

缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用

陈正汉 秦冰 著



科学出版社

缓冲/回填材料的 热-水-力耦合特性及其应用

陈正汉 秦 冰 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

我国是一个核工业大国,如何安全、有效、可靠地处置高水平放射性废物,是一个关系到我国的生存环境安全和核工业可持续发展的重大问题。作者及其学术团队自2006年以来,深入系统地研究了高放废物地质处置库的缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用,本书就是10年研究成果的结晶,也是国内目前关于缓冲/回填材料研究方面的第一本著作。

全书共10章,书中以我国拟选用的高放废物地质处置库的缓冲/回填材料——高庙子膨润土及其含砂混合料为对象,利用研发的高温高压高吸力三轴仪、固结仪、渗气仪和三向胀缩仪等设备,揭示了其热-力学特性(包括持水特性、变形特性、强度特性、三向膨胀力特性、热-水-力耦合特性)和渗气特性的规律;以混合物理论和热力学为基础,构建了缓冲/回填材料的热-水-力耦合分析模型,研发了相关的有限元法分析软件,并对国内外模型试验进行了全面的数值模拟分析,取得了良好的结果。本书的成果可为我国高放废物地质处置库的缓冲/回填材料的设计提供科学依据、理论基础和基本数据。

本书可供从事高放废物处置研究的科技人员,以及高等院校岩土工程和环境工程专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用/陈正汉,秦冰著. —北京:科学出版社,2017

ISBN 978-7-03-053516-0

I. ①缓… II. ①陈… ②秦… III. 高放废物—研究 IV. ①XS91
中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第141033号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:陶丽荣

责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华设计部

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年7月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017年7月第一次印刷 印张: 18

字数: 347 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

我国是一个核工业大国，在大力开发核能和发展核武器和的同时，将产生大量高水平放射性废物（以下简称高放废物）。高放废物含有放射性强、发热量大、毒性大、半衰期长的核素，如何安全、有效、可靠地处置高放废物，是一个关系到我国的生存环境安全和核工业可持续发展的重大问题。深地质处置是目前国际上公认的妥善方法，即把高放废物埋在距离地表深 500~1000 m 的地质体中，使之与人类的生存环境隔离。埋藏高放废物的地下工程称为“高放废物地质处置库”，地质处置库采用“多重屏障系统”的设计理念，其中的缓冲/回填材料是最后一道人工屏障，起力学屏障（维护处置库结构的稳定性）、水力学屏障（阻滞地下水流到废物罐表面）、化学屏障（阻滞核素及氧化剂迁移）和导热（防止废物罐过热）等作用，其工程特性对于高放废物地质处置库的安全运行非常重要。在国家自然科学基金委员会和中国人民解放军总后勤部（以下简称总后勤部）等单位的支持下，作者及其学术团队自 2006 年以来，深入系统地研究了高放废物地质处置库的缓冲/回填材料的热-水-力耦合特性及其应用，本书就是 10 年研究成果的结晶。

书中以我国拟选用的高放废物地质处置库的缓冲/回填材料——高庙子膨润土及其含砂混合料为对象，以自主研发的高温高压高吸力三轴仪、固结仪、渗气仪和三向胀缩仪等设备为工具，通过系统的试验研究，揭示了缓冲/回填材料的热-力学特性（包括持水特性、变形特性、强度特性、三向膨胀力特性、热-水-力耦合特性）和渗气特性的规律；以混合物理论、非饱和土力学和热力学为基础，构建了缓冲/回填材料的热-水-力耦合分析模型，自主研发了有限元法分析软件，对国内外模型试验进行了全面的数值模拟分析，取得了良好的结果。本书的成果可为我国高放废物地质处置库的缓冲/回填材料的设计提供科学依据、理论基础和基本数据。

全书共 10 章，包括 404 个试验、451 幅插图、50 个表格和 267 个数学表达式。自主创新、数据翔实、推理严谨、深入系统是本书的鲜明特色。

本书内容是国家自然科学基金项目（项目编号：10672182、11072265、11502299 和 11672330）、总后勤部科研项目（项目编号：BY210C023）、重庆市自然科学基金项目（项目编号：2009BB7343）和核工业北京地质研究院科研项目（项目编号：7.3.1-BRIUG-2012-HB11）的研究成果和结晶，作者衷心感谢国家自然科学基金委员会、总后勤部、重庆市科学技术委员会、中国人民解放军后勤工程学院（以下简称后勤工程学院）和核工业北京地质研究院的大力支持。

除了本书作者的积极努力，后勤工程学院的孙发鑫硕士和广西大学的陈皓硕士（其学位论文在后勤工程学院完成）为本书的出版做了大量深入细致的研究工作，后勤工程学院的郭剑峰副教授、章峻豪博士和汪龙硕士也为本书的出版付出了辛勤的劳动。

总后勤部的曾立斌先生和汤磊先生、后勤工程学院科研部的刘毅部长和杜磊磊先生、核工业北京地质研究院的刘月妙老师等为本书的出版提供了许多有益的建议和帮助，作者在此一并表示衷心的感谢。

作者

2017年3月18日

目 录

前言

绪论	1
0.1 工程背景与意义	1
0.2 高放废物地质处置发展概况	3
0.3 国外缓冲/回填材料研究概况	5
0.3.1 试验仪器研制	6
0.3.2 主要工程特性试验研究	8
0.3.3 本构模型研究	10
0.3.4 热-水-力多场耦合研究	12
0.4 国内缓冲/回填材料研究概况	16
0.5 本书主要内容	17
第 1 章 高吸力下缓冲/回填材料持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型	19
1.1 水蒸气平衡技术的误差分析	20
1.2 试样制备与试验方案	24
1.3 试验结果分析	26
1.4 持水曲线温度效应理论模型及应用	30
1.4.1 基于吸附热力学的高吸力段持水曲线的温度效应模型	30
1.4.2 模型验证	33
1.4.3 与已有温度效应模型的对比分析及其在低吸力段的应用	37
1.5 考虑温度效应的混合料的持水特性	40
1.5.1 试验概况	40
1.5.2 试验结果分析	44
1.5.3 考虑温度和含砂率影响的缓冲材料的持水模型	47
1.5.4 模型的验证	49
1.6 本章小结	50
第 2 章 考虑 Klinkenberg 效应的缓冲/回填材料的渗气特性	51
2.1 考虑 Klinkenberg 效应的渗气系数计算原理	52

2.2	试验方法与试验方案	54
2.3	试验结果与分析	56
2.3.1	初始应力对渗气特性的影响	56
2.3.2	气压力对渗气系数的影响与 Klinkenberg 效应	60
2.3.3	Klinkenberg 渗气系数与体积含气率之间的关系	65
2.3.4	固有渗透系数与相对渗透系数	67
2.4	本章小结	70
第3章	缓冲/回填材料在单向压缩及加卸载循环中的变形特性	72
3.1	仪器构造与功能	72
3.2	仪器标定	77
3.2.1	荷重传感器的温度影响标定	77
3.2.2	LVDT 的温度影响标定	79
3.2.3	不同温度下湿度传感器的标定	81
3.2.4	气体循环条件下的吸力控制值标定	83
3.2.5	固结室轴向密封摩擦力的标定	86
3.2.6	仪器自身变形的标定	88
3.3	试验方案	89
3.4	试验结果分析	90
3.4.1	控制温度与吸力的加卸载循环试验结果分析	90
3.4.2	不同温度下的膨胀变形试验结果分析	92
3.5	膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究	95
3.5.1	试样制备与试验方案	95
3.5.2	干密度、竖向压力、浸泡液体及吸湿方式对膨胀变形的影响	96
3.5.3	调整浸泡液体引起的渗析变形	97
3.5.4	膨润土在常温环境下加卸载循环中的变形规律	98
3.6	本章小结	103
第4章	缓冲/回填材料的三向膨胀力特性	105
4.1	膨润土的三向膨胀力特性	105
4.1.1	仪器简介与试样制备	105
4.1.2	三向膨胀力与试样初始状态的关系	109
4.1.3	竖向膨胀力与水平膨胀力之间的关系	111
4.1.4	膨胀力随时间变化规律	113
4.1.5	最终平衡时间	118

4.1.6 关于膨胀力来源的讨论	119
4.1.7 关于膨胀力时程曲线特征的几点说明	120
4.1.8 本节小结	121
4.2 膨润土-石英砂混合料的三向膨胀力特性	121
4.2.1 试验概况	122
4.2.2 试验结果分析	124
4.2.3 三向膨胀力的模型	127
4.2.4 模型的应用	129
4.2.5 讨论	129
4.2.6 本节小结	131
第 5 章 混合缓冲/回填材料在常温下的强度与应力-应变特性	133
5.1 试验概况	133
5.1.1 使用符号说明	133
5.1.2 试验仪器及改进	134
5.1.3 仪器标定	135
5.1.4 剪切速率选择	136
5.1.5 试样制备与试验方案	137
5.2 三轴剪切试验结果分析	138
5.2.1 应力-应变关系分析	138
5.2.2 体应变与轴向应变之间关系	141
5.2.3 试样破坏形式	143
5.2.4 破坏应力分析	144
5.3 膨润土-砂混合料力学参数分析	146
5.3.1 强度指标	146
5.3.2 杨氏模量	149
5.3.3 破坏比	151
5.3.4 泊松比	152
5.4 本章小结	154
第 6 章 考虑温度影响的缓冲/回填材料的强度特性与应力-应变特性	156
6.1 缓冲/回填材料高温-高压-高吸力三轴仪简介	156
6.2 膨润土的温控三轴试验与成果分析	157
6.2.1 试验方案	157
6.2.2 应力-应变曲线与强度分析	157

6.3	混合缓冲材料的温控三轴试验与成果分析	171
6.4	本章小结	186
第 7 章	缓冲/回填材料的热-水-力多场耦合模型	187
7.1	基本假设	188
7.2	场方程	188
7.2.1	质量守恒方程	188
7.2.2	动量守恒方程	189
7.2.3	能量守恒方程	189
7.3	热力学平衡限制条件与本构方程	190
7.3.1	热力学平衡限制条件	190
7.3.2	密度本构方程	191
7.3.3	内能本构方程	192
7.3.4	热流密度与内热源本构方程	192
7.3.5	扩散阻力本构方程与渗透定律	193
7.3.6	变形与饱和度本构方程	196
7.4	增量形式的控制方程	198
7.5	本章小结	202
第 8 章	缓冲/回填材料的热-水-力多场耦合模型的数值求解、验证分析及应用	203
8.1	轴对称条件下缓冲/回填材料的热-水-力多场耦合模型的数值求解	203
8.1.1	热-水-力多场耦合模型的等效积分“弱”形式	203
8.1.2	轴对称条件下空间域与时间域上的有限元离散	208
8.1.3	缓冲/回填材料的热-水-力多场耦合计算程序 THMCA	216
8.2	模型验证	218
8.2.1	西班牙 FEBEX Mock-up 试验简介	218
8.2.2	FEBEX Mock-up 试验的计算模型	219
8.2.3	温度场计算结果	224
8.2.4	水分场计算结果	227
8.2.5	应力场计算结果	231
8.2.6	气压力场计算结果	235
8.3	讨论	235
8.3.1	关于温度场变化的讨论	235
8.3.2	关于水分场变化的讨论	239
8.3.3	关于气压力场变化影响的讨论	245

8.4 地质库混合缓冲材料的热-水-力耦合性状分析	250
8.4.1 研究对象与计算参数	250
8.4.2 含砂率对缓冲材料热-水-力耦合性状的影响	253
8.5 本章小结	255
第9章 主要创新成果及各章图表公式试验数量统计	257
9.1 本书的主要创新成果	257
9.2 本书各章的图表公式试验数量统计	259
参考文献	260

绪 论

0.1 工程背景与意义

核科学技术的发展与核能的和平利用是 20 世纪人类伟大的成就之一。但随着核能和核技术的不断发展,在开发、利用核裂变能的同时,也产生了大量放射性废物(或称核废物)。按放射性水平,核废物可分为极低放废物、低放废物、中放废物和高放废物(IAEA, 2009)^[1]。目前,已有较成熟的技术对低中放废物进行最终安全处置,我国现已建成甘肃(西北)、广东北龙(华南)、四川飞凤山(西南)低中放废物处置场,正在建设或准备建设华东及北方中低放废物处置场。但是,对于高放废物,由于其含有放射性强、发热量大、毒性大、半衰期长的核素,如何对其进行最终安全处置还是一个难题,面临一系列科学、技术、工程、人文和社会学的挑战(潘自强等, 2009)^[2]。

高放废物主要以核电站卸出的乏燃料及其后处理产生的高放废液固化体为主,还包括少量的军工高放废液固化体。随着我国核电事业的飞速发展,产生的高放废物将会大量累积。“十二五”期间,我国核电投资规模约达 6000 亿元,运行和在建机组达 70 台左右,这些核电站产生的乏燃料总量约达 10^6 tHM。世界先进国家核能发展的历程均表明,高放废物的安全处置问题是制约核能可持续发展的关键因素之一。因此,高放废物的安全处置现已成为关系到国土环境、公众安全和核能可持续发展的重大问题,是一个与核安全同等重要的问题,必须对高放废物的处置问题进行研究并加以妥善解决(潘自强等, 2009)^[2]。

高放废物安全处置的最大难点在于如何使高放废物与生物圈进行充分、可靠的隔离,且隔离时间超过一万年。曾经有人提出过“太空处置”“深海沟处置”“冰盖处置”“岩石熔融处置”等多种处置方案,但经过多年的研究和实践,目前公认的安全可靠且技术上可行的方案为“深地质处置”。2003 年颁布的《中华人民共和国放射性污染防治法》第六章第四十三条明确规定“高水平放射性固体废物实行集中的深地质处置”。

高放废物的深地质处置是把高放废物埋在距离地表深 500~1000m 的地质体中,使之与人类的生存环境隔离。埋藏高放废物的地下工程即称为“高放废物处置库”,其采用的是“多重屏障系统”设计理念,即把废物体(高放废液的玻璃固化体或核电站卸出的乏燃料)储存在废物罐中,外面包裹缓冲/回填材料(膨润土或其混合料),再向外是围岩(花岗岩、黏土岩、岩盐等),图 0.1 和图 0.2 为其示

意图。一般把废物体、废物罐和缓冲/回填材料称为工程屏障，把周围的地质体称为天然屏障（Pusch，2008；王驹，2009）^[3,4]。

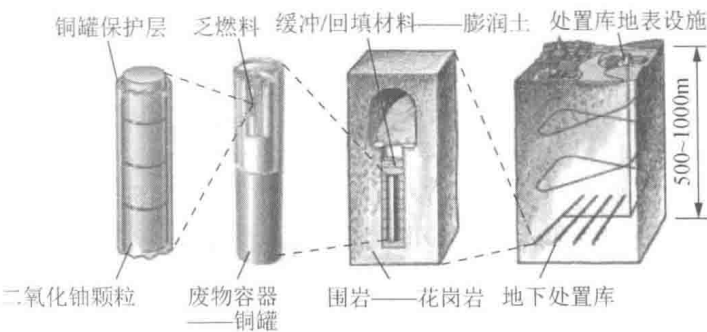


图 0.1 瑞典 KBS-3 高放废物乏燃料深地质处置库设计

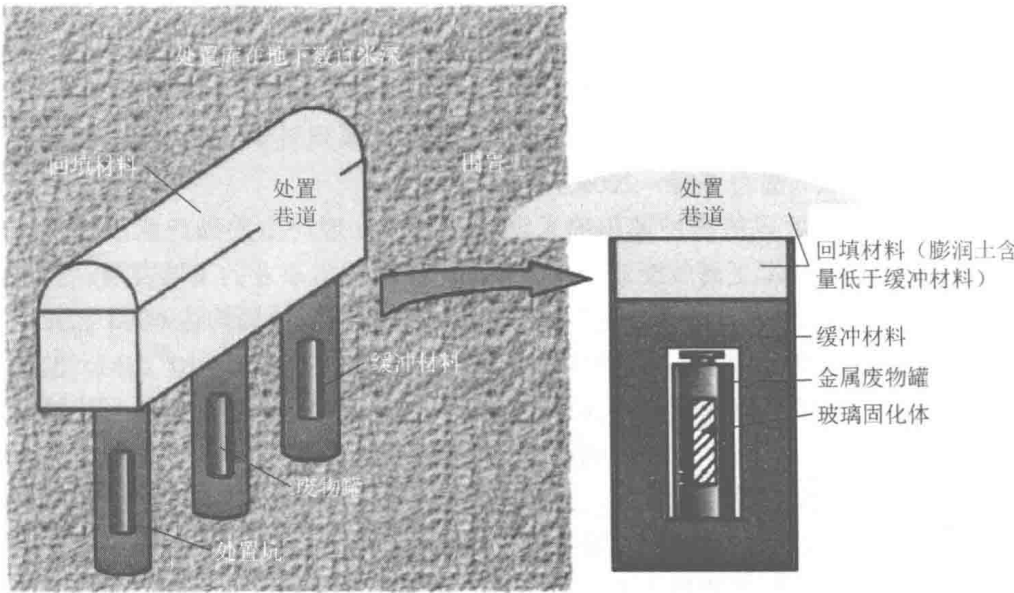


图 0.2 高放废物（玻璃固化体）深地质处置库示意图

缓冲/回填材料是最后一道人工屏障，起到力学屏障（维护处置库结构的稳定性）、水力学屏障（阻滞地下水流到废物罐表面）、化学屏障（阻滞核素及氧化剂迁移）、导热（防止废物罐过热）等作用，其材料的选择和工程特性对于高放废物处置库的安全运行非常重要。膨润土（bentonite）是一种以蒙脱石为主要成分的黏土矿物，其遇水膨胀剧烈、自封闭性好、比表面积大、阳离子交换能力强、吸附能力强、渗透性极低、热传导性良好，满足缓冲/回填材料的设计要求。因此，各国普遍选用膨润土（或其混合料）作为缓冲/回填材料（Enresa，2000；Nagra，2002；Nwmo，2005；Jnc，2000）^[5~8]。我国已选定内蒙古高庙子膨润土矿床作为

我国高放废物地质处置库缓冲/回填材料的首选矿床(刘月妙等, 2013)^[9]。

在高放废物地质处置库中, 缓冲/回填材料处于复杂的热-水-力-化学(T-H-M-C)多场耦合条件下工作: 一是“热效应”(T), 高放废物的衰变将产生大量的热, 缓冲/回填材料将长期处于 100℃左右的高温环境, 温度对其力学性质的影响及水蒸气的运移不容忽视; 二是“水力效应”(H), 缓冲/回填材料初始是非饱和的(其初始吸力可达上百兆帕), 将从围岩中吸水, 存在水分迁移的问题, 而且由于膨润土渗透系数非常低, 在相当长一段时间内(几十年, 甚至上百年)其仍会处于非饱和状态; 三是“力学效应”(M), 膨润土遇水后会产生膨胀力, 受热后会存在温度应力, 另外还会受到围岩蠕变造成的围岩压力; 四是“化学效应”(C), 核素有可能从废物罐中逸出并在缓冲材料中扩散, 而缓冲材料对核素有吸附作用, 可延缓核素的迁移。上述各方面不是孤立发生的, 它们同时存在, 彼此之间有着紧密且复杂的相互影响。要想科学合理地预测与评估缓冲/回填材料的实际工作性能, 必须对热、水、力、化学共同作用条件下非饱和缓冲/回填材料(膨润土)的主要工程特性与多场耦合行为有深入的认识。

0.2 高放废物地质处置发展概况

高放废物地质处置的设想最初是由美国国家科学院于 1957 年提出的(Hess et al., 1957)^[10]。自 20 世纪 70 年代, 一些国家开始着手实施高放废物地质处置方案的开发计划。1997 年通过的《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》明确了国家在安全处置乏燃料和放射性废物方面的责任, 高放废物安全处置的问题进一步得到了各有核国家的重视, 美国、加拿大、瑞典、芬兰、比利时、西班牙、法国、德国、瑞士、捷克、日本、韩国等国均设有专门的机构负责高放废物的深地质处置, 并展开了较为系统的研发工作。部分先进国家的研究已从室内实验室的基础研究, 逐步转向以地下实验室(数百米深)为平台的全尺寸现场验证试验研究, 如瑞士 Grimsel 地下实验室进行的 FEBEX 现场试验(1996~2012 年)^[11]、瑞典 Äspö 硬岩地下实验室进行的 Prototype Repository 原型试验(2001 年至今)^[12]、比利时 HADES 地下实验室进行的 Praclay 原位加热试验(2010 年至今)^[13]、欧盟组织进行的处置库设计施工研究与示范 ESDRED 项目(2004~2009 年)^[14]等。现阶段高放废物地质处置库的建设已日趋可行: 2009 年, 瑞典选定了 Forsmark 场址建造高放废物地质处置库, SKB(瑞典核燃料与废物管理公司)已于 2011 年向政府递交了建库申请^[15]; 芬兰在 2000 年就已选定 Olkiuoto 场址建设高放废物地质处置库, Posiva Oy(芬兰乏燃料处置机构)于 2012 年递交了建库申请, 预计 2020 年递交运行申请, 从 2022 年运行至 2120 年^[16]; 美国 2013 年公布的《乏燃料与高放废物管理和处置战略》提出 2048 年前建成高放废物地质处置库并投入运营^[17]。

我国高放废物深地质处置的研究和开发始于 20 世纪 80 年代中期。前核工业总公司于 1986 年成立了“高放废物深地质处置研究协调组”，负责全国高放废物深地质处置科研的规划、组织和年度计划的实施。同年，前核工业部科技核电局开始实施“1986~2040 年高放废物深地质处置研究发展计划”（SDC 计划），安排了工程、地质、化学、安全 4 个领域的研究项目。2005 年，中华人民共和国国防科学技术工业委员会（简称国防科工委）成立了“高放废物地质处置研究专家组”。2006 年，国防科工委、中华人民共和国科学技术部、原国家环境保护总局联合发布了《高放废物地质处置研究开发规划指南》，提出了我国高放废物地质处置库开发采用“三步曲”式的技术路线：到 2020 年，完成室内实验室研究和处置库场地初选工作，并建成地下实验室；2021~2040 年期间，完成地下实验室研究工作，并最后确认场地；2041 年至 21 世纪中叶，建造高放废物地质处置库。国务院 2007 年批准的《核电中长期发展规划（2005—2020 年）》进一步明确了 2020 年建成我国高放废物地质处置地下实验室的目标。国务院 2012 年批准的《核安全与放射性污染防治“十二五”规划及 2020 年远景目标》提出 2015 年前完成地下实验室选址和相关工程前期准备。

在过去 30 年时间里，我国高放废物地质处置工作取得了一系列进展，特别是近 10 年进入了一个快速发展的阶段，先后在北京（2006 年）、敦煌（2008 年）、杭州（2010 年）、南昌（2012 年）、绵阳（2014 年）、北京（2016）召开了 6 届废物地下处置学术研讨会，取得的进展主要包括：

1) 在选址与场址评价方面，工作人员主要以花岗岩为对象开展了工作，通过对华东、华南、西南、内蒙古、西北和新疆 6 个花岗岩预选区的比较分析，确定了西北甘肃省的北山地区为重点预选区；在北山地区开展了地质调查、水文和工程地质条件、地震地质特征研究等工作，截至 2013 年 5 月已施工了 11 个深钻孔和 8 个浅钻孔，获得了深部岩样、水样和其他相关资料，初步掌握了场址评价方法（王驹等，2012；金远新等，2012）^[18, 19]；2009 年，开始启动黏土岩预选场址调查，已在西北地区筛选出了柴达木盆地西北缘、内蒙古巴音戈壁盆地的塔木素等若干有利区域（刘晓东等，2012）^[20]。

2) 在工程屏障与处置工程方面，通过对全国膨润土矿床的调查和筛选，选定了内蒙古兴和县高庙子膨润土矿床作为我国高放废物地质处置库缓冲/回填材料的首选供应基地；对高庙子膨润土的膨胀、渗透、导热、强度、变形及压实特性等进行了初步的研究（详见 0.4 节），2011 年 7 月开始了 1:2 尺寸的中国缓冲材料热-水-力-化学耦合性能大型模型试验 T-H-M-C China-Mock-Up 的运行，预计运行 10 年（刘月妙等，2013）^[9]；研究了低碳钢、铜、钛及钛钼合金等废物罐材料在模拟高放废物地质处置库环境下的腐蚀行为，并开始进行我国高放废物处置容器的设计（李宁等，2012）^[21]；高放废物地质处置工程概念设计也已逐步开展，

对处置库深度、处置间距、处置库规模、进出通道形式、功能分区等进行了初步的研究(吕涛等, 2012)^[22]。

3) 在处置化学方面, 从早期以方法学研究为主, 逐步向模拟高放废物地质处置库实际物化环境逼近, 研制了一些能够模拟高温、低氧、低浓度处置化学环境的试验装置, 研究了关键核素(镅、钚、镅、镎等)在高庙子膨润土、甘肃北山花岗岩等中的化学行为(核素溶解度、核素存在形式、配合物化学、胶体行为等)与迁移特性(吸附分配比、扩散系数等), 并对关键核素在模拟处置条件下的化学行为与迁移行为开展了机理研究^[2]。

4) 在安全评价方面, 对国外高放废物地质处置安全评价方法与技术进行了跟踪, 初步探讨了高放废物地质处置安全评价指标体系(李金轩等, 2004; 魏方欣, 2012)^[23, 24], 利用 GoldSim 软件对北山预选场址的高放废物地质处置初步概念设计进行了安全试评价(熊小伟等, 2012)^[25]。

0.3 国外缓冲/回填材料研究概况

膨润土最初于 1898 年在美国怀俄明州福特本顿堡附近被发现, 美国地质学家 Knight 以其产地 Fort Benton 命名为 bentonite。20 世纪 70 年代末, 瑞典科学家提出在围岩(花岗岩)与废物罐之间增设一层工程屏障(缓冲/回填材料)以提高高放废物地质处置库的封闭性。

工程屏障体系对缓冲/回填材料的要求包括: ①合适的力学性能, 能保持废物包装容器的稳定。②低渗透性, 能延缓地下水侵蚀废物包装容器和泄露核素向外迁移。③较高的热传导性, 能及时将放射性元素衰变产生的热量传递到围岩中, 避免处置库温度超过 100℃。④较高的吸附性, 能阻滞和延缓放射性元素随地下水渗流而扩散。⑤适宜的膨胀特性, 能及时填补和封闭缓冲/回填材料本身裂缝和围岩内表面裂隙。

膨润土及其含砂混合料以其优异的性能被认为是高放废物地质处置库中理想的缓冲/回填材料。目前, 有的国家选用高压实膨润土作为缓冲/回填材料, 有的国家则选用膨润土-砂混合料作为缓冲/回填材料。例如, 瑞典、西班牙、德国采用纯膨润土^[26]; 瑞士在膨润土中加入 5% 的石英砂^[27]; 美国向 MX-80 膨润土添加的石英砂比例是 10%~15%^[28]; 加拿大选用膨润土和砂各占 50%^[29]; 比利时是向膨润土中添加 35% 的石英砂和 5% 的石墨^[30]; 日本采用 70% 膨润土与 30% 砂的混合料^[31]。有研究结果显示, 在膨润土中加入一定量的石英砂能提高其热传导系数^[32, 33]和强度^[34], 同时能保持膨润土优良的防渗透性^[35]、吸水膨胀自封闭性和吸附性。

鉴于上述情况, 本书把膨润土和膨润土-砂混合料统称为缓冲/回填材料。缓冲/回填材料的膨胀性、渗透性、变形-强度特性、热传导等特性及其多场耦合行

为的研究得到了广泛关注。由于在处置库中缓冲/回填材料初始是非饱和的，从 20 世纪 90 年代中期开始，非饱和土力学的方法与理论逐步应用于缓冲/回填材料的研究。本节将从试验仪器研制、主要工程特性试验研究、本构模型研究、热-水-力多场耦合研究等方面加以介绍。

0.3.1 试验仪器研制

对于非饱和缓冲/回填材料，其试验研究会遇到高吸力（几十兆帕，甚至几百兆帕）、高压（几兆帕，甚至十几兆帕）、高温（可达 100℃）及试验平衡时间很长等问题。这些都大大超出了常规非饱和土仪器的试验能力范围，缺乏适用的仪器设备成为了限制非饱和缓冲/回填材料研究的主要瓶颈之一。

在非饱和固结仪研制方面，Villar (2002)^[36]、Lloret 等 (2004)^[37]、Cuisinier (2005)^[38]、Hoffmann 等 (2005)^[39]、Tang 等 (2007)^[40]、Dueck 等 (2010)^[41] 等分别报道了不同形式的采用气体湿度法控制吸力的高吸力固结仪，各固结仪之间的比较如表 0.1 所示。由表 0.1 可知，上述固结仪的试样尺寸普遍小于常规固结试样的尺寸，这是为了既缩短试验时间，又可在相同的竖向力下得到更高的竖向应力；可施加的最大竖向应力通常在 8 MPa 以上，明显高于常规高压固结仪的最大竖向应力（4 MPa）。通常采用 2 种不同的方式实现试样高吸力的控制：一是将控制相对湿度的溶液直接置入固结室内，通过气体的扩散完成试样的吸力控制^[36, 38, 40]；二是将溶液放入单独的密封容器中，通过该容器与固结室之间强制气体循环流动实现试样的吸力控制^[37, 39, 41]。相比于直接将溶液置入固结室的方法，进行气体循环的方法能够缩短吸力平衡的时间（Marcial et al., 2002）^[42]，但是由于在循环管路中存在温度与压力的不均匀性，会导致试样中的实际吸力与相应的溶液控制值有所不同，同时试样中的吸力分布也可能呈现一定的不均匀性（Dueck, 2004；Oldecop et al.2004；Delage et al., 2008；Pintado et al., 2009）^[43-46]；对于进行气体循环的高吸力控制，应对试样真实吸力加以量测，Ducekt 等 (2010)^[41]在其研制的固结仪中，试样中部周边布置了湿度传感器用以量测试样吸力。Lloret 等 (2004)^[37]、Tang 等 (2007)^[40]分别采用在固结室外围设置加热室和直接将固结室置入恒温水浴的方法实现了相应高吸力固结仪的高温应用，最高温度均在 80℃ 之内。

表 0.1 文献报道的高吸力固结仪

文献出处	试样直径 /mm	试样高度 /mm	最大应力 /MPa	水蒸气 是否循环	吸力 是否量测	温度范围 /℃
Villar (2002) ^[36]	38	12	9	否	否	室温
Lloret et al. (2004) ^[37]	50	20	8.6	是	否	22~78
Cuisinier et al. (2005) ^[38]	50	10	20	否	否	室温

续表

文献出处	试样直径 /mm	试样高度 /mm	最大应力 /MPa	水蒸气 是否循环	吸力 是否量测	温度范围 /℃
Hoffmann et al. (2005) [39]	50	20	2	是	否	室温
Tang et al. (2007) [40]	80	10	64 (等向)	否	否	20~70
Dueck et al. (2010) [41]	35	14	20	是	是	室温

在非饱和三轴仪方面, Blatz 等 (2000) [47] 研制了气体湿度法控制吸力的非饱和三轴仪, 该三轴仪是在 Lingnau 等 (1996) [48] 的高温饱和三轴仪、Wan 等 (1995) [49]、Tang 等 (1997) [50] 的可量测吸力三轴仪基础上改进而成的。控制湿度的溶液放在专门的干燥器中, 试样四周贴有 15 mm 宽的土工织物 (Amaco no. 2044), 以便气体在蠕动泵的驱动下在试样与干燥器之间循环; 在试样帽与试样中部分别设有热电偶湿度传感器 (Wescor PST-55), 可实时监测吸力变化, 可量测的最大吸力为 8 MPa; 该三轴仪压力室最大可承受围压 10 MPa, 内置有量测轴向力的荷重传感器 (10 kN) 1 个、量测试样轴向变形的 LVDT 1 个、量测试样中部径向变形的 LVDT 2 个。

在膨胀力测量方面, 通常是在一维侧限条件下进行, 主要有两种不同的方法: 一是加压平衡法, 即通过不断增大竖向荷载, 以平衡试样的膨胀变形, 相应的最大竖向荷载即为膨胀力; 二是恒体积法, 即试验过程中始终保持试样体积不变, 量测相应荷载的变化。由于缓冲/回填材料中存在复杂的应力路径相关性, 上述两种方法的结果有一定差异; 考虑到在实际处置库中缓冲/回填材料的总体积变化不大, 恒体积法会更符合实际工程需要。恒体积法的实现, 既可将膨胀仪室或固结室直接放入刚性框架之中, 利用刚性框架与膨胀仪室之间的荷重传感器量测膨胀力 (Romero, 1999; Lloret, 2003; Villar, 2004; Karnland et al., 2006; Dueck, 2008) [51~55]; 也可在膨胀仪室内置微型测力装置, 如 UPC 膨胀仪中内置了 Y 型测力元件, 通过量测该元件的应变变化得出相应膨胀力变化 (Hoffmann, 2005) [56]。通过将膨胀仪室置入恒温水浴 (Villar, 2004) [53], 在膨胀仪室侧面设置加热元件 (Arifin et al, 2007) [57] 或加热室 (Romero, 1999) [51] 等方式, 可实现恒体积下高温膨胀力的测量。

在非饱和渗水装置方面, 由于缓冲/回填材料极强的吸水性, 无法使用稳态法直接量测膨润土的非饱和渗透系数, 只能采用非稳态法进行研究。Lemaire 等 (2004) [58] 曾报道了用于低干密度膨润土的一维渗水装置, 通过双源 γ 射线量测试样中的含水率与干密度的变化。基于瞬态剖面法, Cui 等 (2008) [59] 报道了两套分别用于恒体积条件与自由膨胀条件下的一维渗水装置: 在恒体积条件下, 将试样放置于不锈钢渗透筒中, 一端注水, 另一端直接与大气相通, 在渗透筒壁上安装了 4 个湿度传感器以量测不同剖面处的吸力变化; 在自由膨胀条件下, 试样