

高应变率下延性多孔介质中孔洞的动态演化

94, 15(3)
199-198

郑 坚

王泽平

(中国科学院力学所开放实验室, 北京, 100080) (西南交通大学, 成都, 610031)

0346.5

摘要 本文提出了一个新的材料延性动态损伤模型, 模型中不但包括了率效应, 同时还考虑了惯性效应、孔洞表面能变化和材料硬化对孔洞演化的影响. 此外, 在模型中同时考虑了体应力和偏应力对孔洞演化的作用. 从孔洞演化方程直接得到了孔洞增长和压缩应力临界表达式, Carroll 和 Holt 的结果作为该表达式的一个特例而得出. 模型的数值分析得出以下结论: ①延性孔洞的动态增长对率效应十分敏感, 应变率越高, 孔洞增长越快; ②惯性效应在高加载率条件下对孔洞增长有明显的影响, 具体表现为对孔洞增长的阻碍作用. 除此之外, 本文还得到了延性孔洞动态压实模型, 该模型可用于粉末和其它材料的动态压实研究中.

关键词 延性动态损伤, 演化方程, 惯性效应, 数值分析, 复杂应力作用

1 引言

多孔介质, 孔洞, 损伤理论

材料在强动载作用下(应变率 $\dot{\epsilon} \geq 10^3 \text{ s}^{-1}$)的损伤和破坏过程是一个十分复杂的现象. 大量实验观测表明^[1-4], 宏观破坏的产生是微观损伤(微孔洞或微裂纹)的萌生、增长、聚合的结果. 从损伤的微观机理上大体可分为延性动态损伤和脆性动态损伤两大类. 所谓延性动态损伤就是损伤是由微孔洞(1—100 μm 的量级)的萌生、增长、聚合过程形成; 而脆性动态损伤过程则是由微裂纹的萌生、增长、聚合过程组成. 本文研究的对象是第一类, 即延性损伤过程. 由于材料的微结构不同(如: 纯铜由多晶体组成; 铝合金由铝基体和第二相粒子组成; 而各类不同的钢则含不同的夹杂物), 外加载条件不同, 材料的损伤破坏形式也不同. 平板高速撞击产生层裂, 这主要是拉伸应力作用的结果; 长杆的动态拉伸产生剪切破坏, 这主要是三轴应力的作用; 炸药加载下材料产生的破坏现象既有拉伸破坏也有剪切破坏. 动态损伤与准静态损伤主要区别在于, 动态损伤过程中应变率效应、惯性效应影响以及热效应是三个主要作用因素^[2]; 而在静态损伤过程的研究中, 这些可以忽略不计. 从上面的叙述了解到, 动态损伤和破坏的研究是一项难度很大的课题, 主要困难在以下两个方面:

(1) 微孔洞的萌生、增长和聚合过程无法直接观察到; 另外, 材料内部由高速塑性形变而产生温度升高的变化无法直接测得. 因此, 无法真实地了解损伤破坏的实际过程, 只能间接推测, 这给理论描述带来很多困难.

(2) 前面指出过, 由于损伤形成的多样性, 加上应变率、惯性以及热效应的存在, 给理论模型的建立带来很大的困难. Gurson^[5]采用细观损伤力学方法得出了延性介质带损伤的宏观塑性本构势, 从而建立了一套较完整的细观与宏观相结合的描述延性介质损伤过程的理

论框架,但它只适应于准静态情形. Johnson^[6] 曾将 Gurson 理论直接应用于层裂和长杆的动态拉伸断裂研究,但从理论描述到数值分析结果都不尽人意.

国内外学者对延性介质的动态损伤问题进行了大量的研究,建立了一些理论模型. 在国内,有邢修三^[7,8]采用非平衡态统计与细观位错运动理论相结合的方法建立了非平衡统计断裂力学,该理论将宏观损伤量与细观损伤演化相结合,宏观损伤量看成是细观损伤的统计平均值. 白以龙^[9-11]等人将统计方法与细观动力学方法结合,建立了微损伤系统演化统计模型. 王泽平^[3,11,12-16]等人在 Carroll 和 Holt^[16] 以及 Johnson^[17] 等人工作的基础上,采用细观分析的方法建立了一个延性动态损伤模型,模型的一个主要特点是考虑了惯性效应对孔洞增长的影响,该模型成功地应用于几种延性材料一维二维层裂的数值模拟中. 在国外, Curran^[1,18] 等人采用实验统计的方法建立了延脆性动态断裂模型,称为 NAG (nucleation and growth) 模型. Johnson^[17] 在 Carroll 和 Holt^[16] 工作的基础上给出了一个简化的延性孔洞动态增长模型. Perzyna^[19] 把他本人在 60 年代提出的动态粘塑性过应力本构模型推广到考虑损伤的情形. 另外,还有 Cochran 和 Banner^[20], Rajendran^[21] 等人, Cortes^[22] 以及 Ortiz^[23] 等人分别给出了自己的延性动态损伤模型. 由于延性动态损伤破坏过程与多种因素有关,不同加载形式及材料不同的微结构都强烈地影响着损伤演化,目前还没有一种模型或理论能完全真实地描述延性动态损伤过程,该课题的研究正处在发展阶段.

惯性效应对孔洞增长的影响是强动载与静载损伤过程的主要区别之一. 另外,材料内部损伤的发生和发展是体应力和偏应力联合作用的结果,但由于数学上的困难,上面提到的模型几乎都忽略了惯性效应,同时只考虑了体应力对孔洞演化的贡献. 实际上,仍然是用在准静态条件下得出的模型来描述动态损伤过程,这不能不说是理论分析上的一个不足之处. 本文采用细观分析的方法,给出了一个新的材料延性动态损伤模型,模型中包括了惯性效应的影响,考虑了外加载的体应力和偏应力的联合作用;同时,还导出使孔洞增长或压缩的应力临界值表达式.

2 延性孔洞的动态增长和压缩

材料中微孔洞的大小和分布实际上是随机的,为了理论分析的方便,假设微孔洞的大小和分布是均匀的,材料是均匀的和各向同性的. 这样,就可以通过研究单个孔洞在外力作用下的增长和压缩来研究整体材料的动态响应. 这种方法就是细观分析的方法. Rice^[24], Gurson^[6], Cocks^[25] 采用了这种方法来研究准静态延性损伤; Carroll 和 Holt^[16], Johnson^[17], Cortes^[22] 等人采用了这种方法来研究延性动态损伤问题. 我们还假设孔洞周围的基体是塑性不可压的,孔洞在整个增长和压缩过程中保持球形不变. 图 1 就是要研究的基本单元示意图,图中 Σ_0 为外加宏观应力场. 本文还采用了 Carroll 和 Holt^[16] 的假设,认为有孔洞存在时材料的状态方程与基体的状态方程有同样的形式,即

$$P = P_0(V/a, e_0)/a \quad (1)$$

式中 P 为有损伤存在时宏观平均体应力, V 为宏观平均相对比容, e_0 为基体的比内能, P_0 为基体的状态方程, a 为一表示材料损伤的量,称为孔洞膨胀比,定义为

$$a = \frac{b^3}{b^3 - \alpha^3} \quad (2)$$

式中 a, b 量见图 1. 显然, $\alpha_{crit} \geq \alpha \geq 1, \alpha_{crit}$ 为临界孔洞膨胀比. 当 $\alpha \geq \alpha_{crit}$ 时, 材料就产生宏观破坏现象, 我们的目的就是通过对研究基元在外力 Σ_y 作用下的增长和压缩来描述材料的损伤破坏.

2.1 孔洞演化方程

将基体和孔洞看成一个系统, 系统能量由 3 部分组成, 即: 动能 E_k , 内能 E_i 和孔洞表面能 E_s . 外力对系统做的功 W 等于系统能量的变化

$$W = \Delta E_k + \Delta E_i + \Delta E_s \quad (3)$$

根据 Carroll 和 Holt^[16] 的分析结果, 基体的弹性和弹塑性形变对孔洞增长的贡献与后来的完全塑性形变相比可以忽略. 我们可直接从基元完全进入塑性状态开始分析, 基体的本构关系采用以下与应变率有关的形式

$$\sigma_e = Y_0 + H \epsilon_e^p + \eta \dot{\epsilon}_e^p \quad (4)$$

式中 Y_0 为基体的静屈服强度, H 为线性硬化系数, η 为粘性系数, σ_e 为等效应力, ϵ_e^p 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}_e^p$ 为等效塑性应变率, “ \cdot ”表示对时间变量求导数. 塑性应变 ϵ_e^p 由下式给出^[28]

$$\epsilon_e^p = \pm 2 \ln \frac{r}{r_0} \quad (5)$$

式中“+”号对应于孔洞增长, “-”号对应于孔洞压缩, r 为基体中某点的坐标, r_0 为该点的初始坐标.

在本文的理论推导中有以下关系要用到^[12]

$$r^3 = r_0^3 - B(t), \quad B(t) = a_0^3 \frac{a_0 - \alpha}{a_0 - 1} \quad (6)$$

$$\frac{B(t)}{a^3} = \frac{a_0 - \alpha}{\alpha - 1}, \quad \frac{B(t)}{b^3} = \frac{a_0 - \alpha}{\alpha} \quad (7)$$

式中带下标“0”的量为初始时刻的量.

系统动能的变化由下式给出

$$\Delta E_k = E_k(\alpha) - E_k(\alpha_0) \quad (8)$$

$$E_k(\alpha) = \int_a^b \frac{1}{2} r^2 \rho_s 4\pi r^2 dr \quad (9)$$

式中 ρ_s 为基体的密度, 由方程(6), (7)有

$$E_k(\alpha) = \left[\frac{4\pi a_0^3}{9(a_0 - 1)} \right] \frac{a_0^3 \rho_s}{2(a_0 - 1)} \left(\frac{a_0 - 1}{\alpha - 1} \right)^{1/3} \left[1 - \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right)^{1/3} \right] \alpha^2 \quad (10)$$

同理, 可得孔洞表面能的变化为

$$\Delta E_s = \pm [E_s(\alpha) - E_s(\alpha_0)] \quad (11)$$

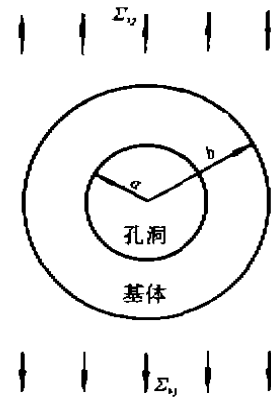


图 1 基本单元示意图

$$E_s(\alpha) = \left[\frac{4\pi a_0^3}{9(\alpha_0 - 1)} \right] \frac{9(\alpha_0 - 1)^{1/3} \gamma (\alpha - 1)^{2/3}}{a_0} \quad (12)$$

式中 γ 为表面能密度, “+”号表示孔洞增长, “-”号表示孔洞压缩.

本文讨论的是强动载作用下的延性动态损伤, 整个过程可作为绝热过程处理, 同时假设材料内部没有热源, 由此可得比内能变化率为

$$de_i = \frac{1}{\rho_s} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} = \frac{1}{\rho_s} (\sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^e + \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p) \quad (13)$$

由于我们考虑的是基体完全进入塑性状态的情形, (13)式可化为

$$de_i = \frac{1}{\rho_s} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\rho_s} (\sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \sigma_{nn} \delta_{ij}) d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\rho_s} \sigma'_{ij} d\epsilon_{ij}^p = \frac{1}{\rho_s} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \quad (14)$$

式中 σ'_{ij} 为基体的偏应力分量, 同时用到了基体塑性不可压假设 $d\epsilon_{nn}^p = 0$, 系统的内能变化为

$$\Delta E_i = \frac{1}{\rho_s} \int_V \left[\int_0^{\epsilon_{ij}^p} \sigma_{ij}(\epsilon^p) d\epsilon^p \right] 4\pi \rho_s r^2 dr \quad (15)$$

借助于(4)~(7)式可得

$$\Delta E_i = \left[\frac{4\pi a_0^3}{9(\alpha_0 - 1)} \right] [F_3(\alpha) + F_4(\alpha) + F_5(\alpha)\alpha] \quad (16)$$

式中

$$F_3(\alpha) = \pm 2Y_0 \left(\ln \frac{\alpha - 1}{\alpha_0 - 1} + \alpha \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} - \alpha_0 \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} \right) \quad (17)$$

$$F_4(\alpha) = \frac{4}{3} H \left[(\alpha - \alpha_0) F(\alpha) + \frac{\alpha_0}{2} \left(\ln \frac{\alpha_0}{\alpha} \right)^2 - \frac{\alpha_0 - 1}{2} \left(\ln \frac{\alpha_0 - 1}{\alpha - 1} \right)^2 \right] \quad (18)$$

$$F(\alpha) = \int_{h_0}^{\alpha} \frac{\ln(h+1)}{h} dh \quad (19)$$

$$h_0 = \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha - 1}, \quad h_1 = \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha}, \quad F_5(\alpha) = \frac{2}{3} \eta \left(\ln \frac{\alpha - 1}{\alpha} + \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} \right) \quad (20)$$

函数 $F_3(\alpha)$, $F_4(\alpha)$ 和 $F_5(\alpha)$ 分别表示基体的静态屈服强度、硬化以及粘性对系统内能变化的影响.

外力 Σ_{ij} 对基元中单位体积做的功为

$$dW = \Sigma_{ij} dE_{ij} \quad (21)$$

式中 E_{ij} 为宏观平均应变分量, 其定义为^[6]

$$E_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \dot{\epsilon}_{ij} dV \quad (22)$$

这里 V 为基元的体积, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为基体中的应变率分量. 基体外边界条件为

$$v_i|_s = \dot{E}_{ij} x_j|_s \quad (\text{笛卡尔坐标}) \quad (23)$$

式中 v_i 为基体的速度场, x_j 为基体的笛卡尔坐标.

由(22)、(23)式得出

$$\dot{E}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}, \quad \dot{E}_{nn} = \dot{V}/V \quad (24)$$

式中 \dot{E}_{ij} 和 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 分别为宏观平均和基体的偏应变场分量, (21)式可写成

$$dW = \Sigma_{ij} dE_{ij} = (\Sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \Sigma_{nn} \delta_{ij}) (dE'_{ij} + \frac{1}{3} \delta_{ij} dE_{nn})$$

$$= \Sigma'_i dE'_i + \frac{1}{3} \Sigma_{ii} dE_{ii} = \Sigma_e dE_e + \frac{1}{3} \Sigma_{ii} \frac{dV}{V} \quad (25)$$

式中 Σ'_i 为宏观平均偏应力分量, 由(7)和(24)式有

$$dE_e = de_e = \frac{2}{3} \frac{d\alpha}{\alpha}, \quad \frac{\dot{V}}{V} = \frac{\dot{\alpha}}{\alpha} \quad (26)$$

同时, 利用关系式

$$\frac{1}{3} \Sigma_{ii} = -P \quad (27)$$

(25)式可化为

$$dW = \left(\frac{2}{3} \Sigma_e - P \right) \frac{d\alpha}{\alpha} \quad (28)$$

外力 Σ_e 对系统做的功为

$$W = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{4}{3} \pi \beta^3 dW = \frac{4}{3} \pi \frac{\alpha_0^3}{\alpha_0 - 1} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \left[\frac{2}{3} \Sigma_e(\beta) - P(\beta) \right] d\beta \quad (29)$$

这里将 Σ_e 和 P 看成 α 的函数. 将 ΔE_i 、 ΔE_e 、 ΔE_i 和 W 的表达式代入(3)式最后得

$$F_1(\alpha) \dot{\alpha}^2 + F_5(\alpha) \dot{\alpha} + F_7(\alpha) = 0 \quad (30)$$

式中

$$F_1(\alpha) = \frac{\rho \alpha_0^3}{2(\alpha_0 - 1)} \left(\frac{\alpha_0 - 1}{\alpha - 1} \right)^{1/3} \left[1 - \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right)^{1/3} \right] \quad (31)$$

$$F_7(\alpha) = F_2(\alpha) + F_3(\alpha) + F_4(\alpha) - 3 \int_{\alpha_0}^{\alpha} \left[\frac{2}{3} \Sigma_e(\beta) - P(\beta) \right] d\beta - F_1(\alpha_0) \alpha_0^3 - F_2(\alpha_0) \quad (32)$$

$$F_5(\alpha) = \pm \frac{9(\alpha_0 - 1)^{1/3} \gamma (\alpha - 1)^{2/3}}{\alpha_0} \quad (33)$$

从(30)式求出 $\dot{\alpha}$

$$\dot{\alpha} = \frac{1}{2F_1(\alpha)} \left\{ -F_5(\alpha) \pm \sqrt{[F_5(\alpha)]^2 - 4F_1(\alpha)F_7(\alpha)} \right\} \quad (34)$$

(34)式为孔洞演化方程, 式中“+”号对应孔洞增长, “-”号对应孔洞压缩. 式中 $F_1(\alpha)$ 表示惯性的影响, $F_5(\alpha)$ 表示粘性(或应变率)的影响, $F_7(\alpha)$ 则表示外力、孔洞表面能变化、基体的屈服和硬化对孔洞演化的作用. (34)式给出的是精确解析解, 式中各项的物理意义十分明确, 利用(34)式可分别考察各种效应对孔洞增长和压缩过程的影响. 如果不考虑惯性效应, 即: 不考虑系统动能的变化, 由(30)式可得

$$\dot{\alpha} = -F_2(\alpha)/F_5(\alpha) \quad (35)$$

式中

$$F_2(\alpha) = F_2(\alpha) + F_3(\alpha) + F_4(\alpha) - 3 \int_{\alpha_0}^{\alpha} \left[\frac{2}{3} \Sigma_e(\beta) - P(\beta) \right] d\beta - F_2(\alpha_0) \quad (36)$$

2.2 临界应力表达式

定义

$$\Sigma = \frac{2}{3} \Sigma_e - P \quad (37)$$

Σ 表示总的外加作用力, 显然, 它包括体应力和偏应力两部分, 习惯上对于体应力 P 取拉伸为负值, 压缩为正值. 由于 a 为实数, 从(34)式可得

$$|\Sigma(a)| \geq \frac{1}{3} \left[\frac{dF_2(a)}{da} + \frac{dF_3(a)}{da} + \frac{dF_4(a)}{da} \right] \quad (38)$$

将(33)、(17)、(18)式代入(38)式有

$$\begin{cases} \Sigma(a) \geq \frac{1}{3} \left[\frac{6\gamma}{a_0} \left(\frac{a_0-1}{a-1} \right)^{1/3} + \frac{4H}{3} F(a) \right. \\ \quad \left. - \frac{8H}{3} \frac{a_0-1}{a-1} \ln \frac{a-1}{a_0-1} + 2Y_0 \ln \frac{a}{a-1} \right] & \text{(孔洞增长)} \\ \Sigma(a) \leq -\frac{1}{3} \left[\frac{6\gamma}{a_0} \left(\frac{a_0-1}{a-1} \right)^{1/3} + \frac{4H}{3} F(a) \right. \\ \quad \left. - \frac{8H}{3} \frac{a_0-1}{a-1} \ln \frac{a-1}{a_0-1} + 2Y_0 \ln \frac{a}{a-1} \right] & \text{(孔洞压缩)} \end{cases} \quad (39)$$

令

$$\Sigma_{crit}(a) = \pm \frac{1}{3} \left[\frac{6\gamma}{a_0} \left(\frac{a_0-1}{a-1} \right)^{1/3} + \frac{4H}{3} F(a) - \frac{8H}{3} \frac{a_0-1}{a-1} \ln \frac{a-1}{a_0-1} + 2Y_0 \ln \frac{a}{a-1} \right] \quad (40)$$

$\Sigma_{crit}(a)$ 为孔洞增长和压缩的应力临界值, 式中“+”对应于孔洞增长, “-”对应于孔洞压缩. 因此我们得到使延性孔洞动态增长和压缩时外加应力需满足的条件为

$$\begin{cases} \Sigma(a) > \Sigma_{crit}(a) & \text{(孔洞增长)} \\ \Sigma(a) < \Sigma_{crit}(a) & \text{(孔洞压缩)} \end{cases} \quad (41)$$

值得一提的是, 如果不考虑外加偏应力 Σ' 的作用, 并且不考虑孔表面能变化以及材料的硬化, 对于孔洞增长情况, (40)式简化为

$$P_{crit}(a) = -\frac{2}{3} Y_0 \ln \frac{a}{a-1} \quad (42)$$

这与 Carroll 和 Holt^[14] 得到的结论完全一致! 另外, 从(40)式可以看到, 应力临界值只与材料参数有关, 与初始以及当时的损伤状况有关, 而与应变率无关.

3 数值分析

3.1 不同因素对应力临界值的影响

表1 材料参数

材料	ρ_s g/cm ³	K_0 GPa	Γ_0	Y_0 GPa	H GPa	μ_s GPa	η GPa · μ s	Ψ_{crit}	γ J/m ²
纯铜	8.92	136.0	1.94	0.26	0.25	48.4	0.1	0.31	0.09

以纯铜为例, 计算所需材料参数由表1给出, 图2给出了(40)式中各项对 $\Sigma_{crit}(a)$ 的影响, 图中

$$P_1(a) = \pm \frac{2\gamma}{a_0} \left(\frac{a_0-1}{a-1} \right)^{1/3} \quad (43)$$

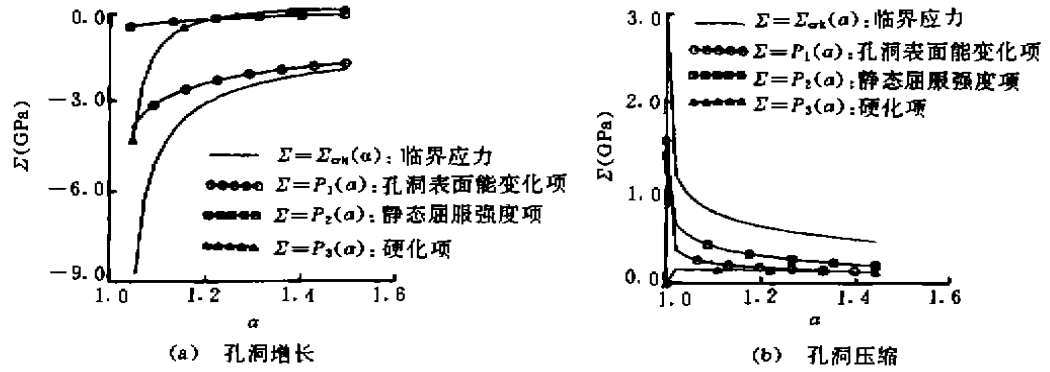


图 2 各种因素对应力临界值的影响

$$P_2(a) = \pm \frac{2}{3} Y_0 \ln \frac{a}{a-1} \tag{44}$$

$$P_3(a) = \pm \frac{4}{3} H \left[F(a) - 2 \frac{a_0 - 1}{a - 1} \ln \frac{a - 1}{a_0 - 1} \right] \tag{45}$$

对于孔洞增长图 2(a), 表面能变化 $P_1(a)$ 和材料硬化 $P_3(a)$ 的影响同量级, 屈服强度的影响占主要地位, 但 $P_1(a) + P_3(a)$ 的影响在孔洞增长中期开始与 $P_2(a)$ 同阶. 这表明在考虑孔洞增长的临界应力时, 孔洞表面能变化和介质的硬化的作用不可忽略.

对于孔洞压缩应力临界值, 由图 2(b) 可看出, 孔洞表面能变化 $P_1(a)$ 起主要作用, 而材料的屈服和硬化的影响几乎可以忽略; 此外, 还看到, 随着孔洞的压缩所需外界应力增长很快, 这意味着在孔洞的压缩过程中存在一个临界 α_{crit} , 当 α 达到 α_{crit} 时孔洞几乎不可能再压缩.

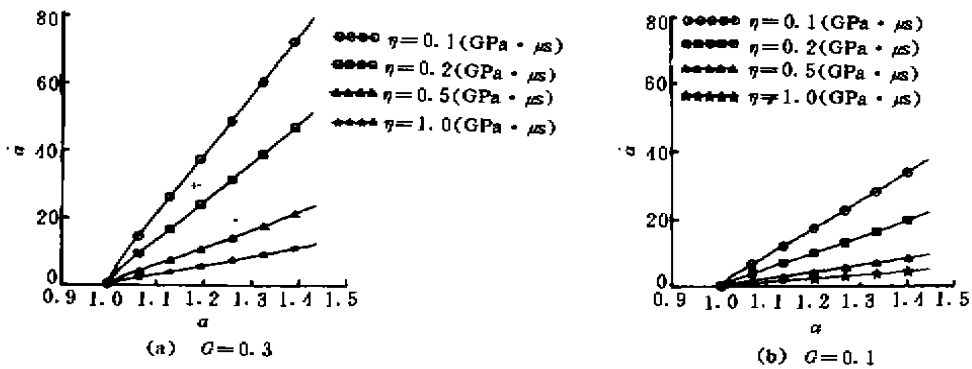


图 3 不同加载率下粘性(应变率)对孔洞增长的影响

3.2 材料粘性对孔洞增长的影响

为了简化分析, 假设外加载为线性形式

$$\Sigma(\alpha) = \Sigma_0 + G(\alpha - \alpha_0) \tag{46}$$

式中 $\Sigma_0 = \Sigma_{crit}(\alpha_0)$, G 为某一常数.

以孔洞增长为例,图3给出了在不同加载率条件下分别取不同 η 值时 α 随 a 的变化. 粘性 η 与应变率平方根成反比,即^[27]: $\eta \sim 1/\sqrt{\dot{\epsilon}}$,也就是说,应变率越高 η 越小. 由图3得出以下结论:

- (1) 孔洞的增长对应变率十分敏感,应变率越高孔洞增长越快;
- (2) 孔洞的增长速度与外加载率有关,外加载率越高,孔洞增长越快.

3.3 惯性效应对孔洞增长的影响

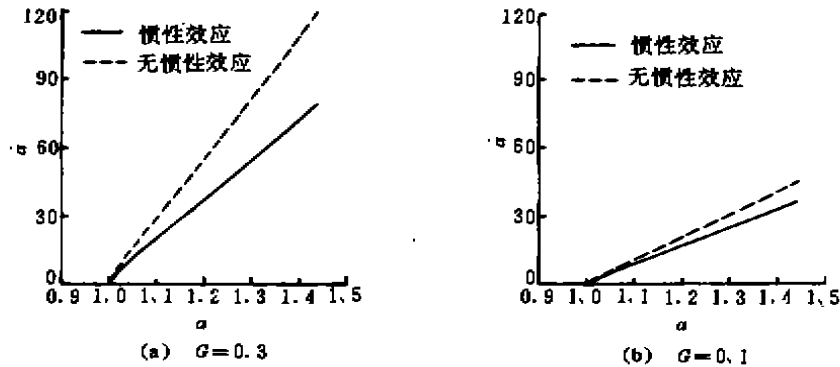


图4 不同加载率下惯性效应对孔洞增长的影响

图4给出了在不同加载条件下惯性对孔洞增长的影响. 图中实线为(34)式,表示考虑了惯性的影响,虚线为(35)式,表示没有考虑惯性的影响. 由图可知,惯性表现出对孔洞增长起阻碍作用,随着外载率的增加,这种阻碍作用越来越明显. 图4的数值分析表明,惯性效应在研究延性孔洞动态增长时是一个不可忽略的因素,特别在高加载情况下,惯性效应尤为明显.

4 结论

本文工作有以下内容:

(1) 采用细观动力学方法建立了一个新的延性动态损伤模型,与前人的工作比较该模型有以下新内容:

- a 完全包括了惯性效应对孔洞增长和压缩的影响;
- b 不但考虑了体应力,而且还计及了偏应力对孔洞增长和压缩的作用,从而使模型具有更广泛的适应性;
- c 从孔洞高速演化方程中直接得出了使孔洞增长和压缩的应力临界值表达式,作为一个特例,从该表达式中直接推出 Carroll 和 Holt^[16] 曾得到的结果;

(2) 得出孔洞动态压实模型,该模型可用来研究各种粉末和其它材料的动态压实问题;

(3) 对本文所提延性动态损伤模型进行了数值分析,得出了一些有价值的结论:

- a 延性孔洞的动态增长对率效应十分敏感, 应变率越高, 孔洞增长越快;
- b 惯性效应在高加载条件下对延性孔洞的增长有明显的影响, 具体表现为对增长的阻尼作用;
- c 随着加载率的增加, 惯性影响明显增大. 因此得出结论: 在高加载率条件下, 惯性效应是影响孔洞增长的重要因素之一, 不应该被忽略.

参 考 文 献

- 1 Curran C R, Seaman L and Shockey D A. Dynamic failure of solids. *Physics Reports*, 1987, 147(5, 6), 253—388
- 2 Meyers M A and Almqvist C T. Dynamic fracture (spalling) of metals. *Prog Mater Sci*, 1983, 28, 1—96
- 3 Wang Zeping. A study on one-dimensional dynamic damage in pure copper. *Acta Mechanica Solida Sinica (English Edition)*, 1993, 6(1), 69—80
- 4 王泽平, 恽寿榕, 黄正平. LY12 铝动态断裂研究. *兵工学报*, 1993, 55(增刊), 70—75
- 5 Gurson A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth; part 1—yield criteria and flow rules of porous ductile media. *J Engng Mater Tech*, 1977, 99, 2—15
- 6 Johnson J N and Addessio F L. Tensile plasticity and ductile fracture. *J Appl Phys*, 1988, 64, 6699—6712
- 7 邢修三. 脆性断裂的微观机理和非平衡统计特性. *力学进展*, 1986, 16(4), 495—510
- 8 邢修三. 非平衡统计断裂力学. *力学进展*, 1991, 21(2), 153—168
- 9 柯孚久, 白以龙, 夏蒙莽. 理想微裂纹系统的演化特性. *中国科学, A 辑*, 1990, 6, 621—631
- 10 夏蒙莽, 柯孚久, 吕永华, 白以龙. 理想微裂纹系统中的随机扩展效应. *中国科学, A 辑*, 1991, 3, 276—284
- 11 白以龙, 柯孚久, 夏蒙莽. 固体中微裂纹系统统计演化的基本描述. *力学学报*, 1991, 23(3), 290—298
- 12 Wang Z P, et al. Description of two-dimensional spallation in pure copper. *Int J Fracture*, 1993, 60, 195—208
- 13 Wang Z P, Lu C and Yun S R. The influence of inertial effects on dynamic growth of voids in ductile solids under intense dynamic loading. *Int J Impact Eng*, 1994, 15(1), 79—89
- 14 Wang Z P, et al. Analytical and experimental study of spallation damage in pure copper based on a heuristic hydrodynamic model. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1993, 19, 95—104
- 15 王泽平, 黄风雷, 丁敬等. 高加载率条件下 LY12 铝合金损伤断裂现象的研究. *高压物理学报*, 1993, 5(1), 23—32
- 16 Carroll M M and Holt A C. Static and dynamic pore—collapse relations for ductile porous materials. *J Appl Phys*, 1972, 43(4), 1626—1636
- 17 Johnson J N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids. *J Appl Phys*, 1981, 52(4), 2812—2825
- 18 Seaman L, Curran D R and Shockey D A. Computational model for ductile and brittle fracture. *J Appl Phys*, 1976, 47, 4814—4826
- 19 Perzyna P. Internal state variable description of dynamic fracture of ductile solids. *Int J Solids Structures*, 1986, 22(7), 797—818
- 20 Cochran S and Banner D. Spall studies in uranium. *J Appl Phys*, 1977, 48(7), 2729—2737
- 21 Rajendran A M, Dietsberger M A and Grove D J. A void growth—based failure model to describe spallation. *J Appl Phys*, 1989, 65(4), 1521—1527
- 22 Cortes R. The growth of microvoids under intense dynamic loading. *Int J Solids Structures*, 1992, 29(11), 1339

— 1350

- 23 Ortiz M and Molinari A. Effect of strain hardening and rate sensitivity on the dynamic growth of a void in a plastic material. *J Appl Mech*, 1992, 59: 48—53
- 24 Rice J R and Tracey D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *J Mech Phys Solids*, 1969, 17: 201—217
- 25 Cocks A C F. Inelastic deformation of porous materials. *J Mech Phys Solids*, 1989, 37: 693—715
- 26 Johnson W and Meller P B. *Engineering Plasticity*. Van Nostrand Reinhold. London, 1973
- 27 Chhabildas L C and Asay J R. Rise-time measurements of shock transitions in aluminum, copper, and steel. *J Appl Phys*, 1979, 50: 2749—2756

EVOLUTION OF VOIDS IN DUCTILE POROUS MATERIALS AT HIGH STRAIN RATE

Zheng Jian

Wang Zeping

(*LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080*) (*Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031*)

Abstract In the present work, a dynamic damage model for ductile materials under dynamic general stresses loading is presented. The evolution equation of ductile voids has the closed form, in which work-hardening, the change of surface energy of voids, rate-dependent, inertial effects are taken into account. The expressions of critical stresses for the growth and compaction of voids are directly obtained from the evolution equations of voids. From the expressions, the result obtained by Carroll and Holt^[14], as a special example, is given. Numerical analysis shows that the growth of voids is sensitive to the strain rates. The growth of voids increases rapidly with an increase of strain rate. It also shows that the influence of the inertial to the void growth is significant under high loading rates. It appears to resist the growth of voids. In addition, a dynamic collapse model of ductile voids is also proposed, which can be applied to study the problems of compaction of powder and other materials.

Key words dynamic ductile damage, the evolution equation, inertial effects, numerical analysis, action of complex stresses