

帽型试样的绝热剪切数值模拟与温度场研究

Numerical Simulation of Adiabatic Shear and Temperature Field in Hat-shaped Specimens

冀建平, 才鸿年, 李树奎

(北京理工大学 材料科学与工程学院, 北京 100081)

Ji Jian-ping, Cai Hong-nian, Li Shu-kui

(School of Materials Science and Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 通过选择恰当的模型和科学的空间离散化,对 SHPB 加载过程进行了 2D 数值模拟,数值重现了帽型试样高应变条件下的绝热剪切变形历程。基于应力塌陷绝热剪切形成判据分析了材料绝热剪切变形规律;利用模拟结果的应力-时间、应变-时间曲线进行了温度场的计算,确定了剪切带的类型,计算结果与实验结果吻合。

关键词: 绝热剪切变形; SHPB; 帽型试样; 数值模拟

中图分类号: TG301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4381(2007)10-0027-04

Abstract: Appropriate model and space discretization were chosen to simulate the loading process of specimens conducted on the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) in two-dimension, and the adiabatic shear deformation course of the hat-shaped specimen under high strain rate was obtained. Based on the criterion of the formation of adiabatic shear to Stress Collage, the rule of adiabatic shear deformation was analyzed, the simulated stress-time curves and strain-time curves were employed to calculate the temperature field, the type of the shear bands was determined, and the results of numerical simulation are consistent with the experimental results.

Key words: adiabatic shear deformation; SHPB; hat-shaped specimen; numerical simulation

绝热剪切变形断裂是高应变率条件下材料独特而普遍的失效模式。不同材料发生绝热剪切变形的难易程度存在很大的差别,材料的绝热剪切特性又直接影响材料的高应变率使用性能,因此必须了解各种材料对绝热剪切变形局域化的敏感程度。

数值模拟方法在对 ASB 的形核、扩展及 ASB 内组织演化过程的研究中起到了巨大作用^[1,2]。Wright 和 Batra^[3]采用数值模拟方法对 ASB 进行了一维模拟,发现当剪切带位置上应力接近最大值时保持一段时间恒定,接着应力迅速下降(Stress Collage),这是有关 ASB 内应力场的最重大的发现,也被众多的后来的数值模拟人员作为判定 ASB 是否生成的标志。Wright 和 Watters^[4]采用渐近分析(Asymptotic Analyses)方法论证了有关应力塌陷的问题。分别采用等效塑性应变等于 0.50,等效应力达到最大值和应力塌陷作为 ASB 形成的判据。李剑荣等^[5]利用 ABAQUS 模拟了钨合金圆台试件在冲击载荷下的变形和剪切局部化行为,计算结果表明绝热剪切带的形成和发展与

试件的应力状态密切相关^[6,7]。这些数值模拟重点强调应力、应变场的研究,而现有的商业有限元软件 ANSYS 在利用热粘塑性本构关系(Johnson-Cook)进行数值计算时,无法输出单元的温度数据。

本研究对 SHPB 加载条件下的帽型试样的绝热剪切变形进行了数值分析,并计算了剪切带区域的绝热温升来判定剪切带的类型,计算结果与实验结果一致。

1 有限元模型

本研究模拟的物理过程是 SHPB 加载过程。为了更好的揭示 SHPB 加载过程中材料的物理本质同时也为了节约计算成本,并考虑与实验条件相吻合,将子弹、入射杆、透射杆、吸收杆和试样用轴对称模型来描述,取各自纵截面的一半进行计算,将一个实际上的三维问题简化为二维问题。前处理过程采用 ANSYS 完成实体模型的建立和有限元网格的划分(见图 1),其中右侧所注单元自上而下分别为单元 901, 821,

840, 759, 674。入射杆、透射杆、吸收杆尺寸见表 1。模型中都采用 PLANE162 单元网格。

表 1 SHPB 入射杆、透射杆、吸收杆尺寸 (mm)

Table 1 The dimensions of SHPB incident bar, transmission bar and absorability bar (mm)

	Bullet	Incident bar	Transmission bar	Absorbability bar
ϕ/mm	14.5	14.5	14.5	14.5
L/mm	195	695	695	1000

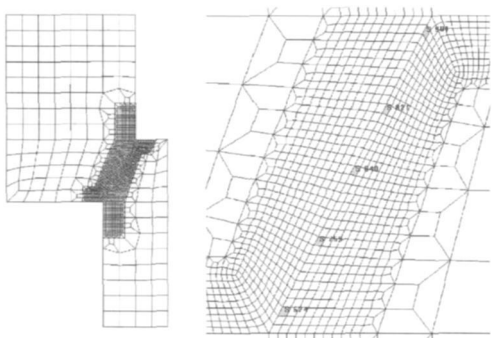


图 1 帽型试样网格及剪切区域细化图

Fig. 1 The mess of hat-shaped specimens and fine images in shear zone

为了更好地描述绝热剪切带, 单元尺寸必须很小。考虑到剪切带仅局限于一个窄长的区域, 为了减少计算开销, 采用了两种粗细不同的网格, 如图 1 所示。帽型试样剪切区域是发生变形局部化的敏感区域, 在该区域单元划分需要比较细密。绝热计算忽略热传导效应, 如果计算中网格划分过粗则不能反映剧烈的剪切变形, 而网格划分过细, 则不能忽略热传导效应, 否则表现为塑性功耗散集中在极小区域, 变形局部化和失稳提前出现, 与实际情况相差很远。考虑到实验中观察到的剪切带宽度不超过 100 μm , 而典型的晶粒尺寸为 20~ 50 μm , 因此在剪切区域中的最小网格尺寸取为约 30 μm , 远离该区域网格逐渐粗化。

2 本构模型和材料参数选择

数值模拟中只有选择合适的材料模型及模型参数, 才能较好地反映使用环境下的材料性能, 从而得到正确的模拟结果。根据本研究的 SHPB 加载过程, 选取两种不同的材料模型。即: 子弹、SHPB 压杆材料模型和帽型试样材料模型。

2.1 子弹、SHPB 压杆材料本构模型

考虑加载过程中子弹及 SHPB 杆不发生塑性变形, 因此选择弹性本构关系。材料模型及参数见表 2。

表 2 子弹和 SHPB 的本构模型及其参数

Table 2 Constitutive relation and parameters of bullet and SHPB

MAT_ELASTIC		
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν
7.85	210	0.3

2.2 帽型试样本构模型及状态方程

帽型试样在加载过程中, 其剪切区域承受强烈的剪切变形, 出现了绝热剪切带。为了更好地模拟绝热剪切过程, 需引入能反映应变硬化、应变率硬化和热软化的本构关系, 才能得出正确的结果。因此选取 Johnson-Cook 本构模型^[8]。

Johnson-Cook 本构模型为:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] [1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

其中, A, B, C, n, m 为 5 个需要实验确定的参数; B 为应变硬化系数; C 为应变率敏感系数; m 为温度敏感系数; T_r 为参考温度(一般取室温值); T_m 为熔点温度; $\dot{\epsilon}_0$ 一般为参考应变率。

可以看出, Johnson-Cook 本构关系中三个因子分别表达了流变应力与应变、应变速率及温度之间的关系, 分别表征了材料的应变硬化、应变率硬化和热软化特性。

模拟中采用 45 钢退火态材料参数, 其中本构关系中的五个参数和 LS-DYNA 计算中所用到的数据如下:

密度: $\rho = 7.85\text{g}/\text{cm}^3$; 弹性模量: $E = 210\text{GPa}$; 剪切模量: $G = 0.76\text{GPa}$; 初始温度: $T_r = 298\text{K}$; 熔点: $T_m = 1765\text{K}$; 比热: $c = 452\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 泊松比: $\nu = 0.3$; $A = 497.75\text{MPa}$; $B = 647.15\text{MPa}$; $n = 0.393$; $C = 0.06$; $m = 0.626$ 。

45 钢调质态的 A, B, n, C, m 与 45 钢退火态有所不同, 在此不一一列出。

在 LS-DYNA 计算中 Johnson-Cook 本构关系要求与状态方程相匹配, 采用 Mie-Gruneisen 状态方程^[9]。

3 计算结果分析讨论

3.1 加载速度对绝热剪切带的影响

45 钢退火态材料在不同加载速度下、不同时刻等效应力等值云图见图 2。

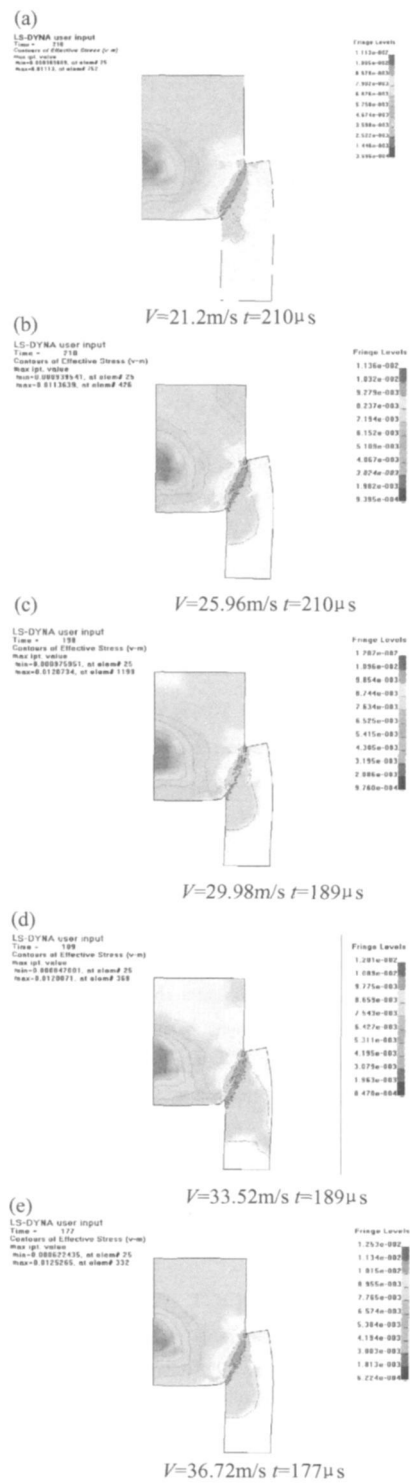


图2 45 钢退火态材料在不同加载速度下、不同时刻等效应力等值云图

Fig. 2 Equivalent stress fringes of 45 steel at various velocities and time

45 钢退火态剪切中间单元 840 在不同加载速度下的等效应力-时间曲线如图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出, 45 钢退火态在前两个低速加载条件下, 剪切区域特征单元没有发生应力塌陷,

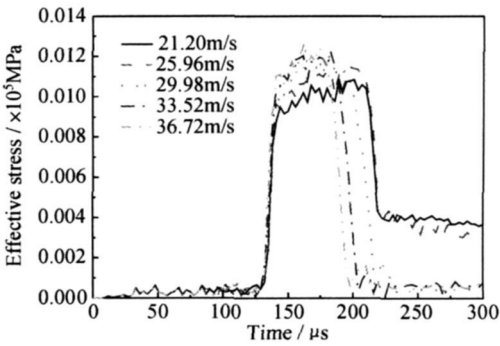


图3 剪切中间单元 840 在不同加载速度下的等效应力-时间曲线

Fig. 3 Effective stress-time curves of element 840 in shear zone at various velocities

其中的应力下降是卸载造成的; 而在后三种高速加载条件下, 剪切区域均出现了应力塌陷, 也就是说, 该材料在这种加载环境下发生了绝热剪切变形。随着加载速度的提高, 应力幅值增大, 应力持续时间缩短, 应力塌陷的时间也逐渐提前。

3.2 绝热剪切带温度场计算

采用 Johnson-Cook 材料模拟来表征材料的应变硬化、应变率硬化和热软化性能, 但无法输出温度场。本研究利用式 (3) 来间接求解特征单元的温度场。通过特征单元温度场的表征, 来分析绝热剪切带的类型。

$$\Delta T(t) = 0.9\alpha(t)d\varepsilon/\rho C \tag{3}$$

其中: $\alpha(t)$ 为 t 时刻的应力; $d\varepsilon$ 为 t 时刻的应变; ρ 为密度; C 为比热; $\Delta T(t)$ 为 t 时刻的温升。

许多国内外学者在研究绝热剪切现象时, 利用下式来判定绝热剪切带的类型。

当 $T = 0.4T_m$ 时, 材料将发生再结晶。可以这样认为, 当特征单元在加载过程中出现应力塌陷, 且单元的温度超过熔点的 0.4 倍时, 认定剪切带的类型为转变带, 即在金相显微镜下观察到的白亮带; 若温度低于熔点的 0.4 倍时, 即认为剪切带的类型为形变带。

选取 45 钢退火态和 45 钢调质态两种材料在加载速度为 29.98m/s 时的变形, 将数值模拟的等效应力-时间曲线、等效应变-时间曲线输出, 计算特征单元的温度。来判定所形成剪切带的类型。

图 4、5 所示的是 45 钢退火态、45 钢调质态剪切区域特征单元的等效应力-时间曲线和温度-时间曲线。

45 钢的熔点为 1765K, $0.4T_m$ 为 706K。从图 4 中可知特征单元在应力塌陷时刻的温度未超过 $0.4T_m$, 故 45 钢退火态材料所产生的绝热剪切带为形变带; 而从图 5 曲线中得知 45 钢调质态特征单元在应力塌陷时刻的温度超过 $0.4T_m$, 剪切区域特征单元的温度已达到 800K 以上, 因此, 该特征区域已发生了转变带。

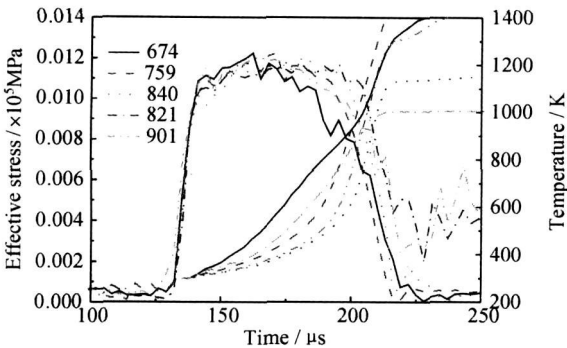


图 4 45 钢退火态剪切区域特征单元的
等效应力-时间曲线和温度-时间曲线

Fig. 4 Effective stress-time and temperature-time
curves of feature units in shear zone of annealing 45 steel

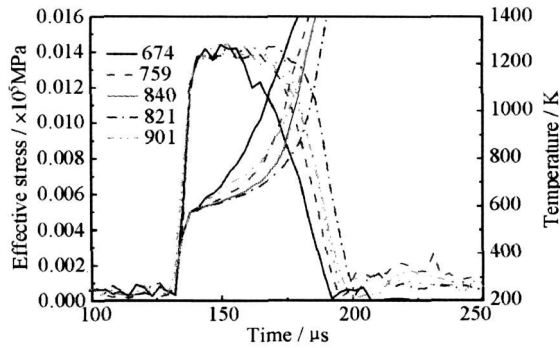


图 5 45 钢调质态剪切区域特征单元的
等效应力-时间曲线和温度-时间曲线

Fig. 5 Effective stress-time and temperature-time
curves of feature units in shear zone of
quenched and tempered 45 steel

模拟结果与实验结果比较,当打击速度为 29.98 m/s 时,45 钢退火态观察到的是形变带,而 45 钢调质态实验观察到的是白亮带。数值模拟结果与实验结果相吻合,如图 6 所示。

4 结论

- (1) 随着加载速度的提高,绝热剪切越易出现。
- (2) 利用数值模拟获取的特征单元的应力、应变数据,计算了特征单元的温度场。当单元温度超过熔点温度的 0.4 倍时,剪切带的类型为转变带;反之则为形变带。

参考文献

[1] 谭成文. 破片特征参数预测中的若干问题研究[D]. 北京: 北京理工大学博士学位论文, 2004.

[2] 谭成文,王富耻,李树奎. 绝热剪切变形局部化研究进展及发展趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 26(5): 62- 66.

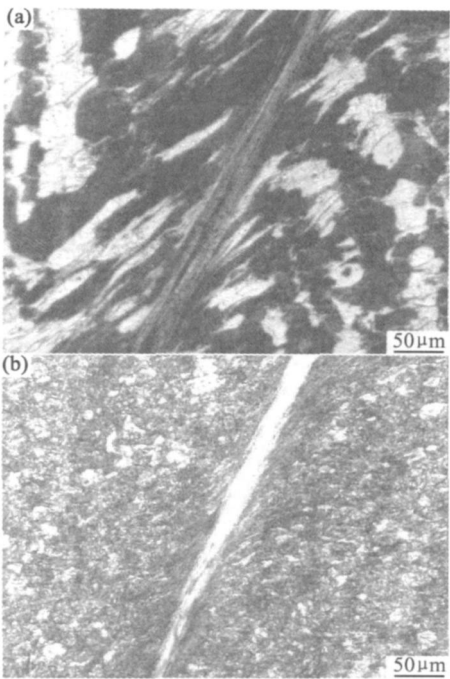


图 6 V= 29.98 m/s 不同材料剪切区微观形貌
(a) 45 退火; (b) 45 调质

Fig. 6 Micrographs in shear zone of different materials
at V= 29.98 m/s (a) annealing state of 45 steel;
(b) quenched and tempered 45 steel

[3] WRIGHT T W, OCKENDON H. A model for fully formed shear bands[J]. J Mech Phys Solids, 1992, 40(6): 1217- 1226.

[4] DEAN J R. Analysis of adiabatic shear banding in a thick-walled steel tube by the finite element method[M]. Virginia: the Virginia Polytech Institute and State University, 1996. 1- 2.

[5] 李剑荣,虞吉林,魏志刚. 冲击载荷下钨合金圆台试件绝热剪切变形局部化的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 257- 262.

[6] WEI Zhi-gang, YU Ji-lin, LI Jian-rong, et al. Influence of stress condition on adiabatic shear localization of tungsten heavy alloys [A]. Hypervelocity Impact Symposium [C]. Galveston: Texas, 2000.

[7] CHICHILID R, RAMESH K T. Recovery experiments for adiabatic shear localization: a novel experimental technique[J]. Journal of Applied Mechanics, 1999, 66: 10- 20.

[8] JOHNSON G R, COOK W H. High velocity oblique impact and ricochet mainly of long rod projectiles[A]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics [C]. Netherlands: The Hague, 1983.

[9] HALLQUIST J O. LS-DYNA keyword user's manual[M]. USA: Livermore Software Technology Corporation, 2001.

收稿日期: 2006-06-20; 修订日期: 2007-03-20

作者简介: 冀建平(1965-), 男, 博士研究生, 研究方向为材料动力学, 联系地址: 北京市 1251 信箱机电工程系(102602)。