

温度对 U-5.7Nb 合金动态压缩力学性能影响研究

肖大武, 何立峰, 邱志聪, 邹东利

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621700)

摘 要: 利用 Hopkinson 杆装置开展了-100~400 °C 较宽温度范围下 U-5.7Nb 合金的动态压缩变形行为研究, 结果表明: U-5.7Nb 合金的压缩性能对温度和应变率较为敏感。随实验温度升高, 屈服应力迅速下降, 下降速率约为 2 MPa/°C, 而加工硬化行为基本不变, 当温度升高至 200 °C 以上时, 静态应力~应变曲线形态由“双屈服”转变为“单屈服”; 随应变率提高, 屈服应力及去孪生引起的硬化模量均明显增大。最后, 结合金相分析结果讨论了 400 °C 时静态力学曲线分歧的来源。

关键词: U-5.7Nb 合金; 温度; 应变率; 动态压缩

中图分类号: TG146.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)01-0363-04

U 及 U 合金具有优异的核性能及机械性能, 因此在核工业及能源领域中得到了广泛应用。为了进一步提高其塑性及抗腐蚀性能, 通常会在金属铀中加入铌进行合金化。U-Nb 合金(5%~8%Nb, 质量分数)的力学性能对温度极其敏感, 变形行为极其复杂, 具有形状记忆效应, 其独特的形变行为及显微结构也引起了国内外学者的广泛兴趣, 相关的研究方向包括了相变特性、形状记忆机制^[1,2]、时效行为等^[3]。在温度、应变率相关的变形行为方面研究报道较少, 主要是由 Los Alamos 实验室的 Cady 研究小组完成的^[4-7]。他们比较研究了铌含量对 U-Nb 合金常温至 600 °C 下的静态压缩力学性能, 结果表明铌含量对 U-Nb 合金力学响应有显著影响, 铌含量 4% 时强度最高, 硬化最显著, 动态压缩下 U-6Nb 合金加工硬化行为随温度变化不大, 在 400 °C 时, 其应力~应变曲线由“双屈服”特征转变为“单屈服”特征。而在准静态时, 200 °C 就发生了类似的转变, 且在 400 °C 时, 屈服强度迅速增大, 甚至远高于常温下的数值, 且随应变增大呈现为热软化特征, 其对于屈服强度的反常行为认为可能是由于时效与动态应变时效的双重作用导致的。随后, Cady 等人还对锻态和铸态两种状态的 U-6Nb 合金力学性能进行了比对分析, 结果显示两种状态的 U-6Nb 合金尽管初始的微观金相组织差异明显, 但最终表现出的静态力学性能基本一致。本实验拟利用 Hopkinson 杆装置开展温度、应变率对 U-5.7Nb 合金压缩力学性能

的影响研究, 结合微观组织分析手段, 进一步讨论分析温度、应变率对 U-5.7Nb 合金变形机制的影响。

1 实 验

静态压缩试验在配备高温真空炉的万能材料试验机上进行。动态压缩试验在 $\Phi 16$ mm 的 Hopkinson 杆装置上进行, 实验的详细设计及分析方法见文献[8]。进行高温实验时的样品受热时间控制在 5 min 内, 同时充入惰性气体避免样品发生高温氧化。低温动态实验中采用增压液氮喷射制冷方式实现低温环境。静态压缩试样的尺寸均为 $\Phi 5$ mm \times 5 mm, 准静态压缩应变率为 5×10^{-4} s⁻¹, 动态压缩应变率范围 $0.6\times 10^3\sim 8.0\times 10^3$ s⁻¹。试验样品的显微组织及析出相由金相, 扫描电镜及能谱仪进行观察和分析。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

室温下 U-5.7Nb 合金是由单斜的 α'' 相组成, α'' 相室温下为板条状马氏体组织, 随着实验温度升高, 合金的微观结构逐渐由 α'' 相向 γ^0 相和 γ 相过渡, 其变形曲线也由“双屈服”向一般弹塑性金属的“单屈服”过渡。图 1 为室温下 U-5.7Nb 合金的应力-应变曲线示意图, 其力学曲线呈现为“双屈服”特征, 为了更好地分析其变形行为与温度和应变率的相关性, 将其分为 4 个不同特征的变形区域。如图 1 中所示, 应力低于

收稿日期: 2017-01-01

基金项目: 国防科技重点实验室基金(9140C660201140C66275); 中国工程物理研究院科学发展基金(2014B0301046, 2015B0301066)

作者简介: 肖大武, 男, 1983 年生, 博士, 副研究员, 中国工程物理研究院材料研究所, 四川 绵阳 621700, 电话: 0816-3626742, E-mail: hopkinson@163.com

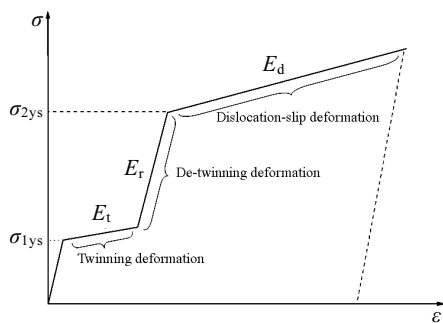


图 1 U-5.7Nb 合金室温变形行为示意图

Fig.1 Scheme of the stress-strain diagram of U-5.7Nb alloy at room temperature

第 1 屈服点 σ_{1ys} 时为初始弹性变形阶段；第 2 阶段由孪生变形控制，随着应力升高，马氏体板条内部形成高密度的孪晶，用 E_t 描述其宏观变形特征；第 3 阶段为晶体方向调整（或去孪生）而引发材料变形的区域，在应力作用下马氏体板条之间细小孪晶变体发生界面移动，孪晶组织长大，相互吞并，用 E_r 描述其宏观变形特征；当应力增大至高于第 2 屈服点 σ_{2ys} 时，进入第 4 个变形阶段，由位错滑移控制的塑性变形区，用 E_d 描述其加工硬化行为。

不同温度下获得的 U-5.7Nb 合金动态压缩力学曲线如图 2 所示，其中图 2a~图 2c 分别为高温下的静态、动态压缩曲线和低温动态压缩实验结果，从图中可以看到，U-5.7Nb 合金表现出较强的温度相关性和应变率敏感性。高温下的实验结果显示，随实验温度的升高，材料的屈服应力总体明显呈下降趋势，准静态和动态压缩曲线在温度高于 200 °C 时，均由常温时的“双屈服”形态转变为一般金属材料的弹塑性变形态，而温度升高至 400 °C 时，静态力学曲线出现明显分

歧，静态压缩曲线的应力值异常升高，而动态曲线的应力值随温度的升高进一步降低。此外，比较静态实验数据可知，随变形应变率提高，第 1 屈服点 σ_{1ys} 和第 2 屈服点 σ_{2ys} 应力值明显升高。在低温下，U-5.7Nb 合金的力学曲线形态与常温一致，仍为“双屈服”形态，随温度降低，屈服应力均显著提高。

图 3 展示了温度、应变率对 U-5.7Nb 合金不同变形阶段屈服应力、加工硬化行为参数的影响。由图 3a 中分析结果可知，随温度升高，动态载荷下 U-5.7Nb 合金初始变形阶段启动的孪晶临界分切应力与塑性变形阶段位错滑移驱动力降低，对应的屈服应力 σ_{1ys} 和 σ_{2ys} 均呈明显下降趋势，两者下降斜率相近，约为 2 MPa/°C。温度高于 200 °C 时，则屈服应力变化不明显，这可能是时效硬化导致的。相比而言，不同变形阶段下的模量 E_t 、 E_r 和 E_d 等参数基本不随温度变化而改变。图 3b 中的结果显示，屈服应力随应变率升高逐步提升，尤其是第二屈服应力 σ_{2ys} 在应变率高于 10^3 s^{-1} 后快速增大。高应变率下材料内部形成的孪晶密度也更高，新的孪晶生成使其形核能增加，当孪晶长大合并时，孪晶界面移动又会使位错与孪晶界之间相互作用能和原子协同运动的摩擦阻力增加，从而导致高应变率下模量 E_t 和 E_r 增大，尤其是 E_r 上升趋势更明显，进入塑性变形区后，孪晶界面阻碍了位错滑移从而使应力值增大。

2.2 微观分析

为了进一步分析图 2 中高温下静动态力学曲线分歧的来源，对未变形的原始样品和 400 °C 下的静动态回收试样进行了微观分析。沿压缩方向将试样剖开，经机械抛光、蚀刻后在激光共聚焦显微镜下观察，分析结果如图 4 所示。

由图 4 可以看到，与原始试样的金相组织相比，400 °C 下的动态回收样中晶粒观察不到明显变化，而

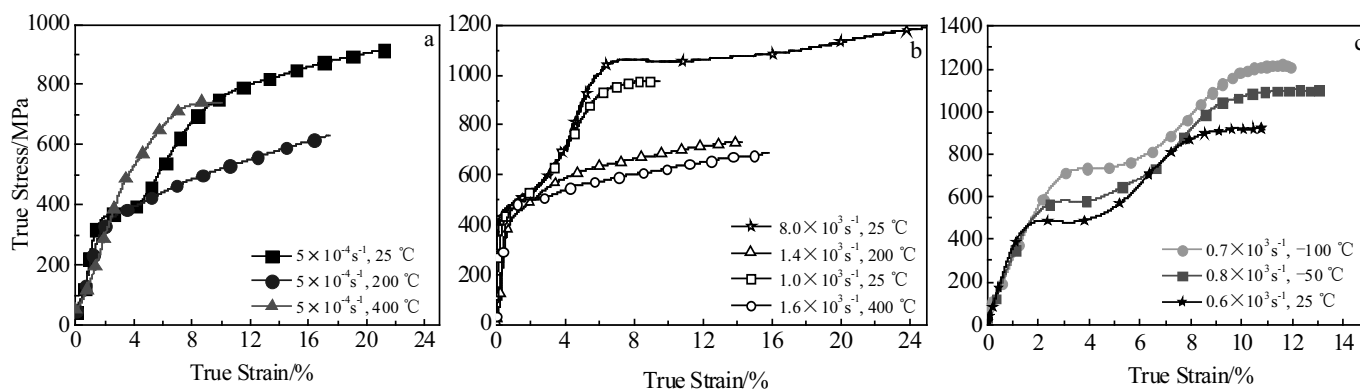


图 2 不同温度下 U-5.7Nb 合金的压缩力学行为

Fig.2 Mechanical behavior of U-5.7Nb alloy at different temperatures: (a) the stress-strain curves at high temperatures under quasi-static; (b) the stress-strain curves at high temperatures under dynamic loading; (c) the stress-strain curves at low temperatures under dynamic loading

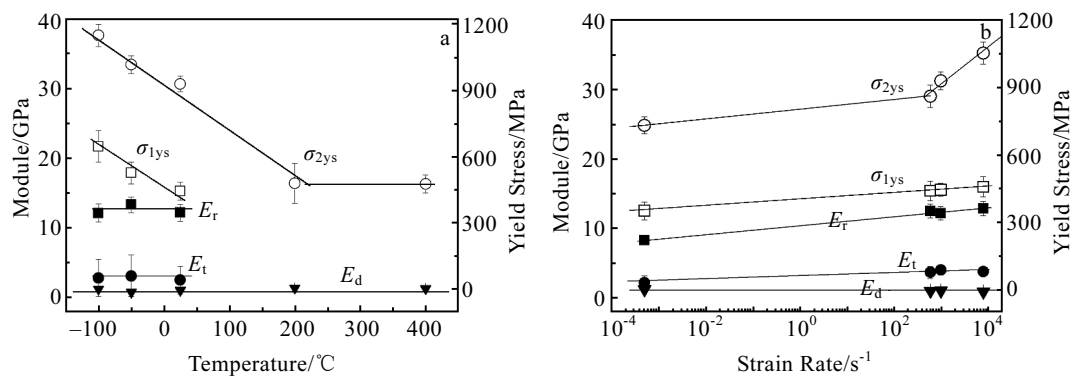


图 3 U-5.7Nb 合金压缩性能随温度和应变率的变化规律

Fig.3 Temperature and strain rate dependences of the mechanical parameters of U-5.7Nb alloy: (a) the effect of temperature on the mechanical properties at a strain rate of 10^3 s^{-1} and (b) the effect of strain rate on the mechanical properties at room temperature

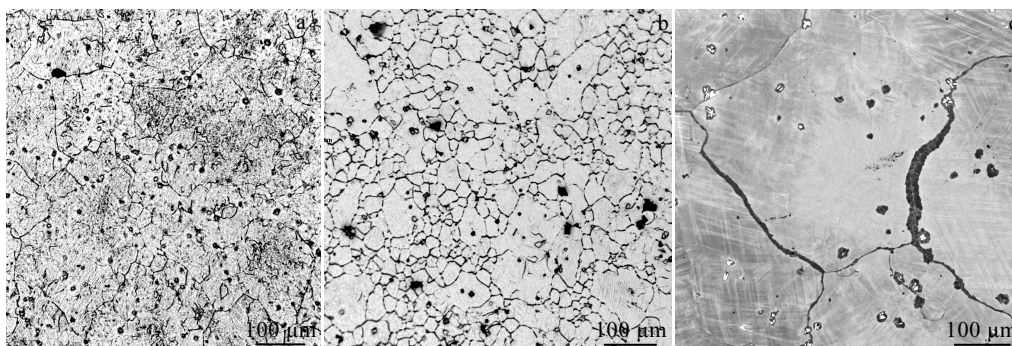


图 4 金相分析结果

Fig.4 OM images of the recovered specimens of U-5.7Nb alloy: (a) the microstructure of the original sample, (b) the microstructure of the recycled sample after dynamic compression, and (c) the microstructure of the recycled sample after quasi-static compression

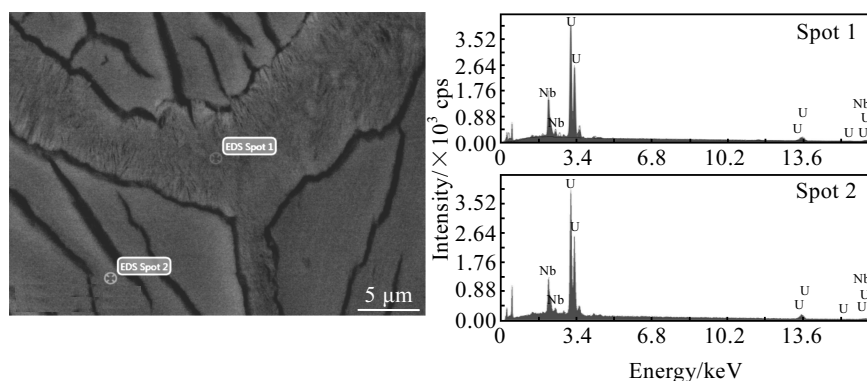


图 5 U-5.7Nb 合金回收样 SEM 及 EDS 分析结果

Fig.5 SEM image and EDS spectra of the recovered specimens of U-5.7Nb alloy

静态回收样中, 晶粒尺寸显著增大, 同时样品内部一部分晶界发生了分解 (深色部分)。图 5 扫描电镜分析结果显示有第二相析出, 用能谱测量基体 Nb 平均含量为 6.5%(点 2), 析出物 Nb 平均含量为 7.6%(点 1), 与该合金在低温时效研究中发现的结果类似^[9], 初始

的单斜 α'' 相分解成平衡态 $\alpha + \gamma^0$ 相, 导致了宏观力学性能表现为强度升高, 塑性下降, 这与静态高温试验中样品较长的升温时间吻合 (约 60 min, 远高于动态试验中较短的 5 min 受热时间)。

3 结 论

1) 随实验温度升高, 应力迅速下降, 不同变形阶段的硬化模量无明显变化, 200 °C 为其应力~应变曲线形态特征转变点;

2) 而随应变率提高, 屈服应力显著增大, 去孪生引起的硬化模量也随之增大。

参考文献 References

- [1] Vandermeer R A. *Overview: Constitution, Structure, and Transformation in Uranium and Uranium Alloys*, Y/DV-206[R]. Oak Ridge: Oak Ridge Y-12 Plant, 1982
- [2] Clarke A J, Field R D, McCabe R J *et al.* *Acta Mater*[J], 2008, 56: 2638
- [3] Sunwoo A J, Hiromoto D S. *J Nucl Mater*[J], 2004, 327: 37
- [4] Addessio F L, Zuo Q H, Mason T A *et al.* *J Appl Phys*[J], 2003, 93(12): 9644
- [5] Zubelewicz A, Addessio F L, Cady C M. *J Appl Phys*[J], 2006, 100(1): 013 523
- [6] Cady C M, Gray G T, Hecker S S *et al.* *Constitutive and Damage Modeling of Inelastic Deformation and Phase Transformation: Proceedings of Plasticity '99* [C]. Cancun: Neat Press, 1999
- [7] Cady C M, Gray G T, Chen S R *et al.* *9th International Conference on the Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading*[C]. Brussels: EDP Sciences Press, 2009
- [8] Xiao Dawu, Li Yinglei, Hu Shisheng *et al.* *J Mater Sci Tech*[J], 2010, 26(10): 878
- [9] Carpenter D A. *X-Ray Diffraction Study of Reversible Deformation Mechanisms in the Aged Uranium-6.5Niobium Alloy, DE85015049*[R]. Oak Ridge: Oak Ridge Y-12 Plant, 1985

Dynamic Compression Behavior of U-5.7Nb Alloy at Elevated Temperatures

Xiao Dawu, He Lifeng, Qiu Zhicong, Zou Dongli

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621700, China)

Abstract: High strain rate compression experiments of U-5.7Nb alloy were conducted at temperatures from -100 to 400 °C with split Hopkinson pressure bar apparatus. Results show that the compressive stress-strain response depends sensitively on the applied strain rate and test temperature. The yield stress of U-5.7Nb alloy is found to decrease rapidly with the increasing temperature at a rate of about 2 MPa/°C, while the work hardening rate is relatively constant. At temperatures higher than 200 °C, the shape of the stress-strain curves changes from duplex yield character to elastic-plastic character for both quasi-static and dynamic compression experiments. The hardening modulus caused by detwinning and the yield stress increase obviously with the increasing strain rates. Finally, the divergency of the low- and high-rate deformation curves at temperature of 400 °C was discussed based on the optical micrography.

Key words: U-5.7Nb alloy; temperature; strain rate; dynamic compression

Corresponding author: Xiao Dawu, Ph. D., Associate Professor, Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621700, P. R. China, Tel: 0086-816-3626742, E-mail: hopkinson@163.com