

国内地下储气库钻完井技术现状分析

袁光杰¹ 杨长来² 王斌³ 夏焱¹ 班凡生¹ 庄晓谦¹

1. 中国石油集团钻井工程技术研究院 2. 中国石化天然气川气东送管道分公司

3. 中国石油新疆油田公司储气库项目部

袁光杰等. 国内地下储气库钻完井技术现状分析. 天然气工业, 2013, 33(2): 61-64.

摘要 国内已投入运行的储气库暴露出了环空带压问题, 严重地影响了储气库安全平稳运行。为此, 详细介绍了国外储气库建设在注采井寿命、钻井方式及井型、井身结构、钻进工艺、固井、完井、老井封堵和注采等方面采用的最新理念和技术。针对国内在建和拟建地下储气库的基本情况, 着重分析了环空带压、井身结构、钻井施工、固井、老井处理、关键工具和装备以及规范和标准等方面存在的主要问题。结果认为: ①国内储气库建设各方逐渐接受了储气层采用大尺寸井眼且储层专打的井身结构理念; ②钻井应以提高固井质量为核心, 把套管丝扣气密封检测、弹性水泥浆、IBC 测井等先进技术应用于技术套管和生产套管固井; ③要高度重视地下储气库注采井和老井的井筒完整性管理。最后指出应建立适合国内地质特点的储气库钻完井工程设计和施工技术规范; 需专项研究低压储气库钻井防漏堵漏和储层保护等技术并研制油套管氦气气密封检测等装备与工具。

关键词 中国 地下储气库 钻井 完井 固井 技术现状 井筒完整性管理

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.02.013

Drilling and completion technologies for the underground gas storage (UGS) in China: A state-of-the-art appraisal

Yuan Guangjie¹, Yang Changlai², Wang Bin³, Xia Yan¹, Ban Fansheng¹, Zhuang Xiaolian¹

(1. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China; 2. Sichuan-to-East China Gas Pipeline Company, Sinopec, Wuhan, Hubei 213200, China; 3. Gas Storage Project Department of Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Kelamay, Xinjiang 834000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 2, pp.61-64, 2/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Both research and construction of underground gas storage (UGS) started late in China, and the annular abnormal pressure in drilling has brought about trouble in normal operation of those in-service UGSs. In view of this, this paper first introduces in detail the newest ideas and advanced techniques associated with international UGS in terms of life spans of injection and production wells, drilling methods and well types, well structure, drilling technology, cementing and completion, plugging, injection and production of mature wells, and so on. Then, this paper analyzes the basic information of those UGS projects planned or under construction, focusing on such major issues as circular abnormal pressure, well structure, drilling operation, well completion and cementing, processing of mature wells, important tools and equipments, as well as the involved criteria and regulations. The following conclusions are drawn. (1) The new concept of casing program specially designed for gas reservoirs with large-size bore holes being adopted has been gradually accepted by all the participators of UGS project construction. (2) Cementing quality is the core of drilling operation so the advanced techniques like air-tight seal inspection, elastic cement, isolation scanner are used for intermediate and production casings in well cementing. (3) Great attention should be paid to the well integrity management of injection, production and mature wells in the USG construction. On this basis, the following proposals are presented. (1) Design codes and technical regulations should be established for well completion in UGS projects based on domestic geological conditions. (2) Special studies should be conducted on the technologies for loss circulation control and reservoir protection as well as the development and research of special equipment and tools for helium leak check in casing strings.

Key words: China underground gas storage (UGS), drilling, completion, cementing, salt cavern, well integrity management

基金项目:北京市重大科技成果转化落地培育项目(编号:Z111100059411024)。

作者简介:袁光杰, 1974年生, 高级工程师, 博士; 从事地下储气库工程及煤层气钻完井技术研究工作。地址: (100195) 北京市海淀区四季青镇北坞村路甲25号静芯园K座。电话: (010) 52781892。E-mail: ygjdrf@cnpc.com.cn

根据国际天然气联盟(IGU)统计,目前全球共 36 个国家和地区建设有 630 座地下储气库,地下储气库总工作气量为 $3\,530 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占 2010 年全球 $3.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 天然气消费量的 11.14%。共有储气库井 2.3×10^4 口。美国、俄罗斯、乌克兰、德国、意大利、加拿大、法国是传统的储气库大国,占全球地下气库工作气量的 85%;全球地下储气库总工作气量的 78% 分布于气藏型储气库,5% 分布于油藏型储气库,12% 分布于含水层储气库,5% 分布于盐穴储气库,另有约 0.1% 分布于废弃矿坑和岩洞型储气库中^[1]。

枯竭油气藏是世界上最适合建设地下储气库的一种类型。1915 年在加拿大安大略省 Welland 枯竭气藏建立首个储气库,到 2006 年全球利用枯竭油气藏改造而成的储气库有 495 座,占当年储气库总量的 82%。2006 年美国 365 座枯竭油气藏储气库中的 320 座为气藏储气库,10 座为凝析气藏储气库,9 座为油藏储气库,26 座为油气藏储气库^[1]。国外枯竭油气藏储气库储层深度在 500~2 500 m,储层渗透率一般在几十至上千毫达西,岩性主要为砂岩和石灰岩,部分气田含 H_2S 。

1959 年前苏联建成第 1 口盐穴储库井,现在全世界有 60 多座盐穴储气库。盐穴储库的类型主要有 3 种:薄盐层中的巷道式盐穴腔体,多夹层岩盐中的倒梨形腔体和盐丘中的圆柱形腔体^[2-3]。国外盐穴储气库的目的层一般为盐丘,厚度高为 500~1 000 m;岩盐埋深一般在 1 500 m 以内;岩盐品味好,不溶物含量低、夹层少。

美国于 1953—1958 年在芝加哥肯塔基建成了世界上第一个含水层地下储气库;世界上最大的含水岩层地下储气库为俄罗斯的卡西莫夫地下储气库。美国是拥有含水层储气库最多的国家(47 座),法国 15 座储气库中有 12 座为含水层型储气库,是目前拥有含水层型储气库比例最高的国家。

1 国外储气库钻完井技术现状分析

1.1 注采井寿命设计

国外储气库建设单位重视岩石力学、管柱力学等基础性研究,重视建井质量的管理,气库注采井按至少 30 年不修井的原则进行寿命设计。目前比利时 Loenhout 储气库已经实现了这一目标,法国 TIGF 储气库也已运行超过了 50 年,目前仅 1 口井有异常套压(除封堵井外),荷兰 Norg 储气库 6 口生产井生产 14 年没有异常套压^[4-7]。

1.2 钻井方式及井型

枯竭气藏储气库井在钻井方式上主要采用丛式井

场设计,便于集中管理,减少设备搬迁。比利时 Loenhout 储气库用 4 个丛式井组完成 30 口井;荷兰 Norg 储气库采用 1 个丛式井组钻成 10 口井,井间距为 10 m;法国 TIGF 储气库丛式井组井间距为 7 m。储气库注采井应根据储层特征,优先采用水平井或采用水平井、定向井组合提高单井注采能力,水平井水平段长度原则上不小于 500 m。德国 Breitbrunn-Eggstatt 储气库最近新钻 5 口水平井,最大水平位移为 1 514 m;西班牙 Yela 储气库 10 口注采井均采用了丛式水平井或定向井^[4,8]。

1.3 井身结构设计

储气库注采井为满足季节调峰和应急供气的功能,需要满足大流量注采及长寿命、高安全的要求,应尽量采用较大尺寸的井身结构。对于低压油气藏型储气库采用储层专打,不兼顾其他层位。储气库生产套管及完井管柱在材质选择方面主要根据注采气质而定,若存在腐蚀因素,应采用相应的防腐材质,材质选择上都比较保守。例如欧洲比利时的 Loenhout 储气库、Yela 储气库和荷兰的 Norg 储气库采气油管均为 $\varnothing 177.8 \text{ mm}$ ^[4]。

1.4 钻井工艺技术

针对低压地层,采取欠平衡+带压作业,储层压力过低的采取先注气提高压力再钻井的操作程序,以减少对储层的伤害^[9]。如比利时 Loenhout 储气库,即采用了带压作业完井的方式进行操作;西班牙 Serrablo 储气库为一个衰竭型气藏,为降低钻井复杂,进行了先注、后钻注采井的工作^[4]。完井管柱上卸扣时主要采用带扭矩检测,确保上扣扭矩且要求每根套管均进行气密封检测,确保入井管柱密封质量。国外储气库在下气密封管柱时,均要求每根套管均进行气密封检测^[8]。

1.5 固井技术

储气库井筒水泥环在交变应力条件下,很容易产生微裂缝、微环空,产生气窜和套管带压风险。为了提高固井质量,主要采取以下措施:①储气库注采井设计上要控制单层套管下入深度;②重视每一层套管的固井质量,水泥返至地面;③采用韧性膨胀水泥,减少应力交变对水泥环的影响;④采用自愈合水泥技术,填充后期产生的微裂缝;⑤固井质量检测要求高,国外普遍采用超声波成像测井方法(如 IBC)。通过运用上述措施,Total、Shell 在建井质量控制上取得了很好的效果,法国 TIGF 储气库目前仅 1 口井有异常套压;荷兰 Norg 储气库 6 口生产井生产 14 年没有异常套压^[9-11]。

1.6 完井技术

针对枯竭气藏储气库注采井出砂问题各公司的认

识不同,Geostock、Schlumberger 认为裸眼或筛管完成更有利于注采,TIGF 采用了防砂筛管,Norg 初期采用了防砂筛管,鉴于采气压差低、出砂量很小的情况,改防砂筛管为普通筛管。根据储气库完整性要求,原则上不进行压裂改造,若个别注采井存在堵塞和伤害,可采取酸化解堵措施提高注采量。环空为保护液或部分注氮气,Norg 储气库井环空除压力监测外,直接与放空系统连在一起^[4]。

1.7 老井封堵技术

国外枯竭油气藏型储气库的老井封堵普遍遵循“先难后易”原则,也即首先对枯竭气田中的老井进行评价,将情况最复杂的老井进行首先封堵,然后依次封堵直至全部封堵成功后才开始储气库的建设,避免出现因1口井未封堵好而影响整个储气库的建设。具体的封堵方法是首先检测老井固井质量,若盖层封固质量差,应锻铣至原地层,锻铣段长度不少于50 m,注水泥封堵;若盖层封固质量好,可先下入桥塞封堵,上面注水泥封堵。若目的层上部仍有气层,应分段注塞,每个气层顶部不少于50 m水泥塞。老井封堵一年后若无问题,可从地面以下4 m切断,恢复地表^[4,12]。

1.8 注采技术

对于边底水气藏储气库或含水层储气库,国外均从气藏的最顶部开始注气,而且每年的注入量要大于采气量,通过逐年下压气水界面,把库容量和储气量逐步扩大。

1.9 盐穴储气库钻完井技术

国外盐穴储气库钻井通常采用直井,井身质量要求较高,通常储气库注采井井斜小于 1.5° ,井身结构通常采用 $\varnothing 508$ mm 技术套管 $\times \varnothing 339.7$ mm 生产套管 $\times \varnothing 244.5$ mm 注采气管的管柱结构,盐层段钻井液采用饱和盐水钻井液体系,固井采用盐水水泥浆体系,完井方面主要采用不压井作业技术完成排卤管的起出。国外双井盐穴造腔已在现场取得应用,例如美国Avoca盐穴储气库两口井水平井连通,花生形状腔体,溶腔高度30.5 m,长度244 m,腔顶跨度61 m。

2 国内储气库钻完井存在的主要问题

国内地下储气库研究和建设起步较晚,从20世纪90年代开始地下储气库建设,先后针对大港、华北、金坛、刘庄、云应、平顶山、麻丘、王场、上法、安宁、新疆、辽河、川渝气区、长庆气区等多种储气库建库技术进行了研究,目前投入运行的主要有大港^[13]、华北和金坛3座储气库。总结正在建设和已投入运行的储气库,发现在储气库钻完井技术主要暴露出以下问题:

2.1 环空带压

许多枯竭气藏或盐穴储气库注采井存在环空带压问题,注采井运行1~2年后,套管环空或套管与油管之间会产生高压,并可检验出主要成分为天然气。

2.2 井身结构设计偏小

国内储气库的井身结构普遍偏小,部分气藏储气库未采用储层专打,盐穴储气库目前采用 $\varnothing 339.7$ mm 技术套管 $\times \varnothing 244.5$ mm 生产套管 $\times \varnothing 177.8$ mm 注采气管的井身结构,气库的建造速度和应急能力受到限制^[14]。

2.3 钻井施工难度大

国内枯竭气藏储气库目的层普遍埋深超过2 500 m,纵向上存在多套压力系统,地层承压堵漏难度大,水平井安全钻井问题突出,需要探索合适的钻井工艺进行施工。例如华北待建的古潜山裂缝型储气库,目的层深度更是超过4 000 m,施工过程中霸33平3等井出现严重漏失,并影响到固井质量。

2.4 固井难度大

大井眼、易漏失层及储层压力低和气库固井要求高对固井工艺和水泥浆体系带来挑战,生产套管和其上一层技术套管固井是各储气库钻完井面临的主要难题,在弹性微膨胀水泥浆体系的优选、储气库固井质量评价方面则缺乏统一的标准和依据。

2.5 老井多,处理难度大,缺乏规范和规程

老井井况千差万别,检测和评价方法不统一,技术难度大;老井井下复杂多,封堵困难;井身质量检测方法、评价指标等没有相应的行业标准,部分已封堵的储气库老井在气库运行一段时间,井口出现带压现象。

2.6 关键工具和装备缺乏

国内缺乏具有独立知识产权的储气库建设的关键设备和工具。例如在油套管氦气密封检测、多传感器油水界面检测、盐穴声呐测腔方面还完全依赖国外的设备和技术。

2.7 缺乏标准和依据

国内储气库钻完井技术和老井封堵规范尚未建立,各储气库钻完井中出现的新问题在解决时尚无据可依。

3 认识及建议

1)国内通过近20年的储气库研究和建设,在储气库建设质量和要求的认识上有很大提高,大尺寸井眼、储层专打、水平井、套管丝扣气密封检测、弹性水泥浆、IBC测井等先进技术和理念开始逐渐被储气库建设各方所接受,对储气库的建设起到了很好的推动作用。

2)国外在储气库建设上起步较早,已经拥有相对完善的钻完井技术规范 and 标准,应在充分结合国内实际情况上借鉴使用,并尽快建立适合国内地质特点的储气库钻完井设计和施工技术规范,使设计和施工有据可依^[15]。

3)储气库的钻完井施工应以固井为核心,要高度重视储气库注采井和老井的井筒完整性管理,尤其是生产尾管及盖层段固井的质量必须保证。

4)在储气库的建设和管理上,应建立一个业主、设计、监理、施工四方协调工作机制,统一思想认识,加强施工过程管理,保证施工质量。

5)应积极开展低压储气库钻井防漏堵漏及储层保护技术、储气库固井工艺和水泥浆体系、盐穴气库双井建腔钻采工程技术、含水层储气库钻完井技术、储气库井筒完整性检测技术、油套管氦气气密封检测装备研制等的专项研究,为国内储气库的建设提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] ONDERKA V. Working Committee 2 - Gas Storage(WOC2) of the International Gas Union (IGU)[C]// The 24th world gas conference Argentina, 5-9 October, 2009; 2-7.
- [2] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of salt cavern use [C]// SMRI. Fall Meeting, San Antonio, 2000; 130-135.
- [3] FAVRET F. Up-to-date Researches and future trends in underground gas storage facilities: A state of the art review [J]. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, 2004(149); 159-193.
- [4] 中国石油钻井工程技术研究院. 赴欧洲地下储气库考察报告[R]. 北京: 中国石油集团钻井工程技术研究院, 2011. CNPC Drilling Research Institute. To Europe's underground gas storage inspection report[R]. Beijing: CNPC Drilling Research Institute, 2011.
- [5] CADE R, FRAME R, WALLACE B. Underbalanced drilling increases deliverability from gas storage wells [J]. World Oil, 2006, 227(2); 101-102.
- [6] ZAPF D. Rock mechanical design of gas storage caverns for seasonal storage and cyclic operations [C]// SMRI Spring Meeting, Grand Junction, Colorado, 2010; 197-213.
- [7] ZAPF D, STAUDTMEISTER K, LEUGER B. The influence of different loading scenarios on the Thermo-mechanical behavior of a gas storage cavern [C]// SMRI Spring Meeting, Galveston, Texas, 2010; 83-97.
- [8] ROWAN M C, WHIMS M J. Multilateral well enhances gas storage deliverability [J]. Oil & Gas Journal, 1995, 93(52); 89-92.
- [9] BEREST P, BROUARD B, DURUP J G. Tightness testing in salt-cavern wells [C]// SMRI Spring Meeting, Banff, Alberta, Canada, 2002; 103-108.
- [10] STAUDTMEISTER K, ZAPF D, LEUGER B. The influence of different loading scenarios on the thermo-mechanical behavior of a gas storage cavern [C]// SMRI Spring Meeting, Galveston, 2011; 203-211.
- [11] ROKOHR R B, STAUDTMEISTER K, ZAPF D. Rock mechanical design for a planned gas cavern field in the Preesall project area, Lancashire, UK [C]// SMRI Fall Meeting, New York, 2011; 83-88.
- [12] DHARMANDA K, KINGSBURY N, SINGH H. Underground gas storage: Issues beneath the surface [C]// paper 88491 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference 18-20 October 2004, Perth, Australia. New York: SPE, 2004.
- [13] 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.
MA Xiaoming, YU Beibei, MA Dongbo, et al. Project design and matching technologies for underground gas storage based on a depleted sandstone gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(8); 67-71.
- [14] 吴建发, 钟兵, 冯曦, 等. 相国寺石炭系气藏改建地下储气库运行参数设计 [J]. 天然气工业, 2012, 32(2); 91-94.
WU Jianfa, ZHONG Bing, FENG Xi, et al. Operation parameter design of the Xiangguosi underground gas storage based on the Carboniferous gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2); 91-94.
- [15] 肖学兰. 地下储气库建设技术研究现状及建议 [J]. 天然气工业, 2012, 32(2); 79-82.
XIAO Xuelan. Research and proposals on underground gas storage construction technologies [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2); 79-82.

(修改回稿日期 2012-12-04 编辑 凌 忠)