

文章编号: 1001-4888(2008)06-0477-08

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

咎祥¹, 汪洋¹, 夏源明^{1*}, 贺跃辉²

(1. 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材料设计重点实验室, 安徽合肥 230026;

2. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

摘要: 对等轴(NG), 近片层(NL)和双态(DP)组织的 Ti-46.5Al-2Nb-2Cr 在室温至 840℃, 应变率分别为 0.001s^{-1} , 320s^{-1} , 800s^{-1} 和 1350s^{-1} 下的拉伸力学行为进行了实验研究, 初步揭示了三种微观组织的 TiAl 的韧脆转变温度均随应变率的升高而升高; 三种微观组织的 TiAl 动态下的高温综合力学性能优于准静态下的性能——动载下的强度均明显高于静载下的强度, 且呈现出“高温高速韧”的特性。TiAl 有可能成为一种抗冲击的高温结构材料。

关键词: TiAl 金属间化合物; 高应变率; 高温; 力学行为

中图分类号: O347.3

文献标识码: A

0 引言

TiAl 金属间化合物以其密度小、比模量高、比强度高以及在高温下良好的强度稳定性等特点引起了广大科研工作者和工程技术人员的关注。但是由于其室温脆性大、加工性能差, 严重影响了其在工业上的广泛应用^[1-3]。近几十年来, 通过微合金化以及相应的复合热机械处理工艺使得 TiAl 金属间化合物的塑性和强度均有所提高, TiAl 金属间化合物的发展已步入实用化研究阶段^[4-6]。

尽管对 TiAl 金属间化合物在不同温度下的力学行为的研究开展已久, 但大多集中在不同温度准静态加载下的力学行为研究上, 而有关 TiAl 在不同温度动态加载下的力学行为的研究相对较少, 尤其在动态拉伸下的力学行为研究方面。Y. Wang 和 D. Lin (T. L. Lin)^[7,8]与夏源明和周元鑫^[8]合作, 在旋转盘式间接杆—杆型冲击拉伸试验机上对两种片层组织的 TiAl 进行了室温下的冲击拉伸试验; 试验结果表明片层组织的 TiAl 在冲击拉伸载荷下完全是脆性断裂且呈现出“高速韧”的特性。Z. M. Sun^[9]利用类似于中应变率试验机的装置对双态组织的 Ti-45Al-1.6Mn 在室温下进行了最高应变率为 300s^{-1} 的拉伸试验, 并与准静态试验结果进行了对比。结果表明, 材料的强度总体上是随应变率的上升而提高, 但是在高应变率范围内强度的应变率相关性并不明显。M. Shazly 等^[10,11]在 SHTB 装置上对近片层组织的 Gamma-Met PX(德国 GKSS 制备的一种 Ti-45Al-X 金属间化合物, 其中 X 指 Nb, B 或者 C)在不同温度下进行了初步的冲击拉伸试验。该试验还存在诸多问题, 宏观应力—应变曲线中存在的非本构的抖动, 材料没有进入一个恒定应变率变形阶段, 试件试验段的温度无法精确测试等。

本文对等轴(NG), 近片层(NL)和双态(DP)组织的 Ti-46.5Al-2Nb-2Cr 在室温至 840℃, 应变率分别为 0.001s^{-1} , 320s^{-1} , 800s^{-1} 和 1350s^{-1} 下的拉伸力学行为进行了研究, 以揭示温度、应变率和微观

* 收稿日期: 2008-08-04; 修订日期: 2008-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 批准号: 90505002

通讯作者: 夏源明(1942—), 男, 教授。研究方向: 复合材料力学和冲击动力学。E-mail: ymxia@ustc.edu.cn

组织对 TiAl 高温动态力学行为的影响。

1 材料和试验

本文所研究的 TiAl 是通过铸锭变形合金冶金工艺制备的。铸锭首先在 1250℃ 125MPa 下进行了 3 小时的热等静压处理(HIP),然后在 1250℃下退火 8 小时,接着通过控制后续的包套锻和热处理工艺(图 1),获得了 NG、NL 和 DP 组织的 TiAl。三种组织的 TiAl 的金相照片如图 2 所示。

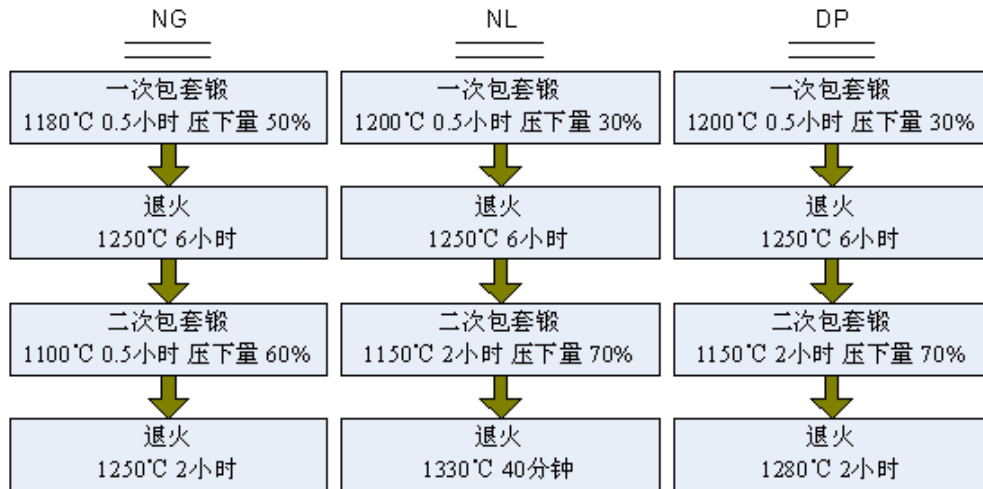


图 1 三种典型组织的包套锻复合热机械处理工艺

Fig. 1 Diagram of canned forging heat treatment of three typical microstructures

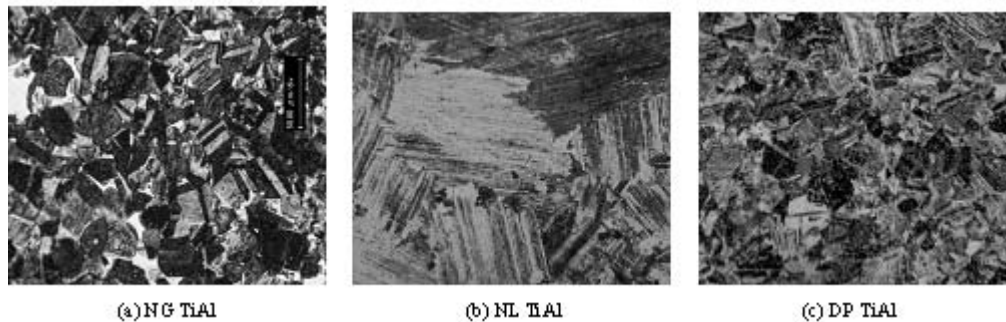


图 2 NG、NL 和 DP 组织的 Ti-46.5Al-2Nb-2Cr 的金相照片($\times 1000$)

Fig. 2 Optical images of NG, NL and DP Ti-46.5Al-2Nb-2Cr

在旋转盘式间接杆—杆型冲击拉伸装置上^[12,13]对上述三种组织的 TiAl 进行了室温至 840℃ 应变率为 320s^{-1} , 800s^{-1} 和 1350s^{-1} 下的冲击拉伸试验;同时还在 MTS 809 材料试验机上对相应温度下应变率为 0.001s^{-1} 下三种组织的 TiAl 的进行了准静态拉伸试验。

2 试验结果与分析

图 3 给出了 NG TiAl 在不同温度和不同应变率下的真应力—真应变曲线,可以看出动载和静载下 NG TiAl 的力学行为有着明显的差异。图 3(a)中 NG TiAl 在准静态不同温度下的曲线中可以看出,当温度低于 750℃ 时,材料的塑性应变都非常的小;而当温度高于 750℃ 时,材料的塑性应变明显增加;当温度达到 950℃ 时,材料出现了明显的温度软化现象。按 Wang 的定义,韧脆转变温度(BDTT)是材料的塑性达到 7.5% 时的温度^[14,15],因此 NG TiAl 的 BDTT 介于 750℃~840℃ 之间。而在图 3(b)~(d)中 NG TiAl 在高应变率不同温度下的曲线中,当温度达到了试验所能达到的最高温度 840℃ 时,材料的塑性仍不足 4%,即仍没有发生韧脆转变。据此可以推断在高应变率拉伸加载条件下,NG TiAl 的 BDTT 应高于 840℃,即高于准静态下的 BDTT。若按 F. Appel^[16,17] 和 Wang^[14,15,18] 的结论——不同微

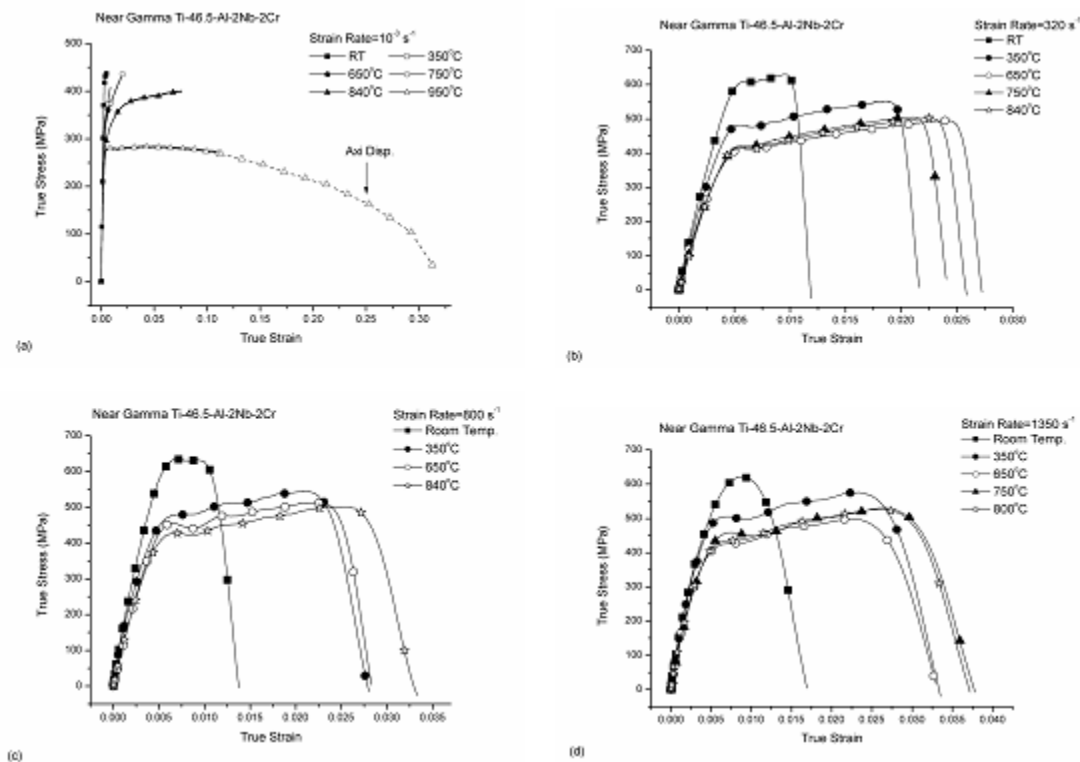


图 3 NG TiAl 在不同应变率下不同温度的真应力—真应变曲线 (a) 0.001s^{-1} , (b) 320s^{-1} , (c) 800s^{-1} , (d) 1350s^{-1}

Fig. 3 True stress-true strain curves of NG TiAl under different temperatures and strain rates

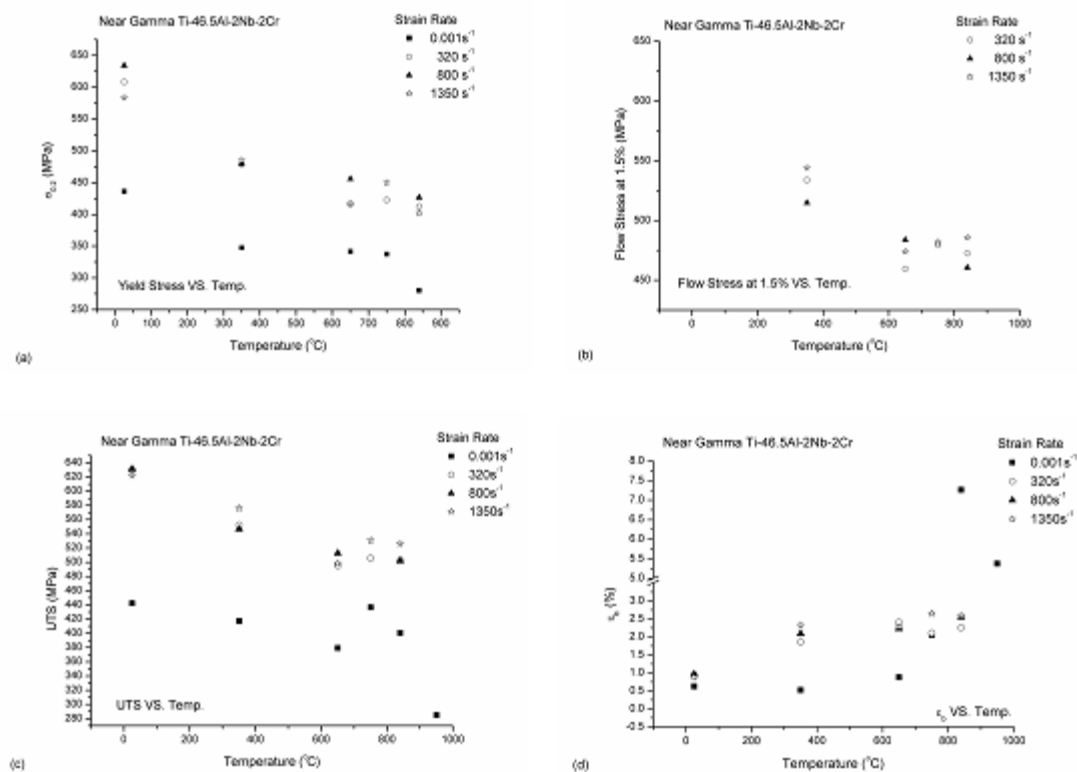


图 4 NG TiAl 在不同应变率下 (a) $\sigma_{0.2}$, (b) $\sigma_{1.5}$, (c) σ_b 和 (d) ϵ_b 的温度相关性

Fig. 4 Temperature dependence of (a) $\sigma_{0.2}$, (b) $\sigma_{1.5}$, (c) σ_b and (d) ϵ_b of NG TiAl

观组织 TiAl 的 BDTT 在准静态范围内随应变率的增加而上升, NG TiAl 的 BDTT 在准静态至动态加载范围内也可能随应变率的增加而升高。另外, 在本文的高应变率范围内 NG TiAl 的硬化率无明显的温度和应变率相关性, 且均为线性硬化。

对获得的真应力—真应变曲线进行二次处理, 可得到 $\sigma_{0.2}$ 、流动应力 $\sigma_{1.5}$ (与 1.5% 应变对应的应力)、 σ_b 和 ϵ_b 与温度和应变率相关性图 (如图 4 和图 5 所示), 图中不包含 $\epsilon_b < 1.5\%$ 时的情况。从图中可以看出, NG TiAl 在动载下的强度明显高于静载下的强度, 而在本文动态加载范围内 ($320\text{s}^{-1} \sim 1350\text{s}^{-1}$), 强度却随应变率的上升而无明显的变化; 同时, 高温下材料的塑性随应变率的上升略有提高 (图 5(d)), 材料呈现“高温高速韧”。总体上, 无论是准静态加载还是动态加载, 材料的强度随温度的上升是下降的; 只是在某一温度范围内, 材料的强度随温度的上升几乎无明显的变化。尽管在动载下当温度达到最高测试温度 840°C 时材料仍没有发生韧脆转变, 但可以推断当温度更高的时候, 材料总会发生韧脆转变, 本文定义此时发生韧脆转变的温度为 BDTT_D , 而与之对应的准静态加载下的韧脆转变温度为 BDTT_Q 。由此, 图 6 中给出了不同温度和不同应变率下屈服强度的温度相关性曲线。从图 6 中可以发现, 无论动载还是静载, 屈服强度的温度相关性曲线都被“特征温度”和“韧脆转变温度”划分为三个区域——在 I 和 III 区, 屈服强度随温度的上升而下降; 而在 II 区, 屈服强度几乎不随温度的上升而变化。由于 $\text{BDTT}_D > \text{BDTT}_Q$, 因此动载下的 II 区温度跨距要明显的大于准静态加载下的 II 区温度跨距, 即动态 II 区范围要大于准静态 II 区范围, 也即动强度基本保持不变的温度范围要大于静强度的温度范围。上述规律对 $\sigma_{1.5}$ 亦成立。此外, 在动载下未发现 G. T. Gray 等^[19-23] 在高温冲击压缩试验中所发现的屈服/流动应力的明显的温度反常现象。总体而言, 材料动态下的高温综合力学性能优于准静态下的性能。

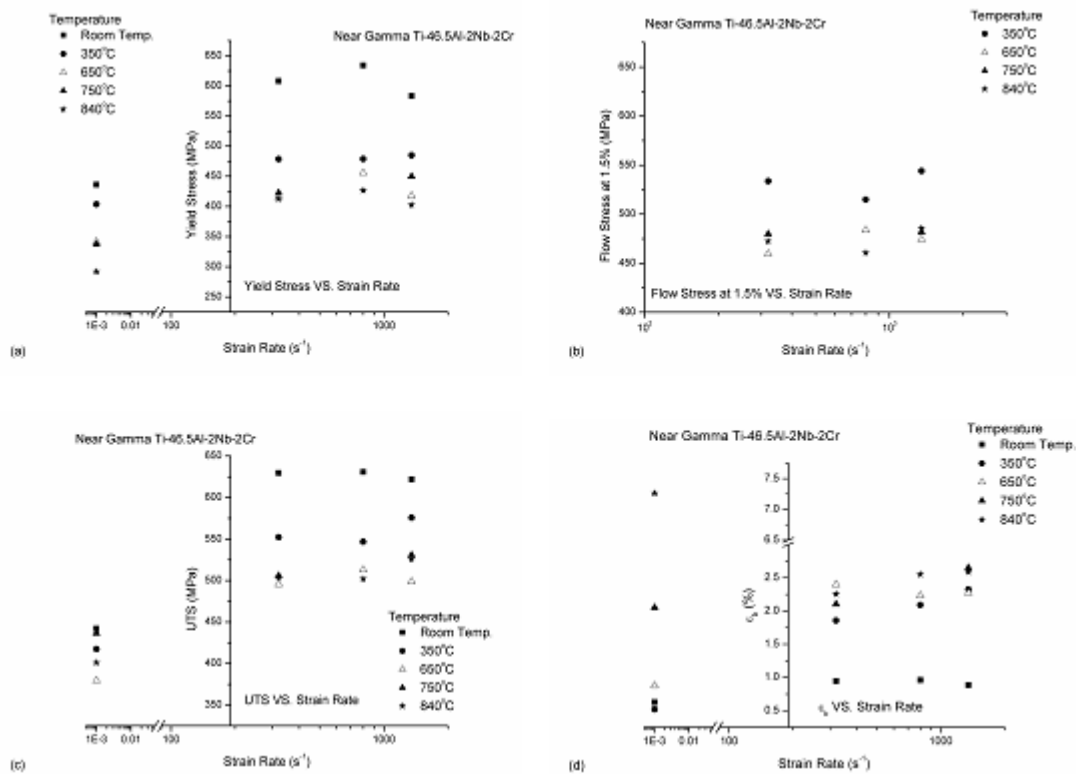


图 5 NG TiAl 在不同温度下 (a) $\sigma_{0.2}$, (b) $\sigma_{1.5}$, (c) σ_b 和 (d) ϵ_b 的应变率相关性

Fig. 5 Strain rate dependence of (a) $\sigma_{0.2}$, (b) $\sigma_{1.5}$, (c) σ_b and (d) ϵ_b of NG TiAl

图 7 和图 8 分别给出了 NL TiAl 和 DP TiAl 在不同温度和不同应变率下的真应力—真应变曲线。从图中可以看出, 上述两种组织 TiAl 和 NG TiAl 有着类似的温度和应变率相关性, 但由于篇幅所限, 本文没有给出上述两种组织 TiAl 的温度和应变率相关性曲线。准静态下 NL TiAl 和 DP TiAl 的

BDTT 分别介于 $950^{\circ}\text{C} \sim 1050^{\circ}\text{C}$ 和 $800^{\circ}\text{C} \sim 840^{\circ}\text{C}$ 之间,且两种组织 TiAl 的强度的温度相关性曲线中的“特征温度”均为 500°C 。由此可见,随微观组织中片层晶粒含量的增加,由 NG 至 DP 再至 NL,准静态下的 BDTT 是不断增加的。同时,随微观组织中片层晶粒含量的增加(NG $\rightarrow$ DP $\rightarrow$ NL),三种组织的 TiAl 的真应力—真应变曲线的屈服点越来越不明显,且材料的硬化段也越来越偏离线性;这很可能是由于高温时片层晶粒间晶界滑移所引起的。总体而言,DP TiAl 的综合力学性能是三种微观组织材料中最好的。

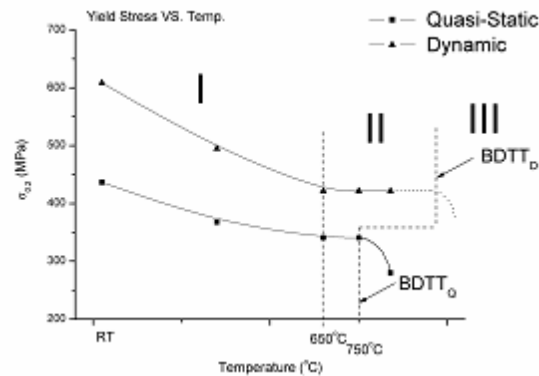


图 6 NG TiAl 准静态和动态加载下屈服应力的温度相关性示意图

Fig. 6 Diagram of temperature dependence of yield strength of NG TiAl under high strain rate and quasi-static loadings

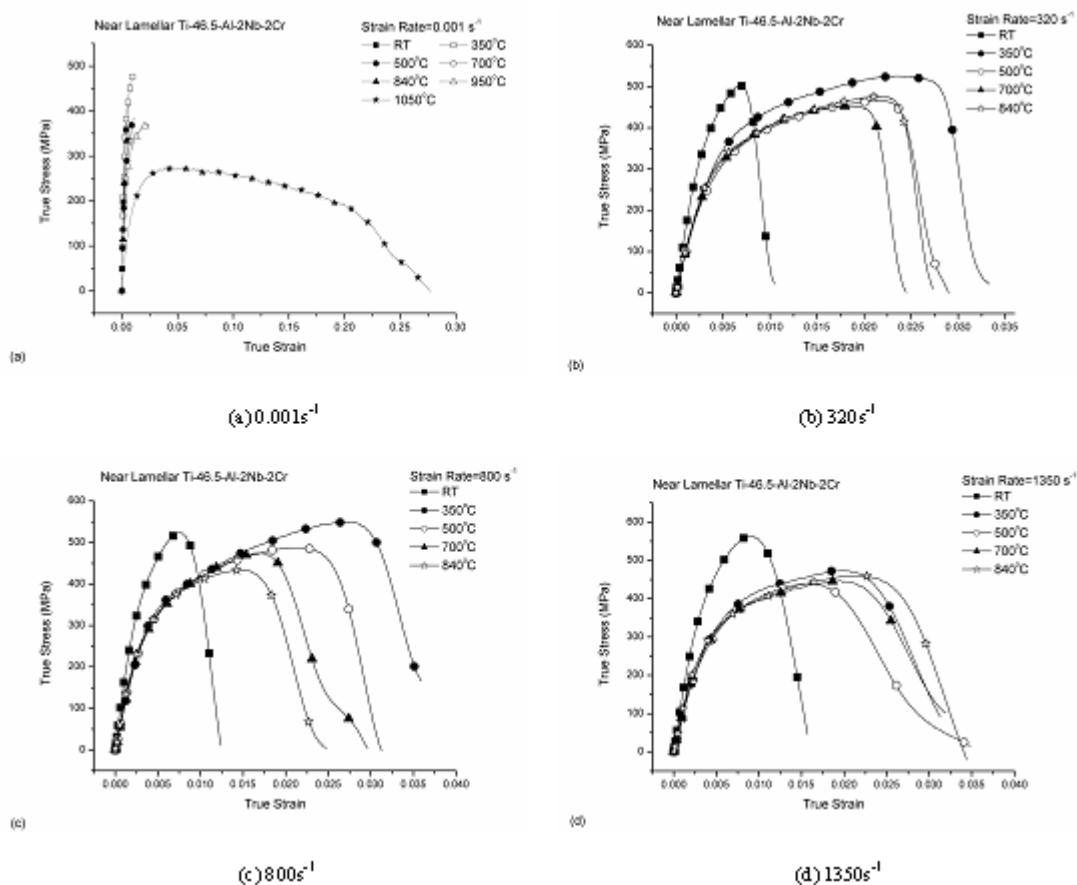


图 7 NL TiAl 在不同应变率下不同温度的真应力—真应变曲线

Fig. 7 True stress-true strain curves of NL TiAl under different temperatures and strain rates

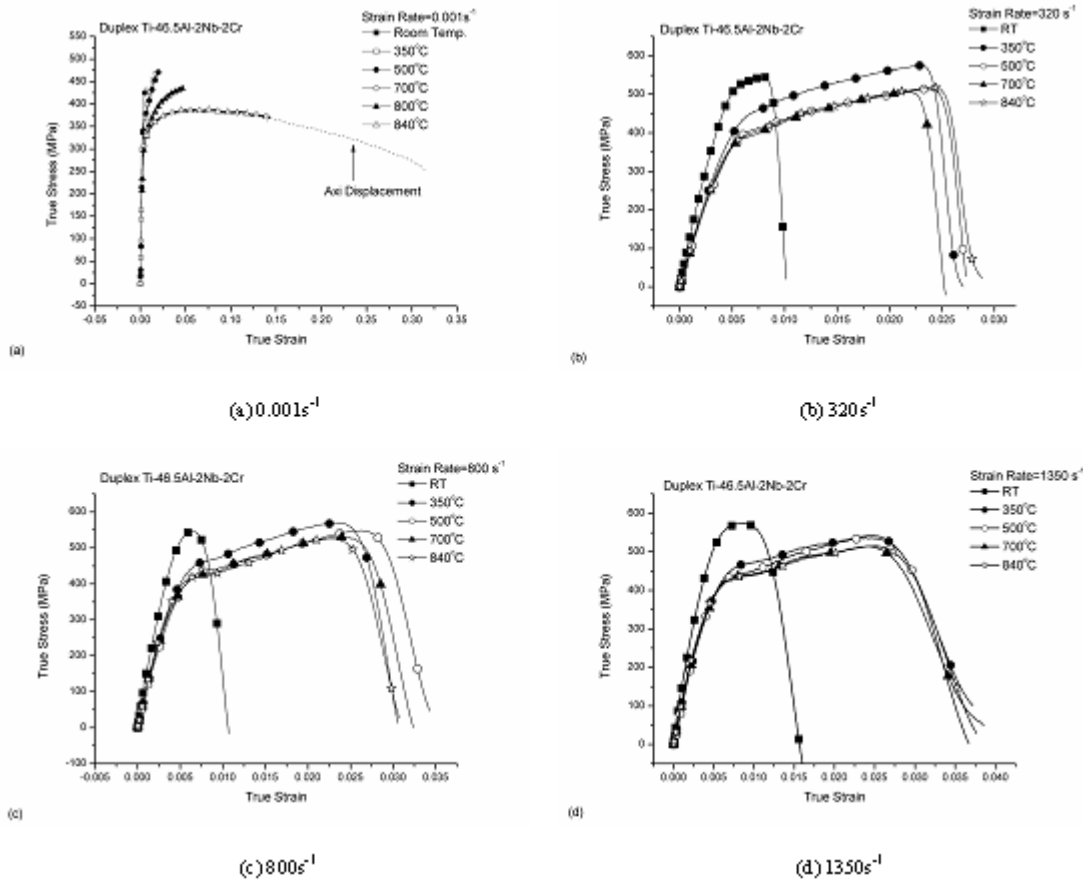


图 8 DP TiAl 在不同应变率下不同温度的真应力—真应变曲线

Fig. 8 True stress-true strain curves of DP TiAl under different temperatures and strain rates

3 结论

三种微观组织的 Ti-46.5Al-2Nb-2Cr 均是温度和应变率相关的:

(1) 三种微观组织 TiAl 的 BDTT 均随应变率的增加而升高;

(2) 无论是准静态加载还是动态加载,三种微观组织 TiAl 的强度的温度相关性曲线均被一“特征温度”(NG TiAl 约为 650°C,其它两种组织的 TiAl 约为 500°C)和“韧脆转变温度”划分为三个区域,且动强度不随温度上升而变化的温度范围要大于静强度的温度范围。总体上动强度高于静强度,但在本文的高应变率范围内(320s⁻¹~1350s⁻¹)动强度自身的应变率相关性不大。

(3) 当温度低于 BDTT 时,在相同温度下动态的 ϵ_b 均大于准静态的 ϵ_b ,但在高应变率加载范围内(320s⁻¹~1350s⁻¹)强度和 ϵ_b 随应变率的变化并不明显,材料呈现“高温高速韧”。结合结论(2)可以看出,材料动态下的高温综合力学性能优于准静态下的;这意味着 TiAl 有可能成为一种抗冲击的高温结构材料。

(4) 三种微观组织 TiAl 在动态加载范围内(320s⁻¹~1350s⁻¹)的硬化率均可看成与温度和应变率无关。

(5) 随组织中片层晶粒含量的增加(NG→DP→NL),三种微观组织 TiAl 准静态下的 BDTT 逐渐升高;高应变率下真应力—真应变曲线中的屈服点逐渐不明显,同时硬化段也逐渐偏离线性。

参考文献:

- [1] Kim Y-W. Intermetallic alloys based on gamma titanium aluminide [J]. JOM, 1989, 41: 24—30.
- [2] Kim Y-W, Dimiduk D M. Progress in the Understanding of Gamma Titanium Aluminides [J]. JOM, 1991, 43: 41

- 47.
- [3] Kim Y-W. Ordered Intermetallic Alloy, Part III: Gamma Titanium Aluminides [J]. JOM, 1994, 46: 30—39.
- [4] 张俊红, 黄伯云, 贺跃辉等. TiAl 基金板材制备技术的发展现状[J]. 材料导报, 2002, 16(2): 16—18 (ZHANG Junhong, HUANG Boyun, HE Yuehui et al. Development of Technologies for manufacturing TiAl Based Alloy Sheets. Materials Review, 2002, 16(2): 16—18 (in Chinese))
- [5] Das G, Kestler H, Clemens H, et al. Sheet gamma TiAl: Status and opportunities [J]. JOM, 2004, 56(11): 42—45.
- [6] Kestler H, Eberhardt N, Knippscheer S. Some Aspects on Production of Wrought (TiAl) Based Components for Transportation [C]. in International Symposium on Niobium for High Temperature Applications. 2004: Araxa, MG; Brazil.
- [7] Wang Y, Lin D, Zhou Y X, et al. Dynamic tensile properties of Ti-47Al-2Mn-2Nb alloy [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(3): 509—513.
- [8] Zhou Y X, Xia Y M. Tensile mechanical behavior of TiAl(FL) at high strain rate [J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(4): 925—929.
- [9] Sun Z M, Kobayashi T, Fukumasu H, et al. Tensile Properties and Fracture Toughness of a Ti-45Al-1.6Mn Alloy at Loading Velocities of up to 12m/s [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29: 263—277.
- [10] Shazly M, Prakash V, Draper S. Mechanical behavior of Gamma-Met PX under uniaxial loading at elevated temperatures and high strain rates [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41: 6485—6503.
- [11] Shazly M. Dynamic Deformation and Fracture of Gamma-Met PX at Room and Elevated Temperatures [D]. in Dept. of Mech. and Aero. Eng. 2005, Case Western Reserve University.
- [12] 管祥, 陈晓宏, 黄文等. 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, et al. Rapid-contact Heating Technique in Tensile Impacts at Elevated Temperatures. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3): 321—327 (in Chinese))
- [13] Huang W, Zan X, Nie X, et al. Experimental study on the dynamic tensile behavior of a poly-crystal pure titanium at elevated temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 443(1-2): 33—41.
- [14] Wang Y, Lin D, Law C C. Brittle-to-ductile transition temperature and its strain rate sensitivity in a two-phase titanium aluminide with near lamellar microstructure [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(13): 3155—3159.
- [15] Wang Y, Lin D, Law C C. The effect of boron addition on brittle-to-ductile transition temperature and its strain rate sensitivity in gamma titanium aluminide [J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(12): 3083—3087.
- [16] Appel F, Wagner R. Microstructure and deformation of two-phase -titanium aluminides[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 1998, 22(5): 187—268.
- [17] Clemens H, Glatz W, Appel F. Tensile properties and strain rate sensitivity of Ti-47Al-2Cr-0.2Si sheet material with different microstructures [J]. Scripta Materialia, 1996, 35(3): 429—434.
- [18] Lin D L, Wang Y, Liu J L, et al. The effects of temperature, strain rate and minor boron on tensile properties of wrought Ti-47Al-2Mn-2Nb alloy [J]. Intermetallics, 2000, 8(5-6): 549—558.
- [19] Maloy S A, Gray III G T. High Strain Rate Deformation of Ti-48-2Nb-2Cr in the Duplex Morphology [C]. in Gamma Titanium Aluminides, 1995: 307—314.
- [20] Maloy S A, Gray III G T. High strain rate deformation of Ti48Al2Nb2Cr[J]. Acta Materialia, 1996, 44(5): 1741—1756.
- [21] Jin Z, Cady C, Gray III G T, et al. Mechanical response and microcrack formation in a fine-grained duplex TiAl at different strain rates and temperatures [C]. in Deformation and Fracture of Ordered Intermetallic Materials. 1996, TMS: Cincinnati, Ohio.
- [22] Vaidya R U, Jin Z, Cady C, et al. A comparative study of the strain rate and temperature dependent compression behavior of Ti-46.5Al-3Nb-2Cr-0.2W and Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo intermetallic alloys [J]. Scripta Materialia, 1999, 41(6): 569—574.
- [23] Jin Z, Cady C, Gray III G T, et al. Mechanical Behavior of a Fine-Grained Duplex Gamma-TiAl Alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31: 1007—1016.

Experimental Study of Ti-46.5Al-2Nb-2Cr with Three Different Microstructures under Elevated Temperatures and High Strain Rate

ZAN Xiang¹, WANG Yang¹, XIA Yuan-ming¹, HE Yue-hui²

(1. Department of Modern Mechanics, CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science & Technology of China, Hefei 230027; 2. State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: The tensile behavior of Ti-46.5Al-2Nb-2Cr with near gamma (NG), near lamellar (NL) and duplex (DP) microstructures were investigated in temperature ranging from room temperature to 840°C and under strain rates of 0.001, 320, 800 and 1350s⁻¹ respectively. Results show that the brittle to ductile transition temperature of all TiAls increases with the strain rate increase. The comprehensive mechanical behavior of all TiAls under high strain rate loading is better than those under quasi-static loading, including the strength and plastic deformation. TiAl may become a structural material that is capable of suffering both high temperature and impact loading.

Keywords: TiAl intermetallics; high strain rate; elevated temperatures; mechanical behavior