文章编号:1000-5773(2007)04-0414-05

一种新型微孔洞损伤模型*

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. 中国科学技术大学力学与机械工程系,安徽合肥 230027)

摘要:在前人的基础上引入单位体积微损伤个数概念,从而将宏观损伤参量与微观孔洞体积结合起来,并且在孔洞长大扩展时计入惯性效应的影响,得到了一个新的二次型微孔洞损伤演化方程,指出表面扩张效应和惯性效应分别在孔洞长大的不同阶段起主导作用,最后以 921 钢板撞击实验为参考,通过比较自由面速度时程曲线,得出的结果与实验相符,验证了本模型的正确性。

关键词:微损伤个数;宏微观结合;微孔洞损伤
中图分类号:O347.4 **文献标识码**:A

1 引 言

外部因素作用下,材料内部将形成大量的微观缺陷,这些微缺陷的形核、扩展(或胀大)、汇合将造成材料的逐渐劣化直至破坏。微孔洞正是一种典型的缺陷,大量材料尤其是延性材料的破坏都是由微孔洞造成的[1]。迄今为止,对这类问题已进行了大量的研究。白以龙[2]、勒迈特[3]等根据损伤力学的思想,在建立损伤函数的概念及有关的模型方面进行了有意义的研究工作;封加波[4]等利用孔洞长大过程中能量转化的观点对微孔洞型损伤进行了模拟;张伟[5]等在封加波模型的基础上抛弃了实体不可压缩的假设,对模型进行了改进,并将之应用于球壳在爆炸载荷下破裂问题的研究。然而,封加波的模型认为在孔洞长大过程中孔洞所需的表面能由孔洞周围介质的应变能提供,并没有考虑孔洞长大所引起周围介质动能的增加即惯性效应对这一过程的影响,张伟也没有考虑此效应。本研究以封加波模型为基础,在孔洞增长过程中考虑惯性效应对微孔洞损伤的影响,并以平板撞击层裂问题为例,对此模型进行了验证。

2 计及惯性效应的微孔洞损伤演化方程

宏观损伤 D 定义为微孔洞的总体积 v_D 和材料总体积 v 之比

$$D=\frac{v_D}{v}=\frac{v-v_s}{v},\quad \frac{\partial D}{\partial t}\geqslant 0 \tag{1}$$

式中:v_s 是材料实体比容,$v_D=v-v_s$。假设实体不可压[4],则损伤函数 D 的演化方程为

$$\frac{\partial D}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{v_D}{v}\right)=\frac{1}{v}\frac{\partial v_D}{\partial t}-\frac{D}{v}\frac{\partial v}{\partial t}=\frac{(1-D)}{v}\frac{\partial v_D}{\partial t} \tag{2}$$

微孔洞总体积的变化可以分为长大和成核两部分。因为孔洞的成核机制很复杂,封加波指出当载荷较强时,孔洞的长大效应将对损伤函数的演化起主导作用,因而在冲击载荷条件下可以忽略孔洞成核效应对损伤演化的贡献,所以我们暂时不考虑微孔洞的成核。因此只要知道微孔洞的长大方程,就可以得到

* **收稿日期**:2007-01-26;**修回日期**:2007-04-24
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,主要从事材料和结构动态响应方面的研究. E-mail:rockdj@ustc.edu
通讯作者:李永池(1941—),男,教授,从事材料和结构动态响应方面的研究. E-mail:ycli@ustc.edu.cn

孔洞的总体积变化规律,也就可以得到损伤演化方程。

假设孔洞在增长过程中始终保持球形,并且材料实体体积不可压[4],则有

$$\frac{\mathrm{d}[(4/3)\pi r^3-(4/3)\pi R^3]}{\mathrm{d}t}=0 \tag{3}$$

式中:r 表示质点与孔洞球心之间的距离,R 表示孔洞半径。由(3)式可得到

$$\dot{r}=(R^2/r^2)\dot{R} \tag{4}$$

在考虑应变能提供孔洞增长所需要的能量时,假设只是由孔洞附近扰动波速所确定区域的介质提供,因此也只考虑这部分区域介质动能的增长。因此孔洞增长引起介质动能增长为

$$E_{\mathrm{k}}=\int_{R}^{R+c\Delta t}\frac{1}{2}\rho\dot{r}^2 4\pi r^2\,\mathrm{d}r \tag{5}$$

式中:c 为声速。假设在孔洞增长过程中,介质密度不变,即 $\rho=\rho_0$,且当 $c\Delta t\ll R$ 时(计算选取时间步长时注意)有

$$E_{\mathrm{k}}=2\pi R^2 c\,\Delta t\dot{R}^2\rho_0 \tag{6}$$

这就是孔洞增长所引起介质动能增加的表达式。孔洞增长过程中有能量关系式

$$\Delta e_{\mathrm{s}}=\Delta e_{\lambda}+\Delta e_{\mathrm{k}} \tag{7}$$

式中:Δe_{s} 为应变能,Δe_{λ} 为表面能,Δe_{k} 为动能。(7)式表示孔洞增大引起表面能以及孔洞周围介质动能的增加,由孔洞周围介质所储存的应变能提供。与封加波[4]同样考虑,假定应变能只与满足阈值应力后的总体积变形能有关,由于假定材料实体不可压,因此这一部分应变能也就相当于外压对孔洞周围这一部分介质所作的功即

$$\delta E=\int_{\sigma_{\mathrm{c}}}^{p}p\,\frac{\mathrm{d}v}{v} \tag{8}$$

式中:p 是静水压力(平均应力的负值),σ_{c} 是孔洞长大的阈值应力。进一步假定体积模量 K 为常数,由上式可得

$$\delta E=(p^2-\sigma_{\mathrm{c}}^2)/2K \tag{9}$$

表面能的增加为

$$\Delta e_{\lambda}=\psi\Delta s=8\pi R\psi\Delta R \tag{10}$$

式中:ψ 为单位面积表面能。则由(6)式可得

$$\delta E\cdot\Delta v'=8\pi R\psi\Delta R+2\pi R^2 c\cdot\Delta t\cdot\dot{R}^2\rho_0 \tag{11}$$

式中:$\Delta v'=4\pi R^2 c\Delta t$,即扰动波速影响的区域,进一步可得到

$$\rho_0 Rc\dot{R}^2+4\psi\dot{R}-2Rc\cdot\delta E=0 \tag{12}$$

这是关于孔洞半径增长速度 $\dot{R}$ 的二次方程。为了与宏观损伤联系起来,假定微元内的孔洞均为半径为 R 的球形孔洞。则根据损伤的定义有

$$D=n\,\frac{4}{3}\pi R^3/V \tag{13}$$

式中:n 是微元内微孔洞损伤的个数,V 是微元的体积。由(12)式和(13)式可得到

$$\alpha_1\dot{v}_{\mathrm{D}}^2+\alpha_2\dot{v}_{\mathrm{D}}+\alpha_3=0 \tag{14}$$

其中

$$\alpha_1=\frac{\rho_0 c}{8\pi}\sqrt[3]{\frac{3D}{4\pi n_V}},\quad \alpha_2=2\psi,\quad \alpha_3=-3cD\cdot\delta E/n_V \tag{15}$$

且 α_1 代表惯性效应项,α_2 代表表面能项,α_3 代表应变能项。$n_V=n/V$,表示单位体积内的微损伤个数。(14)式是关于孔洞体积增长率 $\dot{v}_{\mathrm{D}}$ 的二元一次方程。于是有

$$\dot{v}_{\mathrm{D}}=\frac{-\alpha_2+\sqrt{\alpha_2^2-4\alpha_1\alpha_3}}{2\alpha_1} \tag{16}$$

这里由于 $\alpha_1>0$、$\alpha_2>0$、$\alpha_3<0$,只保留了正根。将其带入(2)式,得

$$\frac{\partial D}{\partial t}=\frac{1-D}{v}\cdot\frac{-\alpha_2+\sqrt{\alpha_2^2-4\alpha_1\alpha_3}}{2\alpha_1} \tag{17}$$

(17)式即是得到的损伤演化方程。

对于(17)式,当 $\alpha_2^2\gg-4\alpha_1\alpha_3$,即孔洞半径较小,材料损伤较小时,$\dot{v}_D\approx-\alpha_3/\alpha_2$,表明孔洞增长速率只与应变能和表面能有关,而孔洞增长惯性效应影响则较小;当 $\alpha_2^2\ll-4\alpha_1\alpha_3$,即孔洞半径较大,材料损伤较大时,$\dot{v}_D\approx\sqrt{-\alpha_3/\alpha_1}$,则表明孔洞增长速率是与应变能和孔洞增长惯性效应项有关,表面能影响则较小。

3 含损伤材料本构关系

本研究利用勒迈特在专著[3]中所提出的"应变等价原理"导出有关材料参数的损伤软化形式。应变等价原理可表达为:"任何对于损伤材料所建立的应变本构方程都可以用与对无损伤材料同样的方程导出,只是其中的通常应力需用有效应力替代"。再综合温度对材料参数的影响,采用线性温升软化近似,可以得到如下一些材料参数随损伤和温度变化的公式

$$E=E_s(1-D)(1-\xi T) \tag{18}$$

$$K=K_s(1-D),\quad G=\frac{G_s(1-D)(1-\xi T)}{1+\xi TG_s/3K_s} \tag{19}$$

式中:E、K、G 分别为杨氏模量、体积模量、剪切模量,带下标 s 的量分别对应该参数的实体量,$\xi=1/T_m$,T_m 为材料的熔点。

采用 Johnson-Cook 本构模型

$$\bar{\sigma}=(\sigma_0+E_1\bar{\varepsilon}^p)[1+g\cdot\ln(\bar{\varepsilon}^p/\bar{\varepsilon}_0^p)](1-T^*) \tag{20}$$

式中:$\bar{\sigma}$、$\bar{\varepsilon}^p$、$\bar{\varepsilon}^p$,分别是等效应力、等效塑性应变、等效塑性应变率,$T^*=(T-T_r)/(T_m-T_r)$,T_r 是室温,0、E_1、g、$\bar{\varepsilon}_0^p$ 是材料参数,用有效应力代替实体应力,由(20)式可以得到

$$\bar{\varepsilon}^p=f=\bar{\varepsilon}_0^p\exp\left\{\frac{1}{g}\left[\frac{\bar{\sigma}}{(\sigma_0+E_1\bar{\varepsilon}^p)(1-D)(1-T^*)}-1\right]\right\} \tag{21}$$

由正交法则,$\dot{\varepsilon}_{ij}^p=\dot{\lambda}(\partial f/\partial\sigma_{ij})$,最终可得到塑性流动因子

$$\dot{\lambda}=g(\sigma_0+E_1\bar{\varepsilon}^p)(1-D)(1-T^*) \tag{22}$$

(22)式是求 $\dot{\lambda}$ 的显式方程,进一步可得 $\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^p$、$\mathrm{d}\sigma_{ij}$。

$$\mathrm{d}\lambda=g(\sigma_0+E_1\bar{\varepsilon}^p)(1-D)(1-T^*)\mathrm{d}t \tag{23}$$

$$\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^p=\frac{\partial f}{\partial\sigma_{ij}}\mathrm{d}\lambda \tag{24}$$

$$\mathrm{d}\sigma_{ij}=E_{ijkl}(\mathrm{d}\varepsilon_{kl}-\mathrm{d}\varepsilon_{kl}^p) \tag{25}$$

4 平板撞击算例

以 921 钢板撞击层裂实验作为模拟的对象,入射板厚度为 1.998 mm,入射速度为 524.0 m/s,靶板厚度为 4.003 mm,由于板的厚度远小于另外两个方向尺寸,因此问题可用一维应变来近似。材料密度 $\rho_0=7\,800\ \mathrm{kg/m^3}$,参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0=1$。表 1 给出了 921 钢的材料参数[6]。

表 1 921 钢材料参数

Table 1 Material parameters of 921 steel

σ_0/(MPa)	E_1/(MPa)	g	n	K_s/(GPa)	T_r/(℃)	T_m/(℃)	G/(GPa)	n_V/($\mathrm{m^{-3}}$)
898.6	356.0	0.022	0.586	158.5	25	1490	81.0	3×10^{13}

采用 ABAQUS 有限元软件对该问题进行模拟,将材料含损伤本构关系用用户自定义材料接口程序 VUMAT 嵌入 ABAQUS[7]中。ABAQUS 没有提供一维应变单元,因此先把模型建立在二维平面中,采用平面应变单元,然后固定节点非速度向的位移和转动,便可模拟出一维应变单元。如图 1 所示,左端为入

射板,速度载荷施加在 1 方向,限制 2 方向位移以及以轴 3 为轴的转动即 U2 和 UR3 为 0 即可。图 1 是板撞击模型图,左边是撞击板,右边是靶板。

图 2 是靶板层裂破坏时损伤分布图。图中高亮区域是破坏层裂的单元,位于材料中部。图 3 是靶板右端自由面速率时程曲线图,图中 Cal. 是计算所得曲线,Exp. 是试验曲线。从图中可看出计算曲线与试验曲线符合较好,文中所采用的微孔洞损伤模型是正确的,可以用来预测材料的损伤破坏情况。图中曲线的变化情况解释如下:靶板右端自由面开始由于撞击产生的压缩波作用使其速率迅速增加并在一段时间内保持稳定,随后由于自由面拉伸波反射的作用,速率逐渐下降,而且拉伸波使得材料内部某处发生层裂,产生新的自由面反射压缩波,速率曲线在下降后不久便开始增加,如此反复。因此,曲线第一次由下降至上升的转折点的变化反映了材料内部层裂破坏的信息。从图中可看出,计算和试验得到的这个转折点基本重合,进一步说明文中微孔洞型损伤能准确地反映材料的损伤破坏情况。图 4 是计及(实线,e)和未计及(虚线,ne)惯性效应时,破坏单元的损伤发展曲线。损伤极限为 0.3。从图中可看出,未考虑惯性效应的损伤发展明显较快。



图 1　板撞击的模型图

Fig. 1　Model of impact of plates

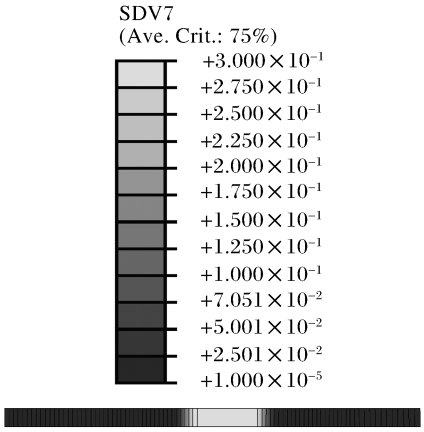


图 2　板损伤分布图

Fig. 2　Distribution of damage in plate

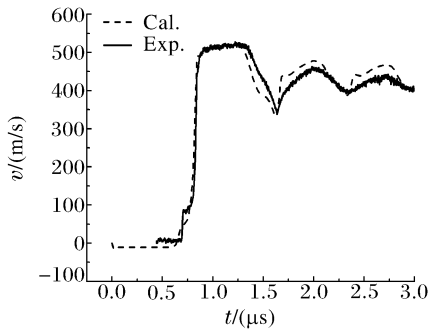


图 3　自由面速率时程曲线

Fig. 3　Free-surface velocity history curves

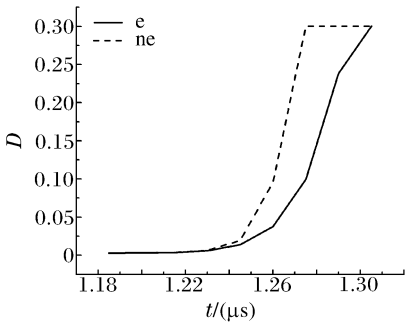


图 4　破坏单元损伤发展曲线

Fig. 4　Damage development of damaged element

5　结　论

本研究得到了如下结果:

(1) 在前人工作的基础上,引入单位体积微损伤数的概念,给出了一种计及孔洞长大惯性效应的新型微孔洞型损伤演化方程。

(2) 当孔洞半径较小、材料损伤较小时,孔洞增长速率受表面扩张效应影响较大;当孔洞半径较大、材料损伤较大时,孔洞增长速率则受惯性效应影响较大。

References:

[1] Yu S W, Feng X Q. Damage Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Publisher, 1997: 10-11. (in Chinese)
余寿文,冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京:清华大学出版社,1997:10-11.

[2] Bai Y L, Ke F J, Xia M F. Formulation of Statistical Evolution of Microcracks in Solids [J]. Acta Mechanica Sinica, 1991, 23(3): 290-298. (in Chinese)
白以龙,柯孚久,夏蒙棼. 固体中微裂纹系统统计演化的基本描述 [J]. 力学学报,1991,23(3):290-298.

[3] Lemaitre J. Damage Mechanics Tutorial [M]. Translated by Li J G, Tao C H. Beijing: Science Publisher, 1996. (in Chinese)
勒迈特. 损伤力学教程 [M]. 倪金刚,陶春虎,译. 北京:科学出版社,1996.

[4] Feng J B. Damge Function Models for the Dynamic Ductile Fracture of Metals [D]. Beijing: Beijin Science and Technology University, 1992. (in Chinese)
封加波. 金属动态延性破坏损伤函数模型 [D]. 北京:北京理工大学,1992.

[5] Zhang W. Investigation of Damage Thermo-Viscous-Plastic Constitutive Equations and Its Application on the Problems of Cylindrical Shell Fracture [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1998. (in Chinese)
张 伟. 含损伤塑性本构关系的研究及在柱壳破裂问题中的应用 [D]. 合肥:中国科学技术大学,1998.

[6] Li Y C, Tan F L, Guo Y. Determination of the Damage Evolution Equation and Spallation Criterion of Metals [J]. Journal of Ninbo University (NSEE), 2003, 16(2): 442-446. (in Chinese)
李永池,谭福利,郭 杨. 金属损伤演化方程和层裂准则的确定 [J]. 宁波大学学报(理工版),2003,16(2):442-446.

[7] HKS Inc. Abaqus Documentation 6.5-1 [Z]. Providence, RI, USA: HKS Inc, 2004.

A New Damage Model of Microvoids

DONG Jie[1,2], LI Yong-Chi[2], CHEN Xue-Dong[1]

(1. *National Technology Research Center on Pressure Vessel and Pipe Line Safety Engineering, Hefei* 230031, *China*;
2. *Department of Mechanics and Mechanical Engineering of USTC, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: With introducing the concept of the number of micro-damage in unit volume, macro damage parameter and microvoids volume are unified together, and a new kind of quadratic micro-voids damage evolution equation is acquired. The effect of inertia is considered during the expansion of voids. The expansion of surface and inertia will play a dominant role during the different stage of expansion of voids respectively. After taking the impact experiment of 921 steel as reference and comparing the curves of free surface velocity, the model is proved to be correct since their results are matched well.

Key words: number of micro-damage inertia; unification of macro and micro scale; microvoids damage