

大型地下水封洞库 修建技术

洪开荣 等 编著



Construction technology of large-scale underground
water-sealed caverns

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

大型地下水封洞库修建技术

洪开荣 等 编著

中国铁道出版社

2013年·北京

内 容 简 介

本书以国内少有地下水封式 LPG 洞库工程的施工技术为背景,通过对三座 LPG 水封洞库工程建设中的数据、经验和教训的系统总结分析,全面客观地对水封洞库修建的关键技术进行梳理、总结和提升,并加以系统阐述而成,是水封洞库领域的第一本著作。

全书共分 11 章,结合汕头、黄岛、烟台 LPG 水封洞库工程的修建情况,从勘察、设计、施工、安装、监测等方面入手,全方位阐述了地下水封洞库发展、储存原理、选址及勘察、设计、大断面洞室群洞库施工技术、水幕系统、施工通风、操作竖井设备安装、施工组织管理与风险控制、验收及运营前准备和工程实例。内容全面、系统,观点新颖,提出了许多宝贵理念、原则。

本书可供水封储油、储气洞库工程的勘察、设计、施工、监测和科研的技术人员参考,也可为公路、铁路、市政、水利水电相关专业的技术人员参考和交流。

图书在版编目(CIP)数据

大型地下水封洞库修建技术/洪开荣等编著. —北京:中国铁道出版社,2013. 6
ISBN 978-7-113-16716-5

I. ①大… II. ①洪… III. ①地下油库—工程施工 IV. ①TU926

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121650 号

书 名:大型地下水封洞库修建技术
作 者:洪开荣 等 编著

责任编辑:陈小刚 电话:010-51873193

编辑助理:张卫晓

封面设计:郑春鹏

责任校对:孙 玫

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:三河市华丰印刷厂

版 次:2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:23.75 字数:592 千

书 号:ISBN 978-7-113-16716-5

定 价:65.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。

电 话:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

编审委员会

顾 问:王梦恕

主 编:洪开荣

副主编:陈海锋 尤显明 郭得福 翟飞飞

编 委:(按姓氏笔画排序)

王 闯 尤显明 师传志 吕宏权

李 纪 辛国平 宋矿银 张 莉

陈 刚 陈海锋 季惠斌 胡 成

胡文勇 洪开荣 姚克光 夏喜林

高文乐 郭 春 郭得福 曹正卯

梁佳佳 韩立春 翟飞飞

审 稿:(按姓氏笔画排序)

陈振林 韩忠存 谭忠盛

参编单位:

中铁隧道集团有限公司

中铁隧道集团一处有限公司



作者简介

洪开荣(1965~),男,博士研究生学位,教授级高级工程师,现任中铁隧道集团有限公司总工程师,盾构及掘进技术国家重点实验室主任,中国土木工程学会隧道及地下工程分会常务理事、秘书长,中国岩石力学与工程学会常务理事,《隧道建设》编委会副主任。

洪开荣长期从事隧道及地下工程的技术研究和管理工作,主持多项国家 863、973 课题,先后主持了太平驿引水隧洞的岩爆防治技术、我国首座地下水封 LPG 洞库修建技术、高速铁路特长水下隧道修建技术、城市地铁大型暗挖车站修建技术等,尤其是我国盾构及施工技术方面的研究与开发、应用上具有突出贡献。先后参加了我国铁路、公路、水电、地铁与市政等重难点隧道工程建设,公开发表论文 20 余篇,出版专著 5 部。获国家科技进步一等奖 1 项、二等奖 1 项,省部级科技进步奖特等奖 2 项、一等奖 1 项,获第七届詹天佑青年奖和第九届詹天佑成就奖,荣获全国五一劳动奖章、中原学者等称号,2006 年获国务院政府特殊津贴。

序

地下水封洞库在国内较少,目前尚处于起步阶段。因水封控制理论、特大断面隧道减震爆破施工、快速施工及洞库通风等关键技术带来的难题,再加上国内还没有形成完整的、系统性的研究理论和实践经验,这些时常困扰着建设、施工和设计单位。

中铁隧道集团于1999年在汕头承建了国内第一座LPG地下水封洞库,随后又相继承建了黄岛LPG洞库和国内第一座全部由中国人设计、施工的烟台LPG洞库,以及锦州石油储备库、惠州地下石油储备库和湛江地下石油储备库,在水封洞库修建技术方面有着较为丰富的施工经验。

该书是中铁隧道集团在多座水封洞库修建经验和吸收科研成果的基础上,对水封洞库修建关键技术的总结。它阐述了水封洞库的勘察、设计、施工、安装、投产前运营等,涉及面广,内容完备,是地下水封洞库领域的第一本专著,它的编辑与出版将填补这个领域的空白,将对水封洞库的建设起到极大的推动作用。同时也希望本书起到“抛砖引玉”的作用,希望出现更多的理论和实践成果,促进水封洞库行业的发展。



2013年6月8日

前 言

地下水封洞库储存油气资源具有安全可靠、经济实用、投资少、占地小、环保和生态友好、储量大并且利于战备,被称为“具有高度战略安全的储备库”。地下水封洞库在我国尚处于起步阶段,我国于1976年在山东黄岛建成第一座地下水封油库,随后陆续在浙江象山、大张坨、汕头、珠海等等地修建了4座地下水封式储油、储气洞库。自改革开放以来,我国经济飞速发展,内需较为旺盛,对油气的需求也快速增长,油气储备已纳入国家战略发展规划,黄岛、惠州、锦州、湛江国家石油储备基地正在大力建设,黄岛LPG洞库即将投产,烟台LPG洞库正处于建设高峰期,另有宁波、连江等地数座地下水封洞库处于筹建阶段,地下水封洞库建设即将进入大力建设阶段。

地下水封洞库工程采用水封原理储备油气资源,洞库的稳定性和密封性是储存油气的前提,施工及运营期间需要稳定的地下水位和良好的洞室稳定性,工程建成后一般不再进入洞库内部进行修复工作,具有洞室结构复杂、开挖断面大、施工质量要求高、注浆及水幕技术要求高、施工组织难度大的特点,施工通风和运输是制约施工进度的关键因素,此类工程施工技术难题一般集中于:(1)水幕施工与控制分析技术;(2)特大断面群洞通风技术;(3)特大断面洞室减震爆破控制技术;(4)立体多工作面快速施工组织技术。

中铁隧道集团于1999年在汕头承建了国内第一座地下水封LPG洞库,随后又相继承建了黄岛、烟台LPG洞库、锦州石油储备库、惠州地下石油储备库和湛江地下石油储备库,并对此类工程进行了一定科学研究,积累了丰富的修建经验。为进一步促进我国能源储油、储气洞库修建技术的发展,促进核心关键技术的掌握和研发。在国内地下水封洞库建设的重要时期,由中铁隧道集团有限公司、中铁隧道集团一处有限公司组织,联合烟台万华聚氨酯股份公司、青岛龙泽燃气有限公司、中国石油建设公司华东设计分公司、北京东方新星石化工程股份有限公司、中国机械工业机械工程有限公司、中国地质大学(武汉)、西南交通大学、山东科技大学等国内优势较为明显的管理和科研单位,集中了具有丰富经验的管理、施工、勘察、设计、科研技术人员,通过不断创新、完善、总结地下水封洞库的设计施工经验,历时一年半完成本书编著工作。

本书作为地下水封洞库修建领域的第一部专著,共分11章。第1章绪论,由洪开荣、夏喜林编写,介绍了地下水封洞库发展过程、现状和趋势;第2章地下水封洞库储油、LPG原理,由洪开荣、夏喜林编写,介绍了地下水封洞库油气储存原理、分类及其主要组成;第3章地下水封洞库选址及勘察,由陈刚、胡成编写,主要

介绍水封洞库的选址方法、勘察技术、勘察成果整理分析与建库条件评价、水文地质监测网设计与施工等内容;第4章地下水封洞库设计,由张莉、郭得福和胡文勇编写,主要阐述施工巷道设计、储库的平面布置及规划、洞室截面的确定、水幕系统设计、竖井设计、支护与注浆设计、运行期的安全监测设计等内容;第5章大断面洞室群洞库施工技术,由宋矿银(第5.1节)、郭得福(第5.2、5.4节)、高文乐、师传志(第5.3节)、吕宏权(第5.5节)、李纪(第5.6节)、季惠斌(第5.1、5.7节)、梁佳佳(第5.7节)编写,主要介绍施工勘察、大断面洞室开挖与支护、爆破施工、注浆技术、库容测量、封塞施工技术及施工期监控量测等内容;第6章地下水封洞库水幕系统,由洪开荣、姚克光、郭得福编写,主要介绍水封系统包含的内容、水幕施工与测试方法、全水幕水文试验、水幕设备调试和试运行等内容;第7章复杂洞室群施工通风,由陈海锋、郭春、辛国平共同编写,主要阐述地下洞库群通风的基本原理和特点,对各种工况进行了仿真模拟计算和分析,形成地下洞库群施工通风方案;第8章操作竖井设备安装,由韩立春编写,对操作竖井设备的预制、涂装和提升系统、锚固钢结构、缓冲罐和泵坑结构、套管、内管、设备、仪表的安装及调试前检查等内容进行阐述;第9章施工组织管理与风险控制,由洪开荣、翟飞飞、王闯编写,主要对洞库的施工组织安排、机械化施工选型与配置、HSE管理进行阐述;第10章洞库验收及运营前准备,由姚克光、李纪编写,主要对洞库工程验收、气密验收试验、投产前的空气置换、第一次产品入库等内容进行阐述;第11章工程实例,由郭得福编写,介绍了国内几座LPG洞库工程概况。全书由辛国平文整和核稿。

我国著名隧道专家、中国工程院院士王梦恕先生为本书所作序言是对作者的鼓励和鞭策,我们将再接再厉,继续攻取水封洞库技术难关,再创佳绩。在此,对王院士的鼓励与鞭策表示由衷的感谢!

本书是在吸收汕头、黄岛、烟台LPG施工经验和依托汕头LPG工程取得研究成果“大型地下水封式液化石油气储藏洞库修建技术”的基础上,结合中铁隧道集团科技创新计划项目“大型地下水封洞库修建关键技术研究”(隧研合2012-22、隧研合2012-23)的实施,对众多成果的整理和集成。在此,对有关管理、勘察、设计、施工等相关单位的基层技术人员表示感谢。

由于时间仓促,水平有限,书中难免会有不少疏漏和错误,恳请专家和读者批评指正。

洪开荣

2013年5月17日

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 地下水封洞库发展过程	1
1.2 地下水封洞库的发展现状	3
1.3 地下水封洞库的发展趋势	5
第2章 地下水封洞库储油 LPG 原理	7
2.1 储存原理	7
2.2 地下水封洞库分类	14
2.3 地下水封洞库主要组成	14
第3章 地下水封洞库选址及勘察	24
3.1 选址方法	24
3.2 勘察技术方法	31
3.3 勘察成果整理分析与建库条件评价	67
3.4 水文地质监测网设计与施工	77
第4章 地下水封洞库设计	83
4.1 概 述	83
4.2 施工巷道	83
4.3 储库的平面布置及规划	90
4.4 洞室截面的确定	95
4.5 水幕系统	96
4.6 竖 井	99
4.7 支护设计	101
4.8 注浆设计	106
4.9 地下洞库运行期的安全监测设计	108
第5章 大断面洞室群洞库施工技术	112
5.1 施工勘察	112
5.2 开挖与支护技术	133
5.3 爆破施工	148
5.4 注浆技术	156
5.5 库容测量	167

5.6	密封塞施工技术	180
5.7	施工期监控量测	191
第6章	地下水封洞库水幕系统	210
6.1	概 述	210
6.2	水封系统包含的内容	210
6.3	水幕施工方法	212
6.4	水幕测试方法	216
6.5	全水幕水文试验	219
6.6	水幕设备调试和试运行	219
6.7	资料整理	220
第7章	复杂洞室群施工通风	221
7.1	大型地下洞室群施工通风概述	221
7.2	大型地下洞室群施工通风研究现状	222
7.3	地下洞库群施工通风方案及规划	224
7.4	地下洞库群施工通风设计计算	243
7.5	地下洞库群施工网络通风信息化程序	255
第8章	操作竖井设备安装	274
8.1	概 述	274
8.2	设备安装前的准备	275
8.3	预 制	276
8.4	涂装工程	287
8.5	提升系统安装	289
8.6	锚固钢结构安装	291
8.7	缓冲罐和泵坑结构安装	291
8.8	套管安装	292
8.9	内管、设备安装	293
8.10	调试前检查	294
第9章	施工组织管理与风险控制	296
9.1	地下水封洞库群工程的特、重、难点概述	296
9.2	地下水封洞库群施工组织	297
9.3	信息化管理	306
9.4	地下洞库群施工风险管理	307
9.5	HSE 管理(安全管理)	310
第10章	洞库验收及运营前准备	323
10.1	分部分项工程验收	323

10.2 洞库气密验收试验.....	328
10.3 投产前的空气置换.....	335
10.4 第一次产品入库.....	342
第 11 章 工程实例	346
11.1 汕头 LPG 地下水封洞库工程	346
11.2 黄岛 LPG 地下水封洞库工程	357
11.3 烟台 LPG 地下水封洞库工程	359
11.4 施工经验与体会.....	362
参考文献.....	364

第 1 章 绪 论

随着我国经济的飞速发展,对油气的需求也快速增长。国内油气资源远远无法满足消费的需要,中国作为一个石油进口大国,目前净进口量超过了我国石油消费量的 50% 以上。为了满足石油供应的需要,应对突发事件,稳定供求关系,平抑油价,保障国民经济安全,我国正在抓紧进行国家石油战略储备体系的建设。石油储备从储存设施形式上可以分为陆上储罐、海上储罐、地下储罐、地下水封洞库等。随着世界人口的不断增长,土地资源日益紧张,环境保护压力日益加大,包括中国在内的许多国家开始广泛采用地下水封洞库储备石油。地下水封洞库储存油气资源具有安全可靠、经济实用、投资少、占地小、环保和生态友好、储量大并且利于战备,被称为“具有高度战略安全的储备库”。由于技术、商业和政治等原因,油气地下水封洞库的作用越来越重要,尤其是在第二次世界大战后得到迅猛发展,并已逐渐形成一门独立的学科。

我国液化石油气(LPG)也随着国民经济的发展,需求量不断增长,20 世纪 90 年代以来,增长速度超过 20%,而国内生产的增长远远满足不了需求,LPG 进口量不断增加。随着 LPG 市场形式的变化,需要增加 LPG 的储运设施,要达到规模经营,提高抗风险能力,必须建设大型 LPG 储存基地。LPG 储存有常温压力储存与低温储存两类,而低温储存又可分为低温降压储存与低温常压储存。常温储存国内一般采用球罐或卧罐,但受容积的限制,它无法满足大型 LPG 储存基地的需要。国外大型 LPG 储存基地一般采用地下岩洞压力储存和低温储罐常压储存两种工艺,国外还在进行新的储存工艺研究。大型 LPG 储存基础建设采用地下水封岩洞储库,具有较大的优势。

利用地下水封洞库储存油气,自 1976 年黄岛地下油库建设开始在我国日益发展起来,特别是 2000 年以来,我国修建了多座 LPG 地下水封洞库,2010 年后开始建设地下水封原油储备库。

1.1 地下水封洞库发展过程

石油及石油产品的地下储存,很早就发展起来。在第一次世界大战期间就已经有了地下储存烃类产品的理论。加拿大于 1915 年在安大略省韦兰市(Welland)附近建成第一个地下储气库。美国于 1916 年利用在纽约州西部伊利湖东岸港口城市布法罗(Buffalo)附近的一个枯竭气田建设了第一个真正使用的地下储气库。1916 年德国提出了在岩盐中建造地下油库,1945 年美国就把这种设想变为现实。前苏联 1958 年也在卡卢加开始建造地下储气库。1939 年瑞典开始建造地下岩洞油库。第二次世界大战期间地下油库开始迅速发展,储存方式和储存油品有了进一步拓展。地下油库广泛应用岩盐层空洞、岩石空洞、废矿坑、岩石的含水层、枯竭油气层等方式。地下油库广泛应用于储存天然气、原油、汽油、柴油、液化石油气(LPG)、乙烯、丙烯和丁烯及煤气等。

第二次世界大战期间,瑞典等北欧国家,为了防御空袭,采用岩石爆破技术,在岩层内开挖了大量的地下岩洞,这些岩洞,在和平时有了新的用途,例如用作停车场、飞机库、军需库,甚至用作大型的海军地下基地,其中也有很多岩洞用来作为地下油库。

约在 1939 年~1945 年期间,瑞典的地下油库不过是在开挖的石洞中放入钢板罐,这种油库为洞式钢板罐。很显然此类油库空间利用率低(50%),钢材用量多,施工复杂,造价昂贵。

1945 年~1955 年,发展了洞式贴壁钢板罐,即在开挖的石洞中,沿岩壁衬钢板(罐壁厚 4 mm,罐顶和罐底厚 5~6 mm),在钢板和岩壁之间灌入水泥砂浆或混凝土。这类油库结构中,薄钢板作为贮油容器,只起到防渗作用,而贮油的静压力由岩石壁承受。目前,许多这样的罐仍然在使用。这类油库的使用经验,又导致了地下油库的根本性发展。原来此种油库,要经常的排除积蓄的渗水,否则水积多了,则会形成巨大的侧向压力,在空罐时可能将罐压破,这是一个很大的缺点。能否利用这个水压反害为利呢?人们从自然界本身储集石油的能力得到启发,大量的原油和天然气贮集在沉积岩床的空隙里并没有流失,很多油气集贮于砂岩的孔隙也没漏泄,原因是岩体的渗透率很低,再加上四周水的压力使它们不能渗漏出来。花岗岩、片麻岩等岩石坚硬致密,虽然在自然界里,它们并不生成石油或集储石油,能否创造条件把石油贮存在这种岩石里呢?早在 1937 年,瑞典政府曾经做了水泥被复的石洞贮油的试验,发现只要水泥孔隙充满了水就不跑油。那么怎样才能使贮油洞室的岩体孔隙中充满水?联想到历史经验,19 世纪末就曾利用地下小石洞贮集过压缩空气,方法是贮气室上方建造一个贮水池利用从上方渗流下来的水的压力包围气体使之不能逃逸。提出了不挖贮水池而把石洞建造在稳定的地下水位以下而达到水封的想法。

瑞典发明家 H. Jansson 在 1939 年的一项专利中建议地下岩洞储罐不用衬里,把油品储存在地下水中。10 年后,根据 Jansson 的理论,在瑞典首都斯德哥尔摩城外建造一个无衬里的地下岩洞储罐,它是利用一座废弃的长石矿井。1949 年,另外一个瑞典人 H. Eaholm 取得了类似观点的专利。他在斯德哥尔摩城外自费建立一个小型试验厂,于 1951 年 6 月往岩洞中注入 17.6 m^3 汽油。5 年后打开岩洞,经检验没有汽油流失,并且发现汽油的质量也未改变。

于是从 1956 年开始在斯堪的纳维亚及全世界开始建造地下无内衬岩洞油库,即利用水封的原理,岩洞建在稳定的地下水位以下。只要储存介质不与水溶合,且地下水渗入岩洞速度缓慢,就可以实现岩洞储存。在岩洞储油之初,该原理为许多石油公司接受。目前,地下岩洞储库在世界各国迅猛发展。在斯堪的那维亚国家最为发达。世界上有数百个地下岩洞储库,分布在各大洲。

LPG 地下无内衬岩洞储存,即 LPG 地下水封岩洞储存是在美国发展起来的。1950 年,美国在得克萨斯的一个页岩层中建成第一个坑道洞库,容量为 $3\,000 \text{ m}^3$ 。1950 年~1970 年间,美国共建起了 70 多座 LPG 岩洞储库,大多数在美国东部,在沉积岩中挖坑道,包括油页岩、石灰岩和白云岩。

欧洲第一个全压力 LPG 岩洞库于 1968 年在瑞典建成。该库建在地下 90 m 深的片麻岩中,在岩洞开挖时及开挖后不断控制地下水位,以保证水封压力,防止气体外漏。1972 年建造了两个 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的冷冻 LPG 地下岩洞罐。法国、芬兰等欧洲国家也相继建造了一些 LPG 地下水封岩洞储罐。

1.2 地下水封洞库的发展现状

1.2.1 世界地下水封洞库的发展现状

目前,世界上仅用于储存天然气的地下库就有 610 多座,460 多座是利用废旧油气田,80 座利用地下水藏,65 座岩溶洞库,工作气量达 320 Nm^3 。主要分布在俄罗斯、美国、法国、加拿大、德国、英国、西班牙、比利时、挪威、葡萄牙、波兰、阿联酋、智利、土耳其、巴西、墨西哥、中国、印度、韩国、日本等国家和地区。

废弃矿藏和岩盐洞大量用来储存各种油品,主要是在美国、德国、法国和加拿大。美国 4 座岩盐洞储备库总库容超过 1 亿 m^3 。法国 1960 年建造的一座包括 28 个洞罐的岩盐洞库储存原油、柴油、汽油、石脑油,总容积为 $650 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。1969 年~1993 年法国利用一座铁矿改建的地下水封洞库储存柴油达 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

在北欧主要是利用开挖岩洞来储存油品,其地下油库储存量远远超过地面油库的储存量,截止 1977 年,北欧地下库储量为 $636 \times 10^4 \text{ m}^3$,地面库储量只有 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

地下油库向大型化发展。前苏联建成的一座地下气库仅工作气就是 100 亿 m^3 ;一般岩盐洞库在 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,西德一座油库容量超过 $1700 \times 10^4 \text{ m}^3$;岩洞储库最大的单罐容量已达 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,瑞典一油库容量达 $410 \times 10^4 \text{ m}^3$,还有更大容积的水封地下洞库在运行中。芬兰、挪威和瑞典 3 国建有 200 多座大型地下石油库。芬兰 Tehokaasu Oy 在 Tornio 1991 年开始分 3 期建设 LPG 地下洞库总计库容为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。瑞典、芬兰、挪威、法国等欧洲国家的大型炼化企业就同时建有包括原油、成品油和 LPG 的地下水封洞库。芬兰 NESTE 公司在其一座炼油厂就建设了近 20 座原油、成品油和 LPG 地下储库。瑞典目前至少建设有 5 座原油地下库,6 座 LPG 地下库,2 座汽油地下库,3 座航空油料地下库,1 座石脑油地下库,11 座柴油地下库等。

欧洲目前仅 LPG 岩洞储库就建造了 20 多座。法国、德国、英国、比利时、摩洛哥、西班牙、葡萄牙、意大利、英国等国家都建有 LPG 地下水封洞库。

巴西计划在里约热内卢和圣保罗之间的海滨利用废矿井建设冷藏 LPG 地下岩洞储库。

澳大利亚悉尼 2000 年建设了一座 $13.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LPG 地下储库。洞库宽度 14 m,高度 11 m,由 4 条 230 m 洞室组成,深 135 m。

印度 2007 年建设了一座 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LPG 地下储库。洞库宽度 20 m,高度 19 m,由 2 条 160 m 洞室组成,深 162 m。目前在着手开展地下原油储备库建设的前期调查工作。

早在 1976 年日本就对地下水封岩洞储油开始了研究。1979 年,石油集团在爱媛县菊间镇建立试验工厂,并进行验证试验,确认在日本建设大规模的地下石油储存基地是完全可行的。1981 年,石油集团在久慈、菊间、串木野三个地区作了选址的可行性调查,进行前期确认工作,并于 1986 年 5 月开始建造地下水封岩洞储油库,在 1993 年~1994 年先后建成 3 个地下岩洞储油库,库址分别位于岩手县久慈(库容量为 $175 \times 10^4 \text{ m}^3$)、爱媛县越智郡菊间町(库容量为 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$)、鹿儿岛县串木野(库容量为 $175 \times 10^4 \text{ m}^3$),总容积为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。日本还建设了一批 LPG 地下水封洞库,一座国家 LPG 地下储备库也即将建成。

韩国总结了美国、日本、欧洲的经验,韩国第一个地下岩洞储油库始建于 1981 年,在 GEOJE 储存原油,所选的岩石是花岗岩,储量为 $429.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。1982 年建成 $25.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的地下柴油库。至 1991 年,韩国在 YEOSU 凝灰岩中储存原油的储量已达到 $620.1 \times$

10^4 m^3 。在二十几年的时间里,韩国建成了 8 个大型的石油储备基地,主要分布在南部和北部,总容量约为 $1800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。韩国在 LPG 地下水封洞库建设上也是比较早的国家,其数量和总容积在世界上也名列前茅。1983 年 LG CALTEX GAS 在 Yosu 建设了一座 $29.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG 地下水封洞库,其中丙烷洞库 $17.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG,丁烷洞库 $12.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。1988 年 SK-GAS 在 Ulsan 建设了一座 $55 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG 地下水封洞库,其中丙烷洞库 $31 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG,丁烷洞库 $24 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。1991 年 KNOC 在 Pyongtaek 建设一座了 $42 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG 洞库。1998 年 SK-GAS 在 Pyongtaek 建设一座 $27 \times 10^4 \text{ m}^3$ 丙烷洞库。2000 年 LG CALTEX GAS 在 Incon 建设一座 $48 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG 地下水封洞库,其中丙烷洞库 $34.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,丁烷洞库 $13.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

新加坡建设中的一座约 $400 \times 10^4 \text{ m}^3$ 大型地下石油库,储存包括原油在内的各种石油产品。沙特阿拉伯计划在 5 个地方建设地下岩洞石油储油库,其中利雅得地下石油库已投入运行,储量为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。津巴布韦利用岩洞储存 $36 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的原油。南非利用废矿井储存了大量的原油。墨西哥 1992 年建设了一座 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 原油地下库。沙特、土耳其、阿尔及利亚、哥伦比亚、越南、以色列等许多国家也曾经或正在开展地下水封洞库的选址和研究工作。

1.2.2 中国地下水封洞库的发展现状

我国第一座地下水封洞库黄岛地下水封石洞原油库,为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 原油库,储存胜利油田原油,油库建成后试运、水运后封存。1984 年 12 月经检修、整改后进油,至 1989 年 8 月共运行了 289 次,进、出原油 $204 \times 10^4 \text{ t}$,随后停用。

在黄岛地下水封石洞原油库设计建设过程中,在国外进行了大量的调研,国内有关院校进行了理论研究,研究单位进行了工程地质和水文地质试验,并针对施工过程中碰到的具体问题进行了研究和反复试验,取得了一批具有实践意义的成果,特别是在围岩结构处理技术、围岩裂隙处理技术等方面较国外公司具有独到的见解,多年的应用证明,是非常有成效的。该项目分别荣获国家科技进步奖、国家勘察金奖、石油工业部优秀设计奖。

我国第二座地下水封洞库 1976 年建设的浙江象山 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 柴油地下库,经 1990 年修复使用至今。

1980 年代,我国先后进行勘察设计了黄岛二期地下水封石洞原油库、泰安成品油库,后来停建。直到 1990 年代中后期,我国才开始恢复建设地下水封洞库,主要是液化石油气储库。

自 1996 年开始,加德士在汕头开始投资建设我国第一座地下水封 LPG 储库,容积为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$,中铁隧道集团承建了交通洞、洞库、竖井、水幕系统等主要工程,于 1998 年建成投产。2002 年,BP 华东液化石油气有限公司投资在宁波建成了我国第二座地下水封 LPG 储库,容积为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2009 年,珠海碧辟液化石油气有限公司在珠海投资建成地下水封 LPG 储库,容积为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。3 座地下水封 LPG 储库均储存丙烷和丁烷,库容各一半,均由国外公司设计、总承包,国内公司施工安装。

1998 年青岛龙泽燃气有限公司开始投资建设黄岛 LPG 地下储库工程,主要包括容积为 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG 洞库、容积为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 丙烷洞库,总库容为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,预计 2013 年投产。2011 年烟台聚氨酯股份有限公司开始投资建设烟台万华地下洞库,包括容积为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 丙烷洞库,容积为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 丁烷洞库,容积为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ LPG 洞库,总规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,预计 2013 年投产。均由国内设计建设。

21 世纪初我国开始建设的国家战略原油储备基地,自第二期之后项目开始大规模采用地下水封洞库,目前 4 座原油储备库均在设计和建设中,规模为 $300 \times 10^4 \sim 500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.3 地下水封洞库的发展趋势

1.3.1 世界地下水封洞库的发展趋势

地下洞库技术的发展主要是在现有技术的改进和其他行业技术的应用,如油气田勘探和开发技术以及信息技术。对天然气的不同需求也促进了不同于传统储气技术的发展。

压缩天然气在 50 bar 的压力下无衬岩洞埋深达 600~700 m,还要加上安全深度 100 m。有两种减少深度的方法:利用水帘幕并增加地下水的压力,使其高于地下水静压,埋深可减少到 300 m;或者在岩壁上衬上不渗漏的衬里。瑞典 Sydgas 曾经设计了一个高压天然气储存设施,岩洞为立式圆柱形。在一个 115 m^3 试验岩洞中注入约 15 MPa 的空气(水压为 52 MPa)进行了一次成功的试验。

瑞典和法国首先提出在地下衬砌洞库(直径 20~50 m,高度 50~120 m)中储存压缩天然气(CNG)技术,工作压力为 15~25 MPa。2002 年瑞典建造了一座 $4\times 10^4\text{ m}^3$ 试验库,商业工作气达 10 MNm^3 。

自 1990 年以来,国际 LNG(液化天然气)贸易快速增长,LNG 大规模储存技术也得到发展。虽然地面 LNG 储罐规模达到了 $16\times 10^4\sim 20\times 10^4\text{ m}^3$,但是其安全间距大,占地面积大,而且安全环保风险大。地下储库由于其独具的安全性,在世界范围内开展了持续的研究。

LNG 的岩洞储存研究 20 世纪 60 年代在美国、英国、瑞典、德国、芬兰等国家就已开始,但大多数没有取得成功,LNG 无衬岩洞储存技术仍然在研究之中。日本也对低温下岩石的热机性能开展了研究,Inada 等人对 $-160\text{ }^\circ\text{C}$ 时冰的机械性能进行了研究,Aoki 等人对五种不同岩石在室温至 $-160\text{ }^\circ\text{C}$ 的机械性能和热性能进行了研究。1992 年 5 月后,大规模的冷冻试验在日本 Kamaiahi 的一座废铁矿进行,取得一些反应岩石、冰和断层填充物的数据,对断裂层的位移进行观察并对开口宽度进行了分析。他们根据试验结果认为有可能用土壤材料作岩洞衬里。意大利 M. Brigno 等人在实验室进行了低温状态下岩石机械性能试验,初步结论认为:LNG 对岩石的性质有影响,对岩石的强度和硬度影响很大,但对水泥的影响小一些,热流对岩洞的应力状态也有影响。

瑞典 Roda Sten Rock Labortorg(RSRL)试验厂从 1989 年~1993 年进行了很多 LNG 衬里岩洞试验,目前仍是世界上最为活跃的试验基地。该试验厂有三个试验洞室,内砌混凝土和钢衬,1988 年由斯堪的纳维亚众多致力于发展衬砌岩洞储存天然气的公司联合建成,在一个洞室中利用压缩天然气和水帘幕进行试验,一个洞室进行了 $-190\text{ }^\circ\text{C}$ 深冷试验。H. Stille 等人的研究报告认为,岩体在可以起到压力容器的作用,在压力为 52 MPa 的试验条件下,岩体没有出现加速变形的情况,径向变形很小(推算出直径 44 m 储库 25 MPa 压力下的径向变形为 21~23 mm)。即使衬里发生泄漏也能得到控制与解决,而不致产生严重的后果。

2004 年开始建设试验洞库。地下 LNG 洞库为衬砌洞库,产品储存温度为 $-162\text{ }^\circ\text{C}$,储存压力为 0.1 MPa。为了使岩体抵抗低温,采用衬砌钢板及聚氨酯泡沫隔热板。对建设期间排水,岩体冷却、衬砌、恢复水位等进行了一系列研究。法国工程师还对地下 LNG 洞库建设期间地下水分布开展了计算机 3 维模型研究。LNG 地下洞库典型截面为 $30\text{ m}\times 20\text{ m}$,容积为 $15\times 10^4\sim 50\times 10^4\text{ m}^3$ 以上,经济规模为 $15\times 10^4\text{ m}^3$ 以上。

利用地下水封洞库储存压缩空气、 CO_2 、 H_2 等是各国科技工作者下一步研究的目标。

1.3.2 中国地下水封洞库的发展前景

一般建造地下水封岩洞储库单室容积大,无论是与地上常温储罐还是与大型低温储罐相比,都有较为明显的优势。对于大型储存基地来说,地下水封岩洞储库具有下述优点。

1. 造价低

在工程地质、水文地质情况良好的地方建造地下储库,其造价明显低于储存能力相当的地上储罐。对建造地下库,影响造价的因素如下:

(1)储存产品的特征及操作要求;

(2)储库容量;

(3)厂址的工程地质和水文地质条件。

一般 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的原油地下水封岩洞油库的投资要比地面库节省 20% 的费用。 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LPG 地下水封岩洞油库的投资要比地面库节省 25% 的费用。

2. 节省钢材

钢材用量少是地下水封岩洞油库显著的特点之一。同时减少引进诸如低温钢之类的设备和材料的数量,可降低成本。

3. 经营管理费用低

地下水封岩洞储库,一般都可建成容积较大的储罐,储罐的个数少,同时也减少了相应的设备,便于生产管理,经营费用低。另外,地下水封岩洞储库坚固耐用,不易损坏,只有少量的地上设备,维修量少,维护费用低。一般可减少 50% 的运营管理费。

4. 安全性高

地下水封岩洞储库埋于地下,油气散失量小,大大降低了火灾和爆炸的危险性,安全可靠,消防设施简单。同时抗震能力强,不易毁坏。抵抗爆炸,有利于战时防备。据试验,深 6 m 且有覆盖物的油库就能承受一般炸弹的轰炸,深 30 m 的地下油库可以承受各种炸弹的直接命中。所以地下储库战时很安全。据介绍,国外地下油库的保险费仅为地面油库的 1/3。

5. 占地面积小

地下岩洞储库地面设施占地面积小,与周围设施的间距较地面储罐小,而地下洞库上面的土地还可以进行种植、绿化等。同时建造地下洞库时挖掘出的石渣还可以用做建筑材料。

6. 环境效果好

地下水封石洞油库与地面油罐相比,由于占地面积小,可不破坏自然景观,操作运行时基本无油气排放,事故率低,有利于环境保护。

我国有漫长的海岸线,地质条件也比较好,适合大规模的发展地下油库,特别是我国目前油品储备水平不高,已经不能适应现代化建设和社会主义市场经济发展的需要,需要提高燃料储备水平,因此,考虑建造大型地下储备油库。中国在地下水封洞库勘察、设计、施工、运行管理上已经有了较为丰富的经验,可以推广地下储存技术。

目前国家原油储备库和企业销售 LPG 储库在采用地下水封洞库上已经有了一定的规模,在炼油石化企业采用地下水封洞库,具有更大的优势,在提高有关企业认识的基础上,将具有广阔的使用前景。

此外,在油田废料等废物处理上,利用废弃的矿井进行地下储存具备较大的优势。