

# 开挖损伤区近场模型 THM 耦合过程的 BMT 模拟

潘鹏志, 冯夏庭, 周 辉

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 以正在进行的大型国际合作项目 DECOVALEX-THMC 为背景, 利用自行开发的弹塑性细胞自动机模拟系统, 对开挖损伤区近场模型域进行程序校验(BMT)模拟研究, 揭示高放废物从处置开始直至  $1 \times 10^6$  a 的演化过程中, 裂隙的存在对开挖损伤区力学性能的影响。首先进行的是弹性分析, 研究对象包括开挖损伤区近场均质模型和包含复杂裂隙网络的非均质模型域, 该裂隙网络是瑞典 Äspö 硬岩实验室根据裂隙映射得出的真实裂隙网络分布。引入简单的弱化参数表达式, 用弱化元胞单元来代表模型中的复杂裂隙网络, 以模拟裂隙的软化效应。采用项目指导委员会提供的随时间变化的温度、应力、水流边界条件, 模拟地质围岩从开挖、核废物处置、加热  $100 \sim 1 \times 10^6$  a 的力学演化过程。模拟结果显示, 裂隙的存在对应力场、变形场和破坏过程有较大的影响, 并将模拟的结果与国际上其他研究小组的模拟结果进行对比, 吻合较好, 说明该模型和方法的合理性, 并可适合于该项目下一步的研究工作。在此基础上, 采用弹塑性细胞自动机模拟系统, 对裂隙网络模型和均质模型进行弹塑性破坏过程分析, 结果表明, 由于裂隙的存在, 裂隙网络模型的破坏过程更加复杂。

**关键词:** 岩石力学; DECOVALEX-THMC; 弹塑性细胞自动机; 复杂裂隙网络; 开挖损伤区; 温度 - 渗流 - 应力耦合; 破坏过程

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)12 - 2532 - 09

## BMT SIMULATION OF COUPLED THM PROCESSES BY NEAR FIELD MODEL IN EXCAVATION DAMAGE ZONE

PAN Pengzhi, FENG Xiating, ZHOU Hui

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** The results of benchmark test(BMT) from the study on coupled thermo-hydro-mechanical(THM) processes in the excavation damage zone(EDZ) around nuclear waste repository in fractured rocks are presented. This is an important part of international cooperation project DECOVALEX-THMC TASK B. The results focus on the influence of fractures on the evolution of EDZ over  $1 \times 10^6$  years after disposal of high-level radioactive waste. The numerical study is conducted for two model domains, homogeneous and heterogeneous near-field models, surrounding a repository. The heterogeneous near-field model domain includes a realistic fracture network derived by detailed fracture mappings at the Äspö hard rock laboratory, Sweden. In this study, fractures are represented discretely, but softening and weakening effects of fractures intersecting a continuum element are simulated using continuum elements by a reduction in modulus. Using this approach for fracture representation, numerical analyses are conducted using elastoplastic cellular automata(EPCA) code. Elastic and elastoplastic analyses are performed

收稿日期: 2007 - 03 - 08; 修回日期: 2007 - 08 - 27

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(40520130315); 国家自然科学基金资助项目(50709036, 50579070); 国家重点基础发展规划(973)项目(2002CB412708); 中国科学院岩土力学重点实验室开放基金项目(Z000605)

作者简介: 潘鹏志(1976 -), 男, 博士, 2000年毕业于武汉理工大学工程力学专业, 现任助理研究员, 主要从事岩石破裂过程及其多场耦合方面的研究工作。E-mail: pzp@whrsm.ac.cn

to study the evolution of stress and deformations in EDZ adopting time-dependent thermal, mechanical and fluid pressure boundary conditions. The analysis shows a strong impact of fractures on the distribution of rock stress and deformation as well as the failure process. The numerical results are consistent with those obtained by other international research teams, indicating the validity of EPCA code. The results also indicate that the EPCA code can be used to perform next step analysis of DECOVALEX-THMC project.

**Key words:** rock mechanics; DECOVALEX-THMC; elastoplastic cellular automata(EPCA); complex fracture network; excavation damage zone(EDZ); thermo-hydro-mechanical(THM) coupling; failure process

## 1 引言

科学技术的发展使得人类逐步向地下空间开拓, 随着对地下仓库、电站、铁路和公路隧道以及核废物地下贮存问题的研究, 地下开挖工程的稳定性引起人们的极大关注, 特别是环绕开挖巷道附近的扰动区域, 其初始状态(如原始应力场、渗流场、温度场等)受到开挖、远场应力或者其他因素扰动, 形成一定的损伤区, 其主要形式为新裂纹的产生、原生裂纹的闭合和张开以及现场应力的扰动。对开挖损伤区力学性能和形成机制的研究已经引起了许多学者的兴趣。P. C. Kelsall 等<sup>[1]</sup>对开挖导致的岩体渗透率的变化进行了估计; R. Pusch<sup>[2]</sup>对隧道开挖引起的水力传导性能的改变进行了研究; T. Sato 等<sup>[3]</sup>对沉积岩进行了现场试验, 研究开挖扰动区形成机制; P. Bosasart 等<sup>[4]</sup>利用地质和水力学方法对开挖扰动区裂隙网络的特性进行分析; S. D. Falls 和 R. P. Young<sup>[5]</sup>使用声发射和超声波方法来研究开挖扰动区形成机制, 分析了开挖引起二次应力场变化规律; C. F. Tsang 和 F. Bernier<sup>[6]</sup>对开挖扰动区和开挖损伤区进行了具体的定义, 阐述了开挖扰动区和开挖损伤区的区别; 吉小明等<sup>[7, 8]</sup>给出了隧道开挖扰动带的概念, 提出了隧道开挖损伤扰动带的力学、渗流特征及表征方法, 研究不同开挖方法对开挖后变形、渗流场的影响; 蔡美峰等<sup>[9, 10]</sup>研究了灵新煤矿西天河下开采引起扰动的覆岩破坏规律和地表移动规律, 并对岩体特性和开采扰动区进行评估。目前, 在开挖损伤区多场耦合方面也取得了重要的进展<sup>[11]</sup>。

然而, 由于问题的复杂性, 对开挖损伤区在温度、渗流和应力耦合情况下的长期力学演化性能的认识仍有待提高。同时, 受开挖扰动的影响, 在开挖损伤区往往形成复杂的裂隙网络, 这些裂隙的存在对于高放废物的地质处置而言, 由于需要对核废物进行成千上万年的封存, 这一过程中温度、应力和流体压力的改变将对开挖损伤区的长期力学性能产生重要影响。因此, 研究含复杂裂隙网络围岩在温

度、应力和流体压力作用下的长期力学演化性能具有重要的现实意义。

为此, 本文利用自行开发的弹塑性细胞自动机(elastoplastic cellular automata, EPCA)模拟系统<sup>[12]</sup>, 以正在进行的大型国际合作项目 DECOVALEX-THMC 为背景, 研究深部试验探洞近场模型域开挖损伤区花岗岩的 THM 耦合过程, 该过程包括从开挖、运行到关闭后长达  $1 \times 10^6$  a 近场应力、水流、温度耦合作用下的长期力学演化性能。

为简便起见, 本文仅考虑温度应力、有效应力和地质构造应力对围岩长期力学性能的影响, 不考虑热传导和流体的流动过程, 采用随时间变化的边界和内部条件, 这样处理能够比较方便地进行 BMT 研究。

## 2 问题描述

DECOVALEX-THMC TASK B 开挖损伤区 THM 耦合过程的模拟研究包括两种尺寸模型<sup>[13]</sup>: (1) 近场(near-field)模型; (2) 岩壁块体(wall-block)模型。岩壁块体模型域的模拟结果见 J. Rutqvist 等<sup>[14]</sup>的研究, 本文给出近场模型域的计算结果。

### 2.1 几何模型

近场(near-field)模型域见图 1, 其中图 1(a)为均质模型, 图 1(b)为非均质模型(裂隙网络模型), 两种模型的尺寸均为  $3.42 \text{ m} \times 3.42 \text{ m}$ (取钻孔半径  $1.14 \text{ m}$  的 3 倍)。可以看出, 图 1(b)包含复杂的裂隙网络, 该裂隙网络几何模型是由瑞典皇家工学院的 A. Bäckström 在 Äspö 硬岩实验室通过裂隙映射获得的, 这是试验洞开挖后近场受到扰动而形成的真实裂隙网络分布, 裂纹模式和其他相关数据参见 A. Bäckström<sup>[15]</sup>的研究。

### 2.2 边界和内部条件

采用随时间变化的边界条件<sup>[13]</sup>, 内部温度和水利条件是从 DECOVALEX-THMC TASK D 全尺寸模拟中提取的<sup>[13, 16]</sup>。为了 BMT 模拟研究的方便起见, 对边界和内部条件进行了如下一些简化:

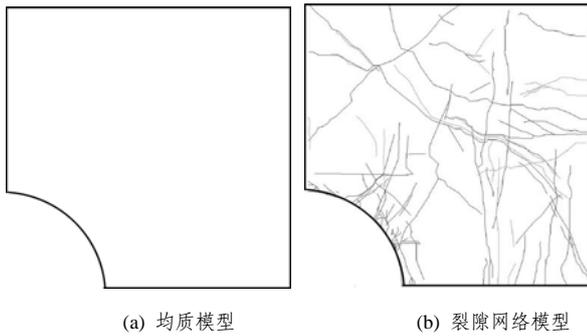


图1 近场模型域

Fig.1 Near-field model domain

(1) 整个近场模型域的温度和水力条件是均匀的;

(2) 整个模型域的相对湿度与钻孔的相对湿度处于一种平衡状态;

(3) 不考虑传热和流体的流动过程, 只考虑温度应力和孔隙压力对开挖损伤区长期力学演化性能的影响。

经过这些简化, 使得开挖损伤区近场模型 THM 耦合过程分析基本上是一个力学计算过程, 并且能够反应温度和流体压力对开挖损伤区长期力学演化的影响。

初始开挖前的条件采用现场 500 m 深处结晶岩中的现场应力、温度和水压, 即: 初始垂直应力为 13.2 MPa, 水平应力为 32.1 MPa, 温度为 25 °C, 流体压力为 5.0 MPa。模拟从开挖后开始, 经历预置、回填直至  $1 \times 10^6$  a 的力学演化过程。

### 3 模拟步骤

对于非均质模型, 由于裂隙数目较多, 采用非连续结构面单元来模拟是几乎不可能完成的工作。因此, 根据模型的特点, 本文采用弱化元胞单元来代表其中的裂隙, 具体步骤如下:

(1) 首先将均质模型划分成由三角形或者四边形(本文采用四边形结构)元胞单元组成的细胞自动机实体网格模型(图 2(a))。

(2) 其次, 将带有裂隙网络的几何模型覆盖到已经建立的实体网格模型上面。

(3) 将裂隙通过的地方所在的元胞单元标识为弱化元胞单元, 其余则为基质元胞单元(图 2(b))。

(4) 采用下面的公式对弱化元胞单元的弹性模量进行赋值:

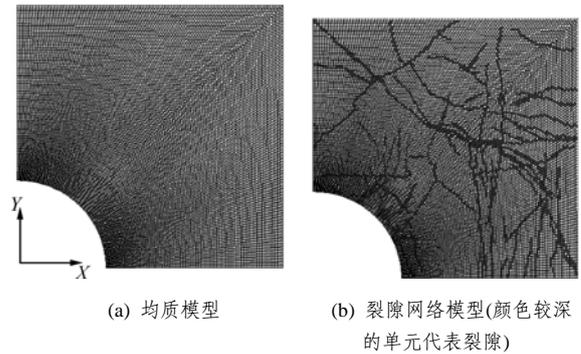


图2 近场模型域实体细胞自动机计算网格图

Fig.2 Calculation grids of physical cellular automata for near-field model domain

$$\frac{1}{E_j} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{k_n b} \quad (1)$$

式中:  $E_j$  为裂隙的弹性模量,  $E_r$  为岩石基质弹性模量,  $k_n$  为裂隙的法向刚度,  $b$  为弱化元胞单元的平均尺寸。

弱化元胞单元的泊松比与基质元胞单元的泊松比保持一致。

(5) 将边界和内部条件分别施加到均质模型和裂隙网络模型上进行计算。

模型中岩石基质和裂隙的力学参数分别见表 1 和 2。

表1 岩石基质的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of intact rock matrix

弹性模量/GPa	泊松比	Biot 常数	温度膨胀系数/(°C) <sup>-1</sup>	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	孔隙率	渗透率/m <sup>2</sup>
70	0.3	1.0	$1 \times 10^{-5}$	2 700	0.01	$1 \times 10^{-19}$

表2 裂隙的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of fractures

剪切刚度/(GPa · m <sup>-1</sup> )	法向刚度/(GPa · m <sup>-1</sup> )
200	2 000

利用弹塑性细胞自动机模拟系统 EPCA 进行计算时, 需要设定细胞自动机迭代精度, 本文设定迭代精度为  $1 \times 10^{-12}$  即可得到比较精确的结果。

## 4 结果分析

### 4.1 均质模型 BMT 模拟

所谓 BMT(benchmark test), 就是程序校验, 可以通过将程序的计算结果与解析解、试验或者其他

方法得出的结果进行对比, 以检验程序的正确性和合理性。

本文将 EPCA 模拟系统得到的近场均质模型的模拟结果与其他国家研究小组的模拟结果进行了对比分析, 以验证本文模拟方法的正确性和可靠性(通过各个研究小组背靠背模拟, 然后将计算结果进行对比来说明各自模型和方法的正确性, 这是 DECOVALEX 项目进行 BMT 研究经常采用的一种手段)。

图 3 和 4 是本文的模拟结果与美国能源部 DOE 研究小组和 DECOVALEX TASK D 的全尺寸计算结果的对比情况<sup>[14-16]</sup>。从应力分布图可以看出, 开挖时的应力与 DOE 小组的应力分布吻合较好, 与 TASK D 全尺寸计算结果也比较接近; 加热 100 a 后, 应力分布有些差别, 但总体趋势是相同的, 由此也说明本文模型和方法的合理性, 并可适合于下一阶段的研究工作。

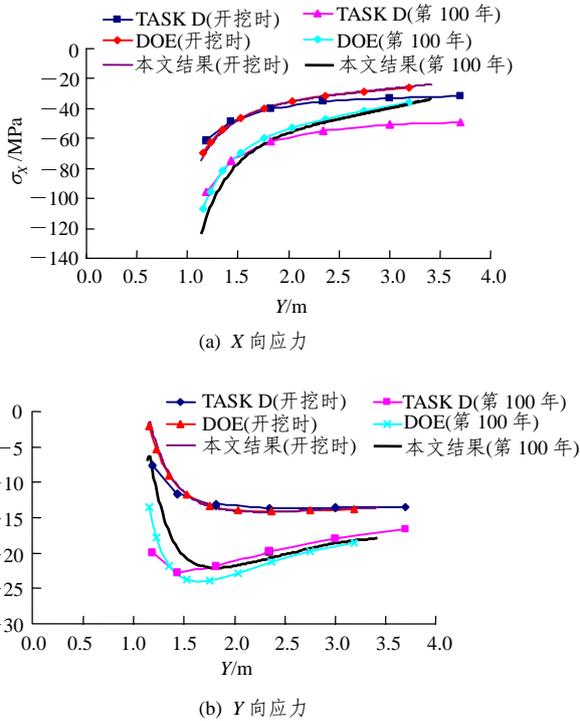


图 3 开挖和第 100 年沿 Y 轴应力分布  
Fig.3 Distribution of stresses along Y-direction at excavation and the 100th year

### 4.2 均质模型与裂隙网络模型

#### 4.2.1 应力分布对比

图 5 和 6 分别为两种模型在开挖和第 100 年时 X 和 Y 向应力分布曲线, 其中, 光滑的曲线是均质模型的应力曲线, 曲折的曲线是裂隙网络模型的应力曲线。从图中可以看出, 由于裂隙的存在, 使得应力分布变得极不光滑, 存在显著的应力集中现象。

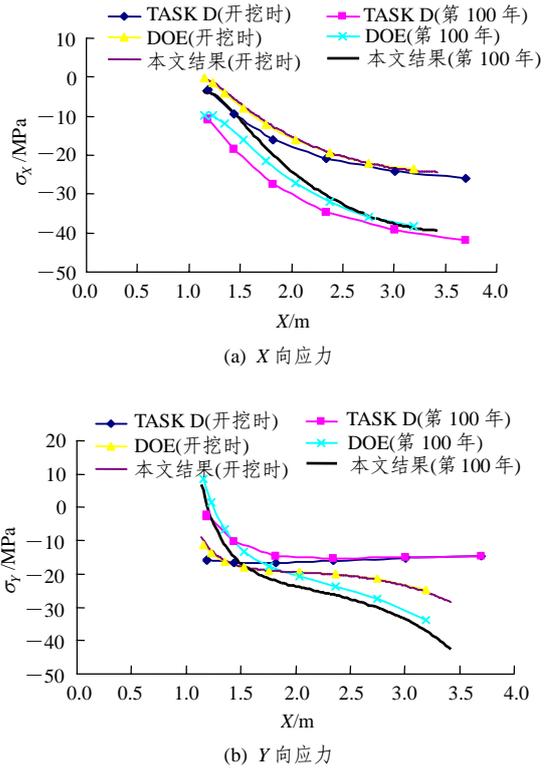


图 4 开挖和第 100 年时沿 X 轴应力分布  
Fig.4 Distribution of stresses along X-direction at excavation and the 100th year

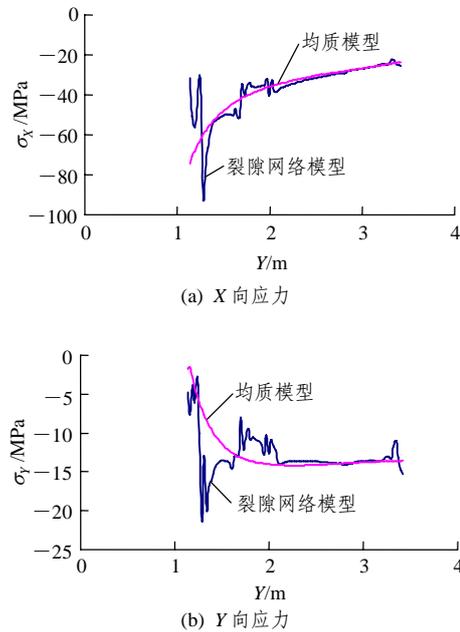
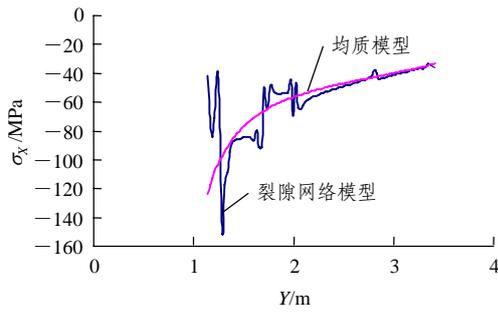
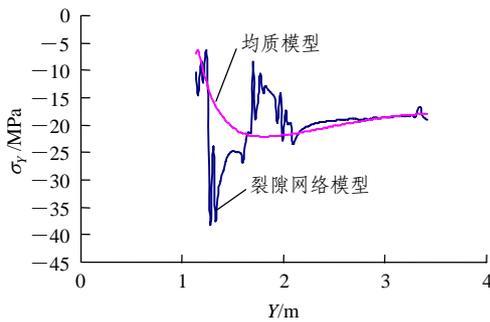


图 5 开挖时两种模型 X 和 Y 向应力分布  
Fig.5 Distribution of stress of two models in X- and Y-direction at excavation

模拟结果显示, 钻孔附近的应力集中现象更加明显, 应力非均匀性更加突出。离钻孔较远的地方, 应力非均匀性逐渐减小, 这是因为离孔越远, 受到的扰动越小的缘故。



(a) X向应力



(b) Y向应力

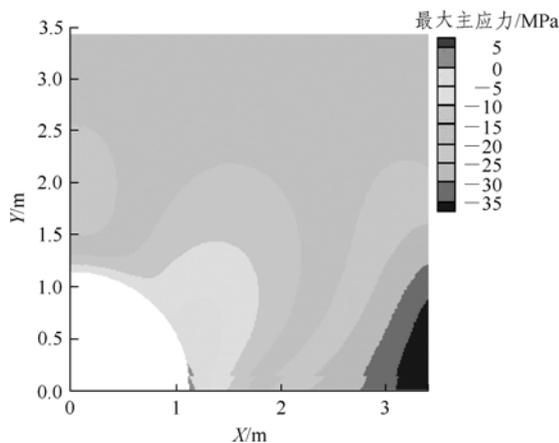
图6 加热 100 a 后两种模型 X 和 Y 向应力分布  
Fig.6 Distribution of stress of two models in X- and Y-direction after heating for 100 years

### 4.2.2 应力云图对比

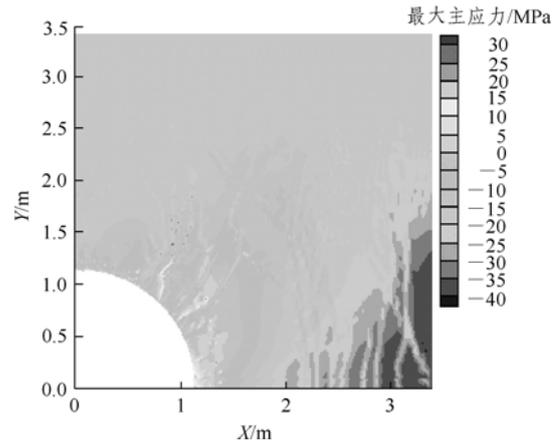
图 7 和 8 是加热 100 a 后的主应力分布云图。通过均质模型和裂隙网络模型应力云图的对比可以发现，裂隙网络的存在极大地改变了近场模型的应力状态，裂隙存在的地方，明显地存在应力集中现象。

### 4.2.3 应力分布柱状图

为了研究主应力分布情况，本文对两种模型中的最大主应力进行了分布统计，如图 9 所示。



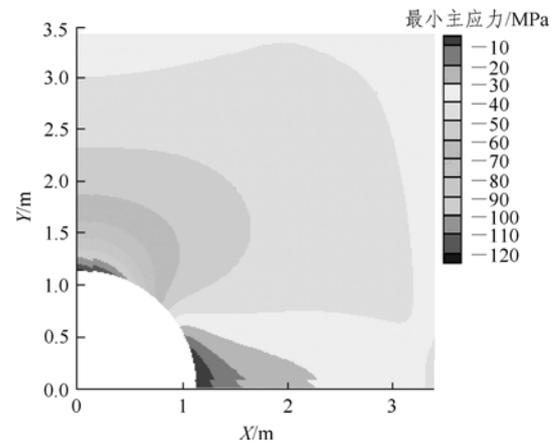
(a) 均质模型



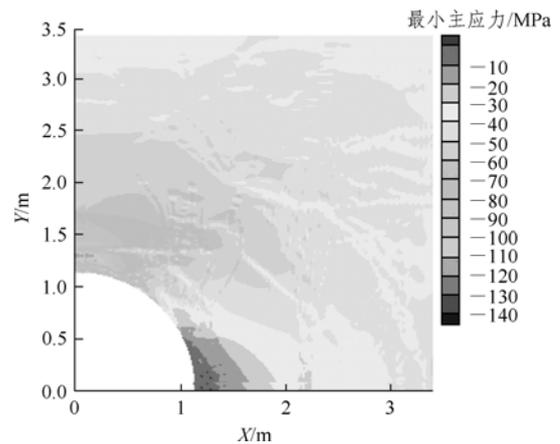
(b) 裂隙网络模型

图7 加热 100 a 后两种模型的最大主应力云图

Fig.7 Nephogram of the maximum principal stresses of two models after heating for 100 years



(a) 均质模型



(b) 裂隙网络模型

图8 加热 100 a 后两种模型的最小主应力云图

Fig.8 Nephogram of the minor principal stresses of two models after heating for 100 years

从最大主应力分布柱状图可以看出，均质模型的最大主应力分布范围为-39~8 MPa，而裂隙网络

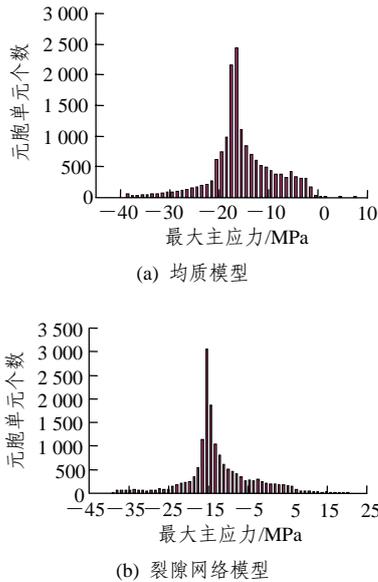


图 9 加热 100 a 后的最大主应力柱状分布图

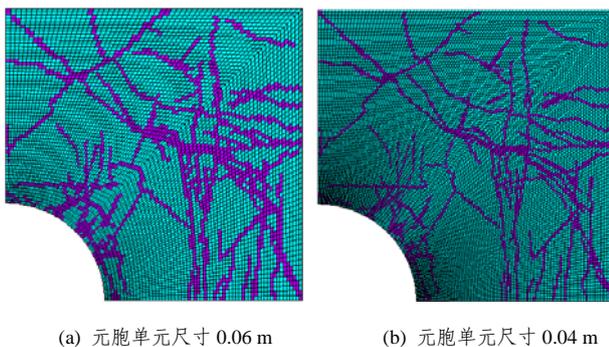
Fig.9 Histogram of the maximum principal stress distributions of two models after heating for 100 years

模型的最大主应力分布范围为-42~27 MPa, 即裂隙网络模型的主应力分布比均质模型的主应力分布范围更广, 系统中最大主应力的最大值更大, 从而说明, 在相同的边界条件下, 裂隙网络模型将比均质模型更早达到屈服状态。

### 4.3 裂隙网络模型的网格尺寸依赖性

对于裂隙网络模型, 元胞单元的平均尺寸必须足够小, 才能比较准确地代表裂隙存在的位置, 如果元胞单元尺寸太小, 必然造成太大的计算工作量, 如果元胞单元尺寸太大, 将无法正确反应裂隙存在的位置。为了研究元胞单元尺寸对计算结果的影响, 本文考虑了两种不同元胞单元尺寸的情形, 来研究裂隙网络模型的网格依赖性问题。

考虑元胞单元的尺寸分别为 0.06 和 0.04 m 的情形, 对应的网格模型如图 10 所示。



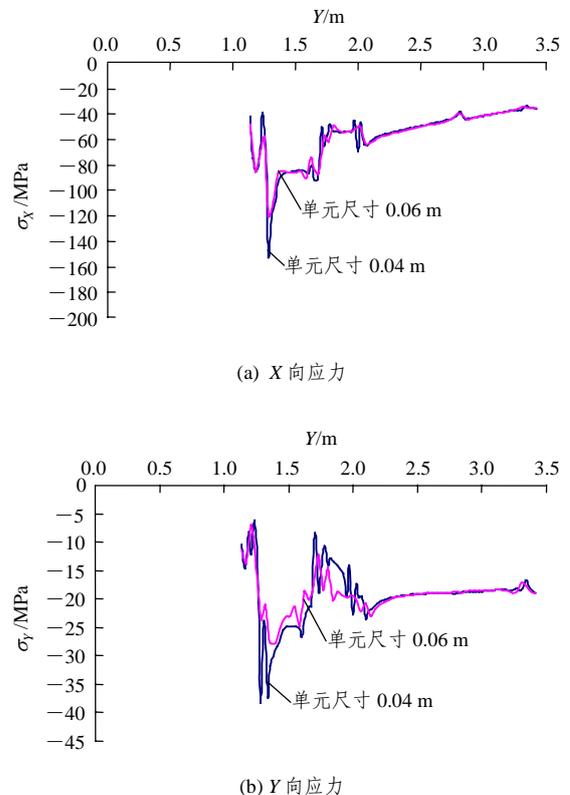
(a) 元胞单元尺寸 0.06 m (b) 元胞单元尺寸 0.04 m

图 10 不同元胞单元尺寸的两两种裂隙网络模型

Fig.10 Two fracture models with different cell element sizes

图 10(a)中包含 7 068 个元胞单元, 7 245 个元胞节点和 1 715 个弱化元胞单元; 图 10(b)中包含 15 996 个元胞单元, 16 262 个元胞节点和 2 676 个弱化元胞单元。

图 11 是两种不同单元尺寸模型在加热 100 a 后的应力分布对比。从图中可以看出, 网格较稀疏的模型虽然也能反应由于裂隙存在而产生的应力集中现象, 但从应力分布对比图可以看出, 网格较密的模型能够更加细致地反映应力集中现象, 而网格较稀疏的模型所反映的应力集中现象则比较粗糙, 尤其是在钻孔附近, 这种现象显得更加突出。图 12 是两种模型在加热 100 a 后的位移对比曲线。从图中可以看出, 不同元胞单元尺寸使得模型位移分布也有一定的差别。图 13 是两种模型在开挖时的主应力柱状分布图, 图 13(a)中的应力分布范围为-27~22 MPa, 图 13(b)中的应力分布范围为-29~26 MPa, 即网格较密的模型应力分布范围更广, 因此也更能反应应力集中现象。因此, 在计算速度允许的前提下, 应该选用较密的网格来模拟裂隙网络模型, 但是网格也不是无限制的密, 元胞单元的尺寸应大于允许最大裂隙隙宽。



(a) X 向应力

(b) Y 向应力

图 11 两种不同单元尺寸模型加热 100 a 后的应力分布对比

Fig.11 Comparison of stresses distribution of two models with different element sizes after heating for 100 years

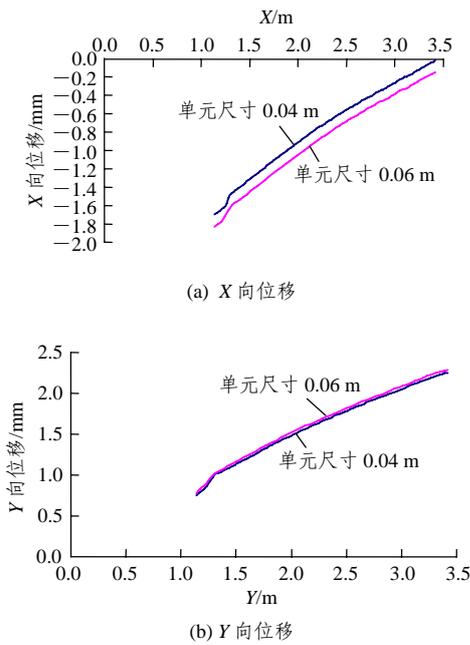


图 12 两种不同单元尺寸加热 100 a 后的位移分布对比  
 Fig.12 Comparison of displacements distribution of two models with different element sizes after heating for 100 years

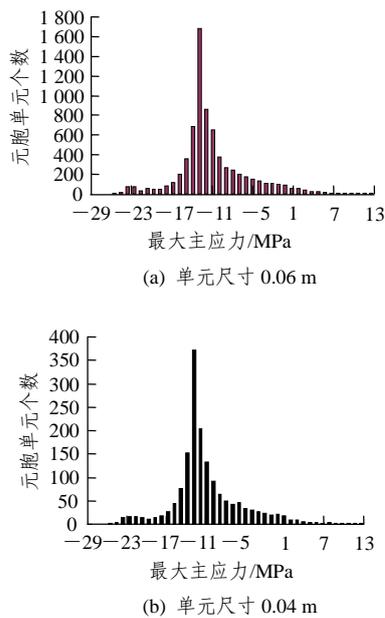


图 13 开挖时两种不同单元尺寸模型的最大主应力柱状分布图  
 Fig.13 Histogram of the maximum principal stress distributions of two models with different element sizes at excavation

### 4.4 弹塑性破坏过程分析

弹性分析结果表明，本文所采用的模型是合理的，方法是正确的，并可进行该项目下一阶段的研究工作，因此，这里对近场裂隙网络模型和均质模型进行弹塑性破坏过程分析。研究在载荷作用下，裂隙网络模型的破坏过程和破坏模式，并与均质模

型的破坏模式相对比，用以说明裂隙的存在对破坏过程的影响。

在前面的弹性分析中，每个时间步的载荷是一步施加上去的，但是，在进行弹塑性破坏分析时，需要采用增量载荷步的方法，为此，设置水平载荷增量为 0.321 MPa/步，垂直载荷增量为 0.132 MPa/步(图 14)，即 100 步对应的时刻是开挖后。根据花岗岩的特点和裂隙的特性<sup>[15]</sup>，本文采用如下的弹塑性参数：基质黏聚力为 15 MPa，内摩擦角为 49°，裂隙黏聚力为 1 MPa，内摩擦角为 27°。元胞单元服从塑性关联流动法则和弹塑性加卸载规律，容许误差 1%，其余参数见表 1 和 2，采用理想弹塑性模型进行求解，元胞单元服从 Mohr-Coulomb 强度准则。

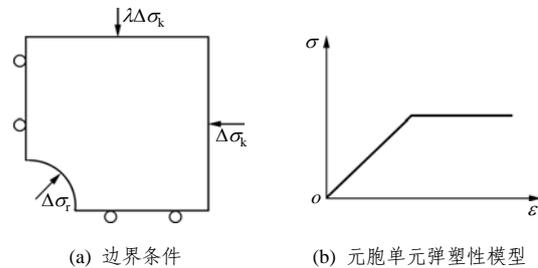


图 14 近场模型破坏过程模拟的边界条件和弹塑性模型  
 Fig.14 Boundary condition in the failure process simulation of near-field model domain and elastoplastic model used in EPCA simulation

裂隙网络近场模型破坏过程如图 15 所示(黑色部分为原先存在的裂隙，白色部分为新出现的破裂区，介于二者之间颜色所示部分为均匀岩石基质)。从图中可以看出，随着边界载荷的增加，微裂纹首先出现在试验洞右下角部位以及其他部位预制裂纹的周围和尖端，这是因为在载荷的作用下，不管是均质模型还是裂隙网络模型，右下角部位均存在较大的拉应力，由于裂隙的影响，裂隙网络模型在该位置的拉应力更大(图 7)，并且，随着载荷的继续增加，试验洞右下角的破坏区扩展得更快，尽管在其他部分出现破裂区，但是破裂区域大部分集中在右下角。从破坏过程图以及前面的弹性分析可以看出，裂隙网络近场模型的破裂主要受拉应力控制，破裂主要是拉伸破坏。对比图 15 和 16 的均质模型破裂状态可以看出，在相同的力学参数和边界条件下，均质模型的破坏区域发生在试验洞的左上角，这是因为均质模型在试验洞右下角的拉应力较小(图 7)，不足以产生受拉破坏，而试验洞的上方位置存在较

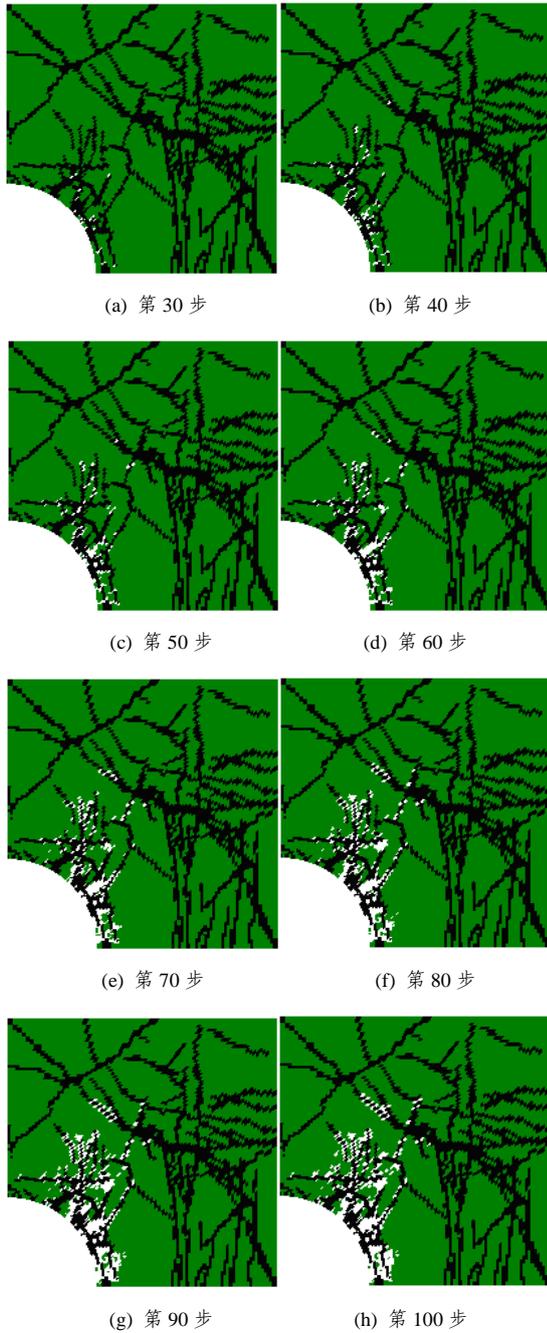


图 15 近场裂隙网络模型弹塑性破坏过程

Fig.15 Elastoplastic failure processes of near-field fracture network model domain



图 16 近场均质模型破坏状态

Fig.16 Final failure state of near-field homogeneous model domain

大的压应力(图 8), 在不断增大的载荷作用下, 容易在该区域出现压剪破裂。而且, 裂隙网络模型在应力比较低的时候就开始出现破裂, 而均质模型的破裂则需要施加较高的边界应力, 这与弹性分析时得出的结论是一致的(图 9)。

模拟结果表明, 裂隙的存在使得近场模型的破坏变得更加复杂。采用弱化元胞单元代表复杂裂隙网络中的裂隙, 能够比较真实地反映裂隙的存在对应力状态和破裂过程的影响。

### 5 结 论

弹塑性细胞自动机模型的一个基本思想是用简单的规则和简单的破坏判据来模拟岩石复杂的破裂过程。本文秉承这一思想, 以弹塑性细胞自动机(EPCA)模拟系统 EPCA 为模拟工具, 利用简单的弱化元胞单元来模拟复杂裂隙网络模型的力学行为, 这正是本文的一个特色所在。基于这种思想, 本文参与了 DECOVALEX-THMC TASK B 近场模型域的 BMT 模拟研究工作, 并得出以下结论:

(1) 采用弱化元胞单元代表裂隙网络中的裂隙, 能够比较准确地模拟裂隙所在的位置以及裂隙的存在对应力场和变形场的影响。采用这种方法具有如下的优点: 捕捉由于裂隙网络的存在而产生的非均匀应力场; 能够方便地在裂隙和基质中考虑材料特性的非均匀效应; 能够考虑裂纹的弯曲和局部波动效应。

(2) 对于近场均质模型, 模拟结果与美国能源部研究小组和 DECOVALEX TASK D 全尺寸的模拟结果比较接近, 从而说明 EPCA 模型的正确性, 并适合于该项目下一阶段的研究工作。

(3) 采用弱化元胞单元来代表裂隙网络中的裂隙, 能够定性地反映由于裂隙存在造成的应力集中现象。模拟结果表明, 裂隙的存在使得应力场的分布变得更加复杂。通过均质模型与裂隙网络模型应力场的比较可以知道, 计算结果在定性上是合理的。

(4) 网格尺寸大小对裂隙网络模型的计算结果有显著影响, 网格较密时, 计算结果能够更加细致地反映裂隙造成的应力集中现象, 而网格较稀疏时, 对应力集中现象的反映则相对粗糙。因此, 在计算速度允许的前提下, 应该选用较密的网格来模拟裂隙网络模型。

(5) 裂隙网络模型的主应力分布比均质模型的主应力分布范围更广, 主应力更大, 从而说明, 在

相同的边界条件下, 裂隙网络模型将比均质模型更早达到屈服状态(如果应力能够达到岩石的屈服强度的话)。

(6) 裂隙网络的存在对近场的破裂模式起决定性的作用, 由于裂隙的存在, 使得裂隙网络模型的破裂模式大部分为受拉破坏, 而均质模型的破坏则主要是压剪破裂, 从而说明, 裂隙的存在使得破坏过程变得十分复杂。

**致谢** 感谢国际岩石力学学会新任主席 J. A. Hudson 对本文模拟的建议, 感谢美国能源部 Jonny 博士提供的 DOE 研究小组的计算结果和 DECOVALEX TASK D 全尺寸模型的计算结果及对本文的模拟所提供的建议!

### 参考文献(References):

- [1] KELSALL P C, CASE J B, CHABANNES C R. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(3): 123 - 135.
- [2] PUSCH R. Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(1): 79 - 83.
- [3] SATO T, KIKUCHI T, SUGIHARA K. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, Central Japan[J]. *Engineering Geology*, 2000, 56(1/2): 97 - 108.
- [4] BOSASART P, MEIER P M, MOERI A, et al. Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus clay of the Mont Terri Rock Laboratory[J]. *Engineering Geology*, 2002, 66(1/2): 19 - 38.
- [5] FALLS S D, YOUNG R P. Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterize the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock[J]. *Tectonophysics*, 1998, 289(1 - 3): 1 - 15.
- [6] TSANG C F, BERNIER F. Definitions of excavation disturbed zone and excavation damaged zone[R]. Luxembourg: [s. n.], 2004.
- [7] 吉小明. 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(10): 1 697 - 1 702.(JI Xiaoming. Study on mechanical and hydraulic behaviors of tunnel surrounding rock masses in excavation-disturbed zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1 697 - 1 702.(in Chinese))
- [8] 吉小明, 任伟新. 隧道岩体赋存地质特征及开挖过程描述[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(4): 615 - 620, 626.(JI Xiaoming, REN Weixin. Geological environment of tunnel ground and depiction of the excavation process[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(4): 615 - 620, 626.(in Chinese))
- [9] 蔡美峰, 任奋华, 来兴平. 灵新煤矿西天河下安全开采技术综合分析[J]. *北京科技大学学报*, 2004, 26(6): 572 - 574.(CAI Meifeng, REN Fenhua, LAI Xingping. Comprehensive analysis of safe mining underneath the Xitian River at Lingxin coal mine of China[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2004, 26(6): 572 - 574.(in Chinese))
- [10] LAI X P, CAI M F, REN F H, et al. Assessment of rock mass characteristics and the excavation disturbed zone in the Lingxin Coal Mine beneath the Xitian River, China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(4): 572 - 581.
- [11] 周 辉, 冯夏庭. 岩石应力 - 水力 - 化学耦合过程研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(4): 855 - 864.(ZHOU Hui, FENG Xiating. Advances in coupled mechanical-hydro-chemical processes in rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(4): 855 - 864.(in Chinese))
- [12] FENG X T, PAN P Z, ZHOU H. Simulation of rock microfracturing process under uniaxial compression using elastoplastic cellular automata[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(7): 1 091 - 1 108.
- [13] RUTQVIST J, SONNENTHAL E, JING L, et al. Task definition for DECOVALEX THMC Task B, Phase 3: a bench mark test on drift wall coupled THMC processes[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Coupled THMC Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modeling, Experiments and Applications*. Nanjing: [s. n.], 2006: 3 - 6.
- [14] RUTQVIST J, FENG X T, HUDSON J, et al. Multiple-code bench mark simulation study of coupled THMC processes in the excavation disturbed zone associated with geological nuclear waste repositories[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Coupled THMC Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modeling, Experiments and Applications*. Nanjing: [s. n.], 2006: 397 - 402.
- [15] BÄCKSTRÖM A. Obtaining the fracture pattern to use in the near field model 2 in Phase 3 in Task B in the DECOVALEX IV Cooperation[R]. [S. l.]: [s. n.], 2006.
- [16] RUTQVIST J, BIRKHOLZER J T, CHIJIMATSU M, et al. Comparative simulation study of coupled THM processes near back-filled and open-drift nuclear waste repositories in Task D of the International DECOVALEX Project[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Coupled THMC Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modeling, Experiments and Applications*. Nanjing: [s. n.], 2006: 428 - 433.