

# THMC 多场耦合作用下岩石物理力学性能与本构模型研究综述

颜丙乾<sup>1,2)</sup>, 任奋华<sup>1,2)</sup>✉, 蔡美峰<sup>1,2)</sup>, 郭奇峰<sup>1,2)</sup>, 乔 趁<sup>1,2)</sup>

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学城市与地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: renfenhua @126.com

**摘 要** 岩石多场耦合作用的研究已经开展了数十年, 包括岩石在单一物理场、两场耦合或三场耦合作用效应的研究。然而深部矿产资源开采和地下空间开发中岩体的赋存环境非常复杂, 岩体在高温、高渗透压、高应力及复杂水化学环境中将发生温度–水流–应力–化学 (THMC) 多场耦合作用。综合分析岩石多场耦合作用下的裂隙演化、变形力学机制、力学本构和耦合模型构建等方面的研究, 在分析岩石强度理论的基础上得出岩石多场耦合本构模型以及岩石蠕变本构模型。不同行业对岩石多场耦合作用的研究重点存在一定的差异, 岩石多场耦合作用不仅涉及到矿产资源开发、油气田开采、地热资源开发等资源能源领域, 其在水利水电工程、高寒工程、地下工程、地下核废料处置及深埋能源储库等领域也是研究的重点。岩石在高应力、水流、高温和化学作用下, 不仅会发生耦合作用, 而且会对岩石本身的物理力学性能产生影响。分析研究多场耦合作用下岩石的力学性能对于预防事故发生和保障工程安全开展具有重要的现实意义。最后探讨分析了岩石多场耦合研究的重点、难点和今后研究的方向, 为工程实践和相关问题的解决提供参考。

**关键词** 裂隙岩体; 多场耦合; 损伤演化; 岩石蠕变; 本构模型

**分类号** TG741.7

## A review of the research on physical and mechanical properties and constitutive model of rock under THMC multi-field coupling

YAN Bing-qian<sup>1,2)</sup>, REN Fen-hua<sup>1,2)</sup>✉, CAI Mei-feng<sup>1,2)</sup>, GUO Qi-feng<sup>1,2)</sup>, QIAO Chen<sup>1,2)</sup>

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: renfenhua @126.com

**ABSTRACT** The study of multi-field coupling of rocks has been carried out for decades, including the effects of single physical field, two-field coupling, and three-field coupling of rocks. However, the occurrence environment of rock mass in deep mining of mineral resources and underground space development is very complex. Thermal–hydrological–mechanical–chemical (THMC) multi-field coupling effect will occur in rock mass under high temperature, high osmotic pressure, high stress, and complex hydrochemical environment. The multi-field coupling of rocks is not the simple superposition of multiple physical fields, but the mutual influence and action of each physical field. The research on fracture evolution, deformation mechanics mechanism, mechanical constitutive and coupling model construction was comprehensively analyzed. Based on the analysis of rock strength theory, the development of a rock multi-field coupling constitutive model and a rock creep constitutive model were obtained. There are some differences in the research focus of multi-field coupling of rocks for different industries. The multi-field coupling of rocks not only involves the development of

收稿日期: 2019–07–29

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (51774022); 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC0804101)

mineral resources, oil and gas fields, geothermal resources and other resources and energy fields, but also water conservancy and hydropower engineering, alpine engineering, underground engineering, underground nuclear waste disposal, and deep buried energy storage. Under the action of high stress, seepage, high temperature and chemical action, not only will the coupling effect occur, but the physical and mechanical properties of rock itself will be affected. It is of great practical significance to analyze and study the mechanical properties of rocks under the action of multi-field coupling for preventing accidents and ensuring engineering safety. Finally, the key and difficult points of rock multi field coupling research and the direction of future research were discussed, which provides a reference for engineering practice and related problems.

**KEY WORDS** fractured rock; multi-field coupling; damage evolution; rock creep; constitutive model

随着地下空间开发和矿产资源开采的纵深向发展,岩石的赋存条件变得更为复杂<sup>[1]</sup>,处在高地应力、高温、高渗透水压和复杂水化学环境中的岩体将发生极其复杂的温度-水流-应力-化学 (THMC) 多场耦合作用<sup>[2]</sup>. 关于岩石多场耦合的研究开始于 20 世纪 50 年代对水库诱发地震的研究和分析,岩石的多场耦合并非所处多种物理场的简单叠加,而是各个物理场之间的相互影响和作用. 岩石的两场或多场耦合作用主要有两种方式,分别为直接耦合和贯序耦合<sup>[3]</sup>. 直接耦合无需将温度、水流、应力和化学四场反复迭代,只是不同物理场的直接耦合. 贯序耦合是多场耦合研究中常用的耦合模式,对多物理场进行相互迭代耦合分析,当迭代收敛时则得出耦合问题的解.

岩体由完整岩块及裂隙构成,多场耦合条件下对岩石的研究主要集中在裂隙岩体的损伤演化特性和不同物理场对岩石物理力学特性的综合影响. 为此,学者引入损伤场来定量描述多场耦合作用下岩石材料的劣化、裂隙的萌生及演化,构建损伤因子来表述材料的初始损伤及温度、水流、应力和化学作用对材料造成的变形等影响. 岩石的损伤不仅与岩石所处的多物理场密切相关,同时也受岩石自身内部细观特征、孔隙率及构造特征等特性的影响<sup>[4]</sup>.

目前,多场耦合作用下岩石的裂隙演化、变形机制、力学本构和耦合模型构建等成为岩石力学领域当前研究的热点、难点问题,得到了各国相关领域学者的高度重视. 加拿大在 1992 年开始的国际重大合作项目 DECOVALEX (Demonstration of coupled models and their validation against experiment) 中,进行了大量的多尺度室内和现场多场耦合试验<sup>[5]</sup>,项目开发并验证了岩体热-水-力交叉耦合模型,代表了当时的最高研究水平. 2003 年开始的 DECOVALEX-THMC (2004—2007) 计划,在 THM 三场耦合的基础上增加了化学场,中国科学院武汉岩土力学所加入了该计划第四阶段的合作研究<sup>[6-7]</sup>.

深部岩体围岩失稳一般表现出明显的时间效应,岩石在长期载荷作用及高温、水流、化学等多场环境中会出现蠕变变形-蠕变损伤-蠕变断裂,因此研究多场耦合作用下岩石的蠕变特性是岩石长期稳定性的研究重点方向.

THMC 多场耦合作用下岩石的研究工作非常复杂,近年来相关学者在多场耦合理论和实验等方面开展了一定的研究工作. 为了进一步开展相关研究工作,有必要结合不同研究背景及其在该领域的研究特点,系统分析国内外在岩石多场耦合方面的研究经验和阶段性成果,明确下一步的研究方向和研究重点,为未来相关研究工作的开展提供一定的借鉴和参考.

## 1 裂隙岩体变形力学性能

### 1.1 多场耦合岩石变形研究概述

天然岩体自身含有微裂隙等缺陷,同时受水、温度、水化学等因素影响会引起岩石材料的劣化,因此在多场耦合研究中,许多学者引入损伤场来表述岩石的损伤. 油页岩由有机质和矿物质组成,其内部微裂纹、微孔洞等初始损伤在应力作用下发生损伤演化、裂隙扩展最终形成宏观裂隙,从图 1 中可以直观看出岩石在应力-化学损伤作用下岩石的损伤演化过程和劣化过程.

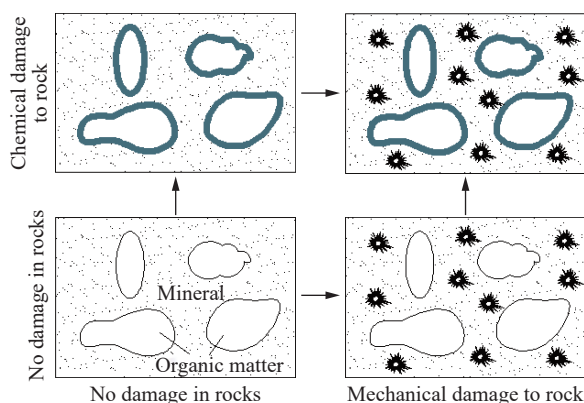


图 1 油页岩应力、化学损伤表征单元<sup>[8]</sup>

Fig.1 Characterization unit of stress and chemical damage in oil shale<sup>[8]</sup>

谭贤君等<sup>[9]</sup>将损伤加入岩石热-水-力三场耦合作用模式中,考虑了损伤对热学参数、水流参数和力学参数的影响,建立了图 2 所示的耦合作用模式图。

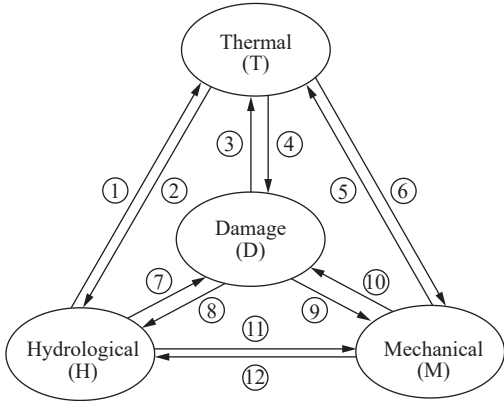


图 2 THMD 耦合作用模式  
Fig.2 THMD coupling mechanism

利用连续介质理论建立三场耦合中任意一场受其他两场影响的数学模型,用以指导迭代法分析三场耦合。在岩石三场耦合计算中使用 BB 模型和 Oda 裂隙张量理论,得出用以分析裂隙对三场耦合影响的二维有限元程序<sup>[10]</sup>。依据静力平衡理论、质量守恒和能力守恒定律,分析得出孔隙介质模型的温度-水流-应力三场耦合控制方程,用于隧道、深部采矿、核废料处置等深部工程中的温度-水流-应力 (THM) 三场耦合计算<sup>[11]</sup>。核废料处理、矿产资源深部开采、地热能源的开发以及高地温条件下的水工高压引水隧洞的多场耦合作用是目前的研究热点之一,但是前期的研究主要集中在水力耦合作用方面,对于高地温引水隧洞 (图 3),必须考虑高梯度的温度场的耦合作用对围岩的力学特性和变形破坏的影响<sup>[12]</sup>。目前研究的 THM 三场耦合计算模型考虑了弹性模型、渗透系数和热传导系数等物理力学参数,但是为了更好地反映脆性岩石的裂化特征需要进一步完善 THM 模型,用以更好地反映岩石的峰后强度变化特征。

垃圾填埋场在 THMC 多场耦合作用下的边坡失稳等工程灾害是多场耦合研究的工程实例之一,填埋场边坡失稳的多场耦合作用示意图如图 4 所示。为了减少污染物的无组织释放,降低垃圾填埋场的灾变事故,系统研究多场耦合作用下填埋场的灾变过程非常重要<sup>[13]</sup>。

岩体在 THMC 多场耦合作用下的研究,主要以岩体所处的地质条件和赋存环境为依据,以实验室试验、理论分析和数值模拟为主要方法,对岩

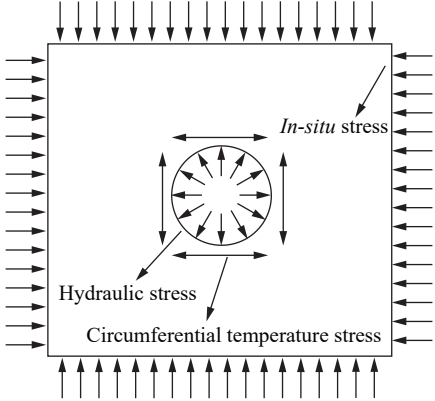


图 3 高地温隧洞受力示意图  
Fig.3 Diagram of stress on tunnel with high geothermal temperature

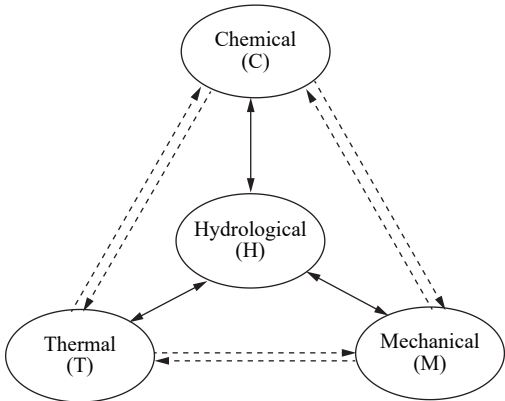


图 4 填埋场灾变过程的多物理场耦合特征示意图  
Fig.4 Schematic diagram of the characteristics of multi-physics coupling for landfill catastrophe

石多场耦合条件下的相互作用进行研究,揭示岩石多场耦合作用下的变形破坏规律和损伤演化规律。岩石多场耦合效应研究涉及地质学、损伤力学、固体力学、流体力学<sup>[14]</sup>、化学等多个学科。处在复杂环境中的多场耦合作用下的岩体称为复杂岩体,图 5 为裂隙岩体的变性特征总体描述,对复杂岩体的变形破坏机制进行研究。

1.2 深部岩石多场耦合试验

由于深部岩石处在高温、高渗透压、高地应力和复杂水化学环境中,因此岩石 THMC 多场耦合作用是当前研究的重点,多场耦合岩体常见的场及耦合关系如图 6 所示。由于流固热化学耦合作用过程非常复杂,涉及到温度对岩石力学性能影响、裂隙岩体应力响应、岩体水流特性、水岩化学反应等多个方面,学者因此开展了多项相关研究,研究了岩石多场耦合作用下岩石破坏演化机制和多场耦合效应。

在岩石多场耦合问题研究中,不同行业对于此类问题的定义和研究重点有一定差异。对于考虑水-力两场耦合的问题,有流固耦合、水-岩相互

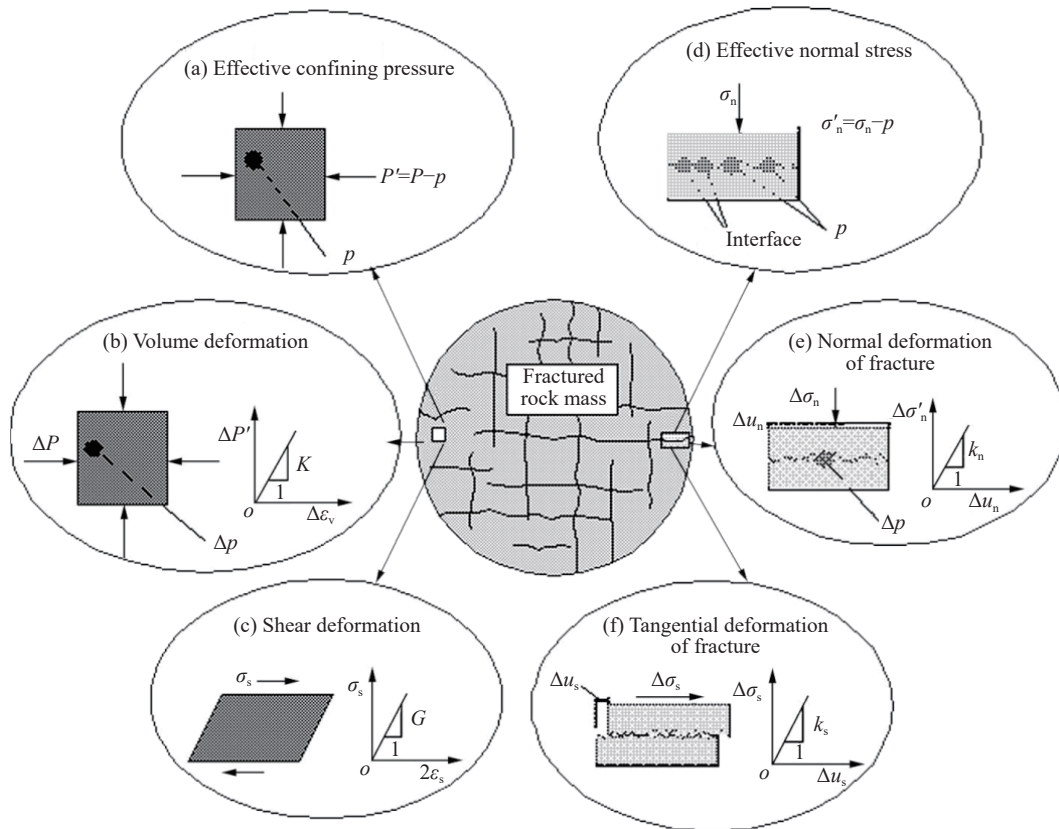


图 5 裂隙岩体变形的总体描述<sup>[15]</sup>

Fig.5 General description of fractured rock masses deformation<sup>[15]</sup>

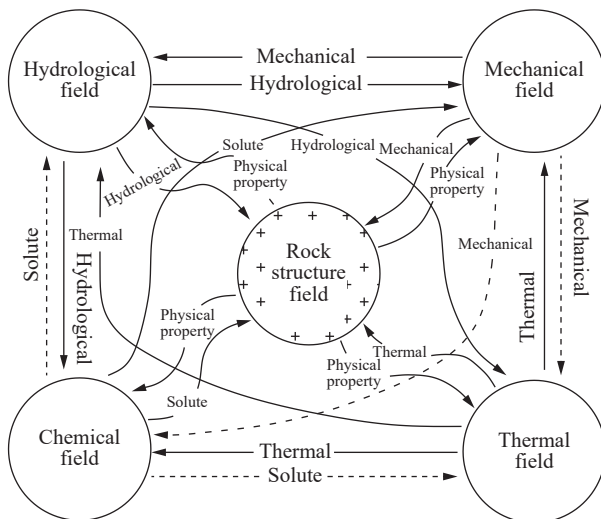


图 6 多场耦合岩体常见的场及耦合关系<sup>[16]</sup>

Fig.6 Common fields and coupling relationships of multi-field coupled rock mass<sup>[16]</sup>

作用、水-力耦合作用等不同的概念,其中流固耦合主要侧重于研究固体介质和流体之间的耦合效应和规律,水-岩相互作用则侧重于对岩石和水发生的化学反应规律及其表现的化学性能<sup>[17-18]</sup>,水-力耦合作用主要研究多场耦合中岩石在水和应力两场耦合作用下岩石的力学性能及变形破坏规律。对于核废料处置及滨海深部矿山开采等领域

的多场耦合侧重于研究岩石在温度-水-应力-化学 4 场的耦合效应<sup>[9]</sup>。地下工程现场原位试验是一个长期系统的研究过程,研究涉及岩石所处的应力场、温度场、水流场、化学场以及引入的损伤场,通过研究现场的作用机理和耦合效应,建立多场耦合本构关系,拓展多物理场的数值模拟技术。

Griggs<sup>[19]</sup> 试验研究了不同应力、围压及不同温度条件下盐岩的单轴、三轴蠕变试验,得出岩石的松弛特性并探讨了岩石的蠕变破坏准则。Malan<sup>[20]</sup> 通过试验发现对于埋深 2000 m 以上的南非金矿深部岩石,即使是坚硬的石英岩和火成岩,岩石流变效应十分显著,稳态蠕变速率达  $0.7 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  以上。徐卫亚等<sup>[21]</sup> 通过试验研究了水电站坝基绿片岩的三轴压缩流变特性,得出了不同围压时岩石的轴向应变和侧向应变的变化规律及岩石流变破坏机理,最终建立了岩石七元非线性黏弹塑性流变模型。张向东等<sup>[22]</sup> 通过泥岩分级加载散珠蠕变试验,得出岩石轴压恒定时,瞬时弹性变形和蠕变变形随着围压的增大而减小,当围压恒定时,瞬时弹性变形和蠕变变形随着轴压的增大而增大。

对于在水流和应力两场耦合作用下的岩体,考虑损伤的影响,这类问题研究开展时间较短。在

前期研究中,学者主要考虑水流-应力单纯的两场耦合作用下的岩石力学性能,研究了应力作用下岩石的渗透性能,建立了岩石应力-水流耦合关系.对于岩石在水流-应力耦合作用下的力学特征及渗透率变化规律等方面的研究主要以室内和现场试验为主要研究手段,通过对岩石全应力应变渗透率的研究可以得出其变化规律:弹性阶段岩石由于内部原生微裂隙在压力作用下被压密,渗透率随着压力的增加而降低;在弹塑性阶段随着新生微裂纹的出现及裂隙演化贯通<sup>[12]</sup>,渗透率先逐渐增加后迅速增加,在峰值前后达到最大值;在残余流动阶段,根据岩石内部孔隙发育情况,渗透率变化不稳定.因此岩石的渗透率变化与岩石的变形破坏过程密切相关,而且经过研究发现岩石的环向应变与轴向应变与渗透率演化规律的关系更大.

裂隙岩体 THM 三场耦合的相关研究最早开始于 20 世纪 80 年代,国内外学者对多场耦合作用下地下岩体的力学性能进行深入的分析和研究,提出了核废料处理及地热开发工程中多场耦合效应研究的迫切性. THM 耦合模型的研究涉及到热、水、力三个物理场,需以 TM, HM 耦合模型的研究成果为基础,但较 TM, HM 耦合问题更为复杂.对 THM 耦合模型的研究,首先需建立合理的耦合作用模式,明确所需考虑的耦合关系,在耦合作用模式的指导下,建立各场之间的耦合方程,完成耦合模型的建立.地下工程中的温度场、水流场和围岩应力场的耦合效应越来越显现,成为科研工作的重要内容之一.

1.3 岩石多场耦合力学理论研究

自然界的岩体是一种复杂的非均质材料,在长期的工程计算中主要采用的计算方法是基于材料力学和结构力学的传统强度计算理论,将复杂

的岩体假定为均质的连续各向同性材料<sup>[23]</sup>,这显然违背了自然裂隙岩体存在天然缺陷的真实情况.因此,传统的强度理论只能反映完整无损材料的力学性能,国内外学者在致力于探索可以反映损伤及含节理岩体力学性能的本构关系.

岩石强度是指岩石破坏时的应力、应变状态或抵抗破坏的极限强度,岩石的破坏是一种特殊的变形状态,失去了应有的承载能力.岩石强度与破坏密切相关,岩石破坏时的应力值即为岩石强度.岩石强度理论主要分为理论强度理论和经验强度理论(表 1).理论强度理论<sup>[24]</sup>是在材料力学和弹性力学基础上得出的,包括最大正应力强度理论、最大剪应力理论、最大正应变理论、八面体剪应力理论 4 个经典强度理论和 Mohr-Coulomb 强度理论、Griffith 和修正的 Griffith 理论以及双剪强度理论等<sup>[25]</sup>.经验强度理论是在岩石力学实验的基础上总结得出的用以近似描述岩石破坏过程的强度理论,比如 Hoek-Brown 经验强度准则.

近年来常用的岩石强度准则主要有 Hoek-Brown 强度准则、Mohr-Coulomb 强度准则、Drucker-Prage 强度准则和 Griffith 强度准则<sup>[26]</sup>.Griffith 提出固体材料实际力学强度低于理论强度原因主要为裂隙及缺陷的存在,20 世纪 50 年代, Irwin 基于应力函数推导出裂隙尖端应力场和位移场的理论解<sup>[27]</sup>,提出应力强度因子,从而奠定了断裂力学的基础.基于 Griffith 能量准则,研究分析了岩石脆性材料断裂过程中裂纹演化扩展方向与初始裂纹倾角的关系.通过对裂纹在压剪作用下的拉应力集中和压应力集中分析,正剪切裂纹在压剪作用下垂直于受力方向扩展,进而建立了压剪断裂强度理论.周家文等<sup>[28]</sup>根据最小应力强度准则确定压剪裂纹起裂角,利用 Mohr-Coulumb 强度准则

表 1 岩石强度理论<sup>[24]</sup>

Table 1 Rock strength theory<sup>[24]</sup>

| Strength theory of rock mass   |                                             |
|--------------------------------|---------------------------------------------|
| Theoretical strength criterion | Classical strength criterion                |
|                                | Maximum normal stress theory                |
|                                | Maximum positive strain theory              |
|                                | Maximum shear stress theory                 |
|                                | Octahedral shear stress theory              |
|                                | Theoretical strength criterion of rock mass |
|                                | Mohr-Coulomb strength theory                |
|                                | Griffith strength theory                    |
|                                | Double shear strength theory                |
|                                | Strength criterion of structural plane      |
| Empirical strength criterion   | Strength theory based on Mohr-Coulomb       |
|                                | Hoek-Brown strength criterion               |

和 Drucker-Prage 强度准则建立脆性岩石压剪破坏的不同判据. Tang 等<sup>[29]</sup>通过对多裂纹材料的实验研究得出岩石的裂纹扩展机理, 采用 Rock Failure Process Analysis(RFPAZa) 软件进行了数值模拟验证.

2 岩石多场耦合本构模型

2.1 多场耦合本构模型

岩石的水流-应力耦合本构模型可以从理论上定量地预测和分析岩石的水流-应力耦合行为, 相关学者主要从数学和力学两方面推导该本构模型, 通过试验和数值模拟相结合对本构模型进行验证和应用分析. 将水流-应力耦合力学模型分为六种, 分别为等效连续介质模型、双重介质模型、裂隙网络模型、连续损伤力学模型、断裂力学模型和统计模型<sup>[30]</sup>, 其中前三种从黏弹塑性本构模型出发, 侧重考虑水流场的影响, 而后三种则着重考虑水流-应力耦合对于岩石损伤及损伤演化带来的岩石内部结构的变化所产生的复杂耦合效应.

在地下矿山开采、地热资源开发等岩石多场耦合的研究中, 温度、水流、应力和化学 (THMC) 四场耦合的研究越来越重要<sup>[31]</sup>. 曾春雷<sup>[32]</sup>从质量守恒、动量平衡和能量守恒原理出发推导了 THM 三场耦合作用控制方程. 裂隙岩体在 THM 三场耦合作用时的各耦合阶段作用过程如图 7 所示<sup>[33]</sup>, 分别为: ①流体热对流作用, ②流体性质随温度变化, ③岩石内部耗散产热及应力应变引起的岩石热特性变化, ④温度诱发的应力应变, ⑤水压力对应力的影响, ⑥孔隙度和裂隙宽度变化.

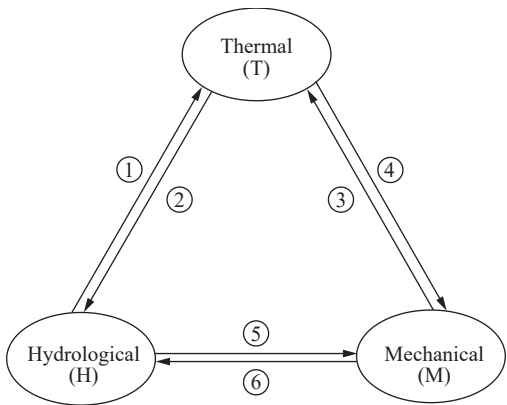


图 7 THM 耦合示意图<sup>[33]</sup>  
Fig.7 Diagram of coupled THM<sup>[33]</sup>

Bekele 等<sup>[34]</sup>研究了关于核废料处理中的三场耦合作用下裂隙岩体的变形问题, 提出了如图 8 所示的核废料储存库三场耦合作用示意图.

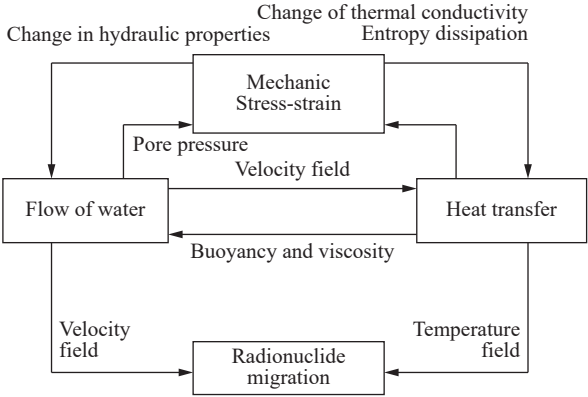


图 8 热液力过程之间的相互关系  
Fig.8 Interdependence of thermal-fluid-mechanical process

目前已有学者提出一些理论模型来研究水流-化学耦合过程或水流-应力-化学耦合过程中裂隙岩体的渗透特性演化规律. Dreybrodt 与 Buhmann<sup>[35]</sup>提出了薄膜理论模型用来研究岩石在水流-化学影响下, 方解石表面受水化学影响的溶解和沉淀机理. Taron 等<sup>[36]</sup>建立了岩石单裂隙中的水流-化学耦合作用偏微分方程组, 用来模拟岩石粗糙裂隙面的水流-化学耦合作用, 通过后数值分析可以得出岩石水流的沟道流现象和岩石水化学的不均匀性. 岩石水-化学耦合作用过程很复杂, 对于多孔岩石材料, 寻求可以全面反映岩石耦合作用及裂隙几何结构变化的数学模型, 加入岩石化学反应平衡过程的处理并建立更完善的数学模型是当前研究的两大难点. Yasuhara<sup>[37]</sup>基于岩石颗粒之间的压溶作用机制建立了集总参数模型, 用规则球形颗粒模型模拟岩石压力溶解中裂隙岩体渗透性的变化, 通过球形颗粒的压溶和裂隙压溶之间的类比关系建立岩体裂隙压溶表达式. Yeh 与 Tripathi<sup>[38]</sup>建立的岩石化学反应传输模型, 将裂隙岩体视为非均质、各向异性多孔介质, 考虑岩石在复杂水化学影响下产生的化学反应和耦合作用, 建立数学模型用以全面反映岩石溶质的运移、沉淀、氧化还原、吸附和离子交换、酸碱反应等过程<sup>[39]</sup>. 该模型的不足之处为无法反映岩石细管裂隙演化结构特征, 忽略了岩石溶解沉淀中孔隙的结构变化.

岩体在温度-水流-应力三场耦合作用下的相互交叉作用机制中, 损伤产生不可忽略的影响. 岩体裂隙的分布及其对岩石力学性能的影响是初试损伤, 三场耦合作用下的岩体裂隙演化扩展直至破坏是损伤演化. 因此在岩石多场耦合作用数学模型的建立过程中, 不可忽视细观损伤对温度-水流-应力三场耦合作用的影响. 裂隙岩体温度-水

流-应力三场耦合作用机制非常复杂,因此在考虑岩石热和水对岩石力学性能影响的同时,需要重点考虑岩石应力对岩石渗透性、热传导性及岩石力学性能的影响。岩石力学多场耦合数学模型构建基于以下假设:①岩石材料为非均质材料,裂隙岩体细观单元中损伤的分布通过数字图像扫描形成;②岩石的热传导遵从 Fourier 定律;③岩石的水流过程基于 Biot 固结理论和修正 Terzaghi 有效应力原理;④岩石中细观单元为弹脆性<sup>[40]</sup>,岩石力学性能描述使用 Mohr-Coulomb 准则、最大拉应变准则和弹性损伤理论等<sup>[41]</sup>。岩石细观单元在弹性状态下热力学不变,同时满足水流-应力应变函数,但是破坏后岩石的热传导率和渗透率发生突变。建立描述岩石单元体损伤后热传导率和渗透率的演化方程,用以描述岩石的破坏过程中温度场、水流场相互作用。

在国内研究中,许孝臣与盛金昌<sup>[42]</sup>利用分形理论建立了一组裂隙结构面,通过建立的单裂隙水流-应力-化学耦合作用的渗透性变化数学模型,计算分析了岩石单裂隙在高压水作用下的裂隙平均开度变化,得出岩石压力溶解过程中水流通道的形成。梁卫国<sup>[43]</sup>建立了溶解-固-水流-传质耦合数学模型,将三维固体变形模型和水流、扩散模型结合,得出岩石相关变量的相互作用及变化规律。陈强<sup>[44]</sup>分析了地下水的不同组分,采用化学热力学方法进一步分析了碳酸盐岩影响。周辉等<sup>[45]</sup>假定岩石由岩石基质、裂隙及球形孔隙组成,岩石孔隙均匀分布,推导得出岩石的有效孔隙度表达式,建立岩石细观统计水流模型,将岩石裂纹演化中渗透性视为非线性动态过程,综合考虑岩石裂纹演化和水流的耦合作用。

多场耦合作用下裂隙岩体的水流性能随着时间发生较大变化,因此研究裂隙岩体水流场和应力场耦合作用下的时间效应对于工程稳定性分析具有一定的指导意义。有学者采用等效连续介质模型对岩石流固耦合作用下的流变效应进行研究,得出岩石耦合条件下的流变数学模型,并根据编制的有限元程序进行分析。

岩石的温度-水流-化学-应力耦合作用是岩石多场耦合研究中的难点,国内外对流固热化学多场耦合作用下的裂隙岩体的力学性能、渗透性能和数学模型的研究非常复杂<sup>[7]</sup>,需要综合采用微观研究、物理试验、数学模型分析和数值模拟分析等方法来揭示岩石多场耦合作用机理。建立岩石热力学方程、水流方程、力学方程、化学多组

分运移方程等多场耦合数学模型,开发合理的数值模拟方法。岩石力学多场耦合作用研究不仅要宏观角度分析,也要建立微观、细观孔隙结构的数学模型来计算和模拟耦合过程,建立微观-细观-宏观多尺度耦合过程分析理论和方法。刘泽佳等<sup>[46]</sup>建立了多孔介质温度-水流-力学-化学(THMC)耦合过程本构模型,同时发展了岩石耦合研究的数值模拟方法。王炳印等<sup>[47]</sup>考虑泥页岩地层的温度-孔隙压力-力学-泥页岩水化学耦合作用,建立了耦合数学模型。

## 2.2 深部岩石蠕变本构模型研究

岩石在多场耦合作用下的流变现象是当前岩石力学研究的重点之一,学者致力于寻求岩石在温度-水流-应力-化学多场耦合作用下的力学效应,建立合理的流变模型<sup>[48]</sup>。只有通过系列岩石流变试验研究,建立能够反映岩石流变性能的本构模型,建立正确合理的本构方程,才能更加准确地描述岩石的流变性能,为现场实际工程提供指导。在岩石流变性能研究中,多种不同类型的流变本构模型得到应用,以下对几种重点流变模型进行介绍。

岩石含水量对于蠕变特性的影响较大<sup>[49]</sup>,水会影响岩石的顺势弹性变形、蠕变变形时间和蠕变变形量等<sup>[50]</sup>。对于岩石含水量对岩石蠕变的影响通常采用的方法是用干燥岩石试件和饱水岩石试件,对比两种含水状态下岩石的蠕变特性,定性分析水对岩石蠕变特性的影响。由于岩石所处的含水状态不一定是完全干燥或饱水状态,因此研究岩石含水率对岩石力学性能的影响,并建立岩石含水率的蠕变模型具有重要的意义。对于地下工程,岩石所处的地下水中往往含有化学离子,因此研究这些化学酸碱性腐蚀离子对岩石力学性能(包括蠕变特性)的影响也是重要研究方向之一。岩石所处环境的干湿循环和水流对岩石流变性能的影响主要采用岩石全自动流变伺服试验机,分析水对岩石蠕变变形和渗透特性的影响。

对于深部地下工程、地热能开发和核废料地下储存等工程的开展,岩石在温度和时间共同作用下的力学性能的变化规律需要进一步研究。刘泉声等<sup>[51]</sup>考虑岩石受温度影响时的热、黏弹塑性,通过试验研究了7种不同温度作用下岩石单轴压缩蠕变随温度的变化关系,建立了流变模型。徐伟亚与杨圣奇<sup>[52]</sup>对节理岩石进行了剪切流变试验,得出节理岩石的长期抗剪强度参数<sup>[53]</sup>。近年来,三轴流变仪<sup>[54]</sup>和岩石流变扰动效应试验仪的

使用, 为岩石开展不同条件下的蠕变性能研究提供了更为稳定和精确的实验设备。

通过岩石流变试验建立岩石流变本构模型是岩石流变学的内容之一<sup>[55]</sup>, 岩石流变本构模型即岩石应力-应变-时间的关系模型, 可以反映岩石的流变特性, 只有建立正确的本构模型才能更准确地描述岩石流变特性<sup>[56]</sup>。

#### (1) 经验本构模型。

经验本构模型主要是通过岩石力学流变试验得出岩石应力、应变与时间的函数关系式, 比如幂函数型本构关系式、对数型本构关系式、指数型本构关系式和多项式函数关系式<sup>[57]</sup>。岩石的蠕变过程主要可以分为减速蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段, 其中加速蠕变阶段时间很短<sup>[58]</sup>。

#### (2) 元件组合模型。

元件组合模型是通过不同元件的组合形成可以描述岩石蠕变特性的本构模型, 对于本构模型的基本元件包括胡克体元件、牛顿粘性体元件、圣维南体元件等, 通过岩石蠕变试验和松弛试验可以获得岩石应力-应变-时间关系曲线, 分析岩石蠕变过程中的弹性、黏性和塑性特征, 建立元件组合流变本构模型。本构模型中使用较多的模型有伯格斯模型、西原模型、宾汉姆模型、马克斯威模型和开尔文模型等<sup>[59]</sup>。

由于线性流变元件的组合模型是线性的, 为了更好地描述岩石流变的非线性特征, 在组合模型中将线性元件改成非线性元件是当前研究的重点方向。通过引入非线性元件, 构建不同的改进非线性流变模型, 更全面地描述岩石的蠕变全过程<sup>[60]</sup>。

#### (3) 积分形式的流变模型。

积分型流变模型是积分形式的岩石本构模型、蠕变方程和松弛方程, 能更好地描述变应力作用下岩石的流变特性<sup>[61]</sup>。积分型本构模型是在遗传流变理论的基础上推导得出的, 考虑了岩石之前的受力和变形情况。岩石非线性积分本构模型可以较好地描述岩石减速蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段<sup>[62]</sup>。

#### (4) 损伤流变模型。

岩体内部包含不同尺度的裂隙缺陷, 研究岩石在耦合作用下的蠕变特性, 需要考虑损伤力学理论和方法, 构建岩石时效变形中的损伤演化、扩展本构模型是近年来发展的岩石流变本构发展的重要内容。徐海滨等<sup>[63]</sup>通过研究岩石损伤和变形之间的关系建立了损伤演化方程。朱维申等<sup>[64]</sup>将损伤力学中应变等效引入, 建立了裂隙岩体损伤

耦合效应黏弹-黏塑性流变本构模型。

### 3 结论与展望

本文总结分析了国内外关于裂隙岩体在温度-水力-应力-化学 (THMC) 多场耦合作用下岩石的裂隙演化、变形力学机制、力学本构和耦合模型构建等方面的研究, 分析探讨了岩石在多场耦合作用下研究的重、难点。未来岩石多场耦合作用的研究方向和研究重点主要集中在:

(1) 不同尺度的多物理化学场耦合的数学模型与分析方法。

岩石多场耦合作用研究需要综合考虑不同尺度岩石的赋存条件, 通过对不同尺度岩石所处多种物理场环境的模拟, 从微观-细观-宏观多尺度研究多场耦合作用机理, 为不同领域多场耦合作用下的工程实际问题的解决提供参考。

(2) 综合考虑温度-水流-应力-化学 (THMC) 全耦合过程或考虑耦合效应。

岩石温度-水流-应力-化学 (THMC) 的研究还处在初始阶段, 目前这方面的研究主要集中在垃圾处理场的 THMC 多场耦合效应和核废料处置 THMC 多场耦合方面, 对于地下空间开发和矿产资源深部开采在 THMC 多场耦合等领域的耦合作用机理研究还需进一步开展。岩石 THMC 多场耦合作用的研究难点在于化学场的引入, 在之前的研究中, 学者认为岩石在水化学作用下的力学性能变化是微小的, 然而对于受海水影响的深部岩体、滨海矿产资源开采和地下空间开发等化学场作用不可忽略的条件下岩石的多场耦合作用研究还较少, 这将是未来岩石多场耦合研究的重点和难点。

(3) 多场耦合作用下的智能化。

针对深部岩石所处的温度场-水流场-应力场-化学场的分布特点及耦合作用机理、综合防治技术资源高效开采和综合利用等关键问题, 研究以应力为主导的能量调控技术、高温控制和利用技术、水资源控制和利用技术, 制定多场耦合作用下的金属矿深部智能开采战略。研究深部岩石的多场耦合作用机理, 提出多场耦合作用下岩石灾害识别精准控制方法, 通过岩石多场环境的智能识别和感知理论方法, 建立深部矿产资源开采及地下空间开发的智能化理论和技术体系。

(4) 多学科的联合及交叉学科的综合。

岩石多场耦合作用主要考虑温度-水流-应力-化学 4 个场, 而工程现场的岩体是一个复杂的系

统工程, 很难通过简单的模型构建来精确地还原现场实际情况。因此, 在研究岩石多场耦合作用过程中, 需要计算机科学、环境科学、化学科学、地球物理、流体力学等学科的联合, 通过不同学科知识的综合以更准确地分析多场耦合的机理及作用机制, 从而得出更能反映真实情况的结果。在多场耦合研究过程中, 要吸收国内外的最新研究成果, 以更先进的装置、设备以及计算机软件等, 为深入研究深部岩体复杂的多场耦合作用提供支持。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou C B, Chen Y F, Jiang Q H, et al. A generalized multi-field coupling approach and its application to stability and deformation control of a high slope. *J Rock Mech Geotech Eng*, 2011, 3(3): 193
- [2] Su B Y, Zhang W J, Sheng J C, et al. Study of permeability in single fracture under effects of coupled fluid flow and chemical dissolution. *Rock Soil Mech*, 2010, 31(11): 3361  
(速宝玉, 张文捷, 盛金昌, 等. 渗流-化学溶解耦合作用下岩石单裂隙渗透特性研究. 岩土力学, 2010, 31(11): 3361)
- [3] Qin Z H. *Study of Load-Bearing Characteristics of Surrounding Rock of Hydraulic Tunnels under High Geotemperature and Hydraulic Pressure Conditions Using Coupled THMD Numerical Model*[Dissertation]. Nanning: Guangxi University, 2016  
(秦子华. 基于热-水-损伤耦合模型的高地温土工高压隧洞围岩承载特性数值模拟研究[学位论文]. 南宁: 广西大学, 2016)
- [4] Yang Y L, Zheng K Y, Li Z W, et al. Experimental study on pore-fracture evolution law in the thermal damage process of coal. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2019, 116: 13
- [5] Hudson J A, Jing L. Demonstration of coupled models and their validation against experiment: the current phase DECOVALEX 2015//*Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods—Proceedings of the 3rd ISRM SINOROCK, Symposium*. Shanghai, 2013: 391
- [6] Zhou H, Feng X T. Research progress in rock stress-hydraulic-chemical coupling process. *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(4): 855  
(周辉, 冯夏庭. 岩石应力-水力-化学耦合过程研究进展. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 855)
- [7] Pan P Z, Feng X T, Huang X H, et al. Coupled THM processes in EDZ of crystalline rocks using an elasto-plastic cellular automaton. *Environ Geol*, 2009, 57(6): 1299
- [8] Li K. *Hydrothermal Coupling Model and Hydraulic Fracturing Law of Oil Shale in Situ Mining*[Dissertation]. Fuxing: Liaoning University of Engineering and Technology, 2011  
(李凯. 油页岩原位开采水热力耦合模型与水力压裂规律研究[学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011)
- [9] Tan X J, Chen W Z, Wu G J, et al. Study of thermo-hydro-mechanical-damage (THMD) coupled model in the condition of freeze-thaw cycles and its application to cold region tunnels. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(2): 239  
(谭贤君, 陈卫忠, 伍国军, 等. 低温冻融条件下岩体温度-渗流-应力-损伤(THMD)耦合模型研究及其在寒区隧道中的应用. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 239)
- [10] Yang J H, Zhang G, Qiao T, et al. Establishment and verification of rock damage mechanics model under the coupled thermo-hydro-mechanical effect. *J Saf Sci Technol*, 2017, 13(4): 87  
(杨金辉, 章光, 乔彤, 等. 热-水-力耦合作用下岩石损伤力学模型与验证. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(4): 87)
- [11] Hsieh P A, Neuman S P, Stiles G K, et al. Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media: 2. Methodology and application to fractured rocks. *Water Resour Res*, 1985, 21(11): 1667
- [12] Yang J B, Feng X T, Pan P Z. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(6): 1629  
(杨金保, 冯夏庭, 潘鹏志. 考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究. 岩土力学, 2013, 34(6): 1629)
- [13] He H J, Lan J W, Chen Y M, et al. Monitoring and analysis of slope slip process at a landfill in Northwest China. *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37(9): 1721  
(何海杰, 兰吉武, 陈云敏, 等. 西北地区某填埋场堆体滑移过程监测与分析. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1721)
- [14] Zhao Y, Yang D, Feng Z, et al. Multi-field coupling theory of porous media and its applications to resources and energy engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2008, 27(7): 1321  
(赵阳升, 杨栋, 冯增朝, 等. 多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1321)
- [15] Müller C, Frühwirth T, Haase D, et al. Modeling deformation and damage of rock salt using the discrete element method. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2018, 103: 230
- [16] Shi B. On fields and their coupling in engineering geology. *J Eng Geol*, 2013, 21(5): 673  
(施斌. 论工程地质中的场及其多场耦合. 工程地质学报, 2013, 21(5): 673)
- [17] Zhou C B, Chen Y F, Jiang Q H, et al. On generalized multi-field coupling for fractured rock masses and its applications to rock engineering. *Chin J Rock Mech Eng*, 2008, 27(7): 1329  
(周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 论岩体多场广义耦合及其工程应用. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1329)
- [18] Zhou C Y, Peng Z Y, Shang W, et al. On the key problem of the water-rock interaction in geoengineering: mechanical variability of special weak rocks and some development trends. *Rock Soil Mech*, 2002, 23(1): 124  
(周翠英, 彭泽英, 尚伟, 等. 论岩土工程中水-岩相互作用研究的焦点问题——特殊软岩的力学变异性. 岩土力学, 2002, 23(1): 124)
- [19] Griggs D. Creep of rocks. *J Geol*, 1939, 47(3): 225
- [20] Malan D F. Manuel Rocha medal recipient simulating the time-

- dependent behaviour of excavations in hard rock. *Rock Mech Rock Eng*, 2002, 35(4): 225
- [21] Xu W Y, Yang S Q, Xie S Y, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (II): model analysis. *Rock Soil Mech*, 2005, 26(5): 693  
(徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究 (II): 模型分析. 岩土力学, 2005, 26(5): 693)
- [22] Zhang X D, Yin X W, Fu Q. Study of triaxial creep properties of purple mudstone under stepwise loading. *J Exp Mech*, 2011, 26(1): 61  
(张向东, 尹晓文, 傅强. 分级加载条件下紫色泥岩三轴蠕变特性研究. 实验力学, 2011, 26(1): 61)
- [23] Espada M, Lamas L. Back analysis procedure for identification of anisotropic elastic parameters of overcored rock specimens. *Rock Mech Rock Eng*, 2017, 50(3): 513
- [24] Wang Y M. *Analysis of Temperature on the Mechanical Properties of Granite Experimental Study on Effect and the Hole Wall Stability*[Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012  
(王艳梅. 温度对花岗岩力学性能影响实验研究及井壁稳定性的分析[学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012)
- [25] Rukhaiyar S, Samadhiya N K. Strength behaviour of sandstone subjected to polyaxial state of stress. *Int J Min Sci Technol*, 2017, 27(6): 889
- [26] Huang D, Gu D M, Yang C, et al. Investigation on mechanical behaviors of sandstone with two preexisting flaws under triaxial compression. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49(2): 375
- [27] Ewalds H L, Waanhill R J. *Fracture Mechanics*. London: Edward Arnold, 1984
- [28] Zhou J W, Xu W Y, Shi C. Investigation on compression-shear fracture criterion of rock based on failure criteria. *Chin J Rock Mech Eng*, 2007, 26(6): 1194  
(周家文, 徐卫亚, 石崇. 基于破坏准则的岩石压剪断裂判据研究. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1194)
- [29] Tang C A, Lin P, Wong R H C, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws—part II: numerical approach. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2001, 38(7): 925
- [30] Liu G. *Pore-Scale Modeling on Hydro-Mechanical Coupling Effects of Geotechnical Materials*[Dissertation]. Wuhan: Wuhan University, 2016  
(刘广. 岩土孔隙尺度水力耦合特性细观模拟研究[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2016)
- [31] Yan B, Ren F, Cai M, et al. Bayesian model based on Markov chain Monte Carlo for identifying mine water sources in submarine gold mining. *J Clean Prod*, 2020, 253: 120008
- [32] Zeng C L. *Study on Mechanical Behavior of Soft Rock in Coupled Effect of High Temperature, High Pressure and Seepage*[Dissertation]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2007  
(曾春雷. 高温、高压和渗流耦合作用下软岩力学行为的研究[学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2007)
- [33] Wang Z J. *Damage Evolution Characteristics and the Accumulation Damage Model of Sandstone under Dry-Wet Cycle*[Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2016  
(王子娟. 干湿循环作用下砂岩的宏观损伤演化及本构模型研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016)
- [34] Bekele Y W, Kyokawa H, Kvarving A M, et al. Isogeometric analysis of THM coupled processes in ground freezing. *Comput Geotech*, 2017, 88: 129
- [35] Dreybrodt W, Buhmann D. A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion. *Chem Geol*, 1991, 90(1-2): 107
- [36] Taron J, Elsworth D, Min K B. Numerical simulation of thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in deformable, fractured porous media. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46(5): 842
- [37] Yasuhara H, Elsworth D, Polak A. Evolution of permeability in a natural fracture: significant role of pressure solution. *J Geophys Res Solid Earth*, 2004, 109(B3): B03204
- [38] Yeh G T, Tripathi V S. A model for simulating transport of reactive multispecies components: model development and demonstration. *Water Resour Res*, 1991, 27(12): 3075
- [39] Sheng J C, Xu X C, Yao D S, et al. Advances in permeability evolution in fractured rocks during hydro-mechanical-chemical processes. *Chin J Geotech Eng*, 2011, 33(7): 996  
(盛金昌, 许孝臣, 姚德生, 等. 流固化学耦合作用下裂隙岩体渗透特性研究进展. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 996)
- [40] Wang B F, Sun K M, Liang B, et al. Experimental research on the mechanical character of deep mining rocks in THM coupling condition. *Energy Sources, Part A*, 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1571125>
- [41] Liu H L, Yang T H, Zhu W C, et al. Investigation on failure and water inrush from roof of 5th Coal Seam in Fanggezhuang Coal Mine. *J Min Saf Eng*, 2009, 26(3): 332  
(刘洪磊, 杨天鸿, 朱万成, 等. 范各庄矿5煤顶板破坏及突水模拟研究. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 332)
- [42] Xu X C, Sheng J C. Permeability of single fracture under coupled hydrological-mechanical-chemical action. *J Liaoning Tech Univ Nat Sci*, 2009, 28(Suppl): 270  
(许孝臣, 盛金昌. 渗流-应力-化学耦合作用下单裂隙渗透特性. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(增刊): 270)
- [43] Liang W G. Study on multi-field coupling theory and its application of hydraulic fracturing and solution mining for salt deposits. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(6): 1090  
(梁卫国. 盐类矿床水压致裂水溶开采的多场耦合理论及应用研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1090)
- [44] Chen Q. *Systemic Study on Engineering Geology of Long Tunnel in Karst and Gas-Storing Area*[Dissertation]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005  
(陈强. 岩溶储气长隧道工程地质系统研究[学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2005)
- [45] Zhou H, Shao J F, Feng X T, et al. Research on statistical

- penetration meso-model of rock ——Part II: case analysis. *Rock Soil Mech*, 2006, 27(1): 123  
(周辉, 邵建富, 冯夏庭, 等. 岩石细观统计渗流模型研究(II): 实例分析. 岩土力学, 2006, 27(1): 123)
- [46] 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. *Chin J Geotech Eng*, 2004, 26(6): 797  
(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. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 797)
- [47] Wang B Y, Yu B H, Zhang Y Q. The influence of temperature on borehole stability. *Inner Mongolia Petrochem Ind*, 2008(8): 129  
(王炳印, 蔚宝华, 张跃群. 泥页岩地层井壁失稳的一种新机理. 内蒙古石油化工, 2008(8): 129)
- [48] Ma L J, Wang M Y, Zhang N, et al. A variable-parameter creep damage model incorporating the effects of loading frequency for rock salt and its application in a bedded storage cavern. *Rock Mech Rock Eng*, 2017, 50(9): 2495
- [49] Yan B, Guo Q, Ren F, et al. Modified Nishihara model and experimental verification of deep rock mass under the water-rock interaction. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2020, 128: 104250
- [50] Andargoli M B E, Shahriar K, Ramezanzadeh A, et al. The analysis of dates obtained from long-term creep tests to determine creep coefficients of rock salt. *Bull Eng Geol Environ*, 2019, 78(3): 1617
- [51] Liu X W, Liu Q S, Lu C B, et al. A numerical manifold method for fracture propagation of rock mass considering thermo-mechanical coupling. *Chin J Rock Mech Eng*, 2014, 33(7): 1432  
(刘学伟, 刘泉声, 卢超波, 等. 温度-应力耦合作用下岩体裂隙扩展的数值流形方法研究. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1432)
- [52] Xu W Y, Yang S Q. Experiment and modeling investigation on shear rheological property of joint rock. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(Suppl 2): 5536  
(徐卫亚, 杨圣奇. 节理岩石剪切流变特性试验与模型研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5536)
- [53] Zhang Y, Xiong L X. Rock rheological mechanics: present state of research and its direction of development. *J Geomech*, 2008, 14(3): 274  
(张尧, 熊良宵. 岩石流变力学的研究现状及其发展方向. 地质力学学报, 2008, 14(3): 274)
- [54] Liu Q S, Luo C Y, Chen Z Y, et al. Development of triaxial rheological testing equipment for in-situ rock mass. *Rock Soil Mech*, 2018, 39(Suppl 2): 473  
(刘泉声, 罗慈友, 陈自由, 等. 现场岩体三轴流变试验设备研制. 岩土力学, 2018, 39(增刊2): 473)
- [55] Zhang C L. *Multi-Field Coupling Analysis of Deep Rock Mass and Unloading Study on Underground Excavation*[Dissertation]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007  
(张成良. 深部岩体多场耦合分析及地下空间开挖卸荷研究[学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2007)
- [56] Liu L, Xu W Y, Wang H L, et al. Permeability evolution of granite gneiss during triaxial creep tests. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49(9): 3455
- [57] Li F X. *Experimental Study on Nonlinear Three-Dimensional Rheological Constitutive Model of  $Q_3$  Remolded-Loess and Its Implementation in FLAC3D*[Dissertation]. Xi'an: Chang'an University, 2016  
(李飞霞.  $Q_3$ 重塑黄土三维非线性流变本构模型试验研究及其在FLAC3D中的实现[学位论文]. 西安: 长安大学, 2016)
- [58] Zhang Z L, Xu W Y, Wang W. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba Hydropower Station. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(1): 132  
(张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 132)
- [59] Bertram A, Glüge R. *Solid Mechanics*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015
- [60] Zhao Y L, Wang Y X, Wang W J, et al. Modeling of non-linear rheological behavior of hard rock using triaxial rheological experiment. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2017, 93: 66
- [61] Liu X R, Yang X, Wang J B. A nonlinear creep model of rock salt and its numerical implement in FLAC<sup>3D</sup>. *Adv Mater Sci Eng*, 2015: 285158
- [62] Zhao Y L, Zhang L Y, Wang W J, et al. Creep behavior of intact and cracked limestone under multi-level loading and unloading cycles. *Rock Mech Rock Eng*, 2017, 50(6): 1409
- [63] Xu H B, Zhu W S, Bai S W. A visco-elastic-plastic-damage constitutive model of rock masses and its finite element analysis. *Rock Soil Mech*, 1992, 13(1): 11  
(徐海滨, 朱维申, 白世伟. 岩体粘弹塑性-损伤本构模型及其有限元分析. 岩土力学, 1992, 13(1): 11)
- [64] Zhu W S, Zheng W H, Wang W T. Numerical simulation of a new damage rheology model for jointed rock mass. *Chin J Geotech Eng*, 2010, 32(7): 1011  
(朱维申, 郑文华, 王文涛. 新型节理岩体损伤流变模型数值模拟研究. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1011)