

岩石细观损伤破坏的观测研究

尚嘉兰 孔常静

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

李廷芥 张梅英

(中国科学院岩土力学研究所, 武汉, 430071)

摘要 利用扫描电镜 (SEM), 对香港白岗岩等岩样在单轴压缩状态下, 进行细观结构 (μm 尺度) 观察, 研究其微损伤的萌生、扩展、连接直至破坏的行为, 分析了白岗岩等岩石的细观破坏机制及其与宏观力学行为的关系, 得到了一些重要的感性认识和若干观察记录。为认识岩爆发生的机理及复杂应力状态下岩石损伤破坏的理论分析提供了实验依据。

关键词 白岗岩和大理岩 扫描电镜 SEM 单轴压缩试验 细观损伤破坏

1 引言

在高地应力岩体中开挖地下洞室 (包括采矿工业、建筑业等) 时, 常常发生岩爆。岩爆是洞室围岩突然释放能量、发生小规模 (尺度为米) 脆性破裂的结果。岩爆的物理过程相当复杂, 世界各国已采取了多种探测方法, 试图探测岩爆的原因, 预测岩爆的发生。至今并未得到完全可靠并十分成功的结果^[2,3]。岩爆的形成机理、发生条件及发展过程等理论研究, 走过了漫长的探索过程。至今没有一个公认的, 较完满的共识^[1,2]。

然而, 无论如何, 围岩的应力状态和岩性都是岩爆发生的必要条件。在适当应力状态下, 原始损伤会发生活动; 新的损伤也会不断萌生、发育; 损伤的扩展、连接, 最终造成岩石体系的破坏。这一过程, 在自然界存在, 以地壳变动、山体滑坡和地震等形式出现, 在工程中表现为边坡不稳定、塌方、矿震和岩爆等; 在实验室岩样实验中, 以应力—应变曲线的非线性变化、试件破坏和断裂等方式出现。它们均起因于岩石微结构的损伤萌生、长大、连结直至破坏。分析研究岩石在一定应力状态下的损伤萌生、扩展至破坏的过程及其规律, 即从细观层次上探讨其损伤演化直至破坏的规律是很有必要的。这无疑将为认识现场复杂应力状态下岩爆发生的机理提供可靠的基础^[4-8]。

为此, 我们利用中科院力学研究所 LMN 实验室的 S—570 型扫描电镜 (SEM), 对香港白岗岩等岩样在单轴压缩状态下, 在不同压应力时进行细观结构 (μm 尺度) 观察, 记录并分析了

其微损伤的萌生、扩展、连接直至破坏的行为,以探究白岗岩等岩石在受力过程中的细观结构的改变和细观损伤的演化过程,探索建立岩石材料细观结构演化的力学分析及其与宏观变形破坏行为的关系的途径。得到了若干观测记录,为岩石损伤破坏的理论分析提供了依据。

2 实验

2.1 试样

香港白岗岩和湖北黄石大理岩。

试件有二种结构形式: 1) 矩形板: 长 $L = 15 \sim 20\text{mm}$, 宽 $w = 5 \sim 10\text{mm}$, 高 $H = 1.6 \sim 2.2\text{mm}$; 2) 矩形板有中心圆孔: 孔径 $\Phi = 3 \sim 3.5\text{mm}$ 。试件观察面经研磨抛光和镀金, 以使扫描电子束能从非导电的岩石表面反射。

2.2 实验设备

实验在中科院力学研究所LMN实验室的S-570型扫描电镜(SEM)的拉伸台上进行, 拉伸台的最大载荷为2000N, 最大行程5mm。在试件背面粘贴电阻应变片(B×C_{120-1AD}), 其位置如图1a所示。用3800广域动态应变仪记录试件的应变值。在加载过程中用WD-2电镜连机图象处理系统自动记录每一时刻的载荷 F 和相应的应变 ϵ 。采样频率为每40 μs 一次。根据记录的载荷 F , 以初始截面积 $A = WH$ 除之, 便可得到该件上的工程应力 $\sigma = F/A$ 。

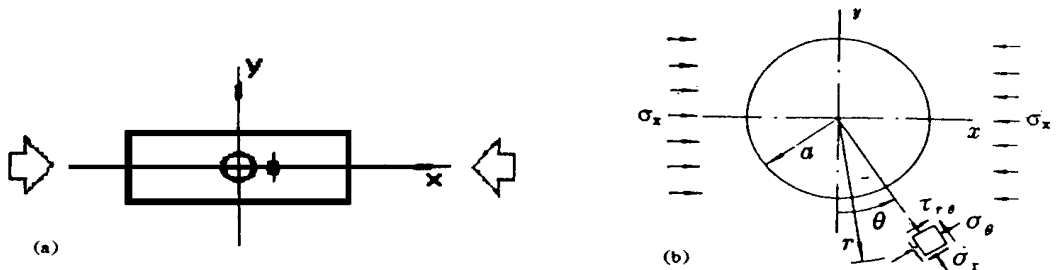


图1 (a) 中心有圆孔的矩形平板背面应变探头的位置 (b) 和单向受压时板上一点 (r, θ) 的应力状态

Fig. 1 (a) Location of strain gauge on the back of rectangular plate with a circular hole and (b) stress state at (r, θ) of the plate under uniaxial compression loading

2.3 实验的进行

在加载的不同阶段, 对试件表面进行扫描电镜观察、拍照。得到各不同受力条件的试件表面形貌, 微裂纹的萌生、扩展、连接, 直至宏观断裂破坏全过程的观察记录。

3 实验结果

试验共进行9次, 其中香港白岗岩(HG)7次; 大冶黄石大理岩(HM)3次。二种试件结构形式为: 1) 矩形板2次, 2) 有圆孔矩形板7次。

3.1 应力—应变关系

(1) 白岗岩矩形板单轴压缩试验

图2给出白岗岩矩形板单轴压缩试验HGM C03的应力—应变曲线。试验HGM C03和HGM C09初始时斜率较低, $E_0 = 25.7\text{GPa}$ 和 74GPa 。在弹性变形阶段, 应力—应变曲线的

平均斜率为切线模量 $E_t = 39.7 \text{ GPa}$ 和 86.8 GPa 。可以认为 HGM C03 有弹性极限 $\sigma_e = 157.6 \text{ MPa}$ 。之后, 受载岩样进入非线性变形阶段。二者的断裂应力为 $\sigma_b = 188.7 \text{ MPa}$ 和 164.7 MPa 。由于端部迅速破裂, 应力、应变立即下降。HGM C03 的卸载模量为 $E_u = 31 \text{ GPa}$, 比其初始模量高约 20%。两个试样的初始模量、切线模量都相差很远, 表现出岩样实验的分散性。其断裂应力 σ_b 较接近。在其它试验中观察到矩形板试件单轴压缩最终发生劈裂张拉破坏, 主裂纹大致沿主应力方向贯通。

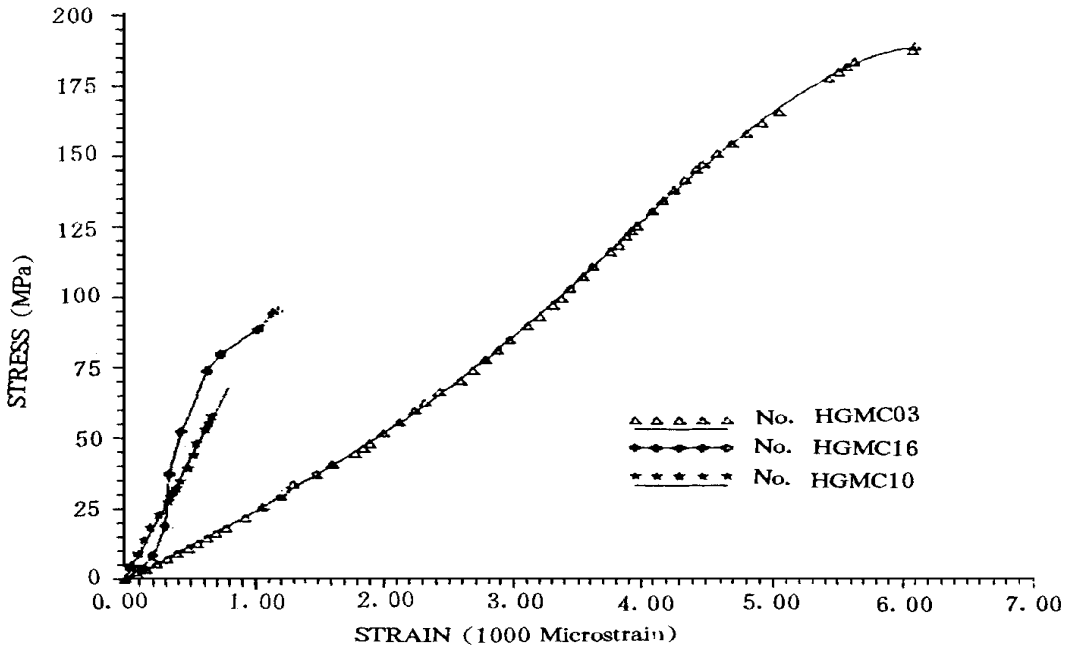


图 2 岩石单轴压缩试验的应力—应变曲线

Fig. 2 Stress and strain curves of rock specimen under uniaxial compression loading

(2) 有中心圆孔的矩形板单轴压缩试验

中心有圆孔的矩形板单轴压缩试验的应力—应变曲线示于图 2 中。白岗岩试验的割线弹模为 $E_s = 73.7 \text{ GPa} \sim 105.2 \text{ GPa}$ 。大理岩单轴压缩试验的应力—应变曲线基本上为一直线。两个试验 HMM C10 和 HMM C20 的割线弹模为 $E = 84.2 \text{ GPa}$ 和 73.7 GPa 。

当正中心有圆孔的矩形板两对边受压应力 α_x 和 α_y (压应力为正) 时 (见图 1b)、圆孔周围应力分布的弹性解为:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\alpha_x + \alpha_y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\alpha_x - \alpha_y}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha_x + \alpha_y}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\alpha_x - \alpha_y}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= - \frac{\alpha_x - \alpha_y}{2} \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \end{aligned}$$

其中 σ_r 、 σ_θ 和 $\tau_{r\theta}$ 分别为所考察点 (r, θ) 的径向应力、周向应力和剪应力。在我们的条件下, 矩形板受单向压应力 $\alpha_x = \alpha$, $\alpha_y = 0$ 。测量应变 ϵ_x 的探头粘贴在距孔边约 1.6 mm 处, 其位置为

$r_g = a + 1.6 \text{ mm}$ $2a$, $\theta = \pi/2$ 。这里 x 方向的应力为 $\sigma_x = \frac{15}{32}\sigma = \frac{15}{32}\sigma$ 即应变片所受应力 σ_x 小于无孔时应受应力 σ 的一半。这使有孔矩形板的应力应变曲线均有较大的斜率。白岗岩中心有圆孔矩形板测得的名义模量为 $73.7 \sim 105.2 \text{ GPa}$, 比无孔矩形板测得的模量 $39.7 \sim 86.8 \text{ GPa}$ 大。

3.2 启裂点

(1) 白岗岩矩形板的启裂点, 因岩石强度和变形能力的不同而不同。但启裂应力较高, 在 $\sigma = 33 \sim 65 \text{ MPa}$, 较其断裂应力而言, $\frac{\sigma_c}{\sigma_b} = (17.5 \sim 40)\%$ 。HGM C03 的板宽 5 mm , 仅为 HGM C09 试件宽度的一半, 可能是其更易启裂的一个原因。

(2) 白岗岩中心圆孔矩形板试验, 启裂应力较矩形板略低, $\sigma = (11.8 \sim 51) \text{ MPa}$, 平均 27.4 MPa , $\frac{\sigma_c}{\sigma_b} = (13.4 \sim 54)\%$ 。启裂均发生在孔边的 x 轴附近(图 3a)。

在矩形板中心圆孔孔壁附近, $r = a$, 径向应力 $\sigma_r = 0$, 周向应力 $\sigma_\theta = (1 + 2\cos 2\theta)\sigma$, 即 $\frac{\sigma_\theta}{\sigma} = 1 + 2\cos 2\theta$ 。在孔壁与 x 轴的交点处, $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\sigma_\theta = -\sigma$ 。周向应力为与 σ 大小相等的拉应力。因此, 孔顶正中处承受的周向拉应力最大, 张裂纹首先在这里萌生。有中心圆孔矩形板单轴压缩试验的启裂应力与材料的拉伸强度密切相关。

(3) 大理岩有中心圆孔矩形板试验, 其启裂点发生位置与白岗岩相同。两个实验的起裂点分别为 $\sigma = 30 \text{ MPa}$ 和 12 MPa , $\frac{\sigma_c}{\sigma_b} = 50.0\%$ 和 35.6% 。

3.3 裂纹发展及破坏方式

(1) 矩形板

矩形板试件单轴压缩试验, 主要开裂方向沿压应力方向, 属劈裂张拉破坏。

(2) 有中心圆孔矩形板白岗岩试验

有中心圆孔矩形板单轴压缩试验时, 裂纹扩展有这样一些特点:

1) 从孔顶处开裂后, 随着外加应力的增加裂纹主要沿主应力方向扩展。图 3 给出 HGM C15 试件孔右侧不同应力条件下裂纹发展的显微照片。裂纹扩展范围(从圆孔边计, 沿主应力方向裂尖达到的范围) s , 随着外加应力的增加而增加(见图 4, 其中下标 r 和 l 分别表示圆孔的右、左侧), 在接近断裂应力之前, 其增长速率几乎不变。

2) 裂纹扩展方向主要受主应力控制, 多沿主应力方向或最终形成与主应力方向成 $15 \sim 20$ 夹角的张裂纹(见图 3d)。裂纹扩展过程中有时出现大角度分叉, 如图 5 出现两条向左上方发展的剪切裂纹 a 和 b , 与主应力方向夹角约为 45° 。

裂纹扩展方向除受主应力控制之外, 也受局部条件的影响, 诸如沿矿物颗粒界面、晶界或沿解理穿晶扩展(见图 6a, b), 向有原始孔洞和裂纹处发展等。有时裂纹发展到一孔洞处可在较大应力增量范围内停止扩展, 在主要裂纹前方形成了小裂纹群(见图 6c, d), 增加载荷后, 裂纹群相互连接或与主裂纹连接。

裂纹在扩展过程中常常形成网状结构, 裂纹附近的矿物常有小于颗粒尺度的开裂、破碎等现象发生, 形成碎裂带。这是脆性断裂的表现。

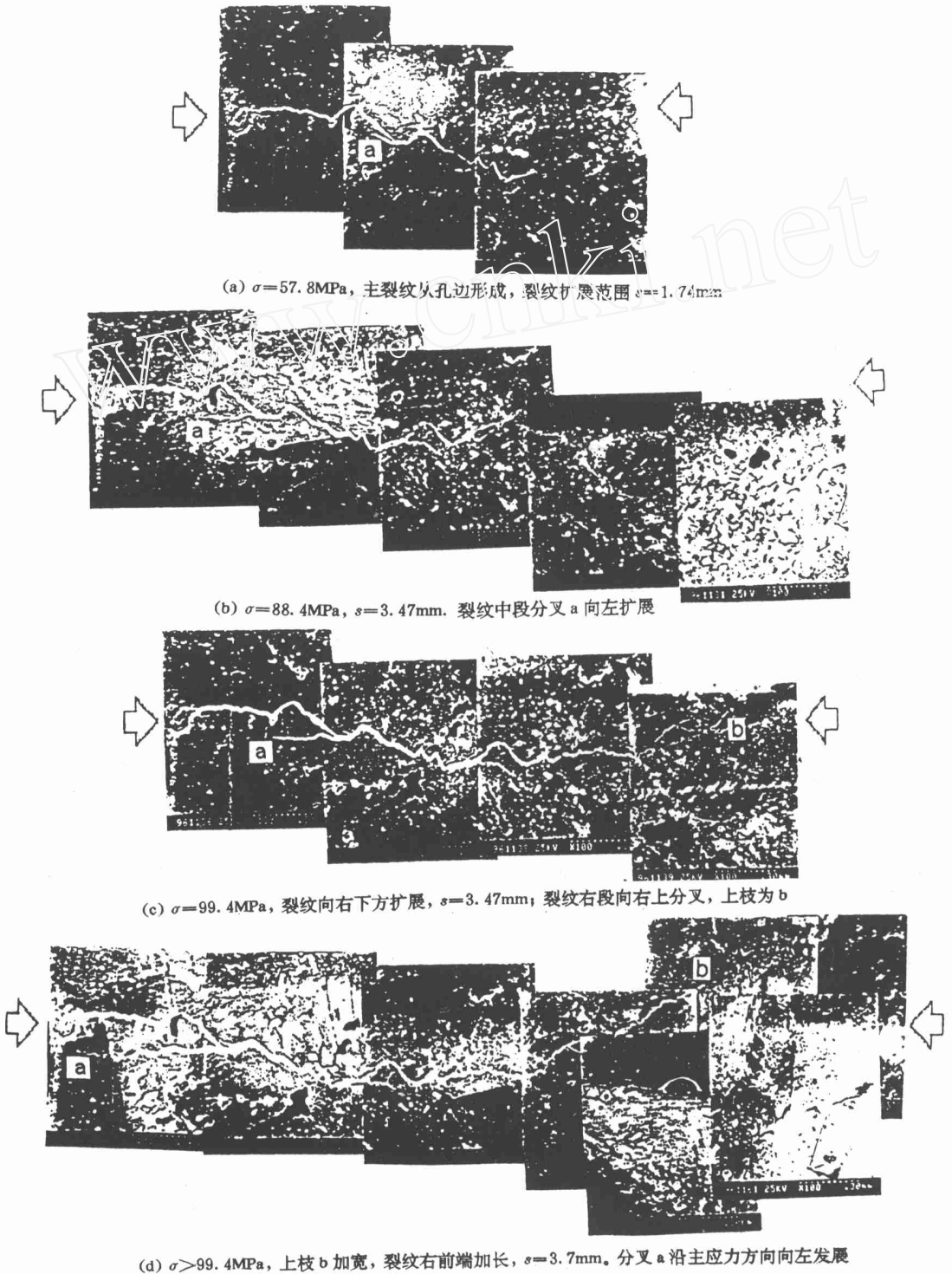


图3 试件HGM16孔右侧不同应力条件下裂纹发展的显微照片。随应力的增加, 裂纹增长、加宽

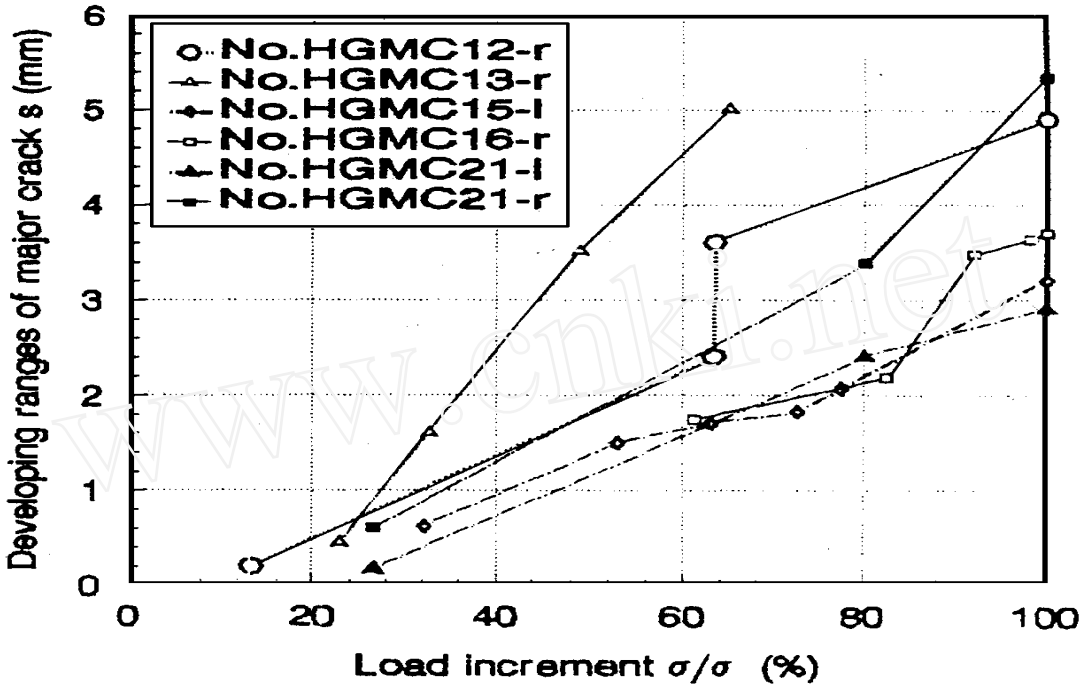


图4 裂纹扩展范围 s 随载荷的增加而增长

Fig. 4 The change of crack developing range with load increment

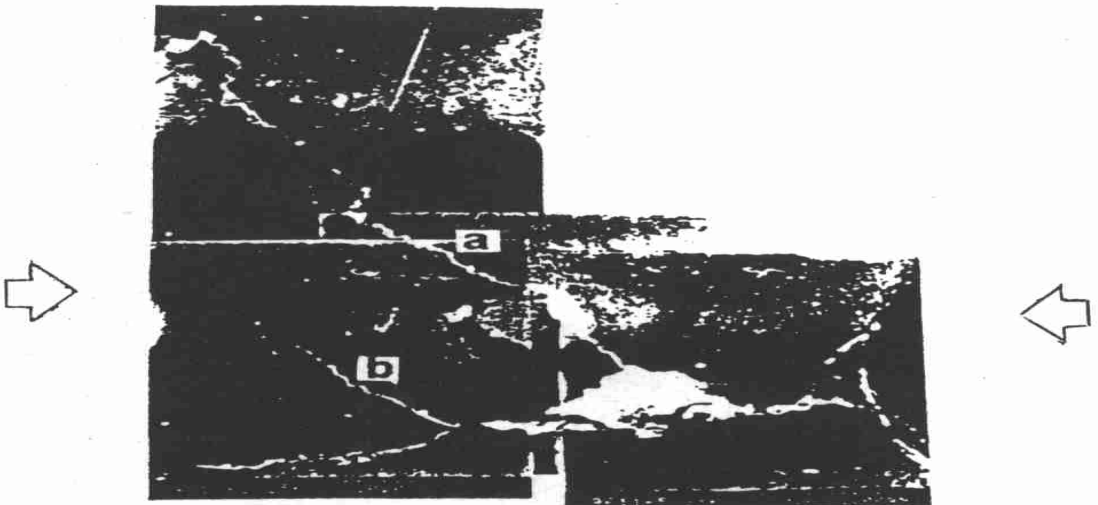


图5 试件HGMC13主裂纹分叉,分叉裂纹 a, b 沿与主应力方向成 45° 夹角的方向扩展,直至试件左端

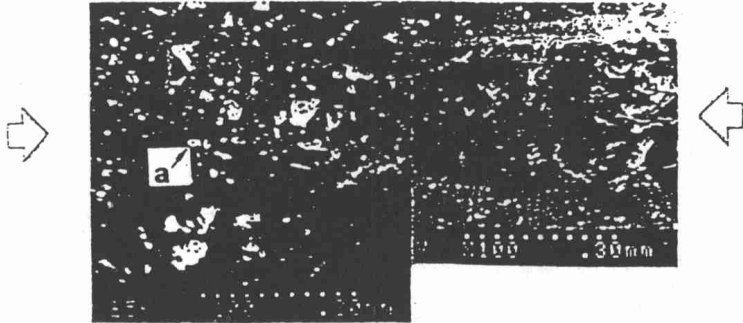
Fig. 5 When specimen loaded under uniaxial compression main crack bifurcated and branch cracks developed along direction of 45° with main stress



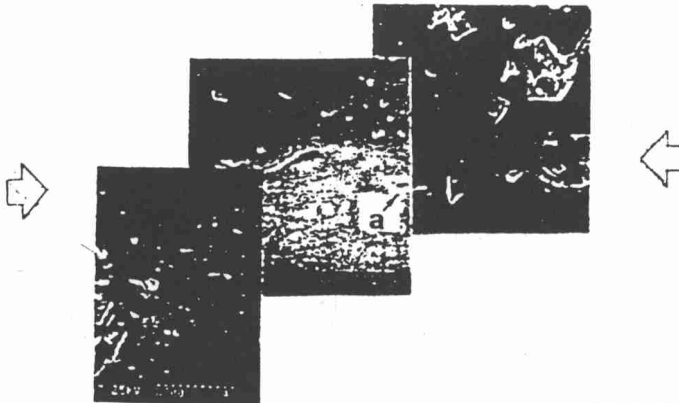
(a) 试件 HGMC15, $\sigma > 68.5\text{ MPa}$ 时, 孔右侧主裂纹沿晶界扩展, 晶粒边界开裂.



(b) 试件 HGMC15, $\sigma > 68.5\text{ MPa}$ 时, 孔左侧主裂纹经地一晶粒, 形成沿晶界和穿晶粒开裂.



(c) 试件 HGMC16, $\sigma = 79.2\text{ MPa}$ 时, 孔左侧裂纹扩展至一原始孔洞 a.



(d) 试件 HGMC16, 加载后卸载, 再加载至 $\sigma = 94.4\text{ MPa}$ 后, 裂纹仍滞留在孔洞 a 外, 高倍率观察可见其前方有细小裂纹发育.

图 6 裂纹沿矿物颗粒界面或晶面(图 6(a), 6(b))和向有原始孔洞和裂纹处扩展图 6(c). 裂纹发展到孔洞处, 经较大应力增量, 裂纹未见扩展图(d)

Fig 6 Details of crack developing in uniaxial compression progress

3) 孔的正上下方板边缘有时会崩坏, 出现一个三角形口(见图7), 为最大剪应力区的剪切破坏所致。

4) 大理岩有中心圆孔矩形板单轴压缩试验, 如HMMC10孔右侧(图8a), 当加载到 $\sigma_c/\sigma_b = 92.3\%$ 时, 已出现两组裂纹 a 和 b ; 再加载到 $\sigma_c/\sigma_b = 100\%$ 时, 试件圆孔上下侧剪应力最大区域突然发生剪切断裂(图8b)。 a 组裂纹闭合, b 组裂纹加宽, 且向左下方扩展到孔口。圆孔的上下侧断口与孔壁夹角约为 45° 。断口从孔口上下沿主应力方向发展到试件两端, 断口附近除有大量碎屑崩落, 两侧还有大量裂纹发育, 其程度随远离断裂带的距离而下降(见图9)。

值得注意的是, 由于岩石为天然聚晶材料, 试件端部易存在较大的加工破损, 加载时端部易发生应力集中而过早开裂。

总之, 有中心圆孔的矩形板单轴压缩试验, 启裂发生在加压方向的孔顶处。随着外力的增加, 裂纹会沿主应力方向, 或与主应力方向成小于 $15\sim 20^\circ$ 夹角方向扩展。其附近和前方, 于矿物颗粒边界、节理面、原始损伤等处出现裂纹群, 或构成网状裂纹。由于其它裂纹的形成和扩展, 原裂纹的扩展会停滞, 甚至闭合。随着外力的增加, 最终在圆孔的上下侧突然发生断裂错动。断口从孔口上下沿主应力方向发展到试件两端。

4 小结

从以上实验观察, 得到几点认识:

1) 本实验的两种岩样, 香港白岗岩和湖北大理岩, 均为脆性材料, 其中白岗岩断裂强度高, 在 $165\sim 189\text{MPa}$, 初始弹模在 $40\sim 87\text{GPa}$ 。

有中心圆孔矩形板试件的断裂应力, 白岗岩高于 $58\sim 96\text{MPa}$, 大理岩为 $36\sim 60\text{MPa}$ 。

2) 矩形板试件单轴压缩实验启裂在试件两端, 启裂应力为断裂应力的 $17\sim 40\%$; 中心圆孔矩形板启裂在圆孔沿加压方向直径的外边缘处, 启裂应力为断裂应力的 $13\sim 54\%$ 以下(白岗岩平均 27%)。

裂纹为张拉型, 裂纹沿外加压应力方向或与之成 $15\sim 20^\circ$ 方向发展。局部受矿物颗粒边界、节理和孔洞等影响而曲折前进。裂尖前方小裂纹群首先在晶界、节理或原始损伤处萌生。随外加荷载的增加, 小裂纹相互连接, 与大裂纹相连接而扩展。裂纹扩展至缺陷处, 可能停滞一段; 在外加位移不变时, 裂纹可能不断延伸, 应力下降。裂纹多数是呈束状或网状扩展。

矩形板试件的最终断裂形态为倾斜约 $15\sim 20^\circ$ 的张剪型破坏。有中心圆孔矩形板最终为孔上下端剪切断裂, 主裂缝沿外加压应力方向, 而且形成两个或数个断裂带。

3) 本实验给出了二种岩石、二种试件构形的单轴压缩试验的观察。观察得到的结果, 为描述岩石材料组织的细观结构参数、结构演化的细观力学分析提供了一些实验事实。它为建立细观分析与宏观变形破坏行为之间的关系作了较详实的准备。

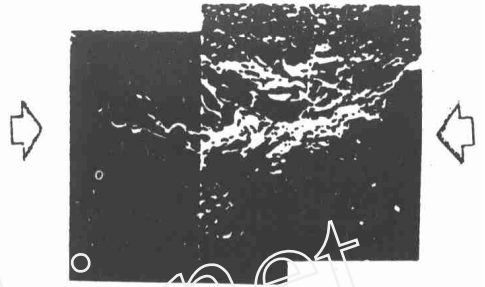
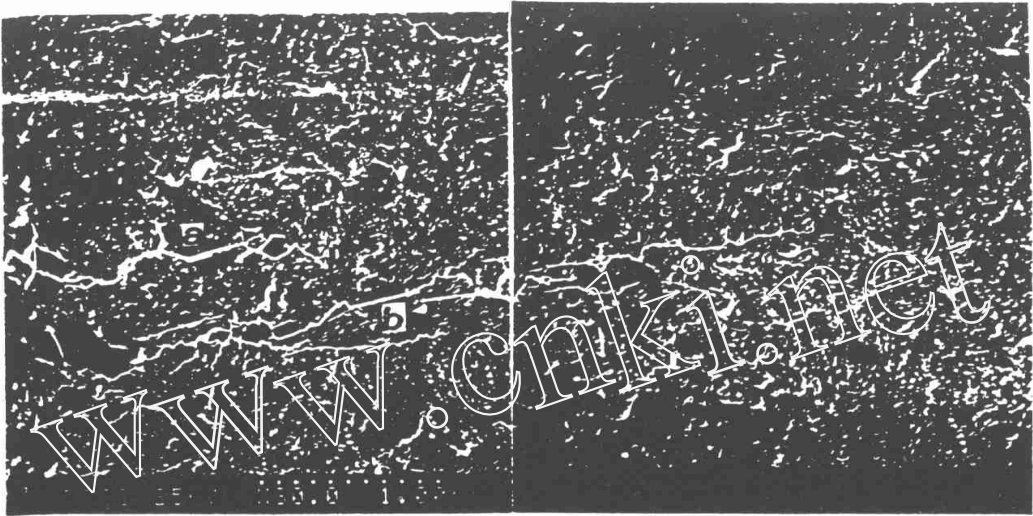
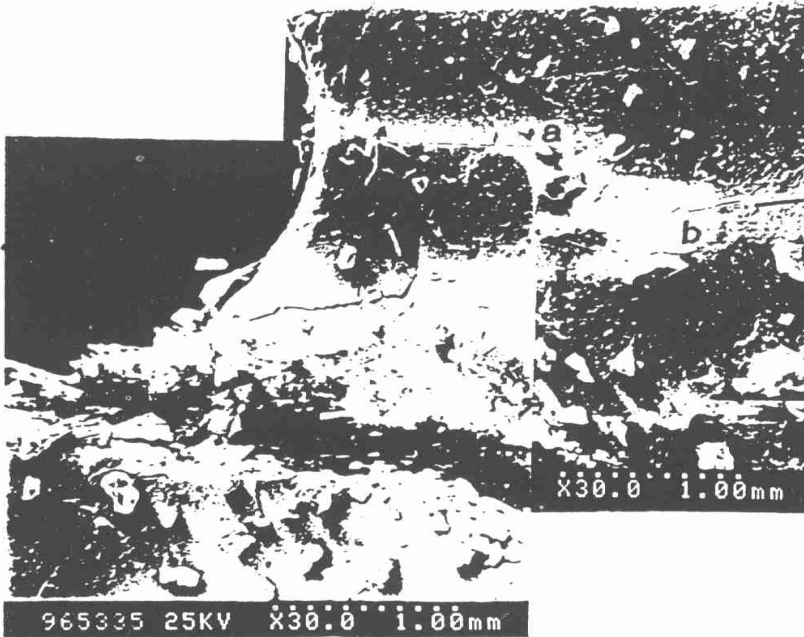


图7 试件HMMC21, $\sigma_c = 76.8\text{MPa}$

Fig. 7 Specimen HMMC21, $\sigma_c = 76.8\text{MPa}$



(a) $\sigma/\sigma_b=92.3\%$ 时, 形成两组裂纹:a 和 b



(b) $\sigma/\sigma_b=100\%$ 时, 裂纹组 a 闭合, 裂纹组 b 向下方扩展到孔口; 孔口和裂纹组 b 下方形成宏观断裂

图 8 主裂纹的发展和试件的最终断裂

Fig. 8 Developing of the major crack and final break

当然, 微细观结构(如矿物颗粒边界、矿物结晶、解理的产状及花岗岩类岩石不同矿物颗粒的差异等)对微裂纹萌生和发展的影响等问题, 尚有待进一步观察分析研究。与宏观实验结果相对照, 建立在细观结构演化基础上的微细观力学模型; 尽可能在细观结构层次上找寻特征参量, 与宏观力学规律之间建立有实验事实依据的关系, 作为建立宏观力学模型的基础, 应为本工作今后的努力方向。

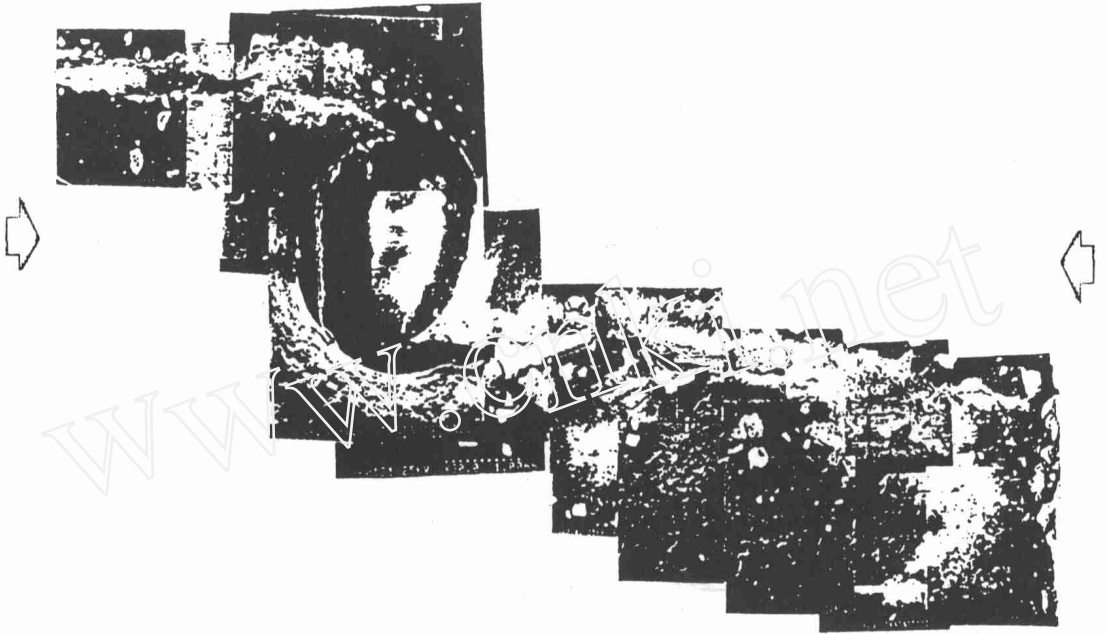


图9 大理岩有中心圆孔矩形板单轴压缩断裂后形貌

Fig. 9 Specimen HMMC20 under uniaxial compression loading

感谢 岩样由武汉岩土力学所提供, 实验在中科院力学研究所 LNM 的 SEM 实验室进行, 曾得到李端义高工的大力协助, 汪海英参加了部分实验工作。

参 考 文 献

- 1 赵本钧 冲击地压及其防治, 煤炭工业出版社, 1995
- 2 周德培, 洪开荣 太平驿隧洞岩爆特征及其防治措施 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 171- 178
- 3 谢和平. 岩石的分形特征和机理 岩石力学与工程学报 1993, 12(1): 28- 37
- 4 赵永红, 黄杰藩, 王仁 岩石微破裂发育的扫描电镜即时观测研究, 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 284- 294
- 5 谢和平, 陈至达 分形(Fractal)几何与岩石断裂 力学学报, 1988, 20(3): 264- 71
- 6 陶纪南 岩石断裂韧度 K_{IC} 测试中的几个问题——裂纹亚临界扩展的研究 岩石力学与工程学报, 1990, 9(4): 319- 327
- 7 Jiefan Huang, Zhongyan Wang & Yonghong Zhao. The development of rock fracture from microfracturing to main fracture formation. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. 1993, 38(7): 925- 928
- 8 杨军, 王树仁 岩石爆破分形损伤模型研究 爆炸与冲击, 1996, 16(1): 5- 18

Observation and Study on Meso-damage and Fracture of Rock

SHAN G Jialan KONG Changjing L I T ingjie ZHAN G W eiyong

(*Institute of M echanics, CA S, B eijing, 100080*)

(*Institute of Rock and Soil M echanics, CA S, W uhan, 430071*)

Abstract Uniaxial compression tests for both granite and marble specimens are carried out under direct SEM observation. The initiation, growth, cohesion and propagation of microcracks and microdamages, and also the fracture behavior of the rocks are recorded. The observation may serve as the foundation of engineering analysis for rock burst, drilling and blasting.

Key words granite and marble, SEM, uniaxial compression, meso-damage and fracture

作者简介

尚嘉兰, 女, 1938 年生, 副研究员。主要从事爆炸效应和材料(高分子复合材料、金属基复合材料及岩石材料等)动态力学性能研究。