

动态损伤演化的空间不连续性实验研究*

彭辉¹⁾²⁾ 李平¹⁾²⁾ 裴晓阳^{2)†} 贺红亮²⁾ 程和平²⁾ 祁美兰³⁾

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

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重点实验室, 绵阳 621900)

3) (武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

(2013年5月27日收到; 2013年7月18日收到修改稿)

对冲击加载下高纯铝的损伤演化进行了实验研究. 利用基于白光轴向色差的表面轮廓测试技术测试冲击加载“软回收”的样品截面, 对测试结果进行三维重构和损伤量化计算. 结果表明: 受到孔洞形核效应、尺寸效应和应力松弛作用, 在损伤演化早期, 损伤度随着空间的分布是不连续的, 除最大损伤度以外还存在一个次高峰. 在损伤演化后期, 受到贯穿作用的影响, 损伤度增量随空间的分布也是不连续的, 贯穿区域损伤度迅速增加, 损伤度曲线的次高峰特征消失.

关键词: 高纯铝, 冲击波, 损伤演化, 空间不连续性

PACS: 62.20.mm, 62.20.fk, 62.20.M-, 62.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.62.226201

1 引言

材料的损伤演化机理研究是建立可预测材料性能模型的基础, 可为设计更加安全有效的材料提供保障. 层裂是动态损伤的一种典型形式, 由于其理论分析较为简单, 实验上容易实现, 因此是材料损伤演化研究的一个重要方面^[1,2]. 高强动载荷下延性金属的层裂破坏是指在冲击波作用下, 材料的自由面和飞片的后自由面分别反射的稀疏波在样品中相互作用产生拉伸应力使得材料内部发生损伤.

早期的层裂研究主要侧重建立各种层裂准则, 这些准则中涉及应力、应变、应变率、应力梯度、温度等宏观变量^[3-5]. 当宏观量满足这些准则时, 材料发生层裂. 这些准则无一例外地将层裂过程中的损伤演化归结为完好样品到层裂的一个二元状态的离散描述, 即层裂是一个离散现象.

Davison 和 Stevens^[6] 基于连续介质理论提出了“损伤度”的概念, 进行基于损伤演化的物理过程

研究. 在损伤演化这一概念下, 学者在延性金属的层裂研究上形成共识, 即延性金属层裂包括微孔洞的形核、长大和贯通三个阶段^[7-10]. 由于这三个阶段的微细观机理存在差异, 从损伤演化的角度看, 其随时间的发展是不连续的, 因此其理论模型是分段描述的^[11-15]. 从空间上看, Curran 等^[12] 通过对“软回收”的初始层裂样品统计分析, 获得样品中损伤分布是在层裂面出现最大值, 随着到层裂面距离的增加, 损伤量逐渐减小. 文献^[16-18] 通过实验方法获得了相似的结果, 这似乎说明损伤随空间分布是连续的. 然而层裂的损伤演化是在时间和空间跨越多个尺度并且相互耦合的^[19], 时间上的不连续性也应该在空间上有所体现, 因此本文试图通过实验的方法研究损伤的空间不连续性分布.

本文选用纯度大于 99.999% 的高纯铝作为实验材料, 在一级轻气炮上开展冲击实验, 利用基于白光轴向色差技术的表面轮廓测试, 对冲击加载“软回收”实验样品截面进行高分辨率测试表征以及量化. 结果表明, 损伤度曲线以及损伤度增量在空间分布是不连续的, 通过分析认为这种不连续性是受

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目 (批准号: 2011A0201002)、国防基础科学研究计划 (批准号: B1520110003) 和国家自然科学基金 (批准号: 11202196, 11172221) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: peixiaoyang2000@sina.com

到孔洞形核效应、尺寸效应、应力松弛和贯穿效应作用的结果。

2 实验技术与方法

2.1 实验方法

实验在 $\Phi 100\text{ mm}$ 一级轻气炮上完成, 装置如图 1 所示, 该装置能同时实现自由面速度的测量和样品“软回收”。气炮驱动弹托、飞片托架和飞片在炮管中加速, 飞片与靶架之间的测速探针用于飞片击靶前的速度测量。实验中样品直径小于飞片直径, 击靶后飞片被膜盒阻挡, 不能进入膜盒, 避免二次碰撞, 同时在回收舱中填入软性物质, 实现样品的“软回收”。任意反射面速度干涉系统 (VISAR) 用于测量样品后自由面速度历史。

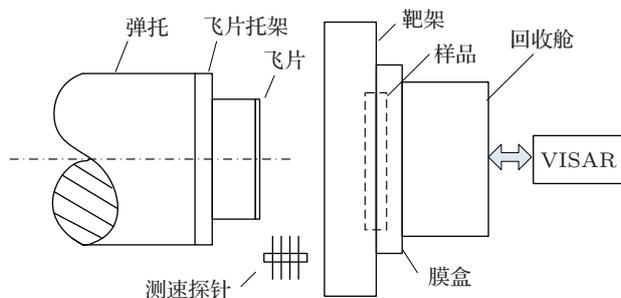


图 1 测量与回收装置示意图

实验中飞片和样品均采用高纯铝。高纯铝样品由贵州铝厂提供, 北京有色金属研究院轧制为棒材, 纯度大于 99.999%, 主要杂质及含量 (单位为 $\mu\text{g/g}$) 如下: 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), Ti (0.1—0.8), Cd (0.1), In (0.1—0.13)。实验条件列于表 1, 其中 d_s 和 d_f 分别为样品和飞片的厚度, V 为实际测量的弹速。

表 1 实验条件

样品编号	d_s/mm	d_f/mm	$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	4.01	2.00	219.7
2	5.99	3.01	215.4
3	6.01	3.00	236.3

2.2 轴向色差测试原理

将“软回收”的样品沿着冲击方向对称线性切割, 取其中一块, 对其截面研磨、抛光。利用轴向色差技术^[20]对样品表面上各个点的空间坐标进行测量, 其测试原理如图 2 所示。光源发出的白光经过一个半透半反镜和一个物镜后照射在样品表面, 组

成白光的各种单色光以不同的焦距聚集在物镜一侧, 形成各自的单色影像。只有某一特定的波长才能在物体表面聚焦, 图 2 中波长为 λ_m 的单色光在样品表面聚焦, 经过物镜和半透半反镜到达空间滤波器, 只有在样品表面聚焦的单色光能经过空间滤波器进入分光光度计, 在视觉信号处理中形成峰值, 将位置信息转换为波长信息。检测形成峰值的波长, 通过计算获得被测点到物镜之间的相对高度。利用工作台的水平移动控制样品与物镜的相对位置变化, 实现对样品表面的逐点空间坐标扫描。

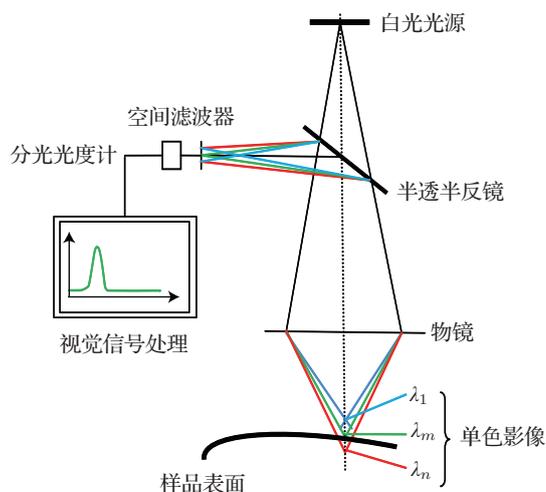


图 2 轴向色差测试原理

3 结果与讨论

图 3 所示为对样品 3 截面测试所得数据重构获得的截面图, 其测试点之间间距为 $3\ \mu\text{m}$, 测试面积为 $6.9\ \text{mm} \times 9.999\ \text{mm}$ 。从轮廓图可以清晰地看到截面上孔洞的大小以及位置分布。通过轮廓的局部放大图可以清晰地看出, 尺寸较大的孔洞内部还分布着一些小尺寸孔洞, 其空间拓扑结构十分复杂。

3.1 损伤演化的早期不连续性分析

将样品截面上受损伤孔洞的面积与基体面积比定义为材料的损伤度^[21]。图 4 所示为样品 1 和样品 2 的损伤度分布曲线, 其最大损伤度分别出现在距离自由面约 2 和 3 mm 处, 位于各样品沿着冲击方向的中间位置。这是由于在本文设计的飞片与样品的厚度比下, 碰撞过程中样品的自由面和飞片的后自由面分别反射稀疏波, 其交汇区出现在样品厚度方向的中心位置, 这个位置上的拉伸应力持续时间最长, 从而导致最大损伤的出现。

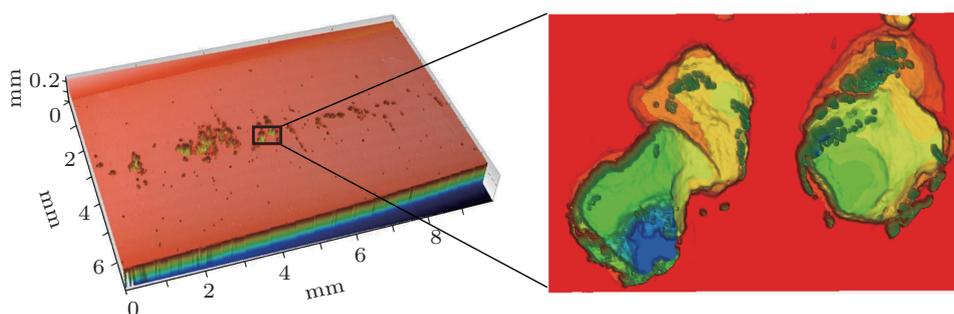


图3 样品3的截面轮廓

与传统的损伤度曲线先单调增加到最大损伤度值然后单调减小^[12,18]不同,图4中损伤度曲线除了最大损伤度值以外还存在一个次高峰.宏观上看,这是由于样品中复杂波系的相互作用产生的.而微观上,我们认为这是由于波在材料中传播时材料中各点的应力状态并不保持相同,同时材料本身的非均匀性使得各个缺陷点的孔洞形核条件不一致,因此在拉伸应力作用下孔洞的形核本身也是一个过程,从时间上有先后之分,如图5所示.先形核的孔洞,由于产生新的界面,其应力松弛作用对其附近缺陷点的形核有抑制作用.形核时间的差异导致在增长过程中样品内孔洞的尺寸大小不一.不同尺寸的孔洞相互之间的尺寸效应使得样品中局部区域损伤的发展受到抑制,损伤度随空间分布就呈现一个非连续的状态.

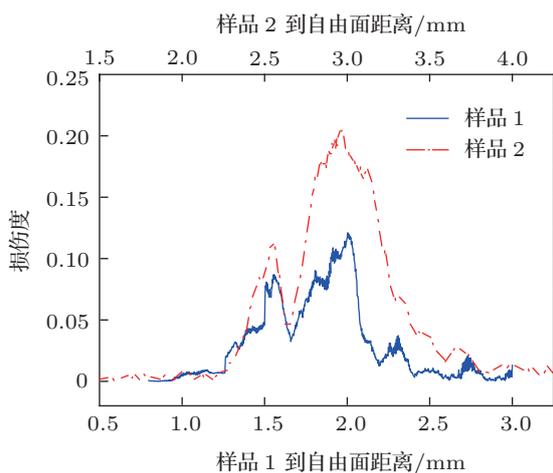


图4 样品1和样品2的损伤度曲线

3.2 损伤演化的后期不连续性分析

与样品2损伤度曲线相比,样品3的损伤度曲线并没有明显的次高峰,如图6所示.由于在损伤发展演化过程中,当孔洞的尺寸满足一定条件时就

会发生孔洞贯穿.与样品2相比,样品3的冲击加载速度更大,损伤进一步发展,孔洞之间的贯穿现象开始凸显,损伤局域化程度加剧.图6中的点线为样品3相对于样品2的损伤度增量,不难发现损伤度增量随着空间的分布也具有不连续性,损伤度增幅最大的两个位置分别出现在样品2中最大损伤度与次高峰之间的峰谷位置和最大损伤度位置.

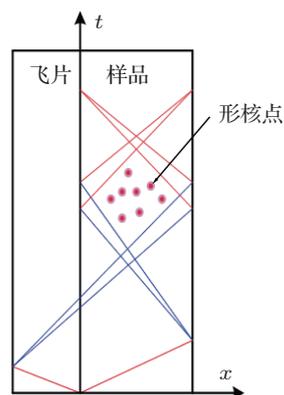


图5 形核示意图

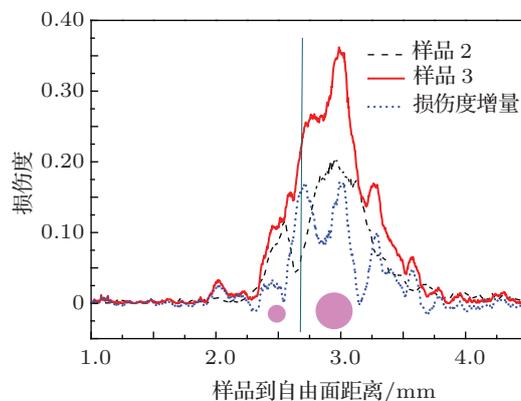


图6 样品2和样品3的损伤度曲线

如图6所示,以样品2的最大损伤度与次高峰之间的峰谷位置作为分界线,分别以一个尺寸较大

的孔洞和一个尺寸较小的孔洞近似代表样品 2 中包含的最大损伤度值和次高峰的两个区域. Dongare 等^[22]利用分子动力学计算了类似模型的孔洞聚集过程,其模型如图 7(a)所示.图 7(b)为计算得到的损伤度随时间 t 的演化.在 $t = 370$ ps 时,孔洞

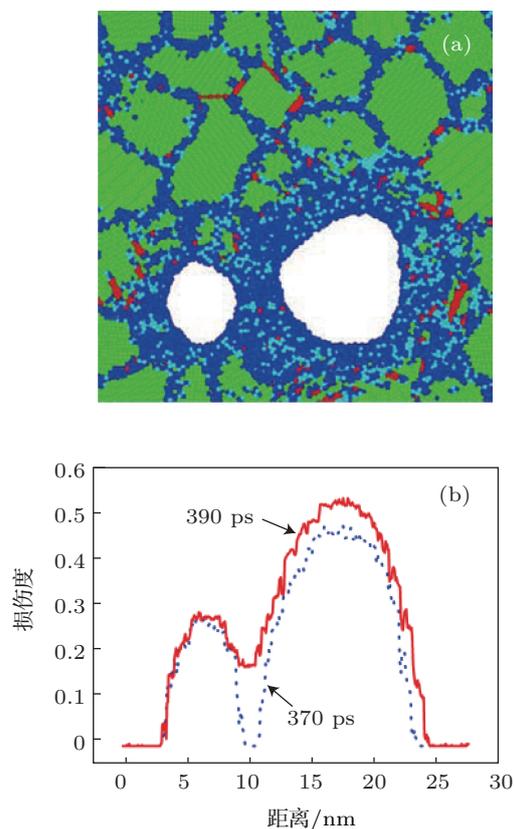


图 7 分子动力学计算 (a) Dongare 模型; (b) 损伤度曲线对比

开始贯穿.对比图 7(b)中两条不同时间的损伤度曲线可以看出,在孔洞贯穿发生以后,由于贯穿效应作用,贯穿位置的损伤度迅速增加,而其他位置的损伤度变化不大.由此可知,图 6 中在峰谷处出现最大的损伤度增量是由于孔洞之间的贯穿效应导致的.本文中采用一个单一的孔洞对样品 2 中的两个区域的损伤状态进行描述,而在实际的受损伤的材料中,两个区域都包含大量的孔洞,特别是包含最大损伤度的区域,而在以上描述中忽略了两个不同区域内部孔洞之间的贯穿效应.据此我们有理由相信,损伤度增量在样品 2 的最大损伤度处出现最大值是由于该区域内部孔洞之间的贯穿效应所致.

4 结论

本文以高纯铝为研究对象开展平面冲击实验,采用基于白光轴向色差的表面轮廓测试技术,对“软回收”的实验样品截面轮廓进行高精度测量,并对测试结果进行三维轮廓重构和损伤量化计算.通过对损伤度曲线分析发现:在损伤发展演化早期,受到孔洞形核效应、应力松弛作用和尺寸效应的影响,损伤度随着空间的分布是不连续的,除最大损伤度外还存在一个次高峰;在损伤发展演化后期,通过对比分子动力学计算结果,得出受到孔洞贯穿效应的影响,损伤度增量也是不连续的,贯穿区域损伤度迅速增加,损伤度曲线的次高峰特征逐渐消失.

- [1] Antoun T, Seaman L, Curran D R, Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 2003 *Spall Fracture* (New York: Springer) pp1–20
- [2] Meyers M A, Aimone C T 1983 *Prog. Mater. Sci.* **28** 1
- [3] Bread B R, Mader C L, Venable D 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 3271
- [4] Rinehart J S 1951 *J. Appl. Phys.* **22** 555
- [5] Whiteman P 1962 *Atomic Weapons Research Establishment Report AWRE-SWAN 10/61*
- [6] Davison L, Stevens A L 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 988
- [7] Kanel G I 2010 *Int. J. Fracture* **163** 173
- [8] Meyers M A, Traiviratana S, Lubarda V A, Benson D J, Bringa E M 2009 *Jom* **61** 35
- [9] Wayne L, Krishnan K, DiGiacomo S, Kovvali N, Peralta P, Luo S N, Greenfield S, Byler D, Paisley D, McClellan K J, Koskelo A, Dickerson R 2010 *Scripta Mater.* **63** 1065
- [10] Qi M L, He H L, Yan S L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5965 (in Chinese) [祁美兰, 贺红亮, 晏石林 2007 物理学报 **56** 5965]
- [11] Besson J 2009 *Int. J. Damage Mech.* **19** 3
- [12] Curran D R, Seaman L, Shockey D A 1987 *Phys. Rep.* **147** 253
- [13] Molinari A, Wright T W 2005 *J. Mech. Phys. Solids* **53** 1476
- [14] Tonks D L, Thissell W R, Schwartz D S 2004 *AIP Conference Proceedings* **706** 507
- [15] Zhang F G, Zhou H Q, Hu J, Shao J L, Zhang G C, Hong T, He B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094601
- [16] Fan D, Qi M L 2011 *Adv. Mater. Res.* **160–162** 434
- [17] Qi M L, He H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 036201
- [18] Qi M L, Luo C, He H L, Wang Y G, Fan D, Yan S L 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 043506
- [19] Remington B A, Bazan G, Belak J, Bringa E, Caturla M, Colvin J D 2004 *Metall. Mater. Trans. A* **35** 2587
- [20] Pruss C, Ruprecht A, Körner K, Osten W, Lütke P 2005 *DGAO Proc.* **A1** 106
- [21] Zurek A K, Thissell W R, Trujillo C P, Tonks D L, Henrie B L, Keinigs R K 2003 *Los Alamos Sci.* **28** 111
- [22] Dongare A, Rajendran A, LaMattina B, Zikry M, Brenner D 2009 *Phys. Rev. B* **80** 104108

Experimental study of the spatial discontinuity of dynamic damage evolution*

Peng Hui¹⁾²⁾ Li Ping¹⁾²⁾ Pei Xiao-Yang^{2)†} He Hong-Liang²⁾
Cheng He-Ping²⁾ Qi Mei-Lan³⁾

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

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

3) (School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(Received 27 May 2013; revised manuscript received 18 July 2013)

Abstract

In this paper, the damage evolution of high purity aluminum under shock loading is investigated experimentally. The surface profile measurement technique based on white light axial chromatic aberration is used to measure the cross-section of sample which is soft-recovered from dynamic impact experiments. Then, the cross-section image and 3-D surface topography are obtained by reconstruction of the data, the quantified damage is also calculated based on the data. The results show that in the early stage of damage evolution the spatial distribution of relative void volume is not continuous, which results from nucleation affect, size affect and stress relaxation. The damage curves show not only the maximum damage but also a second peak. In the late stage of damage evolution, the spatial distribution of damage increment is discontinuous, which results from the coalescence of voids. The damage of the coalescence region rapidly increases and the secondary peak of the damage curve disappears.

Keywords: high-purity aluminum, shock wave, damage evolution, spatial discontinuity

PACS: 62.20.mm, 62.20.fk, 62.20.M–, 62.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.62.226201

* Project supported by the key Program of the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2011A0201002), the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. B1520110003), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11202196, 11172221).

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