

盐穴地下储气库气密封检测技术

李建中¹ 李奇² 胥洪成¹

1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 2. 中国科学院渗流流体力学研究所

李建中等. 盐穴地下储气库气密封检测技术. 天然气工业, 2011, 31(5): 90-92.

摘要 建设盐穴地下储气库是一项高风险的复杂工程, 对盐穴的气密封性有着很高的要求, 其密封性检测技术就成为评价建库工程成败的关键。为此, 分析了中国建设盐穴地下储气库的特殊性(盐穴储气库的盐层具有矿层层数多、单层厚度小、夹层多、含盐品位低、共生组分多和相变大等特点), 指出了建设盐穴地下储气库工程发生天然气泄漏的主要影响因素(井筒工程因素、地质因素和地面设备因素), 重点论述了建设盐穴储气库钻完井井筒密封性检测技术、水溶造腔过程中腔体的检测技术、首次注气排卤前盐穴完整性气密封检测技术和盐穴地下储气库运行后的评估检测技术。以上技术具有气密封性检测精度高、工期短、能耗低、工序简化及节省投资等特点, 对我国正在建设和今后准备建设的盐穴储气库工程具有参考和借鉴作用。

关键词 天然气储备 盐穴地下储气库 密封性检测 天然气泄漏 检测技术

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.05.024

盐穴地下储气库是根据水溶盐岩采卤原理, 通过淡水置换和人工控制的方法, 在地下形成一定体积的溶腔作为存储空间。盐穴地下储气库除可以储存天然气外, 还可用以储存液态原油、成品油、氢气和 CO₂ 等其他类型气态产品^[1]; 在人口稀少的地区还可以利用盐穴进行深层封存放射性工业垃圾和核废料等。因此, 建设盐穴地下储气库是一项高风险的复杂工程, 对盐穴的气密封性有着很高的要求, 而盐穴储气库密封性检测技术就成为评价建库工程成败的关键。国外已经建设投入运营的盐穴储气库有 74 座, 占全球地下储气库总量的 11.7%^[2]。各国都十分重视盐穴储气库的气密封性检测, 以确保高风险储气工程的安全。

中国江苏地区建设盐穴储气库的实践经验表明, 在整个建库系统工程中, 盐穴储气库的气密封检测包括 4 项关键技术: ①完井套管井筒密封性检测技术; ②水溶造腔过程中腔体检测技术; ③首次注气排卤盐穴完整性气密封检测技术; ④盐穴储气库运行后的评估检测技术。

1 中国盐穴地下储气库的特殊性

1.1 盐岩层状分布, 厚度小, 夹层多, 含盐品位低

中国利用层状盐岩体建设盐穴储气库取得重大进展。由于东部地区的成盐期主要在印支运动后期, 地层结构为内陆湖相沉积盐岩地层, 几乎全部属于水平层状结构地层, 盐层具有矿层层数多、单层厚度小、夹层多、含盐品位低、共生组分多和相变大等特点。

由于层状盐岩与国外盐丘的结构特点不同, 故中国盐穴储气库的设计也和国外的设计不尽相同。国外在盐丘中建库, 溶腔埋深比较灵活, 腔体体积达到几十万甚至上百万立方米, 溶腔呈“氧气瓶”状的理想形态。而中国在层状盐岩中不宜建设埋深较大的气库, 因腔体高度受到地质条件的限制, 溶腔体积一般为 $10 \times 10^4 \sim 20 \times 10^4 \text{ m}^3$, 溶腔的形态为椭球形。

江苏地区正在建设的盐穴储气库, 其盐层单层厚度介于 20~50 m, 累计厚度约为 200 m, 夹层占盐层总厚度的 10%~15%, 含盐品位为 50%~80%。建库

作者简介: 李建中, 1954 年生, 高级工程师, 学士; 主要从事地下储库工程设计与研究工作, 现任中国石油勘探开发研究院廊坊分院地下储气库研究中心副主任。地址: (065007) 河北省廊坊市万庄 44 号信箱储气库中心。电话: (010) 69213381, 13901182567。E-mail: ljz381@sina.com

工程采用垂直硐室结构方案,水溶造腔过程中要穿越多个泥质夹层,因此,注采气井的生产套管、生产套管鞋附近及套管固井质量的气密封性就成为建库工程泄漏风险的关键控制点。

1.2 盐穴储气库气密封检测工程质量要求高

盐穴储气库的运行不同于其他孔隙型地下储气库。储气库既是很好的储气场所,又是很方便的供气“气源”。从注气期开始到注入的天然气充满储气库,储气库的运行压力从下限压力提升到上限压力;供气时到采气期结束,全部采出气库内的工作气量,储气库的运行压力从上限压力下降到下限压力附近,这样的1次注采气升降压过程,称为储气库运行周期。孔隙型地下储气库受地质渗流条件的限制,主要发挥季节性调峰的作用,一般每年运行1~2个周期。而盐穴储气库由于是地下洞穴状态,可以发挥应急和用气高峰调峰的作用,根据安全运行设计方案和供气需求,每年可以运行8~10个周期。

因此,多周期注采运行使得储气库长期处于反复交变载荷的变化过程当中,这对于盐穴腔体结构的完整性、注采气井的密封性与稳定性都提出了更高的技术要求。

1.3 储气库天然气泄漏的主要影响因素分析

地下储气库最主要的危险就是其储存的天然气发生泄漏。

盐穴储气库可能发生天然气泄漏的主要风险因素有井筒工程因素、地质因素和地面设备因素等^[3]。储气库天然气泄漏的方式主要表现为:①天然气从注采气井的套管漏失或从注采气井套管固井胶结面上窜漏失;②天然气从盖层(断层)漏失;③盐穴受交变载荷的影响,储气库压力降低后,顶板或腔壁完整性受到破坏,导致天然气漏失;④天然气从地面设备和管道处漏失。目前储气库所发生的天然气泄漏事件,大多数是由于井筒工程原因而导致天然气从注采气井的套管或注采气井套管固井胶结面上窜漏失的。

2 建设盐穴储气库的密封性检测技术

2.1 完井井筒气密封性检测

完成生产套管固井且经工程测井反映固井质量合格或优良后,还必须通过全井筒气密封性实验来检查生产套管的技术状况、固井的气密封性以及生产套管鞋附近的气密封状态,从而确定该井是否可以开始水溶造腔并适用于未来的储气运行。

总结国外实践经验得知,在利用氮气作为造腔顶板隔离保护介质的前提下,井筒密封性检测技术宜采

用完井套管检测—造腔联作一步完成法。生产套管完井后,按照施工作业程序下入造腔管柱代替测试管柱,将造腔顶板隔离保护介质氮气从生产套管与造腔管柱环形空间注入,氮气到达生产套管鞋以下部位,保证生产套管全部充满气体。保持温度平衡后,继续补充氮气,使套管鞋处压力达到储气库设计的运行上限压力试压8~10 h,压力保持稳定则表明检测合格。生产套管井筒密封性检测合格后,直接利用测试氮气作为造腔顶板隔离保护介质开始造腔。

完井套管检测—造腔联作一步完成法的主要优点为:①检测气体介质与造腔顶板隔离保护介质共用;②井筒密封性检测与井下造腔管柱施工联合作业一次完成,检测精度满足作业要求,降低了能耗,简化了工序,缩短了工期,节省了投资。江苏地区建设盐穴储气库,实施了15口新完钻井造腔工程前期全井筒气密封实验,有1口井因为气密封检测不合格而放弃继续水溶造腔施工。

2.2 水溶造腔过程的腔体检测

盐穴水溶造腔作业实施过程中,根据设计方案,在造腔的不同阶段检测盐穴腔体的发展变化、腔体形态特征和几何体积变化等是否达到设计标准。

水溶造腔过程腔体检测的核心技术是成功应用了声呐探测技术。利用声呐探测结果与造腔模拟计算,可以获得常压或高压条件下盐穴内部结构的动态特征,实时分析腔体有效容积、基本尺寸和形状等动态变化参数,检测水溶腔体是否出现顶板、夹层崩落或腔体垮塌等现象,优化造腔每个溶蚀阶段的注排卤流量、循环方式和造腔管柱上提位置等,从而排除造腔过程中地质不确定因素可能造成的伤害,检查、控制水溶腔体的完整性,进而确定该井是否符合储气库设计规范并适用于未来的储气运行。

2.3 盐穴完整性气密封检测

盐穴完整性气密封检测是造腔结束后,在首次注气排卤之前实施腔体完整性密封试验的关键性技术,通过检验腔体的完整性及生产套管鞋附近的气密封性是否达到设计标准来排除造腔过程中可能造成的伤害,检查盐穴是否满足安全运行工作压力区间的设计要求,从而确认其是否具备储存天然气的能力^[4]。

该技术的应用目前在国外主要以北美、欧洲地区为代表,都采用了API推荐的密封检测方法原理,井筒下入测试管柱进行注气承压实验,但2个地区密封性检测评价标准却不同:北美地区API检测方法的评价标准为24 h测试时间内气水界面深度变化小于1 m;欧洲地区的Geostock检测方法则根据泄漏率与

时间的关系曲线和泄漏率的绝对值来对盐腔密封性进行评价。

在国内,盐穴地下储气库完整性气密封检测技术则综合了国外 API 检测方法和 Geostock 检测方法,采用注采气生产管柱(排卤时插入中心排卤管柱)代替测试管柱,利用储气库储存介质(天然气)作为盐穴整体气密封检测介质,向生产套管与注采气生产管柱环形空间注入天然气至生产套管鞋以下 10 m,保证生产套管井筒至生产套管鞋全部充满气体,待测试注气顶替盐卤后腔体整体温度平衡后,继续补充注入天然气,使套管鞋处的压力达到储气库的设计运行上限压力,进行腔体完整性试压,测试气水界面深度,记录井口检测仪表数据,录取地质工程资料,24 h 连续测压。气密封检测评价的标准为:① 计算气水液面随时间的变化关系,要求其趋于稳定,稳定后变化率小于气体压缩体积;② 盐穴整体(腔体内部、井筒)承压达到储气库允许的最高上限压力且保持稳定,压降为零。盐穴储气库完整性气密封检测合格后,可以投入注气排卤,进行完整性检测的第二步:施工下入中心排卤管柱,继续向盐穴中注气,同时排出盐穴体积内的卤水,剩余卤水与天然气界面的深度依设计而定,同时建立盐穴内最小压力并保持在设计要求的精度下,测量盐穴蠕变闭合值,将测量结果与设计预测的蠕变闭合值对比(从中可以看出预测及测量的结果仅在压力释放的初期有所不同,之后两者的对应关系非常好)。对于盐穴长期闭合率的确定以最小内部压力测量为准。

经过上述检测,确认盐穴满足安全运行工作压力区间的设计要求,具备储存天然气的能力,开始用于储气库注采气运行。

3 盐穴储气库运行后的评估检测方法

3.1 盐穴储气库腔体密封性检测

盐穴储气库投入运行后进行注气和采气时,溶腔内部的压力和温度在最大值和最小值之间变化。在温度和压力的作用下,盐岩的流变性导致盐穴发生塑性变形,从而逐渐减少了溶腔的体积,这种盐穴腔体蠕变闭合是随时间而变化的。腔体的完整性决定了储气库的最高运行压力,因为在合理的运行压力及温度条件下,盐岩体形变后不会产生裂缝。但是盐穴储气库的多周期长期运行会产生变形条件,盐穴受交变载荷作用力的影响,可能会出现盐穴顶板盐体崩落或垮塌的现象。当储气介质开始向围岩介质漏失之时就是储气腔体废弃之日。因此,盐穴储气库的运行监测是投入运营后的重要工作。

目前最为常用的储气库运行监测技术就是声呐探测技术,其次还有井下探测技术和热力学技术等。声呐探测技术结合井下实时探测技术可评价盐穴内部的压力、温度变化及热力学特性。声呐探测技术是在充气的高压溶腔内进行的,高压溶腔声呐探测不同于常规方法,在气体密度较大时工作效果最佳,传感器信号响应比较明显,声呐探测范围更大。利用声呐仪探头可以垂直或水平旋转倾斜 360°测得腔体资料,绘制成二维及三维图像,将分析结果进行模拟计算,可以获得盐穴储气库运行周期内的压降变化速度、应力大小、盐穴蠕变速度和闭合度等动态变化数据,同时还可获得注采气生产运行条件下盐穴内部结构的动态特征及盐穴受交变载荷作用力的影响程度。通过对比分析盐穴储气库周期运行动态变化、预测盐穴腔体密封性、定量分析盐穴内盐体崩落或垮塌发生的状况,可为盐穴储气库的运行管理和风险预测提供科学依据^[5]。声呐探测在储气库运行初期通常要求每年测试 1 次,遇到特殊情况可增加测试次数,储气库正常运行以后可以每 2 年测试 1 次。

3.2 盐穴储气库注采井密封性检测

盐穴储气库长期并多周期反复注采气运行,会改变注采气井及储气库本身的温度和压力条件。长期交变载荷、温度和压力条件的改变,会对注采井井筒(特别是生产套管鞋部位)产生不间断的周期性强烈作用,破坏套管和固井水泥环,从而导致天然气从套管和套管外部环形空间漏失,并向盐穴顶部地表漏失,直接扩散至大气中造成泄漏。对储气库运行过程中的漏气状况可采用测井方法来确定,自然伽马、中子伽马、感应中子和高灵敏井温等测井系列技术是查明工程漏气的有效方法。

例如:高灵敏井温测井技术就是首先利用原井温测井资料作为参考值,通过重复测井将井温曲线进行对比,发现井温曲线异常带,综合其他资料从而判定盐穴地下储气库中自下而上漏气引起的温度异常,由此确定井筒漏气状况及漏气部位。

另外,溶腔的稳定性和蠕变性对地面沉降的影响由遍布库区地面监测系统的测量点进行监测,阶段性地监测任何可能出现的沉降现象。

4 结论

1)盐穴地下储气库可能发生天然气泄漏的主要风险因素有井筒工程因素、地质因素和地面设备因素。目前世界上所发生的地下储气库天然气泄漏事件大多数与井筒工程因素有关,造成天然气从注采气井的套

管或生产套管固井胶结界面上窜发生漏失,应该引起建库工程的高度重视。

2)在建设盐穴储气库的不同阶段全过程实施气密封检测,从而保障地下储气库建设与运行系统的安全。盐穴储气库气密封性检测的关键技术包括:钻完井井筒气密封检测、造腔后首次注气排卤前盐穴完整性气密封检测以及盐穴储气库运行后的评估检测。

3)完井井筒密封性检测采用钻完井井筒套管检测施工与造腔管柱井下施工联合作业法,同时有效地利用造腔顶板隔离气体介质进行钻完井井筒气密封检测,从而确定该井是否可以开始水溶造腔。通过盐穴完整性气密封检测,在水溶造腔结束后进一步确定该井是否可以适用于未来的储气运行。采用首次注气排卤施工与注采气井下施工作业一步法,可有效地利用盐穴储气库将要储存的气体介质进行气密封检测。

综上所述,盐穴地下储气库气密封性检测技术具

有气密封性检测精度高、工期短、能耗低、工序简化、节省投资等特点。

参 考 文 献

- [1] 丁国生.全球地下储气库的发展趋势与驱动力[J].天然气工业,2010,30(8):59-61.
- [2] 郑雅丽,赵艳杰.盐穴储气库国内外发展概况[J].油气储运,2010,29(9):652-655.
- [3] 丁国生,张昱文,李建中,等.盐穴地下储气库[M].北京:石油工业出版社,2010.
- [4] 李建中.利用岩盐层建设盐穴地下储气库[J].天然气工业,2004,24(9):119-121.
- [5] 李建中.石油战略储备的新领域——地下盐穴储库[J].岩石力学与工程学报,2004,23(增刊2):4787-4789.

(修改回稿日期 2011-03-14 编辑 何 明)