

含水层地下储气库

丁国生 王皆明 郑得文 主编



石油工业出版社

含水层地下储气库

丁明 王明 孙文 等



地质出版社

含水层地下储气库

丁国生 王皆明 郑得文 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

该书详细介绍了含水层地下储气库的设计和建设所涉及的相关知识、技术和工艺,包括含水层建库勘探与评价、含水圈闭有效性地质评价方法、建库渗流机理、工作井注采能力预测方法、库容参数预测方法、注采运行动态预测方法、钻完井技术、动态监测技术及地面工艺,还建立了含水层建库条件评估标准和建库地质方案设计流程,可为今后该类型储气库评价与建设打下较好的基础。

本书可供从事地下储气库工作的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使用。

图书在版编目(CIP)数据

含水层地下储气库/丁国生等主编.

北京:石油工业出版社,2014.8

ISBN 978-7-5021-9916-6

I. 含…

II. 丁…

III. 含水层-地下储气库-研究

IV. TE972

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 298433 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

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.75

字数:290 千字

定价:56.00 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

《含水层地下储气库》

编 委 会

主 编：丁国生 王皆明 郑得文

成 员：李建中 郑雅丽 祁红林 田 静 袁进平

胥洪成 李 春 孙军昌 赵艳杰 完颜祺琪

张刚雄 冉莉娜 张 敏 韩冰洁 李清山

唐立根 孙春柳 王 影 垢艳侠 武志德

石 磊 赵 凯 魏 欢

序

跨入 21 世纪以来,中国的天然气工业步入了快速发展的轨道,伴随着天然气消费市场的不断扩大,储气与调峰的需求增长趋势十分明显。地下储气库作为天然气产业链中不可或缺的最有效、最可靠的调峰和储备手段,也将迎来大规模的建设时期。目前,储气库建设已经列入中国天然气安全稳定供气的重点工程。建设与中国天然气市场需求相适应的天然气地下储气库,不仅能够保障安全、稳定供气,而且也是改善大气环境、提升经济社会发展效益的重要举措。

国内经过近 20 年的地下储气库建设与发展,已经陆续有十余座气藏和盐穴型地下储气库建成并投入运行,在环渤海湾和长三角地区天然气调峰中发挥了重要作用。同时在借鉴国外成熟经验的基础上,通过边建设边探索,逐步形成了适应我国复杂地质条件气藏和盐穴型地下储气库建设配套技术体系。但由于中国地域辽阔,尤其是中国南方广大天然气下游用户区,油气藏和盐穴型地下储气库建库资源匮乏,需要开辟新的地下储气库建库领域,以满足日益增长的调峰和应急需求。

含水层地下储气库是世界上第二大类型的地下储气库,在欧美发达国家已有半个世纪的历史,建库技术也日臻成熟,为中国的含水层地下储气库建设提供了很好的借鉴经验。国内的含水层地下储气库建设已经提上议事日程,中国石油勘探开发研究院廊坊分院自 2000 年以来一直致力于含水层地下储气库建库基础理论研究,在充分调研国外成熟经验的基础上,开展了大量卓有成效的工作,并先后承担完成了华北风河营、湖北潜江及华北孙虎潜山等多个含水圈闭建库前期评价研究工作,作为国内最早的地下储气库研究设计部门之一,我们有义务系统地介绍含水层地下储气库的相关理论和知识。

本书以近年来相关的研究为基础,按含水层地下储气库建设所涉及的地球物理勘探、地质、气藏工程、钻完井和地面工程等专业学科分别进行了比较系统的总结和介绍,希望可以给从事相关领域研究和设计的人员提供参考。但由于国内尚无建成并运行的含水层地下储气库予以借鉴,因此在含水层地下储气库实践经验及相关技术的介绍难免有所欠缺和疏漏,还敬请读者给予批评指正。

丁国生

2013 年 11 月

前 言

含水层地下储气库（简称含水层储气库）是利用地下适宜的含水储层，通过人工注气驱水方式形成的次生气顶来储存天然气。自 1946 年美国建成第一座含水层储气库，目前世界上共有 86 座含水层储气库在运行，占全球各类储气库总数的 13.7%，是仅次于气藏型地下储气库的第二大储气库类型，在西欧和北美等天然气消费发达地区季节调峰和应急储备中发挥了至关重要的作用。

由于含水层储气库完全是由人工注气形成的地下储气构造，因此含水层储气库的建设具有一定的特殊性和复杂性，从早期的圈闭勘探到最终形成次生气顶发挥调峰功能，要经历区域勘探、圈闭预探、地质详探、工业性试注和商业化循环注采运行等多个阶段，建库周期一般长达 5~10 年。在这一过程中，需要地球物理勘探、地质、气藏工程、钻完井和地面工程等多专业紧密配合，相互衔接，按照含水层储气库建设的特点，发挥各专业的优势，共同完成这一复杂的系统工程。

含水层储气库作为一个新的门类，在中国目前尚处于前期库址筛选评价和建库理论探索研究阶段，还需要经过进一步的技术攻关与实践。但由于我国地下储气库（简称储气库）建设需求大，尤其是未来中国广大的非油气资源区的储气库建设，将更多的依赖含水层储气库以满足日益增长的调峰需求，因此系统介绍含水层储气库建设的相关技术和理论，对中国未来含水层储气库的建设大有裨益。

本书是在调研大量国外含水层储气库文献资料的基础上，结合近几年国内含水层建库基础理论研究成果，经充分提炼和总结而成。全书比较系统地介绍了含水层储气库建设所涉及的地球物理勘探、地质、气藏工程、钻完井和地面工程等相关专业学科的基础理论体系和实用方法，为下一步国内含水层储气库工程设计与实施提供参考，也可为希望了解含水层储气库相关知识的读者提供一定的帮助。

全书共分十二章，第一章由丁国生、王皆明、郑得文编写；第二章由丁国生、祁红林、完颜祺琪编写；第三章由郑得文、郑雅丽、赵艳杰编写；第四章由王皆明、郑雅丽、李青山；第五章由王皆明、孙军昌、石磊编写；第六章由王皆明、武志德、垢艳霞编写；第七章由丁国生、王皆明、胥洪成编写；第八章由王皆明、李春、赵凯编写；第九章由丁国生、韩冰洁、张敏编写；第十章由袁进平、李建中、田静、张刚雄

编写；第十一章由王皆明、唐立根、魏欢编写；第十二章由丁国生、冉丽娜、孙春柳编写。全书由丁国生负责统稿。

在本书的编写过程中，中国石油勘探开发研究院廊坊分院张昱文教授和华北油田勘探开发研究院朱亚东教授对本书的完成作出了重要贡献，在表示衷心感谢。

由于本书涉及内容较多，加之编者的水平有限，如有不妥之处，敬请读者批评指正。

编委会

2013 年 11 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 含水层地下储气库发展历史	(1)
第二节 含水层地下储气库术语	(7)
第三节 含水层地下储气库建库基本原理	(8)
第二章 含水层建库勘探与评价	(11)
第一节 总体工作流程	(11)
第二节 区域勘探	(12)
第三节 圈闭预探	(14)
第四节 地质详探	(19)
第三章 含水圈闭有效性地质评价方法	(23)
第一节 构造评价方法	(23)
第二节 储层评价方法	(26)
第三节 盖层封闭性评价方法	(34)
第四节 断层封闭性评价方法	(36)
第四章 含水层地下储气库建库条件评估	(50)
第一节 圈闭密封性	(50)
第二节 埋藏深度	(54)
第三节 圈闭闭合幅度	(57)
第四节 含水层渗透率	(59)
第五节 水体规模	(61)
第六节 综合分析	(63)
第五章 含水层地下储气库建库渗流机理	(65)
第一节 渗流基础理论	(65)
第二节 气水互驱相对渗透率曲线特征	(71)
第三节 次生气顶形成过程渗流机理	(73)
第四节 多周期运行过程中库容及渗流能力变化特征	(76)
第五节 岩石应力敏感性评价	(77)
第六节 含水层地下储气库建库与注采运行的微观可视化模拟	(79)

第六章 含水层地下储气库工作井注采能力预测方法	(85)
第一节 工作井注采气能力估算方法	(85)
第二节 工作井注采气节点压力系统分析预测方法	(88)
第三节 控制水锥进的临界产量预测方法	(93)
第四节 工作井最小携液产量预测方法	(95)
第五节 工作井冲蚀安全流量预测方法	(96)
第六节 影响工作井注采气能力的主要因素分析	(98)
第七章 含水层地下储气库库容参数预测方法	(100)
第一节 含水层地下储气库运行上限压力预测方法	(100)
第二节 含水层地下储气库库容量预测方法	(101)
第三节 含水层地下储气库工作气体积优化预测方法	(102)
第四节 含水层地下储气库不对称操作时循环操作曲线预测	(108)
第五节 降低含水层地下储气库压力增加工作气量的计算方法	(111)
第六节 含水层地下储气库排水参数计算	(112)
第八章 含水层地下储气库注采动态运行预测方法	(115)
第一节 含水层地下储气库注采物质平衡方法	(115)
第二节 含水层地下储气库注采周期函数关系预测方法	(121)
第九章 含水层建库地质方案设计	(129)
第一节 总体技术流程	(129)
第二节 含水层建库地质综合评价	(132)
第三节 注采渗流机理研究	(134)
第四节 工作井注采气能力评价	(136)
第五节 库容参数设计	(137)
第六节 注采运行方案设计	(139)
第七节 监测方案设计	(140)
第八节 整体方案部署与实施	(142)
第十章 含水层地下储气库钻完井技术	(143)
第一节 保护储层的钻完井技术	(143)
第二节 提高注采井密封效果的固井技术	(144)
第三节 注采井完井管柱优化技术	(156)
第四节 气井防砂技术	(160)
第五节 气井防腐技术	(165)
第六节 排液井排水工艺技术	(172)
第十一章 含水层地下储气库监测技术	(174)
第一节 含水层地下储气库天然气泄漏损耗因素	(174)

第二节	含水层地下储气库监测技术	(176)
第十二章	含水层地下储气库地面工艺及主要设施	(184)
第一节	注采气站工艺	(184)
第二节	输气系统工程	(187)
第三节	自动控制工程	(189)
参考文献		(191)

第一章 绪 论

第一节 含水层地下储气库发展历史

一、含水层地下储气库概述

天然气地下储气库（以下简称“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）。

建设储气库的主要目的，一是缓解季节（月、日）用气量的不均衡性，保证天然气藏生产和输气管道的平稳运行，以利于输气管道的优化和降低管道建设投资；二是作为应急和战略储备，以保证在输气管道发生故障或系统检修时，仍然可以向城市工业和居民连续、稳定供气；而作为战略储备，主要是应对天然气地区性供应中断或短缺时的应急之需；三是进行一定的商业运作，以获取天然气价格差。储气库储备的天然气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，供气与用气双方都可以从天然气季节性或月差价中实现价格套利。

按照储气库所在地层的地质特点，目前世界上天然气地下储气库可分为 4 种类型，即油气藏型、地下含水层型、盐穴型、废弃矿坑和岩洞型，其中后两种类型的储气库数量较少。法国国际天然气信息中心统计，截至 2013 年 1 月，全球 48 个国家共有 688 座储气库在运行，总工作气量为 $3770 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占 2012 年全球天然气总消费量的 10.3%。同时，目前在建储气库 95 座，预计增加工作气量 $680 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，另有 141 座储气库处于计划或筹备建设中。

含水层型地下储气库（以下简称“含水层储气库”）是通过高压将天然气注入具备一定储存条件的地下含水储层中，通过注气驱水而形成的一种人工气藏。含水层储气库一般建在背斜构造的含水地层中，要求满足 3 个基本条件：①具有良好的多孔、高渗透性和具有一定厚度的储层，储层孔隙度和渗透率要满足一定的标准（如前苏联规定适宜建设储气库的含水储层孔隙度不低于 10% ~ 15%，渗透率不低于 200 ~ 300mD，储层厚度不小于 4 ~ 6m）；②有可靠的盖层，保证气体不会发生垂向泄漏；③储层周围密封性良好，保证气体不会发生侧漏。

根据 2009 年 10 月在阿根廷召开的第 24 次世界天然气大会储气库工作委员会的统计，目前世界上共有 86 座含水层储气库在运行，占全球各类储气库总数的 13.7%，总

工作气量为 $412.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占全球储气库总工作气量的 14.57%。86 座含水层储气库主要分布在北美、欧洲地区和独联体国家，其中美国 51 座、法国 12 座，德国和俄罗斯各 7 座，其余国家数量较少。表 1-1 为世界各地含水层储气库统计结果。

表 1-1 世界各地含水层储气库统计表

地区	国家	储气库 (座)	库容 (10^8 m^3)	工作气量 (10^8 m^3)	垫气量 (10^8 m^3)	注采井 (口)
北美	美国	51	378.69	101.66	277.03	1705
小计	—	51	378.69	101.66	277.03	1705
欧洲	法国	12	253.80	109.4	144.40	363
	德国	7	25.62	11.53	14.09	81
	比利时	1	11.00	5.50	5.50	11
	丹麦	1	12.30	4.00	8.30	13
	拉脱维亚	1	44.45	23.00	21.45	180
	捷克	1	3.35	1.77	1.58	20
小计	—	23	350.52	155.20	195.32	668
独联体	俄罗斯	7	337.90	156.50	181.40	667
	乌克兰	2	36.60	18.10	18.50	107
	哈萨克斯坦	2	16.03	6.53	9.50	89
	白俄罗斯	1	7.00	4.00	3.00	40
小计	—	12	397.53	185.13	212.40	903
合计	—	86	1126.74	441.99	684.75	3276

二、含水层储气库发展历史

世界上第一座含水层储气库（Doe Run Upper 储气库）始建于 1946 年，建在美国肯塔基州和印第安纳州交界处的杜茹安地层中。该地层埋深 170m，岩性为石灰岩。Doe Run Upper 储气库投入运营后最大工作气量为 $1.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，垫气量为 $0.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，总工作井数为 93 口，观察井数为 4 口。世界上第二座含水层储气库（Herscher Galesville 储气库）建在美国的艾奥瓦州，该地层埋深 536m，工作气量为 $3.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，垫气量为 $6.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，总工作井数为 53 口，观察井数为 163 口。现今美国国内运营的 51 座含水层储气库全部均在 1976 年前建成并投入运营。

（一）俄罗斯含水层储气库

苏联地下储气的需求产生于 1950—1955 年，1956 年开始了实际勘察工作，寻找适合建造储气库的地下含水构造，同时也开展了利用气藏建造储气库的研究工作。苏联建造的第一座含水层储气库，是靠近莫斯科的加卢什（Kalugskoe）储气库，该储气库

具有地质构造复杂、储层稳固和气井产量高等特点，含水构造顶部埋深为 800m。1959 年 8 月开始向被选作储气目标的寒武纪含水砂岩注气。投入运营后，加卢什储气库总工作气量为 $4.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，垫气量为 $2.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，最大日采气量为 $1350 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在建加卢什储气库时，苏联完成了大量试验性、基础理论和方法方面的研究工作，积累了丰富的实践经验，培养出一批从事含水层储气库建设方面的专门人才。

苏联建设的第二座含水层储气库为肖洛柯（Schelkovskoe）储气库，1961 年投入运营后，肖洛柯储气库库容高达 $33.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，工作气量为 $13.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1968 年，苏联在靠近圣彼得堡的加特奇纳市附近建成了世界上第一座接近在水平含水地层中建造的储气库，其工作气量和垫气量分别为 $2.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，最大日采气量为 $200.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1975 年 8 月，苏联开始在莫斯科市附近的卡西莫夫镇建设卡西莫夫（Kasimovskoe）储气库，1977 年 10 月开始注气试运行。在第一期建设时仅包括一个集气站（命名为 1 号集气站），以及与其连接的 10 口注采井，第一次注气时将 $800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 天然气注入地下含水层。在随后的 5 年中，配套的气体分离和干燥装置开工建设，连接至卡西莫夫镇的输气管道也全线贯通。1983 年开始，卡西莫夫储气库开始了第二期建设和扩容工作，开始新建了 2 号和 3 号集气站及与其相连接的 70 口注采井。1998 年以后，卡西莫夫储气库进行的工作主要为钻大井眼井和增加建设压缩机。截至目前，卡西莫夫储气库工作气量为 $90.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，垫气量为 $100.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是目前世界上最大的含水层储气库，其工作井数达到 287 口，日最大供气量为 $1.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

截至 2009 年 10 月，俄罗斯共建成含水层储气库 7 座，总工作气量为 $156.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，注采井数为 667 口，观察井数为 659 口（表 1-2）。7 座含水层储气库地层埋深分布在 400 ~ 1050m 之间，储层平均孔隙度和渗透率分别为 24.38% 和 2500mD，增压系数平均为 1.39。

表 1-2 俄罗斯含水层储气库统计表

序号	储气库名称	投运年份	工作气量 (10^8 m^3)	垫气量 (10^8 m^3)	最大采气量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{h}$)	工作井数 (口)	观察井 (口)	含水层埋深 (m)	上限压力 (MPa)
1	Kalugskoe	1959	4.1	2.2	56.25	38	82	800	11.2
2	Schelkovskoe	1961	13.0	20.0	42.00	122	95	880	10.6
3	Gatchinskoe	1963	2.0	3.1	8.34	42	124	400	4.6
4	Nevskoe	1975	16.0	20.0	87.50	67	64	1050	15.0
5	Kasimovskoe	1977	90.0	100.0	416.70	287	159	760	11.5
6	Uvyazovskoe	1998	25.0	30.0	70.80	88	70	760	11.5
7	Udmurd Reservation Comple-Karashurskoe	2003	6.4	6.1	36.30	23	65	—	—
合计	—	—	156.5	181.4	717.89	667	659	—	—

俄罗斯含水层储气库建设的经验和研究成果简述如下。

1. 地质勘探与评价

含水层储气库选址应从含水层地质特征、距离输气主干线和大型工业中心的距离等方面综合考虑。对于具有建库潜力的含水层，要求含水圈闭构造较为完整，储层孔隙度和渗透率较高，一般要求储层孔隙度不小于 10% ~ 15%，渗透率不小于 200 ~ 300mD，储层厚度不小于 4 ~ 6m，盖层渗透率小于 0.01mD。对于封闭型含水层储气库，要求水体体积应为储气库容积的几百倍以上，否则仅依靠系统弹性向储气库注气难度较大。

建库地质勘探与评价阶段主要进行 3 项工作：①对准备建造储气库的区域，应对其现有的地理和地质资料进行收集和综合分析；②对选定地区进行专门的地球物理勘探；③进行勘探钻井。在地质勘探与评价阶段，首先需要证实在所选定的区域是否有含水圈闭存在，在获得肯定结果的基础上，对含水圈闭构造特征、地质特征、圈闭密封性（尤其是盖层封闭性）和储层物性进行系统的研究，研究评价结果将直接指导下一步的探测性注气作业。

俄罗斯建造含水层储气库特别强调综合采用多种方法进行研究，包括地震法、地球物理法、岩心实验、水文地质法、地球化学法及其他气动力学法等。在最终提供的研究报告中，也需要详细列出地质资料（包括岩石学、地层学和构造地质学资料）、水文化学资料（包括地下水的化学成分、水的盐度在平面和地层深度上的分布等）和水动力学资料（包括基础含水层和监测含水层个别地带之间的水动力学关系，以及地层渗透率、压力传导性、水力传导性等资料）。

地质勘探阶段在构造隆起上布井时，需要考虑以后进行水动力学和气动力学勘察时，以及将来储气库投产后，如何使这些井得到有效利用，以减少储气库建造费用和缩短建库周期。

2. 建库地质方案设计

建库地质方案设计的主要原始数据包括储气库的库容、工作气量和最大采气能力，这些数据可以通过与其他参数的互相结合而获得，如储气库的最大和最小压力、地层水的驱出液位、井数等。在建库地质方案设计中要制订出储气库的最佳操作方案，建库地质方案设计要与探测—工业性注气试验相结合，试验性注气提供的数据不仅能够帮助解决地质勘探中尚未解决的问题，而且对于计算确定合理的库容参数也具有重要的指导作用。

俄罗斯常采用由 C. H. 布金诺夫和 E. B. 列维金提出的方法进行地层部分循环操作关键参数的计算，该方法通过将储气库假设为一个直径为 r_{ϕ} 、分布在无限均匀的等厚地层中放大的井，认为储气库内压力变化可以忽略不计，以及气体饱和度被认为是定值。在计算中，将气体流量看作是时间的周期函数，然后与描述含水区压力变化

的谐波扰动方程进行联立求解，便可计算得到储气库地层部分操作的水动力学主要指标和工艺指标之间的关系。

含水层储气库最大压力的确定，推荐采用 Zheltov 提出的方法，充分考虑盖层断裂压力和含水层侧围压等参数，认为储气库最大允许压力与含水层埋深、含气面积大小、含水构造特征、盖层岩石力学强度和密封性、可塑性有关。俄罗斯含水层储气库建设经验表明，当含水层盖层厚度大于 5m 时，储气库最大允许压力可为静水压力的 1.3 ~ 1.5 倍。

（二）法国含水层储气库

由于天然气供需矛盾的持续加剧，法国于 1956 年开始在距离巴黎西 40km 的 Beynes 地区建设 Beynes 含水层储气库，该储气库含水构造顶部埋深 405m，至 1997 年 Beynes 储气库总库容为 $4.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，工作气量为 $2.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是法国建设的第一座储气库。法国建设的第二座含水层储气库为 Lussagnet 储气库，含水构造顶部埋深为 545m，工作气量为 $10.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，垫气量为 $13.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1968 年，法国建成了库容和工作气量仅次于俄罗斯卡西莫夫储气库的世界第二大含水层储气库——Chemery 储气库，该储气库库容为 $70.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，工作气量为 $35.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，注采井和观察井数分别为 67 口和 26 口。

截至 2009 年 10 月，法国国内运营的 15 座储气库中有 12 座为含水层储气库，是世界上拥有含水层储气库比例最高的国家，含水层储气库工作气量占国内储气库总工作气量的比例高达 91.83%（表 1-3）。12 座含水层储气库地层埋深分布在 395 ~ 1140m 之间，储层平均孔隙度和渗透率分别为 21.7% 和 1710mD，增压系数平均为 1.38，储层有效厚度平均为 35.92m。

表 1-3 法国含水层储气库统计表

序号	储气库名称	投运年份	工作气量 (10^8 m^3)	垫气量 (10^8 m^3)	最大采气量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{h}$)	工作井数 (口)	观察井 (口)	地层深度 (m)	上限压力 (MPa)
1	Lussagnet	1956	10.80	13.20	93.7	44	15	545	7.62
2	Beynes Superieur	1956	1.70	2.20	18.0	17	14	395	4.90
3	Saint-Illiers-La-Ville	1965	6.00	8.5	62.0	31	17	470	6.95
4	Chemery	1968	35.00	35.00	220.0	67	26	1086	15.50
5	Beynes Profond	1975	3.30	4.70	40.0	24	11	740	9.85
6	Izaute	1976	13.50	17.10	45.8	16	9	510	7.18
7	Gournay-Sur-Aronde	1976	12.70	19.40	110.0	60	17	720	10.60
8	Saint-Clair-Sur-Epte	1979	4.25	5.75	15.0	17	18	700	10.30
9	Soings-En-Sologne	1981	2.15	5.80	32.0	11	18	1140	16.00
10	Germigny-Sous-Coulombs	1982	8.00	18.70	40.0	25	25	850	12.35
11	Cere-La-Ronde	1993	5.50	5.80	22.0	13	13	910	13.00
12	Cerville-Velaine	—	6.50	8.50	40.4	38	17	470	6.10
合计	—	—	109.40	144.40	738.9	363	200	—	—

(三) 德国含水层储气库

由于国内天然气用量的增加和已开发气田产量的下降, 联邦德国国内天然气消费量对外依存度越来越高。20 世纪 50 ~ 60 年代, 联邦德国国内天然气消费量的一半依赖进口, 至 1981 年, 天然气消费量的 70% 依赖进口。因此, 联邦德国 (即 1989 年之前的西德) 于 1954 年开始建设 Engelbostel 含水层储气库, 该储气库是西德建设的第一座含水层储气库, 含水构造顶部埋深 200m, 注气井数为 61 口, 采气井数为 47 口, 工作气量为 $0.55 \times 10^8 \text{ m}^3$, 主要用于向 Hanover 市供气。西德建设的第二座含水层储气库为 Reitbrook I 储气库, 含水构造顶部埋深 25m, 注气井数为 16 口, 采气井数为 13 口, 工作气量为 $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

截至 2009 年 10 月, 德国国内运营的含水层储气库共 7 座, 总工作气量为 $11.53 \times 10^8 \text{ m}^3$, 垫气量为 $14.09 \times 10^8 \text{ m}^3$, 注采井数为 81 口, 观察井数为 43 口 (表 1-4)。7 座含水层储气库地层埋深分布在 500 ~ 2100m 之间, 储层平均孔隙度和渗透率分别为 23.0% 和 857.14mD, 增压系数平均为 1.28。

表 1-4 德国含水层储气库统计表

序号	储气库名称	投运年份	工作气量 (10^8 m^3)	垫气量 (10^8 m^3)	最大采气量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{h}$)	工作井数 (口)	观察井 (口)	地层深度 (m)	上限压力 (MPa)
1	Hähnlein	1960	0.80	0.80	10.0	18	4	500	5.40
2	Kalle	1978	2.15	4.15	45.0	9	1	2100	32.0
3	Buchholz	1978	1.75	2.13	10.0	8	17	547	9.51
4	Frankenthal	1979	1.05	1.95	15.0	13	11	670	6.90
5	Sandhausen	1991	0.30	0.30	4.5	5	3	600	6.40
6	Berlin	1992	3.80	3.80	25.0	16	2	695	12.80
7	Eschenfelden	1995	1.68	0.96	13.0	12	5	500	4.60
合计	—	—	11.53	14.09	122.5	81	43	—	—

三、含水层储气库发展趋势

虽然油气藏型和盐穴型储气库分别在建库周期和工作气比例等方面具有含水层储气库无法比拟的优势, 但由于在大型工业中心和大城市附近, 并非都有适合建设地下储气库的油气藏和易于溶腔造穴的地下盐层或盐丘存在, 但总可以找到地下含水构造。在这种情况下, 建设含水层储气库便成为首选方案, 有时甚至是唯一可选方案, 同时, 从天然气输配系统的整体协调性和经济性出发, 有时在地下含水构造中建造储气库也是经济合理的。

根据目前全球含水层储气库建设实践和研究现状, 含水层储气库未来发展趋势主