

水封油库地下水位动态变化特性数值研究

蒋中明^{1,2}, 冯树荣², 曾 铃¹, 赵海斌², 梅松华²

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 为认识水封石油洞库区地下水位的动态变化过程, 以黄岛地下水封石油洞库的基本地质条件为依据, 采用饱和和非饱和非恒定流数值分析方法, 对水封油库在施工期和运行期可能出现工况下的地下水位变化情况进行了全过程数值仿真计算, 分析了不同时期洞库区附近岩体的地下水位分布特点及变化过程。研究表明水封油库区内的地下水位变化过程主要受岩体渗透系数、洞库开挖方式和运行方式的影响; 当洞库区岩体渗透系数大于 1.0×10^{-7} m/s 时, 洞顶上方岩体中的地下水将被疏干, 必须设置水幕系统来保证洞库的水封效果。

关键词: 水封油库; 非恒定渗流; 地下水位变化特性; 数值分析; 水幕系统

中图分类号: TU462 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)11-1780-06

作者简介: 蒋中明(1969-), 男, 博士后, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的科研教学工作。E-mail: zzmmjiang@163.com。

Numerical study on variation features of water table in area of underground rock cavern for oil storage

JIANG Zhong-ming^{1,2}, FENG Shu-rong², ZENG Ling¹, ZHAO Hai-bin², MEI Song-hua²

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of science & technology, Changsha 410004, China; 2. Hydro China Zhongnan

Engineering Corporation, Changsha 410014, China)

Abstract: To better understand the variation process of water table near the caverns, based on the basic geological conditions of Huangdao underground rock cavern for an oil storage project, the saturated and unsaturated non steady seepage numerical method is employed to simulate the variation of water table under different cases during the construction and operation periods. The distribution features and whole variation process of the water table near the caverns during different periods are analyzed. It indicates that the variation of water table due to the excavation of caverns is mainly influenced by the values of coefficient of permeability, excavated ways and operation ways of caverns. The water on the top of the caverns for oil storage will be drained off if the coefficient of permeability of rock mass is greater than 10×10^{-7} m/s. In this situation, the water curtain system should be set for the purpose to ensure the effect of water sealing.

Key words: underground rock cavern for oil storage; non steady seepage; variation feature of water table; numerical analysis; water curtain system

0 引言

地下水封石油洞库作为原油储备的方式之一在中国已经进入实施阶段。地下水封油库的原理是利用洞室周边岩体裂隙水压力与洞库中的油压力之差封存洞库中的原油。因此为达到良好的水封效果, 地下水封油库必须布置在某一稳定的地下水位线以下, 以保证洞库边墙和底板裂隙岩体中的水压力大于洞库中相应位置处的储油压力。洞库区地下水位的变化与洞库初始地下水位、洞库开挖过程及油库运行方式等密切相关^[1]。洞库上方岩体内的地下水位变化在施工期和运行期都将经历一个复杂的变化过程, 文献[2]通过对宁波石浦水封油库1976年7月—1978年7月地下水位观

测数据的分析后也证实了这一情况。同时文献[2]还明确地指出运行期水封油库罐体周围存在一个地下水的降落漏斗, 而且漏斗曲线随罐内液面的高低而变化。洞库区出现的降落漏斗一般源于施工期洞室开挖处理不当而在洞室顶部形成降落漏斗, 同时也会导致洞室周围裂隙水疏干^[3]。洞库周围岩体中的降落漏斗过大和水体疏干严重时可能导致水封条件的丧失。由于洞库区岩体渗透性一般较小, 洞库水封条件丧失后再恢复将是一个复杂而漫长过程。因此在施工期应采取相

基金项目: 中国水电工程顾问集团科技计划项目(2010680); 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金(200813047)

收稿日期: 2010-09-17

应的裂隙水保护措施以避免洞库周围岩体中的水体被大范围疏干。

文献[4]通过室内实验和现场监测资料的分析证实了在长期空库排水条件下储油洞库拱顶以上还保持了一定厚度的水柱。文献[5, 6]利用三维非恒定流数值方法研究了惠州和湛江地下水封油库的地下水变化情况, 结果表明洞库上方岩体内的水体在长达3 a的施工过程中也不会被完全疏干。

由此可见, 关于洞库区上方岩体中地下水位存在形态的认识存在两种观点: 一是洞库上方存在明显的与洞库边墙相连接的地下水位降落漏斗曲线^[2], 这也是采用解析解方法求解洞库流量的前提; 另外也有文献指出洞顶上方不存在降落漏斗曲线^[4]。从相关文献^[2-6]的论述来看, 这两种观点都有各自的充分依据。在中国目前大型水封油库建设的起步阶段, 需要对这一问题进行充分的论证和研究。这两种看似矛盾的观点是否意味着洞库上方岩体中的水体被疏干有可能存在一定的前提条件, 而非在任何情况下都会被完全疏干呢? 要全面认识这一问题, 需要弄清楚洞库周围的渗流场动态分布, 而解析法是不能给出满意的解答的; 数值分析方法则可以较好地模拟水封油库岩体渗流场变化和洞库区地下水位变化过程^[7]。考虑到洞库区地下水位存在形式是洞库水幕系统设置的重要依据, 本文以黄岛水封石油洞库的水文地质条件为依据, 尝试采用非恒定流数值方法对不同情况下的储油洞库区地下水动态变化过程进行探讨, 以期为水封石油洞库工程中水幕系统的合理决策提供参考依据。

1 饱和非饱和非恒定流基本理论

目前中国拟建的4个大型地下水封石油洞库施工期基本都安排在3 a左右。考虑到洞库开挖的过程性, 洞库区地下水位变化将始终处于一个动态变化过程之中; 地下水位变化过程实质上也反映了洞库区岩体饱和非饱和渗流的相互转化过程, 而这个过程可以采用饱和非饱和非恒定流理论加以分析。岩体饱和非饱和渗流本构关系仍采用达西定律。洞库区岩体非恒定渗流偏微分方程形式如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + w = u_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中 H 为岩体裂隙中的总水头; K_x 和 K_y 为 x 和 y 方向的渗透系数; w 为源汇项; u_s 为储水率, t 为时间。

岩体非恒定渗流有限元方程为

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}_{,t} = \{Q\} \quad (2)$$

式中 $[K]$ 为单元特征矩阵; $[M]$ 为单元质量矩阵;

$\{Q\}$ 为节点流量向量。

有限元方程求解结合以下边界条件进行:

$$H(x, y, t) = H_1 \quad ((x, y) \in S_1) ; \quad (3)$$

$$k \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{S_2} = q(x, y, t) \quad ((x, y) \in S_2) . \quad (4)$$

式中 S_1 为已知水头边界; S_2 为已知流量边界。

目前大多数学者在渗流分析时对洞库边界条件都概化为定水头边界^[7-9]。这种处理方法对洞库施工期渗流数值模拟存在较大不足。实际上洞库边界上的水头随着洞库周围地下水不断渗入洞库而变化, 在长期疏干作用下, 洞库边界附近岩体甚至出现非饱和状态, 在这种情况下仍然采用定水头边界对洞库边界附近渗流场的模拟会带来较大的误差。为了更加真实模拟岩土中的水体自由出渗的物理现象, 一些商业程序(如GeoStudio)在求解时提供了自由排水边界。实际上自由排水边界是流量边界的另一种形式。当边界设置为自由排水边界的情况下, 边界上的流量大小取决于边界最近单元的实际渗透系数和当前状态下单元孔隙水压力的大小以及与该节点相联系的边界长度值, 并且随着求解时间步的变化而变化。因此, 进行施工期渗流分析时, 洞库边墙、顶拱边界按自由排水边界处理更合理。

非恒定渗流分析的初始条件为

$$H(x, y, 0) = H_0 \quad ((x, y) \in \Omega) . \quad (5)$$

随着洞库周围岩体内的水分不断地排出, 拱顶和边墙附近的岩体将从饱和状态演变为非饱和状态; 而在储油后, 洞库周围的岩体将逐渐恢复到饱和状态。因此洞库区围岩的渗流是一个饱和非饱和渗流过程。在饱和非饱和渗流数值分析中, 岩土体的渗透系数与单元的饱和度相关, 较为常用的渗透系数与饱和度的关系为 Van Genuchten 模型。

2 数值模型及计算方案

2.1 工程概况

国家石油储备黄岛地下水封洞库工程包括地下工程和地上辅助设施两部分, 设计库容为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。地下工程主要包括 2 条施工巷道及其连接巷道、9 个主洞室、9 个竖井以及 5 条水幕巷道。9 个主洞室按北偏西 45° 平行设置, 每 3 个主洞室之间通过 4 条连接巷道组成一个罐体, 共分为 3 个洞罐组。主洞室设计底面标高为 -50 m, 长度为 $484 \sim 717 \text{ m}$ 不等, 设计洞跨 20 m , 洞高 30 m , 截面形状为直墙圆拱形。主洞室壁与相邻施工巷道壁之间设计净间距为 25 m , 两个相邻主洞室之间设计净间距为 30 m 。图 1 为洞库布置

示意图。

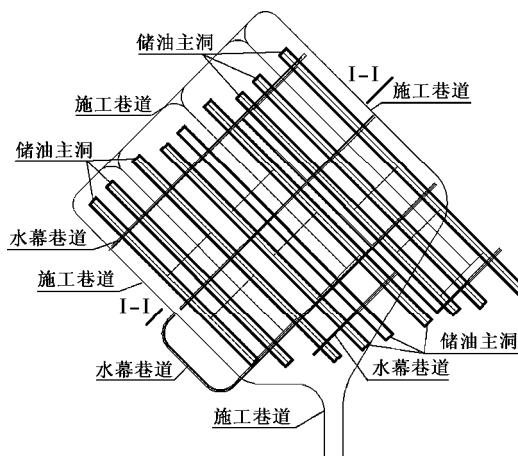


图 1 洞库布置示意图

Fig. 1 Layout of caverns

2.2 数值模型

数值分析软件采用 GeoStudio 软件中的渗流分析模块。计算剖面选择在洞库中间部位横剖面 I-I 进行有限元建模。平面有限元计算范围从施工巷道外边缘向外各延伸 600 m, 模型底部高程-250 m, 顶部为自然高程, 模型总长 1805 m。计算模型单元数量为 7321, 节点数量 5789。网格自动剖分为四边形和三角形单元, 对洞室附近岩体进行单元加密处理。图 2 为有限元计算网格图。

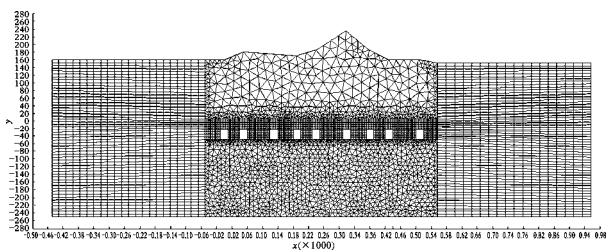


图 2 计算网格图

Fig. 2 Meshes for FEM analysis

初始条件: 根据库址区钻孔水位观测资料及库址区外围水文地质调查资料, 钻孔的水位标高为 93.07 ~ 268.48 m, 库址区外围水井及地表水体水位标高为 39.00 ~ 124.35 m, 地下水位变化幅度一般小于 5 m, 地下水位标高变化与地形基本一致, 水位标高最小值 39.00 m 为远离洞库的殷家河水库水位。计算时, 洞库位置初始水位按钻孔水位考虑, 进行初始渗流场拟合计算。

边界条件: 模型计算边界位于影响区半径范围外, 因此认为边界不受地下洞室的影响。模型底部水平边界设定为不渗透边界, 铅直边界设定为已知水头边界。施工期洞库边墙、顶拱按自由排水边界处理; 运行期地下油库边墙和底板以及水幕孔布置平面概化为定水头边界, 注水孔水头按高出水幕孔高程 2 m 控制。地表降雨入渗的年均降水量为 821.4 mm。

水力学模型: 各向同性达西流模型。

计算水力学参数: 为了有效地封存地下洞库中的原油, 地下石油洞库都选择布置在渗透性小的地层中, 例如韩国 Yeosu peninsula 石油洞库区岩体渗透系数^[10]为 $i \times 10^{-9} \sim i \times 10^{-10}$ m/s; 韩国 U2 石油洞库区岩体渗透系数^[11]为 $i \times 10^{-8}$ m/s; 锦州地下石油洞库围岩渗透系数^[8]则在 $i \times 10^{-5} \sim i \times 10^{-9}$ m/s 之间变化。根据现场渗透试验成果, 黄岛地下石油洞库区围岩渗透系数也在 $i \times 10^{-9} \sim i \times 10^{-10}$ m/s; 湛江地下石油洞库区围岩渗透系数也在 $i \times 10^{-7} \sim i \times 10^{-9}$ m/s。由此可见, 尽管地下储油洞库区岩体渗透系数较小, 但不同的工程或同一工程的不同部位, 其渗透性相差也在 2 ~ 3 个量级之间变化。针对这种情况, 数值计算时渗透系数分别取 $k=1.15 \times 10^{-9}$ m/s, $k=1.15 \times 10^{-8}$ m/s, $k=1.15 \times 10^{-7}$ m/s, 共计 3 种情况。渗透系数取值变化的计算目的是为了研究渗透系数变化对地下水位变化的影响。

2.3 计算方案设计

由于地下储油洞库的规模宏大, 其施工期一般都在 3 a 以上, 完全按实际开挖进度模拟洞库施工过程引起的地下水位变化难度较大。因此, 数值模拟考虑 9 个洞库一次开挖完成, 然后排水 3 a 的最不利情况和洞库分三步开挖, 然后逐步排水两种情况。现有的资料表明, 国内外的地下水封石油洞库大都采用了水幕系统, 但也有少量未采取水幕系统而成功储油的工程, 因此计算中考虑水幕注水和不注水两种工况。对每种渗透系数均按表 1 设计的计算方案进行数值计算。

表 1 计算方案

Table 1 Calculation scheme

工况编号	工况描述
1	9 个洞库一次性开挖完成 (水幕孔不注水)
2	分步开挖, 0 ~ 1 a 开挖 #1 ~ #3 洞库, 1 ~ 2 a 开挖 #4 ~ #6 洞库, 2 ~ 3 a 开挖 7 ~ 9 号洞库 (水幕孔不注水)
3	9 个洞库一次性开挖 (施工 2 a 后水幕孔开始注水)
4	工况 1 完成时计算水位, 储油 50 a (水幕孔不注水)
5	工况 3 完成时计算水位, 储油 50 a (水幕孔注水)

3 洞库区地下水位动态变化分析

水封油库区的地下水位变化对洞库的运行有着至关重要的影响。关于洞库区洞库上方地下水位在施工及运行过程中的变化情况, 目前观点还不统一。从现有文献来看, 大部分文献中均采用了洞库上方水体在施工及运行期将被疏干而形成一个降落漏斗的假定。如果这个假定成立, 洞库排水形成的降落漏斗必然影响到洞库储油功能的正常发挥。由于洞库在储油

运行过程中会在拱顶位置积聚大量的油气; 油气的积聚会导致洞罐顶部的压力增加, 如果洞罐上方岩体中的水头不足, 油气很可能通过岩体中的裂隙进入到大气中, 污染大气, 危害人体健康, 甚至会产生安全事故^[12]。

图 3 为施工期水幕孔不注水情况下的洞库一次性开挖 3 a 后的地下水位和孔隙水压力分布等值图 (工况 1)。由图可知, 当岩体渗透系数在 10^{-7} m/s 量级时, 中间 6 个洞库上方岩体均进入到非饱和状态, 山体中原地下水位下降幅度明显, 洞库区形成了明显的水位降落漏斗。同时左边 2 个洞库和右边 1 个洞库的围岩因排水作用也出现了一定范围的非饱和区, 其中洞顶的非饱和区明显大于洞库边墙附近岩体的非饱和区, 洞库上方出现不连续的地下水位线。

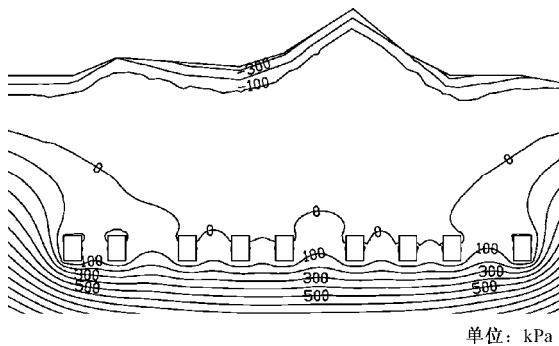


图 3 施工完成时孔隙水压力等值图 (不注水)

Fig. 3 Contours of pore pressure near caverns after construction (without water injection)

图 4 为洞库一次性开挖且水幕孔在施工期注水情况下的地下水位和孔隙水压力分布等值图 (工况 3)。在开挖 2 a 后对水幕孔进行注水时, 洞库上方岩体中的地下水位也会产生较大幅度的下降, 但由于水幕孔注水作用, 地下水位的下降幅度远小于不注水工况。洞库上方岩体中的水位降落漏斗也不十分明显。同时, 由于水幕系统的补水, 使得储油洞库附近岩体的非饱和区范围十分有限。由此可见, 施工期水幕系统注水与否对地下水位的影响至关重要。

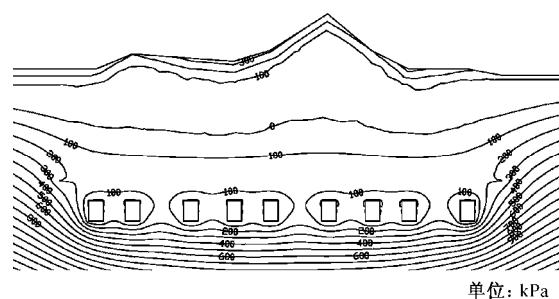


图 4 施工完成时孔隙水压力等值图 (注水)

Fig. 4 Contours of pore pressure near caverns after construction (with water injection)

图 5 给出了不注水条件下洞库开挖后不同时期的地下水位变化过程图 (工况 1)。在洞库开挖之前, 洞库上方岩体中的地下水位变化基本与地形一致。由于岩体渗透性较大, 开挖 180 d 后地下水位的最大降幅达到 101 m 左右, 第 4 和第 5 洞库之间拱顶上方岩体以及#7 和#8 洞库之间拱顶上方岩体中的水体也被大量排出而形成连通的地下水位线。开挖后 180~360 d 之间, 地下水位下降也比较迅速, 360 d 后#4 和#5 洞库之间拱顶上方岩体非饱和区与地表大气连通。第 2 年~第 3 年之间的地下水位的下降速度明显放缓, 岩体中的渗流逐步趋向于恒定渗流。

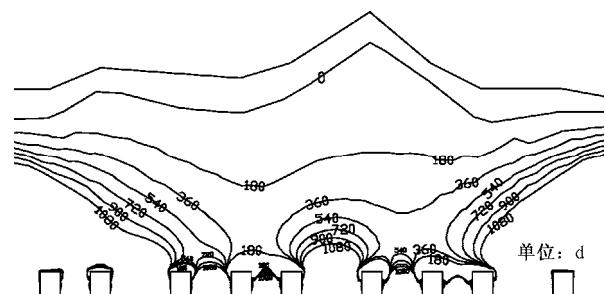


图 5 不同时期地下水位变化过程图 (不注水)

Fig. 5 Variation process of water table during different periods (without water injection)

图 6 是洞库分三步开挖不同时段的地下水位变化过程 (工况 2)。对比图 5, 6 可发现, 洞库一次开挖和分步开挖最终形成的地下水位基本一致, 但其中间变化过程却不同。在分步开挖 360 d 情况下, 洞库上方还保留了相当厚度的地下水体。由此可见, 施工方式的不同也是影响地下水位变化的重要因素之一。

图 7 给出了工况 3 注水条件下洞库开挖后不同时期的地下水位变化过程图。由于水幕孔的注水, 一方面补给了因开挖而形成的洞库上方非饱和区裂隙岩体, 同时水幕系统注水向上抬高了水幕系统布置平面上方和下方的地下水位。使得水幕系统布置平面上方和下方的非饱和岩体重新饱和, 导致洞库上方岩体中的地下水位 180 d 中快速升高近 90 m; 而注水 180 d 后地下水位的变化缓慢。

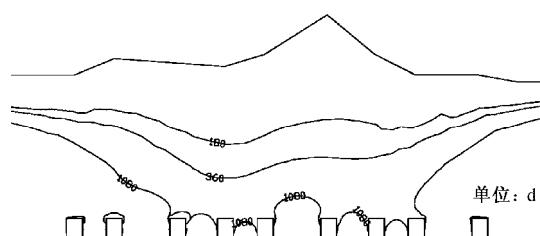


图 6 工况 2 条件下的地下水位变化过程图 (不注水)

Fig. 6 Variation process of water table in Case 2 (without water injection)

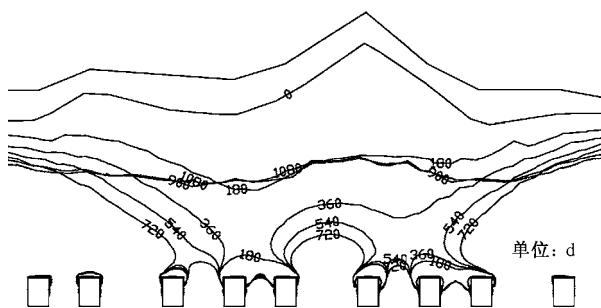


图 7 工况 3 条件下的地下水位变化过程图 (注水)

Fig. 7 Variation process of water table in Case 3 (with water injection)

图 5, 7 表明了设置水幕系统和不设置水幕系统情况下, 洞库区地下水位变化过程和规律完全不同; 同时指出洞库区饱和非饱和非恒定渗流分析过程可以清晰地反映洞库开挖引起的地下水位变化过程。对地下水位变化过程的充分认识是洞库区地下水合理管理的基本前提之一。

图 8 为不注水条件下运行期洞库地下水位变化过程图 (工况 4)。在不设置水幕系统的条件下, 因施工开挖在洞库上方岩体中形成了大量的与地表大气连通的非饱和区。在洞库区周围水体补给作用下, 这部分非饱和区在储油后将逐渐恢复到饱和状态, 即洞库上方的岩体地下水位会逐渐恢复。图 8 还表明在维持 0.2 MPa 储油压力作用下洞库运行 50 a, 洞库上方地下水位将经历一个较为缓慢的下降过程, 并逐步稳定在距离洞顶 25 m 位置处。

图 9 为注水条件下运行期洞库地下水位变化过程图 (工况 5)。在施工完成 2 a 后开始注水的条件下, 洞库上方岩体中将保持较高的地下水位。运行期储油开始后 (图中第 0 天), 如果保持洞库 0.2 MPa 储油压力, 洞库上方地下水位将逐渐缓慢地降低。洞库运行 50 a 后, 地下水位也逐步稳定在距离洞顶 49 m 位置处。注水情况下洞库上方保留的水体厚度远大于不注水情况下洞库上方保留的水体厚度。

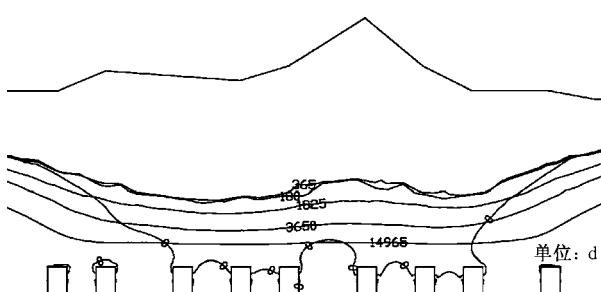


图 8 运行期地下水位变化过程图 (不注水)

Fig. 8 Variation process of water table during operation period (without water injection)

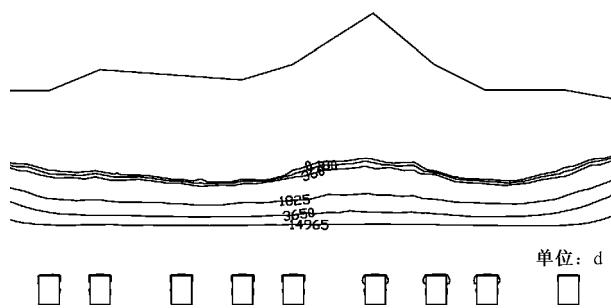


图 9 运行期地下水位变化过程图 (注水)

Fig. 9 Variation process of water table during operation period (with water injection)

4 岩体渗透系数取值对地下水位影响

图 10 为注水和不注水条件下洞库开挖 3 a 后的地下水位对比图。无论洞库上方是否设置水幕系统, 当洞库区岩体渗透系数小于 1.0×10^{-8} m/s 条件下, 洞库上方的地下水位下降幅度都比较小, 而当洞库区岩体渗透系数大于 1.0×10^{-7} m/s 时, 洞库上方的地下水位将产生大幅度下降, 特别是不注水条件下洞库区地下水位会下降到洞库拱顶位置, 并在洞库区形成巨大的降落漏斗。洞库区因疏干形成大范围降落漏斗后, 洞库上方岩体裂隙与大气连通, 严重影响运行期洞库上方地下水位恢复。因此从安全储油的角度出发, 洞库区不宜选择在岩体渗透系数大于 1.0×10^{-7} m/s 的地区。如洞库区局部存在渗透系数大于 1.0×10^{-7} m/s 的岩体, 则必须对该部分岩体进行防渗处理。

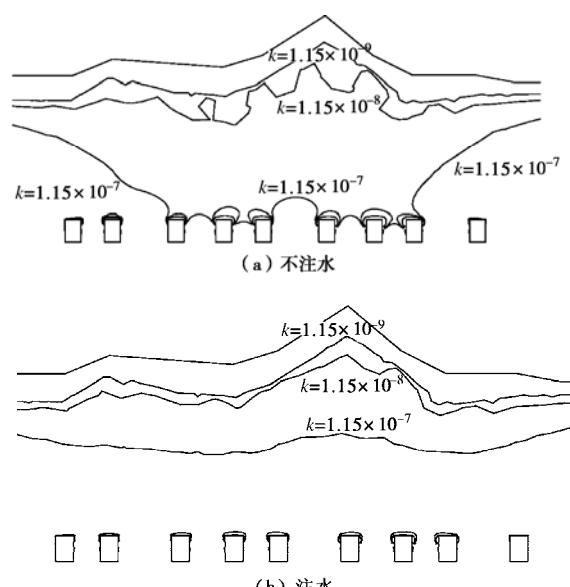


图 10 开挖完成后的地下水位对比

Fig. 10 Comparison of water tables after excavation of caverns

5 结 论

大型水封石油洞库区地下水位变化受洞库区围

岩渗透系数大小、洞库开挖方式和运行方式等的影响。洞库区地下水位动态变化特性的研究有助于全面了解洞库区地下水位变化的全过程, 合理估计洞顶上方岩体中的水柱厚度, 对水封油库设计中是否需要设置水幕系统来阻止运行期洞库中的油气外逸具有十分重要的实际意义。通过本研究全面分析了水封石油洞库附近地下水位变化过程以及存在的形态, 并得到如下启示:

(1) 当洞库区围岩渗透系数较大时, 采用水幕系统补水是必要的; 当围岩渗透系数较小时, 由于洞库上方存在相当厚度的地下水体, 是否设置水幕系统需要通过综合研究确定。

(2) 岩体渗透系数的大小是影响洞库区地下水位变化的最关键因素, 从保证洞库上方存在足够高的地下水位和降低水封失效的风险角度出发, 建议洞库位置应选在渗透系数较小的区域, 从而降低围岩封堵带来的造价增加。

参考文献:

- [1] 王玉洲, 代云清, 安佰燕. 地下水封岩洞储油库地下水控制[C]// 第二届全国岩土与工程学术大会, 2006: 862–865. (WANG Yu-zhou, DAI Yun-qing, AN Bai-yan. Water table control in the area of underground oil storage in rock cavern[C]// The Second National Academic Conference of Geotechnical Engineering, 2006: 862–865. (in Chinese))
- [2] 王作垣. 宁波石浦水封油库设计中的水文动态分析[C]// 中国土木工程学会隧道与地下工程学会防排水专业委员会第九次学术交流会, 1999: 102–107. (WANG Zuo-heng. Ningbo Shipu underground oil storage in rock cavern design dynamic analysis of hydrological[C]// China Civil Engineering Society Institute of the Tunnel and Underground Engineering Drainage Professional Committee of the Ninth Academic Exchange, 1999: 102–107. (in Chinese))
- [3] 郭书太. 地下储油库工程中地下水的利用和处理[J]. 工程地质学报, 2008(增刊 1): 69–72. (GUO Shu-tai. The groundwater use and handling in underground oil storage project[J]. Journal of Engineering Geology, 2008(S1): 69–72. (in Chinese))
- [4] 张秀山. 地下油库岩体裂隙处理及水位动态预测[J]. 油气储运, 1995, 14(4): 24–27. (ZHANG Xiu-shan. Underground oil storage fracture treatment and prediction of water level[J]. Gas Storage and Transportation, 1995, 14(4): 24–27. (in Chinese))
- [5] 蒋中明. 国家石油储备基地惠州地下水封洞库围岩渗流数值分析研究报告[R]. 长沙: 长沙理工大学, 2010, 3. (JIANG Zhong-ming. Analysis of seepage simulation of underground water sealed caverns in Huizhou[R]. Changsha University of Science and Technology, 2010, 3. (in Chinese))
- [6] 蒋中明. 国家石油储备基地湛江地下水封洞库围岩渗流数值分析研究报告[R]. 长沙: 长沙理工大学, 2010, 6. (JIANG Zhong-ming. Analysis of seepage simulation of underground water sealed caverns in Zhanjiang[R]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010, 6. (in Chinese))
- [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. (LIU Guan-qun, HAN Man, SONG Tao, et al. Seepage simulation of underground petroleum storage caverns and necessity analysis of a water curtain system[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(5): 819–824. (in Chinese))
- [8] 巫润建, 李国敏, 董艳辉, 等. 锦州某地下水封洞库工程渗流场数值分析[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10): 87–91. (WU Run-jian, LI Guo-min, DONG Yan-hui, et al. Analysis of seepage simulation of underground water sealed caverns in Jinzhou[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(10): 87–91. (in Chinese))
- [9] 许建聪, 郭书太. 地下水封油库围岩地下水渗流量计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1295–1301. (XU Jian-cong, GUO Shu-tai. Seepage discharge calculation of surrounding rock groundwater in rock caverns sealed oil storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1295–1301. (in Chinese))
- [10] YANG Hyung-sik, KANG Jae-gi, KIM Kyung-su, et al. Groundwater flow characterization in the vicinity of the underground caverns in fractured rock masses by numerical modeling[J]. Geosciences Journal, 2004, 8(4): 401–413.
- [11] LEE Chung-in, SONG Jae-joon. Rock engineering in underground energy storage in Korea[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 467–483.
- [12] 杜华章, 毕加宾, 张庆征, 等. 地下水封岩洞原油库油气处理方案的探讨[J]. 石油工程建设, 2006, 32(4): 23–25. (DU Hua-zhang, BI Jia-bin, ZHANG Qing-zheng, et al. Discussion on treatment of crude oil library in rock caverns sealed oil storage[J]. Petroleum Engineering Construction, 2006, 32(4): 23–25. (in Chinese))