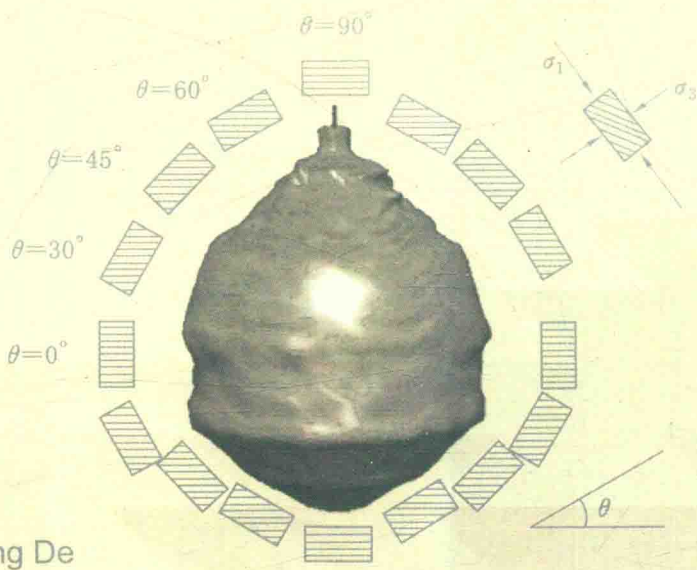


国家自然科学基金青年基金 (51504243, 41401397, 51404262)
江苏省自然科学基金青年基金 (BK20150191, BK20140237, BK20140213)
中央高校基本科研业务费专项资金 (2015XKZD06)
中国博士后科学基金面上项目 (2014M560462)

基于界面沉积特征的 薄互层盐岩储气库稳定性与地表沉降研究

张桂民 王李娟 陈彦龙 吴宇 刘江峰 著



Jiyu Jiemian Chenji Tezheng De
Bohuceng Yanyan Chuqiku
Wendingxing Yu Dibiao Chenjiang Yanjiu



国家自然科学基金青年基金(51504243,41401397,51404262)

江苏省自然科学基金青年基金(BK20150191,BK20140237,BK20140213)

中央高校基本科研业务费专项资金(2015XKZD06)

中国博士后科学基金面上项目(2014M560462)

基于界面沉积特征的薄互层盐岩 储气库稳定性与地表沉降研究

张桂民 王李娟 陈彦龙 著
吴 宇 刘江峰



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

由于海相沉积形成的盐丘型盐岩矿床稀缺,我国盐穴型油气储库的选址只能局限在湖相沉积形成的薄互层状盐岩矿床中。本书首先建立了薄互层盐岩的界面力学特性与沉积地质特征的相关性。然后,通过研究薄互层盐岩变形破坏的规律,提出了基于界面沉积特性的薄互层盐岩体破坏准则。继而,论证了常规工况和紧急工况条件下淮安张兴块段盐穴压气蓄能储气库的稳定性。最后,提出了一种新的薄互层盐岩储气库地表沉降的预测模型。本书可供从事采矿工程、地下空间与工程、油气储运工程、岩土工程等专业的科技工作者、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

基于界面沉积特性的薄互层盐岩储气库稳定性与地表沉降研究/张桂民等著. — 徐州:中国矿业大学出版社, 2016.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3044 - 7

I. ①基… II. ①张… III. ①薄互层—储气—气库—稳定性—研究②薄互层—储气—气库—地表沉降—研究
IV. ①TE82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 045143 号

书 名 基于界面沉积特征的薄互层盐岩储气库稳定性与地表沉降研究

著 者 张桂民 王李娟 陈彦龙 吴 宇 刘江峰

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8 字数 200 千字

版次印次 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

能源地下储备是指把原油、成品油及天然气等能源储存于一定深度的大型地下库群,以应对市场波动,尤其是诸多突发因素,如战争、地震、极端气候条件及恐怖事件等对能源供应带来的影响。盐穴储气库是被国际上广泛认可的一种能源战略储备方式,其利用深部盐矿水溶开采形成的地下空间来储存石油或天然气。由于国家能源战略储备的巨大需求,我国能源盐岩地下储库群正在大规模兴建,但是受储气库地域需求及我国地质地层条件的限制,我国的盐穴储气库群选址均为人口稠密、经济较为发达的地区。一旦储气库群发生灾害事故,不但影响能源储备安全,而且危害人民的生命和财产安全。

由于海相沉积形成的盐丘型盐岩矿床稀缺,我国盐岩油气储库的选址只能局限在湖相沉积形成的层状盐岩矿床中,其基本特点是:夹层多、盐层薄、界面多。相对于大型能源地下储备库而言,层状盐岩围岩可视为交互层状介质,本书称之为薄互层盐岩。薄互层盐岩是由多种不同属性、不同厚度、不同组分并以不同结合方式按照某种顺序组合而成的天然层状岩体,其力学和变形特性就反映了多相不均匀性、各相异性、层间界面力学性质以及复合体力学效应。着眼于我国能源盐穴地下战略储备,针对我国盐岩夹层多、盐层薄、界面多的特点,亟须研究不同界面沉积特征下薄互层盐岩体的破损规律,进而揭示薄互层盐岩储气库的失稳机理和地表沉降诱因,对我国薄互层盐岩内储气库工程的安全高效运营和灾害规避具有极其重要的意义。

作者采用地质调查、室内试验、理论分析和数值模拟的手段,从盐岩界面沉积特征和破损机理两个方面对储气库稳定性和地表沉降等问题开展研究,取得了多项有价值的成果。本书是在这些研究成果的基础上精心撰写而成。

本书是作者近年来在薄互层盐岩破损机理及盐穴储气库稳定性和地表沉降研究方面的成果总结,全书共7章内容:第1章介绍了薄互层盐岩中进行储气库建设的工程背景和国内外该项技术的研究现状与进展。第2章基于我国湖相沉积盐岩地层的沉积韵律特征,研究了界面力学特性与其沉积地质特征之间的相关性。第3章和第4章通过岩芯室内试验、模型材料试验和理论分析研究了薄互层盐岩变形破损的规律,提出了基于界面沉积特性的薄互层盐岩体破坏

准则,为薄互层盐岩地下储库稳定性分析奠定了理论基础。第5章论证了淮安张兴块段盐穴压气蓄能储气库可行性,研究了常规工况和紧急工况条件下薄互层盐岩中压气蓄能储气库的稳定性。第6章提出了一种新的薄互层盐岩储气库地表沉降的预测模型,该模型考虑了薄互层盐岩的蠕变效应和品位的影响,可建立造腔和存储两个阶段的盐穴储气库地表动态沉降量。第7章是对全书研究成果的归纳总结。

在本书的撰写过程中广泛参阅了国内外其他学者的研究成果和相关论著,在此一并致以谢意。本书的写作和出版得到了中国矿业大学缪协兴教授的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢。本书中部分研究成果是第一作者在中国科学院武汉岩土力学研究所攻读博士学位期间完成的,对中科院武汉岩土力学研究所李银平研究员、杨春和研究员给予的指导和帮助表示衷心的感谢。感谢茅献彪教授、王连国教授、白海波教授、陈占清教授、浦海教授、马占国教授、赵玉成教授给予的指导和帮助。同时感谢中国矿业大学出版社编辑同志为本书出版所付出的辛勤工作。

此外,本书相关的研究和出版得到了国家自然科学基金青年基金(51504243, 41401397, 51404262)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20150191, BK20140237, BK20140213)、中央高校基本科研业务费专项资金(2015XKZD06)、中国博士后科学基金面上项目(2014M560462)的资助,在此向有关基金会表示诚挚的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有疏误之处,敬请读者谅解与指正。

作 者

2016年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程背景与研究意义	1
1.1.1 盐穴储气库建设现状	1
1.1.2 我国盐穴储气库场址的沉积地质特征	2
1.1.3 本项目的研究意义	3
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 层状岩体变形破损研究进展	5
1.2.2 互层盐岩地质与力学特性研究进展	8
1.2.3 盐穴储气库稳定性研究进展	13
1.3 研究思路及研究工作	15
1.3.1 总体研究思路	15
1.3.2 主要研究工作	16
第 2 章 薄互层盐岩沉积韵律与层间界面赋存特性	18
2.1 薄互层盐岩沉积韵律特性	18
2.1.1 沉积韵律的定义与划分	18
2.1.2 云应盐矿沉积韵律	18
2.2 薄互层盐岩层间界面特征	22
2.2.1 层间界面的命名与分类	22
2.2.2 典型界面的微观结构分析	25
2.2.3 界面强度多样性与弱界面的潜在位置	27
2.3 本章小节	29
第 3 章 薄互层盐岩岩芯变形破损特性	32
3.1 盐岩和夹层的归类	32
3.2 夹层对薄互层盐岩力学特性的影响	32
3.2.1 单轴压缩试验	33
3.2.2 三轴压缩试验	35
3.2.3 蠕变试验	40
3.3 界面对薄互层盐岩力学特性的影响	43
3.3.1 沿界面拉伸和剪切试验	44

3.3.2	特定界面抗剪强度模型	51
3.4	本章小节	54
第4章	薄互层盐岩模型材料压缩试验及破损机理	56
4.1	试验方案及设备	56
4.2	薄互层盐岩模型材料压缩试验结果	57
4.2.1	单轴压缩试验结果及分析	57
4.2.2	三轴压缩试验结果及分析	61
4.2.3	薄互层盐岩破坏模式和主控因素	62
4.3	考虑界面和夹层效应的薄互层盐岩破损机理	63
4.3.1	单条弱界面岩体破坏条件和强度表达式	63
4.3.2	薄互层盐岩破坏准则	68
4.4	本章小节	70
第5章	薄互层盐岩中压气蓄能储气库稳定性研究	71
5.1	拟建储气库区域地质概况	71
5.2	地层简化与参数选择	72
5.3	储库工作气量与最小溶腔体积	74
5.4	数值模型的建立	75
5.4.1	计算模型	75
5.4.2	常规运营计算工况	76
5.4.3	紧急条件计算工况	78
5.5	腔体稳定性计算结果	79
5.5.1	常规工况腔周破损区和位移分布	79
5.5.2	紧急工况腔周塑性区和位移分布	81
5.6	腔体体积收缩	83
5.6.1	常规工况腔体体积收缩分析	83
5.6.2	紧急工况腔体体积收缩分析	83
5.7	本章小节	85
第6章	薄互层盐岩中储气库地表沉降时间依赖预测模型	86
6.1	盐穴储气库腔体收缩	86
6.1.1	建腔期	86
6.1.2	运营期	88
6.1.3	体积收缩率	88
6.2	储气库地表动态沉降	89
6.2.1	动态沉降量	89

6.2.2 其他参数	90
6.3 案例分析和模型验证	90
6.3.1 数值模型和参数	90
6.3.2 模型验证	91
6.4 参数分析与讨论	94
6.4.1 地层参数	94
6.4.2 设计参数	99
6.5 本章小结	100
第 7 章 结论与展望	102
7.1 主要结论	102
7.2 创新点	104
7.3 展望	105
参考文献	106

第1章 绪 论

1.1 工程背景与研究意义

地下储气库是将长输管道输送来的商品天然气重新注入地下空间而形成的一种人工气田或气藏,一般建设在靠近下游天然气用户城市的附近。与地面球罐等方式相比较,地下储气库具有以下优点:储存量大,机动性强,调峰范围广;经济合理,虽然造价高,但是经久耐用,使用年限长达30~50年或更长;安全系数大,安全性远远高于地面设施。目前世界上典型的天然气地下储气库类型有5种^[1]:枯竭油气藏储气库、含水层储气库、盐穴储气库、废弃矿坑储气库及岩洞储气库。2009年10月,在阿根廷举办的第24次世界天然气大会储气库工作委员会统计^[2],世界上共有35个国家运行各种地下储气库630座。

1.1.1 盐穴储气库建设现状

(1) 世界盐穴储气库建设概况

盐穴地下储气库是利用深部盐矿水溶开采形成的地下空间来储存天然气。目前美国、德国、加拿大、法国、英国、丹麦等西方发达国家相继建成了盐岩地下油气库群,用于国家战略能源储备。据统计,截至2009年,全世界已建成74座盐穴储气库并投入运行,主要分布在美国和欧洲,详见表1-1^[1]。数据显示,目前中国的天然气储气库储气量仅为消费量的3%左右^[3],远低于世界平均水平,调峰能力明显不足。

表 1-1 世界盐穴地下储气库统计

国 家	储气库/座	工作气量/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	注采气井/口
美国	31	50.27	149
德国	23	78.86	173
加拿大	9	6.12	34
法国	3	9.73	36
英国	3	5	11
亚美尼亚	1	1.1	18
波兰	1	3.8	10
丹麦	1	4.2	7
中国	1	1.4	6
葡萄牙	1	1.5	3

(2) 中国目前的天然气储备概况

我国的地下储气库建设起步较晚,真正开始研究地下储气库是在20世纪90年代初,开始研究建设地下储气库以确保北京和天津两大城市的安全供气^[4]。到目前为止,在天津市附近的大港油田利用枯竭气藏建成了3个地下储气库,即大张坨地下储气库、板876地下储气库和板中北储气库,总的调峰气量约为 $20.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。

随着国家实施西气东输、川气东送等战略工程的实施,2001年1月启动了西气东输工程天然气地下储气库工程可行性研究项目。由于大口径长输送管道的中下游主要为我国的中东部地区,尚未发现可用作地下储气库的含水构造、枯竭油气藏等合适的地质构造,但是这些地区有丰富的井矿盐资源,因此在中东部地区建设大规模地下盐穴储气库成为我国的必然选择。

为确保“西气东输”工程的实施,保证“西气东输”管线沿线和下游长江三角洲地区用户的正常用气,现在长江三角洲地区选择了江苏省金坛盐矿和江苏省刘庄建设地下储气库,其工作用气量规模占总设计的85%以上^[6],地下储气库已于2006年陆续投入使用。另外,为保持西气东输二线工程天然气的供应,中石油集团在湖北应城、河南平顶山以及江苏淮安等地区也正在筹建天然气储气库,其中湖北云应地区的储气库已经通过了国家层面的可行性论证,进入到了先导性研究阶段;河南平顶山储气库和江苏淮安储气库正在做可行性论证^[7]。中石油计划在2011年到2015年修建10座储气库,总库容达到224亿 m^3 ,分布在气源所在地和消费中心,以及大型骨干管网周边,包括长庆、辽河、重庆等地。上述项目建成后,国内储气规模将占天然气总销量的8%~10%^[8]。为配合川渝天然气东输“两湖”地区,中石化还将在长江中游地区建设地下储气库,如湖北潜江拟建储气库^[9-10],同时川气东送长江下游金坛盐穴储气库也马上投入建设,以确保该川气东送工程的供气安全。

可见,我国在能源储备方向具有巨大需求,在盐岩地层中实施油气地下储备也已成为能源战略储备的重点部署方向之一。我国大规模兴建盐岩地下储库群已经开始,未来10~20年将迎来地下油气储库建设的高峰^[11]。

1.1.2 我国盐穴储气库场址的沉积地质特征

我国井矿盐资源多为湖相沉积,以碎屑型岩层覆盖为主,盐岩普遍含泥类、砂类杂质,且多与夹层呈韵律分布,这一特点使得盐岩能源储备建设中无法照搬国外海相沉积的盐丘型储库建设经验,需要针对我国盐矿资源的成因及其力学特征综合分析储库建设中的关键问题^[10]。中国盐类矿床的主要成盐时代为震旦纪、三叠纪、白垩纪和古近纪、新近纪,其次是中奥陶世、早二叠世、侏罗纪和第四纪^[12]。其中白垩纪至古近纪、新近纪是陆相沉积盐矿床的形成年代,是中国主要陆相成盐时期。

随着我国能源储备计划的实施,2007年为服务西气东输一线工程,在江苏金坛废弃盐岩溶腔中成功建造了天然气储气库,并顺利投入运营,为我国能源储库建设积累了重要的建设经验,现湖北潜江、云应、河南平顶山等地已陆续展开储气库可行性前期论证工作。但是,我国幅员辽阔,国内不同地域的盐岩沉积环境有明显差异,导致盐岩的力学特

性及影响储库建设的关键因素不尽相同^[12-14]。“盐岩层数多,单层厚度薄,夹层众多且厚薄不一”,是我国盐岩矿床的一个重要特点(图 1-1),这一特点对地下能源储备库的建造以及安全运行均会造成一定影响。

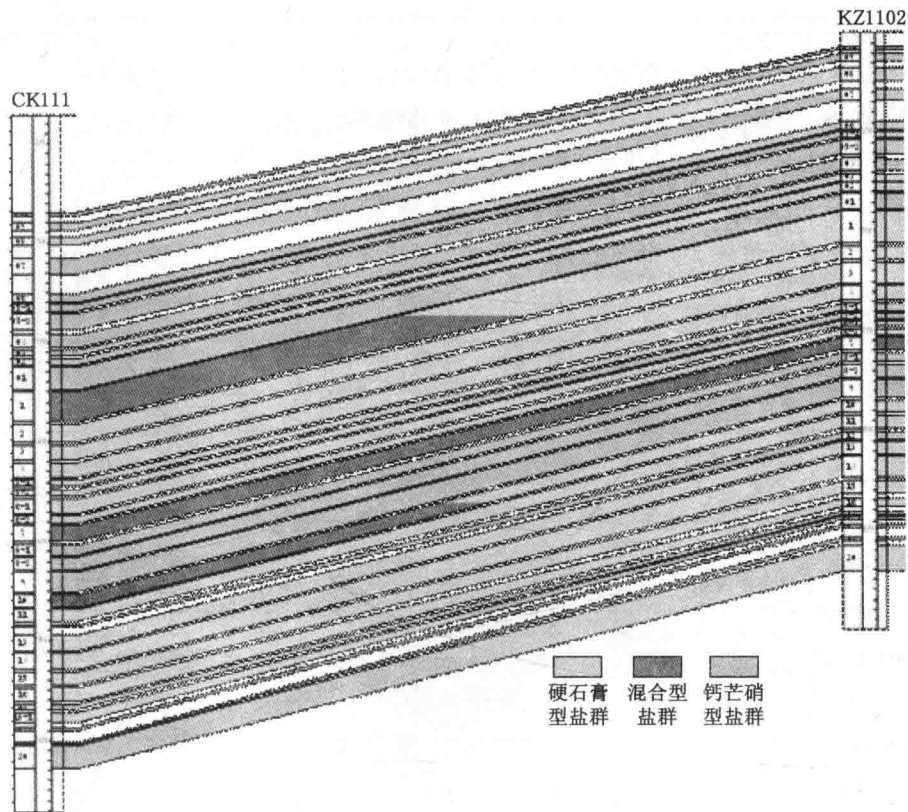


图 1-1 云应钻孔 CKIII~CK1102 盐层段连井剖面图

1.1.3 本项目的研究意义

长江中下游地区是中国人口最为稠密的地区之一,在这个地区规划建设的储气库周围均有密集的城镇和村庄,以及重要的铁路、公路等交通运输要道。盐穴油气储库的灾难性事故虽然出现的概率比较低,一旦发生油气泄漏事故,会引起大火、爆炸等灾难性后果,其波及面必然会非常广,严重影响人民群众的生命财产安全,对社会造成不良影响。

我国的储气库建设起步较晚,目前仅有大港储气库、金坛储气库等少数几个储气库投入运营,尚未发生因腔体稳定性、密闭性等问题而引发的事故。研究资料表明,美国、德国、加拿大等国油气储库发生过诸如油气井喷、大火和爆炸、腔体失效、地面沉降等灾难性事故。表 1-2 列出了国外部分能源地下储备库事故,涉及油气泄漏、溶腔失效和地面沉降等多种类型,事故原因有人为操作失当、上覆地层非均匀变形、腔体破损、腔体过度

变形、顶板垮塌、底板隆起等多种,多为因腔体稳定性不足而导致密闭性失效,从而引发的灾难性事故。

表 1-2 国外部分能源地下储备库事故^[7,15]

储库名称	时间、地点	储存物	事故类型	事故描述	事故原因
West Hackberry	1978 年 9 月美国路易斯安那州	石油	油气渗漏	大火、井喷	上覆地层非均匀变形导致密封失效
Brenham	1992 年 4 月美国德克萨斯州	液化石油气	油气渗漏	大火、爆炸	人为操作失当导致密封失效
Fort-Saskatchewan	2001 年加拿大萨斯喀彻温省	乙烷	油气渗漏	火灾,持续 8 天	上覆地层非均匀变形导致密封失效
Yaggy	2001 年 1 月美国堪萨斯州	天然气	油气渗漏	大火、爆炸	腔体破损导致密封失效
Mont Belvieu	1980 年美国德克萨斯州	液化石油气	油气渗漏	大火、爆炸	上覆地层非均匀变形导致密封失效
Mont Belvieu	1985 年 11 月美国德克萨斯州	液化石油气	油气渗漏	大火、爆炸	腔体破损导致密封失效
Moss Bluff	2004 年 8 月美国路易斯安那州	天然气	油气渗漏	大火、爆炸	腔体破损导致密封失效
Stratton Ridge	20 世纪 90 年代美国德克萨斯州	天然气	溶腔失效	腔体失效、弃用	腔体破损、底板隆起
Eminence	1970 年~1972 年美国密西西比州	天然气	溶腔失效	腔体收缩 40%	腔体破损、顶板垮塌、底板隆起
Kiel 101	1967 年德国	天然气	溶腔失效	40 天后体积收缩 12.3%	腔体破损、顶板垮塌
Tersanne	1970 年~1980 年法国	天然气	溶腔失效	有效体积损失 60%	地面沉陷、压力波动
Big Hill	1989~1999 年美国德克萨斯州	石油	地表沉陷	地面沉降 0.30 英尺/年	腔体过度变形、顶板垮塌
Bryan Mound	1982~1998 年美国德克萨斯州	石油	地表沉陷	地面沉降 0.12 英尺/年	腔体过度变形
West Hackberry	20 世纪 70 年代美国路易斯安那州	石油	地表沉陷	地面沉降 0.25 英尺/年	腔体过度变形

相对于国外较多的盐丘状储气库,我国用于建造储气库的盐岩地层的典型特征是“盐岩层数多,单层厚度薄,夹层众多且厚薄不一”。众多的夹层之间、夹层与盐岩之间会

有很多界面,这些界面的胶结状态和力学特性亦会有不同。由于我国的盐岩地层是由多种不同属性、厚度、组分并以不同结合方式按照某种顺序组合而成的天然层状岩体,其力学和变形特性就反映出多相不均匀性、各相异性、层间界面力学性质、复合体力学效应以及力学性质的不匹配性质,为我国深部层状盐岩石油、天然气地下储备库的设计和施工带来了诸多挑战。

同时,在盐岩地层中建设储气库,相当于硐室开挖,此时腔周附近的围岩会产生应力重分布(图 1-2)。在腔周一定范围内,重分布后的最大主应力 σ_1 平行于腔壁(矩形的长边方向),最小主应力 σ_3 垂直于墙壁(矩形的短边方向)。在不同位置处,地层方向(矩形中平行线的方向)与最大主应力 σ_1 方向的夹角是不同的,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内变化。因此,即使层状盐岩地层倾角为水平或缓倾角,但是由于应力重分布,不得不考虑倾角对层状盐岩变形破损的影响。

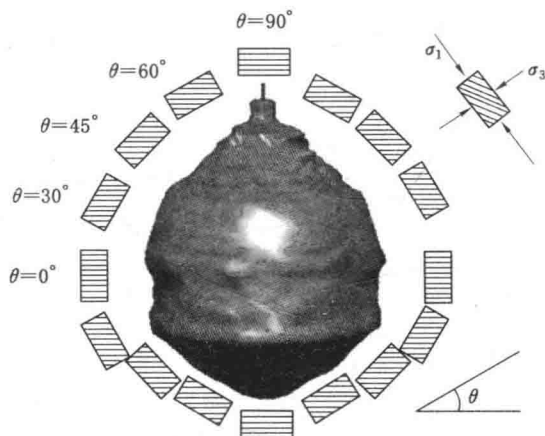


图 1-2 互层状盐岩储油(气)库腔壁围岩应力状态示意图

综上所述,为保证储气库腔体结构的稳定性、密闭性和耐压性,深入研究和探讨沉积韵律、夹层以及界面的分类和力学特性、倾角等对层状盐岩变形、强度和破损的影响,就显得极为重要。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 层状岩体变形破损研究进展

层状岩体由于具有层状结构,不仅变形和强度性质具有明显的各向异性,岩体的破坏机理及方式也明显不同于其他岩体。对于由沉积作用形成的层状岩体,在平行于层理方向上力学性质比较接近,而在平行和垂直层理方向上的物理力学性质则差异较大。因此,在研究其受力引起的力学响应时,常将其简化为横观各向同性介质。

层状岩体的研究起始于 20 世纪 60 年代,当时主要的研究内容是如何确定层状岩体

的弹性参数。1963年, Lekhnitskii^[16] 出版了专著 *Theory of elasticity of an anisotropic body*, 他从连续介质的弹性理论出发, 导出了各向异性体弹性理论方程, 为各向异性问题的研究提供了理论基础。后来, Pinto^[17] 提出了层状正交各向异性体, Wardle and Gerrard^[18] 等提出了层状介质等效各向异性体, Salamon^[19] 提出了层状介质等效模型。其中, Salamon 的研究成果影响较大, 他将层状岩体简化为一种等效均质横观各向同性介质, 进而得到等效横观各向同性介质的 5 个独立弹性常数。80 年代, Gerrard^[20] 又将 Salamon 等效模型方法推广, 认为层状岩体可以被视为一种等效的均质正交弹性体, 其特性可以通过分层岩体的弹性参数来表达。

层状岩体变形各向异性特征的研究主要集中于对不同倾角下的变形模量和泊松比的测试及其两者随倾角和围压的变化规律方面。国内外许多学者针对砂岩、页岩、泥板岩等设计了各种试验, 实测了弹性模量, 研究表明: 对于完整均质的横观各向同性岩体, 弹性模量在平行于层面方向最大, 在垂直层面方向最小, 并且随层面倾角的增大而减小, 弹性模量近似呈椭圆规律变化。Amadei and Pan^[21]、曾纪全等^[22] 等的研究表明, 层状岩体弹性模量的最小值出现在层面倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。对砂岩的试验表明, 其泊松比 μ 随层面倾角 θ 的增大而增大, 席道瑛等^[23] 的部分实验成果与采用 Lekhnitskii^[16] 横观各向同性介质理论推出的公式有很好的 consistency。

在层状岩体强度各向异性特征方面, Jaeger^[24] 提出的单弱面理论, 为研究固有不连续面对岩体强度的影响提供了有益的起点, 该理论将岩体的破坏分为沿结构面破坏和切结构面破坏两种方式, 岩块被认为是均质各向同性体, 通过分析结构面与主平面之间夹角的变化情况来分析岩体强度及破坏情况, 很好地解释了结构面对岩体强度的影响。Duveau and Shao^[25] 等对 Jaeger 准则进行了修正, 增加了两个参数, 被称为扩展 Jaeger 准则。在 Jaeger 之后国内外许多学者对不同的层状岩体进行了大量试验研究, Attewell and Sanford^[26-27]、Lydz 等^[28]、Sigh 等^[29]、冒海军等^[30]、张玉军等^[31]、赵平劳^[32-33]、曾世全等^[34] 研究表明: 在缓倾角阶段层状岩体的强度较高, 破坏一般不受层面倾角的影响, 但随着倾角的增大岩体强度越来越低, 并在 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间出现最低值; 层状岩体内摩擦角和內聚力随层面倾角变化, 并在 45° 左右达到最小值; 由于加载方向不同, 层状岩体也表现出不同的强度力学性质, 平行层面方向加载时的抗拉强度大于垂直层面方向的抗拉强度; 而平行层面方向加载时的抗压强度与黏聚力小于垂直层面方向的抗压强度与黏聚力。

在本构模型方面, 国内外岩石力学工作者提出了许多针对岩层岩体的本构模型, 主要有: 等效各向异性本构模型、层状复合岩体本构模型、层状岩体 Cosserat 本构模型、加锚层状岩体本构模型等。在层状岩体等效本构模型研究方面, 贺少辉等^[35] 研究了岩层厚度和层面力学性质不同组合情况下的层状岩体等效弹塑性本构关系; 赵平劳^[36] 以层状结构岩体为对象, 应用复合材料力学原理, 采用动静态力学试验获得了层状结构岩体的本构关系。刘立等^[37] 对层状复合岩体断裂损伤过程进行实验研究, 提出了损伤断裂模型和破坏准则, 建立了岩体的微结构模型。层状岩体 Cosserat 介质理论是研究具有一定特征结构的介质在外界荷载作用下变形破坏等问题的连续介质理论。由于它考虑了偶应力,

比较适用于弯曲变形的情况。后来,Adhikary^[38-39]、Provids^[40]、余成学等^[41]、刘俊^[42-43]、王启耀^[44]等学者研究了 Cosserat 弹性或弹塑性本构模型,分析了层状岩体的弯曲变形破坏。杨春和^[45]、李银平^[46]又将 Cosserat 介质扩展理论引入到了层状盐岩。

在强度准则方面,Taliercio and Landriani^[47]基于试验研究,对各层岩体都采用 Mohr-Coulomb 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 and Pan^[22]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。Tian 等^[48]开展了互层类岩石材料的模型试验,研究了横观各向同性体倾角对岩石整体强度和弹性模量的影响,并提出了相应的破坏准则。鲜学福等^[49]、刘立等^[37]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。

由于岩体各向异性的复杂性,目前对岩体各向异性屈服准则和本构关系的研究主要还处于理论研究阶段,在实际岩体工程中应用较少,其主要原因^[50]在于:① 各向异性屈服准则及其本构关系十分复杂,参数多,且取值十分困难;② 各向异性本构关系往往无法用显式的数学公式来表示,计算过程复杂,计算量巨大。

层状岩体的分布广泛,很多地下工程修建在该类岩体当中。岩层变形和强度的各向异性及结构面的低强度特点使得围岩的变形和稳定性问题十分复杂,国内外学者对此开展了广泛的研究。如,肖明等^[51-52]采用层状各向异性三维非线性有限元计算模式分析了西龙池、琅琊山抽水蓄能电站地下厂房洞室围岩的稳定性,较好地反映了层状各向异性对围岩稳定的影响。王启耀等^[53]将考虑偶应力影响的 Cosserat 介质理论引入到了层状岩体中地下洞室工程的开挖模拟中,并基于 MATLAB 平台编制了考虑偶应力的二维弹塑性有限元程序,进行了层状岩体中大型地下洞室围岩变形的特征及影响因素分析。蒋臻蔚等^[54]指出层状岩体的变形破坏主要以顺层滑移和弯折破坏为主,并以此分析了陡倾角层状岩体中大型地下洞室群开挖可能遇到的围岩稳定性问题。陆海昌等^[55]借助建立的各向异性弹性常数的不变量方程,提出了一种在非弹性状态下确定正交各向异性岩体的弹性常数(主弹性常数及主轴方向)的方法,并给出了求解正交各向异性体弹性平面问题的解答及一般巷道围岩的应力分布。赵海斌等^[56]对龙滩水电站地下洞室群进行了研究,龙滩水电站地下洞室群围岩为陡倾角层状岩体,其研究结论重点指出:加强施工期监测,对各种监测数据进行科学而系统的分析和评判是巨型地下洞室群围岩稳定性研究的重点。胡本雄等^[57]采用边界元法分析地下洞室的各向异性问题,借助引入等效模量将层状节理岩体内地下洞室问题转化为均匀各向异性问题求解,并讨论了各向异性特征对地下洞室围岩应力及洞周位移的影响。张晓春等^[58]基于 RFPA'98 程序,对层状岩体中洞室围岩的层裂及破坏进行了数值模拟,得到了层裂结构的层裂板厚度,认各向异性本构关系的基础上,采用非线性的 Mohr-Coulomb 准则进行了层状岩体中地下洞室弹塑性和黏弹塑性的数值模拟。李刚^[59]采用多层薄板(梯度层合板模型)分析了地下洞室顶拱水平岩层的破坏规律。

1.2.2 互层盐岩地质与力学特性研究进展

1.2.2.1 沉积地质研究

世界上广泛存在的中新生代盐湖盆地,一直是地质学家研究的重点。对于以盐矿沉积为主的盐湖研究,主要关注盐岩矿床的成盐时代、成因类型、纹理特征、层序地层学、物源、沉积相、含盐岩系构造的演化、盐湖的沉积韵律和模式。而对于与油气生成相关的盐湖盆地,则主要从盐湖盆地的层序地层划分,盐岩对油气保存的作用及盐底辟构造(比如盐丘)在油气运移中的作用等角度进行分析与研究^[60]。

Aref 等^[61]研究了埃及苏伊士湾 Ras Shukeir 地区全新世蒸发岩沉积环境和沉积相。Makhlouf and El-Haddad^[62]研究了约旦晚三叠世阿布鲁韦斯构造沉积相和沉积环境。Bose 等^[63]通过查找和回顾相关文献研究了前寒武纪硅质碎屑盐岩和碳酸盐岩沉积记录的独特性。Glenn 等^[64]对盐湖沉积物的沉积韵律进行了系统分析。Kasprzyk^[65]给出了波兰南部喀尔巴阡山前 Badenian 蒸发岩沉积盆地石膏矿床的沉积韵律和成盐模式。Kloosterboer-van Hoeve 等^[66]通过研究希腊北部托勒密上新世早期的花粉记录分析了此地区千年尺度的气候周期。EL tabakh 等^[67]深入讨论了在泰国东北部呵叻高原白垩纪玛哈沙拉堪蒸发岩的沉积学。Mees^[68]研究了马里北部全新世 Taoudenni-Agorgott 盆地常年盐湖的沉积结构特征。Back 等^[69]利用 3D 地震研究了南部丹麦北海 Chalk 组的地形学和沉积学。Talbot 等^[70]研究了盐岩挤入构造的内部运动学。Jackson^[71]通过回顾历史调查了盐岩地层的构造学。Hudec 等^[72]总结了盐岩地层的流动机理、底辟的发育过程以及由此导致的区域盐岩地层多样性。

在我国,张本书等^[73]较为系统地对盐湖盆地层序地层学的研究现状、研究方法进行了综述,指出在世界上研究程度较高的盐湖油气盆地中,绝大多数都是海相沉积盆地,而国内外还未见系统的盐湖盆地特别是陆相盐湖盆地层序地层学的研究成果。方志雄^[74-75]等研究了潜江盐湖盆地的盐间沉积,并非某种单一的岩性,而是随发育地区的不同而变化的特殊混合岩石,讨论了这种盐间沉积的岩石组分、沉积特征和油气地质意义,认为这类盐间沉积在化学成分和碎屑组成方面的韵律性变化具有明显的湖面升降变化含义,因而可将其韵律特性与层序地层单元进行对比分析。李明慧等^[76]对青藏高原秋里南木湖芒硝、黏土和原生硼砂的韵律沉积进行了分析,从物质来源、地貌和气候变化 3 个方面讨论了韵律形成的机制,讨论了沉积物所反映的气候环境变化。胡光明等^[77]简述了陆生盐湖的地层学,讨论了陆相盐湖盐源的复杂多样性,认为陆源和海源主要通过蒸发成盐,气候起着关键作用。孔敏等^[78]依据地震资料与钻井资料,采用定量与定性相结合的方法,从时空上分析该凹陷盐岩沉积与构造的响应关系。

张衍辉等^[79]探讨了平顶山盐田石盐矿床形成的构造条件和盐湖的沉积模式、沉积类型、成矿物源进行了分析。刘群^[80-81]等对钾盐矿床的沉积进行了分类,并指出了其重要性,并深入研究了我国中新生代陆源碎屑—化学岩型盐类沉积。王清明^[12]介绍了我国的盐类矿床资源及其分类特征,并系统地分析了盐类矿床的沉积地质特征。

1.2.2.2 盐岩力学特性

由于盐岩在能源以及废弃物处置等地下储存所具有的突出特点,使得盐岩地下处置具有重要的商业价值及战略存储背景。正是基于这一原因,50多年来,特别是近30年来,美国、加拿大及部分欧洲发达国家能源部门集中了大量人力、物力、财力对盐岩力学特性进行专项研究,亦举办了多次有关盐岩力学特性的研讨会:国际盐岩力学大会自1981年于美国召开第一届开始,到2012年法国巴黎为止,已经召开了七届。国内外许多研究机构和学者对盐岩的力学特性进行的研究,主要可分为盐岩的短期力学特性研究和流变特性研究。

盐岩的短期强度特性研究是指其在单轴拉伸、单轴压缩或三轴压缩作用下,在不考虑时间效应的前提下进行的力学试验及相关理论研究,从而探索并建立盐岩的强度和变形理论。Hansen等^[82]研究了不同地点的盐岩的强度特性,得到了盐岩的强度参数黏聚力 C 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 、泊松比 μ 的变化范围。Farmer and Gilbert^[83]对盐岩进行了三轴压缩试验研究,结果表明:当围压为 $0\sim 3.5$ MPa时,盐岩具有应变软化特征,当围压大于 3.5 MPa时,盐岩的应变软化现象不再出现,而且随着围压的不断增高,盐岩表现为应变硬化特征。Werner^[84]、Hansen等^[82,85]、Hunsche等^[86-88]对盐岩短期强度与变形特征进行了一些基本的力学特性的研究,所进行的实验主要有盐岩的单轴压轴、三轴压缩和剪切实验,获得了盐岩的抗压强度参数,建立了以莫尔—库仑强度理论为基础的盐岩强度理论。此外,国外也有结合盐岩的损伤及渗透特性来表征盐岩的强度特性,主要是利用声发射技术测定盐岩的应力状态与声发射数的变化关系。Popp等^[89]、Schulze等^[90]对盐岩的损伤、强度与渗透特性进行了一定研究,得到了盐岩的压缩—扩容边界线及破坏强度边界线,并指出在扩容边界线以下压缩区,盐岩不会发生破坏,并绘制了盐岩压缩—扩容边界示意图。Alkana^[91]通过三轴压缩并联合声发射测试技术对德国某盐矿盐岩进行试验研究,表明扩容边界和加载速率以及围压大小有关,增大加载速率,扩容边界稍微下移,但是当围压增大时,加载速率的影响就变得突出。

盐岩之所以能被选为能源地下储库介质,非常重要的原因是其具有良好的蠕变特性,即在低于宏观屈服极限的应力作用下发生缓慢的塑性变形,并不断累积即蠕变应变。盐岩的蠕变应变可达 $30\%\sim 40\%$,同时不会发生崩溃式破坏。而有关盐岩蠕变特性的试验研究方面,主要进行不同应力状态、温度条件下盐岩的单轴、三轴蠕变试验,一般试验的加载方式多为应力分级加载或温度分级加载。当然,盐岩的蠕变试验难以准确反映其蠕变特性,尤其是蠕变时间过短的蠕变试验往往没有真正进入稳态蠕变阶段。Hunsche^[86]、Cristescu等^[92-93]、Hampel^[94]都进行了盐岩蠕变方面的试验研究,研究表明在非常小的偏应力作用下,盐岩也具有很好的流变性;盐岩的蠕变速率是偏应力和温度的高阶非线性函数,同时并根据作者经验及试验条件对蠕变参数进行了一定的修正。

根据蠕变曲线的形状盐岩蠕变可分为三个阶段:初始蠕变、稳态蠕变、加速蠕变。针对盐岩的蠕变特性研究主要集中在初始蠕变和稳态蠕变这两个阶段。关于初始蠕变本构主要利用内变量理论及黏弹塑性模型理论来描述,Lux and Heusermann^[95]、Munson等^[96-97]、Aubertin等^[98-99]、Hunsche^[85,100]等利用内变量理论研究盐岩的初始蠕变本构,但