

文章编号: 1001-1455(2005)05-0467-05

延性金属层裂模型比较*

王永刚^{1,2}, 贺红亮¹, 陈登平¹, 王礼立^{1,2}, 经福谦¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆炸物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 宁波大学力学与材料研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在平面一维弹塑性流动有限差分计算程序中加入 4 种延性金属层裂模型, 对平板撞击层裂实验进行数值模拟。结果表明: 简单最大拉伸应力模型和简单损伤累积模型能定性反映层裂的物理现象, 由于忽略损伤对本构的影响, 计算结果和实验有偏差, 但模型要求参数较少, 对于一些精度要求不是很高的工程问题, 可以采用; 从材料损伤断裂物理本质出发, 采用微损伤统计方法得到的 NAG 模型和封加波损伤度函数模型, 能很好地再现实测的自由面速度剖面, 数值计算结果与实验吻合很好。

关键词: 固体力学; 层裂; 数值模拟; 延性金属; 断裂模型

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

层裂是作用在材料上的两个运动方向相反的稀疏波相遇时发生的一种现象。材料在动态载荷下发生的层裂现象在许多工程问题、航空航天、武器等方面有着重要的应用, 长期以来, 人们对此一直十分关注, 并开展了大量的实验和理论研究^[1~2]。材料的加工历史、细观结构和缺陷以及外载条件等, 影响着材料的层裂特性。大量实验证实, 材料的层裂过程可分为微损伤的成核、成长和连通 3 个主要阶段, 是个与时间相关的过程。

本文中 will 把一些典型的层裂模型加入平面一维流体弹塑性有限差分计算程序中, 对平板撞击一维应变条件下的层裂实验进行数值模拟。通过数值计算和实验的比较分析, 对这些典型层裂模型进行对比研究和讨论, 重点考察损伤演化过程对材料层裂特性的影响。

2 典型层裂模型

人们已经建立了许多层裂模型来描述和预测层裂破坏。J. S. Rinehart^[1]在 20 世纪 50 年代初提出最大拉伸应力判据; F. R. Tuler 等^[2]提出了简单损伤累积判据; L. Seaman 等^[3]、D. R. Curran 等^[4]提出了损伤成核与成长(NAG)模型; M. M. Carroll 等^[5]和 J. N. Johnson 等^[6]提出了的孔洞成长模型; 白以龙等^[7~8]从微损伤的统计角度出发提出了统计细观损伤模型, 封加波^[9~10]从孔洞成长的能量平衡出发提出了损伤度函数模型等。本文中用 4 种典型模型: 最大拉伸应力模型、简单损伤累积模型、NAG 模型、损伤度函数模型。

2.1 最大拉伸应力模型(Cut-off model)^[1]

最大拉伸应力模型可以用下式描述

$$\sigma \geq \sigma_c \quad (1)$$

式中: σ_c 是材料所能承受的拉伸应力极限值。

2.2 简单损伤累积模型(T-B model)^[2]

F. R. Tuler 等^[2]提出了损伤累积判据

* 收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2004-12-23

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 项目(10476027)

作者简介: 王永刚(1976—), 男, 博士研究生。

$$\int_0^{t_c} (\sigma - \sigma_0)^\alpha dt \geq K \quad (2)$$

式中: α 、 K 为材料常数, σ_0 为材料的损伤阈值应力, t_c 是拉伸应力作用下材料发生层裂所需的时间。

2.3 NAG 模型^[3]

该模型考虑了微损伤的成核和成长效应, 所以称为成核与成长模型(NAG)。模型中定义损伤为孔洞的体积 V , 孔洞体积由两部分组成

$$V = \Delta V_n + \Delta V_g \quad (3)$$

式中: ΔV_n 为成核产生的孔洞体积; ΔV_g 为成长产生的孔洞体积。

2.3.1 孔洞成核

L. Seaman 等^[3] 实验发现成核规律为

$$\dot{N}_0 = \begin{cases} N_{n0} \exp[(P_s - P_{n0})/P_1] & P_s > P_{n0} \\ 0 & P_s \leq P_{n0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_{n0} 和 P_1 为材料常数, P_s 为拉伸应力, P_{n0} 为成核阈值应力。经过时间步长 Δt , 由于成核而引起的孔洞体积改变

$$\Delta V_n = 8\pi \dot{N}_0 \Delta t R_n^3 \quad (5)$$

式中: R_n 为材料成核尺寸参数。

2.3.2 孔洞成长

当材料中拉伸应力 P_s 超过材料的成长阈值应力 P_{g0} 时, 孔洞开始成长。在一个时间步长 Δt 内, 由于孔洞成长而引起的孔洞体积改变为

$$\Delta V_g = V_0 \exp[3(P_s - P_{g0})\Delta t / (4\eta)] - V_0 \quad (6)$$

式中: V_0 为时间步长开始前的孔洞体积, η 为材料粘性参数。

2.4 损伤度函数模型

2.4.1 封加波损伤度函数^[9]

定义的损伤 $D = V/V_t$, 其中 V_t 为总体积。封加波把 Griffith-Orowan 提出的裂纹扩展的能量观点用于分析微孔成长的动力学过程, 在基体材料不可压近似条件下, 得到损伤度函数演化方程

$$\frac{\partial D}{\partial t} = (1 - D)D \frac{P_s^2 - \sigma_0^2}{4B\lambda / (3c)} \quad (7)$$

式中: B 为基体材料的体模量, λ 为表面功, c 为介质的体积声速。

2.4.2 模型改进

逾渗理论^[11] 在处理无序系统中相互连接程度的变化所引起的效应方面具有较好的描述能力。根据逾渗理论, 构建如下应力松弛特性函数 $F(D)$ 来描述损伤后期应力松弛过程

$$F(D) = \begin{cases} 1 & D < D_c \\ 1 - k(D/D_c - 1)^\beta & D_f \geq D \geq D_c \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{边界条件} \quad F(D) = \begin{cases} 1 & D = D_c \\ 0 & D = D_f \end{cases}$$

式中: D_c 为失稳时临界损伤阈值; D_f 为层裂时的损伤值; β 、 k 为材料参数。

2.5 损伤对本构的影响^[12]

损伤材料的剪切强度 G 和屈服强度 Y 与基体材料的 G_s 和 Y_0 之间, 由下列关系相联系

$$G = G_s \left[1 - \frac{(15B + 20G_s)D}{9B + 8G_s} \right] F(D) \quad (9)$$

$$Y = Y_0 (1 - 4D) F(D) \quad (10)$$

式中: G_s 为基体材料的剪切模量, Y_0 为基体材料的屈服强度。

3 数值计算与结果讨论

计算中采用理想流体弹塑性本构关系和 Mie-Grüneisen 状态方程以及上述的 4 个断裂模型,对 45 钢对称碰撞层裂实验进行数值模拟,靶厚 3.997 mm,飞片厚 1.995 mm,速度 657 m/s^[13]。计算过程中,有些计算参数来自有关文献,其他参数根据其大致取值范围,进行调试取值,其标准是使计算结果尽量与实验一致,计算采用的材料参数为:本构方程参数, $\rho^{[13]}=7.80\text{ g/cm}^3$, $c_0^{[9]}=4.693\text{ km/s}$, $s_0^{[9]}=1.339$, $G_s^{[9]}=77\text{ GPa}$, $Y_0^{[9]}=0.8\text{ GPa}$, $\gamma_0^{[9]}=1.68$,其中 c_0 、 s_0 是冲击波速度 D 和粒子速度 u 拟合关系 $D=c_0+s_0u$ 中的参数, γ_0 为 Grüneisen 系数;最大拉伸应力模型, $\sigma_c=2.35\text{ GPa}$;简单损伤累积模型, $\sigma_0^{[13]}=350\text{ MPa}$, $\alpha^{[2]}=2$, $K=10^{12}\text{ Pa}^2\cdot\text{s}$;NAG 模型, $P_{g0}^{[13]}=350\text{ MPa}$, $R_n^{[4]}=1\text{ }\mu\text{m}$, $P_{n0}^{[4]}=300\text{ MPa}$, $P_1^{[4]}=200\text{ MPa}$, $\eta^{[4]}=7.5\text{ Ns/m}^2$;New-FJB 模型, $B^{[13]}=164.2\text{ GPa}$, $\lambda=1\text{ kJ/m}^2$, $\sigma_0^{[13]}=350\text{ MPa}$, $\beta^{[14]}=0.4$, $D_c=0.006$, $k=0.8$, $D_0^{[9]}=10^{-5}$,其中 D_0 为材料的初始损伤值。各种层裂模型计算结果如图 1 所示。

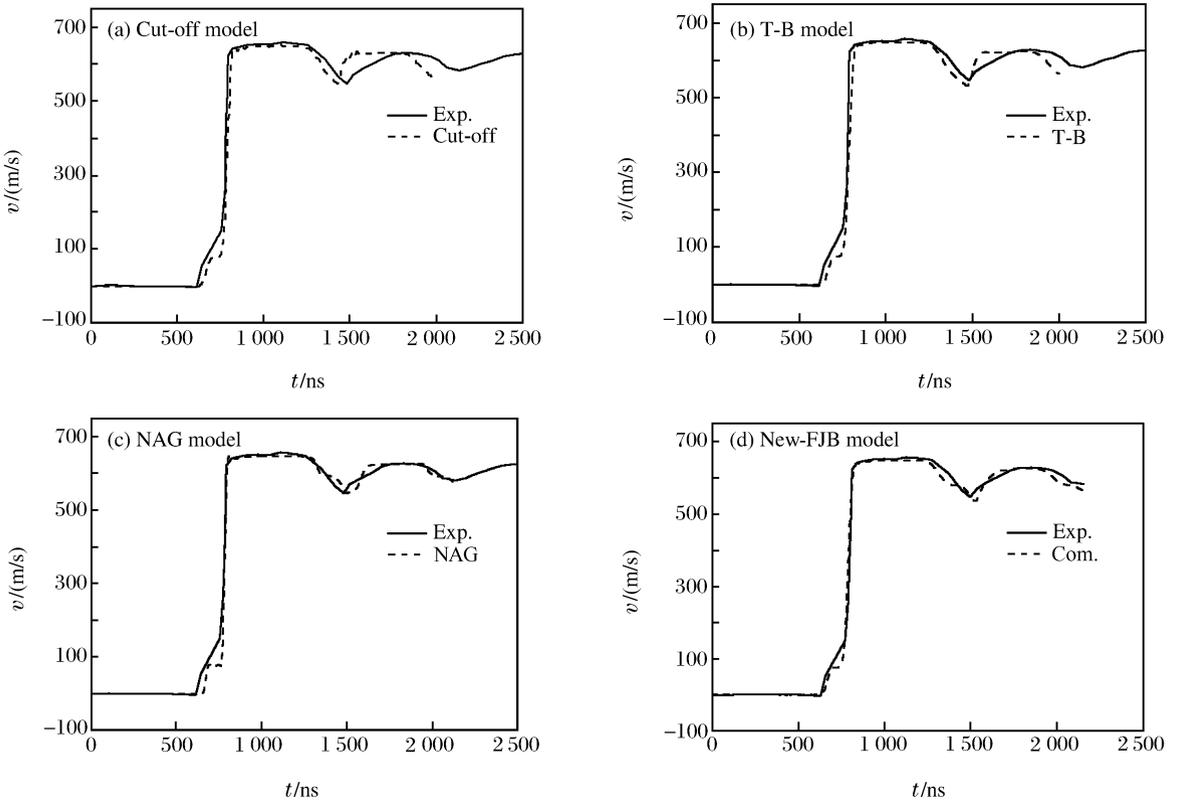


图 1 计算自由面速度和实验的比较

Fig. 1 Comparison of experimental and computed free-surface velocity

采用不同层裂模型计算结果的初始加载段都与实验吻合很好,这说明所采用本构模型参数是可靠的。由于没有考虑时间相关性,最大拉伸应力模型计算得到的波形回跳时间要早一些,而简单损伤累积模型则考虑了时间相关性,波形回跳时间与实验比较吻合。最大拉伸应力模型和简单损伤累积模型由于没有考虑损伤对材料本构的影响,层裂回跳信号上升较陡,波形振荡周期比实验值短,计算得到后期振荡波形与实验吻合不是很好,但从中能反映层裂现象所具有的基本物理本质。总体上说,考虑了损伤随时间的累积效应 T-B 模型计算结果比 Cut-off 模型与实验结果的吻合程度要好一些。对于一些精度要求不是很高的工程问题,上述 2 个模型由于物理模型简单,所需参数比较少,可以选择采用。目前在一些通用有限元计算程序中,例如 LS-DYNA,计算一些工程问题时,基本上都采用上述两种简单层裂模型。从简单层裂准则的提出到损伤累积概念的引入,标志着人们在观念上的改变。这时人们已开始

认识到材料的动态破坏应看作是材料内部损伤的累积和发展过程,该过程不仅受到材料外部作用的影响,而且反过来又影响到材料的力学性能,从而也影响到材料在外部条件作用下的响应特性。简单损伤累积模型虽然引入了时间相关性,严格地说,这是一种被动型损伤累积模型,没有明确给出损伤的定义。通过从材料损伤断裂微观机制出发,寻找微损伤的物理过程和材料的宏观力学性质之间的关系,而建立起来的 NAG 模型和封加波损伤度函数模型明确地给出了材料损伤的定义,它们是一种主动型损伤累积模型,同时模型中考虑损伤和材料本构之间的相互耦合作用,使计算结果与实验吻合很好。但由于 NAG 模型需要对回收的样品进行显微观察,确定其中参数工作量巨大,因此 NAG 模型没有得到广泛的应用。改进了的损伤度函数模型中各参数有着比较明确的物理意义,也容易确定,因此该模型具有较强的实际应用价值。

4 结 论

采用 4 种不同的层裂模型对层裂问题进行了数值计算,通过与实验结果比较,得出以下几点结论:

(1) 最大拉伸应力模型和简单损伤累积模型能够反映层裂的一些物理本质,但由于没有考虑损伤对材料性能的影响,层裂发生后波形振荡的计算结果与实验吻合程度较差一些。其优点在于物理模型简单,所需参数比较少,一些精度要求不是很高的工程问题可以选择采用。

(2) 采用从微损伤细观统计角度建立的 NAG 模型和封加波损伤度函数模型,明确地给出了损伤的定义,是主动型损伤累积模型,能够较好地反映材料损伤断裂物理本质,同时模型中考虑损伤对本构的影响,所得计算结果和与实验吻合很好。

(3) 从简单最大拉伸应力层裂准则到损伤累积模型再到细观统计损伤模型的发展,反映了人们对于损伤断裂问题认识的逐步深入。计算结果表明损伤的演化以及损伤对材料本构的影响在材料层裂破坏过程中起着很重要的作用。

参考文献:

- [1] Rinehart J S. Some quantitative data bearing on the scabbing of metals under explosive attack[J]. *Journal of Applied Physics*, 1951,22:131.
- [2] Tuler F R, Butcher B M. A criterion for the time dependence of dynamic fracture[J]. *International Journal of Fracture and Mechanics*, 1968,4(4):431—437.
- [3] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computation models for ductile and brittle fracture[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976,47(11):4814—4826.
- [4] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solid[J]. *Physics Reports*, 1987,147(5/6):253—388.
- [5] Carroll M M, Holt A C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972,43:1626—1635.
- [6] Johnson J N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981,52(4):2812—2825.
- [7] Bai Y L, Bai J, Li H L. Damage evolution, localization and failure of solids subjected to impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000,24:685—701.
- [8] Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. Statistical microdamage mechanics and damage field evolution[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2001,37:1—10.
- [9] 封加波. 金属动态延性破坏的损伤度函数模型[D]. 北京:北京理工大学,1992.
- [10] FENG Jia-po, JING Fu-qian, ZHANG Guan-ren. Dynamic ductile fragmentation and the damage function model [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997,81(6):2578—2581.
- [11] Stauffer D. *Introduction to the Percolation Theory*[M]. London: Taylor and Francis, 1985.
- [12] Mackenzie J K. The elastic constants of a solid containing spherical holes[J]. *Proceedings of Physics Society*, 1950,A244:526—544.
- [13] 张林,张祖根,秦晓云,等. D6A、921、和 45 钢的动态破坏与低压冲击特性[J]. *高压物理学报*, 2003,17(4):305—

310.

ZHANG Lin, ZHANG Zu-gen, QIN Xiao-yun, et al. Dynamic fracture and mechanical property of D6A, 921 and 45 steels under low shock pressure[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003,17(4):305-310.

[14] Strachan A, Cagin T, William A. Goddard III: Critical behavior in spallation failure of metals[J]. Physical Review B, 2001,63,060103:1-4.

Comparison of different spall models for simulating spallation in ductile metals

WANG Yong-gang^{1,2}, HE Hong-liang^{1*}, CHEN Den-ping¹,

WANG Li-li^{1,2}, JING Fu-qian¹

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

2. *Mechanics and Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China*)

Abstract: By using one-dimensional finite different hydrodynamic code coupled with four spall models, spall in ductile metal has been studied. Numerical simulation results indicate that: (1) Cut-off model and simple damage accumulation model can qualitatively describe some physical essences of spall fracture, but remain apparent discrepancies from the experimental results due to the damage influence on the material properties being neglected; However, because of using a few parameters, they are still useful to solve engineering problems without considering higher precision. (2) NAG model and FJB damage degree function model based on statistical micro-damage mechanics have a good ability of description of the process of damage evolution, and the computed free-surface velocity profiles consist with the experimental measurements very well.

Key words: solid mechanics; spall; numerical simulation; ductile metal; damage

* Corresponding author: HE Hong-liang
E-mail address: honglianghe@263.net
Telephone: 0816-2494957