

# 层裂微裂纹的形态及层裂程度的表征参量<sup>\*</sup>

董雁瑾 叶 宁 韩闻生

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

## 摘 要

层裂是冲击载荷造成材料破坏的一种典型方式。文中运用超声 C 扫描检测系统对层裂试件的微损伤形态进行检测,确是出在一维应变加载条件下的微裂纹形态呈钱币型;另一方面,根据钱币型微纹形态,通过对层裂损伤演化过程的分析,提出了一个描述层裂程度的无量纲参量,与层裂实验数据的对比说明了这个参量能够很好地描述层裂损伤程度。

关键词:层裂;微裂纹形态;C 扫描检测;层裂参量

## 1 引 言

材料的损伤和破坏一般表现为在外载荷作用下材料内部微损伤的萌生、扩展和连接过程<sup>[1,2]</sup>。在冲击载荷作用下,材料的损伤和破坏过程表现出强烈的时效性。即不仅是冲击造成的应力波脉冲的幅值与材料损伤和破坏相关,而且应力脉冲的持续时间也直接影响材料损伤破坏的程度。究其原因,是由于外载荷引发的微损伤,其扩展过程的时间与应力脉冲的持续时间相当,因而扩展受到应力脉冲持续时间的影响。以冲击损伤和破坏的典型形式——层裂研究为例,长期以来,众多研究者关注的问题有两方面:一是层理解微损伤的萌生,扩展和连接的物理过程,当然层裂微损伤形态的认识是最基本的一步;另一方面,是建立包含应力脉冲幅值和持续时间的层裂准则。

在前一方面,对层裂微损伤形态的认识一般通过沿厚度方向剖开层裂试件,从剖面的观察而获得。从微损伤在多个剖面上的形态来反推微损伤的整体形态。微损伤数目及其大小的分布也是通过剖面上微损伤的统计而获得的。这种方法直接接触微损伤的实体,对微损伤局部区域测量的精度很高,但是从剖面到整体数据转换可能带来很大的误差。本文试图利用 C 扫描探测方法,直接获得微损伤的整体形态,从而建立起对微损伤整体形态的更可靠的认识。

在层裂准则的建立方面,先后有各种包含时效性的经验公式,如:

\* 得到国家自然科学基金和中国科学院力学所所长择优基金的资助

来稿日期:1996-08-28;修回日期:1997-03-24

$$\begin{aligned}
 T &= T_0 e^{\beta/\sigma^{31}} \\
 T &= k e^{-\alpha\sigma^{41}} \\
 T &= C \sigma^{-\lambda^{51}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

其中  $\sigma$  为应力脉冲幅值,  $T$  为应力脉冲的持续时间,  $T_0, \beta, k, \alpha, \lambda, C$  均为参数。

更具一般意义的时效性准则, 是 Tuler & Butcher 发展的积分型准则<sup>[6]</sup>, 为

$$\int_0^T (\sigma - \sigma_0)^\lambda dt = K
 \tag{2}$$

其中  $\sigma_0, \lambda, K$  为参数,  $\sigma$  为应力脉冲幅值,  $T$  为应力脉冲的持续时间。此准则是层裂的累积损伤思想的体现, 没有涉及损伤萌生和演化的物理机制。本文从对微损伤的演化过程分析出发, 提出一个描述层裂损伤程度的无量纲参数。通过与层裂实验数据的对比表明, 这个参数能够更好地描写层裂损伤程度。

## 2 层裂微损伤形态的 C 扫描检测

层裂试验是在中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放实验室的轻气炮实验室进行的。试件材料为一种铝合金结构材料。金相分析表明, 这种铝合金主要由两相材料构成: 一是以铝为基体的铝铜固溶体, 呈面心立方结构, 一般较软, 称  $\alpha$  相。另一个为  $Al_2Cu$  金属间化合物, 一般较硬, 称  $\theta$  相。  $\varnothing 70$  mm 的圆板试件如图 1 所示, 用于轻气炮平板撞击实验。圆板试件靶板受飞板冲击作用的情况剖面图如图 2 所示。左侧  $P$  代表冲击的飞板, 右侧  $T$  代表靶板。由应力波的传播情况分析可知: 将在靶板内部形成一个高的拉伸应力区, 正是这个拉伸应力造成了靶板层裂损伤的萌生和扩展。

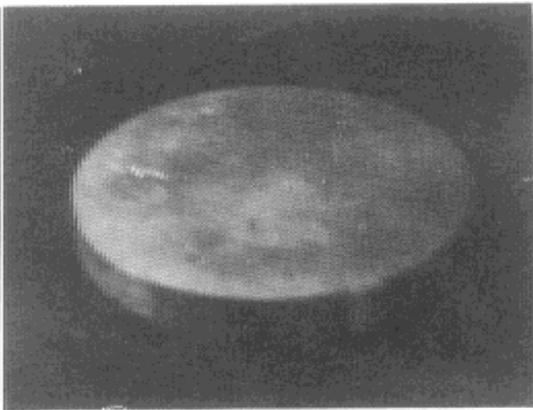


图 1  $\varnothing 70$  mm 的圆板试件

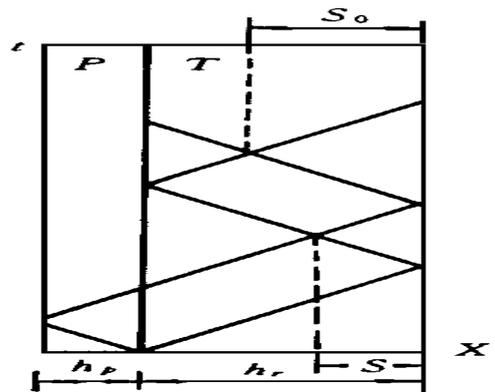


图 2 圆板试件靶板受冲击作用的情况

回收后的靶板, 使用中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放实验室的 USIP 20 C 扫描超声检测系统沿靶板的厚度方向进行 C 扫描。

先将圆板试件平放在超声检测系统的扫描水槽底部, 然后利用 USIP 20 超声仪的声程 (TOF) 信号检测试件是否处于水平, 直到调整试件使其处于水平为止, 其倾斜误差保证在  $10^{-4}$  弧度以下。

初测时首先选择合适频率的探头, 对层裂的铝合金试样选用 25 MHz、焦距为 25 mm 的水

浸探头, 然后调整聚焦探头与试件的距离, 使聚焦探头的焦点落在试件上表面上。采用界面波触发, 伤波声程 (TOF) 模拟信号通过 KEITHLEY 5312 调制编码输入卡输入微机, 据此离散信号数据由微机软件 Mark2 建立内部微裂纹的图像 (扫描速度为  $10 \text{ mm}/\mu\text{in}$ , 扫描步长  $0.02 \text{ mm}$ )。图像用 250 种彩色或 250 级灰色通过彩色显示器或彩色打印机给出。

图 3 为初测后得到的试件内部微裂纹的图像。其不同颜色或灰度代表距试件表面不同深度的微裂纹。微裂纹的位置和深度可在显示器上标示出来。检查这些微裂纹的深度可以发现, 这种层裂试件的微裂纹主要集中在厚度方向的中间层上, 因此复测时选择中间层作聚焦面, 根据公式 (3) 确定探头与试件上表面的距离 (水程)。

$$H = F - (V_{\text{材}}/V_{\text{水}}) \cdot d \quad (3)$$

其中  $H$  为水程,  $F$  为探头焦距,  $V_{\text{材}}$  和  $V_{\text{水}}$  分别为材料和水的声速,  $d$  为聚焦面与上表面的距离。

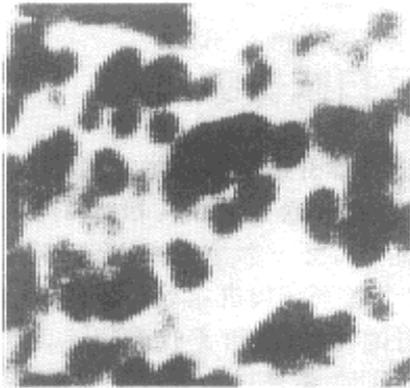


图 3 初测时试件内部的微裂纹形态——钱币型

(水程  $H = 25 \text{ mm}$ , DAC = 62 5dB)

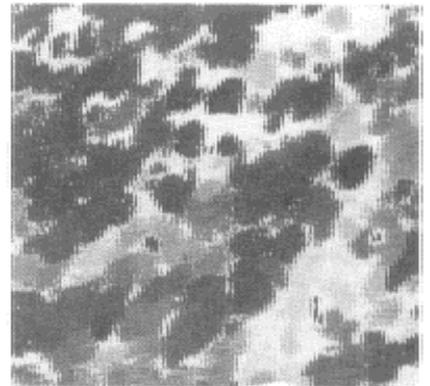


图 4 复测时试件内部的微裂纹形态——钱币型

(水程  $H = 3.9 \text{ mm}$ , DAC = 62 5dB)

测量后得到图 4 (扫描速度  $10 \text{ mm}/\mu\text{in}$ , 扫描步长  $0.02 \text{ mm}$ ), 可以发现, 选择中间层作聚焦面可以使声场能量更多地集中到中间层及其邻近层的微裂纹上, 使得初测时因回波较弱而无法检测出来的微裂纹在复测时反射较高的回波, 从而得到更为全面的微裂纹分布形态图像这种层裂的微损伤形态呈钱币型。

图 5 (扫描速度  $40 \text{ mm}/\mu\text{in}$ , 扫描步长  $0.10 \text{ mm}$  为四分之一试件的 C 扫描图像, 钱币型微裂纹群集中在圆板试件的中央部分, 在圆板试件的周界没有微裂纹, 这是由于圆板周界的影响结果。这些事实上与简单应力波分析的结果相一致。同时由于试件边界对纵波声场的影响<sup>[7]</sup>, 使得靠近边界的缺陷无法测量出来, 因此在图 5 中, 本应有微裂纹显示的两条直角边界上没有微裂纹, 即呈现出超声波测量的边界效应。

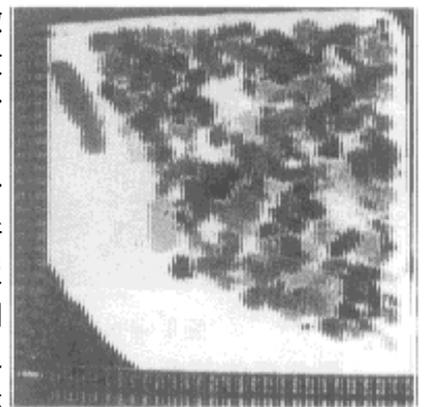


图 5 四分之一试件中的钱币型微裂纹群

### 3 层裂程度的判别参量

如前所述,层裂是一个微损伤的萌生和发展的过程。一般地,根据试件内部大量小的、各个独立的裂纹群或孔洞群的数目和大小覆盖整个试件的横截面的程度,人们用“初始层裂”、“中间层裂”和“完全层裂”来标明层裂损伤程度。大量的试验事实表明,微损伤萌生于脆性第二相。因此,微损伤萌生的数目就是应力达到断裂应力的第二相粒子的数目<sup>[8]</sup>。由断裂力学知,在应力  $\sigma$  作用下,断裂的第二相粒子的最小直径  $C_0$  为<sup>[9]</sup>

$$C_0 = \frac{\pi E \gamma}{\sigma^2} \quad (4)$$

其中  $\gamma$  是材料的有效断裂表面能,  $E$  是杨氏模量。

显然,断裂的第二相粒子的最小直径越小,可断裂的第二相粒子数就越多,即微损伤萌生的数目越多。基于以上分析,作为初级近似,认为微损伤萌生的数目与断裂的最小直径成反比,则由(4)式可得:

$$N \sim \frac{1}{C_0} = \frac{\sigma^2}{\pi E \gamma} \quad (5)$$

其中  $N$  为单位体积内萌生的微损伤数目。另一方面,微损伤的扩展量应与其扩展速度和时间相关,如果定义微损伤的特征扩展速度为其平均速度

$$V = \frac{1}{N} \sum v_i \quad (6)$$

那么由微裂纹的扩展速度表达式(例如 Mott<sup>[10]</sup> 的速度公式)知,这个速度与外载和材料常数无关,而且很快达到极限速度而保持恒定,这样,作为近似,可认为特征扩展速度近似为常数。

于是,层裂微损伤总的扩展是由下式计算

$$S \sim N V t = \frac{\sigma^2 N t}{\pi E \gamma} \quad (7)$$

从量纲上看,  $S$  是一个无量纲量。上式表明,层裂程度与应力脉冲的幅值平方成正比,与应力脉冲的持续时间成正比,与材料的杨氏模量和有效表面能成反比。符合通常的物理理解。

### 4 与实验数据的对比

沈乐天等<sup>[11]</sup>利用轻气炮的平板撞击技术对本文所述铝合金进行了层裂的试验研究。冲击后的试件分别进行了拉伸试验及微观观察,拉伸实验主要测量层裂损伤后材料强度的降低,微观观察为这种强度的降低提供直接的支持。他们定义了损伤能量  $F$  为

$$F = 1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_0} \quad (8)$$

其中  $\sigma_r$  是层裂损伤后材料的残余强度,  $\sigma_0$  是材料的原始强度。可以看出,未损材料其损伤参量  $F = 0$ , 完全层裂材料的损伤参量  $F = 1$ 。

按照不同损伤参量,试验分为四组,每组试验数据均用下列形式的层裂准则拟合,

$$(\sigma/\sigma_0 - 1)^n \Delta T = K \quad (9)$$

其中  $\sigma$  是拉伸应力,  $\Delta T$  是应力脉冲持续时间,  $K$ ,  $n$  和  $\sigma_0$  是参数,依赖于损伤参数。

表 1、2、3、4 分别列出了对应于  $F = 0, 1/3, 1/2$  和 1 的实验数据以及用 (8) 式拟合的结果和误差。用本文提出的无量纲参量  $S$  (式 (6)) 的拟合结果及误差也列在表中。可以看出, 用无量纲参量  $S$  描述不同程度的层裂, 除在成核阶段误差超过 10% 以外, 其它阶段均在 10% 以内, 符合较好。

表 1 第一组层裂实验结果,  $F = 0$ 

试验号	冲击速度 $V$ (m/s)	脉宽 $\Delta T$ ( $\mu$ s)	拉伸应力 $\sigma$ (M Pa)				
			实验测定	沈文计算值	误差(%)	本文计算值	误差(%)
880022	400	0.134	3167	3160	0.2	2871	9.3
87126	257	0.234	2133	2175	2.0	2173	1.9
88049	134	0.85	1125	1057	6.0	1140	1.3
88050	93.5	1.36	783	865	10.4	901	15.1
84075	101	1.70	843	796	5.6	806	4.4

表 2 第二组层裂实验结果,  $F = 1/3$ 

试验号	冲击速度 $V$ (m/s)	脉宽 $\Delta T$ ( $\mu$ s)	拉伸应力 $\sigma$ (M Pa)				
			实验测定	沈文计算值	误差(%)	本文计算值	误差(%)
84-98	108.9	1.741	914	913	0.11	925	1.2
84-71	122.4	1.393	1029	1010	1.85	1034	1.1
84-62	160.6	0.835	1359	1316	3.16	1335	1.7
84-88	176.9	0.669	1500	1497	0.20	1492	0.5

表 3 第二组层裂实验结果,  $F = 1/2$ 

试验号	冲击速度 $V$ (m/s)	脉宽 $\Delta T$ ( $\mu$ s)	拉伸应力 $\sigma$ (M Pa)				
			实验测定	沈文计算值	误差(%)	本文计算值	误差(%)
84-13	122.2	1.733	1028	1026	0.19	1021	0.7
84-70	139.0	1.358	1146	1137	0.79	1154	0.7
84-10	176.1	0.856	1494	1410	5.62	1454	2.7
84-90	187.4	0.676	1592	1589	0.19	1636	2.8

表 4 第二组层裂实验结果,  $F = 1$ 

试验号	冲击速度 $V$ (m/s)	脉宽 $\Delta T$ ( $\mu$ s)	拉伸应力 $\sigma$ (M Pa)				
			实验测定	沈文计算值	误差(%)	本文计算值	误差(%)
84-11	136.8	1.735	1153	1152	0.09	1091	5.38
84-112	148.2	1.382	1251	1247	0.32	1223	2.23
84-13	181.0	0.839	1536	1502	2.21	1569	2.15
84-87	193.4	0.670	1645	1643	0.12	1756	6.70

## 5 结 论

利用 C 扫描超声波检测和量纲分析, 得到如下结论:

- 1) 一维应变冲击载荷作用结构铝合金产生的层裂微损伤形态呈钱币状, 且试件周界效应的影响很大。
- 2) 提出一个描写层裂程度的无量纲量  $S \sim \frac{V \sigma_t}{\pi E \gamma}$ , 与实验对比说明这个无量纲量可以很好地描写层裂程度。

## 参 考 文 献

- 1 夏蒙芬, 韩闻生, 柯享久, 白以龙. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(I). 力学进展, 1995, 25: 1
- 2 韩闻生. 一中铝合金层裂的细观动力学规律. 中国科学院力学所博士论文, 1993
- 3 Clathart J. L., Preston F. W. The fatigue modulus at glass. J. Appl Phys, 1946, 17: 189
- 4 Zhurkov S. N. Anniversary Issue of the Int. J. Fract. Mech., 1975, 11: 5
- 5 Pines B., Sinenko A. F. The Calculated and Empirical Values of the Lifetime of Metals and Alloys under a Load. Fiz. Tverdogo Tela, 1960, 2: 1043
- 6 Tuler F. R. and Butcher B. M. A Criterion for the Time Dependence of Dynamic Fracture. Int. J. Fracture Mech., 1968, 4: 4
- 7 中国机械工程学会无损检测学会编. 超声波探伤. 1989, 79
- 8 Wensheng Han and Yilong Bai. Embryo-damage Induced Nucleation of Microcracks in an Aluminum Alloy under Impact Loading. Acta Metall. Mater., 1995, 43(6): 2157-2162
- 9 Curry D. and Knott J. F. Met. Sci., 1986, 10: 1
- 10 Mott N. F. Engineering, 1948, 165: 16
- 11 Shen L. T., Zhao S. D., Bai Y. L. and Luo L. M. Experimental Study on the Criterion and mechanism of Spallation in an Aluminum Alloy. Int. J. Impact Eng., 1992, 12(1): 9

## The Influence of the Dominant Frequency Position on FFT Spectrum Leakage

Liu Giming Ying Huaqiao

(China Orient Institute of Noise & Vibration, Beijing, 100088)

### Abstract

When FFT spectrum leakage was discussed before, the dominant frequency position was not considered. In fact, the FFT spectrum is the convolution between real time series and window function in domain of frequency, the dominant frequency position influence on leakage should not be ignored. The leakage regularity of different dominant frequency position was deduced in this paper for fundamental waves FFT spectrum, and a correction method was also put forward.

Keywords: *FFT, leakage correction.*

## The Global Behavior of Cylinder-rounding Flow

Zhang Xinhua Xu Jianxue

(Institute of Nonlinear Dynamics, Xi'an Jiaotong University 710049)

### Abstract

In this paper, the dynamics of cylinder-rounding flow is studied. Firstly, the related discrete dynamical model is obtained by Galerkin technique. Secondly, all the infinite singular points are located and their stabilities are analyzed respectively. Thus, it is possible to search for the dynamical global structure of cylinder-rounding flow.

Keywords: *cylinder-rounding flow, global stability, infinite singular point*

## The Microcrack Shape of Spallation and Characteristics of Spalling Level

Dong Yanjin Ye Ning Han Wensheng

(Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

### Abstract

Spallation is a typical mode of impact damage and fracture of materials. This paper reported that by using Ultrasonic C Scanning System, the shape of microcracks was found to be like penny based upon the detecting results of Ultrasonic System. Moreover, based upon the penny shape of microcracks and analysis of evolution process of microcracks, a non-dimensional parameter describing the spallation was proposed. Comparison with the experimental results illustrates that this parameter is appropriate for characterizing spallation.

Keywords: *spallation, microcrack shape, c-scanning test, characteristics of spalling level*