

# 盐穴储气库密封性能影响因素<sup>\*</sup>

袁光杰<sup>1,2</sup> 田中兰<sup>2</sup> 袁进平<sup>1,2</sup> 汪蓬勃<sup>2</sup> 马云鹏<sup>3</sup>

(1.中国石油大学石油工程教育部重点实验室 2.中国石油钻井工程技术研究院 3.中国石油吐哈油田公司)

袁光杰等.盐穴储气库密封性能影响因素.天然气工业,2008,28(4):105-107.

**摘要** 储气库能否储存天然气并在气库运行过程中不发生泄漏,主要取决于盐穴腔体及井筒的密封性能,而盐穴腔体密封性能的影响因素很多,影响机理复杂,故深入研究盐穴腔体密封性能影响因素具有重要意义。从地质、工程和工艺3方面详细分析了影响盐穴储气库密封性能的各项因素,根据现场施工经验及国外储气库泄漏事故产生的原因统计,确定出储气库密封性能的主要影响因素,给出主要因素导致气库产生泄漏或破坏的条件,提出了相应的预防措施,现场应用效果良好。

**关键词** 盐穴 地下储气库 密封性能 夹层 盖层 固井

盐穴储气库的安全性主要由储气溶腔的稳定性、气密性、贮存介质及工艺条件等决定,其中气密性是储气库的一项重要技术和安全指标,近年来盐穴储气库密封技术研究受到国内外学者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。

盐穴储气库是否能够储存天然气,并在运行过程中不发生泄漏,主要取决于地质、钻井和注采工艺3方面因素的影响,涉及到岩盐蠕变、岩盐渗透性、卤水的热膨胀、运行压力、夹层特性及固井质量等一系列因素,这些因素有的是直接对气库的密封性产生影响,有的则是耦合在一起对气库密封性能产生影响,影响机理非常复杂。

## 一、盐穴密封性能影响因素分析

盐穴储气库的泄漏通道主要有3个部位(图1):①井筒管柱及配件;②生产套管鞋;③腔体。引起这3个部位泄漏的有地质、钻井、工艺及管理等因素。

### 1.岩盐蠕变

当岩盐处于不平衡的应力状态时,将会发生持续的变形,并受到位错及晶内界面控制,这种变形被定义为岩盐蠕变。在密闭的盐穴内,当腔内流体压力小于岩盐静压力时,盐穴就会收缩并导致腔内压力升高。而压力的升高又将降低岩盐的蠕变,某一深度处岩盐的静压力和腔内流体压力差会随时间推

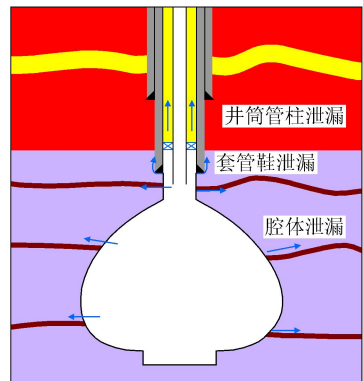


图1 盐穴储气库泄漏通道示意图

移而逐渐变小,大约需要几个世纪的时间才会达到一个平衡的状态,在此期间盐穴顶部和底部的卤水压力不能够同时平衡岩盐的压力。如果盐穴的高度较大,卤水的压力还将超过顶板处岩盐的抗张强度,导致顶板出现裂纹或裂缝,致使盐穴密封失效。

### 2.岩盐渗透性

从工程角度来讲,在被地层覆盖着时,岩盐是一种极难被渗透的岩石,它的孔隙度很低。盐层的实际渗透率只有  $1 \times 10^{-10} \mu\text{m}^2$ ,即使盐层中含有一定量的不溶物或夹层,其渗透率也为  $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ <sup>[6]</sup>。在密封测试过程中,卤水压力比盐层的孔隙压力大很多,因此必定导致部分卤水渗透到

<sup>\*</sup> 本文受到“十五”国家科技攻关计划项目(编号:2004BA616A-12)的资助。

**作者简介:**袁光杰,1974年生,高级工程师;2001年获原西南石油学院油气井工程硕士学位,2004年获上海交通大学机械制造及其自动化专业博士学位,现为中国石油大学(北京)在读博士后;已发表30余篇文章,其中被SCI检索5篇,EI检索15篇,获发明专利1项、实用新型专利3项;现主要从事钻井完井及盐穴储气库工程技术研究工作。地址:(100095)北京市海淀区四季青镇北坞村路甲25号静芯园小区K座。电话:(010)52781892。E-mail:ygjdr@cnpc.com.cn

盐层中。根据达西定律计算可知： $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  盐腔的卤水损失率约为  $1 \text{ m}^3 / \text{a}$ 。

考虑到盐穴长期使用的工况特点,尤其是当密封盐穴的压力升高时,由于卤水相当高的耐压缩性,即使很小的流体损失(例如一个  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  的盐穴损失  $1 \text{ m}^3$  的流体)都会很大程度降低岩盐蠕变效应的影响,并阻止腔体压力持续的升高,使盐穴内的压力保持一个恒定值,从而在一定程度上避免超过岩盐静压力值,使盐腔受到损坏。

### 3. 岩盐的溶解

在盐穴密封以后岩盐仍将不断溶解,卤水的浓度则会逐渐达到 100% 的饱和。岩盐的溶解过程本身就是一个化学反应,它不仅会导致腔体体积的增加,还会降低腔内流体的温度,缓解由于岩盐蠕变和卤水热膨胀引起的腔内压力升高,降低盐穴密封失效的危险。

### 4. 卤水的热膨胀

岩盐的溶解过程会极大地改变盐层温度场,由于造腔过程中注入的淡水温度要远低于地层水(1 000 m 深的盐穴温差约为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ),因此盐穴周围岩盐的温度会持续被降低,尤其是盐穴内壁附近的部位。根据热传导理论计算可知,一个  $1 \times 10^5 \text{ m}^3$  的盐穴要消除初始温度差约需 5.3 a 的时间,而一个  $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$  的盐穴则约需 10 a 的时间。

在一个敞口的盐穴内,温度的增加将会导致热膨胀和卤水的溢流,但在一个封闭盐穴内,卤水温度升高会导致压力增加。粗略估计:温度增加  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,压力会相应上升约 1 MPa(准确值与盐穴形状相关),也就是说  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  的初始温度差被平衡后,压力相应增加 25 MPa,这远远超过了岩盐与卤水的静压力差。因此在关闭盐穴时一定要避免这种温度不平衡的情况,因为它可以直接导致盐穴破裂,腔体密封失效。

### 5. 盐腔压力

流体总是由高压区域向低压区域流动,在盐穴储气库的建造和运行过程中,各种压力的变化情况对储气库的密封性将产生一定的影响,尤其是盐穴腔体瓶颈处的压力对盐穴的密封性会产生很大的影响。为此,造腔过程中的静水压力、卤水压力以及气库运行过程中的最大运行压力一定不能超过岩盐的地静压力和生产套管处的水泥环胶结强度。

### 6. 盖层及夹层密封性

储气库盖层是否存在断裂、盖层岩性是否均一、盖层的扩散能力、夹层岩性的塑性条件、夹层的致密性、夹层的扩散能力等对气库是否密封起着重要作

用。从地下储气库的地质评价角度来讲,储气库所在区域不允许存在大的断层,小断层的断距应该小,且最好为压性断层;储气库盖层的岩性要好,最好为泥质岩、蒸发岩或致密灰岩;盖层的渗透率要低,扩散能力要弱,但突破压差要大。岩盐夹层的塑性要强,毛细管压力要高,渗透率要低,扩散能力要弱,夹层数量越少越好。

### 7. 井筒管柱及固井质量

盐穴井筒未来将用于高压储气运行,其质量的好坏直接关系到储气库的密封性能和使用寿命。应特别关注以下几点:①生产套管鞋应深入盐层不少于 20 m;②地质必漏点应全封;③全井段固井质量应为良以上,生产套管鞋上部 200 m 井段固井质量应为优;④生产套管及注采管应为气密封螺纹;⑤井底距盐层底界应不少于 10 m。

## 二、密封影响因素评价及预防

根据国外多起盐穴气库密封事故发生的原因,以及金坛盐穴储气库现场施工经验对盐穴气库密封影响因素进行初步的评价,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,井筒管柱及固井质量、盐腔压力、盖层及夹层密封性是影响气库密封性能的主要因素,根据这 3 个影响因素的特点,在金坛储气库采取了以下措施来保证气库的密封性:

(1)设计采用 20 m 左右的导管封堵地表含水层和疏松岩层,用 600 m 左右的表层套管封堵易漏的玄武岩地层,生产套管则采用 3SB 气密封螺纹并下入盐层 30 m 左右以提高盐穴井筒的整体密封性。气库运行过程中注采管柱采用 VAGT 气密封螺纹,注采套管头及采气树采用金属对金属密封以有效保证气库运行过程中的井筒密封性。在固井工艺方面,生产套管采用 JSS 低温早强稳定性好的半饱和盐水水泥浆进行固井,以保证套管鞋处的水泥固结质量,增强井筒的密封性。另外在储气库注采运行阶段,将采用注环空保护液和阴极保护等措施提高注采管柱和生产套管的防腐能力,避免气库井筒因腐蚀发生泄漏的危险。

(2)造腔过程中严格控制注水压力,地面安装压力报警装置,缓慢开启和关闭注水阀或者排卤阀,开启和关闭时间必须大于 1.8 s,以防水击损伤井筒管柱。储气库运行期间,严格控制气库运行压力区间,合理安排产能,避免大吞大吐现象发生,尽量减少气库在下限运行压力下的工作时间。

表1 盐穴气库密封性影响因素评价表

影响因素	影响程度	产生不利影响的条件
井筒管柱及固井质量	高	①生产套管腐蚀,非气密扣,未下入盐层或下入盐层距离过小 ②注采管柱、封隔器、安全阀等配件使用寿命或质量问题 ③生产套管固井质量差,特别是套管鞋附近部位
盐腔压力	高	①造腔期间腔内压力过高,对腔体特别是腔体脖颈部位产生损害 ②气库运行压力过高,对腔体特别是腔体脖颈部位产生损害 ③气库运行压力过低,引起腔顶垮塌,特别是生产套管鞋部位岩盐脱落
盖层及夹层密封性	较高	①盖层岩性不好,在高压下微孔隙、微孔洞或微裂隙相互连通 ②盖层突破压差小(1 000 m 深处盖层突破压差应大于 9 MPa) ③夹层内存在裂缝或大的溶洞 ④岩盐层启动压力过小,小于 0.05 MPa/m ⑤24 h 内腔内气体漏失量超过 2.8 m <sup>3</sup>
岩盐蠕变	低	盐穴井口长期密封,未能及时放压
卤水热膨胀	低	盐穴井口长期密封,未能及时放压
岩盐溶解	低	造腔过程中,生产套管鞋部位被溶解
岩盐渗透性	低	可降低岩盐蠕变和卤水热膨胀引起的腔内压力升高,对气库密封性能有利

(3)采用三维地震进行宏观地质评价,试验井全井取心和普通井盐层段取心进行地层微观封闭能力评价,同时对建成后的腔体进行定期机械完整性测试,确保气库的长期运行安全。

### 三、现场应用

上述各种措施在国内盐穴储气库现场得到了及时的应用,目前已完成的 14 口新井井筒经气密封检测有 13 口井符合检测标准要求;完成的 6 口已有溶腔经气密封检测有 5 口溶腔符合检测标准要求,目前这 5 口溶腔正在实施注气排卤作业。仅 1 口已有溶腔未通过气密封检测,可能是由于溶腔顶部过度溶解,套管鞋距离盐顶的距离不足 5 m 引起的;1 口新井井筒未通过气密封检测(可能是由于盐底被钻穿,虽经注水泥塞但也未能完全密封所引起的)。图 2 给出了其中 1 口已有溶腔气密封检测结果示意图,由图中可以看出在测试时间 24 h 内 B1 盐穴腔体泄漏率随时间的变化趋势是逐渐减小的,并最终稳定在零值附近,符合气密封检测标准要求。

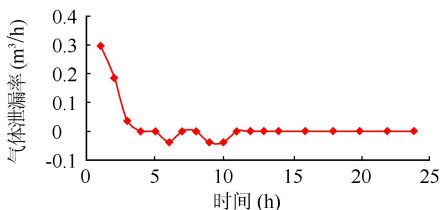


图2 B1 井气体泄漏率与时间的关系曲线图

### 四、结论

(1)腔体密封性是地下盐穴储气库工程的一项

重要技术指标,其直接关系到储气库的储存能力和运行安全。

(2)盐穴气库密封性能受地质、工程、工艺和管理等多方面因素影响,影响机理复杂。

(3)井筒管柱及固井质量、盐腔压力、盖层及夹层密封性是影响气库密封性能的主要因素。

(4)盐穴储气库密封技术的研究在国内尚处于起步阶段,其中腔体密封监控手段及结果评价,盐穴密封的基础理论尚需进一步研究。

### 参考文献

- [1] 袁光杰,申瑞臣,袁进平,等.盐穴储气库腔体机械完整性检测技术[J].天然气,2005,1(1):84-86.
- [2] 何爱国.盐穴储气库建库技术[J].天然气工业,2004,24(9):122-125.
- [3] 丁国生.盐穴地下储气库建库技术[J].天然气工业,2003,23(2):106-108.
- [4] BEREST P, BROURARD B, DURUP J G. Tightness tests in salt cavern wells[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2001, 56(5):451-469.
- [5] REMIZOV V V, POZDNYAKOV A G, IGOSHIN A I. Examination of rock salt underground cavern testing for leak-tightness by pressure alteration [C]. San Antonio, Texas, USA; SMRI Fall Meeting, 2000.
- [6] DURUP J G. Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt [C]. Hannover, Germany; SMRI Fall Meeting, 1994.

(修改回稿日期 2008-03-05 编辑 罗冬梅)