

盐穴地下储气库

YANXUE DIXIA CHUQIKU

丁国生 张昱文 主编

石油工业出版社

盐穴地下储气库

丁国生 张昱文 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

该书详细介绍了盐穴储气库设计和建造所涉及的相关知识、技术和工艺等,包括盐穴储气库选址、盐层地质评价、盐岩力学特征、盐腔形态设计与稳定性评价、盐腔的建造、注气排卤工艺与完整性评价、盐穴储气库注采运行管理以及建库地面工程,最后以我国金坛盐穴储气库为例,说明盐穴储气库建造的过程。

该书可供从事地下储气库科研人员和技术管理人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

盐穴地下储气库/丁国生,张昱文主编.

北京:石油工业出版社,2010.4

ISBN 978-7-5021-7691-4

I. 盐…

II. ①丁…②张…

III. 天然气-地下储气

IV. TE822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 043216 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 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523589

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.5

字数: 318 千字 印数: 1—2000 册

定价: 50.00 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

《盐穴地下储气库》编写组

主 编：丁国生 张昱文

副主编：李建中 魏东吼 杨海军

成 员：郑雅丽 祁红林 田 静 王皆明

崔红霞 冉莉娜 赵艳杰 张刚雄

完颜祺琪 韩冰洁

序 言

天然气地下储气库是天然气上下游产业链中一个重要的不可或缺的组成部分，欧美国家几十年来的天然气利用经验充分证明了地下储气库是最有效、最可靠的调峰和储备手段。目前我国正处在天然气业务快速发展的初期，未来对调峰储气的需求将会不断增长，因此建设与中国未来天然气市场需求相适应的天然气地下储气库，是中国天然气工业可持续发展的重要举措。

盐穴储气库作为一个专门的储气库类型，具有很多其他调峰设施不具备的优势，中国第一座盐穴储气库已经在中国江苏的金坛投入建设和运行，取得了宝贵的盐穴储气库建库经验。尽管如此，盐穴储气库在我国还属于一个新的领域，中国盐穴地下储气库的建设既有较好的发展前景，也还面临着在复杂盐层地质条件下建库的技术挑战。

中国石油勘探开发研究院廊坊分院自 20 世纪 90 年代中期以来就开始从事地下储气库的研究和设计，已经在储气库领域开展了很多工作，承担了很多地下储气库的选址评价和设计。作为中国第一座盐穴储气库选址评价和设计者，编写《盐穴地下储气库》一书，可以系统地总结盐穴地下储气库建库技术、并对今后同类储气库的建设将会大有裨益，起到积极的指导作用。

中国石油勘探开发研究院廊坊分院院长

2010 年 3 月 8 日



前 言

进入 21 世纪以来，中国的天然气工业步入了快速发展的轨道，天然气年消费量不断增长，以陕京输气管工程和“西气东输”管道工程为代表的长输管道工程将中国天然气工业带入了一个新的发展高度。与此同时，与天然气管道工程相配套的各种基础设施的建设也如火如荼，其中作为保障安全平稳供气的地下储气库建设取得了长足的进步，并且必将随着中国天然气消费量的不断增长而快速发展。

盐穴型地下储气库是主要的储气库类型之一，具有注采率高、短期吞吐量大、垫层气量低并可完全回收等优点，已在欧美天然气利用较发达的国家普遍采用。我国盐穴储气库建设起步较晚，仅有 5 年历史，目前金坛盐穴储气库正在建造之中。随着我国天然气工业的不断发展，将会有更多的盐穴地下储气库建成并投入运行，在天然气储备与调峰中发挥重要作用。

盐穴储气库的设计和建造涉及地质评价、岩石力学与稳定性、溶腔设计和建造、盐穴注气排卤工艺、完整性评价、注采运行管理以及地面建设工程等多个学科和领域，是集成多学科为一体的综合技术。

全书共九章，第一章由郑雅丽、张昱文编写，第二章由祁红林、丁国生编写，第三章和第四章由丁国生、冉莉娜编写，第五章由张昱文、赵艳杰、杨海军编写，第六章由丁国生、张刚雄编写，第七章由李建中、王皆明、完颜祺琪编写，第八章由崔红霞、韩冰洁编写，第九章由田静、魏东吼编写，全书由丁国生负责统稿。

在本书的编写过程中，廊坊分院地下储气库中心的任晓萍、汪滌、姜凤光、李春、胥洪成等同志给予了很大帮助；廊坊分院谢荣院教授、中国石油大学（北京）王芝银教授提出了很多宝贵的修改意见；中国石油西气东输管道分公司储气库项目部也给予了大力支持，在此一并表示衷心感谢。

由于本书设计内容较多，加之编者的水平有限，如有不妥之处，敬请读者批评指正。

本书编写组

2010 年 3 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 盐穴地下储气库的发展历史	(3)
第二节 盐穴储气库术语	(4)
第三节 盐穴储气库建库基本原理	(6)
一、建库目标库址的确定	(6)
二、建库方案设计	(6)
三、储气库施工建设	(7)
第四节 国外盐穴储气库介绍	(8)
一、美国盐穴地下储气库	(8)
二、德国盐丘/盐层气库	(11)
第二章 盐穴储气库建库地质条件	(14)
第一节 盐岩物理、化学性质	(14)
一、盐岩的物理性质	(14)
二、盐岩的化学性质	(15)
三、矿石矿物原料特点	(15)
四、石盐矿床的类型	(16)
第二节 盐穴储气库建库地质条件	(19)
一、勘探目标筛选	(20)
二、目标库址的勘探	(24)
三、目标库址建库地质评价	(31)
四、建库区块选择	(44)
第三章 含盐系地层岩石力学特征	(46)
第一节 岩石力学特征测定方法	(46)
一、岩石力学实验设备	(46)
二、岩心试样处理和加工	(47)
三、常规力学实验	(47)
四、蠕变实验	(52)
第二节 含盐系地层岩石短期强度特征	(53)
一、盐岩的力学参数	(53)

二、盐岩的应力—应变关系	(54)
三、盐岩应变硬化—软化特征	(55)
四、盐岩的破坏特征	(55)
五、含夹层盐岩及泥岩的短期强度特征	(55)
第三节 盐岩蠕变特征	(56)
一、盐岩蠕变不同阶段	(57)
二、含盐系地层岩石蠕变力学特性	(57)
三、盐岩蠕变本构关系	(58)
第四章 盐腔形态设计与稳定性	(62)
第一节 设计原则	(62)
一、单腔设计技术要求	(62)
二、腔群设计技术要求	(62)
第二节 稳定性评价	(63)
一、内容	(63)
二、方法	(64)
三、标准	(71)
四、工程应用	(72)
第五章 盐穴的建造	(82)
第一节 造腔基本原理	(82)
第二节 造腔基本过程	(83)
一、建槽期	(83)
二、造腔期	(83)
三、封顶期	(83)
第三节 造腔工程设计	(83)
一、造腔方案设计	(84)
二、造腔工艺	(88)
三、造腔前套管检验和井筒密封性检测	(92)
四、造腔过程控制	(92)
第四节 造腔过程中的形态预测与检测	(94)
一、水溶造腔机理	(95)
二、水溶造腔数值模拟	(97)
三、水溶造腔影响因素	(103)
四、盐腔的检测	(109)
第五节 盐穴建造的钻完井工程	(112)

一、盐穴储气库钻井特征	(112)
二、钻井井型优选	(112)
三、井身结构设计	(114)
四、钻井液优选	(119)
五、套管柱设计	(119)
六、注水泥设计	(121)
七、完井方法	(122)
八、井口装置	(122)
第六节 卤水处理	(122)
第六章 盐穴储气库的密封性评价及注气排卤工艺	(124)
第一节 盐穴储气库的密封性评价	(124)
一、盐穴储气库密封性检测目的	(124)
二、盐穴储气库密封性检测方法	(125)
三、盐穴储气库密封性检测评价标准与评价参数	(126)
四、盐穴密封性能风险分析及影响因素	(128)
五、盐穴密封性测试引起的瞬变现象	(133)
六、典型密封性检测实例	(135)
第二节 盐穴储气库注气排卤工艺	(136)
一、工艺方案	(136)
二、具体施工步骤及要求	(137)
三、施工资料录取要求	(145)
第七章 储气库库容计算与注采运行模拟	(146)
第一节 库容计算	(146)
一、单腔库容计算	(147)
二、单腔工作气量计算	(149)
第二节 盐腔注采运行模拟	(151)
一、盐穴储气库注采计算模型	(151)
二、盐腔运行过程的热动力平衡	(154)
三、盐腔运行动态模拟	(155)
第三节 水合物的形成与防治	(162)
一、水合物生成判定及生成区间预测	(163)
二、水合物生成状况模拟分析	(166)
三、防治水合物生成的措施	(167)
第八章 地面工艺及主要设施	(169)

第一节 储气库地面工艺及设施	(169)
一、配套建设工程范围	(169)
二、站址选择及布置	(170)
三、基础数据	(171)
第二节 注采气站及主要工艺	(172)
一、注采气站的组成	(172)
二、注采气规模的确定	(173)
三、压缩机选择	(173)
第三节 造腔采卤站工艺	(175)
一、造腔采卤站规模确定	(175)
二、造腔采卤站工艺	(175)
三、主要工艺流程	(175)
第四节 自动化控制	(176)
一、自动化控制系统组成及功能	(176)
二、自动控制水平	(176)
三、主要检测控制方案	(177)
第五节 主要设施	(177)
第九章 金坛盐穴地下储气库建库应用与实践	(179)
第一节 建库区地质特征	(179)
第二节 盐腔设计与建造	(181)
一、单腔形态设计	(181)
二、盐腔运行压力及对应的盐腔温度的确定	(181)
三、单腔库容参数	(181)
四、盐腔的建造	(181)
第三节 建库总体规模与方案	(183)
一、建库规模	(183)
二、建库方案	(183)
第四节 项目实施效果	(184)
一、工程建设进程	(184)
二、实施效果	(185)
三、注采气生产运行状况	(185)
参考文献	(187)

第一章 绪 论

天然气地下储气库是将从天然气田（藏）中采出的天然气，重新注入地下具备封闭条件的储集空间中，从而形成的一种人工气田（藏）。

目前世界上天然气地下储气库主要有枯竭油气藏、含水层、盐穴、废弃矿坑及岩洞储气库等类型，其中后两种数量较少。

根据 2009 年 10 月阿根廷第 24 次世界天然气大会储气库工作委员会的统计（Dr Vladimir Onderka *et al.* 2009），世界上 35 个国家运营着各类地下储气库 630 座，总有效工作量达 $3524.81 \times 10^8 \text{m}^3$ （表 1-1）。这些运营的储气库中最主要的类型是枯竭油气藏型，有 467 座，占总数的 74.1%；其次是含水层型，占 13.7%；盐穴型占 11.7%，岩洞及废弃矿井型较少，分别为 0.3%、0.2%（图 1-1）。

表 1-1 世界各地天然气地下储气库统计表

国家	油气藏 (座)	盐穴 (座)	含水层 (座)	岩洞 (座)	废矿井 (座)	总数 (座)	工作气量 ($\times 10^8 \text{m}^3$)
美国	307	31	51			389	1106.74
加拿大	43	9				52	164.13
德国	15	23	7		1	46	203.15
俄罗斯*	15		7			22	955.61
法国		3	12			15	119.13
乌克兰	11		2			13	318.80
意大利	11					11	167.55
捷克共和国	6		1	1		8	30.73
奥地利	6					6	41.84
中国	5	1				6	11.40
波兰	5	1				6	16.60
罗马尼亚	6					6	27.60
英国	3	3				6	37.00
匈牙利	5					5	37.20
澳大利亚	4					4	11.34
日本	4					4	5.50

续表

国家	油气藏 (座)	盐穴 (座)	含水层 (座)	岩洞 (座)	废矿井 (座)	总数 (座)	工作气量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)
哈萨克斯坦	1		2			3	42.03
荷兰	3					3	50.00
乌兹别克斯坦	3					3	46.00
阿塞拜疆	2					2	13.50
白俄罗斯	1		1			2	7.50
丹麦		1	1			2	8.20
斯洛伐克	2					2	27.20
西班牙	2					2	14.59
土耳其	2					2	16.00
阿根廷	1					1	1.00
亚美尼亚		1				1	1.10
比利时			1			1	5.50
保加利亚	1					1	5.00
克罗地亚	1					1	5.58
爱尔兰	1					1	2.10
吉尔吉斯斯坦	1					1	0.60
拉脱维亚			1			1	23.00
葡萄牙		1				1	1.50
瑞典				1		1	0.09
合计	467	74	86	2	1	630	3524.81

* 俄罗斯包括 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 战略储备气量。

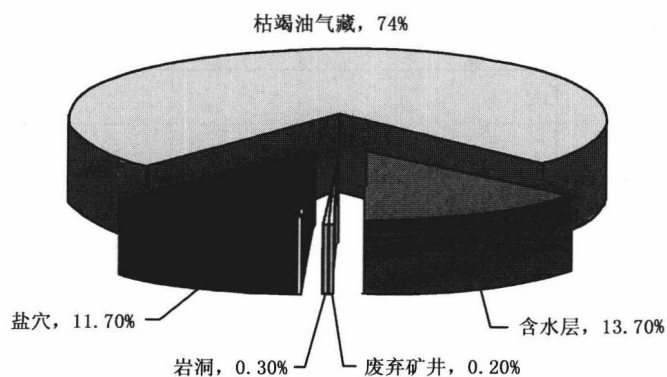


图 1-1 世界不同类型天然气地下储气库数量统计图

第一节 盐穴地下储气库的发展历史

盐穴地下储气库（简称“盐穴储气库”）是利用地下较厚的盐层或盐丘，采用人工方式在盐层或盐丘中水溶形成洞穴储存空间来存储天然气。自 1959 年苏联建成第一个盐穴地下储气库，目前世界上有 74 座盐穴储气库在运行，占储气库总数的 11.7%。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、亚美尼亚、葡萄牙、中国各 1 座；总工作气量为 $161.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占总工作气量的 4.6%（表 1-2）。

表 1-2 世界各地天然气盐穴地下储气库统计表

地区	国家	储气库 (座)	垫气量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	工作气量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	库容量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	注采井 (口)
北美	美国	31	23.32	50.27	73.59	149
	加拿大	9	2.14	6.12	8.26	34
小 计		40	25.46	56.39	81.85	183
欧洲	德国	23	26.3	78.86	105.16	173
	法国	3	7.14	9.73	16.87	36
	英国	3	2.25	5	7.25	11
	丹麦	1	3	4.2	7.2	7
	波兰	1	1.71	3.8	5.51	10
	葡萄牙	1	0.5	1.5	2	3
小 计		32	40.9	103.09	143.99	240
中东	亚美尼亚	1	0.25	1.1	1.35	18
亚洲	中国	1	0.83	1.4	2.23	6
合 计		74	67.44	161.98	229.42	447

用盐丘或盐层储藏的技术最初是德国人 Erdol 在 1916 年 8 月获得的专利，这个专利思想最初是在 20 世纪 50 年代初期的美国应用，而世界上第一座盐丘或盐层储气库却是于 1959 年苏联建成的。

美国于 1961 年在密歇根州 Marysville 首次利用盐穴进行储气，这是一个废弃的盐矿，由密执根天然气公司完成。该气库自 1968 年开始供气，采气量为 $82.12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，注气量是 $34 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，工作气量为 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，压力为 7.2MPa。1970 年密西西比 Eminence 盐丘储气库完成，该储气库当时由 2 个单腔构成，埋藏深度为 1737 ~ 2042m，由于上述两个单腔收缩率达到 40%，2006 年时已废弃，运营的其他 7 个单腔顶面构造深度 731m，工作气量为 $4.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。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 年至 2000 年间投产了 17 座。31 座盐穴储气库顶面构造深度一般为 600 ~ 1300m，运行上限压力

为 7.2 ~ 24.8 MPa。在用气季节高峰期, 盐穴地下储气库能够保证采出 40% 以上的天然气, 最大采气量可达 $180 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

加拿大第一座盐穴储气库建于萨斯喀彻温省 (Thoms R L, et al. 2000), 于 1963 年开始运行, 该气库埋深 1128m, 储气空间为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。截至 2009 年运行的 9 座盐穴储气库顶面构造深度一般为 1000 ~ 1200m, 运行上限压力为 15.2 ~ 26.7 MPa, 最大采气量为 $70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

法国首座盐穴储气库 Tersanne (Thoms R L, et al. 2000) 于 1970 年开始投入使用, 气库埋深介于 1400 ~ 1500m 之间, 单腔高度 150m, 库容量为 $3.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 运行压力为 8 ~ 24 MPa, 工作气量为 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。另两座储气库分别建成于 1980 年、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 (Thoms R L, et al. 2000) 盐丘上建造了首座盐穴储气库, 深度为 1307 ~ 1335m。截至 2009 年运行的 23 座盐穴储气库顶面构造深度一般为 500 ~ 1500m, 运行上限压力为 10 ~ 23.9 MPa, 最大采气量为 $215 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

英国于 1974 年建成了其首座盐穴储气库, 由两个单腔构成, 工作气量为 $0.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其后在 1980 年建成了第二座, 由 9 个单腔构成, 顶面构造深度为 1800m, 工作气量为 $3.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

法国燃气公司拥有 3 座盐穴储气库, 分别建于 1970 年、1980 年和 1993 年, 单腔顶面构造深度分别为 1400m、1400m 和 1000m, 工作气量分别为 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $4.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

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

总体来看, 国外利用盐穴作为储气库的历史最早可以追溯到 20 世纪 50 年代, 其后该项技术在北美及欧洲推广, 法国、德国、英国和丹麦等相继建成盐穴储气库, 截至 2009 年世界上的 74 座盐穴储气库已建成总库容量为 $229.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 工作气量为 $161.98 \times 10^8 \text{ m}^3$, 工作气量占库容量的 70.6%。

我国对盐穴储气库的研究始于 1999 年, 初期主要是对国内的盐矿进行调查, 初步评价各盐矿的建库地质条件。随着西气东输战略工程的实施, 2001 年 1 月启动了西气东输工程建设天然气地下储气库工程可行性研究项目, 确定了江苏金坛作为国内首个盐穴储气库建库目标; 2005 年 4 月完成了西气东输金坛地下储气库地下建设工程初步设计; 2006 年 8 月完成了金坛第一批 15 口新井的钻井施工作业; 2005 年 1 月金资井首先开始造腔作业, 2006 年 7 月完成了 6 口老腔改造与利用的施工作业, 并形成 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储气能力。总之国内首座盐穴储气库工程——金坛盐穴储气库工程的建设正在进行之中, 设计单腔有效储气空间为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$, 有效工作气量为 $2550 \times 10^4 \text{ m}^3$, 第一批储气库井预计于 2010 年上半年完成造腔, 届时可形成 $3.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 调峰能力。

第二节 盐穴储气库术语

盐丘 (salt dome): 主要由盐岩组成呈穹隆状分布的地层。

盐层 (salt bed): 主要由盐岩组成层状分布的地层。

盖层 (caprock): 盐层上覆的非渗透性地层。

顶板 (roof pillar): 经溶滴后盐腔顶界与盐层顶界之间保留的盐体。

底板 (bottom pillar): 经溶滴后盐腔底界与盐层底界之间保留的盐体。

盐腔 (salt cavity): 通过人工溶滴方式在盐岩构造内形成的地下洞穴。

单腔 (individual cavity): 盐层中由单井溶滴方式形成的独立盐腔。

腔群 (cavern cluster): 一定范围内多个盐腔的集合。

已有采卤盐腔 (existing cavern): 以采卤为目的, 溶滴时对形态未经人工控制的盐腔。

上限压力 (maximum operation pressure): 盐腔使用过程中, 在套管鞋处允许的最大压力。

下限压力 (minimum operation pressure): 盐腔使用过程中, 在套管鞋处允许的最小压力。

矿柱 (salt pillar): 相邻盐腔之间保留的盐体。

矿柱宽度 (pillar width): 相邻盐腔边界之间的最小距离。

盐腔闭合 (cavity convergence): 在应力作用下, 盐岩体蠕变造成盐腔体积减小的现象。

盐腔稳定性 (salt cavity stability): 盐腔不发生力学破坏及过度变形, 保持整体稳定。

盐腔有效体积 (cavity free volume): 盐腔内可以储存天然气的体积。

库存量 (cavity stock): 在一定的温度压力时, 盐腔内可容纳的天然气折算为标准状况下的天然气体积量。

最大库容量 (maximum cavity stock): 原始盐层温度, 上限压力时, 盐腔内可容纳的天然气折算为标准状况下的天然气体积。

垫气量 (cushion gas stock): 原始盐层温度, 下限压力时, 盐腔内可容纳的天然气折算为标准状况下的剩余天然气体积。

最大工作气量 (maximum working gas stock): 原始盐层温度条件下, 从上限压力到下限压力, 允许从盐腔中采出的标准状况下的天然气体积, 即最大库容量与垫气量之差。

造腔 (solution mining): 在一定的控制条件下, 把淡水或不饱和卤水注入盐层或盐丘中, 通过溶解盐岩并排出卤水, 从而在地下形成特定形态的储存空间。

底坑 (sump): 造腔初期建造的用于盛装盐岩中不溶物的空间。

垫层 (blanket): 一种比水密度低且不能溶解盐的气态或液态物质, 此种物质可以有效控制盐岩溶解范围, 保护生产套管鞋, 控制盐腔形态。

正循环 (direct circulation): 造腔过程中, 从中心管中注入淡水 (或低浓度卤水), 从中心管和中间管之间的环形空间中排出卤水的流体循环过程。

反循环 (reverse circulation): 是指造腔过程中, 从中心管和中间管之间的环形空间中注入淡水 (或低浓度卤水), 从中心管中排出卤水的流体循环过程。

中间管 (intermediate tubing): 悬挂于生产套管之中, 其与生产套管之间的环形空间用于储存垫层材料的管柱。

中心管 (central tubing): 悬挂于中间管之中, 并与中间管一起实现注水和卤水排放作业的管柱。

环形空间保护液 (annulus protecting fluid): 完井作业时, 在封隔器、生产套管、注采管柱和井口组成的密闭环形空间内注入的具有防腐功能的液体。

井下安全阀 (subsurface safety valve): 安装于井下注采管柱上的, 用于紧急状态下自动

关闭气体流动通道的装置。

注采管 (injection and production tubing)：指组成注采管柱的气密封油管。

注采管柱 (injection and production tubing assembly)：由注采管和井下工具组成，是连接盐腔和地面管线的注气和采气管柱通道，同时也是注气排卤作业中形成注气通道的油套环形空间的外层管柱。

注气排卤 (gas injection and debrining)：通过注采管柱和排卤管柱间的环形空间注入天然气，同时通过排卤管柱排出卤水的作业过程。

注气排卤井口 (wellhead for gas injection and debrining)：在盐穴储气库井口悬挂注采管柱和排卤管柱，满足注气排卤和注采气需要的专用装置。

卤水 (brine)：造腔过程中从井内返出的溶离盐岩形成的水溶液。

排卤管 (debrining tubing)：组成排卤管柱的油管。

排卤管柱 (debrining string)：由排卤管和井下工具组成，是注气排卤作业中将卤水排到地面的管柱通道。

第三节 盐穴储气库建库基本原理

盐穴的形成一般采用水溶方式完成，盐岩的主要矿物成分为氯化钠等，其中，钠盐含量一般为 70% ~ 90% 或以上。钠盐易溶于水，水溶建库正是利用盐岩的这种物理性质，在地面打一口井钻至盐床内部，将淡水（地表水或地下水）用泵通过造腔管柱泵入盐层，水洗溶盐后，从井下抽出，返出地面加以处理或利用。在人工控制的情况下连续不断地溶离，盐层中水洗溶盐形成的空间逐渐扩大，最终形成达到设计要求的地下盐穴。地下盐穴形成后，向其中注入天然气将卤水驱替出来，即完成了盐穴储气库的建设过程。盐穴储气库的建造大致经历以下几个阶段或过程：建库目标库址的确定、建库方案设计、储气库施工建设。

一、建库目标库址的确定

本阶段的目的是确定储气库建库目标、区块及层段，分为如下两个阶段。

（一）区域普查，确定建库目标库址

大多数盐岩矿床是通过地震普查、油气勘探钻井或盐矿开采过程中发现的。本阶段的任务就是利用现有的物探、钻探、地球物理测井及盐矿的水采等资料开展盐岩矿床构造、断裂系统、盐岩分布规律、含盐层系内部结构，盖层分布及封闭性、盐岩稳定性等分析评价，初步评价盐岩矿床是否具备建设盐穴储气库的基本条件。

（二）建库区块及层段的确定

本阶段借助地震、探井、采盐井或新钻资料井的手段，来确定盐体的埋深、分布、形态、边界、盖层特征和地层层序；借助岩心资料分析盐层及夹层的物理化学特性、分析盖层及夹层的密封性、分析含盐地层的力学特性，评价优选有利的建库区块及层段。

二、建库方案设计

建库方案设计包括储气库建设地质方案及工程方案（钻完井工程、造腔工程、注气排

卤工艺、地面工程)两个方面。

(一) 储气库建设地质方案

通常称之为建库方案,方案设计,此阶段重点评价盐岩在力学上的长期稳定性和闭合速度,考虑单腔的深度、体积、几何形态、高宽比、顶部形态、盖层的特性和完整性,确定单腔的基本形态参数及运行压力范围、合理注采气速度,同时确定合理的安全矿柱宽度,完成建库部署设计方案。

(二) 储气库建设工程方案

钻完井工程:包括井身结构、套管程序、钻井液设计、钻机选择、固井液设计、水泥浆配方等。

造腔工程:包括造腔管柱优选、水力计算、阻溶剂设计及盐腔检测等。

注采气排卤工艺:包括注采管柱设计、注气排卤管柱设计、注气排卤施工程序和设备等。

地面工程:包括注采气站、输气干线、集输系统、公用工程、生产组织及定员等。

此外,还包括安全、环保、职业卫生、自然灾害评估等及其预案。

三、储气库施工建设

储气库施工建设要严格执行国家与行业现行的有关标准、规程和规范,严格按照设计进行施工,同时要保证重视整个工程所涉及范围内生态环境的保护。

储气库的施工建设是项复杂的系统工程,除了相配套的地面设施、设备、管线的建设外,还包括钻井、造腔、注气排卤等方面。

盐穴储气库一般由多个单腔构成,一般采用直井单腔的钻井方式。储气库建设步骤如下。

(1) 钻完井:储气库井根据设计方案钻至设计深度后,下入设计尺寸的套管固井;然后再在套管内从外向内依次下入中间管和中心管,安装造腔井口装置。

(2) 造腔:是个有控制的水溶采卤过程,在采卤管柱下到盐层内以后,由高压大排量离心泵,通过地面管汇和采卤管柱,将淡水注入盐层,溶解盐层后形成卤水,再返回地面处理利用或排放。不间断地注入淡水和返出卤水,在盐层中便形成越来越大可供储存天然气的空间。为了建造规定体积和形态的稳定盐腔,造腔初期(建槽)和末期(修整)使用正循环,其余大部分时间使用反循环,在造腔不同阶段要及时调整管柱下入深度、阻溶剂界面位置、注入淡水排量。在盐腔建造完成之后,测量有效体积和形态,测试对气体的密封能力,评价各部位的稳定性能。

(3) 注气排卤:造腔作业完成后拆除井口装置,再下入注采气油管柱,通过密封性检测合格后,开始注气排卤作业。注气排卤过程是从油管环形空间向盐穴内注入天然气,卤水通过油管被置换到地面。这是盐穴地下储气库首次注入天然气的作业,标志着从建设阶段向生产运行阶段的过渡。

(4) 注采排卤作业结束后,从井内起出排卤油管柱,安装注采天然气井口,至此,完成了盐穴储气库地下工程建设,可以转入储气库的正常运行。

值得指出的是:在造腔过程不同阶段及造腔结束需要对盐腔形态进行检测;须对完钻井眼、完成的盐腔及井口装置、下入管柱等进行密封性检测。