

放射性废物地质处置中主要岩石力学问题

井兰如¹, 冯夏庭²

(1. 瑞典皇家工学院, 瑞典 斯德哥尔摩 10044; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 放射性核废物的地质处置是一个关系到国计民生多学科交叉的综合性问题。它不仅提出了许多挑战性的科学和技术课题, 而且在一个更高的层面上对国家核能、核废物、国防和环境保护事业中大型科学研究的总体规划 and 组织实施、经费保障及工程建设等提出了立法和政策方面的要求。岩石力学和岩石工程是放射性废物地质处置问题的一个极其重要的方面。放射性废物地下处置系统的设计、现场地质调查、工程设计和施工、运行以及系统长期安全性评估均含有重要的岩石力学和岩石工程内容, 因而在放射性废物地质处置的研究和发展规划中有不可取代的地位。据此, 首先对核废物地质处置的总体系统及各个主要环节的主要理论和工程问题作一个简要的介绍。然后在此基础上, 提出在可行性研究及现场勘查调研对岩石力学和岩石工程主要内容、要求及目前国际上的动态和发展方向。讨论的重点是节理岩体的温度、应力、流体流动及化学反应过程耦合效应的数值方法、试验研究, 及其国际放射性废物处置事业中的进展和前景及中国在核废物地质处置方面所开展的研究工作以及所取得的进展。

关键词: 岩石力学; 放射性废物; 地质处置

中图分类号: TU 452; TL 942.21

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)04 - 0833 - 09

MAIN ROCK MECHANICS ISSUES IN GEOLOGICAL DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTES

JING Lanru¹, FENG Xiating²

(1. *Royal Institute of Technology, Stockholm 10044, Sweden;*

2. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

Abstract: Geological disposal of radioactive wastes is a multi-disciplinary issue of importance for national interest. It stimulated many challenging scientific and technical issues, and at a higher level, presented a series of demanding requirements for a country's overall research and development programme, its implementation and engineering practice, about basic policies and legislature concerning nuclear energy, defense, waste management and environment. Rock mechanics and rock engineering are very important fields for geological disposal of radioactive wastes, and contribute significantly to the conceptual design, site investigation, engineering design and construction, operation and the long-term safety assessment of the waste repositories. It plays, therefore, a irreplaceable role in the research and development programme of geological disposal of radioactive wastes. In this paper, we first summarizes briefly the main steps about repository system, followed by the major demands for rock mechanics and rock engineering during feasibility study and site investigation, and the major international trends concerning these issues. The focus is placed on the coupled thermo-hydro-mechanical and chemical (THMC)

收稿日期: 2005 - 07 - 27; **修回日期:** 2005 - 10 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172098, 50325414); 中国科学院国际合作重点项目(GJHZ0516); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708)

作者简介: 井兰如(1951 -), 男, 博士, 1990年于瑞典律里欧工业大学获博士学位, 现任瑞典皇家工学院副教授, 主要从事岩石力学数值分析方法方面的教学与研究。E-mail: lanru@kth.se

processes and the current status of research in international communities. At the end, the progress in research and development works in the field of radioactive waste disposal in China are presented; and possible future working directions are discussed.

Key words: rock mechanics; radioactive waste; geological disposal

1 引言

放射性废物来自放射性材料的科研和工业生产活动,比如来自核电厂的乏燃料芯棒,核武器研制和生产过程中产生各种固态或液态放射性废物,科研和医疗卫生事业使用过的放射性材料和防-保护材料,核原料矿山开采中产生的废石、尾矿、废水,以及退役的核发电厂反应堆及其附属设施等。军用核废物和核乏核燃料属于高放射性核废物,并具有较强到极强的放热效应,而液体状态下的军用核废物则具有极强的腐蚀效应。

当前,国际上广泛采纳的高放核废物处置方法是利用深部地下工程的地质处置^[1]。该方法的基本要点是在距地表 500~1 000 m 深度的地质介质(如花岗岩、黏土、岩盐、页岩等)中开挖单层或多层的巷道和洞室系统,将最终形式的放射性废物存放在预置的位置,然后将巷道和洞室加以回填隔离。由于各国地质条件的不同,母岩的处置选择也自然不尽相同,但主要岩石类型主要有花岗岩(加拿大,捷克,芬兰,印度,瑞典,法国,瑞士,日本,德国,保加利亚和乌克兰)、黏土或页岩(比利时,匈牙利,法国,瑞士及德国)、岩盐(白俄罗斯,荷兰和乌克兰)、泥灰岩(保加利亚)、超基性岩(印度尼西亚)、凝灰岩(美国)和沉积岩(日本)。波兰、斯洛伐克、西班牙和英国尚未最后确定核废物储存母岩类型。

2 多屏障处置系统

2.1 多屏障处置系统的基本概念

多屏障处置系统的基本概念是通过工程设施和合理的设计使核素迁移经过若干层的人工及天然屏障介质的延滞使其辐射强度在接近生物圈边界时衰减到安全的剂量^[2]。目前国际上最为广泛接受的概念是三重屏障系统:

(1) 金属存储容器

提供储存容器的结构强度,防渗漏/防腐及其他有利的环境化学条件,设计时一般要求可安全储存高放核废物(无泄漏)达数百年至上千年,称为“第

一层人工屏障”。

(2) 人工黏土充填层

在金属容器外围设置一定厚度,遇水膨胀、非常致密且有极低的渗透性,并有较强吸附性和良好传热性的人工黏土层。该黏土层具有多重作用:①避免金属容器与坚硬岩石直接接触以保护其结构强度;②有极低的渗透性,能显著地延缓核素迁移速度并延长其迁移时间(数百年至上千年);③对地下水和金属储存器实行化学隔离,将废物衰变放出的热量从容器有效地传递到岩石圈。该黏土隔离层为“第二人工屏障”,并将第一、第二人工屏障统称为“工程屏障”。

(3) 天然屏障

天然屏障是与第二人工屏障直接接触的天然储存母岩或其他地质介质。该屏障的应具有有利的地球化学环境和条件、长期稳定的地质力学条件和较低的渗透性,从而可有效地降低核素的辐射强度和迁移速度,延长其传输时间(即提供其衰变所需的时间,可达数千乃至数十万年),从而使不断衰变的核素在接近生物圈边界时,使其辐射剂量符合安全标准。地下储存场一般要求构成天然屏障的地质材料处于饱和状态以充分发挥黏土隔离层的效用,而对于位于地下水位以上的储存场(如美国的尤卡山顶部储存场)则要求无水的“干储存场”或极少量的自然水量补给。同时,地质材料的矿物构成能提供可接受的地下水酸碱度(pH)和氧化还原电位(Eh)条件。

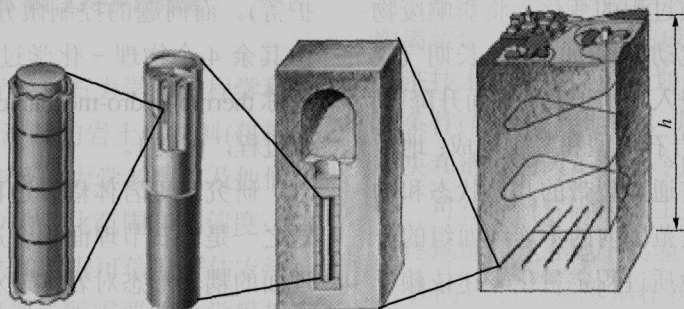
由于地质条件和母岩选择的不同,各国的最终核废物处置场的概念设计也不同。图1是瑞典目前采用的封闭式多屏障处置系统示意图^[2]。

2.2 最终储存场的多阶段开发过程

核废物最终处置场的选址、设计、论证、施工和运行不能一蹴而就,必须经过一个多阶段的反复探索和提高的过程,其主要阶段是:

(1) 初步可行性研究

根据本国具体地质条件提出母岩类型(花岗岩、黏土/页岩、岩盐等)以及相应于不同母岩类型处置场的数学模型和基本设计参数(如最高限定温度和工程屏障的主要设计参数),提出预选场址选址。



从左至右：乏燃料芯棒；铜-铸铁组合乏燃料容器；处置场联络运输巷道、垂直存放钻孔和回填料；地下永久存放场及其开拓系统

图1 瑞典SKB的KBS-3多屏障处置系统^[2]

Fig.1 KBS-3 concept of multiple barrier system of SKB in Sweden^[2]

(2) 场址选择

对各预选场址进行各学科综合现场试验研究(主要是岩矿和构造地质、水文地质、地球物理和地球化学勘探及岩石力学),排除不适合场址,根据科学结论和公众意愿选择最终场址。

(3) 现场勘察

对最终场址进行详尽的各学科交叉研究,对处置场初步设计进行储存场特性预测和核素迁移安全分析(包括环境影响分析)。最后,应形成完善的可行性研究报告:① 处置场设计、施工及分阶段开挖建设和试运行;② 处置场最终评估报告(特性预测和核素迁移安全分析);③ 处置场分阶段正常建设、运行和封闭;现场短期-长期监测;④ 处置场最终封闭(包括所有的竖井、斜坡道、斜井、通风巷道和钻孔)及现场长期监测。

完成上述所有过程需要30~50a的时间。核废物(尤其是高放核废物)处置场的论证、选址、环境安全评估、设计施工,以及科学研究的整个过程同时也是工业界与国家环境安全监察机构之间、公众与国家行政机构之间、国家立法和督察机构与工业界之间相互合作的过程。核废物处置在西方各主要工业国不仅仅是科学技术和工业经济问题,而且往往还是一个极为敏感的政治问题。公众意愿往往有极大的影响力,尤其对选址和环境上的意愿会影响评估的最终结论。在此背景下,各国均采用“全透明”的核废料处理计划和实施过程,其目的是尽可能在初期得到社会各界对核废物处置计划中各重大问题的处理方式及其结果的理解、支持和反馈。

与其他岩土工程相比,地下高放核废物处置场

的开挖和施工并没有太大的工程施工上的难度,但在许多理论和技术方面存在诸多问题。其中,最重要的问题之一是必须向国家环境安全监察机构提供确信的关于最终处置场发展各个阶段的主要理论依据和技术结论的科学性、正确性,技术可行性,环境安全可靠、经济合理性,以及与现行环境法规的适应性等,且这种科学论证在必要的情形下须为非专业化人士和社会公众所理解和接受。由于节理岩体的复杂几何形态和物理-化学特性及参数中的不确定性,这种论证和结论需要建立在可靠的试验、观测和理论预测基础上。因此,对放射性废物在地质介质中储存和核素迁移过程中所可能涉及到的所有物理-化学过程及其人为因素影响的理解,以及由此所建立的可靠数学模型和有效的计算机模拟手段是核废物地质处置问题的关键所在。

3 主要的物理-化学过程

核废物地下处置所涉及的物理-化学过程较为复杂,且随不同的地质储存介质和场址设计而有所不同。核废物处置场的主要组成部分(从内向外)为:核废物组件、金属储存罐、人工隔离缓冲回填层(包括存放井中人工黏土隔离层和巷道废石/黏土混合回填体)及母岩。各部分所涉及的物理-化学过程也大不相同,但可概括为六大类基本过程的不同组合:地质过程(G)、热传输过程(T)、流体(包括液体和气体及其混合物)流动过程(H)、介质应力-应变(包括破坏、断裂、损伤等)过程(M)、化学反应(包括反应性和非反应性溶质和核素传输)过程(C)和工程扰动

过程(E)。其中地质过程决定初始几何条件、边界条件和加载条件及其随地质过程的变化,将影响废物场所在天然场址岩体的扰动过程(如地震、长期气候变化引起的周期性冰川侵入和消退、海平面升降等)以及初始地质条件(母岩岩石类型和矿物构成;地质构造特性,特别是大型贯通断裂带的几何状态和物理-化学特性;不同尺度范围内的不连续面组的分布特性;地热梯度等)。地质过程定量化表述依赖于长期理论预测(如周期性冰川侵入和消退的频度、冰层的可靠模型,冰下富氧水流状态和永冻层深度变化模型等)或观测(如地震频度/烈度和海面升降的统计模型等)。工程扰动过程主要是工程勘查勘探(如钻孔和巷探工程)和核废物场分步开挖,运行和回填封闭过程中引起的对母岩的人工扰动,表现为动边界和几何状态的变化(如竖井-巷道-斜坡道综合开拓系统的几何设计、施工顺序和进度设计、支护手段设计、服务寿命预测、施工方法设计(如凿岩爆破、机械开挖等)、钻孔平面几何布置及深度设计等),以及所引起的其他工程或非工程问题的处理(如通风、排水、供电、照明、安全、生活、地面设

施和交通、社区关系、废石堆放和再利用、环境保护等)。而问题的控制微分方程和本构模型则主要由其余 4 个物理-化学过程及耦合效应所决定,即所称 thermo-hydro-mechanical and chemical(THMC)耦合过程,见表 1。

研究节理岩体耦合过程及其影响中最重要的课题之一是岩石节理面耦合过程的研究,因为岩石节理面的耦合形态对岩体宏观耦合形态往往起着控制性的影响。尽管国际上目前对岩土介质的耦合过程(特别是 THM 耦合过程)研究取得了一定的进展,但对于节理岩体,特别是工程中较常见的硬质岩(如花岗岩、大理岩、变质岩和灰岩等),类似的研究尚处于起步阶段,其主要原因是人们对岩石构造面的耦合过程的理解尚处于起始阶段,因而众多的重大理论和试验问题尚未得到充分的解决。目前的试验和理论研究集中在岩石节理应力-水流耦合效应上,但是温度和化学反应过程的作用几乎处于空白状态。这种状态的主要原因是缺少有效和可靠的试验技术和手段,从而对理论研究和实际应用造成了很大的障碍。

表 1 岩石节理面的基本 THMC 耦合关系
Table 1 Basic THMC coupling mechanisms of rock fractures

耦合关系	特征
力学过程(M)	构造面岩石的应力、应变、损伤、强度、破坏和构造面增长
M-H 耦合	构造面岩石的应力、应变、损伤、强度和破坏对构造面的导水渗透率的影响
M-T 耦合	构造面接触和相对摩擦引起的机械功到热能的转化
M-C 耦合	构造面岩石的应力、应变、损伤、强度和破坏对物质(如污染物)传输路径和扩散性质的影响
H-M 耦合	流体压力对构造面的应力、隙宽、变形和刚度的变化
流体流动过程(H)	构造面内流气体的达西或非达西流(牛顿或非牛顿流)流动
H-T 耦合	流体速度场引起的构造面内的热对流及其对邻近岩石的热传导过程的影响
H-C 耦合	流体压力和速度及饱和度和脱水/吸水循环对固/气体溶解、矿物沉结、污染物传输阻碍的影响
T-M 耦合	介质的热应力和热应变(热胀冷缩现象)、裂隙节理的张开、闭合、损伤、抗剪强度变化及不可逆变形
T-H 耦合	流体密度、浮力和黏度随温度的变化、流体相变(蒸发和冷凝)、流体的热扩散等
热流过程(T)	天然或人工热源造成的热流运动(传导、对流、辐射)
T-C 耦合	温度对固(流)体-化学反应过程速度和稳定性的影响
C-M 耦合	化学反应对构造面的强度、变形参数和损伤程度的影响
C-H 耦合	化学反应对介质渗透率和节理裂隙渗透率的影响
C-T 耦合	化学反应过程中的吸(放)热现象
化学过程(C)	反应型或非反应型的物质传输(如核素迁移)、流体-岩上相互作用等

4 各主要阶段的岩石力学问题

对于放射性废物处置, 岩石力学和工程学科的主要任务是: (1) 提供所涉及的岩土体材料(包括支护材料)的本构模型、所涉及的力学参数以及他们在有关的物理-化学过程中的变化范围和可信度; (2) 提出原岩应力的测量方法和数据可信度评估方法; (3) 提供岩石力学和工程学科所需要的数学模拟方法和计算机程序; (4) 提出岩石力学和工程学科所需要和所产生的数据、信息管理方法、手段; (5) 提供可靠的地质处置场, 并根据多种可选初步设计方案及可行性论证结论; (6) 提供涉及其他领域的耦合过程模型、所需参数及其测定方法或方案; (7) 根据岩石力学与工程的要求, 提出现场勘察、研究和规划的有关内容; (8) 地下实验室的选址、规划、建设, 以及岩石力学试验项目的设计和和实施; (9) 根据现场勘察和地下实验室研究得的结论, 提供处置场总体特性和环境安全分析所需的岩石力学有关的模型、参数和结论; (10) 最终核废料处置场施工设计、施工、支护、试运行、正常运行和稳定性监测; (11) 提供处置场最终封闭后的有关岩石力学的现场监测内容、设计方案和实施技术。

在各个具体实施阶段, 岩石力学与工程的具体内容与深度又有所不同。本文只涉及可行性研究和现场勘察研究阶段的岩石力学问题。

4.1 可行性研究阶段

可行性研究是核废物最终地质处置的起始阶段, 其主要任务是依据具体地质条件选择适当的储存介质(不同的岩石、黏土、页岩及岩盐等)和工程屏障的设计概念(如瑞典的KBS-3), 并在此基础上提出地质处置场址的候选场址。根据已有场址的岩石条件和环境安全, 判据并确定处置场设计和控制参数(如限定温度、处置深度、工程屏障几何尺寸和材料组成、废物再回收可能性等), 同时对各场址进行评估, 并确定最终处置场址和地下实验室建设。除了要考虑场址选举的基本要求外, 场址选址还应根据以下因素进行选择:

- (1) 有利的区域地下水地质条件(较小而且稳定的水流梯度以保持较低的核素迁移速度);
- (2) 有利的地下水化学条件以减低储存罐体的腐蚀速度;
- (3) 有利的岩土地球化学条件以保证工程屏障

材料的化学稳定性。

其他的影响因素有核废物运输方式(尤其是长距离运输技术)和相应的成本, 场址所在区域的长期经济技术和环境发展规划, 特殊区域的特定人文环境条件(如少数民族地区), 场址土地所有权以及其他中央和地方的政策和法令所规定的条件等。

可行性研究阶段的主要任务有两大方面: 确定最终场址和建立地下实验室。前者目的显而易见, 后者的目的则是尽早在符合地下实际情况的条件下, 为后续的现场勘察研究和最终安全报告提供所需的理论和技术, 并开展针对性的研究, 其中的岩石力学工作主要有:

(1) 场址可行性研究和场址的最终选择

在实验室和现场试验数据的基础上, 若试验数据较少, 建议采用经验以确定岩石和其他有关材料的本构模型和所需的物理-力学参数, 也可根据已确定的设计和控制参数, 建立各场址处置场初步设计的若干可选模型;

针对各方案的处置场力学稳定性分析(作为场址总体特性分析和总体环境安全分析的成分之一), 筛选满足稳定性和环境安全要求的场址和处置场设计方案, 推荐最佳场址和最优处置场设计模型。

(2) 地下实验室建立和针对性项目研究

选择地下实验室的岩石类型并确定其相对位置及系统设计, 提供开挖技术方案及辅助系统设计和实施; 开展与实验室建设(开挖与支护等)过程相结合的岩石力学试验研究。如不同开挖方案可能引起的扰动(损伤)区(EDZ)特性, 同时, 进行井巷表面不连续面的测绘、井巷涌水试验、井巷围岩变形观测及岩体力学参数反分析等; 合理选择各学科有关的重大地下实验室课题, 在岩石力学与工程领域, 优先考虑岩土材料的本构模型、岩体不连续面及其量测, 并考虑完整岩石、岩石节理和节理岩体耦合过程的基本形态表征和模型, 原岩应力测量, 实验室试验技术及大型现场试验研究方法等。

本阶段的工作可为下一步深入地进行现场勘察奠定坚实的基础。

4.2 现场勘察研究阶段

最终场址确定之后, 现场勘察一般分若干初始和详细的调查阶段(见图2^[2]), 其基本目的是建立为最终场址特性和环境安全分析报告所需要的各学科综合模型。该综合模型是建立在各学科独立模型的基础上并综合其相互作用(耦合效应)而建立的, 主要有场址地质模型(场址区域的岩性和构造状态),

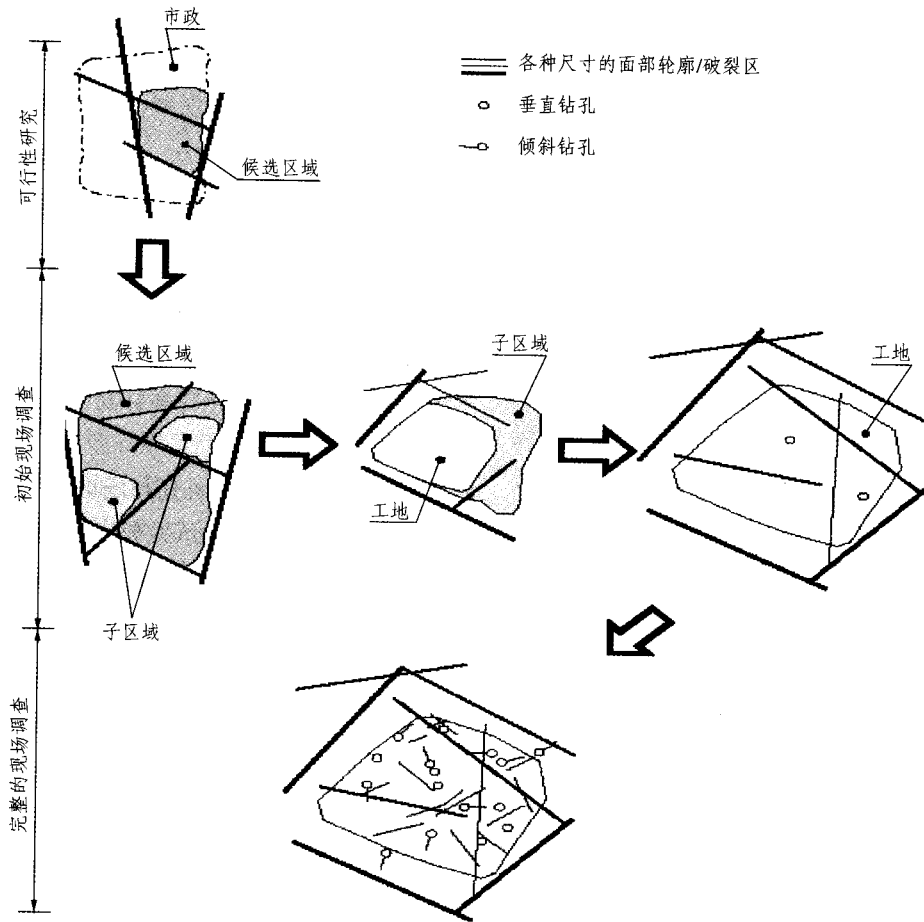


图 2 瑞典 SKB 的多阶段现场勘察研究示意图^[2]

Fig.2 Multi-stage site investigation process of SKB^[2]

岩石力学模型(岩体和不同尺寸构造面的力学模型和性质、开挖施工效应、场址设计和原岩应力等)、水文地质模型(区域流场基本形态、岩体和主要构造面导水度等)、热传输模型(废物放热引起的热流形态、岩体热力学性质等)、核素和溶质传输模型(场址特定地质化学反应条件下核素迁移和溶质传输性质、传输性质等)。地质模型是其他各模型的基础,钻孔密度随着各阶段勘察区域面积的缩小逐步加密以满足地质模型和其他各模型建立所需精度的需要。

在场址地质模型和地下实验室研究基础上,岩石力学学科应在现场勘察阶段完成其主要的研究工作,主要包括:(1) 建立和验证岩土材料和岩石构造面的本构模型及其相关参数;(2) 建立和验证岩体不连续面系统的数学表征、测量方法和分析手段;(3) 建立和验证岩土材料和岩石构造面,特别是大型断裂带的主要力学-物理-化学耦合过程的模型和控制微分方程(组)及其数值解法;(4) 建立和验证特定场址的节理岩体概念模型(如等效连续

介质、离散块体系统、离散节理系统等)的物理过程(如稳定性分析、流体流动和物质传输分析、应力-水流耦合分析等)、控制微分方程(组)及其数值解法;(5) 建立和验证实用可靠的原岩应力测量和分析手段;(6) 建立和验证可靠的实验室和现场试验技术以估计不同本构模型所需的物理力学参数(如岩石/岩体的弹性和非弹性变形特性参数、断裂和损伤特性参数、蠕变和其他时间效应参数、岩体尺寸效应特性参数、岩石节理/断层的变形/导水/传热特性及尺寸效应参数等)以及耦合效应参数(如完整岩石和隔离/回填材料在不同饱和度下的 Biot 参数,节理岩体的应力(或应变)-导水度关系参数及尺寸效应参数等);(7) 建立和验证核废物放热强度模型;(8) 建立和验证处置场不同材料之间的各种界面的关于应力/变形/破坏、流体流动、热传输、溶质和核素迁移的本构模型和相关参数(如储存罐体-黏土隔离层界面、黏土隔离层-岩石界面、黏土/废石回填体-岩石界面等);(9) 建立和验证可靠的反分析

方法和计算机程序以便给出地质场址特性的数学表征;(10) 建立和验证可靠的关于耦合过程(如 THM, THMC)并适用于连续介质和节理岩体的(能包括复杂地质条件和开挖施工过程以及能充分反映所涉及岩土材料本构特性)不同数值方法和计算机程序;(11) 建立和验证与岩石力学有关的大型现场试验方法,如现场耦合过程试验、加热试验、抽水试验、小型处置场原型试验(验证处置场设计判据及控制参数,如限定温度和工程屏障设计参数等)等;(12) 建立和验证岩体和构造面特性特征参数的不确定性的估算方法以及他们对处置场的力学稳定和最终环境安全分析结果的影响;(13) 提出并实施针对上述研究发展工作所需要的地下实验室现场试验;(14) 建立可靠、有效的岩石力学数据和信息保存和管理系统,可作为综合学科数据库的组成部分;(15) 建立和验证有岩石力学与工程学科特点的质量适合管理手段和执行程序以保障研究发展工作透明度、可靠度和责任追踪制度;(16) 建立最终场址特性分析、环境安全分析和最终可行性报告所需的岩石力学模型、算法、程序,并对相邻有关耦合过程部分提供技术支持;(17) 承担地下实验室井巷系统的初步设计和施工图设计以及施工指导的主要技术方案。

在数值方法和计算机程序的研发中,要特别注重大型和特大型岩土工程计算问题的特殊需要(如数据结构、前后处理、大型方程组的有效解法、多用户便利性、灵活多样的本构模型和材料可选参数库、不同数值方法的连接界面、开挖-回填-支护措施和顺序的正确表达等)。由于节理岩体的构造特性和水流-热流场的中心作用,应特别注重三维程序发展和非定常状态问题的求解。

实验室和现场试验(尤其是大型试验)应满足各学科的综合需求及各科特殊需要。试验的设计应建立在综合论证的基础上。

4.3 现场岩石力学模型和相邻学科模型的关系

(1) 岩石力学模型与场址地质模型

场址地质模型提供岩石力学模型的岩性和构造几何条件。由于钻孔密度和尺寸的限制,地质模型有较大的不确定性(尤其是关于中小型构造面系统)。由于钻孔地质记录推测的构造面空间延伸状态、地表露头构造面测量和钻孔构造面记录相关性的验证存在不同的困难,地质模型的不确定性应随现场勘查的深入而逐渐缩小。

由于构造面系统在岩石力学问题的重要性,这

些不确定性必须在岩石力学模型中得到充分的反映。基于随机变量场原理的蒙特卡洛法是最普遍采用的方法之一,但也应相应探求更有效的方法。

(2) 岩石力学模型与水文地质模型

应力-水流耦合效应对处置场工程屏障的力学形态和处置场力学稳定性具有的重要影响。反而言之,岩体的应力-变形-破坏状态对近场岩体的导水度和传输特性也极为重要,因而必须充分估计。水文地质模型为岩石力学模型提供地下流场计算部分的初始边界条件,包括含(隔)水层的水力性质和几何条件、不同水体(如淡水、海水等)的物理-化学性质、淡水-海水相互作用机制和冰川覆盖下的水流变化和永冻模型等。尤为重要的是,水文地质模型应提供关于大型断裂带的水力表征。

节理岩体的水力特性在很大的程度上受控于构造面系统的几何形态,尤其是构造面尺寸和连通度,而后者的不确定性造成其水力模型数学表征上的不确定性。基于蒙特卡罗原理的离散节理系统模型(DFN)目前尚难以考虑应力-变形的影响,而基于等效连续介质模型的应力-水流耦合模拟则是更为广泛接受的方法。

(3) 岩石力学模型与热传输模型

温度应力与材料热膨胀模型和算法在岩石力学的应力分析方法中应用较为成熟。大量实践已证明热传导是节理岩体主要的传热模式。导水节理中的对流传热作用有限,但对于工程屏障材料而言,温度梯度引起的水对流和流体流动所引起的热对流对隔离层/回填体的饱和度和含水量分布具有相当的影响,因而必须包括在场址总体特性的分析中。对于高温废物处置场(如军用/民用核废物混合处置场)更是如此。

(4) 岩石力学模型与化学模型

岩石力学与化学反应过程的耦合模型(包括溶质与核素迁移)尚在初始的研究阶段。已报导的工作主要集中在节理表面上的矿物沉结对其导水度的影响和矿物化学反应对岩石试件力学性质的影响的实验室研究^[3, 4]。连续岩土介质的 THM 过程与水化学反应过程的耦合模型和不包括应力(变形)的热-水流及化学反应型物质传输过程的耦合模型及计算机程序已成功地应用于核废物地下地质处置中。

5 国际经验和教训

5.1 目前现状和存在的问题

岩石力学是成功地解决地下核废物处置问题的理论基础和技术手段之一。它不仅在处置场的设计和施工中起到决定性作用,而且对处置场的总体特性分析和环境安全分析(即最终安全结论)起着不可替代的作用。岩石力学试验也是各国地下实验室的重要研究方向之一。

由于节理岩体的复杂构造形态和核废物地质处置问题中复杂的物理-化学过程,目前仍存在很多尚待解决的重大岩石力学问题:(1) 构造面(特别是大型断裂带)对节理岩体的原岩应力状态的影响和可靠的测量技术;(2) 大型构造面(尤其是大型断裂带)的物理-力学模型、数学表征和直接验证方法;(3) 岩体构造面几何形状、尺寸以及构造面系统连通度的定量表征方法和数学模型;(4) 节理岩体物理-力学特性尺寸效应的数学模型和等效连续介质模型的验证;(5) 可靠和有效的大型或特大型数值计算手段;(6) 节理岩体的时间效应(如蠕变)的数学模型及其长期形态的试验验证;(7) 岩石节理粗糙度的有效定量表征方法及其对不同尺寸的岩石节理 THMC 特性影响;(8) 大尺寸岩石试件和岩石节理试件的 THMC 过程的实验室试验;(9) 节理岩体和构造面数学-力学模型和参数中的不确定性表述及其在数值模拟过程中的传播路径和对所研究问题的最终结论影响等。

5.2 国际经验和教训

从 20 世纪 70 年代,欧美各国在核废物事业上已经投入了巨大的人力、财力、物力,并在立法保障、基础研究、系统安全分析、地下实验室建设及国际合作等方面积累了许多宝贵经验和教训。充分吸收这些先进经验和失误的教训对中国的核废物处置事业具有非常重要的意义。篇幅所限,以下略举一二。

(1) 保障基础研究

基础研究的主要目标是处置场址的主要物理化学过程(THMC)以及地质过程和工程扰动对其影响(G-THMC-E),特别是地质结构面系统的影响以及系统安全分析方法和手段。采取的方式一般是基本理论研究、室内试验、数值模拟、中大型现场试验相结合,并以具有充分研究条件的大学和专业研究机构(如美国的 LLNL, LBNL, SANDIA 国家实验室)合作来开展工作。

(2) 开展跨学科研究

必须在地质现行的基础上尽早开展跨学科领域的综合或合作研究以避免不必要的往返或重复研

究。地质和水文地质调查规划必须事先考虑各学科研究工作的不同需要。

(3) 建立地下实验室

必须在可能的条件下尽早建立地下实验室以开展针对具体地质条件和处置场基本概念设计参数的大型地下试验以便为处置场的设计、施工、运行和最终安全分析提供可靠的科学依据。各国经验显示,地下实验室是核废物处置工作的基本研究平台和不可取代的中心环节,也是国际合作的主要环节。和他国地下实验室的合作可帮助中国建立自己的研究工具和方法、锻炼研究队伍,但不能开展自己所需要的试验,也得不到自己所需要的关键数据,尤其是大型试验的数据。

(4) 加大国际合作和交流

大力开展国际合作以学习先进经验和知识、汲取教训、锻炼自己的队伍、发展自己所需要的研究工具和手段。

(5) 做好中长期规划

欧美各国的核废物处置的长期规划一般是由运作方提出,国家监督机构审定,最后由国家立法机构通过。长期规划的制定必须考虑国家核电和核武器发展的需要,同时也要考虑废物组成、地质条件和场址选择条件(如是否需要当地居民和地方政府的允许等),以及各子阶段的任务和进度。核废物组成可能是民用废物(如来自核电站的乏燃料)、军用核废物(核武器制造产生的核废物)或二者的混合废料。欧美非核武国家(如瑞典、芬兰、瑞士、西班牙加拿大等)的地下处置场是核电站乏燃料处置场,而美国的 Yucca Mountain 处置场则为军民核废物混合处置场。不同的废物组成造成了不同的废物形式,从而决定不同的处置场概念设计。

以上也构成本文对中国核废物事业的几点建议。

6 中国高放废物地质处置工作

中国高放废物地质处置研究始于 1985 年,在原核工业部组织下制定了初步的研究发展计划(简称 SDC 计划),成立了研究协调组,并从国防预研经费中拨出少量经费,安排了工程、地质、化学、安全等四个领域的研究项目。同时,开展了高放废物处置库场址预选,对华东、华南、西南、内蒙和西北等 5 个预选片区进行比较,重点研究了西北预选区(即甘肃北山预选区);在西北预选区及其旧井地段、

野马泉地段和向阳山地段进行了一些基础性的工作,如研究了甘肃北山及其邻区的地壳稳定性、构造架构,地震地质特征、水文地质条件和工程地质条件等。在旧井地段和野马泉 1:50 000 地面地质调查的基础上,施工了四口深钻孔,首次获得甘肃北山场址的深部岩样、水样和数据资料,如钻孔电视图像和钻孔雷达图像等,并初步建立了一些场址评价的地质学方法^[5~7]。最近国防科工委专门召开了学术研讨会,还成立了专家组;同时,《高放废物地质处置研究发展规划指南》也即将公布,旨在全面、系统、科学、协调地部署研究开发工作,为在“十一五”期间动员全国各方面力量,以及编制高效废物地质处置中长期研究发展规划提供指导性意见。在国家自然科学基金等项目的支持下,本文第二作者领导的课题研究小组开展了一些研究工作,并作为指导委员会成员之一,参加了国际合作研究计划 DECOVALEX,在应力-水流耦合过程、温度-应力-水流耦合过程、化学腐蚀岩石破裂过程等方面的试验与数值模拟方法研究取得了一些良好进展^[3, 4, 8~11]。

7 结 语

现代岩石力学自 20 世纪 50 年代建立以来受到了两个重要的理论和技术推动。一个是 20 世纪 60 年代末开始的计算机数值模拟技术,另一个是 20 世纪 80 年代中期开始的岩土介质的应力(变形)-流体流动-温度传输的耦合过程的数学模型和计算机程序发展。前者使岩石力学有了真实意义上的分析手段和预测工具,而后者使岩石力学建立在更为坚实的物理-力学基础之上。现代岩石力学已不仅仅限于从固体力学的应力分析原理来处理关于岩石或岩体的应力、变形、强度、稳定性、破坏等现象和支护手段,而是一个从连续介质力学的基本原理(质量守恒、动量守恒和能量守恒)出发、应用连续和非连续孔隙弹性介质力学的基本介质表征概念和模型建立手段以及先进的数值解法和计算机技术相结合的更广泛和适用的应用力学学科。当然,同时也包含和融合了其他应用力学学科的内容和成果,如断裂力学、塑性力学、损伤力学、多相流流体力学、热力学等。其独特性表现在:(1) 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;

(2) 岩石构造面和构造面系统的几何和物理-力学性质及参数的很大不确定性;(3) 数值模拟方法的不可替代的地位;(4) 实验室和大型现场试验和检测的极端重要性,其代表了现代岩石力学最重要的研究目标和方向。

参考文献(References):

- [1] Savage D. The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1995.
- [2] SKB. Sea disposal of radioactive wastes(Technical Report TR - 01 - 30)[R]. Vienna: IAEA Bulletin 2/1994, IAEA, 2001.
- [3] Feng Xiating, Chen Sili, Zhou Hui. Real-time computerized tomography(CT) experiments on sandstone damage evolution during triaxial compression with chemical corrosion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 181 - 192.
- [4] Feng Xiating, Li Shaojun, Chen Sili. Effect of water chemical corrosion on strength and cracking characteristics of rocks[J]. Key Engineering Materials, 2004, 261 - 263: 1355 - 1360.
- [5] 王 驹, 徐国庆. 甘肃北山区域地壳稳定性研究[M]. 兰州: 甘肃地质出版社, 2000.(Wang Ju, Xu Guoqing. Study on Crustal Stability at Baishan Region, Gansu Province[M]. Lanzhou: Gansu Geological Publishing House, 2000.(in Chinese))
- [6] Wang Ju. Progress in site—selection for a high level nuclear waste repository in China[R]. Beijing: IAEA Meeting, 1994. 21 - 28.
- [7] Wang Ju. Deep geological disposal of high-level radioactive waste in China[A]. In: Winter Meeting of the United States of Nuclear Waste Technical Review Board[C]. Las Vegas, USA: [s. n.], 1996. 42 - 49.
- [8] Li Mingtian, Feng Xiating, Zhou Hui. 2D vector cellular automata model for simulating fracture of rock under tensile condition[J]. Key Engineering Materials, 2004, 261 - 263: 705 - 710.
- [9] Liu Jianjun, Feng Xiating, Jing Lanru. Theoretical and experimental studies on the fluid-solid coupling processes for oil recovery from low permeability fractured reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 496.
- [10] Zhang Youlang, Feng Xiating, Jiang Annan, et al. Ru implementation of domain decomposition method based parallel finite element method in geotechnical engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 435.
- [11] Feng Xiating, Chen Sili, Li Shaojun. Effects of water chemistry on microcracking and compressive strength of granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(4): 557 - 568.