

动态拉伸加载下高纯铝破坏的临界行为^{*}

祁美兰^{1)†} 贺红亮^{1)†} 晏石林²⁾

1) 武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

2) 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 绵阳 621900)

(2007 年 4 月 10 日收到, 2007 年 6 月 4 日收到修改稿)

以高纯铝(99.999%)作为延性金属的模拟材料,在一级气体炮上开展了一维应变平面冲击波加载实验.通过对不完全层裂的回收样品进行细观微损伤统计分析,讨论了高纯铝动态破坏时发生的临界行为.文中定义拉伸应力和拉伸作用时间的乘积为拉伸(作用)冲量.统计发现,随着拉伸冲量的增加,样品中的损伤呈现明显的临界行为特征:当拉伸冲量较小时,损伤以线性方式缓慢增长,当拉伸冲量足够大,且超过一定的临界阈值以后,损伤以幂指数形式快速增长.初步实验结果表明,高纯铝的拉伸冲量临界阈值约为 $0.34 \text{ GPa} \cdot \mu\text{s}$,对应的损伤临界值约为 0.12.

关键词:高纯铝,临界行为,拉伸冲量,临界损伤

PACC:6250,6220M,4630N

1. 引 言

延性金属动态拉伸宏观断裂现象与材料中微细观尺度内微孔洞的成核、长大及其局域化聚集过程密切相关.迄今,无论从宏观还是微观,人们对微孔洞的成核和长大规律都进行了较多的研究^[1-9],但对微孔洞之间的聚集行为和灾变式断裂行为的研究工作却很少.根据多年来的研究结果,人们逐渐认识到微孔洞聚集过程对延性金属由损伤阶段向发生灾变式宏观拉伸断裂阶段过渡中的重要作用,故对微孔洞聚集行为的研究现已成为金属材料延性断裂研究的一个热点问题^[10,11].

自 20 世纪 70 年代 Davison 等人^[12]提出层裂破坏的连续损伤概念开始,人们逐渐认识到层裂破坏是一个物理过程.这种观念上的变化标志着人们逐渐扬弃了传统的瞬时断裂经验准则,开启了以物理过程为基础的损伤演化研究. Curran 等人^[13]的工作是对连续损伤理论发展提供的重要实验基础,他们基于对大量回收样品的损伤统计观测,提出了微孔洞成核-长大的基本规律,即微孔洞的长大半径与拉伸应力和加载时间呈指数增长关系:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\sigma_s - \sigma_{\theta}}{4\eta} \Delta t\right), \quad (1)$$

式中 R 为孔洞半径, σ_s 为加载的拉伸应力, Δt 为拉伸时间, σ_{θ} 为孔洞长大的阈值应力, η 为材料粘度, R_0 为初始孔洞半径.

然而,最近 Strachan 等人^[14]和 Seppälä 等人^[15,16]通过分子动力学模拟研究,揭示出延性金属拉伸型动态断裂的损伤发展具有一定的临界行为.他们发现只有当微孔洞的半径长大到一定临界值以后,才呈现快速幂指数增长的规律.临界行为的提出无疑是对 Curran 和 Seaman 等人提出的微孔洞成核-长大规律的重新诠释和重要修正,也是对损伤演化规律的一种全新认识.但目前对金属材料动态断裂的临界行为研究还仅停留在分子动力学模拟的基础上,没有涉及到与实验相关的论证,本文通过对宏观试样进行的实验和观察,进一步认识和印证了这种损伤演化和断裂的临界特性.

2. 实验原理及方法

选取 $\phi 100 \text{ mm}$ 的一级轻气炮作为加载装置,实验用到的高纯铝材料是由贵州铝厂提供,北京有色金属研究院轧制成棒材,纯度大于 99.999%,主要杂质及含量($\times 10^{-6}$):Si(1.0—2.0),Fe(1.0—2.4),Cu(1.0—2.1),Pb(0.1),Zn(0.5),Ga(0.1—0.18),

^{*} 国家自然科学基金(批准号:310476027)和冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金项目(批准号:9140C67010100701)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: honglianghe@263.net

TX(0.1—0.8), Cd(0.1), In(0.1—0.13). 采用对称碰撞方式, 即飞片和样品均为高纯铝, 拉伸加载状态下波在飞片和样品中的传播及相互作用如图 1 所示. 设计的实验条件如表 1 所示, 其中 Shot 1, Shot 3, Shot 4 和 Shot 5 为材料处于不完全层裂的状态, Shot 2 和 Shot 6 为材料发生完全层裂的状态.

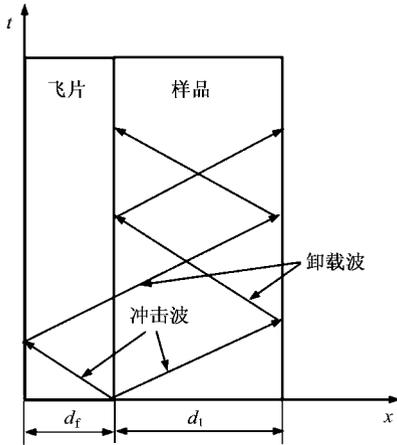


图 1 拉伸加载波系作用图

表 1 实验的加载条件

样品	Shot 1	Shot 2	Shot 3	Shot 4	Shot 5	Shot 6
靶厚/mm	4	4	6	6	6	6
飞片厚度/mm	2	2	3	3	3	3
冲击波速度/ $m \cdot s^{-1}$	219.7	300.5	196.9	215.4	236.3	317.9

高纯铝属于延展性很强的材料, 在动态冲击下, 内部的微损伤近似呈球形或椭球形. 通过对回收样品的细观微损伤进行分析^[17], 可以发现: 低速冲击下样品较薄时, 微孔洞独立地生长, 如图 2, 损伤区域也比较宽; 当冲击速度逐渐增大时, 大量微孔洞长成大孔, 相邻的孔洞之间发生了粘连, 形成更大的不规则的孔洞, 有的孔洞甚至连成一条线, 损伤区域也变得更加集中, 如图 3, 这是因为损伤的出现使得损伤周围材料的强度降低, 孔洞的成核和生长更易发生, 从而引起了更多的孔洞汇聚, 形成更严重的损伤区域. 当损伤累积达到一定的量, 材料就会发生断裂(未给出金相图), 从这些图中可以看到, 材料的断裂是由微孔洞的成核、长大以及贯通引起的. 对不完全层裂的实验回收样品分别进行了损伤统计, 它们的最大相对孔洞体积(即损伤)分别为 0.09, 0.21, 0.28 和 0.47.

上述损伤统计数值是根据体视金相学中的 Schwartz-Saltykov (SS) 方法^[18] 将图 2, 图 3 所示的损伤截面特征转化为体积损伤度, 限于本文篇幅, 更为

详细的转化方法可以参阅文献[17]. 损伤统计中的误差问题, 文献[17]中也进行了讨论, 并与文献[19]的统计方法进行了对比, 表明本文采用的 SS 方法不仅简单, 而且统计结果的精度也与文献[19]相当, 两种方法之间的误差约为 2%.

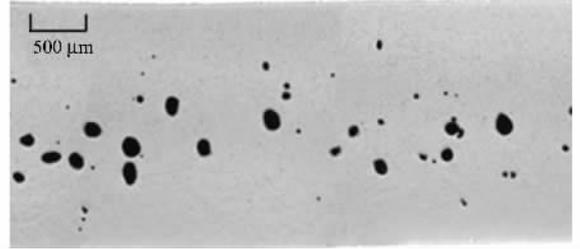


图 2 Shot 1 样品的金相照片

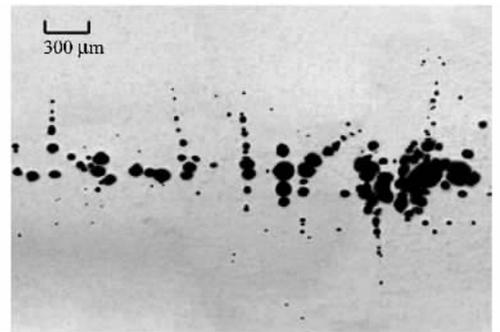


图 3 Shot 5 样品的金相照片

3. 实验结果分析与讨论

在未完全层裂的样品 Shot 1, Shot 3, Shot 4 和 Shot 5 中, 样品经受的拉伸应力在幅值上近似等于作用于它的冲击加载应力 σ_s , 而拉伸应力作用的时间近似等于自由面速度由峰值下降到峰谷时间间隔 Δt 的一半^[17], 因此我们将拉伸应力与时间的乘积定义为拉伸冲量, 写为

$$I = \frac{1}{2} \sigma_s \Delta t. \quad (2)$$

以拉伸冲量为横坐标, 未完全层裂样品中的最大损伤度 (D_{\max}) 为纵坐标, 可以得到高纯铝最大损伤度随拉伸冲量变化的关系, 如图 4 所示. 从图 4 中看出, 随着拉伸冲量的增加, 损伤开始是逐渐发展变化的, 但在损伤的演化过程中存在一个临界点, 当达到这个损伤临界点之后, 损伤演化的速度突然加快了.

基于本文的实验观察结果, 我们认为高纯铝损伤演化的初期近似呈线性增长, 如图 4 中的虚线所

示. 线性增长方程近似表示为

$$D_{\max} = 0.35 I, \quad (3)$$

而对于损伤演化发展后期, 我们以幂指数形式来拟合图 4 的实验观察结果, 得到

$$D_{\max} = 1.69 \left(\frac{I}{0.34} - 1 \right)^{0.6}. \quad (4)$$

拟合结果见图 4 中实线所示. 通过虚线的延长线与实线相交, 可以确定出两种增长模式的过渡点, 即损伤演化临界点. 图中给出的临界增长点的最大损伤值约为 0.12, 对应的拉伸冲量约为 $0.34 \text{ GPa} \cdot \mu\text{s}$.

Strachan 和 Seppälä 等人通过分子动力学模拟研究, 指出延性金属拉伸型动态断裂的损伤发展具有一定的临界行为, 图 5 是根据文献 [14] 对金属钽的层裂破坏给出的分子动力学模拟计算换算的结果, 横坐标是拉伸冲量, 纵坐标是计算得到的最大孔洞体积的变化. 可以看到, 在临界冲量 I_c 以前, 最大孔洞的体积很小, 增长也非常缓慢, 而在 I_c 以后, 最大孔洞体积随着拉伸冲量增长很快长大. 这种变化的规律性, 在本文高纯铝的宏观试件中得到了印证, 图 4 显示出冲击拉伸加载的高纯铝试件中损伤演化的发展具有相似的临界行为.

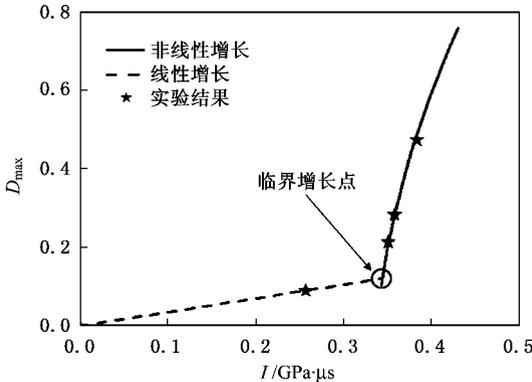


图 4 高纯铝层裂损伤的发展的两个阶段及临界增长点

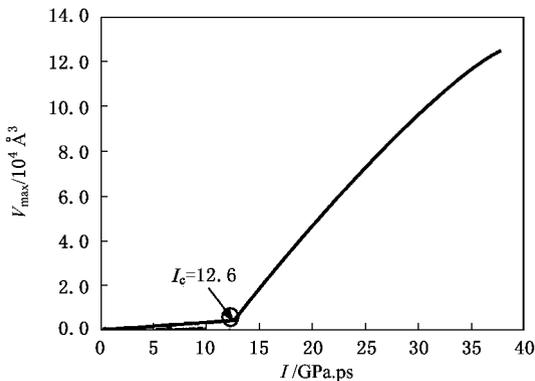


图 5 分子动力学模拟得出的钽中损伤演化的临界行为^[14]

对比 Curran 等人^[13]早期对层裂损伤样品的统计观察得出的微孔洞长大半径与拉伸应力和加载时间所呈的指数关系, 可以看出, 指数增长规律描述的主要是损伤演化发展后期, 即进入临界损伤点以后的增长行为, 而对于损伤演化的初期行为, 指数规律并不适用. 图 4 所示的实验结果充分说明, 像高纯铝这样的延性金属材料, 拉伸型动态损伤演化可以分为两个阶段, 即: 初始损伤期的线性增长阶段和后期损伤的幂指数形式增长阶段, 两个阶段的过渡具有明显的临界行为特征. 该结果支持和验证了 Strachan 和 Seppälä 等人在分子动力学研究中提出的临界损伤行为的说法, 也是对 Curran 和 Seaman 等人提出的单一指数增长规律的重要补充和完善.

另外, 我们可以从临界损伤度的几何意义上来分析一下损伤演化临界点的特定含义. 根据损伤度的定义, 可得微孔洞周边间距 L 与微孔洞直径 ϕ_v 之比为^[17]

$$\frac{L}{\phi_v} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6D} - 1}, \quad (5)$$

其中 D 为损伤度. 由图 4 得到高纯铝的损伤演化临界点处对应的损伤度为 0.12, 代入上式得 $L/\phi_v = 0.63$. 也就是说: 当两个孔洞之间的周边距与孔洞直径之比大于 0.63 时, 两个孔洞之间相对以近似球形独立长大 (如图 2), 一旦这一比值小于了 0.63, 孔洞之间就会有聚合的趋势, 孔洞已不再呈球形, 分别向着接近另一个孔洞的方向伸长 (如图 3). 各种材料在发生微损伤聚集时, 在统计平均意义上都有其特征的孔洞周边距离与孔洞直径的比值, 这也进一步说明了材料在损伤演化过程中确实存在一个临界点.

4. 结 论

低速冲击下, 高纯铝中损伤分布范围较宽, 随着冲击速度的增加, 损伤分布范围变得尖锐. 从对不同加载条件下回收样品的损伤统计发现, 随着拉伸冲量的增加, 样品的损伤呈现明显的临界行为特征, 当拉伸冲量较小时, 损伤演化以线性方式缓慢增长, 当拉伸冲量足够大, 超过一定的临界阈值 ($0.34 \text{ GPa} \cdot \mu\text{s}$) 以后, 损伤演化将以指数形式快速增长, 两个阶段的过渡具有明显的临界行为特征. 另外, 从临界损伤度的几何意义上分析可知: 当两个孔洞之间的周边距与孔洞直径之比大于某一临界值 (0.63) 时, 孔洞之

间相对独立地长大,当这一比值小于此临界值时孔洞之间会发生相互聚集.

- [1] 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]
- [2] Ma X L , Yang W 2003 *Acta Mech. Sin.* **19** 485
- [3] 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]
- [4] Cai L C , Cheng X L , Liu Z J , Yang X D , Zhang H 2006 *Chin. Phys.* **15** 224
- [5] Raj R , Ashby M F 1975 *Acta Metallurgica* **23** 653
- [6] Rice J R 1992 *J. Mech. Phys. Solids* **40** 239
- [7] Rice J R , Tracey D M 1969 *J. Mech. Phys. Solids* **17** 201
- [8] Carroll M M , Holt A C 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 1626
- [9] Johnson J N 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 2812
- [10] Potimiche G P , Horstemeyer M F , Wagner G J *et al* 2006 *Int. J. Plasticity* **22** 257
- [11] Horstemeyer M F , Matalanis M M , Sieber A M *et al* 2000 *Int. J. Plasticity* **16** 979
- [12] Davison L , Stevens A L 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 988
- [13] Curran D R , Seaman L , Shockey D A 1987 *Physics Reports* **147** 253
- [14] Strachan A , Cagin T , Goddard III W A 2001 *Phys. Rev. B* **63** 060103
- [15] Seppälä E T , Belak J , Rudd R E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 245503
- [16] Seppälä E T , Belak J , Rudd R E 2005 *Phys. Rev. Lett.* **71** 064112
- [17] Qi M L 2007 *Doctor Thesis* (Wuhan : Wuhan University of Technology)(in Chinese)[祁美兰 2007 博士学位论文 (武汉 : 武汉理工大学)]
- [18] Saltykov S A 1958 *Stereometric Metallography 2nd ed* (Moscow : Metallurgizdat) p267 (in Russian)
- [19] Seaman L , Curran D R , Crewdson R C 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 5221

Critical fracture behavior of high purity aluminum under impact loading^{*}

Qi Mei-Lan¹⁾²⁾ He Hong-Liang^{1)†} Yan Shi-Lin²⁾

¹⁾ School of Science , Wuhan University of Technology , Wuhan 430070 , China)

²⁾ Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics , Institute of Fluid Physics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

(Received 10 April 2007 ; revised manuscript received 4 June 2007)

Abstract

One-dimensional strain impact experiments were performed for the high purity aluminum (HPA) (99.999%). The spall characteristics of HPA in dynamic tensile fracture have been discussed according to the quantitative metallographic analysis of the shock recover of samples. By defining the product of the tensile stress and the time as a parameter called tensile impulse (I), the statistic results indicate that an obvious critical behavior for the damage evolution appears with the increasing of I . When the I is low , the damage grows slowly with a linear increment. Once the I reaches a critical value , the damage grows rapidly and an exponential increase is observed. Our preliminary results indicate that the critical value of I for HPA is about $0.34 \text{ GPa} \cdot \mu\text{s}$ and the corresponding critical damage is about 0.12.

Keywords : high purity aluminum , critical behavior , tensile impulse , critical damage

PACC : 6250 , 6220M , 4630N

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10476027) and the Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics , China (Grant No. 9140C67010100701).

[†] Corresponding author. E-mail : honglianghe@263.net