

U-Ti 合金的动态力学性能

刘婷婷¹, 张鹏程¹, 何立峰²

(1. 表面物理与化学国家重点实验室, 四川 绵阳 621907;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要:采用分段式霍普金森杆(SHPB)及材料试验机测试了3种时效状态的U-Ti合金在室温下的静动态力学曲线,采用扫描电镜分析了U-Ti合金动态压缩后的剪切断裂特征,采用XRD分析了动态压缩前后的结构变化。结果表明,3种状态的U-Ti合金都产生了应变速率强化效应;当应变速率约为 $2\ 500\ \text{s}^{-1}$ 时,U-Ti合金发生了剪切断裂;断口出现取向性的韧窝且在局部区域的韧窝非常细小,以及烧蚀变形。动态压缩使3种状态的U-Ti合金的晶粒取向改变。

关键词:动态力学;分段式霍普金森杆;剪切

中图分类号: TG115

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)12-1095-05

Dynamic Mechanical Properties of U-Ti Alloy

LIU Ting-ting¹, ZHANG Peng-cheng¹, HE Li-feng²

(1. National Key Laboratory for Surface Physics and Chemistry, Mianyang 621907, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The quasi-static and dynamic stress-strain curves of the three aged U-Ti alloys were tested respectively by mechanical equipment and split Hopkinson pressure bar at room temperature, the tensile fractures and microstructure were analyzed by SEM and XRD. The results show that the three aged U-Ti alloys are sensitive of the strain rate. Shear fractures yield in the U-Ti alloys under the strain rate about $2\ 500\ \text{s}^{-1}$. Orientated dimples and distorted deformation are found on the fractures. Dynamic compression changes the grain orientations of the aged U-Ti alloys at three different states.

Key words: dynamic mechanics; split Hopkinson pressure bar; shearing

随着现代兵器的发展,研究兵器材料在高速冲击情况下的力学响应,即研究兵器材料在高应变速率下的动态力学性能已日渐瞩目,其中,装甲防护材料及反装甲用穿甲材料的动态力学性能尤受重视。当前,在反装甲兵器领域

中,U-Ti合金因具有高强度和高密度的特点,是重要的穿甲弹弹芯材料。作为穿甲材料,其工作时的应变速率达到 $10^6\ \text{s}^{-1}$ 甚至更高。因此,U-Ti合金的动态力学性能已愈来愈为世人瞩目^[1-5]。鉴于U-Ti合金穿甲的优越性,需进

一步了解其剪切特征。在动态力学性能的研究手段方面,霍普金森杆的应用已较为成熟,它能够达到的应变速率范围为 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$,一般材料的流动应力随应变速率发生转折的应变速率通常在 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 之间(对于铀及其合金,约为 10^3 s^{-1} [6])。在这个应变速率范围内通过建立本构关系模型,可预测更高应变速率下合金的真应力-真应变关系。因此,研究 U-Ti 合金在霍普金森杆作用下的动态力学行为具有重要意义。本工作着重研究 3 种时效状态的 U-Ti 合金在冲击压缩下的应力应变关系。

1 实验

1.1 材料

U-Ti 合金试样毛坯采用感应熔炼法制备,然后在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行固溶处理后水淬。试件加工前,分别在 $200, 380, 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行 4 h 的时效处理,时效完成后加工成 $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的样品。

1.2 实验分析

采用 CMT5105 型材料试验机对不同时效状态的合金进行了准静态拉伸试验。样品选用标准拉伸样,标距 25 mm,直径 5 mm,3 种状态的 U-Ti 合金准静态力学性能列于表 1。采用 $\phi 10 \text{ mm}$ 分段式霍普金森杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)进行了动态力学性能测试,子弹的冲击压强选取为 0.4 和 0.8 MPa,测得子弹速度 v 分别为 11.6 和 16.1 m/s,通过测试入射波、反射波和透射波,并在一维假定和均匀性假定[7]的基础上,确定被测材料的应变速率和一维应力状态下的动态应力-应变关系,应变速率 $\dot{\epsilon}(t)$ 、应力 $\sigma(t)$ 和应变 $\epsilon(t)$ 的计算公式如下:

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_0}{L}(\epsilon_t - \epsilon_i - \epsilon_r) = -\frac{2C_0}{L}\epsilon_r(t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{C_0}{L} \int (\epsilon_t - \epsilon_i - \epsilon_r) dt = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = E \frac{A_0}{2A} (\epsilon_t + \epsilon_i + \epsilon_r) = E \frac{A_0}{A} \epsilon_t(t) \quad (3)$$

式中: $\epsilon_t, \epsilon_r, \epsilon_i$ 分别为入射波、反射波和透射波的应变历史; E, C_0 和 A_0 分别为压杆的杨氏模量、弹性波速和压杆的横截面积; A 和 L 分别为样品初始横截面积和初始长度。

所得 U-Ti 合金的应变速率列于表 2。

采用 Sirion-200 热场发射扫描电镜观察了动态冲击后的剪切断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 U-Ti 合金的动静态力学性能

对 3 种状态的 U-Ti 合金进行了 2 个应变速率下(2 组)动态压缩实验,每组进行 3 次,应变速率为 $1\,000 \sim 2\,800 \text{ s}^{-1}$ 。从准静态和动态压缩曲线(图 1、2)比较,U-Ti 合金动态屈服极限远大于准静态屈服极限,在应变强化的同时产生了应变速率强化效应,因此,U-Ti 合金属于应变速率敏感材料。子弹速度为 11.6 m/s 时, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时效的 U-Ti 合金产生 16% 的长度收缩; $380 \text{ }^\circ\text{C}$ 时效的 U-Ti 合金产生 13% 的长度收缩; $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时效的 U-Ti 合金产生 7% 的长度收缩。当 U-Ti 合金未发生剪切断裂时,在相同的动态压缩条件下,其准静态强度越高应变越小,应变速率也越小。子弹速度为 16.1 m/s 时,3 种状态的 U-Ti 合金沿 45° 方向剪切断裂,四周出现火光,断口周围有烧蚀现象,合金由于剪切错位,厚度大约只为原始尺寸的一半。胡时胜等[4]从动态力学的本构方程出发,研究表明在室温下铀合金的动态强度越高,其应变速率敏感程度越低。从动态曲线看,

表 1 3 种时效状态的 U-Ti 合金的准静态力学性能

Table 1 Strain rate of three aged U-Ti alloys

U-Ti 合金时效状态	编号	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	断裂强度 σ_b/MPa	延伸率 $\delta/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$	$10^{-5} E/\text{Pa}$
200 $^\circ\text{C}$ 时效 4 h	1#	690	1 044	10.6	5.8	1.75
380 $^\circ\text{C}$ 时效 4 h	2#	931	1 439	6.3	4.1	1.68
500 $^\circ\text{C}$ 时效 4 h	3#	1 069	1 428	2.2	0.4	1.83

表 2 3 种时效状态 U-Ti 合金的应变速率
Table 2 Quasi-static mechanical properties
of three aged U-Ti alloys

U-Ti 合金 时效状态	编号	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	
		$v=11.6 \text{ m/s}$	$v=16.1 \text{ m/s}$
200 °C 时效 4 h	1#	1 500	2 800
380 °C 时效 4 h	2#	1 200	2 800
500 °C 时效 4 h	3#	1 000	2 300

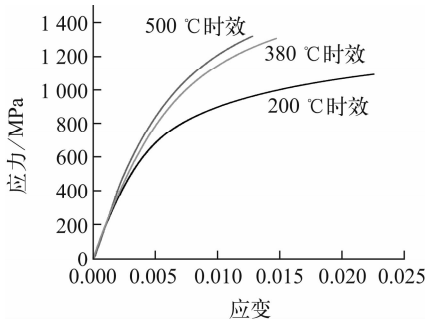


图 1 3 种时效状态的 U-Ti 合金准静态拉伸曲线
Fig. 1 Quasi-static mechanical curves
of three aged U-Ti alloys

380 °C 时效的和 500 °C 时效的 U-Ti 合金没有随着应变速率的增加动态屈服强度和流动应力也增加,即表明这两种时效状态的 U-Ti 合金存在应变速率强化效应,但对应变速率不敏感。而 200 °C 时效的 U-Ti 合金动态屈服强度较低,仍表现出良好的应变速率敏感性。

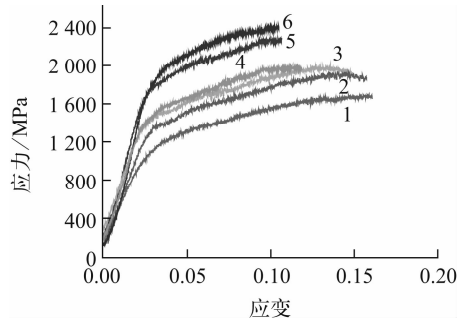


图 2 3 种时效状态的 U-Ti 合金
在不同应变速率下的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of three aged
U-Ti alloys at different strain rates
1——200 °C 时效,应变速率为 1 500 s^{-1} ;
2——200 °C 时效,应变速率为 2 800 s^{-1} ;
3——380 °C 时效,应变速率为 2 800 s^{-1} ;
4——380 °C 时效,应变速率为 1 200 s^{-1} ;
5——500 °C 时效,应变速率为 2 300 s^{-1} ;
6——500 °C 时效,应变速率为 1 000 s^{-1}

2.2 U-Ti 合金动态压缩剪切断口分析

在较高的应变速率下,U-Ti 合金发生 45° 剪切破坏(图 3a、4a、5a),断裂时,试件周围出现火光,断口边缘有明显的烧蚀现象。U-Ti 合金是对剪切敏感的材料,具有自锐化效应。200 °C 时效的 U-Ti 合金在断口上沿剪切方向有取向性的韧窝(图 3e)及在断口边缘出现烧蚀变形(图 3c、d);380 °C 时效的合金剪切断口

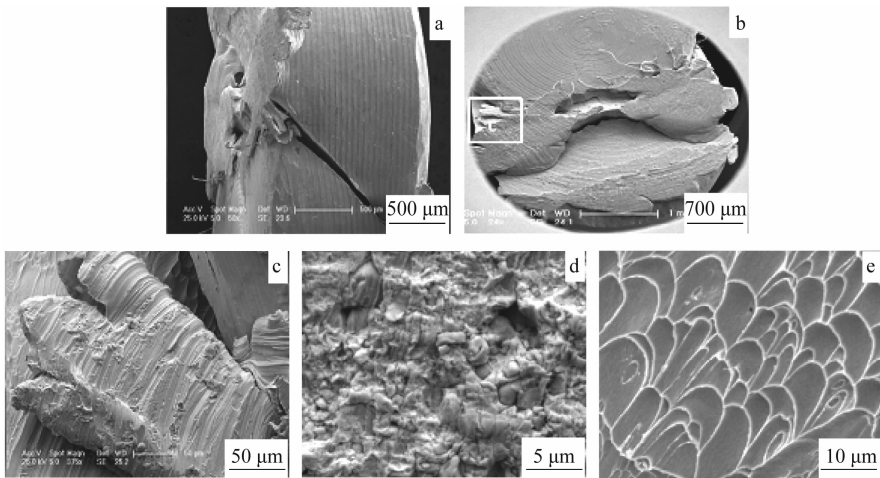


图 3 200 °C 时效的 U-Ti 合金在应变速率为 2 800 s^{-1} 时的剪切断裂形貌
Fig. 3 Shear fracture patterns of aged U-Ti alloy at 200 °C under strain rate 2 800 s^{-1}

a——侧面,平行于加载方向;b——表面,被冲击面,垂直于加载方向;
c——b 图中 C 区域的放大;d、e——剪切断口微观形貌

上也出现了韧窝(图 4d),但由于其塑性的减弱,韧窝变浅且出现平滑的区域,另外,在断口的局部区域有微韧窝(图 4e)及在断口的局部区域有大变形(图 4c);500 °C 时效的 U-Ti 合金由于其塑性的进一步降低,在剪切断口上出现大的平滑区域,只有非常浅的韧窝(图 5e)及局部的微韧窝(图 5f),断口边缘出现烧蚀变形(图 5c)和流体形态的变形(图 5d)。

2.3 压缩前、后 XRD 分析

从 XRD 图谱(图 6)分析可知,动态压缩

前、后相对峰强度发生了改变。在 2θ 为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 时包括 U-Ti 合金主要的 4 个强峰,依据 α -U 的标准谱图按峰强从高到低排列所对应的晶面依次是(021)、(110)、(111)、(002),3 种不同状态的 U-Ti 合金在室温下 XRD 谱图的最强峰所对应的(021)晶面与标准图谱一致,(110)、(111)、(002)晶面所对应的相对峰强有微小变化。在 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 左右的应变速率下最强峰和第 4 强峰产生了重叠,从标准谱图上二者的角度差可见,贡献多半来源于(002)晶面,

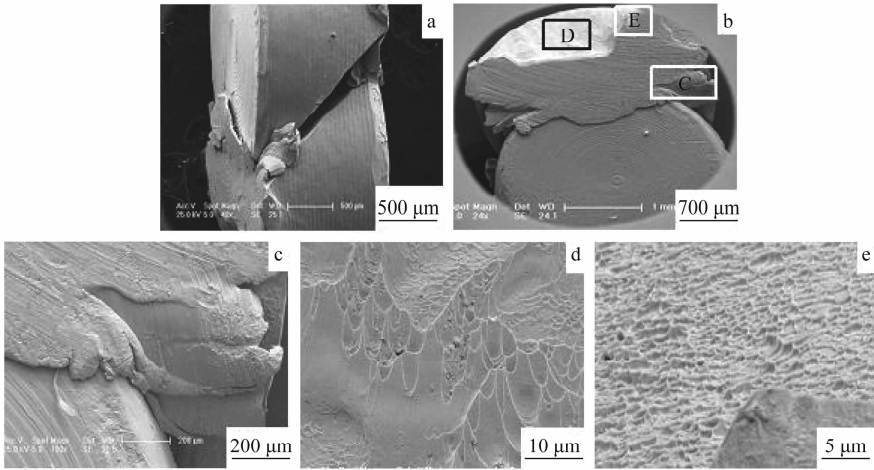


图 4 380 °C 时效的 U-Ti 合金在应变速率为 $2\ 800\ \text{s}^{-1}$ 时的剪切断裂形貌

Fig. 4 Shear fracture patterns of aged U-Ti alloy at 380 °C under strain rate $2\ 800\ \text{s}^{-1}$

a——侧面,平行于加载方向;b——表面,被冲击面,垂直于加载方向;

c——b 图中 C 区域的放大;d,e——b 图中 D,E 区域的放大,剪切断口微观形貌

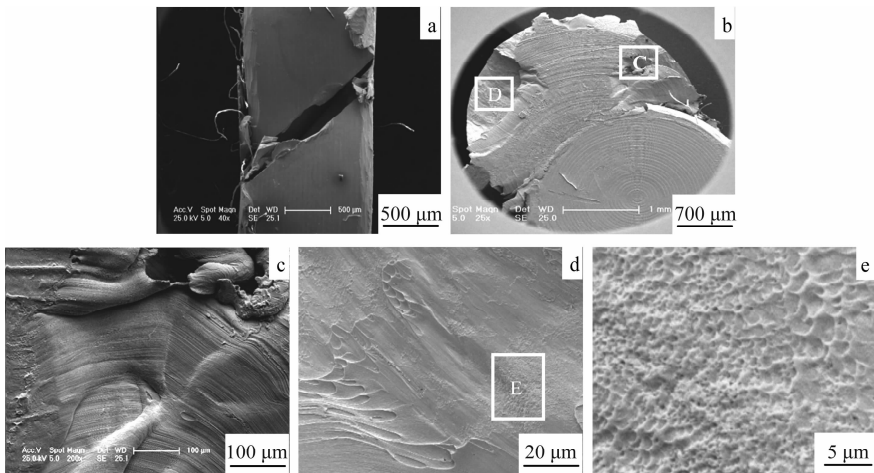


图 5 500 °C 时效的 U-Ti 合金在应变速率为 $2\ 300\ \text{s}^{-1}$ 时的剪切断裂形貌

Fig. 5 Shear fracture patterns of aged U-Ti alloy at 500 °C under strain rate $2\ 300\ \text{s}^{-1}$

a——侧面,平行于加载方向;b——表面,被冲击面,垂直于加载方向;c——b 图中 C 区域的放大;

d——b 图中 D 区域的放大,剪切断口微观形貌;e——d 图中 E 区域的放大,剪切断口的微观形貌

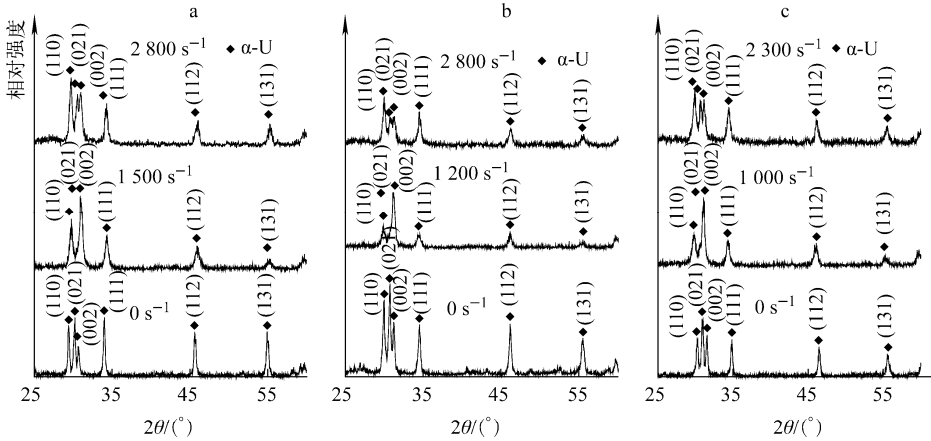


图6 不同时效的U-Ti合金在压缩前、后的XRD谱

Fig. 6 XRD patterns before and after compression of aged U-Ti at different temperatures

a—200 °C; b—380 °C; c—500 °C

即最强峰对应的晶面由(021)变成了(002)。在 $2\ 800\ \text{s}^{-1}$ 左右的应变速率下合金的最强峰对应的晶面变成了(110)，(021)、(111)、(002)晶面所对应的峰高基本相同。从4个强峰的相对强度的变化可知，动态压缩使合金的晶粒取向发生了变化，不同状态的合金在同一应变速率下的变化趋势基本一致，同一状态的合金在不同的应变速率下有所不同。

3 结论

1) 3种状态的U-Ti合金动态屈服强度远大于准静态屈服强度，都产生了应变速率强化效应。380、500 °C时效4 h的U-Ti合金随着应变速率的增加其动态屈服强度并未增加，甚至有微降，对应变速率敏感程度低。

2) 当应变速率约为 $2\ 500\ \text{s}^{-1}$ 时，U-Ti合金发生 45° 剪切破坏。断口出现取向性的韧窝，随着塑性的降低，端口愈加平滑，且韧窝越来越浅。断口边缘出现流体形态的变形和烧蚀变形。当应变速率约为 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 时，U-Ti合金表面出现沿径向分布的细的剪切纹。

3) 从 α -U 4个强峰的相对强度变化可知，动态压缩使合金的晶粒取向发生了变化，不同状态合金在同一应变速率下的变化趋势基本一致，同一状态合金在不同的应变速率下有所不同。

参考文献:

[1] NORTHUTT W G. 氢含量和应变速率对铀-

钛合金拉伸性能的影响, Y/DV-74[R]. 王士杰, 译. 四川: 中国工程物理研究院, 1981.

- [2] ZUREK A K. Spall experiments and microscopy of depleted U-0.75%Ti alloy[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1994, 211: 52-56.
- [3] ZUREK A K. Preshock-induced phase transition in spalled U-0.75 wt% Ti[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1999, 264: 155-160.
- [4] 胡时胜, 郭勇, 胡秀章, 等. 铀合金动态力学性能的研究[J]. *爆炸与冲击*, 1993, 13(1): 18-22.
HU Shisheng, GUO Yong, HU Xiuzhang, et al. Studies of dynamic mechanical properties of DU alloys[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(1): 18-22(in Chinese).
- [5] 田开文, 尚福军, 祝理君, 等. 具备绝热剪切敏感性的钨合金穿甲弹材料研究现状[J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(4): 53-56.
TIAN Kaiwen, SHANG Fujun, ZHU Lijun, et al. Research status of WHA with adiabatic shear susceptibility[J]. *Engineering Materials Science and Engineering*, 2005, 28(4): 53-56(in Chinese).
- [6] ROSEN R S. The mechanical behavior of U-6Nb alloy and AISI 1045 and 1215 steel at high strain rates[J]. *Journal of Material Science Letters (UK)*, 1992, 125(11): 125-128.
- [7] 胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. *兵器材料科学与工程*, 1991, 122(11): 40-47.
HU Shisheng. The technique of Hopkinson pressure bar[J]. *Engineering Materials Science and Engineering*, 1991, 122(11): 40-47(in Chinese).