phase temperature range and a wide strain rate range[J]. Computational Material Science, 2014, 97:136–147.
- [26] Xia Y F, Jiang W, Cheng Q, et al. Hot deformation behavior of Ti-6Al-4V-0.1Ru alloy during isothermal compression[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1):134–146.
- [27] 梁后权, 郭鸿镇, 宁永权, 等. 基于软化机制的 TC18 钛合金本构关系研究[J]. 金属学报, 2014, 50(7):871–878 (LIANG Houquan, GUO Hongzhen, NING Yongquan, et al. Analysis on the constitutive relationship of TC18 titanium alloy based on the softening mechanism[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(7):871–878 (in Chinese))
- [28] 张效宁, 宋杰, 范志国. Beta Ti-9.8Mo-3.9Nb-2V-3.1Al 合金的热压缩变形行为研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(1):10–13 (ZHANG Xiaoning, SONG Jie, FAN Zhiguo. Research on hot compression deformation behavior of Beta Ti-9.8Mo-3.9Nb-2V-3.1Al alloy[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science Edition), 2009, 30(1):10–13 (in Chinese))
- [29] Liu G, Xie W, Hadadzadeh A, et al. Hot deformation behavior and processing map of a superlight dual-phase Mg-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 766:460–469.
- [30] 王德尊. 金属力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993:36–38 (WANG Dezun. Mechanical properties of metals[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1993:36–38 (in Chinese))

## Compression mechanical properties of Ti- $x$ Nb ( $x=5, 10, 15$ ) alloy at different temperatures and strain rates

ZHAO Shuai<sup>1</sup>, WANG Hefeng<sup>1,2</sup>, FENG Xiaofei<sup>1</sup>, WANG Yudi<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Taiyuan Qingze Zhicheng Technology Partnership, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** To explore the effects of temperature, strain rate, and mass fraction of Nb on mechanical properties of Ti-Nb alloy, the Ti- $x$ Nb ( $x=5, 10, 15$ ) alloys were tested by Zwick universal material testing machine and Gleeble 3800 thermal simulation testing machine, using the room-temperature and high-temperature quasi-static compress methods with various strain rates ( $0.001\text{s}^{-1}$ ,  $0.01\text{s}^{-1}$ , and  $0.1\text{s}^{-1}$ ). The results show that the three Ti-Nb alloys are sensitive to temperature and strain rate, and the yield stress increases with the decrease of temperature and the increase of strain rate. The yield stress increases and the plasticity decreases gradually with increasing of the Nb element mass fraction in Ti-Nb alloy during quasi-static compress condition. During the condition of high-temperature quasi-static deformation, the recovery mechanisms of Ti-5Nb and Ti-10Nb alloys at  $800^\circ\text{C}$ ,  $0.001\text{s}^{-1}$  and  $760^\circ\text{C}$ ,  $0.001\text{s}^{-1}$ , respectively, are dominated by dynamic recovery, while the rest of the conditions are dominated by dynamic recrystallization. The recovery mechanism of Ti-15Nb alloy is mainly dynamic recrystallization.

**Keywords:** Ti-Nb alloys; quasi-static compression; hot compression; mechanical properties