

# 岩体 THM 耦合应用研究现状综述

张强林,王 媛

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要** 对岩体 THM 耦合研究现状进行综述.从 THM 耦合机理分析入手,结合国内外试验成果,对裂隙岩体耦合模型、方程求解等几个方面进行总结,最后对后继研究提出了几点建议.耦合机理研究方面,需要对温度场、渗流场、应力场各场之间耦合影响的大小进行研究,而大裂隙中的 THM 耦合值得注意.在耦合机理的验证方面,需加强室内或现场试验.在耦合计算方面,应开发程序,而采用高性能计算是一个较好的发展方向.

**关键词** 裂隙岩体 温度场 渗流场 应力场 THM 耦合

**中图分类号** :TU457

**文献标识码** :A

**文章编号** :1000-1980(2007)05-0538-04

20 世纪 80 年代初期,由于石油、地热等能源开发以及核废料深埋地质处理等工程问题的实际需要,国外开始关注岩土工程中的 THM 耦合(温度场 T、渗流场 H 和应力场 M 耦合)问题.早期的 THM 耦合研究主要集中在温度场-渗流场-应力场三场耦合数学模型的建立以及数学模型求解方法(数值模拟)的有效性检验方面.从 20 世纪 90 年代开始,国外学者开始进行名为 DECOVALEX<sup>[1-3]</sup> 的国际合作研究计划,推动了裂隙岩体 THM 耦合研究在数学模型、数值模拟以及试验方面的发展.从 20 世纪 90 年代开始,裂隙岩体 THM 耦合问题也引起中国学者<sup>[4-7]</sup> 的极大兴趣,成为研究的热点,其研究成果在诸如核废料深埋处理、地热能提取、寒区工程、煤与瓦斯突出、石油天然气开发等领域都有不同的应用.如核能利用后产生的高放射性核废料在采用深埋地质处理后仍然会放出大量的热,加上污染物的运移,给储库周围岩体的地质环境产生很大的影响.注冷法提取地热能或提升油气产量时更要考虑在温度场-渗流场-应力场共同作用下裂隙等流体通道的情况.而生活垃圾采用填埋处理后分解释放出的甲烷或少量有毒气体等也需要重点研究.可以看出,研究岩体的 THM 耦合具有重要的意义.基于此,本文从耦合机理入手,对岩体 THM 耦合应用研究的现状从耦合试验、耦合模型处理及模型求解方面作一综述,并提出相应的研究建议.

## 1 岩体 THM 耦合机理分析

岩体(尤其是裂隙岩体)处于一定的地质环境中,而岩体的温度、应力及地下水的流动是影响地质环境的 3 个主要因素,三者之间相互联系、相互作用、相互制约,形成裂隙岩体中渗流场、应力场与温度场之间复杂的耦合效应,因此进行裂隙岩体的 THM 耦合机理分析非常必要.简单地说,在温度场、渗流场、应力场中,热作用可以在岩体中产生热应力并引起岩体的弹性模量、泊松比等固体特性的变化,同时由于温度变化引起地下水密度的变化,影响了地下水的流动.地下水的流动可以通过传导或对流使热量更快地扩散开来,而岩体中地下水的存在可以改变岩体的受力情况.岩体由于受到变形影响会在内部产生一定的热量耗散,而力学变形也会部分影响固体热学特性的变化,同时力学效应对于空隙度或流体的渗透性能也具有比较明显的影响.许多学者对此进行了探讨,如 Abdallah 等<sup>[8]</sup> 提出了非完全耦合作用机理模型(图 1),Hart 等<sup>[9]</sup> 提出了完全耦合作用机理模型(图 2)等.

## 2 裂隙岩体 THM 耦合试验研究

根据实际需要,有关学者通过试验对裂隙岩体的 THM 耦合机理进行验证. DECOVALEX 组织<sup>[1-3]</sup> 在几个

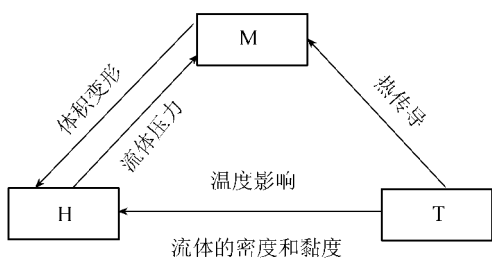


图 1 岩体 THM 非完全耦合作用机理<sup>[8]</sup>

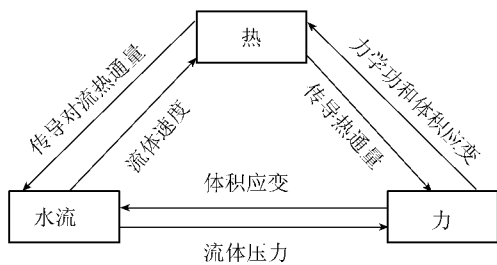


图 2 岩体 THM 完全耦合作用机理<sup>[9]</sup>

Fig.1 Incomplete THM coupling mechanism of rock mass

Fig.2 Complete THM coupling mechanism of rock mass

阶段的研究中进行了很多试验.第 1 阶段针对 3 个假定的 BMT(标准试验)和 6 个 TC(试验实例)进行模拟试验(含针对岩石试样和节理的 3 个小型实验室试验和 3 个大型现场试验),其中 1 个 BMT 是模拟位于具有裂隙网络系统、性质与 Stripa 花岗岩类似的瑞典 KBS-3 核废料贮存概念库.第 2 阶段<sup>[1]</sup>决定减少 TC 数量,把研究重点放在 2 个主要的大尺度现场试验(英国对 Sellafield 地区的 RCF 巷道开挖过程进行研究及日本 Kamaishi Mine 的原位岩体现场 THM 耦合试验)上.主要研究工作由 4 部分组成:(a)英国 Sellafield 竖井内 NIREX 地下实验室围岩性质的数值模拟研究;(b)日本 Kamaishi 矿井的地下加热实验室围岩性质的数值模拟研究;(c)岩石节理本构关系研究现状的调研评估;(d)影响核废料贮存库设计与安全性评价的 THM 耦合过程的分析.第 3 阶段<sup>[1]</sup>的研究工作也分成 4 个部分,每部分工作都由 1 个现场试验来进行:(a)由西班牙 ENRESA 研究小组进行的瑞士 Grimsel 矿井内 FEBEX 地下实验室加热试验;(b)位于美国 Yucca Mountain 的地下实验室进行的平洞缩尺试验(DST);(c)3 个 BMT 试验,即再饱和模拟试验 BMT<sub>1</sub>、围岩均质性 BMT<sub>2</sub> 试验和冰川作用影响的 BMT<sub>3</sub> 试验;(d)目前正在进行的涉及化学场的耦合研究阶段.IJRMM 等<sup>[10-14]</sup>针对这几个阶段的试验成果进行了大量的研究.

为了研究温度场、渗流场、应力场影响下某些因素的变化情况,我国进行了一些室内试验,应用于现场的大范围试验还不多见.如程瑞端等<sup>[15]</sup>通过变温煤样渗流实验,探讨了温度、有效应力对煤样渗透系数的影响.刘亚晨等<sup>[16]</sup>进行了单、正交裂隙岩体的渗透试验,并针对单、正交裂隙岩样在不同温度及应力下的渗流试验特点,分析了裂隙结构面变形规律,并以此试验成果为基础,给出了岩样裂隙结构面温度-应力-水力的耦合本构关系式.刘均荣等<sup>[17]</sup>对储层粉砂岩、灰岩、变质岩和砾岩渗透率受热变化规律进行了试验研究,分析结果表明 岩石在常压条件下经过高温加热处理,其渗透率随温度的升高呈增大趋势;岩石渗透率发生突变时存在一个阈值温度,组分不同的岩石,其阈值温度也不同.梁冰等<sup>[18]</sup>基于热弹性理论,结合室内试验测试结果,导出了岩石渗透率和温度之间的正指数关系,并从理论上验证了温度门槛值的存在.贺玉龙等<sup>[19]</sup>进行了不同温度水平和不同有效应力水平下砂岩的孔隙度试验和渗透率试验.试验结果表明 在温度水平一定的情况下,砂岩岩样的孔隙度和渗透率均随有效应力的增加而减小,但孔隙度的减小幅度大大小于渗透率的减小幅度.而在有效应力水平一定的情况下,当温度升高时,砂岩岩样的渗透率减小幅度很大,但孔隙度的变化却很小.贺玉龙等<sup>[19]</sup>通过对试验结果的分析,初步论证了温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理,认为温度及有效应力的影响主要体现在对砂岩“喉道”的控制作用上.周青春等<sup>[20]</sup>通过不同温度和围压及孔隙水压力和围压条件下的耦合三轴试验,研究了南水北调西线一期工程砂岩的强度特性和变形特性.试验结果显示,相同温度下,三轴压缩时砂岩的强度随围压增加而增长,而变形模量随围压的增长变化不大.温度对砂岩强度的影响比较复杂,在低围压下,砂岩的强度随温度增长.围压超过 40 MPa 后,砂岩的强度随温度的增长有降低的趋势.平均变形模量对温度的依赖性较大,总体上随着温度增加其值得到提高.在相同孔隙水压力作用下,砂岩的强度受围压控制,表现为围压越大,砂岩的强度越高.在相同围压条件下,孔隙水压力越高,砂岩强度越低.在孔隙水压力作用下,围压越高,平均变形模量越高.在围压作用下,孔隙水压力越高,变形模量越低.

### 3 裂隙岩体完全 THM 耦合模型处理

目前主要采用多孔介质的方法研究裂隙岩体中的 THM 耦合机理,根据一定的假设条件从机理出发建立 THM 耦合控制方程. Rutqvist 等<sup>[21]</sup>采用多孔均质介质的方法对核废料处理领域中应用较多的 4 种软件

ROCMAS, THAMES, FRACON, AQCLAY 控制方程进行推导, 而刘亚晨等<sup>[25]</sup>也主要采用均质多孔介质的方法。

实际上由于天然岩体中存在大量的孔隙和裂隙, 这些缺陷不但大大改变了岩体的力学性质(变形模量及强度参数降低, 岩体呈各向异性), 也严重影响岩体的渗透特性及热学性能。为了能够精确处理温度场、渗流场、应力场耦合特性, 研究中必须考虑这些裂隙等的影响。目前关于岩体的 THM 耦合研究主要有 2 种方法<sup>[22]</sup>——等效连续法与离散法。等效连续法就是把裂隙中的渗流量、热流等平均到岩体中去, 在得到等效连续介质模型之后利用经典的多孔介质分析方法来进行研究。这种方法使用起来很方便, 但缺点在于岩体渗流或热流的尺寸效应不容易判定, 但只要样本的单元体积(REV)存在, 并且相对于研究网格来说不是很大, 则应该尽量采用等效连续介质模型进行分析。离散法则是在确定每条裂隙的空间方位、隙宽等几何参数的情况下, 以单条裂隙水流基本公式为基础, 利用流入、流出各裂隙交叉点流量相等条件来求其水头值, 而热学分析与此大致类似。这种模型假定岩块为刚性或可变形的, 不连续面由节理单元模拟, 更接近于研究实际, 但处理起来难度很大, 且数值分析的工作量也很大。Millard 等<sup>[23]</sup>针对 DECOVALEX 项目第 1 阶段的 BMT<sub>1</sub> 试验(基准试验, 针对大范围的裂隙岩体), 介绍了几个小组采用离散法或等效连续法处理的结果并进行了对比, 结果发现温度及力学方面的计算结果相类似, 而水力特性上存在差异, 主要原因是裂隙的水力传导与裂隙开度之间非线性关系很强。Olivella 等<sup>[22]</sup>用双重介质模型进行 THM 耦合分析, 以研究层理结构岩体的固有渗透率和变形变化, 并得出了全耦合的重要性。孙培德<sup>[24]</sup>针对核废料地质处理系统的情况, 采用不确定性的随机分析方法来进行地质系统的 THM 耦合研究, 并提出了研究思路及部分技术路线。

## 4 裂隙岩体 THM 耦合模型求解

得到 THM 耦合控制方程之后, 理论上, 如果结合一定的边界条件及初始条件, 就可以得到精确的解析解。但对于绝大多数的耦合问题来说, 由于地质体状态的复杂性、耦合的强非线性等使得精确的解析解很难得到。大部分情况下人们都采用数值方法离散控制方程, 采用迭代法或全耦合方法进行求解。对于裂隙岩体 THM 耦合, 常用的数值模拟方法有 2 种: 有限差分法(FDM)和有限元(FEM)法。从数学角度看, FDM 比 FEM 近似程度高, 但应用上后者远比前者简单灵活。特别是在 Galerkin 法出现后, 有限元法得到了进一步发展。利用有限差分法或有限元法, 将控制方程在时间、空间上离散, 结合初始条件和边界条件即可计算出每个时间步中 THM 耦合过程的变化情况。国外已编制了可以用于岩体 THM 耦合计算的 MOTIF, THAMES, FRACON, ABAQUS, UDEC 等计算程序<sup>[23-24]</sup>。国内也编制了类似程序<sup>[25-27]</sup>, 但还没有方便使用的软件。

## 5 结论及建议

本文对国内外复杂裂隙岩体 THM 耦合研究现状进行了综述。从研究情况来看, 将复杂裂隙岩体用多孔及等效方法的 THM 耦合研究国内外差距并不大, 而对于大裂隙也就是离散裂隙的 THM 耦合分析尚不多见, 对于温度场、渗流场、应力场的相互影响机理及影响大小仍需进一步研究。在耦合机理的试验验证上, 国外已进行了几个大范围的长期的现场试验以及较多的室内相关试验, 而国内在试验方面比较欠缺, 虽然提出了一些理论模型, 但大多未经试验验证, 而试验采用小样本也缺乏代表性。在模型计算方面, 国外已经开发出了几个可以用于耦合计算的大型软件, 但国内尚没有类似软件出现。因此, 建议对裂隙中的耦合机理及其他各场的耦合影响大小展开研究, 同时进行相关试验及计算软件开发。考虑到计算量的增多和计算区域的扩大, 还应该加强高性能计算的应用研究, 以节省计算时间。

## 参考文献:

- [1] JING L, TSANG C F, STEPHANSSON O. DEXCOVALEX-an international co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1995, 32(5): 389-398.
- [2] TSANG C F, JING L, STEPHANSSON O, et al. The DECOVALEX III project: a summary of activities and lessons learned[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, 42(6): 593-610.
- [3] 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.
- [4] 刘亚晨, 吴玉山, 刘泉声. 核废料储存裂隙岩体耦合分析研究综述[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 10(3): 72-78.
- [5] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 529

-533.

- [6] 刘建军,薛强.岩土热-流-固耦合理论及在采矿工程中的应用[J].武汉工业学院学报,2004,23(3):55-60.
- [7] 刘建军,冯夏庭.我国油藏渗流-温度-应力耦合的研究进展[J].岩土力学,2003,24(增刊):645-650.
- [8] ABDALLAH G, THORAVALL A, SFEIR A, et al. Thermal convection of fluid in fractured media[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech. Abstr, 1995, 32(5): 481-490.
- [9] HART R D, JOHN C M. Formulation of a fully-coupled Thermal-Mechanical-Fluid Model for non-linear geologic systems[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1986, 23(3): 213-224.
- [10] CHAN T, KHAIR K, JING L, et al. International comparison of coupled thermo-hydro-mechanical models of a multiple-fracture bench mark problem: DECOVALEX Phase I, bench mark test 2[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1995, 32(5): 435-452.
- [11] BORGESESSON L, CHIJIMATSU M, FUJITA T, et al. Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite-based buffer material by laboratory tests and numerical back analysis[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38(1): 95-104.
- [12] HSIUNG S M, CHOWDHURY A H, NATARAJA M S. Numerical simulation of thermal-mechanical process observed at the Drift-Scale heater test at Yucca Mountain, Nevada, USA[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, 42(6): 652-666.
- [13] TSANG C F, STEPHANSSON O, KAUTSKY F, et al. An overview of the DECOVALEX Project on coupled THM processes in fractured rock-bentonite systems[C]//STEPHANSSON O, HUDSON J A, JING L. International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems: Fundamentals, Modelling, Experiments & Applications. Stockholm: LWR, KTH, 2003: 3-14.
- [14] STEPHANSSON O, TSANG C F, JING L, et al. DECOVALEX project 1992-2006: purposes, tasks and main achievements[C]//XU Weiya. Advances on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Geosystems and Engineering. Nanjing: Hohai University, 2006: 31-45.
- [15] 程瑞端,陈海焱,鲜学福,等.温度对煤样渗透系数影响的实验研究[J].煤炭工程师,1998(1):13-18.
- [16] 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.
- [17] 刘均荣,秦积舜,吴晓东.温度对岩石渗透率影响的实验研究[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(4):51-54.
- [18] 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.
- [19] 贺玉龙,杨立中.温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14):2420-2427.
- [20] 周青春,李海波,杨春和,等.南水北调西线一期工程砂岩温度、围压和水压耦合试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3639-3645.
- [21] RUTQVIST J, BORGESESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Thermohydrmechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element models[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38(1): 105-128.
- [22] OLIVELLA S, GENS A. Double structure THM analysis of a heating test in a fracture tuff incorporating intrinsic permeability variations[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, 42(6): 667-679.
- [23] MILLARD A, DURIN M, STIETEL A, et al. Discrete and continuum approaches to simulate the Thermo-Hydro-Mechanical couplings in a large, fractured rock mass[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1995, 32(5): 409-434.
- [24] 孙培德.地质系统热-水-力耦合作用的随机建模初步研究[J].岩土力学,2003,24(增刊):39-42.
- [25] 刘亚晨,席道瑛.核废料贮存裂隙岩体中 THM 耦合过程的有限元分析[J].水文地质工程地质,2003(3):81-86.
- [26] 张玉军.一种模拟热-水-应力耦合作用的节理单元及数值分析[J].岩土工程学报,2005,27(3):270-274.
- [27] 李宁,陈波,陈飞熊.寒区复合地基的温度场、水分场与变形场三场耦合模型[J].土木工程学报,2003,36(10):66-71.

## Review of current research on application of THM coupling of rock mass

ZHANG Qiang-lin, WANG Yuan

(Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** From the mechanism of THM coupling, a review was made on following aspects, i. e. the coupling model of fissured rock mass, the solving of equations, etc., based on the experimental results at home and abroad. Finally, some suggestions for further research were made: the range of interaction influences in different fields should be studied for investigation of the coupling mechanism, and THM coupling in large fissures should be paid much more attention; the laboratory and field experiments should be strengthened for verification of the coupling mechanism; as for coupling calculation, new programs should be developed, and high efficient calculation may be a better way.

**Key words** fissured rock mass; temperature field; seepage field; stress field; THM coupling