

# 某地下水封石油洞库选址压水试验成果分析

唐文颖 (江苏省水文地质海洋地质勘查院, 江苏 淮安 223005)

**摘要:** 水封地下油库作为国家石油战略储备库得到越来越多的应用, 在某地下水封石油洞库选址方案一 ZK1、ZK2 和方案二 ZK3、ZK4 四个钻孔中进行压水试验, 试验压力分别为 0.3MPa、0.6MPa、1.0MPa, 试验段长度主要为 5.1m, 破碎带及裂隙密集带试段长度有所变化, 试验段之间有部分重叠确保不漏段, 总共完成 45 段压水试验, 本文对试验成果进行分析讨论, 了解岩体在实际水头压力作用下的透水率、渗透特性和岩体完整程度等, 为地下水封石油洞库选址和设计提供依据。

**关键词:** 地下水封石油洞库; 压水试验; P-Q 曲线; 透水率; 渗透系数

## 1 引言

石油不仅是需求巨大的化工原料, 还是非常重要的战略物资, 同时还是现在世界上应用最广泛、运输和储存最方便的一种能源, 是工业发展的动脉。近几十年以来, 随着世界经济的快速发展, 与能源相关的问题越来越突出, 建立石油储备体系不仅可以保障国家社会经济稳定安全, 还是应对国内国际突发事件的必要手段, 更可以稳定石油供求关系并有效的平抑石油价格。目前, 世界上的石油储备库分为地下储油库和地上储油库两种, 而地下储油库是大规模石油储备的主要方式。

地下储油库分为两种, 一种是盐岩洞库, 另一种是水封岩石洞库。地下水封岩石洞库是以地表稳定水位线以下一定深度的完整岩体作为载体, 通过人工开凿出一定容积的洞室作为石油储存空间, 利用洞室外围岩体中存在的地下水或是人为形成地下水幕的水封作用, 将石油外溢的途径封死形成封闭空间, 便构成地下水封石油洞库; 盐岩洞库则是利用埋藏在地下一定深度的盐岩, 因其孔隙率与渗透率几乎为零, 具有很好的液密性和气密性, 通过人工在盐岩中冲刷出一定空间的洞库来储存石油。地下储油库与地上储油库相比, 具有占地少、污染小、储存安全、维护简单、使用寿命长等优势, 从而受到许多国家和地区的欢迎, 因此, 对地下洞室各方面的研究具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

## 2 工程概况

本次地下水封石油洞库选址备选有两个方案, 方案一处于缓坡丘陵地带, 地势相对起伏, 地表以荒山、少量林地和耕地为主。覆盖层厚度一般在 1~20m, 主要为含砂粉质黏土, 植被较发育, 下伏基岩为燕山晚期第三次侵入岩, 局部中风化基岩出露, 岩性主要为灰白色、灰青色、杂灰黑色中粒花岗岩, 半自形粒状

结构, 块状构造, 微风化以上岩体致密、坚硬, 主要矿物成分为钾长石、斜长石、石英、黑云母。方案二地形宽阔平坦, 地表主要为耕地及荔枝果园, 覆盖层厚度较大, 未见基岩裸露, 钻探揭露覆盖层为第四系残坡积粉质黏土夹碎石, 土体内有孤石分布, 下伏基岩为燕山晚期第一次侵入岩, 岩性主要为灰白色混杂黑色斑点二长花岗岩, 半自形粒状结构, 块状构造, 微风化以上岩体致密、坚硬, 主要矿物成分为斜长石、钾长石、黑云母、少量石英, 零星见角闪石。

## 3 试验原理

本次地下水封石油洞库压水试验参照《水利水电工程钻孔压水试验规程》(SL31-2003) 进行, 采用吕荣试验作为试验方法。试验中每段均采用 0.3MPa、0.6MPa、1.0MPa 三级压力、五个阶段, 即  $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 (P_4=P_2) \rightarrow P_5 (P_5=P_1)$ ,  $P_1 < P_2 < P_3$ 。在断层带、错动带上透水量较大时, 压力点的压力值有所下调。根据试验要求对测定的压力和流量资料进行分析整理, 计算出各试验段的岩体透水率和渗透系数。

试段透水率的单位为吕荣 (Lu), 1Lu 的定义是当试段压力为 1MPa 时, 每米试段的压入流量为 1L/min。试段透水率采用最大压力阶段的压力值和流量值按下式计算:

$$q = \frac{Q}{L \times P}$$

式中:  $q$  为试段透水率 (Lu),  $Q$  为最高压力阶段稳定流量 (L/min),  $L$  为试验段长度 (m),  $P$  为最高压力阶段压力值 (MPa)。

试验段位于地下水位以下, 透水性较小 ( $q < 10Lu$ ), 所以采用下式计算岩体渗透系数:

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \times L_n \frac{L}{r_0}$$

式中:  $K$  为岩体渗透系数 ( $m/d$ );  $Q$  为压入流量 ( $m^3/d$ );  $H$  为试验水头 ( $m$ );  $L$  为试段长度 ( $m$ );  $r_0$  为钻孔半径 ( $m$ )。

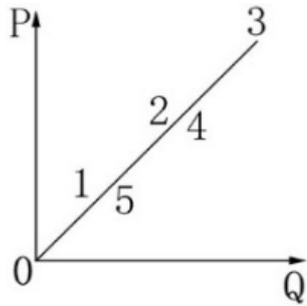


图1 升压曲线为直线, 降压曲线与升压曲线基本重合

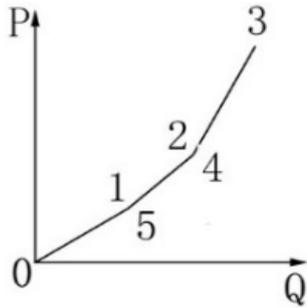


图2 升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合

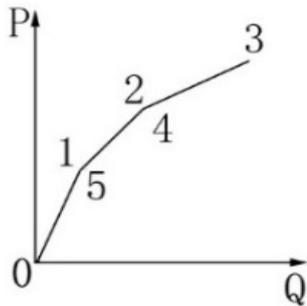


图3 升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合

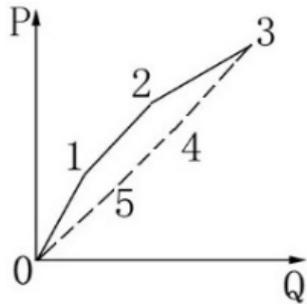


图4 升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈顺时针环状

所测试验段只有完成三级压力、五个阶段的压水试验后, 才能根据压力和流量关系绘制 P-Q 曲线。不

渗透或少于 5 个压力阶段的试段无法绘制 P-Q 曲线。

《水利水电工程钻孔压水试验规程》中划定, P-Q 曲线有 5 种类型, 每种曲线代表一种渗流类型, 分别为: A 层流型、B 紊流型、C 扩张型、D 冲蚀型及 E 充填型, 其标准曲线特点如图 1-图 5<sup>[3]</sup>。

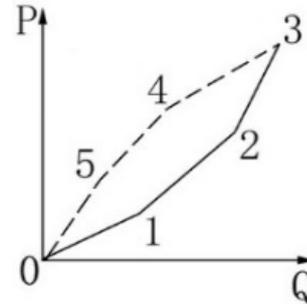


图5 升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈逆时针环状

#### 4 试验结果分析与讨论

地下水封石油洞库钻探孔 ZK1 孔在孔深 85.0m~140.2m 深度域内, 连续进行 11 段压水试验; ZK2 孔在孔深 75.0m~142.8m 深度域内, 连续进行 13 段压水; ZK3 孔在孔深 90.0m~145.1m 深度域内, 连续进行 11 段压水; ZK4 孔在孔深 85.0m~140.0m 深度域内, 连续进行 10 段压水。四个钻孔试验段揭露的地层岩性均为花岗岩, 在测量深度域内岩石完整的试验段不透水, 而透水主要表现在原生裂隙比较发育的层段上, 四个钻孔共出现 11 个透水段, 试验结果详见表 1。

表 1 压水试验结果

钻孔编号	试段深度 (m)	透水率 (Lu) 及 P-Q 曲线类型	渗透系数 (m/d)
ZK1	100.0-105.1	5.79 (E)	$6.5 \times 10^{-2}$
	105.0-110.1	9.34 (E)	$1.1 \times 10^{-1}$
	110.0-115.1	1.87 (E)	$2.1 \times 10^{-2}$
	115.0-120.1	2.43 (E)	$2.7 \times 10^{-2}$
	120.0-125.1	2.80 (E)	$3.1 \times 10^{-2}$
	130.0-135.1	2.80 (E)	$3.1 \times 10^{-2}$
ZK2	91.0-96.1	0.38 (E)	$9.0 \times 10^{-4}$
ZK3	90.0-95.1	7.21 (A)	$8.1 \times 10^{-2}$
	110.0-115.1	6.66 (A)	$7.5 \times 10^{-2}$

ZK4	85.0-90.1	4.15 (A)	$4.7 \times 10^{-2}$
	130.0-135.1	0.57 (A)	$6.0 \times 10^{-3}$

#### 4.1 吕荣值与渗透系数

根据表 1 两个方案 45 个试验段压水试验吕荣值与渗透系数表现为如下特征:

在地下水封石油洞库选址方案一中 ZK1 号孔在 100.0~125.1m 之间 5 段连续发生了透水, 其中 105.0~110.1m 试验段透水量较大, 透水率为 9.34Lu, 渗透系数为  $1.1 \times 10^{-1}$ m/d。其余试验段的透水率在 1.8~5.8Lu 之间, 渗透系数在  $2.1 \times 10^{-2}$ ~ $6.5 \times 10^{-2}$ m/d 之间。ZK2 号孔有一个试验段发生透水, 透水率为 0.38Lu, 透水系数为  $9 \times 10^{-4}$ m/d。总计透水段占总段数的 29.2%。

在地下水封石油洞库选址方案二中 ZK3 和 ZK4 号孔均有 2 段试验段发生了透水, 透水率主要在 4.2~7.2Lu 之间, 渗透系数主要在  $4.7 \times 10^{-2}$ ~ $8.1 \times 10^{-2}$ m/d 之间, 其中 130.0~135.1m 透水率较小为 0.57Lu, 渗透系数为  $6 \times 10^{-3}$ m/d。总计透水段占总试验段的 19.1%。

四个钻孔在试验深度内的透水性是  $q_{ZK2} < q_{ZK4} < q_{ZK3} < q_{ZK1}$ 。依据《工程地质手册》(第四版)中划定见表 2, ZK2 钻孔试验段内岩体评价为完整, ZK1、ZK3 和 ZK4 试验段内岩体评价为节理较发育。

表 2 单位吸水量与裂隙系数关系<sup>[4]</sup>

透水率 (Lu)	裂隙系数	岩体评价
< 0.1	< 0.2	最完整
0.1-1	0.2-0.4	完整
1-10	0.4-0.6	节理较发育
10-50	0.6-0.8	节理裂隙发育
> 50	> 0.8	破碎岩体

#### 4.2 P-Q 曲线类型

本次地下水封石油洞库压水试验在 45 段成果中, 大部分试段在 0.3MPa、0.6MPa、1.0MPa 压力下不漏水, 有 11 段在五个压力阶段有流量, 根据试验结果确定出 P-Q 曲线类型。地下水封石油洞库选址方案一中 P-Q 曲线升压与降压不重合, 都为逆时针环状, 渗透类型以充填型为主, 表明试段内岩体裂隙短小, 裂隙之间连通性一般, 且部分处于闭合状态, 裂隙内充填物呈松散状, 受到试验水头压力作用后发生移动, 固体颗粒及水充填破碎带缝隙和半封闭裂隙, 降压段

流量呈减小趋势<sup>[5]</sup>。地下水封石油洞库选址方案二中 P-Q 曲线都为通过原点的直线, 升压曲线与降压曲线基本重合, 表明渗透类型为层流型, 整个试验期间裂隙状态没有发生变化。

## 5 结论

### 5.1 透水率

在本次地下水封石油洞库备选场址内四个钻孔 45 段压水试验及其成果分析表明: 试验深度内, 在压力为 1.0MPa 压力下, 方案一 ZK1 孔有 6 段透水, ZK2 孔有 1 段透水, 透水率在 0.38~9.3Lu 之间。方案二 ZK3 和 ZK4 都有 2 段透水, 透水率在 0.57~7.2Lu 之间。四个钻孔在试段内的岩体完整段不透水, 裂隙段透水率低连通性差, 方案一 ZK1 孔个别试段的透水率较高。

### 5.2 渗透系数

根据本次地下水封石油洞库选址四个钻孔 45 段压水试验结果计算了岩体的渗透系数, 方案一透水的试验段渗透系数在  $10^{-2}$ m/d ( $10^{-5}$ cm/s) 量级, 个别试验段在  $10^{-1}$ m/d ( $10^{-4}$ cm/s) 量级, 其他试验段渗透系数在  $10^{-3}$ m/d ( $10^{-6}$ cm/s) 以下。方案二透水试验段的渗透系数在  $10^{-2}$ m/d ( $10^{-5}$ cm/s) 量级, 其他试验段渗透系数在  $10^{-3}$ m/d ( $10^{-6}$ cm/s) 以下。

### 5.3 P-Q 曲线类型

本次地下水封石油洞库压水试验 45 段试验结果显示, 有 11 段在五个压力阶段有流量, 根据试验成果确定出 P-Q 曲线类型, 方案一钻孔压水试验 P-Q 曲线为充填型; 方案二钻孔压水试验 P-Q 曲线主要为层流型。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨峰. 惠州地下水封储油洞库群围岩稳定性分析与评价 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [3] 水利水电工程钻孔压水试验规程 (SL31-2003)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [4] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册 (第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [5] 司海宝, 李会. 某小 (1) 型水库大坝坝基岩体渗透性分析 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2018, 35 (01): 61-65.

#### 作者简介:

唐文颖 (1987-), 男, 汉族, 江苏淮安人, 硕士研究生, 工程师, 从事水工环地质勘察及研究工作。