

水封式地下储油洞库人工水幕设计及渗流量分析

时洪斌, 刘保国

(北京交通大学, 北京 100044)

摘 要: 论述了人工水幕的应用及原理。以黄岛水封式地下储油洞库的设计方案为模型, 通过开挖工况和运行工况的渗流场数值模拟, 对人工水幕的水封效果进行了分析评价, 表明人工水幕对于稳定地下水位, 保证水封条件起到了非常重要的作用。储油洞室渗流量的近似解析解与数值解的一致性, 表明采用的近似解析方法和 FLAC 数值模拟方法合理估算了储油洞室渗流量, 其方法是可行的。针对水封式地下储油洞库的渗流场分析和渗流量分析能够为人工水幕的优化设计提供有益的参考。

关键词: 水封; 人工水幕; 渗流场; 渗流量

中图分类号: TE822; TV139.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)01-0130-08

作者简介: 时洪斌(1980-), 男, 山东滕州人, 博士研究生, 主要从事地下空间的开发与利用方面的研究。E-mail: shb1980@gmail.com。

Design and seepage discharge analysis of artificial water curtains for water sealed underground petroleum storage caverns in rock

SHI Hong-bin, LIU Bao-guo

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The application and principles of artificial water curtain are studied. The study model originates from the layout of Huangdao water sealed underground petroleum storage rock caverns. Through simulating seepage field under excavation and operation conditions, the effect of artificial water curtains is studied. It is concluded that the artificial water curtaining is very important for stabilizing underground water table and maintaining hydraulic seal conditions. The agreement between the approximate analytical solution and numerical solution of seepage discharge of storage caverns shows that the approximate analytical method and FLAC numerical method can effectively and reasonably estimate the seepage discharge of storage caverns. The seepage field analysis and seepage discharge analysis for the water sealed underground petroleum storage caverns can provide instructive reference for the optimum design of artificial water curtaining.

Key words: water seal; artificial water curtain; seepage field; seepage discharge

0 前 言

人工水幕在煤矿瓦斯抽放、水电站气垫式调压室和地下水封式油气库等方面得到了广泛的应用。主要是通过提供额外的水头对洞库进行水动力密封, 以防止内部气体或液体泄漏。而影响人工水幕水封效果的因素, 除了水幕系统运行工况下的维护外, 更重要的是人工水幕的设计和施工问题。所以对人工水幕工况下的渗流场和渗流量进行详细分析, 有利于减少人工水幕在设计和施工过程中的风险。

本文以人工水幕在地下储油洞库中的应用为例, 探究人工水幕对储油洞库围岩渗流场的影响, 确定洞库开挖工况和储油工况下的渗流量, 用以优化水幕参数, 保证洞室的密封性。

1 人工水幕的应用和研究

水封理论起源于人们对天然油气藏的认识, 自然中的石油和天然气在未开采之前, 就是储藏在储油岩内相互沟通的孔隙中, 四周被地下水包围。由于油比水轻且油水不互溶的原理, 从而形成了天然的地下油气藏。油气藏围岩裂隙中的地下水也就是自然形成的水幕系统。

水封理论的发展很大程度上得益于实践设计和运行经验。目前已知的应用领域有煤炭行业、水电站和油气储存等。

在煤炭行业几十年使用密封巷道储存压缩空气的实践中, 人们发现巷道处于饱和含水层中或充水围岩

中可以有效阻止所储存气体的泄露。另外在高瓦斯煤矿开采中,水封式巷道抽放瓦斯技术可以实现煤与瓦斯共采,有效解决了瓦斯治理难题,充分发挥了水力封存的作用。

20世纪70年代,挪威专家 Svec 和 Rathe 等提出了水电站气垫式调压室的概念。水电站气垫式调压室利用岩石壁面与水面所形成的封闭气室、依靠气体的压缩和膨胀特性来反射水锤波和抑制水位波动,确保电站的安全稳定运行。为了保证气垫式调压室的气密性,防止由于高压空气泄漏而失压,在存在裂隙的调压室围岩周围设置了水幕系统。另外压缩空气能量贮存(CAES)也是水封理论在水电站的一个应用实例。

而将水封理论推到另一个高度的是水封式地下储油和储气洞库的大规模建设。水封式地下储油洞库起源于瑞典,早在西班牙内战期间(1936年~1939年),瑞典政府为了安全储备军用和民用燃油,对石油储备方式提出了新的要求,储存方式从地上转移到了地下岩洞中。为了将燃油安全无泄漏的储存于地下岩洞中,瑞典岩石力学和石油储备之父 Hageman 提出了著名的“瑞典法”^[1]——将石油储备在地下水位线以下的非衬砌岩洞中,并与1938年申请了专利。

当地下水补给不充足时,由于洞室的开挖会引起洞室上部地下水位下降,疏干围岩,进而洞室内油品会通过围岩裂隙挥发泄漏。为了保持地下水位的稳定达到瑞典法储油的要求,瑞典的 Ingvar Janelid 教授提出了人工水幕方法^[2]——先于储油洞室开挖,在洞室上部围岩中布设水幕系统(水幕巷道和水幕钻孔)来保持地下水位稳定,保证洞室开挖过程中的水封条件。

从20世纪70年代开始,众多学者^[3-13]关于水封系统的实验室试验和数值模拟试验为以后水封技术的发展奠定了基础。目前,国际上主要的30多个国家建有地下水封式油库200多处^[14]。其中水封幕在保证储库安全,防止油品泄露方面起到非常重要的作用。

2 水封储油库原理及水封失效原因

2.1 水封原理

图1为典型的地下水封储油洞室工作原理,由于洞室围岩裂隙水头大于洞内油品及饱和蒸气压力,保证了油品的安全储存。如图1中所示当 $P_1+H>P_g+F+S$ 时就满足了基本的水封工况下的水头条件。

从理论上讲,裂隙地下水并不是要必备的要素,水封式地下储库之所以要求有裂隙地下水的存在,是因为自然界的岩体中发育有裂隙,如果洞库所在岩体为一整块无裂隙岩石或者存在非贯通裂隙,开挖出的洞室本身就可以实现密闭,这种情况下裂隙地下水就

是非必要的。也就是说,仅仅是由于岩体中发育有贯通裂隙,裂隙地下水才成为水封式地下储库所必须具备的要素,因此地下水和裂隙在水封式地下储库中的关系是“隙存水补”这样一种主从关系。

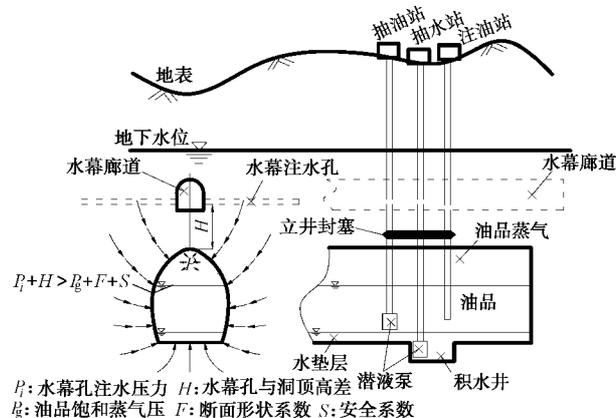


图1 水封原理示意图

Fig. 1 Schematic drawing of water seal

地下水在水封式地下储库中所起的作用具有双重性:①一方面岩体内有裂隙发育,要想实现封闭就必须有地下水填充;②另一方面,如果它越丰富,说明岩体越破碎,这不仅给洞库的稳定造成威胁,而且地下水与被储油品同为液体,它们之间很容易发生对流,以致造成油品流失和地下水污染,此外,如果地下水量很大,处理地下水(注浆和排水)又将增大工程量,而且还会使洞库的运营成本增加。所以对于水幕系统的优化设计是十分复杂的过程,要通过对围岩渗流的控制来实现水封的有效性。

2.2 水封失效原因

水幕系统的失效原因有以下3个方面:①水幕系统设计和施工过程中的问题,主要有设计参数不合理和施工产生的误差等;②水幕系统运行工况下产生的问题,包括水幕水量和水压力的不足,以及排水、管道和监控系统中出现的各种问题;③水幕系统长期使用后产生的问题,主要是因为水幕孔在长期使用过程中逐渐被堵塞所致,造成堵塞的原因包括水幕水中的杂质颗粒和矿物质的物理化学沉淀,细菌的生长等。

上述3个原因中后两者比较容易避免,只要通过加强水幕系统的监测和适当处理水幕水就可以减少或者消除这些风险。但是对于设计和施工中出现的問題就要从设计参数和影响施工的因素进行模拟分析,得到合理有效的水幕系统。

3 水封油库分析模型

黄岛水封式地下储油洞库设计一期洞库共分9个洞室,3个洞室为1个罐体(1个组),共3个罐体。

洞罐埋深-30 m，洞室采用直边墙圆拱洞，跨度 20 m，高度 30 m，洞室长度为 560~669 m。同一罐体内的一侧相邻洞室净间距为 30 m，另一侧相邻洞室净间距为 58m。不同罐体的两个相邻洞室净间距为 58 m。每个洞罐在不同的两个洞室各设一个竖井，直径分别为 3 m 和 5 m。洞顶以上 30 m 设水平水幕系统，由水幕廊道和水幕钻孔组成，覆盖整个洞库上方（图 2）。

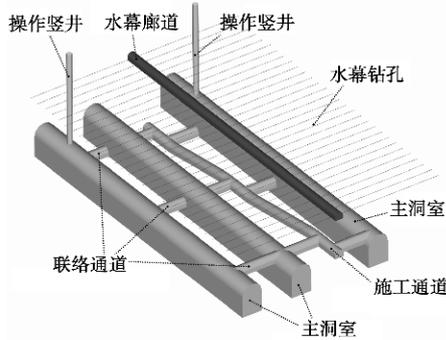


图 2 水封油库布置图

Fig. 2 Layout of water sealed petroleum storage caverns

根据黄岛地下水封油库可研阶段工程地质勘察报告，库址内深部岩体完整，裂隙稀疏，而且裂隙宽度均小于 0.3 mm，岩性属于花岗质片麻岩，依据试验测试结果^[15]，渗透系数取为 $k=1.0 \times 10^{-9}$ m/s。故将洞室群岩体视为均匀各向同性弹塑性介质，材料破坏规律服从莫尔-库仑准则，其物理力学参数^[15]：密度 $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 $E=17.1 \text{ GPa}$ ，抗压强度 $s_c=48.2 \text{ MPa}$ ，抗拉强度 $s_t=6.3 \text{ MPa}$ ，黏聚力 $c=8.3 \text{ MPa}$ ，摩擦角 $f=32^\circ$ ，泊松比 $\mu=0.21$ 。

为便于问题分析，将模型适当简化进行二维模拟。模型由 1 组（3 个）主洞室和 1 个水幕廊道构成，洞室尺寸和布置方式如图 3 所示。模型范围为 328 m \times 210 m，水幕廊道底板中心为坐标系原点，Z 轴竖直向上。水幕概化为定水头边界，位于 $Z=0$ 平面上，距离主洞室顶部 30 m。数值模拟过程满足如下条件：地下水流动满足达西定律；围岩视为均质各项同性等效连续介质模型；地下水条件恒定并且处于稳定流状态；地下水不可压缩；洞室围岩处于完全饱和状态。模型开挖前渗流场水文边界的初始条件为：模型顶部为透水边界，孔压固定为 0；底部孔压由静水压力梯度确定，并且固定底部孔压；左右边界为不透水边界。

4 洞库渗流场分析

4.1 开挖工况渗流场分析

(1) 无水幕情况下渗流场

假定以孔压等值线来表征降水漏斗，模型计算至平衡状态。由于水幕廊道断面尺寸相对较小，当水幕

廊道开挖时只有较小范围的地下水漏斗生成；当水幕廊道和主洞室全部开挖时，地下水漏斗形成的速度较快，而且影响范围比较大，由图 4 可以看出 10000 Pa 等值线包络水幕廊道，18000 Pa 等值线包络水幕廊道和中间主洞室，20000 Pa 和 30000 Pa 等值线包络水幕廊道、左主洞室和中主洞室，40000 Pa 等值线包络水幕廊道和全部主洞室，由此说明由于洞室群的开挖首先疏干水幕廊道上方围岩，然后疏干中间主洞室上方围岩，其次扩展到左主洞室上方围岩，最后到达右主洞室上方围岩以致很快疏干整个洞室群上方围岩。

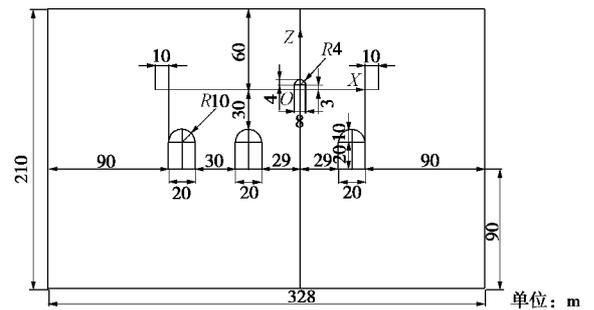


图 3 水封洞库二维概化模型

Fig. 3 2D generalized model of water sealed caverns

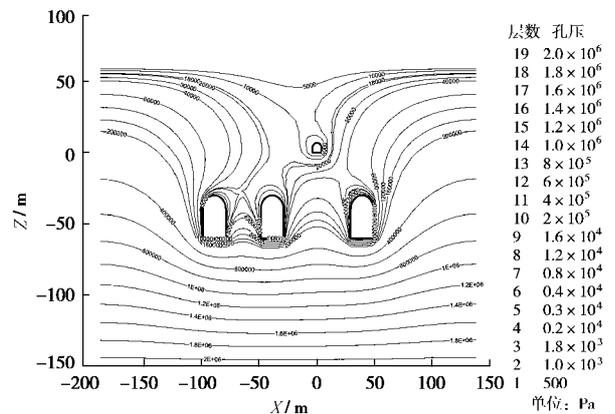


图 4 水幕廊道和主洞室开挖时的渗流场

Fig. 4 Seepage field after excavation of gallery and main caverns

如果在施工过程中造成了主洞室群上方围岩的大面积疏干对于水封条件的满足是极其不利的，即便是可以通过人工水幕注水来进行补充，但是完全恢复围岩疏干前的饱和状态仍需要一定时间，另外由于该过程中地下水位的反复变化，极易造成油品泄漏污染地下水。所以水幕廊道和水幕孔应该在主洞室开挖前就进行施工和充水，既可以减少由于主洞室开挖造成的地下水位下降，又可以在开挖的过程中及时进行水封效果监测，采用注浆和支护等手段处理不利水封条件围岩区域（破碎带和断层等大涌水不良地质带）。

(2) 有水幕情况下渗流场

在人工水幕和地下水共同作用下，洞库开挖

不会产生大的降水漏斗, 人工水幕对地下水位起到了稳定的作用。将主洞室边界设为透水边界, 孔压等值线分布如图 5 所示。由等值线分布可以看出: 洞室顶部的水力梯度较其他方向大, 可以有效阻止洞室内部饱和蒸气从洞室上方围岩渗出; 由于左中洞室间距较小, 使得左中洞室间的水头差较小, 水力联系密切。

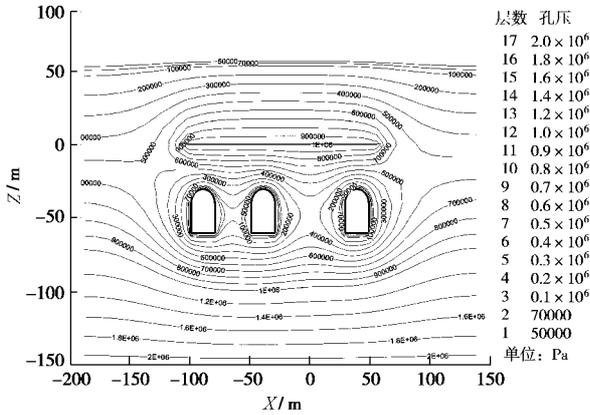


图 5 有水幕时主洞室开挖后的渗流场

Fig. 5 Seepage field after excavation of main caverns with water curtains

4.2 储油工况渗流场分析

在储油工况下, 液态油品浮在水垫层上, 液态油品上部为饱和蒸气。取水垫层厚度为 $h=200\text{ mm}$, 液态油品自由面到洞库底板高度为 $H+h=20\text{ m}$, 洞室内壁不同位置受力如图 6 所示, 同时在渗流场分析时还要施加第一类水头边界条件。

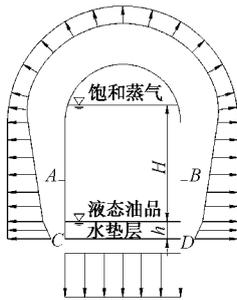


图 6 储油工况洞库内壁受力示意图

Fig. 6 Stress acting on inner walls of cavern filled with petroleum

在无人工水幕的储油工况下, 地下水的渗流场变化如图 7 所示, 和开挖工况下地下水渗流场 (图 4) 相比, 地下水的降水漏斗和疏干区域都较小。说明在该种情况下地下水的渗流场会随着液态油面的变化发生变化, 但是由于在洞库边界上地下水压较低时, 极易产生液态油品渗入洞壁围岩, 即便是以后通过增加水幕来增加围岩裂隙地下水压力将泄漏油品推回洞库内, 也会产生死油区污染地下水。所以在洞库储油前应保证足够大的水头压力。另外可以看出由于右中洞

室间的距离较大, 所以右中洞室内存在较大的水头。

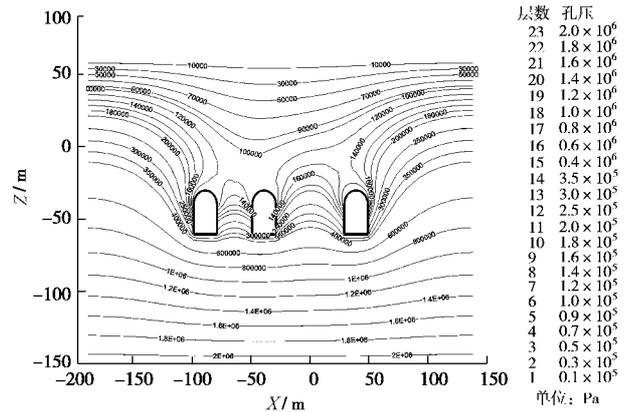


图 7 储油工况无水幕渗流场

Fig. 7 Seepage field without water curtains under operation condition

在有水人工水幕的储油工况下, 地下水的渗流场变化如图 8 所示。由于洞室内油品的作用使得洞库上方围岩裂隙水的水力梯度比洞室两侧和底部都大。人工水幕补充了地下水, 也增加了洞室上方围岩内的裂隙水水头, 有效地防止了饱和蒸气从洞室上方围岩渗出。

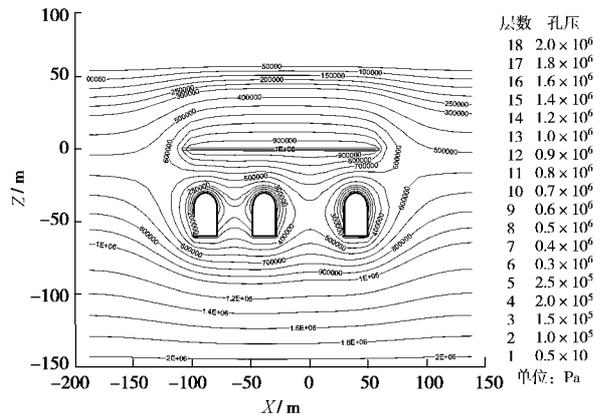


图 8 储油工况有水幕渗流场

Fig. 8 Seepage field with water curtains under operation condition

4.3 人工水幕水封效果分析

水封系统的最不利条件是没有地下水, 只有人工水幕对洞库进行水力封存。在这种情况下先进行力学开挖, 平衡后将洞室边界设为不透水边界, 施加人工水幕进行水平衡计算得到渗流场如图 9 所示。取各个主洞室的直墙中点 (A 点和 B 点) 和底脚 (C 点和 D 点) 为监测点, 监测由于施加人工水幕压力在该处产生的孔压, 来判断是否满足对油品的水封条件。取两种临界情况: 油品液面高度在直墙中点处; 油品液面接近拱顶。

假定保证气态油品水封的临界条件为洞周围岩地下水压力比气态油品压力大略大; 保证液态油品水封的临界条件为洞周围岩地下水压力比液态油品稍大;

由于洞室底部为固定水垫层，油品浮于水垫层上，所以洞室底部水封条件自然满足。

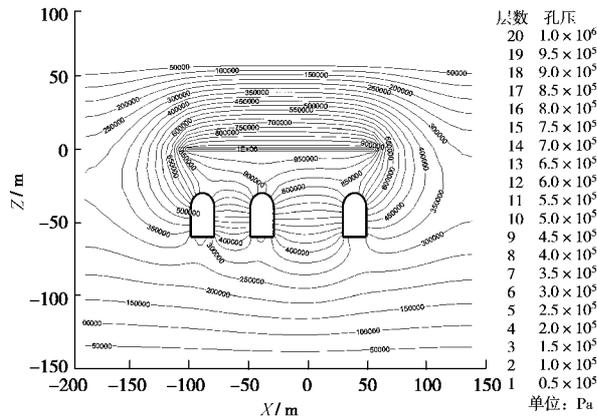


图9 最不利水封条件下人工水幕渗流场

Fig. 9 Seepage field with artificial water curtains under the worst water seal condition

取油品密度为 $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ ，油品饱和蒸气压为 0.1 MPa ，人工水幕压力为 1 MPa 。不考虑水垫层的情况下，当处于第一种临界情况时，A点和B点的临界水头应该为 0.1 MPa ，此时C和D点的临界水头为 $\rho g H + 0.1 = 0.185 \text{ MPa}$ 。第二种临界情况时，A和B点的临界水头应该为 $\rho g H + 0.1 = 0.27 \text{ MPa}$ ；此时C点和D点的临界水头为 $\rho g H + 0.1 = 0.355 \text{ MPa}$ 。

所以综合两种临界情况可得：要保证洞库的水封条件，洞库直墙中点A点和B点的临界水头为 0.27 MPa ，底脚点C点和D点的临界水头为 0.355 MPa ，只有大于临界水头才能有效地保证洞库的水封条件。由渗流场的数值模拟可得各主洞室的监测点的孔压值如表1所示。

表1 主洞室监测点孔压

Table 1 Pore pressure of monitoring points on walls of main caverns

		MPa		
测点	左洞室	中洞室	右洞室	
A	0.4196	0.5506	0.5548	
B	0.5404	0.5701	0.4413	
C	0.2885	0.3675	0.3740	
D	0.3434	0.3919	0.3081	

由表1可以看出，其中只有左洞室两底脚监测点和右洞室的右侧底脚监测点不满足水封条件临界水头值。但是考虑到左洞室右侧底脚点和临界水头相差极小，所以只有两外侧洞室的外侧底脚点是水封最不利位置。由于在实际情况下围岩中是存在地下水的，所以在实际水封条件下 1 MPa 的人工水幕压力，可以满足最不利两底脚点的水封条件。另外为了提高水封的安全系数可以将水封钻孔的覆盖范围适当向左右边界

延伸，以保证绝对的水封，防止油气泄漏。

5 渗流量分析

渗流量分析是水封洞库不得不考虑的问题，一般地下洞库都是阻止地下水渗入洞库内，而水封洞库既要让地下水通过围岩裂隙渗入洞库内，又不能无限制地渗入，对于大涌水量的破碎带或者断层带要进行注浆封堵控制地下水的渗流量。因为进行渗流量计算时采用的是等效连续介质模型，没有考虑不利地质条件，所以如果实际情况中存在不利地质条件，可以通过适当调整渗透系数来模拟。

5.1 无水幕工况渗流量分析

在只有地下水的情况下，因为储油洞库处于半无限天然含水水体中，并且洞室上部疏干后稳定渗流只发生在洞室两侧壁和底板位置，所以整个洞室的渗流量包括侧壁渗流量和底板渗流量两部分。为了容易得到底板渗流量的解析解，假定洞室底板的实际透水边界为半圆形断面。考虑到洞室对称性，对一侧洞库侧壁和底板的一半进行渗流量分析（图10），侧壁渗流量为 Q_1 ，底板渗流量为 Q_2 。

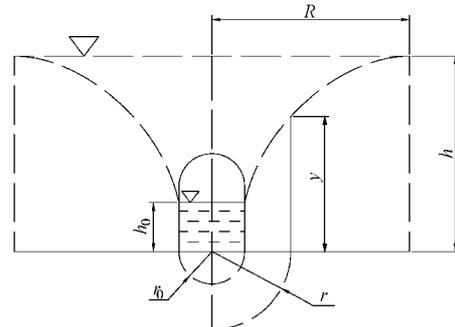


图10 单洞室渗流量分析示意图

Fig. 10 Analysis of seepage discharge for a single cavern

根据达西定律和图示边界条件可以得到 Q_1 ， Q_2 及总流量 Q 的数学表达式^[13]为

$$Q_1 = \frac{KS(h+h_0)}{2(R-r_0)} \quad (1)$$

$$Q_2 = 0.683 \frac{KS}{\lg(R/r_0)} \quad (2)$$

$$Q = 2L(Q_1 + Q_2) = KSL \left[\frac{h+h_0}{R-r_0} + \frac{1.365}{\lg(R/r_0)} \right] \quad (3)$$

式中， K 为岩体渗透系数， S 为地下水的降深， $S = h - h_0$ ， h 为稳定地下水位至洞室底板的高度， h_0 为洞室内水位高度， r_0 为洞室跨度的 $1/2$ ， R 为降落漏斗曲线影响半径， L 为洞库纵向长度。

图11所示为黄岛一组平行洞室在自然开挖状态下的渗流量分析示意图。由于左中洞室(I和II)间距

30 m, 右中洞室 (II 和 III) 间距 58 m, 所以左中洞室相距较近, 两洞室岩壁中的液位基本上与洞内液位相同, 可以将左中洞室视为一个大洞室来考虑, 其跨度为左中洞室跨度和加上左中洞库间距; 右中洞室相距较远, 两洞室之间仍存在一定的水头差, 所以右洞要单独计算。

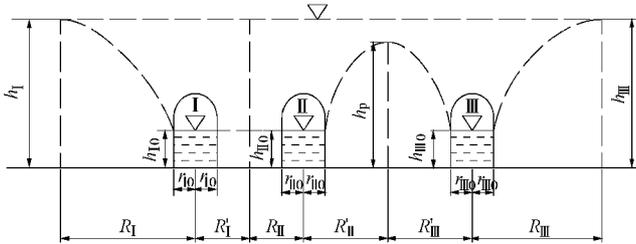


图 11 1 组洞室渗流量分析示意图

Fig. 11 Analysis of seepage discharge for a group of caverns

所以可根据达西定律和多个平行洞室渗流量的分析方法^[13]可以推出该洞室群的渗流量为

$$Q_{I+II} = KSL \left[\frac{h_1 + h_{10}}{2[(R_1 + R_1') - (r_{10} + R_1')]} + \frac{0.683}{\lg \frac{R_1 + R_1'}{r_{10} + R_1'}} \right], \quad (4)$$

$$Q'_{I+II} = KS'L \left[\frac{h_p + h_{110}}{2[(R_{II} + R_{II}') - (r_{110} + R_{II}')] } + \frac{0.683}{\lg \frac{R_{II} + R_{II}'}{r_{110} + R_{II}'}} \right], \quad (5)$$

式中, Q_{I+II} 为左中洞室等效洞室左侧渗流量, Q'_{I+II} 为左中洞室等效洞室右侧渗流量。并且 $h_{10} = h_{110}$, $r_{10} = r_{110}$, $R_1' = R_{II}$, $S = h_1 - h_{10}$, $S' = h_p - h_{110}$ 。

$$Q_{III} = KSL \left[\frac{h_{111} + h_{110}}{2(R_{III} - r_{110})} + \frac{0.683}{\lg \frac{R_{III}}{r_{110}}} \right], \quad (6)$$

$$Q'_{III} = KS'L \left[\frac{h_p + h_{110}}{2(R_{III}' - r_{110})} + \frac{0.683}{\lg \frac{R_{III}'}{r_{110}}} \right], \quad (7)$$

式中, Q_{III} 为右洞室右侧渗流量, Q'_{III} 为右洞室左侧渗流量。并且 $S = h_{111} - h_{110}$, $S' = h_p - h_{110}$ 。

对于本例实际情况其中参数取值: $h_1 = h_{111} = 93$ m, $h_{10} = h_{110} = h_{1110} = 20$ m, $h_p = 50$ m, $R_1 = R_{III} = 100$ m, $R_1' = R_{II} = 25$ m, $R_{II}' = R_{III}' = 39$ m, $r_{10} = r_{110} = r_{1110} = 10$ m。代入式 (4) ~ (7) 可得: $Q_{I+II} = 8.1608 \times 10^{-5}$ m³/s, $Q'_{I+II} = 6.8629 \times 10^{-5}$ m³/s, $Q_{III} = 5.7413 \times 10^{-5}$ m³/s, $Q'_{III} = 4.2523 \times 10^{-5}$ m³/s, $L = 600$ m。

所以该组洞室总渗流量解析解为

$$Q = Q_{I+II} + Q'_{I+II} + Q_{III} + Q'_{III} = 21.6146 \text{ (m}^3/\text{d)}. \quad (8)$$

由数值模拟 (图 7) 得到的总渗流量数值解 $Q' = 24.0391$ m³/d。对比两种解的结果可以看出渗流量的计算是合理的。

5.2 只有水幕工况渗流量分析

当洞室周围只有高压水幕的情况时 (图 12), 由

达西定律可得渗入洞室内的单位流量为

$$q = KiA = K2pr \frac{dp}{dr}, \quad (9)$$

其中, K 为渗透系数, i 为水力梯度, A 为过水断面。

将式 (9) 积分可得:

$$q = 2\pi K \frac{P_w - P_a}{\ln(R/R_0)}, \quad (10)$$

式中, P_w 为水幕压力, P_a 为洞内压力, R 为水幕近似的圆形断面半径, R_0 为洞室近似的圆形断面换算半径 $R_0 = \sqrt{A'/\pi}$, A' 为洞库的横截面积。

所以洞室的总渗流量为

$$Q = 2\pi KL \frac{P_w - P_a}{\ln(R/R_0)}. \quad (11)$$

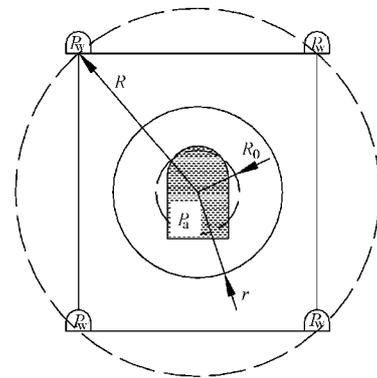


图 12 单洞室等效断面图^[13]

Fig. 12 Equivalent cross section for a single cavern

本例中将水封系统按图 13 布置时, 由于左中洞室间距较小, 将两洞室等价半径为 R_0 的圆形洞室; 右洞室等价半径为 R'_0 的圆形洞室。其中水幕水头 $P_w = 100$ m, 洞内压力等效水头 $P_a = 20$ m, $L = 600$ m, 水幕等效半径 $R = 78.2368$ m, $R' = 59.5483$ m, 洞室等效半径 $R_0 = 18.8321$ m, $R'_0 = 13.3163$ m, 代入式 (11) 可得:

$$Q_I = 2\pi KL \frac{P_w - P_a}{\ln(R/R_0)} = 2.1177 \times 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)}, \quad (12)$$

$$Q_{II} = 2\pi KL \frac{P_w - P_a}{\ln(R'/R'_0)} = 2.0136 \times 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)}. \quad (13)$$

以上为四周都有水幕的情况, 本例实际只在洞室上方布置水幕, 所以洞室群的总渗流量应当进行适当的折减; 另考虑到在四周都有水幕的情况下, 顶部水幕对水封起决定性作用, 其渗流量所在的比重也较大, 所以将折减系数取为 0.5 是可行的。所以总渗流量解析解为

$$Q = 0.5 \times (Q_I + Q_{II}) = 17.8476 \text{ (m}^3/\text{d)}. \quad (14)$$

在相同的边界条件和 1 MPa 人工水幕压力下进行渗流场数值模拟得到该组洞室的总渗流量数值解为 $Q' = 18.8292$ m³/d。可见解析解和数值解误差较小, 计算方法是合理的。

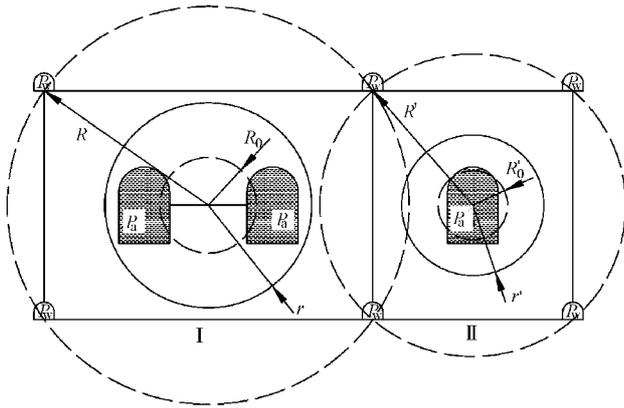


图 13 1 组洞室等效断面图

Fig. 13 Equivalent cross section for a group of caverns

最后对实际储油工况(图 8)进行数值模拟可得:在地下水和人工水幕共同作用下,该组洞室的总渗流量 $Q=46.3121 \text{ m}^3/\text{d}$ 。对比只有地下水和只有水幕两种情况下的渗流量,实际储油工况下的渗流量略大于两者之和是符合实际情况的。

6 结 论

水封储油洞库都是建造在稳定地下水位以下,地下水如果自然补给充足的话,可以不建造人工水幕。人工水幕的主要目的提供稳定的地下水位,防止油品和蒸气的泄漏。从以上对水幕系统的分析可以得到以下结论:

(1) 在没有人工水幕的情况下,洞室的开挖会快速疏干洞室上部围岩,而且即使是后续添加人工水幕仍不能短时间内恢复围岩裂隙的饱和状态。所以在洞室开挖前应先开挖水幕系统,始终使洞室围岩在洞室开挖过程中处于饱和状态,这样不仅可以检验水幕系统的有效性,还可以通过监测洞室的渗流量及时发现洞室围岩不良地质带,进行必要的注浆支护处理。

(2) 在渗流场数值模拟中,如果洞室边界设为透水边界,可以通过洞室周围的水力梯度变化来评价水封效果,一般认为垂直水力梯度大于 1 时就可以保证水封^[3];如果洞室边界设为不透水边界,可以通过边界上水头值的大小来评价水封效果,当裂隙水压力大于内部储油压力时裂隙水沿洞壁流入洞室,就可以保证油品不外泄。

(3) 人工水幕设置在洞室的正上方一定距离,其水封作用对洞室顶部最明显,越往底部作用越小。但是由于洞室底部存在一定厚度的水垫层,洞室底部一般不会发生油品的泄漏。另外可以通过适当延长水幕钻孔,加大水幕的覆盖范围来提高洞室外侧围岩的水头,以满足水封条件。

(4) 通过对比达西定律下的近似解析解和 FLAC 数值模拟的结果,其较小的误差说明渗流量的计算方法是合理的。通过对洞室渗流量的合理估算,可以为人工水幕的设计提供有益的参考。

(5) 通过在开挖工况和运行工况下渗流场和渗流量的数值模拟,可以得出在现有地质资料的前提下,1 MPa 的人工水幕压力可以满足黄岛水封油库的水封条件。

参考文献:

- [1] MORFELDT C O. Storage of petroleum products in man-made caverns in Sweden[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1983, **28**(1): 17 - 30.
- [2] 高翔, 谷兆祺. 人工水幕在不衬砌地下贮气洞室工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, **16**(2): 178 - 187. (GAO Xiang, GU Zhao-qi. The application of artificial water curtain to unlined gas storage caverns[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, **16**(2): 178 - 187. (in Chinese))
- [3] ABERG B. Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock[C]// *Proceedings of the First International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns*. Stockholm: Pergamon Press, 1977: 399 - 413.
- [4] ABERG B. Model tests on oil storage in unlined rock caverns[C]// *Proceedings of the First International Symposium on Storage in Excavated Rock Caverns*. Stockholm, 1977: 517 - 530.
- [5] GOODALL D C, ABERG B, BREKKE T L. Fundamentals of gas containment in unlined rock caverns[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1988, **21**(4): 235-258.
- [6] CHUNG Hyung-sik, SUN Yong. Model study on the water tightness around the underground oil storage cavern[C]// *Large Rock Caverns: Proceedings of the International Symposium*. Helsinki: Pergamon Press, 1986: 653 - 660.
- [7] SUH Jung-kyu, CHUNG Hyung-sik, KIM Chi-whan. A study on the condition of preventing gas leakage from the unlined rock cavern[C]// *Large Rock Caverns: Proceedings of the International Symposium*. Helsinki: Pergamon Press, 1986: 725 - 736.
- [8] OHKAWA T, SAKAKIHARA N, MOMOTA H, et al. Numerical simulation for hydraulic behavior in the bedrock of the zone surrounding the cavern[C]// *Large Rock Caverns: Proceedings of the International Symposium*. Helsinki: Pergamon Press, 1986: 1361-1372.
- [9] REHBINDER G, KARLSSON R, DAHLKILD A. A study of a

- water curtain around a gas store in rock[J]. Applied Scientific Research, 1988, **45**: 107 - 127.
- [10] LINDBLOM U. The performance of water curtains surrounding rock caverns used for gas storage[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1989, **26**(1): 85 - 97.
- [11] CARL-OLOF Soder Vbb. Water curtains in gas storage an experimental study[C]// Proceeding of 8th International Congress on Rock Mechanics, ISRM95. Tokyo: Balkema, 1995: 773 - 778.
- [12] KIM Jitae, CHO Woncheol, CHUNG Il-moon, et al. On the stochastic simulation procedure of estimating critical hydraulic gradient for gas storage in unlined rock caverns[J]. Geosciences Journal, 2007, **11**(3): 249 - 258.
- [13] 崔京浩. 地下工程与城市防灾[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (CUI Jing-hao. Underground engineering and urban disaster prevention[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [14] 王梦恕, 杨会军. 地下水封岩洞油库设计、施工的基本原则[J]. 中国工程科学, 2008, **10**(4): 11 - 16, 28. (WANG Meng-shu, YANG Hui-jun. Basic principles for design and construction of underground water sealed hydrocarbon storage rock caverns[J]. Engineering Science, 2008, **10**(4): 11 - 16, 28. (in Chinese))
- [15] 陈 祥. 黄岛地下水封石油洞库岩体质量评价及围岩稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2007. (CHEN Xiang. Evaluation on quality and analysis on stability of adjacent rock mass of the water-sealed underground oil tank in Huangdao[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese))

第三届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会 (征文通知)

当前, 我国社会经济正在向大规模加强基础设施建设、建设资源节约型和环境友好型社会发展。随着大规模基础设施建设向中西部转移, 岩土力学与工程研究既面临复杂地质环境和超大工程规模所带来的技术难题, 又面临着脆弱生态环境保护与工程建设的协调以及资源节约的新挑战。这些新的巨大的挑战也给岩土工作者带来了前所未有的难得的机遇, 大大促进了我国岩土力学与工程学科的发展和进步。为此, 经中国水利学会批准, 中国水利学会岩土工程专业委员会拟在陕西省杨凌国家高新农业示范区召开第三届水利水电岩土力学与工程学术讨论会。会议由西北农林科技大学、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、长安大学和西安理工大学承办。大会将交流讨论水利水电岩土力学与工程的最新发展, 探讨重大岩土工程关键技术问题, 将是全国广大岩土工作者进行学术交流和展示、促进学科的交叉与融合、增进友谊和合作的良好平台。

主办单位: 中国水利学会岩土力学专业委员会

承办单位: 西北农林科技大学、南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、长安大学、西安理工大学

协办单位: 《岩土工程学报》编辑部、《岩石力学与工程学报》编辑部、《岩土力学》编辑部、中国水电顾问集团西北勘测设计研究院、陕西省岩石力学与工程学会、陕西省黄土力学与工程重点实验室

会议时间: 2010年9月18日~19日

会议地点: 中国陕西杨凌西北农林科技大学

会议主题: ①特殊土(黄土、盐渍土、膨胀土、冻土)和

岩石工程性质与测试技术; ②岩土工程数值模拟理论与方法; ③岩土工程原位试验与物理模拟; ④地震作用下的岩土构筑物破坏机理与灾害控制; ⑤大型水利水电工程中的岩土力学问题与环境保护; ⑥环境岩土工程、地下工程、隧道工程、边坡工程、地基处理与桩基工程中的关键技术; ⑦岩土体安全监测技术与预测预报方法; ⑧重大工程实录。

论文要求: ①论文内容务必实事求是, 不得侵犯他人著作权, 不涉及保密内容, 文责自负; ②论文要求尚未公开发表, 论点明确, 论据可靠, 数据准确, 文字精炼, 引用文献明确出处, 字数控制在6页内; ③参会论文要体现作者的研究前沿; ④会议论文格式一律按照《岩土力学》期刊格式撰写, 暂不分栏; ⑤请务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及E-mail地址。

重要时间: 提交全文截止日期: 2010年2月28日

论文录用通知日期: 2010年3月31日

修改稿提交截止日期: 2010年4月30日

会议回执提交截止日期: 2010年6月10日

秘书处联系方式: 陕西省杨凌示范区渭惠路23号西北农林科技大学水利与建筑工程学院; 邮政编码712100; 联系人: 李大可 029-87081358, 13991218856, huiyi3@nwsuaf.edu.cn, 李鹏 029-87082983, 13709124572, yt00@nwsuaf.edu.cn, 传真: 029-87081358; E-mail: huiyi3@nwsuaf.edu.cn, Xn_zaj@163.com。

(中国水利学会岩土力学专业委员会 供稿)