

引文: 王建夫, 金作良, 李剑光, 等. 盐穴储库水平对接井造腔物理模拟实验[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 926-935, 951.

WANG Jianfu, JIN Zuoliang, LI Jianguang, et al. Physical simulation experiment on horizontal docking well leaching for salt cavern storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 926-935, 951.

盐穴储库水平对接井造腔物理模拟实验

王建夫¹ 金作良² 李剑光² 贾建超³ 朱阔远³ 周照恒¹

1. 中国石油盐穴储气库技术研究中心; 2. 中国石油储气库分公司; 3. 华北石油管理局有限公司江苏储气库分公司

摘要:【目的】水平对接井造腔是一种高效的盐穴建造方法, 采用垫层阻溶可以较好地控制对接井腔体形态。但该造腔方式尚未应用于对接井, 其对腔体形态及排卤浓度的影响规律尚不明确, 无法有效指导现场技术应用。

【方法】基于现有盐穴采卤方式特点及存在的问题, 提出采用垫层阻溶双井交替注水、分阶段上提造腔管柱与垫层的对接井造腔方式。基于相似理论搭建实验平台, 开展新造腔方式下的对接井造腔物理模拟实验, 采用江苏淮安盐矿某一对接井现场实际数据验证了实验模型的准确性, 随后分析了地层倾角、注水排量、垫层及管柱控制、注水循环方式对腔体形状及排卤质量浓度的影响。【结果】水平对接井造腔腔体形态呈U形, 腔体体积大, 排卤质量浓度高, 相对于单直井具有显著优势; 地层倾角的存在会增加水平通道高度, 降低直井注水时的排卤质量浓度; 大排量可扩展腔体体积, 增大水平通道及两侧腔体尺寸; 垫层控制对腔体形状影响较大, 垫层长期停留在同一位置易出现平顶状畸形, 而管柱控制对腔体形状影响较小; 存在地层倾角时, 注水循环方式会显著影响腔体形态与排卤质量浓度。【结论】水平对接井造腔是一种高效的造腔方式, 具有腔体形状可控、排卤浓度高等优点, 可作为未来盐穴储库造腔技术的主要发展方向, 但室内实验研究具有局限性, 应加强该造腔方式的现场试验研究。(图12, 表3, 参18)

关键词: 盐穴储库; 对接井造腔; 地层倾角; 循环方式; 垫层控制; 腔体形态; 排卤浓度

中图分类号: TE822

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)08-0926-10

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.009

Physical simulation experiment on horizontal docking well leaching for salt cavern storage

WANG Jianfu¹, JIN Zuoliang², LI Jianguang², JIA Jianchao³, ZHU Kuoyuan³, ZHOU Zhaozheng¹

1. PetroChina Research Center of Salt-Cavern UGS Technology; 2. PetroChina Gas Storage Company;

3. Huabei Petroleum Administration Jiangsu Gas Storage Company

Abstract: [Objective] Horizontal docking well leaching is prevalently applied among salt chemical enterprises for brine extraction. However, controlling the cavern shape becomes challenging when this technique is utilized, primarily due to the absence of dissolution inhibitor cushions. Although this cushion method is commonly employed in salt cavern storage to improve cavern shape control, it has not been applied to docking well leaching. To effectively guide the field application of this method, research into the influence patterns of dissolution inhibitor cushions on the cavern shapes resulting from docking well leaching and brine concentrations is necessary. [Methods] Based on the characteristics and deficiencies of brine extraction methods currently applied by salt enterprises, a novel approach for docking well leaching was introduced. This process involves alternating water injection between two wells equipped with dissolution inhibitor cushions and the phased lifting of tubing strings for leaching and cushions. Based on the similarity theory, an experimental platform was set up for physical simulations of docking well leaching using the proposed approach. The accuracy of the simulation results was verified through a comparison with field data collected from a docking well at Huai'an Salt Mine in Jiangsu Province. Furthermore, this study delved into the influence patterns of various factors on cavern shapes and mass concentrations in brine displacement, including formation dips, displacements, cushion and tubing string control, as well as water injection circulation modes. [Results] The caverns produced by horizontal docking well leaching optimized by dissolution inhibitor cushions exhibited U-shaped configurations with substantial volumes and high brine

concentrations, surpassing those achieved by a single vertical well setup. The presence of formation dips led to elevated horizontal channels and decreased mass concentrations in brine displacement during water injection into the vertical well. Significant displacements contributed to increased cavern volumes, expanded horizontal channels, and enlarged caverns on both sides. Cushion control notably impacted cavern shapes, with prolonged retention at the same position leading to flat tops. Conversely, tubing string control had minimal influence on cavern shapes. Additionally, in the presence of formation dips, the water injection circulation modes notably influenced cavern shapes and mass concentrations in brine displacement. **[Conclusion]** The horizontal docking well leaching enhanced by dissolution inhibitor cushions offers an efficient way of leaching, showcasing benefits such as manageable cavern shapes and elevated brine concentrations. This technique stands out as a dominant area for the advancement of leaching methods in salt cavern storage. Nevertheless, given the constraints of laboratory research, future efforts should prioritize conducting field experiments. (12 Figures, 3 Tables, 18 References)

Key words: salt cavern storage, docking well leaching, formation dip, circulation mode, cushion control, cavern shape, brine concentration

随着国家绿色低碳发展战略的实施,天然气及新能源行业快速发展,盐穴由于其良好的密封性与稳定性,在储天然气、储压缩空气、储氢等方面发挥了重要作用^[1]。目前,盐穴造腔主要采用单井单腔方式,在生产套管内下入两根同心管柱,利用管柱环空及内管形成注水排卤循环通道,对地下盐层进行水溶造腔^[2-4]。但该方式存在排卤浓度低、造腔速度慢等问题,且不适用于中国低品位、薄盐层等地质条件^[5]。水平对接井是盐企常用的一种采卤技术,通过钻水平井连通垂直井,形成注水排卤的循环通道。该技术采卤浓度高、产量大,适用于盐层厚度跨度大、NaCl 品位差异大的盐矿,在未来可作为一种高效的盐穴造腔方式投入实际应用^[6-10]。

近年来,国内外学者针对水平对接井造腔形态与排卤规律开展了大量研究。陈涛等^[5]通过室内实验探究了气垫阻溶效果与盐腔内部卤水分布规律;唐海军等^[11]采用室内模型实验分析了不同注水流量下水平井腔体体积的扩展规律;王文权等^[12]开展了注水排量对水平腔形态的影响实验,结果表明水平腔呈现“鞋”形。周冬林等^[13]通过声呐测腔技术与造腔工程技术构建了水平对接井腔体形态;康延鹏等^[14]实验探究了水平退步法排量、排卤管高度、步长对腔体形态与排卤浓度的影响。以上造腔实验均假设在薄盐层中进行,采用水平井与直井连通方式建造横卧的腔体,不符合实际大井距对接井腔体形态发展情况。同时,以上研究考虑的造腔影响因素较少,未能系统反映水平对接井腔体形态的发展规律。为此,通过分析现有对接井采卤工艺特点及存在的问题,提出采用垫层阻溶双井交替注水、分阶段上提造腔管柱与垫层位置的造腔方式。根据相似理论搭建实验平台开展造腔物理

模拟实验,首先分析了对接井造腔腔体形态、体积、排卤浓度的基本发展规律,其次分析了地层倾角、排量、垫层及管柱控制、循环方式对腔体形态与排卤质量浓度的影响,最后基于实验结果给出现场对接井造腔建议。

1 基本原理

1.1 对接井造腔原理

对接井造腔是通过将一口水平井与另一口垂直井连通,形成注水排卤循环通道后,利用水溶法采盐的造腔方式。目前,盐企通常采用的对接井造腔方式(图 1a)为:采卤井与注水井内均下入生产套管至底部开采盐层,并固井至地面,两井定期转换注采方向;造腔过程中不注入任何阻溶剂,定期或根据堵管情况,采用切割生产套管的方式控制采盐层位。该方式无阻溶剂,且由于堵管、管柱断脱等原因,注水位置存在不确定性,无法对腔体形状进行精确控制。为此,提出一种新型对接井造腔方式(图 1b):首先将生产套管下入盐层顶部并固井,然后在生产套管中下入一层中心管;造腔时通过生产套管与中心管的环空注入柴油等阻溶剂,利用直井与对接水平井中的中心管进行交替注水与排卤;定期上提阻溶垫层至设计位置,从而对腔体形状进行精确控制。

1.2 相似比

相似理论可用于指导建立与现场原位实物相似的实验室尺度模型,首先通过量纲分析法建立实验模型与现场原型的相似关系。根据水溶造腔工艺的技术特点,影响盐岩水溶造腔的有关参数及相关量纲为以下 7 个:几何尺寸 l 的量纲为 L 、溶解时间 t 的量纲为 T 、

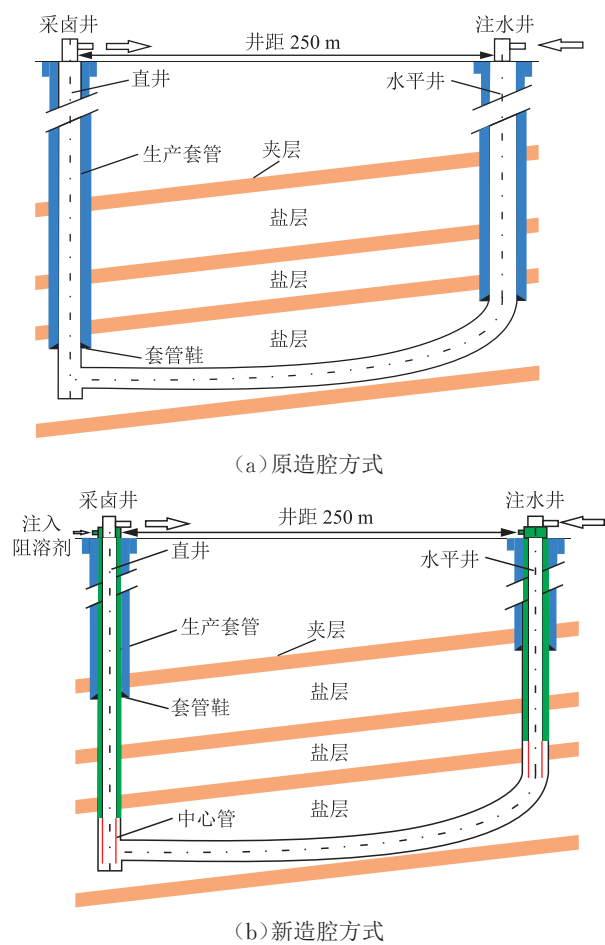


图 1 盐穴储库水平对接井造腔方式示意图
Fig. 1 Schematic diagram of horizontal docking well leaching for salt cavern storage

溶解速率 ω 的量纲为 $ML^{-2}T^{-1}$ 、注水流量 q 的量纲为 L^3T^{-1} 、卤水浓度 c 的量纲为 ML^{-3} 、温度 f 的量纲为 θ 、盐岩密度 ρ 的量纲为 ML^{-3} 。其中,基本量纲 4 个: L 为长度量纲, M 为质量量纲, T 为时间量纲, θ 为温度量纲。由相似第二定理可知,该实验模拟系统包含 3 个相似准则。选取 l 、 t 、 ω 、 f 为基本物理量,其余 3 个物

理量可用基本物理量来表示,注水流量 q 可表示为:
$$q=l^{\alpha}t^{\beta}\omega^{\epsilon}f^{\gamma} \tag{1}$$

式中: α 、 β 、 ϵ 、 γ 为待定系数。
根据方程量纲齐次原则,计算得 $\alpha=3$ 、 $\beta=-1$ 、 $\epsilon=0$ 、 $\gamma=0$,则与 q 、 ρ 、 c 有关的 π 项为:

$$\begin{cases} \pi_q = \frac{qt}{l^3} \\ \pi_\rho = \frac{\rho l}{t\omega} \\ \pi_c = \frac{lc}{t\omega} \end{cases} \tag{2}$$

K 为参数的相似比,几何相似比 K_l 可表示为:
$$K_l = \frac{l_p}{l_m} \tag{3}$$

式中: l_p 为原型尺寸; l_m 为模型尺寸。
其他参量相似比关系可表示为:

$$\begin{cases} \frac{K_q K_l}{K_l^3} = 1 \\ \frac{K_\rho K_l}{K_l K_\omega} = 1 \\ \frac{K_c K_l}{K_l K_\omega} = 1 \end{cases} \tag{4}$$

实验选用的盐砖尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.05\text{ m}$,设计实验室腔体直径为 0.08 m ,工程现场盐穴腔体直径为 80 m ,则几何尺寸 l 的相似比 $K_l=1\ 000$;实验室与工程现场腔体的盐溶解速率 ω 均为 $2\ 163\text{ kg/m}^3$ 、卤水浓度 c 均为 300 g/L ,则相似比 $K_\omega=1$ 、 $K_c=1$ 。根据式(4)计算得到主要参数相似比 $K_q=1 \times 10^6$ 、 $K_l=1\ 000$,结合工程现场腔体参数,可得到相应物理模拟实验的参数(表 1)。

表 1 水平对接井造腔模拟实验中实验室模型与现场原型的主要参数相似比统计表
Table 1 Statistics of similarity ratio in main parameters between laboratory model in simulation experiment and field prototype on horizontal docking well leaching

对比项	腔体直径/m	盐岩密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	溶解速率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	卤水浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	注水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	时间/d	体积/ m^3
现场原型	80.00	2 163	12.28	300	180.0	500.0	3×10^5
实验室模型	0.08	2 163	12.28	300	1.8×10^{-4}	0.5	3×10^{-4}

2 水平对接井造腔模拟实验

2.1 实验平台

根据相似比计算结果,搭建室内对接井水溶造腔物理模拟实验平台(图 2)。平台采用喜马拉雅盐砖,

NaCl 质量分数为 96%。为便于观察腔体扩展规律,在盐砖表面开槽后粘贴透明塑料板,形成半溶腔模型。实验平台通过蠕动泵注入淡水并对流量进行调节,利用注射器向腔内注入阻溶剂并对油水界面进行控制,通过上下移动金属细钢管模拟造腔管柱的上提或下

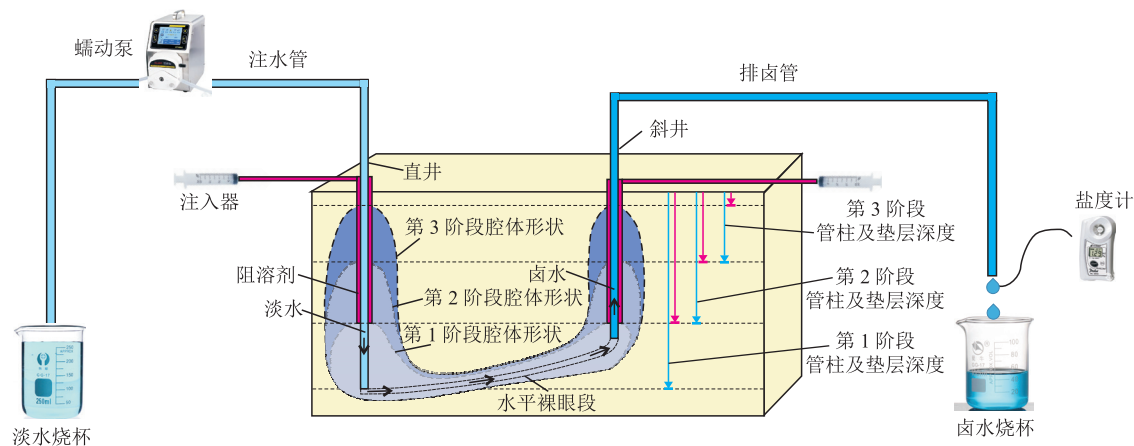


图 2 室内对接井水溶造腔物理模拟实验平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laboratory experimental platform for physical simulations of docking well leaching using water solution

放,采用盐度计测定排出卤水浓度,并用相机拍照记录腔体形状发展。

2.2 实验方案

为探究对接井水溶造腔腔体形状与排卤浓度的变化规律,从地层倾角、注水排量、垫层及管柱控制、循环方式 4 个方面设计 10 组实验方案(表 2)。在实验中,盐砖表面水平钻孔长度 25 cm,对应现场对接井井距 250 m;竖直钻孔长度 15 cm,对应现场造腔高度 150 m。采用双井交替注水,总实验时间 12 h,每隔 1 h 交换 1 次注水方向。垫层及管柱上提控制方式如下:①上提 2 次,则造腔分 3 个阶段(图 2),每个阶段上提距离为

5 cm,每一阶段间隔 4 h;②上提 1 次,则造腔分 2 个阶段,每个阶段上提距离为 7 cm,每一阶段间隔 6 h;③上提 0 次,即垫层及管柱不动,造腔为 1 个阶段。倾角实验设计 3 组,分别模拟地层倾角为 0°、5°、10°;注水排量实验设计 2 组,流量设置为 1 mL/min、2 mL/min,对应现场流量 60 m³/h、120 m³/h,同时与第 3 组实验形成对比;垫层及管柱控制实验设计 3 组,6 号、8 号实验在不提垫层的情况下,研究提管次数对腔体的影响,7 号、3 号实验研究上提垫层及管柱次数对腔体影响;循环方式实验设计 2 组,研究在地层倾角为 10° 的情况下注水循环方向对腔体的影响。

表 2 室内对接井水溶造腔物理模拟实验方案设计表

Table 2 Design of laboratory experiment for physical simulation of docking well leaching using water solution

实验名称	序号	排量/(mL·min ⁻¹)	地层倾角/(°)	垫层上提次数	提管次数	循环方式(A 直井,B 斜井)
倾角实验	1	3	0	2	2	A、B 井交替注水
	2	3	5	2	2	A、B 井交替注水
	3	3	10	2	2	A、B 井交替注水
注水排量实验	4	2	10	2	2	A、B 井交替注水
	5	1	10	2	2	A、B 井交替注水
垫层及管柱控制实验	6	3	10	0	2	A、B 井交替注水
	7	3	10	1	1	A、B 井交替注水
	8	3	10	0	0	A、B 井交替注水
循环方式实验	9	3	10	2	0	A 井注水,B 井排卤
	10	3	10	2	0	B 井注水,A 井排卤

2.3 模型验证

以江苏淮安盐矿某一对接井为例验证实验模型的准确性^[15]。该井累计采卤 6.781×10⁶ m³,估算动用含盐地层地下空间体积 1.712×10⁶ m³。声呐测腔显示腔体 1 底部平均直径 82.78 m,腔体 2 底部平均直径 63.32 m,则两腔体平均直径 73.5 m(图 3a)。开展对接连通老腔改造实验,在水平通道上方钻 1 口排卤井,钻探显示通道顶部深度 1 477 m,钻头探底深度 1 486 m,

水平通道空腔高度 9 m。但实际水平井井眼轨迹深度为 1 490 m,若基于井眼深度计算,则水平通道总溶蚀高度为 13 m。

通过对接井造腔模拟实验得到腔体最大直径为 7 cm,水平通道高度 1.5 cm(图 3b),按照相似比放大至现场分别为 70 m、15 m。实验腔体形态与现场预测形态接近,均为 U 形腔,中部水平通道为细长形。同时,腔体尺寸误差较小,腔体直径与水平通道高度误差分

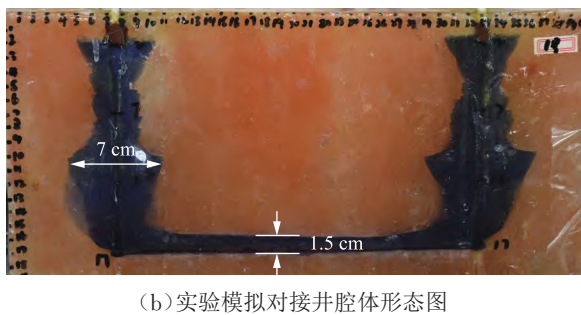
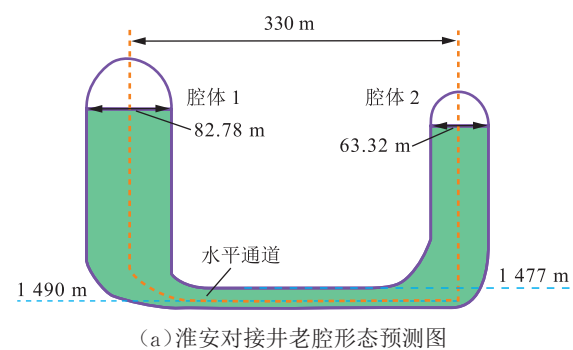


图 3 江苏淮安盐矿某对接井老腔形态与实验结果对比图
Fig. 3 Comparison between existing cavern shape and experimental results for a docking well at Huai'an Salt Mine in Jiangsu



图 4 室内对接井水溶造腔腔体形态发展过程图
Fig. 4 Development process of docking well leaching using water solution in laboratory experiment

别为 3.5 m、2.0 m, 表明该实验模型具有一定的可信度, 实验结果可作为连通老腔形态预测及改造的参考。

3 实验结果

3.1 基本规律

为充分了解对接井腔体形态发展规律, 以 1 号实验为例进行分析(图 4)。该实验分 3 个阶段, 分别上提 2 次管柱与 2 次垫层, 各阶段的管柱深度分别为 17 cm、12 cm、7 cm, 垫层深度分别为 12 cm、7 cm、2 cm。第 1 阶段实验结果(图 4a~图 4d)显示: 随着左侧注水进行, 注水口腔体与水平通道高度不断增加, 而右侧排卤端腔体直径及水平通道扩展速度较慢, 基本未溶蚀; 当注水井转化为右侧时, 右侧腔体及水平通道高度增长较快, 而左侧排卤端腔体尺寸增长缓慢。这表明对接井造腔时, 腔体的扩展主要发生在注水端一侧, 而由于排卤端卤水浓度较高, 该侧腔体基本不

发生溶蚀。第2阶段实验结果(图4e~图4h)显示:上提垫层与管柱初期,由于垂直井段的顶部裸眼段直径较小,溶蚀速度较慢,腔体主要在下部扩展。随着注水时间增加,顶部裸眼段缓慢打开,溶蚀速度逐渐加快。但由于该阶段腔体溶蚀面积较大,水平通道内卤水质量浓度较高,接近饱和值320 g/L,因此该阶段底部水平通道扩展速度非常慢,基本未溶蚀。第3阶段实验结果(图4i~图4l)显示:随着左右交替注水,腔体形态也左右交替增长,最终发展为两侧对称的U形腔形态。在对接井造腔中,水平通道扩展主要发生在前期,后期基本未增长,后期主要增长的是两侧腔体的尺寸。

由于实验按照相似比原理设计,实验室与现场造腔时间、腔体体积、形状尺寸具有一定的相似比,可通过室内实验结果对现场腔体体积、形态进行计算与分析(表3)。根据实验结果推算,当现场以180 m³/h排量造腔500 d,腔体体积可达33.1×10⁴ m³,造腔速度达662 m³/d,对接井造腔速度较高。U形腔可分为两侧腔体与中部水平通道,其中水平通道体积5.7×10⁴ m³,占总体积的17.3%,通道高度15 m、宽度40 m。由于水平通道无法通过声呐仪器进行检测,其现场体积通常根据采盐体积预测,可信度低。但该实验证明水平通道也可形成一定的空间体积,可用于储气,实验结果可为老腔改造提供参考。

表3 水平对接井造腔模拟实验结果与现场推算结果对比表
Table 3 Comparison between simulation experiment results and field calculation results for horizontal docking well leaching

对比项	造腔时间/ d	排量/ (m ³ ·h ⁻¹)	两侧腔体 直径/m	两侧腔体 高度/m	水平通道 高度/m	水平通道 宽度/m	腔体 总体积/m ³	左侧腔体 体积/m ³	水平通道腔体 体积/m ³	右侧腔体 体积/m ³
实验室	0.5	18×10 ⁻⁵	0.07	0.15	0.015	0.04	331×10 ⁻⁶	136×10 ⁻⁶	57×10 ⁻⁶	138×10 ⁻⁶
现场	500.0	180	70.00	150.00	15.000	40.00	33.1×10 ⁴	13.6×10 ⁴	5.7×10 ⁴	13.8×10 ⁴

该实验时间相似比为1 000,按此比例,可将室内720 min的造腔时间推算至现场500 d,再将水平对接井排卤浓度与金坛现场单直井排卤浓度^[16]绘制在同一坐标系中,对比两种造腔方式下的排卤浓度(图5)。相对于单直井,在造腔初期水平对接井造腔排卤浓度上升速度明显较快,在短时间内即可达到饱和。实验结果显示,对接井造腔时仅需41.6 d排卤质量浓度即达到291 g/L,接近饱和状态,而单直井一般至少需要1年。同时,对接井造腔的排卤浓度明显高于单直井。在前500 d时间内,对接井造腔平均排卤质量浓度303.7 g/L,造腔速度为606.1 m³/d(排量180 m³/h);

单直井平均排卤质量浓度为232.9 g/L,造腔速度为228.1 m³/d(排量88.3 m³/h),对接井排卤浓度、造腔速度分别比单直井高30%、165.8%。可见对接井造腔具有显著的排卤浓度高、造腔速度快的优势。其原因是对接井造腔时,淡水流经路径较长,与岩盐壁面充分接触溶蚀后更容易达到饱和状态。

3.2 地层倾角

根据表2中1号、2号、3号实验结果(图6),在纯盐层中地层倾角对两侧腔体形态无影响,两侧腔体左右对称发展。但倾角对底部连通通道的形态有影响,随着倾角增大,连通通道的高度依次增大,地层倾角为0°、5°、10°的通道高度分别为1.4 cm、1.6 cm、2.0 cm。根据不同倾角下对接井造腔排卤质量浓度曲线(图7)可见,当交替注水过程中直井注水时,含倾角的对接井排卤质量浓度明显低于无倾角的实验浓度,这表明有倾角时水平通道内的卤水浓度较低,通道溶蚀扩展速度更快。由于倾角的存在,直井注入的淡水在出管口后受到浮力作用,有一部分分流进入倾斜的连通通道,导致水平通道内卤水浓度较低,溶蚀扩展速度较快;倾角越大,进入通道的淡水越多,通道溶蚀扩展程度越高。同时,前期斜井注水阶段的排卤浓度明显高于直井注水阶段。因此,前期可优先安排处于高部位的斜井注水,获得较高的排卤浓度,待后期腔体扩大后再转化为交替注水。

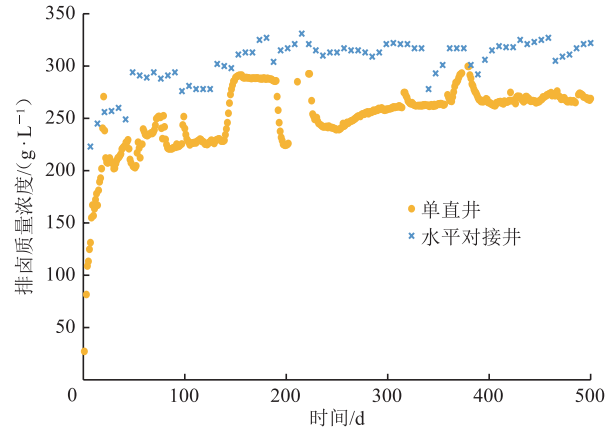


图5 实验室水平对接井造腔与现场单直井造腔排卤质量浓度对比曲线
Fig. 5 Comparison curves of brine concentrations between horizontal docking well leaching in laboratory experiment and field single vertical well setup



(a) 1号实验(倾角 0°)



(b) 2号实验(倾角 5°)



(c) 3号实验(倾角 10°)

图6 不同地层倾角下对接井造腔腔体形态图

Fig. 6 Cavern shapes from docking well leaching at different dips

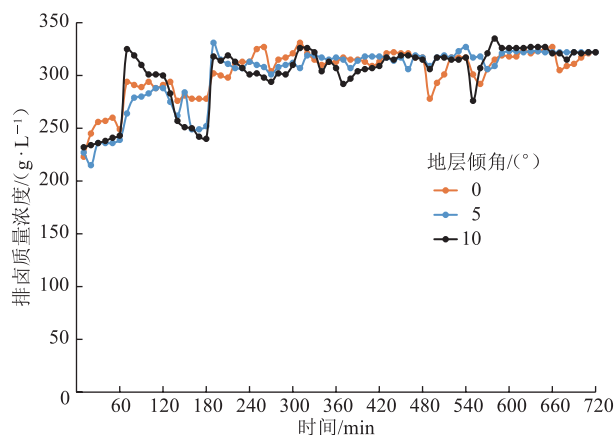


图7 不同地层倾角下对接井造腔排卤质量浓度曲线

Fig. 7 Brine concentration curves of docking well leaching at different formation dips

3.3 注水排量

为研究注水排量对腔体形态与排卤浓度的影响,开展表2中5号、4号、3号实验,其注水排量分别为1 mL/min、2 mL/min、3 mL/min,对应现场排量60 m³/h、120 m³/h、180 m³/h。结果表明,对接井造腔排量显著影响腔体尺寸与体积(图8)。排量越大,溶蚀速度越



(a) 5号实验(排量 1 mL/min)



(b) 4号实验(排量 2 mL/min)



(c) 3号实验(排量 3 mL/min)

图8 不同排量下对接井造腔腔体形态图

Fig. 8 Cavern shapes from docking well leaching at different displacements

快,两侧腔体的直径与水平通道尺寸越大。5号、4号、3号实验的腔体体积分别为275 cm³、302 cm³、335 cm³,对应现场27.5×10⁴ m³、30.2×10⁴ m³、33.5×10⁴ m³。对3组数据进行拟合,结果显示腔体体积与排量呈线性关系,不同排量下对接井造腔的排卤浓度变化规律基本相同(图9)。可见,对接井在初期短时间内即可达到饱和,中后期排卤浓度曲线接近,均在320 g/L饱和值附近。因此,当排卤浓度达到固定值(即饱和)时,造

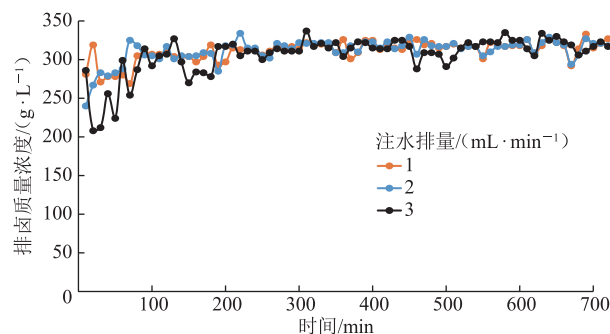


图9 不同注水排量下对接井造腔排卤质量浓度曲线

Fig. 9 Brine concentration curves of docking well leaching at different displacements

腔体积仅与排量相关,呈线性增长关系。这表明对接井造腔时,由于淡水流经路径较长,在较大排量下仍能获得饱和卤水。因此,相比单直井,对接井造腔时可尽量选择大排量,以获得更快的造腔速度。

3.4 垫层及管柱控制

为分析垫层及管柱控制对腔体形态的影响,开展表2中3号、6号、7号、8号实验(图10)。3号、7号实验同步上提垫层与管柱,上提次数分别为2次、1次,上提距离分别为5 cm、7 cm。6号、8号垫层位置控制在腔顶不动,6号实验管柱上提2次、上提距离为5 cm,8号管柱下入腔底不动。3号、7号、6号实验结果表



(a) 3号实验(管柱及垫层上提2次)



(b) 7号实验(管柱及垫层上提1次)



(c) 6号实验(管柱上提2次,垫层不提)



(d) 8号实验(管柱及垫层均不提)

图10 垫层及管柱控制对接井造腔腔体形态的影响图
Fig. 10 Influence patterns of cushion and tubing string control on cavern shapes from horizontal docking well leaching

明,垫层控制对腔体形状影响较大。3号实验垫层提2次,腔体形状控制较好,两侧腔体总体呈现椭球形;7号实验垫层提1次,垫层在中部及顶部停留时间略长,这两个位置出现较小的平顶;6号实验垫层控制在顶部不动,腔体出现了大平顶。这表明当垫层长期控制在一个位置时,由于腔体上部的卤水浓度最低,该处盐层因侧溶速度较快,不断向两侧扩张,易形成大平顶状畸形,严重时将引起垮塌事故^[17]。因此,合理增加垫层上提次数、缩短上提距离有利于形成椭球形腔体。需要特别注意的是,应避免垫层长期停留在一个位置不动,而形成大平顶影响腔体的稳定性。根据6号、8号实验可见,管柱上提控制对腔体的形态影响不大。6号、8号实验形成的腔体形状相似,两侧腔体顶部均为大平顶,而底部直径较小,这与单直井反循环造腔形成的腔体形状相似^[18]。因此,对接井造腔可尽量减少管柱的上提次数,从而不对腔体形态造成大的影响。

3.5 循环方式

开展表2中9号、10号实验分析注水循环方式对腔体形态的影响(图11)。9号实验选择直井(左)注水,斜井(右)排卤;10号实验选择斜井(右)注水,直井(左)排卤。两组实验的管柱均下入腔底位置不动,垫层上提2次,每次上提距离为5 cm。结果表明:在地层存在倾角条件下,循环方式对腔体形状的影响较大。9号实验(图11a)显示,左侧低部位直井注水时,



(a) 9号实验



(b) 10号实验

图11 不同注水循环方式下对接井造腔腔体形态图
Fig. 11 Cavern shapes from docking well leaching with different water injection circulation modes

腔体的溶蚀扩张主要发生在左侧,但水平通道及右侧排卤端也会发生少量溶蚀。10号实验(图11b)显示,右侧高部位斜井注水时,溶蚀作用全部发生在右侧,而左侧排卤井及临近的水平通道未发生溶蚀作用。由排卤浓度曲线(图12)可见,直井注水的排卤浓度明显低于斜井注水,且长期处于未饱和状态,而斜井注水的排卤绝大部分时间为饱和状态。其原因为:当水平通道存在倾角时,低部位直井注入的淡水受浮力作用一部分沿着通道进入右侧排卤井,导致排卤浓度长期未饱和,因此水平通道及右侧排卤端也会发生少量溶蚀。而高部位的斜井注水时,淡水由于密度低首先沿管柱全部向上流动,在对右侧腔体溶蚀后形成高浓度卤水,再向下流动进入水平通道,此时卤水浓度已经饱和,因此并未对左侧腔体及临近通道产生溶蚀作用。为了将盐层充分溶蚀,提高两侧盐层利用率,同时避免某一侧腔体直径过大,应避免长期采用单侧井注水,选择两侧交替注水的循环方式,保证两侧注水量相同,使两侧腔体体积、形状对等发展。

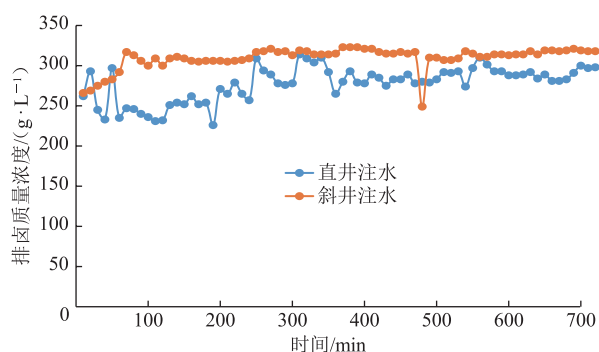


图12 不同注水循环方式下对接井造腔排卤质量浓度曲线
Fig. 12 Brine concentration curves of docking well leaching with different water injection circulation modes

4 结论

根据相似理论搭建与现场原位实物相似的实验平台,开展10组水平对接井造腔模拟实验,探究地层倾角、注水排量、垫层及管柱控制、循环方式对腔体形态与排卤浓度的影响规律,得到以下结论及建议:

1) 水平对接井交替注水垫层阻溶造腔方式是一种高效的造腔方法。可建造左右对称的U形连通腔,两侧盐腔体积较大,水平通道占总体积的17.3%。对接井排卤浓度、造腔速度分别高出单直井30%、165.8%。

2) 对接井在大排量下排卤浓度仍较高,导致造腔

体积仅与排量相关且呈线性增长关系。地层存在倾角时,水平通道高度会增加。注水循环方式会显著影响腔体形状与排卤浓度,高部位斜井注水,腔体只在注水端扩展,排卤浓度较高;低部位直井注水,两侧腔体均有溶蚀,排卤浓度略低。垫层上提控制对腔体形态影响较大,垫层长期不动,易形成平顶,合理增加垫层上提次数有利于形成椭球形腔体。管柱上提控制对腔体的形态影响不大,可尽量减少管柱的上提次数,降低井下作业成本。

3) 建议造腔初期采用高部位井注水、低部位井排卤的方式,可提高初期排卤浓度;待后期腔体扩大后再转化为交替注水。初期排量可较低,控制在 $60\sim 120\text{ m}^3/\text{h}$;后期排量可增至 $180\text{ m}^3/\text{h}$,甚至根据实际情况选择更大排量。

4) 随着中国盐穴储库建库地质条件不断变差,单井单腔造腔方式已不再适用,而水平对接井造腔具有腔体形态可控、体积大、排卤质量浓度高等优势,可作为未来造腔技术主要发展方向。该水平对接井造腔物理模拟实验由于室内实验尺度存在局限性,得出的实验结果及建议还需通过大量现场试验进一步验证。

参考文献:

- [1] 杨春和,贺涛,王同涛.层状盐岩地层油气储库建造技术研发进展[J].油气储运,2022,41(6):614-624. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.003.
YANG C H, HE T, WANG T T. Research and development progress of oil and gas storage construction technology in bedded salt rock formation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 614-624.
- [2] 刘春,高云杰,何邦玉,王元刚,周冬林,李建君.盐穴储气库造腔设计与跟踪[J].油气储运,2019,38(2):220-227. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2019.02.016.
LIU C, GAO Y J, HE B Y, WANG Y G, ZHOU D L, LI J J. Solution mining design and tracking of salt cavern gas storages[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(2): 220-227.
- [3] 王建夫,安国印,王文权,贾建超,刘春,苗胜东,等.盐穴储气库氮气阻溶造腔工艺技术及现场试验[J].油气储运,2021,40(7):802-808. DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2021.07.012.
WANG J F, AN G Y, WANG W Q, JIA J C, LIU C, MIAO S D, et al. Solution-mining-under-nitrogen technology for salt-cavern gas storage and field test[J]. Oil & Gas Storage and

- Transportation, 2021, 40(7): 802-808.
- [4] WANG J F, AN G Y, SHAN B D, WANG W Q, JIA J C, WANG T T, et al. Parameter optimization of solution mining under nitrogen for the construction of a gas storage salt cavern[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 91: 103954. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103954.
- [5] 陈涛,施锡林,李金龙,杨春和,刘继芹,李银平,等.盐穴储气库水平井造腔模拟试验[J].油气储运,2019,38(11):1257-1264. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.11.009.
- CHEN T, SHI X L, LI J L, YANG C H, LIU J Q, LI Y P, et al. Simulation test on the horizontal-well leaching of salt-cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(11): 1257-1264.
- [6] 张鹏,张文广,卢青峰.水平对接盐井提高矿产资源综合利用率技术研究[J].中国井矿盐,2017,48(5):28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0335.2017.05.011.
- ZHANG P, ZHANG W G, LU Q F. Technical research on horizontal joint salt wells to increase comprehensive utilization rate of mineral resources[J]. China Well and Rock Salt, 2017, 48(5): 28-31.
- [7] 付晓飞,胡汉正,覃丽君,梁文川.江汉潜江构造盐矿水平井开采分析研究[J].广东石油化工学院学报,2020,30(4):15-18,22. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2562.2020.04.004.
- FU X F, HU H Z, QIN L J, LIANG W C. Analysis of horizontal well mining in Jiangnan Qianjiang structure salt mine[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2020, 30(4): 15-18, 22.
- [8] 刘海翔,刘春生,胡汉月,刘志强,陈晓林.土耳其天然碱矿水平对接井水溶开采技术回顾[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):7-13. DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.08.003.
- LIU H X, LIU C S, HU H Y, LIU Z Q, CHEN X L. Review on trona solution mining with intersected well sets in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(8): 7-13.
- [9] 朱培,刘兆成,郑瑜.淮安地区岩盐水溶开采溶腔形态及其影响因素浅析[J].中国井矿盐,2020,51(5):6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0335.2020.05.003.
- ZHU P, LIU Z C, ZHENG Y. Analysis on structural configurations and influence factors of the dissolved salt cavity with solution mining in huaian[J]. China Well and Rock Salt, 2020, 51(5): 6-9.
- [10] 丁国生,王云,完颜祺琪,王皆明,胥洪成,李康,等.不同类型复杂地下储气库建库难点与攻关方向[J].天然气工业,2023,43(10):14-23. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2023.10.002.
- DING G S, WANG Y, WANYAN Q Q, WANG J M, XU H C, LI K, et al. Construction difficulties and research directions of various complex UGSs[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(10): 14-23.
- [11] 唐海军,李晓康,刘伟,张治鑫.盐穴储气库水平井造腔扩展规律试验探究[J].地下空间与工程学报,2019,15(3):762-768.
- TANG H J, LI X K, LIU W, ZHANG Z X. Experimental study on cavity expansion of horizontal well in salt caverns gas storage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 762-768.
- [12] 王文权,苗胜东,邢红艳,张强,杨杰,程煜.注水排量对水平井造腔腔体形态影响实验研究[J].石油钻采工艺,2020,42(4):476-480. DOI: 10.13639/j.odpt.2020.04.017.
- WANG W Q, MIAO S D, XING H Y, ZHANG Q, YANG J, CHENG Y. Experimental study on the influence of water injection displacement on the shape of the cavity built by horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 476-480.
- [13] 周冬林,焦雨佳,杜玉洁,王立东.水平对接采卤井腔体溶蚀形态分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(1):142-148. DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2019.05.20.01.
- ZHOU D L, JIAO Y J, DU Y J, WANG L D. Morphological analysis of cavern leaching of horizontally butted wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(1): 142-148.
- [14] 康延鹏,焦雨佳,王建夫,张玲,吴张帆.盐穴储气库水平腔溶蚀特征实验[J].油气储运,2022,41(9):1061-1068. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.09.009.
- KANG Y P, JIAO Y J, WANG J F, ZHANG L, WU Z F. Experiment on horizontal leaching characteristics of salt cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(9): 1061-1068.
- [15] 薛雨,王元刚,张新悦.盐穴地下储气库对老腔改造工艺技术[J].天然气工业,2019,39(6):131-136. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.06.015.
- XUE Y, WANG Y G, ZHANG X Y. A technology of reconstructing salt cavern underground gas storages by use of the old chambers of those existing convection wells[J].

(下转第 951 页)

- X L. Establishment and analysis of PFD model based on proof test strategy[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(2): 128-134.
- [15] 史建锋. 安全仪表系统(SIS)安全完整性等级(SIL)评估验证必要性[J]. 中国氯碱, 2019(5): 37-38. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1785.2019.05.011.
- SHI J F. Necessity of safety instrument system (SIS) safety integrity level (SIL) assessment and verification[J]. China Chlor-Alkali, 2019(5): 37-38.
- [16] 杨艺. 输气站场控制系统 SIL 分析与应用研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- YANG Y. SIL analysis and application research of gas transmission station control system[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [17] 王俊, 丁兰蓉. 安全完整性等级 SIL 的验证方法[J]. 化工与医药工程, 2015, 36(2): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1008-455X.2015.02.016.
- WANG J, DING L R. Method of safety integrity level validation[J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2015, 36(2): 53-57.
- [18] 李娜, 孙文勇, 宁信道. HAZOP、LOPA 和 SIL 方法的应用分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(5): 101-106. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2012.05.019.
- LI N, SUN W Y, NING X D. The application of HAZOP, LOPA and SIL analytical method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(5): 101-106.
- (编辑: 刘朝阳)
- 基金项目:** 国家重点研发计划“跨地域复杂油气管网安全高效运行状态监测传感系统及应用”, 2022YFB3207600.
- 作者简介:** 刁宇, 男, 1988 年生, 高级工程师, 2014 年硕士毕业于东北石油大学油气储运工程专业, 现主要从事油气管道智能决策与控制、功能安全方向的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道 51 号, 065000。电话: 0316-2073305。Email: diaoyu@pipechina.com.cn
- Received: 2023-10-09
 - Revised: 2023-11-22
 - Online: 2024-05-09



(上接第 935 页)

- Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 131-136.
- [16] 王建夫, 王娜, 许开志, 夏敬亮. 盐穴储气库盐腔有效体积计算方法[J]. 油气储运, 2021, 40(8): 909-913. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.08.011.
- WANG J F, WANG N, XU K Z, XIA J L. Calculation method for effective cavity volume of salt cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(8): 909-913.
- [17] WANG T T, YANG C H, LI J J, LI J L, SHI X L, MA H L. Failure analysis of overhanging blocks in the walls of a gas storage salt cavern: a case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(1): 125-137. DOI: 10.1007/s00603-016-1102-1.
- [18] 刘伟, 李德鹏, 高丽, 万继方, 李林, 唐海军, 等. 盐穴能源储库氮气阻溶造腔气垫控制理论研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2205-2220. DOI: 10.16285/j.rsm.2023.0120.
- LIU W, LI D P, GAO L, WAN J F, LI L, TANG H J, et al. Control theory of gas blanket in energy storage salt cavern construction with nitrogen dissolution inhibition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2205-2220.
- (编辑: 刘朝阳)
- 基金项目:** 中国石油天然气集团有限公司科技项目“盐穴储库复杂介质地震响应规律及表征方法”, 2023DJ8307; 中国石油天然气股份有限公司科技项目“盐穴储气库高效造腔与老腔改造利用关键技术研究”, 2023YQX10603.
- 作者简介:** 王建夫, 男, 1989 年生, 工程师, 2017 年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气田开发专业, 现主要从事盐穴储气库造腔工艺技术研发工作。地址: 江苏省镇江市润州区南徐大道 60 号商务中心 A 区 D 座, 212000。电话: 18531721971。Email: wjf_jscqk@petrochina.com.cn
- Received: 2023-12-05
 - Revised: 2024-02-18
 - Online: 2024-05-14

