

单轴压缩过程中岩石变形破坏机理*

张梅英 袁建新 李廷芥

尚嘉兰 孔常静

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 对白岗岩、花岗岩、大理岩试样在扫描电镜下进行单轴压缩试验,即时观察分析岩石在受力过程中,其微裂纹的萌生—扩展—断裂破坏全过程。得到各试样的应力-应变曲线与相对应的微观结构变化的照片实录,很直观地揭示了岩石变形破裂的实质,比较满意地解释岩石变形破坏的机理。

关键词 单轴压缩试验,即时观察,微裂纹的萌生—扩展—断裂破坏

1 前言

岩石断裂破坏的实质是岩石在受力过程中微裂纹的萌生、扩展直至贯通的结果,是岩石微观结构变形破坏的累积的宏观反映。近几年来,一些科学工作者从不同的专业角度进行细观力学实验研究,并发表了一些文章,引起国内外学者的相当重视。本文着重阐述岩石在扫描电镜内进行单轴压缩试验,即时观察分析岩石在受力过程中微裂纹的萌生—扩展—断裂破坏全过程,得到应力-应变曲线与相对应的微观结构变化的照片。有关微裂纹统计性的定量分析另文报道。

2 实验装置和试样

本文实验是在 S-570 型扫描电镜内拉伸台的台钳式加压装置上进行的。最大荷载为 2 000 N,加载头最大行程为 5 mm,以传感器测量荷载的大小,应变仪量测应变(在试样底面中间部位平行压力方向粘贴 BXC120-1AD 的电阻应变片)。在部分实验中,其应力、应变测量全由微计算机绘图和数字采集。在加载过程中,可随意停止加载并进行拍照。

试样取自香港地区的白岗岩、碎裂黑云母正长花岗岩以及湖北大冶的大理岩。

白岗岩为灰白色细粒它形不等粒结构,部分为碎裂结构。主要组成矿物为石英(30%~40%)、斜长石(25%±)和钾长石(35%±),并含有极少量的黑云母(已绿泥石化<1%±)。斜长石有轻微绢云母化,钾长石为条纹长石轻微高岭土化。岩石经受过较轻的构造变形,致使矿物部分碎裂化,有数条不规则裂隙,为石英和白云母所充填。

碎裂黑云母正长花岗岩为浅肉红色带铁锈斑点,碎裂结构或碎斑结构。主要组成矿物为石英(30%±)、钾长石(50%±)、斜长石(15%±)、黑云母少量(<5%)。黑云母绿泥石

1997年3月13日收到初稿,1997年5月20日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(19472075)和香港研究资助局(RGC)资助项目。

化(部分为白云母化),斜长石绢云母化,钾长石强高岭土化,粒间分布有粘土矿物(风化产物)。

大理岩为细粒粒状变晶结构,块状、团粒状构造,主要为碳酸盐矿物组成。矿物双晶发育,粒度均匀。部分重结晶程度差,含有石英碎屑矿物(<2%)。

对以上岩石样品分别细心切磨,表面抛光,然后制成多种不同尺寸的试件:15 mm×5 mm×1 mm,15 mm×10 mm×1 mm,15 mm×10 mm×2 mm,20 mm×10 mm×2 mm,有的在试件中心预制 $\phi 3.2 \sim 3.5$ mm 的小圆孔和长约 6 mm 并与长边成 45° 的预制割裂缝等 28 件。将上述制成的试件取一些在电镜外进行加载试验,观察试件最终压缩破裂的状况;其余试件则进行表面喷镀金膜后分别置于扫描电镜内,边加载,边观察试件变形破坏全过程。

3 实验结果和分析讨论

3.1 实验结果

对上述试样在扫描电镜内分别进行单轴压缩试验,即时观察微裂纹的萌生—扩展—破裂全过程。其部分实验结果列于表 1,具体说明如下。

表 1 岩石试样微观力学实验结果

Table 1 Testing results of micromechanics for rock samples

编号	岩石名称	试样尺寸长×宽×高 /mm	受载面积 /mm ²	峰值应力 σ /MPa	萌生微裂纹 应力 σ_c /MPa	$\frac{\sigma_c}{\sigma}$ /%	破坏部位
03	白岗岩	14.94×4.96×1.10	5.46	188.7	33.0	17.5	右端角及底面破裂
09	白岗岩	14.94×9.96×1.00	9.96	164.7	65.3	39.6	左右端部和左底面破裂
06	碎裂黑云母 正长花岗岩	15.02×4.92×1.02	5.02	73.7	23.9	32.4	左端部破裂
12	白岗岩	15.02×10.0×1.70 (小孔 $\phi 3.16$ mm)	17.00	71.8	11.2	15.6	左端底部呈 三角形破块
21	白岗岩	15.06×10.0×1.64 (小孔 $\phi 3.28$ mm)	16.40	96.0	25.7	26.8	左端和孔上部、右上 角破裂
13	白岗岩	15.10×10.02×2.16 (小孔 $\phi 3.5$ mm)	21.64	>92.4*	20.2	<21.9	小孔两侧有裂纹,未破裂
15	白岗岩	15.12×10.04×2.14 (小孔 $\phi 3.48$ mm)	21.49	>93.1*	28.5	<30.6	小孔两侧有裂纹,未破裂
16	白岗岩	15.10×10.02×2.08 (小孔 $\phi 3.48$ mm)	20.84	>96.0*	51.6	<53.8	小孔两侧有裂纹,未破裂
10	大理岩	20.06×10.0×2.12 (小孔 $\phi 3.28$ mm)	21.20	61.3	30.7	50	在小孔对称部位与试样 长边呈 45° 破裂开
20	大理岩	20.10×10.02×2.08 (小孔 $\phi 3.16$ mm)	20.84	36.0	12.5	34.7	在小孔对称部位与试样 长边呈 45° 破裂开
11	大理岩	20.00×9.94×2.08 (割缝长 6.04 mm)	20.70	41.1	24.2	58.9	在割缝两端部外侧与试 样长边呈 45° 破裂开

* 受到仪器保护(最大荷载为 2 000 N),试样未达峰值应力。

3.1.1 长方形板块状试样

长方形板块状试样又简称为 A 试样，试样尺寸有 15 mm×5 mm×1 mm 和 15 mm×10 mm×1 mm 2 种。试样在加载过程中，微裂纹萌生的随机性较大，一般先在两边端部(近于垂直端边或平行加载方向)和端角出现微裂纹，随压力增加，试件内也出现无规律分布的断续短小微裂纹(平行压力方向较多，亦有大小角度不等的分叉)。这些微裂纹有的沿晶界扩展，有的沿解理面成台阶状扩展，有的部位又重新出现新的微裂纹，方向不一，分散性强，微裂纹贯通较慢，重点在端角部位。当压力达到强度峰值时，试样端部突然碎裂，压力陡降。后者尺寸(15 mm×10 mm×1 mm)试样，其微裂纹萌生应力值较高，但峰值强度却不随试样宽度而增加。3 个试样(03#, 09#, 06#)均在端部碎裂破坏，详见表 1 和图 1, 2。

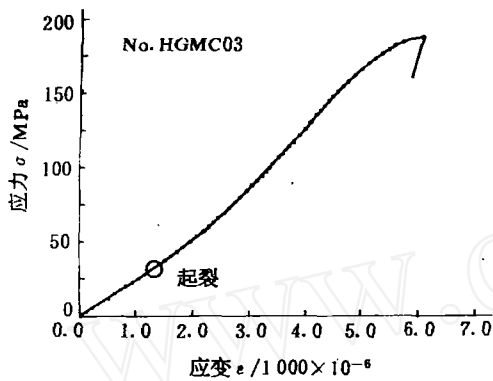


图 1 白岗岩应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curves of alaskite

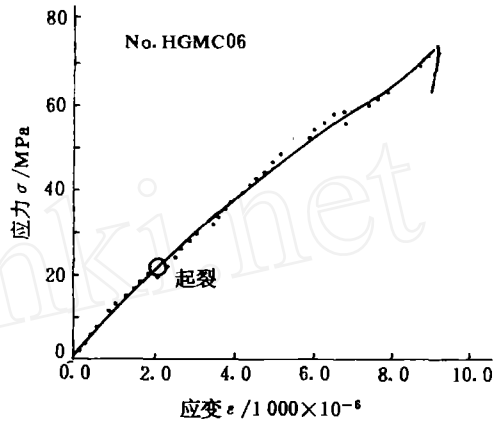


图 2 碎裂黑云母正长花岗岩应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of granite

3.1.2 中心预制 φ 3.1~3.5 mm 小圆孔试样

这种试件简称为 B 试样。除大理岩试样尺寸为 20 mm×10 mm×2 mm 外，其余均为 15 mm×10 mm×2 mm。试样在加载过程中，初始微裂纹的萌生在小圆孔轴线两侧，平行荷载方向，近于垂直圆的切线(图 3)，亦有呈某一角度出现。随压力增加，与压力方向一致的微裂纹扩展较快。圆孔两边扩展的速度不一样，主要沿矿物边界扩展，亦有穿晶扩展，曲折延扩，同时产生分叉新裂纹(图 4)。大理岩的微裂纹比白岗岩的发育，而且分叉的微裂纹呈裂纹带，但最终仍以一条与荷载方向平行的主裂纹形成宏观裂纹向前扩展，其余分叉的或平行的微裂纹则停止扩展或闭合(图 5, 6)。当一边的主裂纹扩展到端部而小圆孔另一边裂纹还未贯通时，其压力没有明显下降。随压力继续增加，裂纹张开宽度增加且向试样深部扩



图 3 白岗岩(预制小圆孔)初始微裂纹 SEM 像(11.2 MPa)
Fig. 3 Alaskite micro-fracture germination SEM photo with prefabricated hole

还未贯通时，其压力没有明显下降。随压力继续增加，裂纹张开宽度增加且向试样深部扩

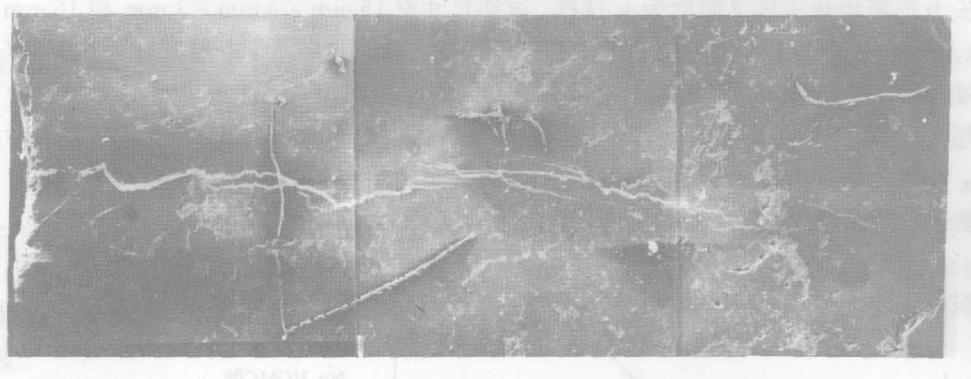


图 4 白岗岩(预制圆孔)微裂纹扩展为主裂纹 SEM 像(72 MPa)

Fig. 4 Alaskite micro-fracture spread SEM photo with prefabricated hole (72 MPa)

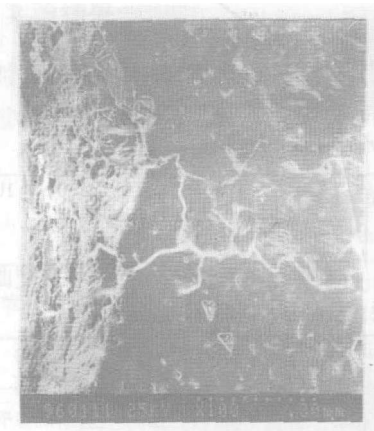


图 5 大理岩(预制圆孔)初始微裂纹扩展 SEM 像(26.1 MPa)

Fig. 5 Marble micro-fracture spread SEM photo with prefabricated hole (26.1 MPa)

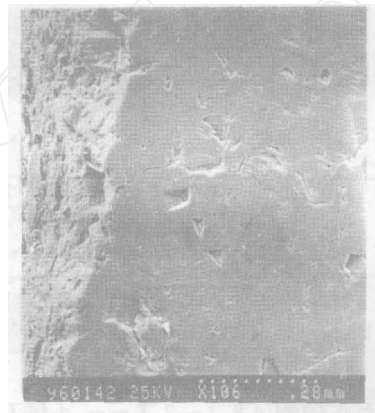


图 6 大理岩破坏后(36.04 MPa)原微裂纹闭合和缩小(与图 5 对比)SEM 像

Fig. 6 Original micro-fracture closure and reduction SEM photo of marble after failure (36.04 MPa), compared with Fig. 5

展(圆孔端部较明显),达到峰值应力,试样突然断裂破坏,压力突降。其最终断裂不是沿主裂纹断开,而在试样的端部(白岗岩、花岗岩),以及与荷载方向呈近 45° 的对角线断裂开(大理岩)。试样断裂破坏后,原来主裂纹宽度明显变窄,有些分叉裂纹闭合,断裂时有较强的振动,破碎的岩屑溅落在试样表面(图 7)。因受仪器测量范围的限制(最大荷载 2 000 N),厚度为 2 mm 的白岗岩试样,没有获得峰值应力值。详见表 1 和图 8, 9。

3. 1. 3 中心预制 6 mm×0.5 mm, 与试样长边呈 45° 的割裂缝试样

以下简称该试样为 C 试样。试样在加载过程中,初始微裂纹的萌生一般较集中在割缝上下端对称外侧部位(图 10),微裂纹萌生方向是以平行加载方向为主,垂直割缝边壁或一定角度的分叉,可以多条微裂纹同时萌生。随压力增加,微裂纹的扩展路径和破坏状态与



图 7 大理岩破坏后孔边断裂 SEM 像
Fig. 7 Fracture SEM photo of hole boundary in marble after failure

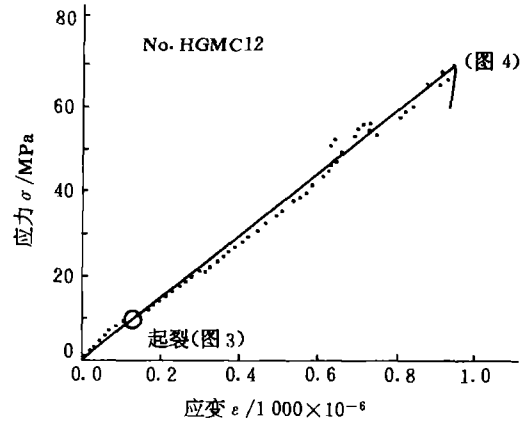


图 8 白岗岩(预制小圆孔)的应力-应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curves of alaskite with prefabricated hole

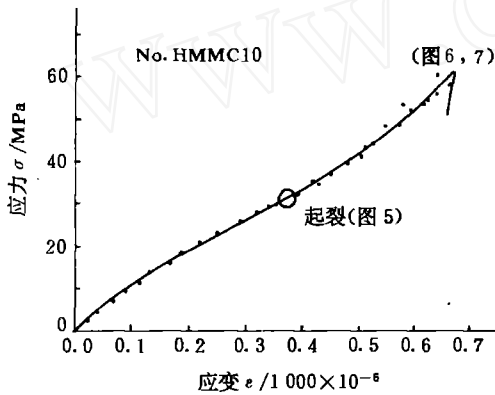


图 9 大理岩(预制小圆孔)的应力-应变曲线
Fig. 9 Stress-strain curves of marble with prefabricated hole

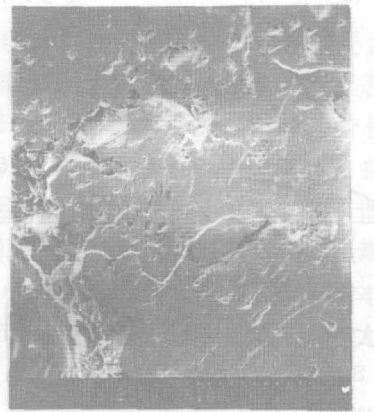


图 10 大理岩(预制割裂缝)初始微裂纹 SEM 像(24.2 MPa)
Fig. 10 Marble micro-fracture germination SEM photo with prefabricated crevice

B 试样类同(图 11), 实验结果见表 1 和图 12。

取部分试样在扫描电镜外进行单轴压缩试验(即将拉伸台置于电镜外, 可以不受仪器压力量测的限制), 观察试样最终破坏状况。A 试样, 白岗岩试样是在端部破碎, 有的在底面呈三角形小块破裂掉下; 大理岩试样是在端部平行试样表面上下张裂型破坏。B 和 C 试样、白岗岩试样仍在端部碎裂, 少部分与大理岩试样一样, 与压力方向呈近 45° 方向断裂, 如图 13。试样断裂时, 试样抖动厉害且带有弱响声, 同时碎屑抛出, 都在瞬间发生。

3.2 实验结果分析讨论

3.2.1 单轴压力作用过程中岩样的变形破坏特征

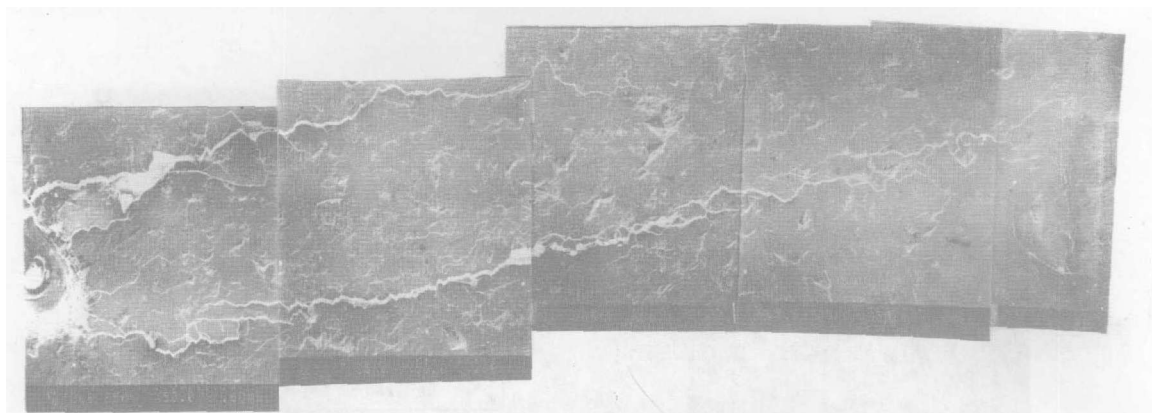


图 11 大理岩(预制裂缝)微裂纹扩展至端部(41.1 MPa)SEM 像

Fig. 11 SEM photo of micro-fractures spread to end in marble with prefabricated crevice (41.1 MPa)

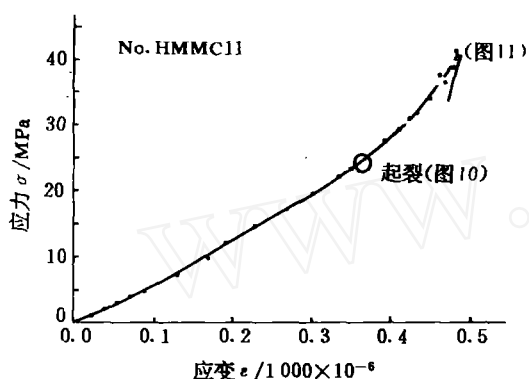


图 12 大理岩(预制裂缝)的应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves of marble with prefabricated crevice

从表 1 看出, 白岗岩 A 试样的峰值强度 (165~189 MPa) 比 B 试样 (72~96 MPa) 高一倍, 微裂纹的萌生应力与峰值应力之比 (σ_a/σ) 为 17%~30%, 个别达 40% 左右; 花岗岩 (经受弱风化作用) A 试样的峰值强度 (74 MPa) 比白岗岩 A 试样小一半, 微裂纹的 σ_a/σ 为 32%; 大理岩 B 和 C 试样的峰值强度为 36~61 MPa, 微裂纹的 σ_a/σ 为 30%~59%。这表明坚硬岩石的微裂纹起裂较早 (与峰值强度比), 经受压密过程较短, 试件的类型和厚度对峰值强度有影响。

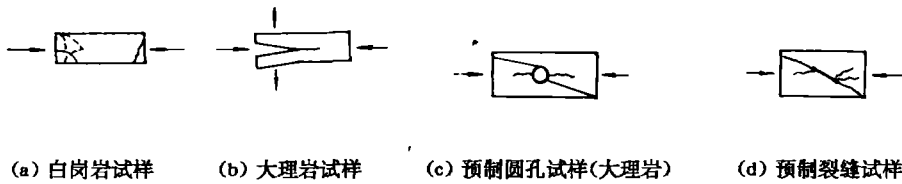
岩样受力后, 随压力增加, 其变形破坏有一逐渐发展过程, 可分为 3 个阶段:

(1) 压密阶段: 为组成矿物之间的紧密接触, 力和波在矿物间传递调整阶段。

(2) 微裂纹的萌生和扩展阶段: 随压力增加, 经压密后, 以平行压力方向为主, 在应力集中部位萌生微裂纹并开始向前扩展, 为较平静的变形破坏阶段, 微裂纹在空间上分布不均匀, 其扩展有闭有扩。当荷载达峰值强度 80%~90% 时, 微裂纹扩展速度较快, 形成主裂纹。此时, 如果压力保持不变, 仍可看到裂纹继续扩展, 直至受阻或能量消耗才停止。

(3) 断裂破坏阶段: 此时荷载达到峰值强度, 瞬间发生突然性的压剪断裂破坏, 岩样抖动强烈, 岩屑飞溅, 稍带有响声。

上述 (1), (2) 阶段为渐变性, 第 3 阶段为突变性。由渐变到突变有一时间和空间的准备过程, 随压力增加, 岩样在从压密到微裂纹萌生和扩展过程中, 当某部位出现应力集中, 且释放能量速率大于消耗能量速率时, 就会发生突然性 (冲击式) 断裂破坏。在裂纹明显曲折部位, 呈三角块状破裂掉落 (图 14)。这表明宏观的断裂破坏是微观结构 (微裂纹) 变形破坏的累积反映。上述岩石的变形破坏过程可以较满意的解释岩爆的形成机理。



(a) 白岗岩试样 (b) 大理岩试样 (c) 预制圆孔试样(大理岩) (d) 预制裂缝试样

图 13 岩石试样破坏状态

Fig. 13 Failure state of rock samples

3.2.2 岩样变形破坏与荷载方向密切相关

岩样受力后，微裂纹的萌生和扩展，均以平行荷载方向沿矿物边界曲折向前扩展为主。虽然有的微裂纹与荷载方向有一定角度，但最终以平行荷载方向的主裂纹扩展速度最快。当荷载方向与岩石原缺陷方位一致时，优先在原缺陷应力集中处或受拉应力最大的部位(指圆孔和缝边)起裂和扩展；否则微裂纹的起裂和扩展可以在平行荷载方向毫无缺陷的部位出现。

3.2.3 岩样变形破坏受岩性和矿物组成的控制

不同类型岩石由物性不同的矿物所组成，其物理力学性质也不一样。岩石受力后，首先观察到的是表面微裂纹的萌生和扩展，然而最终破坏是岩石的整体断裂，所以表面的微裂纹如何向深部扩展，目前的技术尚无法观察到，只有根据表面现象进行推理分析。从岩石的结构看，矿物之间的排列是无序紧密镶嵌，各矿物对力和波的传递速率和自身变形不同，当某矿物受力时，必然牵动上下左右相邻矿物且互相传递，在接触胶结最弱部位产生微裂纹。在矿物间互相作用中，除传递压应力外，同时产生剪切分力。如：局部出现雁行排列的微裂纹(图 11 中主裂纹两侧)；有的矿物周边(或上下)出现微裂纹，此矿物本身可能发生弱的旋转力，使矿物受剪力作用穿晶而破(图 15)。这些现象说明岩样在压应力作用下



图 14 裂纹折曲处块状破裂 SEM 像
Fig. 14 Micro-fracture SEM photo of fold with lump failure

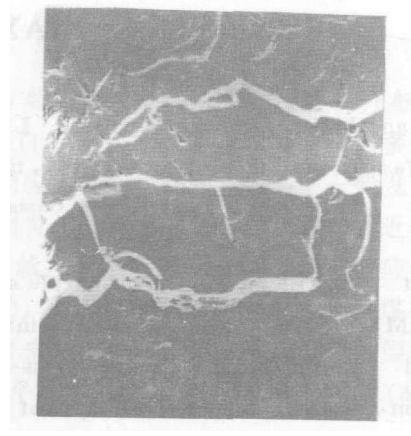


图 15 穿晶裂纹 SEM 像(×200)
Fig. 15 SEM photo (×200) of micro-fracture through crystalline grain

仍存在剪应力的作用。

4 结论

(1) 本文采用扫描电镜进行细观力学试验的方法,能很直观地观察岩石受力过程中,其变形破坏的全过程,为岩石的变形破坏机理研究提供了新的、成功的途径。

(2) 前述岩样在单轴压力作用下,均属脆性断裂破坏类型,其变形破坏过程可分3个阶段,由渐变性发展到突变性,主要是以平行压力方向沿矿物边缘(亦有穿晶)呈张性微裂纹为主,局部出现剪切破裂,最终发展为宏观的压剪断裂破坏。

(3) 在微裂纹扩展形成主裂纹后,原来一些微裂纹(或分叉微裂纹)则停止扩展或闭合,在这些部位可能会产生隐蔽的不稳定区和能量储存区,为后续工程的隐患。

致谢 本文实验工作得到中国科学院力学研究所李端义高工的帮助,试件制作得到北京大学地质系耿金达同志帮助,在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 张梅英,袁建新等. 岩土介质微观力学动态观测研究. 科学通报, 1993, 38(10): 920~924
- 2 袁建新,张梅英. 岩土力学性质和微观结构. 见: 海峡两岸土力学及基础工程土工技术研讨会论文集, 西安: 1994, 66~72
- 3 卢应发,张梅英,葛修润. 大理岩静态和循环荷载试件的电镜试验分析. 岩土力学, 1990, 11(4): 75~80
- 4 唐辉明,晏同珍. 岩体断裂力学理论及工程应用. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993

MECHANISM OF DEFORMATION AND FAILURE FOR ROCK IN UNIAXIAL COMPRESSION TEST

Zhang Meiyong¹ Yuan Jianxin¹ Li Tingjie¹ Shang Jialan² Kong Changjing²

(¹ Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(² Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Alaskite, granite and marble samples are observed in uniaxial compression test with SEM. The whole process of germination, evolution and fracture of micro-fractures is analyzed. Simultaneously, the stress-strain curves and photoes of microstructure alteration are obtained. The principle of rock deformation and failure has been shown and explained satisfactorily.

Key words uniaxial compression test, real-time observation, germination-spread-failure of microfracture