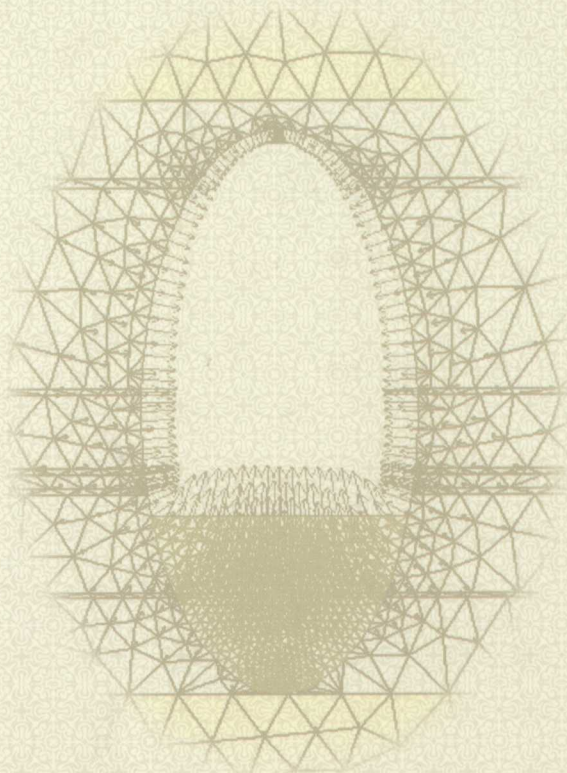


层状盐岩力学 理论与工程

杨春和 李银平 陈 锋 著



科学出版社
www.sciencep.com

层状盐岩力学理论与工程

杨春和 李银平 陈 锋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书与我国深部盐岩地下能源储备研究相结合,介绍了层状盐岩工程力学特性研究及应用研究的成果。主要包括层状盐岩工程力学特性试验研究、层状盐岩工程力学特性理论研究(包括本构、损伤、蠕变及温度效应)、深部废弃盐岩溶腔可用性评估,以及层状盐岩地下溶腔稳定性分析等。

本书可供从事盐岩地下能源储存研究、设计和施工的科研人员和工程技术人员参考,也可作为盐岩水溶采矿的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

层状盐岩力学理论与工程/杨春和,李银平,陈锋著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-023209-0

I. 层… II. ①杨…②李…③陈… III. 层状构造-岩石力学-研究-中国 IV. P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 161627 号

责任编辑:吴凡洁/责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博/封面设计:王 浩

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

*

2009 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 7 月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 1—2 500 字数: 268 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

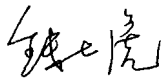
序

盐岩力学理论与工程研究是能源在地下盐岩中储备的基础性核心研究课题。近 20 多年来,美国、加拿大及部分欧洲国家的能源部门集中了大量的人、财、物对盐岩的力学特性进行了专项研究。国际盐岩力学专业委员会分别在 1981 年(USA)、1986 年(Germany)、1993 年(France)、1996 年(Canada)、1999 年(Romania)和 2007 年(Germany)连续召开了六届国际盐岩力学大会(The Mechanical Behavior of Salt),研究与盐岩中地下储存能源与地下处置核废物等相关的盐岩力学问题。

国外一般在地层结构较为简单的巨厚盐丘中开展储库建设,而我国的盐岩层具有埋藏浅、盐层薄、夹层多、品位低等特点,在盐岩层中实施能源储备与国外成熟的盐岩储存技术相比,更具复杂性,许多关键的理论和技术问题尚未很好解决。

着眼于我国深部盐岩中地下储备能源,杨春和研究员以其在美国从事多年的盐岩力学特性研究为基础,领导其研究团队针对我国盐岩层薄、富含不可溶或难溶夹层的沉积特点,较为系统地开展了层状盐岩体的工程力学特性研究,并成功运用于我国地下能源储库的选址、可行性论证及设计、施工和运营,为顺利实施我国能源地下储备计划作出了重要贡献。特别值得一提的是,他们的研究成果已为亚洲首座盐穴储气库——江苏金坛储气库的顺利建设和运营提供了重要技术支持,保证了该工程的顺利实施。

该书是我国在层状盐岩力学特性研究方面出版的第一本专著,主要介绍了我国近十余年在层状盐岩力学特性和时效特性的理论和试验研究方面的成果,可贵的是该书结合我国近期开展的能源地下储备工程实践,介绍了层状盐岩构造中能源储库稳定性分析、设计和运营关键参数的确定方法以及长期运营条件下洞室有效体积的预测分析等方面的最新成果。由于上述科学问题的复杂性和我国能源地下储备的阶段性,该书介绍的研究成果还远不够深入和全面,但是我仍然十分高兴能看到该书的出版,我相信,该书的出版将为盐岩力学研究提供第一手宝贵资料,供研究人员和工程技术人员借鉴和参考,并将推动我国层状盐岩力学特性研究及深部能源地下储备相关学科的发展。



2009 年 7 月 1 日于北京

前 言

盐岩由于其低渗透特性和良好的蠕变行为,成为能源储存的理想介质,利用深部盐岩洞穴进行能源地下储备成为国际上广泛认可的能源储备方式。西方发达国家如美国、德国、法国等都已建起了大量的盐岩地下油气库群,用于国家战略能源储备。据统计,美国 90%、德国 50%、法国 30% 的石油储存于盐岩库群中;美国 20%、德国 40%、法国 20% 的天然气储存于盐岩库群中。在我国,由于国家能源储备的巨大需求,能源盐岩地下储备也已成为能源战略储备的重点部署方向,盐岩地下储库群大规模兴建已经开始。如建设中的江苏金坛盐岩储气库,2010 年将达到 15 个单腔(单腔容积约为 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$) 的规模,最终将形成由 100~120 个单腔组成的密集地下气库群。同时,一个由 50~60 个单腔组成的大型地下石油储库群也将在金坛盐矿兴建,原油储备可达 $3.0 \times 10^6 \sim 6.0 \times 10^6 \text{ t}$ 。另外,湖北云应和河南平顶山等盐矿区也已规划了大型地下油气储库群。

尽管相对于其他储存围岩体,盐岩能源地下储备库具有较好的安全性,但近 30 年来,国外盐岩地下储库灾难性事故,如油气渗漏、溶腔失效和库区地表沉降等时有发生,且事故突发性强、破坏力大,对安全及环境产生巨大灾难性影响。而我国在盐岩地下储库建设方面刚刚开始,缺乏经验,特别是与国外巨厚盐丘储库相比,我国岩盐地层埋深较浅、成层分布、夹层较多,地质条件相对复杂,薄夹层的存在增大了形成油气渗漏通道的风险,埋深较浅加剧了地表沉降。况且,这些能源地下储库又均紧邻人口稠密、经济较为发达地区,此类事故一旦发生,不但影响能源储备安全,而且危害人民的生命和财产安全。对这种盐岩层中的地下储库群的建设与运营将遇到更为复杂的科学问题和技术难题,亟须就相关的基础科学理论进行研究。这其中盐岩及其夹层的工程力学特性研究是最为关键的,是解决其他问题的前提和基础。

值得注意的是,国外一般是在巨厚的、NaCl 含量很高的深部盐丘(盐岩单层厚度大于 200m)中建造溶腔型储库。我国盐岩矿虽然分布广泛,但从千年制盐古都四川自贡到全国最大的井矿盐生产基地湖北云应地区,从西北的陕甘盆地到东部的沿海地区,至今尚未发现巨盐丘构造的盐岩矿床。我国盐岩的基本特点是“盐岩层数多,单层厚度薄,不可溶夹层含量多”。众多夹层的存在将对溶腔储库的围岩稳定性及渗透特性产生显著的影响,因此,在这类盐岩层中实施能源储备与国外成熟的盐岩储存技术相比,更具有复杂性。国外的研究主要集中在纯盐岩介质的蠕变特性、破损规律及渗透特性的研究,几乎没有考虑多夹层(泥岩、硬

石膏或钙芒硝等)对盐岩体力学特性的影响,无论在理论上还是应用方法上均很难运用于我国能源储存的地下工程实践。同时,与国外大规模开展的能源地下储存库的关键力学问题研究相比,我国在这方面的研究尚属起步阶段,许多关键的基础性问题尚未得到很好解决,这将严重影响我国战略石油地下储备工作的进行。因而,着眼于深部能源盐岩地下储备,针对我国盐矿盐岩层薄、富含不可溶或难溶夹层的沉积特点,开展层状盐岩工程力学理论与工程研究,对顺利完成我国国家能源地下储备计划具有十分重要的意义。

本书以层状盐岩工程力学特性及工程应用作为研究课题,通过试验研究、理论分析、数值模拟及现场试验方法,对高温、高压及高渗透压下层状盐岩力学特性及渗透特性进行了较系统的研究。具体内容如下:第1章,盐岩层岩土力学物理基础;第2章,层状盐岩力学特性试验研究;第3章,盐岩蠕变机理及层状盐岩破损分析;第4章,层状盐岩本构模型及蠕变损伤特性研究;第5章,深部地下油(气)储存盐岩溶腔稳定性研究;第6章,层状盐岩体中地下能源储库稳定性影响因素分析。

本书是在国家重点基础研究发展计划项目“能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究”(2009CB724602, 2009CB724603)、国家杰出青年科学基金项目“深部盐岩力学特性与应用”(E50725414)、国家自然科学基金重点项目“深部盐岩石油储存中的基础性研究”(E50434050)和面上项目(E50774076)、科技部重大国际合作计划项目“中国层状盐岩 CO₂ 地质处置研究”(2007DFB60100)、国家自然科学基金委员会创新研究群体项目(50621403)、中国科学院知识创新工程重要方向项目、湖北省科技厅科技攻关计划项目以及中国石油天然气集团公司等的联合资助下完成的,在此对上述资助单位表示诚挚的谢意!

本书还要特别感谢中国科学院科学出版基金对本书出版的资助!

本书凝聚了中国科学院武汉岩土力学研究所岩石流变力学研究组同事白世伟研究员、吴文副研究员、张超博士、冒海军博士、王贵宾博士等,以及博士后梁卫国、任松、韦立德、康勇和研究生尹雪英、陈剑文、刘江、赵克烈、郭印同、李二兵、高小平、高敬、马洪岭、杨花、施锡林等的辛勤劳动。

钱七虎院士和谢和平院士自始至终对开展这方面的研究给予了指导、鼓励和支持,在研究中得到了中国石油西气东输储气库项目部魏东吼处长、杨海军处长、李祥副处长、屈丹安高级工程师及中国石油勘探开发研究院廊坊分院李文阳院长、谢荣院高级工程师、张昱文高级工程师、丁国生博士等的指导和帮助,作者对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 盐岩层岩土力学物理基础	1
1.1 盐岩的组成及成因	1
1.1.1 盐岩主要矿物特性	1
1.1.2 盐岩主要成分	2
1.1.3 盐岩成因	2
1.2 盐丘与层状盐岩	4
1.2.1 盐丘	4
1.2.2 层状盐岩	4
1.3 我国井矿盐分布	5
第 2 章 层状盐岩力学特性试验研究	7
2.1 盐岩体力学特性研究进展	7
2.1.1 深部盐岩力学研究方面	7
2.1.2 层状岩体力学研究方面	8
2.2 层状盐岩变形破坏及其时间和温度效应	9
2.2.1 单轴压缩试验	9
2.2.2 三轴压缩试验	12
2.2.3 单轴压缩蠕变试验	14
2.2.4 三轴压缩蠕变试验	16
2.2.5 温度影响试验	19
2.2.6 应力松弛试验	26
2.3 层状盐岩交界层面力学特性及微观机理	31
2.3.1 间接拉伸试验	31
2.3.2 直接剪切试验	33
2.3.3 交界层面微观分析	40
第 3 章 盐岩蠕变机理及层状盐岩破损分析	44
3.1 盐岩的蠕变机理分析	44
3.1.1 概述	44
3.1.2 盐岩的率方程的简化	47

3.1.3 盐岩蠕变机理图的建立及应用	48
3.2 层状盐岩破损机理分析	50
3.2.1 岩石的基本破坏类型	50
3.2.2 层状盐岩体的单轴破坏机理	52
3.2.3 层状盐岩的三轴破坏机理	56
第4章 层状盐岩本构模型及蠕变损伤特性研究	64
4.1 层状盐岩复合体扩展 Cosserat 本构模型	64
4.1.1 Cosserat 介质本构理论简介	64
4.1.2 Cosserat 介质模型代表单元	64
4.1.3 Cosserat 介质扩展模型本构关系	65
4.2 新本构模型的程序实现	67
4.2.1 FLAC3D 计算方法简介	67
4.2.2 Cosserat 介质弹塑性本构模块开发	69
4.3 盐岩蠕变损伤本构关系研究	71
4.3.1 盐岩蠕变本构关系概述	72
4.3.2 盐岩蠕变损伤本构关系的建立	78
4.3.3 盐岩蠕变损伤本构编程及应用验证	82
第5章 深部地下油(气)储存盐岩溶腔稳定性研究	91
5.1 江苏金坛盐矿溶腔储气库稳定性研究	91
5.1.1 金坛盐矿基本地质特征	91
5.1.2 盐岩溶腔储库洞形优化研究	96
5.1.3 拟建储气库数值模拟研究	107
5.2 江苏金坛盐矿优选老腔稳定性分析	116
5.2.1 优选老腔计算模型	116
5.2.2 腔体体积蠕变规律研究	118
5.2.3 运营过程中损伤区扩展区研究	123
5.2.4 腔顶至套管鞋的安全距离的确定	128
5.2.5 不同采气速率下腔体变形规律研究	131
5.3 湖北云应盐矿拟建溶腔稳定性研究	138
5.3.1 建造盐岩溶腔型储库的基本地质条件	138
5.3.2 计算模型和计算参数	142
5.3.3 溶腔稳定性分析	146
5.3.4 储油库长期稳定性-流变分析	150
5.3.5 套管鞋-腔顶距分析	157
5.3.6 合理矿柱宽度分析	158

第 6 章 层状盐岩体中地下能源储库稳定性影响因素分析	162
6.1 概述	162
6.2 泥岩夹层对地下能源储库稳定性的影响研究	164
6.2.1 泥岩夹层含量对储库稳定性影响研究	164
6.2.2 泥岩夹层与盐岩刚度比对储库稳定性影响研究	167
6.3 地下能源储库稳定性的影响因素分析	170
6.3.1 溶腔内压的对溶腔稳定性的影响分析	170
6.3.2 储库高径比对溶腔稳定性的影响分析	173
6.3.3 上覆层厚度对溶腔稳定性的影响分析	175
6.4 矿柱安全性研究	179
6.4.1 腔周破损区比较	180
6.4.2 腔周等效应变比较	182
6.4.3 剪胀损伤因子 D 比较	184
6.4.4 洞室周边最大、最小主应力差值比较	186
6.5 层状盐岩溶腔稳定影响因素分析小结	188
参考文献	190

第 1 章 盐岩层岩土力学物理基础

1.1 盐岩的组成及成因

盐岩(rock salt 或 salt)主要矿物为石盐 (halite), 是化学作用下的沉积岩。盐岩是一种特殊的地质材料, 除了作为非金属矿物原料外, 在深部地下能源储备和废物处置方面也引起人们广泛的关注。

1.1.1 盐岩主要矿物特性

盐岩主要矿物为“石盐”, 化学式为 NaCl , 理论含量: Na 39.34%、Cl 60.66%, 常含有卤水、气泡、泥质和有机质等包裹体。

盐岩单晶体为等轴晶系, 常呈立方体, 在立方体晶面上常有阶梯状凹陷(见图 1-1)。集合体一般为粒状、致密块状, 有时呈柱状、纤维状、毛发状、盐华状等; 无色透明或白色, 含泥质时呈灰色, 含氢氧化铁时呈黄色, 含氧化铁时呈红色, 含有机质呈黑褐色。

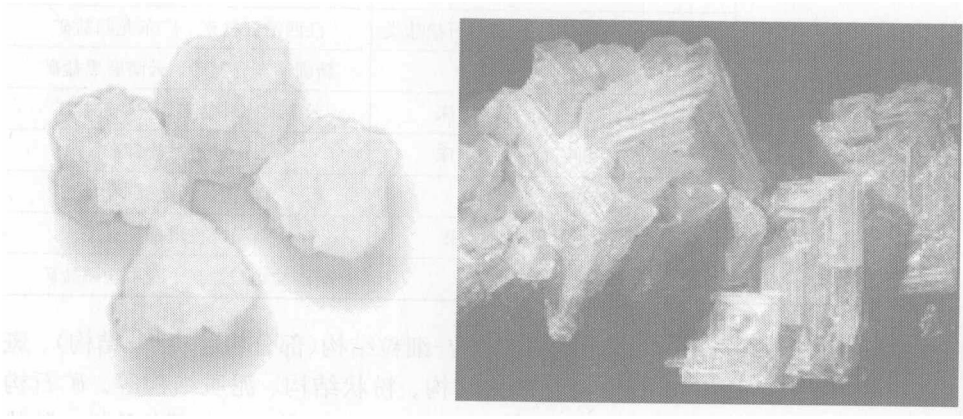


图 1-1 盐岩矿物晶体结构

盐岩呈玻璃光泽, 风化表面或潮解后呈油脂光泽, 贝壳状断口, 性脆, 硬度为 2~2.6, 密度为 $2.1\sim 2.2\text{g/cm}^3$; 易溶于水, 20°C 时溶解度为 36, 易潮解, 味咸, 有凉感; 不导电, 摩擦发光, 焰色浓黄; 熔点为 801°C , 沸点为 1413°C , 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(固体流)。

1.1.2 盐岩主要成分

盐岩形成于气温高、蒸发量大的环境中，而且随着海水(或咸水)蒸发过程中的逐步浓缩，各类盐岩相继沉淀而出现。一般来讲，成膏成盐必须具备下列几个条件：①有充分的物质来源；②有封闭良好的沉积环境；③有持续性的、小幅度的沉降——连续的沉积；④有干燥炎热的蒸发气候；⑤后期覆盖迅速，使其不受破坏。

所以从区域来讲，成膏成盐的盆地，必定是大构造中的一系列“垒瓦”式盆地和地堑式盆地，随着沉积盆地溶液汇集、蒸发，经过淡水湖泊→硫酸盐湖→浓缩氯化盐自析沉积→硫酸盐湖的过程，依次经历石膏→硬石膏→钙芒硝→岩盐→钙芒硝→硬石膏的形成，它局限分布在最凹的、封闭良好的地段。

常见的共生矿物有石膏、硬石膏、钙芒硝、无水芒硝、天青石、方解石、白云石、光卤石、钾石盐、杂卤石、天然碱等。据其主要矿物组分含量可分为9种矿石类型(见表1-1)。

表 1-1 中国盐岩矿床工业类型(朱训, 1999)

工业类型	亚类	矿床实例
碳酸盐岩系盐岩矿床	硬石膏-盐岩矿床	四川威西盐矿、长宁盐矿
碎屑岩系 盐岩矿床	硬石膏-盐岩矿床	河南叶县盐矿
	硬石膏-钙芒硝(无水芒硝)-石盐盐类	江西清江盐矿、广东龙归盐矿
	泥砾岩-盐岩矿床	新疆库车含盐带、云南磨黑盐矿
	泥砾岩-钙芒硝-盐岩矿床	云南元水井盐矿、一平浪盐矿
	泥砾岩-钾石盐-盐岩矿床	云南勐野井盐钾矿
	天然碱-盐岩矿床	河南吴县盐碱矿
次生与变态 盐矿矿床	次生淋滤沉积盐岩矿床	新疆吐孜塔格盐矿
	盐丘矿床	新疆盐山口盐矿、四川盐潭盐矿

矿石结构一般有自形-半自形结构、中粒-细粒结构(部分粗粒-巨粒结构)、斑晶结构等；在低品位盐岩矿石中可见砂状结构、粉状结构、泥质结构等。矿石构造常有块状构造、条带状构造、层状构造，其次还有斑状构造、角砾状构造、脉状构造、浸染状构造等。

盐岩矿石按品位可分为3类：富矿石，NaCl含量大于85%；中等矿石，NaCl含量为50%~85%；贫矿石，NaCl含量为20%~50%。

1.1.3 盐岩成因

盐岩矿的成因可分别从“盐质之来源”、“地形之影响”和“气候条件”等地

质地貌环境条件来分析。

1.1.3.1 蒸发成盐说

经典蒸发说(袁见齐等, 1984)认为: 在干燥或者半干燥的气候下, 全封闭或者半封闭的内陆盆地或滨海泻湖盆地中, 在以太阳能为主要能源的自然蒸发作用下, 当其蒸发量远远超出补给量时, 海水或盐湖水便蒸发浓缩, 顺序晶析出各种盐类矿物, 成岩后当它们的质和量达到工业开采利用标准时, 便构成盐类矿物。

蒸发说的提出是以现在内陆盐湖盆地或滨海泻湖盆地正在成盐的事实为依据, 并且得到一系列海水蒸发成盐实验的验证。但经典蒸发说难以解释巨大的古盐矿床的成因, 因此在其基础上很多学者又进行了补充。例如, 德国学者提出的“沙坝蒸发成盐说”、“分离盆地说”和“回流说”来修正“沙坝说”、“沙漠盆地成盐说”和 20 世纪 50 年代所提出的“深水沉积成盐说”。

1.1.3.2 深大断裂成盐说

同经典或经过修正的蒸发成盐假说截然相反的是约 20 世纪 70 年代提出的“深大断裂成盐说”(薛春纪等, 2006; 袁见齐等, 1984)。该成盐说的主要观点如下:

- (1) 地球上的盐层堆积, 在空间上都是和地壳深大断裂的发育相联系的;
- (2) 成盐物质是和沿深大断裂上升的地壳深部物质的供给密切相关的。

以苏联索宗斯基为代表的学者们提出了大量的事实证明该理论。索宗斯基还利用板块构造理论来解释古盐盆地的空间分布规律。他认为古盐盆地都沿板块的张性裂谷带发育, 在该带不仅能够见到以玄武岩为代表的幔分异作用产生的物质, 而且也从深处带来热的初生盐卤(这是现在东非裂谷带中能堆积厚盐层、发育热盐卤和大量甲烷及矿化水的原因所在); 在板块的挤压构造带, 就不能够出现类似现象, 含盐层亦不发育。

1.1.3.3 深成热液-喷气成盐说

深成热液-喷气成盐说(薛春纪等, 2006; 袁见齐等, 1984)基于的事实: ①在元古代、古生代、中生代和新生代的盐层中都发现有火山-岩浆岩, 尽管它们的数量相当少, 且并非所有盐盆地中都有发现; ②强烈成盐的时代和地球强烈的构造活动造成的地形改变相吻合, 表现了成盐作用的全球性; ③在 2.56×10^8 年时间内, 成盐作用表现出与火山-岩浆岩活动之间的直接依赖性, 而与碎屑岩和“巨大干涸”之间的关系却并不存在; ④研究古纬度后发现, 各大陆 222 个成盐地层, 有 171 个分布在南北古纬度 30° 之间, 其中 93 个分布在南北古纬度 15° 之间(许多

盐盆都是巨厚盐层的重要盆地)。

总之,越来越多的学者,从不同的角度纷纷给出了内生成盐的不同成因:盐矿物的形式与蒸发作用有关,且可存在于海底深处,由于不同组分和不同比重的卤水混合而导致盐类矿物的沉淀。

由上述各种假说可知,古盐类矿床的成盐条件和控矿因素各有所异,甚为复杂。在不同的地质时代,在同一地质时代不同地区中,成盐的方式并不只是以一种途径进行。因此,盐类矿床应该是属于具有多种成因和成矿作用方式的矿床;成矿物质来源也往往是多源的,具体情况需具体分析。

1.2 盐丘与层状盐岩

1.2.1 盐丘

1.2.1.1 盐丘形态和结构

盐丘是由盐体组成核部的穹隆构造。美国的一些盐丘高出周围地面数米至十几米,个别可达 25m,直径 1.5km。盐丘平面呈圆形或椭圆形,其顶部常发育一些断层和裂隙。在地形上已无明显突出的盐丘,它们形成时间较早,近期没有活动。

盐丘内核主要是由盐岩构成,上有盖岩层。但有些内核是由黏土层及含盐层与盐层交互成层。盐体上的盖层常由石灰岩、石膏和硬石膏组成,少数盐丘的盖层中含有大量硫黄,也有一些盐丘没有盖层。有些盐丘核上拱,山覆沉积岩被重力折断,这些断层常呈放射状排列或平行排列。

1.2.1.2 盐丘的成因

盐丘是由盐岩成塑性状态侵入周围的沉积岩中形成的。盐岩来自早期沉积的某一岩层。盐岩成流体上升可能有两种原因:①塑性盐岩的密度比周围沉积岩的密度要小,若原生盐层的顶部有一个小的背斜构造,盐岩就由此上升;②由于构造作用的横向压力的挤压,使盐岩挤入背斜顶部的沉积岩中,形成底劈褶曲。

1.2.2 层状盐岩

层状盐岩即盐系具有明显的沉积韵律。与国外的盐丘不同,我国盐岩大部分为层状,其基本特点是盐岩层数多,单层厚度薄,含盐岩地层的不可溶解性夹层众多,因此盐岩(层)的力学性质比较复杂。如湖北省应城的盐岩矿床赋存在下第三系云龙群含膏盐组第三段(Eg3)之中(杨春和等,2006),共分出 14 个含盐带。

盐岩-钙芒硝-硬石膏、钙芒硝-盐岩、盐岩-硬石膏与赭色粉砂质黏土岩和灰蓝色黏土岩互层,组成盐组。每个盐组厚1~9 m,单层厚5~10 cm,层间距10~45 cm。各地组数不一,为8~24组。岩组间距2~5 m,被赭色岩所隔,形成明显的旋回构造。

1.3 我国井矿盐分布

我国盐矿资源基本分布状况:东部海盐,西部湖盐,中部井矿盐。全国的盐矿分布如图1-2所示。

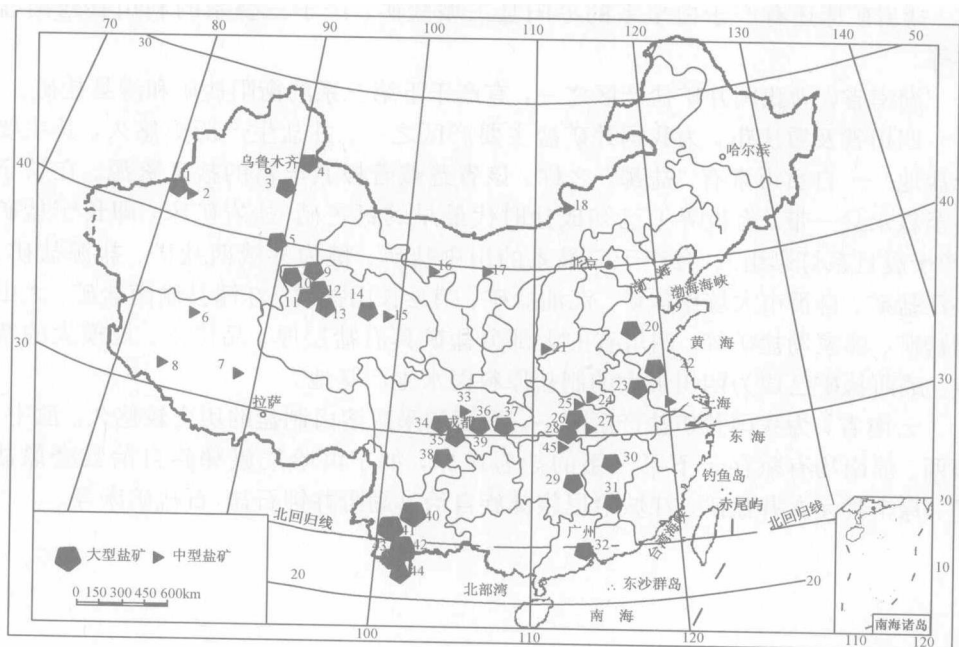


图1-2 我国盐矿分布(朱训, 1999)

1. 新疆阿克苏; 2. 新疆盐山口; 3. 新疆艾丁湖; 4. 新疆北塔山; 5. 新疆罗布泊; 6. 西藏戈木茶卡;
7. 西藏杜佳里湖; 8. 西藏扎布耶茶卡; 9. 青海大浪滩; 10. 青海昆特依盐湖; 11. 青海西台吉乃尔湖;
12. 青海东台吉乃尔湖; 13. 青海察哈尔汗湖; 14. 青海柯柯盐湖; 15. 青海茶卡盐池; 16. 内蒙古雅不赖盐湖;
17. 内蒙古乌兰泰盐湖; 18. 内蒙古二连盐湖; 19. 山东莱州盐田; 20. 山东大汶口盐矿; 21. 山西运城盐矿;
22. 江苏淮安盐矿; 23. 安徽东兴盐矿; 24. 河南吴城盐碱矿; 25. 湖北王城盐矿; 26. 湖北小板盐矿;
27. 湖北云应盐矿; 28. 湖北潜江盐矿; 29. 湖南衡阳盐矿; 30. 江西清江盐矿; 31. 江西会昌周田盐矿;
32. 广东龙归盐矿; 33. 四川江油盐矿; 34. 四川成都-蒲江盐矿; 35. 四川威西盐矿; 36. 川中盐矿;
37. 重庆垫江盐矿; 38. 四川长宁盐矿; 39. 四川自贡盐矿; 40. 云南安宁盐矿; 41. 云南文卡盐矿;
42. 云南勐野井盐矿; 43. 云南整董盐矿; 44. 云南勐腊县盐矿; 45. 湖南湘潭盐矿

按照省份总结,我国井矿盐分布范围如下:

江西省,为我国井矿盐产区之一。盐岩矿床有产于下第三系的清江盐矿和产于上白垩统的会昌县周田盐矿等。

江苏省,井矿盐于下第三系的盐岩矿床有金坛市直溪桥盐矿、淮阴县高堰盐矿、丰县盐矿,产于白垩系的盐岩矿床有淮安盐矿。

河南省,我国井矿盐产区之一,有产于下第三系的桐柏县吴城盐碱矿、叶县盐矿,并在濮城、文留一带发现下第三系特大型盐岩矿床——濮阳盐矿。

湖北省,我国井矿盐主要产区之一。盐矿资源极为丰富。在云梦县、应城市、天门市和潜江市分布有下第三系的特大型盐岩矿床和地下卤水矿床,如云应盐矿。盐岩矿床还有产于白垩系的枣阳县王城盐矿,产于三叠系的利川县建南盐矿等。

湖南省,为我国井矿盐产区之一,有产于下第三系的衡阳盐矿和澧县盐矿。

四川省及重庆市,为我国井矿盐主要产区之一。井盐生产历史悠久,其主要产盐地——自贡市素有“盐都”之称。该省蕴藏着极其丰富的盐矿资源。在长宁县至叙永县一带,有世界上已知成盐时代最早的钙芒硝-盐岩矿床,即长宁盐矿(产于震旦系灯影组);有产于三叠系的川中盐矿、犍为县威西盐矿、盐源盐矿、垫江盐矿、自贡市大坟堡盐矿、江油盐矿、荣县长山盐矿、江津县渝南盐矿、大山铺盐矿、郭家坳盐矿等。四川省的大部分盐矿具有盐层厚、品位富、规模大的特点。威西盐矿已成为四川最大的制盐原料卤水生产基地。

云南省,为我国井矿盐产区之一。汲卤和采矿溶卤制盐的历史较悠久。滇中、滇西、滇南均有赋存于下第三系的盐岩矿床,如宁洱哈尼族彝族自治县磨黑盐矿、禄丰县元永井盐矿、江城哈尼族彝族自治县勐野井钾石盐-石盐矿床等。

第2章 层状盐岩力学特性试验研究

2.1 盐岩体力学特性研究进展

国内外科研人员着眼于能源地下储存,广泛开展了盐岩工程力学特性、变形时效规律及渗透特性的研究;此外,为满足地下空间工程和采矿工程研究的需求,研究人员也开展了一般层状岩体的力学特性方面的研究;而针对我国盐矿盐岩层的构造特点而开展的层状盐岩体力学的研究才刚刚起步。目前国内外的相关研究进展如下。

2.1.1 深部盐岩力学研究方面

到目前为止,研究人员从不同的角度,考虑不同的运行条件下储存硐库的稳定性,对盐岩力学特性进行了研究,已初步建立了考虑盐岩的损伤、变形与渗透之间关系的盐岩本构模型。如 Lux (1984)、Lux 和 Reinhard (1984)、Hansen 等(1984)、Hunsche(1988; 1984a; 1984b)、Yang 和 Daemen (1997a)以及杨春和等(2002)对盐岩的强度、变形特性做了大量的室内、外试验研究工作;Schulze 等(2001)通过试验研究了盐岩在扩容区和非扩容区的应力、变形特征,以及盐岩在扩容应力区微裂隙的产生和扩展对盐岩总应变的影响规律并建立相应的力学模型;Hunsche (1989)对自然结晶盐岩的破坏标准进行了研究。

盐岩地下工程设计中,盐岩的长期力学行为及其强度是控制储油库溶腔大小及其工作年限的关键参数。Stead 和 Szczepanik(1991)通过盐岩蠕变过程的声发射现象,首次从试验的角度研究了盐岩蠕变的损伤过程,并建立相应的强度理论。Munson 和 Dawson 于 1979 年提出了盐岩变形机制定律(deformation mechanism law)。Chan 等(1997)改进了盐岩位错理论(M-D),建立了基于盐岩位错理论的盐岩蠕变损伤理论,Cristescu(1993)从经典弹-黏塑性理论出发,分析盐岩剪胀现象,从而分析了盐岩蠕变损伤过程。邱贤德等(2003b)通过对盐岩的蠕变和微观结构分析认为,盐岩的蠕变与损伤演化特征和 NaCl 含量的高低、结晶的尺寸大小等因素密切相关。余海龙等(1995)通过实验室相似材料试验,研究盐岩溶腔的稳定性,得到了溶腔围岩应力分布规律和溶腔极限跨距等重要参数。Schulze 等(2001)等通过三轴试验发现:当盐岩的应力状态低于盐岩的临界扩容应力时,盐岩的塑性变形不会对盐岩的内部结构产生损伤,而当盐岩的应力超过临界扩容应力时,盐岩内部将产生微裂隙,微裂隙的产生和扩展将使盐岩产生附加的损伤

应变,从而导致盐岩的强度和承载能力的降低。Hou(2003)通过对德国盐岩的蠕变试验研究,提出盐岩在初期蠕变、等速蠕变和加速蠕变阶段的变形特征与其微裂隙损伤演化和扩容的关系,并分析盐岩储存洞穴损伤区的片帮、垮塌的机理,提出预测盐岩长期强度的方法。

在盐岩储库的洞型优化及盐矿变形的反馈分析方面,梁卫国等(2003)在理论分析的基础上,建立了盐岩水溶开采的数学模型,并对溶腔的变形进行了相应的数值模拟分析。杨春和等(2005)结合江苏省金坛盐矿的特点,通过现场对现有盐穴的洞型测试和稳定性分析,提出了利用已有盐岩溶腔作为储气库的可行性方案。

2.1.2 层状岩体力学研究方面

在漫长的地质演化过程中,岩石经受各种地质作用,保存了各种各样的永久变形和地质构造形迹,如褶皱、断裂、节理、层理和不整合等结构弱面。对于“层状岩体”,在诸多文献中指的是被节理面等不连续面分割的岩体,各层的力学特性是相同的,而节理被模拟为具有线性或非线性法向和切向刚度的无厚度层。关于此类层状岩体的研究非常广泛和深入。

对于非均质或者非连续的岩体,当细观微结构特征尺寸(节理面间距、层厚、裂纹尺寸和夹杂尺寸等)和所研究结构的宏观尺寸相比很小时,经常采用均匀化方法将其概化为均匀连续但是具有异向性的岩体来进行研究。但当考虑在层状岩体内进行开挖及硐室稳定性时,应力场的梯度变大,这时需要考虑弯曲效应的影响。Dawson 和 Cundall(1995)、Iordache 和 Willamb(1998)、Adhikary 和 Dyskin(1997a; 1996)、Forest 等(2000)以及我国的葛修润等(Ge et al., 1991)和余成学等(1994)采用 Cosserat 介质分析方法考虑不连续面引起的局部弯曲效应的影响,并嵌入到有限元软件或者有限差分软件进行分析。

层状岩体指的是由具有不同物理特性的岩层交替而组成的互层岩体。针对此类层状岩体, Taliercio 和 Landriani(1988)基于试验研究,对各层岩体都采用莫尔-库仑破坏准则(各层岩体黏聚力和内摩擦角不一定相同);考虑层间位移协调提出了互层岩体的破坏准则,不过该准则应用起来较为复杂。Amadei 和 Pan(1992)综合研究了由于岩体的分层沉积特点或者不连续结构面引起的岩体宏观的各向异性,对评估现场地应力数据时如何考虑各向异性提出了建议。中国台湾的 Lai 等(1999)开展了一系列的互层类岩石材料的模型试验研究,对材料破坏和变形的各向异性特征进行了研究。刘立等(1999)研究了由灰岩、砂岩和泥岩构成的层状复合岩石的微观结构形态,导出了含多层岩石的复合岩体的三维非线性损伤本构方程和损伤演化方程及复合岩石的破坏失稳准则。

作者针对湖北省云应盐矿的赋存特点,开展了一系列层状盐岩物理与力学特性试验研究(杨春和等, 2006),揭示了层状盐岩变形破坏机理及时效特征、层状