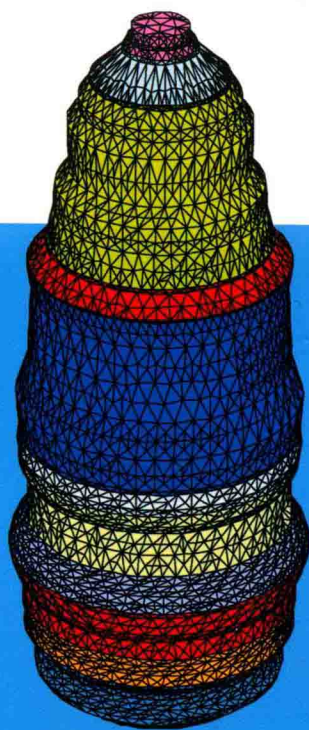


层状盐岩储气库 造腔设计与控制

丁国生 郑雅丽 李 龙 主编



石油工业出版社

层状盐岩储气库 造腔设计与控制

丁国生 郑雅丽 李 龙 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合我国盐岩地质特征,系统介绍了地下盐穴储气库造腔设计与控制相关技术,包括层状盐岩地质设计与造腔设计、造腔控制、有效空间利用等特色技术等,并对我国目前已建和在建盐穴储气库进行了分析。

本书可供从事盐穴地下储气库研究的设计人员、工程人员、管理人员及相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

层状盐岩储气库造腔设计与控制 / 丁国生, 郑雅丽, 李龙
主编. — 北京: 石油工业出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-5183-2078-3

I. ①层… II. ①丁… ②郑… ③李… III. ①岩性油气藏-
地下储气库-设计 IV. ①TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 215964 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523544

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 320 千字

定价: 80.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《层状盐岩储气库造腔设计与控制》

编 委 会

主 编：丁国生 郑雅丽 李 龙

编写人员：完颜祺琪 武志德 垢艳侠 冉莉娜

孙春柳 赵艳杰 李 康 邱小松

赖 欣 张 敏 张刚雄 魏 欢

李东旭

前 言

中国天然气消费正处于快速上升时期，到“十三五”末，天然气消费占一次能源消费比重将接近 10%，天然气“生产、运输、储存、销售、利用”五大环节构成的完整产业链已经形成。地下储气库作为大规模天然气储存的主要手段，在天然气安全平稳供给中发挥着不可替代的作用，中国天然气消费的快速增长必将催生大规模地下储气库建设需求。

盐穴地下储气库是地下储气库的主要类型之一，具有注采气灵活、采气能力突出等特点，使得盐穴地下储气库在应急调峰和保供中发挥着重要作用。

我国盐矿建库资源多为复杂层状盐岩，氯化钠含量低，水不溶物含量高，从溶腔设计到造腔控制均存在较大难度。自中国第一座盐穴储气库——金坛盐穴储气库建设以来，国内一直致力于复杂层状盐岩建库的研究与探索，中国石油勘探开发研究院和中国石油西气东输管道分公司先后在平顶山、淮安、安宁、云应等多盐矿开展复杂层状盐岩建库的实验和探索，初步形成了一套复杂多夹层盐岩造腔设计和控制的技术方法。本书系统梳理了我国盐穴储气库建设潜力，详细介绍了多夹层盐岩建库溶腔设计和造腔控制方面的理论和方法，并进行了部分实例分析，希望可以给从事相关领域的研究人员和设计人员提供参考。

鉴于层状盐岩储气库造腔技术仍需要不断的摸索、实践和完善，书中所述难免存在疏漏和欠缺，敬请读者批评指正！

目 录

第一章 盐穴储气库关键技术及发展方向	(1)
第一节 世界盐穴储气库发展概况	(1)
第二节 盐穴储气库建库的关键技术	(2)
一、盐穴选址与地质评价技术	(2)
二、造腔控制技术	(3)
三、造腔模拟预测技术	(3)
四、稳定性设计与控制技术	(4)
五、盐腔检测技术	(5)
六、盐腔完整性测试技术	(6)
七、注气排卤技术	(6)
八、注采运行热动力模拟与预测技术	(6)
第三节 盐穴储气库的主要发展方向	(7)
第二章 中国盐穴储气库建库潜力分析	(9)
第一节 中国盐岩矿床地质特征	(9)
一、盐岩矿床的时空分布特征	(9)
二、盐岩矿床类型及主要地质特征	(10)
第二节 天然气骨干管网沿线盐岩矿概述	(11)
一、辛集—宁晋盐矿	(11)
二、金坛（直溪桥）盐矿	(13)
三、赵集盐矿	(15)
四、淮安盐矿	(18)
五、清江盐矿	(20)
六、平顶山盐矿	(22)
七、定远东兴盐矿	(24)
八、陕北盐田	(26)
九、黄场盐矿	(29)
十、云应盐矿	(31)
十一、湘衡盐矿	(33)
十二、威西盐矿	(35)
十三、安宁盐矿	(36)
第三节 盐穴储气库建库资源潜力	(38)
一、含盐地层有关参数比选	(38)
二、综合评价	(42)

第三章 盐穴储气库建库地质评价	(44)
第一节 中国盐穴储气库建库区域地质特点及建设的主要难点	(44)
一、中国盐穴储气库建库区域的主要地质特点	(44)
二、中国盐穴储气库建设的主要难点	(45)
第二节 盐穴储气库的库址选择与评价	(47)
一、库址选择与评价的原则	(47)
二、库址选择与评价的过程与方法	(47)
第三节 含盐地层建库地质评价	(53)
一、构造分析	(53)
二、盖层封闭性评价	(54)
三、含盐地层地质分析	(56)
四、建库区块与层段选择	(57)
第四节 盐溶溶蚀参数获取与分析	(57)
一、盐岩溶蚀参数的类别	(58)
二、盐溶参数获取的手段和方法	(58)
第四章 层状盐岩储气库造腔设计	(62)
第一节 造腔物理模拟	(62)
一、国内外水溶造腔物理模拟研究历程	(62)
二、多夹层盐岩造腔物理模拟实验	(63)
第二节 造腔数值模拟	(71)
一、国内外水溶造腔数值模拟研究历程	(71)
二、水溶造腔数值模拟的理论基础	(71)
三、水溶造腔数学模型的建立	(77)
四、造腔数值模拟软件	(80)
第三节 造腔主要设计参数设计	(81)
一、造腔参数设计准则	(81)
二、造腔设计主要参数	(82)
三、实例介绍	(85)
第四节 储气库运行压力设计	(86)
一、盐穴储气库运行压力设计评价标准	(86)
二、运行压力主要设计方法	(89)
三、盐岩地层的地应力测试与盐穴最大运行压力的确定	(89)
四、下限运行压力的确定	(92)
五、压力变化速率的确定	(92)
第五节 储气库稳定性评价	(92)
一、盐岩力学特性研究进展	(93)
二、层状盐岩力学特性实验研究	(94)
三、盐穴储气库稳定性评价	(105)
第六节 盐腔库容及注采运行方案设计	(112)
一、注采运行方案设计	(112)

二、库容量参数设计	(113)
三、盐腔运行过程的井筒、盐穴内温度—压力模拟预测	(113)
第五章 多夹层造腔控制	(118)
第一节 造腔形态工艺控制	(118)
一、井型对造腔形态的控制	(118)
二、造腔过程中盐腔形态控制	(120)
三、溶腔不同发展阶段的主要控制方法	(122)
第二节 夹层垮塌控制	(123)
一、厚夹层强度力学的实验研究	(123)
二、夹层垮塌数值模拟分析	(127)
三、夹层垮塌造腔过程控制方法	(134)
第三节 腔底形态控制方法	(135)
一、技术原理	(136)
二、工具制造	(137)
三、模拟效果分析	(138)
第六章 造腔实例分析	(148)
第一节 金坛盐矿层状盐岩造腔试验	(148)
一、建库区盐层特征	(148)
二、盐腔设计	(149)
三、典型盐腔造腔设计与实施效果	(152)
四、造腔实践的启示及认识	(161)
第二节 云应盐矿多夹层低品位盐岩造腔试验	(161)
一、单井单腔造腔成腔性试验效果分析	(162)
二、双井眼加快造腔速度试验效果分析	(174)
第三节 淮安厚夹层造腔先导性试验	(178)
一、厚夹层垮塌性分析	(179)
二、造腔方案设计	(181)
三、建槽试验过程	(184)
四、建槽试验效果分析	(186)
参考文献	(194)

第一章 盐穴储气库关键技术的发展方向

第一节 世界盐穴储气库发展概况

盐穴储备库是利用地下盐岩矿床经水溶开采后形成的地下洞穴储存石油和天然气的一种油气地下储备设施，用于储存天然气的地下盐穴及与之相配套的各类设施总称为地下盐穴储气库，其核心设施是地下盐穴。

地下盐穴储存技术最初是德国人 Erdol 在 1916 年 8 月获得的专利，而世界上第一座盐丘/盐层储气库却是 1959 年苏联建成的。由于地下盐穴具有安全性高、环保、投资少等优势，受到了世界各国的青睐。根据 2012 年 IGU 地下储气库年度报告，世界上 38 个国家和地区运营各类地下储气库 634 座，其中盐穴储气库 74 座，占总数的 11.6%，工作气量 $162\times10^8\text{m}^3$ ，占总工作气量的 5%。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、葡萄牙、亚美尼亚、中国各 1 座（表 1-1）。

表 1-1 世界各国已建成地下盐穴储气库统计表

国家	储气库 (座)	垫气量 (10^8m^3)	工作气量 (10^8m^3)	库容量 (10^8m^3)
美国	31	23.32	50.27	73.59
加拿大	9	2.14	6.12	8.26
德国	23	26.3	78.86	105.16
法国	3	7.14	9.73	16.87
英国	3	2.25	5	7.25
丹麦	1	3	4.2	7.2
波兰	1	1.71	3.8	5.51
葡萄牙	1	0.5	1.5	2
亚美尼亚	1	0.25	1.1	1.35
中国	1	0.83	2.5	2.23
合计	74	67.44	161.98	229.42

美国在 1961 年于密歇根州 Marysville 首次用盐穴储气，该盐穴储气库由密歇根天然气公司通过废弃的盐矿改造而成。该气库自 1968 年开始供气，采气量为 $82.12\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ ，注气量是 $34\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ ，工作气量为 $600\times10^4\text{m}^3$ ，压力为 7.2MPa。美国运行的 31 座盐穴储气库多数于 20 世纪 90 年代投入运营，1990—2000 年间投产了 17 座。31 座盐穴储气库顶面构造深度一般 600~1300m，运行上限压力 7.2~24.8MPa。

加拿大第一座盐穴储气库建于萨斯喀彻温省，于 1963 年开始运行，该气库埋深 1128m，

储气空间为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。现今运行的 9 座盐穴储气库顶面构造深度一般为 1000~1200m，运行上限压力 15.2~26.7MPa。

法国首座盐穴储气库 Tersanne 于 1970 年开始投入使用，气库埋深介于 1400~1500m 之间，单腔高度 150m，总容量为 $3.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，运行压力 8~24MPa，工作气量 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。另两座储气库分别建成于 1980 年和 1993 年，单腔顶面构造深度分别为 1400m、1000m，高度分别为 150m、250m，工作气量分别为 $4.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

德国于 1971 年在基尔市附近的 Honigsee 盐丘上建造了首座盐穴储气库，深度 1307~1335 m。目前运行的 23 座盐穴储气库顶面构造深度一般为 500~1500m，运行上限压力 10~23.9MPa，最大采气量 $215 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

英国于 1974 年建成了首座盐穴储气库，由 2 个单腔构成，工作气量为 $0.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1980 年建成了第二座由 9 个单腔构成的工作气量为 $3.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的储气库，该储气库顶面构造深度为 1800m。

另外亚美尼亚、丹麦、波兰分别于 1964 年（苏联时期）、1986 年、1997 年建成各自的首座盐穴储气库，工作气量分别为 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $4.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $3.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

统计世界盐穴储气库可以看出，为控制盐穴储气库盐岩蠕变的影响，绝大部分储气库的埋深不超过 1500m，95% 的储气库埋深范围在 550~1200m 之间，有资料统计的 70 多座储气库中只有加拿大的 NUL 和 Atco 两个建于同一地层的储气库和英国 HORNSEA 储气库埋深接近 1800m。

由于盐穴储气库为单个溶腔组成，溶腔的大小和数量决定了盐穴储气库工作气量的多少。统计的 74 座盐穴储气库中，只有 1 口井的盐穴储气库有 15 座，有 2 口井的有 15 座，3 口井的 12 座，4 口井的有 5 座，5 口井的有 4 座。5 口井及以下的储气库总数 51 座，约占总数的 69%。

从各个盐穴储气库工作气量来看，绝大部分盐穴储气库工作气量小于 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，超过 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 工作气量的盐穴储气库只有 5 座，统计的 74 座盐穴储气库中，28 座盐穴储气库的工作气量小于 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从盐穴储气库运行压力来看，大部分储气库最大运行压力与储气库埋藏深度的关系为 1.6~2.2MPa/100m，最小运行压力与储气库埋藏深度的关系为 0.3~0.6MPa/100m，相比油气藏型储气库来说，运行压力区间较大。

通过以上统计数据可以看出，盐穴储气库具有以下特点：一是埋藏较浅，以浅层为主；二是工作气量较小，以小型储气库为主；三是运行压力区间范围大；四是垫气比例较低。

第二节 盐穴储气库建库的关键技术

盐穴储气库经过半个多世纪的发展，重点围绕盐穴的设计与建造，已经形成了相当完善的储气库建库技术，从盐穴的选址评价到盐穴储气库终止关闭，均有一套比较完整的评价体系与做法，盐穴储气库建库由八大关键技术构成。

一、盐穴选址与地质评价技术

盐层地质条件的优劣对建造盐穴储气库具有决定性的影响，抛开地理位置等影响因素，优质的盐层地质条件是建设高效盐穴储气库的必要条件。但是受原始沉积环境、成岩作用及

后期盐层改造等因素的影响，在同一沉积盆地的不同位置，盐层的厚度、含盐量、盐层内夹层的数量及厚度等会千差万别，寻找到特定区域内的最优质盐层是地质选址和评价的主要任务。由于现代地质勘探技术水平的不断提高，以构造研究和沉积学研究为基础，以地震勘探、测井分析为手段，可以对盐层的沉积特征、盐层空间展布的控制因素及分布规律、盐层内部较厚夹层的性质及分布规律、盐层顶底地层的密封性、与盐体有关的断裂特征等进行准确和精细的描述。但是，在中小型陆相含盐盆地中，地层横向变化大，很多含盐地层泥岩与盐岩互层，单层厚度较小，这种地层要做到对盐层的精细解释和预测仍然存在较大的困难。

二、造腔控制技术

盐穴的造腔过程是一个水溶过程，通过钻井下入套管，需要造腔的盐层部位裸眼完钻。通常情况下在套管内下入两根同心管柱，内部较小的管柱称为中心管，外层管柱称为中间管。通过中心管和中间管与中心管之间的环空注入淡水并进行循环采出卤水，使盐层部位溶蚀形成盐腔。

一定厚度的盐层溶解部位取决于淡水注入的部位，通过中心管注入淡水称为正循环，这种循环方式比较容易形成底部直径大上部直径小的盐腔。通过中心管与中间管的环空注入淡水称为反循环，这种循环方式易形成倒锥形腔体。因此，为了控制盐腔不同的溶解位置，就需要采用不同的循环方式和调整注水及采出卤水管柱的位置，通过调整注水口和采卤口的位置，就可以起到控制盐层溶解位置的作用。在保持注采管柱深度不变的情况下，由于盐岩不断溶解，盐腔内不同的部位会形成不同浓度的卤水，由于卤水和淡水存在密度差，随着溶蚀时间的延长，淡水会逐渐集中到上层并主要形成向上溶蚀的现象，为阻止上层盐层的溶蚀，扩大横向溶蚀范围，造腔过程中通过中间管与套管之间的环形空间向盐腔内注入一定量的阻溶剂。阻溶剂一般是气体或各类油品，常用的主要是柴油。利用阻溶剂与卤水的密度差异，使盐腔顶部形成一定厚度阻溶剂层，从而达到阻止水向上溶解，保护盐腔顶部并促使盐腔横向扩展的目的。在造腔过程中，将盐腔从下向上分成不同的层段分别完成，从而达到控制造腔的作用。

盐层纵向溶解位置和速度可以通过调整管柱位置来实现，横向上对于均质盐层来说可以认为溶解速度是相同的。理论上讲，每个深度的水平面上最终会形成半径相同的圆形。而实际盐层中由于不同部位含盐量及盐岩中含有石膏和芒硝等不同的化学物质，其溶解速度是不一样的，因此在横向上往往会出现某个方向上溶解速度较快，溶解不规则的现象，通常称为偏溶。偏溶现象普遍存在，目前还没有很好的控制偏溶的手段。

三、造腔模拟预测技术

地下盐腔的建造过程完全依赖井下管柱的控制，在地面是无法直接观察盐穴的形成和发展过程，因此要有效实现对盐腔的形态和体积的控制，就必须建立一套有效的盐腔形成和发展控制的技术手段。最直观的办法就是建立一个可以仿真井下盐穴形成过程的模拟系统（也称物理模拟系统），来模拟盐腔在不同工况下的盐腔形成发展过程。通过模拟，一是观察在不同的生产条件下盐腔形成规律，并通过调整实验参数掌握盐腔的形状控制方法，从而形成合理的控制技术，为建立稳定盐腔形态、优选施工方案、提高施工效率提供基础理论；二是可以掌握盐岩溶蚀机理，测定注入淡水在盐腔内卤水中的对流扩散规律，从而建立卤水浓度分布的数学模型。

要将实验室物理模拟获得的相关参数和经验直接应用到具体盐腔的设计建造上，还需要通过数值模拟的办法才能解决，造腔数值模拟是模拟和预测造腔过程中腔体形态变化的一种数学方法。造腔数值模拟依据物理模拟结果，建立盐岩溶蚀数学模型、盐腔溶质传输模型和盐腔内流体的流动场模型，利用相似准则原理、流体力学、热动力学、化学动力学及物质平衡原理，编制一套可以模拟不同盐层条件和不同造腔工况下的盐穴形成发展规律的软件，软件模拟结果包括盐腔不同造腔阶段的形态（图 1-1）、盐腔体积、有效体积、卤水出口浓度、施工压力等各项关键参数，以此为依据，可以开展各种条件下的盐腔的造腔控制与预测。

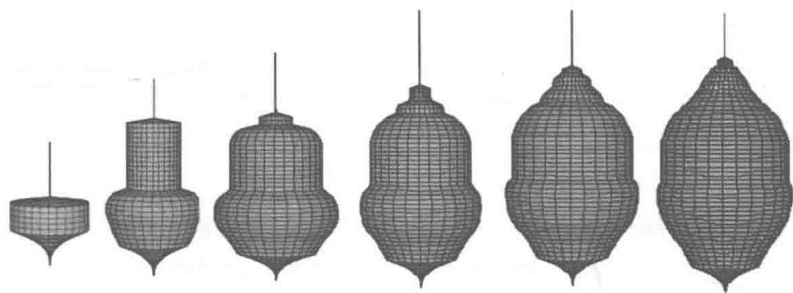


图 1-1 某盐穴储气库单腔造腔六个阶段末的盐腔三维形态预测图

四、稳定性设计与控制技术

盐穴作为地下巨大的储存空间，能否保持长期稳定是盐穴储气库的关键所在，因此盐穴稳定性设计与评价是盐穴储气库设计的核心。在进行各种盐穴储气库盐腔设计时，关键是如何在保持盐腔稳定的前提下，建造出能够承受大范围运行压力并且体积最大的盐腔。而盐腔稳定性与盐腔体积、形状以及运行压力之间存在着相互关联，因此，在盐腔稳定性设计中需要兼顾体积大小、盐腔最大最小直径、盐腔承受的运行压力范围，通过各种盐腔参数优化对比，确定最终可以保持长期运行的稳定性控制参数（图 1-2）。

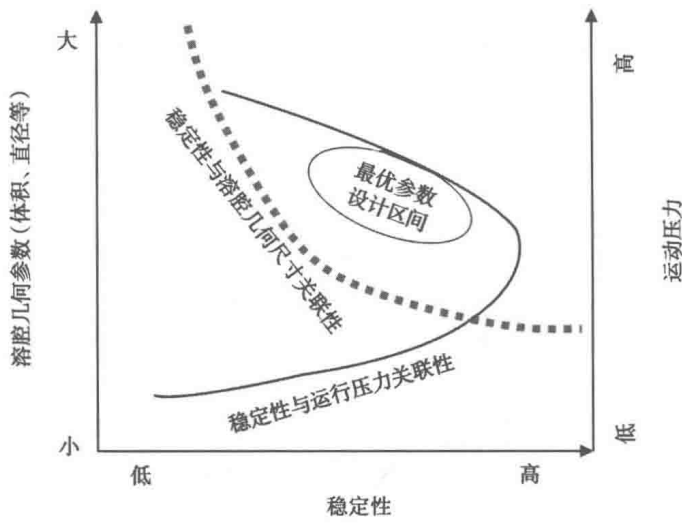


图 1-2 盐腔几何参数、运行压力与稳定性相互关系图

盐腔稳定就是盐腔周围的岩石在储气库整个运行过程不会突破岩石破坏强度而发生垮塌、破裂或大规模的变形。因此在设计和控制盐腔稳定性过程中，需要综合分析岩石力学特性、盐层的地应力状态、盐腔造腔过程和储气库运行过程中盐腔内部应力变化等各种因素。

盐腔稳定性设计和控制首先需要确定盐腔所在地层的各类岩石力学特性。目前在对包括盐岩在内的各类岩石的力学测试和研究方面已经十分成熟，包括盐岩的抗压抗张强度、盐岩的蠕变特性等。在对岩石力学特性有充分认识的基础上，还需要了解含盐地层的地应力状态，目前在对地层应力状态的研究测试技术也十分成熟，在实际研究测试过程中，通常会对拟建盐腔的含盐地层段做多段的破裂压力测试和最小主应力测试，以获取盐腔运行过程中临界极限状态。

目前在进行盐腔稳定的设计和评价过程中，主要考虑两个因素：一是盐腔周围岩石是否会出现拉张破坏，二是是否出现大规模蠕变破坏。通常采用 FL3D 等商业软件进行盐腔稳定性的评价和设计，但是各国在盐穴储气库盐腔稳定设计中，设计的盐腔运行状态会低于可能发生破坏的极限条件，因此如何掌握这个“度”，不同的国家有不同的标准。但总体来讲，设计评价的手段方法技术基本一致。

五、盐腔检测技术

腔体形态检测是造腔过程中对腔体形态的直接监测，通过监测掌握盐腔的发展过程。盐腔检测主要通过声呐检测设备完成，通过声呐检测可以比较精确的掌握盐腔的空间形态(图 1-3)。声呐检测技术的主要原理是声呐设备下入腔体中，向盐腔壁发射定向声波，声波经腔壁反射后再被声呐仪接受，经过分析计算后可以得出仪器距腔壁的距离，声呐仪旋转

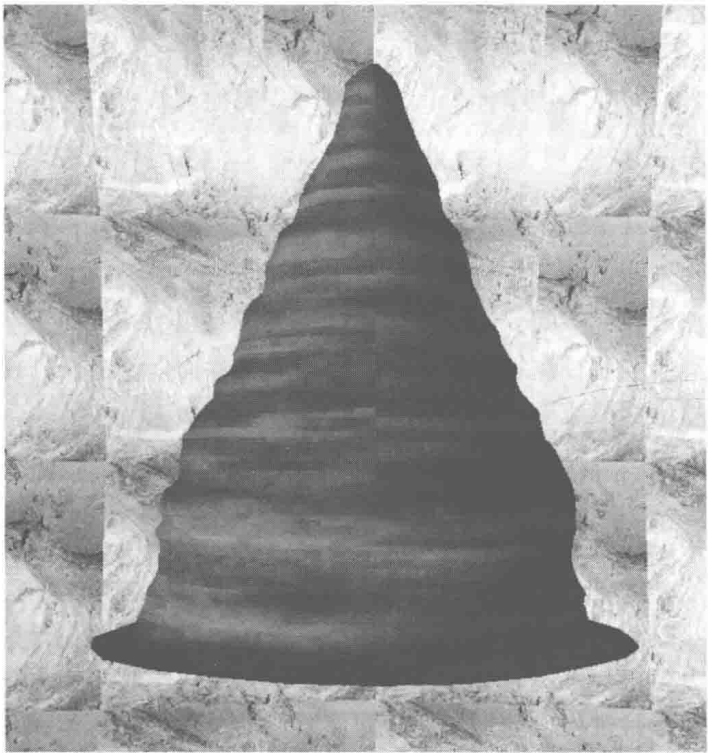


图 1-3 盐腔声呐检测成果图

一周可以测量该深度上盐腔半径的变化情况，不断改变声呐仪下入的深度就可以全方位了解盐腔的三维空间形态。

盐腔声呐检测主要包括盐腔建造过程的监测和储气库运行阶段的监测。造腔过程中对盐腔形态进行监测，从而及时调整施工参数来控制腔体的形态，使腔体达到设计的要求。储气库运行阶段的盐腔监测，由于盐层属于塑性地层，盐腔在运行过程中由于压力不断变化，会导致盐层发生蠕变而使盐腔体积缩小。因此在运行过程中，每隔一定的周期需要对盐腔进行声呐检测，确定盐腔的变形状况，了解盐腔的稳定性。

声呐检测技术已经广泛应用于盐穴储气库的形态检测，目前世界上能够生产盐穴声呐检测设备的国家主要有德国、美国和俄罗斯。其中德国 SOCON 公司生产的声呐检测仪具有精度高、适用于卤水和天然气两种介质中测量、仪器集成度高等优点，在世界范围内得到普遍公认。

六、盐腔完整性测试技术

盐腔完整性测试主要是测试盐腔的密封性。由于盐腔是埋藏在地下的巨大储气空间，与常规的油气藏有本质的区别，虽然盐层具有很好的密封性，但由于地质因素千变万化，盐腔整体密封性究竟如何，需要通过测试才能确定，否则盐腔注气后一旦发现漏失，将很难处理。完整性测试分造腔前和造腔后两个阶段，造腔前测试如果不发生地层漏失，才可以开始造腔。造腔后的完整性测试主要观测盐腔的密封性，如果达到密封要求才可以注气排卤实施储气过程。

完整性测试的主要方法是以氮气或空气为试压介质，通过下入双层测试管柱，检测测试期间气体的泄漏量来评价腔体的密封性。在试验过程中将氮气—盐水界面保持在稳定水平上，通过在测试管上安排一个排泄孔来实现。在试验过程中，将定期添加少量氮气。在井口监测气量变化（图 1-4）。如果盐腔内的氮气与卤水的界面可以较长时间内稳定在一个位置上，则说明该盐腔具有较好的密封性，可以进行储气库的注气投产。

七、注气排卤技术

注气排卤是盐穴储气库造腔完成后注气投产的第一个环节，该过程类似于正循环水溶造腔过程，只是将注淡水改成注入天然气，通过不断注入天然气，不断将盐腔内的卤水排出，形成一个巨大的天然气储存空间，注气排卤过程涉及不压井作业等工序，该技术比较成熟。在盐腔注气排卤过程中需要控制好气水界面，防止气水界面低于出卤管柱的最下端，导致天然气通过排卤管柱喷出而酿成事故。

八、注采运行热动力模拟与预测技术

盐穴储气库注采过程是一个复杂的热动态平衡过程，天然气、注采管柱、井壁、盐腔围岩在注采过程中会不断进行热量的交换。这种热能的交换对溶腔内部的压力和注采气能力都会产生较大的影响。热动力平衡是单个溶腔运行模拟的关键，同时也是整个气库群运行的基础。注采运行热动力模拟与预测通过应用工程热力学、传热学和流体力学基础理论，对盐穴储气库的构造和实际运行过程，分别建立井筒连续流动及热传导模型、溶腔热传导模型、水合物形成条件模型，并建立相应数学模型的边界条件，并编制相应的计算程序，通过热动力模拟，能够分析在各种采气条件下溶腔内部和井口的温度压力变化，以及开采过程中水合物

形成的趋势，从而为地面工程配套设施提供设计依据，并可以进行溶腔压力预测，以确保溶腔处于稳定的运行压力区间。

目前已经有不少盐穴储气库注采运行的模拟预测手段和软件，但是能够进行准确预测软件还比较少，更多的是在实际注采过程中通过温度、压力的实际测量和控制掌握盐穴储气库的运行状态。

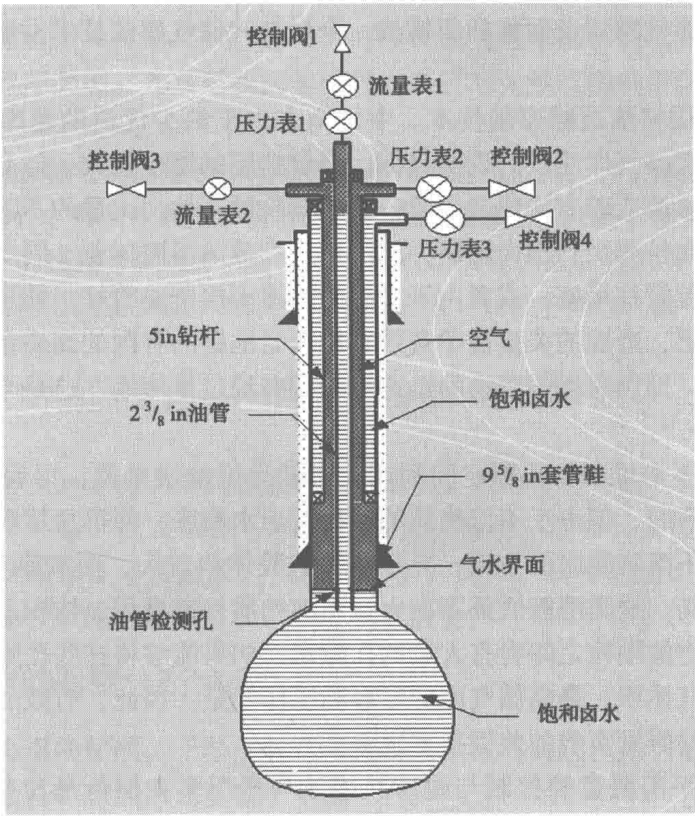


图 1-4 完整性测试原理示意图

第三节 盐穴储气库的主要发展方向

盐穴储气库尽管已经有了百年的发展历程，利用厚层高品位盐层和盐丘建造盐穴储气库已经十分成熟，但是面对不断增加的储气库建库需求和复杂多变的盐层建库条件，在今后一段时间内，仍然面临一些尚未解决的技术难题。

技术需求和亟待解决的技术问题主要源自复杂的建库地质条件，盐层建库条件的不断劣质化和溶腔的不断劣质化给建库技术带来新的挑战。这种劣质化地质条件表现在四个方面：

(1) 低品质盐层建库。主要表现在盐层本身杂质含量高，不溶组分多，盐层与不溶物夹层互层，使得整个造腔层段 NaCl 等可溶部分较低，在造腔过程中不能使盐层得到有效充分的溶解而形成较大体积的溶腔，同时由于大量不溶组分遇水膨胀后占据了有效空间，使得该类盐层造腔十分困难。

(2) 薄盐层建库。虽然盐层品质较好，但是盐层总的厚度较小，盐层总厚度不足 100m，甚至部分厚度只有 30~50m，这类盐层采用目前的单井造腔工艺很难形成体积较大、

形态较规则的盐腔。

(3) 深层盐层建库。由盐岩本身的力学特性所决定,处于深部的盐岩在受到高温高压的作用下,岩石会发生较大的蠕变,因此这类盐层造腔后溶腔会发生收缩,存储体积不断缩小,利用这类盐层如何建库是一个较大的难题。

(4) 盐腔在经过多年的运行后,部分会出现腔壁垮塌、夹层渗漏、溶腔井筒泄漏等一系列问题,如何处理和解决这类问题将面临新的挑战。

针对上述盐穴储气库建设面临的新挑战,今后盐穴储气库的技术发展主要方向,主要体现在四个方面。

(1) 低品位盐层精细造腔控制技术。中国南方由于缺少优质的建库地质目标,很多低品位盐层就成为盐穴储气库建设的现实目标。尽管盐层的厚度较大,但品位低,不溶物质含量较高,利用单井水溶造腔方法建造溶腔,从建槽阶段开始,大量的不溶物质迅速堆积在腔底部,使得水溶横向扩展受到很大限制,无法形成有效的溶腔体积。同时由于大量不溶物质迅速堆积,使得造腔管柱堵塞,或者由于夹层的垮塌砸损造腔管柱,使造腔过程难以有效实施。对这类盐岩地层,造腔的关键在于有效利用盐岩地层的有限的高质量盐层,采用精细控制造腔工艺等办法,抑制夹层不溶物的迅速堆积和夹层过早垮塌,这是今后此类盐层造腔发展的方向。

(2) 溶腔底部不溶堆积物孔隙空间利用。对低品位盐层来说,尽管采用各种办法可以建造出一定体积的溶腔,但由于不溶物质的存在并遇水膨胀,使得盐层溶解采出形成的地下空间很大部分会被不溶物膨胀而占据,导致尽管造腔体积较大,而实际有效储气空间很小,造腔效率低、成本高。这类溶腔底部存在大量不溶物质松散堆积,体积是不溶物原始体积的1.4~1.7倍,不溶物的颗粒之间含有大量的孔隙水,如果能够将这些孔隙水有效排除,就可能大大增加有效储气体积,提高储气库的库容和工作气量。因此,有效的不溶堆积物孔隙水排水技术是目前需要研发实践的关键技术之一。

(3) 薄盐层水平溶腔造腔控制与建库技术。与厚层多夹层低品位盐层造腔不同的是,有些盐层厚度较小,只有30~50m,但是盐层的品位较高,利用单井直井造腔受盐层厚度的限制,很难形成较大体积的溶腔,如果能够顺盐层建造顺层溶腔,大大增加水平方向的溶腔长度,就可以形成较大规模的溶腔体积。但由于目前造腔技术主要适用于垂直方向的造腔,在水平方向的造腔控制与预测、造腔控制工艺、顶板的稳定性控制、水平方向溶腔扩展控制、溶腔的形态检测、注气排卤、密封性检测等,一系列盐穴储气库建造的工艺技术需要进行改进和研发实践。

(4) 溶腔的实时造腔监测。目前溶腔建造过程的形态监测依赖于声呐监测,溶腔每建造一个阶段后需要中断造腔进行声呐检测,而造腔过程中无法进行实时形态监控。在盐层内部存在严重非均质情况下,溶腔就可能出现严重的偏溶,如果不能及时掌握溶腔形态,就可能导致最后的造腔体积和形态与设计相差较大,因此,针对复杂地层条件下的溶腔造腔,有效实时监控溶腔的形态是十分必要的。目前没有有效的技术手段进行溶腔形态的实时监控,开发相应的技术是今后盐穴储气库的一个重要发展方向。

第二章 中国盐穴储气库建库潜力分析

地下盐穴储气库由于具有垫气少、注气时间短、采气速率高、利用率高、调峰能力强等优势，成为重要的建库类型，尤其对我国非油气主产区的天然气消费市场而言，盐岩地层成为建库的首选目标。

随着中国天然气长输管网的建设，天然气用户几乎遍布全国，为了保证输气管网的安全平稳运行及应对突发事件，在对中国盐矿资源进行调查的基础上，开展了与建库相关的前期评价工作，为盐穴储气库的建设与规划提供备选库址。本章以我国盐矿资源分布基本情况为基础，通过对天然气骨干管网沿线主要盐矿的基本特征的论述，分析中国盐穴储气库的建库潜力。

第一节 中国盐岩矿床地质特征

盐岩矿床为赋存在地下岩层中的石盐矿床。石盐矿床常常与芒硝、钙芒硝、钾盐、石膏及硬石膏等盐类矿产共生。已在云南、四川、湖北、湖南、江西、安徽、河南、江苏、河北、陕西、山东、新疆等省（自治区）发现大型盐岩矿床。我国盐岩矿床绝大多数埋藏于地下数十米至 5000m，矿体一般呈层状、似层状或透镜状，产状平缓。

一、盐岩矿床的时空分布特征

受频繁海进、海退的影响，干旱气候几乎遍及各个地质时代，作为成盐盆地封闭要素的屏障广泛发育，为盐岩矿床的形成奠定了基础。

（一）时代分布

中国盐岩矿床的主要成盐时代为震旦纪、奥陶纪、三叠纪、白垩纪—新近纪、第四纪，石炭纪、侏罗纪也在局部地区沉积了盐岩。

1. 震旦纪

海水侵入上扬子盆地，形成广阔的浅海区，局部呈半封闭状态，加之气候干旱，在四川盆地西南部长宁凹陷灯影组沉积了规模巨大的海相盐岩矿床。

2. 奥陶纪

海侵广泛，气候干旱，在华北“准地台”上形成若干次一级凹陷，其中在米脂凹陷奥陶系马家沟组沉积了巨厚海相大型盐岩矿床。

3. 石炭纪

气候总体湿润，但局部地区也沉积了海相盐岩，已在塔里木盆地满加尔凹陷北部发现早石炭世海相石盐沉积矿床，盐岩矿床埋深超过 5000m；另在塔里木盆地南缘和西北缘地表发现石炭系盐岩矿床；在宁夏中卫县云台山下石炭统发现石盐及次生石盐。

4. 三叠纪

早、中三叠世由于气候干旱，在上扬子盆地许多封闭条件较好的次一级凹陷中，沉积了嘉陵江组和雷口坡组规模巨大的海相盐岩矿床。