

盐穴储气库建槽工程实践与顶板极限跨度分析

屈丹安^{1,2,3}, 施锡林², 李银平², 杨春和^{1,2}, 马洪岭², 张桂民²

- (1. 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;
2. 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;
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 金坛 213200)

摘要:通过分析金坛盐穴储气库的建槽工程案例, 探讨建槽施工中遇到的若干问题, 总结经验教训并提出工艺改进方案, 进而讨论建槽期工艺设计应考虑的关键问题, 阐明确定盐腔顶板极限跨度的必要性, 并提出建槽期盐腔顶板极限跨度的确定方法, 应用该方法开展基于数值试验的极限跨度分析, 获得不同侧溶底角及盐腔高度条件下的盐腔顶板极限跨度, 并对其规律进行分析。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 储气库; 水溶造腔; 建槽; 工程实践; 顶板跨度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2012)增 2-3703-07

ENGINEERING PRACTICE AND ANALYSIS OF LIMIT ROOF DIAMETER IN BUILDING SUMP OF SALT CAVERN FOR GAS STORAGE

QU Dan'an^{1,2,3}, SHI Xilin², LI Yinping², YANG Chunhe^{1,2}, MA Hongling², ZHANG Guimin²

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

Abstract: According to the analysis of an engineering case of building sump of Jintan salt cavern, some problems existing in the engineering case are discussed. The experience and lesson are summarized, and some ideas and suggestions are proposed. Then, some key factors that should be considered in the design progress of solution mining are discussed. The necessity of determining limit diameter of cavern roof is expounded. And a method of calculating limit exposed diameter of cavern roof is presented. With this method, the limit roof diameters of some salt caverns are studied basing on simulation test. The limit roof diameters of salt caverns with different lateral solution angles and cavern heights are obtained, and their laws are studied.

Key words: rock mechanics; salt rock; gas storage; solution mining; building sump of salt cavern; engineering practice; diameter of cavern roof

1 引言

我国盐穴储库采用的建造方法为“单井油垫对

流法水溶造腔”, 本文所述的“建槽”是水溶开采中的广义建槽, 具体是指盐穴储气库水溶造腔过程中建造不溶物沉渣腔的施工过程。建槽是盐穴储气库水溶造腔的第一步, 对于储气库建造的成功具有关

收稿日期: 2012-05-01; 修回日期: 2012-06-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724602, 2010CB226701); 国家自然科学基金资助项目(51274187)

作者简介: 屈丹安(1965-), 男, 1985年毕业于西北大学化工机械与设备专业, 现任高级工程师、博士研究生, 主要从事盐穴储气库水溶造腔方面的研究工作。E-mail: qudanan@petrochina.com.cn。通讯作者: 施锡林(1983-), 男, 现任助理研究员。E-mail: xlshi@whrsm.ac.cn

键影响。

国外盐穴储气库造腔相关研究，始于 20 世纪 60 年代，在工程实践中积累了不少经验与教训，但限于技术保密等方面的原因，一些实质性的技术成果并未公开发表。我国盐穴储气库建设最近几年才刚刚起步，相关的核心技术正在摸索中慢慢建立起来，例如我国第一批新建盐穴储气库 16 口溶腔已进入造腔后期，将在未来数月内投入储气运行，施工过程中积累了宝贵的技术经验。专门针对盐穴储气库建槽的研究并不多见，与本文研究内容相关的报道简述如下。

S. Bauer 等^[1]基于梁的弯曲理论，简要研究了盐穴泥质顶板的破坏形式，考虑了顶板的剪切及拉伸破坏形式，研究成果对于单井水溶造腔适用性不强。R. Bekendam 和 W. Poar^[2]研究了盐腔顶板夹层的垮塌问题，并采用 FLAC 软件对顶板的离层、拉破坏等问题进行了探讨，研究针对的是卤水从盐穴移除后引起的地面沉降问题，未涉及水溶开采过程。Y. Charnavel 和 N. Lubin^[3]研究了难溶夹层对盐穴储气库腔体最终形状的影响，认为腔体段存在大量难溶夹层，会使腔体底部中心出现凸起，导致注气排卤时周边卤水无法排出。K. L. Devries 等^[4]采用数值模拟方法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气库运行安全的影响，但未涉及盐穴储气库的水溶造腔问题。

余海龙等^[5]通过相似模拟试验，探讨了水溶开采中溶腔围岩移动、破坏和应力重新分布特征，得出了不同开采深度岩盐溶腔顶板极限跨距。姜德义等^[6]建立了单井溶腔顶板大变形失稳突变分析力学模型，基于该模型推导出了夹层失稳的必要条件，提出了顶板岩石应力释放规律、溶腔失稳判据和溶腔稳定性控制方法。班凡生等^[7]根据小挠度薄板弯曲理论，建立了盐岩地层中夹层的数学模型，给出了夹层的强度校核和断裂极限长度的求解方法。施锡林等^[8]研究了悬空型难溶夹层垮塌的力学机制，揭示了夹层垮塌的破坏模式及各破坏模式在水溶建槽过程中可能出现的阶段。

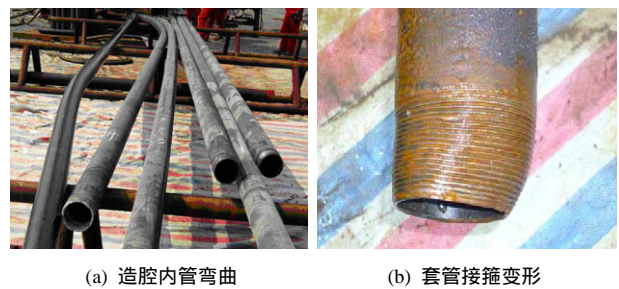
本文通过分析我国金坛储气库建槽期盐腔畸形与管柱损伤案例，发现了我国盐穴储库建槽工艺设计与施工中的不足，并提出了改进建议，进而参考前述研究成果，在总结工程经验的基础上，提出了建槽期盐腔极限跨度的确定方法，并通过算例阐明了该方法的具体实施过程，研究将为我国盐穴储气

库建槽工程设计与施工提供科学依据。

2 建槽期盐腔畸形与管柱损伤案例

2.1 金坛盐穴储气库建槽期造腔案例

我国某盐穴储气库造腔施工中，为配合声纳测腔及下一阶段溶腔，金坛盐腔于 2009 年 2 月底进行管柱调整作业。在起出造腔内管后，发现有 2 根位于溶腔底部的套管发生严重弯曲变形，计算弯曲套管的所在深度分别为 1 172 ~ 1 182 和 1 144 ~ 1 153 m，并伴随套管接箍严重变形(见图 1)。



(a) 造腔内管弯曲 (b) 套管接箍变形

图 1 盐腔造腔内管损伤

Fig.1 The damage of inner leaching tubing in a salt cavern

该盐腔在此次修井作业前，已进行的 4 次声纳测腔的腔体边界及地层柱状图如图 2 所示。最后一次测腔是本次管柱调整期间进行的。4 次测腔的主要时间节点为：2006 年 6 月 28 日，开展第 1 次测腔，体积 6 766.1 m³；2007 年 9 月 13 日，第 2 次测腔，体积 25 387.2 m³；2008 年 6 月 9 日，第 3 次测腔，体积 430 64.7 m³；2009 年 2 月 2 日，第 4 次测腔，体积 84 524.0 m³。

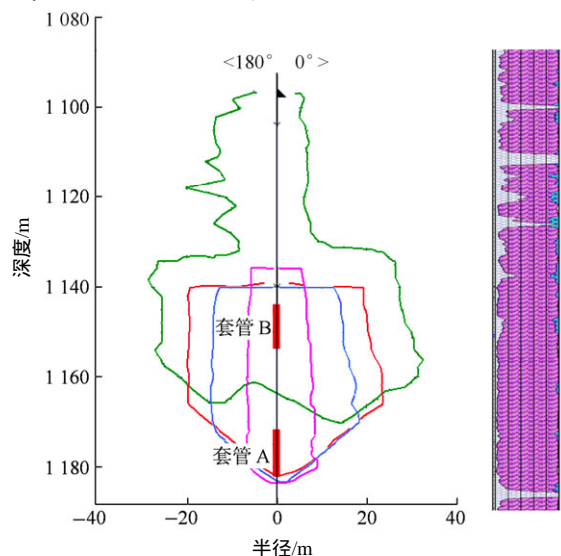


图 2 盐腔的地层柱状图及 4 次声纳测腔的边界轮廓

Fig.2 Stratigraphic column and 4 sonar survey boundaries of a salt cavern

为方便分析讨论，下文中将深度为 1 172 ~ 1 182 m 的弯曲套管命名为“套管 A”，深度为 1 144 ~ 1 153 m 的弯曲套管命名为“套管 B”，这 2 根套管的位置已标注在图 2 中。

由前 3 次的声纳测腔结果，在第 3 次测腔前盐腔顶板基本未抬升，且盐腔形态扩展趋势非常理想。其主要原因：在第 3 次测腔前，造腔外管管鞋始终位于 1 136 m 以下到 1 140 m 之间，而从地层岩性柱状图可以看出，在此深度以下直到溶腔底板的位置，盐层中的不溶泥质含量仅为 3%，属高品位盐层，因而溶腔形态易于控制。

2.2 盐腔畸形的表现形式及原因分析

第 3 次声纳测腔后，提升造腔外管管鞋至 1 098 m，其下部 20 m 范围内均为含泥盐岩，由第 4 次声纳测量边界线可以看出，这次管柱调整之后，溶腔边界的形态就明显差了很多，具体表现形式及原因分析如下：

(1) 腔体上部约 35 m 范围内的腔体扩展趋势表现出明显不对称性。具体到图 2 中来说，上部腔体向左侧溶蚀的趋势明显大于向右侧的趋势。这主要是由 2 方面的原因造成的：套管接箍的损坏后，致使出水口深度及方向发生改变，进而导致左侧卤水流动速度大于右侧；盐岩层品位水平向分布不均匀。

(2) 溶腔上部边界呈锯齿状。这主要是由于泥质夹层的滞后溶蚀造成的。

(3) 溶腔底部中心附近呈向上凸起状态。这与法国某多夹层盐矿盐腔底部的边界类似(见图 3^[3])。如果在造腔完成后仍然保持这种形态，最终会导致

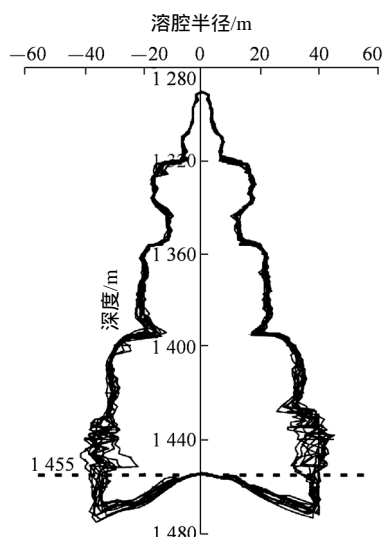


图 3 盐腔底部中心凸起造成的有效储气体积损失^[3]

Fig.3 Volume loss of gas storage caused by bulge in the center on a cavern bottom^[3]

腔底部分卤水无法排出，造成溶腔有效体积的损失。形成这种形态的主要原因为：难溶夹层的滞后溶蚀使腔体形成“瓶颈”(见图 2, 3 中的盐腔上部的锯齿状边界)，“瓶颈”之上的不溶物在水溶造腔过程会不断沉积到腔体底部的中心附近，最终形成腔底中部凸起的形态。

2.3 造腔管柱损伤原因分析

在第 3、第 4 次测腔之间的造腔施工过程中，造腔外管管鞋恰好位于一个厚度约 1.5 m 的夹层顶部，另外在 1 110 m 附近还存在一个厚度约 3.0 m 的夹层。在此期间造腔内管下入深度为溶腔设计底板深度 1 183 m。腔体溶蚀期间，上部的夹层，尤其是厚度为 3.0 和 1.5 m 的低含盐率夹层，在卤水浸泡以及腔体溶蚀引起的应力重分布的综合作用下，逐步发生垮塌，期间伴随夹层大范围突然垮塌，岩块下落过程中砸弯套管 B 并造成接箍损坏，最终堆积到腔体底部中心附近，并掩埋下入最深的造腔内管套管 A，造成其产生弯曲变形。

2.4 经验教训与工艺改进

从该盐腔建槽期的工程实践中，得出了如下经验与教训：

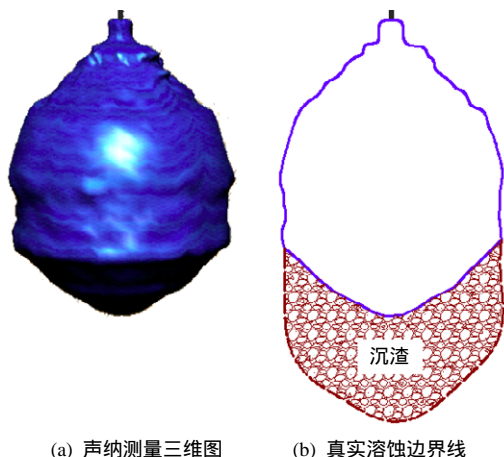
(1) 必须对大厚度难溶夹层的垮塌给予足够重视，否则可能对溶腔形态控制及施工风险规避造成无法弥补的后果。幸运的是，第 4 次声纳测腔还处于造腔早期，之后的造腔施工中，已经有针对性地调整了造腔工艺，目前该盐腔形态发展状况良好。

(2) 对于上述地质特征的盐岩地层，借鉴夹层垮塌动态控制工艺^[9]，第 2 次调整造腔外管的管鞋深度，应位于厚度为 3.0 m 的夹层的下方，下部溶腔顶板跨度接近极限跨度时，再上提造腔外管至集中分布的夹层带的上部，并适当上提造腔内管，可有效避免大厚度夹层过早垮塌，更加有利于造腔中期盐腔形态的控制。

3 建槽期工艺设计应考虑的关键参数

3.1 盐穴储气库建槽的基本原则

我国金坛储气库某盐腔声纳测量边界与真实溶蚀边界的关系如图 4 所示，采用德国 SOCON 公司声纳测量仪器获得，图 4(a)为造腔完成后的最后一次声纳测量结果，图 4(b)为依据该盐腔造腔过程中历次声纳测腔结果绘制的。相关试验及工程实践证明，在综合可溶率高达 80% 的盐层中开展水溶造腔，



(a) 声纳测量三维图 (b) 真实溶蚀边界线
图4 金坛盐腔声纳测量边界与真实溶蚀边界

Fig.4 Sonar survey boundary and true solution mining boundary of Jintan salt cavern

造腔完成后，沉渣将在盐腔底部堆积，由于不溶物膨胀及沉渣块体尺寸的影响，沉渣通常会占据 25% 左右的腔体体积。沉渣面中心点以下的卤水无法排出到地面，造成了盐腔有效储气库体积的减小。这对于在我国总体厚度较薄的盐层建设储气库，无疑是雪上加霜。

因而，盐穴储气库建槽的基本原则可表述为：在保证盐腔稳定、施工安全的前提下，最大限度地做大沉渣腔，以利于储存更多不溶沉渣，从而提高盐腔有效储气库体积。

3.2 工艺设计应考虑的关键参数

(1) 盐腔顶板的极限跨度

可连续水溶段盐层的总厚度是一定的，要想做大沉渣腔，必须尽量扩大建槽期沉渣腔的横向尺寸。除盐腔顶板自身重力外，建槽期盐腔顶板所承受的外部应力如图 5 所示，包括垂直地应力、水平地应力和卤水浮托力，其中卤水浮托力是经过油垫层间接施加到顶板上的。

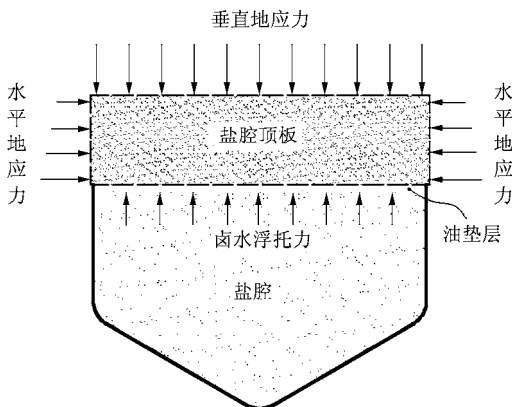


图5 建槽期盐腔顶板所承受的外部应力

Fig.5 External stresses of salt cavern roof in the stage of building sump in solution mining

在三维应力场作用下，盐腔顶板的直径过大，就可能发生局部剪切或拉伸破坏，继而诱发顶板大面积突然垮塌。这将对水溶造腔带来两大不利影响：一是造成造腔管柱损坏，影响盐腔形态的扩展趋势，严重时造成盐腔畸形；二是导致盐腔储气能力下降，主要体现为顶板大体积盐岩堆积到溶腔底部后，很难继续溶解，倘若堆积到底部中心位置，还会形成中心凸起，造成注气、排卤困难。

(2) 油垫层深度与厚度的调控时机

建槽期造腔内管的下入深度为一定值，油垫层深度主要由造腔外管控制，油垫层与盐腔底板间的相对距离，决定了盐腔在竖直方向的尺寸，不同尺寸的盐腔的顶板稳定性存在较大差异。因而，设计过程中应注意考虑造腔内管与造腔外管的两口距。

建槽期盐腔总体积较小，在顶板油垫层的作用下，横向尺寸发展很快，油垫层厚度会逐渐变薄，为避免盐腔顶板过早暴露于卤水中发生溶解反应，根据具体生产情况，适时足量向盐腔内补充油垫是十分必要的。

(3) 建槽段盐岩层的综合可溶率

受重力影响，造腔过程中高浓度卤水总是试图向盐腔底部运动，形成上部浓度低、下部浓度高的总体分布趋势，导致盐腔上部盐岩溶解速度大于下部溶解速度。随着溶解时间的延长，盐类矿石中的不溶残渣不断沉积于盐腔底部，覆盖底部未溶的盐岩，盐腔底部将形成一个以钻井为中心的倒圆锥体。圆锥体母线与水平面之间的夹角，叫做“侧溶底角”。

侧溶底角的大小与盐岩层的综合可溶率有关，并影响到盐腔底部盐岩的利用率：综合可溶率高，侧溶底角小，盐腔底部不溶解的矿石损失少、利用率高；综合可溶率低，侧溶底角较大，溶洞底部未溶矿石损失较多、利用率低。

因而，建槽段盐层的综合可溶率，直接影响到溶腔底部边界的扩展趋势，进而影响到整个盐腔形态的发展趋势，在设计建槽期盐层段时应予以重点考虑。

4 建槽期顶板极限跨度的确定方法

盐穴储气库水溶造腔是一项复杂的系统性工程，受地质条件和施工过程的影响，所形成的盐腔顶板的极限跨度，难以通过解析方法获得，需要通过反复试算的方法来确定，工作量大。本文借鉴非线性方程数值解法中的“二分法”求解思想^[10]，提

出一套极限跨度的快速搜索流程，可有效降低试算工作量。建槽期盐腔顶板极限跨度的搜索流程如图 6 所示。

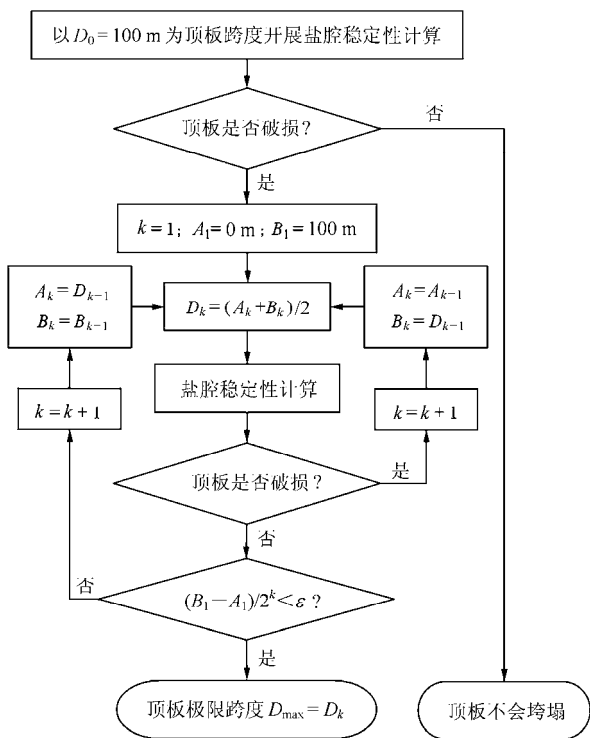


图 6 建槽期盐腔顶板极限跨度搜索流程

Fig.6 Searching flowchart of limit diameter of salt cavern roof in building sump

单井水溶造腔过程中，受盐腔内水动力及物质扩散和传递规律的制约，盐腔不会沿水平方向无限扩展。生产实践表明，单井水溶开采形成的溶腔直径一般不超过 100 m^[11]，因此，可以推测盐穴储气库建槽期盐腔的顶板跨度也不会超过该值。

令 $D_0 = 100\text{ m}$ ，以 D_0 为顶板跨度建立计算模型（所建立的模型将在节 5.2 中进行论述），开展盐腔稳定性计算。计算完成后，判断建槽期盐腔顶板是否有破损。如果顶板没有破损，说明建槽期溶腔顶板是稳定的；如果有破损，则表明在建槽期设计过程中需考虑盐腔顶板的极限跨度，应继续进行更加深入的分析，以确定极限跨度。

令 $A_1 = 0\text{ m}$ ， $B_1 = 100\text{ m}$ ，则极限跨度必然在区间 $[A_1, B_1]$ 上。令 $k = 1$ ，进入第一轮搜索，则 $D_1 = (A_1 + B_1)/2$ 为区间中点，以 D_1 为顶板跨度建立计算模型，开展盐腔稳定性计算。计算完成后，判断盐腔顶板是否有破损。

若顶板有破损，说明极限跨度在区间 $[A_1, D_1]$ 上，即当进入下一轮搜索后，应令 $A_2 = A_1$ ，且 $B_2 = D_1$ ；

若顶板没有破损，则表明极限跨度在区间 $[D_1, B_1]$ 上，即当进入下一轮搜索后，应令 $A_2 = D_1$ ，且 $B_2 = B_1$ 。无论顶板有无破损区，新的极限跨度值所在区间 $[A_2, B_2]$ 仅为 $[A_1, B_1]$ 的 1/2。

对减半后的新的极限跨度值所在区间 $[A_2, B_2]$ ，用中点 $D_2 = (A_2 + B_2)/2$ 再分为两半，以 D_2 为顶板跨度建立计算模型，开展盐腔稳定性计算，从而判断顶板是否有破损，进而确定新的极限跨度值所在区间 $[A_3, B_3]$ ，其长度是 $[A_2, B_2]$ 的 1/2。

如此循环下去，即可得到一系列的极限跨度值所在区间，它们的包含关系如下：

$$[A_1, B_1] \supset [A_2, B_2] \supset [A_3, B_3] \supset \dots \supset [A_k, B_k] \supset \dots \quad (1)$$

其中每个区间都是前一个区间的 1/2。

搜索过程中，将产生一个顶板极限跨度近似解的序列： $\{D_1, D_2, D_3, \dots, D_k, \dots\}$ ，这个序列必然以盐腔的真实极限跨度 D_{\max}^{true} 为极限。

然而，在实际工程中，不需要完成这个无限的计算过程。因为上述搜索过程存在以下关系式：

$$|D_{\max}^{\text{true}} - D_k| \leq (B_k - A_k)/2 = (B_1 - A_1)/2^k \quad (2)$$

假定以 ϵ 作为预定试算精度，经过若干次试算后，便有

$$|D_{\max}^{\text{true}} - D_k| \leq \epsilon \quad (3)$$

可见，经过 5 次试算搜索，便有

$$|D_{\max}^{\text{true}} - D_5| \leq (100 - 0)/2^5 = 3.125 \quad (4)$$

根据理论与工程实践，实际设计过程中，试算精度 $\epsilon = 3.125\text{ m}$ 已足够，即：若令顶板的极限跨度 $D_{\max} = D_k$ ，当 $k = 5$ 时， D_{\max} 的取值可达到精度要求，试算 5 次便可解决问题。

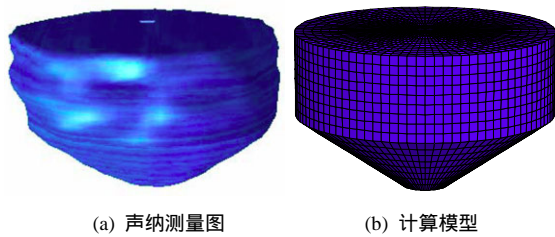
5 基于数值试验的极限跨度分析

5.1 试验方法

基于节 4 所述的极限跨度搜索流程，利用 FLAC^{3D} 建立不同跨度的盐腔，然后开展盐腔稳定性数值试验，观测盐腔顶板的塑性区发展情况，进而确定顶板极限跨度。

5.2 几何模型

单井油垫对流水溶造腔形成的地下盐腔，可视作为以钻井中轴线为旋转轴的旋转体（见图 7(a)）。考虑



(a) 声纳测量图 (b) 计算模型

图7 盐腔声纳测量图与计算模型对比

Fig.7 Contrast between result of sonar survey and numerical model of salt cavern

到几何形态的对称性，计算过程中选取 1/4 腔体及其周边扩展地层作为研究对象，以减少数值计算工作量、降低计算时间。

参考节 2 所述的金坛盐腔的地质资料，建立了如图 8 所示的几何模型及数值计算有限元网格。几何模型为长方体，尺寸为 300 m×300 m×460 m。计算过程中，将含盐系地层内的夹层和盐层概化为“盐岩层”，厚度 230 m；将含盐系地层上方在计算范围内的岩层概化为“上覆岩层”，厚度 120 m；将含盐系地层下方在计算范围内的岩层概化为“下伏岩层”，厚度 110 m。

图 7 为盐腔声纳测量图与计算模型的对比图，其中，图 7(b)所示的盐腔模型，是利用图 8 中所示的 4 个 1/4 盐腔模型拼合而成的，目的是方便直观对比。

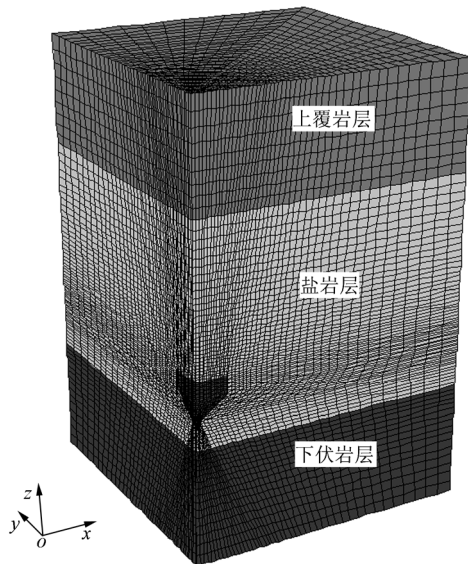


图8 几何模型及数值计算有限元网格

Fig.8 Geometrical model and finite element meshes for numerical analysis

5.3 边界条件与地应力场

模型的上表面施加均布应力，模拟模型上部边

界至地表范围内岩体自重作用。分别约束模型的 4 个侧面及 1 个底面的法向位移。

盐岩具有很强的蠕变变形能力，计算涉及的盐岩矿床短时期内未发生较大的构造运动，且盐层厚度及埋深较大(含盐系地层埋深为 984 ~ 1 217 m)，因而，地应力场可视为静水压状态。初始地应力场的获取过程为：将所有岩体的本构模型设置为弹性模型，求解过程中体积模量及剪切模量设置为很大的值，然后求模型的弹性解，平衡后将位移场及速度场清零，得到初始地应力场。

获取初始地应力场后，将盐腔所属单元的模型设置为 null，模拟腔体开挖。实际上，盐腔的形成过程是一个与时间相关的渐进过程，建槽期通常会持续数月，计算过程中用一次性开挖模拟这一过程，所得出的顶板极限跨度偏于安全。

卤水压力是通过面力的方式施加到溶腔边界上的，同时考虑了造腔过程中盐腔内卤水的压力梯度。卤水压力取对顶板稳定性的最不利工况，即：井口压力为 0；盐腔内的卤水全部为淡水，密度为 1.0 g/cm³。这一做法也将使所得出的顶板极限跨度偏于安全。盐腔内某一深度的卤水压力通过下式计算得出：

$$p_{brine} = \rho_{brine}gh \tag{5}$$

式中： p_{brine} 为盐腔内某点对应的卤水压力， ρ_{brine} 为盐腔内卤水的密度， g 为当地重力加速度， h 为从井口到盐腔内某点的深度。

5.4 岩石力学本构模型及参数

盐腔顶板稳定性数值试验过程中，采用 Mohr - Coulomb 弹塑性模型，所采用的基本力学参数如表 1^[12]所示。

表 1 数值试验中采用的基本力学参数^[12]

Table 1 Basic mechanical parameters in numerical test^[12]

地层名称	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
上覆岩层	10	0.27	1	35	1
盐岩层	18	0.30	1	45	1
下伏岩层	10	0.27	1	35	1

5.5 数值试验结果分析

通过数值试验，获得了不同侧溶底角及盐腔高度条件下盐腔顶板的极限跨度，试验结果如表 2 所示，从表 2 中可以得出如下结论：

表 2 建槽期盐腔顶板极限跨度

Table 2 Limit diameters of salt cavern roof in the stage of building sump m

盐腔高度	极限跨度				
	35°	40°	45°	50°	55°
10	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-
30	71.875	-	-	-	-
40	65.625	71.875	78.125	-	-
50	59.375	65.625	71.875	78.125	-
60	53.125	59.375	65.625	71.875	78.125

注：(1) “-”代表数值试验中盐腔顶板未发生破损，相应工况下的顶板在建槽期处于稳定状态，不存在极限跨度；(2) 35°等为侧溶底角。

(1) 盐腔设计高度较小的工况中，受侧溶底角限制，盐腔横向尺寸扩展能力有限，不可能形成较大直径的顶板，因而，在建槽期顶板始终处于稳定状态，不存在极限跨度。

(2) 盐腔高度相同的情况下，侧溶底角越大，顶板的极限跨度越大。分析出现这种趋势的原因为：侧溶底角越大，盐腔底部未溶解的盐岩越多，所形成的盐腔整体抵抗外力的能力越强，顶板也就越趋于稳定。

(3) 侧溶底角相同的情况下，盐腔设计高度越大，顶板极限跨度越小。分析其原因为：盐腔设计高度越大，其整体抵抗外力的能力越弱，顶板也就越趋于不稳定。

6 结 论

我国盐矿具有“夹层多、盐层薄”的突出特点，这一地质特征给盐穴储气库造腔带来了极大挑战，建槽质量的好坏更是关系到整个盐穴储库造腔的成败。本文针对建槽过程中的科技问题开展研究，提出了建槽工艺的改进方案，探讨了建槽期工艺设计应考虑的关键问题，进而提出了建槽期盐腔极限跨度的确定方法，并应用该方法研究了不同侧溶底角及盐腔高度条件下盐腔顶板的极限跨度的分布规律。研究成果可为我国盐穴储气库建槽期设计与施工提供参考。

参考文献(References)：

[1] BAUER S, EHGARTNER B, LEVIN B, et al. Waste disposal in horizontal solution mined caverns[C]// Proceedings of the SMRI Fall

Meeting. [S.l.] : [s.n.] , 1998 : 1 - 10

- [2] BEKENDAM R, PAAR W. Induction of subsidence by brine removal[C]// Proceedings of the SMRI Fall Meeting. [S.l.] : [s.n.] , 2002 : 1 - 12.
- [3] CHARNAVEL Y, LUBIN N. Insoluble deposit in salt cavern-test case[C]// Proceedings of the SMRI Fall Meeting. [S.l.] : [s.n.] , 2002 : 1 - 8.
- [4] DEVRIES K L, MELLEGARD K D, CALLAHAN G D, et al. Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt[R]. Rapid City, South Dakota, USA : RESPEC, 2005.
- [5] 余海龙, 谭学术, 鲜学福, 等. 岩盐溶腔稳定性模拟试验研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 4(3) : 156 - 159.(YU Hailong, TAN Xueshu, XIAN Xuefu, et al. Simulating test of salt cavern stability[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995, 4(3) : 156 - 159.(in Chinese))
- [6] 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) : 1 099 - 1 103.(JIANG Deyi, REN Song, LIU Xinrong, et al. Stability analysis of rock salt cavern with catastrophe theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(7) : 1 099 - 1 103.(in Chinese))
- [7] 班凡生, 高树生, 单文文. 夹层对岩盐储气库水溶建腔的影响分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(增) : 114 - 116.(BAN Fansheng, GAO Shusheng, SHAN Wenwen. Analysis of inter-beds's effect on gas storage in salt caverns building with water solution[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(Supp.) : 114 - 116.(in Chinese))
- [8] 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) : 3 615 - 3 620.(SHI Xilin, LI Yinping, YANG Chunhe, 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) : 3 615 - 3 620.(in Chinese))
- [9] 施锡林, 李银平, 杨春和, 等. 多夹层盐矿油储气库水溶建腔夹层垮塌控制技术[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12) : 1 957 - 1 963.(SHI Xilin, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Collapse control technology for interbeds in solution mining for oil/gas storage in multi-interbedded salt formation[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2011, 33(12) : 1 957 - 1 963.(in Chinese))
- [10] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京 : 清华大学出版社, 2008 : 212 - 215.(LI Qingyang, WANG Nengchao, YI Dayi. Numerical analysis[M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2008 : 212 - 215.(in Chinese))
- [11] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京 : 化学工业出版社, 2003 : 214 - 269.(WANG Qingming. Solution mining in salt deposits[M]. Beijing : Chemical Industry Press, 2003 : 214 - 269.(in Chinese))
- [12] 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 : 101.(YANG Chunhe, LI Yinping, CHEN Feng. Mechanical theory and engineering of bedded salt rock[M]. Beijing : Science Press, 2009 : 101.(in Chinese))