

岩石破裂过程的数值模拟研究*

黄明利^{1, 2} 唐春安^{1, 3} 朱万成³

(1中国科学院力学研究所LNM 北京 100080)

(2辽宁工程技术大学 阜新 123000) (3东北大学岩石破裂与失稳研究中心 沈阳 110006)

摘要 考虑不同粒度组成和缺陷分布的岩石, 对其裂纹扩展、演化过程的影响, 建立数学模型, 应用 RFPA^{2D} 程序分析了均质度对岩石类脆性材料在外载作用下的裂纹扩展、演化过程的影响, 和相关的实验结果进行对比, 指出了均质度对材料破坏过程的决定性影响。

关键词 非均质性, 单裂纹, 裂纹演化规律

分类号 O 242.1, O 346.1

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2000)04-0468-04

1 引言

岩体中裂纹的扩展是地学领域的重要研究课题, 对于理解井巷工程稳定性、边坡失稳和地震等地壳介质破裂过程的机制具有重要意义。几十年来有关它的研究取得了长足的进展^[1-5]。岩体是由多种矿物晶粒、胶结物及孔隙缺陷等组成的混合物, 是自然界中经过亿万年的地质演变和地质构造运动所形成的最为复杂的固体材料之一。岩石中晶粒缺陷的随机分布导致其各向异性和非均质性, 这对岩石在外载作用下的破坏行为产生显著影响。岩石在外载作用下的变形破坏过程, 实质上就是岩石中的缺陷的萌生、长大、扩展和汇合的过程。裂纹不规则扩展、相互作用直至贯通是这类非均匀脆性材料破坏的主要形式。均质度对其破坏的影响是决定性的。考虑均质度影响, 用解析方法分析裂纹扩展、演化影响是极其复杂的, 在目前来说, 甚至是不可能的。随着计算机的发展, 有限元、边界元等数值算法在材料破坏分析方面的应用越来越广。而一种岩石力学的分析方法能否成功地解决实际岩土工程中的问题, 在很大程度上取决于它是否真实地反映工程岩体所具有的非均匀性。

本文应用东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发的 RFPA^{2D} (Rock Failure Process Analysis) 软件, 考虑不同岩性均质度的影响, 模拟了不同岩性岩石

在外载作用下的不同破坏失稳过程, 并和相关的实验结果比较, 表明了数值计算的可靠性。

2 数值模拟模型

2.1 岩石破裂过程分析程序 RFPA^{2D} 概述

本文所用 RFPA^{2D} 系统, 是一个能模拟岩石介质逐渐破坏过程的数值模拟工具^[6, 7]。和其他已有的逐渐破坏模型 (Progressive Failure/Fracture/Damage Model) 一样^[8], RFPA^{2D} 包括两个方面的功能: 应力分析和破坏分析。RFPA^{2D} 的应力分析采用有限元法进行。破坏分析则是根据一定的破坏准则来检查材料中是否有单元破坏。对破坏单元则采用刚度特性退化 (处理分离) 和刚度重建 (处理接触) 的办法进行处理。为了模拟试验机加载情况, 采用位移加载方式。对于每一步给定的位移增量, 首先进行应力计算。然后根据破坏准则来检查模型中是否有破坏单元。如果没有, 继续增加一个位移增量, 进行下一步应力计算。如果有破坏单元, 则根据单元的拉或剪破坏状态进行刚度退化处理。然后重新进行当前步的应力计算。重复上述过程, 直到整个材料产生宏观破坏。由于单元的破坏为脆性, 因此认为单元破坏释放的弹性能以声发射的形式释放^[6, 7], 据声发射特性来观察岩石破裂过程。考虑到岩石类脆性材料的抗拉强度远小于抗压强度, 因此本文采用了修正后的库仑准则, 包含拉伸截断^[9]作为单元破坏的强度判据。

1998年11月11日收到初稿, 1999年5月19日收到修改稿。

* 中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放实验室开放基金资助项目。

作者 黄明利 简介: 男, 30岁, 博士, 1991年毕业于辽宁工程技术大学采矿系采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石力学与采矿方面的研究工作。

根据这一准则,单元的破坏可能是拉坏也可能是剪坏。

2.2 计算数学模型

2.2.1 模型说明

为便于与本文所进行的带预制裂纹大理岩扫描电子显微镜(SEM)实验结果进行对比(见图1),设计如图2所示的计算模型,计算范围为 $20\text{mm} \times 10\text{mm}$,考虑大理岩中颗粒的平均粒径为 $0.05 \sim 0.35\text{mm}$,共划分为 $200 \times 100 = 20\,000$ 个等面积单元,100个/ mm^2 。裂纹预置在试样的中部,长为5mm,与长边夹角为 45° 。采用平面应力分析。为了研究材料显著非均质性对裂纹扩展过程的影响,同时又设计了裂纹两端伸入均质度不同的两岩体模型,如图2(b),白色表示均质度较好岩石,暗色表示均质度较差岩石。

2.2.2 力学参数说明

RFP A^{2D}程序以某种分布形式对材料强度和弹性模量进行初始赋值。本文采用韦布尔(Weibull)分布 $\varphi_c(m, \mu)$ 来近似反映缺陷和晶粒等各微元强度等力学参数的不同。根据文[10]中结论知,韦布尔参量 m 是材料的结构参数,它反映了材料结构中缺陷分布不规则程度,在量值上是该材料结构分形维数 D 的2倍。其中参数 m 越大,表明岩石的性质越均匀。 μ 为反映岩石材料平均性质的参数。本模型中,岩体力学参数如下:弹模 $E = 78\,900\text{MPa}$, $R_c = 170\text{MPa}$,泊松比 $\nu = 0.25$ 。均质岩体 m 值取为100,非均质体取为3。为了与试验模型一致,这里的割缝为完全贯通的裂纹,在如图2所示的受力状态下,该裂缝不会闭合,而将不断地扩展。

单元破坏准则中的摩擦角取为 30° ;拉压强度比

为 $1/8$ 。模拟过程共计加载150步,每步加载量为 0.0005mm 。

3 计算结果分析

为分析岩石均质度对其裂纹扩展过程的影响,共进行了三个方案的模拟,因篇幅所限,只在图3(a)中列出有代表性结果,其中的四幅图皆为能代表破坏过程时空分布的声发射图, A_i 表示单岩体试样; A_1 和 A_2 表示和图2中大理岩试样均质度相近的试样在不同载荷阶段的声发射图; A_3 为均质体到峰值强度 α 的95%时的破坏图; B 为均质度不同的两体试样到峰值强度95%的破坏图。下面对此结果进行简要对比分析。

(1) 均匀材料中裂纹扩展的数值模拟表明,破坏基本沿裂纹两端对称萌生和扩展(见图3中 A_3),所形成的主裂纹从宏观上看较光滑。模拟结果和文[11]用树脂材料所做结果很吻合,也符合经典断裂力学有关翼型裂纹扩展的解析结果,说明RFP A^{2D}方法对于脆性材料中裂纹扩展过程的模拟是可行的。

(2) 对于非均质的大理岩,对比图1和图3中 A_1, A_2 的实验和数值模拟结果,两者表现极强的一致性。由于实际岩石中晶粒和缺陷的随机分布,当受到外载荷时,由于各矿物对力的传递效率和自身变形不同,必然引起岩石内部应力场的不均匀分布,产生局部应力集中,导致胶结最弱部位微裂纹产生。起初微破裂杂乱无章分布,随着载荷增加,微裂纹逐渐在预置裂纹端部集中,当达到峰值强度50%时,并逐渐汇集、贯通成肉眼可见的宏观裂纹,方向大致与预置裂纹垂直,与外力成 45° 角;随着外载荷的

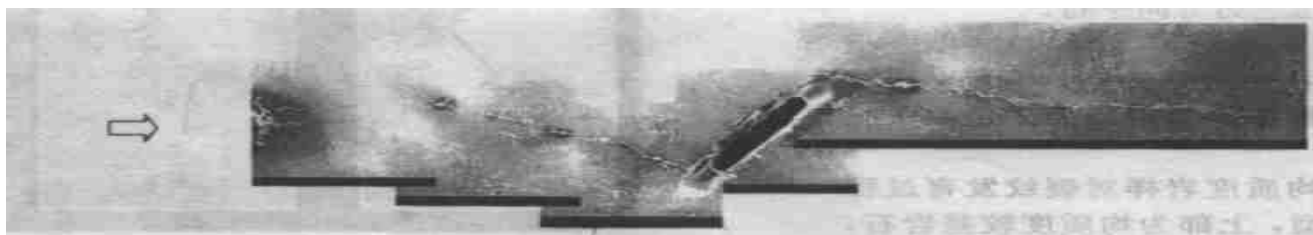


图1 预制裂纹大理岩试样裂纹扩展 SEM

Fig. 1 SEM sketch of crack propagation in the marble with preexisting crack



(a) 单体模型

(b) 两体模型

图2 计算数学模型

Fig. 2 Mathematical model for calculation

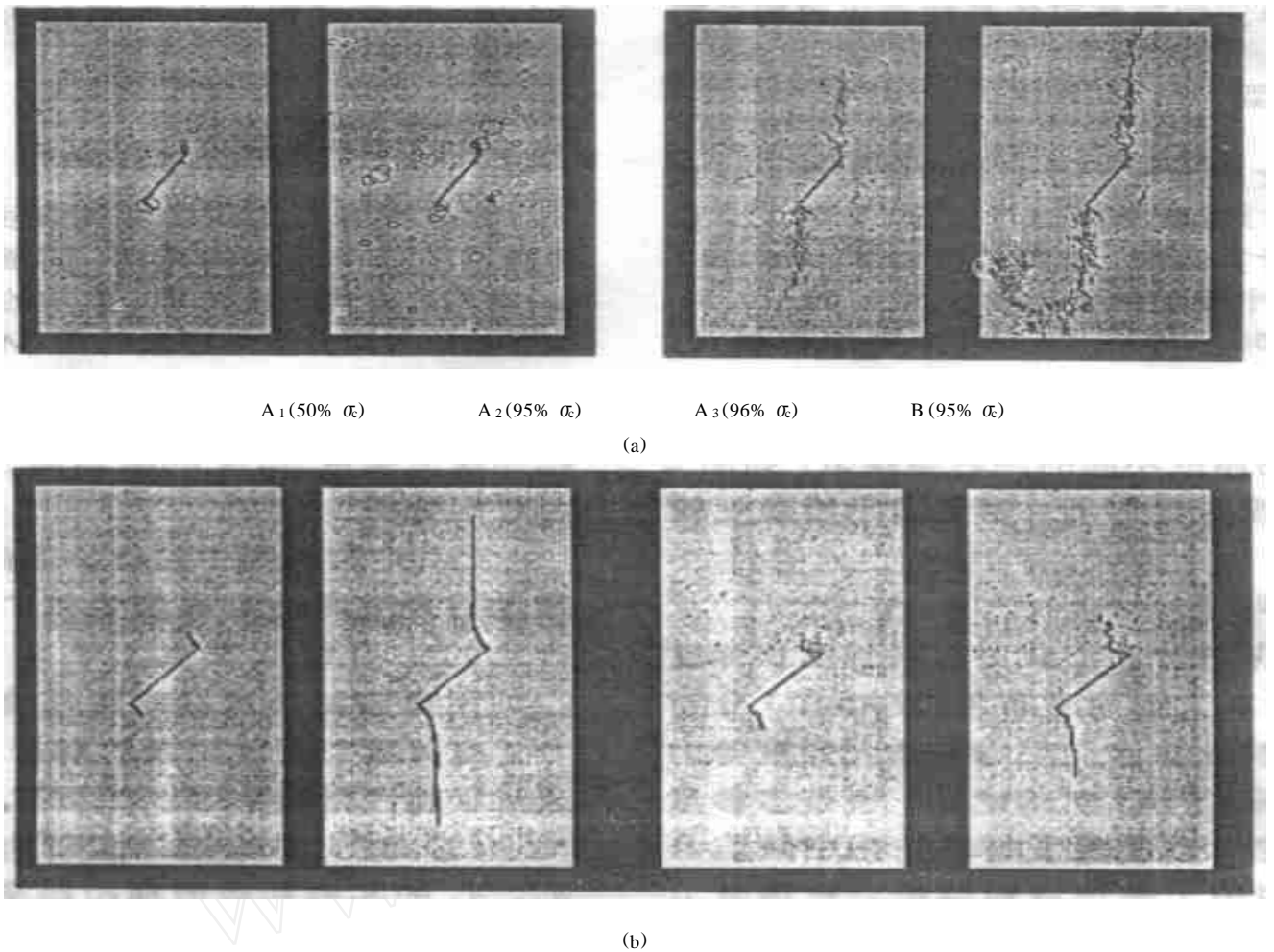


图 3 单轴加载下均质度不同岩样中破裂过程的声发射模拟结果

Fig 3 Simulated AE of failure process in different rock specimens with different homogeneity under uniaxial compression

增加, 主裂纹逐渐形成, 由于岩石的非均质性影响, 裂纹的扩展和贯通蜿蜒曲折向前推进, 所以从宏观看上去裂纹是粗糙的, 但总的发展方向由与割缝方向垂直逐渐转向与最大主压应力方向平行。

通过 SEM 对岩石(大理岩和砂岩等)试样进行细观破坏观察及数值模拟结果都表明, 尽管岩样所受的是压缩载荷, 但岩样中产生裂纹大多呈拉张脆性破坏。

(3) 为了对比不同均质度岩样对裂纹发育过程的影响, 设计了两体模型, 上部为均质度较差岩石, m 取 3; 下端为均质度较好岩体, m 取 100。从图 3 (b)中给出的临近峰值强度时的声发射图可见, 在均质性较差的上部, 除贯通形成的主裂纹外, 其他部位还有杂乱分布的微裂纹产生, 而在下部则无此现象。这就进一步印证了上面的分析结果。

(4) 除此以外, 数值模拟还可以给出裂纹扩展过程中裂纹周围应力场的变化规律。如图 4 所示, 从中可以清楚地看出裂纹尖端拉应力的集中, 以及随着裂纹扩展, 这种应力集中的释放和转移。

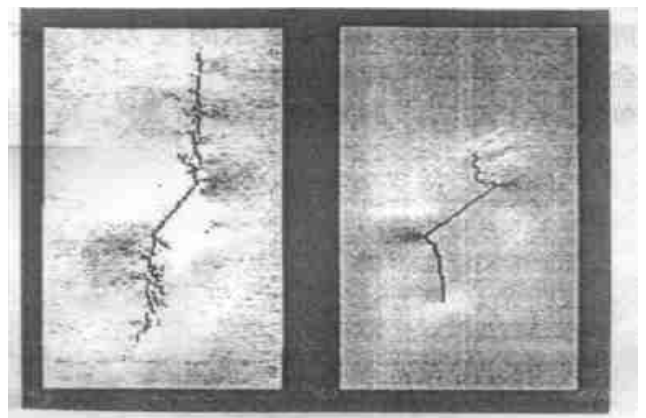


图 4 最小主应力分布图

Fig 4 Distribution of minor principal stress

4 结 论

(1) 本文通过对单轴加载下含单裂纹岩石试样破坏的数值模拟结果与相关的实验结果分析表明, 两者表现了较好的一致性, 说明用 RFPA^{2D}程序对于脆性材料中裂纹扩展过程的模拟是可行的。

(2) 采矿等岩石工程诱发的微震活动性、地壳变形过程中的雁行断裂,地震孕育过程中的前兆、余震等等现象,都与岩石这种地质材料的非均匀性密切相关。本文的研究表明,材料非均匀性对岩石试样中的裂纹扩展模式有很大影响,忽略这种影响可能会掩盖许多岩石材料变形和破坏过程的特殊现象,尤其是裂纹扩展的模式。通过数值模拟方法,在模型中引入材料的非均匀性,可能会给岩石断裂力学的发展乃至地震科学中裂纹扩展问题的研究带来新的契机。

参 考 文 献

- 1 张立之,方兴 含非均匀体岩板中混合型裂纹扩展过程实验[J]. 地球物理学报, 1989, 32(1): 183~ 193
- 2 陈静曦 裂纹扩展速度监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 425~ 428
- 3 王桂尧,孙宗颀 断裂力学在震源机制分析中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 55~ 59
- 4 肖洪天,杨若琼,周维垣 三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 447~ 450
- 5 王水林,葛修润,章光 受压状态下裂纹扩展的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 18(6): 671~ 675
- 6 唐春安 岩石声发射规律数值模拟初探[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 368~ 374
- 7 Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34: 249~ 262
- 8 崔维成 复合材料结构破坏过程的计算机模拟[J]. 复合材料学报, 1996, 13(4): 102~ 111
- 9 Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining [M]. Second Edition, London: Chapman & Hall, 1993, 106~ 108
- 10 高峰,谢和平 脆性材料的分形统计强度理论[J]. 固体力学学报, 1996, 17(3): 239~ 245
- 11 Horii H, Nemat N S. Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(B4): 3105~ 3125

NUMERICAL SIMULATION ON FAILURE PROCESS OF ROCK

Huang Mingli^{1, 2}, Tang Chun an^{1, 3} Zhu Wancheng³

⁽¹⁾ LNM, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China

⁽²⁾ Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin 123000 China

⁽³⁾ CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006 China

Abstract Taking account of the influence of different grain size and distribution of the flaws on the propagation process of the cracks in rock, a mathematical model is established. Then the RFPA^{2D} program is used to analyze the influences of different homogeneity on the propagation and evolution of cracks in the rock-like brittle materials under external load. By comparing with corresponding experimental results, the conclusion that the homogeneity has a great effect on the failure process of materials is drawn.

Key words homogeneity, single crack, evolution law of cracks

新书简介

《基坑工程事故分析与处理》一书由唐业清、李启民、崔江余编著,中国建筑工业出版社1999年出版,32开本,568页,46.5万字,定价29元。

该书是在大量调查国内基坑事故的基础上,对其进行分析总结,提出对基坑工程事故的预防措施、处理对策。该书精选一百六十余例基坑工程事故,分别介绍其施工背景,分析事故发生的原因,给出处理措施。该书还介绍了十五例成功的基坑工程实例、建筑基坑工程设计与施工要点及新技术、新进展,并附有大量的基坑工程事故和成功实例照片。

该书对从事建筑工程设计、施工及岩土工程的技术人员都有一定的参考价值。