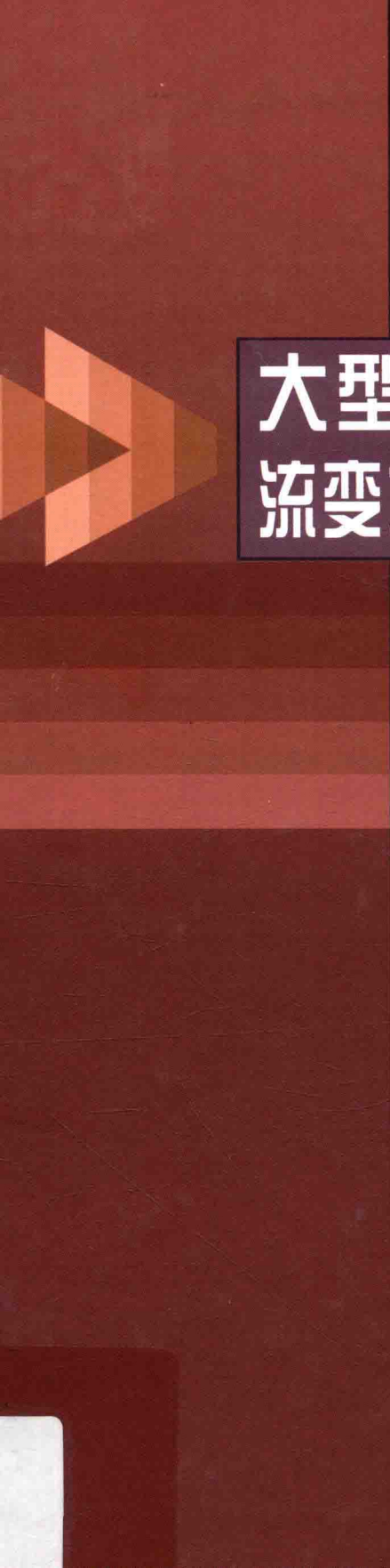


“十三五”国家重点出版物出版规划项目

岩石力学与
工程研究著作 丛书



大型地下水封洞库围岩 流变力学与长期安全性分析

◎徐卫亚 张超 王如宾 王环玲 赵海斌 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
岩石力学与工程研究著作丛书

大型地下水封洞库围岩 流变力学与长期安全性分析

徐卫亚 张 超 著
王如宾 王环玲 赵海斌

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍大型地下水封洞库围岩流变力学与长期安全性评估方面的研究成果。内容主要包括:开展地下水封洞库围岩的瞬时力学特性、流变力学特性试验研究,描述洞库围岩流变应力应变随时间的变化规律,研究岩石的流变变形速率,分析岩石试样流变宏观破坏形式与试样破坏断口微观断裂机理,揭示岩石试样流变过程中的渗透性演化规律;建立考虑损伤演化的渗流应力耦合流变损伤模型,进行地下水封洞库工程的三维弹塑性数值计算、流变数值计算、流变损伤数值计算以及渗流应力耦合流变损伤数值计算,对比分析不同计算方案下的洞库围岩变形特征,并对地下水封洞库的长期稳定性与安全性进行分析和评价。

本书可供高等院校、科研院所等从事土木工程、能源工程、水利水电、矿山开采等领域的研究生、科技人员、工程设计人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大型地下水封洞库围岩流变力学与长期安全性分析/徐卫亚等著. —北京:科学出版社,2016.9

(岩石力学与工程研究著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-049994-3

I. ①大… II. ①徐… III. ①地下油库—围岩—流变学—力学—研究
②地下油库—安全性—分析 IV. ①TU926

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 225111 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/6

2016 年 9 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:285 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编: 孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编: 冯夏庭

副主编: 何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长: 黄理兴 刘宝莉

编 委: (按姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘宝莉	刘汉东	刘汉龙	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、 CO_2 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO_2 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

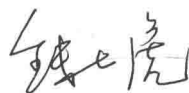
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

前 言

地下水封洞库处于稳定的地下水位线以下,地下水在岩体裂隙中流动产生复杂渗流场效应,工程地质环境复杂。渗流应力耦合作用下地下水封洞库围岩长期稳定性与安全性是整个石油战略储备工程成败的关键,对地下水封洞库工程的长期安全运营有着至关重要的影响,也是地下水封洞库工程建设中最为关键的科学技术问题之一。

岩石流变力学作为科学研究和工程应用的重要课题,得到了众多国内外专家和学者的广泛关注和持续性研究。地下工程稳定性具有明显的时间效应,洞室围岩周围岩石材料与岩体结构的流变性质是影响大型地下水封洞库、地下隧道、地下结构以及地下洞室群工程长期稳定与运行安全的重要原因之一。许多大型地下工程的变形与失稳破坏并不是瞬间就发生的,而是随时间的推移不断发展而最终完成的。因此,针对大型地下工程,开展岩石流变力学特性试验与理论研究具有十分重要研究意义与研究价值。

我国从 2003 年开始筹建国家石油储备基地,致力于国家石油战略储备体系,并因此进行了一系列大型地下水封洞库工程的建设。在大型地下水封洞库工程建设及其长期安全运营过程中,不可避免地遇到地下工程岩石及软弱结构面的流变力学问题。地下水封洞库工程规模巨大,地理环境独特,岩体赋存环境极其复杂,其长期稳定性和运行安全性评价方面存在许多理论和技术问题。因此,合理地描述和解释岩石及岩体结构面与时间相关的力学性质和行为,认识其时效变形规律和破坏特征,开展地下水封洞库三维流变数值计算分析,进行长期稳定性评价与安全性评估,具有重要的理论价值和广泛应用前景。

本书撰写大纲由徐卫亚教授提出,张超、王如宾、王环玲等负责撰写。全书共 8 章:第 1 章为研究综述;第 2、3 章主要为试验部分的内容,主要包括地下水封洞库围岩三轴力学特性试验和渗流应力耦合三轴流变力学试验;第 4 章为地下水封洞库围岩流变本构模型,主要内容包括考虑损伤演化的流变损伤模型和渗流应力耦合流变损伤模型研究;第 5~7 章为地下水封洞库三维数值计算与分析,主要包括三维弹塑性数值计算、三维流变数值计算以及三维流变损伤数值计算;第 8 章为地下水封洞库渗流应力耦合长期安全评估技术研究,主要内容包括渗流应力耦合作用下的地下水封洞库流变损伤数值计算,不同数值计算方案下地下水封洞库围岩变形规律对比分析,以及地下水封洞库长期稳定性与安全性的分析与评价。

本书的研究工作得到了“十二五”国家科技支撑计划项目“石油储备地下水封

洞库工程安全技术”(2012BAK03B04)、国家自然科学基金项目(51479049、51409082、11172090、11572110、11272113、51209075),以及中央高校基本科研业务费项目(2014B17714)等基金课题的资助,在此表示衷心感谢。

本书是研究团队近五年来在石油战略储备洞库工程领域所取得的研究成果,期间培养了一批优秀的博士、硕士研究生。感谢闫龙、贾朝军、孟庆祥、刘琳、张强、王盛年、吕军、林志南、王欣、左静、孔茜、曹亚军等所有参与课题研究的研究生所付出的辛勤劳动,同时书中还包含了部分研究生的学位论文相关成果,一并表示感谢。同时感谢中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司在石油洞库工程现场调研、岩石试样制取与地质资料收集方面的大力支持和协助。感谢河海大学王伟副教授和张久长博士后对流变力学试验和流变损伤模型研究工作的辛勤付出。

由于作者的水平与时间有限,书中内容难免有不妥之处,恳请各位专家、学者和广大读者批评指正。

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 地下工程岩石流变力学试验研究现状	3
1.3 岩石流变本构模型研究现状	4
1.4 地下工程围岩长期稳定性研究现状	6
1.5 本书主要内容	6
第 2 章 地下水封洞库围岩力学特性试验	8
2.1 试验设备与试样制备	8
2.1.1 试验设备	8
2.1.2 试样制备	9
2.2 试验方案和试验方法	10
2.2.1 试验方案	10
2.2.2 试验方法	11
2.3 二长花岗岩三轴力学试验成果与分析	11
2.3.1 瞬时三轴力学试验曲线	12
2.3.2 二长花岗岩应力-应变规律与强度特性	13
2.3.3 二长花岗岩试样瞬时破坏形式	17
2.4 闪长岩三轴力学试验成果与分析	18
2.4.1 瞬时三轴力学试验曲线	18
2.4.2 闪长岩应力-应变规律与强度特性	20
2.4.3 闪长岩试样瞬时破坏形式	23
2.5 地下水封洞库围岩渗透演化规律分析	24
2.5.1 轴向应变与渗透率的关系	24
2.5.2 环向应变与渗透率的关系	26
2.6 本章小结	27
第 3 章 地下水封洞库围岩渗流应力耦合流变力学试验	28
3.1 渗流应力耦合三轴流变力学试验	28

3.1.1	试样制备	28
3.1.2	流变力学试验方案和试验方法	29
3.1.3	渗流应力耦合三轴流变力学试验曲线	30
3.2	洞库围岩流变变形特性分析	33
3.2.1	轴向应变-时间变化规律	33
3.2.2	环向应变-时间变化规律	34
3.2.3	体积应变-时间变化规律	35
3.2.4	岩石流变变形速率分析	36
3.2.5	岩石流变力学性质与瞬时力学性质对比分析	39
3.3	岩石试样流变破坏形式与断口微观分析	42
3.3.1	岩石试样流变宏观破坏形式	42
3.3.2	岩石试样破坏断口扫描电镜试验(SEM)及微观断裂机理	43
3.4	岩石试样流变过程中的渗透性演化规律	47
3.4.1	三轴流变过程中渗透性试验结果	48
3.4.2	三轴流变过程中渗透演化规律分析	48
3.4.3	加速流变阶段的渗透演化规律分析	50
3.5	本章小结	52
第4章	地下水封洞库围岩渗流应力耦合流变损伤模型	53
4.1	地下工程岩石渗流应力耦合分析理论	53
4.1.1	岩石渗流应力耦合分析基本方程	53
4.1.2	岩石的渗流耦合特性	55
4.1.3	岩石渗透特性与应力耦合关系	58
4.2	地下水封洞库围岩流变损伤特性分析	60
4.2.1	洞库围岩变形的时效性	60
4.2.2	洞库围岩强度的时效性	61
4.2.3	渗流场环境下洞库围岩流变损伤特性分析	62
4.3	考虑损伤演化的岩石流变损伤模型	64
4.3.1	岩石损伤变量	64
4.3.2	岩石损伤演化方程	66
4.3.3	岩石流变损伤模型	67
4.4	洞库围岩渗流应力耦合流变损伤模型	69
4.4.1	地下水封洞库围岩流变-渗流耦合关系	70
4.4.2	考虑损伤作用的岩石渗透性演化模型	71
4.4.3	岩石渗流应力耦合黏弹塑性流变损伤模型	72
4.5	渗流应力耦合流变损伤模型二次开发	73

4.5.1 本构模型有限差分格式	73
4.5.2 二次开发程序设计	76
4.6 本章小结	77
第5章 地下水封洞库三维弹塑性数值分析	78
5.1 工程地质条件	78
5.1.1 工程概述	78
5.1.2 工程地质条件	79
5.1.3 工程初始地应力场与渗流场	82
5.2 三维弹塑性数值计算方案	90
5.2.1 地下水封洞库数值计算模型	90
5.2.2 地下水封洞库围岩力学参数及边界条件	93
5.2.3 数值计算分析剖面	93
5.3 洞库围岩三维弹塑性数值分析	94
5.3.1 $X=0+200\text{m}$ 断面(A、B、C洞罐组)应力应变分析	94
5.3.2 $X=0+352.32\text{m}$ 断面(A、B洞罐组)应力应变分析	102
5.3.3 $X=0+532.78\text{m}$ 断面(C洞罐组)应力应变分析	107
5.3.4 2号主洞室轴线剖面($Y=60\text{m}$)应力应变分析	110
5.3.5 4号主洞室轴线剖面($Y=199\text{m}$)应力应变分析	113
5.3.6 6号主洞室轴线剖面($Y=328\text{m}$)应力应变分析	115
5.4 弹塑性计算条件下主洞室特征点位移分析	118
5.5 本章小结	119
第6章 地下水封洞库三维流变数值分析	121
6.1 三维流变数值计算方案	121
6.2 洞库围岩三维流变数值分析	121
6.2.1 $X=0+200\text{m}$ 断面(A、B、C洞罐组)流变计算结果	122
6.2.2 $X=0+352.32\text{m}$ 断面(A、B洞罐组)流变计算结果	130
6.2.3 $X=0+532.78\text{m}$ 断面(C洞罐组)流变计算结果	135
6.2.4 2号主洞室轴线剖面($Y=60\text{m}$)流变计算结果	138
6.2.5 4号主洞室轴线剖面($Y=199\text{m}$)流变计算结果	140
6.2.6 6号主洞室轴线剖面($Y=328\text{m}$)流变计算结果	143
6.3 流变计算条件下主洞室特征点位移分析	146
6.4 本章小结	147
第7章 地下水封洞库三维流变损伤数值分析	148
7.1 洞库围岩三维流变损伤数值分析	148
7.1.1 $X=0+200\text{m}$ 断面(A、B、C洞罐组)流变损伤计算结果	148

7.1.2	$X=0+352.32\text{m}$ 断面(A、B洞罐组)流变损伤计算结果	156
7.1.3	$X=0+532.78\text{m}$ 断面(C洞罐组)流变损伤计算结果	161
7.1.4	2号主洞室轴线剖面($Y=60\text{m}$)流变损伤计算结果	164
7.1.5	4号主洞室轴线剖面($Y=199\text{m}$)流变损伤计算结果	167
7.1.6	6号主洞室轴线剖面($Y=328\text{m}$)流变损伤计算结果	169
7.2	流变损伤计算条件下主洞室特征点位移分析	172
7.3	本章小结	173
第8章	地下水封洞库渗流应力耦合长期安全性分析	175
8.1	渗流应力耦合流变损伤数值计算与分析	175
8.1.1	$X=0+200\text{m}$ 断面(A、B、C洞罐组)渗流应力耦合流变损伤计算结果	175
8.1.2	$X=0+352.32\text{m}$ 断面(A、B洞罐组)渗流应力耦合流变损伤计算结果	183
8.1.3	$X=0+532.78\text{m}$ 断面(C洞罐组)渗流应力耦合流变损伤计算结果	188
8.1.4	2号主洞室轴线剖面($Y=60\text{m}$)渗流应力耦合流变损伤计算结果	191
8.1.5	4号主洞室轴线剖面($Y=199\text{m}$)渗流应力耦合流变损伤计算结果	193
8.1.6	6号主洞室轴线剖面($Y=328\text{m}$)渗流应力耦合流变损伤计算结果	196
8.2	考虑渗流应力耦合作用的主洞室特征点位移分析	199
8.3	不同计算方案下地下水封洞库围岩变形对比分析	200
8.3.1	典型剖面最大合位移对比分析	200
8.3.2	地下水封洞库围岩特征点最大合位移对比分析	202
8.3.3	不同计算方案下地下水封洞库围岩变形特征分析	203
8.4	本章小结	207
参考文献		208

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

国家石油战略储备大型地下水封洞库工程环境复杂,位于地下水位线以下,油、水、气多相介质相互作用,应力场和渗流场相互耦合,人工水幕系统与岩体裂隙天然流场相互作用,以上因素相互影响、相互耦合,其物理力学作用机制十分复杂。尤其是地下水封洞库投入使用后,基本不会再进行维修,一般至少要保证正常运行 50 年。要确保地下水封洞库在长期工作状态下的安全性,就必须开展渗流应力耦合作用下的大型地下水封洞库围岩流变力学与长期安全性分析研究,而且需要岩石力学与工程学科和工程地质、水工结构等学科开展协同攻关,进行大型地下水封洞库长期安全性评估方面的创新性研究。

目前,国际上石油储备库划分为地上油库和地下油库两大类(王梦恕和杨会军,2008)。地上油库一般均为钢罐储存;地下油库有多种不同的形式,主要包括人工专制岩盐洞穴、废弃矿井巷道加水幕系统、人工不衬砌硬岩洞库加水幕系统(简称地下水封洞库)、地质条件较好的含水层储油、枯竭的油气层储油 5 种形式。其中,地下水封岩洞油库是储存原油和成品油的最好形式。

我国于 20 世纪 70 年代开始,进行试验储油洞库的研究与建造。1977 年,由我国设计并修建了第一座原油地下水封储油洞库,由两个容量分别为 5 万 m^3 和 10 万 m^3 的洞室组成,主要用于原油的储存。20 世纪 80 年代,我国修建了一座容量仅为 4000 m^3 的地下成品油储库。随着我国大力发展国民经济,中央政府对石油的战略储备也得以重视,从国外大量进口石油与液化天然气等石油产品,地下水封储备库的建造得到大力发展(杜国敏等,2006;高飞,2010;李宝宁,2012;于崇,2010)。目前,我国已建造了两座投入使用的地下液化石油气洞库,分别位于汕头和宁波,总容量达到 70 万 m^3 。

为了加强国家能源安全,应对突发事件,我国从 2003 年开始筹建国家石油储备基地,致力于建立国家石油储备体系,因此,进行了一系列大型地下水封洞库工程建设。目前,我国石油战略储备规划建设的石油储备库多为大型地下水封洞库,如第二期 4 个储库中黄岛洞库库容为 300 万 m^3 、惠州洞库库容为 500 万 m^3 、湛江洞库库容为 500 万 m^3 ,第三、四期石油储备建设的大部分项目也采用大型地下水封洞库。

地下水封洞库一般选择建造在区域稳定、地下水位线以下的岩体中。在主洞室开挖之前,地下水位线需在洞顶以上高程,这样才可满足洞室周围岩层空隙处于饱和状态,地下水封石油密封原理如图 1.1 所示。

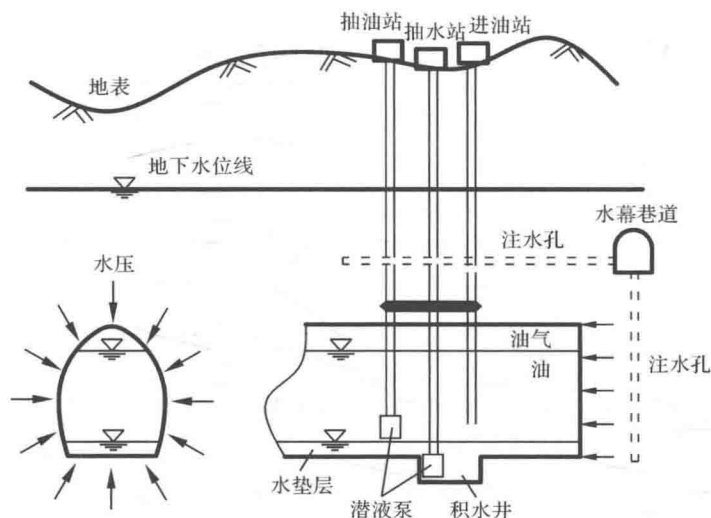


图 1.1 地下水封岩洞油库的密封原理(王梦恕和杨会军,2008)

地下水封洞室开挖完成后,地下水由周围岩体向地下洞室内流动,当在洞室中注入石油产品时,油与水相互接触的界面上存在一定压力差,接触面上的水压力均大于油压力,这样使得石油产品不会通过洞室围岩中的节理裂隙等渗漏。由于水与油的比重不同,利用油比水轻、油与水不相溶的性质,通过节理裂隙等涌入洞室的水沿洞壁汇集到洞室底部形成水床,当水床水位达到一定高度时,利用水泵将水抽出,这就是地下水封储备库的原理(杨明举和关宝树,2001)。

地下水封洞库工程规模巨大,地理环境独特,岩体赋存环境极其复杂。在地下水封洞库工程建设及其长期安全运营过程中,不可避免地遇到岩石及软弱结构面的流变力学问题,尤其是渗流场与应力场耦合作用下的洞库围岩长期稳定性与安全性,是整个石油战略储备工程成败的关键,对地下水封洞库工程的长期安全运营有着至关重要的影响,也是地下水封洞库工程建设中最关键的技术问题之一。因此,基于地下水封洞库围岩长期流变力学试验成果,开展洞库围岩流变力学性质研究,揭示岩石时效变形规律和流变破坏特征;并通过不同计算方案下的地下水封洞库三维数值计算结果,对地下水封洞库长期稳定性与安全性进行分析与评价,研究成果具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

1.2 地下工程岩石流变力学试验研究现状

岩石流变力学特性是地下工程中的普遍现象。对于隧道和大型地下洞室群工程,其洞室围岩的受力和变形只有从岩体流变学的观点和方法出发,才能对诸如毛洞施工失稳、围岩变形位移及其对支护结构变形压力的历时持续增长发展,以及衬砌支护与围岩的时效相互作用等工程实际问题做出有说服力的合理解释(孙钧,2007)。岩石流变力学试验是了解和掌握其流变力学特性的主要手段,国内外众多学者、专家均对此开展了深入研究。

Griggs(1939)通过室内岩石流变试验,进行了一些软弱岩石的流变力学试验,试验结果表明,当施加的载荷为12.5%~80.0%的岩石极限抗压强度时,软岩则会产生流变变形、破坏等现象。Maranini和Brignoli(1999)通过单轴压缩、三轴压缩的方法对石灰岩进行了流变力学的试验研究,分析了此类岩石的流变变形破坏机制,得出不同围压下石灰岩的破坏机理。Li和Xia(2000)通过单轴压缩流变试验,研究了红砂岩、泥岩、粉砂岩等软弱岩石的流变特性,根据研究结果可以看出,在施加恒定荷载的条件下,上述软弱岩石均出现了三个典型的流变阶段,即流变速率从减小到稳定,最后增大直至岩石发生破坏的三个阶段,不同岩石的岩性、应力水平直接影响着各流变阶段的出现及其延续时间。Okubo等(1991)自主研发了刚性岩石力学伺服试验系统,利用该具有伺服控制的试验系统成功测试了单轴压缩情况下砂岩、安山岩以及大理岩等试样的流变变形过程,通过该流变试验获得了各种岩石试样在加速流变阶段应变与时间的关系曲线,根据试验关系曲线推导了描述岩石三个流变阶段的本构方程。

孙钧等(1989,1990)从软岩和节理裂隙发育岩体的流变试验研究、流变模型辨识与参数估计、流变力学手段在收敛约束法及隧道结构设计优化中的应用、高应力隧洞围岩非线性流变及其对洞室衬护的力学效应,以及岩石流变损伤与断裂研究等方面,阐述了岩石流变力学及其工程研究的若干进展。徐卫亚等(2005a, 2005b, 2006)、杨圣奇等(2006, 2007)、蒋昱州等(2009, 2010, 2011)、王如宾等(2010)、张治亮等(2010, 2011)、李良权等(2010)、张玉等(2014)通过岩石全自动流变伺服系统对工程岩体绿片岩、大理岩、板岩、砂岩、蚀变岩、黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩、变质火山角砾岩、柱状节理玄武岩、坝基挤压带、破碎带岩体、结构面、断层等软弱岩体进行了一系列岩石三轴流变力学试验、剪切流变力学试验,研究了岩石的流变力学特性和长期强度参数。夏才初等(2009)对锦屏大理岩进行恒轴压分级卸围压应力路径下的三轴流变试验,得到轴压恒定、不同围压下的应力-应变-时间曲线。陈卫忠等(2009)详细介绍了泥岩现场大型真三轴流变试验过程、方法和试验成果,深入分析流变变形随时间的变化规律,提出泥岩非线性经

验幂函数型流变模型及其参数。以上研究结果揭示,不仅软弱岩石以及含有泥质充填物和夹层破碎带的松散岩体具有流变性质,而且在高应力水平状态下,中等强度岩石或者节理发育的硬岩也会发生一定程度的流变。

但是,地下工程围岩总是赋存于复杂的地质环境之中,影响岩石流变特性的主要因素不仅是应力大小,还包括地下水渗流环境、温度、湿度、岩石内部材料构成以及围压加载状态等。复杂环境状态下的岩石流变变形规律主要是通过室内试验进行研究。目前,已有不少流变试验成果考虑到岩石的含水状态影响,朱合华和叶斌(2002)开展了干燥和饱水两种状态下的岩石流变试验,探讨了岩石流变受含水状态影响的规律性。岩体三向应力状态下的三轴流变试验是真实反映工程岩体流变力学特性的重要手段。杨圣奇等(2006)利用岩石全自动流变伺服仪对饱和状态下坚硬大理岩和绿片岩进行了三轴压缩流变试验,基于硬岩三轴流变试验结果,研究了硬岩在不同围压作用下的轴向应变以及侧向应变随时间的变化规律。孙钧和胡玉银(1997)通过试验分析了三峡工程永久船闸高边坡岩体饱和和花岗岩在劈裂拉伸条件下的流变关系,论证了水对增强岩石抗拉强度时效性的不利影响;陈占清等(2006)利用破碎岩石渗透特性试验系统研究了饱和含水状态下石灰岩散体的流变试验,分析了流变过程中的孔隙度变化率与当前孔隙度、应力水平之间的关系。由于目前流变试验设备还很不完善,对于复杂多场耦合状态下,尤其是渗流应力耦合作用下岩石流变力学试验研究成果非常少。

研究结果指出,渗流与应力的耦合作用对岩石的流变变形规律有着显著影响,是地下工程长期稳定性分析中必须考虑的重要因素。地下水渗流对岩石流变的影响主要包括物理化学作用和力学作用,前者使岩石性状逐渐恶化,后者主要表现为静水压力的有效应力作用和动水压力的冲刷作用;而洞室围岩的流变变形、失稳乃至破坏,与岩石内部材料构成、含水状态、应力状态、围压加载状态以及地下水渗流环境有关;在流变试验过程中,岩石试样的破坏机制不仅与应力加载路径、围压大小、节理面分布有关,还可能受到渗流应力耦合作用的控制。然而,迄今还没有完整反映这些因素对岩石流变变形及长期强度的影响规律,并对其破坏机制和屈服准则认识还不够深刻,对岩石流变变形过程中的渗透演化规律缺乏研究,有待通过试验进行系统研究。

1.3 岩石流变本构模型研究现状

关于岩石流变本构模型的研究,从第一届国际岩石力学会会议迄今,得到了充足的发展,积累了许多研究成果。根据巫德斌等(2004)、韦立德等(2002,2005)、张贵科和徐卫亚(2006)、蒋昱州等(2009)、李良权等(2009)、张治亮等(2011)、夏