

岩板中混合裂纹扩展过程的数值模拟^{*}

Numerical simulation on the propagation processes of mixed mode cracks in rock plates

朱万成

唐春安

(中国科学院力学研究所 LNM, 北京, 100080) (东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳, 110006)

文 摘 应用自行研究开发的材料破坏过程分析软件 MFPA^{2D}, 对带有预裂纹的大理岩以及大理岩 - 砂岩的拼接岩板的单轴压缩实验进行了数值模拟。模拟内容有: 单一岩板中的单条裂纹、单一岩板中顺向雁形裂纹以及两拼接岩板中单一裂纹的扩展过程模拟。模拟结果与相应的实验结果较为一致。

关键词 混合型裂纹, 雁型裂纹, 裂纹扩展过程, 数值模拟

中图法分类号 O 242.1, TU 452

作者简介 朱万成, 男, 1974 年生, 1998 年获东北大学硕士学位, 现在该校攻读博士学位, 主要从事岩石破坏过程数值模拟的研究。

Zhu Wancheng

Tang Chun'an

(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100082) (CRISR, Northeastern University, Shenyang, 110006)

Abstract The propagation processes of a mixed mode crack or an echelon crack in marble rock plate and spliced plates of marble and sandstone under uniaxial compression are simulated by using MFPA^{2D} (Material Failure Process Analysis) Code recently developed by the authors. The results of simulations, which include propagation processes of single mixed crack in single rock plate, single mixed crack in spliced plates of marble and sandstone as well as echelon cracks in single rock plate, are in good agreement with those of experiments.

Key words mixed crack, echelon crack, propagation process of crack, numerical simulation

1 前 言^{*}

岩体变形和破坏机制与其中裂纹的萌生、扩展和贯通过程密切相关。了解岩体的变形与破坏机制是进行岩体工程设计和施工的基础性研究, 它将为工程设计提供理论基础。岩体断裂力学的不断发展是近几十年来岩体力学的重要发展之一。岩体断裂力学给出了均质材料中特殊单一裂纹或者规律性分布裂纹的扩展准则和扩展方向, 但是在复杂多裂纹岩体的研究方面往往不如人意。国内外很多学者在裂纹扩展及其导致岩体破坏方面做了大量的实验研究^[1, 2]。各种岩石裂纹体的实验研究为我们了解裂纹扩展过程及其规律提供了一条直观而有效的途径。一般认为, 岩体断裂机制的研究依赖于室内外实验方法、数值模拟方法与解析方法的共同推进。有效的数值模拟方法往往是实验和理论分析的有益补充。本文应用自行开发的材料破坏过程分析 MFPA^{2D} 软件系统^[3], 对岩板中混合裂纹扩展过程进行数值模拟研究。

现今, 在断裂力学问题的数值模拟中采用有限元的居多。一些学者^[4]用自适应有限元技术或与其它数值方法的结合来进行裂纹扩展过程的模拟或进行应力强度因子等的求解, 取得许多重要的成果。边界元方法及由其发展起来的不连续位移法在模拟裂纹扩展中

也有成功的应用^[5, 6]。此外, 一种求解边值问题的数值分析方法——流形元方法, 在裂纹扩展中也开始应用^[7, 8]。本文所用 MFPA^{2D} 系统, 是一个能够模拟材料逐渐破坏的数值模拟工具。该方法考虑了材料性质的非均匀性, 假定组成材料各单元的力学性质整体上服从 Weibull 分布; 同时认为: 当单元变形使应力达到一定强度值时即作破坏处理(即假定单元性质近似为弹脆性的, 但由于考虑了材料的非均匀性, 材料的宏观性质则可能是具有软化或弱化关系的非线性性质); 破坏单元不具备抗拉能力, 但具备一定的抗挤压能力; 材料的非均匀性可以通过单元力学参数分布的非均匀性来表达; 破坏单元的力学特性变化是不可逆的。

MFPA^{2D} 的分析过程包括两个方面: 应力分析和破坏分析。应力分析也使用有限元, 用于计算整个结构承受载荷所产生的应力场和位移场; 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。为了模拟实验机加载情况, 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

^{*} 本研究得到国家杰出青年科学基金(No. 59472018)及中科院力学所非线性连续介质力学开放实验室开放基金资助
到稿日期: 1998 - 11 - 09

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,直至整个材料产生宏观破坏。这样就可以处理裂纹萌生、扩展以及裂纹的非规则路径选择问题^[3,9]。

2 数值模拟模型

为了便于与文献[1]的实验结果对比,这里选择与其相同的模型,选择的两种岩石为大理岩和砂岩。为了研究不同的材料性质变化对裂纹扩展过程的影响,还采用了大理岩-砂岩岩板的拼接试件。试件尺寸为150 mm × 100 mm,并在板的中心预制一条斜裂纹或双条顺向雁形裂纹。数值模拟中按照平面应力问题考虑。图1为大理岩和砂岩的一个拼接试件。试件的几何参数及加载的边界条件如图1所示。预制裂纹的中心与拼接试件的中心重合,预裂纹与加载方向成为50°角。拼接试件的总长度 $L = 150$ mm,模拟中考虑了 $L_2 = 50$ mm和 $L_2 = 75$ mm时裂纹的扩展情况。数值模拟中所用的材料的各力学参数均按照Weibull分布赋值,弹性模量和强度的均质度均为10,各参数的平均值如表1。

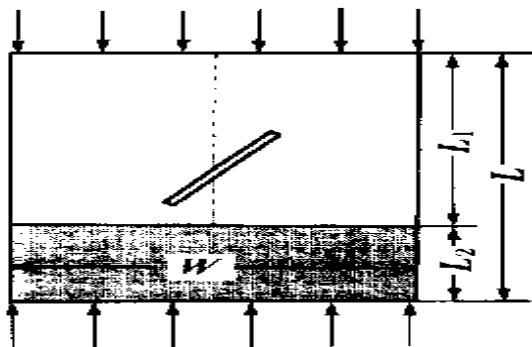


图1 试件的几何参数

Fig. 1 Geometrical parameters of specimen

表1 岩石试样的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock specimens

岩石种类	弹性模量 / 10^5 MPa	抗压强度 / MPa	泊松比	抗拉强度 / MPa
大理岩	11	175	0.4	17.5
砂岩	7	137	0.14	13.7

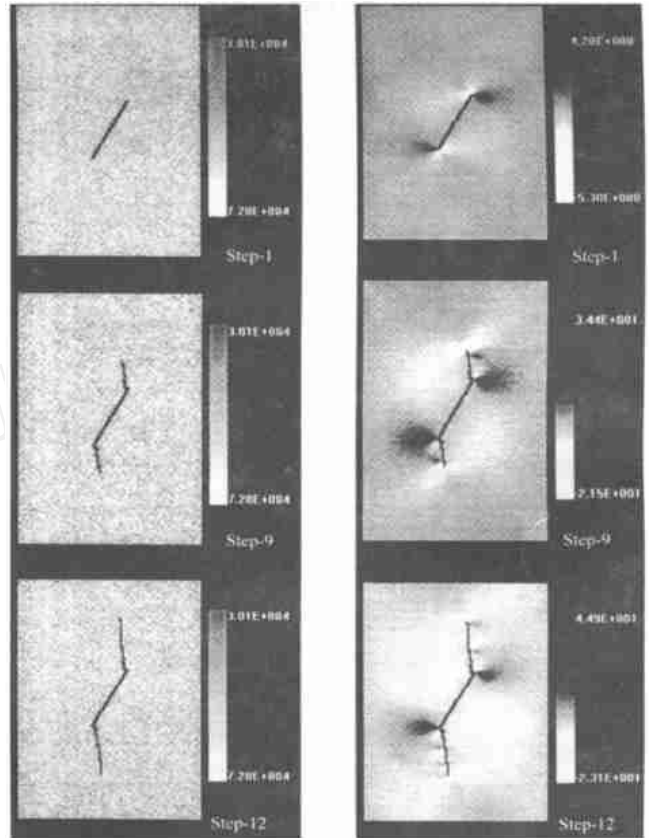
3 模拟结果

3.1 单一岩板中预制裂纹的扩展过程

(1) 单条裂纹的扩展过程

单一岩板中单条裂纹的扩展过程的数值模拟结果如图2所示(包括弹模图(a)和最小主应力图(b)),图中颜色的灰度代表数值的大小。单个裂纹从尖端开始

起裂,起裂方向与原预裂纹成较大的角度,约为70°,然后逐渐弯向加载方向。模拟中规定压应力为正,故最小主应力图反映了拉应力的分布特征。裂纹扩展的尖端始终是拉应力的集中区,随着裂纹的扩展,拉应力集中逐渐释放,并向新的尖端转移。



(a) 弹模图

(b) 最小主应力图

图2 单一岩板中单条裂纹的扩展过程

Fig. 2 Propagation of single crack in a rock plate

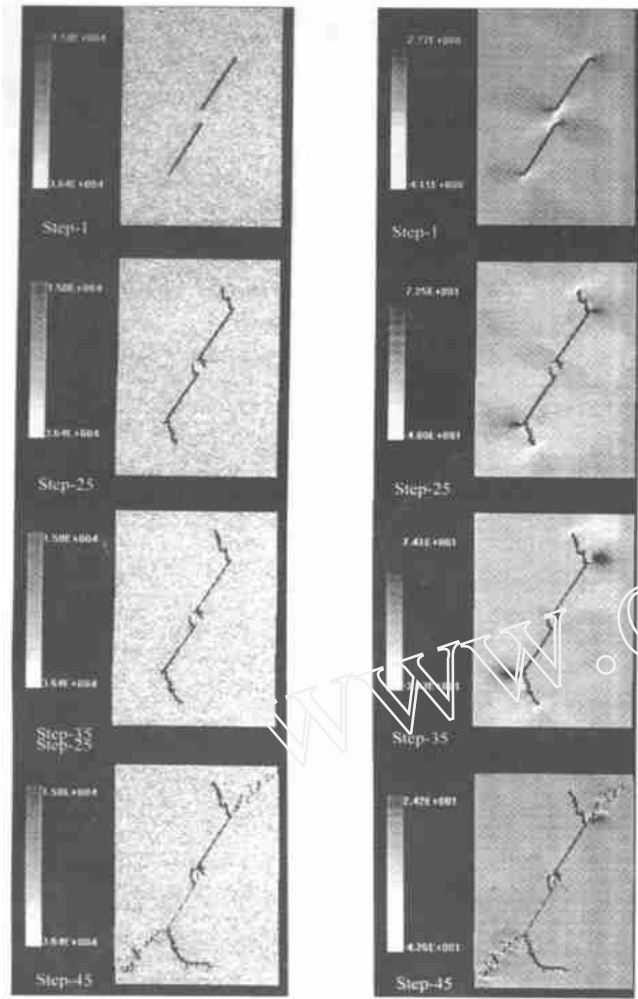
(2) 雁形裂纹的扩展过程

如图3所示,起初在两个裂纹的内端部裂尖应力高度集中,故两个裂纹在此处最先扩展;远端处裂尖的扩展速度较快,扩展方式与单裂纹受压的扩展方式几乎完全相同;扩展到一定阶段时,两裂纹的内端部各自的扩展分支与轴压方向平行,最后停止增长。此时若继续加载,则萌生出直接连接两个裂纹邻近尖端的裂纹,而在两裂纹的远端部平行与预制裂纹方向产生弥散的破坏点,最后相互贯通导致整个岩板破裂。

3.2 大理岩-砂岩拼接岩板中预制裂纹的扩展过程

图4为两种岩石拼接岩板中单条裂纹扩展过程的数值模拟结果,在初始弹模图(图4中的Step-1)中,颜色明暗的两部分表示两种材料性质不同的岩板,亮度越高表示弹模越大。这里,上部较亮的部分表示大理岩岩板,下部是砂岩岩板。

当裂纹预制在大理岩岩板中时(如图4(a)所示),



(a) 弹模图 (b) 最小主应力图

图 3 单一岩板中雁形裂纹的扩展过程

Fig. 3 Propagation of echelon crack in a rock plate

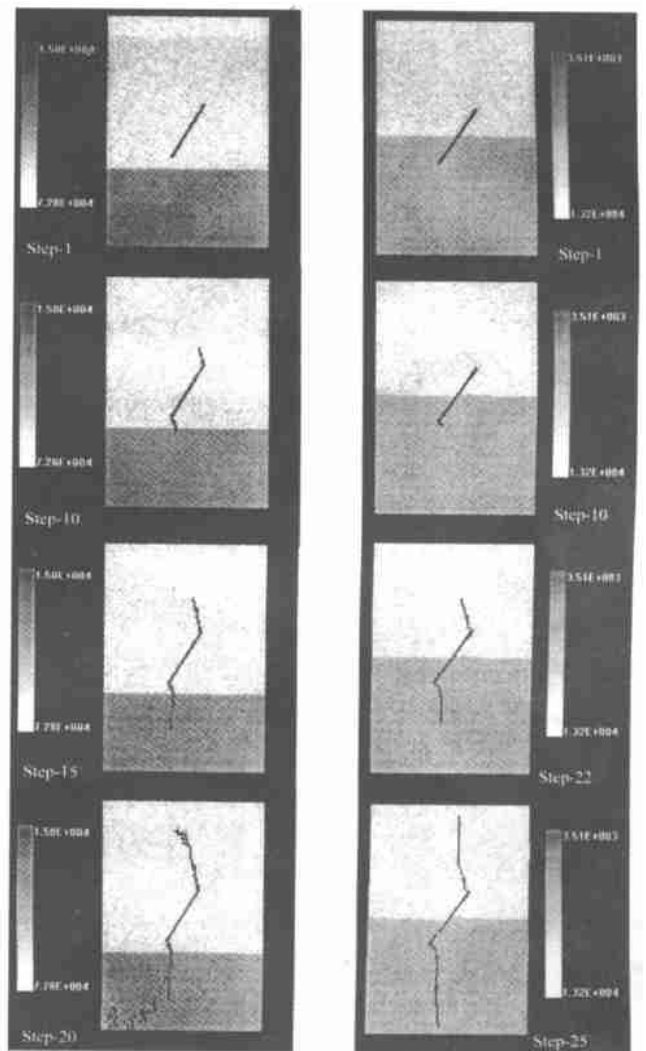
裂纹的初始萌生和扩展与单一岩板中的完全相同,具有大致相同的扩展角度,而且裂纹的两个尖端呈现出对称性。当预制裂纹贯穿大理岩和砂岩的界面时,裂尖在砂岩中快速扩展;在大理岩中的尖端扩展变得缓慢,扩展一段长度后,随着载荷的增加将不再扩展。但在砂岩中裂纹尖端继续扩展,并且另有分支裂纹出现,最终导致岩板的破裂。

当预制裂纹同时跨越大理岩和砂岩岩板时,如图 4(b) 所示,裂纹扩展具有相同的趋势,但在大理岩中裂纹扩展较为缓慢。裂纹两端扩展到一定阶段后,继续加载不再使原裂纹的两端扩展,而是在砂岩中,沿着预制裂纹的方向产生一些分散的破坏点。再继续加载,这些破坏点彼此连通后被压密,在砂岩中又产生一个破坏区,最终这些破坏区连成一片使得整个试件失去承载能力。

3.3 与实验结果的对比

以上给出了用 MFPA^{2D}模拟的图形,为了便于与实

验结果对比,这里也给出实验的裂纹扩展路径示意图(如图 5 所示,按照文献[1]中有代表性的图形绘出,但图 4(b) 所示的模型在文献[1]中未给出,这里不做对比)。我们发现,由于数值模拟考虑了岩板材料性质的非均匀性,裂纹的扩展路径虽然呈现出局部的曲折性,但整体上与实验结果表现出较好的一致性。除此之外,从 MFPA^{2D}给出的最小主应力分布图可以清晰地看出裂纹扩展过程中应力场的变化。



(a) 裂纹位于大理岩内 (L₂ = 50mm) (b) 裂纹位于两岩板结合面 (L₂ = 75mm)

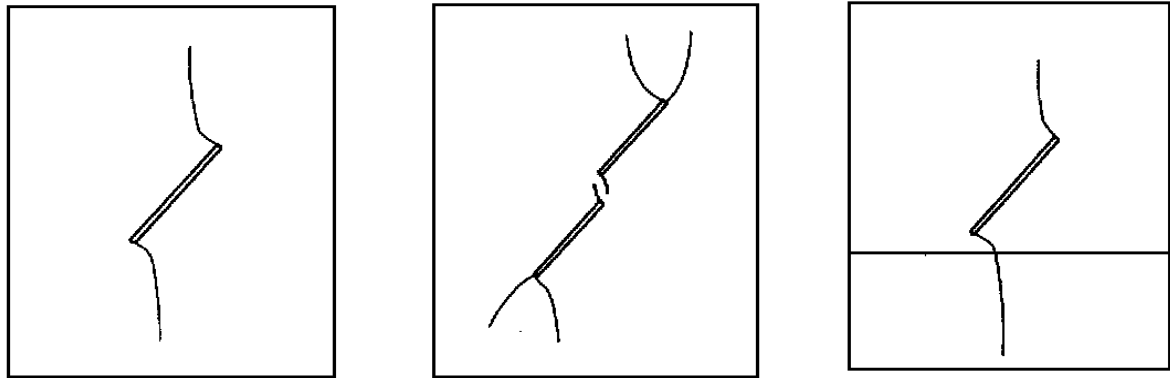
图 4 双岩板中单条裂纹的扩展过程

Fig. 4 Propagation of single crack in two rock plates

3.4 关于裂纹扩展的简单分析

文献[1]对以上裂纹在不同材料中扩展情况进行了分析,若用 K_A 和 K_B 分别表示裂纹两端 A 点和 B 点的应力强度因子,认为应存在如下关系:当 $E_1 = E_2$ 和 $\mu_1 = \mu_2$ 时, $K_A = K_B$; 当 $E_1 < E_2$ 时, $K_A > K_B$; 当 $E_1 > E_2$ 时, $K_A < K_B$ 。

由此看来,在均匀岩板中,单一裂纹和雁形裂纹的



(a) 大理岩岩板裂纹扩展示意图 (文献[1]中图4b) (b) 大理岩岩板中雁形裂纹扩展示意图(文献[1]中图5b) (c) 大理岩-砂岩拼接岩板裂纹扩展示意图(文献[1]中图9f)

图5 裂纹的扩展路径的实验结果示意图

Fig. 5 Sketch of the crack propagation path

扩展都呈现对称性。当裂纹扩展前方有非均匀体存在时,裂纹两端的应力强度因子变得不相等,因而导致裂纹两个尖端扩展的不对称。弹模较小的一端(在砂岩中),应力强度因子增加较大,在较低的应力水平下就能扩展,故裂纹在砂岩中能加速扩展;弹模较大的一端(在大理岩中)在相同的应力下不容易扩展。这种简单的分析,很容易地解释了裂纹的扩展趋势问题。本文的模拟结果再次证明了这一分析结果的正确性。

4 结 论

本文使用 MFPA^{2D}系统对文献[1]中的实验过程进行了数值模拟,再现实验中裂纹的扩展全过程,裂纹扩展的模拟结果与实验结果一致。同时给出了裂纹扩展过程中岩板中应力场的分布。数值模拟可得以下结论:

(1) 单轴受压的混合型裂纹在裂尖以较大的扩展角度(约为 70°)开始扩展,随着轴压的增大逐渐趋于轴压方向。

(2) 对于单轴压下雁形裂纹,在两裂纹邻近端的裂尖优先独立扩展,但是,两裂纹远端裂尖的扩展速度比近端快,近端裂尖扩展到与轴压方向平行时停止。如果继续加载,则萌生出直接连接两个裂纹邻近尖端的裂纹,最后导致整个岩板破裂。

(3) 岩板的力学性质对于裂纹扩展有较大的影响,当裂纹扩展路径中遇到强硬介质时会受到阻碍,当遇到软弱的介质时则会穿过界面加速扩展进程。

(4) 随着裂纹的扩展,裂纹尖端的应力不断释放,应力集中向新的尖端转移,MFPA^{2D}成功地模拟了这一

现象。

MFPA^{2D}对岩体中裂纹萌生和扩展规律的成功模拟说明了该系统用于模拟岩体变形与破坏特征是可行的,这将为岩体基本力学性质以及岩体工程方法的基础研究提供一种有效的方法。

参 考 文 献

- 1 张之立,方兴. 含非均匀体岩板中混合型裂纹扩展过程实验. 见:实验地球物理研究文集. 北京:地震出版社, 1989. 184~193
- 2 李世愚,滕春凯等. 裂纹间动态相互作用的实验观测与理论分析——以共线剪切裂纹归并为例. 地球物理学报, 1998 (1): 79~88
- 3 唐春安. 岩石破裂过程声发射的数值模拟初探. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 368~378
- 4 杨庆生,杨卫. 断裂过程的有限元模拟. 计算力学学报, 1997(4): 407~412
- 5 刘光廷,涂金良,张镜剑. 位移不连续边界元法解多裂纹体的裂纹扩展. 清华大学学报(自然科学版), 1996(1): 59~64
- 6 Shen Baotang, Stephansson O. Numerical analysis of mined mode I and mode II fracture propagation. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1993, 30(7): 861~867
- 7 周维垣,杨若琼,刻公瑞. 流形元法及其在工程中的应用. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 211~218
- 8 王水林,葛修润. 流形元方法在模拟裂纹扩展中的应用. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 405~410
- 9 Tang C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34: 249~262