DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0150-07

高锰钢帽型样品在高速冲击下的剪切行为*

金 婷,杨 平
(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

摘要: 绝热剪切带是材料在高速变形时一种典型的破坏形式,为了更好地理解高速冲击过程中绝热剪切带的形成和扩展,基于 Johnson-Cook 本构模型,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对高锰钢帽型样品高速冲击过程的剪切行为进行了二维数值模拟。结果表明:横穿剪切带方向,应力应变分布都是剪切带中心最高,然后向两边逐渐降低,类似于高斯分布;平行于剪切带方向,应力应变分布则是呈两端高中间低的特点。然后利用模拟的应力应变场分布确定了剪切带和裂纹形成及扩展方向,即从剪切区两端形成并向中间扩展;最后通过编辑软件的 k 文件直接得到了剪切带内部及周围形变影响区和基体的温度分布,其和应力应变场分布规律一致,结果与实验结果基本吻合。

关键词: 固体力学;绝热剪切带;高速冲击;高锰钢
中图分类号: O344 **国标学科代码**:1301555 **文献标志码**: A

在爆炸,切削,高速撞击等过程中,由于变形在极短的时间内完成,大部分塑性功转化成的热能来不及散失,就会形成绝热剪切带(adiabatic shear band, ASB)。虽然对 ASB 内因高速形变造成绝热温升带来的连续式动态再结晶已有不少研究,但大部分都是基于变形前后的对比。在极短时间内,其变形过程尚不十分清楚,此时变形过程中的应力应变和绝热温升在剪切带中的分布扮演着重要角色。李继承等[1-2]利用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟 921A 钢帽形样经霍普金森杆高速冲击过程,发现绝热剪切带从剪切区两端向其中心扩展,裂纹尖端存在一个高温高应变区,该区域随着断裂的发展而逐渐向剪切区中心扩展。冀建平等[3]用同样方法模拟了 45 钢帽形样霍普金森杆高速冲击过程,并根据特征单元应力应变数据,计算特征单元温度随时间变化,从而确定 45 钢退火态材料所产生的绝热剪切带为形变。两者虽然目的不一样,材料不一样,但都通过 ANSYS/LS-DYNA 软件成功模拟了霍普金森杆高速冲击过程,不同模拟结果与实际都吻合。说明只要选择合适的本构模型,ANSYS/LS-DYNA 软件模拟各种材料高速冲击过程是适合的。A. Marchand 等[4]通过实验发现等效应变超过 40%,流动应力开始迅速下降,这种应力坍塌现象随后也被 T. W. Wright 等[5]通过数值模拟发现,后来被众多学者作为判定 ASB 是否生成的标志。M. Zhou 等[6]还得到了应力坍塌的产生所需临界应变的经验公式,并指出等效应变到达临界应变时发生应力坍塌。D. J. Rattazzi 等[7]分别采用等效塑性应变等于 0.5,等效应力达到最大值和等效应力下降到最大值的 90%作为形成剪切带的临界条件,发现剪切带开始时间与选择的临界条件有关。高锰 TRIP 钢在形变过程中会发生相变,需要考虑模拟过程中不涉及相变是否对模拟结果影响较大。A. Khosravifard 等[8]利用 ANSYS 软件包对高锰 TRIP/TWIP 钢高应变速率扭转进行有限元模拟,模拟过程中不考虑组织变化,仅输入力学和热学参数,并采用简易的时间力矩曲线进行加载,主要观察剪切应力应变分布及应变率软化行为和高速形变过程中绝热温升,发现模拟结果与实际吻合。说明不考虑组织变化,依然可以模拟剪切带内外应力应变场、温度场分布。

本文中选择 Johnson-Cook 本构模型和 Grüneisen 状态方程,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟高锰 TRIP 钢高速冲击过程,可对实验结果进行补充,有利于更加全面了解高锰 TRIP 钢高速冲击过程。

* **收稿日期**: 2015-06-02; **修回日期**: 2015-12-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(51271028)
第一作者: 金 婷(1990—),女,硕士研究生; **通信作者**: 杨 平,yangp@mater.ustb.edu.cn。

1　热粘塑性本构模型

Johnson-Cook 模型形式简单、参数较少，是目前应用最广泛且与应变率相关的材料本构模型之一，并同时考虑到了金属材料的应变强化效应、应变率强化效应和热软化效应。Johnson-Cook 本构模型：

$$\sigma=(A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right)(1-T^{*m}) \tag{1}$$

式中：ε_{p}为等效塑性应变，A 为准静态下的屈服应力，B 为应变硬化系数，n 为应变硬化指数，$\dot{\varepsilon}_{0}$ 为参考应变率(可取准静态应变率)，C 为应变率敏感系数，$T^{*}=(T-T_{\mathrm{r}})/(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{r}})$，$T_{\mathrm{r}}$ 和 T_{m} 分别为参考温度和熔化温度，一般取 T_{r} 为 300 K，m 为热软化系数。

由于实验在室温进行，即 $T^{*}=0$，故可将式(1)转化为：

$$\sigma=(A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n})\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right) \tag{2}$$

当实验为准静态状态时，可将式(2)变为转化为：

$$\sigma=A+B\varepsilon_{\mathrm{p}}^{n} \tag{3}$$

将式(3)两端取对数，可转化为

$$\ln[(\sigma-A)/\mathrm{MPa}]=n\ln\varepsilon+\ln(B/\mathrm{MPa}) \tag{4}$$

最后利用准静态实验数据进行曲线拟合，即可得到 A、B 和 n。

实验采用高锰钢各组分的质量分数为：Mn，17.22%；Si，2.87%；Al，0.48%；C，0.022%。将高锰钢准静态下的实验数据进行曲线拟合，最终得到材料屈服强度 $A=236.58$ MPa，曲线斜率 $n=0.76$，截距 $\ln(B/\mathrm{MPa})=7.525\,8$，即 $B=1\,948$ MPa。

当 $\varepsilon=0$ 时，室温下 Johnson-Cook 本构模型可以转化为屈服强度与应变率的函数：

$$\sigma_{\mathrm{s}}=A\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right) \tag{5}$$

根据实验得到的不同应变率下的屈服强度值，利用最小二乘法拟合得出 $C=0.052$。同理 m 可由准静态下不同温度下的应力应变数据拟合得到，取 $m=1$[9]。状态方程中的参量和损伤失效参量都需要大量的实验才能确定，受实验条件限制，取值参考文献[10]。

2　有限元模型及验证

模拟的帽形样品尺寸如图 1 所示。鉴于系统的轴对称特性，数值模型简化为二维轴对称模型，如图 2 所示。

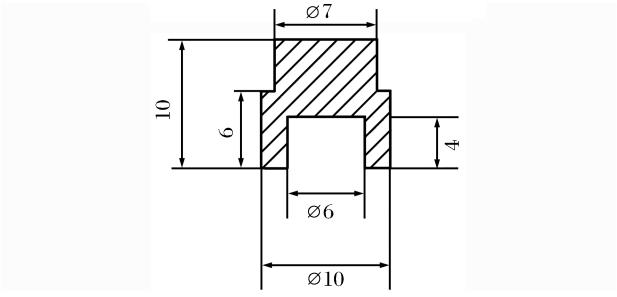

图 1　帽型样的结构和尺寸

Fig. 1　Structure and size of hat-shaped specimen

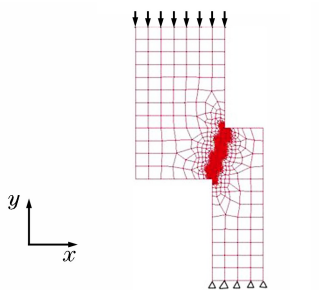

图 2　有限元模型示意图

Fig. 2　Schematic diagram of finite element model

为了更精确地反映数据变化规律，在变化梯度较大的强制剪切区应细化网格。利用实验得到的应力时程曲线，如图 3 所示。在试样的上端施加载荷，在对实验进行初步模拟时，将载荷曲线简化为折线，将屈服之前的应力简化为一条直线，起点是原点，屈服之后的应力简化为一条直线，终点和实验得到的曲线终点重合，加载时间和实验一致，为 80 μs。虚线是实验得到的应力时程曲线，实线是简化的加载曲

线。试样下端固定。

通过上面的数值模拟,可以得到加载 80 μs 后试样的位移量为 0.139 mm,然后与实验结果(实验测得变形量为 0.124 mm)作对比,发现高速冲击后试样的长度有 0.015 mm 的误差,有一定的吻合性。

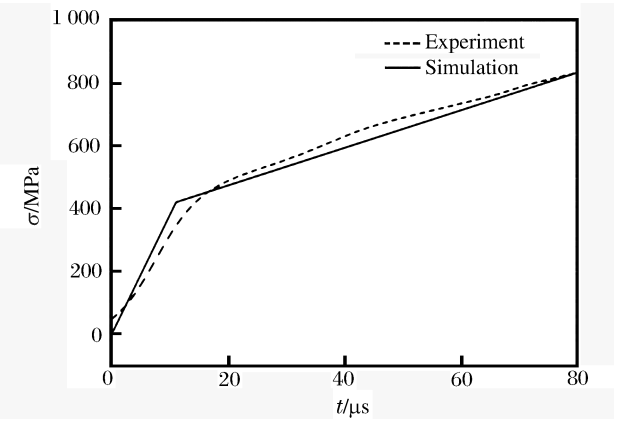

图 3 应力时程曲线实验和数值模拟的对比

Fig. 3 Comparison of stress-time curves obtained from experimental data and simulation

3 模拟结果与讨论

3.1 剪切带形成判据

定义直角坐标系下特征单元位置,如图 4 所示。将剪切带靠近帽顶的一端定义为剪切带的上端,靠近帽沿一端定义为剪切带的下端。将特征单元 404 和 1941 等效塑性应变达到临界应变时的平均压下量作为形成剪切带和剪切带贯穿整个剪切区域所需的平均压下量,等效塑性应变随压下率(压缩前后的长度差与原始长度的比值)变化曲线如图 5 所示。根据绝热剪切带的定义,高速变形时,塑性变形功基本完全转化为热量,而热量来不及散失,引起热软化现象,变形过程中,加工硬化和热软化相互竞争,当热软化大于加工硬化时,便会出现绝热剪切带。所以当某一个单元在剪切带内,由于热软化大于加工硬化,在卸载前,该单元就会出现应力下降,而剪切带外的单元加工硬化大于热软化,只有在卸载时(当 t =80 μs 时)应力才会下降。

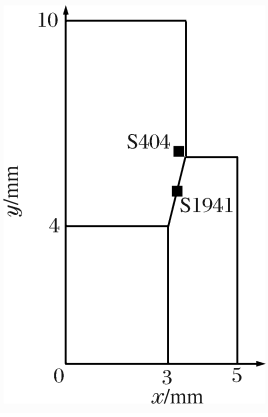

图 4 直角坐标系示意图

Fig. 4 Schematic of the cartesian coordinate system

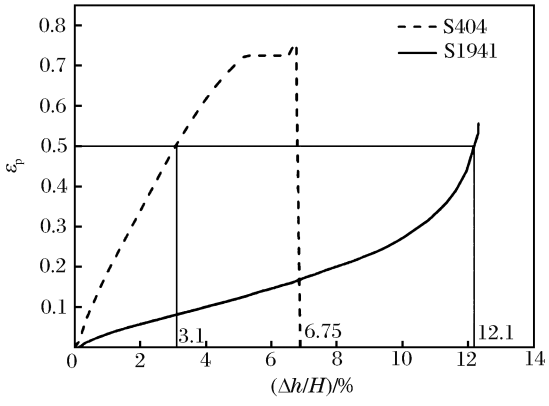

图 5 等效塑性应变随压下率变化曲线

Fig. 5 Relationship between effective plastic strain and reduction rates

图 6 所示为 2 个不同单元的剪切应力时程曲线,从图中可知,单元 2167 在卸载前剪切应力就下降了,而单元 1680 在卸载时剪切应力才下降。所以,单元 2167 在剪切带内,而单元 1680 不在剪切区内,且卸载前应力下降时的等效塑性应变为形成剪切带的临界等效塑性应变。图 7 所示为单元 2167 的剪切应力等效塑性应变关系曲线,可以看出,剪切应力下降时对应的等效塑性应变为 0.500。结合变形量下强制剪切区域的扫描电镜形貌图,如图 8 所示,可以看出在形变量 9.65%下未产生剪切带只是发生了相变,而在形变量 12.40%、23.20%、25.80%下均能看到明显的剪切带,且贯穿整个强制剪切区,说明形成剪切带且贯穿整个剪切区的临界形变量处于 9.65%和 12.40%之间。从图 5 中特征单元 1941 随形变量逐渐增加的等效塑性应变曲线图可以看出等效塑性应变 0.500 对应的形变量为 12.10%,正好处于9.65%和 12.4%之间,和实验观察到的现象吻合。因此,本文中把等效塑性应变为 0.500 作为判定 ASB 是否生成的标志。

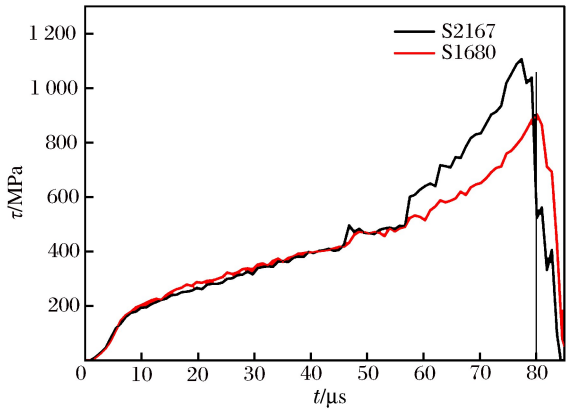

图 6　不同单元的剪切应力时程曲线

Fig. 6　Histories of shear stress at different elements

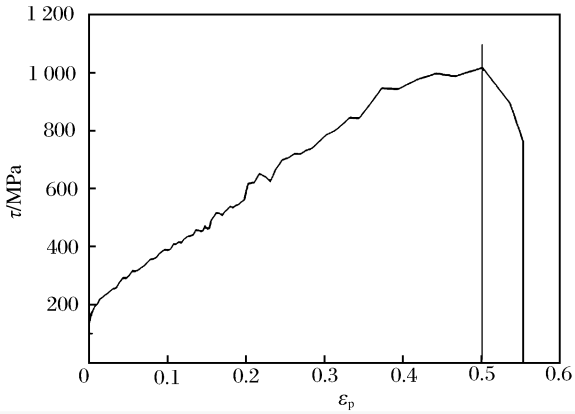

图 7　剪切应力与等效塑性应变关系

Fig. 7　Relationship between shear stress and effective plastic strain

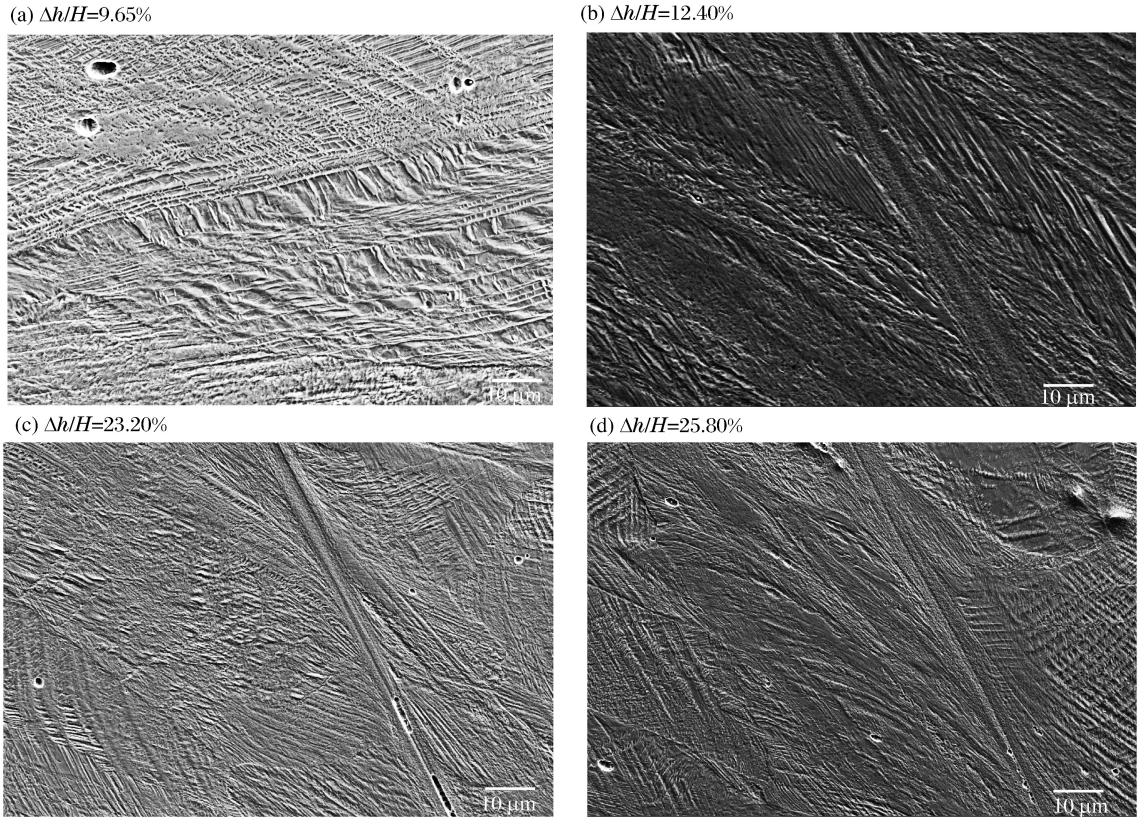

图 8　不同形变量下剪切区的扫描电镜图

Fig. 8　SEM figures of shear zones under different amounts of deformation

3.2　剪切区内外应变分布

过单元 1941，横穿剪切带取一系列单元，以 x 轴为横坐标（按图 4 定义的坐标系），剪切应变 ε_{xy} 为纵坐标作曲线，如图 9 所示。从图中可以看出横跨剪切带（沿 x 轴）的剪切应变分布类似于高斯分布，剪切区中心剪切应变最大，约为 0.500，然后沿两边基体剪切应变逐渐下降到接近为零（10^{-3} 量级），且从剪切带中心到距离其 563 μm 处（假设此处为基体的应变）下降较快；继续向两边扩展时，下降较平缓。实际上，剪切区中心剪切应变远大于 0.500，这是因为 ANSYS 模拟是具有网格依赖性的，要求在变化梯度较大的区域要细化网格，而上述模拟中剪切区网格细化程度远远达不到实际剪切区晶粒细化程度。模拟不同细化程度下剪切区中心剪切应变大小，发现当细化程度从 1/27 减小到 1/9、1/3 时剪切区中心

剪切应变大小相应从 0.500 减小到 0.222、0.195，说明细化程度直接影响实验结果。

图 9(b)所示为高速冲击时在不同时刻沿 y 轴方向(平行于剪切带)剪切带中心剪切应变的分布图，因破坏而删除的单元在图中不再显示。从图 9(b)中可以看出，剪切应变沿 y 轴呈两端高中间低的特点。当 $t=28.8$ μs 时，剪切区上端剪切应变高于下端，此时剪切带刚开始在强制剪切区上端形成。因此剪切带首先在施加载荷的一端形成，接着另一端也逐渐形成，然后剪切带由两端向中间扩展。

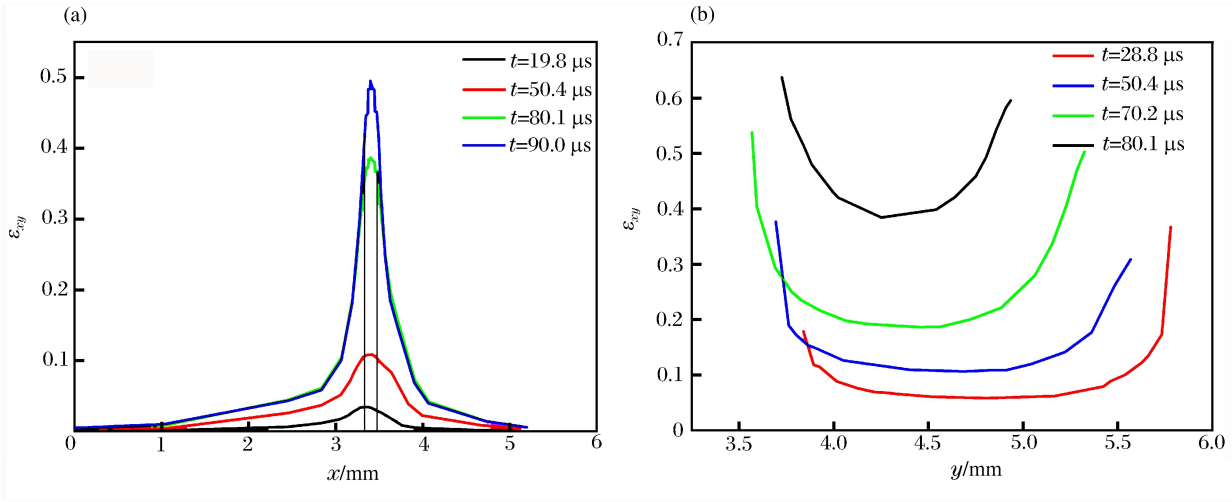

图 9 剪切应变分布与冲击时间的关系

Fig. 9 Relationship between shear strain distribution and impact time across the shear zone

3.3 剪切区内外温度分布

通过编辑软件的 k 文件可以直接输出系统的温度数据。编辑 k 文件过程中假设材料变形能的 90%转化为热能，材料的热容为 450 J/(kg·K)，导热系数为 12.979 W/(m·K)。发现温度的分布和等效塑性应变的分布非常类似，温升区域主要集中在剪切带区及周围形变影响区。还是过单元 1941 横穿剪切带和平行于剪切带取一系列单元，作出沿 x 轴和 y 轴的温升曲线，如图 10 所示。因破坏而删除的单元在图中不再显示。从图中可以看出曲线的形状和应力应变基本上是一样的，横穿剪切带方向剪切带中心温度最高，约 402 K，然后向两边逐渐下降。温升主要集中在 $x=3\sim3.7$ mm 较窄的区域内，基体的温度变化不大。这和文献[11]中模拟的绝热剪切带内温度分布特征基本吻合。平行于剪切带方向 $t=19.8$ μs 时剪切带两端温度开始上升，然后随着剪切带逐渐向中间扩展，温升区域也逐渐向中间扩展。整个试样，剪切带两端温度最高，约为 590 K，这也是最容易发生断裂的地方。

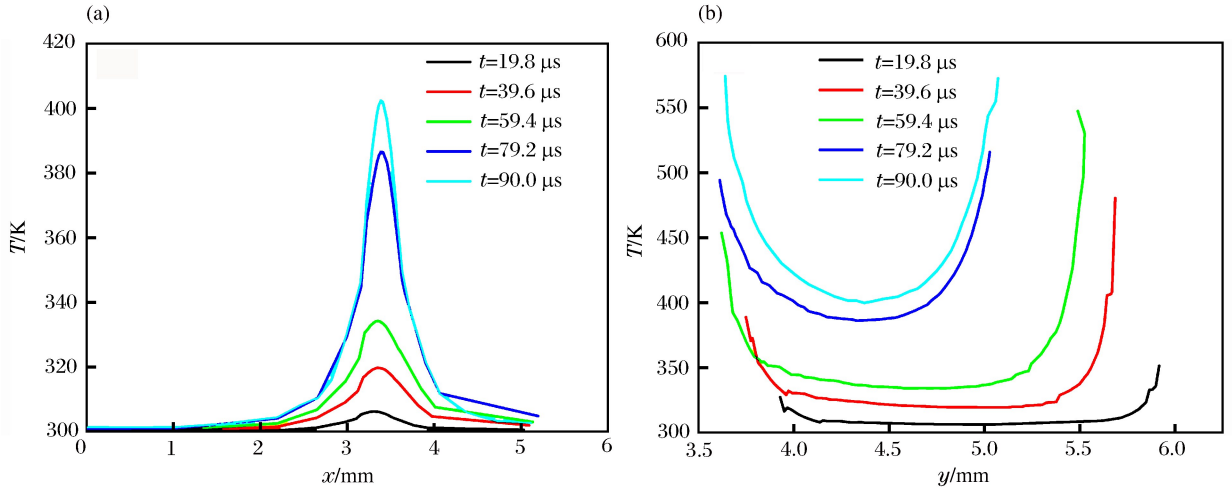

图 10 横穿剪切带和平行于剪切带方向的温度分布和冲击时间关系

Fig. 10 Relationship of temperature distribution and impact time across or parallel to the ASB

通过预压缩变形 30%获得的初始组织几乎没有残余奥氏体，但是在高速冲击之 ASB 内仍以细小的等轴的奥氏体为主，这是由于温升加上剪切力作用，发生了马氏体逆转变，从而形成奥氏体。由于冲击时间极短，很难原位检测剪切带内部的温升。文献[12]曾报道 ε-马氏体向 γ-奥氏体逆转变开始温度约 400 K，且随着变形量的增加而逐渐降低。根据这个依据，在本文模拟条件下，剪切带内部的温升是可以诱导马氏体逆转变发生的。

4　讨　论

对样品进行高速冲击是一个很快的过程，通常实验只能对变形前和变形后试样形貌和组织进行检测，而很难捕捉到中间的变化过程。这个时候需要借助模拟这个辅助工具来加强对试样在变形过程变化的了解。绝热剪切带是材料在高速变形时一种典型的破坏形式，本文中选择形成剪切带的临界等效塑性应变为 0.500，此值并不影响应变和温度的分布。临界塑性应变依赖于材料和加载条件。不同的材料要根据材料本身特性选择不同的临界条件；若高应变率下加载时能形成剪切带，那么即使应变达到临界塑性应变 0.500，在低应变率下加载时，强制剪切区也不一定能形成剪切带。通过帽型样形成强制剪切区，着重观察剪切区内应变和温度分布。通过模拟结果，发现绝热剪切带和温升区域都是从剪切区两端开始形成，然后向中间扩展。横穿剪切带方向，应变和温度分布都是剪切带中心最高，然后向两边逐渐降低，类似于高斯分布。平行于剪切带方向，应变和温度分布都是呈两端高中间低的特点。

5　结　论

基于 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟高锰 TRIP 钢在高速冲击过程中绝热剪切带的形成，得到以下规律：

(1)随着压缩变形的增加，剪切带逐渐从帽形样的强制剪切区的两端开始形成，并向中间扩展。

(2)横穿剪切带的方向，从剪切带中心到周围基体剪切应变的分布类似于高斯分布。剪切带中心处剪切应变最大，从剪切带中心到距离其 563 μm 处下降较快，然后继续向两边扩展时下降较平缓。剪切带中心处剪切应变约为 0.500，刚到基体时下降为 0.440，距剪切带中心约 563 μm 处靠近试样对称轴侧基体的剪切应变是 0.058，到试样中心或两边边界时剪切应变下降到 10^{-3} 量级。

(3)平行剪切带方向，从上端到下端剪切应变的分布大体上都是呈两端高、中间低的特点。

(4)温升区域主要集中在剪切带区域和其周围形变影响区。在高速冲击的过程中，剪切区域温升首先出现在两端，然后逐渐向中间扩展。整个试样，剪切带两端温度最高，约为 590 K，这也是最容易发生断裂的位置。

参考文献：

[1]　李继承，陈小伟，陈刚. 921A 钢纯剪切帽状试件绝热剪切行为的数值模拟研究[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集(上册). 2009.

[2]　李继承，陈小伟，陈刚. 921A 钢纯剪切帽状试件在 SHPB 实验中的动态变形[J]. 爆炸与冲击，2010，30(3)：239-246.
Li Jicheng, Chen Xiaowei, Chen Gang. Dynamic deformation of 921A steel pure shear hat-shaped specimens in SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(3):239-246.

[3]　冀建平，才鸿年，李树奎. 帽型试样的绝热剪切数值模拟与温度场研究[J]. 材料工程，2007(10)：27-30.
Ji Jianping, Cai Hongnian, Li Shukui. Numerical simulation of adiabatic shear and temperature field in hat-shaped specimens[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(10):27-30.

[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]　Wright T W, Ockendon H. A model for fully formed shear bands[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1992,40(6):1217-1226.

[6] Zhou M, Ravichandran G, Rosakis A J. Dynamically propagating shear bands in impact-loaded prenotched plates Ⅱ: Numerical simulations[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1996,44(6):1007-1032.

[7] Rattazzi D J. Analysis of adiabatic shear banding in a thick-walled steel tube by the finite element method[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.

[8] Khosravifard A, Moshksar M M, Ebrahimi R. High strain rate torsional testing of a high manganese steel: Design and simulation[J]. Materials & Design, 2013,52(24):495-503.

[9] Johnson G R, Hoegfeldt J M, Lindholm U S, et al. Response of various metals to large torsional strains over a large range of strain rates part Ⅰ: Ductile metals[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1983,105(1):42-47.

[10] 张红松,胡仁喜,康士廷. ANSYS 14.5/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.

[11] Bonnet-Lebouvier A S, Molinari A, Lipinski P. Analysis of the dynamic propagation of adiabatic shear bands[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002,39(16):4249-4269.

[12] Zhao Z T, Liu T, Liu G W, et al. Reverse martensite transformation induced by strain in Fe-Mn-Si alloy[J]. Journal of Materials Science Letters, 1996,15(16):1427-1428.

Shear behaviors of hat-shaped high manganese steel specimens under high-speed impact

Jin Ting, Yang Ping

(*School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Adiabatic shear band (ASB) is a typical failure mode of material during high speed deformation. In order to better understand its formation and expansion process, two-dimensional numerical simulation with the Johnson-Cook constitutive model was conducted to reveal shear behaviors of hat-shaped high manganese steel specimens under high-speed impact using the ANSYS/LS-DYNA software. The results show that across the shear band, the strain distributions are the highest in the shear zone center, and are then gradually reduced to the sides, which is similar to a Gaussian distribution, and in the direction parallel to the shear zone, its distributions are characterized by that they are high at both ends and low in the middle. The formation and propagation direction of ASB are determined according to the simulated strain distributions. It is observed that ASBs are formed from both ends of the shear zone and extend to the middle of the samples. Finally, the temperature distributions inside and outside the ASB interior and exterior are obtained directly by editing the k file of the software and they are similar to those of the strain. Simulation and experimental results are shown in good agreement.

Keywords: solid mechanics; ASB; high-speed impact; high manganese steels

(责任编辑 王易难)