

金坛盐穴地下储气库建库关键技术综述

丁国生

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院)

丁国生.金坛盐穴地下储气库建库关键技术综述.天然气工业,2007,27(3):111-113.

摘要 金坛盐穴储气库是中国第一个盐穴储气库,建设金坛盐穴地下储气库是一个比较复杂的系统工程,建库中通过摸索形成和运用了多项关键技术。①地质评价:对建库区域的选择和溶腔密封性至关重要;②溶腔设计及稳定性评价:是确保溶腔稳定的最佳形态并达到体积最大化的技术保障;③造腔技术:是整个建库工程的核心,它是能否实现所设计的理想溶腔形态和体积的关键;④声纳检测技术:确定造腔过程和最终溶腔的体积和形态;⑤完整性测试溶腔:是能否开始建造和建造后可否投入运行的关键;⑥热动力模拟:是编制盐穴储气库运行计划并为地面设施配套的重要依据;⑦老腔井筒改造技术:部分形态较好的采盐溶腔改建成为储气溶腔,加快了储气库建设进程。金坛储气库的建设使中国具备了建设同类地下油气储备库的技术实力。

关键词 盐穴气库 造腔 稳定性 检测 完整性 模拟

盐穴地下储气库已有70多年发展史,在欧美许多国家的天然气调峰中发挥了重要作用^[1]。金坛盐穴储气库是中国第一个盐穴地下储气库。到2007年上半年,第一批溶腔即将投入调峰运行。它的建设在国内已形成了一套较完善的盐穴储气库建库技术系列。

一、建库基本地质条件

金坛盐穴储气库位于江苏省金坛市,距西气东输管线距离约35 km。金坛盐矿盐岩层发育于直溪桥凹陷阜宁组沉积末期,属湖盆萎缩阶段局限盐湖沉积。盐岩矿床平面形态呈肾状分布,含盐面积60.5 km²,盐岩层埋深800~1200 m,盐岩层厚度67.85~245 m^[2]。由于金坛盐矿具备了盐岩分布稳定、盐层厚度大、内部夹层少、盐层品位高、顶板强度大、盐层埋深适中等有利地质条件,加上充足的造腔水源和优越的地理位置,成为建设储气库的有利目标。

二、储气库工程概况

金坛盐穴储气库是西气东输管道工程建设的主要储气库,计划共建设新溶腔57个,改造已有的溶腔6个,合计建成63个,总工作气量约为(17~20)×10⁸ m³。设计日注气规模为1000×10⁴ m³、采气能力1600×10⁴ m³,日应急最大能力在3000×10⁴ m³。

三、建库关键技术

金坛储气库的建设不仅对西气东输工程具有重要意义,同时对其他地区和其他油气管道的地下储备库建设具有示范和指导意义。储气库的建设是一个系统工程,涉及到从钻井完井、造腔、地面集输与处理、气库运行管理等领域,其核心是如何建成稳定密封并具有较大储气能力的地下盐穴。通过几年来的研究、摸索、实践,以及引进消化和吸收国外经验,形成了一整套盐穴储气库建库技术。盐穴储气库建库不同阶段的关键技术如下。

1.地质评价技术

盐层的地质评价建立在地震勘探和测井研究的基础上。地质评价主要包括盐层的沉积特征、盐层展布的控制因素及分布规律、盐层内部夹层的性质及分布规律、盐层顶底地层的密封性、与盐体有关的断裂特征、盐层中不溶物质的类型及组成,以及不溶物质含量的计算、盐层中夹层的分布及对储气库建设的影响等。特别是运用高分辨层序地层原理进行盐岩层顶底界面的识别和预测,在现场钻井进尺控制和卡层中发挥了重要作用。

2.溶腔设计与稳定性评价

溶腔设计是盐穴储气库设计的关键,设计主要包括形态、体积、运行压力、运行过程的压力变化梯

作者简介:丁国生,1966年生,高级工程师,博士;现为中国石油勘探开发研究院廊坊分院地下储库中心主任工程师。地址:(065007)河北省廊坊市万庄44号信箱。电话:(010)69213415,13803162543。E-mail:dgs69@petrochina.com.cn

度控制等。设计主要考虑的是溶腔的稳定性,在评价盐穴的稳定性时,主要遵循以下两个准则^[3]。

(1)无张应力准则。由于盐岩的抗张强度较小,因此,储气库运行过程中腔壁不允许存在张应力。实际气库运行过程中的张应力主要产生于以下两种情况,包括盐穴受压过度或者在运行过程中天然气温度剧烈变化引起的冲击,以及由于盐穴顶部跨度过大,其顶部变形引起的张应力。

(2)膨胀判定准则。膨胀是判断岩石发生损伤的一个依据,而应力准则可以判断是否发生膨胀。

在溶腔稳定判别标准的基础上,以岩石力学分析为基础,综合运用地质力学、工程力学对溶腔的各种参数进行反复优化,并运用力学有限元模拟计算,分析不同溶腔形态在不同的运行状态下,溶腔不同部位的应力和应变,直至满足稳定性标准。

3. 造腔

盐穴的造腔过程是一个水溶过程,通过钻井下入套管,需要造腔的盐层部位裸眼完钻。在套管内下入两根同心管柱,内部较小的管柱称为中心管,外层管柱称为中间管。通过中心管和中间管与中心管之间的环空注入淡水并进行循环采出卤水,使盐层部位溶蚀形成溶腔。通过中心管注入淡水称为正循环,这种循环方式比较容易形成底部直径大、上部直径小的溶腔。通过中心管与中间管的环空注入淡水称为反循环,这种方式易形成倒锥形腔体。

水溶开采过程中,在形成初始溶腔后,通过中间管与套管之间的环形空间向溶腔内注入一定量的非溶剂(非溶剂一般是气体或各类油品,常用的主要是柴油)。利用非溶剂与卤水的密度差异,使溶腔顶部形成一定厚度非溶剂层,从而达到阻止水向上溶解、保护溶腔顶部并促使溶腔横向扩展的目的。一般情况下绝不允许溶解至盐层顶板。在造腔过程中,将溶腔从下向上分成不同的层段分别完成。

在盐层中造腔,无法直接观测管柱及排量变化对溶腔形态的影响,需要建立一套方法用于预测溶腔在不同工作状态下的发展过程。预测方法包括造腔物理模拟和造腔数值模拟。

(1)造腔物理模拟

造腔物理模拟是利用岩心在实验室模拟造腔的一个实验过程。模拟包括岩盐溶蚀模拟、对流扩散模拟、造腔模拟^[4]。主要目的是:①搞清岩盐溶蚀机理,获得岩盐溶蚀速率,掌握注入淡水在溶腔内卤水中的对流扩散规律,从而建立卤水浓度分布的数学模型;②观察在不同的生产条件下溶腔形成规律,并

通过调整实验参数掌握溶腔的形状控制方法,从而形成合理的控制技术,为建立稳定溶腔形态、优选施工方案、提高施工效益提供基础理论;③通过物理模拟结果,利用相似准则原理,为溶腔形态预测的数值模拟软件编制提供边界条件与初始条件。

(2)造腔数值模拟

造腔数值模拟是模拟和预测造腔过程中腔体形态变化的一种数学方法。造腔数值模拟依据流体力学、热动力学、化学动力学及物质平衡原理,根据室内实验模拟结果,建立盐岩溶蚀数学模型、溶腔溶质传输模型和溶腔内流体的流动场模型,依据盐岩溶解物理参数,预测在特定的盐层的条件下和特定开采工程情况下的溶腔边界变化规律,从而达到预测和控制溶腔体积和形态的要求。通过数值模拟可以预测不同施工状况下的溶腔发展过程(图1),根据预测情况可以优化编制造腔施工参数和施工方案。

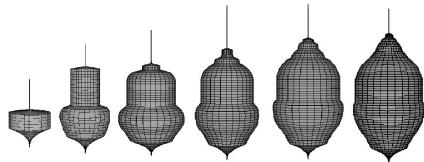


图1 单腔造腔6个阶段末的溶腔三维形态图

4. 溶腔监测

腔体形态检测是造腔过程中对腔体形态的直接监测,通过监测掌握溶腔的发展过程。溶腔检测主要通过声纳检测设备完成,通过声纳检测可以较精确地掌握溶腔的空间形态(图2)。声纳检测技术的主要原理是将声纳设备下入腔体中,向溶腔壁发射定向声波,声波经腔壁反射后再被声纳仪接受,经过分析计算后可以得出仪器距腔壁的距离,声纳仪旋转一周可以测量该深度上溶腔半径的变化情况,不断改变声纳仪下入的深度就可以全方位了解溶腔的三维空间形态。



图2 溶腔声纳检测成果图

采用溶腔声纳检测主要有如下两个目的。①造腔过程中对溶腔形态的监测。通过监测掌握腔体形

态在整个造腔过程中的变化,从而及时调整施工参数来控制腔体的形态,使腔体达到设计的要求。②对气库运行阶段的溶腔进行监测。由于盐层属于塑性地层,溶腔在运行过程中因压力不断变化,会导致盐层发生蠕变而使溶腔体积缩小。因此在运行过程中,每隔一定的周期需要对溶腔进行声纳检测,确定溶腔的变形状况,了解溶腔的稳定性。

5. 已有溶腔井筒改造

由于采用新建溶腔来建库的周期较长,不能满足西气东输管道应急保障的需要。通过分析研究,建立了一套对以前采盐溶腔的评价筛选的标准,并优选了4~6口采盐溶腔加以改造,使之满足储气需要,从而加快储气库建设进程。

由于采盐溶腔完全没有考虑到作为储气库大排量天然气注采和密封性的需要,因此,必须对原有采盐溶腔的井筒进行改造,使其满足注采气量和密封性的需要。

对金坛已有采盐溶腔的井筒改造主要采取的是全井段套铣技术。通过全井套铣,取出原有井筒内腐蚀严重的小尺寸套管,然后通过扩眼下入大尺寸的气密封套管并固井完井。

金坛已有采盐溶腔的 8 口井的井筒改造全部取得成功,大大提前了金坛储气库的投产日期。

6.溶腔完整性测试技术

溶腔的完整性测试主要是测试溶腔的密封性。由于溶腔是埋藏在地下的巨大储气空间,与常规的油气藏有本质的区别,虽然盐层具有很好的密封性,但由于地质因素千变万化,溶腔整体密封性需要通过测试才能确定,否则,溶腔注气后一旦发现漏失将很难处理。完整性测试分造腔前和造腔后两个阶段。造腔前测试如果不发生地层漏失才可开始造腔。造腔后的完整性测试主要观测溶腔的密封性,如达到密封要求才可以注气排卤实施储气过程。

完整性测试的主要方法是以氮气或空气为试压介质,通过下入双层测试管柱,检测测试期间气体的泄漏量来评价腔体的密封性。

在试验过程中将氮气—盐水界面保持在稳定水平上,通过在测试管上安排一个排泄孔来实现。在试验过程中将定期添加少量氮气,在井口监测气量变化(图3)。

完整性测试在金坛储气库建设过程中的应用取得成功。通过测试认为,金坛已修复的 5 口已有溶腔的密封性达到了改建储气库的要求。

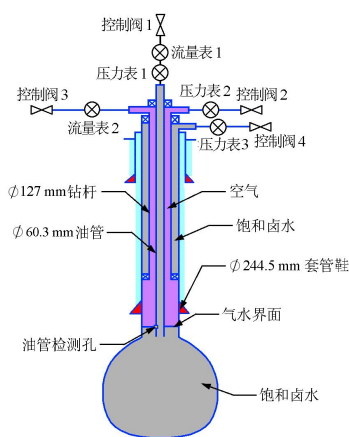


图 3 完整性测试的原理示意图

7. 注采运行热动力模拟与预测技术

盐穴储气库注采过程是一个复杂的热动态平衡过程,天然气、注采管柱、井壁、溶腔围岩在注采过程中要不断进行热量的交换。这种热能的交换对溶腔内部的压力和注采气能力都会产生较大影响。

热动力平衡是单个溶腔运行模拟的关键,也是整个气库群运行的基础。注采运行热动力模拟与预测通过应用工程热力学、传热学和流体力学基础理论,对盐穴储气库的构造和实际运行过程的分析,分别建立井筒连续流动及热传导模型、溶腔热传导模型、水合物形成条件模型,并建立相应数学模型的边界条件,编制相应的计算程序。通过热动力模拟^[5],能够分析在各种采气条件下溶腔内部和井口的温度压力变化,以及开采过程中水合物形成的趋势,从而为地面工程配套设施提供设计依据,并可以进行溶腔压力预测,以确保溶腔处于稳定的运行压力区间。

参考文献

- [1] 丁国生,等.国内外地下储气库现状与发展趋势[J].国际石油经济,2002(6):23-26.
- [2] 金坛盐穴储气库地下工程初步设计[R].中国石油勘探开发研究院廊坊分院,2005.
- [3] MICHAEL S BRUNO, MAURICE B. Geomechanical Analysis of Pressure For Thin Bedded Salt Caverns [J]. Dusseault Technologies USA Inc,2003(10):220-225.
- [4] 林元雄.岩类水溶采矿技术[M].成都:四川人民出版社,1990.
- [5] 丁国生,等.西气东输盐穴储气库库容及运行模拟预测研究[J].天然气工业,2006,26(10):120-123.

(修改回稿日期 2007-02-01 编辑 赵 勤)