

# 多夹层盐矿油气储库水溶建腔夹层垮塌控制技术

施锡林<sup>1</sup>, 李银平<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 屈丹安<sup>2,3</sup>, 杨海军<sup>3</sup>, 马洪岭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程  
教育部重点实验室, 重庆 400044; 3. 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道公司储气库项目部, 江苏 常州 213200)

**摘要:** 针对多夹层盐矿油气储库水溶建腔过程中遇到的难溶夹层处理的重大技术难题, 提出了难溶夹层直接顶板极限跨度的计算方法, 揭示了腔体溶蚀策略对夹层垮塌的影响规律, 给出了调控难溶夹层垮塌时间的若干措施。综合相关研究成果并结合单井对流水溶建腔工艺, 提出了适用于多夹层盐矿水溶建腔的难溶夹层垮塌控制技术。并以金坛储气库某腔体为例阐述了夹层垮塌控制在增大腔体有效容积中的应用。

**关键词:** 多夹层盐矿; 油气储库; 水溶建腔; 难溶夹层; 崩塌控制

中图分类号: TD313 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1957-07

作者简介: 施锡林(1983-), 男, 博士, 主要从事石油天然气地下储备方面的研究工作。E-mail: xilinshi@163.com。

## Collapse control technology for interbeds in solution mining for oil/gas storage in multi-interbedded salt formation

SHI Xi-lin<sup>1</sup>, LI Yin-ping<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1,2</sup>, QU Dan-an<sup>2,3</sup>, YANG Hai-jun<sup>3</sup>, MA Hong-ling<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. West-to-East Gas Pipeline Company Gas Storage Project Department, PetroChina Company Limited, Changzhou 213200, China)

**Abstract:** In order to solve the technical problem of how to deal with the insoluble interbeds during solution mining for oil/gas storage in multi-interbedded salt formation, a method for calculating the limit span of interbed roof is presented. The influence laws of salt cavern leaching tactics on interbed collapse are revealed, and several technical measures to regulate and control collapse time of interbeds are given. According to the relevant research results and considering the technical characteristics of solution mining by means of the single well convection method, the collapse control technology for interbeds in solution mining for oil/gas storage in multi-interbedded salt formation is proposed. Finally, the application of collapse control technology for interbeds in increasing the available volume of caverns is illustrated by taking a salt cavern of Jintan as an example.

**Key words:** multi-interbedded salt formation; oil/gas storage; solution mining; insoluble interbeds; collapse control

## 0 引言

目前建造盐穴储库普遍采用单井油垫对流法水溶开采。国外用于地下储库的盐矿床普遍为盐丘或厚盐层, 水溶建腔施工比较容易开展, 可以得到较为理想的储库形状; 但中国在建或拟建油气地下储库的场址均为多夹层盐岩矿床, 其基本特点是“矿层数多、单层厚度薄”, 盐矿床中含有大量难溶夹层, 如硬石膏层、钙芒硝层、泥岩层等<sup>[1-2]</sup>, 难溶夹层的存在给水溶造腔带来了很多不利影响。

单井油垫对流法水溶建腔的正循环施工过程中, 淡水或非饱和卤水经造腔内管注入腔体, 然后从造腔内管与造腔外管的环隙流出, 流动的卤水不断溶蚀腔壁盐岩, 腔体容积不断扩大, 同时通过油垫层控制上

溶, 从而达到建造较为理想的储库腔体形状的目的。

但是, 难溶夹层的滞后溶蚀会导致腔体内流场紊乱, 腔体形状很难控制, 形态失控严重时会导致腔体报废。另外, 建腔过程中难溶夹层突然大面积垮塌, 会导致井下套管弯曲、破损、局部颈缩等问题(如图1), 此类事故会造成诸多次生问题, 例如: 造腔内管弯曲后, 修井过程中强行拔出会损伤造腔外管, 在后续造腔过程中柴油会从损坏部位溢出, 严重时将导致无法在腔体顶部形成油垫层, 在拔出受损套管过程中

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724602, 2009CB724603); 国家杰出青年科学基金项目(50725414); 国家自然科学基金项目(50774076)

收稿日期: 2010-09-17

还易造成卡管事故；造腔内管接箍损坏后使出水口深度发生改变，导致腔体形状失控。这些事故严重影响了建腔进度及质量。

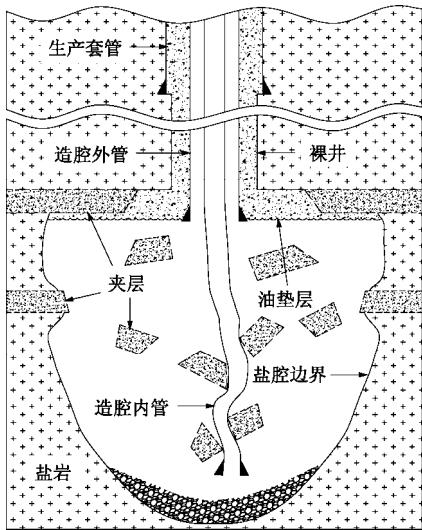


图1 难溶夹层的垮塌及其造成的套管损坏

Fig. 1 Collapse of insoluble interbeds and casing damage induced by it

目前尚未检索到专门针对水溶建腔难溶夹层处理方式的公开文献报道<sup>[3]</sup>，以下是国内外学者的一些相关研究。

Charnavel 等<sup>[4]</sup>以法国 Etrez 地区的 2 个腔体为例，应用声纳测量成果研究了难溶夹层的存在对腔体形态的影响，研究指出水溶建腔过程中腔体段的难溶夹层会使腔体形成多个“瓶颈”(bottle neck)，“瓶颈”之上的不溶物在造腔过程会不断沉积到腔体底部的中心附近，造腔完成后腔体底部会呈现中部凸起的状态，致使注气排卤期间凸起周边的卤水无法排出，会造成约 10% 腔体有效体积损失。Bauer 等<sup>[5]</sup>应用梁的弯曲理论研究了盐穴泥质顶板的破坏形式，考虑了泥质顶板的剪切及拉伸破坏形式，研究结论对于单井水溶建腔适用性不强，而且并未考虑水平力对夹层破坏的影响。DeVries 等<sup>[6]</sup>通过数值模拟研究了盐穴储气库运行过程中顶板跨度、顶板深度、护顶盐厚度、泥页岩厚度及刚度等对储库运行安全的影响，但未涉及水溶建腔问题。

姜德义等<sup>[7]</sup>采用固支大变形圆板突变模型研究了单井及连通井溶腔顶板的稳定性，得出了溶腔顶板岩层失稳的必要条件，为地下储库溶腔稳定性控制奠定了重要理论基础。万玉金<sup>[8]</sup>通过模拟实验探索了溶腔形状控制机理及技术，研究结论认为：对于存在夹层的盐层，为提高夹层上部的溶蚀率，油垫应设置在其上部的适当位置，充分利用油垫和管柱位置配合控制溶蚀，使之达到预定的形状，但文中并未给出具体的操作实现方法。蒋向阳<sup>[9]</sup>从提高盐岩回采率角度论述了顶板垮塌在水溶采矿中的应用，其应用对象为对井

水力压裂采矿法和多井自然连通采矿法，不适合单腔盐穴储库水溶建腔。

施锡林等<sup>[10-11]</sup>采用化学分析、岩石力学试验、力学理论分析等手段，研究了水溶建腔过程中难溶夹层的垮塌机理，为垮塌控制技术奠定了理论基础。文献[10]通过化学分析、浸泡试验及力学试验研究了不同浓度卤水浸泡对各类含盐率泥质夹层试样抗拉强度弱化的影响规律，研究表明：在多夹层盐矿水溶造腔过程中，中、高含盐率泥质夹层抗拉强度的弱化机制主要是夹层在非饱和卤水浸泡下的架构破坏，低含盐率夹层的抗拉强度在卤水浸泡下弱化速度较慢，应是夹层垮塌控制的重点。文献[11]在考虑地应力、卤水压力及夹层自重等关键影响因素的基础上，对夹层垮塌的力学机制进行了研究，结果表明层状盐岩造腔过程中的夹层垮塌主要体现为重力破坏、挤压破坏和失稳破坏等 3 类模式，并揭示了 3 类破坏模式的主要控制因素及水溶建腔过程中可能出现的阶段。

本文将在前述研究成果的基础上，对与难溶夹层垮塌控制相关的问题进行深入研究，提出一套适用于多夹层盐矿水溶建腔的夹层垮塌控制技术，以克服我国盐穴地下储库水溶建腔施工的技术难题。

## 1 难溶夹层顶板的极限跨度

多夹层盐矿油气储库水溶建腔过程中，随着盐层的不断溶蚀，难溶夹层会成为腔体的直接顶板而暴露于卤水之中，由于夹层相对盐层具有良好的力学特性且溶蚀滞后，暴露后的夹层很难马上垮塌，但随着盐层溶蚀范围的增大夹层的受力状况不断恶化，当夹层暴露跨度达到某一数值之后，将发生大范围垮塌现象，本文称该值为“极限跨度”。

依据水溶建腔过程中难溶夹层在腔体中暴露位置的不同，将夹层的暴露方式分为：直接顶板型夹层(如图 1 中较浅的位于腔体顶部的夹层)及悬空型夹层(如图 1 中腔体中段已经垮塌的夹层)。若能提前计算出夹层作为直接顶板时的极限跨度，在夹层达到极限垮塌前适时将造腔内管上提便可有效避免垮塌带来的不利影响。因而，求得直接顶板型夹层的极限跨度是实现垮塌控制的重要前提。

夹层垮塌力学机制研究表明夹层垮塌类型可归结为局部破损型及整体失稳型<sup>[11]</sup>：前者是因夹层局部挤压或拉伸破坏导致的大面积垮塌形式(对于受卤水浸泡影响大且均质性差的难溶夹层而言，当夹层内某点的应力状态满足了破坏条件后，该点附近会发生局部破坏，一定程度的局部破坏会引起夹层的大面积垮塌)；后者是夹层整体失稳导致的大面积垮塌行为(对于受卤水浸泡影响小且力学性质很好的难溶均质夹层

而言, 随着腔壁盐岩的不断溶离, 夹层暴露跨度不断增大, 当跨度增大到某种程度时候, 夹层发生整体失稳垮塌。鉴于诱发 2 种垮塌类型的内在力学机制不同, 在计算夹层成为腔体直接顶板极限跨度的过程中, 需要分别进行讨论。图 2 给出了直接顶板型夹层极限跨度的计算流程, 其详细计算方法见下文。

对于某一具体的难溶夹层而言, 首先通过数值试验观察夹层在造腔过程中的破损情况。依据夹层所处深度的腔体设计尺寸, 确定数值试验中夹层几何模型的最大跨度, 即所有腔体几何模型的顶板的跨度均小于腔体在该位置的设计直径。为减轻计算工作量, 采用二分法建立不同跨度夹层顶板的数值试验几何模型, 计算中观察各计算模型(图 2 中的模型 1、模型 2、模型 3、模型  $n$  等)中夹层的破损情况, 判断是否出现了夹层垮塌现象。

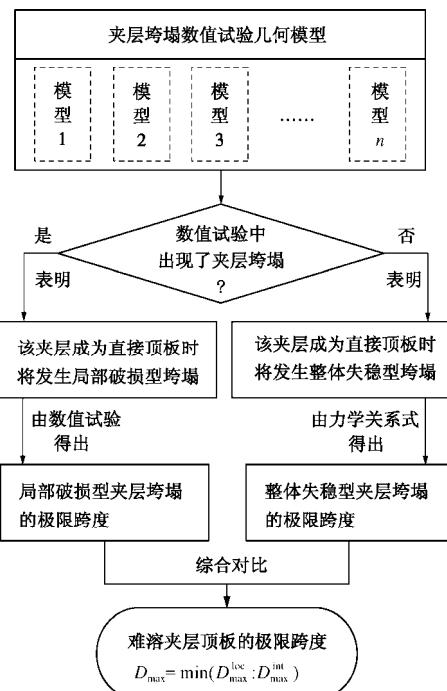


图 2 直接顶板型夹层极限跨度的计算流程

Fig. 2 Flowchart of calculating limit span

若数值试验中出现了夹层垮塌, 则表明难溶夹层顶板会发生局部破型垮塌, 由数值试验可得局部破型夹层垮塌的极限跨度  $D_{\max}^{\text{loc}}$ 。例如: 当夹层的跨度为 16 m 时计算过程中未出现夹层垮塌现象, 但当夹层的跨度为 15 m 时计算过程中出现了夹层垮塌现象, 则可判定  $15 \text{ m} < D_{\max}^{\text{loc}} < 16 \text{ m}$ , 对于实际工程而言从安全角度考虑可取  $D_{\max}^{\text{loc}} = 15 \text{ m}$ 。

若数值试验中未出现夹层垮塌, 则表明难溶夹层顶板会发生整体失稳型垮塌。整体失稳型夹层垮塌的极限跨度  $D_{\max}^{\text{int}}$  可由以下关系式得出

$$D_{\max}^{\text{int}} = 2h \sqrt{\frac{1.224E}{K\sigma_r^h(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

式(1)是基于板壳力学理论推导得出的, 对于直接顶板型难溶夹层而言关系式中各参数含义是:  $E$  为夹层弹性模量;  $\nu$  为夹层泊松比;  $h$  为夹层厚度;  $\sigma_r^h$  为夹层所处深度的水平向地应力;  $K$  为修正系数(根据具体地质条件取不小于 1 的正数)。

最后综合对比得出难溶夹层顶板的极限跨度  $D_{\max}$ , 其值为  $D_{\max}^{\text{loc}}$  与  $D_{\max}^{\text{int}}$  中较小的一个, 即

$$D_{\max} = \min(D_{\max}^{\text{loc}}, D_{\max}^{\text{int}})。$$

## 2 腔体溶蚀策略对夹层垮塌的影响

不同的腔体溶蚀策略会对夹层垮塌的时间产生重要影响, 其具体的影响规律难以通过简单的理论分析或室内试验得出, 数值模拟在复杂计算中具有明显优势, 笔者采用数值模拟手段从力学角度对相关规律进行了定性分析, 主要结论如下:

(1) 当腔体溶蚀范围扩展到难溶夹层后, 腔体围岩的短期弹性变形及长期蠕变收缩会引起夹层附近的应力重新分布, 夹层周边所受水平向应力的增长幅度尤其明显, 腔体溶蚀引起的应力重分布将导致夹层的受力状况不断恶化, 直至使其破坏。

(2) 腔体溶蚀直径越大、夹层越容易发生垮塌。因此, 对于某些厚度较大的夹层, 在其垮塌前不必急于上提造腔管柱, 而是将其下部的腔体横向尺寸尽量做大, 将有利于促进夹层在后续造腔中的垮塌。另外, 当厚夹层位于设计腔体段下部时, 将夹层下部腔体横向尺寸尽量做大, 可明显增大腔体有效容积, 具体实现方法在第 5 节中进行详细论述。

(3) 对于厚度较大的难溶夹层, 其下部盐层按设计要求溶蚀完成后并不会马上垮塌, 但上提造腔管柱继续对上部盐层进行溶蚀, 夹层上部盐层溶蚀范围逐渐扩大, 盐层溶蚀范围的扩大将导致腔体收缩压力不断增长, 夹层对腔体支撑力变大, 夹层在一定时期将发生垮塌破坏。

## 3 夹层垮塌时间的调控

夹层垮塌时间的调控是垮塌控制技术的核心问题, 基于夹层垮塌机理研究成果, 结合单井油垫对流溶建腔工艺特点, 提出以下调控方法。

### 3.1 通过油水界面调控垮塌时间

油垫对流法水溶建腔基本原理为: 以一口井为一个开采单元, 利用油水互不相溶、石油密度小于卤水且石油不溶解盐类矿物的特性, 从生产套管与造腔外管环隙注入石油(通常为柴油), 在腔体顶部形成一层薄油垫层(造腔中期厚度一般为 5 cm, 后期为保护顶板厚度为 50 cm 左右<sup>[12]</sup>), 从而将卤水与盐矿层隔开以控制上溶。

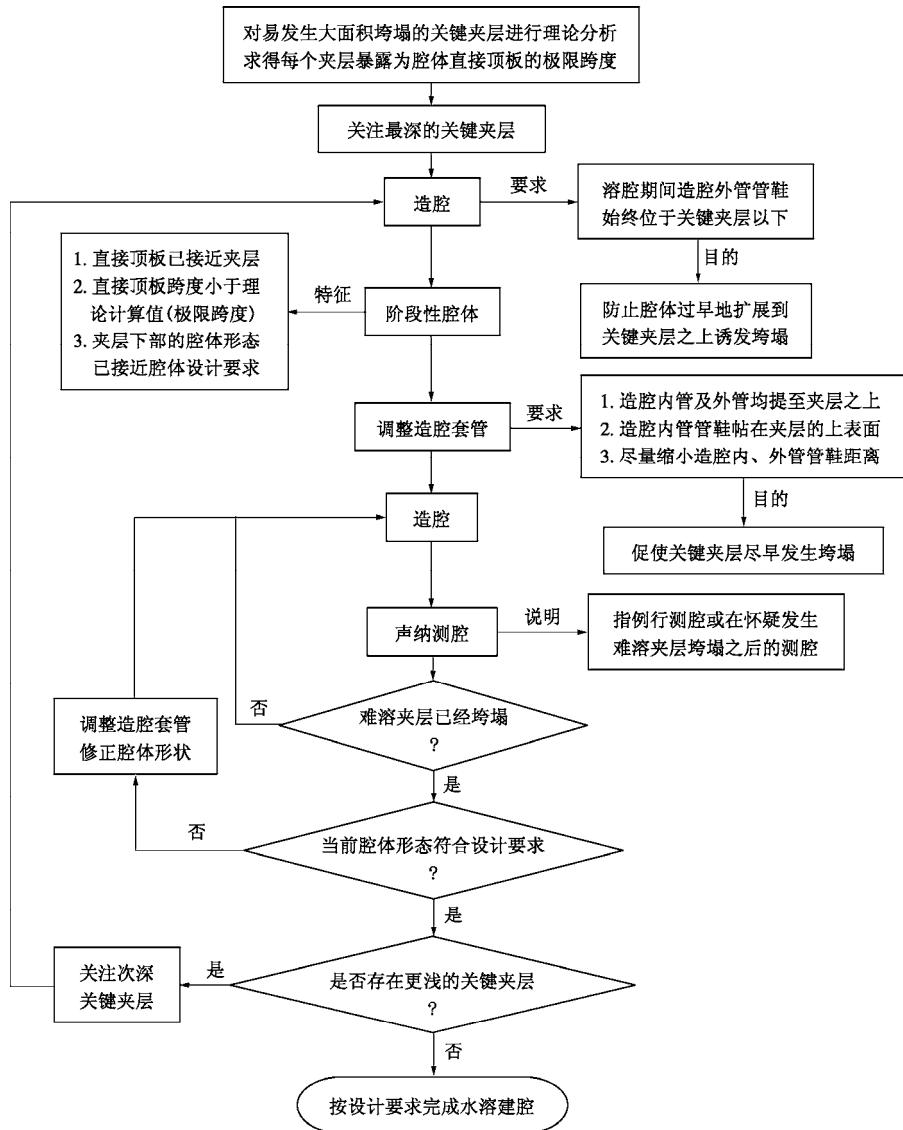


图 3 难溶夹层垮塌控制技术流程

Fig. 3 Flowchart of collapse control technology for insoluble interbeds

试验研究表明, 夹层暴露于非饱和卤水中的时间越长, 其力学性质的弱化程度越严重, 夹层就越容易垮塌<sup>[10]</sup>, 因此通过调控夹层暴露于卤水中的时间可以达到调节垮塌时间的目的。可采取的具体措施是调节造腔外管管鞋的深度: 为避免夹层过早垮塌, 可将造腔外管管鞋的深度尽量维持在夹层埋深以下的位置, 从而使油垫层保持在夹层下部, 防止夹层因浸水过早垮塌; 反之, 调节油水界面的深度至夹层之上, 可推迟夹层垮塌的时间。文献[13, 14]给出了油垫层深度的具体检验及控制方式。

### 3.2 通过控制腔体收缩调控垮塌时间

夹层垮塌力学机制研究<sup>[11]</sup>表明: 对于某一特定难溶夹层而言, 其所受的径向应力越大、增长速度越快, 夹层发生垮塌的可能性就越大、垮塌就越快。由于夹层所受的径向应力与腔体的收缩量及收缩速度密切相关, 因此, 通过控制腔体的收缩可以达到加速或延缓夹层垮塌时间的目的, 控制腔体蠕变收缩最为直接的

方法是调整腔体内压力。

腔体内压力可由卤水静压力及注水引起的压力叠加得到。卤水静压力指从地面到腔体深度的静止卤水液柱压力, 这部分压力是无法人为控制的; 水溶建腔过程中井口注水压力范围通常保持在 4~12 MPa, 这部分压力是可以调节的。

若想将腔体内的卤水压力尽量降低并防止腔体内的套管损坏, 可采取方法为上提管柱至夹层之上, 停止注水并打开井口相关阀门。采取这些措施后, 腔体所受内压力便只剩卤水静压力这一部分, 腔体内卤水的内压减小, 腔体蠕变收缩速率必然加快, 夹层径向受力随时间快速增加, 从而达到促使夹层尽快可控垮塌的目的。反之, 保持一定的井口压力, 有利于延缓夹层垮塌的发生。

## 4 夹层垮塌控制技术流程

以前述研究成果为基础, 本小节提出了一种切实

可行的难溶夹层垮塌控制技术方案, 其技术流程如图 3 所示。图 4 为该技术流程各主要阶段的套管鞋下入深度以及垮塌过程示意, 所述第 1 关键夹层为埋藏最深的关键夹层、第 2 关键夹层埋深次之。下面结合图 3, 4 对该技术工艺进行详细阐述。

依据具体腔体的设计资料(如腔体所处深度的地层信息、腔体横向尺寸等), 可以初步确定易发生大面积垮塌的若干危险关键夹层(如江苏金坛储气库盐岩矿床存在平均厚度分别为 3.02, 2.50 m 的 2 个主要对比泥岩标志层<sup>[15]</sup>), 依据第 4 节中给出的夹层极限跨度的计算方法, 可以确定各难溶关键夹层暴露为腔体直接顶板时的极限跨度。

水溶建腔是按深度自下而上的顺序进行的, 因此应首先关注埋藏最深的关键夹层。造腔开始后, 造腔外管的管鞋须位于该夹层之下(如图 4(a)左图所示), 以保持油垫层位于夹层之下, 防止难溶泥质夹层过早暴露于卤水之中发生吸水弱化现象, 从而达到延迟垮塌的目的, 有利于控制该夹层下部的腔体形态及防止腔体内套管因垮塌损坏。随着造腔的进行, 腔体不断向上溶离, 横向尺寸也相应扩大, 当腔体的直接顶板接近关键夹层时, 称此时的腔体为阶段性腔体, 阶段性腔体顶板的跨度应不大于力学分析所得出的“极限跨度”, 并且腔体形状已经接近设计要求, 在形状无法同时满足以上要求的情况下, 应优先考虑跨度的问题(因腔体局部范围内的形态不规则对腔体整体稳定性的影响不大, 但夹层过早垮塌会导致套管损坏, 夹层过晚垮塌会导致流场失控造成腔体形态的大范围改变, 后 2 种现象的出现更加不利于水溶建腔的顺利进行及储库投入运行后的稳定性)。在此期间, 夹层与套管具体间距为多大时有利于夹层垮塌的控制, 需要针对特定拟建腔体的详细资料进行具体计算, 具体问题具体分析。

阶段性腔体形成之后, 便可以将造腔内管及造腔外管同时提升至关键夹层之上, 同时造腔内管应尽量贴近关键夹层的上表面, 并使造腔内管管鞋及造腔外管管鞋保持尽量小的距离(如图 4(a)右图所示), 以利于促进夹层上部盐岩的充分溶解, 从而让更大面积的夹层暴露于卤水之中以加快夹层力学特性弱化的速度, 促使关键夹层尽快垮塌。在此期间, 腔体体积不断扩大, 尤其是关键夹层上部的腔体扩展速更快, 由此引发的应力重分布将使得夹层的径向受力不断增大, 由前述力学分析及数值模拟成果可知, 该措施有利于促进夹层垮塌的发生。另外, 夹层上部的盐岩溶解缓慢及沉渣在夹层之上的沉积也会对夹层受力状况产生一定影响, 在针对具体腔体开展的垮塌控制工艺设计中, 应依据盐矿石品位及腔体具体形态等参数具体进行

计算。此时所有套管均位于关键夹层之上, 故而完全避免了夹层大面积垮塌造成的套管弯曲事故。在此期间, 夹层越早垮塌, 对后续腔体形态的控制越有利。

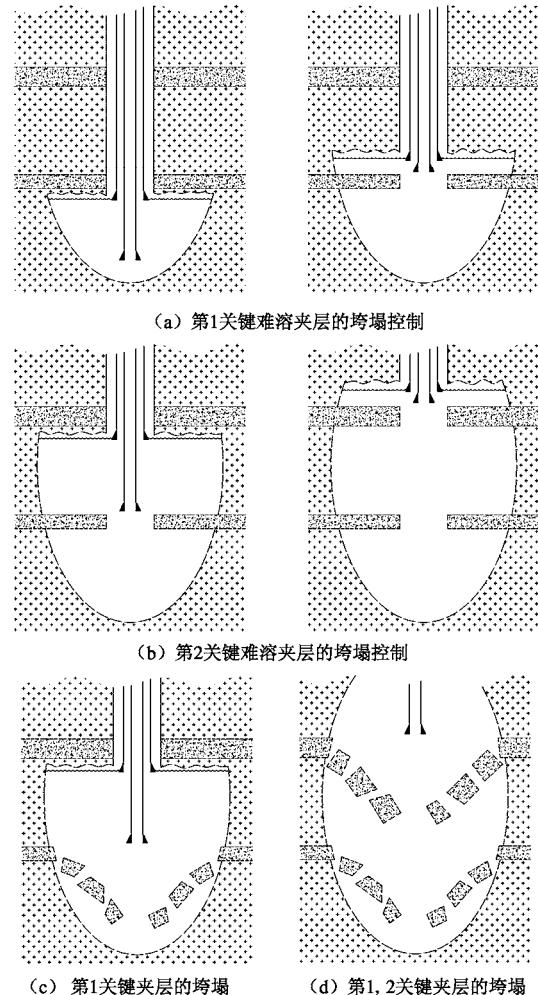


图 4 垮塌控制过程中套管下入深度及垮塌形态示意

Fig. 4 Location of casings and collapse shapes of interbeds during control process

单腔盐穴水溶建腔施工中, 按照设计要求, 通常会进行 6 次左右例行声纳测腔, 声纳测腔结果可以直观地检验关键夹层是否已经垮塌。另外对于一些需要特别关注的夹层, 在怀疑其发生了大面积垮塌之后, 也可进行声纳测腔以验证是否发生了垮塌。如果垮塌没有发生, 则造腔内管应继续保持在夹层上部进行造腔, 待确定关键夹层已发生大面积垮塌后(如图 4(c)所示), 再通过声纳资料确定关键夹层垮塌后的腔体形状是否符合设计要求, 若不符合, 则重新调整造腔内管及造腔外管的深度以修正腔体形状, 修正过程中造腔内管管鞋可以位于夹层深度之下而不会发生腔内套管损坏事故。

当阶段性腔体形态基本符合设计要求之后, 便可重点关注埋深更浅的关键夹层, 其垮塌控制方式与埋深最深的关键夹层类似(如图 4(b)所示), 建腔过程中发生如图 4(d)右侧图所示的垮塌是我们希望看

到的。若还有更多的关键夹层，则其处理方式类似，直至按照设计要求完成水溶建腔。

整个技术流程各个环节是紧密联系的，在进行溶腔工艺设计的时候应综合考虑，施工过程中及时地应用声纳测腔资料及水溶建腔模拟软件进行工艺调整是十分必要的。

## 5 夹层垮塌控制在增大腔体有效容积中的应用

就金坛盐穴储气库而言，水溶建腔完成后单腔底坑区域 (cavern sump) 沉渣体积通常占整个腔体体积的 30% 左右，沉渣面之下的卤水在注气排卤过程中很难排出，腔体的有效容积损失严重，再者金坛储气库盐层的总厚度较小，若腔体有效容积损失严重将更加不利于储气库建设的顺利进行。

化学分析及岩石力学试验研究表明<sup>[10]</sup>，金坛地区泥岩及盐岩在未受卤水侵蚀之前，泥岩的力学特性优于盐岩。由于两者存在的强度性质差异，在有油垫层保护的情况下，同跨度泥岩直接顶板的稳定性优于盐岩。难溶夹层试样在力学试验中表现出的这一特征，给我们提供了一种增大盐岩腔体有效容积的思路：

在水溶建腔的建槽期，可以充分利用位于腔体设计底板之上二三十米之内的厚泥岩夹层，充分发挥厚难溶夹层良好的力学强度特性，应用夹层垮塌控制技术将夹层之下的腔体体积尽量做大。水溶建腔施工过程中，在厚夹层之下的腔体体积达到极限之后，上提造腔内管及造腔外管到厚泥岩夹层之上，此后重点控制该夹层之上的腔体形状。随着时间的推移，腔体中的难溶沉渣不断堆积于该厚夹层之上，再加之卤水的长期浸泡以及腔体的蠕变收缩，导致该厚夹层的受力状况不断恶化，最终会发生大面积垮塌。垮塌之后，上部的所有沉渣会随之下沉到厚夹层未垮塌前的底部腔体中，原难溶厚夹层之下的腔体空间便转化成一个大的沉渣腔，在水溶造腔完成之后，沉渣面的深度会大幅下降，储气库腔体的有效容积也会有大幅增加。

下面江苏金坛盐穴储气库某腔体为例，说明该思路的有益效果。

如图 5 所示，该腔原设计腔底位于厚约 1 m 的难溶泥质岩层之上，深度约 1195 m，底板之上 13 m 左右为纯度较高的盐岩层，在此盐岩层之上存在厚约 2 m 的纯泥岩夹层（埋深 1180 m 左右），且该夹层上部 2 m 左右的岩层仍有 30% 左右的泥质含量，是一个典型的难溶厚夹层。

施工过程中考虑到难溶厚夹层的特点，合理采用夹层垮塌控制技术，可形成图 5 中虚线所示的腔体轮廓线及沉渣面。位于原设计沉渣面及工艺优化之后的

沉渣面之间的腔体体积为工艺优化之后增加的有效腔体体积。

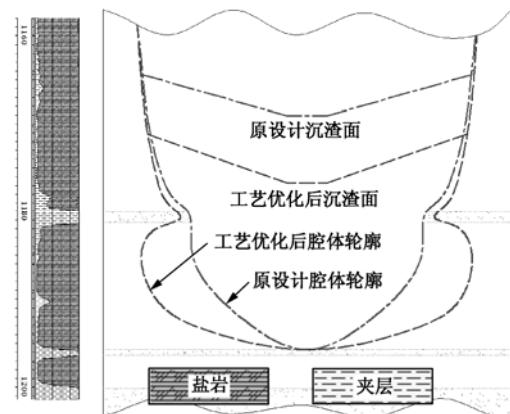


图 5 底坑区域建腔工艺优化前后的腔体形态示意

Fig. 5 Comparison of cavern shapes before and after optimization

该腔目前正处于水溶建腔的早期阶段，最近的一次声纳测腔成果如图 6 所示。声纳测腔成果表明该腔目前已形成约  $3.68 \times 10^4 \text{ m}^3$  的有效腔体，而依据该腔原设计资料，此阶段腔体有效体积应为  $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3$  左右，也就是说采用垮塌控制工艺后增加了约  $6800 \text{ m}^3$  的有效体积。

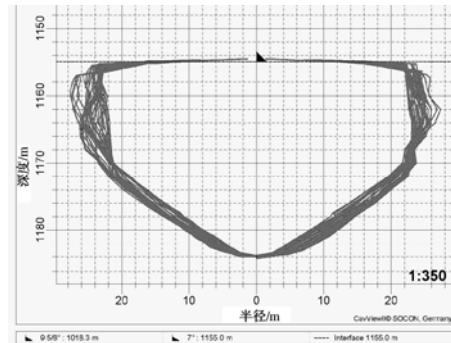


图 6 声纳测腔成果图

Fig. 6 Result of sonar survey

由图 6 可知，腔体沉渣面最低点位于 1184 m 附近，低于 1180 m 附近难溶夹层的最低点，由此可推断埋深 1180 m 左右的泥质难溶夹层已部分或完全垮塌。之所以说难溶夹层可能“部分”垮塌，是由于声纳测量无法测得沉渣面之下的腔体形态。如果目前该夹层只是部分垮塌，悬空夹层的下部可能还存在大量卤水，随着造腔的不断进行，夹层上部堆载的沉渣不断增多，夹层因卤水浸泡力学强度会进一步下降，该夹层最终将整体垮塌。这样一来，该腔体最终增加的有效腔体体积会远大于目前的  $6800 \text{ m}^3$ ，这对于一个设计有效体积仅为  $20 \times 10^4 \text{ m}^3$  左右的腔体来说，增加的储气能力是十分可观的。

## 6 结语

该技术已在储气库造腔现场的若干腔体开展应

用<sup>[13-14]</sup>。施工实践表明, 采用该技术后造腔管柱破损事故的发生频率大大降低。其在增大腔体有效容积方法的优势也已初步体现。

目前, 中国溶腔型地下盐穴储库建设普遍采用国外水溶建腔模拟软件设计溶腔工艺。但国外溶腔模拟软件大多只针对盐丘或大厚盐层进行设计, 对难溶夹层的影响考虑不足, 实践证明该类软件不适合中国盐穴地下储库的多夹层地质条件, 致使实际施工过程中腔体最终形态与最初的设计方案存在较大差异, 不利于储库的安全运行。

因此, 着眼中国多夹层盐岩矿床水溶建腔工况, 充分考虑难溶夹层对溶腔过程的影响, 在工程实践中不断完善夹层垮塌控制技术工艺, 并把处理难溶夹层的工艺嵌入水溶建腔模拟软件, 必将为多夹层盐矿油气储库水溶建腔的顺利进行提供有力支持。

## 参考文献:

- [1] 杨春和, 李银平, 陈 锋. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (YANG Chun-he, LI Yin-ping, CHEN Feng. Mechanics theory and engineering of bedded salt rock[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. (WANG Qing-ming. Solution mining in salt deposits[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 中国科学院武汉科技查新咨询检索中心. 盐岩储气库水溶造腔夹层垮塌机理及控制技术研究科技查新报告[R]. 武汉: 中国科学院国家科学图书馆武汉分馆, 2009. (Wuhan Documentation and Information Center of Chinese Academy of Sciences. Novelty assessment report of mechanism and controlling technology of interbeds collapse in solution mining for gas storage[R]. Wuhan: Wuhan Branch of National Science Library, CAS. 2009. (in Chinese))
- [4] YVAN CHARNAVEL, NICOLAS LUBIN. Insoluble deposit in salt cavern--test case[C]// SMRI Fall 2002 Meeting, Austria, 2002.
- [5] STEPHEN BAUER, BRIAN EHGARTNER, BRUCE LEVIN, et al. Waste disposal in horizontal solution mined caverns[C]// SMRI Fall Meeting, 1998.
- [6] KERRY L Devries, KIRBY D Mellegard, GARY D Callahan, et al. Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt[R]. Rapid City, South Dakota: RESPEC, 2005.
- [7] 姜德义, 任 松, 刘新荣, 等. 岩盐溶腔顶板稳定性突变理论分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1099–1103. (JIANG De-yi, REN Song, LIU Xin-rong, et al. Stability analysis of rock salt cavern with catastrophe theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7): 1099–1103. (in Chinese))
- [8] 万玉金. 在盐层中建设储气库的形状控制机理[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 130–132. (WAN Yu-jin. The mechanism of controlling the shape of gas storeroom built in the rock salt[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 130–132. (in Chinese))
- [9] 蒋向阳. 顶板垮塌在水溶采矿中的应用[J]. 化工矿物与加工, 1994, 23(4): 10–12. (JIANG Xiang-yang. Application of roof caving in solution mining[J]. Industrial Minerals and Porocessing, 1994, 23(4): 10–12. (in Chinese))
- [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 Xi-lin, LI Yin-ping, YANG Chun-he, 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. (in Chinese))
- [11] 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 Xi-lin, LI Yin-ping, YANG Chun-he, 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. (in Chinese))
- [12] 魏东吼. 金坛盐穴地下储气库造腔工程技术研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2008. (WEI Dong-hou. Engineering technology of cavity making in Jintan saltcaverns underground gas storage[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2008. (in Chinese))
- [13] 屈丹安, 杨春和, 施锡林, 等. 一种油水界面检验和控制方法: 中国, 200810149877.1[P]. 2009. (QU Dan-an, YANG Chun-he, SHI Xi-lin, et al. A method of checking and controlling oil-water interface in solution mining: China, ZL200810149877.1[P]. 2009. (in Chinese))
- [14] 屈丹安, 杨春和, 施锡林, 等. 一种油水分离检验装置: 中国, ZL200810149878.6[P]. 2009. (QU Dan-an, YANG Chun-he, SHI Xi-lin, et al. A device for checking oil-water separation in solution mining: China, ZL200810149878.6[P]. 2009. (in Chinese))
- [15] 刘艳辉, 李 晓, 李守定, 等. 盐岩地下储气库泥岩夹层分布与组构特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3627–3632. (LIU Yan-hui, LI Xiao, LI Shou-ding, et al. Distribution and structural fabric features of mudstone interlayer of rock salt in underground gas storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3627–3632. (in Chinese))