

# 裂隙倾角对石油洞库水封效果的影响

温毓繁<sup>1</sup>, 任旭华<sup>1</sup>, 张海波<sup>2</sup>, 张继勋<sup>1</sup>, 葛金花<sup>1</sup>, 王宝强<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 青岛市政工程管理处, 山东 青岛 266022)

**摘要:** 结合某大型地下水封石油洞库工程, 采用离散单元法, 运用 UDEC 软件, 模拟了不同工况下, 不同倾角裂隙的存在对洞库渗流场的影响, 并进而分析了在各渗流场情况下, 洞库的水封效果的变化。结果表明: 洞库周边的裂隙水压随角度增大而增大, 在 20°至 40°中, 裂隙水压快速增大, 在 40°至 70°中, 裂隙水压缓慢增大; 相同水封措施对倾角较小的裂隙岩体的水封效果比大倾角裂隙岩体的水封效果差, 要维持同等的水封效果就需要加大水幕洞水头, 但是小倾角洞库的涌水量较大倾角洞库的小。

**关键词:** 地下水; 水封石油洞库; 裂隙倾角; 离散单元法; 涌水量

**中图分类号:** TE822

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-643X(2014)05-0069-04

## Impact of fissure inclination angle on water seal effect of petroleum storage cavern

WEN Yufan<sup>1</sup>, REN Xuhua<sup>1</sup>, ZHANG Haibo<sup>2</sup>, ZHANG Jixun<sup>1</sup>, GE Jinhua<sup>1</sup>, WANG Baoqiang<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Qingdao Municipal Engineering Administration Department, Qingdao 266022, China)

**Abstract:** Combined with a large scale underground petroleum storage caverns Engineering, the paper took discrete element method and applied UDEC software to simulate the effect of different conditions and dip fractured rocks on seepage field. It also analyzed the effect of water seal in different seepage field conditions. The results shows that the fracture pressure surround cavern will increase with the increase of angle. From 20 to 40 degrees, the fissure water pressure increases quickly, but from 40 to 70 degrees, the fissure water pressure increases slowly. The effect of water seal in the fractured rock cavern of small angle is worse than that of fractured rock cavern with large angle. In order to maintain the water seal effect equally with the former, it is necessary to increase waterhead in the water curtain cave, but the water inflow in the fractured rock cavern with small angle is less than that with large angle.

**Key words:** groundwater; petroleum storage cavern; angle of fissure; discrete element method; water inflow

地下水封石油洞库是在地下水位下适当深度处开挖岩石形成洞库, 根据油水不混合, 水压大于油压的原理, 将石油水封到洞库中。由于洞库的岩壁中充满的裂隙水的压强大于储油压力, 这使得石油能够封存在由裂隙水和岩壁组成的密封空间中而不向外渗漏<sup>[1]</sup>。在运营期间, 只要始终使洞库上方的地下水位维持在一定高度就能保证油品不向外漏。维持地下水位的主要方式是在洞库上方开凿一系列的水幕洞, 通过水幕洞向岩体补充地下水达到维持地下水位的作用<sup>[2]</sup>。

离散单元法是 1971 年提出的一种新的数值计算方法。在离散单元法中, 一般是将岩体假定成离散块体的集合体, 同时裂隙、节理、断层等结构面当作是这些离散体之间相互作用的接触面<sup>[3]</sup>。Udec 是一款基于离散单元法的计算分析软件, 其中流体的流动是由相邻流体域的压力差决定的, 其中流动域中流体压力的大小由流动域中中心压力的大小决定<sup>[4]</sup>。按块体接触条件的不同, 裂隙岩体中流体的速率有两种计算方法: 分别是点接触和边-边接触<sup>[5]</sup>; 在点接触中:

收稿日期: 2014-05-10; 修回日期: 2014-05-24

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAK03B04); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2011491211)

作者简介: 温毓繁(1990-), 男, 江西石城人, 硕士研究生, 研究方向为地下工程。

$$v = -k_c \Delta p \tag{1}$$

式中： $v$  为流速，m/s； $k_c$  为接触处的渗透系数单位为，m/(Pa·s)。

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1) \tag{2}$$

式中： $\Delta p$  为压强差，Pa； $\rho_w$  为流体密度，kg/m<sup>3</sup>； $g$  为重力加速度，m/s<sup>2</sup>， $y_1$ 、 $y_2$  为两个流动域的中心坐标。在边-边接触中，按立方定律计算单宽流量，即

$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \tag{3}$$

式中： $q$  为单宽流量，m<sup>3</sup>/(s·m)； $k_j$  为裂隙的渗透系数，m/(Pa·s)（理论值为 1/12μ）；μ 为动力粘滞系数； $l$  为两流体域之间的接触长度，m； $a$  为接触的水力隙宽，单位为 m。

水在岩体中的渗透主要是通过岩体裂隙和岩体孔隙。岩体孔隙介质起储水作用，岩体裂隙介质起导水作用<sup>[7]</sup>。因此裂隙的形态是主要影响地下水封石油洞库的水封性因素。裂隙的几何要素主要包括裂隙密度，裂隙倾角，裂隙走向，裂隙迹长，裂隙开度<sup>[8]</sup>。本文主要研究的是裂隙倾角的影响。岩体的渗透性研究主要有 3 种模型：离散网络介质模型，等效介质模型，双重介质模型<sup>[9]</sup>。本文将采用离散网络介质模型来研究裂隙倾角对地下水封石油洞库水封效果的影响。所谓离散介质模型即忽略岩块的透水性，认为水只是在裂隙中流动。该模型可以较好地描述裂隙岩体的非均匀各向异性，特别是当岩块很致密时，可以忽略岩块渗透性时，因此具有拟真性好、精度高等优点<sup>[10]</sup>。

本文将结合某水封石油洞库工程，利用离散元软件 UDEC，研究在开挖工况、无水幕运行工况、有水幕运行工况下，不同的裂隙倾角对地下渗流场、洞库涌水量、洞库水封效果的影响。

1 工程概况

某地下水封石油洞库工程是我国在建的一个大型战略石油储备库，其设计库容为 300 万 m<sup>3</sup>。地下工程主要包括 9 个主洞室、2 条施工巷道、6 个竖井、2 条施工巷道及 5 条水幕巷道。其中的 9 个主洞室是平行设置的，每 3 个主洞室相连通组成一个罐体，共为 3 个洞罐组。主洞室的设计底面标高为 -50 m，长度为 484 ~ 717 m，洞高 30 m，洞跨 20 m，洞室截面为直墙圆拱形。相邻主洞室之间的设计净间距为 30m，主洞室与相邻施工巷道之间设计净间距是 25.25 m，水幕巷道布置在主洞室顶面以上 25 m（标高为 5 m）处，间隔 10 m 布置一个水幕钻孔。布置

情况如图 1 所示。

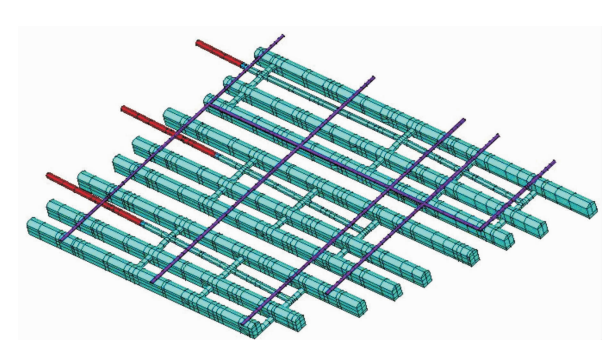


图 1 石油洞库布置图

2 数值模拟

2.1 计算模型

分别建立 2 组裂隙倾角为 20°与 160°、30°与 150°、40°与 140°、50°与 130°、60°与 120°、70°与 120°，裂隙间距均为 10 m 的模型，共计 6 组模型，水幕洞距离洞顶高 30 m，间距为 15 m 的模型。模型底部边界设定为定水头边界，大小为 260 m；左右水头边界设定为三角形分布水头，洞顶上方 30 m 处为 0 水头，模型底部为 260 m 水头；在无水幕运行工况下内部油压直接设定为 0.1 MPa。在加载水幕运行期，加载水头为 3 m；裂隙开度在正应力为 0 时设定为 1 mm，最小阈值为 0.5 mm。裂隙渗透系数取为 1 pa<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>。20°裂隙模型如图 2，其余模型仅裂隙角度的变化，在此不再罗列。

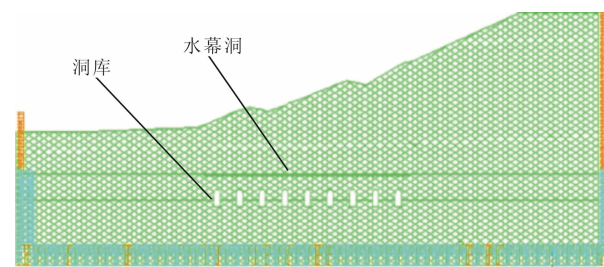


图 2 20°裂隙模型

2.2 计算参数

结合设计院提供的基本资料，岩石的物理力学参数见表 1，裂隙的物理力学参数见表 2。水的密度取为 1 000 kg/m<sup>3</sup>，体积模量为 0.2 GPa。

表 1 岩石物理力学参数

| MPa, kPa, kg/m <sup>3</sup> , (°), cm/s |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 体积模量                                    | 剪切模量 | 凝聚力  | 密度   | 内摩擦角 | 渗透系数 |
| 16.7                                    | 10.5 | 4500 | 2640 | 43.2 | 0    |

表 2 裂隙物理力学参数  
GPa/m, kPa, (°), m/(Pa·s)

| 法向<br>刚度 | 切向<br>刚度 | 内摩<br>擦角 | 粘聚力 | 渗透<br>系数 |
|----------|----------|----------|-----|----------|
| 10       | 1        | 30       | 450 | 200      |

2.3 计算工况

共分为 3 个工况,分别为无水幕开挖期工况,无水幕运行期工况,有水幕运行期工况。在无水幕开挖期工况中,只在模型边界加上高出洞顶 30 m 的水头;无水幕运行期工况是在无水幕开挖期工况基础之上加载洞库内油压,洞库内油压的大小是 0.1 MPa;水幕运行期工况是在无水幕运行期工况之上加载水幕洞水头,所加载的水幕洞水头是 3 m。

3 结果分析

3.1 洞库周边裂隙水压分析

设置水幕的根本目的是保证洞库周边的水压大于油压,从而保证油不外渗,洞库周边的水压越大洞库的水封越安全。从表 3 及图 3 中可知,水幕运行期洞库周边的平均水压均大于油压 0.1 MPa,洞库周边水压越大,表示水封性能越好。随着角度增大,洞库周边的平均裂隙水压均在增大,其中在 20°~40°中,裂隙的平均水压快速增大,在 40°~70°中,水压缓慢增长。因此,角度越大,洞库周边的水压越大,其水封效果越好,但是 45°左右的洞库的水封效果已经达到较高水平,角度继续增大,水封效果变化不明显。

3.2 洞库涌水量分析

在 3 个工况中,随着裂隙角度的增大,洞库的总涌水量都在增加,角度越大,增速越大。在无水幕开挖期中,70°裂隙洞库的涌水量是 20°裂隙时的 20

倍;在无水幕运行期,70°裂隙洞库的涌水量是 20°是 的 7 倍;在水幕运行期,70°裂隙洞库的涌水量是 20°时的 5 倍。因此洞库的裂隙倾角对洞库的涌水量有较大的影响,倾角越大,洞库的涌水量越大(如表 4 及图 4 所示)。

表 3 水幕运行期洞库周边裂隙平均水压 (°), MPa

| 角度 | 20    | 30   | 40    | 50    | 60    | 70    |
|----|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 水压 | 0.111 | 0.13 | 0.143 | 0.148 | 0.150 | 0.151 |

在水幕运行期的所有角度中,其涌水量较无水幕运行期增加 1 至 4 倍,因此加载水幕洞后洞库的涌水量将显著增加。在无水幕运行期,由于洞库内的油压的作用,抵消了一部分地下水压,使得洞库的渗透压强降低,无水幕运行期的涌水量较开挖期的涌水量有一定的降低。在水幕运行期中,20°~50°的洞库顶部的涌水量远大于洞库中底部的涌水量,在 60°~70°中洞库的顶部涌水量与洞库中底部涌水量相近。在小角度洞库中,对洞顶进行灌浆封堵就能较好的降低洞库的涌水量,在大角度洞库中,各位置的涌水量相对均匀,需对全段面进行灌浆封堵方能降低洞库的涌水量,见图 5。

表 4 洞库总涌水量 (°), cm³/s

| 角度 | 开挖期<br>涌水量 | 运行期<br>涌水量 | 水幕运行<br>期涌水量 |
|----|------------|------------|--------------|
| 20 | 5.6        | 14.4       | 104.4        |
| 30 | 12.6       | 20.6       | 176.8        |
| 40 | 34.2       | 18.8       | 227.2        |
| 50 | 50.8       | 20.4       | 309.6        |
| 60 | 77.6       | 28.8       | 329.6        |
| 70 | 121.2      | 103.6      | 502.0        |

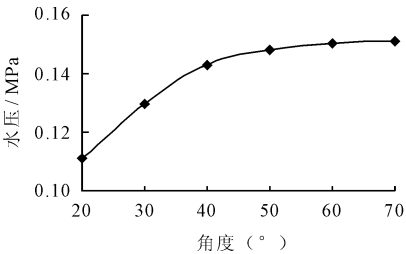


图 3 水幕运行期洞库周边裂隙平均水压

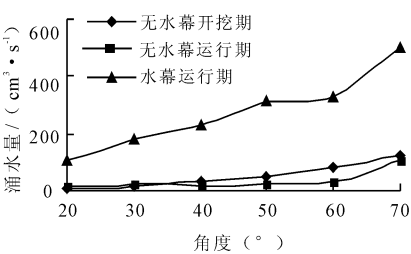


图 4 角度 - 涌水量图

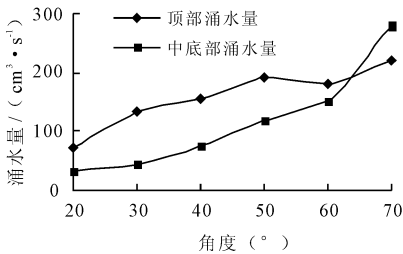


图 5 水幕运行期洞库顶部及中底部涌水量图

3.3 水封性分析

①在无水幕运行期及水幕运行期,洞库的漏油量随着角度的增大而减少,并最终降至 0(如表 5 所示)。因此,角度越大,洞库的漏油量越少,其水封

性越好,洞库更安全。对无水幕运行期及有水幕运行期进行对比,加载水幕后洞库的漏油量降低明显,其中 20°裂隙的洞库漏油量从 7.8 cm³/s 降至 3.2 cm³/s,30°裂隙的洞库漏油量了从 9 cm³/s 降至 2.8

$\text{cm}^3/\text{s}$ ,  $40^\circ$  的裂隙的洞库漏油量从  $2.6 \text{ cm}^3/\text{s}$  降至 0 (如表 4 所示)。加载水幕, 有效的降低了石油的外渗。在小角度裂隙中, 仍有一部分的石油外渗, 水封性仍外达到要求。只有继续加大水幕洞水压方能完全的封住小角度裂隙洞库中的渗流通道。

②与洞库相通的部分裂隙在压力下闭合, 洞内石油在油压作用下无法渗透出去, 使之具备了存储石油的能力, 这部分裂隙在本文中称之为储油裂隙; 这部分裂隙可能由于水压的变化而变成涌水裂隙, 也可能由于油压的变化而变成漏油裂隙。通过对比加载水幕前后的两个工况, 在加载水幕后, 所有的储油裂隙均转化成涌水裂隙(如表 5 所示), 保证洞内石油的稳定而不外漏。

| 表 5 透油量、储油裂隙数 ( $^\circ$ ), $\text{cm}^3/\text{s}$ , 条 |            |            |            |            |
|--------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 裂隙角度                                                   | 漏油量        |            | 储油裂隙数      |            |
|                                                        | 无水幕<br>运行期 | 有水幕<br>运行期 | 无水幕<br>运行期 | 有水幕<br>运行期 |
| 20                                                     | 7.8        | 3.2        | 26         | 0          |
| 30                                                     | 9.0        | 2.8        | 24         | 0          |
| 40                                                     | 2.6        | 0          | 34         | 0          |
| 50                                                     | 0          | 0          | 33         | 0          |
| 60                                                     | 0          | 0          | 29         | 0          |
| 70                                                     | 0          | 0          | 32         | 0          |

4 结 语

- (1)通过研究分析, 运用离散元程序 UDEC, 对某大型地下水封石油洞库工程在不同工况下, 不同倾角裂隙岩体对地下水封石油洞库水封性的影响开展分析研究是可行的。
- (2)加载相同的水幕洞压强, 角度越大, 洞库周边的裂隙水压越大; 在  $20^\circ$  至  $40^\circ$  中, 裂隙水压快速增大, 在  $40^\circ$  至  $70^\circ$  中, 裂隙水压缓慢增大。  $45^\circ$  左右的洞库的水封安全性已经达到较高的水平。
- (3)在岩性相同的情况下, 洞库的裂隙倾角小, 其涌水量小, 裂隙倾角大, 其涌水量大。若实际工程

- 中, 洞库附近大倾角裂隙居多时, 要经常对水幕洞进行补水, 防止地下水位的降低。
- (4)要达到相同的水封效果, 岩性相同的情况下, 如裂隙倾角较小水封需要较大的水头, 裂隙倾角较大的岩体则可以加载较小的水头。
- (5)针对采用加载水幕运行的地下洞库, 对小倾角裂隙洞库的顶部裂隙岩体进行灌浆封堵可以有效的减少渗透量, 而大倾角洞库则需采用全断面灌浆封堵的方法方能有效的减少渗透量。

参考文献:

[1] 杜国敏, 耿晓梅, 徐宝华. 国外地下水封岩洞石油库的建设与发展[J]. 油气储运, 2006, 25(4): 5-6.

[2] 杨明举. 地下水封裸洞储气应力场、渗流场、储气场耦合模型的研究及其工程应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.

[3] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

[4] 许光祥. 裂隙岩体渗流与卸荷力学相互作用及裂隙排水研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.

[5] 冯学敏. 裂隙岩体渗流场及其渗透特性的复合单元法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006.

[6] 许光祥, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 74-79.

[7] 刘贯群, 韩 曼, 宋 涛, 等. 地下水封石油洞库渗流场的数值分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 819-824.

[8] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣. 岩体结构面网络模拟技术研究进展[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 105-108.

[9] 刘贯群, 韩 曼, 宋 涛, 等. 地下水封石油洞库渗流场的数值分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版). 2007, 37(5): 819-824.

[10] 杨明举, 关宝树. 地下水封储气洞库原理及数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报. 2001, 20(3): 301-305.