

高放废料地质处置中多场耦合作用下的岩石 破裂问题

唐春安¹, 马天辉¹, 李连崇¹, 刘红元²

(1. 大连理工大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024; 2. 悉尼大学 土木工程系, 悉尼, 澳大利亚)

摘要: 综述岩石力学中热-水-力耦合模型的研究进展, 认为在热-水-力耦合作用下的岩石(岩体)破裂过程演化将直接影响高放射性废料地质处置库周围围岩的热力学特性、渗流特性和力学稳定性, 进而影响高放射性核素在围岩中的迁移规律。通过建立一种描述热-水-力耦合条件下岩石破裂演化过程的细观力学模型, 来揭示热-水-力耦合条件下宏观岩体结构破坏行为。计算分析结果表明, 这种模型对于高放废料地质处置的可靠性分析具有重要的科学价值及现实意义。

关键词: 岩石力学; 热-水-力耦合; 高放射性废料; 破裂过程; 数值模型

中图分类号: TU 457; O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)增 2-3932-07

ROCK FAILURE ISSUES IN GEOLOGICAL DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES UNDER MULTI-FIELD COUPLING FUNCTION

TANG Chun'an¹, MA Tianhui¹, LI Lianchong¹, LIU Hongyuan²

(1. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Sydney, Sydney, Australia)

Abstract: The research progress in thermal-hydraulic-mechanical (THM) coupling model in rock mechanics is summarized. The rock (rock mass) failure process under the thermal-hydraulic-mechanical coupling function will directly affect the thermodynamic characteristic, the seepage characteristic and mechanical stability of surrounding rock around high-level radioactive wastes geological disposal repository, further affect the migration rules of high-level radioactive nuclide in surrounding rock. The macroscopical behavior of rock structure failure is modeled by building a model which describes the rock (rock mass) failure process under the thermal-hydraulic-mechanical coupling function. The analysis results show that this method has important scientific values and practical significances for the reliability of high-level radioactive wastes disposal.

Key words: rock mechanics; thermal-hydraulic-mechanical (THM) coupling; high-level radioactive wastes; failure process; numerical model

1 高放废料地质处置研究现状

从 20 世纪 50 年代到现在为止, 人类一方面发

展利用核能, 另一方面, 世界上每一个国家都在寻找安全、永久处理核废料的办法。现阶段都倾向于利用深部岩石洞室(花岗岩、岩盐等)作为永久储存库。但是地表水、地下水的运动、放射性核素的污

收稿日期: 2007-03-07; **修回日期:** 2007-06-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40638040)

作者简介: 唐春安(1958-), 男, 博士, 1982年毕业于中南工业大学采矿工程专业, 现任大连理工大学特聘教授、博士生导师, 主要从事岩石破裂与失稳方面的教学与研究工作。E-mail: tca@mail.neu.edu.cn

染迁移、人类活动等均可能导致核泄漏。因此，其永久安全性及其对地质环境和生物圈的长期影响越来越受到人们的关注和担忧。基于上述原因，核废料处置中的地质体稳定性已是举世关注的重大岩石力学课题。到目前为止，各国(主要是发达国家)之间已在此领域开展了广泛的合作研究^[1~8]。1992 年开始，英、美、法、德、日、加拿大、西班牙、芬兰和瑞典政府、欧共体以及工业界联合进行了一项迄今为止规模最大、时间最久、成果最多(1992~2005 年，经费 1 亿元/a)的国际合作项目(DECORVALEX)，该项目就是关于核废料地下处置中岩石和充填黏土的应力、变形、地下水流动和核废料中核元素衰变引起的放热效应诸过程的耦合作用的理论和试验研究，计划的实质是以多学科研究为基础，发展耦合模型；以科学试验为基础，检验各种模型的有效性。该研究计划已取得了许多有意义的成果。

发展战略核威慑力量以及加快核电站建设是我国重要战略决策及能源发展大计。与此同时，每年亦会有相当数量的高放射性废料(简称高放废料)产生。为了保护环境，避免污染，必须使这些高放废料得到安全的处置。它不仅是一个与核安全同等重要的问题，同时也是关系到我国核能工业可持续发展和环境保护的重大问题。我国关于核废料地下深埋处理所涉及的热 - 水 - 力(thermal-hydraulic-mechanical, THM)耦合作用的研究尚处于起步阶段，许多学者^[9~14]在这方面正在进行积极而有意义的探索。

1.1 THM 耦合作用简介

地下储存核废料或放射性废料的岩体会产生包括热(T)、水流(H)、力(M)和化学(C)等过程之耦合作用现象。“耦合过程”的术语意味着一个过程会影响其他过程的发生和发展。因此，人们早就指出，存储有核废料的岩体之行为就不可能用各个过程相互独立的封闭系统来预测^[11]。

建造放射性的废料处置库的目标，就是根据合适的安全和环境要求处理用尽的核燃料和其他核废弃物。为达到这一目的，必须实施放射性废料处置的工程措施。这种工程措施的实施将会引起一系列的问题。比如，安全经济地建立核废料处置库，安全地进行废料转移，可以接受的环境影响，与放射性迁移有关的标准等等。因此，无论是对特殊的

THM 耦合机制的建立，还是对每一种或者全部的设计标准进行特殊机制的评估都是重要的。如图 1 所示，可能有多种完全连接的 THM 问题，这在概念、物理和模型上需要注意^[8]。

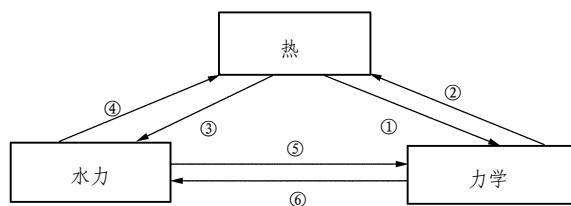
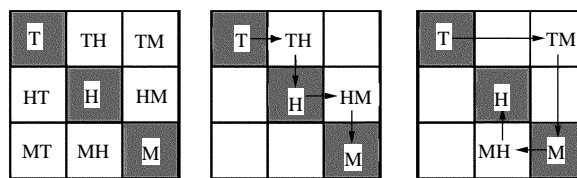


图 1 THM 耦合例图

Fig.1 Sketch of THM coupling example

图 1 中提出了使用相互作用的矩阵的 THM 耦合的岩石工程系统的方法，①表示与温度有关的固体特性变化(a)，或是诱发的热应变(b)；②表示与固体变形有关的热特性变化(a)，或是固体内部耗散(b)，③表示与温度有关的流体特性变化；④表示流体热对流；⑤表示流体压力对固体力学性质影响；⑥表示空隙度和渗透率的变化。

图 2 中分开的热(T)、水(H)、力(M)按照矩阵的对角线排列^[11]。图 2(a)中相互作用矩阵并不是对称的，比如，HT 和 TH 是不同的。图 2(b)中 T, H, M 以一定路径排列进行相互作用，其中 TH 和 HM 相互连接。图 2(c)中，TM 和 MH 连接。实际上，THM 缩写用在本文中，意味这 3 个过程之间进行交替耦合，以所有可能的部分按照不同的路线连接进行耦合。这是 THM 耦合模拟的重要方面。因为，其结果依靠的是合并所有的相互作用的特殊路径。如果需要的话，THM 耦合应该调用图 1 中所有提出的网络连接。



(a) 描绘出同图 1 所示的相同网络 (b) 展示 THM 耦合一个特殊路径: T → TH → H → HM (c) 展示 T, TM, M, MH, H 耦合或者 TMH 耦合

图 2 使用相互作用的矩阵描述 THM 耦合^[11]

Fig.2 THM coupling illustrated by using an interaction matrix^[11]

1.2 与核废料处置库有关的 THM 过程

将 THM 过程分成几个时间段比对处置室从近到远的空间划分要好得多。美国的 NRC(全国咨询中心)暂时定为 3 个阶段: (1) 操作阶段(一直到永久的关闭); (2) 密封阶段(从永久的关闭到 300~1 000 a); (3) 隔离阶段(从长期隔离到 10 000 a)。日本的 AEC(原子能委员会)定义为 4 个阶段: (1) 构造阶段, 在开挖的过程中包含耦合的影响; (2) 操作阶段, 对工程屏障的放置; (3) 关闭阶段, 包括回填和关闭处置室; (4) 永久关闭阶段。

最初的过程是最重要的。本文考虑的 THM 过程, 重点放在比较早的阶段。所以, 下面将按照如下阶段来进行讨论: (1) 开挖阶段; (2) 操作阶段; (3) 关闭阶段, 这同 AECJ(日本原子能委员会)定义的过程差不多^[8]。

1.3 DECOVALEX 国际合作项目对 THM 耦合作用的研究

尽管人们对 THM 耦合过程的重要性有充分的认识, 但是, 迄今为止, 像上述耦合过程建模的可能性仍然是不理想的, 其中部分原因是匮乏可具实用的实测试验数据, 以验证模型计算程序之有效性。因此, 对真实地质系统中 THM 全耦合过程的建模及其数值模拟仍需要做大量的研究工作。为此, 国际合作研究项目 DECOVALEX 应运而生。该项目以开发地质介质中 THM 全耦合过程的数学模型及其应用为目的, 并且强调考察放射性废料的隔离试验去验证模型的有效性^[11]。

DECOVALEX 的研究目标将有助于更好地理解 THM 耦合过程之变化规律, 也即放射性核素如何从地下深埋储存室向地球生物圈迁移和泄漏的重要过程。这些研究将使人们更清楚地知道如何用数学模型去刻画这些耦合过程, 以及如何应用所建立的数学模型去研究和设计此类模型的试验装置。DECOVALEX 的研究目标^[9~14]可归纳如下:

- (1) 开发 THM 耦合模型的计算程序;
- (2) 试探应用恰当的 THM 耦合模型的离散化方法;
- (3) 探讨应用不同的计算程序去描述相关试验, 并进行程序验证的可能性研究;
- (4) 对理论和模型数值计算同现场试验获得的结果进行比较分析;
- (5) 为了进一步的计算程序开发, 设计出 THM 耦合过程的新试验。

DECOVALEX 国际合作研究项目致力于对岩

体的 THM 耦合过程进行理论和试验研究。法国的 INERIS 和 ENSMP 小组代表离散法的研究, 其采用的方法为离散元法和有限元方法; 日本的 KPH 小组和法国 CEA/IDMT 小组代表等效连续方法的研究。主要包括:

(1) 离散法。该法采用的控制方程是: 热平衡方程、块体和不连续体的力学动力方程以及不连续体的水力方程。其中 INERIS 小组采用 UDEC 法, 在 THM 耦合过程简图中的① - a, ② - a, ② - b 和④作用被忽略了; ENSMP 小组采用二维有限单元法, 同样无法考虑① - a, ② - a, ② - b 的作用。

(2) 等效连续方法。该方法根据连续力学基本原理, 建立了由能量、质量和运动组成的守恒方程。其中, KPH 小组利用 Oda 提出的裂隙模型, 采用有限元方法, 比较全面地考虑了 THM 耦合过程; CEA/IDMT 小组在弹性张量方面利用 Reuss 模型, 在渗流张量方面利用 Snow 模型, 同样采用有限元方法, 但该法没有考虑① - a, ② - a, ② - b 的耦合作用。

2 目前 THM 耦合作用研究存在的问题及解决思路

2.1 存在的问题

到目前为止, DECOVALEX 国际合作项目代表了这一领域研究的最高水平, 该项目通过大型物理试验初步验证了 THM 耦合作用模型所具有的合理性和适用性。但是, 也提出了关键性的难题: 首先, 从理论上讲, 温度(热)场、渗流场、应力场在时间和空间尺度上有很大的特征差异; 其次, 渗流场中流体的运移及热对流对相对较小范围内的介质非均匀性及裂纹扩展很敏感; 力学响应(即应力场, 包括裂纹扩展、介质变形)受缺陷、裂纹的影响较大, 致使 THM 耦合模型存在不确定性^[7]。U. Seipold 等^[15~17]及 J. Rutqvist 和 C. F. Tsang^[18]的地下洞室围岩力学特性的数值模拟和原位试验研究发现, 不考虑应力诱发破坏对热力学特性及渗流性影响的数值模型是不可靠的。

对于全过程 THM 耦合作用分析的要求主要来自所考虑的处理系统的基本特征。为了对岩体耦合行为有个良好的理解, 研究人员不得不扩大他们自己的传统知识范围, 向相关学科的研究人员学习, 或同他们合作。由于放射性废料的隔离过程是非常复杂而且时间尺度长久的现象, 为了更好地认识岩

体的耦合行为, 数学模型及其数值分析方法的研究显得尤为重要^[11]。

数值计算已被学术界和工程界广泛接受作为一种力学状态的分析工具。目前用于岩石力学数值计算的有限元、边界元、离散元、刚体元、流形元、有限差分等数值计算方法, 促进了岩石力学学科的发展, 使复杂岩土工程的分析与设计发生根本性的变化。但是传统固体力学中的“均匀性假设”和“连续性假设”这两个致命的弱点一直限制着固体力学理论在岩石力学领域的真正应用。到目前为止, 人们对核废料地下深埋处理中所涉及的关于温度、渗流与应力耦合机制的研究主要是从宏观力学的角度出发, 将岩石这种地质材料简化成均匀、等效连续介质(不能反映孔隙结构性)或离散介质(预定裂隙网络), 难以反映岩石介质在温度、渗流、应力耦合作用下裂纹的萌生、扩展与贯通、岩石破裂过程中孔隙与裂隙相互作用、扩展与贯通等复杂机制。即使一些非连续介质力学方法(如块体理论)也难以考虑岩石从细观破裂到宏观破裂的过程。此外, 在温度、渗流耦合研究中, 应主要考虑热驱动的水流运动; 在温度、应力耦合研究中, 应主要考虑岩体对温度的力学响应以及不连续面的热影响(渗流系数及裂隙开度变化)。此外, 地下水的流动系统的非均质性、流场的渗透性的非均质性问题都是具有挑战性的课题。

2.2 解决思路

针对核废料处理过程中岩体破坏、失稳机制的复杂性, 建立一种描述 THM 耦合作用下的岩石损伤演化过程模型, 对于揭示宏观岩体结构破坏行为, 建立高放废料地质处置中的岩石力学研究方法, 都具有重要的科学价值及现实意义。该方法应该紧紧抓住岩石变形和破裂“过程”这个涉及岩体失稳的本质, 从岩石的“均匀性假设”和“连续性假设”两个关键特征入手, 在充分考虑岩石介质力学性质、环境因素和核废料处理过程时间、空间演化过程复杂性的基础上, 着重解决以下几个基本问题:

(1) 充分考虑岩石介质的非均匀性, 借助统计强度理论, 建立岩石宏观非线性变形破坏行为与细观结构非均匀性和非连续性演化之间的联系;

(2) 建立温度 - 渗流 - 应力 - 损伤的耦合数值模型, 开发在温度 - 渗流 - 应力多场耦合作用下岩石介质缺陷结构和破裂演化发展过程的数值模拟方法, 从细观力学的更高层次上解释宏观工程岩体温度 - 渗流 - 应力 - 损伤耦合作用下的破坏、失稳行为;

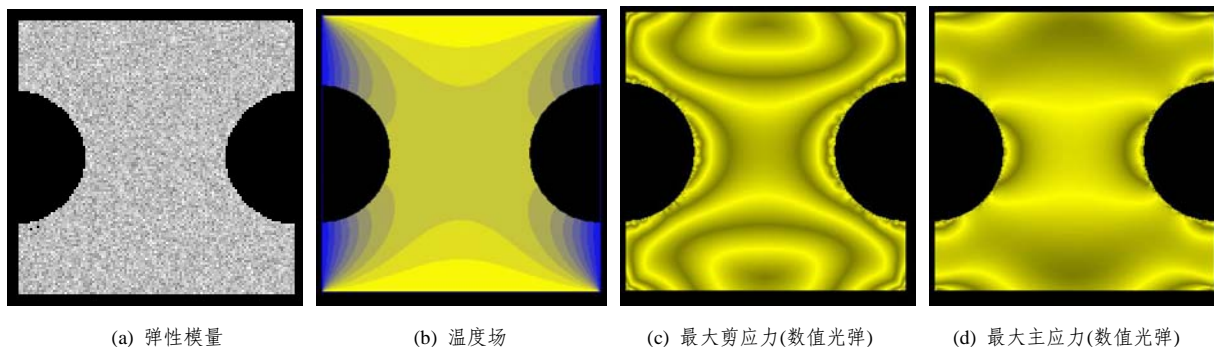
(3) 建立岩体长期载荷作用下流变引起的时效渐近损伤破坏模型, 从细观渐近破坏机制角度解释高应力作用下深部岩体的损伤、疲劳、老化等力学特性和蠕变行为, 确定岩体的长期强度, 为 THM 耦合作用下长期破坏行为提供预测、预报机制。

2.3 探索研究

作者及其研究组在 THM 耦合作用条件下岩石破裂过程的研究中, 开展了一些探索性并具有一定成效的初步工作。由大连力软科技有限公司在此基础上研究开发的材料真实破裂过程分析 RFPA (realistic failure process analysis) 系统, 基于对材料细观结构和细观本构关系的认识, 在充分考虑岩石细观结构非均匀性的基础上, 利用有限元应力分析方法, 并对满足给定强度准则的单元进行破坏处理, 使得非均匀岩石材料破坏过程的数值模拟得以实现^[19, 20]。

图 3 为瑞典 SKB 的 Aspo 硬岩实验室 APSE (aspo pillar stability experiment) 的原位尺度试验的初步 RFPA 数值模拟结果。该项试验目的是为研究热 - 应力作用下两个相邻竖直核废料存储井之间的间柱稳定性。Aspo 硬岩试验同时运用 JobFEM, FLAC, Fracod 等软件进行相应的数值模拟研究^[21], 但很少有一个软件能独立完成试验中的温度场、应力场及破坏过程演化的全过程。而 RFPA 的模拟结果从温度场、应力场到非均匀岩体的破坏过程、声发射演化过程等方面, 均与试验结果表现出了较好的一致性。

图 4 为应用 RFPA 系统(渗流 - 应力 - 损伤耦合

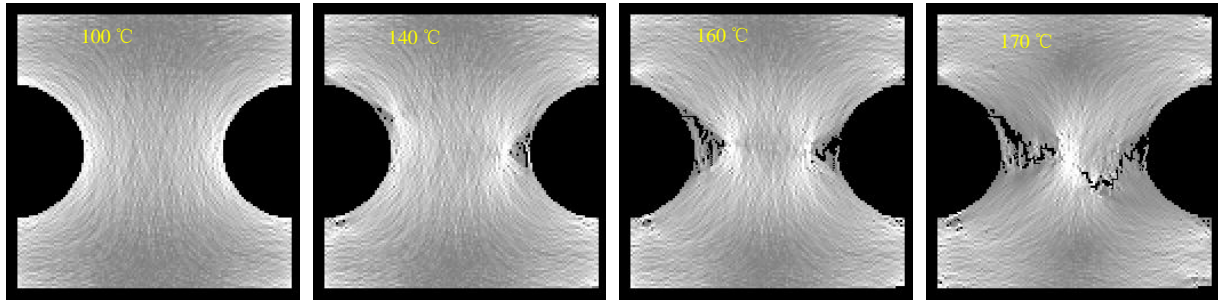


(a) 弹性模量

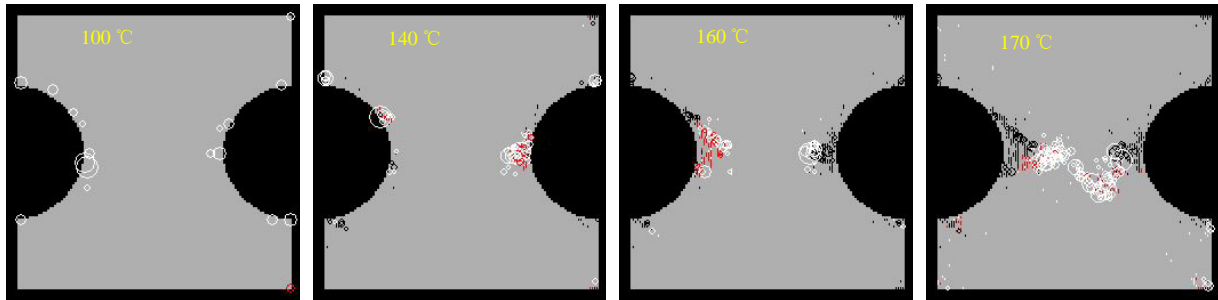
(b) 温度场

(c) 最大剪应力(数值光弹)

(d) 最大主应力(数值光弹)



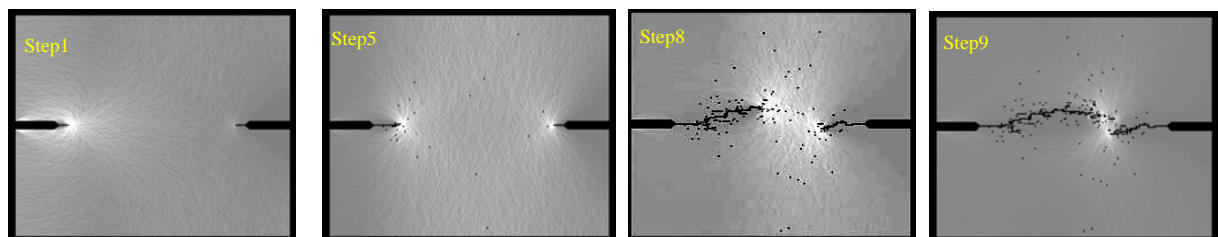
(e) 温度场作用下的最大剪应力分布(灰度代表应力值大小)



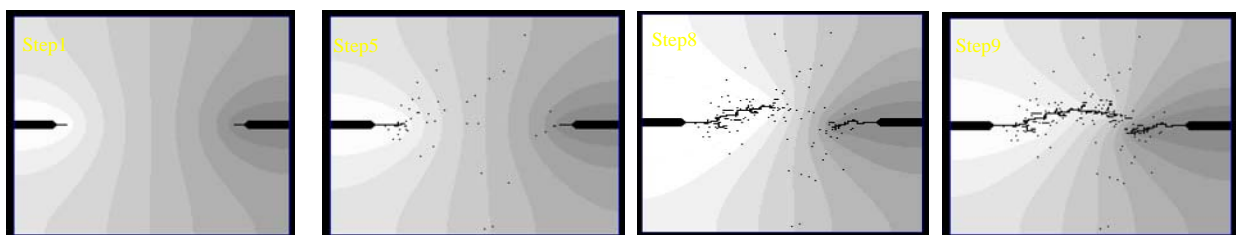
(f) 破坏过程中的声发射分布

图 3 ASPE 试验中的温度诱发间柱破裂过程数值模拟结果(RFPA^{2D}模拟)

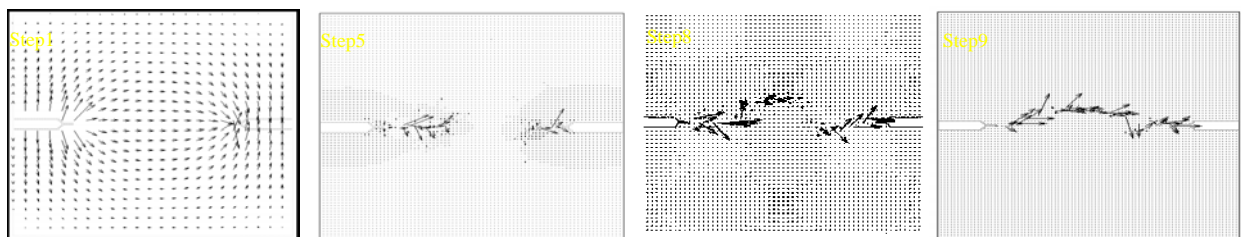
Fig.3 Numerical simulation results of coulomb failure process in APSE experiment(simulated with RFPA^{2D})



(a) 最小主应力场演化过程(灰度代表应力值大小)



(b) 破坏过程中孔隙水压力分布演化



(c) 破坏过程中渗流场演化

图 4 孔隙压力梯度对裂纹扩展影响的数值模拟(RFPA^{2D}模拟)

Fig.4 Numerical simulation of the influence of pore-pressure gradient on the fracture propagation process(simulated with RFPA^{2D})

模型)^[22]对渗流条件下岩体中裂纹诱发及其扩展过程的数值模拟结果, 生动地再现了高应力、非对称孔隙压力梯度下岩体破坏过程、应力场演化及渗流场的分布规律。

3 结 论

本文在简单介绍前人工作的基础上, 介绍了 THM 耦合条件下真实破裂过程 RFPA 数值分析方法, 并给出了通过此方法揭示渗流或温度条件下岩体结构破坏行为的一些分析结果。该方法紧紧抓住岩石变形和破裂“过程”这个涉及岩体失稳的本质。数值模拟从岩石的“非均匀性”和“非连续性”两个关键特征入手, 生动地再现了高应力、非对称孔隙压力梯度下岩体破坏过程、应力场演化及渗流场的迁移规律。

高应力、复杂环境下的核废料处置工作是国内外岩石力学界关注的难点科学问题, 发达国家在这方面的研究起步较早, 而国内的研究起步晚、基础比较薄弱、系统性不强。一方面, 国外的研究目标及成果将有助于更好地开展这方面的工作, 另一方面也给国内研究人员提出了更高的要求, 带来了紧迫感。国内研究工作者必须以更加宽广、全新的思路来研究核废料处理过程中的多相、多场耦合作用过程及其相关的岩体失稳破坏机制。及早开展这一方面的研究, 对于我国战略核威慑力量以及核电站建设的发展具有重要的战略意义。

参考文献(References):

- [1] NOORISHAD J, TSANG C F, WITHERSPOON P A. Coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: numerical approach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(B12): 10 365 - 10 373.
- [2] TSANG C F. Coupled processes associated with nuclear waste repositories[M]. New York: Academic Press, 1987.
- [3] TSANG C F. Coupled thermomechanical and hydrochemical processes in rock fractures[J]. *Review of Geophysics*, 1991, 29(5): 537 - 548.
- [4] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(3): 283 - 353.
- [5] JING L, TSANG C F, STEPHANSSON O. DECOVALEX: an international co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(5): 389 - 398.
- [6] CHAN T, KHAIR K, JING L, et al. International comparison of coupled thermo-hydro-mechanical models of a multiple-fracture bench mark problem: DECOVALEX Phase I, bench mark test 2[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(5): 435 - 452.
- [7] STEPHANSSON O, JING L, TSANG C F. Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media: mathematical and experimental studies, recent developments of DECOVALEX project for radioactive waste repositories[M]. Amsterdam: Elsevier, 1996.
- [8] HUDSON J A, STEPHANSSON O, ANDERSSON J, et al. Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(1): 143 - 161.
- [9] 刘亚晨, 席道瑛. 核废料贮存裂隙岩体中 THM 耦合过程的有限元分析[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(3): 81 - 87.(LIU Yachen, XI Daoying. Finite element method for the coupled thermal-hydro-mechanical processes in fractured rocks surrounding nuclear waste repositories[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(3): 81 - 87.(in Chinese))
- [10] 刘亚晨, 蔡永庆. 核废料贮库围岩介质 THM 耦合的定解问题及其加权积分方程[J]. *地质灾害与环境保护*, 2001, 12(4): 59 - 62, 66.(LIU Yachen, CAI Yongqing. The definite problem and weighted integral equation for thermo-hydro-mechanical coupling in the fractured rock mass media surrounding nuclear waste repositories[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2001, 12(4): 59 - 62, 66.(in Chinese))
- [11] 孙培德, 鲜学福. 核废料深埋处理安全性分析的热-水-力耦合模型新进展[J]. *环境科学进展*, 1997, 5(4): 68 - 81.(SUN Peide, XIAN Xuefu. New advance in mathematical models of coupled thermo-hydro-mechanical processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. *Advances in Environmental Science*, 1997, 5(4): 68 - 81.(in Chinese))
- [12] 杨立中, 黄涛. 初论环境地质中裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究[J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(2): 33 - 35.(YANG Lizhong, HUANG Tao. Primary study on seepage-stress-temperature coupling action of fractured rockmass in environmental geology[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(2): 33 - 35.(in Chinese))
- [13] 高红梅, 梁冰, 兰永伟. 核废料地下处置过程中相关动力学问题

- 及控制措施[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(2): 52 - 56.(GAO Hongmei, LIANG Bing, LAN Yongwei. Dynamic problems in the handle of nuclear waste material underground and control measures[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004, 15(2): 52 - 56.(in Chinese))
- [14] 柴军瑞. 岩体渗流 - 应力 - 温度三场耦合的连续介质模型[J]. 红水河, 2003, 22(2): 18 - 20.(CHAI Junrui. Continuum model for coupled seepage, stress and temperature fields in rock mass[J]. Hongshui River, 2003, 22(2): 18 - 20.(in Chinese))
- [15] SEIPOLD U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks—a general law[J]. Tectonophysics, 1998, 291(1/4): 161 - 171.
- [16] SIBBITT W L, DODSON J G, TESTER J W. Thermal conductivity of crystalline rocks associated with energy extraction from hot dry rock geothermal systems[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B3): 1 117 - 1 124.
- [17] VOSTEEN H D, SCHELLSCHMIDT R. Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(9/11): 499 - 509.
- [18] RUTQVIST J, TSANG C F. Analysis of thermal-hydrologic-mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca Mountain[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 62/63: 637 - 652.
- [19] TANG C A. Numerical simulation on progressive failure leading to collapse and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 249 - 261.
- [20] TANG C A, LIU H Y, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part one: effect of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 555 - 569.
- [21] 傅冰骏. 国际岩石力学与工程新进展——参加第 8 届国际岩石力学大会报导[J]. 西部探矿工程, 1997, 9(2): 1 - 4.(FU Bingjun. New advances of international rock mechanics and engineering[R]. West-China Exploration Engineering, 1997, 9(2): 1 - 4.(in Chinese))
- [22] TANG C A, THAM L G, LEE P K, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage(FSD) in rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 477 - 489.