

# 盐穴水溶造腔建槽期不溶物运动性态及应用研究

李银平<sup>1,2</sup>, 施锡林<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>, 王兵武<sup>1</sup>, 马旭强<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</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 煤炭灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 盐岩储库水溶造腔过程中, 不溶物颗粒的运动和沉积特征, 对建槽期的沉砂坑形态有显著影响。对此, 针对典型盐矿的不溶物, 开展颗粒级配分析及堆积试验, 对不溶物在造腔流场中的运动状态及沉积特性开展理论分析, 确立不溶物颗粒在卤水中的沉积速度; 重点探讨建槽期流场对不溶物颗粒运动规律及对沉砂坑形态的影响; 将理论成果应用于造腔模拟软件开发, 应用结果表明腔体底部形态发展更符合工程实际情况, 并基于此提出对工程的有利启发。

**关键词:** 岩石力学; 盐岩; 不溶物; 水溶造腔; 建槽期; 颗粒; 固-液两相流

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)01-0023-09

## Motion of insoluble subsidence during leaching sump for salt cavern storage

LI Yinping<sup>1,2</sup>, SHI Xilin<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, WANG Bingwu<sup>1</sup>, MA Xuqiang<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** During the process of salt cavern leaching for oil/gas storage, the motion and subsidence of the insoluble particles have great influence on the shape of insoluble substance sump. The grain size distribution was analyzed and stacking experiments were carried to the insoluble particles of typical salt rock. Theoretical research was conducted on the moving and subsidence properties of the insoluble particles subjected to the action of flow field in cavern making. The subsiding velocity of the insoluble subsidence in brine field was established. The influence of the flow field on the moving principle of the insoluble particles in the construction phase of groove and the induced influence on the settlement pit were the focus of the research. The theoretical achievements were written into the software of Salt Cavern Builder. The results of modelling with the software showed that the shape evolution of the cavern bottom was more suitable for the real engineering conditions.

**Key words:** rock mechanics; salt rock; insoluble substance; solution mining; leaching sump; solid particles; two phases flow of solid-water

## 1 引言

我国大部分天然气目前依靠长距离、大口径管

道输送, 为保障管道安全及天然气消费正常供给, 需要建立占管道年输送量 15%~20%的储备<sup>[1]</sup>。利用深部盐矿水溶开采形成的地下空间——盐岩溶腔(又称“盐穴”或“盐腔”)开展油气地下储备, 是

**收稿日期:** 2015-01-05; **修回日期:** 2015-09-01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51274187, 41472285); 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室访问学者基金(2011DA105287-FW201401) Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grants No. 51274187 and 41472285) and Visiting Scholar Foundation of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University(Grant No. 2011DA105287-FW201401)

**作者简介:** 李银平(1969-), 男, 博士, 1991年毕业于浙江大学工程力学专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事能源地下储备方面的研究工作。E-mail: ypli@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0025

国际上首选的方式。我国自本世纪初以来，逐步开展了深部盐矿油气地下储备的规划和建设，目前西气东输一线江苏金坛储气库正在大规模建设之中，已实现初步注采气运行；此外，在湖北应城和潜江、江苏淮安、河南平顶山及湖南衡阳等盐矿，也正在开展盐穴储备库的规划或先导试验<sup>[2]</sup>。

盐穴油气储库造腔通常采用单井油垫对流法，图 1 为这一造腔方法示意图。造腔管柱由同心的生产套管、造腔外管和造腔内管嵌套而成，形成 3 个流体通道：(1) 中心通道(造腔内管内通道)；(2) 内环通道(造腔内管和造腔外管之间环空)；(3) 外环通道(造腔外管和生产套管之间环空)。从外环通道注入柴油作为阻溶剂垫层，控制溶腔向上溶解。从中心通道注入淡水或淡卤水，溶蚀盐岩溶腔，由内环通道排出卤水，称之为正循环，反之则为反循环。

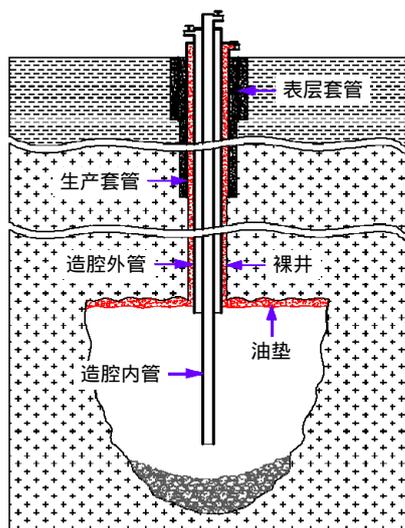


图 1 单井油垫对流水溶造腔示意图

Fig.1 Diagram of solution mining with oil blanket protection

我国盐矿一般含有众多难溶甚至不溶的夹层，如硬石膏层、钙芒硝层、泥岩层等<sup>[3-4]</sup>，自下而上的造腔过程中，造腔层段的夹层逐步依次暴露出来，夹层分割溶流场及其不规则的崩塌产生自由下落块体等，都会对造腔带来巨大的不利影响。针对上述问题，国内外开展了较为系统的理论、试验和现场应用研究。其中，S. J. Bauer 等<sup>[5]</sup>研究了用于废弃物处置的水平盐腔溶蚀建造的相关问题；R. Bekendam 和 W. Paar<sup>[6]</sup>研究了盐腔内卤水排出后顶板稳定性的相关问题；Y. Charnavel 和 N. Lubin<sup>[7]</sup>研究了盐腔内不溶物的沉积堆积特性；姜德义等<sup>[8-9]</sup>开展了盐腔内顶板、夹层对腔体稳定性研究；施锡林等<sup>[10-12]</sup>通过试验、理论和现场测试等手段，深入研究了夹层成

分、跨度、弱化特征等因素对夹层垮塌的影响，并提出了夹层垮塌控制与腔体优化的系统方法；姜德义等<sup>[13]</sup>采用自制型盐模拟了含夹层岩盐的造腔过程；屈丹安等<sup>[14]</sup>针对盐穴建槽工程中顶板极限跨度问题，建立了相应的理论模型；李银平等<sup>[15]</sup>针对盐穴造腔控制工程的几个关键问题进行了探讨；陈结等<sup>[16]</sup>针对水溶造腔过程中夹层与卤水的运移及其相互作用机制进行了探讨。

然而，不同于国外盐穴储库的巨厚盐丘或盐层，我国储库备选盐矿含盐系地层大多含有较多难溶杂质，而关于盐岩层中杂质(不溶物)的组成及结构特征，以及其在溶腔过程中的沉降和腔底堆积性态的研究却很少。

实际上，在水溶造腔的初始阶段——建槽期，溶腔空间狭小，为了溶蚀出容积较大的沉砂坑以利于后期造腔，一般会选择盐岩品位相对较高的连续可溶盐层，避开较厚夹层，可溶性盐(主要成分 NaCl)含量一般可达 65%~90%。然而，尽管如此，盐层中还是有大量的不溶物颗粒，随着盐岩的溶解将进入流场，这时不溶物颗粒的运动性态对造腔过程，特别是建槽期造腔的影响是必须关注的重要问题。粗重颗粒可能会很快沉降并堆积于溶腔底部；轻细的颗粒则会被流体携带运动(夹砂流动)；居中的颗粒则会处于较复杂的运动性态，悬浮、缓慢沉降、或者又被流体从底部旋起卷入流场，这是一个典型固-液两相流问题。如图 1 所示，若不溶物颗粒逐步在溶腔底部堆积，可能会导致造腔内管末端被埋，造成出水或进水不畅，增加注水压力甚至会导致堵管，严重影响造腔施工进度和安全。当然，由于不溶物堆积会阻碍被埋的溶腔壁继续溶蚀，故而不溶物的沉降和堆积性态会对溶腔形态发展，特别是在建槽阶段，造成显著影响。

本文选择金坛和淮安盐矿的典型盐岩岩芯，通过溶解获取不溶物，烘干后开展不溶物颗粒形状及颗粒级配特征研究；在此基础上，对造腔建槽期不溶物颗粒的水动力特性、沉降特性开展分析；最后应用于造腔模拟软件开发，使其预测腔体形态特别是建槽期形态更加符合工程实际情况。

## 2 典型盐矿不溶物颗粒级配分析

### 2.1 不溶物离析方法

在江苏金坛盐矿和淮安盐矿，选取具有代表性

的含杂质盐岩试样(见图 2)：高杂质盐岩、中杂质盐岩、低杂质盐岩试样，用清水进行浸泡去除可溶盐，不溶物颗粒离析出来，经烘干后，获取了如图 3 所示的不溶物颗粒混合体。



(a) 高杂质盐岩 (b) 中杂质盐岩 (c) 低杂质盐岩

图 2 典型盐岩岩芯

Fig. 2 Classical rock salt samples



图 3 不溶物混合体照片

Fig.3 Photo of the insoluble substance

## 2.2 不溶物颗粒形态分析

对不溶物进行筛分颗粒级配分析，获得了表 1 和图 4 所示的分析结果。粒径小于 20 mm 的颗粒占到 80%以上，小于 0.074 mm 的黏粒很少。

表 1 金坛不溶物颗粒分析结果

Table 1 Analysis results of insoluble subsidence from Jintan

粒径/mm	筛余质量/g	质量含量/%	累计含量/%	堆积密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%
> 20	116.0	19.33	100.00	0.64	73.59
10 ~ 20	38.0	6.33	80.67	0.70	71.31
4.75 ~ 10	62.5	10.42	74.33	0.72	70.42
2 ~ 4.75	153.5	25.58	63.92	0.88	63.90
1 ~ 2	68.5	11.42	38.33	0.93	61.76
0.5 ~ 1	58.5	9.75	26.92	0.96	60.83
0.25 ~ 0.5	69.5	11.58	17.17	1.01	58.54
0.074 ~ 0.25	29.5	4.92	5.58	1.01	58.60
< 0.074	4.0	0.67	0.67	1.00	59.02

采用排水法测得了金坛盐岩不溶物的颗粒相对密度约为 2.44，同时采用堆积法(从大颗粒逐次到最

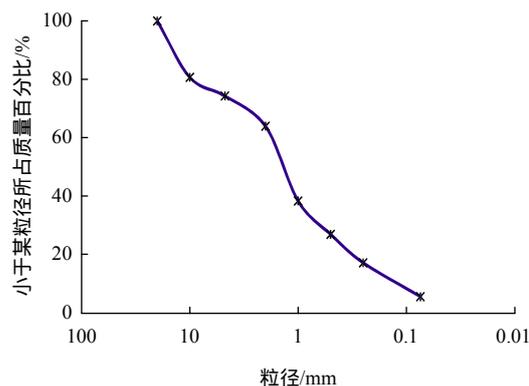


图 4 金坛盐岩不溶物颗粒级配曲线

Fig. 4 Grading curve of insoluble particles from Jintan salt rock

小颗粒)和以下公式求得各粒径对应的孔隙度<sup>[17]</sup>：

$$e = \frac{d_s \rho_w (1 + 0.01w)}{\rho} - 1 \quad (1)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (2)$$

式中： $d_s$  为颗粒相对密度，本文中取 2.44； $\rho_w$  为水的密度，本文取 1.0 g/cm<sup>3</sup>； $w$  为含水率； $\rho$  为沉渣堆积密度； $e$  为孔隙比； $n$  为孔隙度。

图 5 给出了几个筛分后的不溶物颗粒照片。观察发现，当粒径较小时，颗粒呈方形或球形；而当颗粒粒径超过 2 mm 后，颗粒开始呈现蜂窝状等不规则形状，且颗粒越大，蜂窝状构造越明显。试验所用的不溶物沉渣，自溶解后还在非饱和卤水中浸泡了两周时间，可认为是不溶物的最终形态。

此外，针对江苏淮安盐矿盐岩，也开展了相同的浸泡和颗粒级配测试试验，所得不溶物的粒径分布如图 6 所示。



(a) 粒径  $d < 0.074$  mm，粉末状



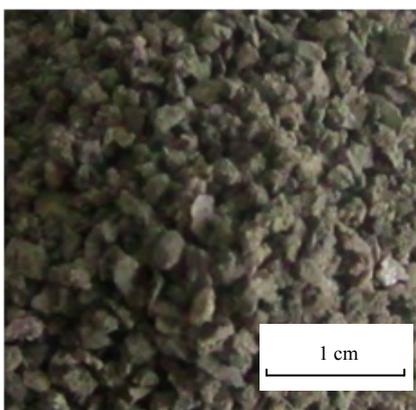
(b) 0.074 mm  $d < 0.25$  mm, 粉末状



(c) 0.25 mm  $d < 0.5$  mm, 球形和立方形



(d) 0.5 mm  $d < 1$  mm, 米粒状、球形、立方形



(e) 1 mm  $d < 2$  mm, 米粒状、立方形



(f) 2 mm  $d < 4.75$  mm, 细粒状, 形状不规则



(g) 10 mm  $d < 20$  mm, 细粒状, 形状不规则

图5 金坛沉渣筛分后典型粒组照片

Fig.5 Typical photos of the insoluble particles(Jintan)

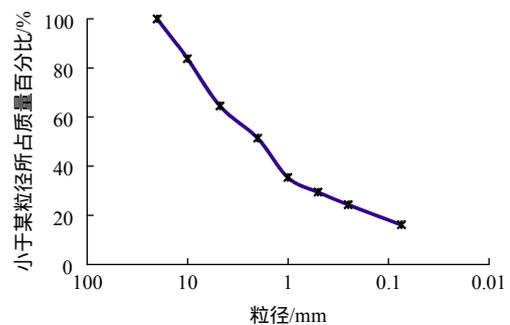


图6 淮安盐岩不溶物颗粒级配曲线

Fig.6 Grading curve of insoluble particles from Huai'an salt rock

### 3 不溶物颗粒运动性态研究

不溶物颗粒从溶腔顶板或者侧壁分离出来后, 即刻进入造腔流场, 一方面, 受到重力作用做下沉运动; 另一方面, 受到流场的影响, 被流场夹带着运动。粗重颗粒较快沉降, 细轻颗粒则会被流体携带, 居中颗粒的运动则较为复杂, 是一个典型固-液两相流问题。

本文研究重点不在于细究颗粒的复杂运动性

态，而是主要就不溶物颗粒是沉降并堆积于腔底，还是受流场携带而悬浮于卤水中开展分析。

### 3.1 颗粒在静水中的沉降状态

因为颗粒的重度大于水的重度，颗粒将受重力作用下沉。在开始自然下沉的一瞬间，初速度为 0，抗拒下沉的阻力也为 0，这时只有有效重力(重力扣除浮力)起作用，颗粒将加速下沉；随着下沉速度的增大，抗拒下沉的阻力也将增大，某一时刻下沉速度会达到某一极限值，此时颗粒所受的有效重力和阻力恰好相等，颗粒便以等速方式下沉。

根据经典流体力学理论<sup>[18]</sup>，颗粒在静水中的沉降状态可以用以下公式进行描述。

颗粒在静水中下沉的运动状态与其雷诺数有关：

$$Re_d = \frac{\omega d}{\nu} \quad (3)$$

式中： $d$  及  $\omega$  分别为颗粒的粒径及沉速， $\nu$  为水的运动黏滞系数。

当  $Re_d$  较小(约小于 0.5)时，颗粒几乎沿铅垂线滞性下沉；当  $Re_d$  较大(约大于 1 000)时，颗粒脱离铅垂线，以紊动状态下沉，附近的水体产生强烈的扰动和涡旋；而当  $Re_d$  介于 0.5 到 1 000 时，颗粒下沉的运动状态为过渡状态。

从图 5 可知，当粒径  $< 2$  mm 时，颗粒一般呈立方体或者近似球体，而当粒径  $> 2$  mm 时，颗粒的形状变得不规则。下面先考虑颗粒为球体，其沉降机制为对称绕流运动，绕流阻力一般表达式为

$$F = C_d \frac{\pi}{4} d^2 \gamma \frac{\omega^2}{2g} \quad (4)$$

式中： $\gamma$  为水的容重； $C_d$  为阻力系数，与颗粒形状、方位、表面粗糙度、水流紊动强度等多因素有关。对于表面光滑球形颗粒， $C_d$  一般可由颗粒雷诺数来确定。

当  $Re_d < 0.5$  时，为滞性状态， $C_d$  和  $Re_d$  的关系式为

$$C_d = \frac{24}{Re_d} \quad (5)$$

当  $Re_d > 1 000$  时，颗粒下沉处于紊动状态，阻力系数与雷诺数基本没有关系，而是接近一常数：

$$C_d = 0.45 \quad (6)$$

在  $0.5 < Re_d < 1 000$  的过渡区范围内，由水流质点加速所引起的惯性力逐渐大于黏滞力作用， $C_d$  和  $Re_d$  呈曲线关系，一般由试验确定。

### 3.2 颗粒在静水中的沉降速度

在颗粒等速下沉条件下，阻力  $F$  应与颗粒在水中受到的有效重力  $W$  相等。 $W$  的表达式为

$$W = \frac{1}{6}(\gamma_s - \gamma)\pi d^3 \quad (7)$$

式中： $\gamma_s$  为颗粒的容重。

令  $W = F$ ，由式(4)，(5)和(7)可得滞流区球体沉速公式：

$$\omega = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{\nu} \quad (8)$$

联立式(4)，(6)和(7)可得紊流区球体沉速公式：

$$\omega = 1.72 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (9)$$

而对于过渡区，则要通过试算并查表才可以求得球体的沉降速度。

为了方便应用，张瑞瑾<sup>[19]</sup>综合前人成果，提出了一个同时满足滞流区、紊流区和过渡区要求的泥沙沉降的通用公式：

$$\omega = \sqrt{\left(13.95 \frac{\nu}{d}\right)^2 + 1.09 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} - 13.95 \frac{\nu}{d} \quad (10)$$

张瑞瑾<sup>[19]</sup>给出的这一通用公式之所以能同时满足滞流区、过渡区和紊流区要求的原因有：(1) 由滞性状态到紊动状态的过渡是逐渐完成的；(2) 当颗粒增大时，属于滞性阻力的因素会逐渐减小，粒径  $d$  超过一定限度后，则滞性因素将减小到可以完全忽略不计。

对于常温条件下，当  $d < 0.1$  mm 时，颗粒下沉为滞流状态；当  $d > 4.0$  mm 时，为紊流状态； $0.1$  mm  $< d < 4.0$  mm 时，则颗粒可视为处于过渡状态。

## 4 水溶造腔建槽期颗粒运动及沉降分析

在建腔中、晚期，由于腔体容积巨大，可达几万甚至几十万立方米，除了造腔管柱管口附近流速较快外，腔内的流速其实是很小的，颗粒基本上都会慢慢沉降到腔底，只有极少量的微尘悬浮于卤水流场中。

然而，建槽期情况就大为不同。建槽通常采用正循环造腔，由于此时腔体较小，高速注入的淡水或淡卤水会对腔底有冲刷作用，向上的回流将携带

部分不溶物颗粒，较小的颗粒可能通过排卤管带出地面，大部分颗粒将在溶腔内运动。下面将对建槽期不溶物运动性态做初步探讨。

建槽期，可假设底部腔体为一近似圆筒，如图 7 所示。实际工程中，裸井直径一般为 216 mm，出水管(造腔内管)内径为 100.54 mm，出水口距离腔底一般为 2 m 左右，在常规注水流量下，出水口的流速可高达 4.2 m/s，即便在 30 m<sup>3</sup>/h 的小排量注水情况下，出水口流速仍能保持大于 1 m/s。如此高流速的流体，在造腔初期的狭小空间内流动，将具有非常强的夹砂流动能力，主要体现在：

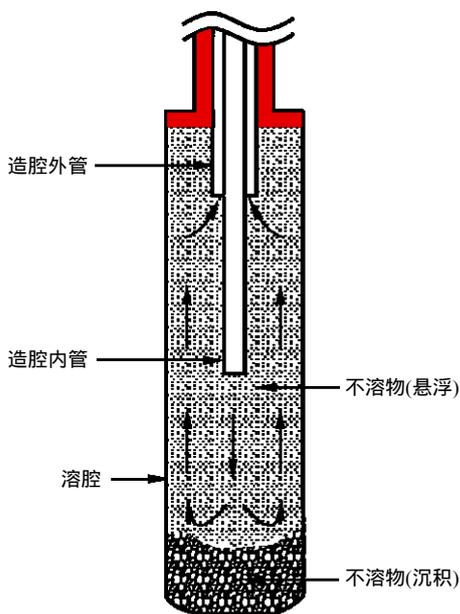


图 7 建槽期流场示意图

Fig.7 Sketch of flow field in sump building stage

(1) 出水口深度以下附近，注入的水向下流动占据了腔体的一部分横截面积，由于建槽初期与溶腔直径处于同一量级，这一影响不能忽略，导致卤水向上流动的横截面积减小为溶腔直径与出水管外径之差。

(2) 冲到出水管管口以上的不溶物颗粒，一部分较小的颗粒将悬浮在卤水中，而另一部分粒径较大的颗粒，在卤水的夹带下，将以与卤水冲击速度相当的速度向上运动，引起卤水向上夹砂能力进一步增加。

(3) 下沉的不溶物颗粒，将引起同体积的水上升，额外形成一个向上的流速。

鉴于以上因素，定义一个出水口附近卤水冲刷速度：

$$\omega_s = k \frac{4Q}{\pi(D^2 - D_{case}^2)} \tag{11}$$

式中： $Q$  为造腔注水流量(一般为 30 ~ 120 m<sup>3</sup>/h)； $D_{case}$  为造腔内管外径(金坛储气库为 114.3 mm)； $D$  为溶腔的直径； $k$  为冲刷系数，与溶腔直径及出水口流速有关，总体上溶腔直径越小、流速越大， $k$  值越大，综合参考相关领域的研究成果，建议取 1.2 ~ 1.6。

这时，可通过比较溶腔冲刷速度  $\omega_s$  和颗粒的静水下沉速度  $\omega$  来判断颗粒的运动情况，当  $\omega < \omega_s$  时，判断临界粒径  $d_{cr}$  以下的不溶物颗粒将被流场夹带运动而不沉淀于腔底。当然，也能通过比较排卤管内卤水流速和颗粒的静水下沉速度  $\omega$ ，得到可被携带至地面的不溶物小颗粒的最大粒径。

这里还要特别指出的是，直径较大的块体/颗粒也有可能被带出地面，特别是反循环时，此时块体粒径和造腔内管管径为一个量级，块体一旦被吸入出水管口，就可能会像被高压爆炸气流推动炮弹冲出炮膛一样被下面高压卤水推送至地面(这个问题将另文研究)。工程实践中曾多次发现粒径 10 cm 左右的不溶物块体(不再是“颗粒”了)被卤水带出地面或者卡堵于排卤管道内的现象。

## 5 数值模拟及工程应用

### 5.1 考虑不溶物沉降的建槽期仿真流程

根据前述理论成果，提出了考虑不溶物沉降的建槽期仿真流程(见图 8)。建槽伊始，初始溶腔直径

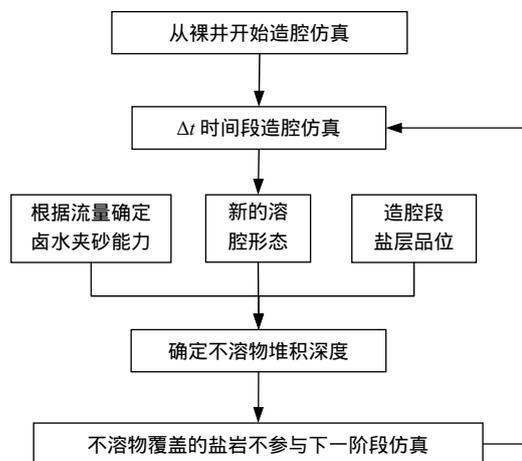


图 8 考虑不溶物沉降的建槽期仿真流程

Fig.8 Simulation flow chart considering insoluble settling in leaching sump stage

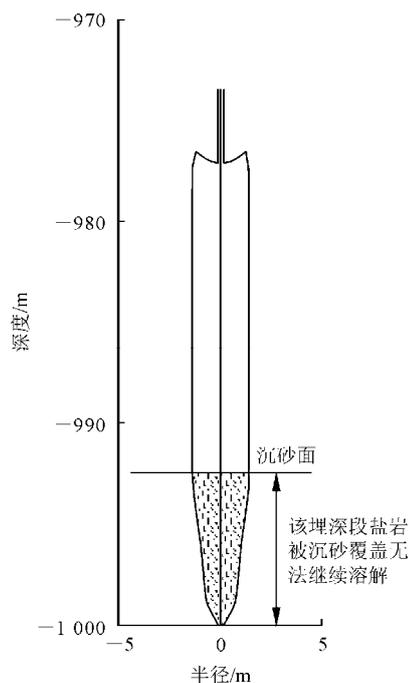
等于钻井裸眼直径，溶腔高度根据油垫层深度和井底深度确定，以此为基础开始第一步造腔仿真，经过仿真时间段 $\Delta t$ 后溶解形成新的溶腔形态，进一步结合造腔段盐层品位及造腔注水流量，应用前述理论公式(式(10)，(11))，确定卤水的夹砂能力，进而结合溶腔底部形态计算不溶物堆积深度，被不溶物覆盖的盐岩不参与下一阶段溶蚀仿真计算，然后进行下一阶段仿真，又形成新的溶腔，以此循环，直到溶腔尺寸达到预期，停止仿真。

### 5.2 工程算例

以江苏金坛储气库某在建溶腔为原型，该溶腔建槽期所涉及的盐层(950~1 000 m)综合可溶率为80%，裸井直径 216 mm，造腔外管内径 161.4 mm，油垫控制在造腔外管管口之上 0.5 m，造腔内管内径 100.54 mm(下入裸井底面以上 2 m)，正循环造腔，注水流量 60 m<sup>3</sup>/h。

图 9(a)为造腔模拟软件(Salt Cavern Builder)原始模拟结果。因未考虑高速卤水的夹砂能力，仿真形成的溶腔底部狭长，仅形成了少量的有效腔体空间，与实际工程观察和测试结果并不符合。

图 9(b)为应用本文成果修正造腔模拟软件后的计算结果。仿真计算过程中，每仿真 1 d 修正沉渣面位置，具体实施方法为：结合式(10)和(11)，确定判断临界粒径  $d_{cr}$ ，根据表 1 确定落入腔底的不溶物百分比，进而确定不溶物堆积深度。可见，采用本



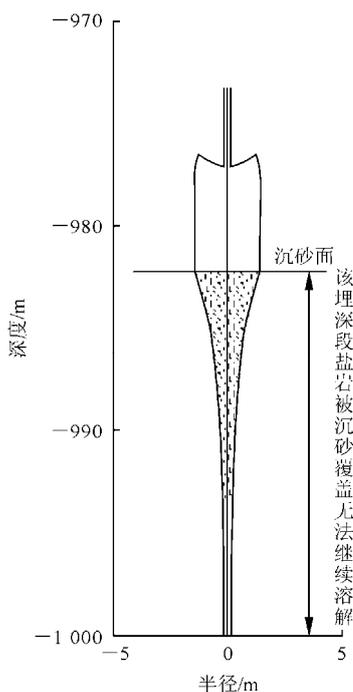
(b) 修正后结果

图 9 造腔模拟软件计算的建槽效果对比

Fig.9 Comparison of results of leaching sump

文理论进行修正后，由于考虑了建槽初期卤水的夹砂能力，除了粗重颗粒即刻沉降于腔底外，很大一部分不溶物悬浮在流场中，腔底沉砂面抬升明显变缓，腔体底部形态发展更加符合工程实际情况。

金坛储气库某盐穴建槽期造腔内管并未一直提升，而是保持在离腔底 2 m 处。若按照图 9(a)模拟结果，沉砂必将埋没造腔内管出水口，导致注水压力升高。图 10 为建槽期井口压力及液体密度监测曲线，从图中的井口压力变化曲线来看，建槽期注水及排卤压力均在正常范围内，未出现因沉砂堵管导致的压力突变现象。这一现象证实了本文图 9(b)的模拟结果是可信的，表明建槽期沉砂不会全部沉于腔底，而只是部分粗重颗粒沉淀于腔底，其他部分



(a) 原始模拟结果

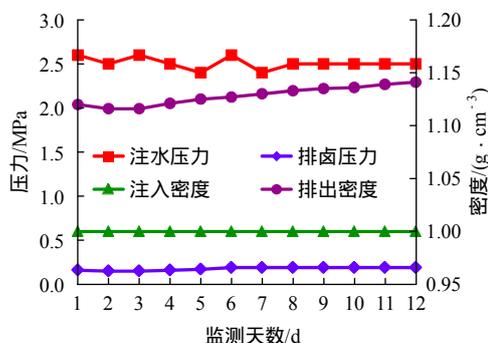


图 10 某盐穴建槽期井口压力及卤水密度监测曲线

Fig.10 Monitoring curves of wellhead pressure and brine density in leaching sump step of a salt cavern

颗粒被流场夹带流动。

另外,由以上研究结果得到启发:建槽期持续保持较大流量造腔,避免不溶物过多、过早堆积在溶腔底部,可起到扩大建槽体积的作用。

## 6 结论及展望

(1) 金坛及淮安矿区,粒径小于 20 mm 的不溶物颗粒占总不溶物的 80%左右,小于 2 mm 的占 40%左右,颗粒主要是方形或者球形。

(2) 建槽期溶腔尺寸小,卤水速度快,部分不溶物会在流场中处于悬浮状态,且颗粒粒径越小,越易悬浮。

(3) 综合考虑夹砂流动以及不溶物颗粒级配特征,建立了一套确定不溶物颗粒运动状态的方法:通过比对颗粒静水下沉速度和建槽期注水口以下小溶腔的冲刷流速,判断颗粒是沉淀于腔底还是被流场夹带运动。

(4) 将理论成果应用于造腔模拟软件开发,通过判断,确定沉淀于腔底不溶物颗粒的实际比例。现场注水压力和排卤监测数据表明,修正后建槽期溶腔模拟结果及预测腔体形态与工程实际更加吻合。

总体上,在储库建槽期,由于溶腔直径与造腔管柱直径尺寸相当,高速卤水流场对不溶物颗粒的运动性态的影响不容忽视,只有充分考虑到这一影响,才能得出符合现场实际的仿真模拟结果。

在储库建腔中后期,不溶物颗粒在溶腔底部的堆积,通常会埋没部分造腔内管,埋管后,不溶物的运动及堆积形态,对造腔工艺参数及盐腔形态发展也有重要影响,在下一步研究工作中将针对这一问题做细致分析。

### 参考文献(References):

- [1] YANG C H, LI Y P, QU D A. The state-of-the-art and research advances on the underground natural gas storage in bedded salt rocks in China[C]// 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. QIAN Qihu, ZHOU Yingxin, ed. Leiden: CRC Press, 2012: 682-683.
- [2] 刘艳辉,李 晓,李守定,等. 盐岩地下储气库泥岩夹层分布与结构特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3 627-3 632.(LIU Yanhui,

- LI Xiao, LI Shouding, 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): 3 627-3 632.(in Chinese))
- [3] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 26-34.(WANG Qingming. Solution mining for salt deposits[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 26-34. (in Chinese))
- [4] 刘 伟,李银平,杨春和,等. 层状盐岩能源储库典型夹层渗透特性及其密闭性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 500-506.(LIU Wei, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Investigation on permeable characteristics and tightness evaluation of typical interlayers of energy storage caverns in bedded salt rock formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 500-506.(in Chinese))
- [5] BAUER S J, EHGARTNER B L, LEVIN B L, et al. Waste disposal in horizontal solution mined caverns[C]// SMRI Fall Meeting. [S. l.]: [s. n.], 1998: 1-20.
- [6] BEKENDAM R, PAAR W. Induction of subsidence by brine removal[C]// SMRI Fall Meeting. Austria: [s. n.], 2002.
- [7] CHARNAVEL Y, LUBIN N. Insoluble deposit in salt cavern-test case[C]// SMRI Fall Meeting. Austria: [s. n.], 2002.
- [8] 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))
- [9] 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 1): 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.1): 114-116.(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): 2 301-2 308.(SHI Xilin, LI Yinping, YANG Chunhe, 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): 2 301-2 308.(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): 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)
- [12] 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): 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 Engineering, 2011, 33(12): 1 957–1 963.(in Chinese))
- [13] 姜德义, 邱华富, 易亮, 等. 大尺寸型盐造腔相似试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1 746–1 755.(JIANG Deyi, QIU Huaifu, YI Liang, et al. Similar experimental study of cavity building using large-size molded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1 746–1 755.(in Chinese))
- [14] 屈丹安, 施锡林, 李银平, 等. 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 2): 3 703–3 709.(QU Dan'an, SHI Xilin, LI Yinping, et al. 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(Supp. 2): 3 703–3 709.(in Chinese))
- [15] 李银平, 施锡林, 杨春和, 等. 深部盐矿油气储库水溶造腔控制的几个关键问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1 785–1 796.(LI Yinping, SHI Xilin, YANG Chunhe, et al. Several key problems about control of solution mining for oil/gas storage in deep salt mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1 785–1 796.(in Chinese))
- [16] 陈结, 姜德义, 刘春, 等. 盐穴建造期夹层与卤水运移相互作用机理分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, 35(7): 107–113.(CHEN Jie, JIANG Deyi, LIU Chun, et al. Analysis on the relationship of interlayer and brine migration in salt cavern construction period[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2012, 35(7): 107–113.(in Chinese))
- [17] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版, 北京: 清华大学出版社, 2013: 18–23.(LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 18–23.(in Chinese))
- [18] GRAF W H. Hydraulics of sediment transport[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984: 35–64.
- [19] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 46–55.(ZHANG Ruijin. River sediment dynamics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008: 46–55.(in Chinese))

## 下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

- (1) 考虑卸荷应力路径的深部采空区失稳局部能量释放判别准则；
- (2) 考虑围压效应的修正软岩热弹黏塑性本构模型；
- (3) 断层影响带的发育规律及其力学成因；
- (4) Shao-Zhu-Su 岩石流变模型的快速显式积分算法及比较研究；
- (5) CO<sub>2</sub>–水两相条件下砂岩致裂特征与有效应力模型试验研究；
- (6) 不同应力路径下花岗片麻岩渗透特性的试验研究；
- (7) 高速远程滑坡裹气流态化动力学特性实验研究；
- (8) 不同类型预应力锚索锚固性能现场试验对比研究。

**土工基础**