

岩石应力 - 水力 - 化学耦合过程研究进展

周 辉^{1,2}, 冯夏庭^{1,2}

(1. 中国科学院 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 首先介绍国际合作 DECOVALEX 计划的概况和研究进展, 阐述中国参加该合作计划研究的必要性和重要意义。对国内外在岩石应力 - 水力 - 化学耦合过程方面的主要研究进展进行简略概述, 并重点总结了 DECOVALEX 计划 Task_B 及中国科学院武汉岩土力学研究所的研究课题组所取得的主要研究进展, 包括: (1) 开展了岩石应力 - 化学耦合条件下的单轴、三轴压缩试验、细观力学试验和 CT 扫描试验的系统研究和分析; (2) 建立了岩石破裂过程的弹塑性和应力 - 渗流耦合细胞自动机模型, 并用于对岩石声发射活动的 Kaiser 效应、II 类曲线的形成机制以及孔隙水压力对岩石力学性质的影响规律和细观机制进行了模拟分析等。上述研究成果对于岩石应力 - 水力 - 化学耦合过程研究起到了积极的推进作用。

关键词: 岩石力学; 应力 - 水力 - 化学耦合过程; 细胞自动机; DECOVALEX

中图分类号: TU 45; TL 942+.21

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)04 - 0855 - 10

ADVANCES IN COUPLED MECHANICAL-HYDRO-CHEMICAL PROCESSES IN ROCKS

ZHOU Hui^{1, 2}, FENG Xiating^{1, 2}

(1. *Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

Abstract: This paper firstly introduces the advance and development of international consortium of DECOVALEX (development of coupled thermo-hydro-mechanical (THM) models and their validation against experiments) project. A general summarization on the study of progress in mechanical-hydro-chemical coupling process in rocks is presented, followed by a detailed introduction to the progress of DECOVALEX Task_B and Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences (CAS). Efforts of CAS are focused on uniaxial and triaxial compression tests, meso-mechanical tests and CT tests under the coupled stress-chemical condition. Based on the influences of chemical corrosion on mechanical and failure properties of rocks, the fracture criteria of multi-crack with chemical corrosion are proposed. Furthermore, a new numerical model named elastoplastic cellular automata for modeling rock failure process is set up by CAS, in which heterogeneity and flaws in rocks can be easily considered, and some typical behaviors of rocks such as Kaiser's effect and Class II curve are successfully modeled using elastoplastic cellular automata. Another cellular automata model for modeling coupled hydro-mechanical process for porous materials is also proposed, and the influence of water pressure on mechanical properties of rock and its meso-mechanism are analyzed using this model. The above-mentioned advance greatly

收稿日期: 2006 - 02 - 13; **修回日期:** 2006 - 03 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10472130, 50204009); 国家自然科学基金重大国际合作项目(40520130315); 中国科学院国际合作重点项目(GJHZ0516)

作者简介: 周 辉(1972 -), 男, 博士, 1994年毕业于山东矿业学院, 现为中国科学院武汉岩土力学研究所副研究员, 主要从事岩石细观力学计算方法、流 - 固耦合和孔隙介质力学理论等方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

promotes the research on mechanical-hydro-chemical coupling process in rocks.

Key words: rock mechanics; mechanical-hydro-chemical coupling process; cellular automata; DECOVALEX

1 引言

西方各工业国同步对于核废料问题的基本研究始于 20 世纪 70 年代，目前已具有中长期研究发展规划、不断发展和验证的数学模型、试验技术和计算手段以及大型地下实验室的支持。由于多种原因，中国对核废料处理问题的研究起步较晚，与各先进工业国相比存在 15~20 a 的差距。但根据目前的规划，中国的最终高放废物处置场要在 2050 年左右投入运行，几乎与西方各工业国同步。因此，尽快开展高放核废料地质处置的基础科学研究，特别是 TMHC(温度 - 应力(变形) - 水力 - 化学反应)过程的耦合过程的数学模型、试验技术和计算手段的研究与开发已成了当务之急。为了保证研究工作的质量和加快研究工作的进度，及时有效地吸取国际已有的成果、先进的知识、经验和教训是必要的。到目前为止，中国尚没有一个较为可靠的模拟地质介质中 TMH(温度 - 应力(变形) - 水力流动)耦合过程的计算机程序和适合中国具体地质条件的介质数学物理模型。为了尽快缩短与国际先进水平的差距，并在尽可能短的时间内开发出适用于中国地质条件和高放核废物形式的计算机软件，中国科学院武汉岩土力学研究所于 2003 年加入了国际 DECOVALEX 计划^[1, 2]第四阶段的合作研究。参加该计划将为今后的工作带来极大的推动：(1) 将中国自主开发的模型和软件及方法与国际先进水平相对比以发现差距；(2) 研究国际大型地下试验以汲取先进的地下试验技术；(3) 研究各参与国核废料处理计划以促进中国的高放核废物处置场的方案设计和环境安全评估软件系统的开发；(4) 锻炼和培养一支有深厚基础科学知识、软件开发能力、试验技术和国际合作经验的骨干研究队伍。

2 DECOVALEX 计划概况

DECOVALEX 计划最早由瑞典提出建议，并得到西方各主要核能大国的积极响应。自 1992 年以来，已经进行了三期计划^[1, 2]——DECOVALEX I,

II, III。其中，DECOVALEX I 从 1992~1995 年，针对 3 个假定的 BMT 和 6 个 TC 进行模拟试验(含针对岩石试样和节理的 3 个小型实验室试验和 3 个大型现场试验)。其中 1 个 BMT 是模拟瑞典 KBS - 3 核废料贮存概念库，概念库假定位于具有裂隙网络系统的花岗岩中，其性质与 Stripa 花岗岩性质类似。

DECOVALEX II 为 1995~1999 年，在该阶段决定减少 TC 数量，把研究重点放在 2 个主要的大尺度现场试验上，以对贮存库的安全性进行分析评价。主要研究工作由 4 个 Task 组成：(1) Task_A，针对位于英国 Sellafield 竖井内的 NIREX 地下实验室的围岩性质进行数值模拟研究；(2) Task_B，针对位于日本 Kamaishi 矿井内的地下加热实验室的围岩性质进行数值模拟研究；(3) Task_C，针对岩石节理本构关系的研究现状进行调研评估；(4) Task_D，针对影响核废料贮存库设计与安全性评价的 THM 耦合过程进行分析，并提出报告。

DECOVALEX III 从 1999~2003 年，研究工作也分成 4 个 Task。Task_A，由西班牙 ENRESA 研究小组进行的瑞士 Grimsel 矿井内 FEBEX 地下实验室加热试验；Task_B，位于美国 Yucca Mountain 的地下实验室进行的平洞缩尺试验(DST)；Task_C，3 个 BMT 试验，即再饱和模拟试验 BMT1、围岩均质性 BMT2 试验和冰川作用影响的 BMT3 试验。

DECOVALEX IV Task_D THMC 已经启动，计划为 2004~2007 年，共由 5 项 Task 组成，主要研究内容见表 1。

表 1 DECOVALEX IV 概况

Table 1 A survey of DECOVALEX IV

任务	负责人	研究内容	试验数据
A	S. Nguyen	近场 THM 耦合对质量评估的影响	From granite rock of the Canadian Shield site
B	J. Hudson	开挖扰动区 EDZ 的 MHC 耦合研究	From Sweden Äspö HRL
C	A. Rejeb	黏土岩 EDZ 模拟与演化	From France Tournemire argillaceous site
D	J. Birkholzer	EDZ 和近场 THM 耦合引起的永久渗透率与孔隙度变化研究	From Yucca Mountain site of US, and JNC Couple UL of Japan
E	M. Jensen	长期气候变化对地质处置场的影响	From Canadian Shield site

自 1992 年至今, 参加 DECOVALEX 国际合作计划 4 个阶段各国家和相应机构见表 2。DECOVALEX 计划因此是一个以政府机构为主导的政府/企业联合研究计划(西方各国及日本的核电企业多为政府控股)。政府机构不仅提供资助, 且与其他资助组织一起负责计划的研究方向、内容和进度管理。具体计划由计划秘书处(KTH, 瑞典皇家工学院)负责组织和执行。

表 2 DECOVALEX 参加国家和组织
Table 2 Countries and organizations involved in DECOVALEX

组织	国家	机构或组织	参加时间	作用
ANDRA	法国	企业研究/执行机构	1992~2003	计划领导及资助
BGR	德国	政府研究机构	1999~2007	计划领导及资助
CSNC	加拿大	政府监督机构	1992~2007	计划领导及资助
DOE	美国	政府执行机构	1995~2007	计划领导及资助
ENRESA	西班牙	企业研究/执行机构	1995~2007	计划领导及资助
IRSN	法国	政府研究机构	1992~2007	计划领导及资助
JNC(PNC)	日本	政府研究机构	1992~2007	计划领导及资助
NIREX	英国	企业研究机构	1992~2003	计划领导及资助
NRC	美国	政府监督机构	1992~2003	计划领导及资助
OPG	加拿大	核电企业	1995~2007	计划领导及资助
SKB	瑞典	企业研究/执行机构	1992~2007	计划领导及资助
SKI	瑞典	政府监督机构	1992~2007	计划领导及资助
STUK	芬兰	政府监督机构	1992~2007	计划领导及资助
EC	欧共体	政府机构	1999~2003	资助
KTH	瑞典	大学	1992~2007	计划组织实施

注: (1) 政府研究机构系隶属国家的研究机构, 如德国的 BGR 类似于中国科学院; (2) 政府监督机构系隶属国家的核安全监督机构, 如我国的国家环境保护总局; (3) 政府执行机构系隶属国家的负责与核废料有关的行政机构, 如美国能源部(DOE); (4) 企业研究/执行机构系隶属核电企业(或企业集团), 并负责核废料研究和最终处置的机构; (5) 企业研究机构隶属核电企业(或企业集团), 并负责核废料研究的机构。

DECOVALEX 计划的目的是集中系统地研究核废料处理问题中的基础科学问题, 主要是地质介质中的 TMHC 耦合作用及其对高放核废料最终处置场的结构/环境安全的影响。重点是 TMHC 耦合作用的数学模型、数值方法和室内及大型现场试验的研究发展与验证。方式为集中各国研究精英对所选定的共同课题开展各种方式(平行、交叉、面对面及背靠背)的研究与比较, 以便综合各国不同的研究方式和方法的优点来推进研究的发展。

自 1992 年启动以来, 经历了 3 个阶段的工作^[2], 基本上完成了地质介质中 TMH 耦合过程的数学模型、试验验证以及计算机程序发展的工作; 先后出版了 2 本专著、3 期国际学术杂志特刊和 1 次国际会议。所取得的成果不仅得到了国际学术界的一致认同, 而且已成为国际核废料处理问题中的主导力量之一。西方各国的同类研究计划一般不超过 7 a (2 期), 大多数为 1 期(3~4 a), 大多为初期或中期的阶段性成果。DECOVALEX 计划已延续到 4 期, 其参加成员之多、周期之长、项目连续性之好, 和成果之显著均为同类研究计划所罕见。其主要原因是计划的重点集中在基础研究和基本计算手段的开发上, 从而对各国急需的研究规划和环境安全分析及及时提供了可靠的科学基础。

该计划第 4 阶段的工作将扩展到化学反应过程的影响。由于计划的显著成效, 欧共体已明确提出要将 TMHC 研究作为下一届欧共体研究计划的主题之一。

3 DECOVALEX 计划 Task_B 开展的研究工作和研究思路

中国科学院武汉岩土力学研究所的课题组主要参加了 Task_B 和 D 的相关研究工作。本节主要介绍 Task_B 的相关情况。第二课题“Task_B——结晶岩开挖扰动区的 MHC 研究”主要强调的是破裂岩体的开挖扰动区(EDZ)、模拟裂纹演化的 MHC 模型、力学与流体作用、开挖扰动区之间的区别; 进一步理解开挖扰动区的形成机制、外力条件、渗流变化、与化学相关的耦合问题随开挖的演化。项目研究分为 5 个阶段: (1) 阶段 1, 文献评述与信息收集, 包括迄今为止关于岩石破裂的信息、化学对岩石性能的影响、开挖扰动区; (2) 阶段 2, 单轴压缩条件下完整岩石结构破坏的数值模型: 各向异性完整岩石、有饱和/化学效应的各向异性完整岩石、单个/多个裂纹的各向异性完整岩石、饱和/化学效应与多裂纹的各向异性完整岩石、取自于瑞典 Äspö 现场的岩芯的试验; (3) 阶段 3, 开挖扰动区的 BMT 模型: 数值模型的建立、开挖过程中、充填之前(岩石 - 空气界面)的模拟、充填之后(岩石 - 缓冲层界面)的模拟; (4) 阶段 4, 能处理模型不确定性的方法研究: 文献综述与过程的开发、阶段 3 的 BMT 模型的应用; (5) 阶段 5, 瑞典 Äspö 现场试验数据

的分析, Äspö 隧道稳定性试验的数据、ZEDEX 数据以及其他信息。

围绕上述各研究阶段主题,中国科学院武汉岩土力学研究所的研究课题组提出了一套完整的、基于试验的 MHC 耦合的唯象分析方法和研究思路,主要包括:

(1) 试验研究:其核心是通过试验分别建立化学腐蚀对岩石力学性质的影响关系、化学腐蚀对岩石渗透性质的影响关系、化学反应过程与生成物的定量关系及岩石孔隙度(和裂隙度)的增加对化学腐蚀作用的影响关系(与化学反应过程分析相结合)。

(2) 理论模型研究:将以上所建立的关系与已经较为成熟的应力-渗流耦合模型相结合,建立一种基于试验的 MHC 耦合的唯象理论模型。

(3) 数值模拟新方法研究:引入细胞自动机方法建立上述理论模型的数值解法,提出一种岩石 MHC 耦合的细胞自动机模型。

(4) 模拟分析与对比验证:利用岩石 MHC 耦合的细胞自动机模型对实验室和核废料实际处置工程条件下的岩体(石)在 MHC 耦合作用下的破坏演化和耦合机制进行模拟分析,并与试验和现场实测结果以及其他国家研究小组的研究结果进行对比;根据对比和验证结果,进一步改进相应的理论模型和模拟方法。

针对上述研究思路中的关键问题,课题组开展了两年多的研究工作,已经在应力-化学耦合过程的试验以及数值模拟新方法研究方面取得了一系列积极的进展。

4 岩石应力-水力-化学(MHC)耦合过程研究进展

到目前为止,国内外学者在 MHC 耦合过程方面已经开展了相当数量的研究工作,取得了一系列成果,但这些成果大部分集中在两种因素的局部耦合方面。本节将首先对相关的国内外研究进展进行简略概述,然后总结 DECOVALEX Task_B 及中国科学院武汉岩土力学研究所的研究课题组所取得的主要研究进展。

4.1 研究概况

如前所述,目前国内外在岩石 MHC 耦合方面

开展的研究主要针对其中两种因素的耦合,且主要集中于对于岩石应力-水力(MH)耦合的研究。

4.1.1 岩石应力-水力(MH)耦合研究

岩石应力-水力耦合的试验研究:由于对研究对象认识的角度不同,试验方法和试验对象各异,总体来说可分为多孔介质^[3~10]、预制裂隙系统^[11, 12]和完整变形破坏过程^[13~23]的试验。在试验基础上,建立了众多 MH 耦合机制模型^[24~32],用于描述岩石水力特性与应力(变形)之间的耦合关系。

岩石 MH 耦合数学模型研究:主要是从宏观上建立岩体(包含结构面)岩石 MH 耦合的数学力学模型。根据建立模型的出发点不同,可以分为三大类:等效连续介质模型^[24, 33~35]、裂隙网络模型^[36~39]和双重介质模型^[40, 41]。

岩石 MH 耦合的数值方法及应用分析:目前,国内外学者基于不同方法(有限元法、离散元法、拉格朗日元法、边界元法和 DDA 等)开发了大量的岩石 MH 耦合数值分析程序,并应用于大量工程中^[24, 35, 39, 42~48]。

4.1.2 岩石应力-化学耦合(MC)的试验研究

关于岩石 MC 耦合的研究主要集中在化学腐蚀对岩石力学性质的试验研究面。M. G. Karfakis 和 M. Askram^[49]研究了化学溶液对断裂韧性影响;L. J. Feucht 等^[50]在 NaCl, CaCl₂, NaSO₄ 溶液作用下对含预制裂纹的砂岩试件进行了三轴压缩试验,研究了不同溶液对裂纹面摩擦因数和摩擦强度的影响;A. Hutchinson 和 J. B. Johnson^[51]用 HCl, H₂SO₄ 等溶液模拟酸雨,对石灰石的腐蚀作用进行了研究;谭卓英等^[52]进行了酸化环境下岩石强度弱化效应的试验模拟研究;冯夏庭等^[53, 54]进行了不同水化学环境下岩石破裂特性的试验研究,分析了花岗岩在蠕变、应力增加和松弛过程中的时间分形特征;冯夏庭、陈四利等^[55~63]对不同化学溶液作用下砂岩、花岗岩、灰岩的力学特性进行了系统的试验研究及分析,建立了峰值前化学损伤本构模型和损伤演化变量;汤连生等^[64~68]对水-岩相互作用下的力学与环境效应进行了较为系统的研究。李宁等^[69, 70]通过研究钙质胶结长石砂岩在不同 pH 值作用下主要胶结物成分,提出了可应用于酸性溶液的岩石化学损伤强度模型。

另外,关于岩石节理表面的矿物沉积和溶解作用对其渗透性影响的研究方面目前也开展了一些探索性的试验工作^[71, 72]。

4.1.3 岩石力学与化学反应过程的耦合模型研究

关于这方面的研究目前尚处于极为初始的阶段, 在已经报道的研究工作中, 连续岩土介质的 THM 过程与水化学反应过程的耦合模型以及不包括应力/变形的热 - 水力和化学反应型物质传输过程的耦合模型及其计算机程序已在核废料地下处置问题中得到了探索性的初步应用分析^[73, 74]。

4.2 DECOVALEX 计划 Task_B 的研究进展

参加 DECOVALEX Task_B 的各国研究小组和组织包括 SKB(瑞典), SKI-KTH(瑞典), DOE(美国), JNC(日本), FRACOM(芬兰)和 CAS(中国)。目前已经完成了前两个阶段的研究工作。每个研究小组分别建立自己的数值模型, 进行模拟研究对比。各研究小组的主要进展情况如下:

(1) FRACOM: 应用断裂力学方法, 进行结晶岩体开挖扰动区 MHC 耦合模拟分析研究, 实现了对完整岩石及含裂纹岩石的单轴压缩破坏过程的模

拟, 并探讨了产生 II 类曲线的机制。

(2) JNC: 分别使用连续损伤力学和弹塑性力学方法模拟了完整岩石的单轴压缩破坏过程, 阐述了 II 类曲线产生的可能机制。

(3) SKI-KTH: 利用 PFC3D 研究了开挖扰动区岩石的力学特性, 对单裂隙岩石的直剪破坏进行了动态模拟。

(4) CAS: 中国科学院武汉岩土力学研究所的研究课题组开展了大量的应力 - 化学耦合的细、宏观力学试验和 CT 试验, 系统分析了化学腐蚀作用对岩石力学性质的影响并建立了相关的理论模型(见表 3); 建立了模拟岩石破裂过程的弹塑性及应力 - 渗流耦合的细胞自动机模型, 并用于对岩石破坏过程中的典型特征和 II 类曲线等特殊现象的形成机制进行了模拟分析, 模拟并揭示了水压对岩石破坏影响的细观机制(见表 4), 下一步将在此基础上实现对岩石 MHC 耦合过程的模拟。

表 3 岩石应力 - 化学(MC)耦合研究进展

Table 3 Advances in mechanical and chemical coupling process in rocks by CAS

序号	研究内容	主要研究成果和结论
1	细观力学设备研制与化学腐蚀下的岩石细观力学试验研究	(1) 研制了裂纹扩展全过程的显微和宏观图像的实时观察、采取、数字记录和分析装置
		(2) 完成了花岗岩、砂岩和灰岩在不同化学环境腐蚀下的单轴压缩细观破裂过程的实时观测试验, 获取了相应的裂纹破裂过程实时显微图片和荷载 - 位移曲线 ^[55-57]
		(3) 探讨了化学腐蚀对岩石变形破坏特征的影响规律和机制 ^[75] 。研究表明: 化学腐蚀损伤作用使裂纹尖端受到损伤, 导致裂纹起裂时间提前; 同时, 未受化学腐蚀试件的破坏一般为脆性破坏, 而受化学腐蚀的试件则由于化学溶液的软化作用, 导致了其裂纹扩展、扩张尺寸及速度均小于未腐蚀试件
2	化学腐蚀下灰岩常规三轴压缩试验 ^[75, 76]	(4) 探讨了水化学作用对裂纹搭接模式的影响规律 ^[75] : 对多裂纹试件, 无论是未受腐蚀还是受腐蚀的试件, 搭接模式均为拉伸破坏, 裂纹搭接与否主要与裂纹相互间的距离有关, 水化学作用对搭接模式的影响不大
		(1) 获得了灰岩全应力 - 应变过程曲线及不同化学环境对灰岩全应力 - 应变曲线各阶段的腐蚀影响特征
		(2) 通过对化学腐蚀前后的岩石进行了矿物成分鉴定和化学成分分析, 获得了不同化学环境下岩石显微结构图片、矿物成分含量的变化以及溶液中主要离子含量变化情况
3	化学腐蚀下砂岩三轴压缩 CT 实时扫描试验	(3) 定量分析了不同 pH 值、不同浓度以及不同化学溶液对不同岩石的力学特性(强度、弹性波速等)的影响, 获得了不同化学环境对岩石变形及强度腐蚀效应的影响规律
		(1) 得到了砂岩从微裂隙被压密到微裂纹发生、扩展到完全破裂各个阶段的 CT 图像、CT 数和 CT 数方差数及应力 - 应变曲线 ^[58, 63]
4	水化学作用下多裂纹岩石的断裂准则研究 ^[75]	(2) 提出了基于 CT 数的损伤变量和损伤演化本构模型 ^[60]
		(1) 考虑化学溶液对岩石腐蚀的两方面主要影响因素(裂纹长度的增加和断裂应力的减小), 提出了水化学作用下 I 型裂纹的应力强度因子、断裂韧性以及 II, III 型裂纹应力强度因子公式
5	岩石化学加固技术和加固机制研究 ^[75]	(2) 提出了水化学作用下单一型裂纹的断裂准则和复合型裂纹的断裂准则
		(1) 提出了一种新型化学加固材料 CRS, 用于对龙游石窟围岩(红砂岩)进行抗风化加固
		(2) 通过对加固岩石进行弹性波测试、三轴压缩试验及微观结构分析, 验证了化学加固的效果和有效性

表 4 岩石应力 - 水力(MH)耦合的细胞自动机模型研究进展

Table 4 Advances in cellular automata for simulating the hydro-mechanical coupling process in rocks by CAS

序号	模型类型	主要研究成果和结论
1	弹塑性细胞自动机模型	<p>(1) 建立了模拟岩石破裂过程的弹塑性细胞自动机模型, 该模型可以方便地从微观尺度来考虑材料的非均质性和内部赋存的缺陷</p> <p>(2) 利用弹塑性细胞自动机模型对不同均质度的岩石单轴压缩破裂过程进行了模拟。研究表明: 岩石的均质度越低, 发生宏观破坏前破坏的微单元数量越多, 宏观强度越低, 越易表现出塑性破坏特征</p> <p>(3) 利用弹塑性细胞自动机模型对循环加卸载条件下岩石的破坏过程进行了模拟, 得到了与典型试验结果相吻合的声发射活动的 Kaiser 效应; 在加卸载初期, 加卸载路径均保持较好的一致性, 而在加卸载后期, 屈服的单元数量增加, 卸载后继续加载时无法达到卸载时的峰值荷载点, 表观弹性模量越来越小; 同时, “滞回环”越来越大, 加载和卸载路径差别越来越大</p> <p>(4) 利用弹塑性细胞自动机模型, 采用应力 - 应变线性组合的控制方法模拟得到了岩石的 I 类和 II 类曲线, 并对 II 类曲线的形成机制进行了分析, 发现: 岩石的均质度越高, 采用这种加载控制方式越易得岩石的 II 类曲线</p>
2	应力 - 渗流 (MH) 耦合的细胞自动机模型	<p>(1) 根据弹塑性细胞自动机模型的基本原理, 建立了岩石应力 - 渗流耦合的细胞自动机模型。模型中考虑了岩石(土)介质应力场参数(包括弹性模量、泊松比、强度等)和渗流场参数(包括孔隙度、渗透率、饱和度等)的随机描述方法, 可以从细观力学角度模拟分析多孔岩土介质在应力 - 水力耦合作用下的变形破坏机制</p> <p>(2) 利用应力 - 水力耦合的细胞自动机模型对固结耦合条件下的岩石破坏过程进行了模拟, 对孔隙水压力影响岩石力学性质的细观机制进行了分析(如图 1 所示), 发现: 无孔隙水压力作用时, 微裂纹的产生较大程度上取决于剪切作用; 而孔隙水压力对裂纹尖端的颗粒施加液压, 使颗粒受到拉伸应力, 岩石在细观上更易提前产生劈裂破坏, 从而在宏观上削弱了岩石的强度(如图 2 所示)</p> <p>(3) 从图 3 中的应力 - 应变 - 渗透系数全程曲线可以看出: 在初始加载阶段, 试样中尚未有单元破坏, 在压缩作用下, 岩石的孔隙度和渗透系数下降; 当加载至非线性段时, 渗透系数开始缓慢上升, 达到应力峰值时, 试样中有大量单元破坏, 渗透系数急剧上升。模拟得到的岩石渗透性的上述演化规律与典型的试验结果相吻合^[15-18]</p>

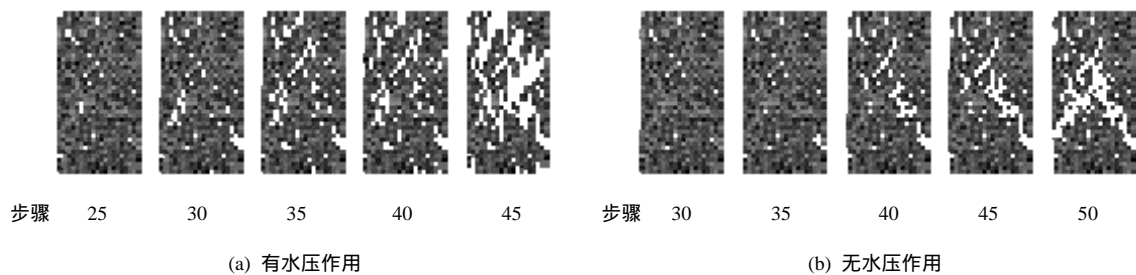


图 1 有、无水压作用下岩石试样的单轴压缩破坏过程

Fig.1 Failure processes of rock samples under the uniaxial compression with and without water pressure

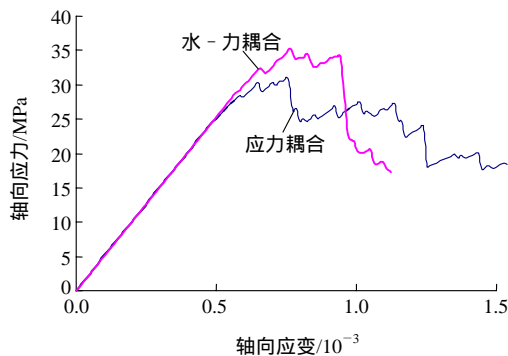


图 2 有无水压情况下的应力 - 应变全程曲线

Fig.2 Complete stress-strain curves with and without water pressure

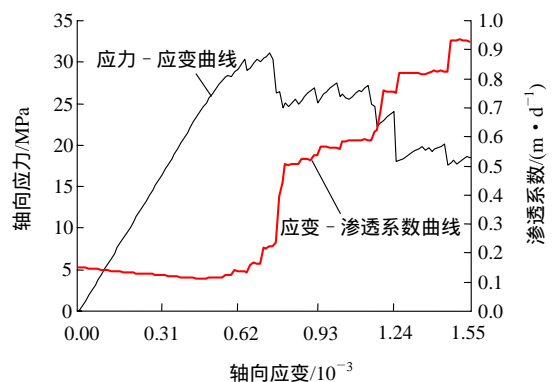


图 3 应力 - 应变 - 渗透系数全程曲线

Fig.3 Complete stress-strain-permeability curves

5 结语与展望

(1) 本文介绍了国际合作 DECOVALEX 计划的概况和研究进展。参加国际合作 DECOVALEX 计划有力地促进了中国在岩石 MHC 耦合过程及核废料地下处置的研究进展, 锻炼和培养了一支具有较高研究水平和较大国际影响的骨干研究队伍。

(2) 对国内外在岩石 MHC 耦合过程方面的主要研究进展进行了简略概述, 并重点总结了 DECOVALEX 计划 Task_B 及中国科学院武汉岩土力学研究所的研究课题组所取得的主要研究进展, 主要包括: 开展了岩石应力 - 化学耦合条件下的单轴、三轴压缩试验、细观力学试验和 CT 扫描试验的系统研究和分析; 建立了岩石破裂过程的弹塑性和应力 - 渗流耦合的细胞自动机模型, 并用于对岩石声发射活动的 Kaiser 效应、II 类曲线的形成机制以及孔隙水压力对岩石力学性质的影响规律和细观机制进行了模拟分析等, 得到了一些有意义的结论。

(3) 应当看到, 由于岩石 MHC 耦合过程极为复杂, 目前的研究还主要限于实验室试验和初步的理论探索。若要对岩石 MHC 耦合过程进行可靠和有效的分析, 尚需要在以下几个方面取得突破:

① 水化学作用对完整岩石和节理/裂隙力学和渗透性质的影响机制、不同尺度的试验及定量关系;

② 可靠、有效的数学力学模型(考虑耦合机制的细 - 宏观模型和基于试验的唯象模型)及相应的大型数值分析手段;

③ 构造面的定量表征方法和等效重构数学模型;

④ 岩体 MHC 耦合过程的时间效应数学模型与长期形态的试验验证;

⑤ 耦合模型中参数不确定性的表征方法及其在数值模拟过程中的演化和对所研究问题最终结论的影响。

参考文献(References):

[1] Jing L, Tsang C F, Stephansson O. V DECOVALEX—an international cooperative 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.

[2] Tsang C F, Stephansson O, Kautsky F, et al. An overview of the DECOVALEX Project on coupled THM processes in fractured

rock-bentonite systems[A]. In: Stephansson O, Jing L, Hudson J A ed. Proceedings of the International Conference GeoProc[C]. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2003. 3 - 13.

[3] Brace W F, Walsh J B, Frangos W T. Permeability of granite under high pressure[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 73(6): 2 225 - 2 236.

[4] Patsouls G, Gripps J C. An investigation of permeability on Yorkshire chalk under different pore water and confining pressure conditions[J]. Energy Sources, 1982, 6(4): 321 - 334.

[5] Gangi A F. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(5): 249 - 257.

[6] Ghaboussi J, Dikmen S. Effective stress analysis of seismic response and liquefaction: case studies[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(5): 645 - 658.

[7] Kranz R L. The permeability of whole and jointed bare granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1979, 16(4): 225 - 234.

[8] Jones F O. A laboratory study on the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1975, 12(4): 55.

[9] Keighin C W, Sampath K. Evaluation of pore geometry of some low-permeability sandstone—Uinta Basin[J]. Journal of Petroleum Technology, 1982, 34: 65 - 70.

[10] Zoback M D, Byerlee J D. The effect of microcrack dilatancy on the permeability of Westerly Granite[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80: 752 - 755.

[11] Tsang Y W, Tsang C F. Channel model of flow through fractured media[J]. Water Resources Research, 1987, 23(3): 467 - 479.

[12] 耿克勤. 岩体裂隙渗流水力特性的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(1): 102 - 106.(Gen Keqin. Experimental research on hydraulic properties of seepage flow in fracture[J]. Journal of Tsinghua University(Sciences and Technology), 1996, 36(1): 102 - 106.(in Chinese))

[13] Zhang S, Cox S F, Paterson M S. The influence of room temperature deformation on porosity and permeability in calcite aggregates[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 15 761 - 15 775.

[14] Peach C J, Spiers C J. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock[J]. Tectonophysics, 1996, 256: 101 - 128.

[15] Stormont J C, Daemen J J K. Laboratory study on gas permeability changes in rock salt during deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,

- 1992, 29(4): 325 - 342.
- [16] Li S P, Wu D X. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of Yinzhuang sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1997, 34(3/4): 432.
- [17] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力 - 应变过程对应的渗透率 - 应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 231 - 235.(Li Shiping, Li Yushou, Wu Zhenye. The permeability-strain equations relating to complete stress-strain path of the rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 231 - 235.(in Chinese))
- [18] 韩宝平, 冯启言, 于礼山, 等. 全应力 - 应变过程中碳酸盐岩渗透性研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 127 - 128.(Han Baoping, Feng Qiyan, Yu Lishan, et al. Study on the permeability of carbonate during full period of stress-strain[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(2): 127 - 128.(in Chinese))
- [19] 李树刚, 徐精彩. 软煤样渗透特性的电液伺服试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 68 - 70.(Li Shugang, Xu Jingcai. Experimental study on permeability of soft coal sample with electro-hydraulic servo-controlled testing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 68 - 70.(in Chinese))
- [20] 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力 - 应变过程渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 153 - 156.(Jiang Zhenquan, Ji Liangjun. The laboratory study on behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 153 - 156.(in Chinese))
- [21] Zhu W, Wong T F. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: permeability evolution[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B2): 3 027 - 3 041.
- [22] Somerton W H, Soylemezoglu I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1975, 12(5/6): 129 - 145.
- [23] Wang K J, Daniel C J. Permeability study on cracked concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381 - 393.
- [24] 王 媛, 徐志英, 速宝玉. 复杂裂隙岩体渗流与应力弹性全耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 177 - 181.(Wang Yuan, Xu Zhiying, Su Baoyu. Complete coupled analysis of fluid flow and elastoplastic stress in complicated fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 177 - 181.(in Chinese))
- [25] 仵彦卿. 裂隙岩体应力与渗流关系研究[J]. 水文地质工程地质, 1995, 22(2): 30 - 35.(Wu Yanqing. Study on the relationship between stress and permeability in fractured rock[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1995, 22(2): 30 - 35.(in Chinese))
- [26] 陈祖安, 伍向阳, 孙德明, 等. 岩渗透率随静压力变化的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 155 - 159.(Chen Zu'an, Wu Xiangyang, Sun Deming, et al. Study on relationship between permeability of sandstone and hydrostatic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 155 - 159.(in Chinese))
- [27] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. 水文地质工程地质, 1987, 14(2): 22 - 28.(Liu Jishan. Permeability equations for a single crack subjected to normal stresses[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987, 14(2): 22 - 28.(in Chinese))
- [28] Barton N, Bandis S, Bakhtar K. Strength, deformation conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121 - 140.
- [29] 周创兵, 熊文林. 岩体节理的渗流广义立方定律[J]. 岩土力学, 1996, 17(4): 1 - 7.(Zhou Chuangbing, Xiong Wenlin. A general cubic law for percolation in rock joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(4): 1 - 7.(in Chinese))
- [30] Walsh J B, Grosenbaugh M A. A new model for analyzing the effect of fractures on compressibility[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B7): 3 532 - 3 536.
- [31] Walsh J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5): 429 - 435.
- [32] Tsang Y W, Witherspoon P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B10): 9 287 - 9 298.
- [33] Oda M. An equivalent model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1 845 - 1 856.
- [34] 陶振宇, 沈小莹. 库区应力场的耦合分析[J]. 武汉水利电力学院学报, 1988, 21(1): 8 - 13.(Tao Zhenyu, Shen Xiaoying. Coupling analysis of stress field of reservoir[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1988, 21(1): 8 - 13.(in Chinese))
- [35] 陈 平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 299 - 308.(Chen Ping, Zhang Youtian. Coupling analysis of seepage-stress for jointed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(4): 299 - 308.(in Chinese))
- [36] 陈胜宏, 王鸿儒, 熊文林. 节理面渗流性质的探讨[J]. 武汉水利电力学院学报, 1989, 22(1): 53 - 60.(Chen Shenghong, Wang Hongru, Xiong Wenlin. Study on the seepage characteristics of joint surface[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1989, 22(1): 53 - 60.(in Chinese))
- [37] 王恩志, 杨成田. 裂隙网络地下水流数值模型及非连通裂隙网络水流的研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(1): 12 - 14.(Wang Enzhi, Yang Chengtian. Numerical model of groundwater flow in fracture networks and water in disconnected fracture networks[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992, 19(1): 12 - 14.(in Chinese))
- [38] 王洪涛. 裂隙网络渗流与离散元耦合分析充水岩质高边坡的稳定

- 性[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(2): 30 - 33.(Wang Hongtao. Stability analysis of saturated rock mass slope by using discrete element method coupled with fluid flow model[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000, 27(2): 30 - 33.(in Chinese))
- [39] 周创兵, 熊文林. 双场耦合条件下裂隙岩体的渗透张量[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(12): 338 - 344.(Zhou Chuangbing, Xiong Wenlin. Permeability tensor for jointed rock masses in coupled seepage and stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(12): 338 - 344.(in Chinese))
- [40] Warren T E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineering Journal, 1963, (3): 234 - 255.
- [41] Noorishad J, Ayatollah M S, Witherspoon P A. A finite-element method for coupled stress and fluid flow analysis in fractured rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1982, 19(4): 185 - 193.
- [42] Rutquist J, Borgesson L, Chijimatsu M, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine—comparison of field results to predictions of four finite element codes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(1): 129 - 142.
- [43] Thallak S, Rothenbury L, Dusseault M. Simulation of multiple hydraulic fractures in discrete element system[A]. In: Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Proceedings of the 32nd U.S. Symposium[C]. Balkema: A. A. Rotterdam, 1991. 271 - 280.
- [44] 赵阳升. 煤体 - 瓦斯耦合数学模型及数值算法[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 229 - 239.(Zhao Yangsheng. Coupled mathematic model on coal mass-methane and its numerical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(3): 229 - 239.(in Chinese))
- [45] 王恩志, 王洪涛, 孙 役. 双重裂隙系统渗流模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 400 - 406.(Wang Enzhi, Wang Hongtao, Sun Yi. Study on seepage flow model in double fracture systems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 400 - 406.(in Chinese))
- [46] 梁 冰, 章梦涛. 考虑时间效应煤和瓦斯突出的失稳破坏机制研究[J]. 阜新矿业学报(自然科学版), 1997, 16(2): 129 - 133.(Liang Bing, Zhang Mengtao. study on instable mechanism of coal and gas burst caused by time effects[J]. Journal of Fuxin Mining Institute(Nature Science), 1997, 16(2): 129 - 133.(in Chinese))
- [47] 杨太华, 曾德顺. 三峡船闸高边坡裂隙岩体的渗流损伤特征[J]. 中国地质灾害预防防治学报, 1997, 8(2): 13 - 18.(Yang Taihua, Zeng Deshun. Seepage damage characteristics of high slope fracture rock mass of shiplock project in Three Gorges[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(2): 13 - 18.(in Chinese))
- [48] 杨天鸿, 唐春安, 朱万成, 等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 489 - 493.(Yang Tianhong, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. Coupling analysis of seepage and stresses in rock failure process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 489 - 493.(in Chinese))
- [49] Karfakis M G, Askram M. Effects of chemical solutions on rock fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 1 253 - 1 259.
- [50] Feucht L J, Logan J M. Effects of chemically active solutions on shearing behavior of a sandstone[J]. Tectonophysics, 1990, 175: 159 - 176.
- [51] Hutchinson A, Johnson J B. Stone degradation due to wet deposition of pollutants[J]. Corrosion Sciences, 1993, 34: 1 881 - 1 898.
- [52] 谭卓英, 刘文静, 闭历平, 等. 岩石强度损伤及其环境效应试验模拟研究[J]. 中国矿业, 2001, 10(4): 49 - 53.(Tan Zhuoying, Liu Wenjing, Bi Liping, et al. Experimental simulation of rock strength damage and its environmental effect[J]. China Mining Magazine, 2001, 10(4): 49 - 53.(in Chinese))
- [53] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第一部分: 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 403 - 407.(Feng Xiating, Masahiro S. Rock fracturing behaviors under chemical corrosion—part I: experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 403 - 407.(in Chinese))
- [54] 王泳嘉, 冯夏庭. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第二部分: 时间分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 551 - 556.(Wang Yongjia, Feng Xiating. Micro-fracturing properties of rock affected by chemical environments—part II: temporal fractal analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 551 - 556.(in Chinese))
- [55] Feng X T, Li S J, Chen S L. Effect of water chemical corrosion on strength and cracking characteristics of rocks—a review[J]. Key Engineering Materials, 2004, 261 - 263: 1 355 - 1 360.
- [56] 冯夏庭, 王川婴, 陈四利. 受环境侵蚀的岩石细观破裂过程试验与实时观测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 935 - 939.(Feng Xiating, Wang Chuanying, Chen Sili. Testing study and real-time observation of rock mesocracking process under chemical erosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 935 - 939.(in Chinese))
- [57] Feng X T, Chen S L, Li S J. Effects of water chemistry on microcracking and compressive strength of granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(4): 557 - 568.
- [58] Feng X T, Chen S L, Zhou H. Real-time computerized tomography (CT) experiments on sandstone damage evolution during triaxial compression with chemical corrosion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 181 - 192.
- [59] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 化学腐蚀下三峡花岗岩的破裂特征[J]. 岩土工程学报, 2003, 24(5): 817 - 821.(Chen Sili, Feng Xiating, Li Shaojun. The fracturing behaviors of Three Gorges granite under

- chemical erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(5): 817 - 821.(in Chinese))
- [60] 陈四利, 冯夏庭, 周 辉. 化学腐蚀下砂岩三轴细观损伤机制及损伤变量分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(9): 1 363 - 1 367.(Chen Sili, Feng Xiating, Zhou Hui. Study on triaxial meso-failure mechanism and damage variables of sandstone under chemical erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(9): 1 363 - 1 367.(in Chinese))
- [61] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 547 - 551.(Chen Sili, Feng Xiating, Li Shaojun. Effects of chemical erosion on uniaxial compressive strength and mesofracturing behaviors of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 547 - 551.(in Chinese))
- [62] 陈四利, 冯夏庭, 李邵军. 化学腐蚀对黄河小浪底砂岩力学特性的影响[J]. *岩土力学*, 2002, 23(3): 284 - 287.(Chen Sili, Feng Xiating, Li Shaojun. The effects of chemical erosion on mechanical behaviors of Xiaolangdi sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(3): 284 - 287.(in Chinese))
- [63] 陈四利, 冯夏庭, 周 辉. 化学腐蚀下砂岩三轴压缩力学效应的试验[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(3): 292 - 295.(Chen Sili, Feng Xiating, Zhou Hui. Experiments on the mechanical effects of sandstone with chemical erosion under the triaxial compression[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Sciences)*, 2003, 24(3): 292 - 295.(in Chinese))
- [64] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水 - 岩化学作用之岩石断裂力学效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(6): 822 - 827.(Tang Liansheng, Zhang Pengcheng, Wang Sijing. Testing study on effects of chemical action of aqueous solution on cracks propagation in rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 822 - 827.(in Chinese))
- [65] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水 - 岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 526 - 531.(Tang Liansheng, Zhang Pengcheng, Wang Sijing. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water on rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 526 - 531.(in Chinese))
- [66] 汤连生, 王思敬. 岩石水化学损伤的机制及量化方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(3): 314 - 319.(Tang Liansheng, Wang Sijing. Analyses of mechanism and quantitative methods of chemical damage in water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 314 - 319.(in Chinese))
- [67] 汤连生, 张鹏程, 汪 洋. 水作用下岩体断裂强度探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(19): 3 337 - 3 341.(Tang Liansheng, Zhang Pengcheng, Wang Yang. On fracture strength of rocks with cracks under water action[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(19): 3 337 - 3 341.(in Chinese))
- [68] 汤连生, 周翠英. 渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机制[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1996, 35(6): 95 - 100.(Tang Liansheng, Zhou Cuiying. Analysis of mechanism of permeation and hydrochemical action resulting in failure of loaded rock mass[J]. *ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1996, 35(6): 95 - 100.(in Chinese))
- [69] Li N, Zhu Y, Su B, et al. A chemical damage model of sandstone in acid solution[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(2): 243 - 249.
- [70] 李 宁. 酸性环境中钙质胶结砂岩的化学损伤模型[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(4): 395 - 399.(Li Ning. A chemical damage model of sandstone in acid environment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(4): 395 - 399.(in Chinese))
- [71] Sausse J, Jacquot E, Fritz B, et al. Evolution of crack permeability during fluid-rock interaction: example of the Brézouard granite (Vosges, France)[J]. *Tectonophysics*, 2001, 336: 199 - 214.
- [72] Su K, Hoteit N, Ozanam O. Effects of desiccation and rehumidification on the thermo-hydro-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian argillaceous rock[A]. In: Stepansson O, Jing L, Hudson J A. ed. *Proceedings of the International Conference GeoProc[C]*. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2003. 415 - 420.
- [73] Chan T, Guvanasen V, Stanchell F. Verification and validation of a three-dimensional finite element code for coupled thermo-hydro-mechanical and salinity(chemical) modeling in fractured rock mass[A]. In: Stepansson O, Jing L, Hudson J A ed. *Proceedings of the International Conference GeoProc[C]*. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2003. 447 - 452.
- [74] Preuss K. TOUGH2—a general-purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow(Report LBL - 29400)[R]. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley Laboratory, 1991.
- [75] 丁梧秀. 水化学作用下岩石变形破裂全过程试验与理论分析[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.(Ding Wuxiu. Experimental and theoretical analysis on rock failure complete process under chemical environment[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.(in Chinese))
- [76] 丁梧秀, 冯夏庭. 化学腐蚀下灰岩力学效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3 571 - 3 576.(Ding Wuxiu, Feng Xiating. Testing study on mechanical effect for limestone under chemical erosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3 571 - 3 576.(in Chinese))