

钛合金 (Ti-17) 的动态力学性能和损伤特性 *

李 强 徐永波

(中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室, 沈阳 110015)

沈乐天 白以龙

(中国科学院非线性连续介质力学开放实验室, 北京 100081)

摘 要 利用分离式 Hopkinson 压杆冲击加载装置, 采用圆柱和锥台两种试样, 在高应变速率 $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ 加载条件下研究 Ti-17 合金的应力应变响应和动态损伤特征. 实验结果表明, 动态屈服应力 (σ_{yd}) 和断裂应力 (σ_{bd}) 比静态相应值高. 宏观损伤对应变速率敏感, 而对应力不敏感, 出现宏观损伤的临界应变速率 $\dot{\epsilon}_c = 2000 \text{ s}^{-1}$. 试样微观解剖显示绝热剪切带是材料宏观损伤的先兆, 试样主要沿剪切带发生破坏. 在垂直加载轴的横截面上, 绝热剪切带呈圆弧形, 平行加载轴剖面上绝热剪切带沿最大剪切应力方向. 锥台试样中绝热剪切带的应变从始点到终点逐渐减小.

关键词 钛合金, 动态力学性能, 损伤, 剪切带

中图分类号 TG146.2, O346.5

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(1999)05-0491-04

DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES AND DAMAGE CHARACTERISTICS OF TITANIUM ALLOY(Ti-17)

LI Qiang, XU Yongbo

State Key Laboratory for Fatigue and Fracture of Materials, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

SHEN Letian, BAI Yilong

Laboratory for Non-linear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Correspondent: LI Qiang, School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, Tel: (022)27404471

Manuscript received 1998-10-05, in revised form 1999-03-04

ABSTRACT Dynamic mechanical properties and damage characteristics of Ti-17 alloy have been investigated using Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) at high strain rate of 10^3 s^{-1} for cylinder and frustum samples. The experimental results show that the dynamic yield stress (σ_{yd}) and the fracture stress (σ_{bd}) are higher than those in the static, and the macro-damage is sensitive to strain rate, but insensitive to the applied stress. The critical macro-damage strain rate, $\dot{\epsilon}_c$, is 2000 s^{-1} . The examination of the deformed samples using metallgraphy and SEM reveals that the damage frequently occurs along shear band, i.e. shear band is a kind of micro-damage, and the fracture is always in cutting form. The semi-cyclic shape shear band and the fracture surface appear to be of shear dimples. The shear band is one of micro-damages, and its appearance on the cross-section plane is cyclic, and straight along the maximum shear stress direction on the section plane which is parallel the sample axis. On the section plane, the shear bands develop at the place where the shear stress is maximum, and propagate along the maximum shear direction. The shear strain distribution along the shear band within the frustum sample is inhomogenous, which decreases gradually along the shear band propagation direction.

KEY WORDS titanium alloy, dynamic mechanical properties, damage, shear band

军事设施、武器装备和运载工具中服役的工程材料经常

遇到强冲击多数工程材料在冲击载荷作用下表现的力学性能和损伤特征与准静态加载条件下表现的相应特性完全不同. 准静态加载条件下, 材料的损伤主要为微观尺度下缺陷或界面附近应力集中和连接, 微裂纹或微孔洞的形成与聚合^[1]. 然而一些材料在动态载荷作用下变形局部化(剪切带)是微

* 辽宁省科委博士启动基金资助项目 19980441

收到初稿日期: 1998-10-05, 收到修改稿日期: 1999-03-04

作者简介: 李 强, 男, 1961 年生, 副教授, 博士

损伤的重要标志。近年来力学界和材料科学界普遍认识到损伤与变形局部化的重要性^[2]。因此对变形局部化现象进行了广泛研究^[3-8]。

Ti 和 Ti 合金是航空航天领域中非常重要的结构材料,对其动态力学性能和变形局部化的研究也开展了许多,Chichili^[9]在很宽的应变速率范围($\dot{\epsilon}=10^{-5} - 10^5 \text{ s}^{-1}$)研究了 α -Ti 应力应变响应特性。文献[10]详细报道了 Ti6Al4V 的动态力学性能与温度和应变速率的关系。Timothy^[4]研究了 Ti6Al4V 中剪切带的微观组织结构特征。本文利用分离式 Hopkinson 压杆冲击加载装置,采用圆柱和锥台两种试样研究 Ti 合金(Ti-17)在高应变速率下的应力应变响应以及宏观损伤和绝热剪切带的特征。

1 实验方法

Ti-17 合金的化学成分(质量分数, %): Al 5.2, Mo 4.0, Sn 2.09, Cr 4.03, Zr 1.99, Fe 0.12, Si <0.04, C 0.1, N 0.018, H 0.001, O 0.096。热锻棒材经(840 °C, 1 h)+空冷,(800 °C, 4 h)+水冷和(630 °C, 8 h)+空冷的热处理,其室温常规力学性能为: $\sigma_b=1235 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2}=1220 \text{ MPa}$, $\varphi=35\%$, $\delta_5=20\%$ 。Hopkinson 压杆冲击试样加工成圆柱型和锥台型两种。圆柱型试样尺寸:直径 3.00 - 5.50 mm,长度 L_s 4.00 - 5.50 mm。锥台型试样的大小底面直径分别是 $\phi_2=5.50 \text{ mm}$, $\phi_1=3.00 \text{ mm}$,高 $h=5.20 \text{ mm}$ 。在室温下将试样置于 Hopkinson 冲击杆的入射杆和透射杆之间(大底面与透射杆接触,小底面与入射杆接触),通过调节打击杆速度和试样长度改变试样应变速率。试样所受应力、应变和应变速率由下列公式计算^[11]

$$\sigma = E \frac{A}{A_n} \epsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{2C_0}{L_s} \int_0^t (\epsilon_I - \epsilon_T) dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{2C_0}{L_s} (\epsilon_I - \epsilon_T) \quad (3)$$

其中 E , C_0 和 A 分别是 Hopkinson 压杆的弹性模量、弹性纵波波速和横截面积, A_n 和 L_s 为试样横截面积和长度, ϵ_I 是在入射杆上测得应变, ϵ_T 是在透射杆上测得应变, t 代表时间。

利用金相显微镜和扫描电镜对冲击后试样进行解剖和断口形貌分析。

2 实验结果与讨论

图 1a 显示圆柱型试样主要沿与加载轴成 45° 的最大剪切应力面剪断。图 1b 为刚刚出现裂纹试样横截面显微观察全貌,绝热剪切带呈圆弧形,沿剪切带已出现裂纹。图 2a 为冲击后锥台试样宏观形貌, Z-2, Z-4 和 Z-5 试样已断裂,而 Z-3 试样没有断裂。图 2b 显示锥台试样(Z-2)破坏端平行加载轴剖面的显微形态,可见断裂沿剪切带发生,其

断口形貌(见图 2c)也显示剪切切窝特征。图 3 是圆柱型试样在不同应变速率下的应力-应变响应曲线。曲线明显分为弹性阶段和应变硬化阶段。由这些曲线和采集的数据可以确定动态屈服应力 $\sigma_{yd}=1500 \text{ MPa}$ 以及断裂应力 $\sigma_{bd}=1750 \text{ MPa}$, 分别比静态相应的应力高出 280 和 325 MPa。这一结果和文献[10]报道 Ti6Al4V 的结果类似;当应变速率低于 10^4 s^{-1} , 材料的流变阻力主要来源于内部短程相互作用,因此流变应力对温度和应变速率十分敏感,流变应力(σ)与应变速率($\dot{\epsilon}$)和温度(T)之间存在如下关系^[10]

$$\sigma = \sigma_n + \frac{\Delta G_0}{V} + \left(\frac{kT}{V}\right) \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (4)$$

其中 σ_n 是与热激活无关的应力, ΔG_0 是无应力作用的热激活自由能, V 是热激活体积, k 为 Boltzman 常数, $\dot{\epsilon}_0$ 是材料常数。式(4)清楚表明流变应力随应变速率增加而增加,本实验结果符合这一关系。

一旦试样发生剪切断裂,其传递载荷能力快速消失,透射杆的应变(ϵ_T)急剧下降,而入射杆上的应变(ϵ_I)不受试样影响,由式(3)可知在有效加载时间内(入射应力波的宽度) $\dot{\epsilon}$ 一定急剧增加。因此实验中通过改变打击杆速度获得不同 $\dot{\epsilon}-t$, 依据 $\dot{\epsilon}-t$ 或 $\dot{\epsilon}-\epsilon$ 曲线判断试样是否发生断裂,从而确定材料断裂的临界应变速率为 $\dot{\epsilon}_c=2000 \text{ s}^{-1}$ 。

图 4 是未发生宏观断裂锥台试样(Z-3)平行加载轴剖面的显微形态,剪切带从尖角斜向中心延伸,与加载平面(AD)的夹角为 40°。借助剪切带两侧的晶界错位(图 4 中剪切带两侧标明的 aa' , bb' , cc' 和 dd' 分别是 4 个晶界的错

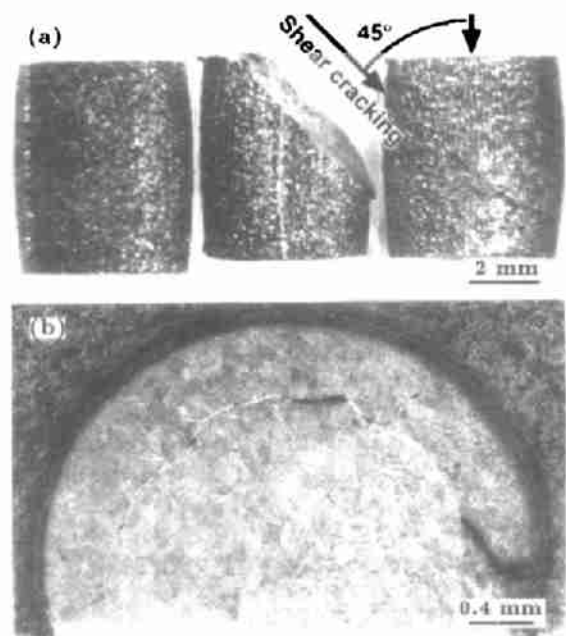


图 1 圆柱型试样的损伤

Fig.1 Damage of cylinder samples

(a) macro-observation (b) configuration of shear band on the cross-section plane

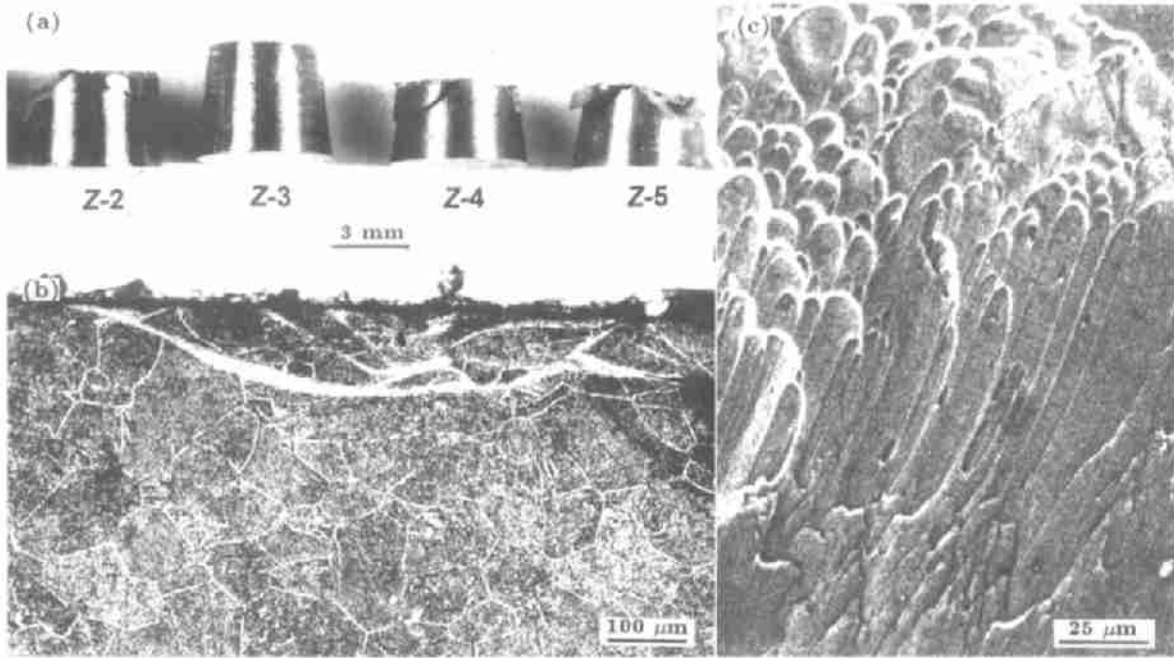


图 2 锥台试样的损伤和断口形貌

Fig.2 Damage and fracture surface micrographs of frustum samples

(a) macro-observation (b) shear bands configuration near the fracture surface (c) fracture surface micrograph from SEM

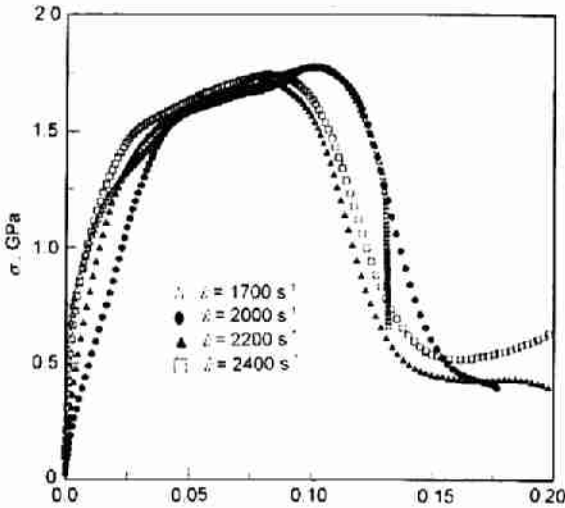


图 3 Ti-17 的动态应力 - 应变关系曲线

Fig.3 Stress vs strain curves of cylinder samples of Ti-17 at high strain rate

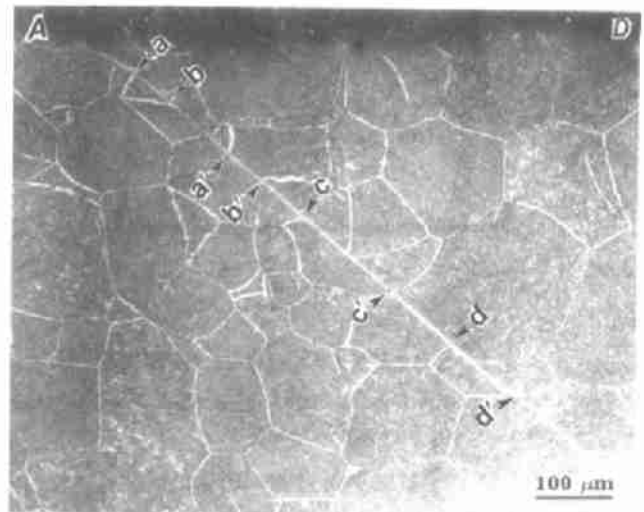


图 4 剪切带在锥台试样上沿最大剪切应力平面形成和传播

Fig.4 Shear band development and propagation in the maximum shear stress plane

动距离) 可知其上的剪切应变由边缘到中心逐渐减小。

Z-2, Z-3, Z-4 和 Z-5 试样的平均应变速率分别为 2100, 2000, 2400 和 2600 s^{-1} , 结合图 3 可确定应变速率超过临界值 ($\dot{\epsilon}_c=2000 s^{-1}$) 时, 试样才会发生宏观断裂。图 5 为 Z-3 锥台试样的 $\sigma - \epsilon$ 曲线, 其中 σ_1 和 σ_2 分

别对应锥台试样小底面应力和大底面应力, 小底面应力大于 3000 MPa, 远远超过动态断裂应力, 但是试样并未出现宏观损伤。表明动态断裂应力并不是断裂的必要条件, Ti-17 的宏观损伤对应力不敏感而对应变速率非常敏感。

锥台试样应力分析如图 6 所示, 表明最大平均剪切应力

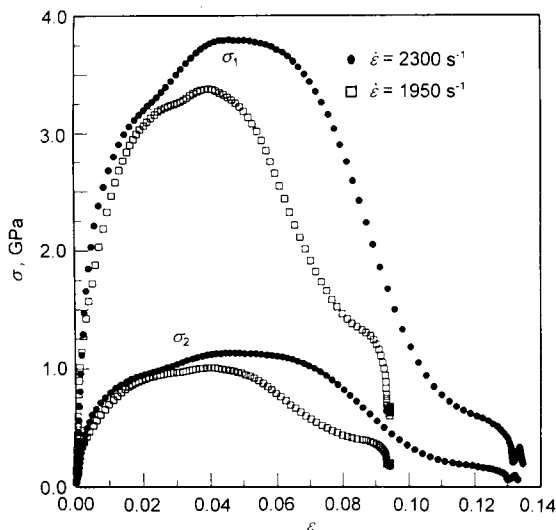


图5 Ti-17 锥台试样的应力 - 应变关系曲线

Fig.5 Stress vs strain curves of Ti-17 frustum samples

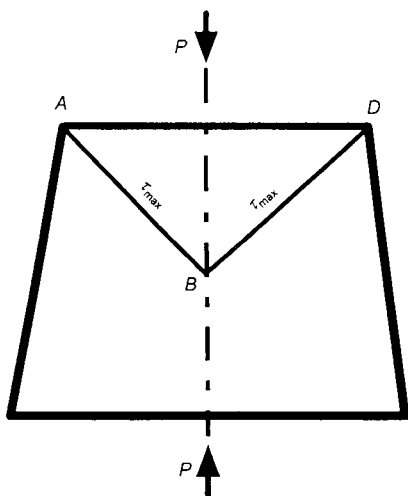


图6 锥台试样最大剪切应力面分析示意图

Fig.6 Schematically illustration of the maximum shear stress plane within frustum sample

面 AB 和 BD 与加载轴夹角为 48.70° 。实际测得剪切带与受力面 (AD) 的夹角为 40° ，与加载轴夹角为 50° ，这与理论分析最大剪切应力位置偏离 1.3° 。因为剪切带与受力面的

夹角是在发生了一定塑性变形的试样上获得，塑性变形开始时的最大剪切应力面随塑性变形进行会发生旋转。考虑这一因素后，可以确认剪切带是在最大剪切应力处形成，并沿最大剪切应力方向传播。剪切带的延性极低，如果试样继续承载变形，就会沿剪切带出现崩裂。剪切带形成和断裂特征的详细分析参见文献 [12]。

3 结论

(1) 在室温、高应变速率 (10^3 s^{-1}) 加载的条件下，Ti-17 的动态屈服应力和断裂应力分别为 $\sigma_{yd}=1500 \text{ MPa}$ ， $\sigma_{bd}=1750 \text{ MPa}$ ，比静态相应值高。在冲击载荷的作用下，Ti-17 的宏观损伤对应变速率敏感而对应力不敏感。宏观损伤的临界应变速率为 $\dot{\epsilon}_c=2000 \text{ s}^{-1}$ 。

(2) 在冲击压缩载荷作用下，Ti-17 的微观损伤主要以剪切带的形式出现。剪切带在垂直加载轴横截面上呈圆弧状，在平行加载轴剖面上沿最大剪切应力方向，并且剪切应变从起始点到终点逐渐减小。

参考文献

- [1] Ni J G, Tao C H, Li S N. *A course on Damage Mechanics*. Beijing: Science Press, 1997: 1
(倪金刚, 陶春虎, 李松年. 损伤力学教程. 北京: 科学出版社, 1997: 1)
- [2] Needleman A. *Appl Mech Rev*, 1992; 45(3): 53
- [3] Bei Y L. *Res Mech*, 1990; 31: 133
- [4] Timothy S P, Hutchings I M. *Acta Metall*, 1985; 33: 667
- [5] Timothy S P. *Acta Metall*, 1987; 35: 301
- [6] Nakkalil R. *Acta Metall*, 1991; 39: 2553
- [7] Xu Y B, Bai Y L. *Acta Metall Sin*, 1995; 31: A487
(徐永波, 白以龙. 金属学报, 1995; 31: A487)
- [8] Hines J A, Vecchio K S, Ahzi S. *Metall Mater Trans*, 1998; 29A: 191
- [9] Chichili D R, Ramesh K T, Hemker K J. *Acta Mater*, 1998; 46: 1025
- [10] Blazynski T Z. *Materials at High Strain Rates*. London and New York: Elsevier Applied Science, 1987: 133
- [11] Hu S S, Wang L L. *Vib Impact*, 1986; 5: 40
(胡时胜, 王礼立. 振动与冲击, 1986; 5: 40)
- [12] Li Qiang. *The Report of Post-Doctoral Research Work*, Shenyang: Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, 1999
(李强. 博士后研究报告, 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1999)