

高放废物深地质处置中的多场耦合与核素迁移

罗嗣海^{1,2}, 钱七虎^{1,2}, 李金轩^{1,2}, 周文斌^{1,3}

(1.东华理工学院, 江西 抚州 344000; 2.解放军理工大学, 南京 210007; 3.南昌大学, 南昌 330029)

摘 要: 概括了深地下工程的深地质处置库的若干特点, 简要介绍了多场耦合的机理与类型, 论述了高放废物深地质处置多场耦合与核素迁移问题的特点及研究现状, 最后提出了高放废物深地质处置多场耦合与核素迁移所需研究的主要问题。

关 键 词: 高放废物; 深地质处置; 多场耦合; 核素迁移

中图分类号: TU 473.2; TB 115

文献标识码: A

Multi-field coupling and nuclide transport in HLW geological disposal repository

LUO Si-hai^{1,2}, QIAN Qi-hu^{1,2}, LI Jin-xuan^{1,2}, ZHOU Wen-bin^{1,3}

(1.East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China;

2.PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 3.Nanchang University, Nanchang 330026, China)

Abstract: The features of deep geological disposal repositories as a deep underground engineering are firstly summarized. Then the concept, mechanism and categories of multifeild coupling are introduced; and the characteristics and the state-of-the-art of THMC coupling and nuclide transport in HLW geological disposal repositories are analyzed. Finally, issues related to the THMC coupling and nuclide transport for HLW disposal are stated.

Key words: high level radioactive waste(HLW); deep geological disposal; multi-field coupling; nuclide transport

1 概 述

高放废物的安全处理和处置是制约核工业发展中的重要问题, 世界各有核国家都极为重视, 从政治、经济、科技与法律等方面进行研究。我国也和其它有核国家一样, 已面临如何处置核废料的问题, 寻求安全、有效、永久性处置高放废物也是我国应尽早国家层面重视的重大课题之一。经过近 50 年来的研究, 通过多种处置方案的分析和对比, 目前, 世界各国普遍认为深地质处置是高放废物最现实可行和安全可靠的处置方案, 并对此进行了多学科、长时间、强投资的研究。

高放废物的深地质处置是指将固体形式的高放废物埋置在地下 500~1 000 m 的地质体中, 即通过地表打竖井至深部、由竖井底部开凿水平坑道, 再在水平坑道中打竖井或支坑道, 作为废物的存放场所, 最后进行封存, 从而使之能长时间(至少 1

万年)与人类生存环境隔离。这些坑道和竖井便构成地下处置库。

从形式上看, 高放废物深地质处置的处置库也是一项深部大型地下工程, 但这类地下工程与一般地下工程相比有其特点, 概括地讲, 表现在下列几个方面:

(1) 从时间跨度上来看, 要求处置库的安全期限至少在 1 万年, 这样长的时间尺度要求超越了一般意义下社会或技术活动所涉及的时间尺度, 也使性能评价中不确定性成为一个重要的必须考虑的因素和研究领域;

(2) 从作用因素上看, 处置库不仅要经历开挖和运营期间的力学扰动, 更重要的还将长时间受放射性辐射和衰变热的作用, 因此, 温度场成为一个重要的因素;

(3) 从评价目标上看出, 不仅要评价处置库的区域稳定性和围岩的力学稳定, 特别重要的是还要

保证核素在其有害的年限内不致迁移到生物圈而危害人类生态环境，因此，化学场和核素迁移规律的研究具有特别重要的意义；

(4) 从研究的范围看，由于要跟踪核素迁移到生物圈的途径并进行安全性评价，因此，其评价的范围不仅限于受机械扰动的围岩，更包括从处置库到核素释放到生物圈的整个地质体；

(5) 从社会影响上看，由于核问题的敏感性和公众的反核情绪，高放废物处置库不仅是一项纯技术性的地下工程，更是一项政治和社会关注的工程，必须向公众和监管机构提供充分的论证；

(6) 从工程数量看，一般一个国家首先考虑 1 个全国性的处置库，因此工程数量少，工程积累的经验 and 借鉴的可能性相对少。

在开挖和运行阶段，高放废物处置库与一般深部地下工程面临相似的问题，即施工的安全与围岩的力学稳定问题，可用一般的深部岩体力学理论与方法评价和解决。但处置库关闭后长时间尺度下，高放废物深地质处置安全性评价的核心问题是长寿命放射性核素与环境隔离性能的评价。处置库中的核素可能由于下列两种原因进入生物圈：① 由隔离失效引起：比如人类的直接介入；地壳上升、侵蚀作用等因素使处置库直接暴露于地表；处置库周围地震、断裂活动、火山活动等。② 由于地下水的作用引起：地下水对废物固化体进行分解后，核素随地下水在回填材料和天然屏障中迁移，最后进入生物圈。

由隔离失效导致的核素返回生物圈一般可通过选择相对稳定的处置场址来解决。一般认为，处置库安全的关键因素是地下水运动及随地下水运动的核素迁移问题。因此，核素迁移是高放废物深地质处置安全与系统性能评价中特殊而关键的核心问题。同时，处置库的围岩必须能满足处置库长期的力学稳定。

处置库关闭后，由于高放废物的放热引发热传输过程，在开挖扰动的基础上进一步诱发新的围岩应力与变形过程，改变流体渗流过程和近场的地球化学过程，同时，放射性核素随时间在不断衰变，因此，此时不同于一般的深地下工程的围岩稳定和裂隙岩体中溶质迁移情形，关闭后高放废物深地质处置中的围岩稳定与核素迁移，特别是近场的岩体稳定与核素迁移，是长时间尺度、温度不断变化情景中，在温度场、渗流场、应力场和化学场相互耦合的过程中发生的，对此时围岩稳定与核素迁移的正确评价必须研究多场耦合。

2 多场耦合的机理、类型及高放废物深地质处置多场耦合与核素迁移的特点

2.1 多场耦合的基本概念

自然界中存在着不同的物理、力学与化学过程，如果这些过程间存在着相互影响、即一个过程的发生与发展将会受到或（和）影响到另一个过程的发生与发展，则称这些过程为耦合作用过程，这种现象称为多场耦合。多场耦合在数学上表现为过程的控制方程上存在交叉项、或表达某过程的参数受到其它过程机理的影响。

2.2 多场耦合的类型与机理

自然界中存在着多种物理、力学与化学过程，在岩体力学、水资源开发、环境保护中涉及的主要有介质的应力与变形过程（M）、流体（液体与气体）的流动过程（H）、热传输过程（T）和化学过程（化学反应与溶质迁移过程 C）。应力与变形过程的主要现象是岩石的应力、变形、损伤、强度与破坏；裂隙的产生、扩展、贯通、损伤及错动；主要的原因是原位应力、地壳运动、重力作用及开挖等。渗流过程的主要现象是：岩石与裂隙中的流体流动；主要形式有：地表水入渗、地下水运动、海水入侵、能源储存中的油/气流，地热田中冷/热水的抽取与注入。热过程的主要表现是由于天然或人为热源引发热传导、热对流；主要原因是：放射性废物的衰变热、地热梯度、冷热水的注汲、永入冻土的冻融等。化学过程主要是反应与非反应性颗粒与溶质迁移，流-固相互作用；主要有污染物迁移（吸附/阻滞、扩散、平流）、固相溶解与沉淀、气体溶解与析出、海水入侵、富氧地表水下渗、材料腐蚀与风化等。

广义而讲，自然界中这些过程总是不同程度地同时存在和相互影响，即总是处在四场全耦合的问题。在许多情形下，有些过程作用不明显，其耦合可忽略不计，因此，只有部分过程产生耦合，从组合上来说，可能存在的各种组合过程共有如下 11 种：

T-H 耦合：典型的例子是地热系统中的热水运移。耦合的机理表现为：一方面，T 对 H 有影响，即温度的变化可引起流体浮力、粘性和渗透系数的变化、流体的相变及引发热扩散；另一方面，H 对 T 有影响，即流体流动将产生热对流，改变温度与热流。

T-M 耦合：如地下开挖中的通风、地下储库中

的霜冻或发热。T 对 M 的影响表现为: 温度变化引起介质的机械性质变化, 引发岩石的膨胀或收缩并产生热应力, 引发裂隙的张闭、损伤及不可恢复的变形。M 对 T 的影响表现为: 应力状态变化引起周围介质密实程度变化, 从而间接影响传热; 变形过程中的机械功转变成热量。

T-C 耦合: 温度对化学场的影响表现在由于温度改变流体的密度、粘性及化学势, 使反应速率、元素、矿物和反应过程的化学稳定性表现出温度效应; 而化学场的变化通过反应的吸热与放热, 将改变温度及热流, 但这种影响一般相对较小而可忽略。

H-M 耦合: 坝基中的渗透与变形、斜坡中的排水与稳定、土的固结、抽取地下水导致的地面沉降与开裂、岩石中的水力压裂等问题可归入此类耦合。渗流场对应力应变场的影响主要表现在固相变形受有效应力控制、裂隙的张开度和刚度与流体压力相关, 毛细压力与膨胀压力参与应力平衡且其大小受到饱和度相关; 而应力场对渗流场影响主要是应力引起岩石孔隙度、裂隙张开度和连通性的变化并改变岩体的渗透性能。

H-C 耦合: 渗流场对化学场的影响表现在流体压力、流速、饱和度及水分变化对固-气溶解、沉淀和溶质阻滞的影响; 化学场对渗流场的影响表现在由于气体溶解与析出、化学反应导致的固相溶解与沉淀引起流体粘性和渗透性能的改变。

M-C 耦合: 这种耦合实际上是间接的, 应力场变化引起的变形、损伤及破裂, 可能引起水-岩接触面积变化, 引起溶质迁移路径变化及从而影响化学场; 而化学场对应力场的影响则是通过化学反应导致固相强度、变形性能的改变而产生的。

T-H-M 耦合: 见于深部封闭隧道与采矿、冻结与冻土、储能中的注气、地热开发、核废物地下处置。

T-H-C 耦合: 此耦合作用在水热系统中广泛得到研究, 主要涉及水热系统中的化学作用问题。

M-H-C 耦合: 地基处理时的化学灌浆、地下污染和处理属此种耦合。

T-M-C 耦合: 典型的例子是介质的热力变形影响到化学场。

T-H-M-C 耦合: 化学采矿、核废物地质处置属于此类耦合。这是一个非常复杂的耦合过程, 由于其复杂性, 人们有时将其进行分解研究。

2.3 高放废物深地质处置中的主要作用过程和多场耦合与核素迁移的特点

由于地下贮存场地的开挖与建造、地下水的存在以及关闭后的放射性放热效应, 高放废物地下处

置中涉及以下诸物理-化学过程的相互作用:

(1) 开挖引发介质应力与变形过程及渗流过程, 产生 H-M 耦合: 由于高放废物处置库的开挖, 在围岩中产生变形和附加应力, 引起岩石产生区域碎裂和岩体渗透率及裂隙张开度的变化, 改变地下水渗流场; 流场内压力对岩体应力、变形产生反作用。

(2) 长时间、变强度放热引发热传输过程、热应力变形过程、渗流过程和地球化学反应与溶质迁移过程, 产生近场的 T-H-M-C 耦合: 处置库关闭后, 由于放射性衰变, 核废物中随着时间不断放热 (几千年至一万年), 并在人工屏障和开挖改造后的岩体中传输, 改变回填材料和围岩中的温度, 引发岩体体积膨胀和热应力, 改变流体的性状和运动, 破坏水-岩之间及水-缓冲材料间的化学平衡并产生新的地球化学作用; 而地球化学作用-渗流-应力变形间产生相互作用并反作用于温度场。

(3) 核素的释放与迁移过程: 耦合作用产生新的地球化学环境, 引发在多场耦合环境条件下, 核素从废物体释放并越过工程屏障随地下水在天然屏障中迁移, 最终进入生物圈, 其中发生包括对流、扩散、吸附等各种物理化学作用。

(4) 与其它耦合和溶质迁移问题相比, 高放废物深地质处置的多场耦合与核素迁移体现下列几个特点:

① 耦合的时间尺度非常长, 要求的安全期限至少在 1 万年, 因此, 不确定性明显;

② 耦合的介质复杂, 包括人工回填材料和经历开挖扰动的低渗透性各向异性、非均质性的裂隙岩体;

③ 耦合的空间跨度大, 包括处置库和从废物体到生物圈之间人工材料与地质体, 空间不同区域, 要考虑的作用过程不同, 近场是明显的 T-M-H-C 四场耦合, 远场主要是溶质运移与地下水运动的 H-C 耦合;

④ 耦合时热源不断衰减, 导致温度变化明显;

⑤ 渗流通道组成复杂, 既包括地质历史过程中形成的初始结构面, 又包括开挖扰动区域化碎裂产生, 甚至包括热应力改造的结构面;

⑥ 化学场具有特别重要的作用, 表现在因温度和湿度变化导致的近场的化学作用引发的化学成分变化对固化体的溶解与核素的析出具有重要作用, 还表现以核素为核心的溶质迁移时处置库性能与安全评价中的核心内容。

⑦ 不同于一般的溶质运移问题, 高放废物中的核素的迁移需经过从固化体中析出和近场释放、迁

移是处于复杂的四场耦合环境中和迁移时核素处于不断衰变中。

3 多场耦合与核素迁移问题研究概况

3.1 多场耦合问题研究概况

耦合问题的研究可从 20 世纪 30 年代太沙基发表一维渗透固结理论算起,但在国外引起广泛关注和取得重要进展则是在最近 20 多年,国内则是近十来年的事,这些研究主要源于核废物深地质处置、油/气与地热的开发和能源储存及环境保护的需要。

从研究方法上,多场耦合的研究方法包括理论分析、室内实验、原位实验与监测,研究内容则涉及多场耦合的基本理论、数值方法、计算程序开发及其工程应用等。

室内实验主要有应力与渗流间、温度与应力间、化学与应力间及温度-应力-渗流间的耦合实验研究,通过实验建立了一些相关关系,如温度对岩体力学性状、应力对岩体渗透性状及流体化学成分对岩体的破坏与损伤方面的影响。

理论分析主要是依据固体力学的基本原理和岩石介质的特性,建立各种情形下多场耦合的基本控制方程和定解条件。研究较多的主要是应力-渗流、温度-应力、渗流-化学(溶质运移)、温度-应力-渗流等耦合问题。耦合的类别包括全耦合和部分耦合。方程的类别包括描述各种过程的方程和描述不同过程耦合关系的方程。建立的基本依据包括固相介质的本构方程、几何方程和动力平衡方程,流体的运移规律与质量守恒及热力方面的传输与能量守恒定律。模型类别包括等效连续介质模型、双重介质模型等。

数值方法和程序开发主要是对提出的各类模型建立相应的数值计算方法并开发出相应的计算机程序。提出的主要数值方法有有限元(FEM)、有限差分(FDM)、离散单元(DEM)、离散裂隙网络(DFN)等,开发了多个有较大影响的程序。

在应用方面,多场耦合应用到多个工程领域。比如基础工程、隧道工程、边坡工程、铁路与高速公路工程、油/气储存工程、煤炭开采工程、固结与地面沉降、地热开采、化学采矿及废物处置等。

在现场实验及监测方面,主要通过大规模的现场监测获取资料,作为理论建立的依据及验证理论研究成果的手段。在高放废物深地质处置的地下实验室曾进行大规模和较长时间的加热实验,系统测量了相应的应力、变形和温度分布。如美国能源部的尤卡山(Yucca Mountain)国家高放废物处置库

(凝灰岩)、加拿大的白壳(Whiteshell)地下实验室(花岗岩)、法国核废料地质处置实验室(页岩)、瑞典的阿斯泼(Aspo)地下硬岩实验室(花岗岩)、瑞士的格瑞穆塞尔(Grimsel)地下实验室(花岗岩)、德国的高勒本(Corleben)地下实验室(岩盐)、比利时的莫尔(Mol)地下粘土实验室等。

在多场耦合的研究项目方面,开展了几项重大和具有广泛影响的项目,如瑞典核能监察局(SKI)先后组织的三项国际合作项目:INTRACON(1981~1986年)、HYDROCOIN(1984~1990年)和INTRAVAL及自1992年起的国际合作项目DECOVALEX;美国的尤卡山项目等。

DECOVALEX 是专为高放废物深地质处置的性能与安全评价而开展的一项国际合作项目,该项目始于1992年,迄今已有来自10个国家的15个研究机构参与了该项目。该项合作研究旨在建立THM的模型与算法、开发相关的程序并将计算与现场及室内实验结果进行比较,从而设计新的实验来支持程序开发,研究THM模拟在性能与安全评价中的作用。DECOVALEX中研究的问题分为2类:一类称为基准试验(benchmark test—BMT),它是假设的一些THM问题,目的在于比较不同数学模型与程序的计算结果;另一类称为试验实例(test case—TC),它是原位或现场实验,用它来验证证明程序的可靠性。迄今为止,DECOVALEX已进行了三期,采用离散和连续方法、应用多个程序(MOTIF, THAMES, ADINA-T, ROCMAS, CHEF, HYDREF, VIPLEF, TRIO-EF, CASTEM2000, UDEC等)研究了多个两场耦合及THM三场耦合问题。在今年拟开始的第4期任务,拟将水化学场列入,从而以水流-应力-化学或温度-水流-化学耦合过程作为主要研究内容。

3.2 高放废物深地质处置核素迁移的研究概况

作为高放废物深地质处置的围岩中含有不规则的交错裂隙,它们构成溶解于地下水中的放射性核素的主要迁移途径。裂隙岩体中核素迁移研究,包括试验与模拟研究,已成为高放废物地质处置系统中核素迁移研究的最主要内容。

在试验研究方面,作为地质屏障中核素迁移研究最主要内容之一,已开展的裂隙岩体中核素迁移试验研究主要涉及迁移机理研究和迁移参数测定。核素迁移试验研究从规模和形式上大体可分为3种类型。

(1) 岩样示踪试验:在专门设计的试验装置内对岩石样品进行示踪试验,试件的尺寸从数厘米到

数米不等, 试验装置由试件主体部分(试件、绝热、密封材料等)、压力传导系统和数据采集系统三部分构成。这类试验的主要目的是: 确定裂隙岩体中放射性核素迁移的水动力弥散参数, 探求裂隙岩体中放射性核素迁移的时空分布规律, 探索裂隙及两侧岩块中核素运移的机理。

(2) 钻孔示踪试验: 通过钻孔对放射性核素在处置库围岩中的迁移行为进行观测, 并用不同的概念模型和数学模型对处置库中核素迁移时空分布规律进行模拟试验研究。

(3) 地下实验研究: 利用废弃的巷道、矿坑(井)建立地下实验室, 对放射性核素在地质屏障中的迁移规律进行试验和模拟研究。美国、日本、瑞典等国家已经或正在建立地下实验室开展高放废物深地质处置研究, 如日本正在利用 Tono 铀矿床开展高放废物深地质处置库运营后放射性核素迁移的比拟研究工作。

综上所述, 国际上一些西方发达国家已经开展了一系列以高放废物深地质处置为目的放射性核素迁移试验研究, 取得了大量实质性进展, 主要表现为:

(1) 通过各种试验研究, 对放射性核素在裂隙介质中的对流、扩散、吸附和阻滞规律和迁移机理的认识得到了进一步提高, 为高放废物深地质处置库围岩中放射性核素迁移概念模型和数学模型的建立奠定了理论基础。

(2) 获得了大量试验资料, 对以花岗岩、凝灰岩、盐岩、粘土岩等为围岩的处置库, 获得了大量放射性核素迁移的水动力弥散参数, 为处置库场地的特征评价提供了科学依据。

(3) 长时间、大规模的地下实验研究, 为长时间尺度下高放废物深地质处置库安全性能评价提供了比拟研究的途径。

(4) 裂隙岩体核素迁移试验技术和方法得到了进一步完善和发展, 开拓了裂隙岩体核素迁移试验新的途径和方法, 丰富了裂隙岩体核素迁移试验理论, 研制开发了一些适合于裂隙岩体核素迁移试验的试验装置和测量浓度、温度、压力的传感器。

核素迁移的模拟研究方面, 美国、瑞典、日本、法国和加拿大等西方发达国家自 20 世纪 50 年代以来, 成立了专门的研究机构就高放废物深地质处置系统中放射性核素的迁移问题进行模拟研究, 主要研究内容有:

①深地质处置系统概念模型的建立: 研究表明深地质处置系统一般由工程屏障系统(玻璃固化体、包装容器、回填材料)、地质屏障系统和生物圈三部分构成, 因此, 从模拟对象上高放废物深地质处置系统中放射性核素迁移模拟应包括工程屏障中核素分解和迁移行为模拟、地质屏障中核素迁移模拟和生物圈中核素迁移模拟。

②裂隙岩体核素迁移机理和迁移模型: 裂隙岩体核素迁移机理研究主要包括核素在裂隙岩体中的对流、扩散、吸附和阻滞规律的研究以及核素迁移过程中的水岩作用过程和核素存在、迁移形式研究; 根据裂隙介质的特征, 裂隙岩体核素迁移模型可分为单裂隙核素迁移模型、连续或等效连续介质核素迁移模型、裂隙网络介质核素迁移模型, 其中, 裂隙网络介质核素迁移模型是高放废物深地质处置系统中放射性核素迁移模拟研究发展趋势。

③多场耦合问题: 由于高放废物地质处置系统的复杂性, 核素溶解、迁移行为的模拟是一项复杂的系统工程。这里面有热力学、水文地球化学、岩体力学、地下水渗流及溶质迁移等问题。所建立的模型也应该是包括渗流场、化学场、应力场、温度场等在内的多场耦合, 或者说是这些场的模型所组成的模型系列。毫无疑问, 多场耦合问题是当前高放废物深地质处置系统中放射性核素迁移模拟研究的前沿性基础问题之一。

④数值模拟方法: 高放废物地质处置系统中核素迁移介质非均质性和核素迁移条件的复杂性, 决定了高放废物深地质处置系统中放射性核素迁移的数学模型难以用解析法求解, 核素迁移数学模型数值解法研究和计算机软件的开发亦是高放废物深地质处置系统中放射性核素迁移模拟研究的基本问题之一。目前基于随机理论的数值计算方法和基于积分变换的数值逆变换技术在放射性核素迁移模型的求解中越来越受到有关学者的关注。

⑤迁移参数的反演和灵敏性分析: 一方面, 通过高放废物深地质处置系统中放射性核素迁移模拟研究能模拟放射性核素迁移的时空分布规律, 进而达到评价高放废物深地质处置系统安全性能的目的; 另一方面, 通过核素迁移模拟数据与试验观测数据的拟合可以反演核素迁移的水动力弥散参数。此外, 借助核素迁移模拟进行参数灵敏性分析也是高放废物深地质处置系统中放射性核素迁移模拟研究的基本问题之一。

4 高放废物深地质处置多场耦合与核素迁移研究中的主要问题

4.1 深部裂隙岩体的地质、水文地质、水文地球化学环境问题

深部岩体的地应力、节理裂隙及各种构造面是深部岩体在工程扰动及热载作用下响应分析的基础；深部裂隙岩体中天然地下水运动的地质概念模型、物理及数学模型是工程与热作用下渗流分析的基础资料；天然条件下深部水-岩相互作用、地下水的原始化学成分及地球化学环境是受热荷载作用后水-岩作用和核素迁移的环境背景；因此，深部裂隙岩体的地质、水文地质和水文地球化学研究成为高放废物深地质处置多场耦合研究中必须研究的问题和必须获取的基础资料。

4.2 岩块、结构面及回填材料工程性状的温度、应力及时间相关性问题

高放废物深地质处置库中围岩及回填材料在处置库关闭后处于高温、高地应力及高流体压力的长时间作用下，因此，岩块、回填材料、结构面及流体的工程性状与常温、常压和室内实验中测定的数值可能显著不同，研究这些介质与结构面的物理、力学、水力学及热学性质与温度、时间及应力的相关性就成为高放废物深地质处置中多场耦合研究的一个重要基础课题。

4.3 深部节理岩体的应力场、渗流场、温度场及化学场的描述问题

深部节理岩体中的多场耦合是应力场、渗流场、温度场及化学场之间的相互影响，因此，各场自身的地质、力学模型与数学描述，是多场耦合研究的基础，必须进行研究。

4.4 深部岩体开挖扰动时的工程响应及开挖引起的岩体碎裂化与地下水渗流场改变问题

高放废物深地质处置库开挖阶段与一般大型深部地下工程一样，由于开挖的力学扰动，会引发施工中的安全问题、围岩的变形破坏问题，产生的岩体碎裂，改变地下水的渗流场和渗透通道，直接影响了高放废物放置后的性能，因此，必须重视研究这一阶段的应力、变形及流场变化。

4.5 水-乏燃料（玻璃固化体）的相互作用及水-岩、水-缓冲材料间化学作用的机理、化学作用的温度和应力相关性及其力学效应

高放废物处置的核素迁移起源于水对乏燃料或高放废物固化体的溶解，因此研究核素迁移需从源头上研究处置库条件下的水-乏燃料或固化体相

互作用与核素的近场释放。

高放废物处置库关闭后，由于核废物的放热，改变废物体外回填材料与围岩中的温度与应力条件，引发水-岩、水-回填材料间的化学作用，产生次生矿物的沉淀与溶解，改变地下水的化学成分、影响孔隙与裂隙率，影响回填材料与岩体的渗透性能、变形性能和强度性能。因此，研究处置库的水-岩、水-回填材料中的地球化学作用类型、机理、温度与压力的影响及地球化学作用的力学效应，成为耦合研究中的一个基础课题。

4.6 多场耦合的基本理论及数值方法

处置库关闭后，处置库的围岩和回填材料中发生热传输、应力与变形、流体流动和地球化学等四种过程，因此建立多场耦合的基本理论及其数值方法，是高放废物深地质处置中的最重要课题。

多场耦合基本理论中最重要的部分是建立耦合条件下各场的控制方程及联系各场的关系方程，例如：多场耦合时固相介质中的应力平衡方程、几何方程、本构方程；流体流动的基本规律与耦合条件下流体的质量守恒方程；耦合条件下的能量守恒方程；化学作用的反应方程等。联系各场关系的方程是指各种方程中的参数受其它场结果的影响的相关关系，比如渗透系数与温度和应力的相关关系、岩石的强度与变形参数与温度的相关关系等等。

多场耦合问题的求解必须寻求相应的数值解法，开发相应的计算程序，这成为求解多场耦合问题的技术关键之一。

4.7 高放废物处置库四场耦合条件下放射性核素迁移的基本机理、数学描述及其迁移规律

高放废物深地质处置的根本目的在于使放射性核素与生物圈的隔离，因此，放射性核素的迁移研究是最核心的课题。

研究的主要内容包括放射性元素在地下水中的传输的化学行为、动力学参数及运移的数学描述与求解的研究，包括：放射性核元素在地下水中的存在形态、运移过程中吸附、扩散与水动力扩散的机理及不同温度与压力条件下各种相关参数的测定；建立放射性核素传输过程的耦合动力学数值模型与求解方法；对核素释放的行为进行环境评价等。

4.8 多场耦合与核素迁移中的不确定性研究及人工类比研究

高放废物深地质处置中多场耦合与核素迁移涉及的时间尺度在一万年以上，这是一个远远跨越

一般工程与技术角度的时间概念,因此,各种过程、模型及参数的不确定性问题是必须研究的课题。

自然界中存在许多与处置库或处置屏障中多场耦合与核素迁移相似天然类似物和作用过程,研究这些产物或过程是研究高放废物中多场耦合与核素迁移的另一条途径。

5 结 论

高放废物的安全处置是世界各国、也是我国面临的一项重大课题。地质处置是一项被普遍接受的方案。与一般地下工程相比,高放废物深地质处置库有许多特殊性,温度-应力-渗流-化学场的长时间、大范围耦合及耦合条件下的核素迁移是其中最重要的作用过程和关键问题。本文概括了作为深地下工程的深地质处置库的 6 个特点,在简要介绍了多场耦合的机理与类型的基础上,提出了高放废物深地质处置多场耦合与核素迁移问题的特点,简要介绍了研究现状,最后提出了高放废物深地质处置多场耦合与核素迁移所需研究的主要问题。

参 考 文 献

- [1] XIA-ting FENG, Jian-jun LIU, Lan-ru JING. Research and application on coupled T-H-M-C processes of geological media in China—a review[A]. **Proceedings of the International Conference on Coupled T-H-M-C Progresses in Geo-system: Fundamental, Modeling, Experimentals& Applications**[C]. Stepansson O, Jing L, Hudson J A, eds., Sweden: Stockholm, 2003. 13—15.
- [2] Si-jing WANG, En-zhi WANG, Recent study on coupled processes in geotechnical and geo-envirnomenta fields in China[A]. **S Proceedings of the International Conference on Coupled T-H-M-C Progresses in Geo-system: Fundamental, Modeling, Experimentals& Applications** Stepansson O, Jing L, Hudson J A, eds., Sweden: Stockholm, 2003. 13—15.
- [3] Willis C, Rubin J. Transport of reactive solutes subject to a moving dissolution boundary: numerical methods and solution[J]. **Water Resource Research**. 1987, 23(8): 1 561—1 574.
- [4] Lee Y M, Lee K J. Nuclide transport of decay chain in the fractured rock medium: a model using continuous time Markov process[J]. **Ann. Nucl. Energy**, 1995, 22 (2): 71—84.
- [5] 周文斌, 张展适, 李满根. 地球化学程序EQ3/6及其在关键核素的迁移行为研究中的应用[A]. 核资源与环境研究成就与展望[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
- [6] 周文斌, 张展适. 元素镓、钷迁移形式的模拟研究[J]. 地球学报, 1999, 20(Supp.): 719—722.
- [7] 张展适. 活动水热系统中水-岩作用研究——以墨西哥 Los Azufres 和菲律宾 Tongonan 地热田为例[博士学位论文 D]. 抚州: 华东地质学院, 2000.
- [8] 张展适, 周文斌. 镓、钷在处置区的存在形式及影响因素[J]. 辐射防护通讯, 2000, 20(6): 21—25.
- [9] 张展适, 周文斌. 镓、钷、铈在黄土地下水中地球化学行为的模拟研究[J]. 辐射防护, 2003, 23(6): 29—35.
- [10] 张展适, 周文斌, 李满根. 水力压裂处置中镓、钷迁移行为的模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 27(6): 542—546.
- [11] 刘亚晨, 吴玉山, 刘泉声. 核废料贮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.
- [12] 沈珍瑶. 高放废物处置库耦合过程简介[J]. 辐射防护通讯, 1997, 17(3): 21—23.