

岩盐品位对岩盐储气库水溶建腔的影响^{*}

班凡生^{1,2} 高树生^{1,2} 单文文^{1,2}

(1.中国科学院渗流流体力学研究所 2.中国石油勘探开发研究院廊坊分院)

班凡生等.岩盐品位对岩盐储气库水溶建腔的影响.天然气工业,2006,26(4):115-118.

摘要 岩盐储气库就是根据水溶采矿的原理,通过采出盐水,利用在地下形成的溶腔作为天然气的存储空间。岩盐储气库水溶建腔技术是岩盐储气库的核心内容,直接影响着岩盐储气库的后期作业,对岩盐储气库运行效果、使用寿命等具有重要意义。为此,研究了岩盐品位对岩盐储气库水溶建腔的影响;根据水溶建腔机理,建立岩盐储气库水溶建腔数学模型;对岩盐品位不同的地层条件下岩盐储气库水溶建腔进行动态模拟数值计算;进而综合分析了岩盐品位对岩盐储气库水溶建腔的影响规律。结果表明:岩盐储气库应选择在岩盐品位高的地层建造,这样既有利于溶腔形态的控制,又能缩短建腔周期。

关键词 岩盐 地下 储气库 水溶建腔 岩盐品位 影响 分析

一、油垫法水溶建腔

油垫法水溶建腔^[1]是一种单井建库方案,是利用油、水互不相溶和油密度小,且油不溶解矿物的特性,在井内注入3层套管程序(中心管、中间管和技术套管),从技术套管和中间管环隙注入柴油,使其在溶腔顶部形成一很薄的油垫层,控制上溶,采用自下而上的方法提升管柱,建槽初期采用正循环(淡水从中心管进入,中心管和中间管环隙排出卤水),后期采用反循环(淡水从中心管和中间管环隙进入,从中心管排出卤水)。

1. 机理研究

(1) 流体输运

水溶建腔流体输运过程中同时存在着扩散现象和对流现象;在溶蚀边界层内,流体输运主要表现为溶质的扩散作用;在循环管柱附近,流体输运主要靠强迫对流作用;而在两者之间,流体输运则以自然对流为主,表现为在重力作用下的沉降扩散平衡。

(2) 腔体溶蚀

溶腔的内壁表面上存在着溶蚀边界层,水和岩盐的质量交换即岩盐的溶解过程是通过边界层完成的。盐溶过程是发生在溶蚀边界层内的物质交换,而采盐过程是溶腔内的盐水通过循环管柱与外界的淡水之间进行的物质交换。根据物质平衡原理,在

稳定溶蚀状态下,盐溶过程与采盐过程达到平衡状态。通常情况下,岩盐品位高,水与盐类矿物的溶解接触面积大,溶解速度快,腔体溶蚀得就快。

2. 数学模型

(1) 浓度场

岩盐腔体溶蚀的过程实际上就是溶质在溶剂的流动体系中的输运过程,这一过程可用一组多维非稳态对流扩散方程^[2]来描述:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) C = D \nabla^2 C \quad (1)$$

式中: C 表示浓度; $\vec{v}$ 表示流速; D 表示扩散系数。

(2) 速度场

对于有源流动,变密度流体的质量守恒定理(或者连续方程)一般可以写成:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = q \quad (2)$$

根据 Navier-Stokes 流体动力学基本方程^[3],动量方程可写为:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{\rho} - \nabla p + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (3)$$

式中: p 表示压力; f 表示体积力; μ 表示动力黏度。

(3) 溶解速度方程

岩盐储气库水溶建腔,除遵循物理化学原理外,还遵循水动力学及物质扩散和质量传递规律,岩盐

* 本文属于中国石油天然气集团公司国家“西气东输”金坛盐穴储气库前期评价项目建腔配套技术专题研究项目成果。

作者简介 班凡生,1977年生,中国科学院渗流流体力学研究所博士研究生;现从事计算流体力学、渗流流体力学、储气库建设等方面研究。地址:(065007)河北省廊坊市44号信箱。电话:13932666035。E-mail:banfansheng@163.com

溶蚀是扩散——动力溶解过程,也就是盐类物质在水溶液中的对流扩散。对流扩散时,在单位时间、单位面积上全部盐类物质质量 J ,可用下式表示:

$$J = J_v + J_d = VC - D \frac{\partial C}{\partial n} \quad (4)$$

式中: J_v 表示溶解水中的盐类物质的精确速率, $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$; J_d 表示扩散的质量传递速率; V 表示溶液运动速度; C 表示溶液浓度; D 表示扩散系数。

假设模型溶腔形态为轴对称,在柱坐标下设溶腔的边界为 R ,单位面积上腔体溶蚀半径增量 dR ,选取溶腔壁面上单位厚度 ($dz=1$) 环行单元体积如图 1 所示。

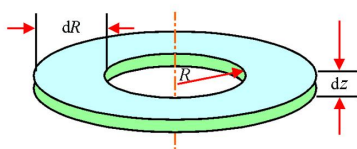


图 1 柱坐标系下体积单元示意图

以体积增量形式表达的腔体溶蚀速率可以写成:

$$dV = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{\rho} M \cdot J \Big|_{r_1} \cdot 2\pi R \quad (5)$$

$$\text{由 } dz=1, \text{ 所以有: } dV = dsdR = 2\pi R dR \quad (6)$$

比较式(5)和式(6),可以得到:

$$dR = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{\rho} M \cdot J \Big|_{r_1} \quad (7)$$

$$\text{溶解速度方程如下: } \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{1}{\rho} M \cdot J \Big|_{r_1} \quad (8)$$

表 1 给出了石盐矿石品位与溶解速度关系表。

由表 1 可以看出,矿石品位高,水与盐类矿物的溶解接触面积大,溶解速度快,溶解速率大。

二、数值模拟和比较分析

根据岩盐地层纵向分布特征,为了便于分析岩盐品位对岩盐储气库造腔的影响,利用研制的岩盐储气库水溶造腔动态模拟软件对品位不同的均质岩盐地层地质模型进行模拟,综合研究溶腔形态发展

表 1 石盐矿石品位与溶解速度的关系表^[4]

样号	取样地点	试验方法	NaCl 品位(%)	侧溶速度(cm/d)	溶液最终浓度(Be′)	测试单位
4 94-Y4-1	四川罗城盐矿	室内静溶法	99.50	35.2	10.1	四川五通桥盐厂 中科院盐湖所 云南平浪盐矿
	青海达改盐矿	室内静溶法	78.74	24.0	10	
	云南平浪盐矿	铜室水溶法(动溶)	29.44	6.72	22	

变化规律。据有关盐矿地质资料,根据岩盐地层纵向分布特征,建立均质岩盐地层地质模型(表 2)。

表 2 均质岩盐地层数据表

地质模型	层位	地层厚度(m)	顶深(m)	底深(m)	岩盐品位(%)
一	岩盐	154	988	1202	80
二	岩盐	154	988	1202	85
三	岩盐	154	988	1202	90
四	岩盐	154	988	1202	95

图 2~5 给出了 4 种地质模型在相同的工艺条件下,岩盐储气库水溶造腔 140 d、400 d、942 d 后的溶腔形态结果图,其中图形底部的红色代表不溶物残渣沉淀。可以看出,随着岩盐品位的增加,不溶物残渣沉淀体积明显减小,溶腔结束后岩盐品位 80% 溶腔,残渣体积约为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,而对岩盐品位 95% 的溶腔,其残渣体积只有 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,由此说明岩盐品位对岩盐储气库水溶建腔的发展过程有重要影响。

图 6~8 给出了 4 种地质模型在溶蚀 942 d 后,腔体体积、平均采盐速度、腔体有效利用率(腔体体积/(腔体体积+残渣体积))随岩盐品位的变化曲线

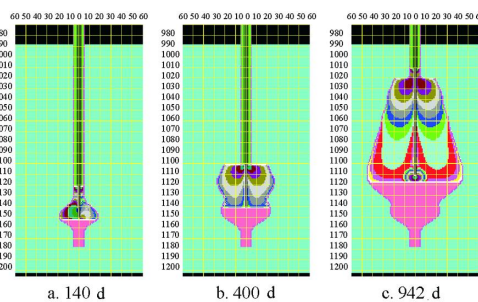


图 2 地质模型一—溶腔形态模拟结果图

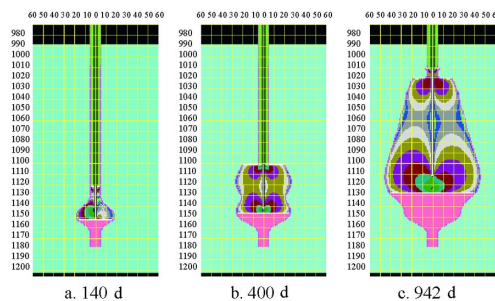


图 3 地质模型二—溶腔形态模拟结果图

图。由图 6 和图 8 可以看出,岩盐品位越高,水溶造腔腔体体积就越大,腔体的有效利用率就越高。在相同溶蚀时间下,品位是 80% 时,腔体体积只有 25

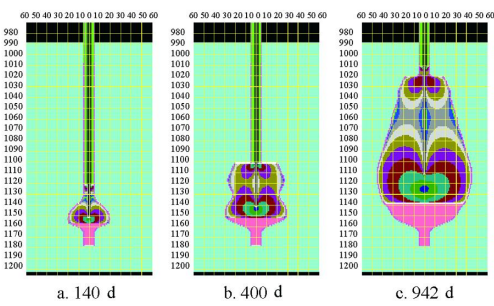


图 4 地质模型三溶腔形态模拟结果图

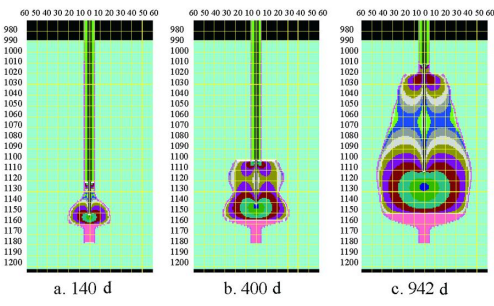


图 5 地质模型四溶腔形态模拟结果图

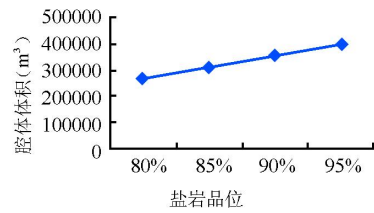


图 6 腔体体积随岩盐品位变化曲线图

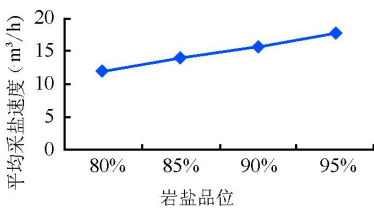


图 7 平均采盐速度随岩盐品位变化曲线图

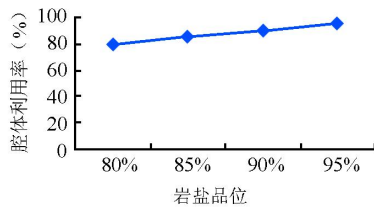


图 8 腔体利用率随岩盐品位变化曲线图

$\times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,有效利用率仅 80%;而当品位达到 95% 时,腔体体积几乎有 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$,有效利用率也达到 90% 多。可见选择岩盐品位高的地层进行岩盐

储气库造腔,能有效缩短建腔时间;图 7 表明品位越高平均采盐速度就越大,最大速度达到 $17 \text{ m}^3/\text{h}$,而最小速度只有 $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 。因此,选择岩盐品位高的地层建腔,能有效提高采卤速度,缩短建腔周期。

三、计算实例

根据岩盐品位影响岩盐储气库的结论,选择合适的地层建设岩盐储气库,下面给出的是某盐矿的合理溶腔结果。据有关盐矿地质资料(表 3),确定计算参数,岩层埋深在 990~1300 m,岩盐品位 85%~94%。腔体设计在地层埋深 988~1202 m 之间,根据隔层情况,溶腔底部盐层预留厚度 25 m,底部预留厚度 17 m,造腔高为 154 m。采用典型注采管柱系统,技术套管 $13 \frac{3}{8}$ 英寸(外径 339.73 mm),中间管 $5 \frac{5}{8}$ 英寸(内径 224.41 mm),中心管 $5 \frac{1}{2}$ 英寸(内径 125.73 mm);油垫位置位于中间管口上 1 m;两口距随不同的溶腔阶段进行变化,溶蚀初期两口距较小,一般在 30 m 左右,目的就是快速建槽,同时降低不溶物渣质的沉淀量,防治中心管堵塞,溶蚀后期开始逐渐增加两口距,扩大对流作用区域,提高溶蚀速度;循环方式采用正反循环组合方式:即溶蚀初期采用正循环建立沉井、然后采用反循环建腔。

表 3 盐矿地质资料数据表

序号	厚度(m)	顶深(m)	底深(m)	岩盐品位(%)
1	75.5	988.0	1063.5	86.21
2	1.3	1063.5	1064.8	50.12
3	41.0	1064.8	1105.8	85.65
4	1.2	1105.8	1107.0	13.10
5	8.9	1107.0	1115.9	75.32
6	0.7	1115.9	1116.6	68.78
7	6.9	1116.6	1123.5	70.94
8	0.8	1123.5	1124.3	49.35
9	54.2	1124.3	1178.5	80.68
10	1.0	1178.5	1179.5	45.85
11	1.1	1179.5	1180.6	14.06
12	1.7	1180.6	1182.3	69.75
13	1.1	1182.3	1183.4	23.98
14	17.5	1183.4	1202.0	84.36

该盐矿共进行了 8 个溶蚀阶段完成,建腔初期选用正循环、小排量 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 进行建槽 140 d,以后改为反循环并逐渐增加排量到 $120 \text{ m}^3/\text{h}$,在每一个排量下一般进行 120 d 左右的溶蚀,在 940 d 可以洗出 $23.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的梨形溶腔。最后,为了保护套管鞋,防治岩盐蠕变给套管带来的伤害,要进行短时间

溶颈试验。这样做的结果可以有效阻止套管鞋处岩盐的蠕变,防止套管受损。具体做法一般采用正循环以 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 的排量溶蚀 $1\sim 2\text{ d}$ 即可,最终的溶蚀结果见图 9(腔体设计符合率高,稳定系数好)。从图 9 中可以看到在非均质带有夹层的岩盐层中,溶腔的连续性受到影响;同时由于岩盐品位较低,不溶物含量过高导致最终溶腔内残渣体积远大于图 2~5 中品位较高均质岩盐层的残渣体积,降低了腔体的有效利用率,增加了建腔周期。

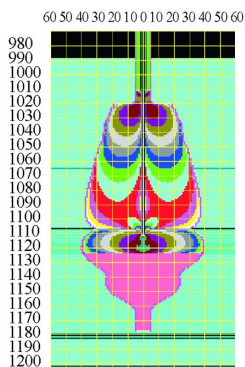


图 9 溶腔形态模拟结果

四、结论

(1)在岩盐品位高的岩盐地层建设储气库,岩盐综合溶解速度大,溶蚀腔体体积大,残渣体积小,腔体有效利用率高,可有效缩短岩盐储气库的水溶造

腔时间;同时在岩盐储气库溶腔过程中采盐速度大,能更好的满足地面盐场的采卤要求。

(2)不同岩盐品位的地层条件下岩盐储气库水溶建腔溶腔形态不同,岩盐品位影响岩盐储气库水溶建腔形态的发展变化:品位越高残渣体积越小,腔体有效利用率越高;品位越低残渣体积越大,腔体有效利用率越低。

(3)岩盐储气库的建设最好选择在盐丘中进行,次之也应该选择岩盐品位高的地层。在岩盐品位高的岩盐层进行岩盐储气库造腔,有利于腔体形态的控制,同时能够加快溶腔速度,降低溶腔周期。

参考文献

- [1] WOLFGANG DREYER. Underground storage of oil and gas in salt deposits and other non-hard rocks[M]. Stuttgart: Enke, 1952.
- [2] 赵志成,朱维耀,单文文,等.岩盐储气库水溶建腔流数学模型研究[J].天然气工业,2004,24(9):126-129.
- [3] 杨本洛.流体运动经典分析[M].北京:科学出版社,1986.
- [4] 王清明.试论盐类矿床水溶采矿的理论基础[J].中国井矿盐,1997(3):14-18.

(修改回稿日期 2005-12-14 编辑 居维清)