

# 流固化学耦合作用下裂隙岩体渗透特性研究进展

盛金昌<sup>1</sup>, 许孝臣<sup>1,2</sup>, 姚德生<sup>1,3</sup>, 詹美礼<sup>1</sup>, 速宝玉<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310000;  
3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘 要:** 从物理试验和数学模型研究两方面介绍和总结了近 10 多年来渗流 - 应力 - 化学溶蚀耦合作用下裂隙岩体渗透特性的研究现状。目前无论是物理试验还是数学模型研究, 都还是主要利用宏观均匀化的方法来研究裂隙岩体渗透特性变化规律、及其与各影响因素(如应力、温度、渗透流体酸碱度、溶质浓度等)之间的宏观关系, 但这种宏观均匀化方法还存在很多不足: 如难以表述由于溶蚀作用岩石孔隙结构的细观变化, 也难以表述渗流通道的形成和发展过程等。因此认为进一步深入开展以下 3 方面的研究将更有利于揭示复杂地质环境下裂隙岩体渗透特性机理: 控制和量测技术一流的耦合渗流试验设备的开发以及现代无损探测技术引入(实现细观的实时的观察图像和数据)、数字岩芯技术的开发、建立微观 - 细观 - 宏观不同尺度的多物理化学场耦合的数学模型与分析方法。

**关键词:** 岩石水力学; 流固化学耦合; 裂隙岩体; 渗透特性

**中图分类号:** TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2011)07 - 0996 - 11

**作者简介:** 盛金昌(1969 - ), 男, 安徽人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程渗流及其流固热化学多场耦合研究。E-mail: sh901@sina.com。

## Advances in permeability evolution in fractured rocks during hydro-mechanical-chemical processes

SHENG Jin-chang<sup>1</sup>, XU Xiao-chen<sup>1,2</sup>, YAO De-sheng<sup>1,3</sup>, ZHAN Mei-li<sup>1</sup>, SU Bao-yu<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guangchuan Engineering Consulting Corporation, Hangzhou 310000, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The advances in permeability evolution in fractured rocks during hydro-mechanical-chemical processes over the past decade are introduced from both experimental and numerical studies. Generally macro-homogenization methods are employed to study the permeability evolution in fractured rocks and the macro-relations between permeability and physical variables (such as stress, temperature, pH value of solution, concentration of solutes, etc.). But there exist some deficiencies for the macro-homogenization methods: meso-changes of pore structures are difficult to be characterized due to mineral dissolution and precipitation, and formation and development of flow conduits also cannot be described numerically. So three following suggestions may be beneficial to the further studies on mechanics of permeability evolution in fractured rocks under complicate geological environment: (1) design of experimental apparatus of coupled fluid flow-mechanical-chemical reaction system in rocks and utilization of no-damaging detection techniques (to obtain meso- and real-time pictures and data); (2) development of digital core techniques; (3) development of mathematical models for multi-physical and chemical processes in micro-meso-macro scales and analytic methods.

**Key words:** rock hydraulics; coupled hydro-mechanical-chemical process; fractured rock; permeability evolution

## 0 引 言

随着国民经济的蓬勃发展, 地下空间开发不断向深部发展。深部岩石处在高地应力、高地温、高渗透水压力以及复杂的水化学环境之中, 将发生极其复杂的温度 - 渗流 - 应力 - 化学反应 (THMC) 耦合作用。

在渗流 - 应力 - 化学反应耦合(以下简称流固化学耦合)作用下, 岩石内部矿物颗粒间联结被削弱, 岩石

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779012); 教育部留学回国人员科研启动基金项目  
收稿日期: 2010 - 01 - 06

溶蚀物质被水溶液带走或被吸附沉淀,裂隙结构面、岩石孔隙结构将发生显著的变异,从而导致裂隙岩体力学特性、渗透特性发生重大改变,最终对岩体工程安全、生态环境产生重要影响<sup>[1]</sup>。

例如:核废料地质安全处理就是一个典型的流固热化学耦合问题,西方国家对这一问题的研究始于20世纪70年代,中国则起步较晚,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。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计划第四阶段的合作研究<sup>[2]</sup>。又如:采矿行业的尾矿由于粒度细小,容易与雨水、生物发生反应而产生含重金属离子的酸性溶液,这种液体通过裂隙岩体的运动也是渗流-化学溶蚀-溶质迁移的耦合作用过程,对周围的地下水生态环境系统产生影响<sup>[3]</sup>。

流固热化学(THMC)耦合作用过程非常复杂,涉及到包括裂隙岩体的力学特性及力学响应、渗透特性及渗流规律、矿物化学反应等诸多方面,其中流固化学(HMC)耦合作用对裂隙岩体(特别是单裂隙)渗透特性的影响极为复杂和敏感。Lin等<sup>[4]</sup>进行了在温度为100°C条件下火山凝灰岩单裂隙的渗透试验(试验过程中试验条件保持不变),试验历时一个多月,其渗透性减小到原来的1/1000。

## 1 流固化学耦合作用下裂隙岩体渗透特性的物理试验研究

裂隙岩体渗透特性的变化强烈地依赖于裂隙的物理力学行为(如裂隙的形成、扩张、闭合等)以及它们与化学行为的相互作用(如与应力有关的溶解沉淀等)。这些行为控制着岩体内部孔隙结构演化、渗透水流路径演化过程等。

### 1.1 流固耦合作用试验研究

目前国内外在裂隙岩体渗流-应力耦合渗透特性方面的研究上已取得丰富的研究成果,提出了很多经验半经验公式、概化模型和理论模型等,这里仅作简要讨论。

建立单裂隙渗流与应力关系是裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析的理论基础和关键环节。

(1)人们首先探讨法向应力对裂隙渗透特性的影响<sup>[5]</sup>:①通过试验总结出不同岩石的渗透系数与应力的经验公式,如刘继山等通过试验建立了单裂隙受正应力作用时的渗流公式;②讨论裂隙渗透特性改变量

与裂隙的机械开度或水力开度改变量之间的关系;③利用概念模型来解释渗透特性与法向应力的关系,如钉床模型,洞穴模型,洞穴-凸起体相结合的模式等。

(2)剪应力对裂隙渗流特性影响:Barton认为粗糙裂隙在剪应力作用下将发生剪胀,渗透性增强,并导出了耦合模型;Matsuki通过试验认为低法向应力作用下水力隙宽与力学隙宽比值不受剪切位移影响;Yeo提出裂隙渗透性随剪切位移的增加而提高;Hicks推导了隙宽和剪切位移的关系;Esaki等对花岗岩人工裂隙试样进行了渗流与剪应力耦合试验研究,结果表明,在剪切位移作用下,裂隙渗透系数的变化与剪胀特性是一致的,笔者解释为剪切产生的齿状物质阻碍了渗流路径而导致裂隙连通率降低。耿克勤<sup>[6]</sup>做了剪应力对裂隙渗流特性影响方面的耦合试验。刘才华等<sup>[7]</sup>通过对规则、均匀、粗糙裂隙的渗流剪切试验,研究了岩体裂隙在剪切荷载作用下的渗流特性。

在岩体的渗透性方面,Louis根据钻孔压力试验结果建立了岩体渗透系数与正应力的经验关系式,渗透系数随压应力的增大而变小,两者之间呈负指数关系。件彦卿<sup>[8]</sup>提出岩石渗透系数与应力耦合的分形几何关系;李四平<sup>[9]</sup>研究了岩石应力应变全过程渗透率与应力的关系。周创兵<sup>[10]</sup>根据流体扩散能迭加原理,推导了考虑渗流应力耦合效应的裂隙岩体的渗透张量。王恩志等<sup>[11]</sup>进行了低渗透岩石在围压作用下的耦合渗流试验。张玉卓等<sup>[12]</sup>对裂隙渗流与应力耦合进行了双向等压和双向不等压试验研究,得出渗流量与应力成四次方关系或非整数幂数关系。郑少河等<sup>[13]</sup>通过天然裂隙渗流试验,提出了裂隙闭合量与岩体三维应力、岩体渗透系数与裂隙闭合量的关系式。杨天鸿等<sup>[14]</sup>进行了岩石破裂过程渗流与应力耦合分析。

岩石流固耦合过程中渗透特性研究起步较早,研究成果较为丰富,开展了大量的试验研究和理论模型分析,对岩石流固耦合作用机理研究较为透彻。当然由于岩石自身性质差异极大(如硬岩与软岩、极低渗透岩石与破碎岩石等),难以有一个统一的理论模型或公式来表达所有岩石流固耦合作用关系,因此,针对不同的岩石,仍需要开展针对性的复杂应力条件下岩石渗透特性研究,特别是在工程应用上,更需要具体问题具体分析。

### 1.2 流固化学耦合试验研究

裂隙岩体的渗流-应力-化学耦合作用研究是在近10多年引起人们重视的。一个原因可能是人们认为自然界的水对裂隙岩体的化学溶蚀过程非常缓慢,从工程的角度(时间、对安全的影响等)来看,其对岩石的渗透特点、力学特点影响很小,似乎可以忽略不计。另一方面,在石油开采行业的井壁稳定问题研究,

人们分别独立地从泥页岩和钻进浆液力学性质和化学性质两方面分别进行,直到90年代,人们才开始从渗流-力学-化学-温度多场耦合的角度来综合研究这一问题。

在裂隙岩体 THMC 多场耦合研究方面,1992 年开始的国际重大合作项目 DECOVALEX 代表了当前这一领域的最高研究水平,其目的就是为了解决核废料的安全贮存问题,该研究进行了大量的小尺度室内耦合试验、大尺度室内耦合试验和现场耦合试验,建立了大规模的地下现场试验室,开发并验证了 THM 耦合模型,取得了一系列重要成果<sup>[15-16]</sup>。主要成果集中在流固热三场耦合作用机理及其过程中岩石介质的力学特性、力学响应分析上,近年来启动的 DECOVALEX-THMC (2004 年—2007 年)计划,其目的就是在 THM 耦合模型中增加化学过程<sup>[17]</sup>。但目前人们对渗流-应力-化学溶蚀耦合作用对岩石介质的渗透特性影响的研究还很少。

已有的研究表明<sup>[18-19]</sup>:对于裂隙岩体这一非均质多孔介质,流固热化学耦合作用对裂隙岩体(特别是单裂隙)渗透特性的影响极为复杂和敏感。有的作用机制使岩石的孔隙或缺陷的连通性增加(如剪胀、微破裂作用、热裂作用、局部集中溶解等),有的则破坏或抵消孔隙连通性的发展(如压剪、静水压缩、裂隙自愈、断层蠕变、由于水膜和自由表面扩散作用引发的压溶作用等)。目前国外已有学者开始研究裂隙岩体在流固化学耦合作用下其渗透特性变化方面的试验研究:

Moore 等<sup>[18]</sup>试验测量了温度在 300℃~500℃时完整 Westerly 花岗岩岩样渗透率变化过程,他们发现热的液体注入岩样后使岩样加热,治愈和封闭岩石中的微裂隙,从而导致岩石的渗透性降低,而且渗透性改变的速率随温度升高而增加。在高温条件下,岩石缺陷的愈合速度非常快,如在 400℃,试样的渗透系数在 50 d 内就降低了 10 倍左右;在 500℃时,岩样在加热到第 5 天左右时渗透系数就降低了两个数量级,其原因还有待进一步分析。另外试验研究表明:宏观裂隙在高温条件的闭合速度也是相当快的,裂隙在渗透试验进行到 20 d 时,其渗透系数就降低到了完整岩石的水平。

为研究断层封闭机制的形成及其对地震再发的影响, Morrow 等<sup>[19]</sup>在有效压应力为 50 MPa、温度为 150℃~500℃条件下分别对完整的、含裂隙的、凿取的这 3 种 Westerly 花岗岩岩样进行了渗透特性试验,孔隙水在 2 MPa 的压力差作用下在岩石中进行循环渗透,试验持续 40 多天。试验测得花岗岩渗透率  $k$  随时间  $t$  增加而降低,呈负指数关系:

$$k = c(10^{-rt}) \quad (1)$$

式中,  $r$  为时间常数,对于完整岩样,  $r$  与温度呈正比,其值大约在 0.001~0.1/d (试验温度在 250℃~500℃),对于 250℃及以下的渗透循环试验,  $r$  值变化很小。相反,在一个给定的温度下,含裂隙岩样渗透率降低的速率更高,这一点通过对岩样裂隙面上矿物溶解和沉淀生长随温度、时间的增加关系的分析得到证实。文中还分析了渗透性变化的机理,认为裂隙渗透性变化的机理不同于完整花岗岩渗透性变化的机理,认为裂隙渗透性降低较快的原因是由于化学作用的存在,在高温条件下的裂隙中,化学作用是较为剧烈的,其对裂隙表面的溶解和沉淀是其渗透性减小较快的原因。

Polak 等<sup>[20]</sup>对均密石英岩天然裂隙(采用直径为 25 mm、长为 90 mm 的圆柱状岩芯)进行了 900 h 的水渗透试验,试验中施加 3.5 MPa 围压并保持不变。试验温度从 20℃开始,大约 30 h 后温度升高到 80℃,75 h 以后温度再升高到 120℃,430 h 后温度升高到 150℃,并保持到试验结束。试验中测量了通过裂隙的水流量以及溶解矿物量,同时有 X 光扫描仪实时扫描和试验后切片的电子扫描显微镜观察,这样可以较全面了解裂隙面的矿物溶解过程以及它对裂隙渗透特性的影响。试验结果显示:在常压力下,裂隙的渗透性随温度和时间单调减小,在 900 h 的试验中,渗透系数降低了两个数量级(见图 1)。

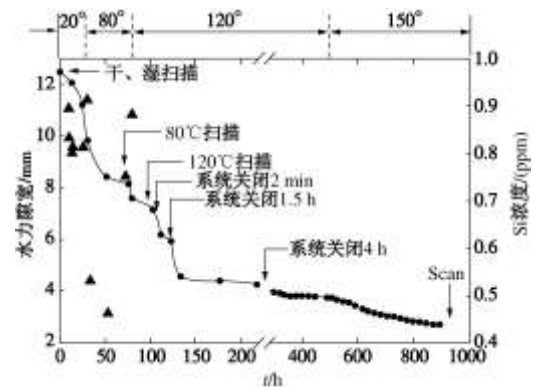


图 1 裂隙等效水力隙宽随时间的变化过程以及试验前半程硅的浓度

Fig. 1 Variation of fracture hydraulic aperture with time and aqueous concentration of silicon

但是矿物的净溶解流出,并不一定造成裂隙面渗透系数的降低。Polak 等<sup>[21]</sup>的试验更进一步揭示了渗流-矿物化学溶蚀-应力耦合作用对裂隙渗透性影响的复杂性。他们在室温(20℃)、低围压(3.5 MPa)条件下进行了石灰岩裂隙的渗透试验,带裂隙的岩石试件是直径为 50 mm、长为 108 mm 的圆柱状岩芯。

试验历时约两个月, 试验前 40 d 使用地下水通过裂隙面流动, 裂隙的渗透性不断地减小到原来的 1/3 左右, 后 23 d 改用蒸馏水, 前 2 d 渗透系数又快速降低了 5 倍, 但在接下来的 21 d 里渗透性却急剧增大 50 倍以上 (见图 2)。图 3 给出了其中一个断面的渗透试验前后的裂隙形态对比图, 从图上可以看出, 经过 2 个月的地下水和蒸馏水的渗透融蚀作用后, 在裂隙面的中间部位形成较大的孔洞, 成为一个明显的上下游贯通的渗透通道。另外试验还对试件进出口水中的钙、镁离子浓度、pH 值进行了测试分析 (图 4, 5)。结果显示: 无论是用地下水还是用蒸馏水, 裂隙面的矿物基本上都被溶解带出, 且水经过裂隙面后其 pH 值有所升高。

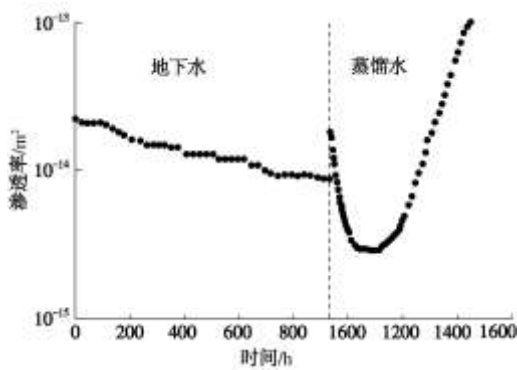


图 2 渗透过程中灰岩裂隙渗透率随时间变化过程

Fig. 2 Variation of limestone fracture permeability with time

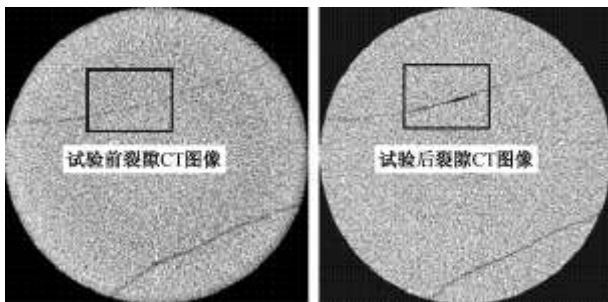


图 3 渗透试验前后的裂隙形态对比图<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Comparison of scanned core images between test initiation and after 1492 hours

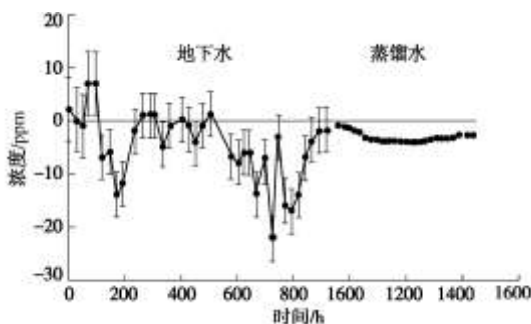


图 4 试件进出口流体中钙离子的浓度差

Fig. 4 Variation of concentration of Ca at inlet and outlet with

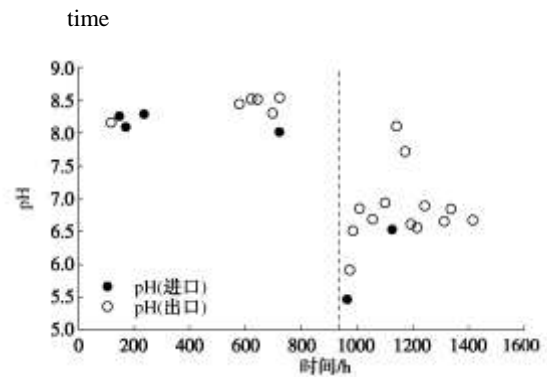


图 5 试件进出口流体的 pH 值对比情况

Fig. 5 Variation of measured pH values at inlet and outlet with time

另外, 文献[22~24]分别进行了石英岩、方解石、钠长石在温度为 23℃~150℃时裂隙在流固热化学作用下的渗透特性变化过程的试验研究, 这里就不一一介绍。裂隙岩体流固热化学多场耦合分析研究已经成为当前研究热点, 这方面的研究已取得了一定的成果<sup>[25]</sup>。

周辉等<sup>[26]</sup>自行设计了一套盐岩裂隙渗流-化学溶蚀的耦合试验装置, 如图6所示。其上面是一块加工好的盐岩块, 表面打磨平整, 下面是一块有机玻璃板。在进水口通入一定浓度的盐岩溶液, 保持进水口和出水口之间的压力差不变, 持续通入溶液125 h, 得到了如图7所示的盐岩裂隙面的溶解形态。试验结果表明, 溶解首先发生在裂隙的进口处, 越深入裂隙深部裂隙的溶解速度越慢 (图8)。

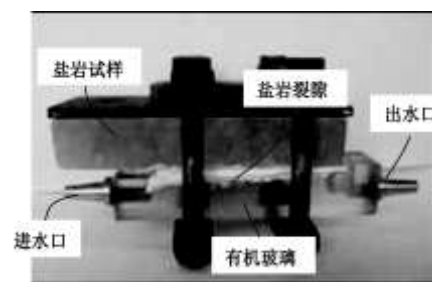


图 6 盐岩裂隙溶解的试验装置图

Fig. 6 Experimental setup for coupled fluid flow and dissolution test for salt rock fracture

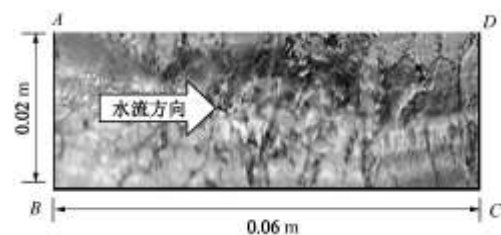


图 7 盐岩裂隙溶解后的形态

Fig. 7 Profile of dissolved salt rock fracture after test

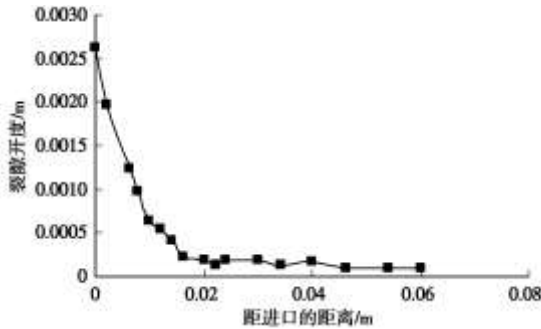


图8 盐岩裂隙溶解后的等效裂隙开度

Fig. 8 Equivalent dissolved aperture over test time

汤连生等<sup>[27]</sup>进行了水-岩-化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究。探讨了岩石的宏观力学效应及断裂力学效应对化学反应的响应机理,研究表明岩石宏观力学效应强烈地受水岩化学作用的影响,主要影响因素为岩体的物理性质、矿物成分、晶体结构等,归结起来受化学反应强弱的影响最为显著,并具有较强的时间依赖性。

刘建军等<sup>[28]</sup>以低渗透岩石为对象,进行了有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响方面的试验研究,试验首先对岩石进行饱和,然后通过加压和释压来观察岩芯流出流入量的多少,试验结果表明,加压能使岩石的渗透率和孔隙度减小,但释压后不能恢复到原来的水平,裂缝型岩石的这种现象要明显高于完整岩石,低渗透性岩石孔隙微小的变化要导致较大的渗透率减小,这些结论对于石油开采有重要的指导意义。

胡友彪等<sup>[29]</sup>在试验室内模拟动水条件,进行一定时间内的灰岩溶蚀作用试验研究,一定程度上反映了自然真实情况,研究表明溶蚀作用包括化学溶蚀和机械破坏两部分,但以化学溶蚀为主,岩样溶解度的大小随着深度的增大而减小,这说明矿物化学溶蚀占有非常重要的地位,且化学溶蚀受外界条件影响。

张凤娥等<sup>[30]</sup>进行了硫酸盐岩溶蚀机理试验研究。他们分别研究了相同环境下不同试样的溶解机理和相同试样在不同环境下(如不同的温度、不同渗流速度)的溶解机理,发现硫酸盐的溶解机理不同于碳酸盐的溶解机理,在没有二氧化碳的参与下也能发生溶蚀,不同的环境下其溶解机理也不相同。

蒋忠诚等<sup>[31]</sup>的数据进一步表明:即使是雨水,岩石的溶蚀作用也是非常快的。以1996年夏天桂林的一次暴雨溶蚀过程为例,雨水降落到裸露岩石表面后,水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 含量由低浓度迅速趋向 $\text{CaCO}_3$ 饱和状态。在雨水刚接触岩面时,水中溶液的 $\text{CaCO}_3$ 浓度迅速增加,在20 min内, $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度即可由6 mg/l增至15 mg/l,此后浓度增加速度有所放慢,但仍呈渐

增趋势,1个多小时后即达到溶蚀动力平衡状态,浓度变化曲线与pH值的变化曲线相一致。

冯夏庭等<sup>[32-33]</sup>研究了岩石在化学腐蚀条件下单轴抗压强度与破裂特征的力学效应。

在耦合试验技术方面采用了一些揭示岩石内部微观结构演化规律的新型测试方法,如CT实时扫描技术<sup>[34]</sup>、显微镜实时观测试验<sup>[32]</sup>、核磁共振(NMRI)、声发射等技术。

以上试验充分表明:裂隙岩体渗透特性演化对其所处的地质环境(应力、温度、水流速、水化学环境等因素)具有高度的敏感性。目前这方面的试验研究还远远不够,主要是一些宏观的物理测试,还没有建立渗透系数与化学溶蚀等因素之间的宏观物理关系,也还没有更进一步的细观的、实时的试验观察和测试。

## 2 流固化学耦合作用下裂隙岩体渗透特性的数学模型研究

目前有人提出一些理论模型来研究渗流-化学溶蚀耦合过程或渗流-应力-化学溶蚀耦合过程中裂隙岩体的渗透特性演化规律。

### 2.1 渗流-化学溶蚀耦合数学模型

Steeffel等、Yeh等采用多组分化学反应传输模型<sup>[35-36]</sup>或者它们的简化模型<sup>[37-38]</sup>来描述岩石裂隙面矿物反应的时空变化过程。如Yeh等建立了二维多组分化学反应传输模型,用来模拟在非均质、各向异性、饱和和非饱和多孔介质中非稳定地下水流动过程中多组分子水化学反应及传输耦合过程,该模型能够反映离子络合、溶质的溶解与沉淀、吸附与解吸、离子交换、氧化还原、酸碱反应等化学过程,并发展了此数学模型的数值解法。该数学模型能够较全面地反映多孔介质中物质的传输转化过程,但也有不足之处:由于该模型不能反映多孔介质的细观孔隙几何结构特征,难以考虑溶解沉淀过程中孔隙结构的变化以及由此导致的介质渗透率的变化,也很难反映孔隙空间的溶解、沉淀、堵塞、次裂隙发育等作用引起的裂隙面几何形状变化的影响,因此这方面的耦合影响因素也就难以考虑进来。Groves等<sup>[39]</sup>则研究了渗流-化学溶蚀耦合作用所引起裂隙岩体渗透特性的变化对喀斯特的形成和发展的影响,他们利用一维数学模型研究了石灰岩裂隙在水流溶解作用下发展为孔洞的控制条件,模拟结果表明:在地质上合理的二氧化碳压力和水力梯度作用下,裂隙能够发展成为孔洞的最小初始隙宽大约为100  $\mu\text{m}$ 量级;如果使用典型的土壤 $\text{CO}_2$ 压力,当水流通道初始隙宽超过500  $\mu\text{m}$ ,那么即使在较低的水力梯度作用下裂隙也非常容易发展成大的渗流通道。

他们还分析了裂隙发育成渗透孔隙通道所需的一组最低初始条件(包括水力梯度、水流路径的长度、 $\text{CO}_2$ 的初始压力等)。但该文数学模型是一维的,不能反映粗糙裂隙面的实际开度分布情况,因此不能反映裂隙面接触处绕流等情况下物质的输运转化过程,另外该模型没有考虑应力的耦合作用。

Dreybrodt 等<sup>[40]</sup>提出了一个薄膜理论模型(图9)来研究在湍流条件下在  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$  溶液中方解石( $\text{CaCO}_3$ )从岩石表面上溶解和沉淀的机理。该模型将流体区分成极薄的扩散边界层和湍流核心区,在扩散边界层中,物质传输完全由分子扩散作用驱动;在边界层外侧为湍流核心区,由于强烈紊动作用,可以认为在该区内离子浓度为常数。该模型考虑了以下3个影响因素:①通过扩散边界层(紧靠液固界面)的分子扩散作用;② $\text{CO}_2$ 转化成 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{H}^+$ 的缓慢过程;③在固体 $\text{CaCO}_3$ 表面上不同类型的化学反应。边界层厚度是由问题的水力学条件决定的,其值既可以由扩散性物质传输过程中的溶解试验测定,也可以由水力学相互关系推得。该模型计算出的 $\text{CaCO}_3$ 溶解和沉淀速率与转动圆盘试验数据吻合较好。该模型对理解石灰岩地区的剥蚀以及喀斯特含水层的发展是有意义的。

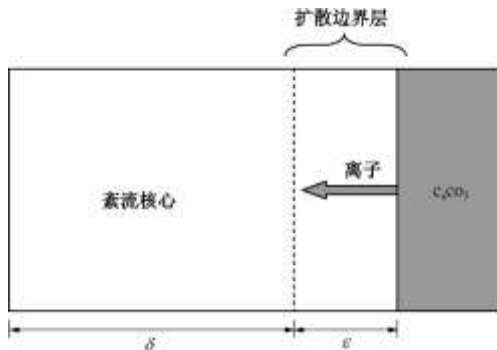


图9 水岩相互作用的  $\text{CaCO}_3-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  系统(分扩散边界层和湍流核心区)( $\epsilon \ll \delta$ )

Fig. 9  $\text{CaCO}_3-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$  system with turbulent core and diffusion boundary layer ( $\epsilon \ll \delta$ )

Steeffel 等<sup>[41]</sup>研究认为裂隙面上覆盖物沉淀及表面形态的变化将改变裂隙壁面之间和岩石内部的有效弥散率,并改变岩石的组分和中和势。

盛金昌等<sup>[42]</sup>建立了单裂隙的二维渗流化学耦合的偏微分方程组,模拟了粗糙裂隙面中的渗流化学耦合过程,数值分析显示,裂隙中的水流存在着明显的沟道流现象,溶解速度存在着不均匀性,这种不均匀性表现在两方面:一是入口处与裂隙深处的溶解存在不均匀性,一是裂隙较大范围的闭合处与连通性较好的开裂处存在不均匀性,裂隙的渗透性在初始时刻增

加较慢,随着裂隙开度的增大和贯通,溶解速度会逐渐增大,溶解是一个加速的过程。

岩石的渗流-化学溶蚀耦合作用过程很复杂,目前这方面的研究已有一些成果,但还不够丰富。对于岩石裂隙面,由于裂隙面可以简化成固壁边界,建立其耦合数学模型相对来说要容易些;对于多孔岩石,由于其内部的孔隙几何结构分布复杂,数学模型往往难以反映溶解、沉淀过程中孔隙结构的变化以及由此导致的介质渗透率的变化,这是难点之一。另外一个难点是数学模型难以加入真正的化学反应平衡过程,往往都是作一些等效的处理。因此还需要进一步的研究工作。

## 2.2 渗流-化学溶蚀-应力耦合数学模型

上述研究主要是水岩之间水流、矿物化学溶蚀与沉淀等耦合过程,没有考虑应力的影响。

Yasuhara 等<sup>[43-44]</sup>利用规则的球形矿物颗粒模型从压力溶解的角度对天然裂隙渗透特性的变化进行了理论模型研究,通过矿物颗粒接触压力溶解与裂隙压力溶解之间的类比关系,建立了裂隙压力溶解的表达式,并通过接触面积和裂隙开度的关系,建立了一个集总参数模型来描述压力溶解作用下裂隙面上矿物溶解、传输、沉淀等过程,最后利用该模型预测了不同温度条件下天然裂隙的闭合过程。但该文模型是基于岩石颗粒之间的压溶作用机制建立起来的,而且文中有些参数取值比理论值大上千倍,是否适合裂隙还有待进一步的验证。实际上压溶作用是一个漫长的地质历史过程,是沉积岩中一种有流体参与的塑性变形过程。由于压力的作用,沉积岩中的一些颗粒(通常是方解石或石英)在高压应力区(接触处)发生溶解,通过流体迁移,而在低压应力区沉淀。

Liu 等<sup>[45]</sup>利用理想化锯齿裂隙面模型从裂隙面化学溶蚀和接触面压力溶解相互竞争的角度建立了二维的裂隙渗透特性应力-渗流-化学耦合模型,对 Polak 等<sup>[21]</sup>的试验进行了理论和数值解析,解释了裂隙渗透性增大和减小的原因。理论研究表明,单裂隙面渗流特性的这种复杂变化是由于应力-渗流-化学耦合作用造成的,裂隙面上压应力的作用是使裂隙面接触点处产生局部应力集中和微裂隙发育,从而促使接触点处的矿物质更容易产生化学溶蚀。

渗流-应力-化学耦合作用的理论研究在国内也取得了一定的进展<sup>[46]</sup>。

盛金昌等<sup>[47]</sup>建立了描述单裂隙在渗流-应力-化学耦合作用下的渗透特性变换的数学模型,并利用分形理论生成了一组裂隙面,利用建立的数学模型计算分析了单裂隙在高水压条件下通水 500 h 后的裂隙平均开度的变化,发现压力溶解在裂隙闭合过程中起

到了主导作用,在压力溶解和表面溶解相互竞争作用下,形成渗流的优势通道是可能的。

陈强等<sup>[48]</sup>从地下水的多组分角度出发,采用化学热力学方法对地下水中碳酸盐岩的侵蚀性进行了分析。梁卫国等<sup>[49]</sup>建立了岩盐水压致裂过程中溶解-固-流-传质耦合数学模型,并模拟了盐矿床致裂溶解的物理规律;其中对围岩和裂缝变形采用三维立体模型,对流体运移、溶质扩散则采用平面模型。将三维固体变形模型和渗流、扩散平面模型相结合,分析各相关量的变化规律及相互作用规律。刘泽佳和李锡夔等<sup>[50]</sup>建立了多孔介质中化学-热-水力-力学耦合过程本构模型,并发展了耦合数值模拟方法。张贵金等<sup>[51]</sup>应用耦合随机理论模型讨论了溶蚀岩体的溶蚀作用下岩体的溶渗作用过程。王炳印等<sup>[52]</sup>考虑泥页岩地层在温度、孔隙压力、泥页岩水化等因素的耦合作用,建立了耦合数学模型,得出了不同泥浆体系和不同泥浆密度下泥页岩井壁的坍塌周期。张玉军<sup>[53]</sup>建立了饱和-非饱和孔隙介质中考虑溶质浓度变化的近场和远场的热-水-应力耦合过程数值模型。周辉等<sup>[54]</sup>提出了岩石细观统计渗流模型,首先假定岩石由固相岩石基质、裂隙和互不联通的球型孔隙组成,岩石的渗透性由球形空隙之间的微裂隙和宏观裂隙导通孔隙或裂隙形成,然后假定并在岩石孔隙的概率分布为均匀分布,通过推导得到了有效孔隙度的具体表达形式,该模型将岩石裂纹演化过程中的渗透性视为一个非线性动态过程,同时,考虑了裂纹扩展演化和孔隙渗流的共同作用。有关多场耦合模型的建立以及数值方法的研究还有很多,如文献[55~59]。

岩石的渗流-化学溶蚀耦合作用过程很复杂,目前这方面的研究已有一些成果。对于岩石裂隙面,由于裂隙面可以简化成固壁边界,建立其耦合数学模型相对来说要容易些;对于多孔岩石,由于其内部的孔隙几何结构分布复杂,数学模型往往难以反映溶解、沉淀过程中孔隙结构的变化以及由此导致的介质渗透率的变化,这是难点之一。另外一个难点是数学模型难以加入真正的化学反应平衡过程,往往都是作一些等效的处理。因此还需要进一步的研究工作。

岩石渗流-化学溶蚀-应力耦合作用的研究才刚刚开始,研究成还远远不够。在工程上,岩石都会承受大小不等的应力作用,应力不仅在渗流特性有直接的影响,而且从细观角度看,对矿物化学溶蚀过程也有直接的影响。目前的理论模型基本上都是建立在宏观概念上或等效关系上,要建立建立细观结构的渗流-化学溶蚀-应力耦合模型还需要做大量的工作。

### 3 结论与展望

本文分别从物理试验和数学模型两方面综合分析了国内外流固热化学多场耦合作用下裂隙岩体渗透特性的研究进展。已有的研究表明,渗流-应力-化学溶蚀耦合作用对裂隙岩体的渗透特性演化、渗流规律的影响极其复杂和敏感,宏观均匀化的研究方法存在很多不足,细观、实时的物理试验和数学模型分析将更有利于揭示渗流-应力-化学溶蚀耦合作用下裂隙岩体渗透特性机理和渗流规律。认为应该在以下方面做进一步的工作:

(1)在物理试验测试设备上,首先需要开发建设真正意义上的用于渗流与应力、温度、化学溶蚀等多因素耦合作用下裂隙岩体耦合渗透测试设备:实时细观地测试高应力、中高温、化学反应条件下岩石的渗透特性演化规律。该设备至少应具备长时间渗透、大流量、稳压(渗透压力、围压)、可控温度、试件进、出口流体的温度控制及流量测定等方面的要求。在此基础上,引进并发展现代无损探测手段,如实时的X光CT扫描技术、电镜扫描技术、核磁共振技术等,让人们能有效获取岩石内部孔隙结构的数字空间分布,并且利用现代计算机图像处理技术可以较方便地处理和分析这些大量数据。这两者相结合,我们就能既无损观测到岩石细部孔隙细观结构的演化过程,又能测得岩石渗透特性与应力、温度、流速、流体的化学性质等之间的宏观关系,试图能从细观和宏观相结合的角度研究复杂因素耦合作用下岩石的渗透特性演化机理。

(2)数字岩芯技术将是细观尺度上研究岩石耦合渗透特性基础和关键之一,也是岩体工程的前沿课题<sup>[60-61]</sup>。由于设备与工具等条件局限,过去很难将岩体内部细观孔隙结构以及材料的实际空间分布定量数字表达出来,并纳入渗流数值分析中。目前,计算机图像技术和无损探测技术的发展使岩芯数字化建模成为可能(如X射线立体成像法简便易行、准确度高),这种能够反映岩石真实孔隙细观结构的数字模型是研究流固化学耦合作用下岩石渗透特性演化的基础。

(3)建立包括多组分溶质运移方程、力学方程、热力学方程、渗流方程在内的耦合数学模型,并开发可靠有效的数值模拟方法。在细观数字岩芯的基础上讨论反映渗流运动、应力作用、岩水间的化学溶蚀、溶质的迁移与沉淀等过程,通过数值试验研究耦合渗透特性基本规律。

(4)探讨建立非均匀岩体的微观-细观-宏观不同尺度耦合渗流分析方法与理论。

过去人们主要是从宏观角度来研究裂隙岩体的渗透特性规律, 对岩体非均质材料人为作出一些均匀化各向同性或各向异性假设。也有不少工作从细观孔隙结构的角来研究岩体的渗透特性。但如何通过建立岩体微观、细观孔隙结构分布的数字模型来计算和预测其在细观层面上的水流运动、矿物化学溶蚀和沉淀、以及力学响应等过程, 然后在细观计算结果的基础上建立适用于宏观计算的岩体流固热耦合渗透模型和参数, 从而进一步建立微观—细观—宏观不同尺度耦合渗流分析方法与理论。

### 参考文献:

- [1] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力 - 水流 - 化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(9): 1465 - 1473. (FENG X T, DING W X. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological-chemical environment[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(9): 1465 - 1473. (in Chinese))
- [2] 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 H, FENG X T. Advances in coupled mechanical-hydro-chemical Processes in rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 855 - 864. (in Chinese))
- [3] 徐晓春, 王 军, 李 援, 等. 安徽铜陵林冲尾矿库重金属元素分布与迁移及其环境影响. 岩石矿物学杂志, 2003, **22**(4): 433 - 436. (XU X C, WANG J, LI Y, et al. The distribution and migration of heavy metal elements of Linchong tailings reservoir in Tongling, Anhui Province, and their environment effects[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2003, **22**(4): 433 - 436. (in Chinese))
- [4] LIN W, ROBERTS J, GLASSLEY W, et al. Fracture and matrix permeability at elevated temperatures[R]. San Francisco: Workshop on Significant Issues and Available Data. 1997.
- [5] 盛金昌, 速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述[J]. 岩土力学, 1998, **19**(2): 92 - 98. (SHENG J C, SU B Y. Comment on the research of coupled stress and fluid flow in fractured rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(2): 92 - 98. (in Chinese))
- [6] 耿克勤, 刘光廷, 陈兴华. 节理岩体的渗透系数与应变、应力的关系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996(1). (GENG K Q, LIU G T, CHEN X H. Coupling relationship of percolation coefficient of fractured rock masses to strain and stress[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1996(1). (in Chinese))
- [7] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(8): 1194 - 1198. (LIU C H, CHEN C X, FU S L. Testing study on seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimensional stresses[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(8): 1194 - 1198. (in Chinese))
- [8] 作彦卿, 张倬元. 《岩体水力学导论》[J]. 地质灾害与环境保护, 1997(3). (WU Y Q, ZHANG Z Y. An introduction to rock mass hydraulics[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997(3). (in Chinese))
- [9] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应得渗透率 - 应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(2): 231 - 235. (LI S P, LI Y S, WU Z Y. The permeability strain equations relating to complete stress-strain path of the rock[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(2): 231 - 235. (in Chinese))
- [10] 周创兵, 熊文林. 论岩体的渗透特性[J]. 工程地质学报, 1996(2). (ZHOU C B, XIONG W L. On permeability characteristics of rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 1996(2). (in Chinese))
- [11] 王恩志, 张文韶, 韩小妹, 等. 低渗透岩石在围压作用下的耦合渗流实验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, **45**(6): 764 - 767. (WANG E Z, ZHANG W S, HAN X M, et al. Experimental study on coupled flow through low permeability rock under confining pressure[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology, 2005, **45**(6): 764 - 767. (in Chinese))
- [12] 张玉卓, 张金才. 裂隙岩体渗流与应力耦合的试验研究[J]. 岩土力学, 1997, **18**(4): 59 - 62. (ZHANG Y Z, ZHANG J C. Experimental study of the seepage flow-stress coupling in fractured rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, **18**(4): 59 - 62. (in Chinese))
- [13] 郑少河, 赵阳升, 段康康. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(2): 133 - 136. (ZHANG S H, ZHANG Y S, DUAN K L. An experimental study on the permeability law of natural fracture under 3-D stresses[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(2): 133 - 136. (in Chinese))
- [14] 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 T H, TANG C A, ZHU W C, et al. Coupling analysis of seepage and stresses in rock failure process[J]. Journal of

- Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 489 - 493. (in Chinese))
- [15] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, **40**: 283 - 353.
- [16] HUDSON J A, STEPHANSSON O, ANDERSSON J, et al. Coupled T-H-M issue relating to radioactive waste repository design and performance[J]. Int J of Rock Mech & Min Sci., 2001, **38**: 143 - 161.
- [17] TSANG C-F, JING L, STEPHANSSON O, et al. The Decovalex III project: a summary of activities and lessons learned[J]. Int J of Rock Mech & Min Sci, 2005.
- [18] MOORE D E, LOCKNER D A, BYERLEE J A. Reduction of permeability in granite at elevated temperatures[J]. Science, 1994: 1558 - 1560.
- [19] MORROW C A, MOORE D E, LOCKNER D A. Permeability reduction in granite under hydrothermal conditions[J]. J Geophys Res, 2001, **106**(30): 551 - 560.
- [20] POLAK A, YASUHARA H, ELSWORTH D, et al. The evolution of permeability in natural fractures-the competing roles of pressure solution and free-face dissolution[C]// International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modeling, Experiments & Applications. 719-724. Stockholm, 2003.
- [21] POLAK A, ELSWORTH D, LIU J, et al. Spontaneous switching of permeability changes in a limestone fracture with net dissolution[J]. Water Resour Res, 2004, **40**: W03502.
- [22] ELIAS B P, HAJASH A. Change in quartz solubility and porosity change due to effective stress: An experimental investigation of pressure solution[J]. Geology, 1992, **20**: 451 - 454.
- [23] ZHANG S, COX S, PATERSON M. The influence of room temperature deformation on porosity and permeability in calcite aggregates[J]. J Geophys Res, 1994, **99**: 761 - 775.
- [24] HAJASH A, CARPENTER T D, DEWERS T A. Dissolution and time-dependent compaction of albite sand: experiments at 100 °C and 160 °C in pH-buffered organic acids and distilled water[J]. Tectonophysics, 1998(295): 93 - 115.
- [25] FENG X T, LIU J, JING L. Research and application on coupled T-H-M-C processes of geological media in China - a review[C]// International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, experiments & applications, 2003: 32 - 43.
- [26] 周辉, 汤艳春, 胡大伟. 等. 盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(5): 946 - 950. (ZHOU H, TANG Y Q, HU D W, et al. Study on coupled penetrating-dissolving model and experiment for salt rock cracks[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(5): 946 - 950. (In Chinese))
- [27] 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**(6): 526 - 531. (TANG L S, ZHANG P C, WANG S J. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water on rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, **21**(6): 526 - 531. (in Chinese))
- [28] 刘建军, 刘先贵. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J]. 地质力学学报, 2001, **7**(1): 41 - 44. (LIU J J, LIU X G. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media[J]. Journal of Geomechanics, 2001, **7**(1): 41 - 44. (in Chinese))
- [29] 胡友彪, 白海波, 赵海峰. 徐州新河矿太原组灰岩溶蚀试验研究[J]. 江苏煤炭, 1997(3): 7 - 10. (HU Y B, BAI H B, ZHAO H F. Experimental study on the limestone corrosion of Xuzhou Xinhe mine[J]. Jiangsu Coal, 1997(3): 7 - 10. (in Chinese))
- [30] 张凤娥, 卢耀如. 硫酸盐岩溶蚀机理试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2001(5): 12 - 16. (ZHANG F E, LU Y R. Experimental study on the mechanism of sulphate corrosion[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001(5): 12 - 16. (in Chinese))
- [31] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 1999, **20**(3): 302 - 308. (JIANG Z C, YUAN D X. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1999, **20**(3): 302 - 308. (in Chinese))
- [32] 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 X T, WANG C Y, CHEN S L. Testing study and real-time observation of rock meso-cracking process under chemical erosion[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(7): 935 - 939. (in Chinese))
- [33] 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 S L, FENG X T, LI S J. Effects of chemical erosion on uniaxial compressive strength and meso-fracturing behaviors of rock[J]. Journal of Rock

- Mechanics and Engineering, 2003, **22**(4): 547 - 551. (in Chinese))
- [34] 李术才, 李树忱, 朱维申, 等. 裂隙水对节理岩体裂隙扩展影响的 CT 实时扫描试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3584 - 3590. (LI S C, LI S C, ZHU W S, et al. CT real-time testing study on effect of water on crack growth in fractured rock mass[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3584 - 3590. (in Chinese))
- [35] STEEFEL C I, CAPPELLEN V P. A new kinetic approach to modeling water-rock interaction: the role of nucleation, precursors, and Ostwald ripening, Geochim[J]. Cosmochim. Acta, 1990, **54**: 2657 - 2677.
- [36] YE H G T, TRIPATHI V S. A model for simulating transport of reactive multispecies components: model development and demonstration[J]. Water Resources Res, 1991, **27**: 3075 - 3094.
- [37] TANG X M, CHENG C H, PAILLET F L. Modeling borehole Stoneley wave propagation a permeable in-situ fracture[C]// Society of Professional Well Log Analysis Annual Logging Symposium, 32<sup>nd</sup>, Transactions. Houston, Tex: Society of Professional Well Log Analysts, 1991.
- [38] DIJK P, BERKOWITZ B, BENDEL P. Investigation of flow in water-saturated rock fractures using nuclear magnetic resonance imaging (NMRI) [J]. Water Resour Res, 1998, **35**: 347 - 360.
- [39] GROVES C G, HOWARD A D. Minimum hydrochemical conditions allowing limestone cave development[J]. Water Res Res, 1994, **30**(3): 607 - 615.
- [40] DREYBRODT W, BUHMANN D. A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion[J]. Chem Geol 1991, **90**: 107 - 22.
- [41] STEEFEL C I, LICHTNER P C. Diffusion and reaction in a rock matrix bordering a hyperalkaline fluid-filled fracture, Geochim[J]. Cosmochim Acta, 1994, **58**: 3595 - 3612.
- [42] SHENG J C, XU X C, ZHAN M L, et al. Permeability changes in a rock fracture during coupled fluid flow and chemical dissolution processes[C]// Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, Vol. I : Water Resources and Hydrology, Nanjing, 2008.
- [43] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A. The evolution of permeability in a natural fracture: the significant role of pressure solution[J]. Journal of Geophysical, 2004, **109**.
- [44] YASUHARA H, ELSWORTH D, POLAK A. A mechanistic model for compaction of granular aggregates moderated by pressure solution[J]. J Geophys Res, 2003, **108**(B11): 2530.
- [45] LIU J, SHENG J C, POLAK A, et al. A fully coupled HMC model for fracture sealing and preferential opening[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2006, **43**: 23 - 36.
- [46] 李义连, 杨玉环, 卢学实. 水 - 岩相互作用模拟的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2003(3): 95 - 99. (LI Y L, YANG Y H, LU X S. Research advance on modeling study of water-rock interaction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003(3): 95 - 99. (in Chinese))
- [47] 许孝臣, 盛金昌. 渗流 - 应力 - 化学耦合作用下单裂隙渗透特性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009(4): 270 - 272. (XU X C, SHENG J C. Permeability of single fracture under coupled hydrological-mechanical-chemical action[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2009(4): 270 - 272. (in Chinese))
- [48] 陈 强, 魏有仪, 刘少巍, 等. 岩溶隧道中地下水侵蚀性的化学热力学分析与评价[J]. 水文地质工程地质, 2003(6). (CHEN Q, WEI Y Y, LIU S W, et al. Chemical thermodynamics evaluation on the corrosion of groundwater in karst tunnel[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003(6). (in Chinese))
- [49] 梁卫国, 赵阳升, 李志萍. 盐岩水压致裂溶解耦合数学模型与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(4): 427 - 430. (LIANG W G, ZHAO Y S, LI Z P. The coupled mathematical model and numerical simulation of hydraulic fracturing and dissolving in rock salt[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(4): 427 - 430. (in Chinese))
- [50] 刘泽佳, 李锡夔, 武文华. 多孔介质中化学 - 热 - 水力 - 力学耦合过程本构模型和数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 797 - 803. (LIU Z J, LI X K, WU W H. A constitutive model and numerical simulation for coupled chemo-thermo-hydro-mechanical process in porous media[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 797 - 803. (in Chinese))
- [51] 张贵金, 徐卫亚, 赖 苗. 溶蚀岩体的溶渗作用及岩溶坝区的渗透性研究[J]. 岩土力学, 2003, **24**(5): 795 - 799. (ZHANG G J, XU W Y, LAI M. Leaching of solution rock and permeability study under karst-engineering geological condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(5): 795 - 799. (in Chinese))
- [52] 王炳印, 邓金根, 邹灵战, 等. 物理 - 化学耦合作用下泥页岩坍塌周期应用研究[J]. 石油学报, 2006, **27**(3): 130 - 132. (WANG B Y, DENG J G, ZOU L Z, et al. Applied

- research of collapse cycle of shale in wellbore using a coupled physico-chemical model[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, **27**(3): 130 - 132. (in Chinese))
- [53] 张玉军. 考虑溶质浓度变化的热-水-应力耦合模型[J]. 焦作大学学报, 2006(3): 53 - 55. (ZHANG Y J. Solute concentrations change about the heat-water-mechanical model[J]. *Journal of Jiaozuo University*, 2006(3): 53 - 55. (in Chinese))
- [54] 周辉, 邵建富, 冯夏庭. 岩石细观统计渗流模型研究(I): 理论模型[J]. 岩土力学, 2004, **25**(2): 169 - 173. (ZHOU H, SHAO J F, FENG X T. Research on statistical penetration meso-model of rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(2): 169 - 173. (in Chinese))
- [55] 徐则民, 黄润秋, 杨立中. 斜坡水-岩化学作用问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(16): 2778 - 2787. (XU Z M, HUANG R Q, YANG L Z. Some problems on chemical water-rock interaction in slopes[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(16): 2778 - 2787. (in Chinese))
- [56] 刘亚晨, 蔡永庆, 刘泉声, 等. 岩体裂隙结构面的温度-应力-水力耦合本构关系[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(2): 196 - 200. (LIU Y C, CAI Y Q, LIU Q S, et al. Thermal-hydraulic-mechanical coupling constitutive relation of rock mass fracture interconnectivity[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(2): 196 - 200. (in Chinese))
- [57] 梁冰, 高红梅, 兰永伟. 岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2009 - 2012. (LIANG B, GAO H M, LAN Y W. Theoretical analysis and experimental study on relation between rock and permeability temperature[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(12): 2009 - 2012. (In Chinese))
- [58] 李宁, 陈波, 党发宁. 裂隙岩体介质温度、渗流、变形耦合模型与有限元解析[J]. 自然科学进展, 2000, **10**(8): 722 - 728. (LI N, CHEN B, DANG F N. Fractured rock media of thermo, hydrological, mechanical coupled model and finite element analysis[J]. *Progress in Natural Science*, 2000, **10**(8): 722 - 728. (In Chinese))
- [59] 徐曾和, 翟玉春, 纪智玲. 固定床中对流扩散与反应耦合问题的一个解析解[J]. 中国有色金属学报, 2004, **14**(11): 1918 - 1925. (XU Zen-he, ZHAI Yu-chun, JI Zhi-ling. An analytical solution for coupled convection-diffusion and chemical reaction in fixed-beds[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, **14**(11): 1918 - 1925. (in Chinese))
- [60] 姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 数字岩心技术现状及展望[J]. 油气地质与采收率, 2005, **12**(6): 52 - 55. (YAO J, ZHAO X C, YI Y J, et al. The current situation and prospect on digital core technology[J]. *Oil & Gas Recovery Technology*, 2005, **12**(6): 52 - 55. (in Chinese))
- [61] 岳中琦. 岩石细观介质空间分布数字表述和相关力学数值分析的方法、应用和进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(5): 875 - 888. (YUE Z Q. Digital representation of meso-geomaterial spatial distribution and associated numerical analysis of geomechanics: methods, applications, and developments[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(5): 875 - 888. (in Chinese))