

基于垂直水力梯度的水封石油洞库补水控制研究

杨玲,任旭华,张继勋,黄修杰,张道法
(河海大学 水利水电学院,江苏 南京 210009)

摘要: 研究了水封石油洞库的补水控制,根据垂直水力梯度的判定准则,给出了洞库安全运行时的最小水幕超压。通过监测洞库周围由于施加人工水幕产生的水压,分别计算出不同地下水位和水幕巷道高度洞库周边的垂直水力梯度,找出洞库安全运行时的最小水幕超压,并研究水幕设计参数对最小水幕超压的影响,将其应用于某地下水封石油洞库工程。计算结果表明:当地下水位至洞库顶部的距离小于70 m时,需根据水幕钻孔的高度、间距设不等超压的水幕,该成果可为洞库安全运行提供重要依据。

关键词: 人工水幕;垂直水力梯度;补水控制;水封石油洞库

中图分类号:TV697.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)04-0159-04

Study on water replenishment control of seal petroleum cavern based on vertical hydraulic gradient

YANG Ling, REN Xuhua, ZHANG Jixun, HUANG Xiujie, ZHANG Daofa

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The paper studied the water supplement control of sealed petroleum cavern is. According to the criteria of vertical hydraulic gradient, it gave the minimum overpressure of petroleum cavern when it operates safely. By monitoring the water pressure around caverns due to setting artificial water curtain, it calculated the vertical hydraulic gradient around the caverns under condition of different heights of the water table and different heights of water curtain tunnel so as to find out the minimum water curtain overpressure during the safe run of cavern, and studied the effect of water curtain design parameters on the minimum exceed pressure of the water curtain. The results were applied to some water sealed underground petroleum storage project. The results show that when the distance from groundwater level to top of cavern is less than 70m, it is necessary to design different curtains of overpressure according to the height and space of water curtain tunnels. The results can provide an important basis for the safe operation of petroleum caverns.

Key words: artificial water curtain; vertical hydraulic gradient; water supply control; seal petroleum cavern

1 研究背景

石油储备在石油安全战略范畴概念中十分重要,是保障国家能源和经济安全的“保护伞”。然而,我国地下水封石油洞库建设才刚起步,工程经验缺乏,设计规范仅有 GB50455-2008《地下水封石油洞库设计规范》^[1]。

近年来,高翔等^[2]围绕水幕设计原则,根据实际工程经验讨论了人工水幕的设计准则,并举例说明该准则在挪威气垫调压室的成功应用。王者超等^[3]分

析了水文地质条件对水封方式的选用以及对水幕系统布置的影响。时洪斌等^[4-5]依托黄岛地下水封石油洞库,分析了储油洞库的渗流场,开展了对水幕水封效果的评价,并估算了涌入储油洞库的渗流量。Hamberger^[6]通过介绍瑞典 Karlshamn LPG 储库泄露的情况,分析了水封系统在防止 LPG 储库泄露中所起的重要作用。Jung 等^[7]通过研究韩国第一个位于湖下的 Pyongtaek LPG 储库,对水封洞库建造过程中的各环节进行分析,包括现场地质勘查,围岩属性和应力分析,洞库几何形状设计,水幕系统设计等提出

收稿日期:2015-03-27; 修回日期:2015-05-05

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:杨玲(1991-),女,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为地下工程。

了采用水平水幕和垂直水幕相结合的水幕系统来保证洞库的水封条件。但在补水控制方面,国外进展较快,但均已以专有技术形式进行保护;从已有文献看,对水幕补水控制方面的研究鲜见报道。

以我国黄岛地下水封石油洞库项目为背景,根据水封判断准则提出了补水控制标准。通过监测洞库周围由于施加人工水幕的水压,分别计算了自然水封和完全水封工况下洞库顶部的垂直水力梯度,得到最小安全水幕超压,并研究了不同地下水位工况下,水幕设计参数对最小安全水幕超压的影响,研究成果可为地下水封石油洞库补水控制提供重要依据。

2 水封原理与水封判断准则

2.1 水封方式与原理

水幕钻孔是水幕系统的核心。理论上水幕钻孔应该垂直岩体中的结构面,使水幕系统里的水最大范围地补给至洞库围岩,从而在洞库周围形成稳定的地下水位,实现洞库完全密封。若岩体中优势结构面较陡,则采用水平水幕钻孔;相反,若岩体中优势结构面较平缓,则采用垂直水幕钻孔比较适合。有时也可水平钻孔与垂直钻孔相结合,如图 1。通常采用水平水幕来补水,用垂直水幕来区分不同洞库的不同油品。

2.2 水幕水封判断准则

水封石油洞库的原理是:通过施加人工水幕,在洞库围岩裂隙中会形成指向洞室的渗流,当这些不同方向的渗流水力坡降大于某一临界值时,就可以阻止洞库内储存油品向裂隙中渗漏。在寻找临界水力坡降值方面,国外许多学者 Aberg^[8] 和 Goodall^[9] 等都做了大量的实验和理论研究。然而,目前尚未有公认的临界水力坡降值 I_0 表达式,仅有的可接受的准则就是 $I_0 > 1$ 或 $I > 1 - \rho_R/\rho_w$ (ρ_R 、 ρ_w 分别为洞

库内油品和水的密度),图 2 对该准则进行了简单的推导。

由伯诺里方程,可知:

$$Z = (p_1 - p_2)/\rho_w g + h_f \tag{1}$$

因 $Z = L \sin \alpha \tag{2}$

$$h_f = IL \tag{3}$$

方程(1) 可写成:

$$\sin \alpha = (p_1 - p_2)/(\rho_w g L) + I \tag{4}$$

根据洞库水封的基本原理,可知 $\rho_1 \geq \rho_2$, 因此式(4) 又可写成:

$$I \geq \sin \alpha \tag{5}$$

引入垂直水力坡降 I_0 , 令 $I_0 = I/\sin \alpha$, 则式(3) 可简化为:

$$I_0 \geq 1 \tag{6}$$

式中: z 为裂隙面的垂直高度, m; L 为裂隙面的长度, m; α 为裂隙面与水平方向的夹角; p_1 为沿着渗流方向上面的水压, kPa; p_2 为沿着渗流方向下面的水压, kPa; ρ_w 为水的密度, kg/m³; h_f 为沿长度 L 上的水头损失, m; I 为沿裂隙面的水力坡降; g 为重力加速度, m/s²。

通过这一判别标准,可以通过监测洞库附近的水压,计算垂直水力梯度,判断洞库是否能安全运行。

3 计算结果与分析

3.1 计算模型

黄岛地下水封石油洞库主要包括 9 个主洞室、5 条水幕巷道、2 条施工巷道和 6 个竖井, 如图 3 所示。洞室形状为直边墙圆拱形, 洞高 30 m, 宽 20 m, 长 560 ~ 717 m。同一洞罐组内部相邻洞室一侧净间距为 30 m, 另一侧间距为 40 m。不同洞罐组相邻洞室之间的净间距为 59 m。洞库上方设置水平水幕, 覆盖于整个洞库上方。

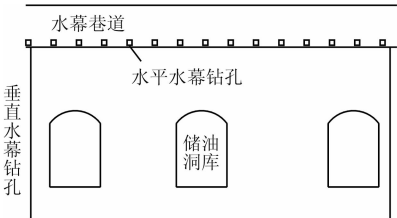


图 1 人工水幕钻孔布置方式示意图

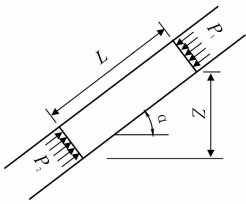


图 2 用临界水力坡降表示水封准则

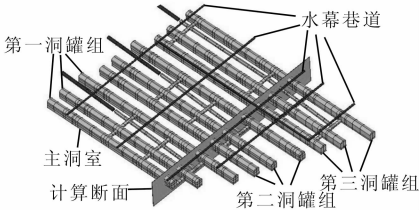


图 3 石油洞库布置图

根据该地下水封石油洞库工程地质勘察报告,库址内部岩体完整,裂隙稀疏,岩性属花岗岩质片麻岩,由试验测试结果,渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ m/d。将洞室群围岩视为各向同性均匀弹塑性介质,材料破坏服

从莫尔-库仑准则,其力学参数:密度 $\rho = 2\,700$ kg/m³, 弹性模量 $E = 17.1$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.21$ 。

为了便于问题分析,将洞罐组模型简化为二维平面模型进行研究,不考虑施工巷道和竖井,计算所选

断面见图 4。数值模拟过程满足如下条件:地下水不可压缩,且流动适用于达西定律;地下水流为恒定且流动稳定;洞库围岩视为各项同性均质连续介质。模型底部及左右边界设为已知水头边界。液态油品上方为饱和蒸气,浮在水垫层上,忽略水垫层的厚度,油品密度 850 kg/m^3 ,饱和蒸气压取为 0.1 MPa ,在油库洞壁按洞壁受力大小施加第一类边界水头。

3.2 自然水幕水封补水控制

水封洞库的最不利工况是地下水位很低,且不

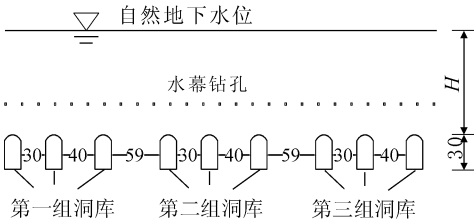


图 4 水封石油洞库平面图(单位:m)

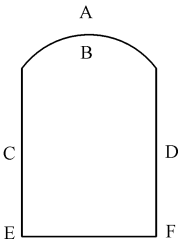


图 6 水封石油洞库监测点布置图

不考虑水垫层的情况下,综合洞库顶部和周边可得:要保证洞库的水封条件,洞库 A、B 两点之间的垂直水力坡降大于 1,洞库直墙中点 C 点和 D 点的临界水压为 0.2 MPa ,底脚点 E 和点 F 的临界水压为 0.3 MPa ,当测点的水压大于临界水压才能保证洞库的水封安全。自然水封工况下,对洞库渗流场数值模拟分析,得主洞室监测点的孔压值,如表 1 所示。

表 1 自然水封时主洞室监测点孔压					
监测点	临界水压	地下水位至洞库顶部距离			
		30	50	70	90
A	114.0	94.8	108.5	122.3	135.5
B	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
C	200.0	205.4	204.2	205.8	207.4
D	200.0	202.0	202.9	204.0	205.1
E	300.0	311.4	306.8	308.5	310.2
F	300.0	305.7	305.4	306.6	307.8
AB 的垂直坡降		<0	0.6	1.1	2.5

设人工水幕,对洞库进行自然水封。在这种情况下油库先进行开挖,计算得到渗流场如图 5 所示。取各个主洞室的拱顶顶点(A 点和 B 点),直墙中点(C 点和 D 点)和底脚(E 点和 F 点)为监测点(如图 6),监测该处的孔压,计算垂直水力坡降并判断是否满足油品的水封条件。假定保证液态油品水封安全的临界条件为洞库周围地下水压力大于同高度下液态油品压力,且洞顶的垂直水力坡降大于 1(洞顶的垂直水力坡降最小)。

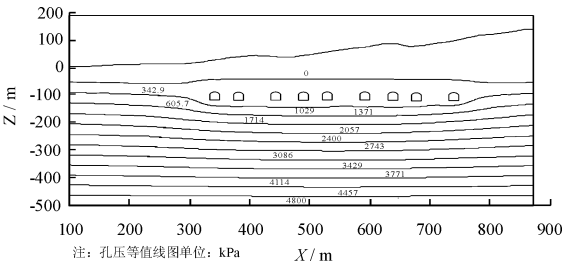


图 5 自然水封工况洞库渗流场

由表 1 可以看出,自然水封工况下,当地下水位至洞库顶部的距离小于 70 m 时,洞库顶部附近的垂直水力梯度小于 1,不满足水封要求。其中洞室两侧直墙中间监测点和两底脚监测点水头值均大于水封安全临界水头值。当地下水位至洞库顶部的距离大于 70 m 时,洞库顶部附近的垂直水力梯度均大于 1,满足水封要求。

表 1 说明,在洞库储油期,当地下水位形成降落漏斗,最低水位至洞库顶部的距离小于 70 m 时,就要开始补水。此外,为了提高水封的安全性,可将水幕钻孔的覆盖范围适当延伸,减少油品泄漏。

3.3 人工水幕水封补水控制

当给定的水幕超压小于临界水幕超压时,洞库顶部的垂直水力梯度小于 1,就要开始补水。最完全水封情况下,地下水埋深,钻孔间距及钻孔至洞库顶部距离对最小安全超压产生不同的影响。

该分析结果是基于平面有限元模型。对于既定模型,可按如下五步计算临界水幕超压:

- (1) 给一个水幕超压。
- (2) 监测洞库周边的水压并计算水力坡降。
- (3) 计算在不同水位,不同洞库间距,和高度,不同水幕超压下洞库顶部的水力坡降,当水力坡降 >1 时,视为洞库能安全运行。
- (4) 再给一个水幕超压,重复步骤 2 和 3,直至水力坡降大于 1 小于 1.1。
- (5) 当给定的水幕超压差值 $<0.05\text{ MPa}$ 时,此

时给定的水幕超压作为最小安全超压。

根据这个方法得到不同工况下的最小安全水幕超压如表 2。

最小安全超压和地下水埋深的关系如图 7。

表 2 各个工况的最小安全水幕超压 m, MPa

地下水埋深	钻孔间距	钻孔至洞库顶部的距离				
		20	25	30	35	40
200	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
	20	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20
220	10	0.05	0.10	0.16	0.23	0.30
	20	0.10	0.16	0.23	0.30	0.37
240	10	0.20	0.27	0.34	0.36	0.38
	20	0.30	0.36	0.43	0.46	0.49

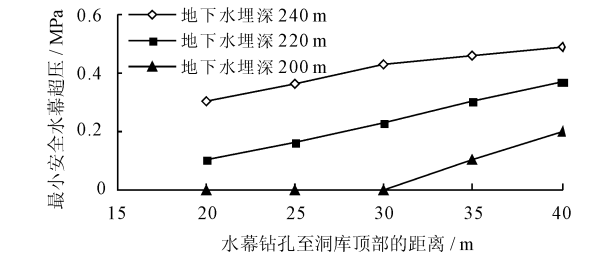


图 7 不同钻地下水埋深安全水幕超压

由图 7 可知:当钻孔在地下水位以下时,最小安全水幕超压和水幕钻孔至顶部的距离成正比。水幕钻孔至洞室顶部的距离越大,最小安全水幕超压越大。且地下水位埋深越小,最小安全水幕超压越大。当地下水埋深为 220 m,钻孔距洞室顶部距离小于 30 m 时,可不设水幕。最不利工况下,此时地下水埋深 240 m,地下水位至洞库顶部的距离只有 30 m,水幕钻孔至洞库顶部的距离为 60 m,水幕超压为 0.49 MPa,洞库恰能安全运行。

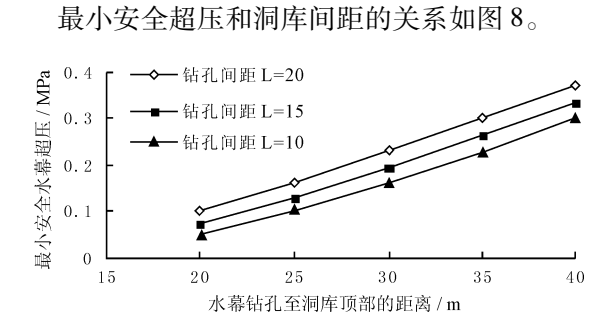


图 8 不同钻孔间距下安全水幕超压

由图 8 可知,钻孔间距越大,所需的安全水幕超压越大。间距 20 m 的钻孔比间距 10 m 的钻孔所需的安全水幕超压大 0.05 MPa 左右。所以,布置水幕

钻孔时应尽量使钻孔密集,这样可以减小钻孔间石油渗漏路径存在的可能性,提高安全运行的概率。

4 结 语

本文研究了自然水封情况下初始地下水埋深和补水的关系,完全水封情况下水幕设计要素对最小安全水幕超压影响,可获得如下结论:

(1)人工补水措施要考虑初始地下水埋深的影响。地下水距洞库顶部距离小于 70 m 时需根据钻孔间距和高度及时补水,而地下水距洞库顶部距离较大的情况可以根据工期适当延后补水。

(2)在运行中要根据钻孔布置情况和地下水埋深合理安排人工补水措施。当钻孔布置间距较大,钻孔离洞库顶部较远时注意及时补水。当地下水位至洞库顶部的距离不超过 30 m,水幕钻孔至洞库顶部的距离为 60 m 时,补水最多施加 0.5 MPa 的水幕超压即可保证洞库安全运行。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. SY/T 0610 - 2008. 地下水封洞库岩土工程勘察规范[S]. 北京:石油工业出版社, 2008

[2] 高翔,谷兆棋. 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.

[3] 王者超,李术才,薛翊国,等. 地下石油洞库水幕设计原则与连通性判断方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 276 - 286.

[4] 时洪斌,刘保国. 水封式地下储油洞库人工水幕设计及渗流量分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 130 - 137.

[5] 时洪斌. 黄岛地下水封洞库水封条件和围岩稳定性分析与评价[D]. 北京:北京交通大学, 2010.

[6] Hamberge U. Case history: Blowout at an LPG storage cavern in Sweden [J]. Tunnelling and Underground space Technology, 1991, 6(1): 119 - 120.

[7] Jung Joo Park. Design of Pyongtaek LPG storage terminal underneath Lake Namyang: A case study [J]. 2005, 20: 463 - 478.

[8] 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.

[9] Goodall D. Containment of gas in rock caverns[D]. Berkeley: Berkeley, Department of Civil Engineering, 1987.