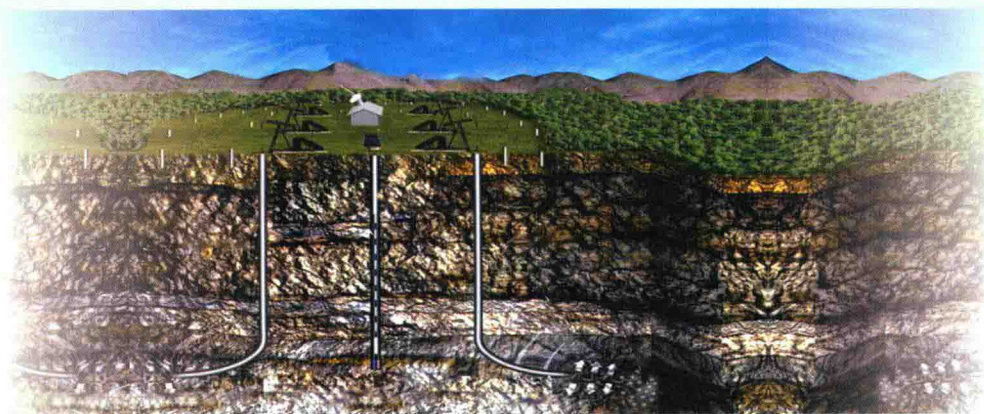


准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书

中渗透砂岩气藏 地下储气库改建技术

THE RECONSTRUCTION TECHNOLOGY OF UNDERGROUND GAS STORAGE IN MEDIUM PERMEABILITY SANDSTONE GAS RESERVOIR

钱根葆 王延杰 王 彬 等著



石油工业出版社

中渗透砂岩气藏 地下储气库改建技术

钱根葆 王延杰 王 彬 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以准噶尔盆地 A 储气库的建设为例,对中渗透砂岩气藏地下储气库改建技术进行了系统的描述。

本书可供石油工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中渗透砂岩气藏地下储气库改建技术/钱根葆等著.

北京:石油工业出版社,2016.5

(准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书)

ISBN 978-7-5183-1245-0

I. 中…

II. 钱…

III. 准噶尔盆地-低渗透油气藏-地下储气库-改建

IV. TE972

中国版本图书馆 CIP 数据字(2016)第 081123 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)64523543 图中营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.75

字数:272 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

《中渗透砂岩气藏地下储气库改建技术》

编写人员

钱根葆 王延杰 王 彬 庞 晶

崔国强 李道清 闫利恒 孔丽娜

仇 鹏 陈 超

序

准噶尔盆地位于中国西部,行政区划属新疆维吾尔自治区。盆地西北为准噶尔界山,东北为阿尔泰山,南部为北天山,是一个略呈三角形的封闭式内陆盆地,东西长 700 千米,南北宽 370 千米,面积 13 万平方千米。盆地腹部为古尔班通古特沙漠,面积占盆地总面积的 36.9%。

1955 年 10 月 29 日,克拉玛依黑油山 1 号井喷出高产油气流,宣告了克拉玛依油田的诞生,从此揭开了新疆石油工业发展的序幕。1958 年 7 月 25 日,世界上唯一一座以石油命名的城市——克拉玛依市诞生。1960 年,克拉玛依油田原油产量达到 166 万吨,占当年全国原油产量的 40%,成为新中国成立后发现的第一个大油田。2002 年原油年产量突破 1000 万吨,成为中国西部第一个千万吨级大油田。

准噶尔盆地蕴藏着丰富的油气资源。油气总资源量 107 亿吨,是我国陆上油气资源当量超过 100 亿吨的四大含油气盆地之一。虽然经过半个多世纪的勘探开发,但截至 2012 年底石油探明程度仅为 26.26%,天然气探明程度仅为 8.51%,均处于含油气盆地油气勘探阶段的早中期,预示着巨大的油气资源和勘探开发潜力。

准噶尔盆地是一个具有复合叠加特征的大型含油气盆地。盆地自晚古生代至第四纪经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等构造运动。其中,晚海西期是盆地坳陷构造格局形成、演化的时期,印支—燕山运动进一步叠加和改造,喜马拉雅运动重点作用于盆地南缘。多旋回的构造发展在盆地中造成多期活动、类型多样的构造组合。

准噶尔盆地沉积总厚度可达 15000 米。石炭系—二叠系被认为是由海相到陆相的过渡地层,中、新生界则属于纯陆相沉积。盆地发育了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系六套烃源岩,分布于盆地不同的凹陷,它们为准噶尔盆地奠定了丰富的油气源物质基础。

纵观准噶尔盆地整个勘探历程,储量增长的高峰大致可分为西北缘深化勘探阶段(20 世纪 70—80 年代)、准东快速发现阶段(20 世纪 80—90 年代)、腹部高效勘探阶段(20 世纪 90 年代—21 世纪初期)、西北缘滚动勘探阶段(21 世纪初期至今)。不难看出,勘探方向 and 目标的转移反映了地质认识的不断深化和勘探技术的日臻成熟。

正是由于几代石油地质工作者的不懈努力和执著追求,使准噶尔盆地在经历了半个多世纪的勘探开发后,仍显示出勃勃生机,油气储量和产量连续 29 年稳中有升,为我国石油工业发展做出了积极贡献。

在充分肯定和乐观评价准噶尔盆地油气资源和勘探开发前景的同时,必须清醒地看到,由

于准噶尔盆地石油地质条件的复杂性和特殊性,随着勘探程度的不断提高,勘探目标多呈“低、深、隐、难”的特点,勘探难度不断加大,勘探效益逐年下降。巨大的剩余油气资源分布和赋存于何处,是目前盆地油气勘探研究的热点和焦点。

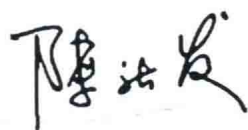
由新疆油田公司组织编写的《准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书》历经近两年时间的努力,今天终于面世了。这是第一部由油田自己的科技人员编写出版的专著丛书,这充分表明我们不仅在半个多世纪的勘探开发实践中取得了一系列重大的成果、积累了丰富的经验,而且在准噶尔盆地油气勘探开发理论和技术总结方面有了长足的进步,理论和实践的结合必将更好地推动准噶尔盆地勘探开发事业的进步。

系列专著的出版汇集了几代石油勘探开发科技工作者的成果和智慧,也彰显了当代年轻地质工作者的厚积薄发和聪明才智。希望今后能有更多高水平的、反映准噶尔盆地特色地质理论的专著出版。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”。希望从事准噶尔盆地油气勘探开发的科技工作者勤于耕耘,勇于创新,精于钻研,甘于奉献,为“十二五”新疆油田的加快发展和“新疆大庆”的战略实施做出新的更大的贡献。

新疆油田公司总经理

2012. 11. 8



前言

地下储气库作为一种具有注入、存储、采出天然气功能的地下地质储气构造,在季节调峰和能源安全保障等方面具有重要作用,越来越受到许多国家的重视。目前全球已建立大量的地下储气库,但绝大部分分布在北美、欧洲、俄罗斯—中亚等地区;目前中国已建立的储气库数量较少,储气库建设经验较为欠缺,储气库建设技术也相对落后,还没有形成非常系统、完善的储气库建设方法。

准噶尔盆地 A 储气库发育多条断层,建库密封性的评价与监测非常困难;由于气藏采出程度高,压力下降对储层物性产生影响,并且气藏规模大、具有边底水,设计出合理的储气库库容参数难度很大;在强注强采过程中如何准确评价注采井的注采气能力、如何利用数值模拟技术也是巨大的挑战。A 储气库作为目前中国最大的地下储气库,在面对这些难题时缺少可以借鉴的经验,但中国石油新疆油田公司组织大量研究人员,针对上述难题,开展地质、地球物理、油藏工程等多学科技术结合的艰苦攻关研究,最终形成了 4 项关键技术:盖层及断层密封性评价技术、弱边水大型储气库库容参数设计技术、强注气过程注气能力评价技术及强注强采数值模拟技术。A 储气库的成功建设有效保障了新疆地区的季节调峰和西气东输二线的应急供气,它不仅推进了新疆经济建设与发展的步伐,同时对我国地下储气库的建设与技术进步也具有重要意义。

全书以准噶尔盆地 A 储气库的建设为例,对中渗透砂岩气藏地下储气库改建技术进行了较系统的描述,可为国内外同类型储气库的建设提供丰富的参考资料。

全书共分为十章。第一章对国内外储气库的建设发展状况、技术发展趋势进行了全面的介绍。第二章在储气库选址基本原则调研的基础上,分析了 A 气藏改建地下储气库的有利因素、不利因素与建库规模,并针对 A 气藏改建地下储气库所面临的主要问题提出了需要攻克的关键技术难题。第三章系统介绍了 A 储气库的地质构造、地层与砂层划分、地层沉积特征、储层特征及气藏特征。第四章分别从微观和宏观的角度对 A 储气库盖层密封性和断层密封性进行了评价。第五章介绍了 A 气藏的开发现状,分析了气井产水情况、单井采气能力变化,并总结了 A 气藏的驱动类型。第六章从产能方程出发,对直井和水平井的采气能力与注气能力分别进行了评价。第七章阐述了储气库设计的基本原则,并在 A 气藏原始地质储量计算的基础上、考虑水侵及反凝析等因素的影响后预测了 A 储气库的库容量。

第八章阐述了 A 储气库注采层位、注采井网的设计,建立了气藏数值模拟,并通过多种方案的设计比较优选出了第一周期的注采气方案。第九章介绍了 A 储气库主要的监测方法,并对监测内容及方案进行了设计。第十章介绍了 A 储气库的工程进展,并对第一周期的注采气效果进行了评价。

在全书编写过程中,中国石油新疆油田公司原总经理陈新发欣然为本丛书作序,西南石油大学教授司马立强等人参与了部分编写工作,新疆油田公司专家周惠泽对全书做了系统校审,在此深表感谢。

鉴于编者水平有限,难免有错误及不妥之处,敬请广大读者不吝指正。

CONTENTS 目录

第一章 绪论	(1)
第一节 国外地下储气库发展现状	(1)
第二节 国内地下储气库发展现状	(5)
第二章 A 气藏改建储气库条件与关键技术分析	(10)
第一节 库址筛选	(10)
第二节 A 气藏改建地下储气库主要难点与关键技术	(12)
第三章 储气库地质特征	(14)
第一节 山前高陡构造解释	(14)
第二节 地层对比与划分	(20)
第三节 沉积特征	(24)
第四节 储层特征描述	(28)
第五节 气藏特征	(37)
第四章 储气库密封性评价	(44)
第一节 盖层密封性评价	(44)
第二节 断层密封性评价	(49)
第五章 气藏开采特征	(52)
第一节 开发现状分析	(52)
第二节 气井产水分析	(53)
第三节 采气能力变化分析	(55)
第四节 气藏驱动类型分析	(56)
第六章 建库注采气能力评价	(60)
第一节 注采井产能分析	(60)
第二节 采气能力评价	(66)
第三节 注气能力评价	(74)
第七章 库容参数设计	(81)
第一节 储气库设计原则	(81)
第二节 库容量设计	(82)

第三节 工作气量预测 (95)

第八章 建库方案设计 (99)

第一节 注采层位设计 (99)

第二节 注采井网设计 (99)

第三节 气藏数值模拟 (101)

第四节 注采气方案设计(第一周期) (109)

第九章 储气库监测方案设计 (126)

第一节 主要监测方法介绍 (126)

第二节 监测内容及方案设计 (130)

第十章 注采效果评价(第一周期) (135)

第一节 储气库工程建设进展 (135)

第二节 注气效果评价 (136)

第三节 采气效果评价 (143)

参考文献 (155)

第一章 绪 论

第一节 国外地下储气库发展现状

地下储气库是一种具有注入、存储、采出天然气功能的地下地质储气构造。它作为大型天然气集输工程的重要组成部分,对优化天然气产、供、销系统功能,减少工程投资;对调节用气市场冬夏季节的用气不均衡,保障用户需求;对实现天然气资源的储备,提供经济与生活的战略性能源安全保障都具有重要作用(马小明等,2011)。

由于地下储气库在调峰和保障供气安全方面具有不可替代的作用和明显的优势,因而越来越受到许多国家的重视。相关资料显示,全球 10% 左右的天然气用气量由地下储气库供应,西欧国家和俄罗斯分别达到 20%、30%。就国际上储气库发展趋势看,欧美国家正在不断加大储气库的建设力度,增大储气量,除了常规的调峰应急需要外,已经开始进行天然气战略储备的课题研究。美国已经就长输管网地下储气库建立相关的法律,欧洲国家也有立法的趋势。

目前世界上典型的天然气地下储气库类型有 4 种:枯竭油气藏储气库、含水层储气库、盐穴储气库、废弃矿坑(岩洞)储气库(李国兴,2006)。

一、国外地下储气库建设发展状况

自 1915 年加拿大在 Welland 气田建成世界上第一个地下储气库以来,地下储气库经历了一个世纪的发展历程。据 IGU2009 年统计资料表明(马小明等,2011;郭平等,2012;IGU,2009),全世界共建成、并运营各类地下储气库共 630 座,总的工作气量达 $3524.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于同期世界天然气总销量的 11.7% 或民用—商用气的 44%。与 2005 年 $3330 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的工作气量相比,5 年间全球地下储气库的工作气量增加了 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ (郭平等,2012)。这些储气库分属全世界 35 个国家 110 多家公司,其分布状况见表 1-1。

表 1-1 世界各国地下储气库统计表

国家	枯竭油气藏 储气库(座)	含水层储气 库(座)	盐穴储气库 (座)	岩洞储气库 (座)	废弃矿坑储 气库(座)	总数(座)	工作气量 (10^8 m^3)
美国	307	51	31			389	1106.74
加拿大	43		9			52	164.13
德国	15	7	23		1	46	203.15
俄罗斯	15	7				22	955.61
法国		12	3			15	119.13
乌克兰	11	2				13	318.80
意大利	11					11	167.55

续表

国家	枯竭油气藏 储气库(座)	含水层储气 库(座)	盐穴储气库 (座)	岩洞储气库 (座)	废弃矿坑储 气库(座)	总数(座)	工作气量 (10 ⁸ m ³)
捷克	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
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
亚美尼亚	1					1	1.00
阿根廷			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
匈牙利			1			1	1.50
瑞典				1		1	0.09
合计	467	86	74	2	1	630	3524.81
占总数百分比(%)	74.13	13.65	11.74	0.32	0.16		

全球地下储气库总的工作气量中,北美地区占 36%,欧洲占 24%,独联体国家占 39%,西亚和亚太地区占 0.8%,拉丁美洲和加勒比海地区占 0.03%(丁国生,2010)。这些储气库中最

主要的类型是枯竭油气藏储气库,占总数的 74.13%;其次是含水层储气库,占 13.35%;盐穴储气库占 11.57%;岩洞储气库与废弃矿坑储气库较少,分别占 0.32%、0.16% (IGU, 2009)。

世界地下储气库发展极不平衡,其中,北美地区(美国、加拿大)发展最为迅猛,其次是欧洲、俄罗斯—中亚地区,其中美国、俄罗斯、乌克兰、德国、意大利、加拿大、法国是地下储气库大国,其地下储气库工作气量约占全球地下储气库总工作气量的 85%。亚太地区及其他地区发展相对滞后,非洲到目前为止尚未建成一座地下储气库。

1. 北美地区

北美作为世界地下储气库开发的先驱,其运营的储气库数量共 441 座,占总量的 70%。在加拿大,民用气占消耗总量的比例达 44%,美国也达 38%。因此,取暖季节的天然气供应主要来源于地下储气库。

美国拥有的天然气地下储气库数量居世界第一,现在共运营储气库 389 座,库容量为 $2277 \times 10^8 \text{ m}^3$,工作气容量达到 $1106.74 \times 10^8 \text{ m}^3$,其工作气容量占美国全年消费量的 17.2%。美国 1916 年在纽约布法罗附近的 ZOAR 枯竭气田利用气藏建设储气库,1954 年在 CALG 的纽约城气田首次利用枯竭油藏建成储气库,1958 年在肯塔基首次建成含水层储气库,1963 年在科罗拉多丹佛附近首次建成废弃矿坑储气库。其中南加州地下储气库是美国地下储气库的典范,代表了美国地下储气库的能力与技术水平,其规模大,储量多,同时还可以出租或代储(佚名, 2001)。储气库的灵活性在天然气消费旺季与淡季发挥了重要作用,特别是在发生世界能源危机与极端异常气候年度,储气库的灵活性将得到充分利用。例如 1998 年,由于气候条件压制了天然气的需求,美国的储气库吸纳了市场上大量不急需的剩余产量。美国天然气研究所(GRI)研究报告预测,到 2015 年,工作气储存容量将增至约 $1130 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

加拿大作为最早建设地下储气库的国家,其开发储气库主要是基于以下两个方面的原因:一是加拿大的天然气产区主要集中在西部几个省,而主要用气地区则分布在东部;二是加拿大全年温差变化相对大,从而加大了原本就高度不均的季节耗气量变化。加拿大共建有 52 座地下储气库,工作气量为 $164.13 \times 10^8 \text{ m}^3$,其类型主要是枯竭油气藏储气库,其次是盐穴储气库(丁国生, 2010)。

2. 欧洲地区

欧洲地区地下储气库也比较发达。西欧和东欧储气库建设具有各自不同的特点。西欧是世界上第三大天然气市场,其天然气消费大多集中在民用与第三产业,而这两个产业的需求波动较大,因此,西欧开发了许多储气设施,以满足高峰需求并确保供给安全。西欧各国储气库数量相差悬殊,大多数储气库分布在德国、法国、意大利和英国。其中德国已建有地下储气库 46 座,工作气量达 $203.15 \times 10^8 \text{ m}^3$;法国已建有地下储气库 15 座,工作气量达 $119.13 \times 10^8 \text{ m}^3$;意大利已建有地下储气库 11 座,工作气量达 $167.55 \times 10^8 \text{ m}^3$;英国已建有地下储气库 6 座,工作气量达 $37 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

东欧的情况与西欧不同,东欧的天然气主要用于工业消费,其次是用于发电,住宅与商业部分的消费量很低,其用气量的季节性变化小于西欧。目前,东欧地区建设地下储气库的国家有罗马尼亚、保加利亚、捷克、斯洛伐克、前南斯拉夫、波兰、匈牙利等。东欧国家的大部分天然气从俄罗斯进口,存在供气中断的风险,因此,急需建设相应的储气设施。波兰正准备在

Wierchowice 附近将一个枯竭的气藏建成一座容量为 $43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的储气库。捷克正在 DolniBojanovice 附近的枯竭气藏新建一个储气库,工作气容量为 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (杨伟等,2010)。

3. 俄罗斯—中亚地区

俄罗斯和中亚地区蕴藏丰富的天然气资源,每年向东欧地区出口相当数量的天然气。天然气在该地区的一次能源消费中约占 20%,在俄罗斯更是高达 50% 以上。巨大的天然气消费量要求其具备完善的地下储气库系统,以确保国家能源安全。该地区的地下储气库主要分布在俄罗斯、乌克兰、哈萨克斯坦、阿塞拜疆等国家。

俄罗斯地下储气库建设工作起步较晚,1959 年在莫斯科附近建设了第一座地下储气库,其后发展很快,1960 年就有 4 座地下储气库投产,目前有 22 座正常运营,工作气量 $955.61 \times 10^8 \text{ m}^3$,仅次于美国。其中枯竭油气藏储气库 15 座,含水层储气库 7 座(丁国生,2010)。准备建于盐穴的 4 个地下储气库项目在处于论证、投资和建设的研究阶段。据 2005—2010 年俄罗斯地下储气工作规划,2010—2011 年采气季节计划将地下储气库的日采气量达到 $7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水平。在 2030 年以前,俄罗斯计划投资 2000 亿卢布用于发展地下储气库系统,其中 700 亿卢布用于改造现有的地下储气库(杨伟等,2010)。

乌克兰拥有 13 座地下储气库,其中 11 座由枯竭气田与凝析气田改建,2 座由含水层改建,储气量达 $318.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,取暖季节初期最大输出能力为 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。乌克兰的地理环境特别适合发展储气库,在其境内有大量的气田、凝析气田和油田,它们大多数实际上已趋于枯竭,从而为储气库的建立提供了良好的条件(马小明等,2011)。

综上所述,美国、俄罗斯、乌克兰、德国、意大利、加拿大、法国是地下储气库大国,其地下储气库工作气量约占全球地下储气库总工作气量的 85%。今后地下储气库的需求主要增长区还是欧洲、北美和独联体国家等天然气市场较为成熟的国家和地区。根据 IGU 预测,全球地下储气库工作气量将从 2005 年的 $3330 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2030 年的 $5430 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,欧洲地下储气库工作气量将从 2005 年的 $790 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2030 年的 $1350 \times 10^8 \text{ m}^3$;北美地区的地下储气库工作气量将从 2005 年的 $1160 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2030 年的 $1870 \times 10^8 \text{ m}^3$;独联体国家的地下储气库工作气量将从 2005 年的 $1360 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2030 年的 $1770 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。亚太地区由于受到天然气管网的限制和地下储气库建库地质条件的限制,且日本、韩国等传统天然气市场以 LNG 为主,储气库总体工作气量比例仍将小于 1% (丁国生,2010)。

二、国外地下储气库技术发展趋势

国外储气库经历了近一个世纪的发展历程,特别是欧美主要发达国家与俄罗斯的储气库研究、建设及运行形成了相应的技术体系与发展模式(丁国生等,2006)。

(1) 形成了 3 种典型的储气库技术体系:

- ① 利用废弃油气藏改建地下储气库评价设计与运行技术体系。
- ② 含水层储气库建库评价、设计技术体系。
- ③ 盐穴储气库建库评价、设计技术体系。

(2) 储气库技术随着油气田开采技术的发展而发展,并将油气开发的最前沿技术应用于储气库的建设,包括将地震、测井等多种勘探评价技术用于储气库的改建;将地质建模等精细地质描述技术用于储气库的地质评价;将实验分析与数值模拟等油藏工程分析技术用于储气

库的设计;水平井、分支井开采技术等完井工程技术用于储气库的开采;将声呐技术用于盐穴溶腔形成预测等。

(3)随着储气库技术的不断发展完善,现在地下储气库技术主要向延长地下储气库使用寿命、减少地下储气库对环境的影响和增强地下储气库运行的灵活性等方向发展。归纳起来,储气库建设技术发展出现了以下趋势(丁国生等,2006;FRAN K HEINZE,2003):

① 加强气库的上下游协调优化,提高储气库的协调能力。在储气库建库运行期间特别强调储气库的协调运行,包括地面地下一体化管理、储气库与管网的一体化管理、储气库与市场用户一体化管理等。

② 加强地下储气库优化管理,提高储气库的利用效率。主要包括加大储气库运行压力范围,提高储气库运行效率;优化注采井网与注采量,减少水侵对储气库运行的影响;利用焊接注采管柱,提高储气库安全性;提高最大注采速度,加快储气库周转;广泛采用新型压缩机、脱水方式;实现储气库的在线监控及远程遥控等。

③ 在油藏和含水层储气库领域进行试验和摸索。包括将储气库建设与提高原油采收率相结合的建库技术、大幅度提高单井产能的钻完井技术、减少垫气量的垫气混相技术、低幅度水平层建库技术、储气库泄漏监测与泡沫堵漏技术和盐穴储气库气囊应用技术等。

④ 盐穴储气库建库技术将得到进一步发展。由于利用盐丘建设储气库技术已经成熟,盐丘建腔将向百万立方米以上大型化溶腔方向发展;盐层储气库技术已经得到快速发展,但还有很大的发展空间。从厚盐层(500m 以上)建库将逐步向 200m 甚至其以下的薄盐层方向发展;适应薄盐层建库的系列造腔技术、稳定评价技术、泄漏控制与监测技术将会继续得到发展(郭平等,2012;刘伟等,2011)。

⑤ 用惰性气体、氮气、二氧化碳代替天然气作为储气库的垫层气。地下储气库内的气体主要由垫层气、工作气及未动用气组成。其中,垫层气占总工作气量的 45% ~ 130%,具有相当大的比例。而目前通常采用天然气作为垫层气,其投资费用高。以美国为例,1987 年美国地下储气库的总垫层气量达 $1080 \times 10^8 \text{ m}^3$,按评价每千立方米天然气 60 美元计,当年垫层气相当于长期沉积资金达 64 亿美元。因此,多年来一些地下储气库技术比较发达的国家对这一问题给予了极大关注,一直在研究减少垫层气增大有效气的可能性以及利用惰性气体、氮气、二氧化碳等成本较低的气体替换天然气作为地下储气库垫层气的可能性,以此节约大量投资。

第二节 国内地下储气库发展现状

一、国内地下储气库建设发展状况

1. 国内地下储气库建设发展历程

与西方发达国家相比,我国的地下储气库建设起步较晚。

20 世纪 70 年代以前,我国天然气的主要产区在四川,修建地下储气库已开始讨论。20 世纪 50 年代曾将川南阳高寺气田二叠系阳 7 井的高压气向同一气田三叠系压力较低井进行探索性试注,但未获成功;60 年代,威成线向成都供气后,考虑供气安全,也曾拟利用成都附近磨

盘山构造作为终端气库,后因地质结构问题而放弃;70 年代后期讨论将兴隆场气田作为干线储气库,但因技术原因搁置下来(王希勇等,2004)。

20 世纪 70 年代在大庆油田曾经进行过利用气藏建设地下储气库的尝试,并建造了两座地下储气库——萨尔图 1 号储气库与喇嘛甸储气库^[13]。萨尔图 1 号储气库在运行十多年后,因储气库与市区扩大后的安全距离问题而被撤除;喇嘛甸储气库目前仍在运行,并于 2000 年进行了扩建,扩建后年注气量为 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这两座地下储气库利用能力低,注气流程复杂,与国外技术相比,各方面差距很大(王希勇等,2004)。

20 世纪 90 年代初,随着陕京天然气输气管道的建设,为确保北京、天津的安全供气,国家开始加大力度研究建设地下储气库技术。并先后在天津附近的大港油田利用枯竭凝析气藏建成了 3 个地下储气库,即大张坨地下储气库、板 867 地下储气库和板中北高点储气库(苏欣,2007)。

进入 21 世纪以来,我国储气库建设跨入了快速发展期,2013 年 7 月,我国最大的地下储气库——呼图壁储气库投产,标志着我国储气库建设规模与技术又上了一个新的台阶。据资料统计(马小明等,2011;郭平等,2012;天工,2013;天工,2010),截至 2013 年,我国已建成地下储气库 14 座(表 1-2),其中,萨尔图 1 号已停止运行。目前我国地下储气库工作气量已达 $110.245 \times 10^8 \text{ m}^3$,注气能力达 $4501 \times 10^4 \text{ m}^3$,采气能力达 $11007 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

表 1-2 我国已建地下储气库汇总表

储气库名称	储气库类型	工作气量 (10^8 m^3)	注气能力 (10^4 m^3)	采气能力 (10^4 m^3)	建成时间	地理位置	备注
萨尔图 1 号	枯竭油气藏型				1969	大庆油田	
喇嘛甸	枯竭油气藏型	1.5	100	250	1975		
大张坨	凝析气藏型	6	320	1000	2000	大港油田	与京陕 线配套
板 876	凝析气藏型	2.17	100	300	2001		
板中北高点	凝析气藏型	10.97	150	300	2003		
板中北高点	凝析气藏型		150	600	2004		
板中南高点	凝析气藏型	4.7	225	600	2005		
板 808、828	凝析油气藏型	6.74	360	600	2006		
京 58	凝析油气藏型	7.535	400	700	2010	华北油田	
永 22	枯竭油气藏型	2.99	136	250	2011		
金坛(一期)	盐穴型	5.4	640	1500	2006	江苏金坛	与西气东 输配套
金坛(二期)	盐穴型	11.74	400	1500	2012		
刘庄	凝析气藏型	2.45	150	200	2012	江苏油田	
呼图壁	气藏型	45.1	1550	1066~1900	2013	新疆油田	
文 96	枯竭油气藏型	2.95	70	200	2012	中原油田	
合计		110.245	4501	11007			

随着我国经济的快速发展,对天然气的需求量也持续增长,国内输气管道建设规模不断扩大,遍及全国的天然气管道网络基本形成,相应的天然气网络的供应安全也面临着极大的挑

战,从而也促使我国的地下储气库建设跨入快速发展期。

中国石油天然气股份有限公司规划在 2020 年前建成工作气量达 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的地下储气库,其中 2011—2015 年,要先期在大港油田、华北油田、辽河油田、西南油气田、新疆油田、长庆油田等 6 个油田建设 10 座总工作气量达 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的地下储气库,2010 年初步完成的构造筛选工作。

目前,中国石化的储气库项目已经通过国家发展和改革委员会可行性论证,文 23 储气库设计容量 $108.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,工作气量 $55 \times 10^8 \text{ m}^3$;卫 11 储气库项目亦在规划论证中。

地下储气库在天然气工业发展过程中的作用重大,因此,政府、企业都对此高度重视。依据国家总体战略部署,中国将形成四大区域性联网协调的储气库群:东北储气库群、华北储气库群、长江中下游储气库群和珠江三角洲储气库群。展望 2020 年,国家将规划建设地下储气库 30 座以上,可调峰总量达 $320 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。随着国家经济的高速发展和对能源需求的日益增长,地下储气库将在中国的油气消费、油气安全领域发挥更加重要的作用,建库目标将从目前的调峰型向战略储备型方向延伸及发展,建库技术水平也将在实践中不断得到提高。

2. 国内典型的地下储气库

目前,我国共有一批储气库建成并投入运行。

1) 萨尔图 1 号储气库与喇嘛甸储气库(马小明等,2011;郭平等,2006;舒萍等,2001;李志等,2001)

我国在大庆利用枯竭气藏建造过萨尔图 1 号储气库与喇嘛甸储气库。萨尔图 1 号地下储气库于 1969 年由萨零组北块气藏转建而成,最大容量为 $3800 \times 10^4 \text{ m}^3$,年注气量不到库容的 $1/2$,主要用于萨尔图市区民用气的季节性调峰。在运行十多年后,因储气库与市区扩大后的安全距离问题而被拆除;大庆喇嘛甸地下储气库 1975 年建成,是大庆合成氨的原料工程之一,建在喇嘛甸油田气顶部,地面设施的设计注采能力为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$,到 1995 年注气量为 $2060 \times 10^4 \text{ m}^3$,不足库容的 0.5%。通过近年来的两次扩建,大庆喇嘛甸地下储气库的日储气能力达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,年注气能力达到 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,总库容已经达到 $25.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,到目前为止已经安全运行 30 年,累计采气 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2) 天津大张坨地下储气库(郭平等,2012;崔立宏等,2003;王起京等,2003)

我国首次大规模采用储气库调峰是在陕京输气管道工程,目的是解决北京市季节用气的不均衡性问题,保证向北京市稳定供气。2000 年 11 月,我国首次在大港油田利用枯竭凝析气藏建成了大张坨地下储气库。大张坨地下储气库采用当时国内最先进的循环注气开采系统,有效工作采气量为 $6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,特殊时期的最大日调峰能力为 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$,地下储气库自 2002 年开始运行以来,一直运行正常,对北京市调峰发挥了重要作用。

之后,为了保证供气安全,并满足北京、天津、河北沧州等地天然气供应需求,2001 年来,继大张坨地下储气库后又建成了板 876 地下储气库,板中北高点地下储气库。这 3 个储气库已经累计注气近 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$,而且配套设施完善,能够在 3min 内启动整个应急供应系统,保证了北京的用气量。

3) 江苏金坛地下储气库(丁国生,2010;丁国生,2003)

江苏省金坛地下储气库属盐穴地下储气库,是中国盐穴第一库,规模为亚洲第一,位于江