

层裂问题的数值研究

王泽平 恽寿榕

(北京理工大学力学工程系)

谢放

(航天部一院十四所)

摘要 本文对 Carrol、Holt 和 Johnson 提出的延性材料损伤断裂进行了改进。在模型中考虑了材料的硬化效应和空穴成核的影响。用数值方法模拟了高速碰撞中 OFCH 铜和铝的层裂过程,其结果与实验吻合得相当好。

关键词 层裂,空穴成核成长,损伤度

分类号 O346.5

金属材料的动态损伤是目前材料动态响应研究领域中的重要课题。为了从机理上弄清金属材料的动态损伤过程,必须有一个符合实际的数学力学模型,人们很早就注意到了这个问题,并且提出了各种动态损伤模型。起初人们提出了瞬时断裂模型^[1,2],认为材料中某些点应力值达到了某个临界值时就发生了断裂,没有达到这个值时认为材料是完好无损的。这个模型简单,也能准确预估材料的断裂位置。但从实验观测知道^[3],在加载情况下,材料的损伤程度是随空间的一个分布,为此,又有人提出了积累损伤模型^[4],但这个模型也不能预估材料的损伤程度。从实验观测中人们发现延性材料的动态断裂过程是空穴成核、成长、聚积最后导致断裂。基于这个过程,有些学者提出了一些新的断裂模型。Seaman^[3,5]等人从实验观测结果出发,用统计方法提出了空穴成核成长的 NAG (nucleation and growth) 模型。该模型能描述材料中空穴成核、成长、聚积到断裂的过程。但这个模型需要对回收试件进行仔细观测分析,给实际应用带来了一定的困难。Carrol 和 Holt^[6]提出了一个简化模型,Johnson^[7]在此基础上作了发展。模型的基本假设是材料微观不可压缩,认为进入塑性状态后材料宏观平均密度的变化是由于微空穴体积变化而引起的。Johnson 模型所需参数较少,能比较好的反映材料的动态断裂过程。但该模型没有考虑材料的硬化效应,也没有考虑空穴的成核过程,认为材料中最初分布有体积很小的球形空穴,空穴在拉伸应力作用下成长。但实际的材料在进入塑性状态后都产生硬化效应。并且对于纯度很高的材料,空穴首先是成核,然后才是成长,聚积到最后断裂。为了更真实的反映金属延性材

* 1990年5月21日收稿

料的动态损伤过程,本文在 Johnson 模型的基础上考虑了材料的硬化和空穴成核成长因素,并利用这个模型模拟 OFCH 铜^[8]和铝^{[9],[13]}的层裂过程。与其他模型以及 Mader 的计算结果比较,该模型的结果与实验吻合的更好一些。

1 模型的提出

Johnson 认为材料的屈服与塑性剪应变率有关,在一维球对称情况下有屈服条件:

$$\Delta S = \sigma_r - \sigma_\theta = \pm Y_0 + \eta' \dot{\gamma}^p \quad (1)$$

式中, σ_r 为径向主应力, σ_θ 为切向主应力, Y_0 为屈服强度, η' 为粘性系数, $\dot{\gamma}^p$ 为塑性剪应变率。在忽略惯性效应的情况下 Johnson 导出了以下损伤度 ϕ 的演化方程

$$\dot{\phi} = \begin{cases} -(\Phi_0 \Phi)^{1/3} [(1-\Phi)/(1-\Phi_0)]^{2/3} \Delta P / \eta' & \Delta p < 0 \\ 0 & \Delta p \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta P = P - P_{eq}(\Phi)$ (3)

$$P_{eq}(\Phi) = 2[Y_0(1-\Phi)\text{Ln}(1/\Phi)]/3 \quad (4)$$

损伤度定义为 $\Phi = (V - V_s)/V$, $V = \rho_0/\rho$ 为材料含空穴时的相对比容, $V_s = \rho_0/\rho_s$ 为基体材料的相对比容。 ρ_0 为基体初始密度, ρ 为含空穴材料的密度, ρ_s 为基体密度。 P 为宏观平均应力。从公式(2)可知,粘性系数 η' 的取值远远小于通常值^[7], Seaman^[10]在他的计算中也碰到这个问题。

我们假设材料是线性硬化的,考虑这个因素,屈服条件(1)化为

$$\Delta S = \sigma_r - \sigma_\theta = \pm Y_0 + H' \epsilon^p + \eta' \dot{\gamma}^p \quad (5)$$

式中, H' 为材料的线性硬化系数, ϵ^p 为有效塑性应变。通过演算并忽略惯性效应可得以下 ϕ 的演化方程:

$$\dot{\phi} = \begin{cases} -(\Phi_0 \Phi)^{1/3} [(1-\Phi)/(1-\Phi_0)]^{2/3} \Delta p' / \eta' & \Delta p' < 0 \\ 0 & \Delta p' \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\Delta p' = P + 2[Y_0(1-\Phi)\text{Ln}(1/\Phi)]/3 - 2H'(1-\Phi)F_1(\Phi, \Phi_0)$ (7)

$$F_1(\Phi, \Phi_0) = [1 - (\Phi/\Phi_0)^{1/3}] [(1-\Phi)/(1-\Phi_0)]^{1/3}$$

式中, Φ_0 为初始损伤度。

在考虑空穴成核部分时,我们采用 chu 和 Needleman^[11]的结论,将 Φ 分成成核,成长两部分。即:

$$\Phi = \Phi_{成核} + \Phi_{成长} \quad (9)$$

式中 $\Phi_{成核} = A (\sigma_m + \sigma_{kk}/3)$ (10)

σ_m 为基体的有效应力, σ_{kk} 为基体的应力张量第一不变量, kk 表示对 k 求和。

$$A = \begin{cases} f_N \exp(-[(\sigma_m + \sigma_{kk}/3 - \sigma_N)/S_N]^2/2) / [S_N(2\pi)^{1/2}], & \sigma_m + \sigma_{kk}/3 - \sigma_N > 0 \\ 0, & \sigma_m + \sigma_{kk}/3 - \sigma_N \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

f_N 为成核粒子的体积因子, S_N 为相应的标准方差, σ_N 为成核平均应力。

我们取(6)式为空穴的成长部分,即:

$$\dot{\Phi}_{成长} = \begin{cases} -(\Phi_0 \Phi)^{1/3} [(1-\Phi)/(1-\Phi_0)]^{2/3} \Delta p' / \eta' & \Delta p' < 0 \\ 0 & \Delta p' \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, Φ_0 的意义与(6)式不同, 这里的 Φ_0 是最初成核时产生的损伤度。(9)-(12)式就是我们延性材料的空穴成核成长断裂模型。

2 数值模拟

我们应用本文提出的模型对 Rajendran^[8]、Mader^[9]和张万甲^[13]文章中的实验结果进行了数值模拟。三个实验分别为: ① 2mm 厚的 OFCH 铜以 0.185mm/ μ s 速度碰撞 9mm 厚的 OFCH 铜靶板, ② 3.175mm 厚的铝飞片以 1.0mm/ μ s 速度碰撞 12.7mm 厚的铝板, ③ 2.0mm 厚的 LY12 硬铝飞片以 0.8mm/ μ s 速度碰撞 6.0mm 厚的 LY12 硬铝板。

状态方程为 Gruneisen 形式:

$$P = P_H + \Gamma\rho(E - E_H) \quad (13)$$

$$\text{式中 } P_H = C_0\rho_0\eta/(1 - S\eta)^2 \quad (14)$$

$$E_H = E_0 + (P_H + P_0)\eta/2\rho_0 \quad (15)$$

$$\eta = 1 - V \quad (16)$$

式中, E 为比内能, E_0 、 P_0 为冲击波波前的比内能和静水压力, 一般取为 0, Γ_0 , ρ_0 , C_0 , S 为材料常数。我们假设 $\Gamma_p = \Gamma_0\rho_0$ 并采用 Johnson 的处理方式, 认为 Φ 只与压力 P 有显式关系:

$$P = (1 - \Phi)P_s((1 - \Phi)V, E) \quad (17)$$

P_s 表示基体压力, 其他力学量的关系不变。由于空穴的存在, 材料常数与 Φ 有下关系^[7]:

$$Y = (1 - \Phi)Y_0 \quad (18)$$

$$K = 4\mu_0K_0(1 - \Phi)/(4\mu_0 + 3K_0\Phi) \quad (19)$$

$$\mu = \mu_0(1 - \Phi)[1 - (6K_0 + 12\mu_0)\Phi]/(9K_0 + 8\mu_0) \quad (20)$$

式中, μ_0 , K_0 表示基体材料的剪切模量和体膨胀模量, μ , K , Y 分别表示材料宏观 (含空穴时平均的) 的剪切模量, 体膨胀模量和屈服强度。对不同模型进行模拟的结果见图 1-7。

3 讨论

图 1-4 是用不同模型模拟 OFCH 铜碰撞实验的计算结果与实验结果的比较。

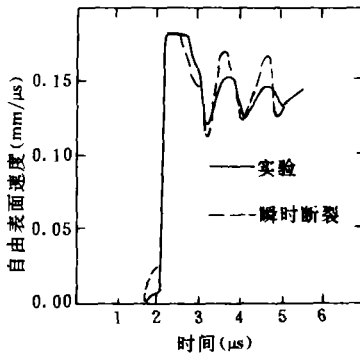


图1 瞬时断裂模型与实验的比较

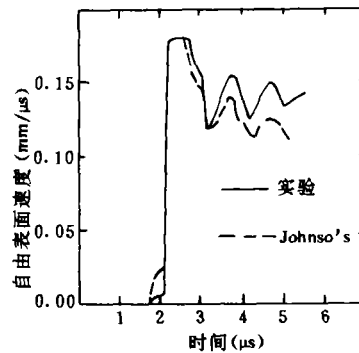


图2 Johnson 模型与实验的比较

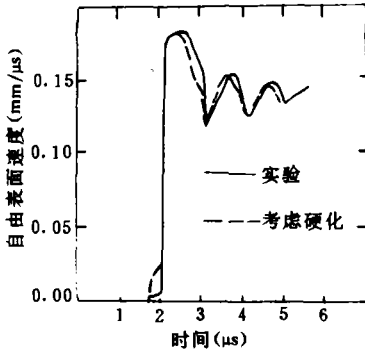


图3 考虑硬化的模型与实验的比较

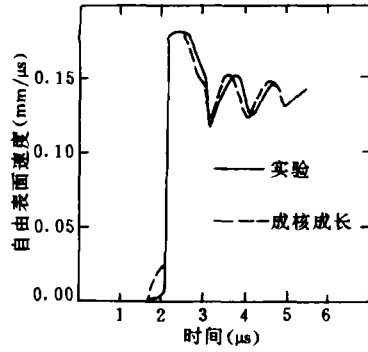


图4 空穴成核成长模型与实验的比较

图5-6是不同模型模拟 Mader 文章中铝碰撞实验的计算结果与 Mader 的计算结果以及实验结果的比较。图7是计算结果与张万甲^[13]实验结果的比较。从图1可看到瞬时断裂能准确的预估层裂的位置，但不能与实验在峰值吻合，原因是瞬时断裂模型本身并没有反映实际的损伤过程。延性材料在发生层裂之前在层裂位置附近就产生了空穴，并且空穴在拉应力作用下不断增长。空穴的空间分布相对应的在宏观上有平均密度的空间分布。应力波在介质的这种状态中传播时相当于不同材料中传播，只是这些不同材料的密度差很小，由于空穴的存在，由(17)式可知压力相对于基体的压力要低一些，反映在实验观测结果上就是图1中第二峰值的大小。Johnson 模型的结果(图2,6,7)与考虑材料硬化效应的结果(图3,6,7)比较可知，硬化效应起着比较重要的作用。从图3-7，可以看出考虑与不考虑空穴成核的计算结果有一定差别，这种差别在图6中明显一些。其原因在于前者假定材料中最初就有微空穴存在。由(17)式可知，计算的平均压力与没有空穴时的基体的压力不一样，从物理机制上讲是不合理的，但由于初始空穴分布对计算结果影响较小，所以该模型同样有实用价值，是一种实际过程的简化模型。图5是本文的空穴成核成长模型与 Mader 的计算结果以及实验结果的比较。很明显，我们的计算结果比 Mader 的结果与实验吻合得更好。图6是图5右上角的局部放大，由图可见，和实验曲线比较，mader 的计算偏高，Johnson 的计算偏低，考虑硬化和空穴成核的计算最接近实验值。

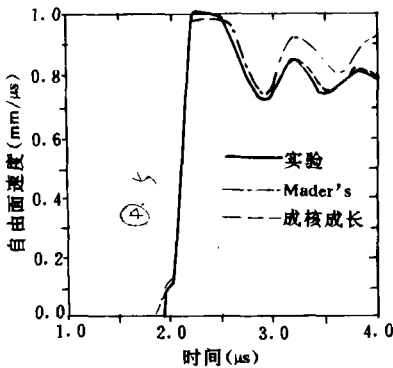


图5 空穴成核成长模型与 Mader 的计算结果及实验的比较

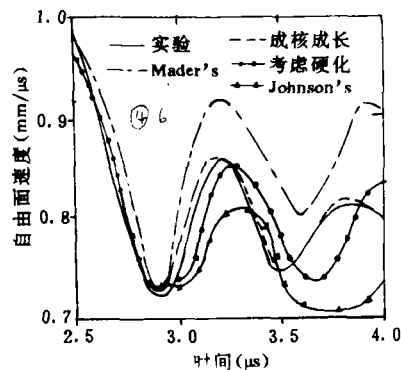


图6 各种模型的计算结果与实验的比较

在计算过程中我们发现不同的损伤度临界值 ϕ_{crit} 对结果有一定影响，但当 ϕ_{crit} 大于某个值后，计算结果没有本质的变化。我们知道 ϕ_{crit} 是一个材料常数，对于一定的材料是一

个常量,当材料中某点的 ϕ 达到了 ϕ_{cr} 时材料就发生断裂,在计算中我们也发现在层裂处当 $\phi \geq \phi_{cr}$ 后该处的应力比其它处的低四个量级以上,所以层裂处几乎完全丧失掉了承受应力的能力。

从计算结果与实验的比较可知,空穴成核成长模型能较好的反映延性材料动态断裂过程,所以能用来研究延性材料的动态损伤过程。

模型的通用性有待于更多的不同延性材料的实验结果来验证。金属材料的动态损伤断裂过程是一个复杂的过程,其影响因素很多,不可能用一个较简单的模型来完全描述。本文提出的模型有一个明显的不足是没有考虑空穴之间的相互作用,这个问题也待今后改进。

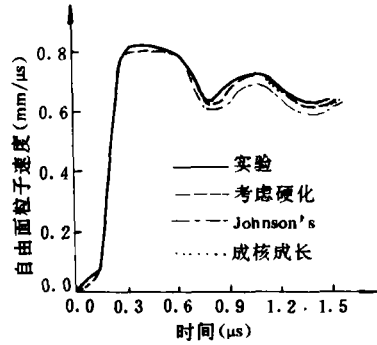


图7 三个不同模型比较

参考文献

- [1] Penning J R, et al. AD-420509
- [2] Butcher B M, et al. AIAAJ, 1964, (2): 77
- [3] Seaman L, et al. AD-A008992
- [4] Tuler F R, et al. Int. J. Frac. Mech., 1968(4): 431
- [5] Seaman L, et al. J. Appl. Phys., 1976, 47(11): 4814
- [6] Carrol M M and Holt A C. J. Appl. Phys., 1972, 43(4)
- [7] Johnson J N. J. Appl. Phys., 1981, 52(4): 2812
- [8] Rajiendran A M, et al. Shock Waves in Condensed Matter. 1987: 359-362
- [9] Mäder C L. 1967, LA-3678
- [10] Seaman L, et al. Stanford Res. Inst. Tech. Report. 1971, AFWL-TR-71-156
- [11] Chu C C and Needleman A. J. Eng. Mat. Tech., 1980, 102-249
- [12] Machenzie J H. Proc. Phys. Soc. 63B, 1950
- [13] 张万甲等. 爆炸与冲击. 1983, 3(1): 73

Spallation Studies with Calculation

Wang Zeping Yun Shourong

(Department of Dynamic Engineering, Beijing Institute of Technology)

Xie Fang

(The First Academy 14th Place of the Spacelight Department)

Abstract

The dynamic fracture model proposed by J. N. Johnson is modified by considering materials work-hardening and void nucleation. Numerical calculations of aluminium and OFCH copper spallation processes in its impact tests are carried on. The computation are in fair agreement with the experimental results.

Key words spallation, void nucleation and growth, porosity