

# 地下裸岩水封式储气库修建工法

(TGJGF-03·04-42)

中铁隧道集团有限公司

## 一、前言

地下裸岩水封式储气库是依靠对岩层钻孔注浆和对洞壁的喷锚支护,将洞库周围岩层加固和封闭,使储存的气体不能逃逸,地下水不能渗入库内。工程完工后库内储存气体,相通的水幕洞内由水占据,并通过水幕孔与外面的水系相沟通,库内储存气体的压力通过水的作用自动调节。气体的存取通过竖井进行。

1997年,我国利用“水密封原理”在汕头首次修建LPG地下储气洞库,中铁隧道集团(原隧道工程局)承担了地下储气洞库的土建工程。该工程主要包括交通洞、水幕洞、主储气洞和竖井等单位工程。主储气洞包括储存丁烷和丙烷的两个主洞室群,储存石油液化气共20.6万 $\text{m}^3$ 。本工法即根据汕头LPG工程修建过程中的施工工艺及科研项目《大型地下水封式液化石油气储存洞库修建技术》进行总结而成。

## 二、工法特点

1. 紧密结合科研,通过科研进一步完善钢纤维湿喷混凝土及锚喷加固施工技术,从而确定相应的施工技术参数和减小围岩爆破振动的方法,合理运用注浆技术来加固节理裂隙带和软弱夹层,保证洞库正常开挖和洞室的气密性,达到防止液化石油气渗漏的设计运营标准。

2. 开挖支护、洞室稳定性控制和光面爆破工艺具有特殊性,必须运用三维力学分析调整大型地下洞室施工技术参数,采用斜眼掏槽技术来提高施工进度,确保大断面洞库群的开挖施工安全。

3. 地下储库的水密性和气密性是通过严密的措施实现的,裸岩储存LPG是利用地下库区顶部一定厚度的含水层来达到气密要求的。必须运用三维渗流场计算分析、验证洞室的气密性,确立和完善人工水幕系统的布置,通过严密的施工方案和措施来保持和控制储存液化气的地下水位和地下水力梯度。

4. 施工管理科学严格,由于工程结构和使用功能特殊,施工技术标准高、难度大,故需对施工管理严格要求,专门制定施工作业程序、工艺要求、检查标准和相对应的工作协调程序,制定操作性极强的安全计划、消防计划和环保计划,使施工管理科学严格,施工作业规范化、程序化,百分之百地达到设计标准。

## 三、适用范围

大型地下裸岩水封式液化石油气储存洞库及其它大型地下裸岩洞室等工程施工。

## 四、工法原理及关键技术

### (一)工法原理

先用矿山法施工交通洞、水幕洞和竖井。水幕孔试验成功之后进行超前探孔和注浆作业。待储气洞库断面中下部及周围岩层充分填充固结后,储气洞库采用三步正台阶法进行开挖支护和补充注浆。最后进行渗流场控制的水幕施工和混凝土封塞,使建成的工程达到储气不泄漏,存取方便,洞库压力能自动调节的设计标准。

### (二)关键技术

1. 地下储库的修建程序与施工工艺。
2. LPG地下储库修建中注浆技术的操作类型及控制指标。
3. LPG地下储库修建中钻孔技术的操作类型、施工方法与工艺。

## 五、施工工艺

### (一)工艺流程(见图1)

## (二) 施工方法

### 1. 储气洞库爆破与控制

大断面采用分三台阶爆破法施工,非电毫秒雷管爆破。

#### (1) 光面爆破参数

①周边眼间距  $E = 40 \sim 50\text{cm}$ ,最小抵抗线  $W = 50 \sim 60\text{cm}$ 。

②炮眼深度 上台阶 3.5m,中下台阶 4.2m。

#### (2) 炮眼布置

①掏槽眼 斜眼掏槽法,连续装药。

②周边眼 沿开挖轮廓线布置,采用  $\phi 25$  小药卷连续装药方式。

③二圈眼 孔间距稍大于周边抵抗线,采用  $\phi 42$  普通药卷。

④底板眼 空气柱间隔装药。

(3)炸药类型 AE 型乳化炸药,周边孔采用  $\phi 25$  小药卷,其它孔采用  $\phi 42$  普通药卷。

(4)一次装药量 一次装药量按下式计算:

$$Q = KSL$$

式中  $K$ ——软弱围岩爆破炸药单耗( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$S$ ——开挖断面积( $\text{m}^2$ );

$L$ ——炮眼深度(m)。

### 2. 裸岩支护技术

汕头 LPG 集散工程通过地下水头、人工水幕压力和水力梯度阻止液化石油气体逃逸,其支护系统采用了特殊要求的喷锚支护设计施工原则。

#### (1) 参数设计

采用国际上常用的挪威 NGI 围岩分类法,利用描述围岩的 6 个参数,对围岩质量进行量化计算,即围岩质量“ $Q$  复合指标法”。 $Q$  值为:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

式中  $Q$ ——围岩质量指标;

$RQD$ ——岩体质量标量,以%表示,它与取芯率、强度有关;

$J_n$ ——节理组数,与岩体的结构有关;

$J_r$ ——节理面粗糙程度,与结构面强度有关;

$J_a$ ——节理蚀变程度,与岩体弱面风化、软化、变形有关;

$J_w$ ——节理水折减系数,与节理夹层的充填物饱和水、弱面强度及摩擦系数有关;

$SRF$ ——应力折减系数,与岩体的应力、塑化、膨胀、松散、挤压状态有关。

由此得出不同围岩质量指标  $Q$  值所对应的喷锚组合支护设计参数,详见表 1。

#### (2) 锚杆安装

a. 孔位 为避免因个别锚杆遗漏(失效)降低群锚效应或导致“负荷压力带”失效,将系统锚杆排列成梅花状,钻孔前,用油漆点画出来。

b. 孔向 系统锚杆要兼顾节理状态、尽量垂直于洞室轮廓线,起到整体加固作用。局部锚杆布置要有利于锚杆受拉,腰部及边墙锚杆要能对岩块起到最大的抗滑作用。

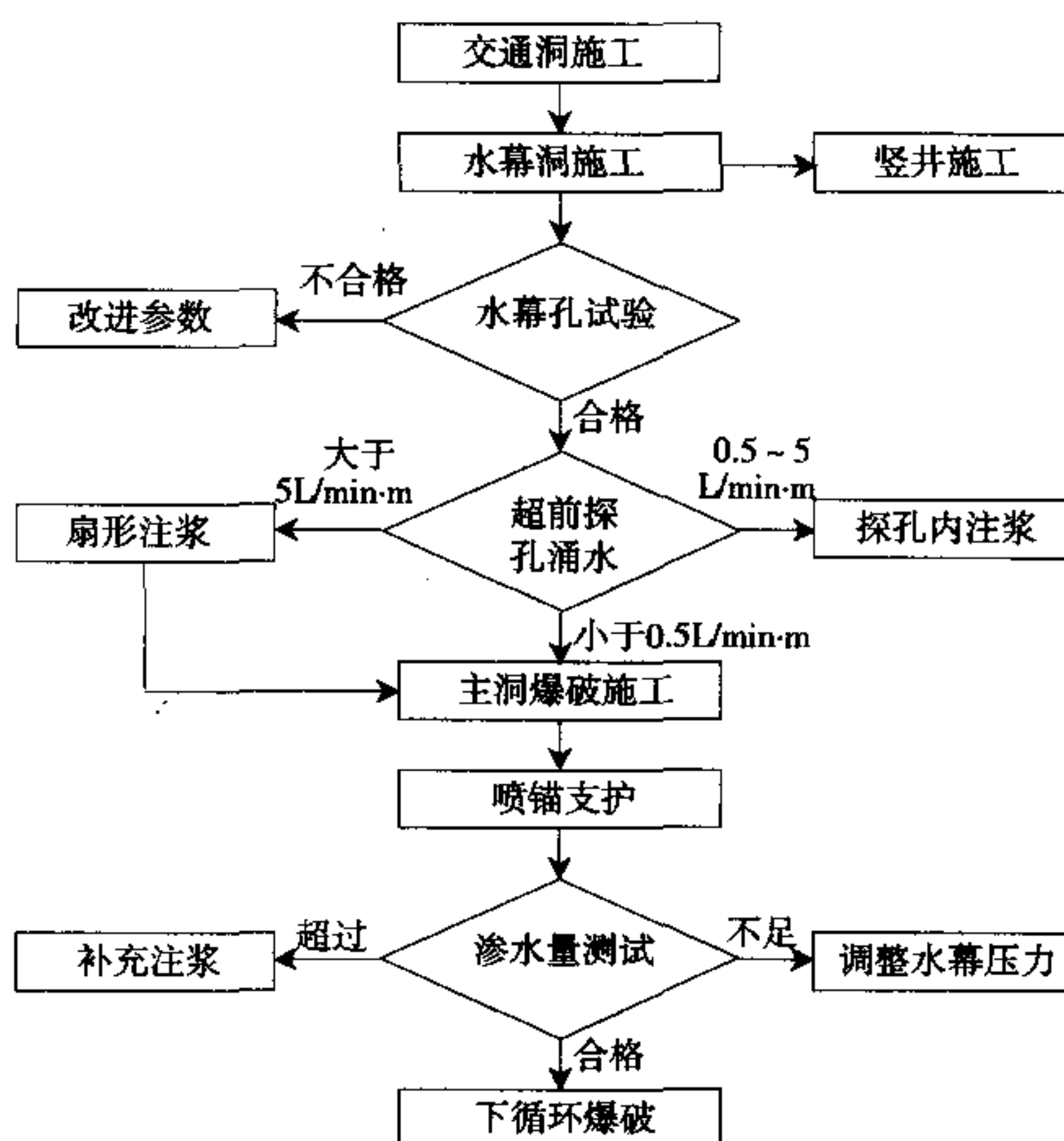


图1 LPG 工程施工工艺流程



表1 不同围岩质量指标  $Q$  值对应的喷锚组合支护设计参数

类型	I	II	III	IV
$Q$	$Q > 40$	$10 < Q < 40$	$4 < Q < 10$	$Q < 4$
拱顶	局部锚杆 $L=4.0\text{m}$ 系统锚杆 $L=4.0\text{m}$ 间隔 $2.5\text{m}$ 素喷混凝土 $7\text{cm}$	局部锚杆 $L=4.0\text{m}$ 系统锚杆 $L=4.0\text{m}$ 间隔 $2.5\text{m}$ 素喷混凝土 $7\text{cm}$	局部锚杆 $L=4\text{m}/5\text{m}$ 系统锚杆 $L=4.0\text{m}$ 间隔 $2.0\text{m}$ 素喷混凝土 $7\text{cm}$	局部锚杆 $L=4.0\text{m}/5.0\text{m}$ 系统锚杆 $L=5.0\text{m}$ 间隔 $2.0\text{m}$ 钢纤维湿喷混凝土 $7\text{cm}$
边墙	局部锚杆 $L=4.0\text{m}$	局部锚杆 $L=4.0\text{m}$	系统锚杆 $L=4.0\text{m}$ 间隔 $2.5\text{m}$	系统锚杆 $L=4\text{m}$ , 间隔 $2\text{m}$ 钢纤维湿喷混凝土 $7\text{cm}$

c. 孔深 全部锚杆孔深必须达到设计值。

d. 注浆 锚杆砂浆  $W/C$  在  $0.27 \sim 0.37$  间。在注浆过程中, 砂浆不应产生沉淀, 要随拌随用, 一次拌合量要在初凝前用完。注浆要确保孔内浆体饱满。

e. 保护 安好的锚杆不得任意敲击。28h 后, 用自锁扭力扳手拧紧锚杆螺母, 施加的扭矩为  $190 \sim 240\text{N} \cdot \text{m}$ 。锚杆端头部分一律用砂浆覆盖。

### (3) 喷混凝土原材料选择

粗骨料: 要求坚硬、结实、耐用, 最大粒径不超过  $16\text{mm}$  并小于喷头口径  $1/3$ 。

细骨料: 尽量使用干净、不含淤泥的河砂, 并存放在简易棚内。

混合骨料级配: 符合《喷射混凝土规范》(美国混凝土协会 506) 所推荐的级配 III。

水泥: 符合 ASTM150(类型 I)、ASTM94-94、ASTM150-94 的要求, 本工程选用普通 52.5R 水泥。

钢纤维: 抗拉强度不小于  $370\text{MPa}$ , 使用前不能有明显的锈迹。

速凝剂: 选用 TCC766 液体活化速凝剂, 由湿喷机自动掺入, 剂量为  $5\%$  水泥用量, 以增加湿喷钢纤维混凝土的一次喷层厚度和粘结力, 减小回弹, 改善钢纤维定向。

稠度剂: 掺量为  $1.2\%$  水泥用量, 以增加混凝土的坍落度、可泵性、改善和易性。

微硅粉: 比表面积达  $20000\text{m}^2/\text{kg}$  以上, 掺量在  $5\% \sim 12\% \text{CW}$ 。埃肯微硅粉主要性能是提高混凝土强度、抗渗性和耐久性, 降低喷射混凝土回弹。

### (4) 喷混凝土配合比设计

按照汕头 LPG 工程施工《技术规范》的要求, 喷混凝土(掺速凝剂)8h 强度不小于  $5\text{MPa}$ , 28d 强度不小于  $21\text{MPa}$ , 掺钢纤维时钢纤维 28d 抗拉强度大于  $4.5\text{MPa}$ ; 具有良好的和易性, 坍落度要求为  $12 \sim 20\text{cm}$ 。

通过现场材料试验, 选定喷混凝土的水灰比  $= 0.43$  (硅粉重量计入水泥重量), 水泥: 砂: 石  $= 1: 1.95: 1.47$ , 每  $\text{m}^3$  喷混凝土各种材料的掺量见表 2。

表2 每  $\text{m}^3$  钢纤维喷射混凝土各种材料的掺量

名称	水泥	硅粉	水	SG 剂	TCC766	砂	石	钢纤维
重量/kg	450	30	206	6	24	937	637	40

### (5) 喷射机械

采用 MBT 公司生产的 Meyco Spraying Mobile 湿喷机。

### (6) 喷射方法

由技术熟练的操作员施喷, 喷头与受喷面的距离为  $1 \sim 1.5\text{m}$ , 角度基本垂直于岩面, 控制在  $75^\circ \sim 90^\circ$  之间, 喷射压力为  $0.3 \sim 0.4\text{MPa}$ 。喷射时, 喷头做顺时针方向旋转, 喷射顺序由下而上至拱顶。为保证两次喷混凝土之间的接合, 接缝处应做成斜面。搅拌好的喷混凝土料应在  $1\text{h}$  内施喷, 回弹料不得重新使用。一次喷层厚度不宜太大, 一般为  $3 \sim 5\text{cm}$ 。汕头 LPG 储库工程中, 设计厚度为  $7\text{cm}$  的分两次施喷, 设计厚度为  $14\text{cm}$  的分三次施喷, 最小厚度大于设计值的  $80\%$ , 平均厚度大于设计值。

### (7) 质量控制指标

喷锚质量控制体系是 LPG 施工管理的重要组成部分, 表 3 为本工程《技术规范》、《施工方法》中喷锚质量控制指标。

表3 质量控制指标

	项目	频率	要求
锚杆	锚杆 扭矩	施工前业主批示 每 20 根	材料由业主批准 $W = 190 \sim 240 \text{ N} \cdot \text{m}$
喷浆	拉拔试验 喷浆厚度 取芯试验	每 200 根 每 $200 \text{ m}^3$ 业主指示	$F_{\text{拉力}} \geq 150 \text{ kN}$ $W_{\text{min}} \geq 80\% W_{\text{设计}}; W_{\text{平均}} \geq W_{\text{设计}}$ 送检(强度,厚度)
加钢纤维喷混凝土	抗压强度 配比计量 钢纤维	施工前业主批示或每 $50 \text{ m}^3$ 300h 施工前业主批示	$R_{\text{平均}} \geq R_{\text{设计}}$ $R_{28\text{d}} \geq 21 \text{ MPa}; R_{9\text{d}} \geq 5 \text{ MPa}$ 材料由业主批准
水泥	凝固时间 密度 抗压强度	制造后 3 个月	材料由业主批准且送检实验结果

锚喷质量的检验结果表明,锚杆抗拉拔力满足规范要求,钢纤维喷混凝土的抗压强度一般都在 30 ~ 40MPa 之间。

### 3. 控制注浆技术

#### (1) 注浆目的

注浆的目的是控制渗漏,孔隙填充,增加岩面接触及岩石的固结,以保障洞室开挖所需的正常工作条件,保证洞室的强度和密封性。

#### (2) 注浆方式

主要注浆操作类型有五类:

①渗漏控制注浆 通过渗漏控制注浆达到地下水的渗漏量在很低限度。大多数渗漏控制注浆在洞区的工作面进行。

②孔隙填充注浆 为保证气密与液密性,减少气体渗漏的通道,在岩石与混凝土衬砌之间,或处理主节理和断层时,必须进行孔隙填充注浆。

③接触注浆 对岩石与竖井混凝土封塞、连接洞衬砌和其他地方衬砌的接触面进行注浆,在高含水带,密封钢拱架的拱背必要时也进行接触注浆,目的是确保洞库的高密闭和结构的高强度。

④固结注浆 为保证开挖所需的正常工作条件,需对开挖附近有疑问的围岩进行固结注浆。

⑤补充注浆 为进一步减少开孔对水文地质流态模式的影响,对开挖的洞室残余渗漏部位进行补充注浆。

#### (3) 控制标准(见表4)

表4 注浆控制标准

注浆操作类型	注浆类型判定标准	注浆压力控制标准	注浆浆液及配合比控制标准	注浆结束控制标准
填充注浆	岩石的孔隙、节理、断层及支护背后的孔隙均需注浆充填	0.5 ~ 1.0 MPa	单液水泥浆 $W/C = 1 \sim 1.5:1$	达到注浆压力且回浆
接触注浆	全部衬砌和混凝土封塞之后与岩石之间进行接触注浆,以保证密合,固结围岩,控制渗漏	衬砌后注浆压力 0.5 MPa 混凝土封塞最大注浆压力 2.0 MPa	单液水泥浆 $W/C = 1 \sim 1.5:1$	达到注浆压力
固结注浆	对围岩力学物性有疑问,如小断层、软弱夹层等区域不能确定保证正常开挖时,需固结注浆	1.0 ~ 2.0 MPa	单液水泥浆 $W/C = 1.5 \sim 0.75:1$ 水泥—水玻璃浆 $W/C = 1.5 \sim 1:1$ $C/S = 1 \sim 0.6:1$	达到注浆压力
补充注浆	对开挖后洞室部分区域的渗漏水进行残余注浆堵漏	1.0 ~ 1.5 MPa	水泥—水玻璃浆 $W/C = 0.5 \sim 1:1$ $C/S = 0.6 \sim 1:1$	达到注浆压力

#### (4) 注浆参数设计

①注浆范围 根据设计及围岩状况,一般取开挖轮廓线外 3.5m。涌水地带根据钻探情况确定。

②单孔注浆半径 按下式确定:

$$R = \sqrt{\frac{V}{m\pi L}}$$

式中  $V$ ——单孔注入浆材的量;

$n$ ——孔隙率;

$L$ ——注浆孔长度。

③注浆孔间距 根据地质情况及经验参照表 5 进行选择。

表 5 注浆孔间距选择

岩体	说明	孔间距/m
岩石	细裂隙	1~3
状态	张开裂隙	2~4
结构	结构与岩体间空洞回填	2~3
孔洞	洞穴填注	3~15

④单孔注浆量 单孔注浆量的选择按下列情况综合判定:根据浆材体积和所处理的围岩体积,综合考虑施工阶段的围岩孔隙率和孔隙的填注系数(根据以往注浆经验)来判断选定;根据钻孔间距和注浆长度、注浆压力和浆液的黏度判定。

单孔注浆量也可以用下式确定:

$$Q = \lambda V$$

$$\lambda = n\alpha(1 + \beta)$$

式中  $Q$ ——注入量;

$\lambda$ ——注入率;

$V$ ——加固对象的体积;

$n$ ——孔隙率;

$\alpha$ ——填充率;

$\beta$ ——损失系数。

⑤注浆速度 通常根据设计的注入形态要求选定合适的注入速度,可以由压力—速度曲线确定:根据注浆前的注水试验测出压力—速度曲线。速度小于临界速度浆液呈渗透固结,固结形状为球形;大于临界速度小于五倍的临界速度,浆液呈渗透脉状注入固结,固结形状为扁平球形;速度大于五倍临界速度浆液呈劈裂注入固结,固结形状为平板状。

⑥注入压力的选定原则 确定上限允许注浆压力时必须避免在注浆孔内产生水力劈裂,在节理体系中产生水力劈裂和岩体上抬;确定下限注浆压力时注浆孔与节理相交处的压力必须足以把浆液驱入节理中;注浆液到达的距离与注浆孔的间距相适应;确定逆向压力时主要根据岩层裂隙、浆材类型(稳定或非稳定)、止浆岩墙的厚度、水压力等因素考虑,通常选择 3~4 倍的涌水压力。涌水压力值通过地质调查孔或深孔监测得出。

⑦终止注浆的判定 裂隙黏性地层及松散破碎带处,裂隙岩层中使用稳定浆材的注浆主要按注浆量进行控制,岩石裂隙使用非稳定浆液的注浆主要按照注浆压力加以控制。在注浆中,通过孔口压力表判断注浆压力是否达到逆向压力。稳定浆液:每 m 孔长耗浆量达  $0.25\text{m}^3$  时,停止注入。非稳定浆液在下列逆向压力情况下终止注浆:

接触注浆 0.2MPa

注浆孔深 3~6m 0.5MPa

注浆孔深 6~12m 1MPa



注浆孔深 12 ~ 24m 1.5MPa

⑧注浆孔大小及布置设计 根据注浆钻孔设备及所有要求的注浆类型,注浆孔直径一般选 40mm,最大孔深不小于 50m。注浆孔的间距是根据浆液影响半径 2.3m 来确定的,典型间距采用 4m;为了最有效穿过含水节理,钻孔图和孔的钻进方向应考虑节理的产状、密度等因素在现场决定。

#### 4. 渗流场控制的水幕施工

水幕洞是为了提供水幕钻孔的作业空间通道,它的大小以能够满足钻机水平钻进水幕孔要求即可,本工程实例实施净空为 14.3m<sup>2</sup> 断面。水幕洞位于主储气洞上方 20m 处,水幕孔间距 10m,水幕近于水平。为了防止钻孔下倾,开孔角度向上倾 3°开钻,一般长度 100m。水幕孔的施工必须在水幕洞施工完成及水幕供水系统建立以后方可开始,长度必须满足水幕对洞库开挖前的有效覆盖,以保证洞库施工期间地下水位维持在一定的水平。

##### (1) 水幕钻孔要求

①水平水幕钻孔直径为 100mm,钻深 110m,孔位精度,在其生成浅形的锥形范围内,即与理论轴线的顺定误差为 2.8°,或孔深的 5%。

②取芯钻孔,如果能够达到钻孔误差要求,取芯钻孔直径可为 76mm,否则,取芯钻孔直径为 100mm。

③如果钻孔超过了允许误差,则必须对误差孔进行注浆,然后重新钻孔。头 5 个钻孔及占总数 20% 的钻孔必须进行误差测量。

④钻孔采用冲击、旋转法,只能用清水或两用泥浆或钻孔液进行钻孔。钻完孔后,应彻底冲洗干净孔内的泥浆和岩屑。清孔后,立即装上机械栓塞。否则,必须盖孔或进行临时堵塞。

⑤对垂直水幕钻孔(数量较少),应在其上安装长 2m 的水泥套管进行抬高,以防止泥浆、岩屑进入孔内。

⑥钻好的孔应在 5d 内进行注水—落水试验。

##### (2) 水平机械回转取芯水幕钻孔的钻进

该方法是采用坑道钻机,配合金刚石钻头,对所需要了解的地层按水平(或倾斜)的预定方向进行环状切削,取出岩芯供地质鉴定和地质编录。开孔时为了确保终孔位置准确,一般采用开孔倾角较设计倾角上仰 1°~2°,开孔方位角左偏 1°~2°。钻孔使用金刚石钻头一径到底;开孔钻进选择低压慢转,确保开孔准确。当孔深大于 3m 时,可转入正常钻进,采用中压和高转速的工艺参数。

##### (3) 水平冲击回转钻进(不取芯水幕钻孔)

该方法是通过坑道钻机,采用潜孔冲击钻具成孔。

①开孔 一般采用较设计孔径大一级的钻具开孔,以便安装除尘装置及孔口防突水装置,开孔倾角较设计倾角上仰 1°~2°,开孔方位角左偏 1°~2°。

②冲击钻进操作要点 冲击钻进时,密切注意钻机转速和压力的变化,如转速急剧下降,压力增加,说明孔内产生泥箍或有孔壁坍塌事故发生,要立即采取措施排除,然后才能继续钻进。钻进应在孔内无渣状态下进行,必要时,可将冲击器提离孔底一定距离,进行强吹清孔。

提高冲击钎头的使用寿命和保持高效率的钻进,取决于轴压和转速的适当配合。施加于冲击器的轴压,以冲击器工作时不反跳为宜。转速可根据出渣的大小进行调整。冲击器和钻杆严禁在孔中反向转动,以防落孔。当终止钻进时,不能立即停止向冲击器供气,应将冲击器提离孔底强吹,待孔中不再有岩渣及岩粉排出时再停气,停止回转。

#### 5. 矿山法施工

##### (1) 交通洞施工

交通洞采用全断面开挖辅以光面爆破,用三臂台车打眼、ZL50C 装载机装渣、18t 自卸汽车运输。支护采用锚杆、挂网,甚至设立花拱架,并进行注浆堵水。施工中应做好以下几项工作。

①洞体防塌 在围岩破碎、软弱、断层带开挖洞室,应遵循“管超前、短进尺、弱爆破、紧支护”的施工原则。在开工前和施工过程中,准备和存放一定数量的钢拱架、格栅拱、钢筋网、锚杆、小导管、钢板、原木、锯材等应急材料,以备特殊情况应急之用。

②防涌水 断层破碎带会与地下水系连通,裂隙发育地带地下水会密集,开挖过程中要注意防止突涌水,准备好防灾堵水材料,如水泥水玻璃双液浆、棉纱、喷浆材料等。及早设计好包括注浆孔布置、注浆压力、注浆量、注浆顺序、凝胶时间等内容的详细注浆堵水方案。

③超前探水 充分利用探测孔,了解掌握开挖掌子面前方的水文地质情况,采取正确的开挖、注浆堵水方式,确保洞室结构和工程施工安全顺利。

## (2)主储气洞施工

主储气洞由平行的双洞组成,每个单洞高20m,宽18m,断面面积 $304\text{m}^2$ ,双洞净距60m,中间设斜坡道和联络通道。本实例的丁烷双主洞长152m,丙烷双主洞长分别为132m和172m。储气主洞分三个台阶开挖。

第一台阶高7m,断面 $77\text{m}^2$ ,采用小导洞法开挖,先开挖中间部分,然后扩挖。拱部全部喷锚支护,破碎地带锚杆按 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 布置,地质良好地带锚杆按 $2.5\text{m}\times 2.5\text{m}$ 布置;

第二、三台阶高6.5m,断面为 $112\text{m}^2$ 、 $113\text{m}^2$ ,全断面开挖,在局部破碎地带喷锚支护。

斜坡道及联络洞采用斜眼掏槽、光面爆破一次开挖成形。

主储气洞的渗漏水控制要求严格,当探孔流量小于 $0.5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}$ 时,才允许进行洞室开挖爆破;当探孔流量大于 $0.5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}$ 小于 $5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}$ 时,要先进行探孔注浆,再进行洞室开挖;当流量大于 $5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}$ 时,要先进行扇形注浆,再进行洞室开挖。

## (3)竖井施工

竖井的作用是向库内灌注和提取气体,并及时抽排库体内的积水。竖井直径4.2m,采用人工手持风钻打眼爆破。竖井施工主要是合理进行施工组织和设备配备,作好洞口场地设施布置,充分保证起吊设备安全稳固地运行,所有作业达到竖井施工安全标准等等。

## 6. 混凝土封塞施工

混凝土封塞是为了密封住洞库内的气体,是洞室工程中最后、也是最重要的一个环节。本工程实例中的封塞有四个:丁烷交通洞封塞、丁烷竖井封塞、丙烷交通洞封塞、丙烷竖井封塞。

### (1)封塞长度5m。

(2)施工程序 开挖→支护→安装锚杆→预注浆→清洗岩面→组装内模板→绑扎钢筋→安装回填注浆管→安装接触注浆管→安装冷却水管和人孔→安装外侧模板→混凝土浇注与养护→测温度与注水冷却→拆模板→回填注浆→喷混凝土→接触注浆→人孔注浆等。

(3)安装锚杆 保证钻孔方向、角度、深度正确,封塞区锚杆要外露50cm,以便和绑扎的钢筋相连接。

(4)预注浆 在岩壁上按设计进行钻孔注浆,以防止施工中岩石的塌落和密封洞壁周围的大小裂隙,不让气体从封塞周边的岩墙中漏出。

(5)浇注混凝土 采用泵送混凝土浇注,选用合适的滑槽,模板中浇注混凝土的高度控制在1.2m以下。浇注时,用震动棒振实,每层要求在1小时内浇完。浇注顺序是左、右、中间反复进行。浇注完成后立即进行混凝土养护,2个星期后混凝土温度与环境相差 $5^{\circ}\text{C}$ 时开始进行回填注浆。

(6)注浆 注浆时注浆泵要用低档,使浆液最大限度地扩散到所有孔隙,浆液水灰比 $W/C=0.5$ 。回填注浆完成后21d可以进行接触注浆,其 $W/C=0.5$ 。最后进行人孔注浆,注浆时也用 $W/C=0.5$ 的浆。第一次注浆完成12h后,为消除混凝土收缩产生的裂缝,还需进行第二次注浆,以达到竣工验收标准。

## 7. 监控量测及永久监测

施工过程中进行围岩变形监测和水位观测,工程结束后进行长期永久观测。

(1)变形监测 主要进行净空收敛量测,观测洞室施工变化趋势。

(2)爆破振动监测 要求爆破施工时振动速度 $<10\text{cm}/\text{s}$ 。

(3)水位观测 施工时满足水幕供水需要,及时调整供水量。

(4)永久监测 为运营管理长期监测控制项目。深水压力计设在洞口和水幕间以及主储气洞周围,压力盒设在主储气洞库周边,传感器具备三轴地震检波器,频率宽带为20~400Hz。



六、机具设备(见表6)

表6 机具设备

序号	设备名称	单位	数量	序号	设备名称	单位	数量
1	三臂钻孔台车	台	2	12	康明斯出渣机	台	2
2	二臂钻孔台车	台	1	13	阿特拉斯 ZBG-02 注浆泵	台	3
3	H518-50 锚杆台车	台	1	14	KBY50/70 注浆泵	台	4
4	麦士德湿喷机	台	1	15	BVT 注浆泵	台	2
5	PZ-5C 喷浆机	台	2	16	110kW 日本通风机	台	3
6	HPZ-1 喷浆机	台	2	17	XY-4 地质钻机	套	1
7	ZLC-40 装载机	台	4	18	GX-1T 地质钻机	套	2
8	ZLC-50 装载机	台	3	19	MKG-5 坑道钻机	套	4
9	380 小松装载机	台	1	20	XY-2 地质钻机	套	3
10	XC3260 铁马卡车	辆	10	21	VPH-700 空压机	台	1
11	12m <sup>3</sup> 内燃空压机	台	3				

七、劳动组织

(一)组织机构

本项目具有技术含量高、工程量大、资源投入大、作业面多、工期紧、合同严、施工管理难度大等特点,因此,我们成立了“TEB 项目管理组”,充分发挥 TEB 设计、科研、施工、制造四位一体的优势。根据 LPG 集散工程施工特点和多工序作业的复杂性及对国外承包商的特点,采用的施工组织机构模式见图 2。

(二)劳动力组织(见表7)

八、质量要求

(一)质量标准

采用本工法施工,除遵循《铁路隧道喷锚构筑法技术规范》、我国现行与本工程相关的施工与设计规范和规程外,还要结合本工程特点达到以下质量标准:

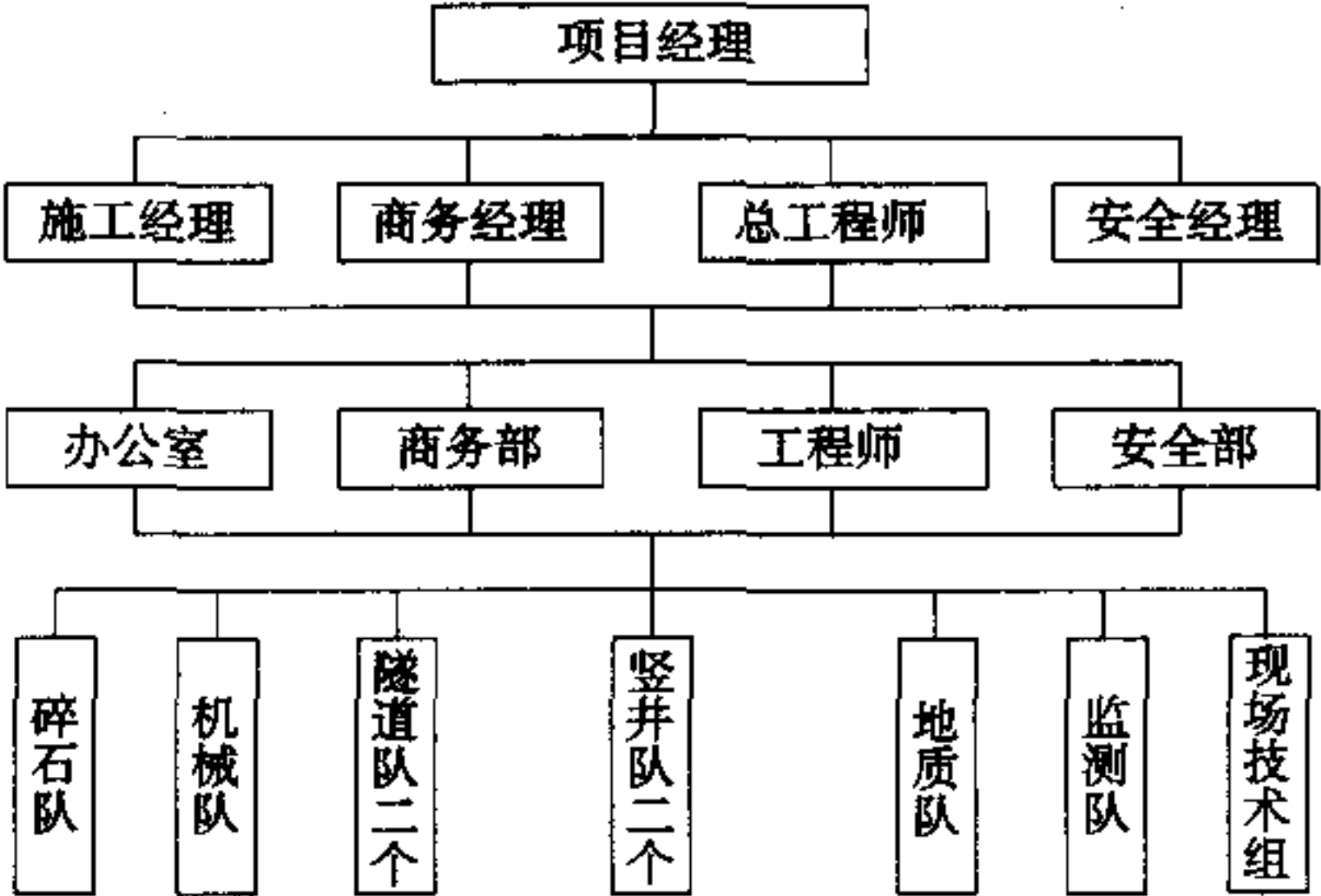


图2 项目管理组织机构

表7 劳动组织

序号	部门名称	班组设置	人数	主要职责
1	经理部	经理 副经理 总工程师	1 3 1	工程项目负责人,对生产安全、工期、质量、成本负责,审批施工技术方案并落实实施,执行商务合同要求
2	办公室		8	人事、后勤、卫生、保安工作
3	商务部		6	对业主、总包的技术、商务传递
4	工程部		18	施工计划、方案、现场实施指导
5	安全部		6	安全、质量、规章制度管理
6	丁烷竖井工区	3 班	40	丁烷竖井开挖支护
7	丙烷竖井工区	4 班	61	丙烷竖井开挖支护
8	丁烷主洞	台车 3 班 炮工 6 班 注浆支护 3 班 装载 3 班	127	丁烷主洞开挖、支护、运输,装载班包括丙烷主洞工作
9	丙烷主洞	台车 3 班 炮工 6 班 注浆支护 3 班	100	丙烷主洞开挖、支护、运输
10	地质钻探	6 班	72	地质孔、水幕孔、观测孔施作
11	土工监测		12	试验、量测、监测
12	碎石加工		18	提供喷浆料等
13	综合加工		37	机修、维护、保养等
合 计			510	



1. 执行总包商根据 SLS 系列规范制定的《技术规范》和《施工方法》;
2. 执行总包商制定的《现场质量控制程序》和项目部编制并被批准的《质量计划》;
3. 主储气洞放线水平偏差 5cm, 垂直偏差 2cm;
4. 喷射混凝土压力 0.3~0.4MPa, 喷层厚度 7cm, 加速凝剂 8h 强度 5MPa;
5. 渗水量小于 0.5L/min·m;
6. 水幕孔方向误差小于 5%;
7. 实施水幕后, 岩层 100m 透水率达到 12m<sup>3</sup>/h。

#### (二) 质量保证措施

1. 加强施工技术管理, 严格执行以总工程师为首的技术责任制, 及时进行技术交底, 发现问题及时解决。建立质量奖罚制度, 明确奖罚标准, 杜绝质量事故发生。
2. 工程质量施工队自检、经理部复核, 合格后报请总包监理检查。设专职质检工程师、质检员。质检工程师有质量否决权, 发现有违背施工程序、不按设计图纸、规则、规范及技术交底施工者, 有权制止, 必要时下停工令, 进行处罚并限期整改。
3. 加强工程试验, 建立台帐和施工记录, 优选施工配合比, 经工程师批准后执行。对施工材料认真检查, 把好进货关, 禁止使用不合格材料。
4. 严格执行制定的各项规章制度, 在执行工程质量管理中, 随时与总包和监理部门沟通, 发现问题及早解决, 避免浪费和损失。

#### 九、安全及环保措施

1. 制定《现场安全健康卫生计划》、《现场安全监察员手册》、《环境保护计划》、《防火与消防计划》、《治安计划》等规章制度。
2. 做好地质描述和超前地质预报工作, 根据地质情况随时调整施工参数。
3. 洞库施工采用分台阶光面爆破法, 严格按爆破设计和《爆破安全规程》操作施工, 严格控制药量, 炸药、雷管等火工品分开保管、装运, 定量从仓库提取, 洞内不准存放多余火工品。
4. 竖井施工做好井口值班联络工作, 严禁抛掷、丢弃物品, 保证人员上下安全。经常检查提升设备、绞车系统安全性能。
5. 定期对所有车辆检查维修保养, 多作业面出渣的运输组织由行车调度统一指挥, 严禁无证上岗、严禁非专职人员开车和调车。
6. 洞内抽排污水、油水等需经地表专用污水处理厂处理后再行排放, 规划弃渣场地, 做好环境保护工作。

#### 十、效益分析

1. 大型地下水封式液化石油气储藏洞库修建技术的研究成果在汕头 LPG 储气工程施工中得到了成功应用, 完善和发展了液化石油气库储技术的理论和施工技术, 为国内类似液化石油气的能源储存洞库施工提供了依据和借鉴。

2. 科研小组通过资料调研、地质情况技术分析、三维有限元计算, 取得丰富的技术资料和研究成果, 有力地指导了地下洞库群的施工, 及时将科研成果运用于实践, 节约直接工程成本 400 余万元。

3. 项目部针对现有地质情况采用 3D-flow 三维有限元渗流程序对丙烷、丁烷渗流场分别进行模拟计算分析, 采用 3D-6 三维弹塑性有限元程序对洞库力学分析计算, 优化的水幕系统施工参数、制定的注浆密封标准, 比采用其它技术措施节约工程投资 1800 万元。

4. 现场采用 TEB 质量管理体系, 在施工质量、人员组织、机械设备配置方面合理安排应用, 取得了较好的经济效益和社会环境效益, 确保了该工程建设总工期的实现。



图3 汕头 LPG 储库工程

## 十一、工程实例

汕头 LPG 工程是我国第一个采用水幕技术修建的地下裸岩洞室储存液化石油气工程,工程包括竖井、水幕洞、交通洞、主储气洞等部分,工程平面见图 3。

库区的主体岩石为花岗岩,岩体较破碎,其间有丰富的后期侵入岩脉,岩脉集中处透水性较好、导通性好,是主要的地下水通道。库区内基岩裂隙水丰富,本工程丰富的地下水既给 LPG 运营的高密高压带来了保障,同时也给反坡道施工带来了负面影响。

中铁隧道集团承建了该工程,采用项目法进行施工管理。工程自 1997 年 10 月正式开工,至 1999 年 11 月完工,历时 25 个月。汕头 LPG 项目部面对复杂的地质条件和艰苦的环境条件,采用科学的施工方法、先进的组织管理,针对该工程地质条件,制定了大断面爆破施工工艺细则、水幕孔施工技术要求、围岩喷锚支护技术措施、地层渗漏水控制注浆防渗漏标准,严格规范施工,顺利建成了本工程。目前,该项工程一直在正常的运营之中。

执笔:杨世武 朱常春 万美林 刘招伟 郑大荣