

Hydraulic Pressure Test Used in Geotechnical Survey of Underground Caverns

Pengfei Dong

The 10th Geological Brigade of Guangdong Geological Bureau (Zhongshan Geological Disaster Emergency Rescue Technology Center of Guangdong Province), Zhongshan, Guangdong, 528400, China

Abstract

This paper combines work experience in multiple domestic cave storage facilities to provide personal discussions on the modification of water curtain drilling and water pressure equipment, optimization of testing procedures, and issues encountered during testing. After optimizing the water pressure equipment, the backflow problem described in Article 5.7.5 of NB/T-35113-2018 "Code for Water Pressure Test of Hydropower Engineering Drilling" (hereinafter referred to as the specification) can be solved, which can reduce the local head loss caused by the water pressure equipment, facilitate maintenance during the water efficiency test stage, and reduce the disturbance caused by pressure relief to the surrounding water curtain boreholes during maintenance. Sealing during the experiment. Evaluate the water blocking curtain hole scheme. The use of single point method for water pressure testing, followed by electronic imaging technology and M. Lugeon test method can significantly shorten the duration of water pressure testing. The head loss along the test component and the local head loss can be ignored.

Keywords

hydraulic pressure test; underground caverns; geotechnical survey

粤东某洞库施工勘察中压水试验应用研究

董鹏飞

广东省地质局第十地质大队（广东省中山地质灾害应急抢险技术中心），中国·广东·中山 528400

摘要

本文结合国内多个洞库工作经历，对水幕钻孔压水设备改装、试验工序优化和对试验期间遇到问题提出个人论述。压水设备优化后可解决《水电工程钻孔压水试验规程》NB/T-35113-2018（下文简称规范）第5.7.5条阐述的回流问题，可减少压水设备造成的局部水头损失，在水效率试验阶段方便维护，减少维护时因泄压对周边水幕钻孔产生的扰动。对试验时封堵水幕孔方案进行评价。采用先单点法压水、后电子成像技术+M.Lugeon（吕荣试验）法可大幅度缩短压水试验时长。试验组件产生的沿程水头损失和局部水头损失可忽略不计。

关键词

压水试验；地下洞库；工程勘察

1 引言

地下洞库为国家地下储备重点项目，洞库能够完全控制气体渗漏的方法就是利用人工水幕和地下水共同作用进行水动力密闭^[1]。

具体工作是在主洞库上方交叉布置水幕巷道，并在巷道两侧或巷道底布置钻孔，水平孔从水平方向连通岩体裂隙，竖直和倾斜钻孔一般布置在各个洞库的相邻面和临海面，防止储存物质不同产生连通和海水倒灌^[2]。通过人工供水，使人工供水与地下水共同形成帷幕，保证整个主洞库气

密性完好（见图1）。岩体透水性和连通性是气封前提物理条件，现场压水试验是施工勘察中确定透水性主要手段，试验完成后进入日常供水阶段。

粤东某岩浆岩地区需建设某地下洞库，但洞库占地面积大，岩体裂隙发育，局部构造裂隙贯穿洞库，故裂隙连通性和透水性研究是非常有必要的^[3]，压水试验可直观反映出试验孔影响范围内裂隙水头能抬高的高度和透水性。

本次根据水幕钻孔实际意义和俯仰角归类说明，按俯仰角大小将试验孔拟分水平（俯仰角 $\theta=0^\circ$ ）、垂直（俯仰角 $\theta=90^\circ$ ）和倾斜孔（俯仰角 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ）三类^[4]。

【作者简介】董鹏飞（1987-），男，中国河南新乡人，本科，工程师，从事水文地质、工程地质、环境地质和岩土工程勘察研究。

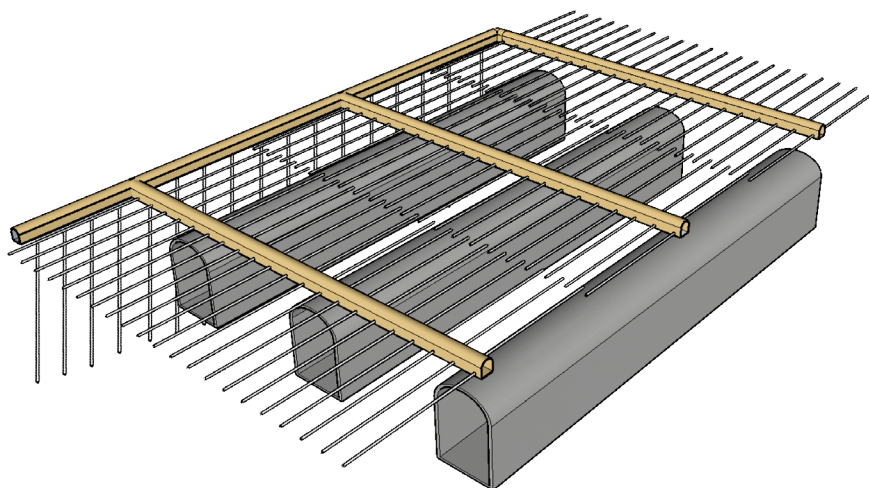


图1 地下洞库展示图(非实例)

2 钻孔封塞的选择方案

钻孔封塞的方案较多,但考虑后续需要长期供水和维护,故本项目单点法压水试验采用机械式栓塞和水囊式胶塞两种方案,吕荣试验采用双栓塞封堵试验段。具体方案评价见表1。

3 供压源和压水设备改装

3.1 供压源的选取

于地表高处建设大容量蓄水池,可将自来水内气体排出,防止供水管道气体堆积。

蓄水池高程需满足试验压力所需,其因高程差产生的理论压力 P 可按式计算:

$$P = \rho gh_0$$

式中: P ——蓄水池提供的理论压力;

ρ ——水的密度 kg/m^3 ;

g ——重力系数 m/s^2 ;

h_0 ——蓄水池形心至钻孔高程的相对高差 m 。

如蓄水池水量充足且高程满足理论压力 P ,但出现供水管压力远低于理论压力时,大概率是供水管路积累气体无法排出导致,致使供水管道压力过低,烟台和惠州某库在因事故停水后就常遇到该情况,可再供水管道尾端和中间一些位置加焊接排气球阀,可有效排出管路积气。

3.2 设备改装及功能

压水试验设备现改装如图2所示,增加止回阀即可解决孔内水回流问题^[5]。功能解释见表2。

表1 栓塞封堵方法统计方案

	机械式栓塞	水囊式胶塞	双栓塞
图例			
适用条件	孔口处岩体裂隙不发育段	孔口岩体裂隙发育段	吕荣试验
优点	经济、安装便捷	可任意调节封堵位置	准确卡住裂隙试验段
缺点	封堵深度一般不超过 3m	价格高,日常供水阶段需要反复压水	深孔试验时装卸较难

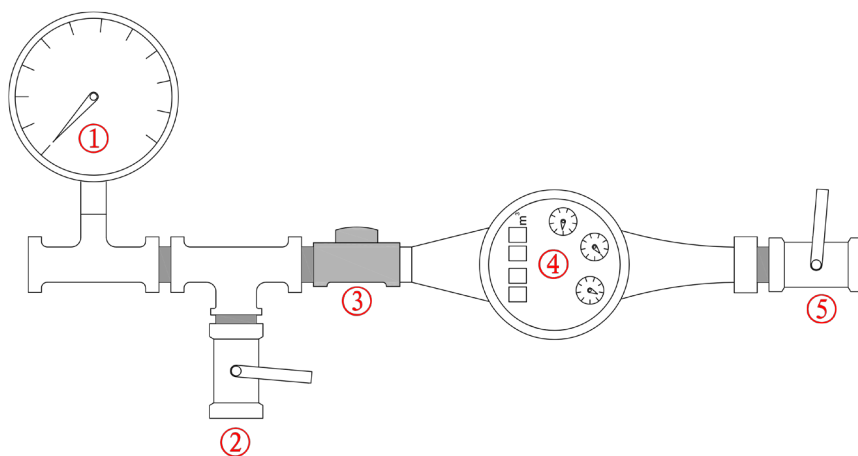


图2 压水设备各部件连接顺序

表2 压水设备各部件连接顺序表 2 各部件功能说明表

序号	名称	单位	功能说明
①	压力表	MPa	测静水压力 P_0 和试验压力 P_p ，设备可直接连接栓塞，避开压水设备各组件之间变径、水表机械转动等因素造成的局部水头损失
②⑤	球阀		②号球阀对孔内水分流和泄压，方便维护压力表。 ⑤球阀的作用为调节进水量以控制试验压力大小
③	止回阀		防止钻孔因孔内压力高于供水压力时造成孔内水回流，造成流量计倒转，使流量误差加大和孔内水流失
④	流量计	L	记录相关水试验和日常供水记录读数

4 单点法压水试验

4.1 静水压的测量

钻孔完成后，安装供水设备，关闭②⑤球阀，钻孔封堵后静止 24h 即可测得孔内试验段静水压力 P_0 （以孔口高程作为零势面）。

水平孔如读数不为 0 压力表读数 P_p 即为静水压 $P_0 = \text{Ma}\{P_1, P_2 \dots P_n\}$ ， $P_1, P_2 \dots P_n$ 为水幕孔连通裂隙产生的静水压力， P_0 即钻孔连通裂隙产生最大静水压。

倾斜孔和垂直孔如读数不为 0 压力表读数 P_p 与孔内最大水头压力 P' 有如下关系：

$$P' = \text{Max}\{P_1, P_2, P_3 \dots\}$$

$$P_p + P_z = P'$$

式中： P_p ——压力表读数；

P_z ——压力表至最高水头与钻孔作用点与压力表中心的相对高差产生的水头压力；

P' ——钻孔内裂隙最高水头压力。

4.2 试验压力

试验增加压力 ΔP 根据储备物质性质、储存物最大工作压力等信息确定，此处不做赘述。试验压力为 $P_0 + \Delta P$ 。

5 单点发压水试验常见问题分析

5.1 静水压过高

如静水压过高时，即静水压 P_0 大于自试验孔孔口起算到洞外地坪标高提供的理论压力时，个人看法可不做压水试验，因静水压过高说明孔内裂隙发育且绵延至地面较高处，如孔内裂隙与周围岩体贯通，则对水幕系统是增益的，可测孔内流量评估该孔增益的大小，为水幕效率试验^[6]提供数据依据。如孔内裂隙与周围岩体不贯通，孔内压力也远大于洞库的临界压力^[7]，可不考虑其影响。

5.2 压水时巷道壁和底部漏水讨论

从本质讲，压水期间钻孔两侧巷道壁或巷道底渗水，可直观说明透水裂隙同时贯穿巷道和水幕钻孔，虽然压水试验和供水期间会出现漏水的情况，但后期水幕巷道封堵蓄水

后，本质上是增加单个水幕钻孔和水幕巷道连通性，故封堵到孔内不漏水段即可。

5.3 不进水孔讨论

如钻孔无法压入水，则该孔渗透性弱，渗透系数 k 可忽略不计，但不同时间段试验结果亦有不同，试验时发现，虽然试验孔试验期无法压入，但在爆破施工、巷道开挖后围岩应力重新分布影响下，会有新裂隙贯穿试验孔，供水期间供水量会有微量变化。

5.4 加压达不到 ΔP 情况

长时间压水压力趋于稳定但增压未达到 ΔP 时，直接进行吕荣试验。

5.5 单点法渗透系数估算

单点法压水试验渗透系数可用下式估算：

$$K = \frac{Q}{2\pi Hl} \ln \frac{l}{r_0}$$

式中： K ——五岩体渗透系数 (m/d)；

Q ——压入流量 (m/d)；

H ——试验水头 (m)；

r_0 ——钻孔半径 (m)；

l ——试验长度，即孔深减去孔口至封堵位置的长度 (m)。

针对单点法试验渗透系数大于 10^{-6} cm/s，钻孔采用吕荣试验进一步确认钻孔透水率。

6 M.Lugeon text (吕荣试验)

6.1 试验段选取

对试验孔电子成像分析裂隙发育和裂隙填充情况，如表3所示。

通过电子成像判断出不透水完整岩段和透水裂隙发育段深度，针对裂隙发育段进行试验，可简化逐段压水过程，大幅度提高试验效率。试验时按三级压力五个阶段进行，过程参见相关规范执行。

6.2 试验段压力讨论

考虑静水压 P_0 ，第 i 段试验压力 P_i 采用下式计算。

$$P_i = P_{pi} + P_{zi} - P_{si} - P_{0i}$$

式中： P_i ——第 i 段试验压力 (MPa)；

P_{pi} ——第 i 段压力表指示压力 (MPa)；

P_{zi} ——第 i 段压力表中心至试验段中心点的压力 (MPa)；试验段中心点在压力表中心上方取正，反之取负；

P_{si} ——第 i 段管路压力损失 (MPa)；

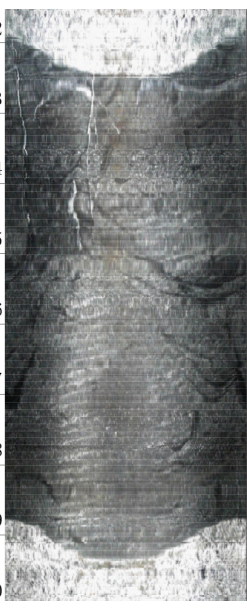
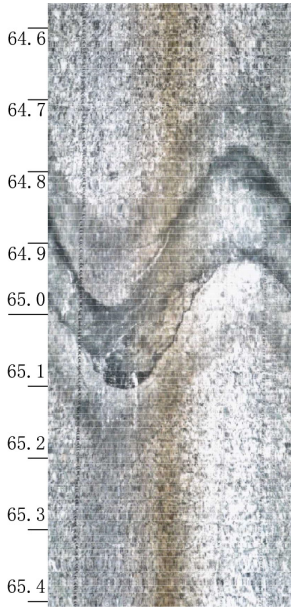
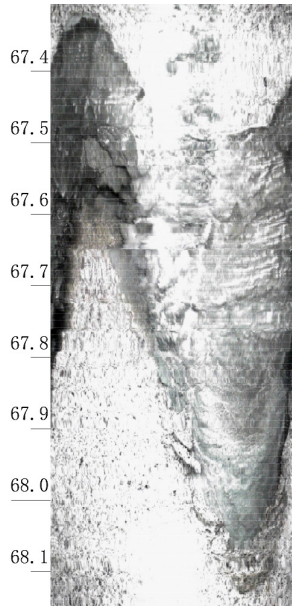
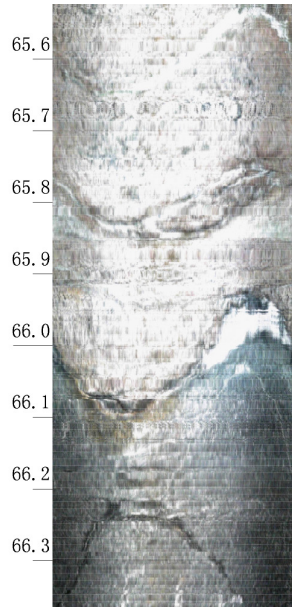
P_{0i} ——第 i 段静水压。

6.3 水平孔 P_z 值讨论：

水平孔钻探工艺复杂，孔深较深，钻孔斜度对 P_z 值影响不可忽视。

为避免钻孔下浮深度过大，故开孔时钻头会上仰 $1\sim 2^\circ$ 。经多次测斜数据发现，钻孔在空间内分布并不是一条直线，而是一条近似曲线，(为显示效果明显，该图按相应比例尺微调，非原始数据)。设 X-东, Y-北, Z-上, 见图3。

表3 电子成像裂隙发育和填充物部分展示图

			
<p>27.2~29.9 米之间裂隙较发育，试验测试长度约 0.7 米，裂隙无充填。</p>	<p>64.85~65.03 米之间见裂隙发育，试验测试长度约 0.2 米，裂隙无充填。</p>	<p>67.3~68.1 米之间见裂隙发育，试验测试长度约 0.8 米，裂隙无充填。</p>	<p>65.5~66.4 米之间裂隙发育，测试长度约 0.9 米，裂隙见充填物。</p>

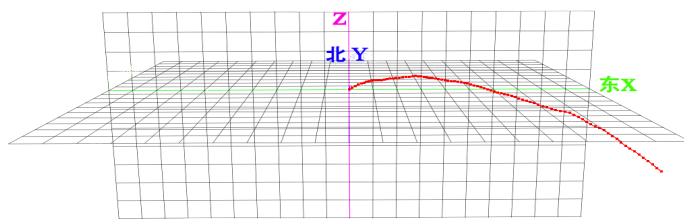


图3 钻孔轨迹曲线

如果考虑构造裂隙产状、岩体岩性物理性质差异等因素，会呈现出近似直线、弧线或其他线条，各钻孔各方位偏差各异，但由于钻杆抗弯刚度较大，故钻孔空间位置拟合函数 $f(x, y, z)$ 遵从处处连续且可导的性质。

根据上述内容，则可设 α 角为俯仰角 (α 角水平为零，向上为正，向下为负)， $\tan \alpha$ 即为 $f(x, y, z)$ 在竖直面被测点处的曲线斜率。L 为孔深，将每段测量段近似看作直线，则第一个点的竖向偏差以 $h_1 \approx L/4 \times \sin \alpha_1$ 近似计算。第二个点竖向偏差 $h_2 \approx h_1 + L/4 \times \sin \alpha_2$ ，以此类推。 P_z 值近似等于 $\rho g h_x$ (h_x 为被测处的竖向偏差，可采用内插法近似计算)。

6.4 竖直孔和倾斜孔 P_z 值讨论：

竖直钻孔由于钻杆自重垂直向下且钻孔深度相对较浅，钻孔斜度接近垂直。

设竖直孔和倾斜孔被测点处俯仰角为 β ，由于洞库深埋地下，故竖直孔和倾斜孔水位情况只有两种，没水或满水。无水孔按 $P_z = \rho g L \sin \beta$ 计算 (L 为孔口至压水段的长度)，有水孔 P_z 近似等于零处理。

6.5 管损 P_s 值讨论

管道压力损失包括沿程水头损失 h_f 和局部水头损失 h_m ^[8]，即：

$$P_s = h_f + h_m$$

沿程水头损失 h_f 可按达西—维斯巴赫 (Darcy-Weisbach) 计算^[9]：

$$h_f = \lambda \frac{l_p v^2}{d 2g}$$

式中： λ ——摩阻系数 (MPa/m)，取 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ 。钢管材质供水管取低值，钢丝管和其他软管取高值。

l_p ——工作管长度 (m)；

d ——工作管内径 (m)；

v ——管内流速 (m/s)，趋于稳定压水时的流量；

g ——重力加速度 (m/s²)，取 9.8m/s²。

设备局部水头损失仅仅是出水口出水流流入钻孔中孔径突然放大造成的水头损失，压力和流量稳定后属于有压淹没流。按常规理论公式计算：

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

其中 ζ 的理论公式如下：

$$\zeta = (1 - \frac{A_1}{A_2})^2$$

式中： A_1 ——变径前的面积；

A_2 ——变径后的面积。

根据试验是采用三通内径为 12.7mm，钻孔孔径为 110mm，故 ζ 理论值约等于 0.974。《岩土工程手册》第四版表 9-3-13 内容，试验设备 $d_2/d_1=12.7/110 \approx 0.115$ ，内插法取值 ζ 为 0.488，无论理论值或查表值，在不同流量下局部水头损失 h_m 在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ m 量级之间，可忽略不计。

6.6 吕荣值计算

$$q = \frac{Q}{LP_3}$$

式中： q ——试段的透水率 (Lu)；

Q ——最大压力阶段的压入流量 (L/min)；

L ——试段长度 (m)，即连杆长度 (连杆长度可根据实际需要加工)。

P_3 ——试验段最大压力 (MPa)，即 P_3 压力。

吕荣试验可准确测出试段透水率，为后续注浆或水幕巷道保障蓄水提供理论依据。

6.7 P—Q 图

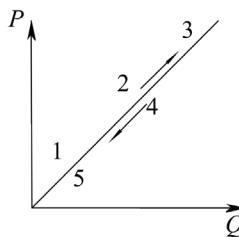
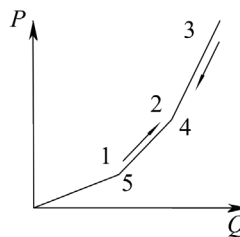
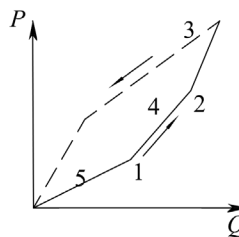
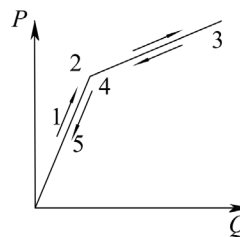
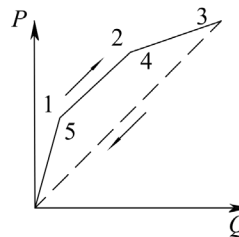
根据渗流状态、裂隙状态、流量变幅，按豪斯比和库兹纳尔 (Hvorslev-Kuznar) 分类法绘制 P—Q 图，根据 P—Q 图特点按表 4 分类^[10] 表述。

P—Q 意义较重要，可求解岩体原始透水率指标、可了解试验岩体变形特征、可根据流量大小对岩体的透水率进行分类等。

7 结语

① 钻孔封堵方案可根据实际情况选择合适封塞。② 论文提出的压水组件连接方法可有效保证数据准确性，且方便后期维护，可解决压水过程中孔内水回流问题，可减少压水设组件造成的局部水头损失，在水效率试验阶段方便维护，减少维护时因泄压对周边水幕钻孔产生的扰动。③ 钻孔压水试验时可先单点法压水，渗透系数大于 10^{-6} cm/s 再进行吕荣试验。④ 电子成像 + 吕荣试验法高效且准确的评估岩体透水率。⑤ 洞库内压水试验应考虑水幕钻孔静水压，水平孔吕荣试验还应考虑钻孔斜度。⑥ 管道压力损失 P_s 可忽略不计。

表 4 P—Q 图曲线类型和曲线特点

层流型 (A 型)	紊流型 (B 型)	扩张型 (C 型)	冲蚀型 (D 型)	充填型 (E 型)
 <p>升压曲线为通过原点的直线, 降压曲线与升压曲线基本重合</p>	 <p>升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合</p>	 <p>升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合</p>	 <p>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</p>	 <p>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</p>

参考文献

[1] 高翔,谷兆祺.人工水幕在不衬砌地下贮气洞室工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,1997(2):83-92.

[2] 乔丽苹,王小倩,王者超,等.某地下水封石油洞库海水入侵评价与控制方法研究[J].岩土工程学报,2021,43(7):1338-1344.

[3] 吕飞飞.水封洞库花岗岩岩体裂隙连通性与渗透性的应用研究[D].北京:中国地质大学2023.

[4] 王者超,李术才,薛翊国,等.地下石油洞库水幕设计原则与连通性判断方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):276-286.

[5] NB / T-35113—2018 水电工程钻孔压水试验规程[S].

[6] 黄圣楠,胡成.某地下水封洞库水幕多孔联合试验参数分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(4):1266-1275.

[7] 刘静华,黄圣楠,陈刚,等.关于地下水封洞库水幕系统试验的讨论[J].长江科学院院报,2016,33(5):105-110.

[8] 丁立丰,郭啟良,王成虎.某石油储备库吕荣压水试验与水力摩阻[J].水文地质工程地质,2011,38(6):35-38+61.

[9] 李江峰,李娟,戚印鑫,等.无压流隧洞渐变段局部水头损失系数计算的创新方法研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(2):51-59.

[10] F.K.Ewert. Rock grouting with emphasis on dam sites[M]. Berlin:Springer-Verlag,1985.