

文章编号: 1001-1455(2008)05-0443-05

微孔洞唯象损伤力学模型及其应用*

董 杰^{1,2}, 李永池², 陈学东¹

(1. 国家压力容器与管道安全工程技术研究中心, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 基于微损伤发展的 NAG(nucleation and growth)模型, 从唯相角度, 得到了一种微孔洞损伤演化方程。在考虑损伤软化和温度软化的基础上得到了材料含损伤本构关系。将损伤演化方程和材料本构关系引入 ABAQUS 有限元软件对 D6AC 和 921 两种钢板撞击层裂问题进行数值模拟。模拟结果与实验结果吻合。

关键词: 固体力学; 损伤演化方程; 有限元; 钢板; 唯象; 本构

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 130·1540

文献标志码: A

1 引言

损伤是指材料在冶炼工艺过程中, 受外界载荷、温度等作用, 其微细结构发生变化, 引起微缺陷的成核、扩展和汇合, 导致材料的宏观力学性能劣化, 最终形成宏观开裂或材料的破坏过程^[1]。最初由 L. M. Kachanov 和 Y. N. Robotnov 在研究蠕变问题时提出了“损伤”及“连续度”的概念, 奠定了连续介质损伤力学发展的基础。时至今日, 材料含损伤动态力学性能研究在许多领域尤其是在军事领域已经得到了广泛的应用。其研究的重点一是要建立材料损伤演化方程, 二是要建立材料含损伤本构关系。

孔洞是材料损伤破坏的一种重要模式, 多数延性材料的断裂是由于微孔洞成核、增长、汇合造成的。对于微孔洞损伤的研究, 已经有了许多工作。例如 M. M. Carroll 等^[2]从细观动力学角度分析了含孔洞理想弹塑性材料动态响应问题, 郑坚等^[3]、周洪强等^[4]在此基础上将细观得到的模型成功应用于层裂实验分析中。虽然这些模型从细观角度能对微孔洞损伤作出很好地分析, 但是这些模型中都没有明确提出一损伤参量来表征材料的受损程度, 也未考虑损伤对材料宏观力学性能的影响, 且模型均较复杂。

层裂是由于应力波在介质内传播时产生的拉伸波和压缩波交互作用所造成的。迄今为止, 层裂的准则主要有以下几种: J. S. Rinehart 的瞬时断裂应力准则^[5]、P. Whiteman 的应力率准则^[6]、R. S. Thurstan 的应力梯度准则^[7]和 T. R. Tuler 的损伤累积准则^[8]。本文中基于微孔洞损伤发展的 NAG (nucleation and growth)模型, 提出一种唯象损伤演化方程, 该模型损伤物理意义明确, 并在考虑损伤软化、温度软化效应对材料本构关系影响的基础上, 将该损伤演化方程和本构关系引入 ABAQUS 有限元计算软件, 对平板撞击层裂问题进行分析。

2 损伤演化方程

考虑含大量孔洞、体积为 V 的介质, 假设实体的体积为 V_s , 孔洞的总体积为 V_d , 则有 $V = V_s + V_d$ 。定义损伤 D 和损失比 ϕ

$$D = V_d/V = V_d/(V_s + V_d), \quad \phi = V_d/V_s \quad (1)$$

则有

$$D = \phi/(1 + \phi), \quad \dot{D} = \dot{\phi}/(1 + \phi)^2 \quad (2)$$

* 收稿日期: 2007-03-16; 修回日期: 2007-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272097)

作者简介: 董 杰(1980—), 男, 博士研究生。

L. Seaman 等^[9]基于固体材料延性和脆性断裂,提出了微孔洞损伤发展的 NAG 模型,即介质内孔洞体积增大包括 2 部分:新产生孔洞的体积和已有孔洞体积的增大。设 t 时刻 V 中有 n 个孔洞,体积各为 V_d^i ,则孔洞体积增长率

$$\dot{V}_d = \sum \dot{V}_d^i + V_s \dot{N} v_0 \quad (3)$$

式中:右端的第一项为已有孔洞体积增大的部分,第二项为新产生孔洞的体积,其中 \dot{N} 为单位实体体积介质的成核率, v_0 为最小成核孔洞体积。这里采用唯象的假设,认为

$$\dot{V}_d^i = a f(\sigma_s) V_d^i \quad (4)$$

$$\dot{N} = \dot{N}_0 f(\sigma_s) \quad (5)$$

且 $f(\sigma_s) = (\sigma_s/\sigma_0 - 1)^p$, 其中 a 与 \dot{N}_0 均为拟合材料参数,通过半经验半尝试方法得到, σ_s 为材料的实体应力, σ_0 是损伤发展的阈值应力。假设实体体积不变化,即 $\dot{V}_s = 0$, 由(3)~(5)式可得

$$\dot{\phi} = (a\phi + \dot{N}_0 v_0) (\sigma_s/\sigma_0 - 1)^p \quad (6)$$

$$\text{再由(2)式可得} \quad \dot{D} = (1-D)^2 [aD/(1-D) + \dot{N}_0 v_0] (\sigma_s/\sigma_0 - 1)^q \quad (7)$$

从(7)式可看出,损伤增长率不仅与加载应力相关,而且与当前损伤有关。由于损伤值只能在 $0 \sim 1$ 之间,因此由(7)式右边可知损伤增长率 \dot{D} 随损伤增大并不是单调递增的,如当 $D=1$ 时, $\dot{D}=0$ 。但是实际上由于微缺陷发展导致微缺陷之间强烈的相互作用,使得损伤增长率应该是随损伤增大而单调增加的,因此从一般性考虑,将(7)式右边第一项 $(1-D)^2$ 修正为 $(1-D)^{-\alpha}$, 其中 $\alpha > 0$ 。事实上,很多损伤演化方程都采用 $(1-D)^{-\alpha}$ 来表示当前损伤对损伤增量的影响,于是得到损伤演化方程

$$\dot{D} = (1-D)^{-\alpha} [aD/(1-D) + \dot{N}_0 v_0] (\sigma_s/\sigma_0 - 1)^q \quad (8)$$

3 含损伤软化和温度软化效应的材料本构关系

对于损伤对材料性能的影响,利用应变等价原理^[10]导出有关材料参数的损伤软化形式;对于温度对材料参数的影响,采用线性温升软化近似^[11],可以得到如下材料参数随损伤和温度变化的公式

$$E = E_s(1-D)(1-\xi T), \quad \nu = \nu_0 + (1/2 - \nu_0)\xi T \quad (9)$$

$$K = K_s(1-D), \quad G = \frac{G_s(1-D)(1-\xi T)}{1 + \xi T G_s / (3K_s)} \quad (10)$$

$$Y = Y_s(1-D)(1-\xi T) \quad (11)$$

$$c_V = c_0(1 + \xi T), \quad \kappa = \kappa_0(1 - \xi T)/(1 + \xi T) \quad (12)$$

式中: $E, \nu, K, G, Y, c_V, \kappa$ 分别为弹性模量、泊松比、体积模量、切变模量、屈服强度、比定容热容、导热系数,带下标 s 对应该参数的实体量(不计损伤影响的物理量),带下标 0 表示常温下的物理量, $\xi = 1/T_m$, T_m 为材料的熔点。

对于金属材料的本构关系,采用流体弹塑性模型,应变增量分为体应变增量和偏应变增量,应力可分为静水压和偏应力

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + s_{ij} \quad (13)$$

对于静水压部分采用 Murnagham 状态方程,并且将损伤和温度的影响考虑进去,有

$$P = \frac{K_s(1-D)(1-T^*)}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (14)$$

式中: K_s 为材料初始体积模量, γ 是 Murnagham 状态方程指数, $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, T_r 是室温。材料的偏应力部分采用 Johnson-Cook 粘塑性屈服准则

$$\bar{\sigma} = Y^* (1 + g \ln(\dot{\epsilon}^p/\dot{\epsilon}_0^p)) \quad (15)$$

式中： $Y^* = (Y + E_1(\bar{\epsilon}^p)^n)(1 - T^{*m})(1 - D)$ ， $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}^p$ 、 $\dot{\bar{\epsilon}}^p$ 分别为等效应力、等效塑性应变和等效塑性应变率， Y 为屈服强度， E_1 为等效塑性模量， g 表示与应变率相关的系数， $\dot{\bar{\epsilon}}_0^p$ 为材料准静态塑性应变率，则由(15)式可得

$$\dot{\bar{\epsilon}}^p = f(\bar{\sigma}) = \dot{\bar{\epsilon}}_0^p \exp[(\bar{\sigma}/Y^* - 1)/g] \tag{16}$$

进一步由塑性力学正交法则可得到塑性流动因子

$$d\lambda = \frac{f(\bar{\sigma})}{f'(\bar{\sigma})} d\bar{\sigma} = gY^* dt \tag{17}$$

则有

$$d\epsilon^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\lambda = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} d\lambda = \frac{3s}{2\sigma} \dot{\bar{\epsilon}}_0^p \exp[(\bar{\sigma}/Y^* - 1)/g] dt \tag{18}$$

$$ds = 2G(d\epsilon - d\epsilon^p) \tag{19}$$

式中： G 为切变模量，由(19)式即可得到偏应力。

由能量守恒方程可得到温升方程为

$$\dot{T} = \kappa \Delta T + \chi(v/c_v) \dot{W}^p \tag{20}$$

式中： Δ 是拉普拉斯算子， v 是比容， \dot{W}^p 是塑性功率， χ 是塑性功的热转化系数，这里 $\chi = 0.9$ 。

表 1 中给出了 DA6C 钢和 921 钢的材料参数。

表 1 DA6C 钢和 921 钢材料参数

Table 1 Material parameters of DA6C and 921 steel

材料	Y/MPa	E ₁ /MPa	g	n	m	K _s /GPa	T _r /°C	T _m /°C	G/GPa	ρ ₀ /(t/m ³)	ε̇ ₀ /s ⁻¹	γ
DA6C	966.0	512.0	0.024	0.298	0.90	165.8	25	1 540	81.0	7.8	1	3.7
921	898.6	356.0	0.022	0.586	1.05	158.5	25	1 490	81.0	7.8	1	3.7

4 有限元数值模拟及分析

以 DA6C 和 921 两种钢板撞击层裂实验作为模拟对象，DA6C 入射板厚 2.006 mm，入射速度为 683.5 m/s，靶板厚 3.993 mm；921 钢板入射板厚 1.998 mm，入射速度为 524.0 m/s，靶板厚 4.003 mm。由于板的厚度远小于另外 2 个方向尺寸，因此问题可用一维应变来近似。ABAQUS 没有提供一维应变单元。先将问题建立在二维平面中，采用平面应变单元，然后固定节点的非速度向的位移和转动，即可模拟出一维应变单元。如图 1 所示，左边为入射板，速度载荷施加在方向 x ，限制方向 y 的位移以及以绕轴 z 的转动。

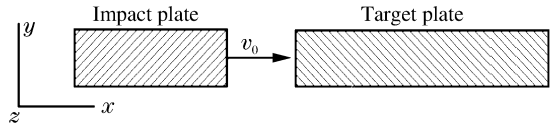


图 1 板撞击的模型图
Fig. 1 Model of plates impact

利用 ABAQUS 中可供用户定义的材料子程序，可以将含损伤材料的本构关系嵌入其中^[12]。定义的过程分 2 部分：(1) 在 ABAQUS 输入文件中定义材料中含有与求解相关变量的个数以及材料常数；(2) 用 FORTRAN 或 C 语言编写材料本构程序，即在已知应变增量的基础上，给出材料的应力增量。ABAQUS 在每个时间增量步的材料积分点均会调用 VUMAT 对材料进行求解计算。表 2 给出了 DA6C 钢和 921 钢的损伤演化方程参数，其中 D_c 表示损伤极限，即单元损伤达到该值时，单元破坏。

从图 2 给出的 2 种钢板撞击靶板自由面速度的时程曲线可看出，实验曲线和计算曲线基本一致，数值模拟结果较好。图 3 是层裂时靶板损伤分布图。图中区域越亮表示该区域损伤值越大。可以看出损伤集中在层裂区域，且层裂片厚度与入射板厚度大致相等，这主要是由于应力波相互作用所导致。表 3 给出了一些特征参数的实验值与计算值，其中 v_{max} 为自由面最大速度， ϵ_0 为自由面最大速度的实验值和计算值的误差， t_a 为层裂信号到达自由面的时刻， ϵ_t 为层裂信号到达自由面时刻的实验值和计算值的误差。从表中可以看出参数误差均较小，说明本文中所采用的模型是合适的。

表 2 DA6C 钢和 921 钢损伤演化方程参数

Table 2 Parameters of DA6C and 921 steel for damage revolution equations

材料	α	a/s^{-1}	$\dot{N}_0 v_0/s^{-1}$	σ_0/MPa	q	D_c
DA6C	1.4	7.8×10^5	10	500	2.9	0.3
921	1.3	7.6×10^5	20	450	2.7	0.3

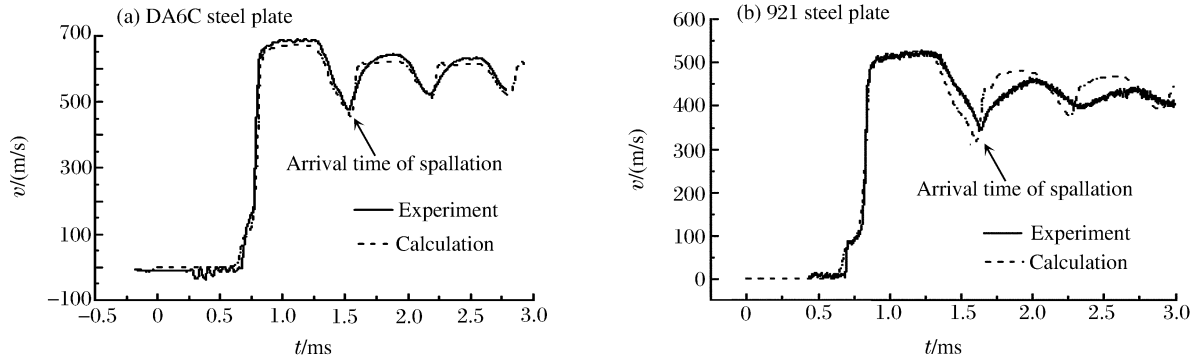


图 2 钢板撞击自由面速度时程曲线

Fig. 2 Free-surface velocity curves of steel plates impacting target plates

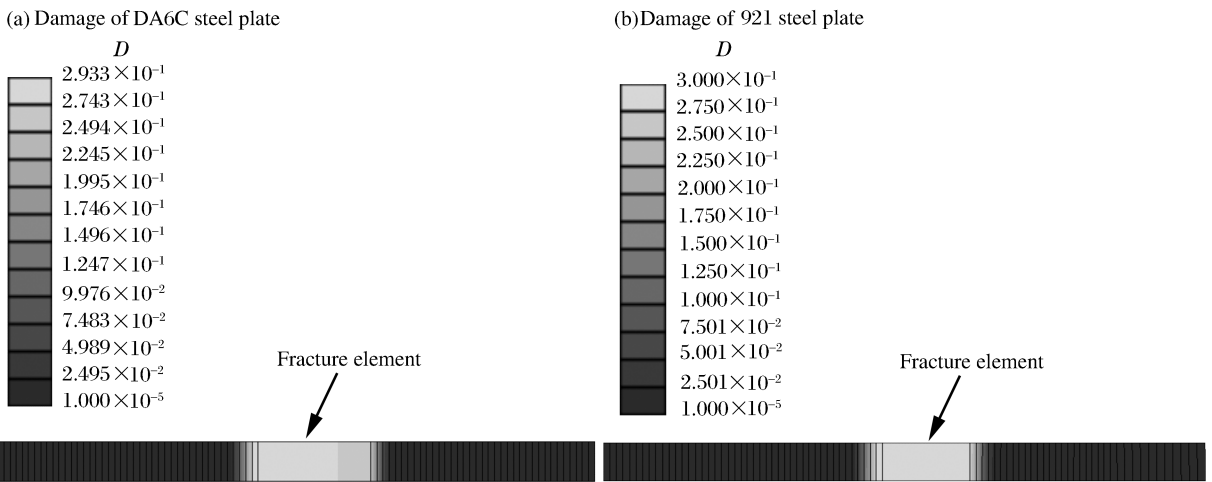


图 3 层裂时钢板损伤分布

Fig. 3 Damage distribution of steel plates at spallation time

表 3 实验与计算结果比较

Table 3 Results of experiments and simulations

材料	$v_{max}/(m/s)$		$\epsilon_v/\%$	t_a/ms		$\epsilon_t/\%$
	实验	计算		实验	计算	
DA6C	686.2	670.6	2.3	1.525	1.545	1.3
921	524.9	523.1	0.3	1.634	1.605	1.8

5 结论

在唯相的基础上得出了微孔洞损伤演化的 NAG 模型表达式;在考虑损伤软化和温度软化的基础上得到了材料含损伤本构关系;将损伤演化方程和材料本构关系引入 ABAQUS 有限元软件,以此对 D6AC 和 921 两种钢板撞击损伤层裂问题进行了数值模拟,得到了较好的结果。

参考文献:

- [1] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] Carroll M M, Holt A C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43:1626-1636.
- [3] 郑坚, 王泽平. 高应变率下延性多孔介质中孔洞的动态演化[J]. *固体力学学报*, 1994, 15(3):189-198.
ZHENG Jian, WANG Ze-ping. Evolution of voids in ductile porous materials at high strain rates[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1994, 15(3):189-198.
- [4] 周洪强, 孙锦山, 王元书. 动载荷下延性材料中微孔洞的增长模型[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(5):415-419.
ZHOU Hong-qiang, SUN Jin-shan, WANG Yuan-shu. The growth of microvoids in ductile materials under dynamic loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5):415-419.
- [5] Rinehart J S. Some quantitative data bearing on the scabbing of metals by an explosive attack[J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22:555-562.
- [6] Whiteman P. Preliminary report on the effect of stress rate on the dynamic fracture in steel, brass and aluminium [R]. AWRESWAN-10/611, 1962.
- [7] Thurstan R S, Mudd W L. Spallation criterion for numerical computational data[R]. LA-4013 TID-4500, 1968.
- [8] Tuler F R, Butcher B M. A criterion for the time-dependent of dynamic fracture[J]. *Journal of Fracture Mechanics*, 1968, 4:431-440.
- [9] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computational models for ductile and brittle fracture[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(11):4814-4826.
- [10] 勒迈特 J. 损伤力学教程[M]. 倪金刚, 陶春虎, 译. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] 竹内洋一郎. 热应力[M]. 郭连玮, 李安全, 译. 北京: 科学出版社, 1977.
- [12] Hibbit, Karlsson and Sorensen INC. Abaqus Documentation[M]. Providence, USA: Hibbit, Karlsson and Sorensen INC, 2004.

A phenomenological damage model of microvoids and its application

DONG Jie^{1, 2*}, LI Yong-chi², CHEN Xue-dong¹

- (1. *National Technology Research Center on Pressure Vessel and Pipe Line Safety Engineering, Hefei 230031, Anhui, China;*
2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)*

Abstract: Based on the nucleation-and-growth model of microvoids and the phenomenological assumption, a microvoid damage evolution equation was acquired. The material constitutive relation considering the effects of damage and temperature softening was developed. The damage evolution and material constitutive equations were embedded into the finite element software ABAQUS with its material interface to simulate numerically the impact spallations of DA6C and 921 steel plates. The simulated results are in good agreement with the experiments.

Key words: solid mechanics; damage evolution equation; finite element; steel plate; phenomenological theory; constitutive equation

* Corresponding author: DONG Jie
E-mail address: jiedong@mail.ustc.edu.cn
Telephone: 86-551-5335485