

# 帽型试样绝热剪切演化实验及数值模拟

宋鹏飞<sup>1</sup>, 董新龙<sup>1\*</sup>, 周刚毅<sup>1</sup>, 付应乾<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 采用 Hopkinson 压杆对 TA2 钛合金扁平帽形试样开展“冻结”实验, 结合微观金相分析, 研究绝热剪切局域化演化过程及其力学响应, 采用剪切损伤软化模型描述绝热剪切带软化特性. 通过有限元模拟得出的应变演化和破坏图像, 以及通过数字图像相关法得到的剪切区平均应变场演化过程, 与“冻结”试样观测结果符合较好.

**关键词:** 帽型剪切试样; 绝热剪切; 图像相关法; 有限元

中图分类号: O346

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 02-0050-05

绝热剪切(Adiabatic Shearing Band, ASB)是韧性金属材料高应变率变形过程中的重要失效机制之一<sup>[1-2]</sup>. 一般认为: 绝热剪切现象宏观上表现为动态本构失稳, 即应力—应变曲线从应变硬化( $d\sigma/d\varepsilon > 0$ ) 转变为应变软化( $d\sigma/d\varepsilon < 0$ ). 在微观上可以观察到高度的局域化, 即绝热剪切带, 包括形变带和相变带<sup>[3]</sup>, 被解释为热塑性失稳. 而事实上, 绝热剪切带的发展及破坏是一个复杂的物理现象, 目前还没有能被广泛接受的分析和解释.

为了更直接地研究材料绝热剪切带起始和破坏特性, Marchand 等<sup>[4]</sup>设计了动态扭转实验. 实验发现: 绝热剪切局域化并不在最大应力处出现, 而在应力下降处产生. 为便于观测绝热剪切演化过程, Meyers 等<sup>[5]</sup>最早设计了平板帽型剪切试样, 分析了绝热剪切的演化过程及其力学响应. 国内外许多学者通过帽型实验对不同材料的绝热剪切演化过程和力学响应展开了研究<sup>[6-13]</sup>. 但帽型试样变形过程中受力状态较为复杂, 存在剪应力和正应力等作用, 预置的剪切区尺寸也不等于剪切变形宽度<sup>[14]</sup>, 难以给出剪切应变值, 只能给出剪切应力—位移响应曲线进行定性讨论. 同时, 绝热剪切带在试样内部, 实验观测到均为终态, 因此为了研究绝热剪切带演化过程, 大多采用数值模拟分析. 但由于剪切带内的性能难以直接测量, 没有精确描述

剪切带扩展和断裂的物理模型, 目前绝热剪切的起始准则和演化扩展一般采用多物理场模型, 即假设带内、带外有不同的本构特性<sup>[15-16]</sup>.

本文采用 Hopkinson 压杆对 TA2 钛合金扁平帽形试样开展“冻结”实验, 研究绝热剪切局域化演化过程及其力学响应. 采用数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)直接测试剪切区的剪切应变演化, 探讨绝热剪切有限元数值实验分析方法.

## 1 帽型剪切实验及有限元模型

### 1.1 试样及实验方法

为了减小结构变形, 设计封闭帽型剪切试样, 如图 1 所示. 实验材料采用厚 5.7 mm 的 TA2 钛金属板材, 成分为 99.6% 的 Ti, 0.021% 的 C, 0.064% 的

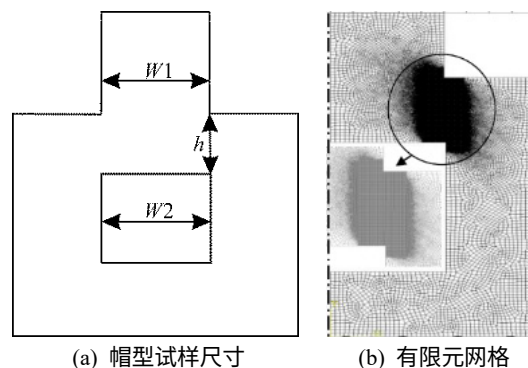


图 1 平板帽型剪切试样及有限元网格模型

收稿日期: 2017-07-18.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(U1230122, 11672143).

第一作者: 宋鹏飞(1991—), 男, 山东淄博人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 材料动态冲击. E-mail: 1225959442@qq.com

\*通信作者: 董新龙(1964—), 男, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 材料动力学行为. E-mail: dongxinlong@nbu.edu.cn

Fe, 0.025%的 N, 0.11%的 O, 其他 $\leq 0.1\%$ ; 组织为单 $\alpha$ 相晶体. 试件尺寸:  $W1=4.9$  mm,  $W2=5.0$  mm,  $h=2.0$  mm, 试样厚 $\delta=5.7$  mm.

采用 $\Phi 14.7$  mm 的分离式霍普金森压杆(SHPB)装置进行加载, 如图2所示.

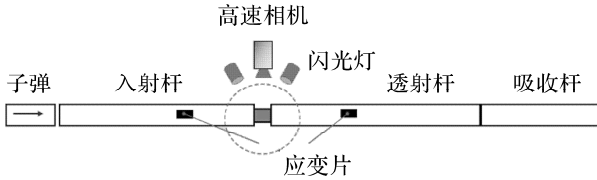


图2 Hopkinson 动态加载实验示意图

根据应力波理论可以得到相应试样两端的压缩力 $F(t)$ 和试样压缩位移 $\Delta D(t)$ <sup>[9]</sup>:

$$F(t) = A_{\text{bar}} E_{\text{bar}} \varepsilon_t(t), \quad (1)$$

$$\Delta D(t) = -2C_0 \int_0^t \varepsilon_r(t) dt, \quad (2)$$

其中:  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_t$  为压杆反射波和透射波应变信号;  $E_{\text{bar}}$  为压杆弹性模量;  $C_0$  为弹性波速;  $A_{\text{bar}}$  为压杆截面积.

实验采用不同子弹长度调节加载入射波脉冲宽度, 得到不同应变的“冻结”试样. 对不同“冻结”阶段的试样进行微观金相分析<sup>[17]</sup>, 观察绝热剪切带形成及发展过程. 为了得到剪切区变形及演化过程, 在平板帽型试样剪切区域均匀喷涂散斑, 如图1所示. 利用二维数字图像相关法, 直接对试样剪切区的剪应变分布及演化过程进行分析, 其中使用的高速相机为 FASTCAM APX RS, 采样率 $150\,000$  帧 $\cdot s^{-1}$ <sup>[18]</sup>.

## 1.2 有限元数值模拟

采用 Abaqus/Explicit 有限元对钛合金 TA2 扁平帽型试件在 Hopkinson 压杆作用下的受迫剪切过程进行数值模拟, 分析试样绝热剪切演化 and 破坏过程, 帽形试样采用 CPE3 单元四面体实体单元及平面应变三角形单元, 单元数 $18\,521$  个, 剪切区最小单元尺寸 $11.8\,\mu\text{m}$ , 如图1(b)所示. TA2 钛合金采用 Johnson-Cook 本构模型:

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_t}{T_m - T_t} \right)^m \right], \quad (3)$$

其中:  $A$  是材料的屈服应力;  $B$  是硬化模量;  $C$  是应变率相关指数;  $n$  是应变硬化指数;  $m$  是热软化指数;  $\dot{\varepsilon}_0$  是参考应变率;  $\varepsilon$  为真实应变率;  $T$  是材料的实际温度;  $T_t$  是材料的转化温度;  $T_m$  是材料的熔化温度.

相应的参数由压缩实验结果拟合得到, 见表1.

表1 Johnson-Cook 本构模型参数

| $A/\text{MPa}$ | $B/\text{MP}$ | $n$ | $m$  | $C$   | $\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$ | $T_m/\text{K}$ | $T_t/\text{K}$ |
|----------------|---------------|-----|------|-------|-------------------------------------|----------------|----------------|
| 460            | 510           | 0.6 | 0.72 | 0.029 | 0.005                               | 1 933          | 299            |

由于缺乏精确描述材料绝热剪切演化的力学模型, Clifton<sup>[8]</sup>提出可以将绝热剪切考虑当做裂纹来处理. 我们采用热软化层来描述绝热剪切演化过程, 如图3所示.

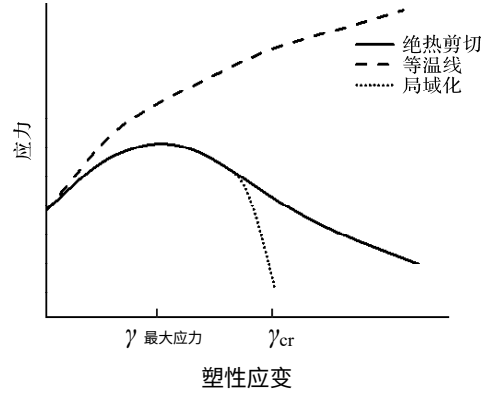


图3 绝热剪切特性描述模型

Johnson-Cook 热粘塑性本构关系, 虽然考虑材料变形引起的应变硬化、应变率硬化和热软化等特性, 但是不足以描述绝热剪切引起的更强的软化特性. 因此, 为了描述绝热剪切起始演化扩展 $\sigma = \sigma_0(1-D)$ , 引入剪切软化模型描述 TA2 钛合金绝热剪切局域化演化过程, 即:

$$D = (\varepsilon - \varepsilon_{\text{cr}}) / (\varepsilon_f - \varepsilon_{\text{cr}}), \varepsilon_{\text{cr}} < \varepsilon < \varepsilon_f, \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0(1-D), \quad (5)$$

其中:  $\varepsilon_{\text{cr}}$  和  $\varepsilon_f$  分别为绝热剪切起始应变和断裂应变.

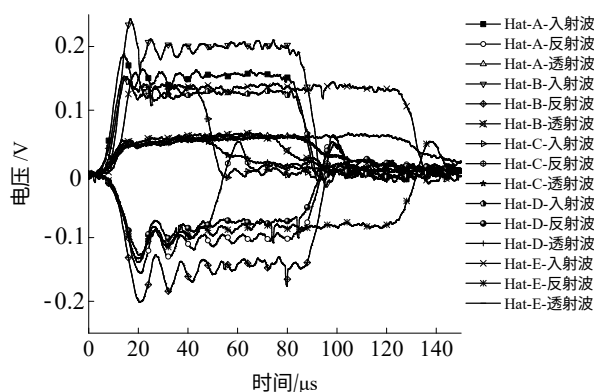
## 2 实验及计算结果

### 2.1 绝热剪切破坏实验现象

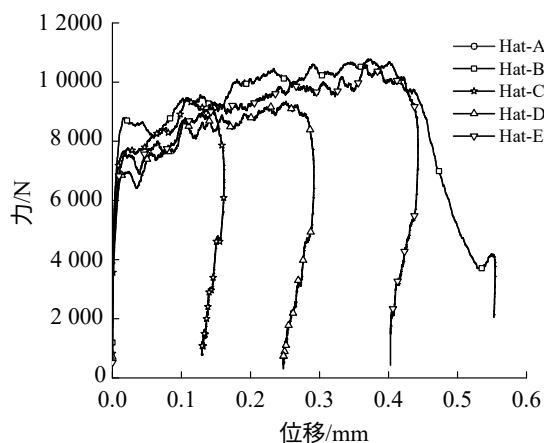
图4(a)为霍普金森压杆上应变片测得的一组入射波、反射波以及透射波曲线, 其中试样 Hat-C、Hat-D 和 Hat-E 子弹撞击速度约为 $5.7\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 子弹长度分别为 $100$ 、 $200$ 、 $300$  mm, 其入射波的强度一致, 但加载脉冲长度不同, 这样实现了相同加载率、不同应变历程的加载, 对试样的不同加载进行“冻结”. Hat-B 为较高打击速度, 试样已发生剪切断裂. 图4(b)为按式(1)和式(2)处理得到的一组典型加载力—位移响应曲线.

实验后, 回收“冻结”试样对其剪切区进行微

观金相分析, 如图 5 所示。

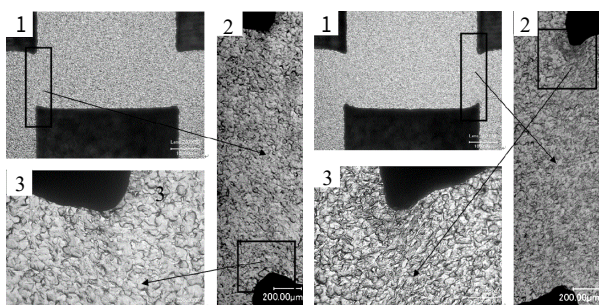


(a) 入射波、反射波及透射波



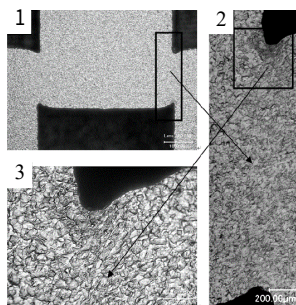
(b) 典型剪切力—位移曲线

图 4 TA2 钛合金剪切破坏响应曲线



(a) Hat-C

(b) Hat-D



(c) Hat-E

图 5 不同加载阶段剪切区变形及破坏

图 5(a)为 Hat-C 试样金相图, 剪切区晶粒未见明显变形, 只是在剪切区两端出现了晶粒拉长和碎化现象; 图 5(b)为 Hat-D 微观金相, 可看到剪切区晶粒被拉长, 其剪切区两端晶粒碎化严重; 图 5(c)为 Hat-E 试样金相图, 可清楚地观察到剪切区出现明显绝热剪切局域化现象, 形成一条极窄的相变带。结果显示: TA2 钛合金随剪切应变的发展达到临界应变后, 发生局域化, 且出现绝热剪切带, 相应的剪切应力—位移曲线出现软化特征<sup>[19]</sup>。

## 2.2 有限元模拟结果及比较

图 6 为帽型剪切试样在  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  速度撞击下, 计算得到的帽型剪切试样载荷随压进位移  $\Delta D$  的变化曲线。图 6 中还给出了实验得到的力—位移曲线, 两者符合较好。

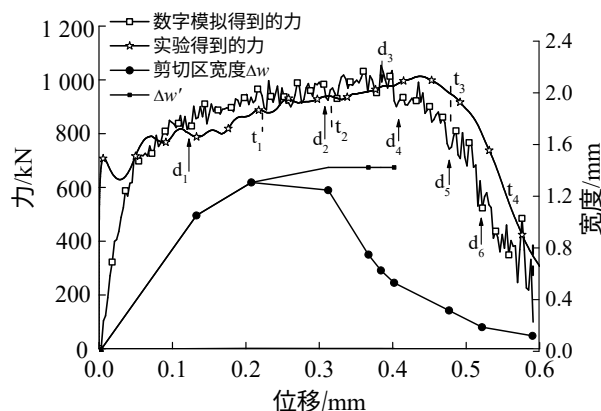


图 6 剪切力—位移曲线比较

图 7 为试样有限元计算剪切变形区等效塑性应变云图与实验 DIC 剪切应变场演化比较, 结果与 DIC 趋势吻合较好。从等效塑性应变云图可见: 动态加载过程, 随打进位移  $\Delta D$  发展, 试样塑性剪切区宽度是不断变化的。

在塑性剪切变形初期, 剪切区塑性应变分布较为均匀, 随着加载继续, 在 d2 至 d6 阶段, 剪切区(带)塑性应变不断演化, 剪切区应变呈梯度分布, 塑性剪切区宽度也不断增大, 最大剪切塑性区(带)宽度  $\Delta w$  约为 1.4 mm, 明显大于设计剪切区宽度 (0.05 mm)。继续加载, 当加载力达到峰值并开始下降时, 出现剪切变形的局域化集中发展, 剪切区宽度急剧减小, 形成极窄的局域化变形集中带。

图 8 为沿剪切区应变分布演化与 DIC 演化的比较, 直观地给出了剪切塑性应变演化及局域化过程, 应变不断集中, 最终形成高度集中的绝热剪

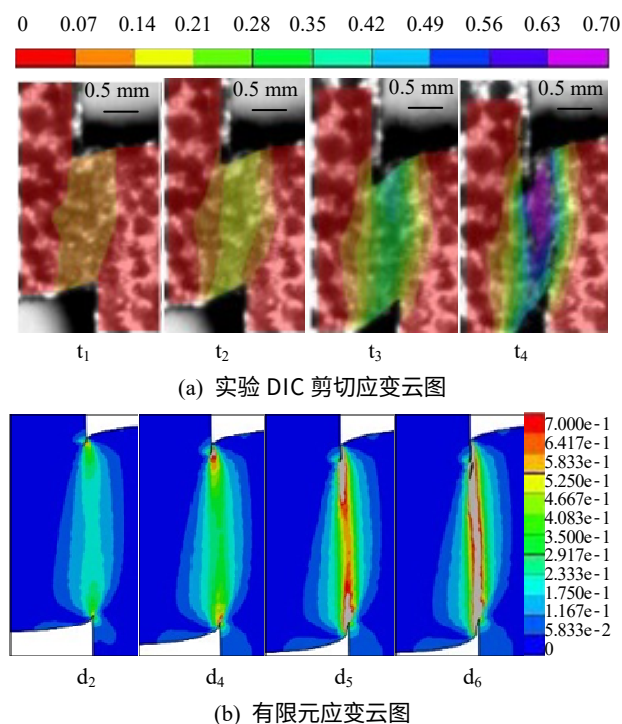
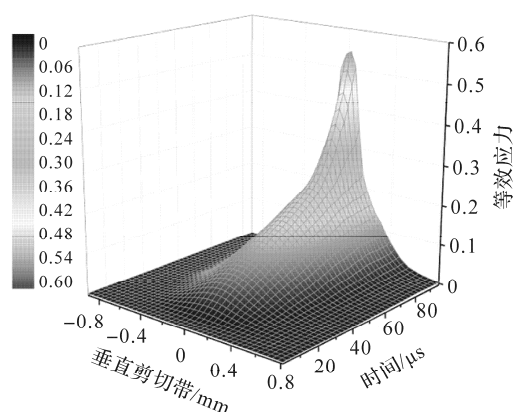
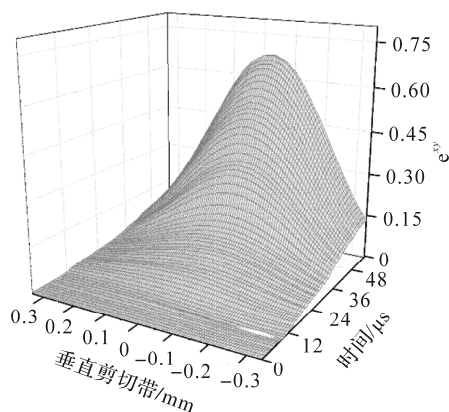


图7 剪切区应变云图与 DIC 实验结果比较



(a) 有限元塑性等效应变演化



(b) DIC 剪切应变演化

图8 沿剪切区有限元应变分布演化与 DIC 演化的比较

切带, 实验结果与有限元符合较好。

需要说明的是: 采用二维数字图像相关法测量给出的是试样剪切区剪应变演化曲线, 而有限元计算给出了应变云图为等效应变, 满足剪切加载状态, 两者的关系为:

$$\varepsilon_{eq} = (\sqrt{3}/3)\gamma_{xy}, \quad (6)$$

因剪切区宽度不断演化, 因此实验不能简单通过  $\gamma_{theo} = \alpha \approx \tan \alpha = \Delta D / \Delta w$  计算试样的剪切应变。

### 3 结语

采用 Hopkinson 压杆对 TA2 钛合金扁平帽形试样开展“冻结”实验, 结合微观金相分析, 研究绝热剪切局域化演化过程及其力学响应, 并探讨有限元数值实验分析方法。结果显示, 平板帽型试样动态加载下其剪切区的演化过程为:

(1)TA2 钛合金帽形试样绝热剪切破坏是由均匀变形到局部化再到断裂的演化过程, 微观上 TA2 晶粒被拉长、碎化, 最后形成相变带。绝热剪切带是从剪切区两端向中心扩展, 裂纹同样也是由剪切区两端向中间扩展。

(2)采用测试得到材料本构参数, 并引入剪切损伤软化模型描述绝热剪切带软化特性, 有限元模拟得出的应变演化、破坏图像以及实验数字图像相关法得到的剪切区应变场演化过程与“冻结”试样结果符合较好。

### 参考文献:

- [1] Dodd B, Bai Y L. Adiabatic Shear Localization: Frontiers and Advances[M]. Oxford: Pergamon, 1992:122-128.
- [2] Bai Y L, Dodd B. Adiabatic shear localization: Occurrence, theories, and applications[J]. Oxford, 1992, 3(4):73-75.
- [3] Zenner C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-32.
- [4] Marchand A, Duffy J. An experimental study of the formation process of adiabatic shear bands in a structural steel[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1988, 36(3):251-283.
- [5] Meyer L W, Staskewitsch E, Burblies A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading [J]. Mechanics of Materials, 1994, 17(2/3):203-214.
- [6] Hartmann K H, Kunze H D, Meyer L W. Metallurgical

- Effects on Impact Loaded Materials[M]. New York: Plenum Press, 1981:325-337.
- [7] Osovski S, Rittel D, Landau P, et al. Micro-structural effects on adiabatic shear band formation[J]. Scripta Materialia, 2012, 66:9-12.
- [8] Clifton R J. Response of materials under dynamic loading[J]. International Journal of Solids & Structures, 2000, 37(1):105-113.
- [9] Chen Y J, Meyers M A, Nesterenko V F. Spontaneous and forced shear localization in high-strain-rate deformation of tantalum[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 268:70-82.
- [10] Peirs J, Verleysen P, Degrieck J, et al. The use of hat-shaped specimens to study the high strain rate shear behaviour of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(6):703-714.
- [11] Clos R, Schreppel U, Veit P. Temperature, micro-structure and mechanical response during shear band formation in different metallic materials[J]. Journal de Physique, 2003, 110(4):111-116.
- [12] Liu L F, Dai H, Bai Y L, et al. Initiation and propagation of shear bands in Zr-based bulk metallic glass under quasi-static and dynamic shear loadings[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2005, 351:3259-3270.
- [13] Minnaar K, Zhou M. An analysis of the dynamic shear failure resistance of structural metals[J]. Journal of Mechanics, Physics and Solids, 1998, 40(10):2155-2170.
- [14] Wu F H, Freund L B. Deformation trapping due to thermoplastic instability in one dimension wave propagation[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1984, 32(2):119-132.
- [15] Zhou M, Rosakis A J, Ravichandran G. Dynamically propagating shear bands in impact-loaded prenotched plates II numerical simulations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1996, 44(6):1007-1021.
- [16] Batra R C, Ko K I. An adaptive mesh refinement technique for the analysis of shear bands in plane strain compression of a thermoviscoplastic solid[J]. Computational Mechanics, 1992, 10(6):369-379.
- [17] 付应乾, 董新龙. 工业纯钛动态压缩特性及破坏的实验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1):102-106.
- [18] 周刚毅, 董新龙, 付应乾, 等. 不同加载状态下 TA2 钛合金绝热剪切破坏响应特性[J]. 力学学报, 2016, 48(6): 1353-1361.
- [19] 付应乾, 董新龙. 帽型试样动态绝热剪切破坏演化分析[J]. 固体力学学报, 2015, 36(5):392-400.

## Experimental and numerical analysis of adiabatic shear evolution in hat-shaped specimen

SONG Peng-fei<sup>1</sup>, DONG Xin-long<sup>1\*</sup>, ZHOU Gang-yi<sup>1</sup>, FU Ying-qian<sup>1,2</sup>

( 1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China )

**Abstract:** Adiabatic shear is one of the important failure mechanism of ductile metal materials under the high strain rate deformation. In this paper, the hat-shaped shear test is carried out experimentally for TA2 titanium alloy using the split Hopkinson pressure bars. The adiabatic shear band is studied by microscopic metallurgical observation of “freezing” sample. Combined with the “freezing” sample, the evolution of adiabatic shear band and its mechanical response is studied. The shear damage model is adopted to describe the softening behavior of adiabatic shear band failure. The strain evolution and failure images using the finite element method are in agreement with the results obtained from digital image correlation method, and the metallographic observation in shear zone of “frozen specimens”.

**Key words:** hat-shaped shear specimen; adiabatic shear; DIC; finite element

(责任编辑 史小丽)