

文章编号: 1000-8241(2017)09-1035-07

盐穴储气库巨厚夹层垮塌控制工艺

王元刚 陈加松 刘春 李建君 薛雨 周冬林 王晓刚

中国石油西气东输管道公司储气库管理处工艺技术研究所

摘要: 在盐穴储气库的建设过程中,巨厚夹层的存在不仅使造腔难度大幅增大,而且在不同程度上影响腔体形状。为了充分利用盐层,对巨厚夹层的垮塌过程及其控制工艺进行研究。以国内某储气库 12 m 的厚夹层为例,选取 2 口井进行现场试验。结果表明:巨厚夹层作为直接腔体顶板时,出现整体失稳垮塌的概率较小;在巨厚夹层达到一定跨度后,上下同时造腔,井眼处易产生局部破坏,从而引起夹层的大面积垮塌。结合现场数据分析可得:通过控制井下工艺使厚夹层跨度达到 60 m 时,既可以使厚夹层大面积垮塌,又可以减小井下工艺的复杂程度。研究结果对盐穴储气库厚夹层处理具有一定借鉴的意义。(图 8,表 1,参 20)

关键词: 盐穴储气库;巨厚夹层;局部破坏;腾空跨度

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.09.009

网络出版时间: 2017-6-13 9:19:04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20170613.0919.002.html>

The technology for controlling the collapse of thick interlayer during the construction of salt-cavern gas storage

WANG Yuangang, CHEN Jiasong, LIU Chun, LI Jianjun, XUE Yu, ZHOU Donglin, WANG Xiaogang
Gas Storage Technology Research Institute of Gas Storage Project Department, PetroChina West-to-East Gas Pipeline Company

Abstract: The existence of thick interlayer makes the salt-cavern leaching more difficult during the construction of salt-cavern gas storage, and impact the cavern shape in different degrees. In order to make full use of salt beds, therefore, it is necessary to study the collapse process of thick interlayer and its control technologies. In this paper, an interlayer of 12 m thick in one salt-cavern gas storage in China was taken as the example for study, and two wells were selected for field tests. It is indicated that the probability of integral instability and collapse is lower if the thick interlayer is taken as the direct roof of cavern. If the diameter of the thick interlayer is large enough, partial damage tends to occur along the wellbore when solution mining is carried out simultaneously above and below the interlayer, and consequently the interlayer will be collapsed in the large area. It is shown from the analysis on the field data that the thick interlayer with diameter of 60 m by controlling the downhole technologies can not only lead to the collapse of thick interlayer in the large area, but also reduce the complexity of the downhole process. The research results can be used as the reference for processing the thick interlayer of salt-cavern gas storage. (8 Figures, 1 Table, 20 References)

Key words: salt-cavern gas storage, thick interlayer, partial damage, collapse diameter

目前,我国盐穴储气库建设大多采用单井阻溶剂对流水溶造腔^[1],从地面注入低浓度卤水,流动的卤水不断溶蚀盐岩,腔体体积不断扩大,同时通过注入阻溶剂阻止盐岩上溶控制腔体形状。我国适于建造盐穴储气库的盐层中含有较多的难溶夹层,在造腔过程中将逐渐成为腔体的直接顶板或悬挑于腔内^[2]。

班凡生等^[3-7]针对薄夹层建立了不同的理论模型,对薄夹层的垮塌机理及其垮塌控制技术进行了研究。西气东输外围储气库建库层段含有 10 m 以上的巨厚夹层,且夹层中不溶物含量达到 95% 以上,其垮塌性质与薄夹层不同,因此有必要研究巨厚夹层的垮塌过程。若巨厚夹层垮塌跨度较小,则将在夹层上部

形成二次造腔,造成盐岩体积大量损失,最终影响腔体库容。根据现场造腔经验,夹层垮塌后将造腔管柱砸弯或砸断的情况时有发生,使井下工艺难度增加。在此,通过建立理论模型研究巨厚夹层的垮塌方式,选取造腔段存在12 m巨厚夹层的2口井分析其夹层垮塌的控制过程,并对类似厚夹层垮塌控制工艺提出建议,以期对后续盐穴储气库巨厚夹层的垮塌控制工艺提供有益参考。

1 巨厚夹层垮塌性分析

在卤水浸泡过程中,注入水从夹层表面浸入夹层,夹层所含盐岩颗粒遇水呈蜂窝状溶解,表面产生微小裂隙^[8],岩石力学强度降低,使得夹层剥落^[9],夹层中盐岩含量越高,越容易剥落。当夹层含盐量较低时,经过卤水浸泡后巨厚夹层仍能基本保持原有骨架,抗拉强度无明显变化,内部无明显溶蚀现象^[10],因此对于厚度超过10 m的难溶巨厚夹层,在受卤水浸泡过程中只有与卤水直接接触的部分会受剥蚀作用而脱落,而大部分厚夹层未受卤水影响,后续理论模型可以近似认为巨厚夹层整体力学性质短时间内不受卤水影响。

1.1 巨厚夹层作为直接顶板

国内的盐腔稳定性分析方法已经成熟^[11-15]。袁焱等^[16-17]认为夹层破坏主要考虑局部破坏准则和整体失稳破坏准则,针对巨厚难溶夹层建立了稳定性评价模型,模拟发现厚夹层出现局部应力破坏点,则厚夹层垮塌形式符合局部破坏准则;反之,则厚夹层垮塌形式符合整体失稳破坏准则。

根据造腔经验,为了保证储气库长期安全运行,腔体最大直径的参考值为80 m。厚夹层下部腔体空间足够大,溶蚀上覆盐层时,造腔管柱需要下入夹层下部,当前腔体直径会继续扩大,为了保证腔体最大直径不超过参考值,厚夹层下部需要预留一定的溶蚀空间,因此,厚夹层的最大腾空跨度按70 m考虑,采用ABAQUS软件模拟厚夹层作为直接顶板时腾空跨度分别为20 m、40 m、60 m、70 m的稳定性。由于平面应变模型模拟的腔体形状是对称的,因此计算时只需计算一半腔体即可,为了得到腔体附近应力场的变化细节,在腔壁附近进行网格加密。

模拟结果显示即使厚夹层腾空跨度达到70 m时,也未出现应力破坏点(图1)。初步判断在盐穴储气库

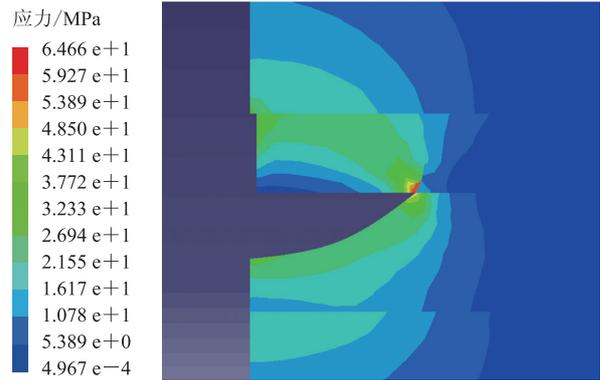


图1 巨厚夹层跨度为70 m时的应力分布图

造腔过程中,厚夹层作为直接顶板时存在整体失稳垮塌的可能性较小,并且夹层的厚度越大,出现整体失稳的概率越小。

1.2 巨厚夹层悬空

厚夹层悬空时顶底面与卤水充分接触,且厚夹层上下同时参与造腔,使其在悬空状态下垮塌。施锡林等^[18-20]提出的极限跨度概念目前仍被广泛应用,认为达到极限跨度后夹层是可以垮塌的。极限跨度的表达式为:

$$D=2h\sqrt{\frac{1.224E}{K\sigma_r(1-\mu^2)}} \quad (1)$$

式中: D 为夹层垮塌的极限跨度,m; h 为夹层厚度,m; E 为夹层弹性模量,GPa; K 为修正系数, $K\geq 1$; σ_r 为夹层所在深度处的水平向地应力,MPa; μ 为夹层泊松比,通过卤水浸泡条件下的室内岩心力学实验获得。

以某储气库为例,该储气库造腔层段含有巨厚夹层,将其地层参数(表1)代入式(1),可得该厚夹层在悬空状态下的极限跨度约为10 m。

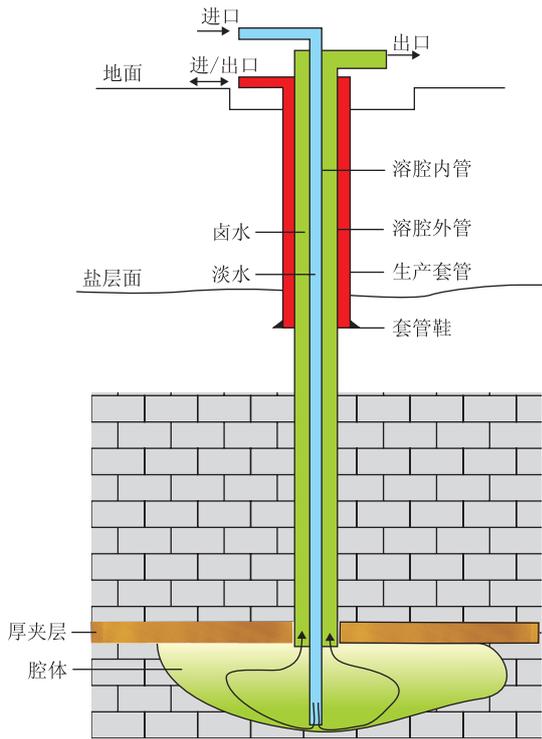
表1 某储气库主要地层参数

h/m	E/GPa	μ	K	σ_r/MPa
12	7.48	0.32	1.2	49.95

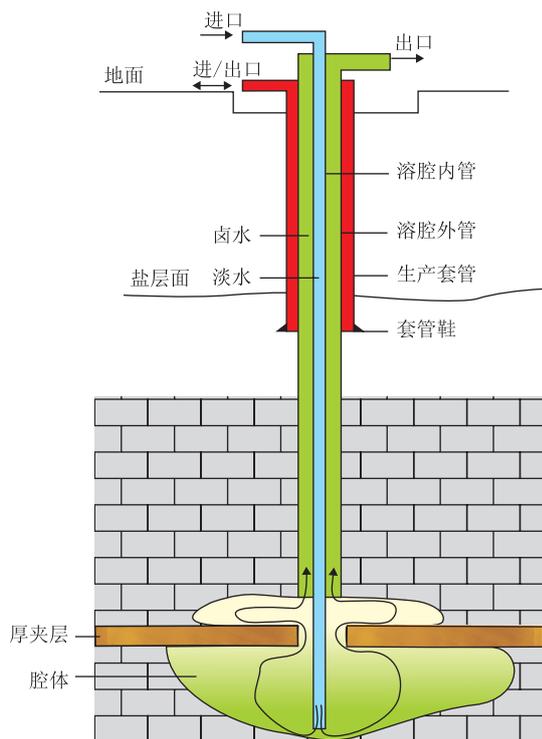
1.3 现场巨厚夹层处理

根据上述分析,巨厚夹层作为直接顶板时的失稳垮塌概率较小;悬挑于腔内的跨度约为10 m时则很容易失稳引起大规模垮塌,若巨厚夹层垮塌时下部腔体体积较小,则会造成夹层下部盐岩体积大量浪费。为了充分利用夹层底部盐岩,现场巨厚夹层的处理(图2)可以分2步进行:

(1)厚夹层底部造腔。将阻溶剂控制在厚夹层以下进行造腔,充分利用厚夹层下部盐层,该阶段厚夹层



(a) 巨厚夹层底部造腔



(b) 巨厚夹层顶、底同时造腔

图2 现场巨厚夹层处理示意图

为腔体直接顶板,由于厚夹层作为直接顶板时出现失稳垮塌的概率较小,因此该阶段结束时厚夹层的腾空跨度应该尽可能大。

(2) 厚夹层顶、底同时造腔。将造腔外管调至夹层顶部以上 3~5 m 溶蚀夹层顶部盐层,内管调至腔底不

溶物以上 2~3 m 进行造腔,进一步扩大厚夹层下部腔体体积的同时,使厚夹层处于悬空状态,促使厚夹层大规模垮塌。

2 实例分析

国内某盐穴储气库 A、B 井建库层段含有 12 m 巨厚夹层,夹层段埋深约 1 600 m,平均不溶物含量在 97% 以上,属于难溶巨厚夹层。

2.1 A 井

A 井巨厚夹层垮塌前共有 3 个造腔阶段,各阶段的造腔方案及腔体形状如下:

(1) 巨厚夹层下部正循环造腔。为了观察厚夹层作为直接顶板时造腔的腔体形状,在腔体体积较小时进行腔体形状测量。测量结果显示该阶段结束时厚夹层的腾空跨度约 30 m,阻溶剂界面控制较好,厚夹层无垮塌迹象,初步证明厚夹层作为直接顶板时的稳定性较好,出现失稳垮塌的概率较小(图 3)。

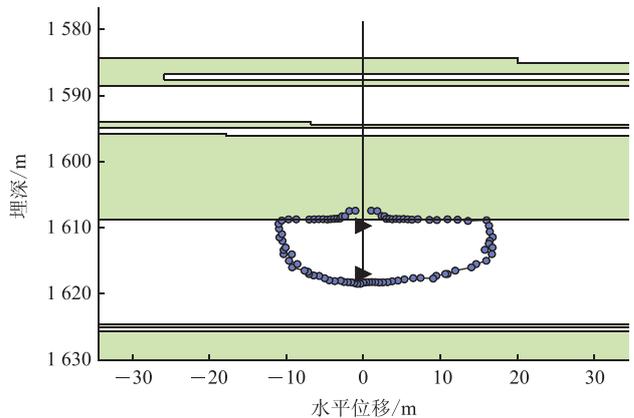


图3 A 井第 1 造腔阶段结束时的腔体形状

(2) 厚夹层下部反循环造腔,最大限度增加厚夹层腾空跨度。第 1 阶段厚夹层未出现垮塌,表明腾空跨度可以继续增加。声呐结果显示,厚夹层腾空跨度为 60 m 时,未出现失稳垮塌。

该阶段由于反循环造腔,厚夹层底部与卤水充分接触,除夹层底部受到卤水浸泡作用溶解剥落后,厚夹层主体部分未与卤水接触,结构完好,表明难溶巨厚夹层受卤水浸泡发生失稳垮塌的概率较小(图 4)。

(3) 巨厚夹层悬空垮塌。将内管调整至厚夹层底部注水,外管调整至厚夹层上部排卤,当阶段产盐量为 1 400 m³ 时,排卤盐度便下降至 50 g/L(图 5),初步判断夹层大面积垮塌将管柱砸断,卤水循环出现短流程。

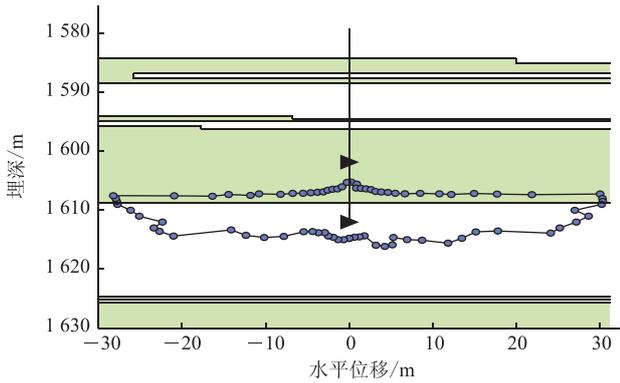


图4 A井第2造腔阶段结束时的腔体形状

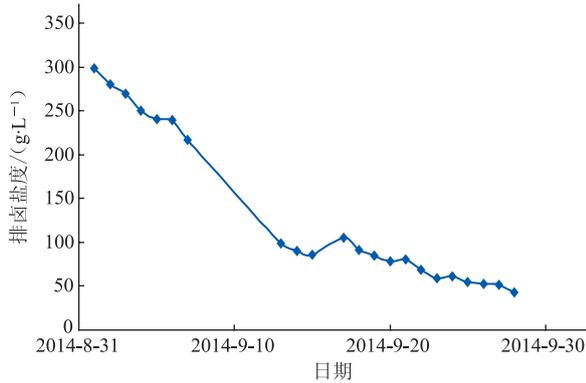


图5 A井第3造腔阶段的排卤盐度曲线

声呐结果显示, 井眼周围厚夹层大面积垮塌, 但是腔体边缘处夹层未垮塌(图6)。

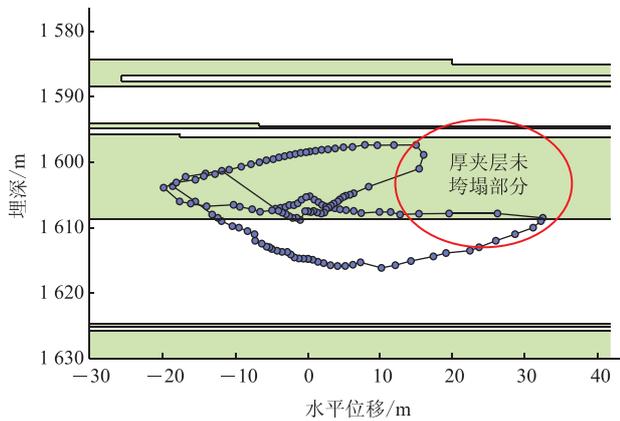
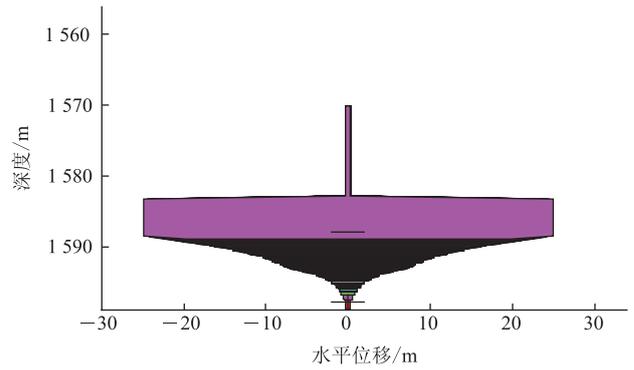


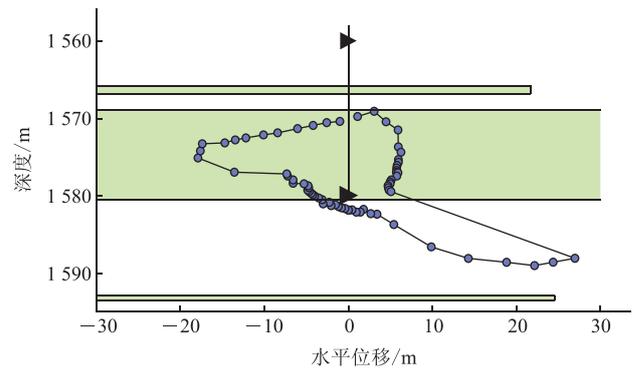
图6 A井巨厚夹层垮塌阶段的腔体形状

2.2 B井

B井地层条件与A井类似, 在第1造腔阶段后期, 阻溶剂界面失控从厚夹层底部上升至夹层顶部, 继续产盐至1000 m³ 时进行声呐测腔。声呐结果显示, 厚夹层发生大面积垮塌, 腔体最大直径约51 m, 由于夹层垮塌的不均匀性, 腔体部分形状无法通过声呐检测到, 因此, B井厚夹层垮塌前的腾空跨度很可能大于51 m(图7)。



(a)垮塌前



(b)垮塌后

图7 B井巨厚夹层垮塌前的腔体预测形状及垮塌后的腔体形状

2.3 垮塌原因分析

对A、B两井的造腔数据进行分析, 厚夹层作为直接顶板时腾空跨度达到50~60 m, 也未出现大规模垮塌, 说明整体失稳垮塌的可能性较小; 当阻溶剂界面上升至厚夹层顶部时, 在造腔体积基本未增加的情况下, 夹层大面积垮塌, 因此厚夹层垮塌时夹层悬空跨度基本为0, 这是由于裸眼段卤水流速较大, 受卤水流速影响产生局部应力破坏, 导致厚夹层大面积垮塌。

当卤水排量 Q 为定值时, 不同卤水截面处的流速为:

$$v_R = Q / (2\pi R^2) \quad (2)$$

$$v_0 = Q / [\pi(R_0^2 - r_0^2)] \quad (3)$$

式中: v_R 为球面半径 R 处的卤水截面流速, m/s; v_0 为厚夹层中裸眼段卤水流速, m/s; R_0 为井眼裸眼半径, m; r_0 为造腔内管半径, m。

在现场实际工况中, 卤水排量一般为100 m³/h, 由流速公式可知, 远离裸眼处的流速可以忽略不计。巨厚夹层不溶物含量达到97%且不溶于水, 经过卤水浸泡后厚夹层仍能基本保持原有骨架, 抗拉强度无明显变化, 内部无明显溶蚀现象。阻溶剂界面上移后, 厚夹层不溶物含量较高, 难溶于水, 裸眼段井径未扩大, 流

速最大可以达到 1.524 km/h, 井眼附近由于卤水冲刷等原因造成应力集中而产生局部破坏, 引起厚夹层大规模垮塌。

3 建议

3.1 作为直接顶板时选择最优腾空跨度

通过理论分析与现场试验发现, 巨厚夹层出现整体失稳垮塌的概率较小, 厚夹层达到极限跨度后, 可以在夹层上下同时造腔使厚夹层悬空引起垮塌。若夹层腾空跨度较小时垮塌, 残渣在井眼附近大量堆积, 后续造腔管柱不能下入腔底, 夹层下部盐岩未充分溶蚀, 盐层利用率较低, 并且厚夹层跨度较小, 溶蚀上部盐层时, 很容易形成二次造腔, 夹层上部盐岩体积大量损失(图 8)。因此单纯从理论角度分析, 厚夹层垮塌前的腾空跨度越大越好。

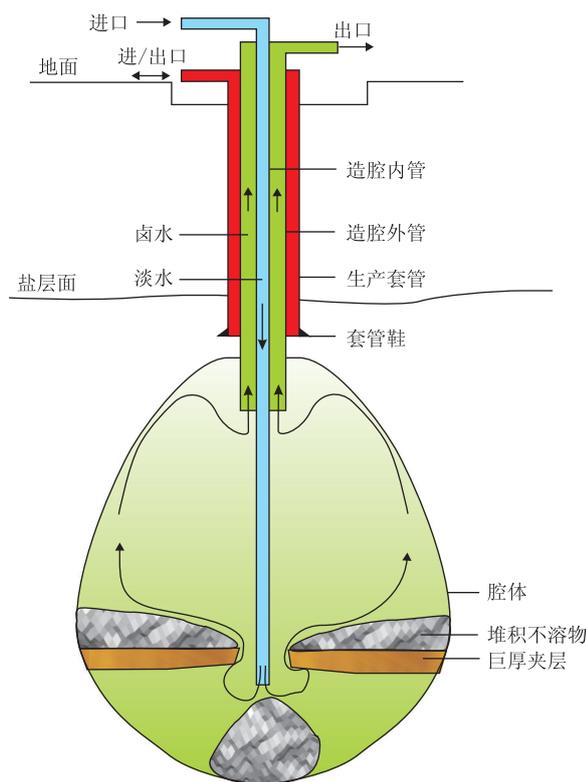


图 8 巨厚夹层上部二次造腔示意图

但通过 A、B 井现场试验可知, 随着厚夹层腾空跨度增大, 阻溶剂控制难度也增大, 如果阻溶剂界面失控, 厚夹层将很快大规模垮塌, 导致造腔管柱被砸弯或砸断, 增加井下工艺困难。

A 井夹层跨度达到 60 m 后, 裸眼段不溶物小部分脱落, 阻溶剂界面缓慢上升, 若后续继续造腔, 则阻溶

剂界面很有可能失控, 引起夹层提前垮塌。B 井阻溶剂界面失控, 厚夹层垮塌后的腔体最大直径为 51 m, 由于厚夹层垮塌的不均匀性, 可以判断厚夹层在垮塌前的跨度大于 51 m。根据 A 井造腔经验, 厚夹层在跨度达到 60 m 时是可以维持阻溶剂界面稳定的。综合分析 A、B 井巨厚夹层的垮塌过程, 当巨厚夹层的腾空跨度约为 60 m 时为最优腾空跨度, 既可以调整管柱在厚夹层上下同时造腔, 保证厚夹层大面积垮塌, 又降低了井下工艺的复杂程度。

3.2 严格控制阻溶剂界面

在现场造腔过程中, 随厚夹层腾空跨度的增加, 阻溶剂界面控制难度相应增加, 随时有界面失控引起裸眼段局部应力破坏使厚夹层提前垮塌的风险。厚夹层作为直接顶板时, 夹层底部裸眼段受卤水浸泡, 小部分剥落, 阻溶剂界面很容易上移, 因此现场垮塌前, 必须严格控制阻溶剂界面, 定期注入阻溶剂使其位于厚夹层下部, 若有必要应该检测阻溶剂的界面位置。

4 结论

(1) 巨厚夹层作为腔体直接顶板时, 稳定性较好, 发生整体失稳垮塌的概率较小。

(2) 巨厚夹层在卤水的充分浸泡过程中, 夹层底部小部分与卤水直接接触部分易受到溶蚀作用而产生裂缝剥落, 未与卤水直接接触部分受影响较小, 夹层结构完整。

(3) 厚夹层跨度达到一定值后, 在厚夹层顶、底同时造腔, 裸眼段由于卤水冲刷等原因会产生局部应力破坏, 引起厚夹层大面积垮塌。

(4) 以 A、B 井处理造腔层段 12 m 厚夹层为例, 为了保证厚夹层垮塌前腔体体积足够大且减小井下工艺的复杂程度, 可以在厚夹层腾空跨度约为 60 m 时调整管柱, 在厚夹层上下同时造腔使其大面积垮塌, 研究成果对后续巨厚夹层的处理具有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 胡开君, 巴金红, 王成林. 盐穴储气库造腔井油水界面位置控制方法[J]. 石油化工应用, 2014, 33(5): 59-61.
- HU K J, BA J H, WANG C L. The controlling of the oil-water interface in salt gas storage leaching well[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(5): 59-61.

- [2] 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.
LI J J, WANG L D, LIU C, et al. Factors affecting cavities distortion of Jintan Salt Cavern Gas Storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(3):269-273.
- [3] 班凡生,袁光杰,赵志成.盐穴储气库溶腔夹层应力分布规律[J].科技导报,2014,32(16):45-48.
BAN F S, YUAN G J, ZHAO Z C. Stress distribution rules of interlayer in salt caverns gas storage[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(16):45-48.
- [4] 袁光杰,班凡生,赵志成.盐穴储气库夹层破坏机理研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(3):675-679.
YUAN G J, BAN F S, ZHAO Z C. Study on collapsing mechanism of interlayer in salt caverns gas storage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3):675-679.
- [5] 郭凯,李建君,郑贤斌.盐穴储气库造腔过程夹层处理工艺——以西气东输金坛储气库为例[J].油气储运,2015,34(2):162-166.
GUO K, LI J J, ZHENG X B. Interlayer treatment process in cavity building for salt cavern gas storage - A case study of Jintan Gas Storage of West-to-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(2):162-166.
- [6] 班凡生,袁光杰,申瑞臣.多夹层盐穴腔体形态控制工艺研究[J].石油天然气学报,2010,32(1):362-364.
BAN F S, YUAN G J, SHEN R C. Research on multi-interbed salt cavern shape control technology[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(1):362-364.
- [7] 徐孜俊,班凡生.多夹层盐穴储气库造腔技术问题及对策[J].现代盐化工,2015,4(2):10-14.
XU Z J, BAN F S. Engineering technology difficulties and countermeasures of solution mining of multi-interlayer rock salt gas storage[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2015, 4(2):10-14.
- [8] 任松,文永江,姜德义,等.泥岩夹层软化试验研究[J].岩土力学,2013,34(11):3110-3116.
REN S, WEN Y J, JIANG D Y, et al. Experimental research on softening in mudstone interlayer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11):3110-3116.
- [9] 姜德义,张军伟,陈结.岩盐储库建腔期难溶夹层的软化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):865-873.
JIANG D Y, ZHANG J W, CHEN J. Research on softening law of insoluble interlayer during salt cavern building[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5):865-873.
- [10] 施锡林,李银平,杨春和,等.卤水浸泡对泥质夹层抗拉强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11):2301-2308.
SHI X L, LI Y P, YANG C H, et al. Test study of influence of brine on tensile strength of muddy intercalation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11):2301-2308.
- [11] KERRY L, VRIES D, KIRBY D, et al. Salt damage criterion proof-of-concept research[R]. Pittsburgh: National Energy Technology Laboratory of United States Department of Energy, 2002:40-58.
- [12] 吴文,侯正猛,杨春和.盐岩中能源(石油和天然气)地下储存库稳定性评价标准研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14):2497-2505.
WU W, HOU Z M, YANG C H. Investigations on evaluating criteria of stabilities for energy (petroleum and natural gas) storage caverns in rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14):2497-2505.
- [13] 梁卫国,杨春和,赵阳升.层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):22-27.
LIANG W G, YANG C H, ZHAO Y S. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1):22-27.
- [14] 李建君,陈加松,吴斌,等.盐穴地下储气库盐岩力学参数的校准方法[J].天然气工业,2015,35(7):96-102.
LI J J, CHEN J S, WU B, et al. A calibration method for salt rock mechanics parameters of salt-cavern gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(7):96-102.
- [15] 杨海军,郭凯,李建君.盐穴储气库单腔长期注采运行分析及注采压力区间优化——以金坛盐穴储气库西2井腔体为例[J].油气储运,2015,34(9):945-950.
YANG H J, GUO K, LI J J. Analysis on long-term operation and interval optimization of pressure for single cavity injection/production in underground salt cavern gas storage - Taking the cavity of Well Xi-2 in salt cavern gas storage in Jintan as an example[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(9):945-950.

- [16] 袁焱. 层状盐岩储库夹层垮塌的理论分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(2): 14-20.
YUAN C. Theoretical analysis of the interlayer collapse in solution mining of the salt cavern[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(2): 14-20.
- [17] 施锡林, 李银平, 杨春和, 等. 多夹层盐矿油气储库水溶建腔夹层垮塌控制技术[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1957-1963.
SHI X L, LI Y P, YANG C H, et al. Collapse control technology for interbeds in solution mining for oil/gas storage in multi-interbedded salt formation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1957-1963.
- [18] 施锡林, 李银平, 杨春和, 等. 盐穴储气库水溶造腔夹层垮塌力学机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3615-3620.
SHI X L, LI Y P, YANG C H, et al. Research on mechanical mechanism of interlayer collapse in solution mining for salt cavern gas storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3615-3620.
- [19] 郑雅丽, 赵艳杰, 丁国生, 等. 厚夹层盐穴储气库扩大储气空间造腔技术[J]. 石油勘探与开发, 2016, 44(1): 1-7.
ZHENG Y L, ZHAO Y J, DING G S, et al. Solution mining technology of enlarging space for thick-sandwich salt cavern storage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 44(1): 1-7.
- [20] 屈丹安, 施锡林, 李银平. 盐穴储气库建槽工程实践与顶板极限跨度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊2): 3703-3709.
QU D A, SHI X L, LI Y P. Engineering practice and analysis of limit roof diameter in building sump of salt cavern for gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3703-3709.
(收稿日期: 2016-12-16; 修回日期: 2017-06-12; 编辑: 刘朝阳)

基金项目: 中国石油天然气集团公司储气库重大专项“地下储气库关键技术研究与应用”, 2015E-40。

作者简介: 王元刚, 男, 1986年生, 工程师, 2012年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发工程专业, 现主要从事盐穴储气库造腔技术研究。地址: 江苏省镇江市润州区南徐大道商务A区D座中石油西气东输管道公司储气库管理处, 212000。电话: 13218370363, Email: wangyuangang@petrochina.com.cn

(上接第 1034 页)

- ZOU Y F, DING M, ZHANG P. The research of the oil recovery rate and recovery efficiency performance test method for skimmer[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(S1): 920-927.
- [17] 李鑫, 储胜利, 胡国林. 《船用吸油毡》标准性能指标分析与完善建议[J]. 油气田环境保护, 2016, 26(1): 25-27.
LI X, CHU S L, HU G L. Analysis and improvement suggestions for the performance indices in the standard *Sorbents for ship*[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2016, 26(1): 25-27.
- [18] 孙涛. 土壤原油污染处理研究进展[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(1): 42-43.
SUN T. Research progress of soil crude oil pollution treatment[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2015, 34(1): 42-43.
- [19] 姜鑫涛, 蓝竹俊, 竺柏康, 等. 吸油毡的吸油性能及其应用研究[J]. 中国水运, 2015, 15(4): 322-324.
JIANG X T, LAN Z J, ZHU B K, et al. Oil absorption property and application of the sorbents[J]. China Water Transport, 2015, 15(4): 322-324.
- [20] 陈玲, 马春燕, 奚旦立, 等. 丙纶吸油毡吸附处理印染厂含油废水试验研究[J]. 净水技术, 2009, 28(1): 38-42.
CHEN L, MA C Y, XI D L, et al. Adsorbing treatment of oily wastewater from printing and dyeing mill with polypropylene felt[J]. Water Purification Technology, 2009, 28(1): 38-42.
(收稿日期: 2016-08-05; 修回日期: 2017-06-27; 编辑: 李华)

基金项目: 国家重大专项子课题“油气管道应急抢修技术及装备研制”, 2016YFC0802106。

作者简介: 郑颖, 女, 1972年生, 会计师, 2008年毕业于中国农业大学会计专业, 现主要从事管道科研财务管理工作。地址: 河北省廊坊市金光道44号, 065000。电话: 13931665959, Email: 717246270@qq.com