DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.09.018 2013,30(09):89-92,100

大型地下石洞油气库人工水幕技术

杨 凯[1],赵 晓[1],张文辉[1],曹 钢[2],李 鹏[2],陈彦生[2]
(1.武警水电三峡工程指挥部,武汉 430050;2.长江科学院,武汉 430010)

摘要:人工水幕技术,是建造储存石油和天然气的不衬砌石洞地下库的关键。一座总库容为300万m^3、9条20 m×30 m×(484~717)m的中国首座大型地下水封洞库建成,标志我国"国家战略石油地下储备库"的梦想成真。给出了人工水幕技术原理、具体实施关键技术以及水封效果。理论分析与初步实践结果表明,在年均降水量736mm的花岗片麻岩内建造储存原油洞库,是切实可行的。首座大型地下水封石洞储库的施工建设技术,对我国后续的国家战略油气地下储库规划实施,起到了示范启迪与借鉴作用。

关 键 词:地下水封;大型洞库;人工水幕;关键技术;水封效果
中图分类号:TU45 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)09-0089-04

1 水幕技术应用现状

自1915年加拿大建成世界上首座地下储气库、1948年瑞典建成世界上首座地下储油库以来,全球范围内已建成数百座大型地下储油气库,其单库储油库容300万~1 500万m^3,单库储气库容10亿~30亿m^3。

不论是储油库,还是储气库,一个共同的建库特征是,不衬砌、大跨度、高边墙石洞,采用水封原理以储存油气,即通过地下水以下一定深度的坚硬岩石诸如花岗岩、片麻岩、黄岗片麻岩等用围岩的水压大于洞内油气的压力之差来密封使油气不泄漏。

水封有2种方式:一是天然水幕;二是人工水幕[1]。前者适宜于年均降水量充沛、地下水位变幅不大的洞库,后者适用于年均降水量较少且地下水位变幅较大的洞库。本文论述的系后者的工况。2种水幕的共同点,均是以控制地下水来限制或消除油气从有压地下储库泄漏出去为目的。

2 人工水幕油气密封技术原理

所谓人工水幕,就是在储油气洞室上方设置充水巷道(水幕巷道),并在其边墙及底板处钻水幕孔且由此辐射一系列充满水压力的钻孔,从而形成一覆盖整个储油气洞室的伞状水幕[2],如图1所示。

图1中,水幕钻孔依围岩结构面而变化其施打

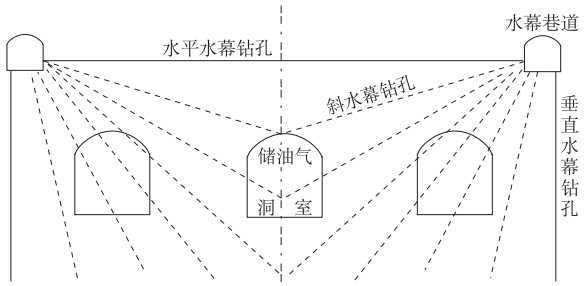


图1 人工水幕系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of artificial water curtain system

方向。对于陡倾角的结构面,水幕钻孔为水平向;对于缓倾角的结构面,水幕钻孔为垂直向;介于陡倾角和缓倾角的结构面两者之间者,则布置斜度不一的水幕钻孔。总的原则是,水幕钻孔尽量与围岩结构面垂直,至少两者有大于70°以上的夹角,以便于水幕钻孔充水后,能使结构面内储有较富裕的水量,使得地下水位保持设计要求的尺度。图2所示的是陡倾角结构面条件下水平水幕孔的布置方式。

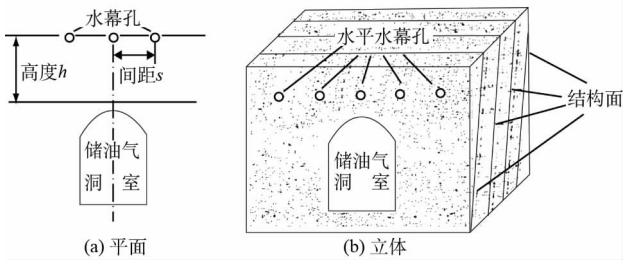


图2 陡倾角结构面水平水幕孔布置示意图
Fig. 2 Plan view and sectional view of the layout of water curtain holes on steep inclined structural planes

收稿日期:2013-07-10
作者简介:杨 凯(1974-)男,陕西西安人,高级工程师,主要从事地下工程施工管理和工程测量技术研究,(电话)18653283933(电子信箱)yk333333@sohu.com。

为分析计,将图 1 等效地改绘为实际地下水封储油气洞库的图 3。

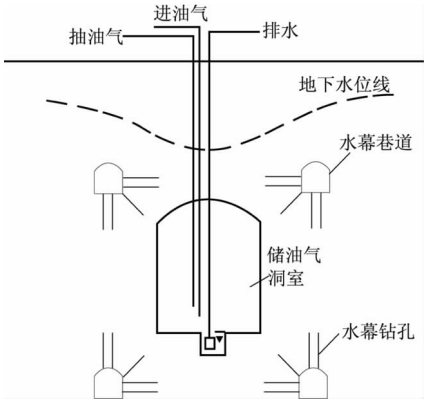


图 3 实际储油气洞室及理论分析的等效水幕系统布设示意图

Fig. 3 Equivalent water curtain system of the oil and gas storage chamber

一般地下水的渗流属稳定流,为此,可用达西(Darcy)于 1856 年创立的式(1)来描述流量 Q,即

$$Q = -kA(h_2 - h_1)/L = -kAJ \quad 。 \qquad (1)$$

式中:k 为渗透系数,对岩石裂隙则称为水力传导系数;A 为包括岩石孔隙和颗粒在内的与流速方向垂直的断面面积或洞室的横截面积;L 为沿水流方向的长度或洞室纵向长度;J 为水力梯度。

于是,流入图 3 储油气洞室内的单位流量 q 可写为

$$q = -kA \cdot \mathrm{grad}U \quad 。 \qquad (2)$$

式中 $\mathrm{grad}U$ 为水力坡降。

对于图 3 中储油气洞室四周有充水钻孔的工况,在理论上又可用图 4 表示。

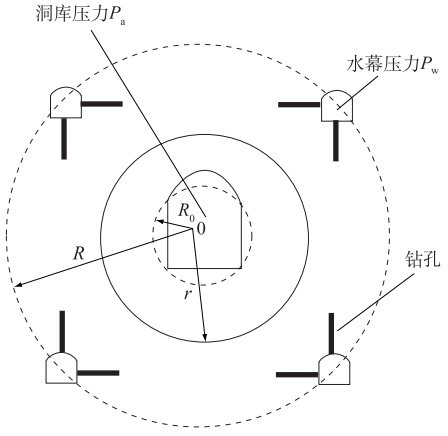


图 4 洞室的等效断面图

Fig. 4 Sketch of equivalent section of the chamber

文献[3]给出了图 4 所示的渗入洞库内的单位流量 q 和总流量 Q:

$$q = 2\pi k \frac{P_w - P_a}{\ln \frac{R}{R_0}} \quad ; \qquad (3)$$

$$Q = 2\pi kL \frac{P_w - P_a}{\ln \frac{R}{R_0}} \quad 。 \qquad (4)$$

式中:P_a 为洞内储油气压力;R 为水幕近似的圆形断面半径;R_0 为储油气洞室(简称“洞室”)近似的圆形换算半径,$R_0 = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$;$A$ 为洞室的横截面积;P_w 为水幕压力;Q 为渗入洞室的总流量;L 为洞室纵向长度。

同理,当地下储油气洞库由多个同断面尺寸的并列洞室组成时(图 5),式(4)仍然适用,只是将式(4)各符号变为式(5)形式:

$$Q_p = 2\pi k \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{n} \frac{P_w - P_a}{\ln \frac{R}{R'_0}} \quad ,$$

$$(i = 1,2,3,\cdots,n) \quad 。 \qquad (5)$$

式中:Q_p 为渗流量;R'_0 为多个同断面尺寸并列洞室组成的储油气洞库围岩换算半径,$R'_0 = 2\pi k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{A_i}{\pi}}$,$(i = 1,2,3,\cdots,n)$;$n$ 为并列同断面尺寸的洞室个数。

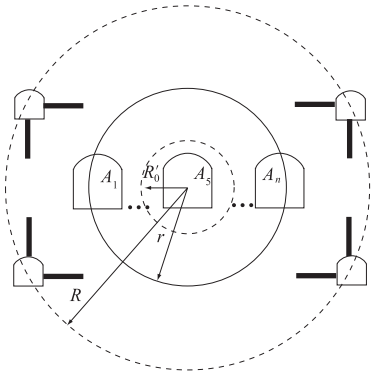


图 5 并列开挖若干个洞室的围岩示意图

Fig. 5 Sketch of parallel chamber of the same section size

在上列各式中,渗透系数 k 的取值可查表 1 选取。

表 1 不同岩土平均空隙率、单位出水量及渗透系数

Table 1 Average void fractions, specific yields and permeability coefficients of different rock and soil types

岩土类型	空隙率/%	单位出水量/%	渗透系数/(m·s^{-1})
黏土	45.0	3.00	$\leqslant 1\times10^{-9}$
砂土	35.0	25.00	$1\times10^{-4}\sim1\times10^{-6}$
卵石	25.0	22.00	$>1\times10^{-4}$
含沙卵石	20.0	16.00	$1\times10^{-5}\sim1\times10^{-7}$
砂岩	15.0	8.00	$1\times10^{-4}\sim1\times10^{-7}$
石灰岩	5.0	2.00	$1\times10^{-5}\sim1\times10^{-6}$
花岗岩	0.5	0.25	$\leqslant 1\times10^{-7}$

由此可见,人工水幕之所以能密闭储油气洞室,是因为人工水幕可使储油气洞室围岩裂缝(结构面之间的空隙)中形成指向洞室的渗流,当这些渗流的水力坡降大于某一临界值时,就可阻止油气进入岩石裂缝或阻止已进入缝隙的油气向外运移。

有关渗流的临界水力坡降值(I_a),目前还没有统一的表达式,唯一可接受的准则是

$$I_a > I \quad ; \tag{6}$$

$$\text{或 } I_a > I - \rho_R/\rho_w \quad 。 \tag{7}$$

式中:I 为沿围岩缝隙面(或结构面)的水力坡降;ρ_R 为油气的重度;ρ_w 为水的重度。

3　水幕技术实施关键

在水幕系统的施工中,水幕钻孔的成孔精准度,是地下水封石洞储油气库成功建造的关键技术。其技术要点如下。

3.1　选择稳定性好、有利于导向施工的钻孔机械

钻孔机械的稳定性与成孔精度密切相关,采取以下措施增加钻孔机械稳定性:采用履带式行走加大钻机自重,钻进前采用油缸支撑的方式将钻机与洞壁围岩固定,在钻机上增设调平装置。

3.2　合理配置钻具包括扶正器、冲击器、定心器及钻杆

(1) 扶正器以导正钻具钻进并扶正钻杆弯曲变形。

(2) 冲击器选用 ø 98 mm 中等风压及 ø 115 mm 中等风压凹心潜孔锤钻头,可以在钻进中起顶锥导向作用。

(3) 定心器利用早期 5 ~ 6 m 的钻孔为导向孔,通过气压将定心器顶紧并使其与孔壁密合,类似全断面圆形隧道掘进机(TBM)结构,定心器以其自身 2 m 长度,当钻杆通过定心器向前推进 2 m 后,自动卸压,并自动向前滑移到钻头附近,然后再次通过气压将定心器与孔壁顶紧,以达钻杆准直继续钻进。如此循环往复,终在 5 m ×4.5 m的水幕巷道内精准钻深,最长达105.4 m。

3.3　施钻前做好钻机定位以及钻孔倾角、方位角的定向

采用岩石锚固、油缸支撑办法,将钻机牢牢固定在设计位置;将孔位点和后视点先人工连线,后用全站仪校核,以达设计要求的倾角与方位角,其误差控制在 mm 级。

3.4　根据施钻岩石变化,适时调整钻进工艺参数

对于花岗片麻岩,水幕孔以钻压 6 ~ 10 kN、钻速 30 r/min、风压0.9 ~ 1.1 MPa、风量 15 m^3/min 正常推进;当遇裂隙发育的富水段时,改用低压、低速和高推进力钻进。当遇断层破碎带时,采用低压、高速、高推进力钻进;若由硬岩向软岩变化时,则用减压、减速和小推进力钻进。

3.5　测斜紧跟钻进,及时纠偏导正

当钻至 5,10,20,30,40,50,60,80,100 m 直至 105.4 m各孔深时,采用 CQ 型测斜仪及时分段测斜,要求水幕钻孔的倾角与方位角精度控制在 ±1° 范围。

3.6　钻孔电视对比

采用钻孔电视,终孔后对整个钻孔的岩石结构与岩性全面成像搜寻,并与各区段钻进的钻压、钻速、推进力对照比较以优化水幕钻孔施工工艺参数。

4　水幕钻孔施工实例

中国首座 300×10^4 m^3 地下水封石洞储库,在 9 个 20 m 宽、30 m 高、484 ~ 717 m 长的洞室拱顶上方 25 m 处,分别布置 5 条断面 5 m ×4.5 m的圆拱直墙水幕巷道,在垂直水幕巷道轴线方向,每隔 10 m 布设 ø 120 mm 水幕钻孔 529 个,其孔深分别有 5,44.4,90.25,105.4 m,共计 49 505 延米,满足了本水封洞库的设计要求。

4.1　水幕钻孔偏斜率

529 个水幕孔总进尺 49 505 延米的钻孔偏斜率见表 2。

表 2　中国首座大型地下水封石洞储油库水幕钻孔偏斜率

Table 2　Deviations of water curtain holes in China's first large-scale groundwater-sealed petroleum storage cavern

孔深/m	偏斜率/%	孔深/m	偏斜率/%
20	0.45	80	3.00
40	0.90	95.5 ~ 105.4	4.00
60	2.00		

由表 2 可见,孔深在 60 m 之前,钻孔属于正常基准导向,其偏斜率为允许范围;孔深 60 ~ 80 m 区段,钻孔属于异常基准导向,其偏斜率较大;孔深 95.5 ~ 105.4 m时,钻孔属于非常基准导向,其偏斜率大,可能对围岩缝隙(结构面)相垂直的布置带来较大偏差,不利于水幕充压和地下水位线调控。

4.2　水幕钻孔偏斜允许值比较

鉴于岩土预应力锚杆偏斜精度,对其锚固工程整体力学效应和应用效果有直接的影响,国内外相关技术规范、指南对钻孔偏斜均给出了明确指标规定(见表 3)。

表 3 水幕钻孔与其之相关规范中钻孔偏斜允许值的比较

Table 3 Comparison of deviation between water curtain hole and borehole in specifications in China and abroad

序号	名称	孔深	偏斜允许值	备注
1	中国首座地下水封石洞油库水幕钻孔	0 ~ 20 m 20 ~ 40 m 40 ~ 60 m 60 ~ 80 m 80 ~ 100 m	±25′ ±50′ ±1.1° ±1.7° ±2.3°	表 2 偏斜率计算
2	(美)《岩土预应力锚杆指南》	全孔深度	≤ ±2°	预应力混凝土协会(PTI)
3	(英)《岩土锚杆实施规范》	全孔深度	≤ ±2.5°	BST (1989 年)
4	(日)《岩土锚杆设计施工规程》	全孔深度	±2.0°	该规程“指南(2001 年)”
5	国际预应力混凝土协会“岩土锚杆规范”	全孔深度	±2.5°	或允许偏差不大于钻孔长度的 1/30
6	中国《锚杆喷射混凝土支护技术规范》	全孔深度	≤3.0°	(GB50086—2001)

由表 3 可见,中国首座大型地下水封石洞储油库的水幕钻孔,实施的所有长度区段,均比现行国内外岩土锚杆的偏差度小,而且钻孔长度在 60 m 区段内,其偏差角度少一半以上。这表明,水幕钻孔的基准导向比锚杆钻孔的要求高;也是水幕“软实力”与锚杆“硬实力”不同所致。

4.3 水封效果

参考国外已建的储油气洞库水幕钻孔技术,以及现场水幕孔注水回落试验、有效性试验和理论分析[4-8],可得:

(1) 通过现场水幕孔的有效性试验,检测水幕孔之间的渗透性,利用有限元分析了各向同性和各向异性渗透性条件下水幕孔注水后孔隙水压力的时空分布规律,得到了不同水压力增量和观察时间条件下水幕孔间距,满足了设计条件。

(2) 单一裂隙下水幕孔周边压力的分布主要控制因素为裂隙的走向,沿裂隙方向导水性好,压力上升最大;垂直裂隙方向透水性较差,水压力变化幅度小。因此,在已知节理裂隙分布情况下,沿裂隙方向,可增大水幕孔间距,其他方向,适当减小水幕孔间距是正确的。

(3) 在小角度交叉裂隙情况下,水幕孔布置在沿裂隙方向和 2 组裂隙较小夹角范围内是比较有利的,在这部分区域,压力传导快,水幕孔连通性好。而在其他区域,水幕孔间距应适当变小。

(4) 对于大角度交叉裂隙而言,在各组裂隙参数取值相同的情况下,水幕孔周围水压力变化比小角度交叉裂隙小,角度越大,变化越小,压力趋向均匀分布。因此,水幕孔的布置,在各个方向的间距变化较小也是可行的。

总之,2 年多的施工期现场试验结果表明,首座大型地下水封石洞储油库的水封效果,符合实际,可以在工程生命周期内满足原油不泄漏的要求。

5 结 语

中国首座大型地下水封石洞储油库的人工水幕技术,理论与初步实践的结果表明,该技术精准可靠,可为国家战略石油储备规划的后续工程借鉴。

通过近期类似工程比较可知,首座储库的人工水幕技术,对于年平均降水量 736 mm 的花岗片麻岩不衬砌条件,能达到水封原油不泄漏的效果,它给类似的工程起到了示范启迪作用。

参考文献:

[1] KJΦRHLT H, BROCH E. The Water Curtain: A Successful Means of Preventing Gas Leakage from High-pressure, Unlined Rock Caverns[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992,7(2):127 – 132.

[2] 高 翔,谷兆祺. 人工水幕在不衬砌地下储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] 崔京浩. 四周有水幕的高压气库渗流量分析[J]. 油气储运,1990,9(4):19 – 26. (CUI Jing-hao. A Method of Analysis on Quantity of Stored High Pressure Gas[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 1990, 9(4): 19 – 26. (in Chinese))

[4] 赵乐之,刘保国,赵 峰. 考虑流固耦合的地下储油洞库稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(1): 155 – 162. (ZHAO Le-zhi, LIU Bao-guo, ZHAO Feng. Research on Stability of Underground Petroleum Storage Caverns with Consideration of Fluid-Solid Coupling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 155 – 162. (in Chinese))

[5] 刘贯群,韩 曼,宋 涛,等. 地下水封石油洞渗流场的数值分析[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 Chinese: Science and Technology, 2007, 37(5): 819 – 824. (in Chinese))

(下转第 100 页)