

# 地下水封储气洞库原理及数值模拟分析

杨明举 关宝树

(西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

**摘要** 结合我国第一座地下水封储气洞库工程,对水封式地下储气洞库的原理及设计作了简单的论述。通过数值模拟方法对地下水封储气洞库从理论上进行了分析探讨。为我国地下储气洞库工程的发展、设计和施工提供了理论依据。

**关键词** 地下工程,水封幕,储气洞库

**分类号** TU 926

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2001)03-0301-05

## 1 引言

随着工业现代化进程对燃料的大量需求,燃料的储藏问题不可避免的摆在人们的面前,特别是对易燃易爆的石油天然气更需要一个良好的存储空间。地下水封储气洞库最早出现在瑞典等欧美国家<sup>[1]</sup>,其特点就是在稳定的地下水位以下开挖岩洞用以储藏石油天然气。一般岩洞跨度大,高边墙,油品直接与洞壁围岩接触,洞壁不需要做衬砌,并利用地下水压力来封存液化气。地下水封储气洞库具有优越的防护性、热稳定性和密闭性,因此利用和开发地下储藏洞室具有深远的现实意义。

## 2 地下水封洞储石油液化气的原理

地下岩石裸洞储存石油液化气(Liquefied Petroleum Gas—LPG)应具备两个条件:一是密封;二是具有一定的强度,以保证油品不渗不漏,不易挥发。地下水封储气洞库一般修建在稳定的地下水位以下的岩体中。洞室开挖前,地下水通过节理裂隙等渗透到岩层的深部并完全充满岩层空隙。如图1所示<sup>[2]</sup>,当储油洞库开挖形成后,周围岩石中的裂隙水就向被挖空的洞室流动,并充满洞室。在洞室中注入油品后,油品周围会存在一定的压力差,因而在任一油面上,水压力都大于油压力,使油品不能从裂隙中漏走。同时利用油比水轻以及油水不能混合的性质,流入洞内的水则沿洞壁汇集到洞底部形成水床,并

由油泵抽出。这就是水封式储气的原理。

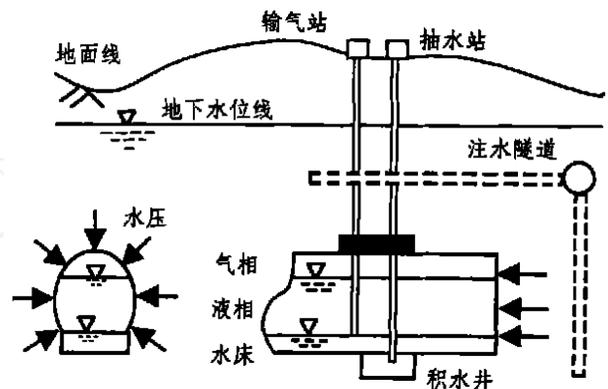


图1 地下水封储气洞库原理示意图<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Underground gas storage caverns with water curtain<sup>[2]</sup>

石油液化气在常温、常压状态下是气体,加压(20℃时,丙烷约为0.84 MPa,丁烷约为0.3 MPa)或冷却(0.1 MPa气压下,丙烷为-42℃,丁烷为-1℃)都容易使LPG变成液体。LPG的储藏方法可采用低温常压或常温高压,或两种方法同时采用,使之变成液体后储藏,其体积为气体时的1/250。目前几乎都采用常温下地下水封储藏方式。在稳定地下水位下,储洞埋设深度每增加10 m,即增加0.1 MPa的水压。如在20℃的岩层内储存丙烷时,只要所处地下水压为大于丙烷蒸汽压0.84 MPa的洞室就可以实现储藏。在这一深度内,围岩渗水压比蒸汽压大,LPG就不可能向外渗漏。为防止LPG渗漏,丙烷设置深度为100 m左右,丁烷为40 m左右。一般洞室的

1999年11月15日收到初稿,1999年12月14日收到修改稿。

作者 杨明举 简介:男,28岁,1995年毕业于成都科技大学水利系水工结构专业,现为西南交通大学博士研究生,主要从事地下工程设计和施工方面的研究工作。

设置深度要考虑储洞内气压和水封压力的平衡深度并加上富裕度，可由下式确定：

$$H = 10 P + a \tag{1}$$

式中： $H$  为常压储藏时从设计水封水位(稳定地下水位线)到最高LPG液面的深度(m)； $P$  为最大使用压力(MPa)； $a$  为富裕度(m)。加压储藏时，为防止LPG喷出，要确保LPG自重可克服储藏压力的深度，其公式为

$$H = 100 P / \gamma + b \tag{2}$$

式中： $H$  为加压储藏时从竖井上部室底到最高液面的深度(m)； $\gamma$  为燃料液体比重； $b$  为富裕度(m)。通常取  $a = 5 \text{ m}$ ， $b = 1 \text{ m}$ 。

### 3 地下水封储气洞库构造设计及渗流场与应力场的耦合

地下水封储气洞库与一般地下工程相比有以下 3 个特点：

- (1) 处于地下水位以下。
- (2) 一般比地下发电站小，比普通公路交通隧道大。
- (3) 地下洞室不衬砌，仅做少量的结构处理。

基于此，需对储洞进行储气前洞室围岩稳定分析和储气后水封分析。对于地下洞室围岩稳定分析一般采用有限元法。其研究流程为：洞室断面规模的研究 决定断面规模及尺寸 采用三维非线性有限元进行洞室稳定性研究 调整和确定洞室间的相互配置。洞室稳定后才能进行水封设计及分析。

地下水封储气洞库最大特征就是利用地下洞室周围形成的地下水压。在进行水封式地下岩洞设计时，保持储洞的液密、气密性和正确预测涌水量是两个重要的课题，也是水封理论的基本问题。水封系统受到岩层的水理特性或有无相邻洞室等空洞布置以及地下水涵养量的影响，一旦地下水位不稳定或深度不足，则可采用人工注水形式。一般沿洞周打注水隧道，使之形成水帘幕，从而防止气体泄漏。水封设计一般采用地下水渗流解析方法进行。其基本流程如下：进行水文地质调查 编制自然水封的基本方式 进行渗流场分析并研究满足液密、气密性的配置构造 判断是否满足液密、气密性 若不满足，则编制人工水封的基本方式 再进行渗流场分析并研究满足液密、气密性的配置构造 计算涌水量。然而天然岩体中存在大量的空隙和裂隙，这些缺陷严重地影响岩体的渗透特性。渗流场受岩体应力场的影响很大，而渗流场也反作用于应力场，

及所谓的渗流-应力耦合分析<sup>[3~5]</sup>。地下水封储气洞库一般位于岩性非常好的岩体中，洞挖后洞室基本处于稳定状态，并不需要衬砌。对此，本文在进行水封分析时，仅考虑应力场对渗流场的影响。国内外实测及实验表明<sup>[6]</sup>，孔隙压力变化会引起有效应力的变化，明显地改变裂隙张开度、流速及液体压力在裂隙中的分布。文[7]通过对地下洞室开挖后围岩渗透系数变化的研究，提出应力与裂隙的渗透系数的关系式为

$$K_f = K_f^0 \left[ \frac{1}{A \left[ - \frac{\sigma}{\sigma_0} + 1 \right]^3} \right] \tag{3}$$

式中： $\sigma$  为有效正应力； $\sigma_0$  为裂隙的就位应力； $K_f$  为应力等于  $\sigma$  时裂隙的渗透系数； $K_f^0$  为应力等于  $\sigma_0$  时裂隙渗透系数； $A$ ， $a$  为待定系数，可根据实验确定。

### 4 地下水封储气洞库工程实例

#### 4.1 工程概况

我国在汕头修建的第一座地下水封LPG洞库总库容为  $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。工程包括丙烷和丁烷两组洞库，其洞室断面为马蹄型，宽 18 m，高 22 m。所处工程地质主要为黑云母花岗岩，岩石致密坚硬，渗透性低，平均渗透率为  $5.9 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。丙烷储气洞埋深为海平面以下 - 115 m，丁烷储气洞埋深为海平面以下 - 55 m。水幕洞处于各洞室的上部 23 m 处，并与其储气洞轴线有一定的夹角，其基本宽度为 4.0 m，高度为 4.0 m(断面面积为  $14.3 \text{ m}^2$ )，能够钻垂直的水幕钻孔。由于工程位于海边，有充足的水封用水。

#### 4.2 有限元渗流模拟方法

裂隙岩体中完整岩体的渗透性极为微弱(渗透系数  $K < 10^{-8} \text{ m/s}$ )，渗透水主要在岩体裂隙中运动，而裂隙在岩体中的分布具有显著的非均一性和方向性。裂隙岩体渗流的数学模型有两类：(1) 把岩体裂隙当作缝隙网的裂隙网络模型，或称为不连续介质模型；(2) 把裂隙渗流平均到整个岩体上当作各向异性均质场的连续介质模型。概化后的连续介质模型中，由于沿裂隙流动的速度与水力坡度并不一致，因而达西定律中渗透系数应以张量表示，代入连续性方程可得均质各向异性介质场渗流的微分方程：

$$\left. \begin{aligned}
 \nabla \cdot (K \nabla H) + Q &= S \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y, z), t \in [0, t_0] \\
 H|_{t=0} &= h_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \\
 H|_{t=t_0} &= h_1(x, y, z, t) \quad t \in [0, t_0] \\
 K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_2 &= q(x, y, z, t) \quad t \in [0, t_0]
 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$



式中： $\nabla$  为拉普拉斯算子； $Q$  为源汇项； $S$  为储水系数； $\Omega$  为渗流区域； $h_0$  和  $h_1$  分别为初始水头分布和第一类边界上的水头分布； $q$  为第二类边界流量； $\Gamma_1, \Gamma_2$  分别为第一类、第二类边界； $K$  为渗透系数张量。

对于上述渗流区域上的偏微分方程的精确解一般是做不到的。但通过离散化方法把整个渗流区域剖分成若干小的单元，化整为零，经过近似处理后再积零为整，从而求得近似解。可以证明，在渗流区域  $\Omega$  上，可推得渗流矩阵方程式：

$$[T]\{H\} + [S]\left\{\frac{dH}{dt}\right\} = \{F\} \quad (5)$$

若区域为稳定渗流，其渗流矩阵方程式为

$$[T]\{H\} = \{F\} \quad (6)$$

上两式中： $[T]$  为  $N \times N$  阶导水矩阵； $[S]$  为  $N \times N$  阶储水系数矩阵； $\{H\}$  为  $N$  阶未知地下水水头列向量； $\left\{\frac{dH}{dt}\right\}$  为  $N$  阶水头变化率列向量； $\{F\}$  为  $N$  阶常数项列向量。

在渗流有限元计算中，利用迭代法通过解式 (5)，(6) 方程组，便可求得渗流区域  $\Omega$  上的水头分布。

### 4.3 工程区域渗流条件概化

针对工程地质构造特点，分别对丙烷储洞的横剖面以及丁烷储洞的纵剖面进行有限元数值模拟分析。由于工程的北面有一条大的局部断层带，其方向变化从东北到西南，且为正断层，其透水性强，可近似作为定水头边界。同时也把海岸作为定水头边界。储洞底部下 100 m 处渗透系数相对于储洞处的更小，可近似处理为隔水边界。对于地下水位可作为自由边界处理。考虑到应力场对计算域内渗透系数的影响，先对洞室进行了非线性有限元模拟开挖计算，求得有效应力后，代入式 (3) 便得到考虑应力影响的渗透系数。

由于渗流区各边界较为稳定，水流状态主要为稳定流。且从水封分析的角度看，主要是研究各种不同的终极稳定状态下地下水在裂隙岩体中的稳定流动，因而本文分析是对稳定流的模拟。

### 4.4 水封地下储洞稳定及渗流场分析

通过储气前对洞室进行三维非线性有限元模拟开挖计算，洞室开挖后围岩变位及其塑性区都都很小。由于丙烷储洞较丁烷储洞埋深大，其洞周围岩塑性区较丁烷大，洞室最大变位发生在丙烷储洞洞顶，其值为 7 mm。各洞室塑性区分布分别见图 2，3。总的来讲储气洞室是稳定可靠的。

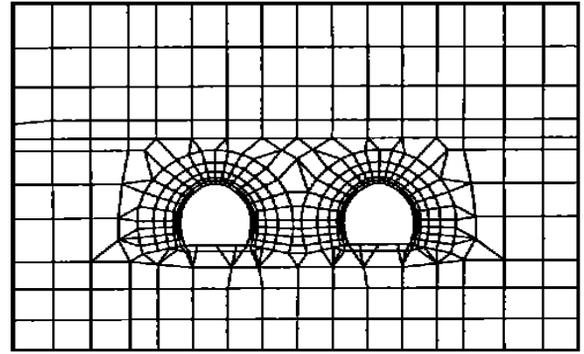


图 2 丙烷储洞开挖后断面塑性区分布图  
Fig. 2 Plastic area of propane storage cavern

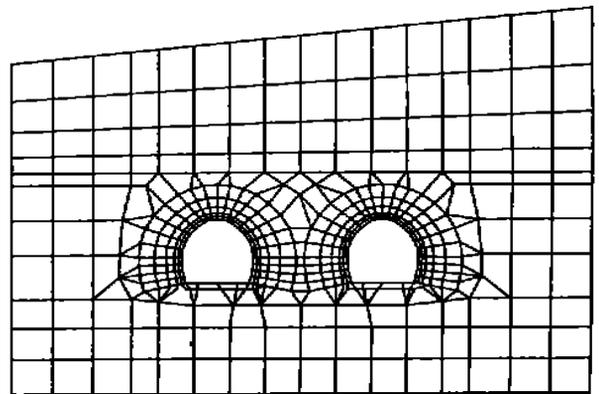


图 3 丁烷储洞开挖后断面塑性区分布图  
Fig. 3 Plastic area of butane storage cavern

当各储气洞室储气后达到稳定状态时，通过有限元模拟地下渗流场计算可知，各储气洞都被大于洞内气体蒸汽压的水压所包围。如丙烷储洞洞周水压为 1.16 MPa 左右，丁烷储洞洞周水压为 0.45 MPa 左右。各洞室地下水等势线图见图 4，5 (图中数字为渗流场水头值 (m))。从地下水封原理的角度讲，达到地下水封储气要求。但从地下水自由面与洞内压力关系图 (图 6) 可以看出，洞室的开挖以及洞内气压的减小都会在洞室周围形成一个地下水降落漏斗。由于降落漏斗的存在，可能会使洞室上部的岩体丧失水封条件。因此在洞室上部岩体中开挖注水隧道，通过水压力作用使水充满岩体裂隙，达到水封及富裕度要求。

从计算涌水量结果来看，地下储洞洞周都有渗水进入洞室。正常储气状态下 (洞内气压等于储气蒸汽压)，其最大涌水量丙烷储洞为 12.96 m<sup>3</sup>/h，丁烷储洞为 14.4 m<sup>3</sup>/h。从涌水量与洞内气压关系图 (图 7) 可以看出，随着储洞内气压的增加，洞内涌水量成比例减少。渗入洞内的水在洞室底部形成一定厚度的水垫层，这样既可防止 LPG 与洞底接触，

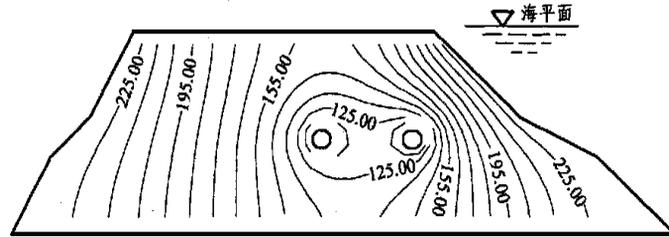


图 4 丙烷储洞储气后地下水等势线图

Fig. 4 Isopleth of seepage potential of propane storage cavern

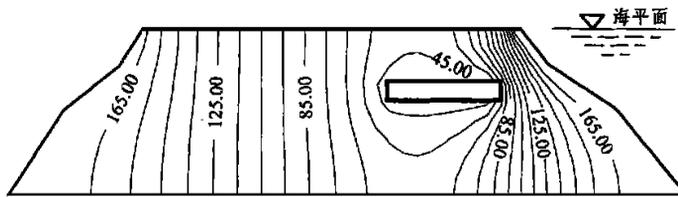


图 5 丁烷储洞储气后地下水等势线图

Fig. 5 Isopleth of seepage potential of butane storage cavern

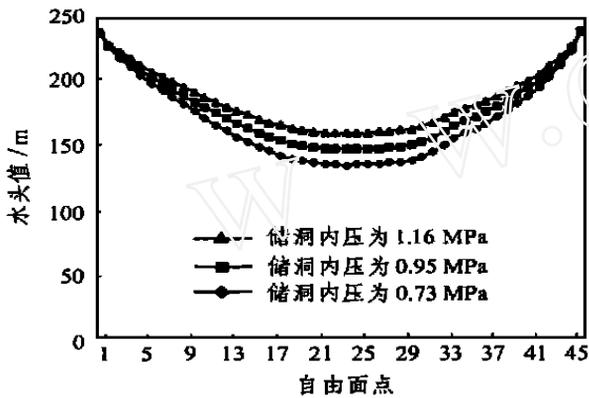


图 6 丙烷储洞内气压与自由面点水头值关系

Fig. 6 Pressure of propane storage cavern versus water head on free surface

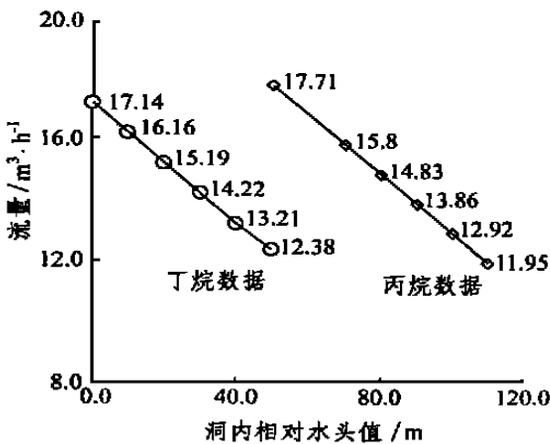


图 7 最大涌水量与洞内气压关系

Fig. 7 Maximum outflow versus pressure of storage cavern

保证 LPG 的清洁，又可防止洞壁岩块掉落不与洞底岩石相撞击，从而达到防爆的目的。多余的水经泵站排出。一般洞内涌水量不宜过大，避免造成供水的浪费以及污水处理量的增加。因此，在稳定地下水和正常储气状态下，控制和确定注水隧道的注水压力是很有必要的。

## 5 结 语

通过本文的分析研究可以看出，利用水封地下洞室储存 LPG 是可行的。地下水封幕的形成完全可以阻止洞内 LPG 的泄露。国外大量的工程也表明，地下水封储气是非常安全和经济的。因此，从长远的可持续性发展的观点看，利用地下水封裸洞储存 LPG 是发展的必然趋势。我国在水电行业修建大型地下厂房已具有相当的水平。面对日益增长的对石油液化气的需求，完善地下水封储气洞库的设计理论和施工技术是非常必要的。同时应对以下几个方面做进一步的研究：

(1) 储洞内气压实际是一个动态的变化过程，LPG 的气液转化以及气泡在裂隙水流中的运动规律仍需研究。

(2) 水封地下储气是包括气体、地下水和围岩相互作用的系统，气、液、固三相耦合问题急待解决。

## 参 考 文 献

- 1 George Orvell. Drilling caverns for underground storage [J]. *Petroleum Engineer*, 1977, (6): 70~76
- 2 关宝树, 钟新樵. 地下空间利用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1989
- 3 陈平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1994, 13(4): 299~308
- 4 陈庆中, 张弥, 冯星梅. 应力场、渗流场和流场耦合系统定边值定初值问题的变分原理[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(6): 550~553
- 5 王媛, 徐志英, 逯宝玉. 复杂裂隙岩体渗流与应力弹塑性全耦合分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2): 177~181
- 6 Oda M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(11): 1845~1856
- 7 Kelsall P C, Case J B, Chabannes C R, et al. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech.*, 1984, 21(3): 123~135

## THEORETICAL AND NUMERICAL SIMULATION STUDY OF UNDERGROUND GAS STORAGE CAVERNS WITH WATER CURTAIN

Yang Mingju, Guan Baoshu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China)

**Abstract** In light of the first underground gas-storage engineering in China, the principles of underground gas-storage caverns with water curtain are presented. Analysis and discussion of the water curtain from theory are carried out by finite element method. Numerical simulation results give a good proof that using water curtain to storage LPG (Liquefied Petroleum Gas) in underground is safe. It will provide quite valuable reference for the design and construction of gas-storage cavern in China.

**Key words** underground engineering, water curtain, gas-storage cavern

### 朱维申研究员主持的 “复杂条件下地下工程开挖支护技术的理论方法和应用研究”成果 荣获国家科技进步二等奖

中国科学院武汉岩土力学研究所朱维申研究员主持的“复杂条件下地下工程开挖支护技术的理论方法和应用研究”成果, 荣获国家科技进步二等奖。该项目积十余年的艰辛研究和工程应用实践, 在科学原理、理论模型、分析方法、设计优化、支护技术、现场试验和监测手段等方面, 都取得了显著的进展, 取得了较为系统完整的具有国内外先进甚至领先水平研究成果, 开辟了岩体力学研究的新方向, 多次获得中国科学院、电力部等重大奖励, 其开拓创新的技术, 已获得国家专利, 发表论文达 60 篇以上, 部分被 SCI, EI 或 ESTP 收录, 出版专著和合著二本, 得到了国内外相同学科专家的认可与好评。该研究成果无论对节理岩体或软弱岩体都建立了创新性的模型和分析方法; 施工过程力学等技术方案也是前人未曾提到过的; 岩桥破裂机理和强度以及加锚后的模型及分析方法, 截止目前在国内外也十分罕见; 锚固效应的大量模型试验和集现场与实验室研究手段及数值分析为一体的综合性研究方法也是十分有特色的。该成果已先后在十余个水利、矿山和有关工程现场得到应用与推广, 已产生直接经济效益超亿元。

(孔繁柏供稿)