



层裂损伤孔洞增长模型参数的确定方法及其应用

张凤国 刘军 何安民 王裴 王昆 周洪强 赵福祺

Method of determining parameters of void growth damage model and its application to simulation of spall test

Zhang Feng-Guo Liu Jun He An-Min Wang Pei Wang Kun Zhou Hong-Qiang Zhao Fu-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 204601 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200527

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200527>

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

氢气浸泡辐照加速方法在3DG111器件上的应用及辐射损伤机理分析

Hydrogen soaking irradiation acceleration method: application to and damage mechanism analysis on 3DG111 transistors

物理学报. 2019, 68(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181992>

高应变率下温度对单晶铁中孔洞成核与生长影响的分子动力学研究

Molecular dynamics simulation of effect of temperature on void nucleation and growth of single crystal iron at a high strain rate

物理学报. 2019, 68(24): 246102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190920>

非一维应变冲击加载下高纯铜初始层裂行为

Incipient spallation of high purity copper under non-one-dimensional strain shock waves

物理学报. 2020, 69(3): 034601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191104>

外界条件在电磁脉冲对GaAs赝高电子迁移率晶体管损伤过程中的影响

Influence of the external condition on the damage process of the GaAs pseudomorphic high electron mobility transistor induced by the electromagnetic pulse

物理学报. 2017, 66(7): 078401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.078401>

Si₃N₄钝化层对横向PNP双极晶体管电离辐射损伤的影响机理

Impact of nitride passivation layer on ionizing irradiation damage on LPNP bipolar transistors

物理学报. 2018, 67(16): 168501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172215>

循环温度疲劳作用下粘接界面损伤的非线性超声评价

Nonlinear ultrasonic evaluation of damage to bonding interface under cyclic temperature fatigue

物理学报. 2018, 67(7): 074302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172265>

层裂损伤孔洞增长模型参数的确定方法及其应用*

张凤国† 刘军 何安民 王裴 王昆 周洪强 赵福祺

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2020年4月10日收到; 2020年6月1日收到修改稿)

基于自由面速度曲线及其与层裂面处物理量变化之间的关联, 考虑层裂损伤演化过程中波的传播与相互作用, 进一步探讨了损伤演化过程中的临界状态, 分析了孔洞增长层裂损伤模型参数所包含的物理涵义, 并给出基于物理的模型参数确定方法. 通过对两种典型延性金属 OFHC 铜和钼层裂实验结果的模拟, 验证了该方法的合理性. 本文给出的参数确定方法不仅可以扩展模型的适用范围, 有效提高计算结果的可信度, 同时, 也为其他层裂损伤模型参数的确定提供了很好的借鉴作用.

关键词: 延性金属, 层裂损伤, 孔洞增长损伤模型, 参数确定

PACS: 46.50.+a, 62.50.Ef, 64.60.Q-, 62.20.mm

DOI: 10.7498/aps.69.20200527

1 引言

冲击载荷作用下, 反射冲击波在靶板内部叠加形成拉伸作用区域, 当拉伸应力足够高时, 延性材料内部层裂面处经历孔洞的成核、增长、汇合直至材料断裂破坏的损伤演化过程, 即层裂破坏. 包括爆轰加载、撞击以及激光加载等均可能造成结构材料的层裂破坏, 因而该问题的研究具有重要的实用价值. 同时, 层裂属于一维拉伸破坏问题, 应力状态简单、实验易行, 研究层裂损伤演化过程也有助于分析材料的理论强度、揭示材料的损伤断裂机理^[1-3].

在层裂损伤问题的研究历程中, 为了数值模拟分析材料的损伤演化过程及其对结构的影响, 采用的损伤模型不断发展完善, 从最初的瞬时断裂模型、损伤累积模型到目前采用的耦合材料微细观结构信息的损伤累积模型^[4-10], 使得对损伤演化过程的描述逐渐精细化, 同时, 结合实验和理论研究深入探讨损伤演化特性^[11-20], 逐步加深了对材料损

伤微细观机理的认识. 在层裂损伤模型的发展过程中, 人们过多地关注如何完善损伤模型, 更好地使计算结果与材料内部损伤状态相符合, 而忽略损伤模型参数如何标定这一重要问题. 对于一些损伤模型, 模型参数的改变不仅对计算结果的影响很大, 而且模型参数本身也可能是相关的, 同时, 部分参数的选取具有一定的人为性, 这就为损伤模型的具体应用造成了困扰, 也降低了计算结果的可信度. 以目前应用较为广泛的孔洞增长 VG 模型 (void growth model)^[5] 为例: 该模型考虑了基体材料的率效应, 并基于空心球壳得到了孔隙度 α (空心球壳总体积与基体体积之比) 随时间变化的增长率与外加拉伸载荷 p 之间的关系为 (本文中变量对时间的导数“ d/dt ”均表示为“ $\dot{}$ ”)

$$\dot{\alpha} = \frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3} (\alpha - 1)^{1/3}}{\eta} \left(\alpha \cdot P - \alpha_s \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right). \quad (1)$$

模型包含的三个基本参数: 初始孔隙度 α_0 定义为距离层裂面较远处的孔隙度, 这个定义本身具有人为性; η 为剪切黏性系数, 但实际应用时作为计算参数, 并根据实验数据进行调整; 基于理论推导,

* 科学挑战专题 (批准号: TZ2018001) 和国家自然科学基金 (批准号: U1530261) 资助的课题.

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

系数 α_s 与基体材料的屈服强度 Y_0 相关, 即 $\alpha_s = 2Y_0/3$, 而实际应用时, Johnson^[5] 定义其为与孔洞周围基体材料的硬化强度相关, 同样也为计算参数. 此外, Johnson^[5] 的文章中只是给出了 OFHC 高纯铜材料的损伤模型参数, 对于其他材料, 参数如何确定就值得商酌, 这极大地降低了计算结果的可信度. 同时, 三个参数的改变也直接影响了损伤演化过程的宏观外在表现——自由面速度变化. 图 1 给出了采用 VG 模型计算模拟的飞片撞击靶板的自由面速度, 计算结果显示, VG 模型参数的

选取不同将导致靶板材料发生损伤破坏 (速度曲线有回跳) 或没有损伤产生 (速度曲线没有回跳) 两种极端情况. 因此, 需要进一步解析损伤模型参数所包含的物理涵义, 给出参数的确定方法.

本文结合自由面速度曲线的斜率和回跳点等变化特性与层裂面处损伤演化过程之间的对应关系、损伤与应力改变之间的关联等, 进一步解析损伤模型参数所包含的物理涵义, 探讨基于物理的损伤模型参数的确定方法, 并通过与文献中不同延性金属材料层裂实验数据比较, 验证了该方法的合理性.

2 层裂损伤模型参数的确定方法

层裂损伤机理认识的不断提高得益于近年来实验诊断技术的进步, 其中基于 VISAR, DISAR 等光学表面诊断技术获得的自由面速度曲线是认识层裂损伤演化规律最重要的一个窗口. 根据波的相互作用理论, 层裂面处的损伤演化与自由面速度曲线的变化之间存在间接的对应关系, 因此, 深入解读自由面速度曲线的变化特性有助于揭示材料内部的损伤变化机理和损伤模型的物理建模.

随着层裂损伤研究的深入, 人们对自由面速度曲线的认识不断提高. 图 2 显示了 2 mm 飞片以 185 m/s 的速度撞击 9 mm OFHC 高纯铜靶板的自由面速度实验测量结果^[21]. 冲击波达到自由面后, 速度达到峰值, 之后冲击波在自由面反射形成卸载稀疏波, 速度曲线下落达到第一个低点, 即回跳点, 峰值与回跳点之间的速度差 Δu 与靶板内部层裂面处卸载稀疏波相互叠加引起的拉伸应力相关, 即层裂强度; 回跳点左侧曲线下落斜率 \dot{u}_1 与拉伸应力的增长率 \dot{p} 相对应, 而右侧速度曲线上升的斜率 \dot{u}_2 与材料内部损伤增长率相关^[2]. 对于回跳点所包含的物理涵义, 近期的实验分析和研究表明: 自由面速度曲线的回跳信号不是材料完全分离的一个标志, 其与孔洞的成核以及早期增长相关, Tonks 等^[6] 定性给出其对应的孔隙度近似为 1.0005. 结合文献关于材料弹塑性效应对层裂损伤影响的分析^[22], 可以进一步明确回跳点对应层裂面处因孔洞早期增长引起材料完全塑性变形的时刻, 此时刻的临界孔隙度为

$$\alpha_{cr} = 2G\alpha_0 / (2G - Y_0), \quad (2)$$

其中 G 为剪切模量, 对应的临界应力-层裂强度的

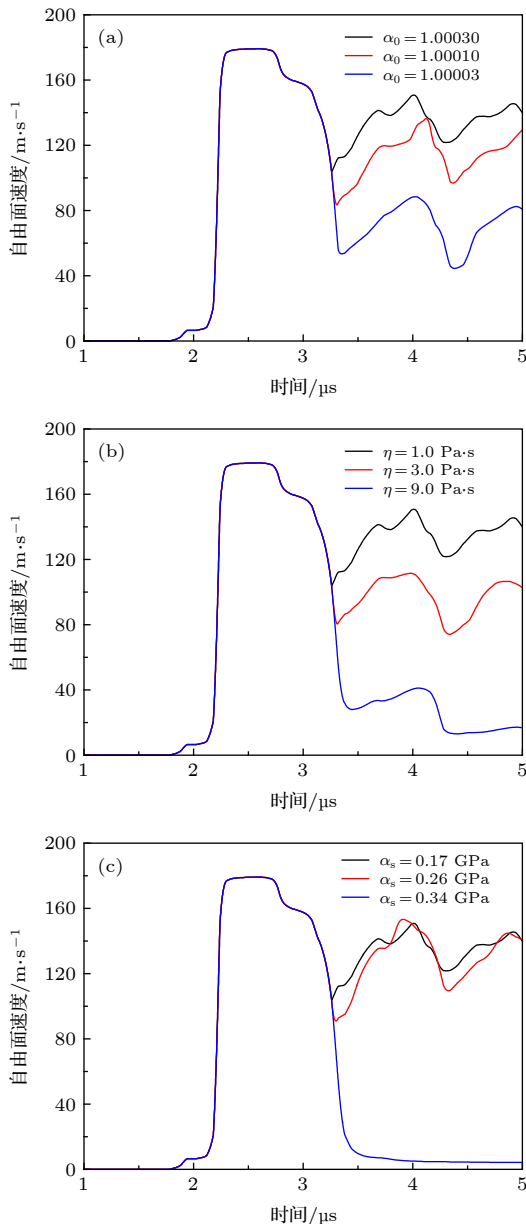


图 1 损伤模型参数对自由面速度的影响 (a) 初始孔隙度的影响; (b) 剪切黏性系数的影响; (c) 材料硬化参数的影响
Fig. 1. Influences of spall model parameters on free surface velocities: (a) Effects of initial porosity; (b) effects of shear viscosity; (c) effects of work hardening.

计算采用 1980 年 Romanchenko 和 Stepanov^[23] 给出的公式:

$$p_{\text{spall}} = \rho_0 \cdot C_l \cdot \Delta u \cdot \frac{1}{1 + C_1/C_0} + \frac{1}{4} \rho_0 \cdot C_0 \cdot h \cdot \dot{u}_1 \cdot \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_1} \right), \quad (3)$$

其中, ρ_0 为初始基体材料密度, C_1 为基体材料的纵波声速, C_0 为体积声速, $h = 0.5C_1 \cdot \Delta t$, 为层裂片厚度.

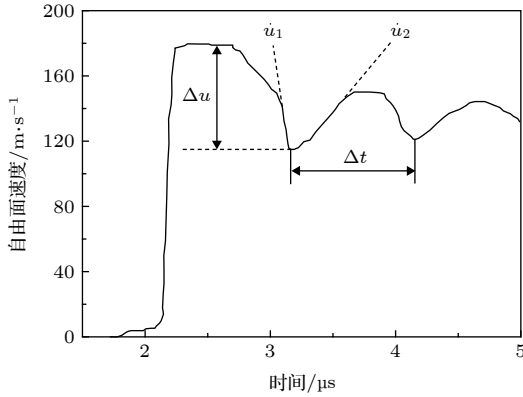


图 2 自由面速度曲线典型特征

Fig. 2. Characters of free surface velocity profile.

首先, 计算过程中采用的含损伤格林内森状态方程的微分形式可以表示为

$$\dot{p} = \rho_0 \cdot C_0^2 \cdot \dot{\mu} + \Gamma_0 \cdot \dot{E}, \quad (4)$$

其中 Γ_0 为格林内森系数, E 为单位初始体积内能, 体积应变 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为当前基体材料密度. 对于一维层裂损伤问题, 在基体材料不可压的假设条件下, $\dot{\mu} = -\dot{\alpha}/\alpha^2$, 而内能的改变量为

$$\dot{E} = -p \cdot \frac{\partial(\rho_0/\rho)}{\partial t} = -p \cdot \dot{\alpha}. \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (4) 式并积分 (α_0 到 α_{cr}), 同时考虑在孔洞早期增长过程中 $\alpha \cong 1$, 则有

$$-\Gamma_0 \cdot (\alpha_{\text{cr}} - \alpha_0) = \ln(\rho_0 \cdot C_0^2 - \Gamma_0 \cdot p_{\text{spall}}) - \ln(\rho_0 \cdot C_0^2 - \Gamma_0 \cdot p_0), \quad (6)$$

考虑到 $p_0 = \alpha_s \ln[\alpha_0/(\alpha_0 - 1)]$, 代入 (6) 式有:

$$\Gamma_0 \cdot \frac{Y_0}{2G - Y_0} \alpha_0 = \ln \left(1 + \Gamma_0 \cdot \frac{p_{\text{spall}} - \alpha_s \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1}}{\rho_0 \cdot C_0^2 - \Gamma_0 \cdot p_{\text{spall}}} \right). \quad (7)$$

因 $\frac{\Gamma_0}{\rho_0 \cdot C_0^2 - \Gamma_0 \cdot p_{\text{spall}}} \left(p_{\text{spall}} - \alpha_s \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} \right) \ll 1$, 对 (7) 式右侧进行泰勒展开, 同时考虑 $\alpha_0 \cong 1$, 取展

开式的第一项有

$$\alpha_s \ln(\alpha_0 - 1) = \frac{Y_0(\rho_0 \cdot C_0^2 - \Gamma_0 \cdot p_{\text{spall}})}{2G - Y_0} - p_{\text{spall}}. \quad (8)$$

其次, 在确定模型参数时, 只需讨论孔洞早期增长过程, 即 $1 < \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{cr}} \cong 1$, 则 (1) 式可以近似改写为

$$\dot{\alpha} = \frac{Y_0}{\eta} (\alpha_0 - 1)^{2/3} (\alpha - 1)^{1/3} \left(\frac{P}{Y_0} - \frac{\alpha_s}{Y_0} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right), \quad (9)$$

其中 P/Y_0 为体现加载强度的无量纲量, 而包含材料特性的系数 $(\alpha_0 - 1)^{2/3} Y_0/\eta$ 本身的量纲只与时间相关, 因此, 不妨假设将其值定义为与材料无关的常数, 结合 Johnson 给出的数据, 即有

$$\eta = \frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3} Y_0}{6.722} \cdot 10^{-5}. \quad (10)$$

最后, 当自由面速度曲线回跳时, Antoun 等^[2] 给出了其对应层裂面处的孔隙度增长率为 $\dot{\alpha} = -4\dot{p}/(\rho_0 C_0^2)$, \dot{p} 为拉伸应力开始增长时的应力率, 同时, 根据波的相互作用有 $\dot{p} = \rho_0 C_0 \cdot \dot{u}_1/2$, 则有

$$\dot{\alpha} = -2\dot{u}_1/C_0. \quad (11)$$

结合 (1) 式可以得到:

$$\frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3} (\alpha_{\text{cr}} - 1)^{1/3}}{\eta} \left(\alpha_{\text{cr}} \cdot P_{\text{spall}} - \alpha_s \ln \frac{\alpha_{\text{cr}}}{\alpha_{\text{cr}} - 1} \right) = -2\dot{u}_1/C_0. \quad (12)$$

至此, 基于理论推导, 并结合自由面速度曲线的实验结果, 本文给出了 VG 层裂损伤模型参数的确定方法: (8) 式、(10) 式、(12) 式均对应速度回跳时刻各物理量之间的关系, 联立 (8) 式、(10) 式、(12) 式可以数值求解 VG 模型的三个参数 α_0 , η 和 α_s ; 也可以将 (8) 式和 (10) 式代入 (12) 式, 利用数学软件 Mathematica 中 FindRoot 命令求解参数 α_0 , 然后代入 (10) 式和 (12) 式得到其他参数. 同时指出, 参数 α_0 并非实际的初始孔隙度, 而是参考初始孔隙度; 自由面速度曲线回跳点对应层裂面处材料因孔洞增长达到塑性变形; 此外, VG 模型虽然简单、实用, 但因为没有考虑惯性和材料微结构的影响, 模型本身并不完善, 这使得参数 η 和 α_s 虽然赋予了一定的物理涵义, 而实际上属于调整损伤增长的模型参数.

3 参数确定方法的实验验证

为了验证本文给出的参数确定方法的适用性, 这

表 1 OFHC 铜和钽的基本力学参数
Table 1. Material parameters of OFHC copper and tantalum.

| | 密度/kg·m ⁻³ | 剪切模量/GPa | 屈服强度/GPa | 体积声速/m·s ⁻¹ | 纵波声速/m·s ⁻¹ | 格林内森系数 |
|-------|-----------------------|----------|----------|------------------------|------------------------|--------|
| OFHC铜 | 8924 | 48.4 | 0.15 | 3910 | 4770 | 2.00 |
| 钽 | 16660 | 69.0 | 0.70 | 3386 | 4187 | 1.67 |

表 2 OFHC 铜和钽的 ZA 本构模型参数
Table 2. Material parameters of OFHC copper and tantalum for Zerilli-Armstrong constitutive relations.

| | A ₀ /GPa | A ₁ /GPa | A ₂ | A ₃ | A ₄ /GPa | n |
|-------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|---------------------|-------|
| OFHC铜 | 0.0465 | 0.890 | 0.00280 | 0.00015 | 0.0185 | |
| 钽 | 0.2950 | 1.519 | 0.00953 | 0.00032 | 0.4070 | 0.582 |

里采用数值方法模拟两种典型延性金属材料 OFHC 铜和钽的层裂实验给出的自由面速度剖面。延性金属材料的层裂损伤演化属于从微观的孔洞成核、增长到宏观破坏的多尺度问题, 相对而言, 基于微观物理机理的 ZA 本构方程更适合层裂损伤的计算^[24,25]。因此, OFHC 铜本构方程选用针对 FCC 材料的 ZA 本构方程:

$$\sigma_y = A_0 + A_1 \cdot \varepsilon^{1/2} \cdot \exp(-A_2 T + A_3 T \cdot \ln \dot{\varepsilon}) + A_4, \quad (13)$$

金属钽的本构方程选用针对 BCC 材料的 ZA 本构方程:

$$\sigma_y = A_0 + A_1 \exp(-A_2 T + A_3 T \ln \dot{\varepsilon}) + A_4 \varepsilon_p^n. \quad (14)$$

两种金属的基本材料参数^[25,26]见表 1 和表 2。

首先, 采用上述方法确定 OFHC 高纯铜材料的 VG 层裂损伤模型参数。基于图 2 给出的层裂实验的自由面速度曲线^[21]有: 速度差 $\Delta u = 65.2 \text{ m/s}$, 曲线斜率 $\dot{u}_1 = -5.37 \times 10^8 \text{ m/s}^2$, 根据波的相互作用, 飞片加载层裂实验的层裂片厚度近似为飞片厚度, 即 $h = 2 \text{ mm}$, 则由 (3) 式计算得到层裂强度 $p_{\text{spall}} = 1.682 \text{ GPa}$ 。根据 (8) 式、(10) 式和 (12) 式计算得到: $\alpha_0 = 1.00048$; $\eta = 1.368 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\alpha_s = 0.193 \text{ GPa}$ 。图 3 显示了采用 VG 模型原参数和本文给出参数计算得到的自由面速度曲线与实验测量结果均符合较好。此外, 若取 $\alpha_0 = 1.0003$, 则根据 (8) 式和 (10) 式得到 $\eta = 1.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以及 $\alpha_s = 0.182 \text{ GPa}$, 这与 Johnson 给出的 $\alpha_0 = 1.0003$, $\eta = 1.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以及 $\alpha_s = 0.17 \text{ GPa}$ 近似相同。总体而言, 对比结果表明: 1) 新的参数标定方法不仅可以还原 VG 层裂损伤模型的参数, 而且基于实验和物理给出的参数也能够很好地模拟自由面速度变化情况 (对应材料内部的层裂损伤演化过程), 证明了本文给出的参数标定方法的有效性; 2) 从另一个角

度而言, 同一个物理模型有两套有效参数, 这也说明层裂损伤模型本身还不完善。

进一步验证本文给出的参数确定方法合理性的关键是采用 VG 模型对其他延性金属材料层裂实验结果的有效计算模拟, 这里包含两个层次的验证: (10) 式假设条件的成立以及参数确定方法的合理性。金属钽是研究金属材料层裂损伤机理的常用典型延性金属之一, 表 3 列出了文献给出的不同加载速率和不同加载飞片厚度的 5 发实验: 对比实验 1—实验 3, 飞片和靶板厚度相同, 飞片的撞击速度不同, 实验反映了加载强度对自由面速度 (损伤) 的影响; 对比实验 5、实验 2 和实验 4, 靶板厚度相同, 飞片的撞击速度近似, 但飞片的厚度不同,

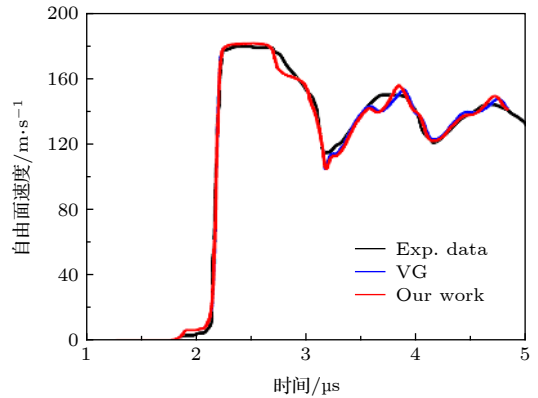


图 3 OFHC 铜层裂的自由面速度曲线

Fig. 3. Simulated free surface velocity profile for OFHC copper.

表 3 实验列表
Table 3. Parameters of shock experiments.

| | 实验1 | 实验2 | 实验3 | 实验4 | 实验5 |
|------------------------|------|------|------|------|------|
| 冲击速度/m·s ⁻¹ | 412 | 306 | 212 | 303 | 307 |
| 飞片厚度/mm | 3 | 3 | 3 | 4 | 2 |
| 靶板厚度/mm | 4.95 | 4.95 | 4.95 | 4.95 | 4.95 |

实验反映了飞片厚度 (即加载应变率) 对自由面速度 (损伤) 的影响^[17]. 本文根据实验 2 的自由面速度剖面特征确定 VG 模型参数: 层裂片的厚度近似为飞片厚度, 即 3 mm, 自由面速度曲线速度差 $\Delta u = 134.2$ m/s、曲线斜率 $\dot{u}_1 = -4.15 \times 10^8$ m/s², 由 (3) 式计算得到层裂强度 $p_{\text{spall}} = 5.18$ GPa, 再根据 (8) 式、(10) 式和 (12) 式计算得到: $\alpha_0 = 1.00676$; $\eta = 37.23$ Pa·s; $\alpha_s = 0.8506$ GPa. 这里可以看出: 高强度延性金属钽的初始孔隙度 α_0 远远大于铜的初始孔隙度, 这与原文提到的初始孔隙度的概念相悖, 从而说明了初始孔隙度应定义为 VG 损伤模型应用时的参考初始孔隙度.

采用 VG 模型和本文给出的参数, 图 4 给出的是不同撞击速度加载条件下层裂实验 1—实验 3 的自由面速度观测结果和计算模拟结果, 图 5 给出的是不同飞片厚度在相近撞击速度加载条件下层裂实验 5、实验 2 和实验 4 的自由面速度观测结果

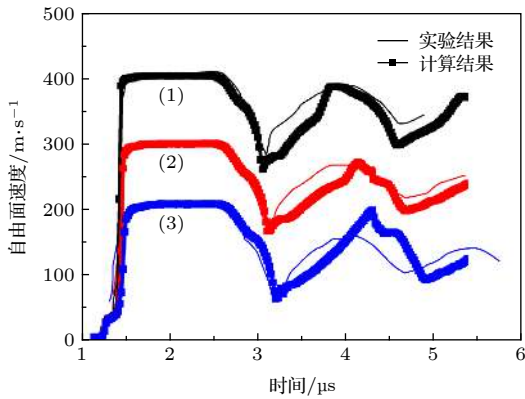


图 4 不同飞片撞击速度的自由面速度曲线

Fig. 4. Simulated free surface velocity profiles with varied impact velocities.

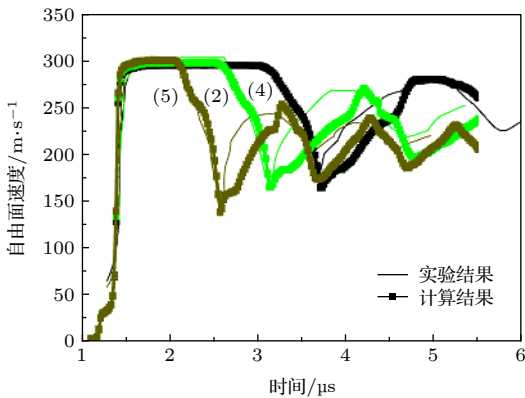


图 5 不同飞片厚度的自由面速度曲线

Fig. 5. Simulated free surface velocity profiles with varied flyer thickness.

和计算模拟结果. 采用相同参数对不同实验模拟对比发现: 首先, 对于速度曲线回跳后上升的斜率, 模拟结果与实验结果相差较大, 这可能是 VG 损伤模型本身没有考虑惯性影响的原因^[22]; 其次, 对于层裂损伤分析所关注的自由面速度回跳点、回跳后曲线上升的幅值以及回跳后曲线的振荡周期 Δt , 模拟结果与实验结果均符合较好, 从而验证了参数确定方法的适用性; 最后, 因可以较好模拟不同加载强度和加载应变率实验结果, 也说明本文给出的参数确定方法可以较好地适用于飞片撞击加载的层裂损伤问题研究.

采用本文给出的参数确定方法, 通过对不同材料、不同加载环境下层裂损伤实验结果的有效模拟, 一方面验证了 (10) 式所给出的假设条件具有一定的合理性, 另一方面也验证了模型参数确定方法的适用性, 从而完善了 VG 损伤模型、扩展了模型本身的适用范围.

4 结 语

本文进一步解析了层裂实验自由面速度曲线的变化特征与材料内部损伤演化之间的相互关联, 并基于自由面速度曲线实验测量结果, 经过理论推导, 给出了 VG 层裂损伤模型参数的理论标定方法, 相关实验结果的有效模拟验证了方法的适用性, 进而提高了计算结果的可信度. 同时, 本文所采用的技术路线不仅为其他损伤模型参数的确定提供参考, 也有利于层裂损伤模型的进一步完善和发展.

参考文献

- [1] Meyers M A, Aifone C T 1983 *Prog. Mater. Sci.* **28** 1
- [2] Antoun T, Seaman L, Curran D R, Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 2003 *Spall Fracture* (New York: Springer-Verlag)
- [3] Kanel G I 2010 *Int. J. Fract.* **163** 173
- [4] Tuler FR, Butcher B M 1968 *Int. J. Fract.* **44** 431
- [5] Johnson J N 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 2812
- [6] Tonks D L, Thissell W R, Schwartz D S 2003 *Shock Compression of Condensed Matter* (New York: Melville)p507
- [7] Czarnota C, Jacques N, Mercier S, Molinari A 2008 *J. Mech. Phys. Solids* **56** 1624
- [8] Wilkerson J W, Ramesh K T 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 215503
- [9] Zhang F G, Zhou H Q, Hu J, Shao J L, Zhang G C, Hong T, He B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094601
- [10] Bai Y L, Ke F J, Xia M F 1991 *Acta Mech. Sin.* **7** 59
- [11] Pei X Y, Peng H, He H L, Li P 2015 *Acta Phys. Sin.* **64**

- 054601 (in Chinese) [裴晓阳, 彭辉, 贺红亮, 李平 2015 物理学报 **64** 054601]
- [12] Zhang F G, Zhou H Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164601 (in Chinese) [张凤国, 周洪强 2013 物理学报 **62** 164601]
- [13] Wilkerson J W 2017 *Int. J. Plast.* **95** 1
- [14] Jacques N, Mercier S, Molinari A 2012 *J. Mech. Phys. Solids* **60** 665
- [15] Johnson J N, Gray III G T, Bourne N K 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 4892
- [16] Escobedo J P, Dennis-Koller D, Cerreta E K, et al. 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 033513
- [17] Roy G 2003 *Ph. D. Dissertation* (ENSMA: University of Poitiers) (In French)
- [18] Xie P C, Wang X S, Hu C M, Hu J B, Zhang F G, Wang Y G 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 034601 (in Chinese) [谢普初, 汪小松, 胡昌明, 胡建波, 张凤国, 王永刚 2020 物理学报 **69** 034601]
- [19] Versino D, Bronkhorst C A 2018 *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* **333** 395
- [20] Turley W D, Fensin S J, Hixson R S, Jones D R, La Lone B M, Stevens G D, Thomas S A, Veaser L R 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 055102
- [21] Rajendran A M, Dietenberger M A, Grove D J 1989 *J. Appl. Phys.* **65** 1521
- [22] Zhang F G, Zhou H Q, Zhang G C, Hong T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074601 (in Chinese) [张凤国, 周洪强, 张广财, 洪涛 2011 物理学报 **60** 074601]
- [23] Romanchenko V I, Stepanov G V 1980 *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **21** 141
- [24] Ikkurthi V R, Chaturvedi S 2012 *Int. J. Plast. Conf. Ser.* **377** 012099
- [25] Zerilli F J, Armstrong R W 1987 *J. Appl. Phys.* **61** 1816
- [26] Peng J X, Li Y L, Li D H 2003 *Explosion and Shock Waves* **23** 183 (in Chinese) [彭建祥, 李英雷, 李大红 2003 爆炸与冲击 **23** 183]

Method of determining parameters of void growth damage model and its application to simulation of spall test*

Zhang Feng-Guo[†] Liu Jun He An-Min Wang Pei Wang Kun
Zhou Hong-Qiang Zhao Fu-Qi

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

(Received 10 April 2020; revised manuscript received 1 June 2020)

Abstract

Spallation of ductile metal is of great importance in many scientific and engineering fields, which is due to the interaction between the incident shock waves and the reflected waves. Physically, the spallation is caused by nucleation, growth and coalescence of microvoids for ductile material. Therefore, numerical simulation of spall process usually involves theoretical model of void growth. However, due to the limited knowledge of microvoid properties, many empirical parameters are included in the void growth model, which are usually determined by comparing numerical results with experimental data. Therefore, a key problem arises in the numerical modeling of damage and spall fracture, that how the parameters of the void growth damage model can be determined. In this work, we present a theoretical method to determine the parameters based on the free surface velocity (FSV) profile. Firstly, the critical state of damage is discussed based on the relationship between characteristics of FSV and change of physical quantity in spall plane. Then, the propagation and interaction of shock waves during the evolution of spall damage are considered. Lastly, the physical meanings of the parameters of the void growth damage model are further discussed. So, based on the relation among spall strength, damage and pull-back of FSV, a physics-based method to determine the parameters of the model is given. The applicability of this method is verified by the simulation of the spall experimental data on typical ductile metals OFHC copper and tantalum. The parameter-determining method given in this paper can not only expand the scope of application of the damage model and effectively improve the reliability of the calculation results, but also provide a good reference for the determination of parameters of other spall damage model.

Keywords: ductile metal, spall damage, void growth damage model, determination method of damage model parameters

PACS: 46.50.+a, 62.50.Ef, 64.60.Q-, 62.20.mm

DOI: [10.7498/aps.69.20200527](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200527)

* Project supported by the Science Challenge Project, China (Grant No. TZ2018001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1530261).

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