

基于单孔洞近似的高纯铝部分层裂实验的数值模拟研究*

王永刚^{1)†} 胡剑东¹⁾ 祁美兰²⁾ 贺红亮³⁾

1) (宁波大学力学与材料研究中心, 宁波 315211)

2) (武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

3) (中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2010年12月13日收到; 2011年7月8日收到修改稿)

基于单孔洞近似, 对不同撞击速度下高纯铝的部分层裂实验进行了数值模拟研究, 讨论了微孔洞长大对波传播的影响及其在自由面速度波剖面上的表现. 通过分析微孔洞周围的应力场变化, 认识到实测自由面速度波剖面出现“回跳”特征并不能说明材料发生完全层裂, 其直接原因是样品内部微孔洞长大所引起的局部卸载效应. 将计算得到的自由面速度波剖面和微孔洞相对体积与实验结果进行了对比分析, 发现两者均符合很好, 表明采用单孔洞增长来近似描述部分层裂样品中随机损伤发展及其对波传播的影响是可行的.

关键词: 层裂, 孔洞增长, 自由面速度波剖面, 微孔洞相对体积

PACS: 62.20.mm, 46.50.+a, 46.15.-x

1. 引言

动载荷下延性金属材料的层裂破坏是一个复杂损伤演化物理过程, 它的基本物理机理是材料内部微孔洞成核、长大、聚集, 最终形成宏观的断裂面^[1-6]. 迄今为止, 人们还无法用实验手段直接监测到材料内部微孔洞增长的实时信息. 近来, 基于可测量任意反射表面的速度干涉仪 (VISAR) 技术, 人们对层裂问题研究取得了长足进展^[7-9]. 利用 VISAR 测量样品的自由面速度波剖面来获取层裂破坏过程的波传播信息, 已经成为人们研究层裂问题的一项重要实验监测手段, 它为解读层裂破坏过程的物理力学问题提供了丰富的信息. 理论模型和数值模拟结果的检验都基于与自由面速度波剖面的比较^[10-13]. 正如文献[14]所指出, 自由面速度波剖面测量中隐含一些缺点(如自由面速度波剖面测量是间接测量而不是直接测量), 因此利用实测自由面速度波剖面速度“回跳”计算层裂强度是不完善的, 这些缺点使解读出的层裂特性存在一定的局

限性, 甚至可能会误导理论分析.

事实上, 损伤演化及层裂发生于样品内部而不在自由面上, 但当应力波在样品中传播时会把材料内部的损伤信息携带到自由面上, 自由面速度波剖面中一定隐含了材料内部的损伤演化信息. 因此, 有必要研究样品内部微孔洞长大过程对波传播的影响及其在自由面速度波剖面上的表现. 本文对高纯铝部分层裂实验进行数值模拟研究, 计算结果将与实测的自由面速度波剖面及回收样品的损伤统计结果进行比较分析, 探讨样品内部微孔洞长大过程与自由面速度波剖面典型特征之间的关联性, 以便更好地通过自由面速度波剖面来解读层裂问题.

2. 高纯铝层裂实验

实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的一级轻气炮进行, 飞片撞击速度由刷子探针测量. 实验采用对称碰撞方式, 即飞片和样品均为高纯铝. 实验条件和实验结果如表 1 所列, 表中 d_0 和

* 国家自然科学基金(批准号: 10876014, 11072119)、国防基础科学研究计划(批准号: B1520110004)和宁波大学王宽诚幸福基金资助的课题.

† E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn

d_s 分别为样品厚度和飞片厚度, V_p 为飞片撞击速度. 采用 VISAR 监测了样品自由面速度波剖面, 实测自由面速度 u_{fs} 随着时间 t 的变化曲线如图 1 所示. 从图 1 可以看出: 不同撞击速度下, 自由面速度波剖面上都表现出了明显速度“回跳”典型特征, 传统观点认为速度“回跳”即意味着层裂发生. 在自由面速度波剖面曲线上, 从第一个速度峰值到第一个速度低谷之间的速度差称为速度“回跳”幅值 Δu , 通过分析 Δu 可以获得层裂强度. 图 2 给出了四发实验回收样品的金相照片, 图中箭头表示冲击方

向. 从图 2 中可以清楚地看出: 前三发实验样品内部出现了大量的近似球形微孔洞, 但没有形成断裂面, 这种损伤状态定义为部分层裂; 第四发速度较高, 微孔洞之间相互聚集, 形成了断裂面, 样品发生完全层裂. 由此可见, 只要样品内部出现损伤就会导致自由面速度波剖面中出现速度“回跳”信号, 通过自由面速度“回跳”信号来计算层裂强度显然是值得商榷的. 下面我们通过数值模拟手段来揭示样品内部微孔洞长大与自由面速度波剖面典型特征之间的关联性.

表 1 高纯铝的层裂实验条件和实验结果

实验编号	d_s/mm	d_f/mm	$V_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta u(\text{实验值})/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta u(\text{计算值})/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	层裂状态
1	6.00	3.01	196.9	154	147	部分层裂
2	5.99	3.01	215.4	165	159	部分层裂
3	6.01	3.00	236.3	167	166	部分层裂
4	6.00	3.01	317.9	173	—	完全层裂

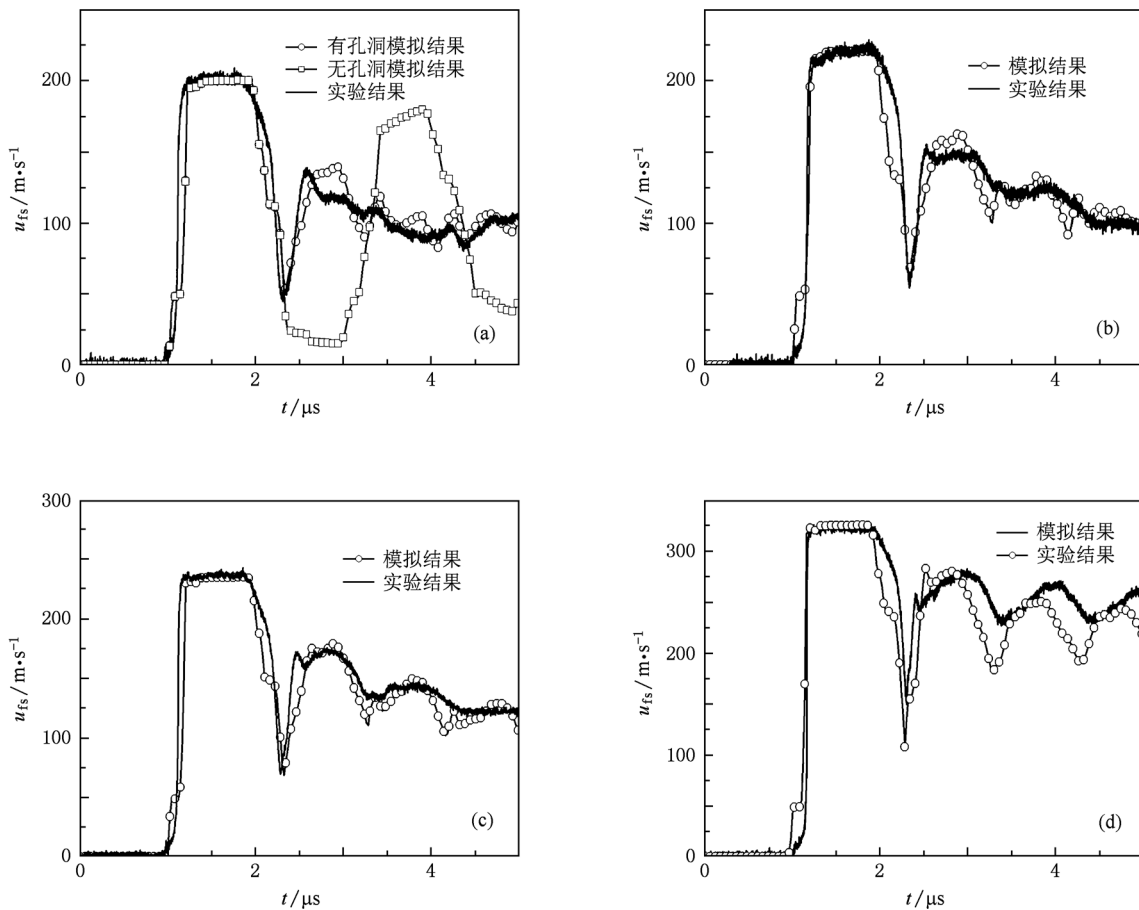


图 1 自由面速度波剖面的实验结果与模拟结果比较 (a) $V_p = 196.9 \text{ m/s}$, (b) $V_p = 215.4 \text{ m/s}$, (c) $V_p = 236.3 \text{ m/s}$, (d) $V_p = 317.9 \text{ m/s}$

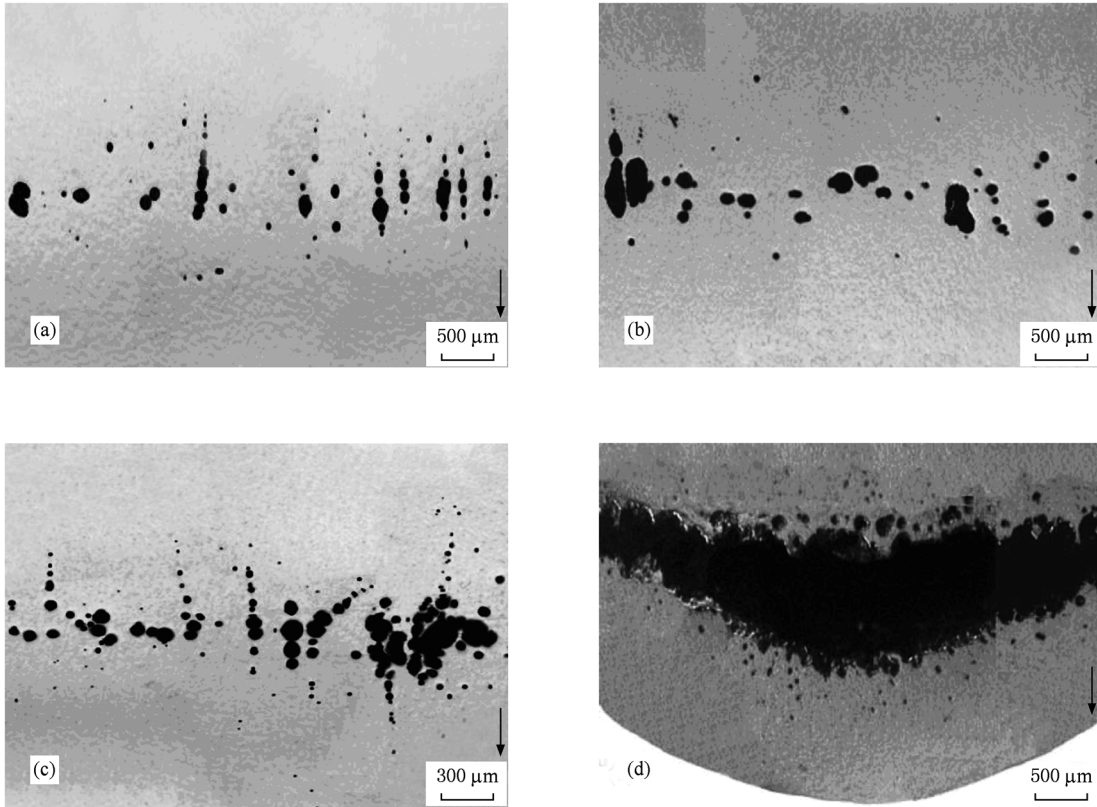


图2 回收样品的金相照片 (a) $V_p = 196.9 \text{ m/s}$, (b) $V_p = 215.4 \text{ m/s}$, (c) $V_p = 236.3 \text{ m/s}$, (d) $V_p = 317.9 \text{ m/s}$

3. 有限元模型的建立

平板撞击层裂实验中,采用对称碰撞条件,当飞片和样品的厚度之比为 1:2 时,由波传播分析易知样品厚度中心层处拉伸应力持续时间最长,损伤主要集中在样品的厚度中心区域. 我们的实验也发现几乎所有的微孔洞主要集中在样品厚度中心附近宽度为 1 mm 的窄带内,并且微孔洞是随机分布的. 数值模拟中,若按照微孔洞分布的实际情况来建模显然是非常困难的,需要进行适当的简化,通常把含损伤材料离散成大量含孔洞的圆柱体胞的集合体. 另外,实验中为了避免边侧稀疏波的影响,VISAR 测点布置在样品中心处,并且激光聚焦在样品上的光斑直径具有一定尺寸,因此 VISAR 测量的自由面速度波剖面严格而言并不是单点测量,已经包含了一定的统计平均. 同样基于统计平均概念,可以把样品中心处损伤区域用一个含初始微孔洞圆柱体胞模型来模拟,参考实验结果,体胞直径和高度均选择为 1 mm. 假定体胞中内含微孔洞的初始直径为 100 μm ,对应的初始孔洞相对体积约为 0.0007.

Seaman 等^[15]基于大量金属材料的统计分析结果认为,金属材料中初始孔洞的相对体积约为 10^{-3} — 10^{-4} . 这表明这里所假定初始微孔洞直径具有一定的合理性. 飞片厚度为 3 mm,样品厚度为 6 mm,采用轴对称的二维实体单元,根据对称条件取二分之一模型来进行分析,建立了平板撞击层裂实验的整个二维轴对称有限元模型如图 3(a)所示. 图 3(b)给出了样品中心处含微孔洞的体胞模型的局部放大,为了避免微孔洞在压缩冲击波作用下被压溃而发生网格畸变,我们在初始微孔洞中填充了球形杂质. 为了模拟平板撞击层裂实验样品中心处一维应变条件,对飞片和样品的边界施加 x 方向位移约束条件.

计算中,高应变率加载下的高纯铝材料的本构关系采用理想流体弹塑性本构关系,即

$$\sigma_{ij} = -p + s_{ij}, \quad (1)$$

式中 σ_{ij} 为应力张量, p 为压力, s_{ij} 为偏应力张量. 当 Von Mises 屈服函数

$$\phi = \frac{1}{2}s_{ij}s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0$$

时,

$$s_{ij} = 2G(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_v); \quad (2)$$

当 Von Mises 屈服函数

$$\phi = \frac{1}{2}s_{ij}s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} > 0$$

时,

$$s_{ij} = \frac{\sigma_y}{s^*} s_{ij}^* \quad (3)$$

这里 G 为剪切模量, σ_y 为屈服应力,

$$s^* = \left(\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}^* \right)^{1/2}.$$

当材料处于压缩状态下, Grüneisen 状态方程的压力表达式为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right]}{\left[1 - (1 - S_0) \mu \right]^2} + \gamma_0 E, \quad (4)$$

式中 ρ_0 为材料的初始密度, C 和 S_0 为冲击波速度与粒子速度关系的拟合参数, γ_0 为 Grüneisen 系数, E 为材料内能, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$. 当材料处于拉伸状态下, Grüneisen 状态方程的压力表达式为

$$p = \rho_0 C^2 \mu + \gamma_0 E. \quad (5)$$

本文计算中所采用的材料本构和状态方程参数^[16]列于表 2.

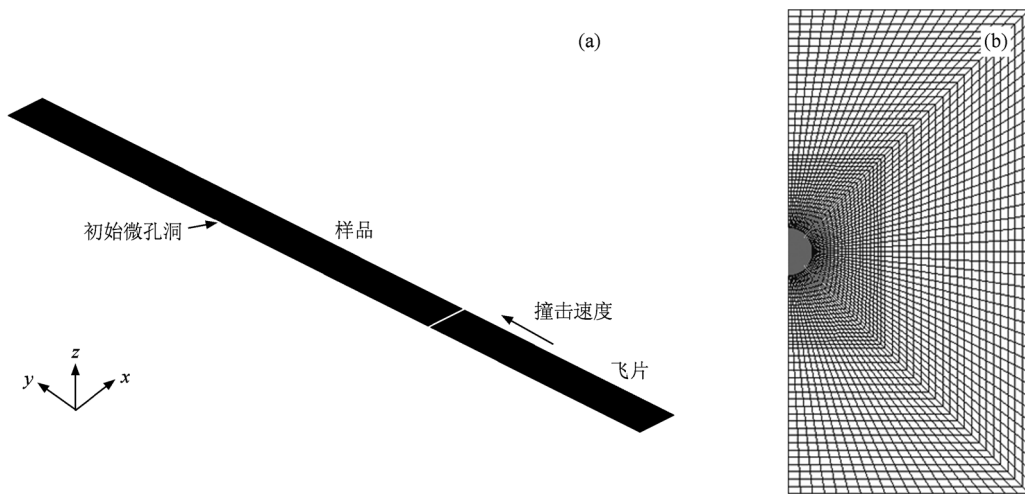


图 3 有限元模型 (a) 层裂实验的二维轴对称整体模型, (b) 含微孔洞的体胞模型的局部放大

表 2 高纯铝材料本构参数以及状态方程参数^[16]

$\rho_0/g \cdot cm^{-3}$	G/GPa	σ_y/MPa	$C/m \cdot s^{-1}$	S_0	γ_0
2.7	26.2	200	5386	1.34	2.0

4. 计算结果及分析

采用上述有限元模型, 首先对第一发实验开展数值模拟工作. 计算获得自由面速度剖面也出现了典型的速度“回跳”信号(图 1(a)), 与实验结果符合很好. 不考虑微孔洞长大的计算结果也示于图 1(a)中, 没有发现速度“回跳”信号. 由此可知, 对部分层裂样品, 实测自由面速度波剖面上也出现“回跳”特征应该是与微孔洞长大密切相关的. 下面我们从波传播角度来加以分析. 当飞片撞击样品后, 在飞片和样品中同时产生压缩冲击波, 当压缩冲击波到达各自的自由面时将会反射稀疏波, 两束稀疏波首先在样品中心相遇, 由此产生拉伸应力区, 微

孔洞在拉伸应力驱动下开始长大, 如图 4 所示(深色区域为拉伸应力区). 随着微孔洞不断长大, 发现微孔洞周围形成近似球形卸载波区域, 并且不断向外扩展. 图 5 给出了距离微孔洞中心不同距离(0.07, 0.2, 0.48 mm)处典型单元轴向应力时程曲线. 为了对比分析需要, 图 5 中还给出了不考虑微孔洞长大条件下相同位置处单元的轴向应力时程曲线. 从图 5 可以看出: 由于微孔洞的存在, 微孔洞周围应力场是很不均匀的, 距离微孔洞越近, 拉伸应力被卸载越快; 如果没有微孔洞时, 周围应力场是非常均匀的, 拉伸应力没有被卸载, 持续时间较长. 我们由此认为实测自由面速度波剖面出现“回跳”特征的直接原因是微孔洞长大所引起的局部卸载效应. 这说明, 当微孔洞周围拉伸应力场被卸载到零或者接近零时, 这就相当于材料内部产生了“自由面”, 与发生完全层裂时断裂面一样, 后续稀疏波遇到“自由面”也同样会反射压缩波, 导致自由面速度提前“回跳”.

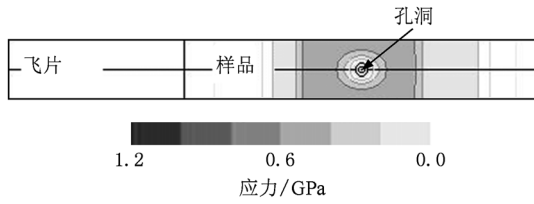


图4 平均应力场云图

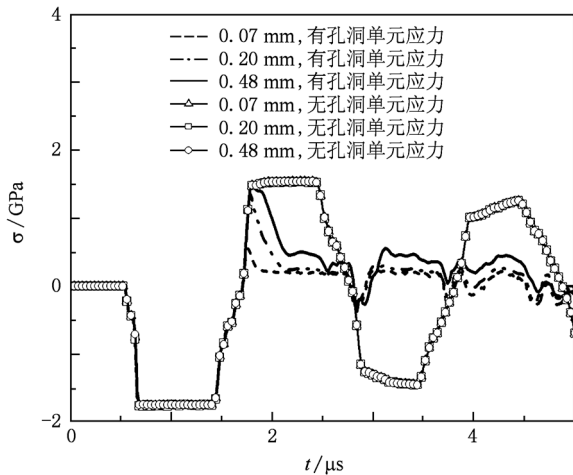


图5 典型单元轴向应力时程曲线

采用同样的有限元模型,我们对其余三发高纯铝层裂实验进行了数值模拟,计算得到的自由面速度波剖面也示于图1,计算结果与实验结果经对比分析后可以发现:对于部分层裂实验,无论是自由面速度“回跳”信号还是后续波形振荡信号符合都非常好;但对于第四发完全层裂实验,计算结果与实验结果符合不好,计算的自由面速度“回跳”信号出现的时间迟一些,并且后续波形振荡信号要弱一些,这主要是因为本文的数值分析模型中没有考虑微孔洞聚集形成断裂面这一物理过程.在冲击加载速度比较高的条件下,样品内微孔洞可以充分长大,但是事实上微孔洞并不是可以无限制地长大,当微孔洞长大到一定阶段后,微孔洞之间会发生快速聚集过程.在这一点上数值模拟与实验不相符,从而导致计算自由面速度波剖面与实验结果符合程度较差.上述数值模拟结果和实验结果的对比研究表明,采用单孔洞增长来近似描述部分层裂样品中随机损伤发展及其对波传播的影响是可行的,同时也证实了许多理论分析模型经常采用的单孔洞近似假定是合理的,但对于完全层裂,需要考虑微孔洞之间的聚集效应.

从自由面速度波剖面上可以获得速度“回跳”幅值 Δu ,实验结果和数值模拟结果都列于表1.从表1可知,随着冲击速度的增加,“回跳”幅值 Δu 在增大.如果基于自由面速度波剖面解读层裂问题的传统观点,用速度“回跳”幅值 Δu 来计算材料的层裂强度,由此得到材料的层裂强度随着外载荷强度的增大而增大.显然,这样的认识是错误的.对于部分层裂样品内部仅仅产生了许多微孔洞,处于损伤发展阶段,用此阶段的“回跳”幅值 Δu 来计算层裂强度是没有意义的.“回跳”幅值 Δu 随冲击速度变化的原因也是与微孔洞周围形成的卸载波密切相关.图6给出了不同冲击速度下微孔洞周围一典型单元的轴向拉伸应力时程曲线,结果显示:冲击速度越大,典型单元在其轴向应力被卸载前所承受的拉伸应力越大.由此认为,随着携带这些样品内部应力卸载特性的应力波传播到自由面上,自由面速度波剖面就会表现出“回跳”幅值 Δu 的变化.另外,图6中显示微孔洞周围典型单元轴向拉伸应力在 $1.8 \mu\text{s}$ 左右开始被卸载.如果考虑到从微孔洞到自由面之间的距离约为 3 mm ,应力波在高纯铝中传播速度约为 6000 m/s ,可知应力波自微孔洞传播到自由面需要的时间约为 $0.5 \mu\text{s}$.因此,我们可以得到微孔洞周围所产生的卸载波效应传播到自由面上所对应的时刻应该在 $2.3 \mu\text{s}$ 左右,图1中显示自由面速度波剖面上速度开始“回跳”的时间也恰好在 $2.3 \mu\text{s}$.这里,从波传播时间上再次检验了自由面速度波剖面上出现“回跳”是样品内部微孔洞周围卸载波效应引起的.

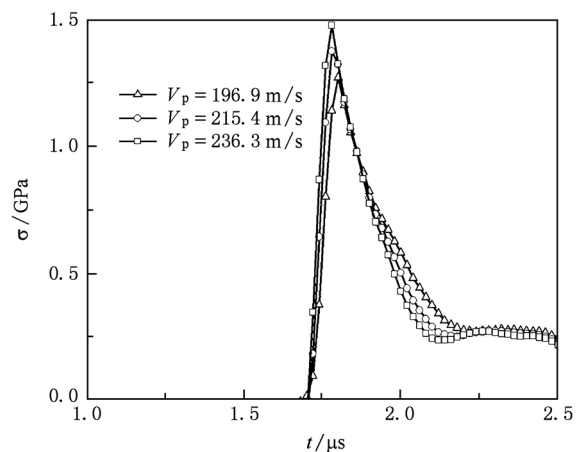


图6 典型单元轴向拉伸应力时程曲线

图7给出了不同撞击速度下胞模型中微孔洞相对体积随时间的演化过程.从图7可以看出:部

分层裂样品内部微孔洞长大并不是拉伸应力波单次作用的结果,而是拉伸应力波多次作用的结果,其中第一次拉伸应力波的贡献比较大,随着后续拉伸应力波被削弱,贡献越来越小,最后达到一个稳定阶段. 基于图 2 所示回收样品的金相照片,获得了不同冲击速度下样品中微孔洞相对体积的分布,结果如图 8 所示. 从图 8 可以看出,最大微孔洞相对体积的位置都在样品中心处(距离自由面 3 mm),并且绝大多数微孔洞集中在距离自由面 2.5—3.5 mm 这一窄条内. 为了与计算结果进行比较,考虑到数值模拟中基于统计平均意义上单孔洞近似假设,我们也对宽度为 1 mm 窄条内的微孔洞相对体积进行统计平均,获得了三发实验样品中心区域 1 mm 范围内微孔洞相对体积的平均值分别为 0.12, 0.18, 0.28. 从图 7 可以看出,不同撞击速度的三发实验样品中最终微孔洞相对体积的数值模拟结果分别是 0.13, 0.19, 0.26. 微孔洞相对体积的计算

结果和实验结果也符合很好. 这再次表明,从宏观统计平均角度来讨论层裂问题时,可以把实验样品中随机分布的多孔洞长大行为等效成一个单孔洞长大来进行近似描述.

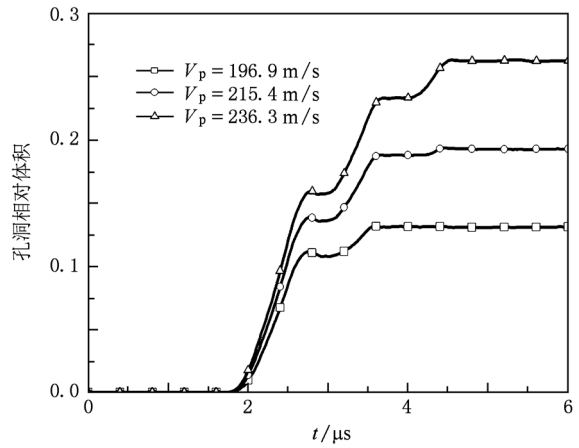


图 7 胞体模型中微孔洞相对体积的演化

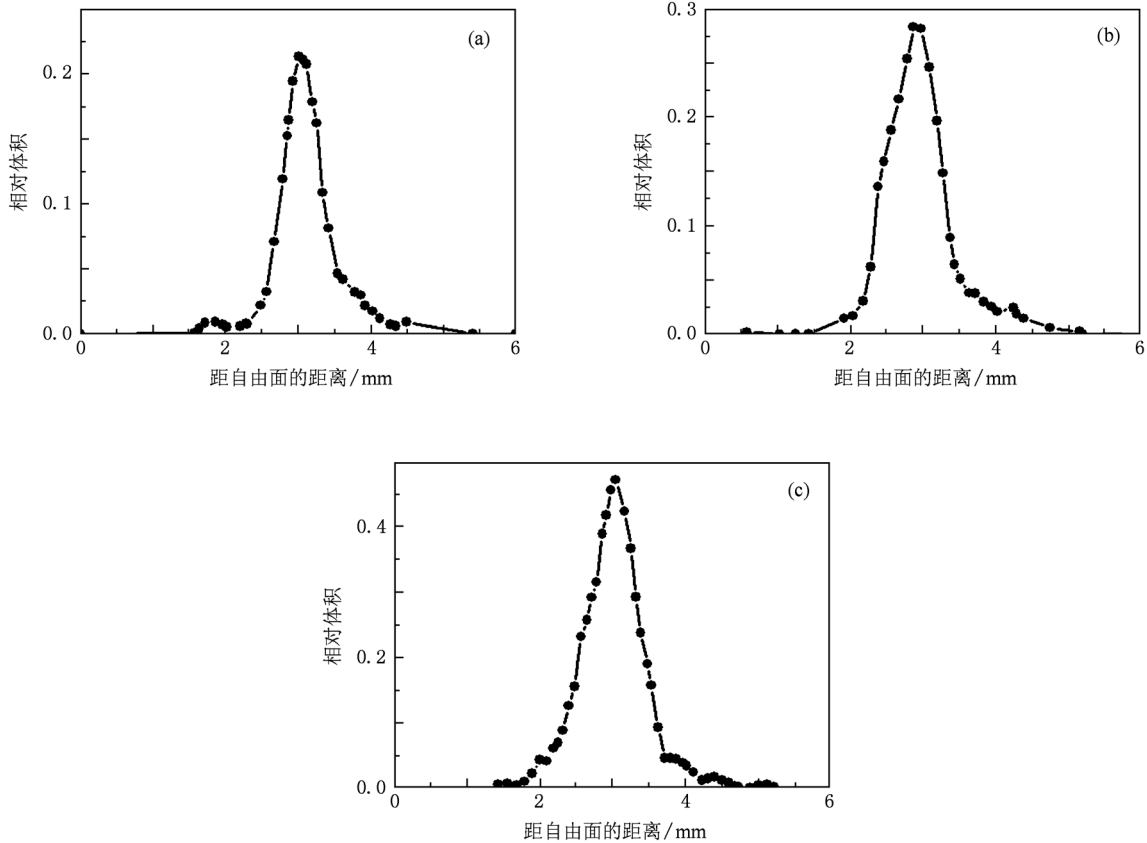


图 8 回收样品中微孔洞相对体积的分布 (a) $V_p = 196.9 \text{ m/s}$, (b) $V_p = 215.4 \text{ m/s}$, (c) $V_p = 236.3 \text{ m/s}$

5. 结 论

基于不同撞击速度下高纯铝层裂实验结果,采

用 Ls-dyna 瞬态动力学有限元程序和单孔洞近似假设,讨论了样品内部微孔洞长大过程及其与自由面速度波剖面典型特征之间的关联性. 通过分析微孔洞周围的应力场变化,认识到实测自由面速度波剖

面出现“回跳”特征并不能说明材料发生完全层裂,它的直接原因是样品内部微孔洞长大所引起的局部卸载效应,利用自由面速度“回跳”幅值来计算材料层裂强度时需要谨慎. 计算得到自由面速度波剖

面和微孔洞相对体积都与实验结果符合很好,表明采用单孔洞增长来近似描述部分层裂样品中随机损伤发展及其对波传播的影响是可行的,证实了理论分析模型经常采用的单孔洞近似假设是合理的.

- [1] Curran D R, Seaman L, Shockey D A 1987 *Phys. Rep.* **147** 253
- [2] Luo J, Zhu W J, Lin L B, He H L, Jing F Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2791 (in Chinese) [罗晋、祝文军、林理彬、贺红亮、经福谦 2005 物理学报 **54** 2791]
- [3] Deng X L, Zhu W J, He H L, Wu D X, Jing F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4767 (in Chinese) [邓小良、祝文军、贺红亮、伍登学、经福谦 2006 物理学报 **55** 4767]
- [4] Seppälä E T, Belak J, Rudd R E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 245503
- [5] Qi M L, He H L, Yan S L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5965 (in Chinese) [祁美兰、贺红亮、宴石林 2007 物理学报 **56** 5965]
- [6] Deng X L, Zhu W J, Song Z F, He H L, Jing F Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4772 (in Chinese) [邓小良、祝文军、宋振飞、贺红亮、经福谦 2009 物理学报 **58** 4472]
- [7] Barker L M, Hollenbach R E 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 4669
- [8] Antoun T, Seaman L, Curran D R, Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 2003 *Spall Fracture* (New York: Springer-Verlag)
- [9] Wang Y G, Chen D P, He H L, Wang L L, Jing F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4202 (in Chinese) [王永刚、陈登平、贺红亮、王礼立、经福谦 2006 物理学报 **55** 4202]
- [10] Tollier L, Fabbro R, Bartnicki E 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 1231
- [11] Wang Y G, He H L, Wang L L, Jing F Q, Boustie M, Sekine T 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 033511
- [12] Czarnota C, Jacques N, Mercier S, Molinari A 2008 *J. Mech. Phys. Sol.* **56** 1624
- [13] Qi M L, He H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 036201
- [14] He H L 2009 *Chin. J. High Press. Phys.* **23** 1 (in Chinese) [贺红亮 2009 高压物理学报 **23** 1]
- [15] Seaman L, Curran D R, Shockey D A 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 4814
- [16] Tollier L, Fabbro R, Bartnicki E 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 1231

Simulation of incipient spallation experiments of high purity aluminum based on a single void growth model*

Wang Yong-Gang^{1)†} Hu Jian-Dong¹⁾ Qi Mei-Lan²⁾ He Hong-Liang³⁾

1) (*Mechanics and Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)

2) (*School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

3) (*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 13 December 2010; revised manuscript received 8 July 2011)

Abstract

By means of a single void growth model, finite element simulations of incipient spallation experiments of high-purity aluminum under different plate impact velocities are carried out. The relationship between the influence of void growth in the sample on wave propagation and the feature of free surface velocity profile is discussed. By analyzing the change of stress field around the void, the occurrence of pullback signal in free surface velocity profiles is attributed to the local unloading wave effect caused by void growth in the sample, which cannot indicate the whole spallation of materials. Free surface velocity profiles and relative void volumes are simulated for different impact velocities and the simulation results are in good agreement with experimental results, which indicates that the stochastic damage evolution in incipiently spalled sample can be described by a single void growth in cell model.

Keywords: spallation, void growth, free surface velocity profiles, relative void volume

PACS: 62.20.mm, 46.50.+a, 46.15.-x

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10876014, 11072119), the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. B1520110004), and the K. C. Wong Magna Foundation of Ningbo University, China.

† E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn