

# 工业纯钛动态压缩特性及破坏的实验研究

付应乾, 董新龙

(宁波大学, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 用分离式霍普金森压杆对 TA2 工业纯钛进行了动态压缩及绝热剪切破坏实验研究, 得到了不同应变率和不同温度下的宏观应力-应变曲线。通过对压缩本构特性及微观金相破坏的比较分析, 讨论了应变率、表观压缩本构特性对绝热剪切形成的影响。结果显示: TA2 试样动态压缩呈现绝热剪切破坏特征, 绝热剪切带在空间呈对称的双锥形状; 应变率越高, 形成绝热剪切带的临界应变越小; 分析表明, 动态压缩实验无法得到关于绝热剪切起始、发展过程的本构软化信息。

**关键词:** 固体力学; TA2 钛金属; 动态压缩; 绝热剪切带

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>3; TG115.5<sup>+</sup>3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2016)01-0102-05

钛金属具有密度小、强度高以及无磁性的特点, 在航天、航空及军工领域有着广泛的应用。使用最广泛的钛金属是工业纯钛(TA1、TA2 和 TA3)和钛合金 TC4, 用于航空、飞行器结构部件。工业纯钛退火组织为细小的  $\alpha$  相, 具有密排六方结构 (hcp)。众所周知, 滑移和孪生是金属塑性变形的 2 种主要方式, 相对面心及体心立方结构, 六方结构金属塑性变形, 孪生作用尤为重要。为此, Nemat-Nasser、Chichili、Meyers、Harding 等人<sup>[1-4]</sup>对  $\alpha$ -Ti 合金在不同应变率和温度下的准静态和动态力学性能进行了研究, 发现  $\alpha$  纯钛的应变硬化特性与应变率、温度相关。在特定温度区间和恒定应变率下, 材料的流动应力分 3 个阶段: 在小应变下, 应变硬化率较小 (阶段 1); 随应变增大达到一定值, 应变硬化率不断增大 (阶段 2); 随后, 应变硬化率又减小甚至变为负值 (阶段 3)。其中, 在阶段 2, 孪生带密度增加显著并相互作用, 而随后局部形成细小晶粒 (阶段 3)。应变硬化变形各阶段与温度、应变率相关, 随应变率提高, 阶段 2 的应变硬化从低温移向高温, 并对其影响进行讨论, 但变形机制并不清楚。

另外, 钛合金具有较低的热传导率, 被认为是绝热剪切敏感材料。绝热剪切一般认为是材料的应变硬化、应变率硬化及热软化竞争的结果, 即材料的本构失稳引起。许多学者利用分离式霍普金森压杆技术研究动态压缩试样中绝热剪切带的形成、发展。针对不同材料, 探讨了绝热剪切带产生的影响因素。Wang 等<sup>[5]</sup>在钛合金

TB2 中发现, 温度越低, 剪切带越容易出现。Dormevo<sup>[6]</sup>在对马氏体钢的研究中, 认为材料硬度增加, 失效应变降低, 剪切带更容易出现。通过相应动态力学性能曲线, 探讨材料绝热软化及绝热剪切起始条件等。魏志刚等<sup>[7]</sup>通过改变圆柱几何形状, 发现在钨合金中也有剪切带产生, 说明应力状态对剪切带形成也有影响。Nguyen<sup>[8]</sup>认为加载速率也有影响, 提出临界速度以上才形成剪切带, 临界速度以下不产生。Meyer、Rittel、Wright、Grady、Bai、Chen、Xue 等<sup>[9-16]</sup>也开展了大量相关工作。

本工作利用分离式霍普金森压杆加载对工业纯钛 TA2 圆柱试样开展动态压缩的实验研究, 并对试样的变形及破坏进行了金相微观观测分析。实验得到了 TA2 在不同应变率和环境温度下的力学性能, 展示了 TA2 压缩时绝热剪切带形成及发展特征, 探讨了应变、应变率和温度对绝热剪切带形成的影响等。

## 1 实验

实验材料采用 TA2 钛金属, 为单  $\alpha$  相晶体, 其热传导率较低。实验采用厚 5.7 mm 冷轧退火 TA2 钛板, 垂直于板平面切割直径 5 mm, 高度 5.7 mm 的圆柱试样。钛板的具体成分 (质量分数) 为 Ti  $\geq$  99.6%, C 0.021%, Fe 0.064%, N 0.025%, H 0.004%, O 0.11%, 其他  $\leq$  0.1%。

利用实验室  $\Phi$ 14.7 mm 带加热装置的分离式 Hopkinson 压杆, 通过控制子弹长度及速度, 来调节加载应变率及应变。子弹长度分别为 150、200、300、

收稿日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11172144); 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金 (U1230122); 教育部博士点基金 (20113305110004)

作者简介: 付应乾, 男, 1986 年生, 硕士生, 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211, 电话: 0574-87600496, E-mail: imech2012@gmail.com

400 mm。测试钛金属 TA2 在  $1000\text{ s}^{-1}$  到  $4500\text{ s}^{-1}$  应变率范围不同环境温度下的力学性能，同时还利用 MTS 试验机进行了准静态压缩测试，准静态应变率为  $10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 动态压缩性能及本构关系

在室温 299 K 下，对 TA2 钛金属在准静态及动态压缩下的力学性能开展实验，应变率范围为  $10^{-3}\sim 4500\text{ s}^{-1}$ 。典型的压缩应力-应变曲线如图 1 所示。其中，准静态 ( $\dot{\epsilon}\approx 0.005\text{ s}^{-1}$ ) TA2 钛金属压缩的屈服强度  $\sigma_0$  为 460 MPa，而动态屈服强度较准静态明显增大。图 2 给出了材料的屈服强度随应变率的变化曲线，并对比了 Chichili 等人的实验结果。可见 TA2 存在明显应变率硬化效应，低应变率下屈服强度随应变率增加呈缓慢线性增长，在高应变率下屈服强度随应变率增加而快速增长。

为探讨材料热软化特性，在不同温度下对 TA2 钛金属开展了系列 Hopkinson 压缩实验研究。图 3 给出了应变率为  $3600\text{ s}^{-1}$  时，TA2 合金在不同环境温度下的应力-应变曲线。可以看出，在相同应变率下，随着环境温度升高，TA2 屈服强度及流动应力降低。实验

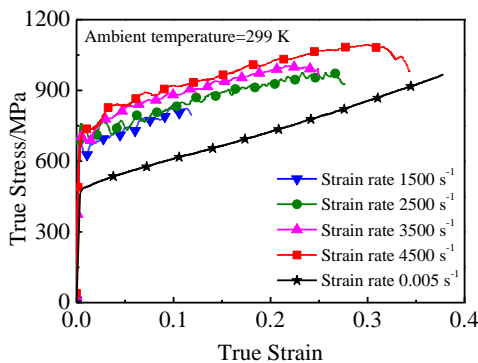


图 1 299 K 时不同应变率下的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves with different strain-rates at 299 K

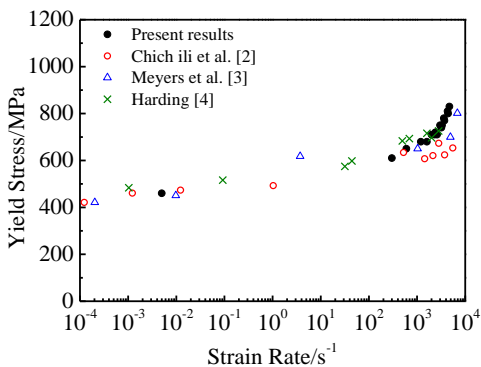


图 2 299 K 时屈服强度随应变率变化曲线

Fig.2 Yield stress versus strain-rate at 299 K

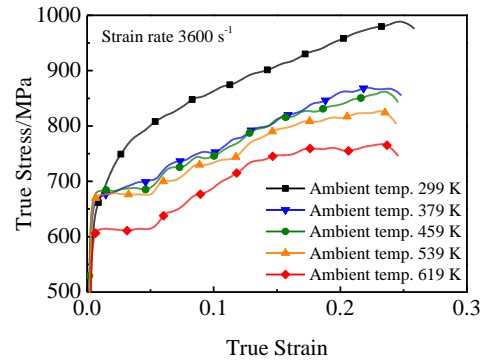


图 3  $3600\text{ s}^{-1}$  时不同温度下的动态应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves at different temperatures with strain-rate of  $3600\text{ s}^{-1}$

发现：在高温环境下，TA2 的流动应力明显分 3 个阶段，即在小应变下，应变硬化率较小；随应变增大达到一定值，应变硬化率不断增大；随后，应变硬化率又减小，尤其在 619 K 时这种现象最为明显。实验结果还显示：在实验温度范围内 (299~619 K)，TA2 呈现不同的软化特性。图 4 给出了不同应变时的流动应力随温度的变化。可见在较低的温度下 (299~375 K)，随温度升高，材料软化较快，而在 375~530 K 温度范围，流动应力随温度升高的软化较小；在温度大于 530 K 后，材料随温度升高的软化又呈现增大的趋势。

### 2.2 绝热剪切破坏现象

实验对回收试样的变形、破坏特征进行了观察及金相分析。对准静态压缩试样，当应变达 0.4 时，仍保持均匀变形，未见破坏及局域化现象。而在动态加载下，试样中发现绝热剪切带，试样发生绝热剪切破坏。图 5、图 6 所示为在应变率为  $4500\text{ s}^{-1}$ 、最大应变为 0.27 的动态压缩回收试样中的绝热剪切带分布及裂纹发展状况。X 射线探伤显示，试样破坏面在空间上形成两个方向对称的圆锥面，锥顶位置交叠在一起，如图 5a

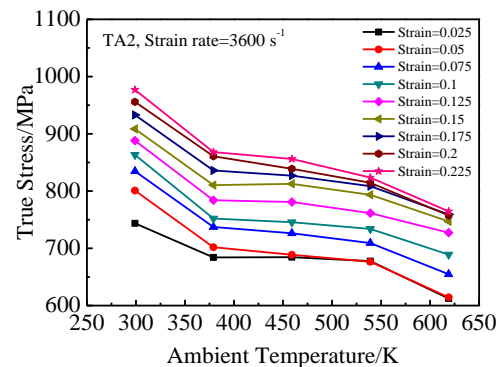


图 4 流动应力随环境温度增加的变化曲线

Fig.4 True stress versus temperature at strain-rate of  $3600\text{ s}^{-1}$

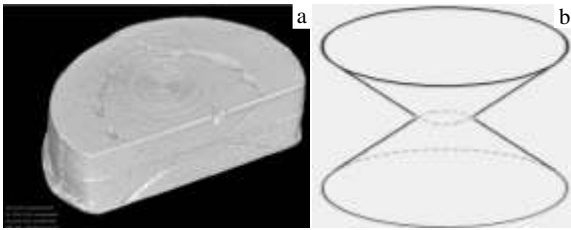


图 5 剪切破坏模式

Fig.5 Model of adiabatic shear failure: (a) X-ray damage detection and (b) schematic diagram of shear conical surface

所示。表明试样呈双锥形破坏特征，如图 5b 所示。

对圆柱试件端面及纵向剖面进行金相观测分析，如图 6 所示。可见试件端面上有一环状的绝热剪切带，沿剪切带有不连续的大孔洞及连通裂纹，而沿试样纵向剖面可见约呈 45°或 135°剪切带及裂纹发展，如图 6a 所示。试样端面相邻大孔洞之间（图 6a 中 C 区）存在绝热剪切带，金相观察如图 6b。该绝热剪切带宽度为 18 μm，绝热剪切带内为极细小的等轴晶，且有微孔洞存在，而剪切带外区域晶粒无明显变化，但有大量的孪晶存在。进一步对试样纵向剖面观察，沿 45°或 135°剪切带及裂纹发展方向逐点分析，如图 6c 所示。可以看到，在裂纹前方为一条绝热剪切带，由此推测，试件破坏过程为：随变形增加，首先在试样上表面边缘产生绝热剪切带，并沿 45°方向向试样内部扩展，裂纹沿剪切带形成、发展，形成锥面。对锥顶

区域进行金相观察分析，如图 6d 所示。图中虚线表示锥尖交叠位置，在该区域内可见严重的变形集中，晶粒被拉长，中间位置存在一条绝热剪切带，剪切带宽度约为 10 μm。

### 3 分析与讨论

从宏观力学角度考虑，一般认为，绝热剪切是材料应变硬化、应变率硬化及热软化竞争的结果。即塑性应变能产生绝热温升，当温升引起的强度下降大于应变硬化时，则导致本构失稳，形成绝热剪切带。基于这一思想，提出了最大应力准则、临界应变或应变率准则等。

#### 3.1 应变和应变率对绝热剪切的影响

Hopkinson 压缩实验中，通过调整子弹长度及速度，可以实现不同应变率、相同应变的“冻结”实验，图 7 为 TA2 在相同应变率 2400 s<sup>-1</sup>、不同应变发展程度时的压缩应力-应变曲线。可以看出，在相同应变率条件下，应力-应变曲线发展趋势一致。相应的实验变形及破坏情况如图 8 所示。当子弹长度为 200 mm 实验结果的最大应变为 0.175 时，金相观察显示，试样保持均匀变形，试样端面无剪切带产生，如图 8a 所示；随加载应变增大，当应变达到 0.27 时，试样端面出现环状剪切带，但未见裂纹，如图 8b 所示。应变进一步提高到 0.36，裂纹已沿环形剪切带发展，试样局部明显出现碎裂，如图 8c 所示。

可见在相同应变率、不同应变发展的情况下，试样初始呈近似均匀变形，随应变发展，将产生剪切局

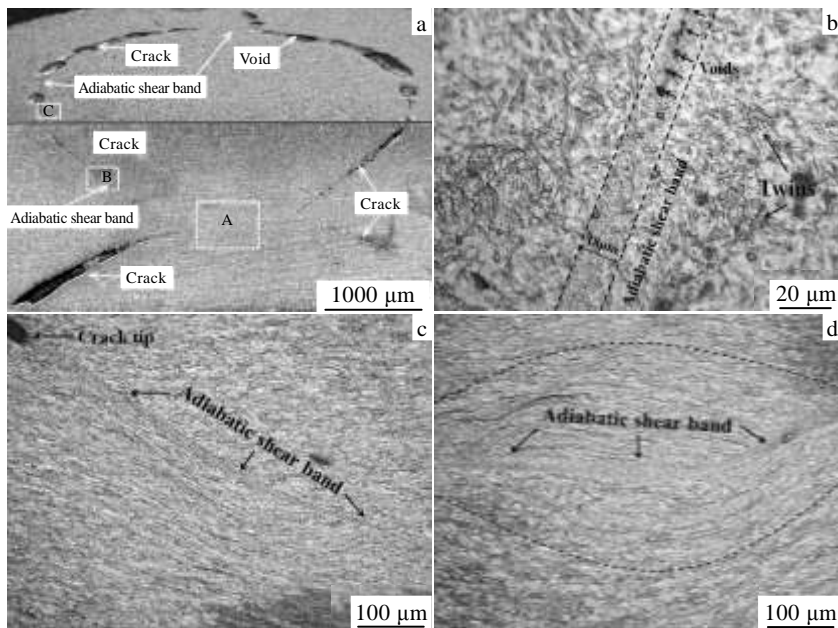


图 6 绝热剪切带金相观察

Fig.6 Metallographs of adiabatic shear bands in TA2: (a) combination of top and axial section metallographs; (b) ASB in zone C; (c) ASB in zone B; (d) ASB in zone A

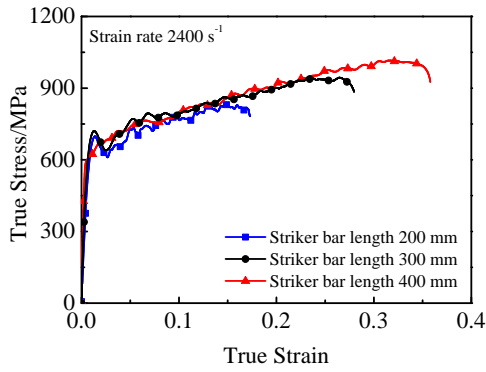


图 7 同一应变率不同长度子弹加载下应力-应变曲线  
Fig.7 Stress-strain curves of samples under the same strain rate with different striker bar lengths

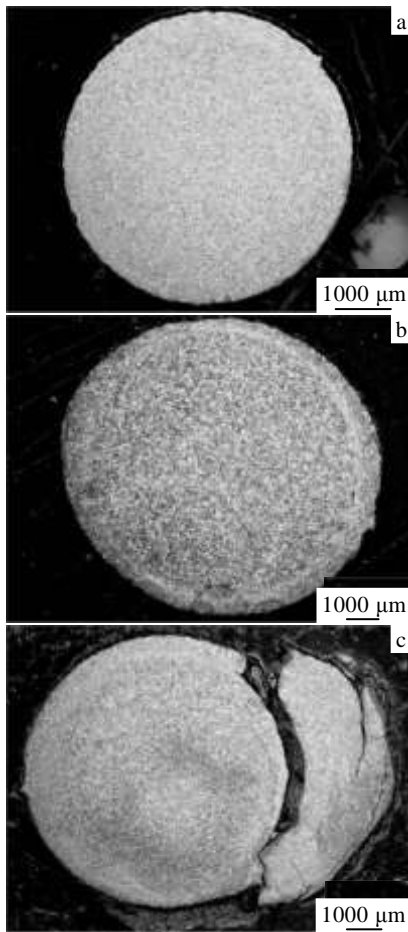


图 8 相同应变率、不同应变发展试样的微观金相照片  
Fig.8 Metallographs of samples with different deformation degrees: (a)  $\epsilon_{max}=0.175$ , (b)  $\epsilon_{max}=0.27$ , and (c)  $\epsilon_{max}=0.36$

域化及绝热剪切带，最后裂纹沿剪切带形成、发展导致破碎。因此，如果材料均匀，则应存在临界应变，当变形大于临界应变时则会产生绝热剪切破坏。在应变率为  $2400\text{ s}^{-1}$  的单轴压缩条件下，TA2 钛金属的绝

热剪切带出现的宏观临界应变在  $0.17\sim 0.27$  之间。

图 9 为通过控制脉冲长度实现最终变形量相同、而应变率不同的两个试样的应力-应变曲线。试样变形和破坏情况分别对应图 8b 所示的应变率为  $2400\text{ s}^{-1}$  试样和图 5 所示应变率为  $4500\text{ s}^{-1}$  的试样。可见当最大应变均为  $0.27$  时，应变率为  $2400\text{ s}^{-1}$  的试样已形成环状绝热剪切带，但无可见裂纹；而应变率为  $4500\text{ s}^{-1}$  的试样已经产生沿环状剪切带的裂纹并出现碎裂现象。因此，应变率越高，产生绝热剪切带的临界应变越小，试样越易出现绝热剪切破坏。

### 3.2 宏观压缩应力-应变曲线与绝热软化

材料本构绝热失稳反映在应力-应变曲线上存在  $d\sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)/d\epsilon=0$  的拐点，应力-应变曲线出现软化。作者分析比较了所有实验得到的动态应力-应变曲线。在实验加载条件下，试样破碎前均未发现本构曲线的软化现象。如以子弹长度为  $300\text{ mm}$ 、应变率为  $3300\text{ s}^{-1}$  的实验结果为例，该试样实验测得的 Hopkinson 杆上的入射波、试样上应力和应变时程曲线汇总在图 10 中。该试样已出现双锥型绝热剪切破坏，并且局部已破碎。图中竖线 A 表示入射波开始卸载时刻，竖线 B 表示入射波卸载结

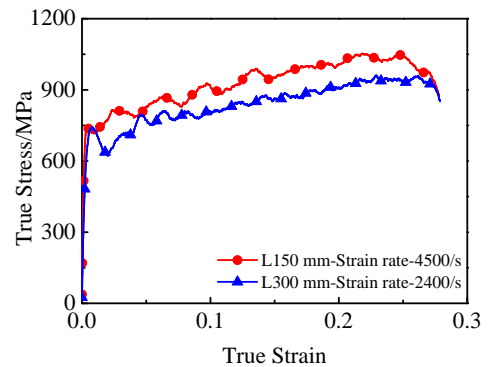


图 9 变形相同、应变率不同的应力-应变曲线  
Fig.9 Stress-strain curves of samples with the same deformation under different strain rates

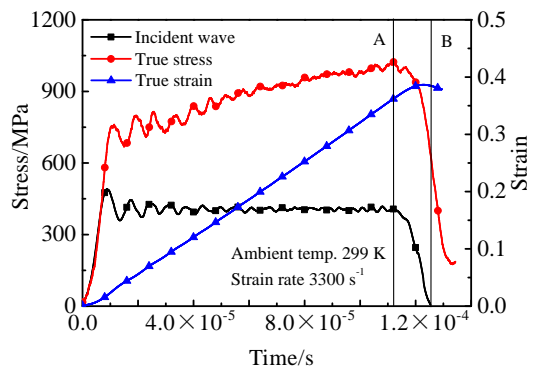


图 10 应力-应变发展时程曲线  
Fig.10 Development of strain and stress with time

束时刻。可见：入射波开始卸载，对应试样上的应力也开始卸载；入射波卸载结束，应变出现弹性恢复。表明该试样上应力下降并不表征材料的失稳或破坏，而是卸载过程。因此，即使试样中已形成双锥形绝热剪切带，材料宏观应力-应变曲线仍无明显的软化特征。这主要是因为，表观动态压缩应力-应变特性折中了绝热剪切局域化软化及试样整体抵抗压缩的能力，即使局部破碎，试样整体仍能承受很高的压缩应力。所以，动态压缩实验得到的表观应力-应变曲线无法描述绝热剪切局域化起始及剪切带形成、发展过程的信息。

## 4 结 论

1) TA2 钛金属是应变率硬化和温度软化敏感材料，高温环境下，流动应力呈明显的 3 个阶段变化趋势。

2) TA2 钛金属试样动态压缩呈现绝热剪切破坏特征，裂纹沿绝热剪切带发展，破坏面在空间呈对称的双锥形状。

3) 应变率越高，形成绝热剪切带的临界应变越小，越易于绝热剪切带起始、发展。

4) 动态压缩实验得到的表观应力-应变曲线反映的是试样整体平均温升引起的软化，无法描述绝热剪切起始及剪切带形成、发展过程的软化信息。

### 参考文献 References

- [1] Nemat-Nasser S, Guo W G, Cheng J Y. *Acta Materialia*[J], 1999, 47(13) : 3705  
 [2] Chichili D R, Ramesh K T, Hemker K J. *Acta Materialia*[J],

1998, 46(3) : 1025

- [3] Meyers M A, Subhash G, Kad B K *et al.* *Mechanics of Materials*[J], 1994, 17: 175  
 [4] Harding J. *Archive of Mechanic*[J], 1975, 27(5-6): 715  
 [5] Wang L L, Bao H S, Lu W X. *Journal of Physics IV France*[J], 1988, 49(3): 207  
 [6] Domeval R. *Materials at High Strain Rates*[M]. New York: Elsevier, 1987: 47  
 [7] Wei Zhigang(魏志刚), Li Yongchi(李永池), Li Jianrong(李剑荣). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2000, 36(12): 1263  
 [8] Nguyen C H. *Journal of Physics IV France*[J], 1997, 7(3): 849  
 [9] Meyer L W, Krueger L, Gooch M *et al.* *Journal of Physics IV France*[J], 1997, 7(3): 415  
 [10] Xue Q, Grady III G T. *Metallurgical and Materials Transaction*[J], 2006, 37A: 2435  
 [11] Xue Q, Grady III G T. *Metallurgical and Materials Transaction*[J], 2006, 37A: 2447  
 [12] Rittel D, Wang Z G, Merzer M. *Physical Review Letters*[J], 2006, 96(7) : 75 502  
 [13] Rittel D. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2009, 42(21): 214 009  
 [14] Lee W S, Chen T H, Lin C F *et al.* *Materials Transaction*[J], 2010, 51(7): 1216  
 [15] Wright T W, Batra R C. *International Journal of Plasticity*[J], 1985, 1(3): 205  
 [16] Dai L H, Bai Y L. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2008, 35(8): 704

## Experimental Study on Mechanical Properties and Failure Characteristic of Commercially Pure Titanium under Dynamic Compression

Fu Yingqian, Dong Xinlong

(Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Dynamic compression and adiabatic shear failure experiments were carried out for commercially pure titanium TA2 by split Hopkinson pressure bar (SHPB). Macro stress-strain curves were obtained at different strain rates and temperatures. The compressive constitutive characteristics and micro failure were comparatively analyzed and the effects of strain rate and apparent compressive constitutive characteristics on adiabatic shear band (ASB) formation were discussed. Results show that the dynamic compression of TA2 exhibits an adiabatic shear failure characteristic, and the ASBs are of symmetrical bipyramid shape. With the strain rate increasing, the critical strain of ASB formation becomes lower. It is found that the constitutive softening information of the origination and development of ASBs cannot be acquired by dynamic compression tests.

**Key words:** solid mechanics; pure titanium TA2; SHPB; adiabatic shear bands

Corresponding author: Dong Xinlong, Ph. D., Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, P. R. China, Tel: 0086-574-87600497, E-mail: dongxinlong@nbu.edu.cn