

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0305-16

多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究

刘泉声, 刘学伟

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

摘 要: 裂隙岩体热-水-应力 (THM) 耦合是目前研究的热点和难点。首先总结了裂隙岩体多场耦合的机制、模型、方法及研究内容, 并通过分析裂隙对 THM 耦合的重要控制作用, 提出了在 THM 耦合中考虑裂隙网络扩展演化及模拟的关键问题, 同时指出了研究的 3 个关键点: (1) 建立考虑裂隙网络演化的耦合模型; (2) 裂隙扩展的数值模拟方法; (3) THM 耦合及岩体变形、失稳全过程的数值模拟算法。随后通过对模拟多场耦合和裂隙扩展数值方法的归类比较, 重点论述了目前适用于模拟多场耦合下裂隙扩展模拟的各种数值方法 (包括有限单元法、无单元法、单位分解法、离散单元法、岩石破裂过程分析方法和数值流形方法) 的优缺点, 并通过对比研究, 推荐采用数值流形方法 (NMM) 来实现对关键问题的模拟研究。最后, 对研究思路和难点进行了初步探讨。

关 键 词: 裂隙岩体; 多场耦合; 裂隙扩展; 数值模拟; 数值流形方法 (NMM)

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multifield coupling of fractured rock mass

LIU Quan-sheng, LIU Xue-wei

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

Abstract: It is hot and difficult point that research on thermo-hydro-mechanical (THM) coupling for fractured rock mass at present. Firstly, the research status of mechanism, models, numerical simulation methods and contents for multifield coupling of fractured rock mass are summarized. Meanwhile, the significant effect on THM coupling of fractures is analyzed. As a result, the critical problem considering the fracture network propagation and its simulation during the THM coupling is proposed. Furthermore, 3 critical points are pointed out: (1) building the THM coupling model which can consider the fracture network propagation; (2) selecting numerical simulation method of simulating fracture propagation; (3) proposing the simulation algorithm for THM coupling and the whole process of rock mass from deformation to collapse. Then, the numerical methods for simulating coupling and fracture propagation are classified and compared; therefore, the various numerical methods, including finite element method, element-free method, partition of unity method, discrete element method, rock fracture process analysis method and numerical manifold method, are discussed thoroughly and particularly, from the advantages and disadvantages. Following, the numerical manifold method (NMM) is recommended for solving the critical problem. Finally, some ways and difficulties of the work are discussed preliminarily.

Key words: fractured rock mass; multifield coupling; fracture propagation; numerical simulation; numerical manifold method (NMM)

1 引 言

随着社会的发展, 工程建设活动遇到的岩体稳定性问题引起人们的极大关注, 如高放废物深地质处

置、深埋隧道工程建设、增强地热系统、CO₂ 地质封存和油气开采等。工程岩体通常处于复杂的地质环境之中, 岩体的安全性受到各种因素的影响。其中热 (thermal)、水 (hydrological)、力 (mechanical)

收稿日期: 2012-12-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 41130742); 中国科学院重点部署项目资助 (No. KZZD-EW-05-03); 国家自然科学基金青年项目 (No. 41202224)。

第一作者简介: 刘泉声, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事裂隙岩体温度-水力-应力耦合分析等方面的教学与研究工作。

E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

通讯作者: 刘学伟, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事岩体裂隙网络扩展过程数值模拟方法的研究工作。E-mail: Liuxw87@126.com

是地质环境中的3个主要因素,且三者之间相互影响、相互作用和相互制约,形成了岩体温度场、渗流场和应力场的三场(THM)耦合效应。

研究表明^[1],工程扰动引起的THM作用下裂隙萌生、扩展及其相互贯通成为威胁工程岩体安全性和稳定性的主要因素。例如,高放废物深地质处置库关闭后,在高放废物衰变放热及开挖损伤区应力重分布作用下,极易引发处置库围岩裂隙萌生和扩展,进而改变处置库围岩渗流通道和渗流场,最后直接影响高放废物放置后的性能,并对处置库安全及自然环境造成重大威胁^[2-4]。因此,考虑耦合作用下的裂隙扩展演化的研究具有较强的理论与实际意义,而这一研究过程包含两方面的内容:一是建立THM耦合作用下的裂隙萌生、扩展数学模型,目前这一方面内容鲜有研究;另一方面,选取合适的数值模拟方法,目前模拟裂隙扩展和多场耦合的数值方法纷繁杂乱,选择一个有力的数值工具对研究工作往往能起到事半功倍的效果。

本文从裂隙岩体THM耦合机制、研究方法及内容等领域对国内外多场耦合研究状况进行介绍,通过分析裂隙在耦合过程中的重要作用,提出了研究THM耦合作用下岩体裂隙网络扩展演化机制及模拟的关键问题,同时系统地总结了目前可以用于模拟多场耦合下裂隙扩展的数值方法。并以此为出发点,推荐采用数值流形方法作为多场耦合和耦合作用下裂隙扩展的模拟手段,最后对研究思路和难点进行了探讨。

2 耦合作用下裂隙扩展演化关键问题的提出

2.1 THM耦合研究状况

多场是指岩体中包含的应力场、渗流场和温度场等的统称,耦合则是复杂系统中各场之间的相互作用和影响。目前针对裂隙岩体THM耦合问题,国内外开展了大量的研究^[5],其中国际合作项目DECOVALEX代表了目前THM耦合的最高水平,经过近20年的系统研究,各国家小组已在THM耦合作用机制、试验及数值模拟方法上取得了丰硕成果。以此为起点,多年来,学者们对于裂隙岩体THM耦合机制的研究基本达成共识:由于岩体富含的裂隙、孔隙通常被流体所充满,在外界应力和流体压力共同作用下会引起岩体裂隙张开、闭合,使得有效隙宽发生变化,从而导致渗透率演化及渗流场的变化,渗透性的变化又引起应力场的变化,同时改变了温度梯度而影响到温度场分布,岩体中的温度

场、应力场和渗流场三者之间形成一个相互影响不断耦合的作用过程^[6-7]。

由于岩体的复杂性和长时间尺度,为了更好地认识岩体耦合行为,数学模型及数值分析方法显得尤为重要。在研究方法上,现有研究对于裂隙岩体THM耦合的求解模型主要集中为等效连续介质模型、裂隙网络模型和双重介质模型3种^[8-10],并根据上述模型所建立的数学方程,采用众多数值手段来模拟岩体的多场耦合效应^[11-15]。在研究内容上,早期多场耦合研究主要集中在水-力耦合上^[16],通过研究应力作用下渗透演化机制来建立应力和渗流之间的耦合关系^[17-19];考虑温度场时的研究重点在于通过试验来确定温度对岩体及渗流各参数的影响^[15,20]。随着研究的深入以及工程的需要,岩体中存在的多相(主要是水-汽)流^[21]及考虑永久冻土、冻岩效应的水冰相作用^[22]也逐渐融入多场耦合的研究范畴。另外,近10年来的研究在传统THM耦合的基础上,又增加了考虑化学及损伤效应的化学场(chemical)和损伤场(damage)作用。其中2003年开始的DECOVALEX-THMC项目^[5]极大地促进了化学场的研究工作。目前化学场的主要研究内容及难点在于化学溶液对岩体参数影响分析^[23-25],以及化学场作用下矿物的搬运堆积对裂隙有效隙宽影响,从而造成岩体的渗透演化机制研究^[26-27]。损伤场的研究主要是通过建立损伤因子来描述多场耦合过程中材料参数的变化,其中包括温度、化学及材料破坏造成的损伤等^[28-31]。

多场耦合中损伤场的引入,其主要目的是将耦合作用下的材料劣化及裂隙萌生或扩展进行一个量化地描述,使得模拟和预测更加符合工程实际。然而目前多场耦合中考虑损伤场的研究大多基于等效连续介质模型,通过参数表征裂隙对耦合效应的影响,规避了真实的裂隙,大大弱化了裂隙在耦合过程中的重要作用。

2.2 裂隙的作用

诱发岩体破裂失稳的主要因素是岩体中裂隙的扩展贯通作用。在THM耦合过程中,裂隙的分布、贯通状况及隙宽直接影响着岩体区域的应力、温度和渗流场分布。因此,岩体中裂隙的作用一直备受研究者关注。

Rutqvist等^[7]指出,在多场耦合中正应力引起的裂隙开闭是耦合的主要机制;黄涛^[32]通过对裂隙岩体渗流-应力-温度耦合研究认为,正是裂隙的存在使得THM耦合得以实现,即当裂隙中渗流产生的热量转移及裂隙面变形,在适当的地质环境下就会

产生耦合作用;张玉军^[33]建立了用于分析存在不连续面热-水-应力耦合弹塑性问题的有限元模型,并通过算例表明,不连续面对岩体中的位移场、应力场和渗流场产生很大的影响;唐春安等^[34]认为,在热-水-力耦合作用下的岩石(岩体)破裂过程演化将直接影响高放射性废料地质处置库周围围岩的热力学特性、渗流特性和力学稳定性;井兰如等^[35]提出多场耦合研究的独特性主要表现为岩石构造面和构造面系统对几乎所有岩石力学问题的控制性影响;Oda等^[1]通过研究发现,在THM耦合作用下,当拉应力和剪应力较高时,裂隙会在尖端产生开裂,同时裂隙附近的岩块会有新裂隙的萌生,这些变化均会对应力分布、渗流过程产生显著影响;Latham等^[36]通过建立地质力学与渗流模型,采用有限元-离散元联合方法(the combined finite-discrete element method, FEMDEM),模拟了岩体中裂隙在应力作用下的渗透演化规律,发现应力作用下裂隙发生的剪胀、翼裂隙萌生及新裂隙之间的相互连通均有效地增加了岩体裂隙渗透性。

2.3 关键问题

上述分析表明,裂隙在多场耦合过程中具有举足轻重的地位。然而,目前关于THM耦合的研究一般局限于既有裂隙网络的数值重建,即耦合过程是在已知裂隙网络内发生的,较少地考虑裂隙网络扩展演化及至失稳对耦合过程的影响,由此笔者提出了THM耦合作用下岩体裂隙网络扩展演化机制及模拟的关键问题。

对于这一关键问题,唐春安等^[34]曾撰文论述高放废深地质处置中多场耦合作用下的岩石破裂问题,并建立了一种描述热-水-力耦合条件下岩石破裂演化过程的细观力学模型,来揭示THM耦合条件下宏观岩体结构破坏行为;朱万成等^[37]在多场耦合分析方程中引入损伤变量,提出岩体损伤过程中的THM耦合模型;李连崇等^[38]从岩石的细观非均匀特点出发,探讨了THM耦合作用下岩石材料的细观结构损伤及其诱发的材料力学性能演化机制;Li等^[29]建立了THM耦合损伤模型,通过损伤变量对耦合参数的影响来描述THM耦合过程中裂隙演化的影响。上述理论认为,细观非均质性是造成材料宏观非线性根本原因,耦合过程变化是损伤的累积,该理论模型对岩石的损伤破裂过程模拟适用性较好,但其在表征真实裂隙及模拟宏观裂隙造成的块体失稳时的适用性则存在一定欠缺。

因此,若要系统研究考虑裂隙扩展演化的THM耦合过程,需要重点分析以下3个关键点。①基于

裂隙岩体流体压力、地应力、温度应力共同作用下的岩石破裂分析,构建裂隙的萌生扩展、搭接成网、网络贯通、主裂隙带破坏的演化模型,建立裂隙网络演化的多场耦合模型,从理论上揭示岩体的失稳机制;②选取合适地能适用于多场耦合和裂隙扩展数值模拟方法,既要有较高的计算效率和精度,又要降低开裂步长、方向对于网格的依赖性;③以考虑裂隙网络演化的THM全耦合及岩体变形、失稳全过程的数值模拟算法分析。

3 耦合作用下裂隙扩展演化数值方法

现阶段多场耦合理论研究逐渐成熟,数值分析是目前研究多场耦合问题最为经济有效的方法。因此,上述3个关键点的突破口在于寻找适合于同时模拟多场耦合及裂隙扩展的数值理论。

3.1 多场耦合数值模拟方法

现有的多场耦合研究或是基于既有裂隙网络数值重建,或是采用等效连续介质模型,为了研究和预测工程岩体多场耦合效应,国内外学者们引入了众多的数值模拟方法(以下称之为传统耦合过程数值模拟方法),目前大量的关于传统耦合数值分析方法大体可以归纳为以下3类。

(1)有限元、有限差分方法。这是针对等效连续介质模型的最常用的一类数值方法,很多学者开发有限元程序或应用已有软件对多场耦合过程进行了模拟。以高放废物深地质处置工程为例,Rutqvist等^[7]对比分析了4个国家小组采用不同数值模拟方法(TOUGH-FLAC、CODE-BRIGHT、CASTEM和FLAC)进行多场耦合的求解过程和结果;张玉军^[39-41]采用有限元方法模拟了假定的高放废物地质处置库THM耦合过程;赵延林等^[42]建立了双重介质热-水-力耦合微分控制方程,开发了双重介质热-水-力耦合分析的三维有限元计算程序;刘泉声等^[43]针对DECOVALEX项目四期的TASK-D采用有限元对热-水-力耦合过程进行了数值模拟;Hou等^[44]采用FLAC对CO₂地质封存过程中的THM耦合效应进行了模拟;Poulet等^[30]采用ABAQUS软件模拟了考虑损伤的THMC耦合效应;Tong等^[21]针对缓冲材料和岩体中存在的两相流、变形和热传导采用有限元方法进行了THM全耦合模拟。

(2)离散单元方法。Ahola等^[45]建立了THM耦合的离散单元方法;郑春梅^[46]基于裂隙网络模型采用非连续变形分析方法对裂隙岩体水力耦合进行了模拟;孙玉杰等^[47]采用离散元软件UDEC对分析了围岩应力与水力耦合作用导致的裂隙隙宽变化及渗

流变化的过程;刘泉声等^[48]通过对 UDEC 进行二次开发,将其应用到裂隙网络模型的水力耦合计算;庄宁^[49]采用颗粒流软件(PFC)对水力耦合状态进行了研究;张玉军^[50]使用 UDEC4.0 对处置库近场水力耦合及热-水-力耦合的过程进行了数值模拟。

(3) 其他。薛雯鸾等^[51]基于复合单元原理,建立渗流与法向应力耦合分析的复合单元模型;何翔^[52]进行了水力耦合的随机有限元方法研究;潘鹏志^[53]采用弹塑性细胞自动机模型对渗流-应力耦合特性进行研究,并基于细观力学分析模拟了岩石的破裂过程;Li 等^[29]开发出 RFPA-THM 软件,并考虑损伤作用,对 THM 耦合作用下岩柱稳定性进行了分析。

传统耦合过程数值模拟方法经过多年的发展已经较为成熟,特别是以有限元为代表的一大批商业软件极大地推动了模拟技术的向前发展。但当考虑裂隙网络的扩展演化时,传统的多场耦合数值方法遇到的第一个难题就是裂隙扩展的数值模拟。

3.2 考虑耦合作用下裂隙扩展的数值方法

裂隙扩展模拟是裂隙扩展后其形态的最直接描述,目前对裂隙分析主要依赖数值方法,已有学者采用不同的数值方法对裂隙问题进行了研究,根据在裂隙扩展模拟过程中是否需要进行网格重构,将现有数值方法分为需网格重构、不需网格重构和数值流形方法 3 大类。

(1) 需网格重构类方法。此类方法的共同特点是裂隙扩展每一步都伴随着网格的重新划分,传统有限元(finite element method, FEM)、有限差分(finite difference method, FDM)和边界元(boundary element method, BEM)方法都可以归结为此类。

(2) 不需网格重构类方法。此类方法最大的特点是在裂隙扩展过程中,网格不需要重新划分。该类方法又可细化为连续、离散及细观力学方法 3 类。连续的方法以无单元法(element-free method, EFM)和单位分解法(partition of unity method, PUM)为代表,离散方法主要包括离散单元法(discrete element method, DEM)、非连续变形分析方法(discontinuous deformation analysis, DDA)等,细观方法则以岩石破裂分析(rock fracture process analysis, RFPA)和虚内键模型(virtual internal bond model, VIB)为代表。

(3) 数值流形方法(numerical manifold method, NMM)。该方法采用两套覆盖——数学覆盖和物理覆盖来模拟裂隙之间的不连续性,对于裂隙扩展问

题不需要进行网格重构,它在连续情况下退化成 FEM,在离散情况下则变成 DDA,能有效模拟工程岩体从连续到失稳全过程。

除此之外,张振南等^[54]提出了基于三角形有限单元的模拟节理岩体破坏的单元劈裂法,该方法在裂隙扩展过程中无需为设置节理单元而改变原网格划分方案,为节理扩展的数值模拟提供了很大方便;杨帆等^[55]采用摩尔-库仑准则作为单元劈裂准则,提出了修正的单元劈裂法,并模拟了不同围压下的多裂隙扩展;李明田^[56]提出了模拟岩石破裂的格构细胞自动机方法;潘鹏志、周辉等^[53, 57]研究了模拟岩石破裂过程的弹塑性细胞自动机模型。另外,现有研究又出现了用连续-不连续耦合法模拟裂隙岩体扩展、破坏过程的新思路,如 DEM-FEM 耦合法^[58]、FEM-DDA 耦合法^[59]等,这些研究都大大丰富了裂隙扩展的数值模拟方法。

模拟裂隙扩展的数值计算方法尚不止于上文所述。但当既要考虑裂隙扩展又要进行多场耦合分析时,到目前为止有限元为主要手段,离散单元法、DDA 方法和 RFPA 也有所涉及,无单元法、数值流形方法、单位分解法等初步实现了单场(温度、渗流)模拟研究见表 1。为了选择一种合适的数值方法,下面重点分析上述部分能够考虑裂隙扩展和多场耦合的数值方法优劣。

表 1 数值分析方法功能对比

Table 1 Comparison for the features of different numerical methods

数值方法	是否需重新 网格划分	破裂 方向	温度场 研究	渗流场 研究	是否能失稳 全过程模拟
有限元法	是	任意	有	有	否
无单元法	否	任意	有	有	否
单位分解法	否	任意	初步	无	否
离散单元法	否	沿边界	有	有	是
DDA 方法	否	沿边界	无	有	是
虚内键方法	否	任意	无	无	否
数值流形方法	否	任意	有	有	是

3.2.1 有限元方法

有限元方法是目前应用最广泛、发展也最成熟的数值方法。在模拟裂隙扩展演化问题时,现有方法一般采用在裂隙尖端加密网格或设置奇异单元^[60-61]。李云鹏等^[62]通过采用节理单元与节理岩石单元相互配合模拟裂隙扩展过程,避免了在裂隙尖端划分过分复杂密集的跟踪单元及节点。陈卫忠等^[63]建立 8 节点奇异等参单元对节理尖端应力场的奇异性进行数值模拟,研究了闭合裂隙的扩展、贯

通规律; Sumi 等^[64]采用 FEM 对非均质材料的裂隙扩展进行了模拟。

在裂隙扩展数值模拟方面,有限元方法借助于目前众多优秀的商业软件得以广泛使用,但同时该方法也有以下几个缺点:①裂隙当作自由边界处理,在划分网格时需要将网格限制在裂隙边界上,尤其是当裂隙随着时步在扩展时,每一步都要重新划分网格,很难模拟任意形状的多裂隙扩展问题。②不易构造高阶连续场,大多数情况下近似函数只具有 C_0 连续性,计算的应力不连续,精度也不高。③由于单元的扭曲变形而丧失计算精度,导致难于处理大变形问题。

3.2.2 无单元方法

无单元方法是近年来兴起一种新的数值计算方法,目前该方法已经广泛地应用于渗流、热应力等岩土工程领域^[65-68]。

该方法不需要单元结构,在模拟裂隙扩展时,节点数量不需要过大,同时只要进行局部少量人为介入就能自动完成裂隙扩展路径的跟踪,因而在裂隙扩展数值模拟中得到广泛应用。寇晓东等^[69]应用无单元法实现了复杂受力边界条件下复合裂隙开裂追踪;沈振中等^[70]利用无单元法模拟了岩体力学劈裂过程。在此基础上,Belytschko 等^[71]于 1994 年利用拉格朗日乘子法施加强制边界条件,引入了背景网格和高斯积分方案,提出了无单元伽辽金方法(element-free galerkin method, GFEM),并用于断裂和裂隙扩展过程的数值模拟。随后,Lu 等^[72]将该方法应用于动态裂隙模拟;Krysl 等^[73]发展了模拟任意 3D 裂隙扩展的 EFGM。在国内,周维垣等^[74]较早开始对 EFGM 进行研究,张敦福^[75]采用无网格伽辽金方法对二维裂隙扩展问题进行了研究,并考虑裂隙水压力对扩展的影响,还在此基础上研究了三维简单裂隙扩展问题;程井等^[76]基于无单元伽辽金法研究了水工结构温度应力及温度裂隙扩展的模拟;马文涛等^[77]提出了一种模拟裂隙扩展的水平集和无网格耦合方法。

归结起来,无单元法的主要优点有:①避免了大量的单元网格划分工作,简化了大量前处理工作,同时克服了有限元法中由于场函数的局部化近似所引起的误差,避免了网格畸变的影响,能够求解大变形问题。②场函数及其梯度在整个求解域内是连续的,无需寻求光滑梯度场的后处理。③为得到离散的代数方程组仅需要对节点和边界条件进行描述。

然而,在处理裂隙扩展的数值模拟时,由于无

单元法中节点影响域的大小、积分域的选取等因素对计算结果有一定影响,而确定这些影响因素尚缺乏深入的研究,因此,可能会导致计算结果不稳定的情况;同时该方法形函数的计算过程较为复杂,在基本边界条件处理、数值积分上需要特殊处理,困难大;另外高阶的近似函数也带来了数值积分的复杂,上述原因大大限制了无单元法的在裂隙扩展领域的应用。

3.2.3 单位分解法

基于单位分解框架下的单位分解法,由于不需要额外的网格重生成和假设,使得其在非连续问题上发展迅猛,其中以广义有限元法(generalized finite element method, GFEM)和扩展有限元方法(extended finite element method, XFEM)最具代表性。

广义有限元概念于 1983 年提出^[78],理论上 GFEM 是 PUM 和常规 FEM 的产物,它具有以下两个优点:一是采用与求解区域无关的网格,在划分有限元网格时,不需考虑区域的内部结构细节,允许孔洞或裂隙等边界横穿单元,这一思想大大增强了 GFEM 网格剖分的灵活性;二是引入了特定的局部逼近函数构造单元形函数,寻求在插值函数中引入特殊函数的思想来考虑真实结构中各种细节的存在,并发展了与之对应的算法和策略。在应用 GFEM 方法处理裂隙问题的研究上,Duarte 等^[79]利用广义有限元方法进行了三维动态裂隙扩展模拟,当裂隙扩展时,只需修改沿裂隙表面的单位分解函数,不需对网格做任何重构;彭自强等^[80]利用 Shepard 公式、可视准则和标准有限单元的形函数,构造出在裂隙处不连续的单位分解函数,并利用自定义函数基,构建在覆盖上的局部逼近空间对动态裂隙扩展的数值模拟。但广义有限元法需要根据具体问题来获得特殊逼近函数,由于特殊函数取自规定问题的封闭解,并包含根据边界条件确定的系数,由此导致该方法具有一定的问题依赖性。

扩展有限元法是 Belytschko 等^[81]1999 年在常规有限元框架内求解不连续问题提出的,该方法在处理裂隙问题时主要有以下 4 个优点^[82]:①不用考虑结构的任何内部细节(如非均质材料或裂隙),只需按照结构的几何外形生成有限元网格。②可以采用其他方法(如水平集法)确定裂隙的实际位置,跟踪裂隙的生长。③借助于对所研究问题的已有知识,改进影响区内单元的形函数,以反映裂隙的存在和生长。④改进的形函数在单元内部具有单位分解特性,因此, XFEM 的刚度矩阵具有与常规有限元一

样的对称、稀疏且带状等优点。

基于上述优点, XFEM 在裂隙扩展模拟上具广泛的应用。Sukummar 等^[83]以扩展有限元为手段, 模拟了混凝土材料任意黏结型裂隙的扩展路径; 余天堂^[84]利用 XFEM 进行了含裂隙体的应力强度因子计算; 方修君等^[85]基于虚节点法在有限元平台上 ABAQUS 实现了 XFEM 的嵌入, 结合黏聚裂隙模型对混凝土开裂过程进行了模拟; 陈胜宏等^[86]采用扩展有限元分析了小湾拱坝坝踵开裂问题; 茹忠亮等^[87]采用 XFEM 研究了断裂问题; 周小平等^[88]基于扩展有限元法建立了压应力状态下多裂隙扩展过程数值模拟方法。最近, 清华大学庄茁教授在其专著《扩展有限单元方法》^[89]中系统地介绍了扩展有限元基本理论及研究现状, 并针对二维板、连续壳体、双材料亚界面及三维聚合物基复合材料的裂隙扩展问题采用 XFEM 进行了模拟分析, 阐述了 XFEM 在进行裂隙扩展模拟问题上的方法与过程。

但扩展有限元对于复杂裂隙扩展问题处理上有一定局限性, 对于被多裂隙所切割的单元, 需要根据具体情况多次施加附加函数。如图 1 所示, 对于一条主干裂隙和一条枝干裂隙问题而言, 首先在被主干裂隙完全剖分的节点采用跳跃函数来增强, 在含有主干裂隙尖端的节点采用裂尖基函数增强; 同样, 对于枝干裂隙, 首先采用同样的方法进行处理; 最后, 含有交叉点的所有节点上需要赋予额外的交叉函数, 如图 1 中打叉节点。因此, XFEM 在处理复杂裂隙问题时具有问题依赖性, 同时, 它难于处理大变形及失稳问题, 这也限制了其应用范围。

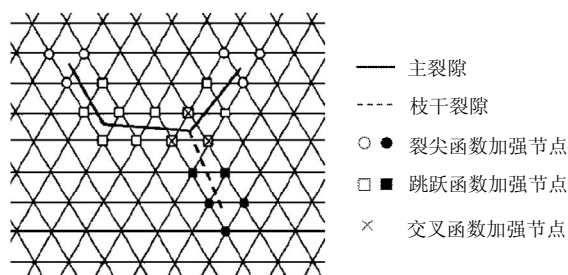


图 1 扩展有限元中复杂裂隙的处理

Fig.1 Treatment of complex crack in the extended FEM

3.2.4 离散元方法

离散单元法以不连续面切割而成的离散块体系统为研究对象, 运用牛顿第二定律描述块体运动过程。该方法是一种基于非连续介质力学的数值计算方法, 它将所研究的区域划分成一个个分离的多边形块体单元, 单元形状可以是多边形, 也可以是圆

形, 单元性质可以是刚性的, 也可以是可变形的。单元之间相互接触, 随着单元的平移和转动, 允许调整各个单元之间的接触关系, 最终达到平衡状态, 因此, 特别适合分析裂隙岩体。

离散单元法在模拟裂隙扩展时具有直观的效果, 当单元之间的状态达到一定破坏准则时, 单元块体与块体之间发生分离, 从而形成裂隙。目前基于成熟的商业软件 UDEC 和 PFC, DEM 在模拟裂隙岩体裂隙扩展及破坏过程上得到广泛应用。贺续文等^[90]采用 PFC^{2D} 软件对边坡稳定性进行了模拟, 并讨论了节理连通率对边坡破坏形式的影响; 杨艳等^[91]利用颗粒流软件从细观角度初步模拟裂隙岩体水力劈裂的发展过程; 常晓林等^[92]在变形体离散元的框架内引入界面单元, 提出模拟岩石等准脆性材料破坏过程的连续-离散耦合分析方法, 该方法能显式地模拟微裂缝的萌生、扩展直至贯通形成宏观裂缝的全过程; Luc Scholtès 等^[93]采用三维离散单元方法对含裂隙岩体扩展和演化过程进行了模拟, 并针对一个具体裂隙岩体边坡工程实例进行了稳定性分析。

非连续变形分析方法是石根华提出的一种性的不连续数值方法^[94], 该方法能够充分考虑岩体的不连续特性, 可以模拟块状结构岩体的非连续变形、大位移运动情形, 克服了有限元法需要重新划分单元的缺点, 因此, 在模拟裂隙开裂问题上有大量的应用研究。焦玉勇等^[95]提出一种用 DDA 模拟岩石裂隙扩展的算法, 该算法将块体边界分为真实的节理边界和虚拟节理边界, 裂隙扩展沿虚拟节理进行, 按照界面破裂准则进行裂隙扩展分析, 可以模拟裂隙萌生、扩展、贯通和岩体破碎全过程; 张秀丽^[96]基于 DDA 原理建立了断续节理岩体裂隙扩展、断裂破坏分析方法; 夏才初等^[97]建立了应用于非连续变形分析计算的断续节理强度形式, 实现对断续节理扩展过程模拟的 DDA 算法; Ning 等^[98]使用 DDA 方法模拟了由岩爆引起的岩体破坏及失稳过程。

从上述研究来看, 目前采用 DEM 和 DDA 分析模拟裂隙扩展取得了较好效果, 然而这两种方法却有以下局限性: ①破裂长度的单元尺寸依赖性。②目前 DDA 方法无裂隙区单元的划分及破裂模拟主要采用虚节理方法, 即事先选择了开裂面。③岩体破裂及裂隙扩展模拟是通过块体单元之间发生断裂而得以实现的, 因此, 裂隙的扩展只能沿着单元网格边界发生, 这在一定程度上影响了模拟的精确性。

3.2.5 岩石破裂过程分析法

唐春安等^[99-100]基于有限元理论、细观损伤理

论和全新的材料破裂过程算法思想,通过考虑材料的非均匀性来模拟材料的非线性,通过单元的弱化来模拟材料变形、破坏的非连续行为,建立了岩石破裂过程分析数值模型。由于突破了传统的断裂理论,RFPA方法可以模拟裂纹的萌生、扩展、汇交等过程。众多学者利用该软件对岩石破坏过程以及对岩石试件中单个裂纹扩展、多个裂纹的扩展以及相互作用进行了广泛的研究。

张后全等^[101]通过对多条预制裂纹破裂渐进过程进行模拟和分析,研究了裂纹数量、裂纹间距等对破坏模式和峰值抗剪强度的影响;梁正召等^[102]采用细观弹性损伤模型和有限元计算方法实现了岩石三维破裂过程的数值模拟,并且在RFPA^{2D}的基础上开发了岩石破裂过程分析系统RFPA^{3D},用来更加形象真实地模拟岩石破裂现象;唐世斌等^[103]在充分考虑岩石的非均匀性和热力耦合作用情形下,开发了RFPA^{2D}-thermal模型,有效地模拟了岩石热破裂过程;Li等^[104]采用RFPA的破裂分析软件成功模拟了裂隙岩质边坡的失稳过程;Zhu等^[105]研究并模拟了地下隧洞在偏压作用下的破裂演化过程。

RFPA方法的优势在于,通过细观作用层次来描述岩石的力学行为及破坏机制,能够完整描述岩石破裂失稳的全过程。但从本质上说,RFPA是一种连续介质方法,其展示出来的裂隙是对单元进行的软化,对于裂隙黏结、滑移、分离及块体失稳需要进一步的理论研究。

3.2.6 数值流形方法

石根华^[94, 106]在1992年提出了一种同时处理连续与非连续的统一计算方法——数值流形方法(NMM)。该方法为裂隙岩体由连续到不连续破坏过程的模拟开辟了新的途径,它充分吸收了DDA的块体模拟和接触模拟的优点,并采用两套网格系统,用数学网格定义求解精度,用物理网格定义和处理块体边界及构造面,可以很好地模拟块体接触运动,离散体大位移等问题。

数值流形方法的出现,大大提高了对连续-非连续介质问题、裂隙问题的解答能力,该方法在极端条件下可以退化成FEM和DDA方法,单位分解方法更是其特例。石根华2012年6月在中国科学院武汉岩土力学研究所进行讲学时曾指出,非连续计算是计算科学的未来,而NMM正是能完整的进行连续到非连续全过程的计算方法。流形方法最初的研究就是针对不连续问题,甚至是移动问题。NMM具有两个显著的特点:一是数学覆盖独立于物理区

域;二是自由度定义在物理覆盖之上。在处理裂隙时不同于Goodman节理单元,不要求解裂隙两侧相对位移,也不需要裂隙处增加基函数。裂隙及材料边界作为物理网格输入,通过定义在物理覆盖上的独立覆盖函数来实现裂隙两侧位移的不连续性模拟,不论裂隙停留在何处,即便是复杂裂隙(例如交叉裂隙),问题的不连续性均能够采用最直接和自然的方法来进行模拟。因此,自它提出后,其中一个最主要研究方向就是模拟裂隙扩展。王水林等^[107]根据线弹性断裂力学原理,利用数值流形方法追踪了岩体试件受压裂隙扩展过程;彭自强^[108]系统地研究了数值流形方法与动态裂隙扩展模拟;张国新等^[109]进行了岩质边坡倾倒破坏的数值流形模拟(见图2);Chiou等^[110]将数值流形方法与虚节理扩展方法相结合研究了复合型断裂的裂纹扩展问题;Zhang等^[111]采用NMM进行了二维裂隙扩展问题模拟(见图3);Ma等^[112]亦对复杂裂隙的扩展问题进行了研究;Wu等^[113]基于NMM的接触技术,结合摩尔-库仑裂隙扩展准则,研究了压力作用下闭合裂纹摩擦角和凝聚力对裂隙扩展的影响。另外,对于新裂隙的产生问题,只要区域内应力或者应变状态达到某一裂隙萌生准则,即可生成新裂隙并随之更新物理覆盖以进行下一步计算。Ning等^[114]基于抗拉强度修正的摩尔-库仑准则和数值流形理论,模拟了存在边缘裂隙的有限板张拉破坏及完整梁的三点弯曲(见图4)、直剪试验和轴压作用下斜裂纹的扩展破坏过程,最后模拟分析了边坡的稳定性。上述研究很好地展现了NMM在单裂隙、多裂隙的扩展以及工程岩体破裂失稳全过程的模拟能力。

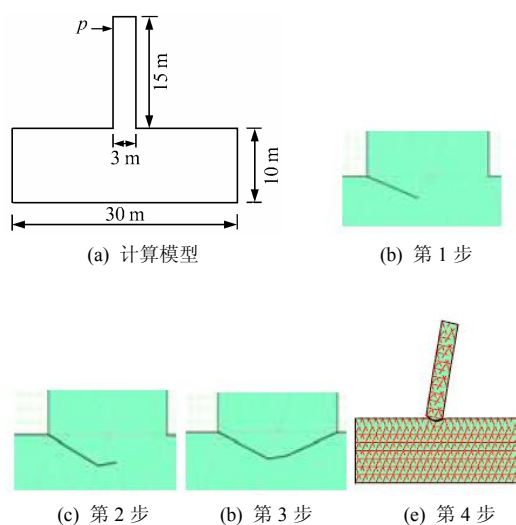
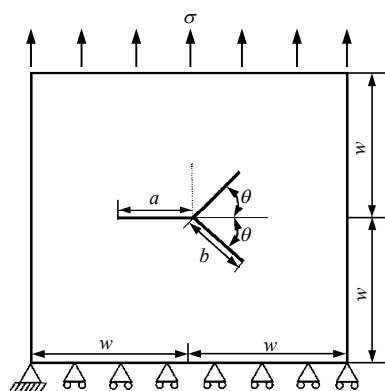
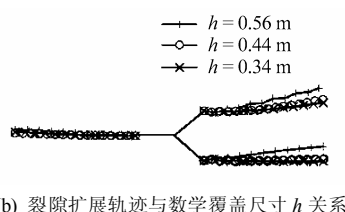
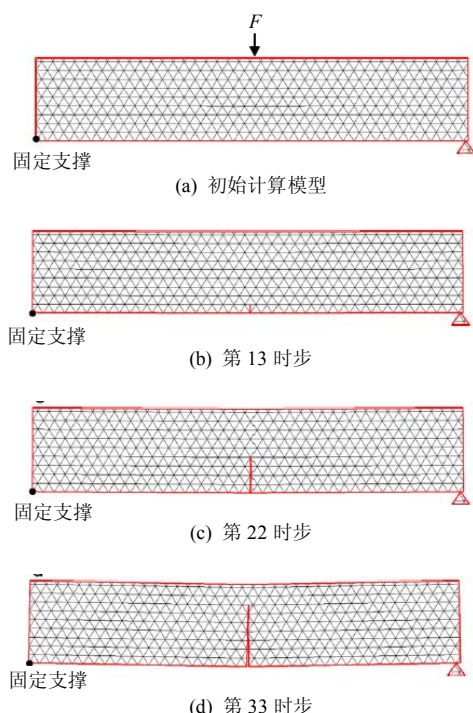


图2 流形元裂纹扩展轨迹^[109]

Fig.2 Crack propagation tracks of manifold method^[109]



(a) 平板分支裂隙模型

(b) 裂隙扩展轨迹与数学覆盖尺寸 h 关系图3 分叉裂隙扩展的数值流形模拟^[111]Fig.3 NMM predicted branched crack growth paths^[111]图4 数值流形方法预测三点弯曲梁的破坏^[114]Fig.4 NMM predicted fracturing process in a three-point loaded beam^[114]

同样,数值流形方法自身也具有一定的缺点:首先是单纯形积分仅适合能够给出解析积分的函数;其次目前缺乏成熟的软件包,造成了NMM在解决复杂问题上的研究不够,均在一定程度上限制了NMM的使用范围。

3.3 数值流形方法研究THM耦合中裂隙网络扩展演化及设想

上述具备模拟多场耦合和裂隙扩展能力的数值方法各有优劣,在综合考虑模拟计算效率、精度及从连续到失稳全过程的分析能力时,上述方法均有待进一步的研究。另一方面,NMM以其严谨的数学理论及较高的计算精度和效率,目前其应用范围已扩展到边坡、地下洞室稳定性分析^[115-116],渗流场、温度场及温度应力场研究^[117-121],岩石大变形和蠕变等方面研究^[122-124]等,这都为采用数值流形方法模拟多场耦合构建了良好的理论基础。同时基于其在处理裂隙上的优势及其模拟由连续到失稳全过程的能力,笔者推荐采用数值流形方法来模拟多场耦合作用下的裂隙网络演化。而目前采用数值流形方法来进行多场耦合的模拟,国内外的研究还处于起步阶段,多场耦合作用下裂隙岩体破裂失稳的研究及其数值流形模拟则更为罕见。

在采用数值流形模拟THM耦合下裂隙网络扩展演化之前,要解决两方面的基础问题:一是要计算同一套数值流形网格下裂隙岩体单一的应力场、温度场和渗流场分布问题,现有研究通过建立位移、温度及水头覆盖函数可以初步解决;二是建立裂隙或是裂隙网络的扩展及新裂隙的萌生准则。

基于上述研究及考虑裂隙网络扩展演化的多场耦合模型,首先建立考虑既有裂隙的数值模型,采用NMM计算出耦合情况下的应力、温度渗流场;其次将应力场、温度应力及水压力叠加,并考虑温度对材料的劣化等因素,基于相应的裂隙萌生、扩展准则,模拟裂隙网络在耦合作用下的扩展演化,并达到这一条件下的裂隙网络稳定状态;随后检查裂隙的搭接成网及相关裂隙参数状况,再以此为基础建立新的裂隙数值模型,进行下一步的多场耦合及裂隙网络扩展演化分析。

4 讨论

考虑裂隙扩展的THM耦合特殊性在于耦合作用会产生新生裂隙,同时新生裂隙对于裂隙网络及渗流、应力、温度场产生影响的相互作用过程,裂隙是这一复杂的主导因素。因此,对于THM耦合作用下裂隙网络的演化研究应立足于裂隙的重要作用,以裂隙扩展准则为切入点,重点研究以下两个关键环节:

(1) 裂隙扩展对裂隙网络的影响。这是区别既有裂隙的THM耦合和考虑裂隙网络演化的THM耦合的重要标志。在THM耦合过程中,一旦某一时

刻达到裂隙扩展准则,岩体既发生裂隙扩展,也可能伴随新裂隙的萌生,这些裂隙的变化会直接影响裂隙网络连通性,导致裂隙网络的演化。

(2) 裂隙网络演化对 THM 耦合过程的影响。这是耦合过程发生变化的直接原因。裂隙网络的演化造成连通性的改变,丰富了导水路径,直接导致渗流场的变化;同时裂隙的变化直接影响力场的分布,岩体所处的应力状态控制裂隙的张开度,从而影响渗透系数和渗流压力;另外,在演化过程中,岩体破碎度的增加还会导致包括弹性模量、岩体强度及热传导系数等参数的变化。

同时,耦合过程的变化又会造成新的裂隙扩展。因此,上述两个环节相互影响、相互作用,最后达到一个动态平衡的过程。通过研究上述两个关键环节,对揭示考虑裂隙网络演化的 THM 耦合作用机制具有十分重要的意义。

同样地,采用数值流形方法对 THM 耦合过程进行模拟也有以下主要难点:

(1) 控制微分方程体现非线性特征,且多场耦合岩石力学参数呈现非均质各向异性,由于覆盖函数对应于物理覆盖,因此,对于非均质参数、不同场的边界条件及初始条件的赋予方法需要进一步研究。

(2) 数值流形法中裂隙作为物理网格施加,对于裂隙的粗糙度、填充性、隙宽的表征及接触摩擦的模拟也需要进一步的研究。

5 结 论

THM 耦合作用下裂隙网络演化研究以一般的多场耦合研究为基础,着重强调裂隙变化对于 THM 耦合的影响,最终落实到对于岩体力学特征和工程特征的影响,将更加贴近工程实际。本文的主要结论如下:

(1) THM 耦合研究目前局限于既有裂隙网络的数值重建,而裂隙的存在对于温度场、渗流场和应力场均产生较大影响,在 THM 耦合过程中考虑裂隙的演化具有较大的必要性和较强的实用性。

(2) 是否考虑裂隙网络演化的 THM 耦合主要区别在于是否考虑裂隙生成与扩展对耦合过程的影响,裂隙的作用是这一过程的主导因素,研究中应以裂隙扩展准则为切入点,重点考察裂隙扩展、温度场、应力场及渗流场与岩体裂隙网络的相互影响。

(3) 系统地分析了目前适用于模拟多场耦合作用下裂隙扩展的各种数值方法的优劣,综合考虑裂隙扩展模拟能力及其在温度场、渗流场的研究基础,

建议采用数值流形方法进行 THM 耦合及其作用下裂隙网络演化模拟研究。

(4) 目前关于 THM 耦合作用下裂隙网络演化机制及其数值流形模拟算法研究均十分罕见,裂隙网络演化机制及相关数值流形算法均有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] ODA M, TAKEMURA T, AOKI T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34(6): 313—331.
- [2] RUTQVIST J, FREIFELD B, MIN K B, et al. Analysis of thermally induced changes in fractured rock permeability during 8 years of heating and cooling at the Yucca mountain drift scale test[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(8): 1373—1389.
- [3] PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, HUANG Xiao-hua, et al. Coupled THM processes in EDZ of crystalline rocks using and elasto-plastic cellular automaton[J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(6): 1299—1311.
- [4] 罗嗣海, 钱七虎, 李金轩, 等. 高放废物深地质处置中的多场耦合与核素迁移[J]. *岩土力学*, 2005, 26(增刊 1): 264—270.
- [5] LUO Si-hai, QIAN Qi-hu, LI Jin-xuan, et al. Multi coupling and nuclide transport in HLW geological disposal repository[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Sup.1): 264—270.
- [5] TSANG Chin-Fu, STEPHANSSON O, JING Lan-ru, et al. DECOVALEX project: From 1992 to 2007[J]. *Environmental Geology*, 2009, 57: 1221—1237.
- [6] TSANG Chin-Fu, STEPHANSSON O, HUDSON J A. A discussion of thermo-hydro-mechanical (THM) processes associated with nuclear waste repositories[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(1-2): 397—402.
- [7] RUTQVIST J, BARR D, DATTA R, et al. Coupled thermal-hydrological-mechanical analyses of the yucca mountain drift scale test—Comparison of field measurements to predictions of four different numerical models[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42(5): 680—697.
- [8] 作彦卿. 岩体水力学基础(四)——岩体渗流场与应力场耦合的等效连续介质模型[J]. *水文地质与工程地质*, 1997, (3): 10—14.

- [9] 作彦卿. 岩体水力学基础(五)——岩体渗流场与应力场耦合的裂隙网络模型[J]. 水文地质与工程地质, 1997, (5): 41—45.
- [10] 作彦卿. 岩体水力学基础(六)——岩体渗流场与应力场耦合的双重介质模型 [J]. 水文地质与工程地质, 1998, (1): 43—46.
- [11] ABABOU R, MILLARD A, TREILLE E, et al. Continuum modeling of coupled thermo-hydro-mechanical processes in fractured rock[C]// Computational Methods in Water Resources. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994: 651—658.
- [12] 柴军瑞, 作彦卿. 岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 712—717.
CHAI Jun-rui, WU Yan-qing. Research on multiple-level fracture network model for coupled seepage and stress fields in rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(6): 712—717.
- [13] 张玉军, 徐刚, 杨朝帅. 裂隙刚度随应力变化对双重孔隙介质热-水-应力耦合影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3426—3432.
ZHANG Yun-jun, XU Gang, YANG Chao-shuai. Finite element analysis of influence of fracture stiffness changing with stress on thermo-hydro-mechanical coupling in dual-porosity medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3426—3432.
- [14] 赵延林, 曹平, 赵阳升, 等. 双重介质温度场-渗流场-应力场耦合模型及三维数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4024—4031.
ZHAO Yan-lin, CAO Ping, ZHAO Yang-sheng, et al. Dual media model for thermo-hydro-mechanical coupling and 3D numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 4024—4031.
- [15] OLIVELLA S, GENS A. Double structure THM analysis of a heating test in a fracture tuff incorporating intrinsic permeability variations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(6): 667—679.
- [16] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [17] 叶源新, 刘光廷. 岩石渗流应力耦合特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 2518—2525.
YE Yuan-xin, LIU Guang-ting. Research on coupling characteristics of fluid flow and stress within rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(4): 2518—2525.
- [18] JING L, HUDSON J A. Fundamentals of the hydro-mechanical behavior of rock fractures-roughness characterization and experimental aspects[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences** 2004, 41(3): 1—6.
- [19] MIN Ki-Bok, RUTQVIST J, TSANG Chin-fu, et al. Stress-dependent permeability of fractured rock masses: A numerical study[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(7): 1191—1210.
- [20] 贺玉龙, 杨立中, 杨明. 岩体温度场与应力场耦合作用的一种量化方法[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(1): 10—13.
HE Yu-long, YANG Li-zhong, YANG Ming. A quantitative method for the coupling effect of temperature fields and stress fields in rock mass[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2002, 37(1): 10—13.
- [21] TONG Fu-guo, JING Lan-ru, ZIMMERMAN R W. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for simulating multiphase flow, deformation and heat transfer in buffer material and rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(2): 205—217.
- [22] 刘泉声, 康永水, 黄兴, 等. 裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 971—978.
LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, HUANG Xing, et al. Critical problems of freeze-thaw damage in fractured rock and their research status[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 971—978.
- [23] 李鹏, 刘建, 李国和, 等. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 380—386.
LI Peng, LIU Jian, LI Guo-he, et al. Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 380—386.
- [24] 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 Xia-ting, DING Wu-xiu. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological-chemical environment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1465—1473.
- [25] 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 Lian-sheng, ZHANG Peng-cheng, WANG Si-jing. 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.
- [26] TARON J, ELSWORTH D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(5): 855—864.
- [27] TARON J, ELSWORTH D, MIN Ki-bok. Numerical simulation of thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in deformable, fractured porous media[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46(5): 842—854.
- [28] 谭贤君, 陈卫忠, 杨建平, 等. 盐岩储气库温度-渗流-应力-损伤耦合模型研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(12): 3633—3641.
- TAN Xian-jun, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Study of THM-damage coupling model of gas storage in salt rock with interlayer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3633—3641.
- [29] LI L C, TANG C A, WANG S Y, et al. A coupled thermo-hydrologic-mechanical damage model and associated application in a stability analysis on a rock pillar[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 34: 38—53.
- [30] POULET T, KARRECH A, REGENAUER-LIEB K, et al. Thermal-hydraulic-mechanical-chemical coupling with damage mechanics using ESCRIPTRT and ABAQUS[J]. **Tectonophysics**, 2012, 526—529: 124—132.
- [31] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(4): 408—411.
- LIU Quan-sheng, XU Xi-chang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 408—411.
- [32] 黄涛. 裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(1): 77—82.
- HUANG Tao. Coupling study among seepage-stress-temperature in fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(1): 77—82.
- [33] 张玉军. 不连续面对饱和-非饱和介质热-水-应力耦合影响的二维有限元分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(12): 2579—2583.
- ZHANG Yu-jun. 2D FEM analysis for influence of discontinuities on coupled thermo-hydro-mechanical processes in saturated-unsaturated media[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2579—2583.
- [34] 唐春安, 马天辉, 李连崇, 等. 高放废料地质处置中多场耦合作用下的岩石破裂问题[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(增刊2): 3932—3938.
- TANG Chun-an, MA Tian-hui, LI Lian-chong, et al. Rock failure issues in geological disposal of high-level radioactive wastes under multi-field coupling function[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3932—3938.
- [35] 井兰如, 冯夏庭. 放射性废物地质处置中主要岩石力学问题[J]. **岩石力学与工程学报**, 2006, 25(5): 833—841.
- JING Lan-ru, FENG Xia-ting. Main rock mechanics issues in geological disposal of radioactive wastes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 833—841.
- [36] LATHAM John-paul, XIANG Jian-sheng, BELAYNEH M, et al. Modelling stress-dependent permeability in fractured rock including effects of propagating and bending fractures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 57: 100—112.
- [37] 朱万成, 魏晨慧, 田军, 等. 岩石损伤过程中的热-流-力耦合模型及其应用初探[J]. **岩土力学**, 2009, 30(12): 3851—3857.
- ZHU Wan-cheng, WEI Chen-hui, TIAN Jun, et al. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model during rock damage and its preliminary application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3851—3857.
- [38] 李连崇, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程 THMD 耦合数值模型研究[J]. **计算力学学报**, 2008, 25(6): 764—769.
- LI Lian-chong, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Investigation on coupled thermo-hydro-mechanical-damage (THMD) model for rock failure process[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2008, 25(6): 764—769.
- [39] 张玉军. 遍有节理岩体的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型及有限元分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(5): 947—955.
- ZHANG Yu-jun. Coupled thermo hydro mechanical model and finite element analyses of dual-porosity fractured medium for ubiquitous-joint rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 947—955.

- [40] 张玉军, 张维庆. 一种双重孔隙介质水-应力耦合模型及其有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 325—329.
- ZHANG Yu-jun, ZHANG Wei-qing. Coupled hydro-mechanical model and FEM analyses for dual-porosity media[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(3): 325—329.
- [41] 张玉军. 核废料处置概念库近场热-水-应力耦合模型及数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 17—23.
- ZHANG Yun-jun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and relevant numerical analysis for near field of conceptual nuclear waste repository[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 17—23.
- [42] 赵延林, 王卫军, 曹平, 等. 不连续面在双重介质热-水-力三维耦合分析中的有限元数值实现[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 638—644.
- ZHAO Yan-lin, WANG Wei-jun, CAO Ping, et al. Numerical implementation of discontinuities in dual media 3D model for thermo-hydro-mechanical coupling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 638—644.
- [43] LIU Quan-sheng, ZHANG Cheng-yuan, LIU Xiao-yan. Numerical modeling and simulation of coupled THM process in TASK_D of DECOVALEX_IV[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(4): 709—720.
- [44] HOU Zheng-meng, GOU Yang, TARON J, et al. Thermo-hydro-mechanical modeling of carbon dioxide injection for enhanced gas-recovery (CO₂-EGR): A benchmarking study for code comparison[J]. **Environmental Earth Science**, 2012, 67: 549—561.
- [45] AHOLA M P, THORAVALL A, CHOWDHURY A H. Distinct element models for the coupled T-H-M processes: Theory and implementation[J]. **Developments in Geotechnical Engineering**, 1996, 79: 181—211.
- [46] 郑春梅. 基于DDA的裂隙岩体水力耦合研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [47] 孙玉杰, 邬爱清, 张宜虎, 等. 基于离散单元法的裂隙岩体渗流与应力耦合作用机制研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10): 62—67.
- SUN Yu-jie, WU Ai-qing, ZHANG Yi-hu, et al. Study on coupling mechanism of stress and fluid flow in fractured rock mass based on discrete element method[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2009, 26(10): 62—67.
- [48] 刘泉声, 吴月秀, 刘滨. 应力对裂隙岩体等效渗透系数影响的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 176—183.
- LIU Quan-sheng, WU Yue-xiu, LIU Bin. Discrete element analysis of effect of stress on equivalent permeability of fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 176—183.
- [49] 庄宁. 裂隙岩体渗流应力耦合状态下裂纹扩展机制及其模型研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [50] 张玉军. 核废料地质处置概念库HM耦合和THM耦合过程的二维离散元分析与比较[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 218—224.
- ZHANG Yu-jun. Analysis and comparison of coupled HM and THM processes by 2d distinct element method in a conceptual nuclear waste repository[J]. **Engineering Mechanics**, 2008, 25(4): 218—224.
- [51] 薛雯, 陈胜宏. 岩石裂隙渗流与法向应力耦合的复合单元模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2613—2619.
- XUE Luan-luan, CHEN Sheng-hong. Composite element model of seepage-normal stress coupling for rock fractures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Sup.1): 2613—2619.
- [52] 何翔. 裂隙岩体渗流-应力耦合的随机有限元方法[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [53] 潘鹏志. 岩石破裂过程及其渗流-应力耦合特性研究的弹塑性细胞自动机[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
- [54] 张振南, 陈永泉. 一种模拟节理岩体破坏的新方法-单元劈裂法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1858—1865.
- ZHANG Zhen-nan, CHEN Yong-quan. Novel numerical approach to jointed rock mass simulation: Element partition method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1858—1865.
- [55] 杨帆, 张振南. 包含摩尔-库仑准则的单元劈裂法模拟围压下节理扩展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, 18(1): 104—110.
- YANG Fan, ZHANG Zhen-nan. Element partition method with Mohr-Coulomb criterion for simulating joint propagation subjected to confining stress[J]. **Journal of Shanghai University (Natural Science)**, 2012, 18(1): 104—110.
- [56] 李明田. 岩石破裂过程数值模拟的格构细胞自动机方法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.
- [57] 周辉, 潘鹏志, 冯夏庭. 循环载荷作用下岩石单轴压缩破坏过程的平面弹塑性细胞自动机模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3623—3628.

- ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting. Plane elastoplastic cellular automata model of failure process of rocks under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp. 2): 3623—3628.
- [58] 魏怀鹏, 易大可, 李世海, 等. 基于连续介质模型的离散元方法中弹簧性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1159—1169.
- WEI Huai-peng, YI Da-ke, LI Shi-hai, et al. Study on spring properties of continuum-based discrete element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1159—1169.
- [59] 郑榕明, 张勇慧, 王可钧. 耦合算法原理及有限元与DDA的耦合[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 727—730.
- CHENG Yung-ming, ZHANG Yong-hui, WANG Ke-jun. Coupling of FEM and DDA method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 727—730.
- [60] 吴枝根, 李云鹏, 王建国, 等. 岩体裂隙扩展过程的有限元仿真[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2003, 26(1): 92—95.
- WU Zhi-gen, LI Yun-peng, WANG Jian-guo, et al. Simulation of the crack propagation process of rock mass based on the finite element method[J]. **Journal of Hefei University of Technology**, 2003, 26(1): 92—95.
- [61] BOUCHARD P O, BAY F, CHASTEL Y. Numerical modelling of crack propagation: Automatic remeshing and comparison of different criteria[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2003, 192(35—36): 3887—3908.
- [62] 李云鹏, 王芝银. 岩体裂隙扩展过程的数值模拟[J]. 工程地质学报, 1995, 3(4): 48—53.
- LI Yun-peng, WANG Zhi-yin. Numerical simulation of the crack extension process in rock masses[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1995, 3(4): 48—53.
- [63] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 等. 岩石裂纹扩展的实验与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 18—23.
- CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 18—23.
- [64] SUMI Y, WANG Z N. A finite-element simulation method for a system of growing cracks in a heterogeneous material[J]. **Mechanics of Materials**, 1998, 28(1—4): 197—206.
- [65] 周维垣, 寇晓东. 无单元法及其在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 5—9.
- ZHOU Wei-yuan, KOU Xiao-dong. Element-free method and its application in geotechnique engineering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 5—9.
- [66] 刘昌军, 丁留谦, 宁保辉, 等. 基于激光点云数据的裂隙岩体渗流场的无单元法模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2330—2337.
- LIU Chang-jun, DING Liu-qian, NING Bao-hui, et al. Simulation of seepage field for fractured rock mass by element free method based on laser point cloud data[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(11): 2330—2337.
- [67] 曹国金, 姜弘道. 无单元法研究和应用现状及动态[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 526—534.
- CAO Guo-jin, JIANG Hong-dao. Current study, application and development trend of meshless methods[J]. **Advance in Mechanics**, 2002, 32(4): 526—534.
- [68] 洪新兰. 无单元伽辽金法在平面热应力分析中的应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- [69] 寇晓东, 周维垣. 应用无单元法追踪裂纹扩展[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 18—23.
- KOU Xiao-dong, ZHOU Wei-yuan. Using element-free method to trace crack propagation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(1): 18—23.
- [70] 沈振中, 张鑫, 孙粤琳. 岩体水力劈裂的应力-渗流-损伤耦合模型研究[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 523—528.
- SHEN Zhen-zhong, ZHANG Xin, SUN Yue-lin. Research on stress-seepage-damage coupling model of hydraulic fracturing for rock mass[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2009, 26(4): 523—528.
- [71] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element-free Galerkin methods[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1994, 37(2): 229—256.
- [72] LU Y Y, BELYTSCHKO T, TABBARA M. Element-free Galerkin method for wave propagation and dynamic fracture[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1995, 126(1—2): 131—153.
- [73] KRYSL P, BELYTSCHKO T. Element free Galerkin method for dynamic propagation of arbitrary 3-D cracks[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1999, 44(6): 767—800.
- [74] 周维垣, 寇晓东. 无单元法及其工程应用[J]. 力学学报, 1998, 20(1): 5—9.

- 1998, 30(2): 193—202.
- ZHOU Wei-yuan, KOU Xiao-dong. Element-free method and its application in engineering[J]. **Acta Mechanica sinica**, 1998, 30(2): 193—202.
- [75] 张敦福. 无网格 Galerkin 方法及裂纹扩展数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [76] 程井, 常晓林, 周伟, 等. 基于无单元伽辽金法的水工结构温度应力及温度裂纹扩展计算[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(4): 26—31.
- CHENG Jing, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei, et al. Simulation of thermal stress and crack propagation in hydraulic structures based on EFGM[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2009, 41(4): 26—31.
- [77] 马文涛, 师俊平, 李宁. 水平集和无网格耦合在裂纹扩展中的应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3447—3453.
- MA Wen-tao, SHI Jun-ping, LI Ning. Coupling of level set and meshless method and its application to crack propagation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3447—3453.
- [78] BABUSHKA I, OSBORN J E. Generalized finite element methods: their performance and their relation to mixed methods[J]. **SIAM Journal of Numerical Analysis**, 1983, 20(3): 510—535.
- [79] DUARTE C A, HAMZEH O N, LISZKA T J, et al. A generalized finite element method for the simulation of three-dimensional dynamic crack propagation[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2001, 190 (15—17) : 2227—2262.
- [80] 彭自强, 李小凯, 葛修润. 广义有限元法对动态裂纹扩展的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3132—3137.
- PENG Zi-qiang, LI Xiao-kai, GE Xiu-run. Numerical simulation of dynamic crack propagation with generalized finite element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(18): 3132—3137.
- [81] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. **International Journal for Numerical Method in Engineering**, 1999, 45(5): 601—620.
- [82] SUKUMAR N, PREVOST J H. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method: Part I. Computer implementation[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2003, 40(26): 7513—537.
- [83] SUKUMAR N, MOËS N, MORAN B, et al. Extended finite element method for three-dimensional crack modeling[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2000, 48(11): 1549—1570.
- [84] 余天堂. 含裂纹体的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4434—4439.
- YU Tian-tang. Numerical simulation of a body with cracks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4434—4439.
- [85] 方修君, 金峰. 基于 ABAQUS 平台的扩展有限元法[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 6—10.
- FANG Xiu-jun, JIN Feng. Extended finite element method based on ABAQUS[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(7): 6—10.
- [86] 陈胜宏, 汪卫明, 徐明毅, 等. 小湾高拱坝坝踵开裂的有限单元法分析[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 66—71.
- CHEN Sheng-hong, WANG Wei-ming, XU Ming-yi, et al. Finite element analysis of the crack propagation in high arch dam heel of Xiaowan project[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, 34(1): 66—71.
- [87] 茹忠亮, 朱传锐, 张友良, 等. 断裂问题的扩展有限元法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2171—2176.
- RU Zhong-liang, ZHU Chuan-rui, ZHANG You-liang, et al. Study of fracture problem with extended finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2171—2176.
- [88] 周小平, 杨海清, 董捷. 压应力状态下多裂纹扩展过程数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 192—197.
- ZHOU Xiao-ping, YANG Hai-qing, DONG Jie. Numerical simulation of multiple-crack growth under compressive loads[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(2): 192—197.
- [89] 庄茁. 扩展有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [90] 贺续文, 刘忠, 廖彪, 等. 基于离散元法的节理岩体边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2199—2204.
- HE Xu-wen, LIU Zhong, LIAO Biao, et al. Stability analysis of jointed rock slopes based on discrete element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2199—2204.
- [91] 杨艳, 常晓林, 周伟, 等. 裂隙岩体水力劈裂的颗粒离散元数值模拟[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 78—85.
- YANG Yan, CHANG Xiao-lin, ZHOU Wei, et al. Simulation of hydraulic fracturing of fractured rock mass by PFC^{2D}[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2012, 44(5): 78—85.

- [92] 常晓林, 胡超, 马刚, 等. 模拟岩体失效全过程的连续——非连续变形体离散元方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2004—2011.
- CHANG Xiao-lin, HU Chao, MA Gang, et al. Continuous-discontinuous deformable discrete element method to simulate the whole failure process of rock masses and application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2004—2011.
- [93] LUC Scholtès, DONZÉ Frédéric-Victor. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 52: 18—30.
- [94] 石根华. 数值流形方法与非连续变形数值分析新方法[M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [95] 焦玉勇, 张秀丽, 刘泉声, 等. 用非连续变形分析方法模拟岩石裂纹扩展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 27(4): 682—691.
- JIAO Yu-yong, ZHANG Xiu-li, LIU Quan-sheng, et al. Simulation of rock crack propagation using discontinuous deformation analysis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 27(4): 682—691.
- [96] 张秀丽. 断续节理岩体破坏过程的数值分析方法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.
- [97] 夏才初, 许崇帮. 非连续变形分析(DDA)中断续节理扩展的模拟方法研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2027—2033.
- XIA Cai-chu, XU Chong-bang. Study of fracturing algorithm of intermittent joint by DDA and experimental validation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2027—2033.
- [98] NING You-jun, YANG Jun, AN Xin-mei, et al. Modelling rock fracturing and blast-induced rock mass failure via advanced discretisation within the discontinuous deformation analysis framework[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(1): 40—49.
- [99] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(2): 249—261.
- [100] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D}[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507—508.
- TANG Chun-an, ZHAO Wen. RFPA^{2D} system for rock fracture process analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(5): 507—508.
- [101] 张后全, 常旭, 唐春安, 等. 岩石多裂纹剪切断裂数值试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 5136—5140.
- ZHANG Hou-quan, CHANG Xu, TANG Chun-an, et al. Numerical study on shear failure of jointed rock with several flaws under shear testing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 5136—5140.
- [102] 梁正召, 唐春安, 张永彬, 等. 岩石三维破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 931—936.
- LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, ZHANG Yong-bin, et al. 3D numerical simulation of failure process of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 931—936.
- [103] 唐世斌, 唐春安, 朱万成, 等. 热应力作用下的岩石破裂过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2071—2078.
- TANG Shi-bin, TANG Chun'an, ZHU Wan-cheng, et al. Numerical investigation on rock failure process induced by thermal stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(10): 2071—2078.
- [104] LI L C, TANG C A, ZHU W C, et al. Numerical analysis of slope stability based on the gravity increase method[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(7): 1246—1258.
- [105] ZHU W C, LIU J, TANG C A, et al. Simulation of progressive fracturing processes around underground excavations under biaxial compression[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(3): 231—240.
- [106] SHI Gen-hua. Manifold method of material analysis[C]// Proceedings of the 1st International Forum on DDA and Simulations of Discontinuous Media. Albuquerque: TSI Press, 1996: 52—204.
- [107] 王水林, 葛秀润, 章光. 受压状态下裂隙扩展的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 671—675.
- WANG Shui-lin, GE Xiu-run, ZHANG Guang. Numerical analysis of crack propagation under compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 671—675.
- [108] 彭自强. 数值流形方法与动态裂纹扩展模拟[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2003.
- [109] 张国新, 赵妍, 彭校初. 考虑岩桥断裂的岩质边坡倾倒破坏的流形元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1773—1780.

- ZHANG Guo-xin, ZHAO Yan, PENG Xiao-chu. Simulation of toppling failure of rock slope by numerical manifold method considering fracture of rock bridges[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1773—1780.
- [110] CHIOU Yaw-jeng, LEE Yu-min, TSAY Ren-jow. Mixed mode fracture propagation by manifold method[J]. **International Journal of Fracture**, 2002, 114(4): 327—347.
- [111] ZHANG H H, LI L X, AN X M, et al. Numerical analysis of 2-D crack propagation problems using the numerical manifold method[J]. **Engineering Analysis with Boundary**, 2010, 34: 41—50.
- [112] MA G W, AN X M, ZHANG H H, et al. Modeling complex crack problems using the numerical manifold method[J]. **International Journal of Fracture**, 2009, 156(1): 21—35.
- [113] WU Zhi-jun, WONG Louis Ngai Yuen. Frictional crack initiation and propagation analysis using the numerical manifold method[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 39: 38—53.
- [114] NING Y J, AN X M, MA G W. Footwall slope stability analysis with the numerical manifold method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(6): 964—975.
- [115] 陈隼, 刘建. 数值流形元中水压力与开挖作用的模拟方法研究[J]. **水文地质与工程地质**, 2011, 38(4): 43—48.
- CHEN Quan, LIU Jian. Water pressure and excavation simulation with the numerical manifold method[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2011, 38(4): 43—48.
- [116] 何传永, 武雄, 吴永平. 平班水电站右岸滑坡流形元法数值模拟[J]. **中国水利水电科学研究院学报**, 2004, 2(2): 120—123.
- HE Chuan-yong, WU Xiong, WU Yong-ping. Numerical simulation of landslide on the right bank at the Pingban Station by using manifold method[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2004, 2(2): 120—123.
- [117] 姜清辉, 邓书申, 周创兵. 有自由面渗流分析的三维数值流形方法[J]. **岩土力学**, 2011, 32(3): 879—884.
- JIANG Qing-hui, DENG Shu-shen, ZHOU Chuang-bing. Three-dimensional numerical manifold method for seepage problems with free surfaces[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 879—884.
- [118] 林绍忠, 明峥嵘, 祁勇峰. 用数值流形法分析温度场及温度应力[J]. **长江科学院院报**, 2007, 24(5): 72—75.
- LIN Shao-zhong, MING Zheng-rong, QI Yong-feng. Thermal field and thermal stress analysis based on numerical manifold method[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2007, 24(5): 72—75.
- [119] 刘泉声, 刘学伟. 裂隙岩体温度场数值流形方法初步研究[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(4): 635—642.
- LIU Quan-sheng, LIU Xue-wei. Preliminary research on numerical manifold method for temperature field of fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(4): 635—642.
- [120] 魏高峰, 冯伟. 热传导问题的非协调数值流形方法[J]. **力学季刊**, 2005, 26(3): 451—454.
- WEI Gao-feng, FENG Wei. Incompatible numerical manifold method based on heat exchange problem[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 2005, 26(3): 451—454.
- [121] 刘学伟, 刘泉声, 黄诗冰, 等. 裂隙岩体温度—渗流耦合数值流形方法研究[J]. **四川大学学报(工程科学版)**, 2013, 45(增刊 2): 77—83.
- LIU Xue-wei, LIU Quan-sheng, Huang Shi-bing, et al. Study on numerical manifold method of coupled thermo-hydraulic of fractured rock masses[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2013, 45(Supp.2): 77—83.
- [122] 王芝银, 王思敬, 杨志法. 岩石大变形分析的流形方法[J]. **岩石力学与工程学报**, 1997, 16(5): 399—404.
- WANG Zhi-yin, WANG Si-jing, YANG Zhi-fa. Manifold method in analysis of large deformation for rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(5): 399—404.
- [123] 刘建, 陈隼. 一种模拟岩石蠕变的数值流形方法[J]. **岩土力学**, 2012, 33(4): 1203—1209.
- LIU Jian, CHEN Quan. A numerical manifold method for simulating creep of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1203—1209.
- [124] 刘建, 陈隼. 岩体黏弹性蠕变计算的高阶数值流形方法研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(7): 2174—2180.
- LIU Jian, CHEN Quan. Study of high-order numerical manifold method in viscoelastic creep of rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2174—2180.