

延性金属层裂自由面速度曲线物理涵义解读

裴晓阳 彭辉 贺红亮 李平

Discussion on the physical meaning of free surface velocity curve in ductile spallation

Pei Xiao-Yang Peng Hui He Hong-Liang Li Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034601 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一类异构多智能体系统固定和切换拓扑下的一致性分析

Consensus analysis for a class of heterogeneous multi-agent systems in fixed and switching topology

物理学报.2014, 63(22): 220201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.220201>

γ 射线辐照对掺 Yb 光纤材料性能的影响

Effects of γ -radiation on Yb-doped fiber

物理学报.2014, 63(20): 200201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.200201>

黏弹性流体充模过程中凝固现象的数值模拟

Simulation of solidification with phase-change in viscoelastic moldfilling process

物理学报.2014, 63(8): 084601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084601>

晶粒尺度对延性金属材料层裂损伤的影响

Effects of grain size on the dynamic tensile damage of ductile polycrystalline metall

物理学报.2013, 62(16): 164601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164601>

黏弹性熔体充模流动诱导残余应力模拟

Simulation of residual stress in viscoelastic mold filling process

物理学报.2012, 61(23): 234602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.234602>

延性金属层裂自由面速度曲线物理涵义解读*

裴晓阳^{1)†} 彭辉²⁾ 贺红亮¹⁾ 李平¹⁾

1) (中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

2) (北京理工大学, 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

(2014年8月12日收到; 2014年9月15日收到修改稿)

对延性金属层裂自由面速度曲线上典型特征所蕴含的物理涵义进行了新的解读. 揭示了自由面速度曲线上宏观响应特征和微孔洞成核、长大和聚集的微损伤演化动力学之间的关联: Pullback 信号的临界点对应于微孔洞的成核, Pullback 幅值表征了损伤成核或起始的条件——成核强度; Pullback 信号之后的回跳斜率代表了损伤演化速率, Pullback 信号后速度回跳幅值从一定程度上反映了损伤程度; Pullback 信号之后的振荡周期模式反映了损伤的局域化状态.

关键词: 层裂, 自由面速度曲线, 宏观响应特征, 微损伤演化

PACS: 46.35.+z, 46.50.+a, 02.10.Yn, 33.15.Vb

DOI: 10.7498/aps.64.034601

1 引言

高强动载荷下延性金属的动态拉伸破坏是武器物理学和工程学的一个重要基础科学问题, 具有非常广泛的应用背景. 层裂作为一种典型的材料动态拉伸断裂形式, 不仅包含了材料在强冲击载荷下破坏过程的丰富内容, 而且实验实施简单、理论分析方便, 因此一直是研究材料动态拉伸断裂问题的基本手段. 在 Butcher 等^[1] 提出损伤随时间累积的概念之前, 早期提出的以层裂强度为基础的瞬态型断裂准则^[2-4] 还没有认识到拉伸脉冲时间的重要性, Barbee 等^[5] 则通过层裂软回收样品的显微表征为这一概念的确立奠定了强有力的实验基础. 在此基础上, Davison^[6] 基于连续介质理论提出了损伤度概念, 基于这一物理思想, 结合 Curran 等^[7] 大量的实验积累, 延性金属层裂是由于材料内部的微损伤(孔洞)成核、长大以及聚集, 最后导致材料发生灾变式断裂的一种损伤演化动力学过程, 这已成为目前大家公认的延性金属层裂的基本物理内

涵. Meyers 和 Aimone^[8] 对 1983 年以前关于层裂破坏的主要研究结果进行了比较系统的总结和评述, Kanel 等^[9] 对俄罗斯科学家对层裂的研究进行了系统综述, 2003 年, 文献^[10] 对层裂的研究历史和现状作了权威性评述. 近年来, 国内也有不少学者^[11-14] 通过实验、理论和数值模拟对层裂开展了深入研究.

层裂理论上的认识和发展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. 图 1(a) 是平板撞击方式开展层裂破坏实验的原理示意图, 具体原理为: 在 t_0 时刻, 飞片以一定速度撞击靶板, 向飞片和靶板中各自传入一个冲击波, 当冲击波到达飞片后界面和靶板自由面时, 都会被反射形成稀疏波. 由于飞片厚度小于靶板厚度, 两束相向的稀疏波在靶板中相遇, 产生拉伸应力, 如果拉伸应力脉冲足够强, 经过一定的孕育时间, 层裂将会发生. 材料发生层裂后, 层裂面会改变后续波的传播使之成为压缩波, 该压缩波和穿过层裂面的右行稀疏波

* 中国工程物理研究院发展基金(批准号: 2011A0201002)、国家自然科学基金(批准号: 11202196)和国防基础科研计划(批准号: B1520110003)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: peixiaoyang2000@sina.com

构成的层裂脉冲停留在层裂片内, 往返反射直至最后衰减. 上述层裂过程, 采用VISAR等表面速度诊断技术对自由面速度历史进行测量, 通常可以得到图1(b)所示的自由面速度曲线, 即冲击波到达靶板自由面时刻(t_1), 自由面速度突然增加达到加载平台值 u_{max} ; 当从飞片后自由面反射的右行稀疏波波头穿越靶板到达靶板自由面时(t_2), 自由面速度开始下降; 当层裂发生后, 由于后续稀疏波在层裂面被反射的压缩波到达自由面时(t_3), 自由面速度

从最低点 u_{min} 又重新回跳, 称为Pullback信号; 此后居留层裂片内的层裂脉冲在层裂片内往复反射, 在自由面速度剖面上形成周期性振荡. 自由面速度剖面信息为实时信息, 当前基于VISAR, DISAR等光学表面诊断技术的时间分辨率可达亚纳秒量级, 从中可以分析层裂损伤演化过程中材料宏观响应的时空历程, 加载应力幅值、拉伸应变率、层裂强度和层裂片厚度等诸多宏观物理量都可依据相关分析获得.

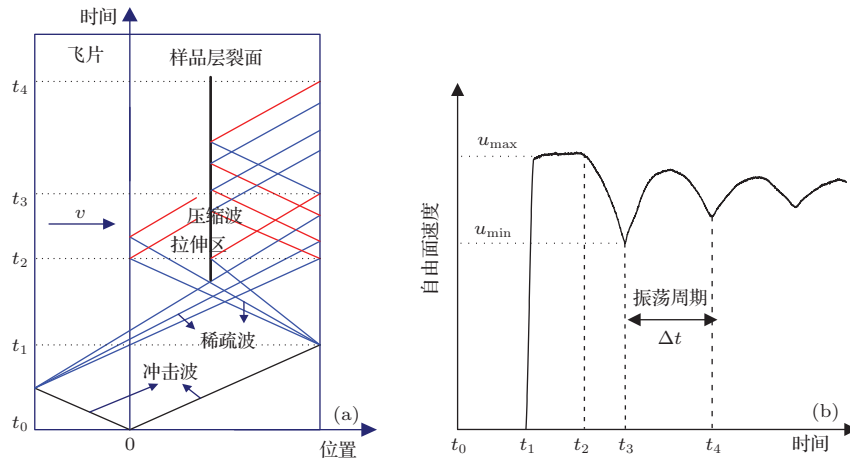


图1 层裂破坏的实验原理及自由面速度剖面特征示意图 (a) 层裂破坏的实验原理; (b) 自由面速度剖面特征

但是, 必须指出上述层裂破坏实验原理只是给出了简化的层裂过程, 实际上真实的材料响应过程要复杂得多. 延性金属的层裂是材料内部非均匀微细观结构被激活并随时空演化的动力学过程, 材料从经受拉伸到完全破坏要经历一个能量耗散、损伤累积和性能退化的过程, 这都会对波的传播过程造成影响. 因此, 确切地讲, 自由面速度曲线是损伤演化动力学过程中微结构演化和宏观响应场相互作用的一种宏观表象, 对其解读和认知程度取决于对损伤演化动力学的理解. 目前, 由于对损伤演化动力学过程难以直接观测, 使我们对层裂过程中的材料宏观响应和微结构演化之间的关联认识还存在诸多不足, 进而对自由面速度曲线的理解也存在诸多争议. 比如对于速度回跳点的物理意义, Zurek等^[15]认为此时材料已完全分离; Eftis等^[16]指出回跳速度值与拉伸应力松弛量相关联、并对应于一定量的损伤; Kanel等^[17]观察到, 即使层裂面的损伤非常小, 速度剖面仍有层裂回跳信号产生. 对于Chen和Asay等^[18]发现的在自由面速度曲线上速度回跳后出现的shoulder效应, 其物理意义目前也无法合理解释, Kanel等^[19]针对这一阶段建立了

自由面速度上升斜率和材料内部损伤演化率的定性关联, 但还缺乏实验依据来支撑. 此外, Thissell等^[20]在实验中发现, 在自由面速度曲线近似的情况下, 材料内部的损伤相差很大. 贺红亮^[21]也曾对从自由面速度曲线来解读层裂实验过程的诸多片面性进行了分析.

本文在综合大量层裂实验结果分析基础上, 结合理论分析和微损伤演化动力学理解, 对延性金属层裂自由面速度曲线上一些典型特征所蕴含的物理涵义进行了澄清, 揭示了Pullback信号、Pullback幅值、Pullback回跳斜率和幅值、振荡周期模式等典型特征所蕴含的损伤演化动力学规律和特性.

2 自由面速度曲线典型特征的物理解读

2.1 Pullback信号的物理涵义

Pullback信号一直是用来判断层裂是否发生的一个重要依据, 如图2(a)所示. 然而, 实验结果^[17]表明, 即使层裂面的损伤非常小, 速度剖面

仍有层裂回跳信号产生. 文献[22]的系列实验结果也表明: 在不同的拉伸持续时间情况下, Pullback幅值几乎相同, 终态损伤却大相径庭, 包括从孤立

的孔洞分布损伤到完全层裂情形. 因此, 可以排除Zurek等[15]的观点, 即自由面速度曲线的回跳信号并不是材料完全分离的一个标志.

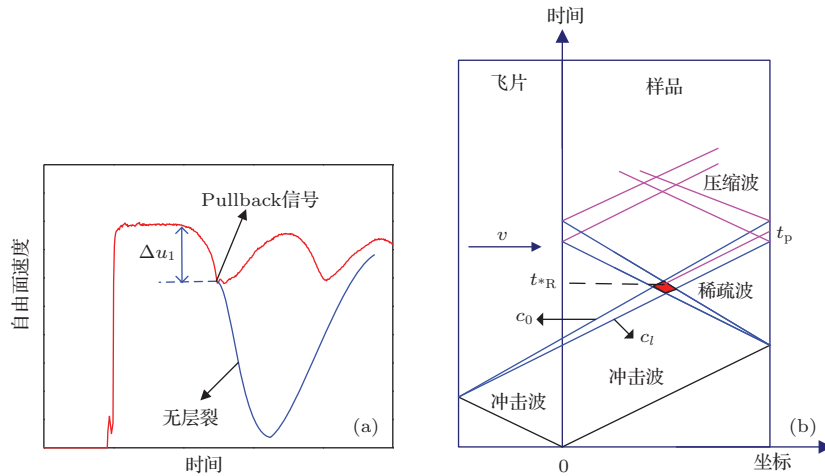


图2 (网刊彩色) Pullback信号波系分析 (a)自由面速度曲线上的Pullback信号; (b) Pullback信号的波系分析

首先由波系分析来确定速度回跳点所对应的层裂面的响应行为. 如图2(b)所示, 自由面的速度出现回跳(即 t_P 时刻), 表明一定有右行压缩波从潜在层裂面产生并传播至自由面, 而在经受拉伸的材料中产生压缩波表明潜在层裂面发生了拉伸应力松弛, 这与Eftis等[16]的观点一致. 而且可由反证法进一步可证明该应力松弛发生的时刻(t_{*R})应位于两束稀疏波的穿透区域(图2(b)中的红色四边形区域)内, 即如果该时刻在穿透区域之外, 从飞片后自由面反射的右行稀疏波将会全部传播至自由面, 这将会导致自由面速度被拉回至零值, 对应于图2(a)中所示的无层裂情形.

其次, 确定发生应力松弛时损伤状态. 由于稀疏波波头以弹性纵波声速传播, 波尾以零压声速传播, 可由声学近似估算稀疏波的穿透区的时间尺度, 如下式:

$$\Delta t = \frac{h_t}{c_0} - \frac{h_t}{c_l}, \quad (1)$$

其中, h_t 分别为靶的厚度, c_l 和 c_0 分别为弹性纵波声速和零压声速. 对于实验中毫米级厚度的飞片和样品, 由(1)式估算稀疏波的穿透区的时间大约为几十纳秒, 也就是指层裂面由最大压应力变化到最大拉伸应力的时间, 通过数值模拟也证实了上述分析. 图3(a)为数值模拟计算的层裂过程压力云图, T_1 和 T_2 分别为稀疏波穿透区(如图2(b)中所示)的两个时间极值, 而在层裂面应力历史上则对应于由最大压应力变化到最大拉伸应力的时刻

(图3(b)中所示). 因此, 可以推断, 发生应力松弛时层裂面经历的拉伸作用时间($t_{*R}-t_{*T}$)还要更短, 这时的损伤没有足够的时间得以发展. 结合实验结果, 发生应力松弛时刻 t_{*R} 的损伤应比实验观测到的最小损伤还要小得多. 再次, 结合微孔洞成核、长大和聚集的损伤演化动力学过程, 应力松弛意味着发生了能量耗散. 考虑到微孔洞的成核过程非常短暂, 而且消耗的能量基本可以忽略. 而微孔洞长大是通过孔洞周围基体材料的塑性变形发生的, 加上惯性效应则伴随强烈的能量耗散. 因此, 一旦微孔洞成核完成, 长大过程将发生强烈的能量耗散, 引起成核区域的应力松弛, 而这时的损伤对应于成核损伤. 即稀疏波穿透区内的微孔洞成核完成或早期增长造成了应力松弛的发生, 引起了自由面速度曲线上的Pullback信号. Bonora等[23]也认为Pullback信号和微孔洞成核密切相关, 但未给出理论解释.

此外, 自由面速度Pullback的幅值(图1(a)中所示 $\Delta u_1 = u_{\max} - u_{\min}$)常被作为预估层裂强度的依据. 而且许多学者曾指出层裂强度的估算需要考虑弹塑性变形、层裂片厚度及损伤造成应力松弛等因素的影响, 在此不再赘述. 但通过上述分析表明, 既然Pullback信号代表微孔洞成核完成, 那么Pullback的幅值也不能代表层裂强度, 应代表损伤或孔洞成核的条件, 也可理解为材料抵抗损伤起源的强度或成核强度.

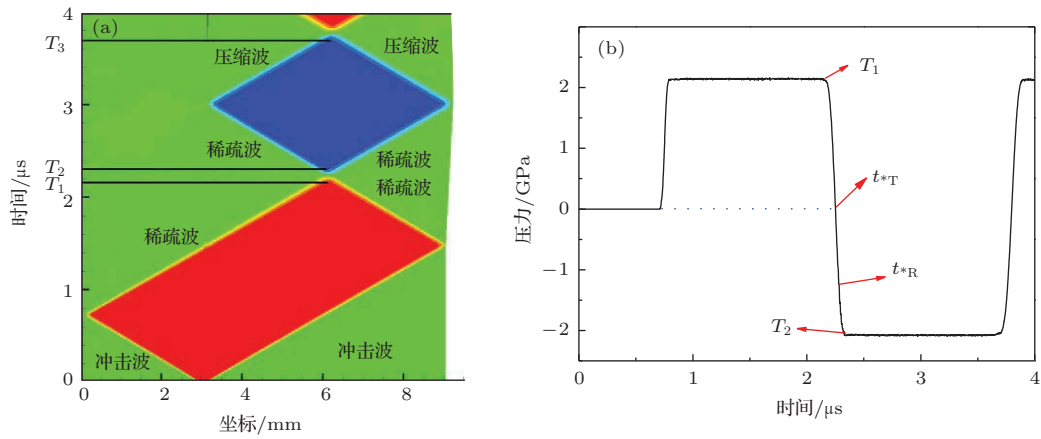


图3 (网刊彩色)层裂过程数值模拟分析 (a)层裂过程压力云图; (b)层裂面的应力历史

2.2 回跳速率和回跳幅值得物理涵义

文献 [22] 中通过实验发现 Pullback 信号之后的速度回跳斜率和损伤演化速率具有正比对应关系, 如图 4 所示. 随着加载应力幅值的升高, Pullback 回跳斜率增大, 同时损伤演化速率增大.

Kanel 等 [17] 基于特征线方法建立了 Pullback 信号速度回跳斜率和材料内部损伤演化速率的定量关联, 具体形式如下:

$$\frac{dFSV}{dt} = A(\dot{V}_V - B), \quad (2)$$

式中 FSV 代表自由面速度, \dot{V}_V 代表孔隙度长大率, A 和 B 为材料参数. 上述关系式表明自由面速度曲线中 Pull back 速度回跳的斜率和损伤演化速率存在正比关系. 实际上, 从宏观波系分析可知, Pullback 信号之后的回跳斜率取决于损伤区域应力松弛的速率, 而应力松弛的速率取决于损伤演化过程中的能量耗散的快慢, 进而能量耗散的快慢是和损伤演化速率直接相关的. 所以, Pullback 信号速度回跳斜率反映了损伤发展的速率.

通过对 (2) 式进行时间积分, 得到

$$V_V = \int_0^{t_T} \left(\frac{1}{A} \frac{dFSV}{dt} + B \right) dt. \quad (3)$$

(3) 式表明速度回跳幅值从一定程度上反映了损伤的程度. 文献 [22] 中, 给出了无氧铜层裂实验中 Pullback 信号后速度回跳幅值和回收样品损伤的关联曲线, 如图 5 所示, 其中横轴坐标代表 Pullback 信号后速度回跳幅值 (Δu_2) 和 Pullback 幅值 (Δu_1) 之比, 纵轴坐标为软回收样品损伤度最大值.

可以看出, 当 $\Delta u_2/\Delta u_1$ 小于 0.3 时, 损伤很小, 当 $\Delta u_2/\Delta u_1$ 大于 0.3 时, 损伤随着 $\Delta u_2/\Delta u_1$ 的增大快速增加, 当 $\Delta u_2/\Delta u_1$ 大于 0.5 时, 回收样品显示为完全层裂.

综上所述, Pullback 信号后速度回跳斜率代表了损伤演化速率, Pullback 信号后速度回跳幅值从一定意义上代表了损伤程度.

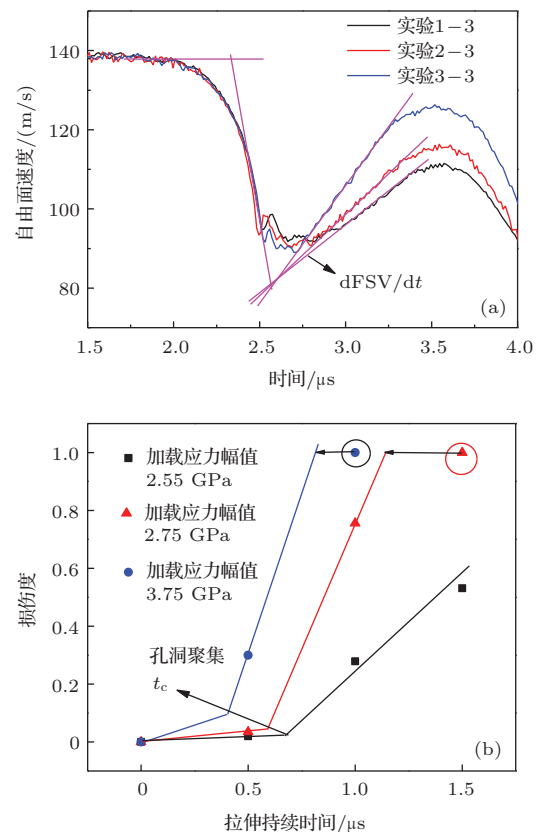


图4 (网刊彩色) Pullback 信号速度回跳斜率和损伤演化速率的实验结果 (a) 不同加载应力幅值下的 Pullback 速度回跳斜率; (b) 损伤演化速率

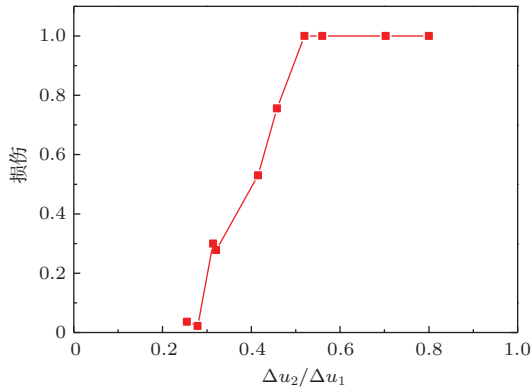


图5 损伤-Pullback 幅值关联曲线

2.3 振荡周期模式的物理涵义

Pullback 信号后的振荡周期常用来判断实验样品是否完全层裂, 具体来讲, 可由速度振荡周期估算层裂片厚度

$$h = \Delta t c_l / 2, \quad (4)$$

式中, Δt 为第一个层裂震荡的周期(图 1 所示), c_l 为弹性纵波声速. 对于飞片撞击靶板情形, 如果由自由面速度曲线上的振荡周期 Δt 计算得到的 h 与飞片厚度相当, 则说明样品发生了完全层裂; 反之, 如果计算得到的 h 与初始样品厚度相当, 则样品未发生完全层裂. 然而文献 [22] 通过实验发现三种典型的周期振荡模式, 而且, 三种振荡模式分别对应于三种典型的损伤状态, 如图 6 所示.

首先, 模式一对应的损伤状态为完全层裂, 也是最为常见的层裂曲线. 周期表现为非常规则的振荡, 依据周期长短和 (4) 式计算的厚度与回收样品层裂片厚度完全符合; 振荡的平衡位置(速度)基本保持不变, 对应于层裂片自由飞行情形; 振幅随着时间轻微减小, 说明残余层裂脉冲在层裂片内往返传播中有所衰减. 其对应的应力波过程如图 7(a) 所示, 该振荡模式是由于残余层裂脉冲在自由飞行的层裂片中往返传播造成的.

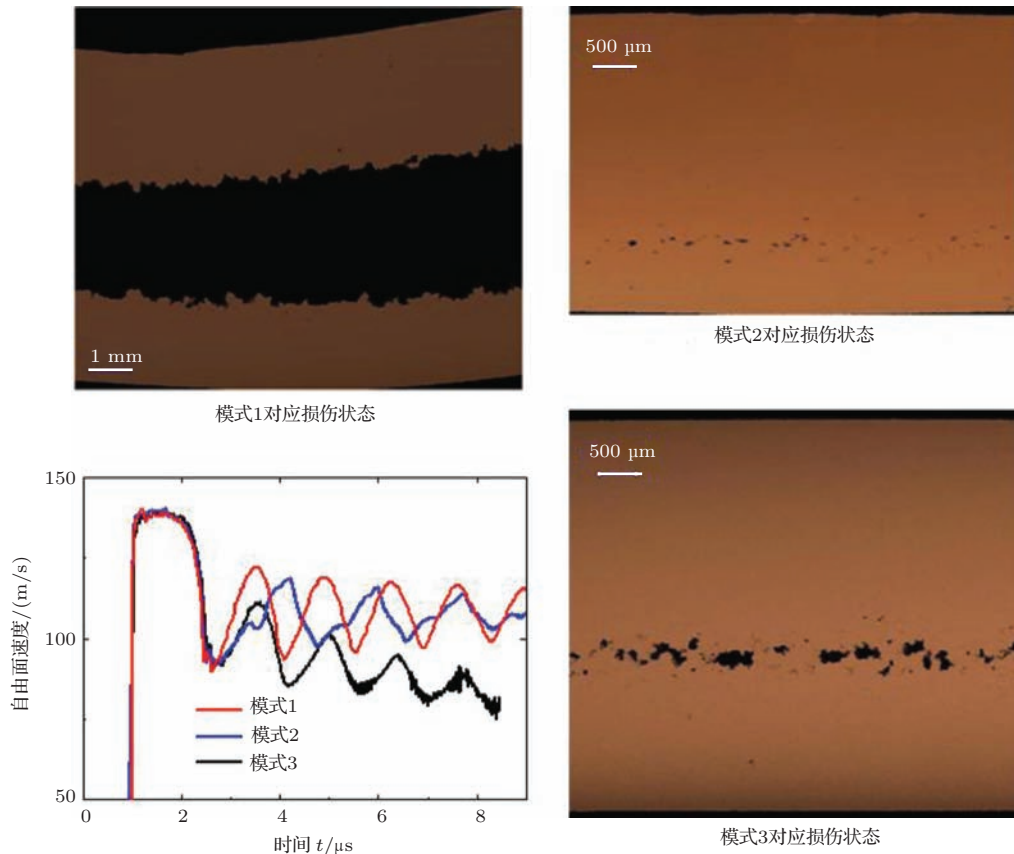


图6 (网刊彩色) 三种典型的周期振荡模式所对应的损伤状态

其次, 模式二对应的损伤状态为孤立孔洞类型, 周期表现为不规则的振荡, 依据周期长短和 (4) 式计算的厚度与整个初始样品厚度完全符合, 表明

脉冲仍在整个初始样品厚度内往返传播; 同时在每个周期速度上升段有一个小的锯齿形拐折, 说明损伤面对从碰撞面透射的压缩波有延迟作用; 平衡

位置也基本保持不变, 对应于整个样品自由飞行状态; 振幅随着时间有所减小, 表明残余脉冲在往返传播中有所衰减. 表明孤立孔洞损伤状态下, 损伤较小, 损伤区材料的阻抗或刚度稍微降低, 其对应的应力波过程如图 7(b) 所示.

最后一种情形, 模式三对应的损伤状态为微孔洞的聚集状态, 损伤状态介于上述两者之间. 依据周期长短和 (4) 式计算的厚度与层裂片厚度完全符合, 但振荡的平衡位置 (速度) 随着时间不断降低, 表明层裂脉冲主要在损伤面和自由面之间往返传播, 但是在到达损伤面时没有被完全反射 (如图 7(c) 所示); 接下来每一个速度振荡周期的幅度

和振荡幅值都不断减小, 说明应力波在每一次经过损伤区域时并未被完全反射, 发生了耗散. 可见, 微孔洞聚集是损伤局域化进程中材料刚度或阻抗显著软化的主要标志. 因为在微孔洞聚集过程中, 相邻孔洞间的基体发生快速塑性失稳, 造成损伤区材料的表观刚度或强度迅速软化, 进而对波的传播造成显著影响.

综合上述情况表明, 振荡周期并不能反映样品是否完全层裂, 只是各种波在具有复杂阻抗梯度 (损伤演化导致) 材料中相互作用的一种宏观表象, 但是依据振荡周期模式可以判别样品的损伤局域化状态.

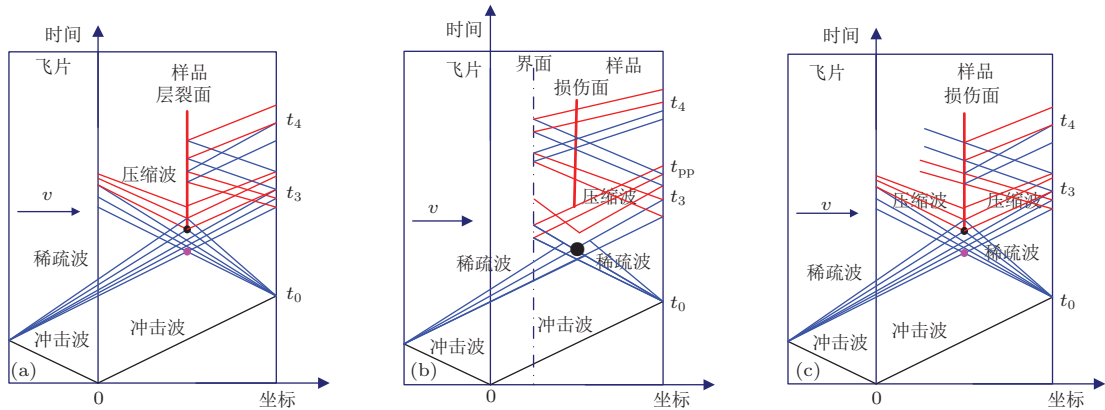


图 7 三种速度振荡周期对应的应力波过程 (a) 完全层裂; (b) 孤立孔洞; (c) 孔洞聚集

3 结 论

本文通过自由面速度剖面和损伤演化动力学过程的关联分析对自由面速度曲线的物理涵义进行了全新解读, 自由面速度剖面上的宏观响应特征和微孔洞成核、长大、聚集至完全断裂的损伤演化动力学过程具有对应关系 (如图 8 所示). 首先, 对 Pullback 信号的临界点的物理涵义给予阐述, 临界

点对应于微孔洞的成核和早期长大, Pullback 幅值代表了损伤成核或起始的条件——成核强度; 其次, Pullback 信号之后的回跳斜率代表了损伤演化速率, Pullback 信号后速度回跳幅值从一定程度上反映了损伤程度; 最后, Pullback 信号之后的振荡周期反映了损伤的局域化状态, 存在三种典型的周期模式分别对应于三种典型的损伤状态, 表明微孔洞聚集过程中材料的表观刚度或强度迅速软化.

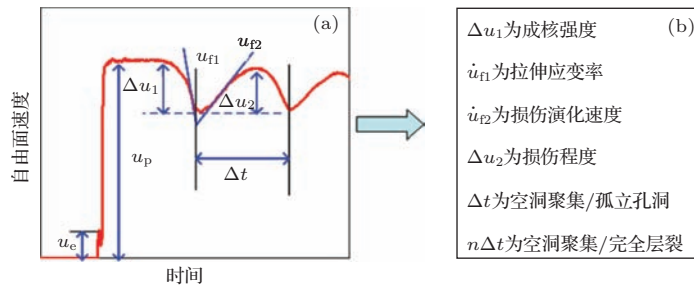


图 8 自由面速度曲线典型特征的物理涵义 (a) 自由面速度剖面典型特征物理量; (b) 典型特征量对应的损伤特性

参考文献

- [1] Tuler F R, Butcher B M 1968 *Int. J. Fract. Mech.* **4** 431
- [2] Rinehart J S 1952 *J. Phys.* **23** 1229
- [3] Whiteman P 1962 *AWRE-SWAN* **10** 61
- [4] Bread B R, Mader C L, Venable D 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 3271
- [5] Barbee T W, Seaman L, Crewdson R, Curran D 1972 *J. Mater.* **7** 393
- [6] Davison L 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 988
- [7] Curran D R, Seaman L, Shockey D A 1987 *Phys. Rep.* **147** 253
- [8] Meyers M A, Aimore C T 1983 *Progress in Materials Science* **28** 1
- [9] Kanel G I, Rasorenov S V, Utkin A V 1995 High-Pressure shock compression of solids II New York: Springer-Verlag
- [10] Antoun T, Seaman L, Curran D R, Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 2003 *Spall Fracture* (New York: Springer-Verlag)
- [11] 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, 洪滔 2011 物理学报 **60** 074601]
- [12] Wang Y G, Hu J D, Qi M L, He H L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 126201 (in Chinese) [王永刚, 胡剑东, 祁美兰, 贺红亮 2011 物理学报 **60** 126201]
- [13] Zhang F G, Zhou H Q, Hu J, Shao J L, Zhang G C, Hong T, He B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094601
- [14] Qi M L, He H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 036201
- [15] Zurek A, Thissell W, Johnson J N, Tonks D, Hixson R. J 1996 *Mater Process Technol* **60** 261
- [16] Eftis J, Nemes J A, Randles P 1991 *Int. J. Plasticity.* **7** 15
- [17] Kanel G, Razorenov S, Bogatch A, Utkin A, Grady D 1997 *Int. J. Impact. Eng.* **20** 467
- [18] Chen X, Asay J R, Dwivedi S K, Field D P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023528
- [19] Kanel G I, Utkin A V 1996 *AIP Conf Proc* (New York: Springer-Verlag) 370
- [20] Thissell W R, Zurek A K 1998 *LA-UR* **98** 3441
- [21] Hongliang H 2009 *High Pre. Acta Phys. Sin.* **62** 226201 (in Chinese) [贺红亮 2009 高压物理学报 **62** 226201]
- [22] Pei X Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (MianYang: CAEP) (in Chinese) [裴晓阳 2013 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [23] Bonora N, Milella P P 2004 SPC 01-4054 N F 61775-01-C 0003

Discussion on the physical meaning of free surface velocity curve in ductile spallation*

Pei Xiao-Yang^{1)†} Peng Hui²⁾ He Hong-Liang¹⁾ Li Ping¹⁾

1) (*Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*State Key Laboratory of Explosion and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

(Received 12 August 2014; revised manuscript received 15 September 2014)

Abstract

The physical meaning of ductile spall fracture corresponding to the typical properties in free surface velocity curve has been discussed. A correlation between the macroscopic responses and the evolution of mic-damage is established; the pullback signal the found to correspond to the condition for nucleation of voids, and the rate at which the velocity rises to the first peak beyond the minima corresponds to the rate of damage evolution, and by using the velocity period after the the pullback signal we can distinguish the state of damage.

Keywords: spall fracture, free surface velocity curve, character of macroscopic response, microscopic damage evolution

PACS: 46.35.+z, 46.50.+a, 02.10.Yn, 33.15.Vb

DOI: [10.7498/aps.64.034601](https://doi.org/10.7498/aps.64.034601)

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2011A 0201002), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11202196), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. B1520110003).

† Corresponding author. E-mail: peixiaoyang2000@sina.com