

# 人工水幕在不衬砌地下贮气洞室工程中的应用

高翔 谷兆祺

(清华大学水电系 北京 100084)

**摘要** 详尽地介绍了不衬砌地下贮气洞室的发展状况,并对人工水幕的发展、基本原理、设计施工以及运行效果做了较为全面的分析和介绍,为我国地下贮气洞室的设计、施工提供了参考依据。

**关键词** 人工水幕, 贮气洞室, 地下工程

## 1 不衬砌地下贮气洞室的发展状况

我国至今尚没有不衬砌地下贮气洞室的工程经验,因而不衬砌地下贮气洞室在我国还是一片处女地。然而,世界上采用不衬砌洞室贮存有压气体的尝试可追溯到十九世纪末,即1899年,在德国Heibronn的一个矿中进行了压缩空气的贮存<sup>[1]</sup>。自本世纪五十年代起,不衬砌地下贮气洞室在北美、欧洲的某些国家及日本、韩国等国迅速发展,并主要应用在以下三个方面:(1) LPG(液化石油气)贮气洞室;(2) 气垫式调压室;(3) CAES(压缩空气能量贮存)。

LPG不衬砌贮存洞室具有大型贮气罐所无法比拟的优点,如节约土地征用,运行经济、方便、安全,无环境问题等。正因为如此,美国在各种岩石地层中已建造了约70个LPG洞室(主要建于50-70年代)<sup>[2]</sup>。欧洲大陆上第一个贮存LPG的开挖洞室于1966年在法国投入运行,之后约有20个LPG硬岩洞室投入运行,参见表1<sup>[3]</sup>。韩国1985年建成一个LPG硬岩洞室用以贮存 $190,000\text{m}^3$ 的丙烷<sup>[4]</sup>。LPG贮存压力决定于温度及气体种类,但总的来说不超过 $1.0\text{MPa}$ 。

气垫式调压室是不衬砌空气贮存洞室的特殊用法,全球所有10个这样的设施都在挪威,气垫式调压室的目的是为了抑制地下水电站引水系统的水力波动,在布置上较传统的开敞式调压室要优越得多。第一个气垫式调压室于1973年建于挪威Driva电站,10个气垫式调压室中有6个气压在40个大气压以上,最高达78个大气压(Tafjord电站)。见表2<sup>[5]</sup>。

CAES是压缩空气在电力系统中的应用,主要用于“削峰”,目前只有两个CAES在运行中,一个在德国(1979年,29万千瓦),另一个在意大利(1986年,2万5千千瓦);美国、荷兰、以色列、前苏联正计划建造一批CAES。

1994年12月12日收到初稿,1995年7月28日收到修改稿。

除上述三个方面的应用外, 不衬砌 贮气洞室最为引人关注的将是 LNG (L iquified N atural Gas, 液化天然气) 的存贮, 由于天然气的沸点极低, 不易液化, 目前全球尚无贮存 LNG 的开挖洞室。LNG 洞室的开发是地下工程急需攻克的难题。

表 1 欧洲不衬砌 LPG 贮存洞室  
Table 1 Unlined LPG storages in Europe

地 址	国家	投入运行 年份	贮存气体	存贮容量 (千立方米)	岩石类别	有无水幕
Gothenburh	瑞典	1968	丙烷	20.0	片麻岩	否
Lysekil	瑞典	1975	丁烷	10.0	花岗岩	是
OEF	瑞典	1977	丙烷	120.0	花岗岩	是
Surdsval	瑞典	1989	丙烷	59.0	片麻岩	是
Karlsham	瑞典	1989	丙烷	45.0	片麻岩	是
Rafnes	挪威	1977	丙烷	100.0	花岗岩	是
Mongstad	挪威	1989	丁烷	10.0	片麻岩	是
	挪威	1989	混合	10.0	片麻岩	是
	挪威	1989	丙烷	10.0	片麻岩	是
Porvoo	芬兰	1976	丁烷	115.0	片麻岩	是
	芬兰	1988	冷凝气体	100.0	片麻岩	否
	芬兰	1988	丙烷	50.0	片麻岩	否
Petit Couronne	法国	1966	丙烷	50.0	白垩岩	否
	法国	1966	丁烷	12.0	白垩岩	否
Laverra	法国	1972	丙烷	123.0	石灰岩	是
Vexin	法国	1980	丙烷	130.0	白垩岩	否
Donges	法国		丙烷	80.0	片麻岩	是
Lavera	法国	1984	丁烷	133.5	石灰岩	-
	法国	1984	丁烷	45.5	石灰岩	-
Killingholm	英国	1985	丙烷	122.0	白垩岩	否
	英国	1987	丁烷	120.0	白垩岩	否

毫无疑问, 贮气洞室的关键在于控制气体的渗漏。目前, 工程上提高贮气洞室密闭性常用的方法有: 围岩灌浆, 洞室衬砌, 冷冻法; 以及利用天然地下水和人工水幕等。工程实践表明, 目前唯一能够完全控制气体渗漏的方法就是利用人工水幕进行水动力密闭。

表 2 挪威气垫式调压室

Table 2 Air-cushion chambers in Norway

地 名	竣工年份	气压(bar)	调压室体积(M <sup>3</sup> )
Driva	1973	42	6, 600
Jukia	1974	24	6, 200
Oksla	1980	44	18, 100
Sim a	1980	48	10, 500
Kvilldal	1981	41	120, 000
Nye O sa	1981	19	12, 000
Tafjord K5	1981	78	2, 000
Brattset	1982	25	9, 000
U lset	1985	28	4, 800
Toipa	1989	44	14, 000

## 2 人工水幕的气体密闭基本原理

水幕原理是瑞典人 I.Janelid 教授首先提出,并于 1972 年首次在法国 Lavera 丙烷贮气室(120 000m<sup>3</sup>)得到应用,之后,人工水幕已多次在 LPG 洞室(见表 2)和挪威的气垫式调压室中得到成功应用。

所谓水幕就是,在贮气洞室上方设置一充水隧洞(或廊道)并由此辐射一系列充满压力水的钻孔,从而形成一覆盖整个贮气洞室的伞状水幕。如图 1 所示。

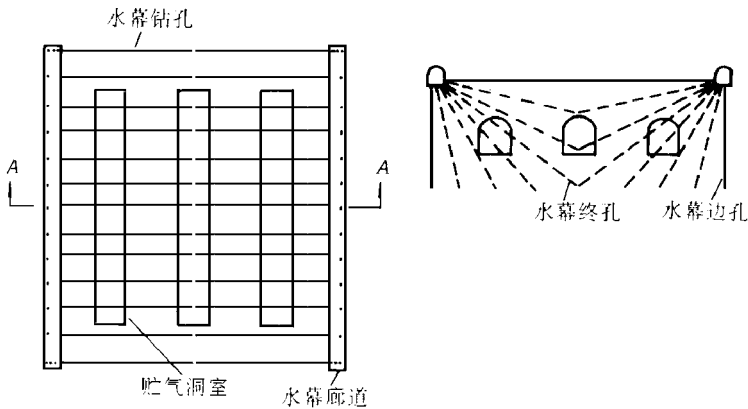


图 1 人工水幕布置示意图

Fig 1 Diagram of a storage with water curtain

人工水幕之所以能密闭贮气洞室,是因为人工水幕可使贮气洞室围岩缝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,就可阻止气体进入岩石缝隙或阻止已进入缝隙的气泡向外运动。在寻找这一临界水力坡降值方面,国外许多学者都做了大

量的实验和理论研究, 其中做出突出贡献的有瑞典人 B. Aberg 和挪威人 D. C. Goodall。然而, 目前尚未有一致认可的临界水力坡降值  $I_0$ 。表达式, 唯一可接受的准则就是  $I_0 > 1$  或  $I > 1 - \rho_k / \rho_w$  ( $\rho_k$ 、 $\rho_w$  分别为气体和水的密度), 同时, 专家们一致认为这一准则相对来说比较保守, 图 2 给出了该准则的简单推导过程。

根据伯诺里 (Bernouli) 方程, 则:

$$\Delta Z = (P_2 - P_1) / (\rho_w g) + h_f \quad (1)$$

因为

$$\Delta Z = L \sin \alpha, \quad h_f = IL$$

现在, 方程 (1) 可写成:

$$\sin \alpha = (P_2 - P_1) / (\rho_w g) L + I \quad (2)$$

根据气体密闭的基本准则, 有  $P_1 = P_2$ , 因此该准则又可表示成:

$$I \sin \alpha \quad (3)$$

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

- $I_0$   $I$
- $\rho_w$  水的密度 ( $kg/m^3$ );
- $h_f$ : 沿长度  $L$  的水头损失 ( $cm$ );
- $I$ : 沿缝隙面的水力坡降;
- $g$ : 重力加速度 ( $m/s^2$ )

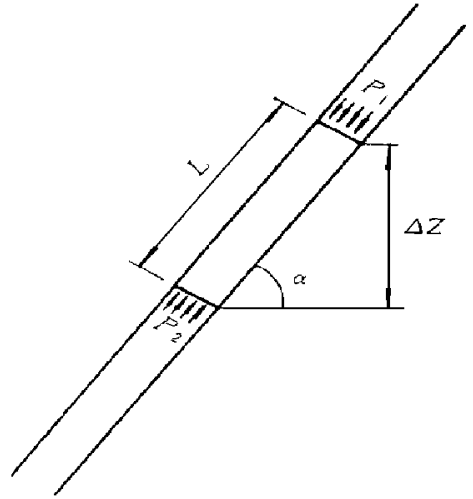


图 2 用水力坡降表示的气体密闭基本准则  
Fig. 2 The fundamental tightness criterion in terms of a gradient criterion

尽管这一判别标准非常简单, 但是由于岩石缝隙的天然不规则, 使得其实际应用有很大困难。因此, 工程上水幕的设计应该结合理论计算、现场实验和实践经验, 然后进行经济技术优化。

### 3 人工水幕的设计

#### 3.1 设计内容及考因素

人工水幕由一族包围贮气洞室的钻孔组成, 这些钻孔至少能覆盖整个洞冠甚至整个洞室。钻孔内水压应较之贮气压力要大以确保形成指向洞室的水力坡降且足以满足密闭要求。

水幕设计的主要内容: 钻间间距; 钻孔与贮气洞室间距; 水幕覆盖范围; 水幕超压 (即与贮气压力之差)。

水幕设计的控制因素主要有: 贮气压力与地下水压之比以及与围岩厚度之比; 洞室几何形状; 密闭程度要求。另外还要其它一些因素, 如: 水幕钻孔作业的通道; 水幕上限压力 (即不能引起水力抬起); 洞室围岩应力状况; 施工及运行的经济优化; 最大钻孔长度; 可能的钻孔偏差。

水幕设计不能教条, 必须将理论计算与工程经验相结合, 同时考虑现场水力试验。因为人工水幕与现场具体情况极为相关, 必须具体情况具体分析, 因此设计者的创造性和直

觉也会影响到水幕的设计。

### 3.2 水幕的超压计算

所谓水幕超压  $\Delta P_{WC}$  就是水幕水压  $P_{WC}$  洞室贮气压力  $P_q$  之差, 即,  $\Delta P_{WC} = P_{WC} - P_q$  这里的  $P_{WC}$  是指贮气室上方的水幕压力 (此处水幕压力最)。

水幕的设计超压  $P_{WC}$  是一个有关贮气洞室和水幕的几何形状以及贮气压力的函数。同时, 对于任一水幕及贮气洞室, 有如下关系:

$$\Delta P_{WC} = \Delta P_{silt} + \Delta P_{\Delta L} + \Delta P_{exp} \tag{4}$$

式中,  $\Delta P_{silt}$ : 当围岩均质且各向同性时, 并假设水幕钻孔间距为零时, 为确保形成连续的水幕槽且保证洞完全闭所必须的水幕超压;

$\Delta P_{\Delta L}$ : 当连续的水幕槽由实际间距为  $\Delta L$  的水幕孔替代时所必须增加的水幕超压;

$\Delta P_{exp}$ : 水幕超压的修正值。

因为实际岩石的不均匀性和各向异性, 以及水幕密闭准则中存在的各种保守因素等, 所以水幕超压还要做一定调整, 一般  $\Delta P_{exp}$  水幕超压的修正值。

$\Delta P_{exp}$  和  $\Delta P_{\Delta L}$  两部分则可利用孔隙介质中稳定流场计作的标准程序而轻易求得, 图 3 及图 4 是 5 个典型水幕布置及其水幕超压计算。

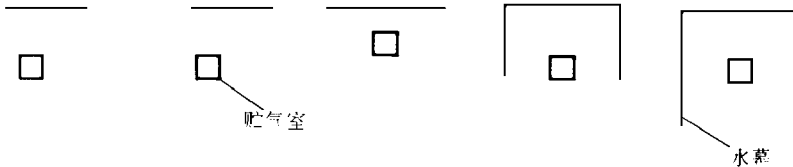


图 3 水幕超压计算模型<sup>[3]</sup>

Fig. 3 Storage & water curtain geometries considered in the investigation of parameter  $\Delta P_{silt}$

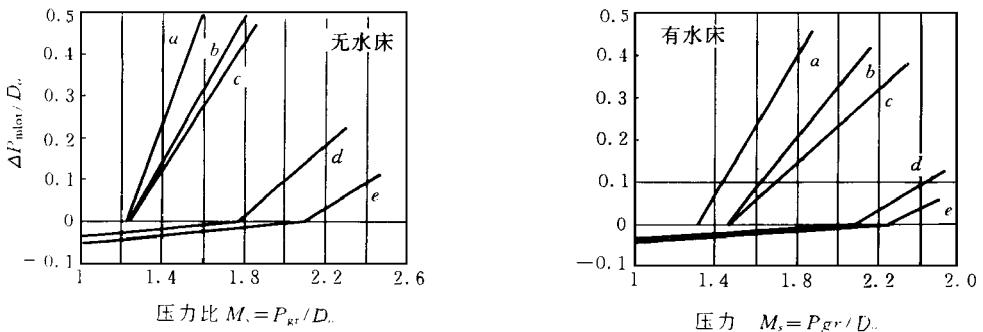


图 4  $\Delta P_{exp}$  压力比  $M_s = P_{gr}/D_0$  关系图<sup>[3]</sup>

Fig. 4  $\Delta P_{silt}$  as a function of pressure ratio and water curtain geometry

图 4 表明:  $\Delta P_{silt}$  随着压力比  $M_s$  增加而增加; 水幕包围洞室越多, 则所需超压

$\Delta P_{sibt}$  越低, 然而一旦  $\Delta P_{sibt} = 0$  后, 水幕的继续延伸就没有多大意义了;  $\Delta P_{sibt}$  随着洞室中水床高度的增大而减小。

图 3 年示模型为二维问题, 对于三维问题 (即洞室有限长), 只要水幕象二维问题中一样覆盖整个洞室, 其所需  $\Delta P_{sibt}$  值较之对应的二维问题要小些, 但差别不大, 因此对于实际洞室进行二维计算就足够了, 且偏于安全。

在水幕设计中, 一般使  $\Delta P_{sibt} = 0$ , 并在此基础上计算  $\Delta P_{\Delta L}$ 。图 5 和图 6 给出了  $\Delta P_{\Delta L}$  一个算例的模型及计算结果。

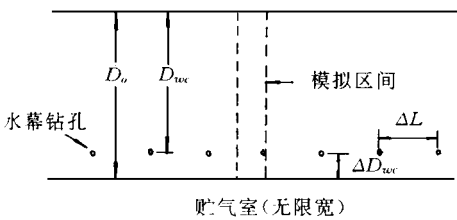


图 5  $\Delta P_{\Delta L}$  的计算模型<sup>[3]</sup>

Fig t Model used for computing  $\Delta P_{\Delta L}$ .

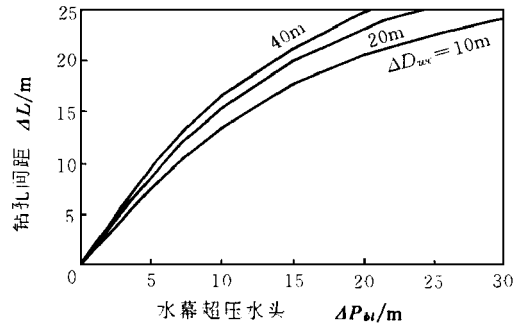


图 6  $\Delta P_{\Delta L} - \Delta L$  关系图<sup>[3]</sup>

Fig 6  $\Delta P_{\Delta L}$  as a function of borehole spacing  $\Delta L$ , and distance between water curtain and storage roof  $\Delta D_{wc}$  ( $\Delta P_{sibt} = 0, M_s = 2, 0$ )

### 3.3 水幕设计准则

在水幕实际设计中, 对于完全密闭可以遵从下面一些准则。

(1) 水幕的覆盖范围: 所设计的水幕覆盖范围应使  $\Delta P_{sibt} = 0$ , 以  $\Delta P_{sibt} = 0$  的水幕覆盖范围为基准范围, 由于水幕末端的水力下降将不所增加, 为补偿这一点, 幕孔还应在基准范围基础上有所延伸, 一般认为, 延长距离等于钻也间距一兰是合理的。

(2) 水幕超压: 如前所示, 水幕超压  $\Delta P_{wc} = \Delta P_{sibt} + \Delta P_{\Delta L} + \Delta P_{exp}$ , 一般取  $\Delta P_{sibt} = 0, \Delta P_{exp} = 0$ , 由  $\Delta P_{wc} = \Delta P_{\Delta L}$  而  $\Delta P_{\Delta L}$  可按上节所述方法计算而得。实际选取  $\Delta P_{wc}$  时还应有一定完全余度, 一般要比计算所得  $\Delta P_{\Delta L}$  大 0.2~ 0.5 MPa (2~ 5) 个大气压)。

(3) 最大水幕压力: 最大水幕压力必须以岩石的水力劈裂压力为上限, 岩石的水力劈裂压力可由多种途径求得, 如: 数值计算, 经验准则, 应力测量和水力试验等。

(4) 钻孔间距  $\Delta L$ : 建议采用布的水幕钻孔, 因为: 第一, 气全最大贮存压力等于水幕最大允许压力减去水幕超压  $\Delta P_{wc}$ , 而  $\Delta P_{wc}$  决定于  $\Delta P_{\Delta L}$ , 即决定于钻孔间距  $\Delta L$ , 因此减少钻孔间距可提高洞室最大贮气压力, 换句话说, 当贮气压力一定时可降低洞室埋深, 节约投资。第二,  $\Delta L$  越小,  $\Delta P_{wc}$  越小, 则水幕与贮气洞室间的水力坡降也越小, 因此水幕中耗水是也越小, 从而减小, 从而减少了水的泵送以及对渗入洞室的水的处理。第三, 密集的钻孔布置可以减小钻也间气体渗漏路径存在的可能性, 从而提高了安全运行的概率。

然而,  $\Delta L$  也不能无限度的小, 至少应该大于或等于钻孔的平均偏差值。水幕钻孔完成后, 应进行压水试验检查相邻钻孔间的水力接触性, 对于钻孔间水力接触性差的, 要补加钻

(5) 钻孔方向: 一般来说, 应使来说, 应能与渗透性最强的裂隙组相交成一定角度, 以便获得钻孔与渗透裂隙或渗透区形成最佳水力接触。而实践发现, 钻孔方向对水幕的埋头苦干不关键, 在挪威 *Kvilldal* 和 *Topa* 两个气垫式调压室水幕中, 水幕的孔向有许多组, 运行效果仍然很好。

(6) 贮气洞室与水幕的间距  $\Delta D_{wc}$ :  $\Delta D_{wc}$  应尽可能的小, 以确保水幕能作用到所有可能渗漏路径上, 但  $\Delta D_{wc}$  又不能太小, 过小的  $\Delta D_{wc}$  可能导致水幕与洞室的水力短路, 当然  $\Delta D_{wc}$  也不能过大, 因为较在的  $\Delta D_{wc}$  会降低洞室的贮气压力或迫使贮气洞室增加埋深。影响  $\Delta D_{wc}$  最小值的因素有: 洞室开挖引起的“张开”袭缝的长度, 岩错长度以及钻孔的可能偏差。

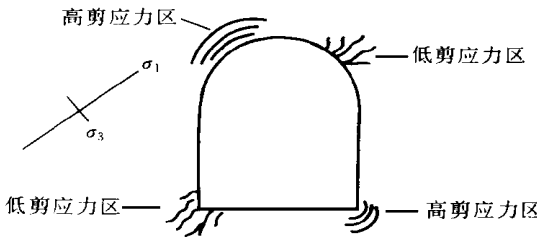


图 7 开挖洞室剪应力区分布<sup>[3]</sup>

Fig. 7 Areas of high and low tangential stress at the periphery of an excavated cavern

我们知道, 洞室开挖后, 将形成高切向应力区和低切向应力区并分别平行于最大主应力和最小主应力, 如图 7。高切向应力区可能导致岩爆或影响围岩稳定, 需要用锚杆支护, *Myrvang* (1988) 认为 2m 长的锚杆就足够了; 在低切向应力区, 可能导致剪切位移或形成张开裂缝, 水幕应布置在锚杆区以及张开裂缝区外。

挪威专家 *Halvor Kjøholt* 建议用公式

(5) 确定  $\Delta D_{wc}$  的最值

$$\Delta D_{wc} = \Delta D_{inf} + \Delta D_{dev} + \Delta D_{dust} \quad (5)$$

式中:  $\Delta D_{inf}$ : 洞室开挖引起围岩渗透性增大的最大范围, 一般取开挖洞径的一半;

$\Delta D_{dist}$ : 预计的钻孔平均偏差值;

$\Delta D_{dist}$ : 安全余度, 等于钻也间距的一半。

一般来说,  $\Delta D_{wc}$  可取 10 (小洞室) ~ 30m (大洞室)。对于冷冻存贮, 水幕还应避开冰冻区。

#### 4 水幕在挪威气垫式调压室中的成功应用

挪威的 3 个气垫式调压室 *Kvilldal*, *Topa* 和 *Tafjord* 都设置了人工水幕, 其中 *Kvilldal* 和 *Tafjord* 是由于调压室在运行中漏气量过高 (分别为  $240\text{Nm}^3/\text{h}$  和  $150\text{Nm}^3/\text{h}$ ) 且灌浆处理失效而被迫采用人工水幕; 而 *Topa* 电站则是一开始就设置了水幕, 参见图 8~ 10。

表 3 给出了三个调压室及其水幕的重要参数; 表 4 则列出了有关水幕钻孔的数据。从表 3 可知, 以有水幕时气体渗漏量都很大, 而设置了水幕后, 只在达到设计压力, 水幕运行效果很好, 可以完全控制气体的渗漏, 表明水幕对高压贮气 (贮气压力高于 400m 水头) 可以起到完全密闭的作用。另外, 从表 4 可看出, 三个水幕的钻孔在孔径、钻孔长度和偏

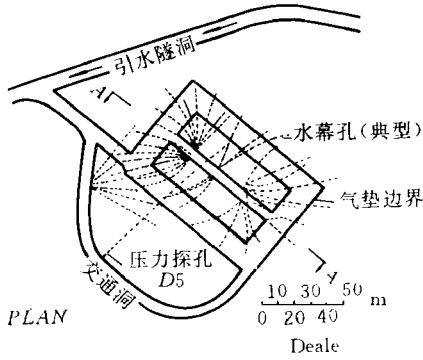


图 8 Kvilldal 气垫式调压室及水幕平面图  
Fig. 8 Kvilldal air cushion surge chamber with water curtain

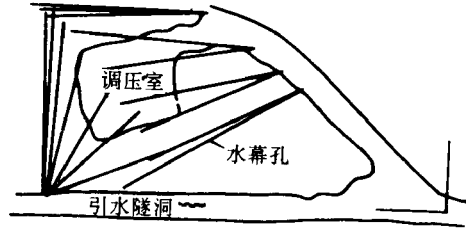


图 9 Tafjord 气垫式调压室及水幕平面图  
Fig. 9 Tafjord air cushion surge chamber with water curtain

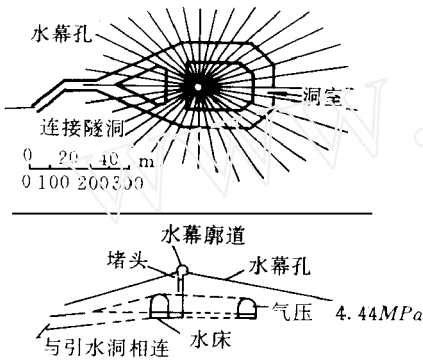


图 10 Topa 气垫式调压室及水幕平面图  
Fig. 10 Topa air cushion surge chamber with water curtain

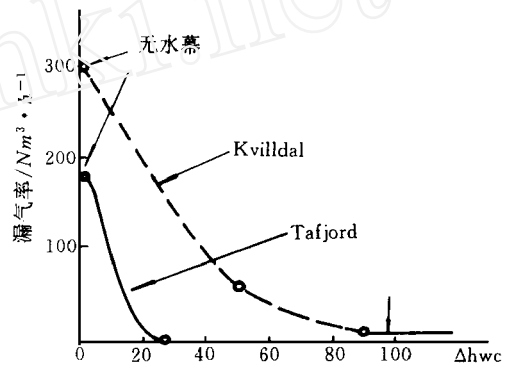


图 11 空气泄漏量与水幕超压的关系  
Fig. 11 Air loss as a function of  $\Delta h_{wc}$

表 3 挪威气垫式调压室水幕实践

Table 3 Experiences of water curtains in Norway Air-cushion chambers

地 址	贮气 压力 MPa	气体渗漏 (无水幕) $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	气体渗漏 设计压力下的 水幕 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	水幕超压 (米水头)		
				设计值	开始渗漏值	
					理论值	实测值
Kvilldal	4.1	240	0	90	-	< 90
Topa	4.4	> 500	0	40	40	< 20
Tafjord (上游水库)	7.7	150	0	25	25	25



表 4 水幕钻孔数据<sup>[3]</sup>

Table 4 Drills of water curtain

地 址	孔径/mm	钻孔长度/m	平均偏差/m	最大偏差/m
Kvilldal	50	43~ 69	13.5	38.0
Tafjord	56	30~ 42	0.85	1.9
Torpa	64	45~ 70	2.3	9.0

差上都相差很大,但运行效果都不错,表明孔径和方向对水幕的影响很大。水幕超压与气体渗漏量直接相关,从图 11 可看出当水幕超压小于某一临界时,气体渗漏明显增大,因此水幕超压必须大于其临界超压。概据文献 [5] 和 [6], Torpa 和 Kvilldal 电站的水幕造价分别为一百万和二百万 NOK (1 NOK = 1 元人民币),比用灌浆降低围岩渗透系数的方不仅经济而且效果要好得多。因此水幕在挪威气垫式调压室的成功运且为将来发展 LNG 贮气洞室提供了宝贵的经验。

## 5 加强水幕研究促进我国地下贮气工程的发展

我国水力资源及石油天然气贮量极为丰富,发展能源是我国经济发展的关键。我国水力富矿主要在西南山区,地形地质条件非常适合修建地下厂房,抽水蓄能电站也需要建设地下厂房,气垫式调压室对优化地下厂房引水系统布置有明显的优点,因而我国也必将会建设一批气垫调压室。随着我国社会经济的发展,石油天然气的需求量将越来越大,其安全贮存是必须解决的课题。地下贮存 LPG 和 LNG 能够避免对环境的不良影响,运行方便而且安全经济,同时可节省地面空间。因此,地下贮存 LPG 和 LNG 是石油天然气贮存的必然趋势。

尽管我国许多工程有着很合适的地形地质条件,由于种种原因,地下贮气洞室在我国仍是空白。归结起来有以下几点:

(1) 我国工程界对地下贮气洞室缺乏足够的了解和认识,误认为国外之所以能成功地彩地下贮气洞室,是因为其地质条件优于我国。其实不然,我国很多工程的地质条件完全可以与国外媲美;

(2) 对水幕的安全经济运行表示怀疑,一则担心水幕不能完全控制气体的渗漏路径,二则担心水幕的用量过大。其实国外实际工程表明这些担心是不必要的,挪威三个人工水幕工程的实测结果证明水幕能够完全密闭贮气洞室(漏气量均为零);另外,水幕的用水量很少,在 Kvilldal 水幕的耗水量为 0.8~ 11/s,相对于一个一百万方的洞室这点进水量是微不足道的。

此外,由于国内在贮气洞室密闭性的研究方面还很落后(国外这方面的研究也不成熟),工程单位心中没底,所以,本文作者建议加强这方面的理论研究,有关水幕的理论研究主要集中在以下方面:气泡在压力水流中的运动规律;气液两相流与围岩应力的耦合问题;水幕作用与贮气洞室几何形状,贮气压力和围岩厚度的在关系等。

理论必须走在实践的前面, 进行水幕的理论研究对发展我国地下贮气工程是有积极意义的。

### 参 考 文 献

- 1 Aufricht W R, Howard K C. Salt characteristics as the affect storage of hydrocarbons. *Journal of Petroleum Tech*, 1961, 733~ 738
- 2 Foh S, NovilM, Rockar E and Randolph P. *U n d e r g r o u n d h y d r o g e n s t o r a g e*. Inst of Gas Technology, Chicago: 1980, 145~ 151
- 3 Kjholt H. Gas tightness of unlined hard rock caverns. *N t H T r y k k*, 1991
- 4 Lindblom U E. The development of hydrocarbon storage in hard rock caverns. In: *I n t C o n f e r e n c e o n S t o r g e o f G a s e s i n R o c k C a v e r n s*, T r o n d h e i m , N o r w a y : 1989, 15~ 30
- 5 Goodall D C, Kjholt H, Dahb T S & Broch E. Experience from the Norwegian air cushions, In: *I n t C o n f e r e n c e o n S t o r a g e o f G a s e s i n R o o k C a v e r n s*, N o r w a y : T r o n d h e i m , 1989, 337~ 347
- 6 S N T E F (1990- 10- 17). *A i r a n d G a s T i g h t n e s s o f U n l i n e d R o c k C a v e r n s / T o r p a A i r C u s h i o n S u r g e C h a m b e r*. Norway: T r o n d h e i m

## THE APPLICATION OF ARTIFICIAL WATER CURTAIN TO UNLINED GAS STORAGE CAVERNS

Gao Xiang Gu Zhaoqi

(*Hydraulic Eng. Dept. of Tsinghua Univ., Beijing 100084*)

**Abstract** This paper gives a detailed presentation of the history and current situation of unlined gas-storage caverns, and also gives a fairly thorough analysis and discussion on the development, main principles, design and construction rules, and some experiences of artificial water curtains. This paper will provide quite valued reference for the design and construction of future gas-storage caverns in China.

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