

耦合孔洞分布特征变化规律的层裂损伤模型及其应用*

张凤国† 潘昊 王裴 王欣欣

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2025年8月26日收到; 2025年11月27日收到修改稿)

强冲击加载下延性材料的层裂损伤演化过程包含孔洞成核、增长、汇合以及材料的断裂/破碎等物理过程, 孔洞增长基本保持球形扩展, 损伤演化过程可分为孔洞成核与增长以及孔洞汇合与增长两个阶段, 且孔洞之间汇合以接触汇合形式为主. 基于三角函数形式, 本文给出了孔洞数密度变化全过程的唯像物理描述方法, 并构建耦合孔洞分布特征变化规律的层裂损伤演化方程. 新模型不仅全面反映了孔洞成核、增长以及汇合的物理过程, 展示损伤演化过程中的孔洞分布特征的变化规律, 而且计算结果可以给出材料内部的损伤状态以及孔洞数密度的分布情况, 这为损伤之后材料的再压缩和破碎问题的分析提供了有效支撑. 微观计算统计结果和相关实验结果验证了新模型的适用性.

关键词: 层裂损伤模型, 孔洞成核, 孔洞汇合, 孔洞分布特征, 冲击加载, 延性金属

DOI: 10.7498/aps.75.20251152

CSTR: 32037.14.aps.75.20251152

1 引言

材料的变形与损伤失效涉及原子-晶格-晶粒-宏观单元等多层次跨尺度问题, 长期以来一直是科学界和工程领域关注的重要课题. 如何在实验、理论和数值模拟中有效诊断并准确描述不同物质层次间的多尺度非线性耦合机制, 仍是当前研究亟待突破的难点. 层裂损伤问题是材料损伤研究的主要方向之一, 具有理论解析方便、实验手段简单的特点, 但因目前缺乏实时捕捉孔洞增长及其分布特征变化的实验手段, 以及有效描述孔洞分布特征变化的数学描述方法, 目前层裂损伤研究也遇到了瓶颈^[1].

强冲击加载下延性材料的层裂损伤演化过程包含了孔洞成核、增长、汇合, 以及断裂/破碎等物理过程, 孔洞增长基本保持球形孔洞扩展, 且孔洞之间汇合以接触汇合形式为主^[2]. 理想状态下其损伤演化过程分为孔洞成核与增长、孔洞增长以及孔

洞汇合与增长 3 个阶段^[3], 但实际上因材料内部初始微细观结构分布的不均匀性或局部的应力集中等情况, 孔洞汇合可能提前发生^[4], 因此, 将动态拉伸损伤演化过程分为孔洞成核与增长以及孔洞汇合与增长两个阶段. 迄今为止, 层裂损伤的研究成果主要集中于孔洞的成核^[5,6]与增长^[7,8]方面, 以及材料微细观结构的影响, 如孔洞周围塑性变形对孔洞成核的影响^[9]、位错演化对孔洞成核^[10]与增长^[11]的影响等. 而由于微孔洞之间强相互作用在理论分析方面遇到的困难, 至今还没有一个较好的模型对孔洞汇合进行合理的描述^[12]: 或者是基于两个相同大小孔洞间的颈缩机制描述孔洞汇合对损伤的影响^[13], 或是采用逾渗理论等唯像方法分析孔洞汇合的影响^[14], 这些工作并不能完全反映实际物理过程, 且与损伤演化过程中的孔洞分布特征变化没有直接关联. 尽管可以采用一维计算因孔洞成核及汇合引起的孔洞数密度的变化, 但这需要跟踪每个单元每个时间步长的孔洞信息 (大小、数量), 在一维程序计算中需要二维数组存储数据, 那么实

* 冲击波物理与爆炸物理全国重点实验室基金 (批准号:2023JCJQLB05401) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhang_fengguo@iapcm.ac.cn

际工程中的三维程序则需要四维数组存储数据,这就造成极其庞大的数据量,这在工程实际中是不可忍受的^[3].随着精细化数值模拟技术在结构优化设计、材料动态损伤机理分析等方面起到越来越重要的作用,因受限于网格划分以及现有损伤模型的不完备性^[15,16],目前宏观有限元模拟仍不能有效提供工程需要的材料损伤状态以及孔洞的分布特征^[17].因而需要对损伤演化过程中孔洞分布特征的变化规律进行分析、研究,进一步发展物理模型.

针对强冲击加载下延性材料的层裂损伤问题,我们旨在寻求分析孔洞成核、增长和汇合及孔洞数密度变化全过程的唯像物理描述方法,进而构建耦合孔洞分布特征变化规律的层裂损伤演化方程.本文第2节简单介绍层裂损伤早期孔洞成核与增长过程中微孔洞分布特征的变化规律^[18].之后,通过解析层裂损伤演化后期孔洞汇合与增长过程中的孔洞分布特征的变化,给出新的层裂损伤模型,并借助分子动力学计算统计结果以及相关的实验结果验证模型的有效性和适用性.

2 孔洞成核过程的物理描述

延续前期的工作^[18],选用余弦函数形式的孔洞成核概率分布函数,即:

$$g(p) = \frac{1}{p_{\text{spall}} - p_{\text{c0}}} \left[1 - \cos \left(\frac{p - p_{\text{c0}}}{p_{\text{spall}} - p_{\text{c0}}} 2\pi \right) \right], \quad (1)$$

式中, p 为加载的拉伸应力 ($p_{\text{c0}} \leq p \leq p_{\text{spall}}$), 对应时刻为 t ; p_{c0} 为孔洞开始成核的成核临界应力, 对应时刻为 t_{c0} , 且 $p_{\text{c0}} = \frac{2}{3} Y_0 [1 + \ln(2G/Y_0)]$ (Y_0 , G 为材料的屈服强度和剪切模量); p_{spall} 为材料的层裂强度, 对应时刻为 t_{spall} , 且层裂强度的计算采用本课题组提出的与加载应变率 $\dot{\epsilon}$ 相关的理论公式^[19],

$$p_{\text{spall}} = \frac{2}{3} Y_0 [1 + \ln(2G/Y_0)] + \left(\frac{Y_0}{GN_0} \right)^{2/9} \rho C_0^{4/3} \dot{\epsilon}^{2/3}, \quad (2)$$

其中, ρ 为材料密度, N_0 为表征晶粒尺度、杂质含量等影响孔洞成核的材料初始微细观结构参数, C_0 为材料的体波声速.

为保持理论分析工作的一致性,仍采用本课题组提出的孔洞成核率方程^[19]:

$$\dot{N} = N_0 \frac{\dot{p}}{p_{\text{c0}}} \exp \left(\frac{p - p_{\text{c0}}}{p_{\text{c0}}} \right). \quad (3)$$

对(3)式进行积分可得成核孔洞总数 N 为

$$N = \int_{p_{\text{c0}}}^{p_{\text{spall}}} \dot{N} dp = N_0 \left[\exp \left(\frac{p_{\text{spall}} - p_{\text{c0}}}{p_{\text{c0}}} \right) - 1 \right]. \quad (4)$$

而不同时刻累计成核孔洞总数随应力增长的变化为

$$N_t = N \left[\frac{p - p_{\text{c0}}}{p_{\text{spall}} - p_{\text{c0}}} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{p - p_{\text{c0}}}{p_{\text{spall}} - p_{\text{c0}}} \right) \right]. \quad (5)$$

同时,损伤发展早期孔洞成核阶段的损伤度 ϕ (单位体积内的孔洞总体积) 演化方程为

$$\dot{\phi} = \dot{p}^2 \left(\frac{2\pi}{p_{\text{spall}} - p_{\text{c0}}} \right)^2 \left[K(p - p_{\text{c0}})^{11/2} - \phi \right], \quad (6)$$

式中, $K = \frac{8N_0\pi}{33(p_{\text{spall}} - p_{\text{c0}})} \left(\frac{8}{33\rho\dot{p}^2} \right)^{3/2}$.

此外,孔洞成核截止时刻孔洞半径不大于该半径的孔洞数占孔洞总数的份额随孔洞半径的变化规律为

$$f(a) = \left(\frac{a}{a_{\text{max}}} \right)^{2/3} - \frac{1}{2\pi} \sin \left[\left(\frac{a}{a_{\text{max}}} \right)^{2/3} 2\pi \right], \quad (7)$$

式中, a_{max} 为最大孔洞半径.图1所示为(7)式的解析计算结果(黑实线)和相关实验数据^[20]的对比,二者符合得也较好,这一特征也是下文分析孔洞汇合问题的主要依据之一.

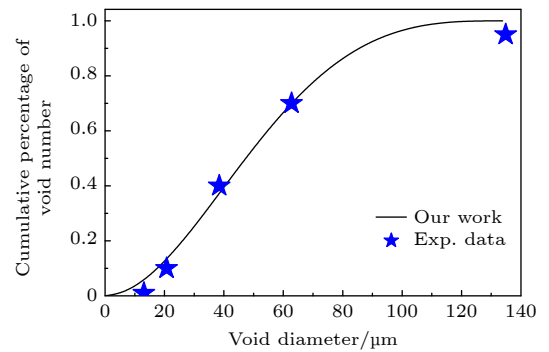


图1 孔洞数累积百分比随孔洞大小的变化规律
Fig. 1. Cumulative percentage of void number as a void size.

3 孔洞汇合过程的物理描述

3.1 孔洞汇合过程的唯像分析

强冲击拉伸载荷作用下,延性材料内部的孔洞汇合主要以接触汇合形式为主,且孔洞汇合首先从小孔洞被大孔洞吸收、合并开始,随着孔洞汇合过程的发展,材料内部的孔洞数密度快速减小,这也是实验上观测到损伤演化后期材料内部孔洞数少

且基本上是以大孔洞为主的原因所在^[20]. 此外, 基于(7)式和图1的唯一理论分析和实验统计结果显示: 孔洞成核截止-孔洞汇合开始之前时刻, 材料内部的孔洞分布特征可以近似采用(7)式的函数形式加以描述. 也就是说, 可采用类似的函数形式描述汇合孔洞数(因孔洞汇合减少的孔洞数)占孔洞总数份额的变化情况.

3.2 孔洞汇合过程孔洞分布特征的物理描述

因材料的损伤度与孔洞总体积是强关联的, 先考虑两种极限临界情况: 1) 孔洞成核截止-孔洞汇合开始之前时刻, 材料处于完全塑性变形, 材料内部的损伤度 $\phi = \phi_0 = Y_0/(2G)$; 2) 所有孔洞最后汇合形成一个孔洞, 此时材料内部的损伤度 $\phi = \phi_{\max} = 1.0$. 这样, 因孔洞汇合导致消失的孔洞数占孔洞总数的比例份额随损伤增长的变化可以描述为

$$W(\phi) = \left(\frac{\phi - \phi_0}{1 - \phi_0} \right)^{\frac{2}{3}} - \frac{1}{2\pi} \sin \left[\left(\frac{\phi - \phi_0}{1 - \phi_0} \right)^{\frac{2}{3}} 2\pi \right]. \quad (8)$$

显然, 当 $W(\phi_0) = 0$ 时没有孔洞汇合; 当 $W(1.0) = 1$ 时, 所有孔洞汇合形成一个孔洞. 不过, 当 $\phi = \phi_{cr} = 0.52$ 时, 所有孔洞之间已经相互接触, 损伤材料本身处于网状化失稳临界状态, 进一步发展, 材料将发生断裂或破碎, 损伤计算停止^[2,3].

因此可采用(1)式和(8)式完整描述延性材料强动态拉伸损伤演化过程中的孔洞分布特征的变化情况. 鉴于目前实验还不具备实时统计材料内部孔洞数密度变化的技术能力, 采用分子动力学计算和层裂实验金相观测统计结果对上述描述方法进行验证. 图2和图3给出了冲击加载速度分别为500 m/s和750 m/s时, 层裂面处的孔洞数随时间变化的分子动力学计算统计结果^[4]和公式计算结果. 表1列出了S24和S27两发纯铜材料层裂实验的加载速率、金相统计的层裂面处损伤度和孔洞数密度^[5], 以及基于(4)式、(8)式计算得到孔洞数密度 ($N_0 = 1.014 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, 材料参数见对应的文献). 对比结果可知, 本文层裂损伤演化过程中孔洞分布特征变化的物理描述方法具有较好的适用性. 此外, 对于不同应变率加载情况下, 根据(2)式得到相应的层裂强度, 进而根据(4)式计算该应变率加载情况下的成核孔洞总数, 如图4所示(图中实验数据为S24和S27实验对应的成核孔洞总

数), 加载应变率越高成核孔洞数越多, 这与相关实验的观测统计结果定性一致.

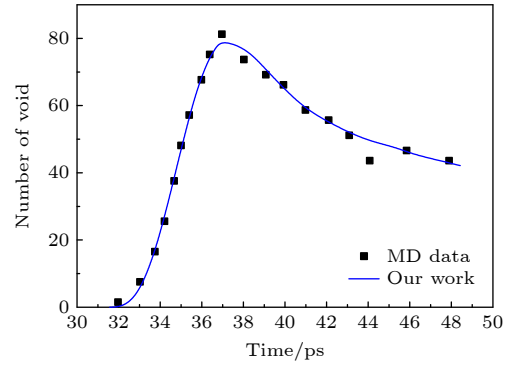


图2 冲击速度500 m/s下层裂面处孔洞数随时间的变化
Fig. 2. Change of void number with time for impact velocity 500 m/s in spall plane.

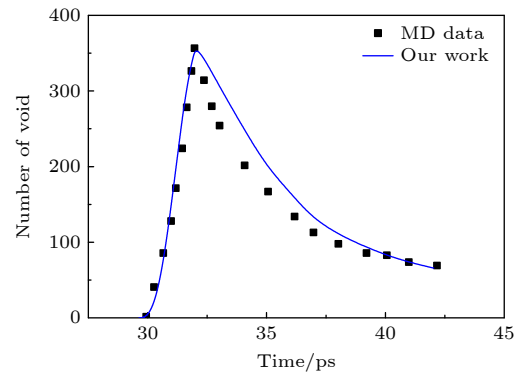


图3 冲击速度750 m/s下层裂面处孔洞数随时间的变化
Fig. 3. Change of void number with time for impact velocity 750 m/s in spall plane.

表1 层裂实验相关数据
Table 1. Spall test data.

实验号	加载应变率/ s^{-1}	层裂强度/ GPa	损伤度	孔洞数/ (10^7 cm^{-3})	
				实验	公式计算
S24	3.052×10^4	0.8158	0.277	6.355	6.36
S27	2.321×10^4	0.8044	0.459	2.16	2.56

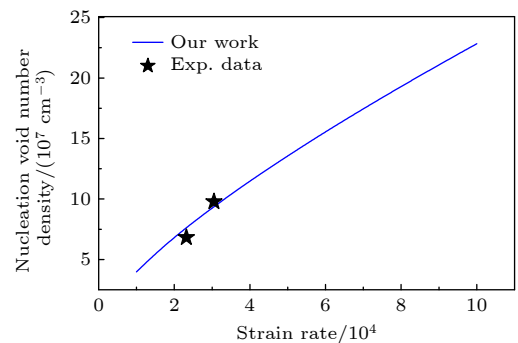


图4 不同加载应变率下的成核孔洞数密度
Fig. 4. Nucleation void number density vs. strain rate.

3.3 孔洞汇合过程损伤演化的物理描述

当材料内部的损伤度 $\phi \geq \phi_0 = Y_0/(2G)$ 时, 材料处于完全塑性变形状态, 且材料内部产生了大量微小孔洞. 之后, 孔洞之间的相互影响逐渐增强, 需要引入孔隙度 $\alpha = 1/(1 - \phi)$, 并采用空心球壳体胞模型描述孔洞增长; 同时, 不同大小孔洞之间开始逐渐汇合. 因此, 这个时期的损伤增长包含孔洞增长和孔洞汇合两方面的影响.

3.3.1 孔洞增长对损伤发展的贡献

关于孔洞增长对损伤的影响, 仍采用之前的处理方法: 基于孔隙度与损伤度之间的关系以及孔洞成核与增长阶段的计算结果, 当 $\phi = \phi_0 = Y_0/(2G)$ 时, 根据公式^[3]

$$\frac{1}{2}\tau \frac{\dot{\alpha}^2}{(\alpha - 1)^{4/3}} = \alpha p(t) - \frac{2}{3}Y_T \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) \quad (9)$$

确定模型参数 τ . 之后采用 Johnson^[7] 给出的胞模型描述孔洞增长:

$$\tau \left\{ \ddot{\alpha} \left[(\alpha - 1)^{-\frac{1}{3}} - \alpha^{-\frac{1}{3}} \right] - \frac{\dot{\alpha}^2}{6} \left[(\alpha - 1)^{-\frac{4}{3}} - \alpha^{-\frac{4}{3}} \right] \right\} = \alpha p(t) - \frac{2}{3}Y_0 \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right). \quad (10)$$

3.3.2 孔洞汇合对损伤发展的贡献

如前讨论, 强冲击加载下, 层裂损伤材料内部的孔洞主要以接触汇合为主, 孔洞汇合对孔隙度增长的影响为^[2]

$$\ddot{\alpha} = \dot{\alpha} \sqrt{\frac{\sum (n_i/r_i)}{\sum (N_j/R_j)}}, \quad (11)$$

其中, $\dot{\alpha}$, r_i , n_i 为孔洞汇合前的孔隙度增长率、孔洞半径和对应的孔洞数密度; $\ddot{\alpha}$, R_j , N_j 为孔洞汇合后的孔隙度增长率、孔洞半径和对应的孔洞数密度. (11) 式计算需要跟踪所有孔洞增长变化情况及其对应的孔洞数的变化, 这在实际三维工程模拟计算中的计算量和数据存储量的耗费巨大. 为此, 采用唯像平均处理方法, 同时考虑孔洞接触汇合前后的孔洞总体积不变这一特点, 给出类似的计算公式:

$$\ddot{\alpha} = \dot{\alpha} \sqrt{\frac{\sum (n_i/r_i)}{\sum (N_j/R_j)}} \approx \dot{\alpha} \sqrt{\frac{\sum (n/r)}{\sum (\bar{N}/\bar{R})}} = \dot{\alpha} \frac{n^{2/3}}{\bar{N}^{2/3}}, \quad (12)$$

式中, r 和 n 分别为孔洞汇合前的平均孔洞半径和孔洞数密度; \bar{R} 和 \bar{N} 分别为孔洞汇合后的平均孔洞半径和孔洞数密度. 同时, 结合 (8) 式, 则孔洞汇合对层裂损伤发展的贡献可表示为

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{\alpha}}{\ddot{\alpha}}\right)^{3/2} &= \frac{n}{\bar{N}} = \frac{N(1 - W(\varphi))}{N[1 - W(\varphi + \Delta\varphi)]} \\ &= \frac{1 - W(\varphi)}{1 - W(\varphi + \Delta\varphi)}. \end{aligned} \quad (13)$$

4 新层裂损伤模型的应用与分析

损伤计算的主要流程包括: 当单元内的拉伸应力大于孔洞成核临界应力 p_{c0} 时, 基于该单元的应变率, 首先根据 (2) 式和 (4) 式计算其层裂强度 p_{spall} 和孔洞成核总数 N , 然后根据 (5) 式和 (6) 式计算损伤演化早期孔洞成核和增长阶段的孔洞数及损伤变化情况; 当 $\phi = \phi_0 = Y_0/(2G)$ 时, 基于单元当前的应力和损伤状态, 根据 (9) 式确定模型参数 τ ; 最后, 当 $\phi \geq Y_0/(2G)$ 时, 根据 (8) 式和 (10) 式计算损伤演化后期孔洞汇合和增长阶段的孔洞数及损伤变化情况, 并根据 (13) 式计算孔洞汇合对损伤增长的影响.

S24 实验是 0.62 mm 厚纯铜飞片以 159 m/s 速度撞击 1.59 mm 厚纯铜靶板, 靶板背面粘贴测量应力变化历史的 PMMA 背靶, 采用对应文献中给出的材料参数和损伤模型参数. 图 5 和图 6 分别给出了靶板内部的损伤分布以及孔洞数密度分布, 包括本文的计算结果以及文献给出的 NAG 模型 (nucleation and growth model) 计算结果和实验数据^[5]. 可以看出, 相对于 NAG 模型, 本文计算结果与实验数据符合更好, 因本文考虑了孔洞汇

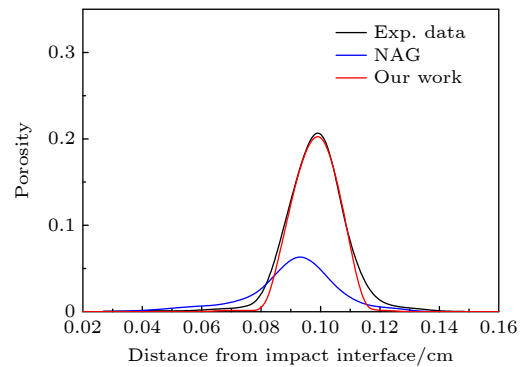


图 5 纯铜靶板内部的损伤分布

Fig. 5. Computed and observed damage in copper target.

合计算, 数密度分布图中部略低于实验值, 而两侧高于实验值可能是因为实验中没有统计更微小的孔洞.

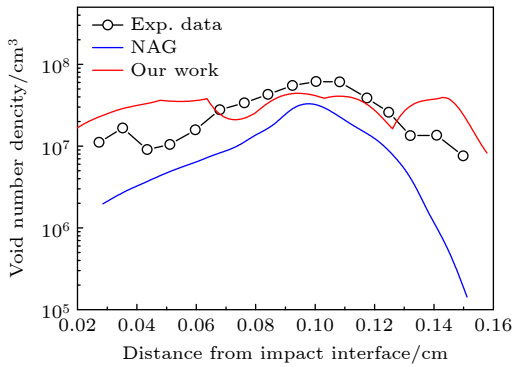


图 6 纯铜靶板内部的孔洞数密度分布

Fig. 6. Computed and observed void concentration in copper target.

此外, 将本文的层裂损伤计算方法与应用广泛的 VG 模型^[7](void growth model) 和考虑孔洞成核的代表性模型——NAG 模型^[5]的计算结果进行对比, 并进一步分析了层裂面处的损伤演化过程. VG 模型有初始孔隙度以及材料物理性质相关的黏性系数、硬化系数 3 个参数; NAG 模型有与材料初始微细观结构相关的系数 N_0 、初始成核孔洞半径以及材料物理性质相关的黏性系数、孔洞成核临界应力、孔洞增长临界应力和参考应力 6 个参数; 而本文给出的层裂损伤计算方法只有一个与材料初始微细观结构相关的系数 N_0 , 且该参数与材料本身的物理性质无关, 这也是其优势之一. 不同的损伤模型计算的损伤演化过程不一致, 甚至差别很大, 而在程序数值模拟过程中, 损伤与本构方程和状态方程计算耦合在一起, 这就导致不同损伤模型计算的层裂面位置可能存在些许差别, 那么对比同一位置单元或最大损伤发生的不同位置单元内的损伤演化过程可能都不太适宜. 为此, 基于解析波的相互作用, 数值计算中只考虑相同位置层裂面处单元的损伤演化, 其他所有单元均不计算损伤. 图 7 给出了 2 mm 纯铜飞片以 185 m/s 的速度撞击 9 mm 纯铜靶板的自由面速度实验测量结果^[21]和 3 种层裂损伤模型计算结果的对比. 从图 7 可以看出, 3 种损伤模型的计算结果相近, 且与实验结果相比, 计算结果均捕捉到了速度曲线的回跳点和之后的振荡周期特征. 图 8 显示了层裂面处单元内 3 种损伤模型计算的损伤演化历程: 新损伤模型

因考虑了孔洞汇合影响, 其计算损伤发展最快; NAG 模型因采用无限介质中的孔洞增长方程这一强限制因素, 且没有考虑孔洞汇合的影响, 图 5 和图 8 均显示了其计算的损伤远远小于其他模型的计算结果和实验统计结果, 此外, Rivas 等^[20]的实验结果也显示了自由面速度相近的情况下材料内部的损伤程度存在倍数上的差别, 也就是说, 目前采用模拟自由面速度标定损伤模型是不完备的. 图 9 给出了单元内孔洞数密度的变化情况: 新模型展示了因孔洞不断成核孔洞数快速增加, 以及因孔洞不断汇合孔洞数逐渐减少的物理过程; 而 NAG 模型只能计算孔洞的增长情况, 这与真实物理过程严重不符.

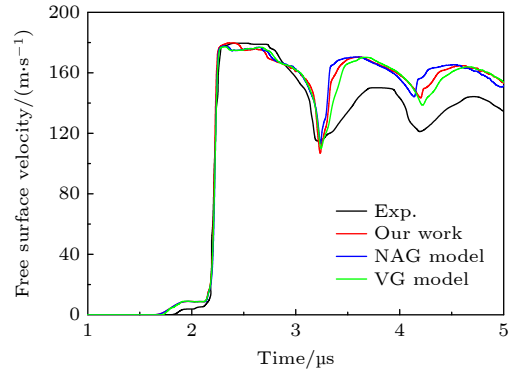


图 7 不同层裂模型计算的自由面速度与实验测量结果的比较

Fig. 7. Experimental and computed free surface velocity profiles using VG, NAG and our model.

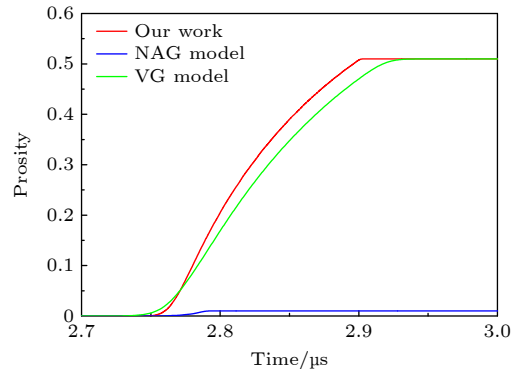


图 8 采用 VG, NAG 及本文模型计算的损伤演化

Fig. 8. Computed damage evolution using VG, NAG and our model.

至此, 我们采用 (1) 式和 (8) 式不仅实现了对层裂损伤演化过程中微孔洞分布特征变化的唯像描述, 避免了数值计算中实时跟踪、记录每个单元不同时刻成核孔洞大小和数量的变化情况, 进而方

便二维、三维数值模拟计算, 并可以定量给出材料的层裂损伤状态. 同时, 针对微层裂问题, 在考虑材料的最后损伤状态-孔洞的分布特征与材料破碎颗粒度之间的相互关联、环境温度以及材料变形导致的温升影响, 借鉴我们之前所采用的处理方法^[3], 从而实现从孔洞成核到材料破碎全过程的物理描述.

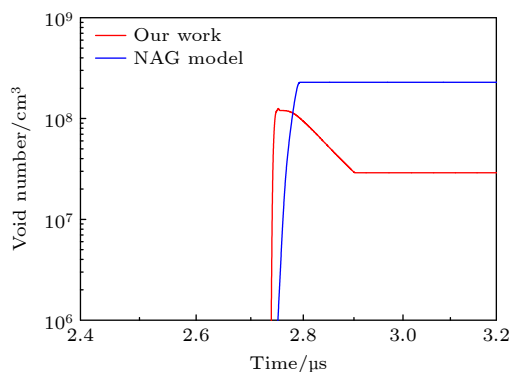


图9 采用NAG方法和本文模型计算的孔洞数密度变化情况

Fig. 9. Computed void number using NAG and our model.

5 结论

本文通过引入三角函数形式概率分布函数描述孔洞成核以及孔洞汇合过程, 成功解耦了损伤与孔洞分布之间的相互关联, 不仅实现了对层裂损伤演化过程中孔洞分布特征变化规律的完整描述, 真正构建了耦合材料内部微细观结构信息变化的层裂损伤演化方程, 而且该方法可以有效应用于实际工程结构二维、三维层裂损伤问题的模拟分析. 同时, 新的损伤模型目前只有一个与材料初始微细观结构相关、与材料本身物理力学性质无关的参数, 与其他拥有多个参数的损伤模型相比, 其适用性可能更好; 而且采用新的损伤模型计算可以给出材料的损伤状态以及材料内部的孔洞分布特征. 这为关注损伤材料的再压缩以及损伤导致材料破碎形成的颗粒度分布等问题提供了有效的数据支撑.

不过, 本文虽然采用分子动力学的计算统计结果和两个实验点的实验结果验证了新模型具有一定的适用性, 但两个实验点较少, 且实验的加载应

变率区间相近. 鉴于目前实验技术并不能提供损伤演化过程中孔洞分布特征的实时变化数据, 为了进一步验证新模型的适用性及其适用范围, 仍然需要较宽加载应变率范围的实验数据, 包括自由面速度、实验回收靶板内部的损伤状态和孔洞分布特征等.

参考文献

- [1] Dongare A M 2020 *J Mater Sci* **55** 3157
- [2] Zhang F G, Zhou H Q, Hu X M, Wang P, Shao J L, Feng Q J 2016 *Explo. Shock Waves* **36** 596 (in Chinese) [张凤国, 周洪强, 胡晓棉, 王裴, 邵建立, 冯其京 2016 *爆炸与冲击* **36** 596]
- [3] Zhang F G, Liu J, He A M, Zhao F Q, Wang P 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 244601 (in Chinese) [张凤国, 刘军, 何安民, 赵福祺, 王裴 2022 *物理学报* **71** 244601]
- [4] Dongare A M, Rajendran A M, LaMattina B, Zikry M A, Donald W, Brenner D W 2010 *J. App. Phys.* **108** 113518
- [5] Seaman L, Curran D R, Shockey D A 1976 *J. App. Phys.* **47** 4814
- [6] Molinari A, Wright W A 2005 *J. Mech. Phys. Solids* **53** 1476.
- [7] Johnson J N 1981 *J. App. Phys.* **52** 2812
- [8] Gurson A L 1977 *J. Eng. Mater. Technol.* **99** 2
- [9] Trumel H, Hild F, Roy G, Pellegrini Y P, Denoual C 2009 *J. Mech. Phys. Solids* **57** 1980
- [10] Sui H N, Yu L, Liu W B, Liu Y, Duan H L 2022 *J. Mech. Phys. Solids* **168** 105032
- [11] Wilkerson J W 2017 *I. J. Plasticity* **95** 21
- [12] Huang Z P, Yang L M, Pan K L 1993 *Adv. Mech.* **23** 433 (in Chinese) [黄筑平, 杨黎明, 潘客麟 1993 *力学进展* **23** 433]
- [13] Tonks D L, Zurek A K, Thissell W R 2003 *J. Phys. IV* **110** 893
- [14] Wang Y G, He H L, Wang L L, Jing F Q 2006 *Chin. J. High Pressure Phys.* **20** 127 (in Chinese) [王永刚, 贺红亮, 王礼立, 经福谦 2006 *高压物理学报* **20** 127]
- [15] Chen X, Asay J R, Dwivedi S K, Field D P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023528
- [16] Lescoute E, De Ressaiguier T, Chevalier J M, Loison D, Cuq-Lelandais J P, Boustie M, Breil J, Maire P H, Schurtz G 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 093510
- [17] Liu J, Sun Z Y, Zhang F G, Wang P 2022 *Explo. Shock Waves* **42** 033101 (in Chinese) [刘军, 孙致远, 张凤国, 王裴 2022 *爆炸与冲击* **42** 033101]
- [18] Zhang F G, Wang Y J, Wang P, Wang X X 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 014601 (in Chinese) [张凤国, 王言金, 王裴, 王欣欣 2025 *物理学报* **74** 014601]
- [19] Zhang F G, Zhao F Q, Liu J, He A M, Wang P 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 034601 (in Chinese) [张凤国, 赵福祺, 刘军, 何安民, 王裴 2022 *物理学报* **71** 034601]
- [20] Rivas J M, Zurek A K, Thissell W R, Tonks D L, Hixson R S 2000 *Metall. Mater. Trans. A* **31** 845
- [21] Rajendran A M, Dietsberger M A 1989 *J. Appl. Phys.* **65** 1521

Spallation model coupled with variation of void distribution characteristics and its application^{*}

ZHANG Fengguo[†] PAN Hao WANG Pei WANG Xinxin

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

(Received 26 August 2025; revised manuscript received 27 November 2025)

Abstract

At the current stage, the development of spallation damage research is limited because of the lack of real-time experimental methods to capture the variation of void growth and its distribution characteristics, as well as effective mathematical description method to describe the variation of pore distribution characteristics. Under strong impact loading, the evolution of spallation damage in ductile materials includes physical processes such as nucleation, growth, coalescence, and final fracture/fragmentation of materials. The growth of voids basically maintains the expansion of spherical holes. The damage evolution process can be divided into two stages: nucleation and growth of voids, and coalescence and growth of voids. The coalescence of voids occurs mainly through direct impingement. Based on the analysis of the variation law of the number of voids in the spallation damage evolution simulated by molecular dynamics, the probability distribution of void nucleation is described using a cosine trigonometric function, and the reduction of void number due to the void coalescence is described using a sine trigonometric function. A phenomenological physical description method for the whole process of the void number density variation is given, and then an evolution equation for spallation damage coupled with the variation law of void number density is constructed. The new model not only fully reflects the physical processes of nucleation, growth and coalescence of voids, but also shows the changing law of void distribution characteristics during damage evolution. The calculation results can determine the damage state and the distribution of void number density in the material, which provides effective support for the analyzing the recompression and fragmentation of materials after spall damage. At the same time, it also promotes the development of spallation damage research. The applicability of the new model is validated by the statistical results of microscopic molecular dynamics computation and related experimental results.

Keywords: spallation model, void nucleation, void coalescence, void distribution characteristics, shock loading, ductile metal

DOI: [10.7498/aps.75.20251152](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251152)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251152](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251152)

^{*} Project supported by the National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics Fund, China (Grant No. 2023JCJQLB05401).

[†] Corresponding author. E-mail: zhang_fengguo@iapcm.ac.cn

耦合孔洞分布特征变化规律的层裂损伤模型及其应用

张凤国 潘昊 王裴 王欣欣

Spallation model coupled with variation of void distribution characteristics and its application

ZHANG Fengguo PAN Hao WANG Pei WANG Xinxin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 030813 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251152

CSTR: 32037.14.aps.75.20251152

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251152>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

层裂损伤早期微孔洞分布特征的变化规律

Variation law of micro-void distribution characteristics in early stage of spallation damage

物理学报. 2025, 74(1): 014601 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241338>

强冲击加载下延性金属卸载熔化损伤/破碎问题的物理建模及其应用

Modelling of spall damage evolution and fragment distribution for melted metals under shock release

物理学报. 2022, 71(24): 244601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221340>

延性金属层裂强度对温度、晶粒尺寸和加载应变率的依赖特性及其物理建模

Dependence of spall strength on temperature, grain size and strain rate in pure ductile metals

物理学报. 2022, 71(3): 034601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210702>

不同晶粒度高纯铜层裂损伤演化的有限元模拟

Numerical simulation on dynamic damage evolution of high pure copper with different grain sizes

物理学报. 2021, 70(20): 204601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210726>

冲击速度对单晶镍层裂行为的影响规律及作用机制

Law and mechanism of impact velocity on spalling and fracture behavior of single crystal nickel

物理学报. 2024, 73(16): 164601 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240244>

Fe-Cr合金辐照空洞微结构演化的相场法模拟

Phase-field modeling of irradiated void microstructure evolution of Fe-Cr alloy

物理学报. 2021, 70(5): 054601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201457>