

盐穴储气库建库技术

何爱国

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院)

何爱国. 盐穴储气库建库技术. 天然气工业, 2004; 24(9): 122~125

摘要 在调研国外盐穴储气库相关资料的基础上, 对用盐穴建设地下储气库的工艺流程、方法进行了探讨, 内容包括: 盐穴储气库的建造工艺过程; 盐岩的特性; 盐对固井水泥的影响; 水溶采矿模拟研究结果; 影响盐穴稳定性的主要因素; 建造岩穴储气库的工艺方法; 盐穴储气库运行压力的确定方法; 盐穴储气库完井技术要点; 国外盐穴储气库建造实例等。可为今后我国建设地下盐穴储气库提供参考。

主题词 盐穴气库 建设 工艺 盐膏层 固井 稳定性 运行压力 完井技术 实例

一、地下盐穴储气库的建造工艺过程

1. 建造工艺流程

按盐在地下存在的方式, 盐穴储气库可划分为盐岩层储气库和盐丘储气库 2 种。简易建造盐穴储气库的工艺过程是: 利用采盐井或新钻井眼作为溶腔, 经注水管注入淡水进行溶解, 由排水管排出卤水, 并在注水管与套管之间的环空内注入一定量的非溶剂隔离液, 以防止盐穴穹隆顶溶解; 为控制盐腔几何形状的稳定, 还须调整注水管和采卤管的相对位置, 由采出盐量和声纳测试确定盐穴容积和几何形状, 当达到设计要求的空间几何尺寸后, 可一边注气一边采卤, 直到卤水基本被采完, 继续注气达到设计压力, 关井待用。

2. 建造地下盐穴储气库应考虑的几个方面

储气库的建设是一项系统工程, 必须考虑: 气库与主管线的距离、水源、卤水排放、环保; 选择厚且纯度相对较高的盐层; 根据井网分布优选采卤方式(单井溶解、双井交换溶解、压裂溶解等)及采卤速度; 数值模拟分析, 预测盐穴的腔体尺寸、几何形状、注采压力及注采量; 盐穴几何形状控制, 利用声纳测井、地震测试监控, 调节注水管深度和注水管与排水管相对位置, 调整采卤速度等方法控制几何形状; 完井管串优化设计, 包括套管层序、级别、尺寸, 井下安全阀、流动接头、坐落接头、密封环、封隔器、防腐液等; 井口装置和地面管汇(包括井口悬挂器、安全阀、仪

表、脱水装置、注采管线尺寸等); 盐穴运行参数选择(包括注入速度和注入量, 采气速度和采气量, 注采压力, 低压下运行时间以及注采温度等); 运行过程盐穴稳定性检测和控制, 根据运行参数和盐岩特性, 预测腔体收缩速度, 进行二次采卤、更换完井管柱等。

二、盐岩的特性

与其他岩性相比, 盐岩具有独特的物理化学特性, 主要表现在: 盐岩渗透性和孔隙度极低, 能够确保储存于其中的液体和气态烃不散失; 随埋深的增加, 密度保持不变, 纯盐矿物密度为 2.17 g/cm^3 , 地层中盐的平均密度为 2.10 g/cm^3 左右; 在恒定压力和作用下发生明显变形, 变形量(蠕变)是时间、加载条件和其自身物理特性的函数, 蠕变的速率受温度、压差、围压、颗粒尺寸、自由水及气泡含量的影响, 其中温度和压差的影响最显著; 对构造裂缝或裂隙能够自行关闭和密封; 具有凝固物的结构强度, 适合在其中建造足够大的洞穴; 易遇水溶解, 形成盐溶液。

岩盐的上述物理化学特性, 使得有岩盐存在的油气井钻井、完井风险高、难度大。尤其岩盐的蠕变, 经常引起套管挤毁, 导致油气井报废, 给油气开发造成很大影响。

三、盐对固井水泥的影响

一般岩盐溶解后进入水泥浆中会延长稠化时间, 但镁盐进入水泥浆导致促凝作用。盐对水泥浆

作者简介: 何爱国, 工程师; 1992 年毕业于石油大学钻井专业, 2002 年中国地质大学在读硕士研究生; 长期从事地下储气库的完井设计, 中国石油勘探开发研究院廊坊分院完井工艺研究所副主任。地址: (065007) 河北省廊坊市万庄 44 号信箱。电话: (010) 69213305。E-mail: heaiguo@sina.com

的影响主要有:①含盐量低于 30%(质量百分比)时,盐对纯水泥开始水化的时间无影响,当含盐量大于 30%时,盐对水泥产生较小的缓凝作用;②注水泥作业时,溶解到水泥浆中的盐起缓凝作用,但这种作用比同样数量的盐溶解于配浆水中要小一些;③盐影响含有萘磺酸型分散剂和乙基纤维素型降失水剂的水泥浆可泵时间,含盐量对剪切极为敏感;④在一级注水泥作业中,水泥浆的剪切速率通常比 API 稠化时间试验的剪切速率小得多。当用剪切敏感性水泥(纯的或分散的含盐水泥)进行 API 稠化时间试验时,会得出错误结果;⑤水泥浆在顶替泥浆的过程中不会冲蚀岩盐层,非饱和盐水泥浆会引起岩盐溶解,而紊流则会导致溶解速度加快。

四、水溶采矿模拟研究结果

国外经水溶模拟研究发现,一方面溶腔的几何形状与构造的稳定性密切相关;而且溶腔体积流的盐度分布对于注水管位置(注水管出口所在深度)很灵敏,大部分盐的溶解发生在溶腔顶部,顶部注水产生不理想的溶腔几何形态,底部注水更易形成圆柱状溶腔;另外盐丘和盐岩层溶解形成的盐穴几何形状有所不同,盐丘中形成的多为圆柱状或橄榄球状,而在盐岩层中形成的盐穴近似球体状。

五、影响盐穴稳定性的主要因素

盐穴储气库建造过程中,盐穴腔体稳定性直接关系到储气库的规模和使用寿命,是盐穴储气库能否正常运作的关键。影响盐穴稳定性的因素主要有:①自身的物理化学特性;②盖层稳定性;③盐穴中气体的压力以及在低压下运行的时间,盐穴在高的气体压力下比较稳定,低的气体压力下不稳定,容易产生蠕变;④注入气体中含水量,任何外来水均导致盐穴井壁溶解;⑤溶腔的大小和几何形状;⑥采卤速度;⑦温度变化,盐腔的蠕变随温度的升高而活跃;⑧相邻盐穴之间盐柱与盐穴直径的比例关系,应保留足够的盐穴之间距离,提高稳定性。

六、建造地下盐穴储气库的工艺方法

1. 国外建造地下盐穴储气库的常用方法

(1) 单井采卤成穴

在岩盐层或盐丘中钻成相互独立的溶腔,经注水溶解达到设计规模。注水方式可分为正注水和逆

注水 2 种。1 座气库可由几个甚至几十个独立的盐穴组成,但盐穴之间盐的厚度与盐穴直径的比例关系要合适。单井采卤分为直井和斜井两种。单井采卤成穴是国外最普遍采用的一种建造岩盐地下储气库的方法。

(2) 压裂开采成穴

以注水井为中心,周围分布采卤井(分布方位应根据岩盐层和裂缝的走向),经中心注水井压裂形成裂缝,建立中心井与周边各井的地下连通,溶解形成盐穴相互连通的储气库。连通盐穴比单穴储存气量要大。

(3) 双井开采成穴

通过定向钻井建立两井之间的地下连通,交换注水溶解成穴,定向井可以是斜井或水平井。

(4) 单井多层采卤成穴

如岩盐层有 2 层,中间夹层较厚,可以从下层的顶部到上层的底部和从上层顶部的地表用基础套管加固,在上层基础套管上射孔。建立多层储气库从下部开始溶解,用带孔套管溶解上层。

2. 盐穴溶解新技术

(1) 边运行边溶解技术。首先建立容积为设计容积 50%~60% 的岩洞并投入运行,运行过程中再将容积扩建到设计要求。

(2) 不使用非溶剂技术。即供水管与盐水排放管尽可能接近来溶解,达到溶剂在岩洞中的质量交换和对流运动在穹顶流动界面上近于理想的搅拌条件下进行,而不使用非溶剂保护层,该技术可缩短 30% 的建库期。

(3) 流体动力学转换原理为基础的工艺。流体动力作用于边界层,使溶解强度增大,因此在自由对流条件下,可调整侧面和顶面的溶解速度。

(4) 采用喷射式逆流水力装置达到以质量交换为基础的技术,液体在高浓度区的强化循环和液体沿岩洞高度分层的重新分布,强化质量交换过程。

(5) 采用声频振荡器的声学技术,使溶剂流增加盐水的涡流作用,强化质量交换过程。

七、地下盐穴储气库运行压力的确定方法

溶腔运行压力是盐穴储气库的关键参数之一,合理的上限和下限压力是保证气库安全运行的核心。确定盐穴储气库运行压力的过程为:首先,确定

目的层原始地层压力、目的层岩石破裂压力以及上覆岩层压力,取盐穴气库的运行上限压力为上覆岩层压力的80%,低于目的层岩石的破裂压力值;最低盐穴气库运行下限压力应考虑溶腔能够稳定的最低允许压力,国外经验值取上限压力值的0.53作为盐穴储气库的下限运行压力。

八、地下盐穴储气库完井技术要点

国外地下盐穴储气库完井着重考虑以下几点。

(1)在盐穴井身结构设计中,均采用大尺寸套管,常见的套管层序为:表层套管封固浅层淡水层或疏松段;技术套管封至距盐穴顶适当高度的岩盐中,用水泥封固;完井套管下深与技术套管基本一致,并带管外封隔器。完井套管与技术套管之间注入缓蚀液,以延长技术套管的寿命。

(2)优化设计注水管下入深度、注水管与排水管相对位置和注排水量,以获得理想盐穴几何形状,提高整体稳定性。

(3)优选非溶剂与卤水界面位置,控制盐穴几何形状和尺寸。

(4)采用厚壁套管、无接箍套管或双层套管,保证井下运行安全,提高盐穴使用寿命。

(5)根据不同地区岩盐层物理化学特性的差异,优选水泥浆体系 and 外加剂种类,无盐油井水泥浆和饱和盐水泥浆均可选择,但尽可能使用无盐油井水泥。

(6)完井管柱带井下安全阀,井口装置也安装有安全阀,保证运行安全。

九、国外地下盐穴储气库建造举例

1. 美国的地下盐穴储气库

Salado 盐穴气库位于美国得克萨斯州西部的 Permian 盆地,是利用岩盐层建造而成。Permian 盆地中部拥有厚逾 270 m 的盐岩层,盐穴建立在岩盐层的底部非纯盐段,目的是利用废弃的液体储气库(该库建在岩盐层上部纯盐中)的注采设施。

第一口井 Salado Cavern 1 号于 1992 年钻成并完井,完井井身结构为:表层 $\varnothing 508$ mm \times 106.68 m 封淡水层, $\varnothing 406.6$ mm 技术套管封至 Salado 岩盐层以上 716.28 m,封固 Permian Redbeds, $\varnothing 339.7$ mm 完井套管下深 822.96 m,即满足最大运行压力下设计深度。保护套管直径为 273.05 mm,溶解管

直径为 177.8 mm。盐穴累计溶解体积达到 1.70×10^4 m³。

1993 年 10 月进行了整体稳定性测试,同年 12 月开始注气,由于注气管问题未能达到设计注气压力,该盐穴投入运行到 1994 年 12 月,随后又进行了扩建。溶解过程的基本组成:淡水井、盐穴井、排污井、泵站(配有过滤装置以及 2 罐柴油)、各种连接管线。

2. 法国的地下盐穴储气库

法国 Manosque 地下盐穴储气库的主要技术参数有:单个盐穴容积为 $2.2 \times 10^5 \sim 5.0 \times 10^5$ m³,7 个盐穴总容积为 2.5×10^6 m³,最后 1 层套管直径为 339.7 mm,下深 900~1200 m,盐穴底深 1250~1500 m,运行压力范围 6~8 MPa,总储气量 4.5×10^{10} m³,工作气量 3.0×10^{10} m³,采卤量 $1.7 \times 10^8 \sim 3.7 \times 10^8$ m³。完井主要技术特点:完井管柱安装两只井下安全阀和一只流动接头,保证运行安全;井身结构为: $\varnothing 339.7$ mm \times 273.05 m(完井管柱) \times 中心管(注气管),注气管从上到下依次为: $\varnothing 193.68$ mm \times 30 m+井下安全阀 2 只+流动接头+ $\varnothing 114.3$ mm 油管至盐穴底;井下安全装置和中心塞允许钢丝穿过,保证下部管串的维修和通过测试仪。井口、井下安全阀均在地面用液压控制,并进行相应的微调和开关操作;用可调油嘴测定初次注气时的卤水产出量以及淡水注入量,以防结晶;注入气体的同时进行采卤; $\varnothing 339.7$ mm 与 $\varnothing 273.05$ mm 套管之间注入缓蚀剂防腐。

3. 德国的地下盐穴储气库

近年随着德国气库需求量的增加,原有气库需要进一步扩建并开发新的洞穴气库,许多项目正在筹划中。1984 年以来,德国已建成盐穴储气库 8 座,36 口盐穴,盐穴总体积达到 1.1×10^7 m³,总工作气量为 1.41×10^9 m³,总垫气量为 4.91×10^8 m³。其中 Nuttermoor 盐穴储气库最大,拥有盐穴 10 口。盐穴最大容积达到 5.0×10^5 m³,最大井口压力为 24.5 MPa,储气库最大采气量达到 7.50×10^3 m³(表 1)。

德国地下盐穴储气库的完井方法包括以下内容。

(1)最后一层水泥封固套管的设计应考虑以下几方面的因素:岩石的外挤力;盐穴中气体内压力;防止由于封隔器部位气窜而形成的压力增加毁坏套管。

表1 德国盐穴储气库一览表

气库名称	盐穴数量 (口)	口井盐穴体积 ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	井口压力 min/max(bar)	工作气量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	垫气量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	气库最大采出量 ($\times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$)
Nuttermoor	10	400~500	25~150	545	125	650
Epe	8	117~310	90~190	350	180	750
Empelde	3	250~430	30~200	183	37	300
Krummhorn	3	200~350	110~245	120	60	500
Xanten	6	75~178	30~160	105	20	320
Huntorf	4	175~400	50~100	65	60	225
Lesum	1	230	30~165	40	7	50
Kiel	1	30	80~160	2	2	50
合计	36	11000		1410	491	

(2)采用盐水泥浆提高套管与盐岩层结合力,提高固井质量。

(3)采用两凝水泥固井,即井筒上部2/3用 $1.45 \sim 1.75 \text{ kg/m}^3$ 的轻水泥浆,其余用 1.95 kg/m^3 的重水泥浆。

(4)利用井下马达钻水泥塞,保证井下安全。

(5)计算机监控套管上扣过程,保证套管上扣质量。

期应检测腔体变化,进行扩容。

参 考 文 献

- 1 Quintanilha J E *et al.* SPE 28119;725—730
- 2 Gano J C, Revay J R. SPE 26903;139—146
- 3 索菲公司/法国燃气公司提供的盐穴储气库技术资料
- 4 Oil & Gas Journal Special, 1994, Sept 12;45—54
- 5 Trondheim Norway, Svein B Thaulle. Eurogas, 1996;3~6 June;361—378
- 6 Oil & Gas Journal, 1993; July 19;44—53
- 7 Oil & Gas Journal, 1994; Dec 12;35—42
- 8 Oil & Gas Journal, 1996; Feb 19;39—45
- 9 油气储运, 1997;16(12);17~19
- 10 国外油气储运, 1992;10(6);59~62
- 11 Japel G, Faber T. Principles for the construction of technically tight gas caverns and inspection measures for confirmation
- 12 Oil & Gas Journal, 1990; July 2;49—53
- 13 SPE 24923;689~696
- 14 Oil & Gas Journal, 1996; Oct 28;76—79
- 15 SPE 38865;219~228
- 16 Thomar F Barron. Oil & Gas Journal, 1994; Sept 12;55—67
- 17 SPE 19084;265—278
- 18 Barker J W, Feland K W. 国外钻井技术, 9;12—16

十、认识与建议

(1)盐穴储气库是仅次于枯竭砂岩油气藏储气库的一种廉价的气库类型。

(2)盐岩自身的特殊物理性质决定盐穴储气库的密封和稳定性,通过水溶解可以形成溶腔,不同腔体形状稳定性不同,必须人为采取调整溶解管柱位置和注入非盐溶性材料,控制腔体形状,保护顶板。

(3)盐溶解速度受温度影响小,受水的盐度影响大,扰动有利于溶解。

(4)盐影响井筒固井质量,盐的蠕变容易导致套管变形,完井应考虑盐对套管的不均匀载荷的影响。

(5)完井管柱应考虑井筒内的安全控制和油套管的保护。

(6)油管和生套管采用较大尺寸,充分发挥盐穴气库的应急调峰优势。

(7)盐穴在气库运行过程受压力变化而收缩,定

(修改回稿日期 2004-07-12 编辑 居维清)