



周 辉 汤艳春 房敬年 著
胡大伟 邵建富 卢景景

可溶岩应力-溶解耦合 效应与理论分析



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

可溶岩应力-溶解耦合 效应与理论分析

周 辉 汤艳春 房敬年 著
胡大伟 邵建富 卢景景

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对能源地下储存和地下工程可溶岩围岩稳定研究的需求开展研究,首先基于细观-宏观耦合的可溶岩弹塑性损伤耦合机理,建立可溶岩弹塑性损伤耦合模型;通过一系列试验对可溶岩应力-溶解耦合特性进行分析;基于溶蚀作用下可溶岩力学性质发生改变机理,建立溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型;提出等效扩散系数这一概念,用于描述应力作用下单位溶蚀面积上的宏观溶蚀速率,建立应力作用下可溶岩溶蚀模型;最后,对可溶岩应力-溶解耦合机理进行研究,建立可溶岩应力-溶解耦合模型以及溶蚀作用下可溶岩围岩稳定性分析方法,并进行模拟计算分析。

本书主要读者对象是岩土工程相关专业的高年级本科生和研究生,以及从事可溶岩力学性质、能源地下储存、地下工程可溶岩围岩稳定等研究的科研院校的科技工作者和工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

可溶岩应力-溶解耦合效应与理论分析/周辉等著. —北京:科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047600-5

I. ①可… II. ①周… III. ①地下工程-岩溶-围岩稳定性-研究 IV. ①TU94②TU457

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 048739 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:肖 兴 / 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 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:11 插页:1

字数:220 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

可溶性岩石(简称为可溶岩),主要包括易溶盐类岩石(如岩盐等)、硫酸盐类岩石(如石膏岩等)以及碳酸盐类岩石等,本书针对岩盐、石膏岩开展研究。由于岩盐具有易溶于水的特性,可在岩盐地层中采用水溶建腔工艺建造盐腔,用于国家战略能源特别是石油和天然气地下储存。我国盐岩地下储库群已开始大规模兴建,如江苏金坛盐岩油气储库群,截至 2011 年年底,已建成并运行的地下储气库约 50 个,总储气量达 6.7 亿 m^3 ;湖北云应盐穴型地下储气库,于 2012 年 7 月开工建设,其设计工作气量为 6 亿 m^3 。在水溶建腔过程中,保证盐腔围岩稳定性,是在盐层中成功实施能源储存的先决条件。在含石膏岩等可溶岩的地层岩体中,石膏岩溶蚀特性及其对地下工程可溶岩围岩稳定(如水利水电工程坝基岩体稳定、隧洞围岩稳定以及硫酸盐岩矿井围岩稳定等方面)的影响必须予以重视。

与普通岩石相比,可溶岩受水溶蚀后,岩石质量减少,其力学特性受溶蚀作用的影响不可忽略;与普通岩层中的地下工程相比,地下工程的可溶岩围岩稳定性具有明显的特殊性和复杂性:地下水渗入到围岩壁可溶岩的裂隙中,促使可溶岩裂隙快速溶解,裂隙开度和长度进一步增大,诱发宏观围岩应力调整,产生新的破坏和宏观变形,从而进一步影响围岩的稳定性,而普通岩层中的地下洞室围岩稳定一般不具有这一过程。

因而,着眼于能源地下储存和地下工程可溶岩围岩稳定研究的需求,开展可溶岩应力-溶解耦合机理与可溶岩围岩稳定性研究,对成功构筑以可溶岩为介质的地下工程具有十分重要的意义。

本书以可溶岩应力-溶解耦合效应与理论为研究课题,通过试验研究、理论分析与数值模拟等方法,对可溶岩弹塑性损伤耦合模型、可溶岩应力-溶解耦合机理与模型、溶蚀作用下可溶岩围岩稳定性分析等进行了较系统的研究。

全书共 6 章,各章主要内容为:

第 1 章,绪论。论述开展可溶岩应力-溶解耦合效应与理论研究的意义,对国内外的研究现状进行综述,并详细列出本书的主要内容。

第 2 章,可溶岩力学模型研究。研究了细观-宏观耦合的可溶岩弹塑性损伤耦合机理,建立了可溶岩弹塑性损伤耦合模型;从宏观力学方面,确定了无溶蚀作用下可溶岩(岩盐、石膏岩)塑性力学模型及参数。

第 3 章,可溶岩应力-溶解耦合试验分析。分析结果表明,应力作用下可溶岩

(岩盐)溶蚀速率变化与不同围压下表面裂纹的发育与扩展有着直接的联系;溶蚀作用下可溶岩力学性质发生变化的机制在于溶蚀作用下可溶岩裂纹的临界应力强度因子降低。

第4章,溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型研究。基于溶蚀作用下可溶岩力学性质发生改变机理以及无溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型,建立溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型,并分别对溶蚀作用下岩盐、石膏岩的力学参数进行了求取。

第5章,应力作用下可溶岩溶蚀模型研究。根据应力作用下可溶岩溶蚀作用改变的机理,提出了等效扩散系数这一概念,建立了应力作用下可溶岩溶蚀模型,并基于试验结果,对等效扩散系数进行了求取。

第6章,可溶岩应力-溶解耦合模型与围岩稳定性分析。对可溶岩应力-溶解耦合机理进行研究,建立了可溶岩应力-溶解耦合模型以及溶蚀作用下可溶岩围岩稳定性分析方法,并分别对应力-溶解耦合作用下的盐腔围岩稳定性、溶蚀作用下含石膏岩层围岩稳定性随溶蚀时间的动态变化规律进行了分析。

本书是作者近10年来开展可溶岩应力-溶解耦合机制分析、耦合模型建立、试验分析以及模拟计算等工作的系统总结。本书主要研究成果是在国家自然科学基金(51279089、51427803、10772190、50809035、50579091)等项目的资助下完成的,在研究过程中还得到了国家重点基础研究发展计划(973)项目:深部复合地层围岩与TBM的相互作用机理及安全控制——第2课题:TBM掘进扰动下深部复合地层围岩力学行为响应规律(2014CB046902)、中国科学院科技创新“交叉与合作团队”(人教字(2012)119号)、中国科学院科研装备研制项目(YZ201553)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(青年人才类)(KZCX2-EW-QN115)等项目的资助。在本书的编写过程中得到有关专家的指导和帮助,引用了多位学者的文献资料,在此一并表示感谢。

还要特别感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书出版的资助!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者和专家批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究进展	4
1.3 研究内容	9
第 2 章 可溶岩力学模型研究	10
2.1 可溶岩力学特性试验研究	10
2.1.1 岩盐单/三轴压缩试验	10
2.1.2 石膏岩单/三轴压缩试验	13
2.1.3 单轴压缩条件下岩盐细观力学试验	15
2.2 细观-宏观耦合的可溶岩弹塑性损伤耦合机理研究	17
2.3 可溶岩弹塑性损伤耦合模型研究	19
2.3.1 塑性力学理论基础	19
2.3.2 损伤力学理论基础	25
2.3.3 可溶岩弹塑性损伤耦合模型建立的思路	28
2.3.4 可溶岩弹塑性损伤耦合模型的具体描述	32
2.3.5 模型计算方法与计算参数确定	35
2.3.6 模型合理性验证	37
2.4 可溶岩塑性力学模型研究	39
2.4.1 应变硬化-软化模型	39
2.4.2 无溶蚀作用下岩盐塑性力学模型参数确定	45
2.4.3 无溶蚀作用下石膏岩塑性力学模型参数确定	47
2.5 本章小结	49
第 3 章 可溶岩应力-溶解耦合试验分析	50
3.1 单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验	50
3.1.1 试验简介	50
3.1.2 应力-应变曲线的“微振”现象	52
3.1.3 溶蚀作用对岩盐变形模量的影响	53
3.1.4 应力作用下岩盐溶蚀特性变化规律	55
3.1.5 溶蚀作用下岩盐力学特性变化规律	62

3.1.6 试验影响因素	68
3.2 溶蚀作用下石膏岩力学特性试验	69
3.2.1 试验简介	69
3.2.2 试验结果分析	71
3.2.3 试验的影响因素	74
3.3 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验	75
3.3.1 试验方案	75
3.3.2 试验数据	76
3.3.3 三轴应力作用下可溶岩溶蚀特性分析	78
3.3.4 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性变化机理分析	83
3.3.5 试验影响因素	84
3.4 本章小结	85
第4章 溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型研究	86
4.1 溶蚀作用下可溶岩力学性质发生改变机理	86
4.1.1 可溶岩力学破坏机理	86
4.1.2 溶蚀作用下可溶岩力学性质发生改变机理分析	87
4.2 溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型的建立	88
4.3 溶蚀作用下岩盐力学参数的求取	89
4.3.1 溶蚀作用下岩盐黏聚力值的计算思路	89
4.3.2 溶蚀作用下岩盐应力状态确定	90
4.3.3 溶蚀作用下岩盐黏聚力值的变化规律	91
4.4 溶蚀作用下石膏岩力学参数的求取	93
4.4.1 遗传规划原理简介	93
4.4.2 溶蚀作用下石膏岩力学参数计算过程	96
4.4.3 溶蚀作用下石膏岩力学参数变化规律	96
4.5 本章小结	99
第5章 应力作用下可溶岩溶蚀模型研究	100
5.1 可溶岩溶蚀机理	100
5.1.1 溶液中的扩散现象	100
5.1.2 溶液中的对流现象	101
5.1.3 溶蚀边界层	102
5.1.4 可溶岩溶蚀物理模型	103
5.2 无应力作用下可溶岩溶蚀模型	104
5.2.1 模型的基本假设	104
5.2.2 无应力作用下可溶岩溶蚀模型的建立	105

5.3 应力作用下可溶岩溶蚀作用的变化	108
5.3.1 岩盐表面裂纹溶解试验现象	109
5.3.2 岩盐单裂隙渗流-溶解耦合模型及试验研究	109
5.3.3 应力作用下可溶岩溶蚀作用改变的机理分析	114
5.4 应力作用下可溶岩溶蚀模型的建立	115
5.5 应力作用下可溶岩溶蚀模型的计算方法	117
5.5.1 计算思路	117
5.5.2 模型数值方法求解	118
5.5.3 等效扩散系数的确定	122
5.6 本章小结	130
第6章 可溶岩应力-溶解耦合模型与围岩稳定性分析	131
6.1 可溶岩应力-溶解耦合模型及其分析方法	131
6.1.1 可溶岩应力-溶解耦合机理与模型	131
6.1.2 溶蚀作用下可溶岩围岩稳定性分析方法的建立	131
6.2 应力-溶解耦合作用下的盐腔围岩稳定性分析	132
6.2.1 盐腔水溶建腔工艺简介	133
6.2.2 应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机制	134
6.2.3 应力-溶解耦合作用下的盐腔围岩稳定性分析方法的建立	134
6.2.4 具体计算步骤	136
6.2.5 应力-溶解耦合与纯溶解作用下盐腔水溶建腔计算结果比较	142
6.3 溶蚀作用下含石膏岩层围岩稳定性分析	146
6.3.1 具体计算过程	147
6.3.2 含石膏岩层围岩稳定性随溶蚀时间的动态变化过程分析	148
6.4 本章小结	159
参考文献	160
索引	166
彩图	

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

可溶性岩石(简称为可溶岩)主要包括易溶盐类岩石(如岩盐等)、硫酸盐类岩石(如石膏岩等)以及碳酸盐类岩石(如石灰岩等)等,本书针对可溶岩中岩盐、石膏岩开展研究。由于岩盐具有易溶于水的特性,在岩盐地层中可采用水溶建腔工艺建造盐腔,用于国家战略能源特别是石油和天然气地下储存;在含石膏岩等可溶岩的地层岩体中,石膏岩溶蚀特性及其对地下工程可溶岩围岩稳定的影响必须予以重视。

与普通岩石相比,可溶岩(岩盐、石膏岩)受水溶蚀后,岩石质量减少,其力学特性受溶蚀作用的影响不可忽略;与普通岩层中的地下工程相比,地下工程的可溶岩围岩稳定性具有明显的特殊性和复杂性:地下工程围岩壁可溶岩溶蚀(相当于“开挖”)导致围岩内应力集中和围岩变形,发生损伤破坏,产生不同尺度的裂隙,形成一定深度的“开挖”损伤区,从而影响围岩的稳定性,这一过程与普通岩层中的地下洞室开挖是相似的;地下水渗入到围岩壁可溶岩的裂隙中,会使可溶岩裂隙快速溶解,裂隙开度和长度进一步增大,诱发宏观围岩应力调整,产生新的破坏和宏观变形,从而进一步影响围岩的稳定性,而普通岩层中的地下洞室开挖一般是不具有这一过程的。

下面分别针对岩盐、石膏岩进行论述。

1. 岩盐

岩盐的化学成分为氯化钠,晶体都属等轴晶系六八面体晶类的卤化物。单晶体呈立方体,在立方体晶面上常有阶梯状凹陷,集合体常呈粒状或块状。纯净的岩盐无色透明,含杂质时呈浅灰、黄、红、黑等色,玻璃光泽。岩盐性脆,摩氏硬度为 2~2.5,相对密度为 2.1~2.2;易溶于水,味咸;熔点 804°C ,焰色反应黄色,在 1000°C 时其可塑性很强,当温度、压力升高超过其临界点时软化,产生塑性变形,形成软流。岩盐是典型的化学沉积成因的矿物。

岩盐在许多领域都具有广泛的用途,除了直接应用于石油化工工业、化学工业、通用动力工业、国防部门、农业以及环保等领域以外,近年来,随着世界范围内对能源的需求量急剧增加,能源危机日益突出,岩盐矿藏还被各国用于进行国家

战略能源特别是石油和天然气地下储存。

能源(石油和天然气)是 21 世纪人类发展备受关注的焦点之一,一旦发生能源危机,将会引起严重的社会动荡,严重破坏国家的政治稳定和经济发展。目前,我国已成为石油、天然气净进口国,石油对外依存度近 60%,天然气对外依存度超过 30%。保障能源安全的重要手段之一是建立国家战略石油储备。为应付石油供应中断的突发事件,石油进口大国都制定了应急石油储备目标,国际能源机构(IEA)认为,石油供应中断量达到需求量的 7%就是安全警戒线,一般为 90 天的进口量。据国家统计局发布消息称,国家石油储备一期工程已于 2014 年建成投用,国家石油储备一期工程包括舟山、镇海、大连和黄岛等四个国家石油储备基地,总储备库容为 1640 万 m^3 ,储备原油 1243 万 t,约为 16 天的石油进口量(以 2014 年 10 月我国原油日均进口量计)。按照国务院批准的《国家石油储备中长期规划(2008~2020 年)》,国家石油储备二期于 2009 年初启动。2020 年以前,将陆续建设国家石油储备二期、三期项目,形成相当于 100 天石油净进口量的储备总规模。

目前,能源储存主要有陆上储罐、海上储罐和地下储存三种方式,地下储存安全性高,不容易遭到破坏,被称为“高度战略安全的储备库”。因此,目前世界上相当大一部分能源储存采用地下存储方式。岩盐易溶解于水的特性使岩盐洞库的施工开挖更加容易和经济,世界上大部分能源储存库建在岩盐介质或报废的盐矿井中。1963 年,加拿大在 Saskatchewan 利用地下盐穴空腔建成了世界上第一个天然气岩盐储存库;70 年代起,美国、法国、德国等国家相继建立了大量的石油、天然气岩盐储存库,储存大部分的战略能源。截至 2009 年,全球已建成且正在运营的盐穴型储气库 74 座,其中美国 31 座,德国 23 座,加拿大 9 座,法国 3 座,英国 3 座,波兰、丹麦、亚美尼亚、中国、葡萄牙各 1 座。

我国的地下岩盐资源丰富,分布范围广,埋藏于地下数十米至 4000 米的深度,具有良好的建设地下能源储存库的地质条件。针对我国能源储备的巨大需求,能源盐岩地下储备已成为能源战略储备的重点部署方向,盐岩地下储库群已开始大规模兴建。如江苏金坛盐岩油气储库群,2007 年储气库部分投产运行,开创了我国盐穴地下储气库的先河,同时这也是世界上第一个对已有盐穴溶腔改建而成的地下储气库。截至 2011 年底,已建成并运行的地下储气库约 50 个,总储气量达 6.7 亿 m^3 。金坛储气库目前处于建设与运行并行阶段,整个建造工程将会持续到 2020 年左右。另外,湖北云应、河南平顶山等盐矿区也已规划了大型地下油气储库群,其中湖北云应盐穴型地下储气库已于 2012 年 7 月底开工建设,其设计工作气量为 6 亿 m^3 。

储库盐腔一般采用水溶建腔工艺,在水溶建腔过程中,保证储库盐腔的围岩稳定性,是在盐层中成功实施能源储存的先决条件。

2. 石膏岩

石膏岩的化学成分为二水硫酸钙,黑灰色,块状构造,结晶结构,由石膏晶体构成。石膏岩作为干旱气候和闭塞环境的标志,是在含盐度较高的溶液或卤水中,通过蒸发作用而产生的化学沉积物。极易发生交代作用、重结晶作用和溶解作用,在成岩阶段,石膏岩往往向硬石膏岩转变,在表生阶段,硬石膏岩水化变为石膏岩。石膏岩的分布是广泛的,在空间上,世界上许多地方都有石膏岩存在;在沉积时代上,从古生代的寒武纪到新生代的第三纪,几乎所有的时代都有石膏的沉积,特别是在第三系红层之中,石膏岩分布广泛。在我国,许多第三系红层中都夹有石膏岩层。

在含石膏岩等可溶岩的地层岩体中,石膏岩溶蚀特性及其对地下工程可溶岩围岩稳定(如水利水电工程坝基岩体稳定、隧洞围岩稳定以及硫酸盐岩矿矿井围岩稳定等方面)的影响必须予以重视。

1) 在水利水电工程坝基岩体稳定方面

含石膏岩等可溶岩的地层岩体是国内外建坝史上出现问题最多的一种坝基岩体,特别是国外已造成了溃坝事件,如美国圣·佛兰西斯坝(St. Francis)蓄水后,坝基砾岩中的石膏岩被溶解,黏土胶结物被软化,地基被淘刷,大坝在几分钟内被冲垮。我国已建成的部分水利水电工程,在其建设或运行过程中,也由于坝基中的石膏岩等可溶岩被溶解,出现了不同程度的问题^[1,2],如:

(1) 青海省西宁市北山寺引水式电站,前池建在橘红色含石膏岩的第三系红层上,电站运行后,很快发生石膏岩溶滤作用。前池因为直接建在石膏岩层上,在溶蚀作用下基础产生变形使得前池开裂。

(2) 新疆风城高库是引额济克工程西干渠尾部的调节水库,最高蓄水位473m,总库容1亿m³。库坝区普遍有次生易溶盐分布,且易溶盐在局部地段形成较大面积的富集。水库蓄水后,由于石膏岩等可溶岩的溶蚀,存在着水库渗漏、大坝基础不均匀沉陷以及放水隧道渗漏等问题。

(3) 新疆克孜尔(黑孜)水库是当前新疆最大的水库,水库建在第三系的红层上,由于岩层中富含石膏岩等可溶岩,在库水作用下,左岸坝肩岩体中的石膏岩发生溶蚀,增大了岩体的透水性,致使左岸坝肩出现明显的绕坝渗漏。

(4) 云南新桥水库由于白垩系红层中石膏岩被溶蚀成不同的空洞而使水库产生严重的渗漏。

(5) 黄河黄丰水电站坝址区岩性为上第三系宁夏组泥岩,夹有多层脉状或层状石膏。从目前的资料来看,坝下厚层石膏被溶蚀的可能性较小,但分布极为频繁的脉层状石膏,未来处于坝基地下水交替较快的地带是不可避免的,这些薄层石膏的溶蚀也会大坝的沉降带来大的影响。

2) 在隧洞围岩稳定方面

在含石膏岩等可溶岩的地层岩体中,随着隧道的开挖,石膏岩层逐渐暴露在外部环境下,临空面增加,围岩压力重分布,隧道周边地下水的补给、径流、排泄途径发生改变,导致石膏岩溶蚀程度发生改变,对隧洞围岩稳定产生不利影响,如:花栎包隧道设计线路 ZK157+675~ZK157+692 段,凉水井隧道设计线路 ZK159+160~ZK159+620 段,以及十字垭隧道 ZK1718+238~ZK1718+319 段等均发育有石膏质岩,其中十字垭隧道发育的石膏质岩纯度较高,危害较大^[3];石太铁路客运专线太行山隧道 Z4 标段中含膏角砾岩地段长为 3217m,如何实现含膏角砾岩地段隧道的安全合理施工,是关系到该项目施工安全、隧道结构安全的关键^[4,5]。

3) 在硫酸盐岩矿矿井围岩稳定方面

在硫酸盐岩矿开采中,由于人工巷道的开凿,加速了上覆地表水及第四系潜水向下渗透运动,加快水对石膏岩的溶蚀作用,对矿井围岩稳定产生不利影响^[6],如:广西北海的一个石膏岩矿区由于长期开采地下石膏而没有考虑开矿诱发渗透水流对石膏岩产生的溶蚀作用,而且矿井中没有任何支护,致使石膏岩力学强度不断降低,结果于 2001 年在降雨后矿井产生坍塌。

从上述案例中可以看出,揭示可溶岩应力-溶解耦合机理与保证可溶岩围岩稳定性,是成功构筑以可溶岩为介质的地下工程的先决条件。

1.2 研究进展

国内外科研人员着眼于能源地下储存和地下工程可溶岩围岩稳定研究的需求,在可溶岩力学性质、可溶岩应力-溶解耦合及其相关性质、地下工程可溶岩围岩稳定研究等方面开展了大量开拓性和卓有成效的工作,积累了丰富的研究成果和研究经验。目前,国内外的相关研究进展如下。

1. 可溶岩力学性质研究方面

1) 可溶岩短期强度特性研究

主要指不考虑时间效应、温度效应而对可溶岩所进行的单轴、常规三轴及真三轴拉伸、压缩或剪切试验及相应的理论分析,建立可溶岩的短期强度与变形理论。

刘新荣等^[7]和梁卫国等^[8]对岩盐的短期强度与变形特性进行了基本力学特性研究。郑雅丽等^[9]对含不同杂质盐岩(纯盐岩、钙芒硝质盐岩、硬石膏质盐岩及泥质混合盐岩)进行了力学试验,并对所获得的力学特性进行了对比分析。梁卫国等^[10]以层状盐岩体矿床中的 NaCl 岩盐与无水芒硝盐岩为研究对象,在实验室

进行 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 单轴压缩强度与变形特性的应变率效应研究, 研究表明, 在上述应变率范围内, NaCl 岩盐与无水芒硝盐岩的单轴抗压强度与弹性模量基本不随加载应变速率而变化; 试件破裂方式不随加载应变速率而变, NaCl 岩盐试件破裂为柱状劈裂或楔型剪切, 而无水芒硝盐岩则表现为单斜剪切; 盐岩在扩容之前均具有很强的变形能力。Hakala 等^[11]进行了层状盐岩破坏准则和等效弹性参数的相关试验研究。李银平等^[12]为了解湖北云应盐矿深部层状盐岩, 特别是盐岩和硬石膏夹层界面的抗剪性能, 开展岩体直剪试验。试验结果表明, 湖北省云应盐矿深部层状盐岩中盐岩和硬石膏夹层的交界层面具有较强的黏结力, 不是一个弱面。Zhigalkin^[13]对单轴压缩条件下的岩盐变形和破坏特征进行了分析。刘江等^[14]通过盐岩单轴压缩试验、三轴压缩试验及巴西劈裂试验, 对湖北应城盐矿和江苏金坛盐矿的盐岩试样的短期强度和变形特征进行了分析。郭印同等^[15]采用伺服刚性试验机对硬石膏进行了不同围压下的常规三轴试验, 研究了硬石膏的强度和变形特性。赵金洲等^[16]对石膏岩进行了三轴压缩试验, 测得了不同围压条件下石膏岩的抗压强度和杨氏模量等参数值。黄英华等^[17]采用 MTS-815 型液压伺服刚性试验机对硬石膏进行了常规三轴压缩试验, 研究表明随着围压的增加, 硬石膏的变形特征表现为由脆性向延性逐渐转变。

2) 可溶岩损伤特性研究

姜德义等^[18,19]设计了盐岩剪切损伤后的自恢复试验, 对损伤盐岩相关力学参数随恢复时间的变化规律进行研究, 试验结果表明, 自恢复对盐岩内摩擦角的恢复作用明显, 而对黏聚力的恢复不明显, 在恢复的初期, 损伤盐岩抗剪强度随之降低, 继续恢复则会出现相对增强, 最终会进入长期恢复阶段, 趋于稳定; 以不同速率下的三轴围压卸载试验为基础, 建立扩容与损伤关系模型, 研究表明, 在一定条件下, 盐岩的扩容可以直观反映其当时状态下的损伤状况, 在同一应力条件下, 不同的围压卸载速率对损伤的影响表现为速率的对数值与损伤值呈线性关系。郭建强等^[20]建立了基于能量原理盐岩的损伤本构模型, 该模型仅需确定常规岩石力学参数, 物理力学意义明确, 能充分模拟盐岩单轴情况下应变软化和三轴情况下应变硬化的全过程。刘建锋等^[21]利用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统, 对盐岩进行了单轴压缩下的 7 级加卸载试验和低周循环加卸载试验测试, 结果表明, 低周循环加卸载可较为真实测试具有显著时间效应变形特征的盐岩的损伤弹性模量, 应用耦合弹性塑性变形损伤变量公式对其损伤进行研究, 更能真实反映其损伤特征。吴文等^[22]基于 Desai 提出的扰动动态概念, 对围压 0~25MPa 盐岩在三轴压缩下的应力-应变关系进行初步模拟分析。Ahmad^[23]以细观-宏观耦合方法对岩盐的力学模型进行了研究。房敬年等^[24]提出了一种能够描述岩盐特性的弹塑性损伤耦合的模型, 该模型描述了岩盐损伤的演化和塑性变形的耦合关系, 并引入了一种非关联的塑性流动法则来描述岩盐从塑性体积压缩

到膨胀的转化。曹林卫等^[25,26]运用混合物理理论推导得到适合于描述层状盐岩体在三轴压缩过程中损伤演化特性的层状盐岩细观损伤本构模型。Pudewills^[27,28]通过岩盐黏塑性本构模型对开挖扰动区内的岩盐损伤特性进行了研究。Pierre等^[29]、Li等^[30]、杨春和等^[31]和 Limarga 等^[32]利用连续介质损伤力学的方法分析了岩盐蠕变过程中的损伤演化过程。

2. 可溶岩应力-溶解耦合及其相关性质研究方面

1) 可溶岩溶解特性研究

马洪岭等^[33]利用自制仪器对某超深地层盐岩、含泥盐岩进行了常温和高温溶解试验,试验结果表明高温 86℃ 和 50℃ 时的纯盐岩溶解速率分别是常温下的 2.32 倍和 1.49 倍。徐素国等^[34]和梁卫国等^[35,36]进行了钙芒硝岩盐溶解特性的试验研究,得出了钙芒硝岩盐在氢氧化钠溶液中溶解速度较快的结论;进行了盐矿水溶开采室内试验,并研究了岩盐水压致裂连通溶解模型。张哲玮^[37]研究了岩盐矿石水溶性能试验中的若干问题,以期通过试验能够准确反映岩盐矿体的水溶行为特征。姜德义等^[38]对应力损伤盐岩进行了声波、溶解试验研究,研究表明,盐岩应力损伤由盐岩晶粒相互错动促使微裂纹增多所致,盐岩的溶解速率随损伤变量的增加而增加。班凡生^[39]研究了岩盐在三向应力状态下的水力压裂机理,建立了相应的理论破裂准则。刘成伦等^[40,41]采用电导法对长山岩盐溶解的动力学特征进行了研究,得出了岩盐溶解的动力学方程。周辉等^[42]利用自行设计研制的盐岩裂隙渗流-溶解耦合试验装置对特定条件下的盐岩裂隙渗流-溶解耦合过程进行试验研究,并建立了盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型。

卢耀如等^[6,43]、张凤娥等^[44]、Alexander^[45]、Roland^[46]和 Farpoor 等^[47]通过试验的方法对石膏的溶蚀特性进行了研究,研究表明,硫酸盐岩和碳酸盐岩的岩溶作用在水溶蚀作用机理上,最主要的区别在于水对碳酸盐岩的岩溶作用,需要借助于溶剂 CO_2 的作用,而水可直接对硫酸盐岩产生溶蚀作用,石膏在 NaCl 溶液中的溶蚀率比在蒸馏水条件下要高 2~3 倍。魏玉峰等^[48]对第三系红层中石膏的溶蚀特性进行了试验研究,试验结果表明,石膏发生溶蚀的主要是含 Ca^{2+} 的物质,并且溶蚀速率和与水接触的方式以及水头压力大小有直接关系。王世霞等^[49]和郑海飞等^[50]在 26℃ 和 0.1~900MPa 压力下进行了纯水中石膏的溶解试验,试验结果发现在低于 608MPa 的压力下石膏一直保持稳定,而在高于该压力下石膏才开始发生溶解。胡彬锋等^[51]对青居水电站地层中石膏质溶蚀的化学效应进行了分析。于伟东等^[52]使用扫描电子显微镜(SEM)对常温下不同浓度盐溶液溶浸作用下的石膏试件进行了细观结构衍化及其特征分析,研究发现,在不同浓度盐溶液中石膏晶体细观结构的变化,严重影响石膏夹层的物理力学特性。范颖芳等^[53]对硫酸盐腐蚀后混凝土力学性能进行了研究,研究表明,石膏溶蚀后的环境

水中富含硫酸盐,对混凝土具有强烈的腐蚀性,硫酸盐对混凝土腐蚀的机理是硫酸盐进入混凝土的内部,与水泥的某些成分发生反应,生成物吸水发生膨胀,当膨胀力达到一定程度时就造成了混凝土结构的变化,引起破坏。

2) 可溶岩应力-溶解耦合研究

汤艳春等^[54~63]和房敬年^[64]进行了大量的可溶岩应力-溶解耦合试验和理论研究工作,主要体现在以下四个方面:一是进行了单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应细观力学试验、三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验等试验对岩盐应力-溶解耦合特性进行了研究;二是根据试验结果对有无应力作用下岩盐溶蚀机理的差异以及应力作用对岩盐溶蚀特性的影响进行了研究,研究表明,在应力作用下岩盐溶解速率与裂纹的发育和扩展有着直接的关系;并基于试验研究结果对应力作用下岩盐溶蚀模型进行了初步研究,提出了等效扩散系数的概念用于描述应力作用下岩盐的溶蚀特性;三是根据试验结果对有无溶蚀作用下岩盐破坏机理、溶蚀作用对岩盐力学特性的影响以及溶蚀作用下的岩盐力学模型进行了研究,研究表明,溶蚀作用对岩盐力学特性的影响不可忽略,溶蚀作用下岩盐力学性质发生变化的机理在于岩盐发生溶解从而使得岩盐裂纹的临界应力强度因子降低;四是根据应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔机理,建立了应力-溶解耦合作用下的盐腔水溶建腔计算方法。

梁卫国等^[65,66]和高红波等^[67,68]在实验室对自然状态(干试件)、饱和与半饱和盐溶液中浸泡 20 天的石膏(湿试件)进行单调单轴压缩与小幅反复加卸载作用方式下的单轴压缩试验,试验结果表明,20 天浸泡作用下有少量溶液由表及里的浸入,从而使石膏变形呈软化趋势,且随溶液浓度不同而不同;进行石膏岩在 40℃ 和 70℃ 半饱和、饱和盐溶液浸泡作用之后的单轴抗压强度、抗拉强度、抗剪强度试验,试验结果表明,随温度升高、盐溶液浓度增大、浸泡时间的延长,石膏岩强度呈降低弱化趋势;在干燥、40℃ 半饱和到 70℃ 饱和溶液条件下,相应破坏方式也由脆性向脆延性、延性转变;进行钙芒硝盐岩溶解渗透力学特性研究,试验结果表明,由于溶解渗透使得矿物组成与结构发生变化,钙芒硝盐岩在溶解渗透前后三轴力学特性差异也很大,在 2MPa 围压的作用条件下,溶解渗透 49h 之后,钙芒硝盐岩的强度由未溶解渗透时的 46.53MPa,降低为溶解渗透后的 11.42MPa。黄英华^[69]采用 MTS-815 型液压伺服刚性试验机,对自然条件和饱水条件下的硬石膏进行了单轴压缩破坏试验,研究结果表明水对硬石膏强度的影响较大,饱水条件下硬石膏的单轴抗压强度远比自然条件下的低。祝艳波等^[70]以宜昌-巴东高速公路凉水井隧道出露的石膏质围岩为研究对象,开展了不同含水率、不同干湿循环下的石膏质岩单轴压缩试验,探讨了其强度软化特性。

3. 地下工程可溶岩围岩稳定研究方面

1) 盐腔围岩稳定研究及其相关性质

许多学者分别采用不同的方法对盐腔围岩稳定性及其相关的盐腔形状控制等方面进行了应用分析研究。吴文等^[71,72]研究了岩盐能源地下储存库的稳定性评价标准,并对各国的标准和设计规范进行了总结和归纳。任松等^[73]、刘新荣等^[74,75]、姜德义等^[76]、陶连金等^[77]、刘成伦等^[78]、梁卫国等^[79]、余海龙等^[80,81]、赵顺柳等^[82]、王贵君^[83,84]、陈卫忠等^[85]、尹雪英等^[86]、陈锋等^[87]和杨春和等^[88]在盐腔围岩稳定性方面做了大量的解析分析和数值模拟工作。在盐腔形状控制方面,潘培泽^[89]对大倾角岩层溶腔形态进行了分析。刘东等^[90]研究了岩盐开采生产中溶腔形状的智能控制方法。赵志成^[91]研究了岩盐储气库水溶建腔流体输运理论及溶腔形态变化的规律。班凡生等^[92~94]分析了夹层、岩盐品位及施工工艺对岩盐储气库水溶建腔的影响。

2) 含石膏岩层围岩稳定及其对工程影响

杨先毅^[95]对河南老河口的王甫洲水利枢纽工程、嘉陵江合川水利枢纽工程等工程有影响的岩层中含有易溶蚀的石膏的问题进行了分析,分析结果表明,由于石膏易于溶蚀,其溶蚀后导致岩体强度、变形参数大幅度降低,特别是对水工建筑物基础岩体的变形、不均匀沉降、抗滑稳定性都有很大影响,对于水库甚至形成渗漏的通道或因石膏溶蚀引起岩体架空进而造成大坝沉降拉裂,对大坝的修建以及建成后的安全运营都有着至关重要的影响。王子忠^[96]对四川盆地红层岩体主要水利水电工程地质问题进行了系统研究。魏玉峰^[1]、周洪福等^[97]对黄河上游某电站上新统石膏夹层对坝基岩体稳定性影响进行分析评价,并给出了坝基石膏岩溶蚀防治措施。林仕祥等^[98]进行了王甫洲水利枢纽坝基石膏溶蚀研究及处理对策研究。刘艳敏等^[3]以杭兰公路宜巴段白云岩层中不规则发育的硬石膏岩为研究对象,采用X射线衍射试验、离子色谱分析、环境扫描电镜及能谱分析等试验手段,定量研究硬石膏岩对隧道结构的危害。研究表明,硬石膏岩对隧道结构的危害主要表现在其水化膨胀作用、溶蚀产生的硫酸盐侵蚀及其溶出的酸性环境对白云岩溶蚀的加剧作用。孟丽苹^[4]和李卓^[5]针对影响石太客运专线的太行山隧道安全的含膏角砾岩的变形特性、强度特性等从理论、室内土工试验两个方面展开研究,重点研究了含膏角砾岩的单轴抗压强度和其流变特性。张晓宇^[99]对西宁地区第三系泥岩夹石膏岩的岩土工程特性及其对工程的影响进行了研究。刘宇等^[100]对成都天府新区含膏红层的主要工程地质问题进行了分析。陈旭等^[101]和洪文之等^[102]对石膏溶蚀特性对工程的影响进行了研究。

1.3 研究内容

本书以可溶岩应力-溶解耦合效应与理论作为研究课题,通过试验研究、理论分析以及数值模拟等方法,对可溶岩弹塑性损伤耦合模型、可溶岩应力-溶解耦合机理与模型、溶蚀作用下可溶岩围岩稳定性分析等进行了较系统的研究。本书主要内容如下:

(1) 基于可溶岩(岩盐、石膏岩)宏观力学特性和细观力学特性试验结果,对细观-宏观耦合的可溶岩弹塑性损伤耦合机理进行研究,继而建立适合于描述可溶岩(岩盐、石膏岩)变形破坏特征的可溶岩弹塑性损伤耦合模型,并通过数值模拟计算对该模型的合理性进行验证;为了便于后续的可溶岩应力-溶解耦合效应与可溶岩围岩稳定性研究,从宏观力学方面,采用应变硬化-软化模型对无溶蚀作用下可溶岩(岩盐、石膏岩)塑性力学行为进行描述,确定无溶蚀作用下可溶岩(岩盐、石膏岩)塑性力学模型参数。

(2) 基于单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验、溶蚀作用下石膏岩力学特性试验以及三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验,对可溶岩应力-溶解耦合特性进行分析,获得单轴压缩或三轴应力作用下可溶岩溶蚀速率的变化规律,以及溶蚀作用下可溶岩力学特性变化规律。

(3) 基于有无溶蚀作用下可溶岩力学特性的变化,对溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型进行研究。基于所揭示的可溶岩力学破坏机理,分别从细观和宏观的角度,对溶蚀作用下可溶岩力学性质发生改变机理进行分析;建立溶蚀作用下可溶岩塑性力学模型;并依据所获得的溶蚀作用下可溶岩(岩盐、石膏岩)力学特性的变化规律,分别对溶蚀作用下岩盐、石膏岩的力学参数进行求取。

(4) 研究应力作用下可溶岩溶蚀作用改变的机理,并提出等效扩散系数这一概念,用于描述应力作用下单位溶蚀面积上的宏观溶蚀速率,它是围压、塑性特征量和溶解时间的函数;用等效扩散系数代替扩散系数,建立应力作用下可溶岩溶蚀模型;基于试验结果,得到等效扩散系数与围压、塑性特征量和溶解时间之间的关系表达式。

(5) 在上述分析内容的基础上,对可溶岩应力-溶解耦合机理进行了研究,建立可溶岩应力-溶解耦合模型以及溶蚀作用下可溶岩围岩稳定性分析方法,并依据所建立的分析方法,选择盐腔围岩为研究对象,对应力-溶解耦合作用下的盐腔围岩稳定性进行分析;选择含石膏岩层围岩为研究对象,考虑石膏岩层的不同分布状况,对溶蚀作用下含石膏岩层围岩的稳定性进行分析。