

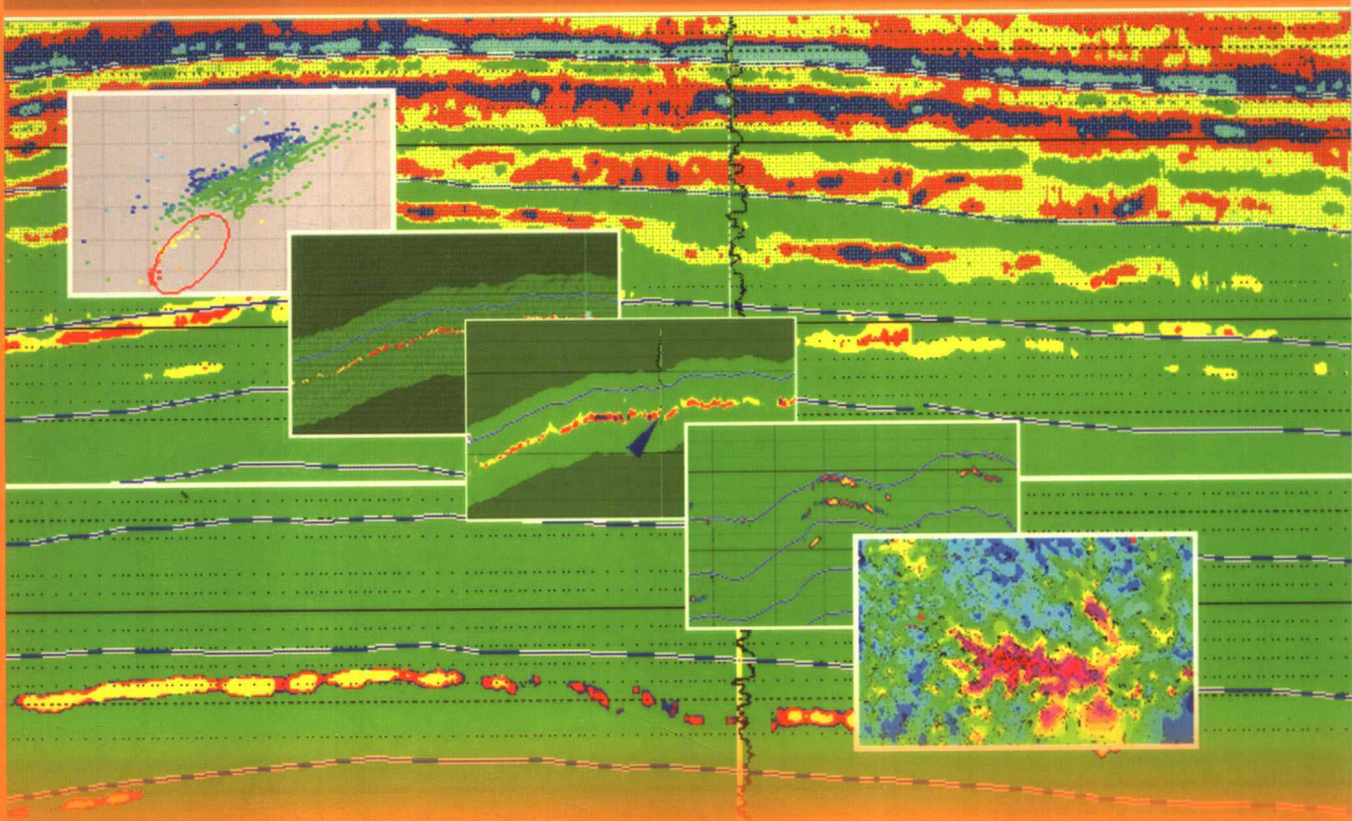


中国石油

中国石油天然气股份有限公司

2006年度 物探技术攻关论文集

中国石油勘探与生产分公司 编



石油工业出版社

天然气地下储气库技术 及数值模拟

谭羽非 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为我国燃气输配工程技术人员和管理干部提供一本全面理解储气库建设和研究的参考读物。全书共分 10 章, 分别介绍了国内外各类型地下储气库的结构特点、建设现状及发展趋势, 城市燃气负荷预测与调峰储气量的确定, 各种类型地下储气库技术、运行关键问题及数值模拟, 储气库监测及储量核实, 储气库垫层气, 储气库地面注采系统工艺, 注采管网及优化模拟, 以及储气库的经济评价等。同时较系统地介绍了笔者研究成果及所开发的数值计算软件。

本书可供城市燃气工程、天然气工业、石化行业、能源工程及其他领域有关专业的工程技术人员、经营管理人员、科研人员阅读, 也可供高校相关专业教师、本科学生、研究生作为教学或学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

天然气地下储气库技术及数值模拟/谭羽非等编著.
北京: 石油工业出版社, 2007. 12
ISBN 978-7-5021-6301-3

I. 天…

II. 谭…

III. ①天然气-地下储气-技术

②天然气-地下储气-数值模拟

IV. TE 822

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 159866 号

天然气地下储气库技术及数值模拟
谭羽非 等编著

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15.75

字数: 400 千字 印数: 1—1000 册

定价: 60.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

为平抑供气峰值波动,保证城市连续、安全、合理地供气,建造天然气地下储气库是最为有效的手段之一。

我国地下储气库的研究和建造还处于起步阶段,目前已建成的有天津大张坨和板 876、大庆喇嘛甸、金坛盐穴等几处地下储气库,其试储(气)库设计、地面工艺及施工技术等方面具有很大开创性,为我国储气库建设与研究工作打下了基础,一些关于储气库综述性及实践经验的文章陆续见有报道。但由于地下储气库既是一个独立系统,也是复杂输气系统的组成部分,其操作和运行机理具有复杂性和随机性,目前国内迫切需要系统地介绍各种类型地下储气库技术、工艺设计及数值模拟的专有文献,以拓展我国储气库科学研究的范围,并为工程实践过程提供理论依据和技术支持。

本书共分 10 章,分别介绍了国内外各类型地下储气库的结构特点、建设现状及发展趋势,城市燃气负荷预测与调峰储气量的确定,各种类型地下储气库技术、运行关键问题及数值模拟,储气库监测及储量核实,储气库垫层气,储气库地面注采系统工艺,注采管网及优化模拟,以及储气库的经济评价等。同时较系统地介绍了笔者的研究成果及所开发的数值计算软件。本书还列举了大张坨地下储气库、金坛盐穴地下储气库等国内外典型储气库案例,使有关理论更加生动具体,更易于读者理解。

本书所列举的关于地下储气库的各主题,其中一部分是在国外已经进行了研究工作,有了较为成熟的研究成果;另有相当一部分是从我国天然气工程建设实践中提炼,自主研究并取得的一些成果。在油气藏工程和燃气输配学科领域,本书进行了集成与开拓。同时本书注意从实际工程技术及实践中提炼出理论,尽量使相关理论既有针对性,又有较高的概括性和普遍的适应性,弥补了同类书籍的缺陷。

本书为我国燃气输配工程技术人员和管理干部提供一本全面理解储气库建设和研究的参考读物。可供城市燃气工程、天然气工业、石化行业、能源工程及其他领域有关专业的工程技术人员、经营管理人员、科研人员阅读,也可供高校相关专业教师、本科学、研究生作为教学或学习参考书。

本书由哈尔滨工业大学和中国石油大学(东营)两校教师合作编著完成,其中第 8 章、第 9 章由中国石油大学李玉星和唐剑锋编著,其余各章节均由哈尔滨工业大学谭羽非编著,全书由谭羽非统稿。

本书得到中国石油勘探开发研究院廊坊分院储气中心的张昱文所长、丁国生总工程师、王皆明、郑雅丽、任晓萍等给予的关心和帮助,三年的科研合作,结下了很深的友谊,在此表示衷心感谢。

感谢西南石油大学的严宇博士,哈尔滨工业大学的展长虹博士、林涛博士、曹琳博士、卜宪标博士,很多问题是经过大家共同讨论才得以解决的。感谢哈尔滨工业大学的王思莹、赵金辉、李娜、李娟娟等同学,帮助整理实验数据并处理了大量计算数据。

限于编者学术水平及教学经验,书中难免有错误和不妥之处,竭诚希望读者及使用本书的师生批评指正。

谭羽非

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 天然气工业与地下储气库	(1)
1.2 天然气地下储气库系统构成及作用	(3)
1.3 天然气地下储气库类型	(6)
1.4 国内外地下储气库建设概况	(10)
1.5 国内外地下储气库研究现状	(14)
1.6 国内外地下储气库数值模拟研究	(16)
1.7 地下储气库建设发展趋势	(19)
第2章 城市燃气负荷预测及调峰储气量的确定	(22)
2.1 燃气负荷的基本概念	(22)
2.2 燃气负荷预测模型	(26)
2.3 城市燃气调峰负荷量的确定	(32)
2.4 调峰负荷预测软件	(33)
第3章 枯竭油气藏型天然气地下储气库	(42)
3.1 油气藏圈闭有效性评价及开采分类	(42)
3.2 储气库建设的技术要求	(43)
3.3 储气库设计参数的确定	(49)
3.4 储气库最优设计方案的确定	(53)
3.5 储气库数值模拟	(58)
3.6 大张坨地下储气库工程实践	(66)
第4章 含水层型天然气地下储气库	(70)
4.1 基本概念	(70)
4.2 储气库的技术要求	(74)
4.3 储气库开发运行方案的制订	(76)
4.4 含水层地下储气库数值模拟研究	(80)
第5章 盐穴型天然气地下储气库	(93)
5.1 盐层地质特征及建库工艺	(93)
5.2 运行过程的关键技术问题	(98)
5.3 盐穴天然气地下储气库数值模拟	(105)
5.4 盐穴地下储气库多腔注采动态运行模拟软件	(122)
5.5 金坛盐穴储气库	(125)
第6章 天然气地下储气库监测及库存量校核	(129)
6.1 储气库天然气泄漏损耗的构成	(129)
6.2 储气库动态监测技术	(131)
6.3 天然气储气库库容量核实	(135)

6.4	天然气储气库泄漏量的确定	(137)
第7章	天然气地下储气库的垫层气	(142)
7.1	基本概念	(142)
7.2	国内外地下储气库垫层气的研究现状	(144)
7.3	惰性气体的来源及与工作气的混合特征	(146)
7.4	CO ₂ 深埋作地下储气库垫层气的可行性	(150)
7.5	地下储气库内混气数学模型的建立及求解	(155)
第8章	天然气地下储气库地面注采工艺	(164)
8.1	地下储气库地面系统的组成及特点	(164)
8.2	地下储气库地面采气净化处理工艺	(169)
8.3	地面注采气工艺流程设计及优化	(193)
8.4	注采气关键设备及选型	(195)
第9章	注采气管网及优化模拟	(211)
9.1	管网的表示方法	(211)
9.2	管网水力计算模型	(219)
9.3	储气库地面注采气管网系统优化计算方法	(223)
9.4	参数优化问题	(226)
第10章	天然气地下储气库的风险分析和经济评价	(232)
10.1	地下储气库的风险分析	(232)
10.2	地下储气库的经济性	(233)
10.3	地下储气库的总费用	(235)
10.4	地下储气库的单位成本	(238)
10.5	各种储气方式成本对比	(239)
参考文献		(243)

第 1 章 绪 论

1.1 天然气工业与地下储气库

1.1.1 天然气工业发展综述

近半个世纪以来,世界一次能源结构发生了较大的变化。1950 年煤炭在世界一次能源结构中占 57.5%,到 1996 年下降为 26.9%,天然气所占比例由 1996 年的 23.5%增加到 35%~45%。在能源结构中,天然气逐步成为压倒石油和煤炭的“首席能源”。

天然气作为 21 世纪新的替代能源,由于它具有热值高、环境污染小和经济效益高等方面的优点,对改善能源结构、缓解能源供需矛盾、提高环境质量起到重要作用。近年来世界天然气工业发展迅速,天然气需求量以 3% 的年均速度迅速增长。据国际能源组织预测,到 2010—2020 年,世界天然气需求量将达到 $3.28 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

中国在过去相当长时期内,煤炭能源占据主导地位,所占比重为 67.7%,石油为 22.7%,水电、核电、风能、太阳能为 7%,天然气所占比重仅为 2.6%。目前世界人均年消费天然气 403 m^3 ,而中国仅为 14 m^3 ,是世界平均水平的 1/29,是俄罗斯的 1/207,因此,中国天然气工业的发展任重道远。

中国具有较为可观的天然气剩余探明可采储量,以及至少 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的待探明可采储量,具备产量快速增长的物质基础。但是我国天然气工业起步较晚,1995—2000 年我国天然气产量平均以每年 7% 左右的速度增长,1999—2003 年增长幅度达 10% 左右,2004 年产量达到 $407.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,较上年增长 17.5%,首次成为天然气净进口国。预计到 2020 年,我国天然气产量将达到 $1200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,2020 年天然气消费量将达到 $1600 \times 10^8 \text{ m}^3$,与预计到 2020 年的年产量尚存在 $800 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的缺口,我国天然气供需矛盾将逐年加重。

为了促进天然气工业的大规模发展,实现经济的持续增长,国家已确定把开发利用天然气作为优化能源消费结构、改善大气环境的一项重要措施。随着西部大开发、引进俄罗斯及中亚国家天然气等一系列改善我国能源结构战略的实施,我国天然气大规模利用的时代已经到来。

天然气的广泛应用,使中国天然气储备不均衡的现象日益突出。经济发达的东部沿海地区和需要冬季采暖的华北、东北地区储备相对不足,而中西部地区和海洋中储备充足,加之消费增长过快,部分城市甚至高达 20% 的年增长率,“气荒”现象席卷全国各地,继北京、广州之后,西安、重庆、郑州等不缺气源的城市也相继出现天然气供应紧张局面。从直接原因看,冬季天然气供应紧张是由于我国冬夏用气峰谷差较大造成的,以北京为例,2004 年冬季最高用气量与夏季最低用气量之比为 13:1。其根本原因是由于缺乏可靠的天然气商业储备体系,特别是用于季节性调峰的大型地下储气库。据不完全统计,全球 10% 的天然气用气量是由地下储气库供应,而欧洲是 20%,俄罗斯则达到 30%,因此,在我国加快构建天然气商业储备体系,势在必行。

随着世界一次能源结构的变化和我国能源工业的快速发展,天然气工程已成为关系到国家能源结构、城市基础设施的重要项目,是我国投资大、涉及范围广的重要规划内容。

加快开发利用天然气，提高天然气在能源消费中的比重，优化能源结构，保护环境是坚持可持续发展的重要举措。2001年开工的“西气东输”工程，输气管道起自塔里木的轮南，途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、安徽、江苏、上海等9个省、市、区，终点上海，全长约4000km，管径1016mm，压力10.0MPa，干线穿越黄河三次、穿越淮河一次、穿越长江一次，工程的投资规模高达1500亿元。2003年建成，实现全线贯通并开始向上海供气，初始供气规模为 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，2005年实现供气规模 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，将稳定供气30年。实施“西气东输”，将我国西部地区天然气通过管道输往急需清洁能源的东部地区，是解决我国长江三角洲和上海城市用气较为集中的问题，满足东部地区天然气能源迫切需要的一个重要系统工程。将西部的资源优势转化为经济优势，对我国经济的发展和能源结构的改变、环境的改变和人民生活质量及工业产品质量的提高有重大意义。

1.1.2 建设地下储气库的意义

天然气运输和消费体系不同于其他燃料，有自身的特殊性。一方面，在天然气供应和消费之间存在时间不均衡的固有矛盾，如年不均衡性、月不均衡性、日不均衡性，气量相差可以达到10~20倍；另一方面，为保证安全可靠连续的供气，还需要对意外事故、战争等进行战略储备。随着天然气国际贸易和边远气田的开发，输气的距离和运时的增加，最近几年天然气这种供、产、销矛盾有加剧的趋势。通常的解决方法有提高管线的输送压差、建立地面各类高低压储存球罐，但这两种方式只能小范围地解决用气不均，对于城镇中型或全国范围内的大型燃气系统都无一例外的需要一定规模的储气措施，在用气高峰，由储气设施补充供给，在用气低谷，将供气源的剩余气体在储气库中储存起来。

对于我国的“西气东输”工程，如何保障如此长距离、大规模的天然气输送管道工程的供气安全，既满足长江三角洲地区及沿线用户因用气行业结构不同及季节变化而出现的用气高峰低谷负荷，实现平稳调峰，又能够在发生突发事件时，实现连续可靠的供气。纵观世界天然气发达的国家，最常见的方法是建设与长输管线、用户市场相配套的天然气地下储气库，从而经济有效地保障供气安全。为确保“西气东输”工程对长江三角洲地区安全稳定的供气，就必须在长江三角洲地区建设地下储气库，保证长输管线的高效、平稳运行。这是“西气东输”工程的一项必不可少的配套工程。

20世纪燃气工业的一项主要技术成就是利用开采后的枯竭油气田、地下含水层、含盐岩层或废矿井来建造天然气地下储气库，用以最大限度的满足城市用气，保证供气稳定可靠，削峰填谷，平抑供气峰值波动，优化供气系统。目前建造地下储气库是对城市用天然气进行季节性调峰的最合理、有效的方式之一。

在我国开展天然气地下储气库的建设和研究工作，不仅可以缓解沿海发达地区能源供应不足的现状，而且对于能源合理有效利用以及整个国民经济的正常运转及可持续发展都有重要的战略意义。

自20世纪初出现天然气地下储气库以来，其发展速度基本与工业发展和社会发展的速度相一致。随着中国天然气工业发展的黄金时刻的到来，地下储气库必将会随之发展。而且可以预见，随着知识经济和环境保护事业的发展，天然气地下储气库必将进入更快的发展时期。地下储气库在未来的经济生活和社会生活中将发挥更加重要的作用。

今后将会在我国东部地区包括东北、华北、长江中下游地区以及西气东输沿线建设一批地下储气库，以保障这些地区的用气需要。综合考虑，中国战略储备规模为全年进口气量的8.3%较合适，即能储备一个月的进口气量，储气库规模应为年总用气量的16%~

19%，预计 2015 年中国与输气管道系统配套的地下储气库总有效工作气量为 $93.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.2 天然气地下储气库系统构成及作用

1.2.1 储气库系统构成

天然气地下储气库系统主要由地下气藏储气层、注采气井、压缩站、脱水站、输气干线四大部分组成。此外，还包括观察井、分离器、地层水处理系统和排放系统、压力调节和计量系统、甲醇注入系统和单井加热炉，以及发电机组和其他辅助设施。储气库的气体由三部分组成：垫层气、工作气和未动用气。

1.2.1.1 地下气藏储气层

地下气藏的地质构造，是具有一定渗透能力的多孔介质，多孔介质的孔隙为天然气的储存提供空间，而渗透率使气体能在其中流动；储层上面有非渗透性盖层，盖层通常是弯曲或是拱形的，能够阻止气体从上面溢出，同时也起到侧面遮挡作用，有时断层产生的垂直断面在储层的一侧或多侧起到封闭作用；非渗透层或底水在储层底部起封隔作用。

地下气藏分为两大类：定容气藏和水驱气藏。定容气藏的四周均被非渗透层封隔，气藏的容积和形状均保持不变。水驱气藏的顶部和四周是非渗透层，而在底部被水体所封闭，在水驱气藏采气时，随气藏压力降低，底水就会逐渐侵入气藏，到衰竭时，气藏除了一个很小的气顶外，其余部分均充满水。

具有水侵的气藏，穿过外边界存在流体流动。在拟稳态流动期间，进入气藏的水侵速度决定于水的流度、气藏与水体的接触面积、气藏和水体中的压力分布。

1.2.1.2 注采井和观察井

储气库注气井和采气井大部分合用，注采气井一般选择在构造顶部区域、物性比较好的地方。一般来说，注入井中含气饱和度最高的井，即为注气期间承压最大的井，在采气时也是产量最高的井。

在采气时，单井流量的计算公式为：

$$Q = C(p_i^2 - p_e^2)^n \quad (1.1)$$

式中 Q ——采气流量， $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ；

p_i ——关井井口压力，MPa；

p_e ——开井井口压力，MPa；

C, n ——通过测试得出的系数，不仅与有关特性有关，还表明油管及井在有效控制范围内储层的共同特征。

在注气时，单井流量的计算公式为：

$$Q = C(p_e^2 - p_i^2)^n \quad (1.2)$$

储气层的观察井，主要是观察天然气在储层厚度方向的推进速度；检查盖层密封性设置；在先导性试验中，测定气水界面、观察边底水情况；监测天然气是否沿断层流到上覆层；研究储层和井筒温度变化；在含气边界附近测定压力。观察井的选择十分重要，这种井往往是注气井也是采气井。

1.2.1.3 集输系统

储气库集输系统是连接井和中心站的中间环节，与一般集输系统区别不大，只是集气管线要粗一些，容积大一些，这样才能和储气库的大井眼井相匹配，管线流速的计算公

式为:

$$Q = 0.001368 \left[\frac{(p_1^2 - p_2^2) \times D^5}{GTLf} \right]^{0.5} \quad (1.3)$$

式中 Q ——流量, m^3/h ;

p_1, p_2 ——上游、下游压力, MPa ;

D ——管的内径, m ;

T ——天然气温度, K ;

L ——管线长度, m ;

G ——气体相对密度;

f ——范宁摩阻系数。

1.2.1.4 压缩机

一般地下储气库都设置注气压缩机,通常设在离井近的中心站,因为地下储气库的压力比管网系统压力高,一般压缩机用于注气。但有时为提高采出能力,采气时也用压缩机。

由于井口的最大注气压力是由地层物性决定的,由这个压力可以推算注气压缩机出口压力。在额定出口压力的前提下,只能通过优选入口压力来确定适宜的压缩比。压缩机入口压力与输气干线至储气库的节点处管压相对应,节点处的管压既要与输气干线系统协调一致,又要兼顾注气压缩机合理的压缩比。在多数情况下输气干线与储气库之间通过单线连接,在采气周期储气库至输气管线的压力就左右着采出气的外输压力,也影响着最小采气压力。

最基本、最常用的计算往复式压缩机理论功率的方程是:

$$HP = QT_1 Z_1 \left(\frac{k}{k-1} \right) \times \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1.4)$$

式中 HP ——理论功率, kW ;

Q ——流量, m^3/h ;

p_1, p_2 ——入口压力、出口压力, MPa ;

T_1 ——入口温度, K ;

Z_1 ——入口端天然气压缩因子;

k ——天然气的热容比。

1.2.1.5 中央脱水装置

地下储气库总含有一定的水,有时水比较活跃,当管线中的干气注入地下后,储层中的水就会蒸发到天然气中,天然气中含水量高,就不符合管输要求,因此天然气采出后必须脱水。

在实际应用中,所有储气库的中心脱水装置都是用乙二醇脱水器,比较经济,且性能好,如不遇水流段塞的话,会一直运转正常。

1.2.2 储气库的作用

地下储气库主要有以下几方面的作用:

(1) 协调供求关系与调峰。

缓解因各类用户对天然气需求量的不同和负荷变化而带来的供气不均衡性,其特点在时间上表现为季节(夏、冬季)、月、昼夜和小时的不均衡性。在冬季取暖季节,由于取暖用燃气装置、热电中心、家庭和地区锅炉房、工业企业锅炉房等用气负荷的增大,使耗气的季节性不均衡性表现得最为突出。如20世纪80年代中期,苏联每年城市用气中,夏季

用气量最低时只为管输气量的 0.74；而在冬季，耗气量最大，超过管输气量的 33%~58%。2000 年这种不均衡性比 1985 年增大 1 倍多。其他许多国家，这种不均衡性也呈不断加剧的趋势。如法国，年度每月高低耗气量之比在 1987 年为 5:1，到 2003 年达到 14:1，2004 年冬季北京天然气耗气量最高达到夏天的 13 倍。用气量如此大的变化，仅靠输气系统本身是无法满足的，必须依靠地下储气库进行调峰，达到平稳供气的目的。

(2) 实施战略储备，保证供气的可靠性和连续性。

当国家内乱、政治动荡、气源或上游输气系统故障和设施停产检修等，都可能造成供气中断，地下储气库可作为补充气源。当供气中断时，抽取储气库中的天然气，保证向固定用户连续供气，提高供气的可靠性，这对天然气来源主要依赖进口的国家尤为重要。如今西欧的储气能力能解决主气源中断至少 6 个月的连续供气，法国的战略储备量相当于 110d 的平均消费量。对天然气出口国而言，为了履行长期供气合同，为用户提供连续、安全、平稳的供气，就不允许出现供气中断问题。俄罗斯是天然气出口大国，是当今世界上建设地下储气库最活跃的国家之一。

(3) 有助于优化生产系统和输气管网的运行。

地下储气库可使天然气生产系统的操作和输气管网的运行不受天然气消费高峰和消费淡季的影响，有助于实现均衡生产和作业，有助于充分利用输气设施的能力，提高管网的利用系数和输气效率，降低输气成本。地下储气库可使上游气田生产系统的操作和管道系统的运行不受市场消费量变化的影响，利用储气设施实现均衡生产和输气，提高上游气田和管道的运行效率，降低运行成本。

(4) 为其他国家提供储气商业服务。

有的国家（如瑞士）找不到适合建造储气库的地质条件，而地质条件好的国家可大力发展储气设施，将富余的储气能力租给别国使用，以满足租用国的天然气战略储备要求。在欧洲，提供地下储气库商业服务开展得相当普通，如法国的 Etrez 储气库、斯洛伐克的 Lab T. V 储气库、奥地利的 Zwe mdorf 储气库等，这些储气库的部分储气能力就是为其它国家提供储气商业服务。

(5) 影响气价，实现价格套利。

地下储气库直接影响着天然气的价格。储气库的发展增强了供气能力，增加了用气高峰时期的可供气量。随着供气竞争的激烈和大量现货市场的出现，天然气价格差异会越来越大。用气高峰时价格上涨，用气淡季时价格下调。供气与用气双方都可从天然气季节性或月差价中实现价格套利，从价格波动中获取可观的利润。供气方在天然气低价时储气不售或增加储气量，待用气高峰价格上涨时售出；用气方在天然气低价时购进储存，待冬季或用气高峰气价上涨时抽出使用（避免高价购气）或出租储气库。

(6) 提供应急服务。

利用地下储气库，可对临时用户或长期用户临时增加的需气量提供应急供气服务。在当今的天然气贸易中，输气合同常与储气合同结合起来签订。储气会减少或降低因输气或井口供气中断带来的合同风险。

美国联邦能源调节委员会 636 号命令作出规定，要求配气公司和各用气大户必须建立自己的储气设施。地下储气库已成为美国输气网的一个重要组成部分和天然气工业的重要基础设施。

随着我国城市能源结构的改变，用气量的不断扩大，为满足天然气安全稳定的供气，

建设适合中国国情的储气库系统势在必行。在今后一段很长的时间内，我国许多大中城市，如北京、天津，包括上海在内的长江三角洲地区、两湖地区、“西气东输”管道沿线的地区和城市，俄罗斯天然气引进后包括东北三省在内的广大地区，都将要建设储气库系统设施。

1.2.3 地下储气库运行特征

(1) 地下储气库不是定产量注采，需根据城市调峰用气量的变化来确定库内注采井的注采量。一方面，天然气的需求量具有很大随意性；另一方面，又强烈要求储气库设施必须保证事故状态下或整个冬季期间的天然气需求量。

(2) 地下储气库注采气周期频繁交替，气体在井筒和地层之间双向流动，一个季节内储气库要注采占储量 40%~60% 的气体，而同样时间内一般气藏采出率不超过 3%~5%，导致储库的压力、温度、流量等注采参数在更大区间变化。因此在注采过程，既要防止注入时局部储层压力、温度超过原始储层最大允许压力、温度，导致天然气溢出；又要避免采出时局部压降、温降过大，导致采出垫层气，使底水锥进，储库库容减少。

(3) 储气库年复一年的重复循环工作，这在很大程度上为分析和揭示各种设施（压缩站、气井、地层、天然气处理设备等的必要参数提供了条件。

1.3 天然气地下储气库类型

1.3.1 按用途分类

对地下储气库按用途，可分为以下 3 种类型：

(1) 基地型储气库。

基地型储气库主要用来调节和缓解大型消费中心天然气需求量的季节性不均衡性，因此又叫做季节性储气库。建在含水层和枯竭油气田的储气库属这种类型，因为这种储气库的容量比较大，按日最大抽气量计，其有效气量可供抽气 50~100d。

(2) 调峰型储气库。

调峰型储气库主要用作昼夜、小时等短期高峰耗气调峰和输气系统事故期间的短期应急供气。盐穴或废旧矿穴的储气库属这种类型，这种类型主要特点是采气效率高，单井产气量高于传统储气库的 2~4 倍。这种储气库的容量相对较小，按昼夜最大抽气量计，其有效气量可供抽气 10~30d。

(3) 储气型储气库。

储气型储气库主要用作战略储备，作机动的备用气源。这种储气库对主要依靠进口天然气的国家具有特殊意义。

1.3.2 按作用分类

对储气库按用途可分为以下两种类型：

(1) 市场储气库。

这类储气库通常接近主要消费市场，通过适当的组合利用输气管道和储气库能力满足不断变化的需求量。例如，法国大部分的天然气都依靠进口，每月高低耗气量之比一直稳步上升，由于管网的压力一定，本身不能满足用气量如此大的变化，因此必须建储气库。

这类储气库一般位于产气区或接近输气干线的首站，主要起补充气源、使输气量保持平衡的作用。例如法国拉克气田附近的地下储气库，面积达 12km²，储库的目的是为调节拉克气田用气负荷季节性变化时的开采量，并保证燃气净化厂停止工作，能不间断地向用户供气。

1.3.3 按地质条件分类

对储气库按地质条件可分为以下 5 种类型。

1.3.3.1 枯竭气藏型储气库

利用已开采枯竭废弃的气藏或开采到一定程度的退役气藏，停止采气转为夏注冬采的地下储气库，这是在各种地下岩层类型中建造地下储气库的最好选择，其主要优点有：

(1) 有盖层、底层、无水驱或弱水驱，具备良好的封闭条件，密闭性好，储气不易散溢漏失，安全可靠性好。

(2) 有很大的天然气储气容积空间，有效库容可大于调峰气量的 1.2 倍，且不需或仅需少量的垫底气，注入气利用率高。

(3) 注气库承压能力高，储气量大，一般注气井停止注气，压力最高上限可达原始关井压力的 90%~95%，而且调峰有效工作气量大，一般调峰工作气量为注气量的 70%~90%。

(4) 有较多现成采气井可供选择利用，作为注采气井，有完整配套的天然气地面集输、水、电、矿建等系统工程设施可供选择，建库周期短、试注、试采运行把握性大，工程风险小，有完整成套的成熟采气工艺技术。

缺点是：枯竭气藏型储气库密封性要求高，注入气体最好是经过处理的干气。

1.3.3.2 枯竭油藏型储气库

这种储气库是利用已采油程度很高的枯竭废弃油藏或油藏气顶来建造，储库虽具备枯竭气藏型储库的部分优点，包括了解完整的油藏构造（断层、岩性尖灭、油水关系等）和油层岩性（砂岩或石灰岩、多孔隙介质、油层厚度、孔隙度、渗透率、油水饱和度）等情况，储气量大，原有地面设备可再利用等优点。但缺点也较为突出，首先需把部分油井改造为天然气注采井，原油集输系统也需改为气体集输系统；其次随同采气必会携带出部分轻质油，需配套新建轻质油脱出及回收系统，而且建造周期长，需试注、试采运行，检验、考核费用较大。

尽管存在上述缺点，在无枯竭气田的条件下，枯竭油藏仍不失为建造地下储气库的良好选择。

根据国外的实践，当枯竭气藏采出程度在 50%~70%时，较适合进行地下储气库改建，在注采气的过程中可减少井底附近渗流阻力。如苏联米哈依洛夫地下储气库在第一个注气周期后，渗流阻力明显减小，气井绝对无阻流量增加 1~2 倍，在第一个采气周期中，气井的采气量比开发气藏时的产量增加 50%。而枯竭油藏要想改建成地下储气库，一般其含水率应达到 90%，这时地下储气库附加值高，如美国得克萨斯的纽约城油田和恩巴特油田，高压注入天然气，部分气体溶入残余油中，在采气的同时，增产原油 7.3×10^4 t，使地下储气库的建设与二次采油同时进行，这说明油气同层也可建造储气库且附加值很高。

1.3.3.3 含水层型储气库

一般建在背斜构造的含水砂岩储层中，满足三个基本条件：具有良好的多孔、高渗透性的储气层；有可靠的盖层，保证气体不会垂向渗漏；储层周围密封性要好，保证气体不

侧漏。如苏联列宁格勒附近的盖钦纳储气库，储层厚度约 10m，渗透率 1~5D，闭合高度 2m，在不同的部位注气排水，自 1963 年运营以来，冬季最大采出量为 $1.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占其库容量的 31%。

这种储气库是通过高压将气体注入含水层的孔隙中，将地下含水层中岩层孔隙中的水排走，用气体将水驱到边缘形成一个人工气田并在非渗透性的含水盖层下储气。用于建造含水层储气库的储集层必须由不透气的背斜层覆盖，储集层为孔隙渗透性良好的岩层，一般建在背斜构造的含水砂岩储层中，孔隙度和渗透率要达到相应的标准。可用于建造地下储气库的含水构造分布很广，即使在输气干线或天然气消费中心附近没有合适的枯竭油气层，也总可以找到含水层构造。

建造这种类型的储气库首先要对基础资料进行分析，从建库的要求出发，对地质条件进行评价，圈出有希望的面积，确定隆起的区域，在隆起的顶部钻测试井。对水层进行详细的地质、地球物理、水化学以及流体力学的研究。确定孔隙度、渗透率以及毛细管的压力，并进行注水、注气压差试验，测出以气驱水时的门限压力。

含水层型储气库优点是构造完整，钻井、完井一次到位，缺点是勘察、研究选库工作难度大，建库周期较长，风险较大，气水界面较难控制，需钻一定数量的注采井、观察井，需建设完整的配套工程，投资运行费用高；气库需一定的垫层气，一般是气库储气量的 30%~70%，储气量、调峰能力较枯竭油气藏小。

1.3.3.4 盐穴型储气库

在天然盐层中，以常规钻井方法钻穿岩层，注入淡水进行冲蚀使之形成一定体积和形状的溶腔，然后泵出盐水注入天然气。从地质构造角度来看，盐穴天然气储气库的建造首先必须有较厚的盐层，盐层的不溶解物质必须低于 25%，还要有充足的淡水资源，因为溶解 1 m^3 的盐水需要 10 m^3 的淡水，见图 1.1。

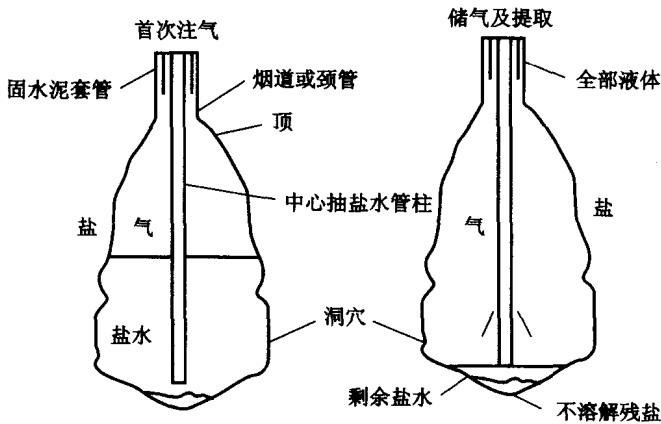


图 1.1 盐穴地下储气库示意图

盐穴储库一般由若干个洞穴组成、洞穴之间的最小间距不应小于 100m，盐穴储库的特点是，单个岩盐空间容积大，最大达 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上，储气量可达 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

与其他地下储存方式相比，这种储气库建库的单位成本和操作费用高，总的天然气有效容积相对较小，钻井、完井难度较大，溶蚀冲蚀较难控制；但产气能力相对较高，注气

时间短，垫层气用量少，储气无泄漏，调速快，调峰能力强，能快速完成抽气注气循环，一年中注采循环可达4~6次，最适合日调峰。

1.3.3.5 废弃矿穴储气库

废弃矿穴储气库是利用废弃煤矿等遗留的洞穴来储存天然气，见图 1.2。此种储气库存在严重缺陷，例如，原有井筒难以密封，存在气体向地面泄漏的危险；抽出储存气体的质量会发生变化，热值有所降低。

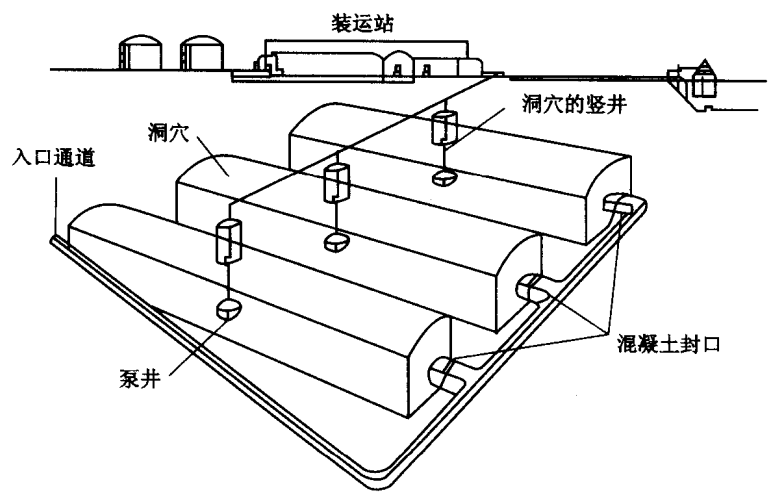


图 1.2 废弃煤矿井储气库示意图

不同类型地下储气库储气原理及优缺点汇总见表 1.1，储气库地质情况示意图见图 1.3。

表 1.1 不同类型地下储气库特征

类 型	储 存 介 质	储 存 方 法	工 作 原 理	优 越 性	缺 点	用 途
枯竭 油气藏	原始饱和油、气、水的孔隙性渗透地层	由注入气体把原始液体加压并驱动	气体压缩膨胀与液体的可压缩性和可流动性相结合； 流动特点：注入采出	储气量大，可利用油气田原有设施	密封性要求高，部分垫层气无法回收	季节调峰与战略储备
含水层	原始饱和水的孔隙性渗透地层	由注入气体把原始液体加压并驱动	气体压缩膨胀与液体的可压缩性和可流动性相结合； 流动特点：注入采出	储气量大	勘探风险大，垫层气不能完全回收	季节调峰与战略储备
盐穴	利用水侵蚀盐层形成洞穴	气体压缩挤出卤水	气体压缩与膨胀，用盐水平衡（特别用于回收垫层气）	工作气量比例高，可完全回收垫层气	卤水排放处理困难，渗漏可能造成储气量损失	日、周、季节调峰，配气保障
废矿	采矿后形成的洞穴	充水后用注入气体压缩挤出水	气体压缩与膨胀，用水平衡	工作气量比例高	易发生漏气现象，与常规储气库比，成本较高	日、周、季节调峰，配气保障

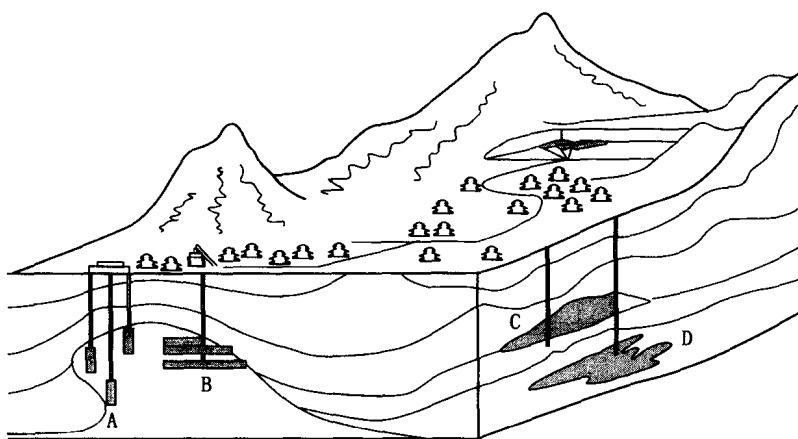


图 1.3 储气库地质情况示意图

A—含盐岩层；B—废矿井；C—地下含水层；D—枯竭油气田

1.4 国内外地下储气库建设概况

1.4.1 国外地下储气库建设概况

地下储气库的历史可以追溯到 20 世纪初。世界上第一个储气库是 1915 年在加拿大安大略省的 Welland 气田进行储气试验，1916 年美国在纽约州布法罗市附近的 Zoar 枯竭气田建设了储气库，1954 年美国在纽约 Calg 县首次利用枯竭油田建成储气库，1958 年美国在肯塔基首次建成含水层储气库，1961 年美国在密执安圣克莱尔首次建成盐穴型地下储气库，1963 年在美国科罗拉多州丹佛市附近首次建成废弃矿井储气库。

美国是世界地下储气库开发中的先驱者，由于天然气产量相对稳定，输气管网很多，因而美国已拥有十分巨大的天然气地下库存能力，储气库数量占世界总量的 3/4，总计库存能力和高峰负荷时的日送气量都居世界领先地位。

加拿大是地下储气库建设最早的国家，至 2003 年末有 41 座储气库，总库存能力 $310 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中有效气量 $195 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，由 9 家公司经营。

法国由于没有大量的气田，为预防天然气进口量在任何可能情形下的中断，必须建设地下储气库实行天然气的战略储备。目前法国现有储气库的有效气量为 $105 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约为法国年需气量的 1/3。

西欧一些国家由于主要依赖进口天然气，所以对建造地下储气库十分重视，已把地下储气库的建设作为天然气市场发展总规划的一个不可分割的部分。欧洲输气管道系统沿线许多大城市附近，都建造有容积大小不等的各种地下储气库，有效气量相当于 45d 的天然气消耗量。尤其是法国、德国、意大利和英国。到 2003 年，西欧共有 74 座地下储气库，总储气容量约为 $968 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。德国是最积极的储气库建设者，德国目前计划和在建的储气库约有 20 余座。

截止到 2003 年，在东欧地区地下储气库总数为 20 个，储气量为 $190 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。捷克共和国输气公司 Transgaz 和 Pribram 储气库（废矿井）的工作气容量为 $5500 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，正在

Dolni Bojanovice 附近建设的新储气库, 工作气量为 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$; 波兰正准备在 Wierchowice 附近将一个枯竭气藏建成一座容量为 $43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的储气库。

俄罗斯是世界第二大储气库大国, 共有 22 座储气库, 工作气容量为 $730 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前, 俄罗斯 Gazprom 天然气公司计划参加 Sarandzha 的储气库建设, 设计容量为 $70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。乌克兰有 12 座储气库, 工作气容量为 $310 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

澳大利亚现有 4 个枯竭气藏型天然气地下储气库, 储气能力为 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

受天然气需求快速增长的刺激, 建设天然气地下储气库的国家也在增多。墨西哥正在审查其东部的盐穴建设储气库的可能性。伊朗的 NIOC 公司计划把它的一个凝析气藏建成储气库, 工作气容量为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。拉丁美洲对天然气这种清洁能源产生了极大的兴趣, 地下储气库的建设也将提到议事日程。

目前世界天然气地下储存技术已逐渐完善和成熟, 储气库库容量越来越大, 储气量和工作气量占消费总量的比例越来越高。截止到 2003 年, 全世界现有各类地下储气库 602 个, 这些储气库主要分布在北美洲和欧洲, 其中枯竭油气藏储气库 464 座, 含水层储气库 75 座, 盐穴储气库 59 座, 废弃矿穴储气库 4 座, 工作气体总容量约 $3104 \times 10^8 \text{ m}^3$, 总储体积极约 $5733 \times 10^8 \text{ m}^3$, 工作气量相当于世界消费量的 11%。分属包括美国、加拿大、苏联、欧洲及澳大利亚等不同国家的 110 多个公司。今后, 世界地下储气库的需求还将有较大增长。预测到 2010 年, 世界地下储气库的有效气量将新增 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 投资额将超过 400 亿美元。

1.4.2 国内地下储气库建设概况

1.4.2.1 大庆储气库的情况

20 世纪 70 年代大庆油田原油开采过程中生产了大量伴生气, 然而到了夏季因消费气量减少, 过剩的天然气不得不白白放空, 而到冬天又不能满足需求。为解决这一矛盾, 曾于 1975 年开始分别在大庆油田萨中地区和喇嘛甸油田北块, 首次建成并投入运营了国内两座小型天然气地下储气库, 为北方寒冷地区合理利用天然气资源, 并在一段时期内为确保工业生产和居民生活用气实现基本平衡, 发挥了重要作用。

(1) 萨尔图一号储气库。

该地下储气库位于萨尔图油田中区北块, 面积达 1.05 km^2 。储气库目的层是油气勘探中探明的萨尔图油层顶部的萨零组上部可凝油气层, 埋深 770m, 储气库总容量为 $0.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。储气层主要为油浸、含油细砂岩和含气细、粉砂岩, 与下部含气层之间为全区稳定分布的泥岩盖层, 其上为全盆地稳定分布的泥质岩及油页岩盖层, 储气层砂岩呈透镜状封闭在泥质岩之间, 整个储气库具有非常好的封盖条件。1986 年该储气库因油田夏季亦无富余天然气可供贮存而停止使用。

(2) 喇嘛甸油田北块地下储气库。

喇嘛甸油田是一带气顶的背斜构造油田, 储气库选在该油田北块, 注气目的层为气顶的一部分, 即萨一组上部和萨零组下部。萨一组上部储气层面积 17.8 km^2 , 地质储量 $4.47 \times 10^8 \text{ m}^3$, 萨零组下部储气层面积 45 km^2 , 地质储量 $3.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该储气库为受构造控制的岩性气藏, 顶部为厚度 250m, 全区是稳定分布的泥岩及油页岩盖层, 底部泥岩隔层平均厚度 8m, 萨零下部与萨一组储层之间为厚约 15m 稳定分布的黑色泥岩, 储气库具有良好的封盖层。该库于 1975 年建成后, 通过三次扩建, 储气库地面日注气能力由 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 增加到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$, 年注气能力由 $0.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 库容量 (动用地质储