文章编号：1000-5773(2010)01-0031-06

结构钢中绝热剪切带形成与扩展的光学观测与数值模拟*

陈思颖[1]，黄晨光[2]，孔卫国[1]，倪国强[1]

(1. 北京理工大学光电成像与信息工程研究所，北京 100081；
2. 中国科学院力学研究所，北京 100190)

摘要：绝热剪切带(Adiabatic Shear Band，ASB)是许多金属材料在冲击载荷作用下发生破坏的主要原因之一，它是近年来冲击动力学和损伤力学研究的前沿和热点。相关的理论研究主要针对一维剪切条件，分析应力、应变、剪切速度、材料热物理和力学性能、初始缺陷大小之间的关系，得到一个由多个物理量组合而成的量来判别材料出现剪切带的难易。ASB 的实验主要利用 Hopkinson 压杆、扭杆、压剪炮等加载技术，研究钛合金、钨合金、高强结构钢等材料的剪切带特征，包括局部温度和变形分布、剪切带出现的阈值等。但是，对剪切带演化过程的在位观察及其动态实时演化的研究还较少见，妨碍了人们对由于剪切局部化而导致的材料破坏机理的深入认识。针对 45 钢，在 Hopkinson 压杆上，开展了不同冲击加载条件下剪切带演化过程的在位观察及可视化研究。利用自行设计的高分辨力的光学观测系统和基于数字相关理论的图像处理软件，捕捉了单一试样在冲击加载条件下 ASB 逐渐形成和扩展的过程。同时，利用 LS-DYNA 商业程序对试样的冲击压缩过程进行了数值模拟，所得主要结果与实验观测基本一致。

关键词：数值模拟；分离式霍普金森压杆(SHPB)；绝热剪切带；可视化
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

绝热剪切带(Adiabatic Shear Band，ASB)是一个剪切变形高度局域化的窄带形区域，宽度一般为 10^2 μm 量级。在 ASB 内可以产生 10～10^2 量级的剪应变，应变速率可高达 10^5～10^7 s^{-1}，温升可达 10^2～10^3 K。绝热剪切是材料在冲击载荷下的一个重要现象，普遍存在于爆炸复合、高速撞击、侵彻、冲孔、切削、高速成型、冲蚀等涉及冲击载荷的高速变形过程中。由于 ASB 是一种独特的局部失稳现象，与材料失效有着密切关系，材料构件出现 ASB 即意味着材料的承载能力下降或丧失，在绝热应力-应变曲线中表现为斜率由正向负的转变，被认为是材料失效的前兆。例如对于装甲材料来说，绝热剪切就是其主要失效形式之一。而在某些场合，也需要利用绝热剪切现象，如制造动能穿甲弹的材料，就要求有强的剪切失稳和变形局域化敏感性，从而在穿甲、侵彻过程中出现“自锐”现象[1]。正是由于其重大的理论和工程实际意义，世界各国都开展了长期的 ASB 研究。Culver 等[2]最先建立的绝热剪切临界条件，就属于由临界应变控制的单变量准则；徐天平、王礼立[3]等基于双曲型势垒热激活机制的热粘塑性本构方程，对室温下 Ti26Al24V 的热塑失稳进行了研究，得出了一个同时与应变和应变率相关的双变量准则；

* **收稿日期**：2009-04-20；**修回日期**：2009-08-26
基金项目：国家 973 计划(2009CB72400402)
作者简介：陈思颖(1975—)，女，博士，副教授，主要从事微弱信号检测与数字图像处理研究. E-mail：csy@bit.edu.cn

包合胜等[4]基于 Johnson-Cook 热粘塑性本构模型,导出了同时与应变、应变率及环境温度相关的三变量准则。此后 Clifton 和白以龙[5-6]在 20 世纪 80 年代的工作再次将绝热剪切带的研究推向了冲击动力学的前沿和热点。

在 ASB 的研究中,冲击加载下的绝热剪切变形是一个瞬间过程,持续时间很短,完全依赖实验手段来研究 ASB 的形成、发展及组织演化,目前的条件还不允许,因此,计算机数值模拟技术所发挥的作用就显得尤为突出。借助数值计算方法,可以对实验获得的应力-应变曲线进行分析,拟合出特定金属材料的热粘塑性本构方程;可以估算 ASB 内的绝热温升;模拟 ASB 的形成和发展过程以及 ASB 内部组织的演化过程等等。国内外学者在这方面也做了大量卓有成效的工作。Kuriyama 和 Meyers 等[7]建立了绝热剪切带扩展的数值计算模型,利用该模型及有限元方法建立了剪切带尖端的应力-应变分布与宏观变形量的函数关系,并预测了在 ASB 尖端存在一个宽度约为 5 μm 的包含高应变而相对低应力的区域,这在等温变形中是不存在的,并认为 ASB 是通过这个不稳定区域的形成而扩展的。Lebouvier 和 Lipinski 等[8]也对绝热剪切带扩展的问题进行了数值研究,分析结果表明,绝热剪切带的扩展存在两个阶段:在较低冲击速度条件下,剪切带的扩展速度强烈依赖于冲击速度;而在冲击速度逐渐增大的情况下,剪切带的扩展速度趋向于某个饱和值。

本工作针对 45 钢,在 Hopkinson 压杆上,开展了不同冲击加载条件下剪切带演化过程的在位观察及可视化研究,捕捉了单一试样在冲击加载条件下 ASB 逐渐形成和扩展的过程。利用数字相关方法对感兴趣的区域进行了位移场计算,同时,利用 LS-DYNA 商业程序对试样的冲击压缩过程进行了数值模拟,所得主要结果与实验观测基本一致。

2 数字相关方法介绍

数字散斑相关方法(DSCM)是对变形前后物体表面的两幅图像进行相关处理,以实现物体变形场的测量。这两幅图像既可以是物体表面本身的散斑场,也可以是表面纹理;使用的光源既可以是激光,也可以是白光光源。

设微小线段 $PQ(\mathrm{d}x,\mathrm{d}y,\mathrm{d}z)$ 变形后为 $P^*Q^*(\mathrm{d}x^*,\mathrm{d}y^*,\mathrm{d}z^*)$。$u$、$v$、$w$ 分别表示一任意点在 x、y、z 方向的位移分量。如果在变形前 P 点的坐标为 (x,y,z),Q 点的坐标则为 $(x+\mathrm{d}x,y+\mathrm{d}y,z+\mathrm{d}z)$,变形后的 P^*、Q^* 的坐标分别为

$$P^*=(x^*,y^*,z^*)=[x+u(P),y+v(P),z+\omega(P)] \tag{1}$$

$$Q^*=[x+u(P)+\mathrm{d}x^*,y+v(P)+\mathrm{d}y^*,z+\omega(P)+\mathrm{d}z^*] \tag{2}$$

式中

$$\begin{cases}\mathrm{d}x^*=u(Q)-u(P)+\mathrm{d}x\\ \mathrm{d}y^*=v(Q)-v(P)+\mathrm{d}y\\ \mathrm{d}z^*=\omega(Q)-\omega(P)+\mathrm{d}z\end{cases} \tag{3}$$

有

$$\begin{cases}u(Q)-u(P)\approx\dfrac{\partial u}{\partial x}\mathrm{d}x+\dfrac{\partial u}{\partial y}\mathrm{d}y+\dfrac{\partial u}{\partial z}\mathrm{d}z\\ v(Q)-v(P)\approx\dfrac{\partial v}{\partial x}\mathrm{d}x+\dfrac{\partial v}{\partial y}\mathrm{d}y+\dfrac{\partial v}{\partial z}\mathrm{d}z\\ \omega(Q)-\omega(P)\approx\dfrac{\partial \omega}{\partial x}\mathrm{d}x+\dfrac{\partial \omega}{\partial y}\mathrm{d}y+\dfrac{\partial \omega}{\partial z}\mathrm{d}z\end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases}\mathrm{d}x^*\approx\left(1+\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)\mathrm{d}x+\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)\mathrm{d}y+\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)\mathrm{d}z\\ \mathrm{d}y^*\approx\left(1+\dfrac{\partial v}{\partial y}\right)\mathrm{d}y+\left(\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)\mathrm{d}x+\left(\dfrac{\partial v}{\partial z}\right)\mathrm{d}z\\ \mathrm{d}z^*\approx\left(1+\dfrac{\partial \omega}{\partial z}\right)\mathrm{d}z+\left(\dfrac{\partial \omega}{\partial x}\right)\mathrm{d}x+\left(\dfrac{\partial \omega}{\partial y}\right)\mathrm{d}y\end{cases} \tag{5}$$

变形前后线段的长度分别为

$$\begin{cases} |PQ|^2=(\mathrm{d}x)^2+(\mathrm{d}y)^2+(\mathrm{d}z)^2 \\ |P^*Q^*|^2=(\mathrm{d}x^*)^2+(\mathrm{d}y^*)^2+(\mathrm{d}z^*)^2 \end{cases} \tag{6}$$

通过相关运算,能够在不同时刻的图像中,分别获得任意线段 PQ 的对应线段 P^*Q^*。通过公式(1)~公式(6),便可以得到被观察样品的位移场分布和时间演化规律。

在相关运算中,要使得相关系数(定义为下式)取极大值

$$C\left(x,y,\frac{\partial u}{\partial x},\frac{\partial u}{\partial y},\frac{\partial v}{\partial x},\frac{\partial v}{\partial y}\right)=\frac{\sum[F(x,y)\cdot G(x^*,y^*)]}{\left\{\sum\left[F(x,y)^2\right]\cdot\sum\left[G(x^*,y^*)^2\right]\right\}^{1/2}}=\frac{\langle F\cdot G\rangle}{[\langle F^2\rangle\cdot\langle G^2\rangle]^{1/2}} \tag{7}$$

式中:$F(x,y)$ 是第一个像的灰度函数,$G(x^*,y^*)$ 是第二个像的灰度函数。

另一种是用 $S'\left(u,v,\frac{\partial u}{\partial x},\frac{\partial u}{\partial y},\frac{\partial v}{\partial x},\frac{\partial v}{\partial y}\right)=1-C'$,它取最小值来判断[9]。

3　实验和光学观测

选取 45 钢作为实验材料,针对材料的特性和 ASB 的形成特点,完成了试样的设计、加工和表面处理。试样的尺寸见图 1。实验中希望通过对单个试样的多次冲击后的观测,能够看到 ASB 的逐步形成过程,每次冲击后都在原位使用相机拍摄冲击变形后的表面形貌,拍摄相机为 NIKON D200,有效像素为1 000万。

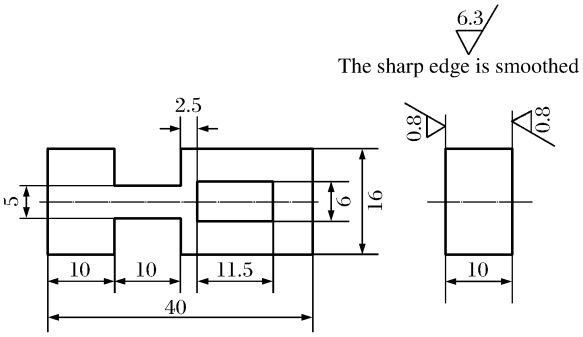


图 1　试样尺寸和结构图

Fig. 1　Sample demensions

实验在中国科学院力学研究所 Hopkinson 压杆装置上进行,对单一试样的采用的冲击速度逐渐增加,分别为:18.9、21.5、23.3 和 28.1 m/s。

每次实验后拍摄的试样受冲击而产生的变形情况如图 2~图 5 所示,图中圆圈所示区域为 ASB 容易出现的位置。可以看到,随着冲击速度的增大,在感兴趣区域的变形逐渐剧烈。针对图中圆圈标识区域,对第二次加载和第三次加载后的试样的同一区域,用自行编写的基于数字相关方法的算法进行了分析计算,得到的位移场如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出,该区域位移急剧变化,可以推测该区域有绝热剪切现象发生。

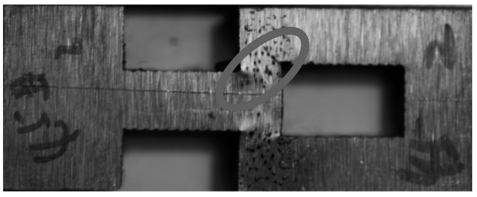


图 2　第一次冲击加载后的变形图

Fig. 2　Deformation fields after the first loading



图 3　第二次冲击加载后的变形图

Fig. 3　Deformation fields after the second loading



图 4　第三次冲击加载后的变形图

Fig. 4　Deformation fields after the third loading



图 5　第四次冲击加载后的变形图

Fig. 5　Deformation fields after the fourth loading

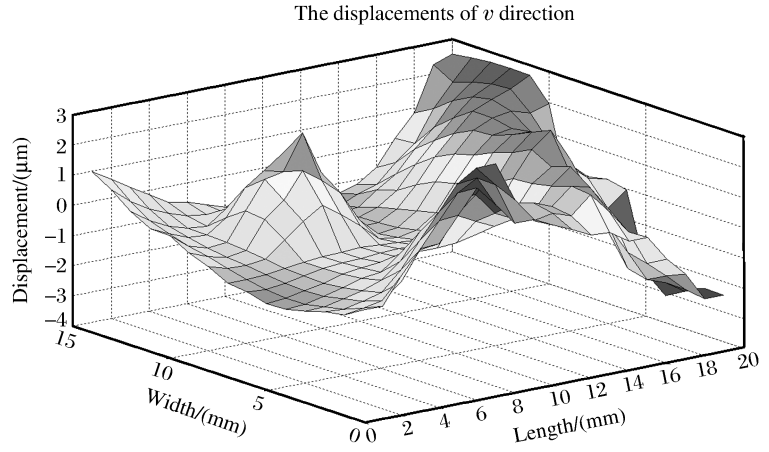


图 6 第二次加载后的 v 位移场

Fig. 6 The displacements of v fields after the second loading

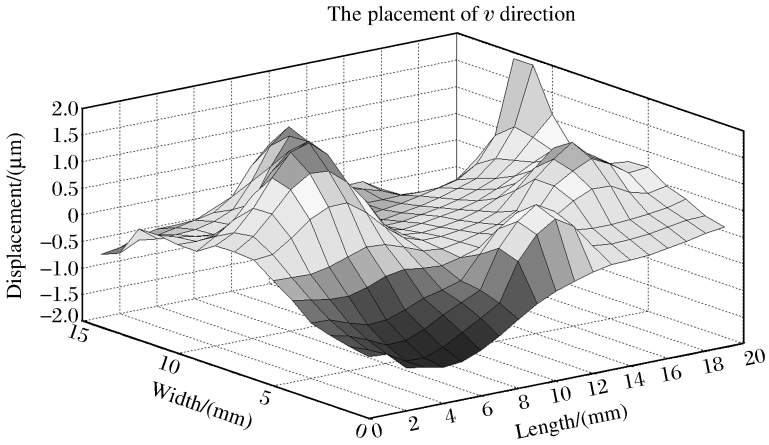


图 7 第三次加载后的 v 位移场

Fig. 7 The displacements of v fields after the third loading

为了证实样品中是否出现了绝热剪切带，用扫描电子显微镜(SEM)观察样品断口形貌，如图 8(a)、图 8(b)所示。图中银白色的亮球为材料在断口上熔化后冷却凝固的产物，这表明材料的失效源于 ASB 的萌生和发展，ASB 内部塑性变形产生的热使得材料局部区域发生熔化。

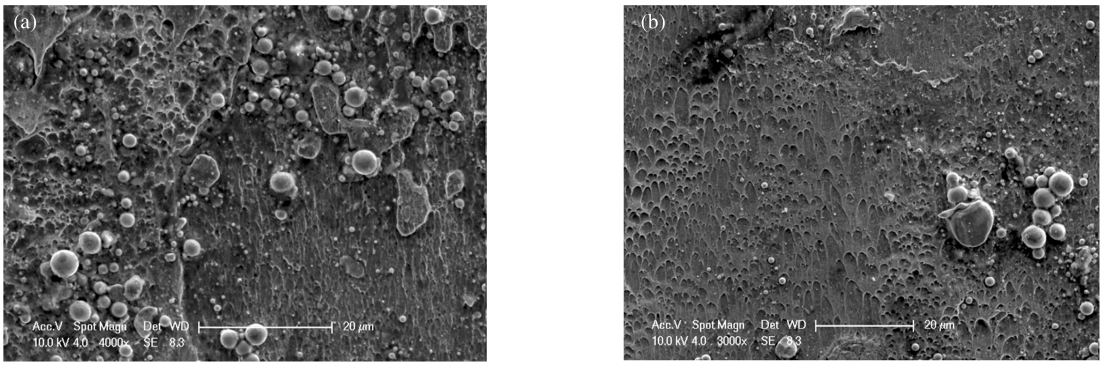


图 8 SEM 观察结果

Fig. 8 The microscopic examination results by SEM

4　数值模拟结果

数值模拟在 LS-DYNA 970 环境下进行,仿真时使用的材料本构关系为 Johnson-Cook 模型。单元网格图如图 9 所示,计算节点总数为 36 448,计算单元总数为 35 945。感兴趣区域如图中圆圈所示,放大后如图 10 所示。

根据加载条件和试样尺寸,加载后不同时间的等效塑性应变仿真结果如图 11～图 14 所示。从仿真结果可以看出,随着加载条件的变化,在图 9 中圆圈标识的感兴趣区域出现了明显的剪切变形高度局部化的状况,变形集中条带越来越窄,最大变形出现在加载后 30～50 μs,与实验结果符合良好。

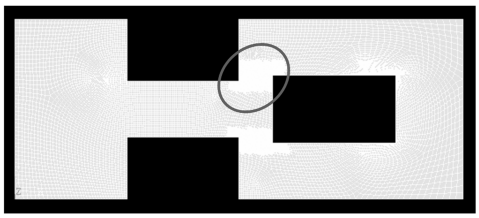


图 9　LS-DYNA 970 仿真的单元网格图

Fig. 9　The gridding in LS-DYNA 970 emulator



图 10　放大后的单元网格图

Fig. 10　The zoom out gridding in LS-DYNA 970 emulator

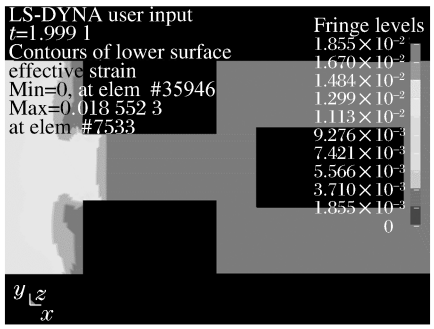


图 11　加载后 2 μs 的仿真结果

Fig. 11　The simulation results 2 μs after loading

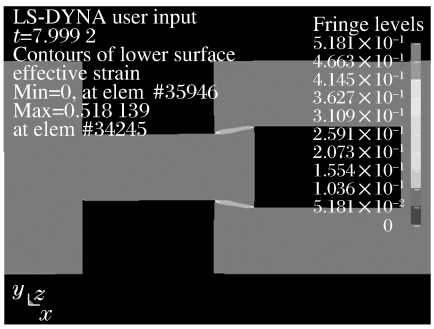


图 12　加载后 8 μs 的仿真结果

Fig. 12　The simulation results 8 μs after loading

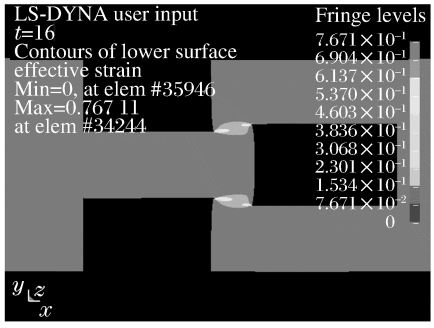


图 13　加载后 16 μs 的仿真结果

Fig. 13　The simulation results 16 μs after loading

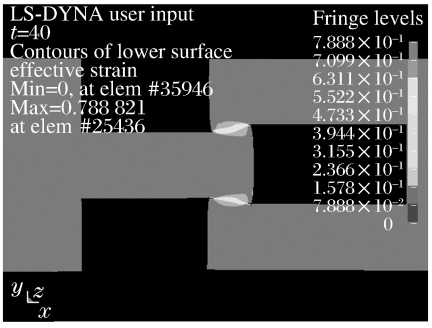


图 14　加载后 40 μs 的仿真结果

Fig. 14　The simulation results 40 μs after loading

5　结　论

绝热剪切带是金属材料在高速加载下出现破坏的主要原因之一。在 Hopkinson 压杆上对 45 钢试样进行了不同加载条件下的冲击实验。对实验现象利用数字相关方法进行了观察和分析,所得结果与数值模拟符合良好。结果表明:本工作发展的技术是进行绝热剪切带实验研究的一种可行手段。

References:

[1] Magness L S. Improving Mechanical Properties of Tungsten Heavy Alloy Composites through Thermo Mechanical Processing [A]//Proc First Int Conf on Tungsten and Tungsten Alloys [C]. Arlington: Metal Powder Industries Federation, 1992: 127-132.

[2] Culver R S. Metall Effects at High Strain Rates [M]. New York: Plenum, 1973: 519-575.

[3] Xu T P, Wang L L. The Thermo-Viscoplasticity and Adiabatic Shear Deformation for a Titanium Alloy Ti-6Al-4V under High Strain Rates [J]. Explosion and Shock Waves, 1987, 7(1): 1-7. (in Chinese)
徐天平, 王礼立, 卢维娴. 高应变速率下钛合金 Ti-6Al-4V 的热粘塑性特性和绝热剪切变形 [J]. 爆炸与冲击, 1987, 7(1): 1-7.

[4] Bao H S, Wang L L, Lu W X. The High Velocity Deformation and Adiabatic Shearing of a Titanium Alloy at Low Temperature [J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(2): 109-119. (in Chinese)
包合胜, 王礼立, 卢维娴. 钛合金在低温下的高速变形特性和绝热剪切 [J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(2): 109-119.

[5] Cilfton R J. Adiabatic Shear Banding [A]//Materials Responses to Ultra-High Loading Rates [C]. Washington: National Academy of Sciences, 1980.

[6] Bai Y L. Thermo-Plastic Instability in Simple Shear [J]. J Mech Phys Solids, 1982, 30: 195-207.

[7] Kuriyama S, Meyers M A. Numerical Modeling of the Propagation of an Adiabatic Shear Band [J]. Metallurgical Trans A, 1986, 17A: 443-449.

[8] Lebouvier A S, Lipinski P. Numerical Study of the Propagation of an Adiabatic Shear Band [J]. J Phys Ⅳ France, 2000, 10: 403-408.

[9] Jin G C. Computer-Aided Optical Metrology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

Optical Observation and Numerical Simulation on the Evolution of Adiabatic Shear Band in Structural Steel

CHEN Si-Ying[1], HUANG Chen-Guang[2], KONG Wei-Guo[1], NI Guo-Qiang[1]

(1. *Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Institute of Mechanics, Chinsese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract: Adiabatic shear band (ASB) may cause damages and failures of many metal materials under impact loading, which is a key issue in the research of damage mechanism. The theoretical study is mainly focused on the relationship among the strain, stress, speed of shear and the initial flaw size in one-dimension shear conditions, which is used to determine the possibility of the generation of ASB. By experimental investigations, the features of ASB of titanium alloy, tungsten alloy and high-strength structural steel, including deformation fields, local temperature and the threshold value for ASB generating, can be detected. However, since there is little study on the real-time and *in-situ* measurements on the evolution process of ASB, the failure details according to the shear-localization are still unknown. In this paper, the real-time observations and visualizations on the evaluation of ASB in 45 steel under different impact conditions in SHPB are presented. The generating and evaluating processes in a single sample are detected and analyzed by a self-design optical system and the self-designed software, which is based on Digital Correlation method with high resolution. At the same time, the numerical simulations and micro-observations by SEM are obtained by LS-DYNA and the simulation results are in good agreement with the experimental ones.

Key words: numerical simulation; split Hopkinson pressure bar (SHPB); adiabatic shear band; visualization