

地下储气库建设技术研究现状及建议

肖 学 兰

中国石油西南油气田公司科技信息处

肖学兰. 地下储气库建设技术研究现状及建议. 天然气工业, 2012, 32(2): 79-82.

摘 要 为了及时把握地下储气库建设技术研究现状,系统地梳理了枯竭油气藏储气库、盐穴储气库、含水层构造储气库的建设及垫底气的设计、提高地下储气库有效储量和生产能力的相关技术、地面系统自动化控制等地下储气库通用技术研究现状及其应用情况。结论认为,我国地下储气库建设技术的研究现状可概括为:国内枯竭气藏建库技术基本成熟;枯竭油藏建库技术尚在摸索之中;盐穴储气库建库技术取得了长足的进步;含水层构造储气库的研究才刚起步。进而提出了我国今后一段时期地下储气库建设的相关建议:①枯竭油气藏仍是我国地下储气库建设的主要类型,应关注相关技术的发展;②盐穴储气库的相关技术需要持续关注,但应当将主要研究力量放在相对薄弱的技术环节上;③我国含水层构造储气库的建设应学习、消化国外相关技术,针对具体的地质条件,加快对注排机理、渗透机理、建库方式、建库周期、井网部署、方案设计和施工技术等的研究;④应高度重视地下储气库建设相关标准、规范的建立;⑤应高度重视地下储气库运行的风险管理。

关键词 地下储气库 枯竭油气藏储气库 盐穴储气库 含水层构造储气库 技术研究 现状 进展 建议

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.02.019

地下储气库是天然气生产调峰和天然气资源储备的最佳选择,是保证天然气安全供应的基本手段^[1]。

国外发达国家的地下储气库建库技术已经比较成熟,地下储气库运行管理技术、相关的技术标准、规范和法律也比较完善^[2-3]。

国内枯竭气藏建库技术基本成熟,枯竭油藏建库技术尚在摸索之中,盐穴储气库建库技术取得了长足的进步,含水层构造储气库的研究才刚起步。目前我国大多数地下储气库运行管理方面的文献都是针对盐穴储气库的,在其他类型地下储气库运行管理方面亟待更广泛深入的研究。

国内外地下储气库技术研究热点主要集中在以下 5 个方面:①适于建库地质体的四维地震勘探技术;②提高地下储气库有效储量和生产能力的相关技术;③利用数值模拟技术进行地下储气库优化运行研究;④与盐穴储气库建库和运行管理相关的一系列技术;⑤线性岩层洞穴建库技术。

1 地下储气库建设技术的最新进展

1.1 枯竭油气藏储气库技术研究现状

1.1.1 枯竭油气藏建库技术

国内在大港、京 58 地下储气库群建设中,形成了

一系列适用于我国枯竭气藏建库的相关技术,主要有:①地质方案设计技术^[4];②废弃井封井工艺;③钻井、固井、完井技术;④钻井液技术;⑤储层保护技术;⑥地面工程配套技术等。马小明^[4]等在系统总结中国石油大港油田公司地下储气库(以下简称大港储气库)地质方案设计技术的基础上,明确了方案设计应遵循的主要程序及主体内容,创建了 7 项行之有效的配套设计技术,提出了 26 项地下储气库的评价与运行指标,形成了较为系统的方案设计模式与技术系列。李建中^[5]等在分析枯竭油气藏建库特殊性的基础上,针对性地提出了建库工程的配套技术,并认为其中老井处理技术和钻井—固井—完井过程的储层保护技术是关键技术。这两项技术促进了我国地下储气库工艺设计的统一化和标准化。

1.1.2 枯竭油气藏储气库运行、管理和维护技术

国内在枯竭油气藏储气库运行、管理和维护方面的研究还相对比较零散,没有形成成熟的技术体系。陶卫方等对大港储气库群的调峰方式进行了优化,有效解决了京津冀冬季用气的调峰问题。丁国生^[6]针对板 52 井的特殊地理位置及其套管腐蚀情况设计了一套完整的修井工艺。针对大庆喇嘛甸储气库具有统一的油气界面和水动力系统、运行管理维护难度大的特

点,黄伏生等总结了其运行管理维护的技术经验,形成了一整套颇具特色的开发技术,包括库容量测算技术、注采气系统节点分析技术、动态系统监测、油气界面调整技术、高压气体计量技术和地下储气库运行的科学管理技术。

1.2 盐穴储气库技术研究及应用现状

近年来,由于盐穴储气库发展迅速,国内外(特别是国内)对盐穴储气库的研究相当活跃,在盐穴储气库的溶腔及造腔、注采方案设计、钻完井工艺、稳定性分析、密封性能分析以及地下储气库运行管理等方面都取得了长足的进步,并已有专著系统地对我国盐穴储气库的建库技术进行了总结^[6]。

1.2.1 盐穴储气库建库理论及技术

1.2.1.1 溶腔技术

实验研究表明^[7]:溶腔过程的溶解角度不同,岩盐溶解速率也不同;向上斜溶角度为 45° 时岩盐的溶解速度最大。袁进平等研制的喷嘴式、延伸喷嘴式、软管式促溶工具及促溶工艺,已在金坛储气库成功应用,应用结果显示:盐穴溶腔速度提高了1倍左右。

国内较早开始研究溶腔形状控制技术,一般是基于实验模拟及数值模拟结果提出相应的控制方法,这些方法主要有岩盐溶蚀模拟技术、对流扩散模拟技术和单井形态控制建腔模拟技术^[8]。国内在预测与控制溶腔过程中泥质夹层垮塌这一难题也有所突破,施锡林等建立了基于单井对流法水溶造腔过程中夹层悬空型垮塌分析的力学模型,给出了计算夹层极限跨度的方法。

1.2.1.2 注气排卤及注采完井技术

国外已经形成比较完善的注气排卤及注采完井配套技术,国内近两年也在此领域取得可喜进步,并已在“西气东输”储气库建设中成功应用相关技术^[9]。主要成果有:①制订了注气排卤中气液界面的确定方法;②确定了注气压力、气液面高度、排卤速度等因素的关系式;③研发了注气排卤后期不同剩余卤水深度下的安全排卤速率的确定方法^[10];④形成了我国盐穴储气库注气排卤及注采完井配套工艺技术。

1.2.1.3 稳定性分析

有关地下储气库运营中盐腔稳定性分析方面的技术进步较大,但稳定性评价标准研究相对滞后。关于层状岩盐的破坏形式,实验模拟结果表明^[10]:岩盐部分产生拉伸裂纹,表现为柱状劈裂;夹层部分为压拉破坏,表现为环状由外向内的锥形剪裂。在地下储气库

运营中体积变形预测、地表沉降预测方面,国内研究的基本思路是^[11]:建立一个力学特性与实际相似的盐岩受力分析试验模型及相应的数学模型,利用模型进行受力变形模拟试验和数值模拟,分析得出盐腔变形规律。从文献资料看,试验建模技术已比较成熟,包括材料配方、地质力学模型试验系统、注采气智能控制系统等^[12]。建立的数学模型也日趋合理、实用,早期主要采用未考虑疲劳损伤的盐岩非线性蠕变损伤本构模型^[11],赵克烈等进一步提出考虑了蠕变损伤和疲劳损伤交互作用的蠕变—疲劳交互损伤模型,王同涛等提出的矿柱尖点位移突变模型则具有更强的针对性和实用性,利于精确量化失稳判别标准。在稳定性评价标准方面,国内尚未形成一个统一的稳定性评价标准,有研究者认为:我国地质条件复杂,地质构造变化快,各地形成的盐岩特点也不相同,建立统一的评价标准非常困难,应根据具体的地质条件,做出具体的稳定性评价。

1.2.1.4 密封性能分析与检测评价技术

盐腔的密封性能分析主要有试验研究和数值模拟分析两种技术手段。国外根据空间结构和大小变化情况来确定孔渗参数降低的原因,并对此开展了一系列的实验研究。国内研究者主要针对我国盐穴储气库含夹层多的特点,大多采用数值模拟方式开展了密封性能研究,取得的主要成果有:①基于层状盐岩中盐岩与夹层的孔隙率与渗透率在气压作用下的变化规律,提出了地下储气库极限运行压力的确定原则^[13];②建立了含软弱夹层盐岩储气库的等效边界气体渗流模型,该模型可反映夹层面流的问题,可用于含夹层盐穴储气库运行过程中天然气渗透规律的研究^[14]。

关于盐腔的密封性检测及评价技术,国外已有多种成果^[15]:①液体泄漏测试方法及其准确度的确定;②氮气泄漏检测法;③淡水—卤水界面法;④燃料油—卤水界面法;⑤盐穴储气库最小可检测泄漏率与最大允许泄漏率的标准。此外,俄罗斯近年来研制了地下储气库生产监测系统,可对地下储气库进行可靠的动态监测。而在国内,袁光杰等依据国内盐穴储气库的实际情况,提出了以氮气或空气为介质的盐穴储气库密封测试方法及检测结果的评价标准、泄漏位置的判别方法,给出了气水界面处的压力平衡方程,并在金坛B1盐穴腔体密封检测中成功得以应用。

1.2.1.5 声呐* 测量技术

除上述技术外,声呐测量技术也广泛应用于采盐

*“声呐”一词本刊根据《现代汉语词典》(第5版)1222页和“黑马校对软件”统一为“声呐”,但在本文2.4节和参考文献[17]中保留了原用的“声纳”,特此说明——编者注。

井腔的腔体形态测量、初选和稳定性评价过程,并据此确定注气排卤参数、制订井筒修复改建和现场施工技术方案^[16-17]。

1.2.2 盐穴储气库运行、管理、维护技术

盐穴储气库运行管理的关键技术包括:①减少运行过程中溶腔的收敛性;②防止天然气水合物的形成;③溶腔建腔过程形成的冷带和残留盐水对运行过程的影响;④盐穴储气库运行的稳定性及注采循环中应注意的问题。从文献调研结果来看,目前我国在与稳定性相关的地下储气库运行安全技术、优化配产技术和风险管理方面已经取得一些进展。

国内基于交变气压、气压变化速率等风险因素对地下储气库运营安全稳定的影响研究结果表明^[18]:洞腔径向收敛位移和径向应变随储气内压的减小逐渐增大,为保证地下储气库的运行安全,地下储气库的储气内压应大于 4 MPa;注采气压变化速率越快,洞腔径向收敛位移和径向应变变化速率越大。

在盐穴储气库的优化配产方面,谭羽非等以腔群总压降最小为优化目标,提出了盐穴储气库腔群配产模型,可应用于盐穴储气库注采运行方案的确定及多腔优化生产调度。

近年来,由于天然气管道完整性管理的理念被广泛应用到管道系统管理中,地下储气库的完整性管理也引起专业人员的关注。国外已经制订了涉及地下储气库风险评估技术方面的标准,国内的相关研究则刚刚起步。针对我国盐穴储气库的特点,目前初步提出了实施定量风险评估的关键技术、设置监控井、规范监(检)测作业和维修更换管理、设置防护栏和预测盐穴体积收缩率等盐穴储气库的风险控制措施^[19-20]。

1.3 含水层构造储气库技术研究现状

世界上主要的含水层构造储气库均位于欧美发达国家,我国尚无建成的含水层构造储气库。目前,含水层构造储气库有向大型化发展的趋势,主要表现在定向井、丛式定向井、水平井等钻完井工程技术运用于地下储气库的建设中;采用数值模拟方法指导地下储气库的建设和整个注采气工艺过程。最近,俄罗斯为发展统一供气系统,提高应对复杂形势下的供气能力,对含水层构造储气库的设计提出了新要求。

2 各类型地下储气库通用技术研究现状

2.1 垫底气的设计

由于用惰性气体代替天然气作为垫底气可以大幅减少地下储气库建设的一次性投资,国内外对其相关的技术都给予了持续的关注。国外采用混合气作为垫

底气在 7 座地下储气库进行了试验^[21],试验结果表明:应用垫底气后,地下储气库的投资成本可降低 20%。国内研究者也做了一些相关研究工作,李娟娟用惰性气体与天然气混合,建立了气体扩散模型,并模拟了含水层构造储气库以惰性气体作为部分垫底气的建库过程和运行情况。

2.2 提高地下储气库有效储量和生产能力的相关技术

水平钻井技术、大井眼完井技术、岩石酸化处理技术以及提高最大储气压力都可以提高地下储气库的有效储量和生产能力。此外,俄罗斯目前正在从改进注气和采气方法上研究提高地下储气库生产能力的新技术。针对中低渗透气藏改建地下储气库,丁国生提出:尽量采用平稳的运行方式,以均匀供气进行季节调峰为主,以利于在调峰期采出更多的天然气。

2.3 地面系统自动化控制

国外近年来在这方面又取得一些新进展,例如,德国对 Rehden 储气基地地面自动控制系统进行了全面更新,采用按 IEC 60870 要求制造出的遥控系统,包括 Rosherg Engineering GMBH 的现代化仪表、控制系统以及西门子 Simatic PCS 的工艺系统^[22]。这些技术极大地提高了地下储气库工艺系统的灵活性。

2.4 相关标准、规范的制订

中国石油天然气集团公司借鉴欧洲、美洲在盐穴储气库方面的相关标准、国内在该方面的研究成果及施工经验,于 2010 年制订了《盐穴储气库腔体设计规范》、《盐穴储气库造腔技术规范》和《盐穴储气库声纳检测技术规范》3 项标准,分别对盐穴储气库的设计、施工和检测技术要求进行了规范。

2.5 其他相关技术

为了优化地下储气库的运行,以下相关技术和工具也常被使用:①地下储气库设备维修和操作技术;②新的测井工具,如核磁共振、改进的三维地震传感器、多种流体及砂粒探测器等;③永久传感器和(或)井内光纤等。

3 我国地下储气库建设技术需求及建议

如前所述,我国地下储气库建设具有自身的特点,且不同类型地下储气库的现有技术水平参差不齐,因此,为了迎接地下储气库建设快速发展带来的挑战,应立足国内地下储气库建设的要求,将有限的科研技术力量合理地分配在相应的技术上。

1) 枯竭油气藏储气库仍是我国地下储气库建设的主要类型,其相关技术也将是关注的重点。鉴于目前我国东部地质条件复杂,改建地下储气库的难度较大

的客观条件以及枯竭气藏建库技术相对成熟、枯竭油藏建库技术相对滞后的现实状况,建议:①下大力气研究针对复杂断块油藏改建地下储气库时在注排机理、渗流机理、建库方式、建库周期、井网部署、方案设计和施工技术等方面的摸索和研究;②及时总结已经比较成熟的枯竭气藏建库技术,并加强对地下储气库运行管理技术方面的研究,特别是优化运行、提高生产能力以及如何将建库与提高采收率相结合方面的技术研究。

2) 盐穴储气库的相关技术需要持续关注,但应当将主要的研究力量放在相对薄弱的技术环节上,建议加强以下8项技术的研究:①基于稳定性要求条件下,优化溶腔控制技术;②稳定性评价标准;③溶腔过程中夹层垮塌的预测和控制;④优化运行技术;⑤地面流程优化;⑥自动化控制系统;⑦运行管理中天然气水合物的防治技术;⑧减少溶腔的收敛性,避免残留盐水的影响。

3) 对于含水层构造储气库而言,我国中小型盆地储盖组合较复杂,含水层构造储气库建设将面临很大的技术难题(已纳入建设规划的麻丘储气库属于含水层构造储气库),该项工程方面的技术还相当匮乏。因此,给出以下建议:①学习、消化国外相关的技术;②针对具体的地质条件,加快对注排机理、渗流机理、建库方式、建库周期、井网部署、方案设计和施工技术等的研究。

4) 应高度重视地下储气库建设相关标准、规范的建立。目前我国主要针对盐穴储气库有一些相关标准和规范,但涉及其他类型地下储气库的标准、规范还寥寥无几。

5) 应高度重视地下储气库运行的风险管理。地下储气库是天然气产运销系统的重要设施,确保其安全运行十分重要,引入完整性管理的理念、加强地下储气库运行风险管理势在必行。

参 考 文 献

[1] 陈茂濠,吴文佳.广东建设天然气储备的初步建议[J].石油与天然气化工,2010,39(3):193-195.
 [2] 霍瑶,黄伟岗,温晓红,等.北美天然气储气库建设的经验与启示[J].天然气工业,2010,30(11):83-86.
 [3] 张耀民,廖鑫海,黄建平,等.国外天然气地下储存建设技术进展[J].石油科技论坛,2008,27(4):29-33.
 [4] 马小明,余贝贝,马东博,等.砂岩枯竭型气藏改建地下储气库方案设计配套技术[J].天然气工业,2010,30(8):67-71.
 [5] 李建中,徐定宇,李春.用枯竭油气藏建设地下储气库工程的配套技术[J].天然气工业,2009,9(9):97-99.

[6] 丁国生,张昱文.盐穴地下储气库[M].北京:石油工业出版社,2010.
 [7] 徐素国.层状盐岩矿床油气储库建造及稳定性基础研究[D].太原:太原理工大学,2010.
 [8] 万玉金.盐层储气库溶腔形状控制模拟技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2005.
 [9] 赵克烈.注采气过程中地下盐岩储气库可用性研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2009.
 [10] 陈锋,杨海军,杨春和.盐岩储气库注气排卤期剩余可排卤水分析[J].岩土力学,2009,30(12):3602-3606.
 [11] 陈卫忠,王者超,伍国军,等.盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):467-472.
 [12] EVANS D J. An appraisal of underground gas storage technologies and incidents for the development of risk assessment methodology[R].Nottingham,UK;British Geological Survey,2007.
 [13] 梁卫国,杨春和,赵阳升.层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):22-27.
 [14] 陈卫忠,谭贤君,伍国军,等.含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1297-1304.
 [15] DIAMOND H W. The water-brine interface method, an alternative mechanical integrity test for salt solution mining wells[C]//SMRI Fall Meeting. San Antonio; SMRI, 1989.
 [16] BREST P, BERGUES J, BROUARD B, et al. A tentative evaluation of the MIT[C]//Houston SMRI Spring Meeting. Houston; SMRI, 1996.
 [17] 屈丹安,杨海军,徐宝财.采盐井腔改建储气库和声纳测量技术的应用[J].石油工程建设,2009,35(6):25-28.
 [18] 张强勇,陈旭光,张宁,等.交变气压风险条件下层状盐岩地下储气库注采气大型三维地质力学试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2410-2419.
 [19] 李丽锋,罗金恒,赵新伟,等.盐穴地下储气库风险评估技术与控制措施[J].油气储运,2010,29(9):648-651.
 [20] 杨琴,余清秀,银小兵,等.枯竭气藏型地下储气库工程安全风险与预防控制措施探讨[J].石油与天然气化工,2011,40(4):410-412.
 [21] MEUNIER G, LABAUNE F. Using inert gas: almost twenty years of experience[C]//20th World Gas Conference, 10-13 June 1997, Copenhagen Denmark. Copenhagen; International Gas Union, 1997.
 [22] VIALA B, RASTATTER B. Process control upgrade boosts system flexibility[J].Oil & Gas Journal,2009,107(26):68-70.

(收稿日期 2011-10-31 编辑 何明)