

## 延性材料动态断裂的实验研究和数值分析

345-350

郑 坚

王泽平

TG115.57

(中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室,北京,100080)

**摘要** 本文对延性材料纯铜和 LY12 铝合金进行了层裂实验,对软回收试件进行了仔细的定量和显微金相观测,观察到了两种材料中不同微损伤的形核、增长和聚合机制,为理论分析提供了真实的实验结果.将文[4]提出的延性动态损伤模型编入了一维 Lagrange 有限差分动力学程序,对两组层裂实验进行了数值模拟,计算结果与实验吻合较好.

**关键词** 层裂, 金相分析, 微损伤, 数值模拟

断裂试验, 延性材料

## 1 引言

材料延性动态损伤和破坏研究一般可分为三个方面进行:实验观测、理论分析和数值模拟.实验研究是理论分析和数值模拟的基础,因此,受到高度重视. Curran<sup>[1]</sup>, 沈乐天<sup>[2]</sup>, 王泽平<sup>[3]</sup>等人对多种延性材料进行了动态断裂实验和数值模拟.实验方法主要有平板撞击,杆的动态拉伸,以及炸药加载等,这些实验有一个共同特点是加载率达到或超过  $10^5 \text{s}^{-1}$ ,属于强动载作用.实验中首先要测量材料的动态响应,记录材料所承受的压力或产生的变形信号,然后对回收的试件进行微观观测,测出微损伤的分布,观察微损伤的形成和演化规律,为理论分析提供实验依据.大量的实验观测发现了一个共同的规律:宏观破坏经历了微损伤的萌生,增长和聚合这一系列发展过程.

本文对纯铜和 LY12 铝合金进行了平板撞击实验,对软回收试件进行了显微和定量金相分析,观察了微损伤的形成和发展机制.此外,采用文[4]提出的理论模型对实验进行了数值模拟,结果比较令人满意.

## 2 层裂实验

## 2.1 实验装置及动态测试结果

实验是在口径为 101mm 的一级轻气炮上进行的,实验装置及试件(靶板)见图 1.

飞片和靶板都加工成圆板形,飞片的直径大于靶板,碰撞后飞片被挡住,使它不致于和靶板一起飞入捕收器使靶板受到二次撞击.捕收器内充满软物质以便很好地回收试件.图 1 中靶板后面贴有低声阻抗材料有机玻璃(PMMA).在靶板与有机玻璃之间埋有经过标定的锰铜压阻应力传感器,用来记录应力随时间的变化,从中测得层裂信号.本文中实验采用的飞片均为 LY12 铝合金,靶板分别为纯铜和 LY12 铝合金.碰撞速度分别为:0.305mm/ $\mu\text{s}$  和 0.35mm/ $\mu\text{s}$ .压力测量结果见图 2,图中看出了明显的层裂信号.图 3 给出了软回收试件剖面中的层裂形状,其层裂面清晰可见.

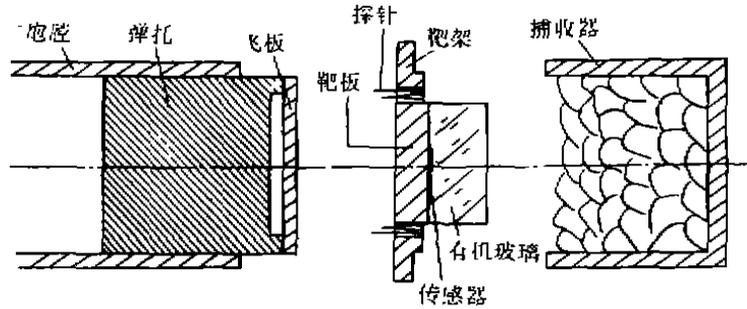


图1 层裂实验装置简图

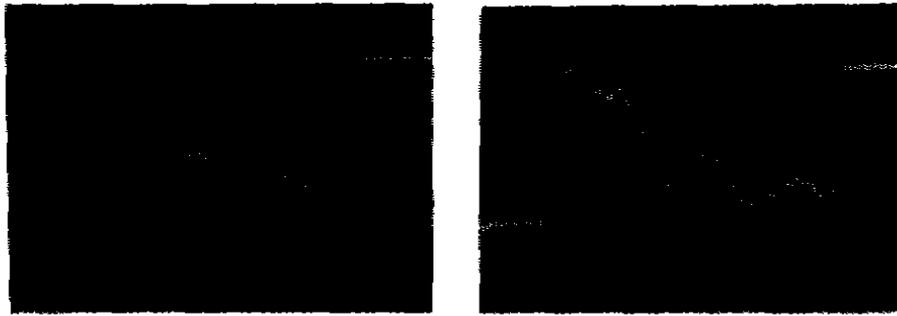


图2 锰钢压电应力传感器实测的应力随时间的变化曲线

(a) 纯铜 (b) LY12 铝合金

## 2.2 金相观测

### 2.2.1 形核机理的观察

在对 LY12 铝合金进行显微观察时发现,形核发生在夹杂物和第二相粒子中,以贯穿断裂的形式形核,基体中没有观察到形核现象。(图 4)。

### 2.2.2 增长机理的观察

从图 5 的金相照片可以清楚地看到,LY12 铝合金试件中孔洞的增长是在第二相粒子中进行的。图 6 为纯铜试件中的孔洞增长过程。大孔洞周围分布着许多小孔洞,孔洞的扩展是通过大孔洞与小孔洞连接进行的。

### 2.2.3 聚合现象的观察

聚合是断裂过程的最后阶段,图 5 为 LY12 铝合金中孔洞的聚合现象。大孔洞之间是由产生了剪切变形破坏的剪切带连接起来的,显示出裂纹沿第二相粒子密集区扩展。图 6 为纯铜中孔洞的聚合现象,其方式为大孔洞的直接聚合。

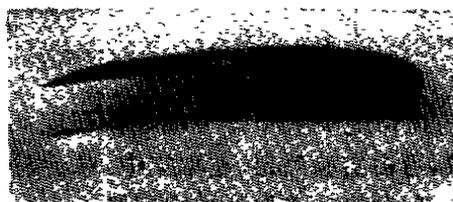


图 3 回收试件剖面中的层裂面

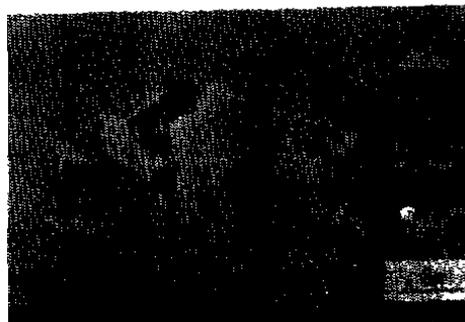


图 4 LY12 铝合金内微损伤的形核

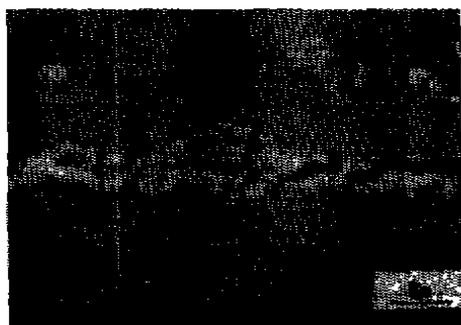


图 5 LY12 铝合金试件中裂纹的增长和聚合



图 6 纯铜试件中孔洞的增长和聚合

### 2.3 分析

从对纯铜和 LY12 铝合金层裂回收试件进行的显微金相观察中我们发现,LY12 铝合金内部形核是在第二相粒子内部发生,而在基体中没有发现形核现象.对于长宽比较大的第二相粒子贯穿断裂并不一定是垂直于长边方向,而是随机的.LY12 铝合金中孔洞的增长也是在第二相粒子中发生,孔洞是由于第二相粒子内部破碎脱落后形成的,在图 4-5 中能明显的看到这种现象.对于延性很高的纯铜,在孔洞周围存在有很多小孔洞,大孔洞的增长是通过与周围小孔洞聚合来实现的.

在图中可以看到在大孔洞之间的基体中存在有许多很小的孔洞.由于大孔洞的存在,使孔洞之间基体中的三轴应力场加强,产生强烈的塑性流动局部化.这种流动局部化是在高应变率下进行的,它产生两个效果:① 产生了新的小孔洞;② 塑性形变转化成熟.这两个效果反过来又使基体软化,加速了塑性流动局部化发展为塑性失稳的进程.这些复杂的过程最终效果是使孔洞快速形成宏观裂纹.

### 3 数值模拟

本文利用文[4]提出的延性动态损伤模型对纯铜和 LY12 铝合金层裂实验进行了数值模拟.计算采用的是一维 Lagrange 有限差分动力学程序,在程序中加入了损伤演化的计算子程序.计算中采用的守恒方程、本构关系、状态方程、材料参数与损伤量的关系和孔洞形核对

损伤的贡献  $\phi$ ，与文[3]中的一样。我们假设损伤度变化率  $\dot{\phi}$  由形核  $\dot{\phi}_n$  和增长  $\dot{\phi}_g$  两部分组成

$$\dot{\phi} = \dot{\phi}_n + \dot{\phi}_g \quad (1)$$

式中  $\dot{\phi}_n$  由下式给出

$$\dot{\phi}_n = \dot{a}/a^2 \quad (2)$$

这里孔洞膨胀比变化率  $\dot{a}$  由文[4]给出。

断裂判据仍采用  $\phi \geq \phi_{crit}$ ，就是说，当某网格的损伤度  $\phi$  大于等于临界损伤度  $\phi_{crit}$  时该网格就发生断裂。临界损伤度  $\phi_{crit}$  是一个材料参数，可由实验测定。在本文中，对于断裂网格的处理与以前的计算有所不同。对于结点  $j$  是否断裂（分离），采取这样的判据：

当  $(\phi_{(j)} + \phi_{(k)})/2 \geq \phi_{crit}$  时就认为在结点  $j$  处发生了断裂。计算中用到的主要材料参数由表1给出。

表1 材料参数

	纯铜	LY12 铝合金	有机玻璃
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	8.92	2.79	1.185
$K_0$ (GPa)	136.0	86.0	7.0
$\Gamma_0$	1.94	1.7	1.0
$Y_0$ (GPa)	0.26	0.33	
$H$ (GPa)	0.25	0.23	
$\mu$ (GPa)	48.4	37.5	
$\eta$ (GPa · $\mu$ s)	0.1	0.09	
$\phi_{crit}$	0.31	0.28	
$\gamma$ (J/m <sup>2</sup> )	0.09	0.1	

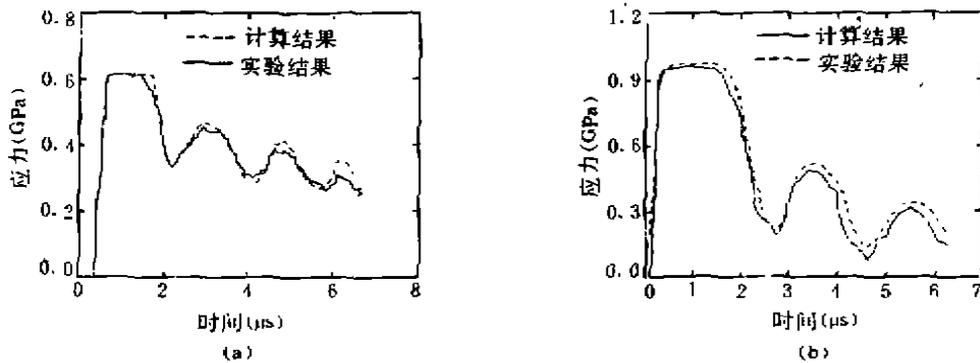


图7 计算得到的应力随时间的变化曲线与实验结果的比较，(a) 纯铜，(b) LY12 铝合金

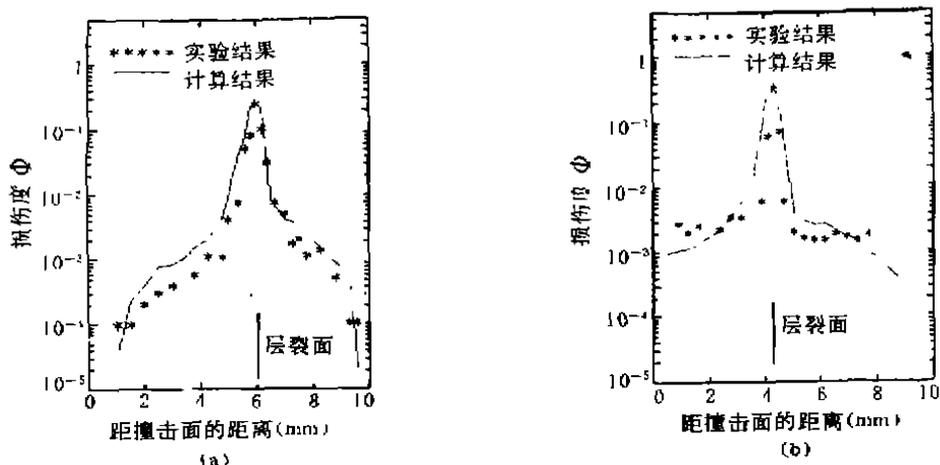


图8 计算得到的损伤度在试件中的分布与实测结果的比较,(a) 纯铜,(b) LY12 铝合金

图7—8分别给出了靶板背面应力随时间的变化历史和损伤在试件内分布的计算结果与实测结果的比较.比较表明,文[4]提出的材料延性动态损伤模型能较好地模拟材料实际损伤过程.

#### 4 讨论及总结

本文对纯铜和LY12铝合金两种延性材料进行了层裂实验、微观观测和层裂过程的数值模拟.对于LY12铝合金,实验观测表明:①微损伤是在第二相粒子中贯穿断裂形式萌生的,在基体中没有发现形核现象;②孔洞的增长则是以第二相粒子的破碎和脱落的形式出现的;③微损伤的聚合是靠孔洞之间的剪切带或细裂纹连接起来的.对于纯铜,主要观察了孔洞的增长和聚合机制:①微孔洞的增长是较大孔洞与周围小孔洞的直接连接进行的,在大孔洞的周围发现了许多小孔洞;②孔洞的聚合是在大孔洞之间直接连接进行的.

孔洞的聚合是损伤演化过程的重要阶段,它是大孔洞之间近程相互作用的结果,这种相互作用包括了基体中新的小孔洞萌生和高速塑性形变产生的热效应.这两种效应反过来又加速了孔洞的相互作用.由于数学上处理的困难,孔洞的相互作用目前还没有在理论上得到很好的描述.在本文的计算中也只是将孔洞的聚合当作瞬时过程处理,认为当损伤度 $\phi \geq \phi_{crit}$ 时,孔洞之间就发生了聚合产生宏观破坏.这一问题有待今后解决.

本文将文[4]中得到的延性动态损伤模型编入了一维Lagrange有限差分动力学程序,对纯铜和LY12铝合金的层裂过程进行了数值模拟,计算结果与实验吻合很好,这说明模型的建立是成功的,模型的适应范围还有待于今后更多的实验验证.

#### 参 考 文 献

- 1 Curran D R et al. Dynamic failure of solids, Physics Reports, 1987, 147(5—6), 253—388
- 2 Shen L T et al. Experimental study on the criteria and mechanism of spallation in an aluminum alloy, Int J Impact Eng, 1992, 12(1), 9—19

- 3 Wang Z P et al. The influence of inertial effects on dynamic growth of voids in ductile solids under intense dynamic loading, *Int J Impact Eng*, 1994, 15(1): 79-89
- 4 郑坚, 王泽平. 高应变率下延性多孔介质中孔洞的动态演化. *固体力学学报*, 1994, 15(3): 189-198

## EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS OF DYNAMIC FRACTURE IN DUCTILE SOLIDS

Zheng Jian      Wang Zeping

(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080)

**Abstract** Spall tests for pure copper and LY12 aluminum alloy are performed. The mechanism of the nucleation, growth and coalescence of micro-voids is observed by means of microscopic observation for the recovered specimens. The model presented in the other paper of authors is incorporated in a hydrodynamic one-dimensional finite-difference computer code, to simulate the processes of spallation of pure copper and LY12 aluminum alloy specimens. The model successfully modeled the processes of spallation.

**Key words** spallation, microscopic observation, micro-damage, numerical simulation