

文章编号: 1000-8241(2015)02-0175-05

盐穴储气库溶腔排量对排卤浓度及腔体形态的影响

王文权 杨海军 刘继芹 齐得山 张新悦 胡志鹏 付亚平

中国石油西气东输管道公司, 江苏镇江 212000

摘要: 为了研究盐穴储气库溶腔过程中不同排量对排卤浓度及腔体形态的影响规律, 通过对溶蚀速率公式的推导及变形, 分析了排量与排卤浓度及造腔体体积的相关性, 而后利用 WinUbro 造腔数值模拟软件建立了理想的腔体模型并赋予其一定的假设条件进行对比分析。为了验证所得结论的可靠性, 对金坛现场溶腔井进行数据统计与整理, 对各个溶腔阶段进行对比与分析, 并以部分井的典型阶段为例进行详细分析, 所得结论与理论分析一致, 即溶腔时注淡水排量越小, 排卤浓度越高, 腔体形态越规则。(图 6, 参 9)

关键词: 盐穴储气库; 溶腔排量; 排卤浓度; 腔体形态

中图分类号: TE822

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.02.013

Effect of cavity displacement of salt cavern gas storage on brine displacing concentration and cavity form

WANG Wenquan, YANG Haijun, LIU Jiqin, QI Deshan, ZHANG Xinyue,

HU Zhipeng, FU Yaping,

PetroChina West-to-East Gas Pipeline Company, Zhenjiang, Jiangsu, 212000

Abstract: In order to identify the effect of different displacements on the brine displacing concentration and cavity form in the process of dissolving cavity, the dissolution velocity formula is deduced and transformed to analyze the correlation between the displacement and brine displacing concentration and the cavity volume. Then, using WinUbro cavern numerical simulation software, an ideal cavity model is established and used for comparative analysis under certain assumptions. To verify the reliability of the conclusions, the data of cavity wells in Jintan are collected, and compared and analyzed for each stage of dissolving cavity; detailed analysis is made for typical phase of some wells, deriving the conclusion which is consistent with results of theoretical analysis, namely, the smaller the freshwater displacement is, when dissolving the cavity, the higher the brine displacing concentration and the more regular the cavity form are. (6 Figures, 9 References)

Key words: salt cavern gas storage, cavity displacement, brine displacing concentration, cavity form

金坛盐穴储气库^[1]是我国首次利用地下盐层建设的天然气储库, 因盐穴储气库注采频次高、反应快、不伤害环境等诸多优点, 被视为西气东输工程不可或缺的配套工程, 主要用于保障长江中下游用户的用气安全和季节调峰, 解决管道供气不均衡引起的供气过剩或供气不足的问题, 目前金坛盐穴储气库已进入大规模溶腔的阶段^[2-3]。溶腔工程是一项复杂的系统工程, 简单地说, 溶腔过程就是将淡水以一定的速率注入到地下盐层中, 使盐岩溶解于淡水形成卤水并排出处理, 使地下盐层形成一定形状的腔体或盐穴的过

程。然而, 该过程除了受到不溶物含量、盐溶解速率等盐层物性影响外, 还受到诸多工艺参数的制约, 如排量大小、循环方式、两管柱距离、溶腔时长等, 这些参数直接影响腔体的形态、排卤浓度等, 如果能有效利用这些参数的影响规律, 制定合理的工作制度, 可大大节省成本, 增加经济效益。当前, 在溶腔参数的相互影响及调整方面已有诸多研究成果^[4-6], 但在排量对腔体形态上的影响方面鲜见报道。基于此, 开展溶腔过程中注淡水排量对排卤浓度及腔体形态的影响规律研究, 以期对实际溶腔工作不同阶段的淡水排量选择提供指导。

1 数学模型与数值模拟

1.1 数学模型

盐穴储气库中水溶盐的溶蚀速率计算公式^[7-9]为:

$$\omega = \kappa(\psi)[1 + \beta(T - T_0)](10^4 C_N - 10^4 C)^\alpha C_N^{2-\alpha} \quad (1)$$

式中: T 为腔体温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为参考温度, 取 $20\text{ }^\circ\text{C}$; β 为温度系数, 取 $0.026\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; C_N 为饱和卤水浓度, g/L ; C 为排卤浓度, g/L ; α 为数值常数, 取 1.5 ; $\kappa(\psi)$ 为溶蚀速率系数。

假设在某个溶腔阶段中, 溶蚀速率系数、腔体温度及饱和卤水浓度均为常数, 则 $\omega = \kappa(\psi)[1 + \beta(T - T_0)]10^4 C_N^{2-\alpha}$ 为定值, 设为 γ , 则式(1)变换为:

$$\omega = \gamma(10^4 C_N - 10^4 C)^\alpha \quad (2)$$

可见, 此时溶蚀速率仅与排卤浓度有关, 且当溶蚀速率变大时, 排卤浓度变小。溶蚀速率是指在某个溶腔阶段中, 盐岩被淡水溶解的速度, 可通过对比两次声呐测量期间腔体直径增加值、腔顶位移及溶腔时间计算溶蚀速率:

$$\omega = \Delta L / t \quad (3)$$

式中: ΔL 为腔体在水平 / 垂直方向上溶蚀的长度, m ; t 为该阶段时长, h 。

联立式(2)、式(3)可得:

$$\Delta L = \gamma(10^4 C_N - 10^4 C)^\alpha t \quad (4)$$

可见, 在一定时间内, 当排卤浓度变小时, 腔体在水平 / 垂直方向上溶蚀的长度变大, 腔体体积亦相应变大。而卤水排量公式为:

$$P = \Delta V / t \quad (5)$$

式中: ΔV 为溶腔所用淡水体积, m^3 。

对比式(4)、式(5)可知, 在同一溶腔阶段内, 溶腔时长相同, 若形成的腔体体积越大, 则进出腔体的淡水体积越大, 即排量越大。

综合以上公式分析可知, 排卤浓度越小, 造腔体积越大, 排量越大, 反之亦然。

1.2 数值模拟

WinUbro 造腔数值模拟软件是一个专门针对盐穴溶腔过程进行模拟分析的软件。目前, 国际上绝大多数盐穴储气库均使用 WinUbro 进行数值模拟及设计分析^[7]。利用该软件建立模型, 假设某溶腔阶段采用 $7\text{ in} + 4.5\text{ in}$ 油管的造腔管柱组合 ($1\text{ in} = 25.4\text{ mm}$), 内外管相距 30 m , 利用正循环模式造腔 150 d , 分别以排量 50 m^3 、 100 m^3 、 200 m^3 进行溶腔, 不溶物含量及盐

溶解速率均设为相等的常量, 观察腔体形态变化, 并对排卤浓度进行对比(图 1、图 2)。

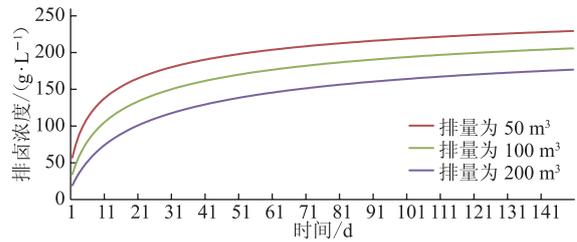
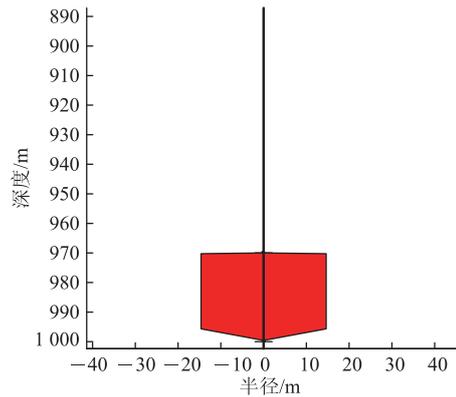
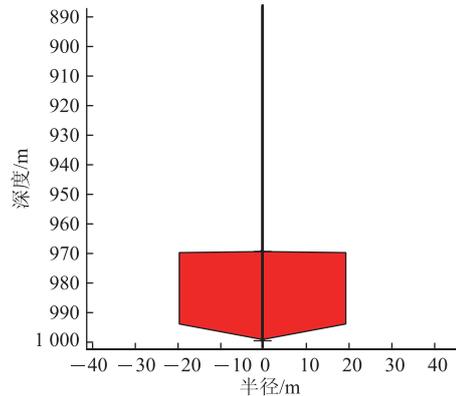


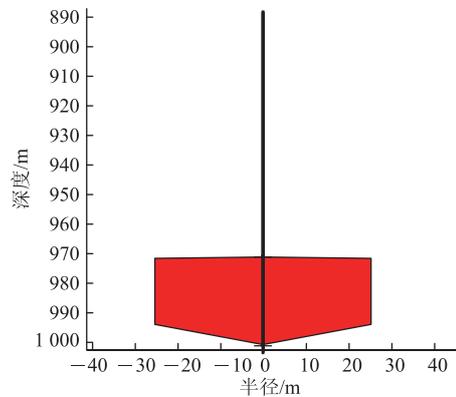
图 1 不同排量下排卤浓度随时间变化曲线



(a) 50 m^3 排量



(b) 100 m^3 排量



(c) 200 m^3 排量

图 2 不同排量下的腔体形态特征

显然, 排量与排卤浓度之间形成了良好的相关性, 排量越小, 排卤浓度越高, 而在腔体发育上, 在相同时

间内,排量越大,腔体半径增加越多,腔体形态在横向上发展越快,且腔体形态变化是规则的。然而,为保证腔体的稳定性,每口溶腔井会在初始设计中根据邻井矿柱比的计算结果设定一个最大半径值,大排量导致的腔体横向发展过快不利于腔体最大半径的控制,因此,从该理论模型分析可知,溶腔过程采用大排量进行溶腔不利于腔体最大半径的控制。由于该例是在WinUbro造腔数值模拟软件中建立的理想模型,未考虑实际地下盐岩存在不同深度、不同方向上的盐岩溶解速率不同、不溶物含量不同及隔夹层等因素的影响,因此,在不同排量下,实际腔体形态的变化规律尚需通过对溶腔井的形态进行监测对比分析而获知。

2 现场应用

一口溶腔井通常根据声呐测量次数而分成不同的阶段,一般一个溶腔阶段持续3~4个月,然后利用声呐测井对当前的腔体形状进行测量,得到实际的腔体形态。在实际溶腔过程中,每个阶段的各项溶腔参数都是根据上个阶段的声呐测井解释结果来设计的,因此,不能像理论分析一样使不同阶段的某些溶腔参数一致,而只研究注淡水排量的大小与排卤浓度及腔体形态之间的关系。为了在实际溶腔井中找到注淡水排量对排卤浓度及腔体形态的影响规律,对金坛储气库多口溶腔井进行数据整理,求取各个阶段的平均排量、平均排卤浓度、两管柱间距及平均不溶物含量,为降低其他变量对分析结果的影响,以平均排量及平均排卤浓度变化较大而两管柱间距及平均不溶物含量变化较小的阶段作为典型阶段,以金坛A井为例,对排量大小与排卤浓度及腔体形态之间的关系进行对比分析(图3、图4)。

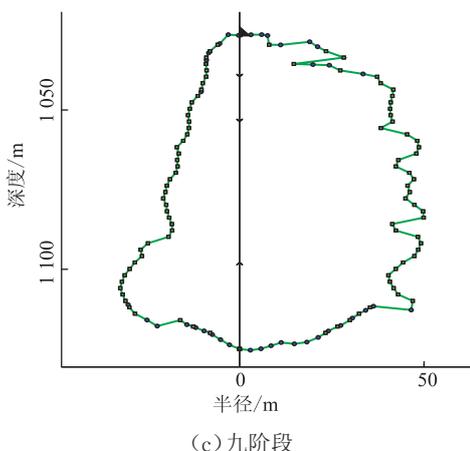
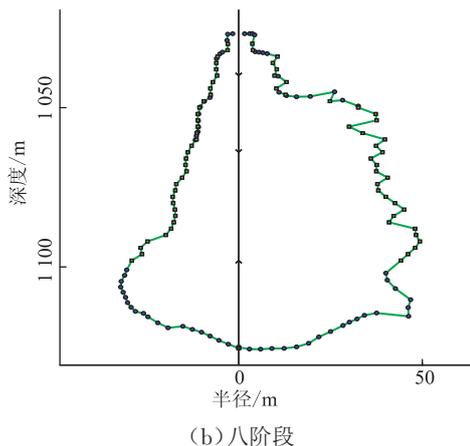
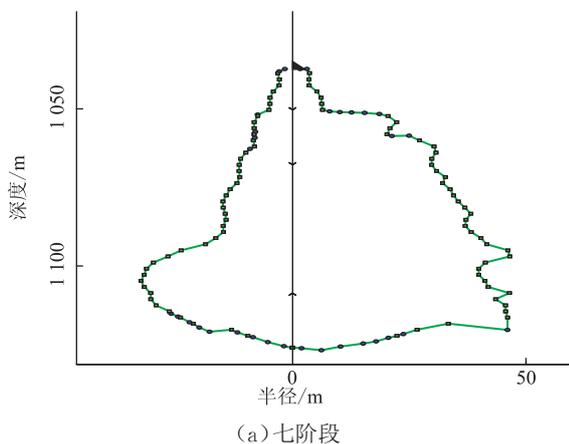


图3 金坛A井各典型阶段溶腔形状

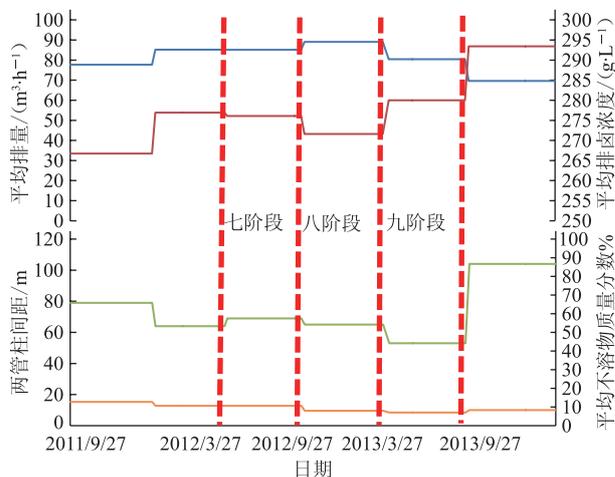


图4 金坛A井典型阶段数据统计图

金坛A井已完成10次声呐测量,第七阶段与第八阶段两管柱间距与平均不溶物含量变化较小,对分析结果基本不构成影响,而当排量变大时,排卤浓度明显下降,说明排量与排卤浓度间具有良好的相关性,而在腔体形态的发育上,第八阶段显然比第七阶段多了很多突起或凹陷,说明排量变大后,腔体形态不易控制,腔体形状发展不规则。对比第八阶段与第九阶段可知,平均不溶物含量变化依然很小,可忽略其对分析结

果的影响,但两管柱间距比第八阶段缩短约10 m,可能对分析结果产生影响。两管柱间距越小,淡水与盐岩的接触面积越小,盐岩溶解体积越小,则排卤浓度应该越小,然而模拟显示,当排量下降后,排卤浓度非但没有变小,反而明显上升,说明排量下降与排卤浓度的上升具有良好的相关性(图4)。对比两个阶段的腔体形态可知,第九阶段的突起或凹陷明显少于第八阶段,腔体形状的规则程度更高,说明排量越小,对腔体形态的控制越有利。由此得出排量对排卤浓度及腔体形态的影响规律:排量越小,则排卤浓度越高,腔体形态越规则,反之亦然。该例同时说明,腔体形态可以根据上一阶段的情况通过调整排量大小或其他溶腔参数来修正,即上一阶段的腔体形态在一定程度上影响下一阶段的腔体形态发育,因此,整个溶腔工作的初期腔体形态控制尤为重要。

为了更加深入地研究排量对腔体形态发育的影响,选择金坛B井和金坛C井的前两阶段进行数据整理及对比分析。这两口井都是刚开始溶腔不久的井,各阶段两管柱间距及不溶物含量均变化不大,其前两个阶段均符合排量越小、排卤浓度越高的规律(图5),不同的是,金坛B井各阶段排量均高于金坛C井,因而使腔体的形态从一开始就受到了影响(图6)。

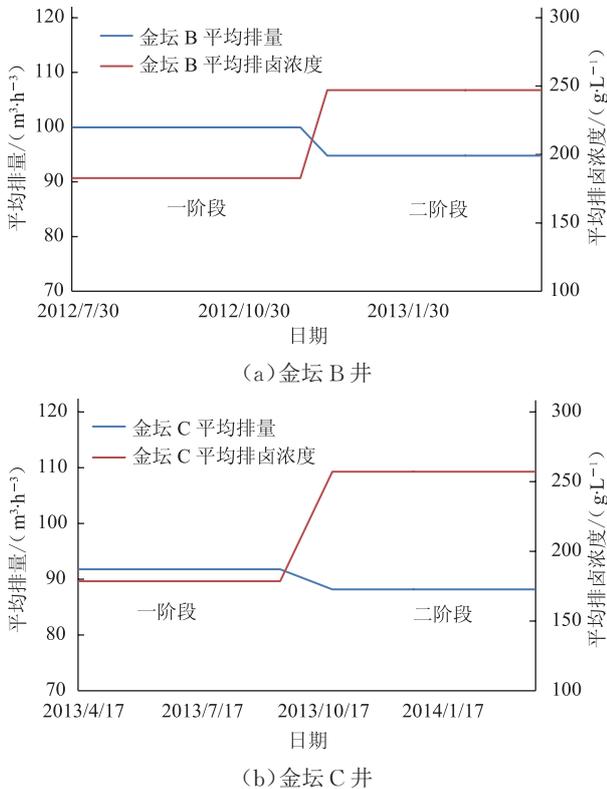


图5 金坛B井、C井前两阶段排量及排卤浓度对比图

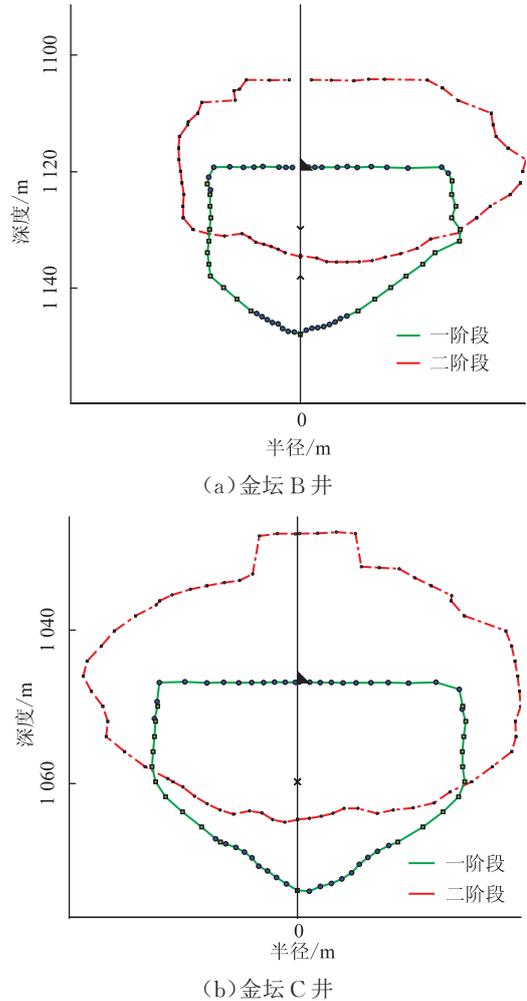


图6 金坛B井、C井前两阶段声呐测腔体积对比图

显见,无论是金坛B井还是金坛C井,因第二阶段的排量均小于第一阶段,故第二阶段的腔体形态显得比第一阶段规则稳定;因金坛C井的排量小于金坛B井的排量,故无论是第一阶段还是第二阶段,金坛C井的腔体形态比金坛B井规则很多。由此,该例进一步说明排量越小,则排卤浓度越高,腔体形状越规则,并且初期溶腔形态越规则,对后面的溶腔形态控制越有利,反之亦然。对金坛多口井的数据进行整理及对比分析,发现该规律普遍存在,且相关性明显,可利用该规律作为调整溶腔参数的依据。

3 结论与认识

(1) 盐穴储气库在溶腔过程中,注淡水排量与排卤浓度及腔体形态之间具有良好的相关性,排量越小,则排卤浓度越大,越容易符合盐企对排卤浓度的要求,腔体形状也越规则,形态越容易控制,并且初期溶腔形

态越规则,对后面的溶腔形态控制越有利,反之亦然。因初期腔体形态的控制对后期腔体形态的发育影响较大,故对腔体初期形态的控制尤为重要,由此提出利用排量调节控制腔体的初期形态。

(2)实际溶腔时,在相同时间内,排量越小,腔体体积越小。为了得到相同的腔体体积,就需要更长的溶腔时间,因而影响储气库的经济效益。为此,并非排量越小越好,应该根据实际情况,制定合理的工作制度,有效匹配溶腔参数。

(3)对于盐穴储气库的溶腔工作,由于初期淡水与盐岩接触面积小,排卤浓度低,且后期腔体形态发育受初期腔体形状影响较大,因此,应该首先采取多开井、小排量的工作制度,这样既可以提高初期排卤浓度,又可以有效控制腔体的初期形状,到后期再采用大排量的造腔模式,以保证造腔时间及经济效益。

参考文献:

- [1] 李建君,王立东,刘春,等. 金坛盐穴储气库腔体畸变影响因素[J]. 油气储运,2014,33(3):269-273.
- [2] 吴建发,钟兵,罗涛. 国内外储气库技术研究现状与发展方向[J]. 油气储运,2007,26(4):1-3.
- [3] 何爱国. 盐穴储气库建库技术[J]. 天然气工业,2004,24(9):122-125.
- [4] 赵志成,朱维耀,单文文,等. 盐穴储气库水溶建腔机理研究[J]. 石油勘探与开发,2003,30(5):107-109.
- [5] 田中兰,夏柏如. 盐穴储气库造腔工艺技术研究[J]. 现代地质,2008,22(1):97-102.

(上接第 174 页)

- [21] 左秀峰,韩伯棠,何世伟,等. 矿井运提系统可靠性模型[J]. 系统工程理论与实践,2005(3):133-139.
- [22] 艾慕阳. 大型油气管网系统可靠性若干问题探讨[J]. 油气储运,2013,32(12):1265-1270.
- [23] 刘锴,郑贤斌. 在役油气管道安全可靠性评估方法初探[J]. 油气田环境保护,2010,20(4):48-51.
- [24] 孙元章,程林,何剑. 电力系统运行可靠性理论[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [25] CABALU Helen. Indicators of security of natural gas supply in Asia[J]. Energy Policy,2010,38(10):218-225.
- (收稿日期:2014-09-25; 修回日期:2014-10-28; 编辑:关中原)

- [6] 班凡生,高树生,单文文,等. 岩盐储气库水溶建腔排量和管柱提升优化研究[J]. 石油天然气学报,2005,27(2):411-413.
- [7] KUNSTMAN A S, URBANCZYK K M. A computer model for designing salt cavern leaching process developed at Chemkop[C]. Solution Mining Research Institute Meeting, Kracow, Poland, October 14-19, 1990.
- [8] ANDREJ Kunstman, KAZIMIERZ Urbanczyk. Application of WinUbro software to modelling of carven development in trona deposit[C]. Solution Mining Research Institute Technical Conference, Krakow, Poland, April 27-28, 2009.
- [9] MARIA K, BARTLOMIEJ R. Analysing cavern geometry development based on sonar measurements from the point of view of geological deposit structure[C]. Solution Mining Research Institute Meeting, Kracow, Poland, May 11-14, 1997.

(收稿日期:2014-06-10; 修回日期:2014-10-20; 编辑:关中原)



作者简介: 王文权,助理工程师,1987年生,2013年硕士毕业于中国石油大学(北京)石油工程学院石油与天然气工程专业,现主要从事盐穴储气库造腔设计及管理工作。

WANG Wenquan, MS.D, assistant engineer, born in 1987, graduated from College of Petroleum Engineering of China University of Petroleum (Beijing), oil and gas engineering, in 2013, engaged in the cavity design and management of salt cavern gas storage.
Tel: 15050857898, Email: wenquan-wang@163.com



作者简介: 刘金艳,在读硕士生,1988年生,2013年毕业于西南石油大学油气储运工程专业,现主要从事地下储气库运行安全方面的研究工作。

LIU Jinyan, reading master, born in 1988, graduated from Southwest Petroleum University, oil & gas storage and transportation engineering, in 2013, engaged in the research of safe operation of underground gas storage.
Tel: 18810905975, Email: ljj124125@163.com