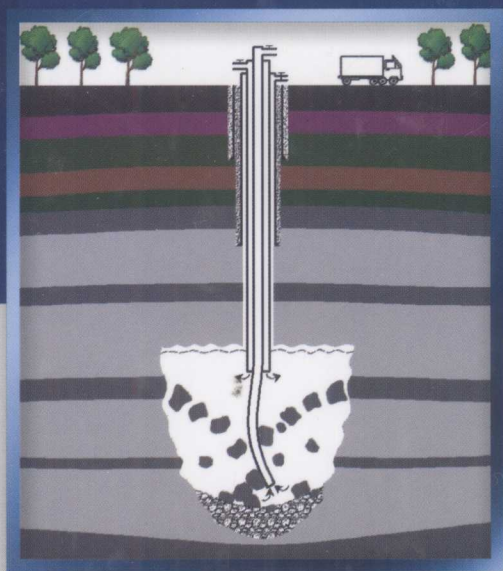




国家重点基础研究发展计划

盐穴储气库 造腔控制与安全评估



李银平 杨春和 施锡林 著



SEU 2592568



科学出版社

2592563

TE822

1

盐穴储气库 造腔控制与安全评估

李银平 杨春和 施锡林 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了盐穴储气库造腔控制与安全评估方面的最新研究及应用成果,包含多项盐穴储气库建设相关专利技术,并介绍了若干现场应用实例,主要内容包括:中国盐矿地质特征概述;夹层盐岩力学及溶蚀特性试验研究;层状盐岩复合本构及破损理论;水溶造腔夹层垮塌机理与动态控制技术及应用;盐穴储气库设计与安全评估。

本书可供盐穴储气库建造及评估方面的科研和工程技术人员参考,也可从事盐矿水溶开采的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

盐穴储气库造腔控制与安全评估/李银平,杨春和,施锡林著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-033522-7

I. ①盐… II. ①李…②杨…③施… III. ①地下储气库-安全评价
IV. ①TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 020501 号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:朱光兰
责任印制:赵 博 / 封面设计:科地亚盟

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

*

2012 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 2 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:240 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

三位作者全部任职于中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室。



李银平, 男, 42岁, 研究员, 博士生导师, 湖南湘阴人。1991年毕业于浙江大学工程力学系, 获流体力学学士学位; 2003年获华中科技大学土木学院岩土工程博士学位。主要从事深部盐矿地下油气储备中的关键岩石力学问题研究, 以及岩石类材料和结构的损伤断裂研究。先后主持或参与了国家自然科学基金面上项目和重点项目、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目及省部级科技计划项目等10余项, 并承担国家重大重点工程科技攻关项目(如西气东输造腔过程关键技术研究项目)多项。合作出版专著2部, 发表论文50余篇(SCI/EI收录30余篇), 授权发明专利7项、实用新型专利2项。获国家科学技术进步奖二等奖1项, 获省部级一等奖和三等奖各1项。



杨春和, 男, 49岁, 研究员, 博士生导师, 江西丰城人。国家杰出青年科学基金获得者, 教育部长江学者奖励计划特聘教授, 973计划项目首席科学家。1999年获美国内华达大学地质工程博士学位。目前任岩土力学与工程国家重点实验室副主任, 中国岩石力学与工程学会常务理事, 中国力学学会理事, 《岩土工程学报》副主编。主要从事深部能源储备中的岩石力学、工程地质、计算力学等多学科交叉领域的研究。现承担包括国家973计划项目和国家自然科学基金项目等在内的10多项国家级科研课题。发表相关论文150多篇(SCI/EI收录120余篇), 出版专著3部, 授权发明专利8项、实用新型专利4项。作为第一完成人获国家科学技术进步奖二等奖3项, 获省部级一等奖4项、二等奖2项。



施锡林, 男, 28岁, 博士, 助理研究员, 山东泰安人。2006年毕业于山东科技大学, 获工程力学专业工学学士学位, 2011年获中国科学院武汉岩土力学研究所岩土工程博士学位。主要从事盐岩工程力学特性、盐穴水溶造腔技术等方面的研究工作。参与了973计划项目、国家自然科学基金项目、中科院重要方向性项目等多项国家重大科研计划项目, 以及多项工程应用方面的科技攻关课题。发表EI收录论文10余篇, 授权发明专利7项、实用新型专利2项。获国家科学技术进步奖二等奖和湖北省科技进步奖一等奖各1项。

序

随着我国经济社会的快速发展,我国天然气消费量持续迅速增长,区域性供需矛盾日益凸显。近年来,我国正在大规模开展以“西气东输”和“川气东送”为代表的天然气长距离、大口径输运管道建设,密集的天然气管网初步形成。为了保障大规模天然气管网的运营安全,迫切需要建立与之配套的天然气储备库。

利用盐矿采卤溶腔建设盐穴地下储气库,是国际上公认的天然气储备方式之一。国外盐穴储气库大多建在海相沉积形成的巨厚盐丘中,而我国盐矿多为湖相沉积形成的薄层状结构,在这种多夹层盐矿中建造大型地下储气库,缺乏可供借鉴的成功经验。其主要科技难题体现在:水溶造腔腔体形态可控性差;夹层的意外崩塌可能引发造腔事故;夹层对储气库力学稳定及密闭性的影响机理不清。这些技术难题的存在,导致盐穴储气库设计与安全评估缺乏依据和技术支撑,已成为制约我国天然气大发展的技术“瓶颈”之一。

针对上述技术难题,李银平和杨春和研究员及其所在团队,紧密结合盐穴储气库工程实践,经过近十年的努力,在理论创新与技术研发方面取得了可喜的突破,初步形成了水溶造腔夹层垮塌控制关键技术,提出了适用于我国盐穴储气库设计与评估的标准及方法,并成功应用于亚洲第一座盐穴储气库——江苏金坛储气库等工程,解决了大量工程实际问题,取得了良好的效果。

该书主要介绍著者在我国盐穴储气库建造及安全评估方法与技术等方面的研究成果及应用实践,为我国盐穴储气库工程建设提供了第一手宝贵资料,具有广阔的应用前景。我十分高兴看到该书的出版,我深信该书将受到广大盐穴储气库建设及盐类矿床开采领域的研究和工程技术人员的欢迎,推动我国深部能源地下储备相关学科的发展。

鲜学福

中国工程院院士
2012年元月6日于重庆

前 言

利用盐矿水溶开采形成的地下空间——盐岩溶腔（盐穴）进行油气储备是国际上首选的方式。我国 99% 的天然气目前依靠长距离、大口径管道输送，需要建立占管道年输送量 20% 的储备，否则将严重威胁管道安全及天然气消费正常供给；此外，我国井矿盐开采历史悠久，存在大量废弃的已有采卤溶腔可供利用，且每年可新增溶腔近 1500 万 m^3 ，这些地下溶腔如不经处理将是重大地质隐患，如江西会昌、安徽定远两个盐矿采空区发生的地面塌陷事故已造成重大环境破坏和经济损失，因此，在盐矿地层中建造大型地下盐穴储气库，既可实现盐矿采卤溶腔综合利用及盐矿资源可持续开采，又是突破我国天然气大发展瓶颈的关键。

国际上的盐穴储气库大多建在海相沉积的巨厚盐丘中，而我国盐矿多为湖相沉积的薄层状结构，不溶或者难溶夹层的存在对盐穴储气库建设及风险评估有着不可忽视的影响，存在水溶造腔溶腔形态可控性差、夹层对溶腔稳定性和密闭性的影响机理不清等重大科技难题。在层状盐岩地层中建造大型储气库，国内外没有成功的经验和技術可以借鉴，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，开展盐穴储气库造腔控制和安全评估的理论与工程研究，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。

本书以盐穴储气库造腔控制与安全评估作为研究课题，通过试验研究、理论分析、数值模拟及现场试验方法，对层状盐岩地层盐穴储气库水溶造腔技术及稳定性和密闭性评估理论与技术进行了较系统的研究。具体内容如下：第 1 章，绪论；第 2 章，中国盐矿地质特征概述；第 3 章，夹层盐岩力学及溶蚀特性试验研究；第 4 章，层状盐岩复合本构及破损理论；第 5 章，水溶造腔夹层垮塌机理；第 6 章，水溶造腔控制技术与应用；第 7 章，盐穴储气库设计与安全评估。

除本书三位署名作者外，中国科学院武汉岩土力学研究所岩石流变力学研究组部分成员、在站博士后和研究生，以及部分合作单位研究人员参与了本书的组稿和撰写工作：中国人民解放军理工大学李二兵博士（第 1 章和第 7 章部分内容）；重庆大学彭向和教授和曹林卫博士（第 4 章部分内容）；武汉工业学院黄小兰副教授（第 3 章及第 7 章部分内容）；中国科学院武汉岩土力学研究所马洪岭博士（第 3 章部分内容）、姚院峰博士（第 2 章部分内容）以及张桂民博士（第 3 章部分内容）。

本书还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、吴文研究员、陈锋副研究员、张超副研究员、冒海军副研究员、王贵宾副研究员和郭印同博士，博士后任松（重庆大学副教授）以及研究生纪文栋、井文君、徐玉龙、孔君凤、杜超和刘伟等的辛勤劳动。

本书是在国家 973 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“化石能源储存与输送”（E50725414）、国家自然科学基金面上项目（E50774076）、科技部重大国际合作计划项目（2007DFB60100）以及中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司、中国石油化工股份有限公司天然气分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！

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 中国盐穴储气库建设概况	1
1.2 夹层对储气库水溶造腔的不利影响	5
1.3 夹层对储气库运行安全的影响	9
第 2 章 中国盐矿地质特征概述	11
2.1 中国盐矿地层赋存特征	11
2.1.1 井矿盐成盐时代	11
2.1.2 含盐系地层结构特征	12
2.2 中国盐矿夹层分布特征	12
2.3 我国典型盐矿的地质特征	15
2.3.1 江苏金坛盐矿	15
2.3.2 湖北云应盐矿	19
第 3 章 夹层盐岩力学及溶蚀特性试验研究	24
3.1 夹层盐岩力学特性试验	24
3.1.1 单轴压缩试验	24
3.1.2 三轴压缩试验	28
3.1.3 蠕变试验	32
3.2 夹层盐岩界面力学特性试验	35
3.2.1 盐岩与夹层的细观结构	35
3.2.2 界面拉伸试验	39
3.2.3 界面直剪试验	41
3.3 夹层溶蚀特性试验	46
3.3.1 化学分析	50
3.3.2 卤水浸泡夹层力学特性试验	51
3.3.3 水溶造腔夹层力学特性的弱化规律	59
3.4 盐岩溶解试验	60
3.4.1 试验装置与原理	60

3.4.2 试验数据分析	64
第4章 层状盐岩复合本构及破损理论	73
4.1 互层盐岩体的 Cosserat 复合本构	73
4.1.1 互层岩体三维扩展模型代表单元	73
4.1.2 三维 Cosserat 介质扩展本构关系	75
4.2 复合盐岩体破损分析	75
4.3 层状盐岩体细观损伤本构模型	77
4.3.1 本构模型建立	77
4.3.2 模型验证与应用	81
第5章 水溶造腔夹层垮塌机理	85
5.1 夹层垮塌力学模型	87
5.1.1 造腔过程中夹层的受力状态	88
5.1.2 夹层应力分布及变形规律分析	89
5.2 夹层垮塌的破坏模式及判据	93
5.2.1 夹层垮塌破坏模式	93
5.2.2 夹层垮塌破坏判据	95
5.2.3 夹层垮塌趋势判断准则	97
5.3 多种造腔因素对夹层垮塌的影响	100
5.3.1 盐岩溶蚀	101
5.3.2 卤水侵蚀	107
5.3.3 溶腔内压	110
5.3.4 地应力	115
5.3.5 夹层厚度与跨度之比	117
第6章 水溶造腔控制技术与应用	120
6.1 夹层垮塌的预测和现场辨识	120
6.1.1 夹层垮塌预测方法	120
6.1.2 造腔现场夹层垮塌辨识	123
6.2 夹层垮塌动态控制	124
6.2.1 夹层垮塌调控措施	124
6.2.2 夹层垮塌动态控制流程	125
6.3 油垫层深度检验方法	129
6.3.1 检验原理与装置	129
6.3.2 现场操作步骤	130
6.4 夹层垮塌事故应急处理	132

6.5 工程应用	134
6.5.1 溶腔畸形及套管损伤分析案例	134
6.5.2 夹层垮塌现场辨识案例	136
6.5.3 增加溶腔有效体积案例	141
第7章 盐穴储气库设计与安全评估	145
7.1 储气库设计考虑的主要因素	145
7.2 安全评估的内容与标准	146
7.2.1 安全评估的主要内容	146
7.2.2 稳定性评价准则	147
7.2.3 密闭性评价准则	150
7.3 盐穴储气库设计与安全评估流程	155
7.3.1 调查拟建储库区域地质特征	155
7.3.2 获取地层工程力学参数	155
7.3.3 确定储气库造腔设计参数	155
7.3.4 确定储气库运行参数	158
7.3.5 溶腔密闭性检测与评估	160
7.3.6 储气库运行期监测与评估	167
7.4 盐穴储气库密闭性检测与评估实例	171
7.4.1 盖层岩心毛细管封闭能力测试	171
7.4.2 盐岩地层渗透性原位测试	174
7.4.3 固井套管及盐层气密性测试	177
参考文献	181

第 1 章 绪 论

1.1 中国盐穴储气库建设概况

1. 中国石油及天然气消费现状

近年来，我国的石油需求量持续快速增长，与此同时我国的石油进口量也不断攀升，石油进口依存度逐年递增，具体统计数据（赵俊平、马小涛，2011）见图 1.1。石油能源对于我国经济有着至关重要的作用，石油消费过度依赖国外进口给我国能源安全带来了巨大风险。依据国际能源安全标准，一个国家的石油进口依存度为 40%~50% 时属于“不安全”，大于 50% 时属于“危机”。从 2005 年起我国石油进口依存度已突破 40%，进入不安全期，2008 年后更是进入了危机期，我国迫切需要建立与军事及经济发展相协调的国家战略石油储备。

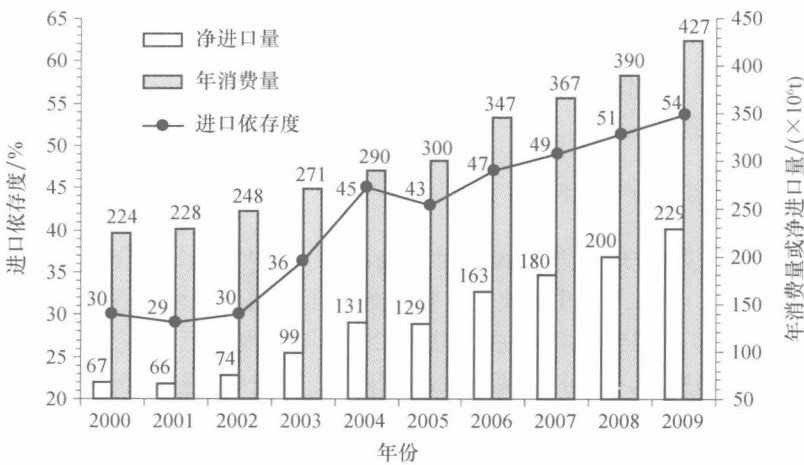


图 1.1 我国近年的石油进口依存度

与此同时，随着我国经济社会的快速发展及天然气储运等基础设施的大规模建设，我国天然气消费量持续迅速增长。根据国家统计局最新数据，我国近几年的天然气消费量如图 1.2 所示。国务院发展研究中心预计 2015 年我国天然气消

费量将增至 1500 亿 m^3 , 2020 年将增至 3000 亿 m^3 (刘雪, 2010)。从图 1.2 中可以看出, 我国天然气消费量正处于高速增长的时期, 并且预计在未来很长一段时间都将保持这种高速增长的势头。



图 1.2 我国近年的天然气消费量及其预测

在我国天然气市场快速发展的同时, 天然气需求的季节性波动也给我天然气供应安全带来了巨大的挑战。2009 年年底, 天然气“气荒”波及了大半个中国, 武汉、杭州、南京、重庆、郑州等多个城市出现了巨大的天然气供应缺口, 出租车因加气难而排起车龙长阵; 城市居民的日常供暖也受到了严重影响, 如北京冬季高峰时天然气日消耗量超过 5000 万 m^3/d , 而在夏季低谷消耗量不足 400 万 m^3/d (王秀强, 2010)。

在此背景下, 为保障我国天然气供应安全, 加快天然气战略储备及调峰气库建设就显得至关重要。

2. 中国密集的油气管网

在加快油气勘探开发力度的同时, 我国还大力推进长输管道建设, 西气东输、川气东送、宁兰、忠武、陕京、冀宁等主干管道相继建成投产后, 全国性天然气管网的主体框架就已经形成。截至 2005 年年底, 已建成天然气管道共计 2.62 万 km (刘然冰, 2008); 截至 2008 年年底, 我国已建成投入运营的长输油气管道 6 万多 km, 其中天然气管道 3.3 万 km (王旭辉、吴莉, 2009)。我国密集的油气管网布局已初步形成, 如图 1.3 所示。

按照与市场相匹配管道里程和供应能力计算, 初步预计, 2015 年中国天然气管道长度将接近 10 万 km, 其中主干道和支干线的建设将达到 2.5 万~4.0 万 km, 支线建设将达到 3.5 万~4.0 万 km (李晓慧, 2010)。如此大规模的长输天然气管线迫切需要大量安全、高效的调峰保安气库。



图 1.3 中国密集的油气管网示意

在大口径天然气长输管道的中下游,主要是我国中东部地区,最需要建立天然气地下储库,但是到目前为止这些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;而我国中东部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。

3. 国内外地下储气库建设概况

利用深部盐矿水溶开采形成的地下空间进行油气储备已成为国际上首选的能源储备方式。美国、德国、加拿大、法国等西方发达国家都已建成大量的大规模盐岩地下油气储库群,用于国家能源战略储备。据统计,截至 2009 年年底,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 (丁国生、张昱文,2010)。

表 1.1 世界盐穴地下储气库统计 (截至 2009 年年底)

国 家	储气库/座	注采气井/口
美国	31	149
德国	23	173
加拿大	9	34
法国	3	36
英国	3	11
亚美尼亚	1	18
波兰	1	10
丹麦	1	7
中国	1	6
葡萄牙	1	3

目前,为保障天然气供应安全,国际上天然气储备占总消费量的比重一般在 10%左右,有的国家或地区达 15%以上(如美国为 20%、俄罗斯为 16%)。根据国际惯例,我国需建立年消费量 10%~15%(即 2020 年 300 亿~450 亿 m^3) 的天然气储备,以确保天然气供应安全,而目前中国的天然气储备仅为消费量的 3%左右(钟晶晶,2010),远低于世界平均水平,调峰能力明显不足。

我国目前的天然气储备概况如下:

中国的地下储气库建设起步较晚,20 世纪 70 年代在大庆油田曾进行过利用枯竭气藏建设储气库的尝试。真正开始研究地下储气库是在 90 年代初,随着陕甘宁大气田的发现和陕京天然气输气管线的建设,才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。

到目前为止,在天津市附近的大港油田利用枯竭凝析气藏建成了三个地下储气库,即大张坨地下储气库、板 876 地下储气库和板中北储气库,这三个储气库总的调峰气量为 $20.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右(丁国生、谢萍,2006)。从近几年的储气库对确保京津地区的安全供气所发挥的作用来看,储气库已经成为天然气消费和输送过程中不可缺少的重要组成部分。

西气东输工程西起新疆轮南,途经 10 个省、自治区、直辖市,全长约 4000km,设计年输气量达 120 亿 m^3 ,现正在进行的增输工程达到 170 亿 m^3 。为确保西气东输工程的顺利实施,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,在长江三角洲地区选择了江苏省金坛盐矿和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(庞维龙、屈丹安,2008),地下储气库已于 2006 年陆续投入使用。另外,中国石油天然气集团公司(简称中石油)在湖北应城和河南平顶山也正在筹建天然气储气库,并已经通过了国家层面的可行性论证。中石油计划在 2011~2015 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%(王秀强,2010)。

为配合川渝天然气东输“两湖”地区,我国还将在长江中游地区(如湖北潜江)建设地下储气库。同时,川气东送管线长江下游的金坛盐穴储气库也马上投入建设,以确保川气东送工程的供气安全。

可见,在盐岩地层中实施油气地下储备已成为我国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,未来10~20年,我国将迎来地下储气(油)储库建设的高峰。

1.2 夹层对储气库水溶造腔的不利影响

国内外深部盐矿开采生产实践表明,单井油垫对流法水溶开采是一种先进的开采工艺,在盐穴储气库腔体形态控制方面具有许多突出优点:

(1) 造腔早期,建槽效率高。在短期内可以建成形态较为理想的大型沉渣槽,有利于提高盐层的利用率、增大单腔储库体积。

(2) 造腔中期,可以有效控制上溶,防止溶腔形成过程中顶板的过早垮塌;可以人为控制侧溶时间,以形成横向尺寸适当的腔体。

(3) 造腔后期,可建成更为稳定的顶板形态,有利于提高顶板稳定性,同时可以达到预留一定的腔顶盐岩保护层的目的。

以上优点均有利于保证盐穴储气库建成后的安全性,是其他水溶开采方式所不能达到的,因此这种水溶造腔方法广为世界各国采用。

如图1.4所示,单井油垫对流法水溶造腔的基本工艺流程是:通过钻井使得盐层与地面连通,在钻井中下入生产套管、造腔外管、造腔内管等管柱;安装好井口装置后,向井下注入饱和卤水充满所有套管及其环隙;接着将柴油从生产套管和造腔外管的环隙注入,直至柴油充满环隙及溶腔顶部,油垫层的深度由造腔外管下入深度控制;然后把淡水或淡卤水注入井下,并通过一定的技术手段将卤水收集到地面,地下盐腔容积在盐岩溶蚀后不断扩大;适时调整造腔内管和造腔外管的深度,并根据实际情况采用正循环或反循环方式,以达到人为控制腔体周围盐岩溶蚀程度的目的,从而最终获得较为理想的储库腔体形状。

国外用于地下储库的盐矿床普遍为盐丘或厚盐层,盐岩品位较高、均质性好,水溶造腔施工比较容易开展,可以得到较为理想的储库形状,且储气能力较大,如德国的盐穴储气库,其单腔直径为50~80m;高度为100~300m,最高达550m;单库容积一般大于30万 m^3 。

我国在建或拟建盐穴储气库的场址均为多夹层盐岩矿床,其基本特点是矿层

层数多、单层厚度薄，矿床中含有大量难溶夹层，如硬石膏层、钙芒硝层、泥岩层等（王清明，2003；杨春和等，2009）。难溶夹层的滞后溶蚀会导致腔体内流场紊乱，腔体形状很难控制，形态失控严重时会导致腔体报废。另外，难溶夹层突然大面积垮塌（图 1.5），会导致井下套管弯曲、破损、局部颈缩等问题出现（图 1.6、图 1.7），此类事故会造成诸多次生问题。例如，造腔内管弯曲后，修井过程中强行拔出会损伤造腔管柱（图 1.8），如果造腔外管管壁被划破，在后续造腔过程中柴油就会从损坏部位溢出，严重时将导致无法在腔体顶部形成油垫

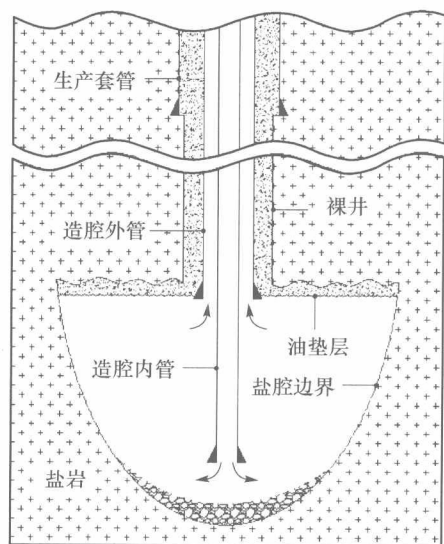


图 1.4 单井油垫对流水溶造腔示意图
(盐丘或厚盐层)

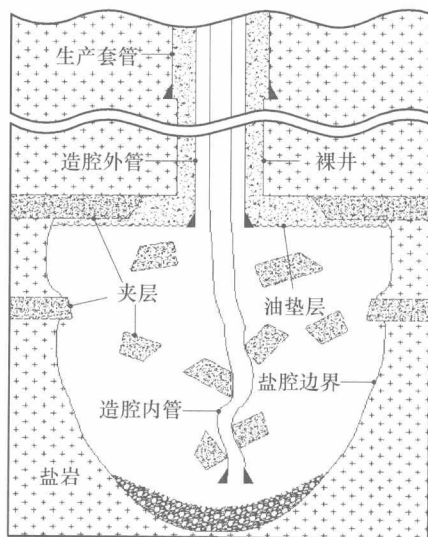


图 1.5 难溶夹层垮塌及其造成的
套管损坏



图 1.6 某盐穴储气库造腔内管弯曲



图 1.7 某盐穴储气库造腔内管弯曲

层,在拔出受损套管过程中还易造成卡管事故;造腔内管接箍损坏(图1.9),会使出水口深度发生改变,导致腔体形状失控。这些事故严重影响了水溶造腔进度和质量。

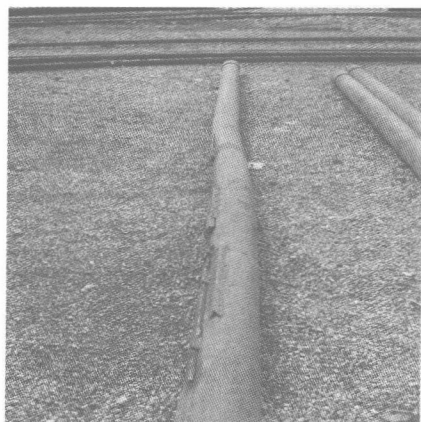


图 1.8 某盐穴储气库造腔管柱划伤

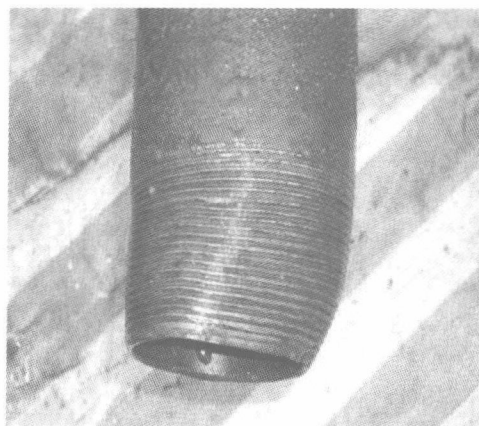


图 1.9 某盐穴储气库套管接箍损坏

国外在多夹层盐岩矿床水溶造腔过程中,也存在如何处理难溶夹层的技术难题,有公开文献报道的典型案例分析如下:

某盐穴声呐测量结果如图1.10所示(Crossley and Graeme, 1998),该盐穴

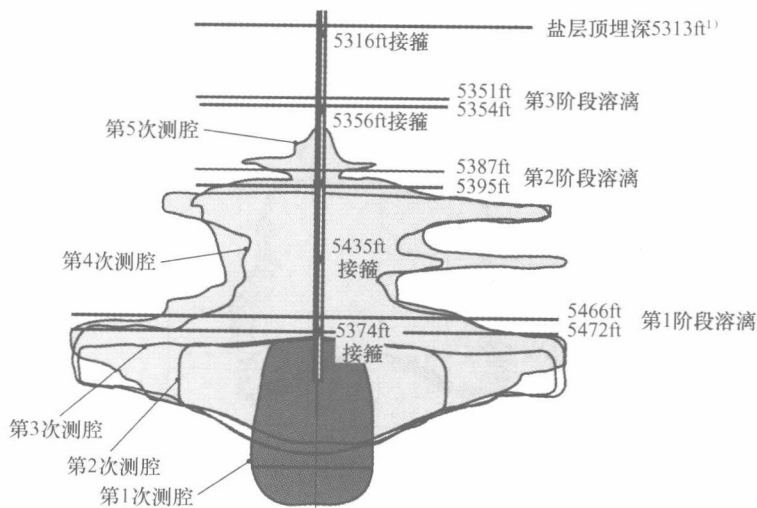


图 1.10 水溶造腔各次声呐测腔腔体轮廓

1) 1ft (英尺)=3.048×10⁻¹m, 下同。