

加载破裂和卸载破裂的焦散阴影区 动态特征的实验研究^{*}

许昭永¹⁾ 杨润海¹⁾ 赵晋明¹⁾ 王赟赟¹⁾
熊秉衡²⁾ 王正荣²⁾ 梅世蓉³⁾

1) 中国昆明 650041 云南省地震局

2) 中国昆明 650051 昆明理工大学激光研究所

3) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

摘要 以实时全息干涉计量方法和焦散阴影光学法,用有机玻璃试样直观、形象地研究加载过程和卸载过程破裂时的应力(应变)场、塑性区或成核区(阴影区)不同地动态特征变化. 结果发现,在低应力时,预制裂缝端点先出现应变核(条纹密集区),进而形成焦散阴影区. 这些核和阴影区会随荷载增加变大,随卸载而减小. 在一定的压力范围内重复加载卸载(循环加载),焦散阴影区则反复增大缩小;但在高应力时,尤其在将出现大破裂时,加载和卸载的焦散阴影区变化是不可逆的,其变化也完全不同. 加载破裂时的焦散阴影区由慢到快迅速扩展;而卸载时的焦散阴影区则扩展较慢,并且在尖角形前方有一圆形阴影.

关键词 加载破裂 卸载破裂 焦散阴影区 动态应力场

中图分类号: P315.8 **文献标识码:** A

引言

陈□(1981)、耿乃光等(1980)和姚孝新(1981)研究认为,不同的应力途径都可导致破裂. 并研究了波速、声发射等在此情形下的前兆特征. 尹祥础(1987)、尹祥础和尹灿(1991)、尹祥础等(1994)以及 Yin 等(1995, 2000)提出加卸载响应比概念. 当系统处于稳定状态时,其对加载和卸载的响应路径相同,加载和卸载响应率相等;而系统偏离稳定状态时,其对加载和卸载的响应路径不同,加载和卸载响应率不相等,前者大于后者. 也即认为某些物理量在卸载和加载过程中变化相同则为稳定正常;若变化不同甚至差异很大则为破裂或地震前兆反映,并将其运用于地震预测中(Yin *et al.*, 1995, 2000; 陈学忠, 尹祥础, 1995; 宋治平等, 2000). 实验地震学引入断裂力学研究地震失稳发生过程和一些前兆特征以及后来的成核问题. 然而比较清晰直观的结果较少. 在我们引入焦散阴影光学方法之前, Lockner 等(1992)和 Lockner(1993)以及雷兴林等(Lei *et al.*, 2000)利用声发射定位研究微破裂成核和毁坏区的形成;耿乃光等(1992)利用岩石遥感热红外成像研究、预测未

^{*} 国家重点基础研究专项经费(G1998040704)和中国地震局双重项目(9691309020301))以及国家自然科学基金(46764010 和 19732060)共同资助.

2001-04-29 收到初稿, 2002-01-04 收到修改稿, 2002-02-01 决定采用.

来破裂区；李世愚等(2000)利用光透射强弱研究岩石试样上模拟构造——裂缝端部的微破裂汇聚；Scholz(1990)对塑性区的形成扩展进行了论述；Dieterich (1992)和 Ohnaka (1992)对成核过程及扩展形式依据一些实验结果做了间接计算或推论. 所有这些研究，均不如我们将焦散阴影光学区和塑性区、成核区及裂纹聚集区(毁坏区)等联系在一起有效直观(Xu *et al.* , 2001). 焦散阴影光学方法是实验应力分析中常用的方法(Kalthoff, 1987；Nolec-hoeksema, Gordon, 1987). 它反映的是模型材料状态和折射率的变化. 我们将其引入地震模拟试验中. 现在再以此直观地研究加载和卸载破裂的应力(应变)场不同的动态特征变化，并进而将记录研究大破裂的动态发展过程(包括塑性区的形成和扩展).

1 试验方法

1.1 试验系统

采用 200 mm×200 mm×15 mm 有机玻璃板试样，试样上用激光刻画出与最大主应力 $\sigma_1(\sigma_y)$ 方向约成 30°角、长 35 mm、宽约 0.1~0.3 mm 的穿透裂纹，以雁列式多裂缝(断层)组成 Y 形块体边界. 在防震平台上架设双轴小型压机，垂直向和水平侧向压力最大可达 300 kN. 加力方式：实验开始，在试样侧向和垂直向(x 和 y 方向)同步加力，达到一定程度后(使 $\sigma_x=\sigma_y=5$ MPa)保持 σ_x 大致不变. 以后有 3 种加力方式：一为不断增加 σ_y 直到最后断裂；二为当增加 σ_y 到约 70%破裂应力时卸载；三为逐次升高循环加载，即增加 σ_y 到一定程度后卸载，卸载到一定程度后再加载，并且超过前一次加载的最大值，如此循环往复. 从加力开始，即开始以实时全息干涉计量方法对应变图象进行摄影记录(图 1a)，同时以微破裂信息存储分析系统开始对声发射记录(图 1b).

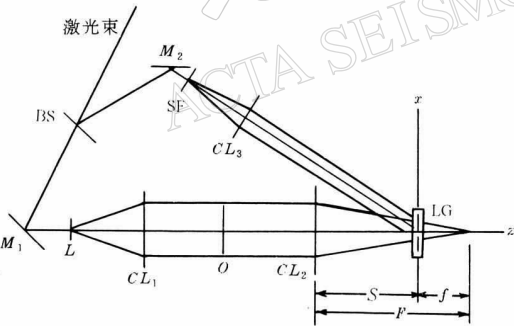


图 1(a) 实时全息干涉计量摄影装置
BS 为分束镜； M_1 , M_2 为反射镜；SF 为空间滤波
波器； CL_1 , CL_2 , CL_3 为透镜；LG 为
液门；O 为透明有机玻璃试样

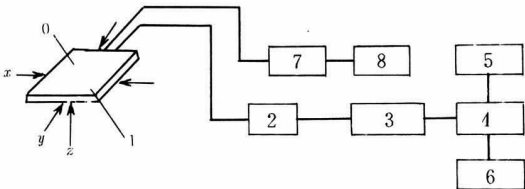


图 1(b) 试样加力方式及传感器布置图
1. 压电晶体传感器；2. 放大器；3. 瞬态波存仪；
4. 计算机；5. 分析；6. 打印机；
7. 应变仪；8. 计算机

1.2 焦散阴影光学方法原理

1.2.1 光程差与主应力关系

当试件受力后，光程要发生相应的变化. 一是由于受力后试件厚度的微小变化而引起；二是由于受力后试件折射率的微小变化而引起. 对于平面应力($\sigma_3=0$)， $z(\sigma_3)$ 方向的应

$$\text{变为} \quad \epsilon_z = -\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

对于光学各向同性材料物光和参考光之间的光程差为

$$\Delta s = dc(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

$$\text{对前表面反射} \quad c_f = -\frac{\nu}{E} \quad \text{对透射} \quad c_t = A - (n-1)\frac{\nu}{E} \quad (3)$$

式中, d 为试件厚度, A 为绝对应力光学系数, ν 为泊松比, E 为杨氏模量, n 为折射率, σ_1 为主应力.

在透射光场中, 干涉条纹的亮纹条件为 $\Delta s = N\lambda$, 于是在 N 级亮条纹处的 z 方向应变为

$$\epsilon_z = \frac{N\lambda}{[n - (AE/\nu) - 1]d} \quad (4)$$

式中, N 为条纹序数, $[n - (AE/\nu)]$ 可视为试件的有效折射率(effective refractive index). 于是, 由式(4)可定量计算 z 方向试件的应变 ϵ_z . 通过 z 方向应变与应力和的关系式(1), 可以计算主应力之和的分布.

1.2.2 焦散线光路原理

焦散线是利用纯几何光学的映射关系, 将物体特别是应力集中区域的复杂变形状态, 转换成简单而清晰的阴影光学图形. 当模型受载时, 在应力奇异区附近, 模型厚度和材料折射率的变化都是非常显著而且非均匀的. 当满足一定条件时, 使从模型前、后表面出射的光偏离平行状态, 在空间形成三维包络面即焦散曲面. 图 2 即显示了光路原理, 并且右边图中白的(亮)曲线即为焦散线, 曲线内的黑区即为焦散阴影区. D 为焦散线的特征长度. 通过对焦散线的测量计算可以得到有关的力学参量, 如应力强度因子、断裂韧性和塑性区大小等(详见下文). 焦散阴影光学区可以用透射或反射光得到, 本文为透射光.

对于 II 型破裂, 应力强度因子

$$K_{II} = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3(3.02)^{\frac{3}{2}}z_0cd\lambda_m^{\frac{3}{2}}}D^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

式中, D 为焦散线的特征长度, λ_m 为光学系统的放大倍数, z_0 为焦散象平面到物(试件)平面的距离.

$$J \text{ 积分} \quad J = \frac{\sigma_0}{bz_0d}D^3 \quad (6)$$

式中, b 为经验常数.

沿 II 型裂缝延伸方向塑性区与焦散阴影区特征长度的关系

$$r_{0c} = \frac{E'}{2\pi bz_0d\sigma_s}D^3 = \alpha D \quad (7)$$

式中, α 为与光学系统放大倍数和试件厚度 d 等有关, 并且小于 1 的常数, 即塑性区一般小于焦散阴影区.

1.3 成核尺度

Scholz(1990)假定, 如果把滑动带当作无限弹性介质中的一个圆形裂纹处理, 则成核(或破裂)长度为

$$l_c = \frac{E\delta}{2(1-\nu^2)\sigma_n\Delta\mu} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu G_c}{(\sigma_1 - \sigma_f)^2} \quad (8)$$

式中， E 为杨氏模量， ν 为泊松比， σ_n 为正应力， $\Delta\mu$ 为摩擦系数改变量， δ 为特征滑动距离， G_c 为剪切断裂能， σ_1 为远场应力， σ_f 为断层面上的动摩擦力。

由于对 II 型裂缝 $J=G_{IIc}$ ，因此，可由式(6)、(8)计算成核区尺度。

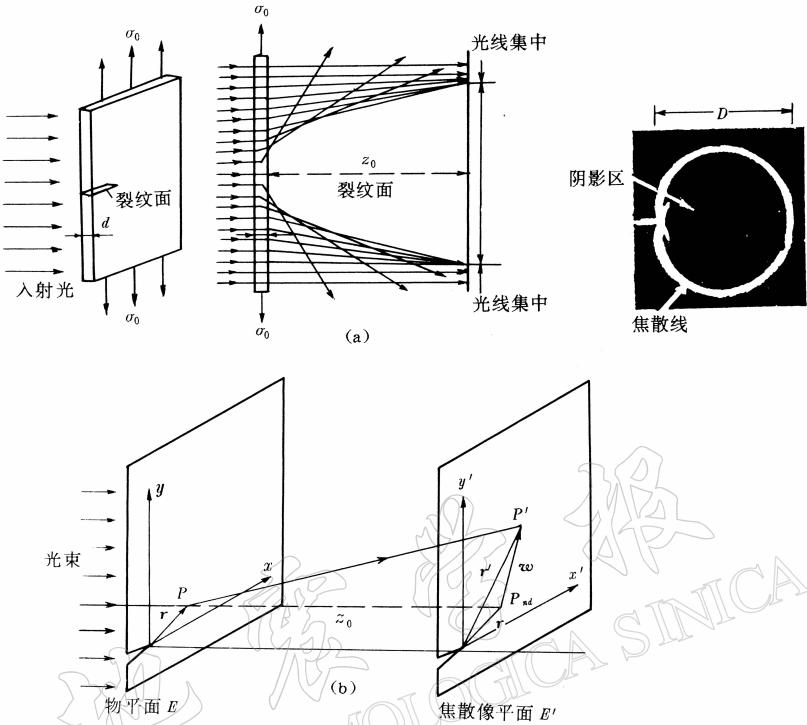


图 2 焦散线光路原理

(a) 光路图；(b) 像平面和物平面的关系

1.4 试样裂缝处应力分析

本实验试样为斜切裂缝、双轴加压。其受力既有平行于裂缝的剪应力，又有垂直于裂缝的正压应力。曾有人根据断裂力学将其等同于张剪裂分析，而实际上由于压剪裂存在巨大摩擦力，两者肯定有很大差异。然而，大量地震是压剪类型，因此，试验采用斜切(压剪)裂缝。现有焦散线理论推导仅有纯 II 型破裂和(斜)张剪裂，实验也仅有纯 II 型破裂。因此，仅借用前述式(5)、(6)、(7)和(8)表示，可以用在斜切裂缝附近及端点处的焦散阴影区计算应力强度因子、断裂韧性、塑性区及成核区。本研究更多的是将焦散阴影区看作塑性区或成核区。

2 试验结果

2.1. 加载过程中应变核、焦散阴影区形成及发展的动态过程

2.1.1 加载前期

从低应力开始，即在各个预制裂缝端部形成应力集中区。从干涉条纹图象看，各个预制裂缝端部条纹较密。随着垂直向应力 σ_y 增加，各个预制裂缝端部条纹越来越密。我们把这个条纹密集区称为应变(应力)核(图 3a)。当 σ_y 增加到约 30% 破裂应力时，各个预制裂

缝附近及其端部形成暗影区,且端部暗影区更大些(图 3a, b). 裂缝附近的暗影区正是由斜切裂缝双轴加压产生的摩擦所引起的,而纯剪切和张剪则仅在裂缝端部形成暗影区. 它与其相邻的高密条纹区有明显的分界线. 这个暗影区即为焦散阴影区,明亮分界线即为焦散线. 这些焦散线(或阴影区的边界)为光滑曲线(图 3b). 这些核和阴影区会随荷载增加而变大,随卸载而减小. 在一定的压力范围内重复加载卸载(循环加载),焦散阴影区则反复增大缩小. 即此时加卸载,阴影区变化是可逆的.

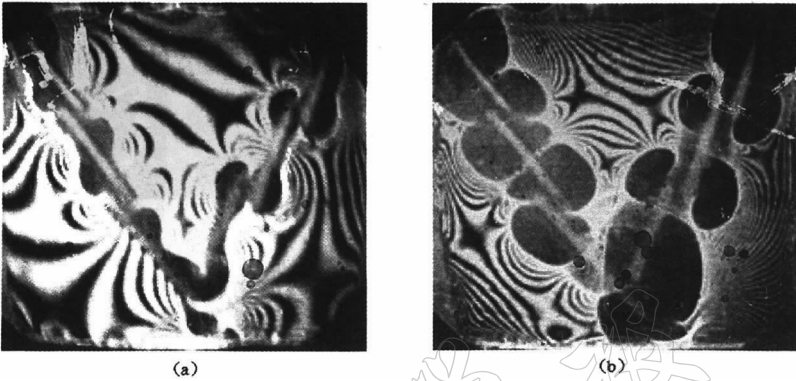


图 3 加载过程中的应变核和焦散阴影区
(a) 低应力时的图象; (b) 高应力时的图象

2.1.2 加载后期——伴随着主大断裂特殊焦散阴影区的形成及扩大的动态过程

我们记录到了从预制裂缝端点开始形成,并逐步扩大直到最后破裂(断裂)的应变核及焦散阴影区的动态发展过程. No. 1 及 No. 4 试样持续加载直到整个试样崩溃. 在断裂前几秒,一个预制裂缝端点的阴影区,从规则光滑(边界)形迅速变大,并最终变成带尖角形,而后急剧扩展(明显的阴影区);随后,还出现分岔,如图 4a, b, c, d 所示. 再如图 4e, f 所示,在一个预制裂缝端点的阴影区,从规则光滑(边界)形迅速变大,并最终变成带尖角形后,又一个预制裂缝端点的阴影区,也从规则光滑(边界)形迅速变大,并最终变成带角形而后扩展;如此,还有第三条(如图 4g),等等. 在断裂前一瞬间,在几条带角形交汇区突然出现一横向尖角阴影,并迅猛扩展直至横穿整个试样(如图 4h),接着主破裂发生,整个试样崩溃. 图 4 即为显示这种动态过程的图. 图 4a, b, c, d 为试样 No. 1 的动态过程,图 4e, f, g, h 为试样 No. 4 的动态过程. 这两块试样的断裂细节并不相同,但都有尖角阴影区的迅猛扩展.

2.1.3 加载过程中的破裂位置

为进行对比,对试样 No. 3、No. 4 和 No. 5(后两者为未穿透裂缝试样)同时作了微破裂定位. 粗略地看,几个试样焦散阴影区先达到最大值的地方不尽相同,但它们还是有共同特点,即焦散阴影区达到足够大时才有微破裂活动,而破裂总是发生在焦散阴影区内. 图 5 以试样 No. 3 表示了在约 70%破裂应力时的这种结果:图 5a 为焦散阴影光学的照片,b 为破裂定位图, c 为试样照片. 规则直线段为激光预刻裂缝,其余为新破裂纹. 由图 5 可看出,破裂集中区与新破裂纹位置是一致的,它们都在焦散阴影区内.

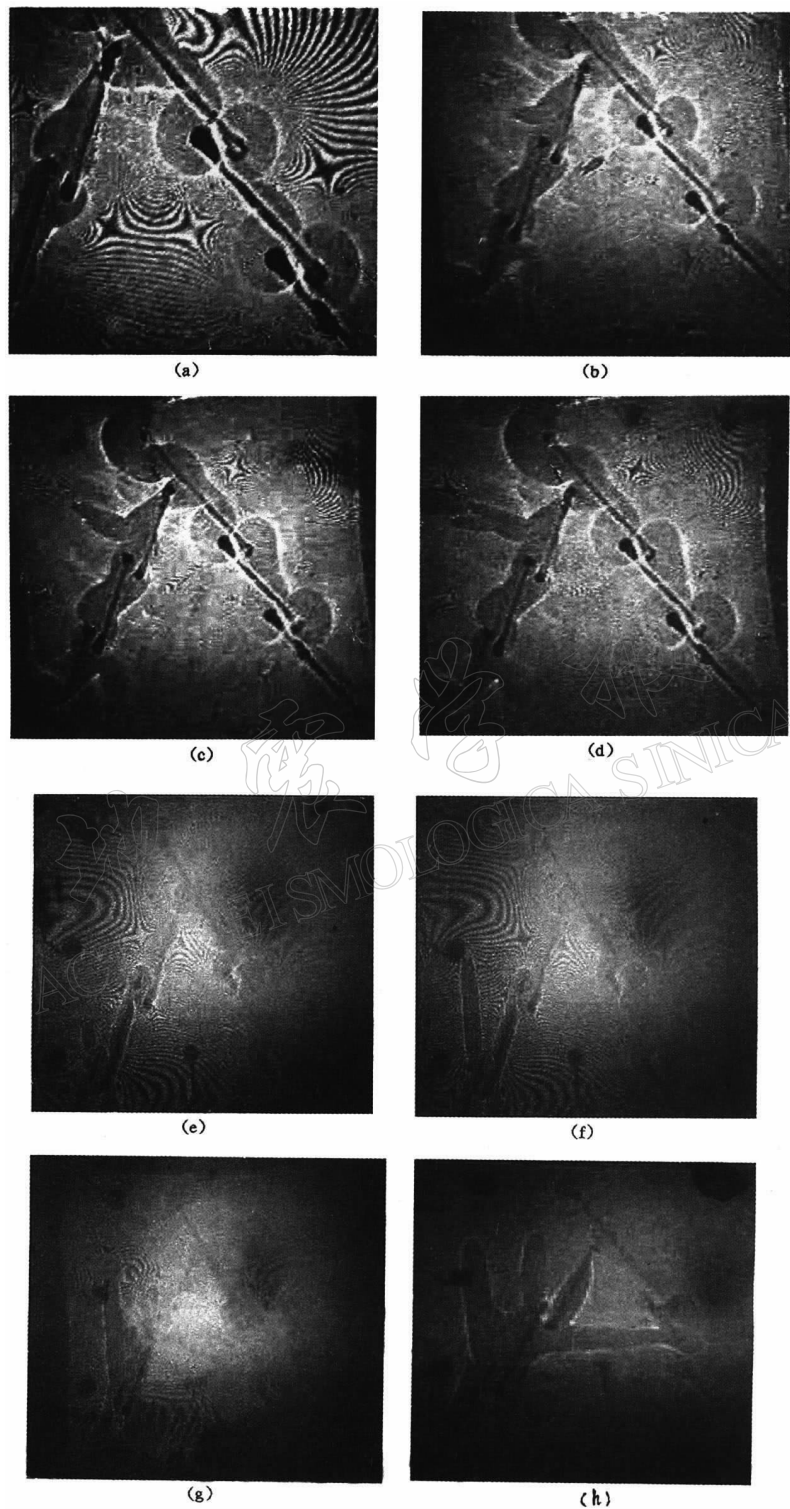


图 4 加载后期——伴随着主(大)断裂特殊焦散阴影区的形成及发展的动态过程
(a)、(b)、(c)、(d)为 No. 1 试样的动态过程，(a)靠前，(d)靠后；
(e)、(f)、(g)、(h)为 No. 4 试样的动态过程，(e)靠前，(h)靠后

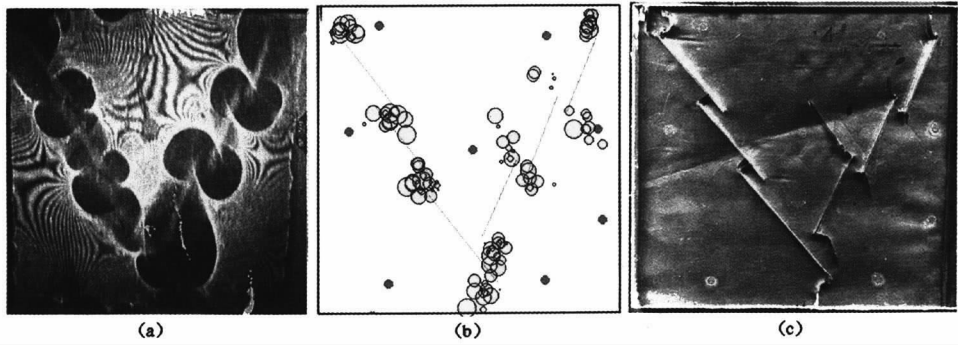


图 5 破裂总发生在焦散阴影区内的照片及图示
(a)焦散阴影光学照片；(b)破裂定位图；(c)试样照片

2.1.4 应变“空区”

随着应力的增加，条纹密集分为两类：一类是发散型，由中心向外扩散；另一类是汇聚型，由外向中心汇聚。前者中心为凸区，为峰；后者中心为凹区，为谷。这两者应变都大，都剧烈；两者之间应变较小。我们把高应变包围着的低应变区称为应变空区。本文所有图中条纹密集区都为剧烈变化区，但并未区分其是凸区还是凹区。本试验在加载和卸载过程中都有应变空区，如图 3，4，5，6 中的条纹稀疏区(条纹如四角星者)所示。每个试样上都有多个应变急剧变化区(条纹密集区及焦散阴影区)，也有多个应变空区。定位结果表明，微小破裂在阴影区出现，大破裂也在阴影区中；但主大破裂(最后崩溃)却是从阴影区开始而后向应变空区急剧发展，如图 4 的尖角阴影即指向应变空区。但并非每个阴影区都能形成尖角向外扩展，扩展时也并非向任意一个应变空区进行，而是向裂缝较近的应变空区迅猛扩展，形成主大断裂。

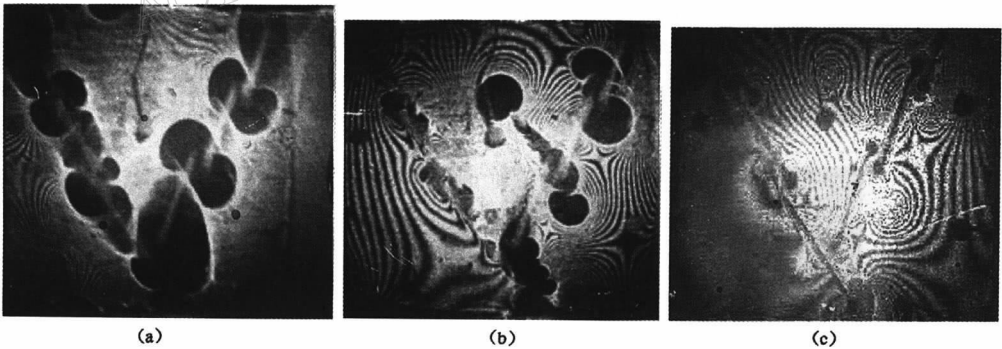


图 6 卸载过程中的应变核和焦散阴影区
(a) 高应力时的焦散阴影区；(b) 卸载过程中的焦散阴影区；(c) 与 b 图相应的应变场

2.2 卸载(应力调整)过程中应变核及焦散阴影区的形成和发展的动态过程

No. 2、No. 3 和 No. 5 都在大约 70%破裂应力时终止加载，以后卸载。在卸载(应力调整)过程中，微破裂似乎更活跃，人耳能听到很多响声。在干涉条纹图上，一是看到条纹变稀应力减小的过程，但同时有尖角阴影区的扩展，在此尖端处还有一个圆形暗影区。图 6b

即显示了两个这种情形, 其中试样中部的相当突出明显. 图 6c 是与图 6b 响应的应变场, 其条纹直接显示的是等高线, 由亮纹条件式(4)可计算应变场, 进一步由式(1)计算应力场. 随着应力减小到 0, 这些暗影区也逐步减小以至消失.

2.3 循环加载过程中应变核及焦散阴影区的形成和发展

在卸载后重新加载依然为先有应变核(条纹密集区), 再有焦散阴影区, 并且依然是焦散阴影区达到足够大时才有微破裂活动. 只有当快要扩展时(卸载), 才有卸载阴影区活动(图略).

3 讨论和结论

如前所述, 焦散阴影区反映的是材料状态或应力场分布的变化, 也可以说是材料或应力异常分布的变化. 研究发现(Xu *et al.*, 2001), 焦散阴影区最大, 过程区(微破裂汇聚区)较小, 成核区居中, 塑性区比焦散阴影区略小. 由此, 我们可以形象地将焦散阴影区作为某种分布, 如塑性区或成核区直观地表示. 这种结果甚少, 但这种研究是有意义的.

3.1 破裂孕育过程前期加、卸载阴影的动态特征

从上述结果看, 破裂孕育过程前期加载和卸载时的焦散阴影区的动态特征是逆向相同的, 即加载时的焦散阴影区由小变大, 而卸载时的焦散阴影区则由大变小. 即使达到临界值, 它也是大小、形状基本不变, 尽管会在预制裂缝尖端形成微裂纹集中区(过程区), 只要裂缝还未扩展, 焦散线或阴影区边界都还是光滑曲线; 一旦应力下降, 焦散阴影区即变小, 但其边界线依然是光滑的. 这种特征变化其实质是材料在低应力状态时所显示的弹性或线弹性特征.

3.2 破裂孕育过程后期加、卸载阴影的动态特征

从上述结果看, 破裂孕育过程后期加载和卸载时的焦散阴影区的动态特征是很不相同的. 持续加载使在预制裂缝尖端微裂纹集中区(过程区)达到一定程度, 裂缝就会扩展, 此时焦散线或阴影区边界从光滑曲线变成带尖角形曲线. 再扩展, 在裂纹尖端依然为尖角形, 并与沿裂纹的条带形阴影区连成一体. 当裂纹尖端应力集中达到相当程度, 在裂纹正要扩展时突然卸载, 此时尖角形焦散阴影区依然存在并向前延伸. 而紧邻裂纹尖端外的圆形焦散阴影区可能正是残留的应力集中从而能使裂纹继续扩展. 继续卸载焦散阴影区消失, 裂纹停止扩展. 加载时尖角形前端无圆形焦散阴影区, 卸载时尖角形前端有圆形焦散阴影区, 这是二者的最大区别; 其次, 加载时的焦散阴影区角形没有卸载的尖锐, 并且加载时的焦散阴影区比卸载时的大; 第三, 加载时的焦散阴影区比卸载时深暗得多. 由此可推断, 加载时裂缝尖端的应变能比卸载时的大, 因此, 加载时破裂的强度相对较高, 卸载时破裂的强度相对较低.

本实验的意义, 不仅在于记录到了加载破裂和卸载破裂的不同动态特征, 而且形象地显示了如塑性区或成核区的动态特征变化, 这可为地震前兆物理机制的研究及预测提供重要参考依据.

3.3 焦散阴影区内的破裂和尖角形曲线扩展

我们(Xu *et al.*, 2001)对单一裂缝两端的过程区、成核区、焦散阴影区和塑性区作了实验和理论探讨, 并对多个裂缝组合的块体边界的多点破裂作了实验和理论探讨. 单裂缝的结果对多裂缝也适用: 在预制裂缝端点出现清晰的应变核和焦散阴影区; 先达到临界值

的阴影区内先发生破裂;破裂发生在预制裂缝端点区附近,即焦散阴影区内,但多裂缝还存在有裂缝之间的相互作用,如相邻两裂缝端点的焦散阴影区既相连又有分界线;左行雁列与右行雁列岩桥附近的焦散阴影区是不相同的,但它们各自相似.本文式(5)、(6)、(7)是对纯Ⅱ型破裂导出的,对本实验的破裂方式并不适用,但可以用它作些定性估计.随着焦散阴影区变大,特征长度 D 变大,应力强度因子变大,当它大于等于断裂韧性时,裂纹失稳扩展.扩展一定程度后,裂纹扩展力小于裂纹扩展阻力,裂纹停止扩展.如此反复,即有多次破裂发生.这里把大破裂类比于大地震,小破裂类比于小地震,其概念与裂纹失稳扩展及止裂条件是一致的.至于卸载时的破裂,可能是由于条件的改变,使断裂韧性及裂纹扩展阻力减小,依然能满足裂纹失稳扩展条件所致.当卸载太多,裂纹扩展力小于裂纹扩展阻力,裂纹停止扩展(破裂停止).虽都为破裂,卸载和加载时的机理并不相同.一是低断裂韧性,一是高断裂韧性,这也就是加载时的破裂的强度相对较高的原因.此外,加载过程中尖角形阴影区的迅猛扩展,它仅在试样最后崩溃之前出现.前人往往把岩石试验的最后破坏类比于主震,但由上述结果判断,这种看法值得商榷.就现在结果看,没有任何一次地震能使地球崩溃.而破裂发生、裂纹扩展和止裂与地震发生、断层(裂)扩展和停止类比将更合适.当然,一次大破裂之前若与试样最后崩溃之前出现的现象有相似性,那么对主破裂(崩溃)前尖角形阴影区的迅猛扩展的研究是有意义的,这也需进行深入研究.

综上所述,焦散阴影区是材料状态,如塑性区或成核区的一种直观反映.在低应力加载时的应力场、焦散阴影区与卸载时的变化是可逆的,即焦散阴影区随加载增大,随卸载减小;但在高应力特别是有大破裂将出现时,加载时的应力场、焦散阴影区与卸载时的变化是不可逆的,其变化完全不同;并且卸载时的破裂和加载时的也不相同.

参加本研究的还有云南省地震局地震工程研究院李佩林、华培忠高级工程师,李正光工程师;昆明理工大学激光研究所吕晓旭副教授、钟丽芸教授、张永安和余灿麟实验师.在此一并致谢.

参 考 文 献

- 陈颙. 1981. 不同应力途径压缩下的岩石声发射[J]. 地震学报, 3(1): 41~48
- 陈学忠, 尹祥础. 1995. 加卸载响应比理论在中强地震($7 > M > 6$)预测中的应用[J]. 中国地震, 11(1): 33~37
- 耿乃光, 陈颙, 姚孝新. 1980. 应力途径和破裂前兆[J]. 地震学报, 2(3): 236~244
- 耿乃光, 崔承禹, 邓明德. 1992. 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端[J]. 地震学报, 14(增刊): 645~652
- 李世恩, 滕春凯, 卢振业, 等. 2000. 典型构造微破裂结的实验研究[J]. 地震学报, 22(3): 278~287
- 宋治平, 尹祥础, 王裕仓, 等. 2000. 美国加州地区地震前加卸载响应比的时空演化及预测意义[J]. 地震学报, 22(6): 588~595
- 姚孝新. 1981. 不同应力途径下辉长岩的破裂特征[J]. 地震学报, 3(1): 49~54
- 尹祥础. 1987. 地震预报新途径的探索[J]. 中国地震, 3(1): 1~7
- 尹祥础, 尹灿. 1991. 非线性系统失稳的前兆与地震预报——响应比理论及其应用[J]. 中国科学(B辑), (5): 512~518
- 尹祥础, 陈学忠, 尹灿, 等. 1994. 响应比理论用于地震预报的进展[J]. 地震, (增刊): 18~23
- Scholz C H 著. 1990. 马胜利, 曾正文, 刘力强, 等译. 1996. 地震与断裂力学[M]. 北京: 地震出版社, 88~94, 174~183
- Dieterich J H. 1992. Earthquake nucleation on faults with rate- and state-dependent strength[J]. *Tectonophysics*, 211: 115~134
- Kalthoff J E. 1987. Shadow optical method of caustics[A]. In: Kobayashi A S ed. *Handbook of Experimental Mechanics*

- [C]. New Jersey: Prentice hall Inc, 430~500
- Lei X, Kusunose K, Rao M V M S, *et al.* 2000. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring[J]. *J Geophys Res*, **105**: 6 127~ 6 139
- Lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, *et al.* 1992. Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions [A]. In: Evans B, Wang T F eds. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rock*[C]. London: Academic Press, 3~31
- Lockner D A. 1993. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J], *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, **30**: 883~899
- Nolec-hoeksema R C, Gordon R B. 1987. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble[J]. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech*, **24**: 135~144
- Ohnaka M. 1992. Earthquake source nucleation: a physical model for short-term precursors[J]. *Tectonophysics*, **211**: 149~178
- Xu Zhaoyong, Yang Runhai, Xiong Bingheng, *et al.* 2002. Experimental study of the process zone, nucleation zone and plastic area of earthquakes by the shadow optical method of caustics[J]. *Pure Appl Geophys* (in press)
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, *et al.* 1995. A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, **145**: 701~715
- Yin X C, Wang Y C, Peng K Y, *et al.* 2000. Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**: 2 365~2 383

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMIC FEATURES OF SHADOW AREAS OF CAUSTICS IN RESPONSE TO LOADING/UNLOADING FRACTURE

Xu Zhaoyong¹⁾ Yang Runhai¹⁾ Zhao Jinming¹⁾ Wang Yunyun¹⁾
Xiong Bingheng²⁾ Wang Zhengrong²⁾ Mei Shirong³⁾

1) Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650041, China

2) Laser Institute, Kunming Technology University, Kunming 650051, China

3) Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

Abstract: Using a plexiglass sample and by means of real-time holographic interferometry and shadow optical method of caustics, the different features of dynamic variation in stress (strain) field, plastic area and nucleation zone (shadow area) when the sample fractures during loading (loading-fracture) and unloading (unloading-fracture) are studied visually. The results show that the strain nuclei (zones with dense fringes) appear first at the tips of prefabricated cracks at low stress, and then the shadow areas of caustics form with the increase of load. These nuclei and shadow areas can become larger, or smaller, when the process of loading, or unloading, goes on. When the stress is kept within a certain range, the shadow areas of caustics can become larger and smaller alternatively with repeated loading and unloading (cyclic loading). However, when loading and unloading at high stress, in particular with the macrofracture is about to appear, the variations of the shadow areas of caustics are irreversible and quite different. The shadow areas of caustics expand rapidly at an increasing speed when loading-fracture appears. In contrast, the shadow areas of caustics expand at a lower speed when unloading-fracture appears; besides, there is a circular shadow in front of the sharp-angle shaped area.

Key words: loading-fracture, unloading-fracture; shadow areas of caustics; dynamic stress field