

# HSLA TRIP 钢的动态拉伸行为及其模拟\*

韦习成 谢群 符仁钰 李麟

(上海大学材料科学与工程学院 上海 200072)

**摘要** 研究了 HSLA TRIP 钢的相变诱发塑性, 并模拟了其动态流变行为. 结果表明, HSLA TRIP 钢是应变率敏感的, 屈服强度和抗拉强度均随着应变率的提高而增大, 断裂延伸率降低. 其变形机理是应变率硬化、绝热软化和残余奥氏体的应变诱发相变等因素的综合作用. 计及拉伸流变过程中准静态向热激活、热激活向粘性拖曳及热激活和粘性拖曳综合作用和高应变率热软化特性, 计算结果与实验具有较好的一致性. 在高应变率拉伸变形过程中 HSLA TRIP 钢的塑性功热转化率为 0.8~0.9.

**关键词** 金属材料, TRIP 钢, 应变率, 拉伸性能, 模拟

**分类号** TG142

**文章编号** 1005-3093(2006)05-0556-05

## The dynamic tensile behavior of HSLA TRIP steel and its modeling

WEI Xicheng\*\* XIE Qun FU Renyu LI Lin

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

\* Supported by Research Foundation of the Education Committee of Shanghai Municipal No.03K027 and Nature Science Foundation of the Science and Technology Committee of Shanghai Municipal No.03ZR14035. Manuscript received October 8, 2005; in revised form June 1, 2006.

\*\* To whom correspondence should be addressed, Tel:(021)56331462, E-mail: wxc1028@staff.shu.edu.cn

**ABSTRACT** The dynamic tensile behavior of HSLA TRIP steel at room temperature was investigated in the strain rate from  $900 \text{ s}^{-1}$  to  $1600 \text{ s}^{-1}$ . The results showed that the yield strength and uniform tensile strength increase and total elongation decreases with increasing strain rate. The dynamic deformation mechanism is the combined effects of strain rate hardening, adiabatic temperature rise and deformation-induced transformation of the retained austenite. The flow stress simulated by considering quasi-static, thermally activated and viscous drag flow characteristics as well as strain rate softening effect under high strain rate is in good agreement with the test date. The rate of plastic work translating into heat under high rate deformation is 0.8~0.9 for the HSLA TRIP steel.

**KEY WORDS** metallic materials, TRIP steel, strain rate, tensile property, modeling

高强度低合金相变诱发塑性 (HSLA TRIP) 钢是一种新型汽车结构钢, 由于其三相组织中残余奥氏体的变形诱发相变而赋予其优良的强塑性匹配, 受到广泛的关注<sup>[1]</sup>. 已有的研究大多侧重于工艺参数、成分和组织等对  $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  应变率范围的静态或准静态力学行为的影响<sup>[2~5]</sup>. 虽然在高应变率下材料力学行为的研究和模拟已有大量报道<sup>[6,7]</sup>, 但涉及车辆冲撞应变率范围 ( $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) 的 HSLA TRIP 动态拉伸行为的研究较少<sup>[1,8,9]</sup>, 对其动态流变行为的模拟更少<sup>[10]</sup>, 而且模拟过程中没有计及塑性功转化

为热的不同比率对材料流变行为的影响. 实际上, 不同材料在高应变率变形过程中的塑性功转化率不同<sup>[11,12]</sup>, 因此在模拟高应变率下新型汽车结构钢的动态流变行为时应该计及绝热温升的影响.

由于汽车的安全性直接体现在车身在撞击过程中吸收撞击能量的能力以及对乘员的保护程度, 而撞击过程中材料的变形是一个高应变率的动态响应, 研究和模拟汽车结构钢在  $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  应变率范围的动态力学行为, 对汽车轻量化发展进程中优化结构设计和合理选择材料, 提高车身安全性具有重要的指导作用. 本文研究 HSLA TRIP 钢的拉伸行为随着应变率的演化, 并对其流变行为进行初步模拟.

### 1 实验方法

实验用钢的化学成分为 0.195% C, 1.60% Si 和

\* 上海市教委基金 03K027 和上海市科委自然科学基金 03ZR14035 资助项目.

2005 年 10 月 8 日收到初稿; 2006 年 6 月 1 日收到修改稿.

本文联系人: 韦习成

1.58% Mn. 将实验材料真空熔炼后锻打和热轧成约 3 mm 厚的板坯, 再冷轧至所需厚度 1.3 mm. HSLA TRIP 的热处理工艺为: 先将切割好的板材加热到铁素体和奥氏体两相区 780 °C 等温 5 min, 然后快冷至贝氏体转变区 400 °C 等温 5 min, 随后油冷.

采用彩色浸蚀技术<sup>[13]</sup>在 EPIPHOT 300 型尼康金相显微镜下观察试样的显微组织. 采用 X 射线衍射技术进行测量(靶材为  $CrK\alpha$ , 晶面  $(220)_\gamma$  的衍射峰积分强度) 试验前后试样中的残余奥氏体体积百分含量, 采用计点法测量铁素体的体积百分含量.

高应变率拉伸试验在气动式间接杆杆型冲击拉伸试验装置<sup>[14]</sup>上进行, 其中应变信号拾取和放大采用中国科技大学生产的 Model-2000 型超动态应变仪, 波形存储和记录采用美国 Tektronix TDS3014 型瞬态波形存储器. 根据实验数据, 按一维弹性应力波的原理计算试样的应力、应变和变形时的应变率<sup>[7]</sup>.

热处理的板材经磨削除去表面氧化层和可能的脱碳层至 1.2 mm, 为了避免加工过程中残余奥氏体的转变, 拉伸试样采用线切割加工呈哑铃状. 动态拉伸试样的有效拉伸标距为 8 mm, 宽度 4 mm; 静态拉伸试样标距尺寸为 30 mm×8 mm. 静态拉伸试验按 ASTM-E8 标准, 试验机为 MTS 电液伺服拉伸试验机, 以应力应变曲线上 0.2% 应变或下屈服点对应的应力作为屈服强度值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 拉伸性能

由表 1 和图 1 可见, 随着应变率的提高, 材料的屈服强度和抗拉强度均增加而均匀延伸率和断裂延伸率下降, 而且均匀延伸率较之静态条件的急剧下降, 仅相当于静态的 40%~50%, 材料的强屈比随着应变率的增加呈现下降趋势. 这个结果表明, 在高应变率拉伸条件下, 由于加工硬化、应变率强化、绝热软化以及残余奥氏体向马氏体转变<sup>[2]</sup>, 该类钢表现出强烈的应变率敏感特性. 从图 1 还可看出, 在静态拉伸试验条件下 HSLA TRIP 钢没有表现出明显的屈服现象, 而高应变率拉伸的应力应变曲线均有明显的屈服点. 而且在静态拉伸曲线上, 在均匀延伸之前, 材料的强度随着应变的增大非常平稳地增大, 直至最大抗拉强度, 失稳伸长和均匀延伸率相比很小. 与此相反, 在高应变率下达到最大应力后的失稳应变要大得多, 这与其他研究结果<sup>[15,16]</sup>有相同的趋势.

不同应变率拉伸后, 试样中的残余奥氏体转变量列于表 2. 随着应变率的提高, 残余奥氏体的转变量下降. 由于残余奥氏体的稳定性是温度相关的, 高应变率拉伸变形的瞬时性使塑性功转化的热量不能及时散失而积聚试样内部导致绝热温升效应<sup>[7]</sup>, 使残余奥氏体的稳定性提高, 延缓了其早期转变, 致使其均匀延伸率较之静态下的低得多. 但是, 随着变形的进一步加剧, 部分稳定化的残余奥氏体在大应变诱发下发生向马氏体的转变, 推迟了基体中孔洞的形成和长大<sup>[9]</sup>, 表现出明显的失稳阶段的应变诱发塑性效

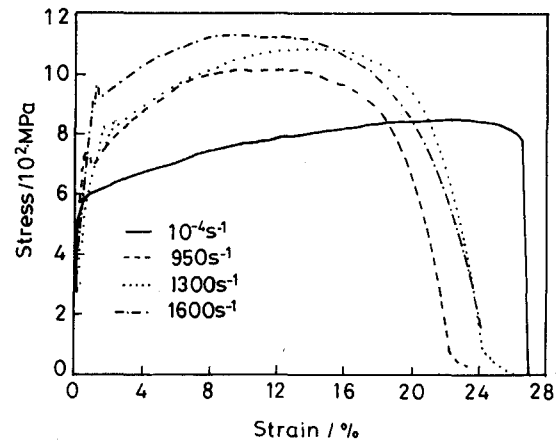


图 1 HSLA TRIP 钢不同应变率的应力应变曲线

Fig.1 Comparison of stress-strain curves of HSLA TRIP steel at various strain rates

表 2 HSLA TRIP 钢中残余奥氏体转变量与应变率的关系

Strain rate $s^{-1}$	$10^{-4}$	950	1300	1600
Transformed volume fraction/%	97	85	81	80

表 1 HSLA TRIP 钢三个应变率下的动力学性能数据

Table 1 Dynamic mechanical property of HSLA TRIP steel under various strain rates

Strain rate/ $s^{-1}$	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Uniform elongation/%	Total elongation/%	$\sigma_b/\sigma_y$
$10^{-4}$	538	845	23.50	26.95	1.57
950	680	1 015	13.00	23.50	1.49
1350	770	1 084	13.20	25.20	1.41
1600	887	1 128	9.70	25.00	1.27

应, 从而使其动态失稳伸长比静态的数值大得多。

## 2.2 应变率相关的流变行为模拟

当今汽车车身防撞安全性研究的基础是计算机仿真模拟, 用实车撞击试验<sup>[1]</sup>验证仿真和模拟结果的可靠性。仿真和模拟必须以材料的相关静、动态力学性能为基础。本文在实验的基础上, 基于 J-C 模型<sup>[18]</sup>对 HSLA TRIP 钢的动态流变行为进行模拟。

Johnson 和 Cook<sup>[17]</sup>提出的应变率相关性弹性塑性模型

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \left(1 - \left[\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right]^m\right) \quad (1)$$

是描述钢铁材料应力应变关系最通用的模型, 其中  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$  和  $\dot{\varepsilon}_0$  是材料参数。Zhao 等<sup>[18]</sup>采用 Judwig 对方程 (1) 的温度项的简化形式  $(1 - \mu\Delta T)$ , 对低碳钢板高应变率范围的冲击压缩模拟结果与试验曲线吻合很好, 说明在  $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  应变率范围内绝热软化对钢板的应力影响采用  $(1 - \mu\Delta T)$  是可取的。

钢的流变应力随着应变率的变化经历 3 个阶段<sup>[19]</sup>: 准静态区 (应力基本不随应变率变化); 对应力的弱影响区 (应力随应变率增加缓慢) 和对应力的强敏感区。本文研究的 HSLA TRIP 钢流变应力随着应变率的变化也显示了相同规律 (图 2)。材料的流变随着应变率的增大是由准静态向热激活转变、由热激活向粘性拖曳的转变以及热激活和粘性拖曳的综合作用。

基于图 2 中 HSLA TRIP 钢的流变应力随应变率增加的特性, 其流变行为可综合上述 3 个过程: 准静态项  $\sigma_s(\varepsilon_p, T)$ 、热激活项  $\sigma_t(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T)$  和粘性拖曳项  $\sigma_v(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T)$ , 同时考虑绝热软化的影响项  $(1 - \mu\Delta T)$ , 即<sup>[17]</sup>

$$\sigma = \sigma_s(\varepsilon_p, T) + \sigma_t(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) + \sigma_v(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) \quad (2)$$

其中

$$\sigma_s = (A + B\varepsilon_p^n)(1 - \mu\Delta T) \quad (3)$$

$$\sigma_t = (C - D\varepsilon_p^n) \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)(1 - \mu\Delta T) \quad (4)$$

$$\sigma_v = E\dot{\varepsilon}^k(1 - \mu\Delta T) \quad (5)$$

式 (2) 的完整形式为

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n + (C - D\varepsilon_p^n) \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + E\dot{\varepsilon}^k](1 - \mu\Delta T) \quad (6)$$

其中  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $k$ ,  $m$ ,  $n$  和  $\dot{\varepsilon}_0$  为材料参数,  $\dot{\varepsilon}_p$  为应变率,  $\varepsilon_p$  为塑性应变,  $\mu$  为热软化系数。  $A$ ,  $B$ ,  $n$  由准静态试验确定,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $k$ ,  $m$  和  $\dot{\varepsilon}_0$  6 个参数描述了 HSLA TRIP 钢的应变率敏感性。图 2 中低应变率与高应变率区之间的过渡区反映了材料的热激活特性, 参数  $C$  通过转折区的切线斜率确定; 高应变率区的流变应力随着应变率的变化反映材料的粘性拖曳特性, 即可确定  $E$  和  $k$ ;  $D$  和  $m$  描述的是应变率的变化而导致的材料流变应力与应变的关系特性。

由此确定的上述材料参数为:  $A=538 \text{ MPa}$ ,  $B=35 \text{ MPa}$ ,  $C=800.33 \text{ MPa}$ ,  $D=1095.6 \varepsilon_p^{-0.2347}$ ,  $E=678.99 \text{ MPa}$ ,  $n=0.235$ ,  $m=0.2163$ ,  $\dot{\varepsilon}_0=10^{-4} \text{ s}^{-1}$  和  $k=0.2163$ ,  $\mu=0.0011 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ <sup>[20]</sup>。

在高应变率拉伸过程中, 塑性功转变为热引起试样内部温度升高, 即

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho c} \int_0^{\varepsilon_p} \sigma d\varepsilon_p \quad (7)$$

其中  $\Delta T$  为试样内部温升,  $\rho$  为材料密度,  $C$  为材料等压比热,  $\sigma$  和  $\varepsilon$  分别为应力和应变,  $\beta$  为塑性功转化为热的比率, 当塑性功完全转化为热时,  $\beta=1$ 。对钢在  $1600 \text{ s}^{-1}$  应变率下变形为 20% 时试样中的温升进行了计算, 结果表明, 高应变率下塑性功向热的转化引起试样温升并随变形增加基本呈线性 (图 3)。在本文研究的应变率范围, 绝热温升一般不超过  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  且均近似呈线性增长, 可忽略不同应变率对温升的影响。通过对不同应变率下绝热温升的加权, 取绝热温升  $\Delta T(^\circ\text{C}) = (6.26\varepsilon_p - 4.21)\beta$ 。

不同材料的  $\beta$  值不同, 1018 钢的  $\beta$  值接近于 100%<sup>[11]</sup>, 而钢和铝的  $\beta$  值约为 80~90%<sup>[12]</sup>。为了确定 HSLA TRIP 钢动态拉伸过程中塑性功转化为热对流变行为的影响, 根据式 (6) 对应变率为  $1600 \text{ s}^{-1}$  时不同  $\beta$  值的应力应变曲线进行了模拟 (图 4)。图 4 表明, 没有考虑绝热温升导致热软化的计算结果与试验结果存在明显偏差, 最大约 7.1%。考虑热软化行为

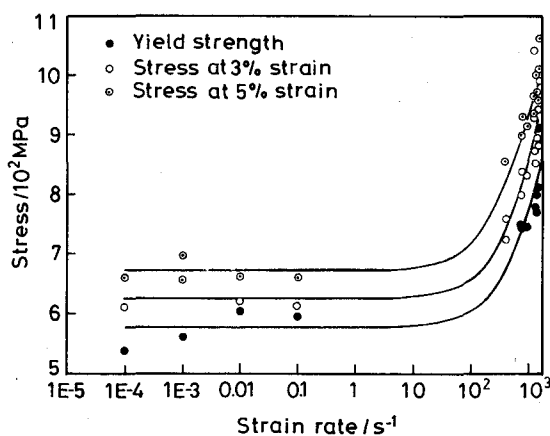


图 2 HSLA TRIP 钢的屈服应力和应变为 3% 和 5% 时应力随应变率的变化

Fig.2 Yield stress and the stresses of HSLA TRIP steel at 3% and 5% strains versus strain rate

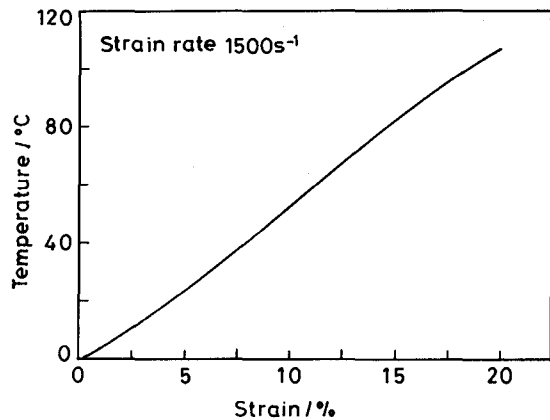


图3 应变率 1500 s<sup>-1</sup> 时 HSLA TRIP 钢试样中绝热温升随变形量的变化

Fig.3 Adiabatic temperature rise as a function of strain under 1600 s<sup>-1</sup> for HSLA TRIP steel

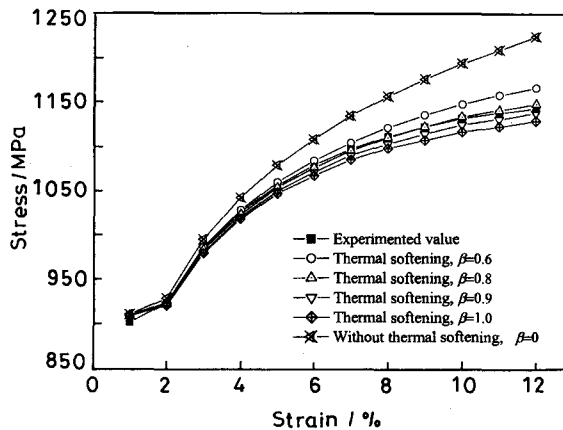


图4 热软化对 HSLA TRIP 钢应力应变曲线的影响

Fig.4 Effect of thermal softening on stress for HSLA TRIP steel (strain rate 1600 s<sup>-1</sup>)

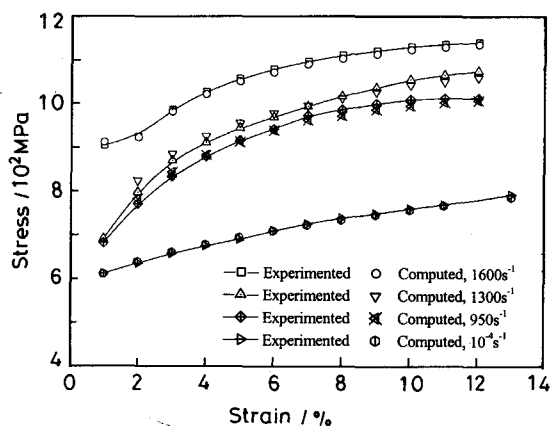


图5 不同应变率下 HSLA TRIP 钢的应力应变曲线试验结果和计算结果的比较 ( $\beta=0.9$ )

Fig.5 Comparison between experimental and calculated curves under various strain rates for HSLA TRIP steel ( $\beta=0.9$ )

的 4 根模拟曲线与实验数据非常接近, 最大误差不足 3%, 其中  $\beta=0.8$  和  $0.9$  的误差小于 1%.

取  $\beta=0.9$ , 利用上述参数对图 1 的准静态和 3 个高应变率下的流变应力进行了模拟 (图 5). 可以看出, 模拟数据与实验结果均具有较好的一致性. 这进一步证明了 HSLA TRIP 钢高应变率拉伸过程中塑性功转化为热引起试样温升的  $\beta$  值应在 80%~90%, 与文献 [19] 对低碳钢的结果一致.

模拟结果的一致性说明计及准静态向热激活转变, 由热激活向粘性拖曳的转变以及热激活和粘性拖曳的综合作用的方程 (6) 具有较好的普适性.

### 3 结 论

1. HSLA TRIP 钢具有强烈的应变率敏感特性, 屈服强度和抗拉强度随应变率提高显著增加, 动态拉伸的均匀延伸率仅为静态下的 40%~50%, 而断裂延伸率的下降幅度较小;

2. 动态拉伸过程中的绝热温升使得 HSLA TRIP 钢中的残余奥氏体稳定性提高, 应变率增加其转变量减小;

3. 高应变率拉伸条件下 HSLA TRIP 钢的塑性功的热转化率为 0.8~0.9, 计及绝热温升影响的流变应力模拟结果与试验结果具有好的一致性.

### 参 考 文 献

- 1 Prosche Engineering Services, Inc. Reports on ULSAB-AVC Project (3): Strain Rate Dependent Material Properties in CAE Analysis for Crashworthiness (R) (2002)
- 2 B.C.De Cooman, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8(3~4), 285(2004)
- 3 P.J.Jacques, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8, 259(2004)
- 4 C.G.Lee, S.J.Kim, T.H.Lee, S.Lee, Materials Science and Engineering A, 371, 16(2004)
- 5 Q.Furnemont, P.J.Jacques, T.Pardoen, Journal De Physique. IV JP, 11(5), 5325(2001)
- 6 G.Y.Sha, E.H.Han, Y.B.Xu, X.L.Zhang, L.Liu, Chinese Journal of Materials Research, 19(6), 561(2005) (沙桂英, 韩恩厚, 徐永波, 张修丽, 刘 路, 材料研究学报, 19(6), 561(2005))
- 7 Y.X.Zhou, Y.M.Xia, Journal Materials Science of ASME, 34, 925(2000)
- 8 D.Choi, D.M.Bruce, Iron and Steel Institute of Japan International, 42(12), 1483(2002)

- 9 B.C.De Cooman, L.Samek, J.Mahieu, J.Van Slycken, P.Verleysen, J.Degrieck, L.Li, W.Li, X.C.We, P.Sun, Quasi-adiabatic effects during the high strain rate deformation of dispersed-phase systems with strain-induced martensitic transformation, in: Proceedings of Materials Science and Technology 2003 Meeting- A Symposium on the Thermodynamics, Kinetics, Characterization and Modeling of: Austenite Formation and Decomposition, Edited by: E.B. Damm, M.J. Merwin, Minerals (Metals and Materials Society, Warrendale, PA 15086, United States, 2003) p.537
- 10 N.Tsuchida, Y.Tomota, Materials Science and Engineering A, **285**, 345(2000)
- 11 R.Kapoor, S.Nemat-Nasser, Mech. Mater., **27**, 1(1998)
- 12 J.J.Mason, A.J.Rosakis, G.Ravichandran, Mech. Mater., **17**, 135(1994)
- 13 E.Girault, P.Jacques, Ph. Harlet, K.Mols, J. Van Humbeeck, E.Aernoudt, F.Delannay, Materials Characterization, **40**, 111(1998)
- 14 X.C.We, L.Li, R.Y.Fu, W.Shi, Mechanical Science and Technology, **24**(7), 844(2005)  
(韦习成, 李麟, 符仁钰, 史文, 机械科学与技术, **24**(7), 844(2005))
- 15 H.Qiu, M.Enoki, H.Mori, T.Nobuo, K.Teruo, Iron and Steel Institute of Japan International, **39**(9), 955(1999)
- 16 N.Kojima, N.Mizui, K.Fukui, Y.Kawaguchi, M.Tsukamoto, Sumitomo Metal, **50**, 31(1996)
- 17 G.R.Johnson, W.H.Cook, in: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics (C), Hugue, The Netherlands, 541(1983)
- 18 H.Zhao, G.Gary, Materials Science and Engineering, **A207**, 46(1996)
- 19 P.J.Zhou, A.K.Hopkinson, *Dynamic Response of Materials under Strong Load Impact*(M), Translated by B.Zhang, H.Y.Zhao (Science Press, Beijing, China, 1985) p.25  
(周培基, A.K.霍普肯斯, 张宝, 赵衡阳译, 材料对强冲击载荷的动态响应(M) (北京, 科学出版社, 1985) p.25)
- 20 H.Zhao, G.Gary, International J. Solids Structures, **33**, 3363(1996)