

ICS 编号  
CCS 编号

# 团体标准

T/CHES XXX—20XX

## 水利水电工程钻孔高压压水试验规程

Code of high-pressure water injection test in borehole for  
water conservancy and hydropower projects

（报批稿）

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水利学会 发布



## 前 言

本规程按照《工程建设标准编写规定》（建标〔2008〕182号）的规定起草。

本规程共8章、5个附录，主要技术内容有：总则、术语和符号、基本规定、试验设备、试验准备、现场试验、资料整理与报告。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条16号，邮编100053），以便今后修订时参考。

本标准主编单位：长江水利委员会长江科学院

本标准参编单位：长江三峡勘测研究院有限公司（武汉）

长江岩土工程有限公司

广东省水利电力勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

本标准主要起草人：董志宏、韩晓玉、丁秀丽、刘元坤、尹健民、周云、王汇明、邓争荣、王殿春、周黎明、刘皓、黄书岭、周春华、付平、艾凯、吴国荣、冯鲲鹏、张新辉、王斌、罗笙、陈长生、常威、卜中国、张雨霆、钱源、张琦、付晖、周朝、叶健等。

本标准主要审查人：马毓淦

目 次

1 总则 ..... 1

2 术语和符号 ..... 2

    2.1 术语 ..... 2

    2.2 符号 ..... 3

3 基本规定 ..... 5

4 试验设备 ..... 7

    4.1 止水栓塞 ..... 7

    4.2 供水设备 ..... 7

    4.3 压力管路 ..... 7

    4.4 量测设备 ..... 7

5 试验准备 ..... 9

6 现场试验 ..... 10

    6.1 试段隔离 ..... 10

    6.2 水位观测 ..... 10

    6.3 试验压力和流量观测 ..... 10

7 资料整理与报告 ..... 12

    7.1 资料整理 ..... 12

    7.2 结果分析 ..... 12

    7.3 报告提纲 ..... 13

附录 A 试验压力确定方法 ..... 14

附录 B 试验记录及成果提交格式 ..... 16

附录 C 岩体渗透系数计算 ..... 21

本规程用词说明 ..... 22

引用标准名录 ..... 23

条文说明 ..... 26

## Contents

1 General Provisions.....	1
2 Terms and Symbols.....	2
2.1 Terms.....	2
2.2 Symbols.....	3
3 Basic Requirements.....	5
4 Testing Equipment.....	7
4.1 Packer.....	7
4.2 Water Supply Equipment.....	7
4.3 Pressure Piping.....	7
4.4 Measurement Equipment.....	7
5 Test Preparation.....	9
6 Site Test.....	10
6.1 Separation of Test Sections.....	10
6.2 Water Level or Pressure Observation.....	10
6.3 Observation of Pressure and Flow.....	10
7 Test Data Compilation.....	12
7.1 Data Compilation.....	12
7.2 Result Analysis.....	12
7.3 Report Content.....	13
Appendix A Test Pressure Determination Method.....	14
Appendix B Record Format of Water Pressure Test in Borehole.....	16
Appendix C Calculation of Rock Mass Permeability.....	21
Explanation of Wording in This Code.....	22
List of Quoted Standards.....	23
Explanation of Provisions.....	26

## 1 总则

- 1.0.1 为规范水利水电工程钻孔高压压水试验的内容、方法和技术要求，保证试验工作质量和成果质量，制定本规程。
- 1.0.2 本规程适用于水利水电工程地质勘察中压力大于 1MPa 的钻孔高压压水试验。
- 1.0.3 水利水电工程钻孔高压压水试验除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 钻孔高压压水试验 high-pressure water injection test in borehole

用栓塞将钻孔隔离出一定长度的孔段，并向该孔段施加大于 1MPa 压力进行压水，根据一定时间内压入水量和施加压力大小的关系，确定岩体在高水头下的渗透特征、渗透稳定性及其结构面张开压力的一种原位渗透试验。

#### 2.1.2 试验长度 length of test section

压水试验时水可以进入岩体的孔段长度。

#### 2.1.3 试验压力 testing pressure

施加在试段内的实际平均压力。

#### 2.1.4 试验水头 testing hydanlic head

试验压力对应的水柱高度。

#### 2.1.5 管路压力损失 pressure loss of tube

水流经工作管路因流体摩阻而损失的压力值。

#### 2.1.6 栓塞 packer

将钻孔隔离出单独封闭孔段的试验设备。

#### 2.1.7 栓塞承压能力 Pressure bearing capacity of packer

在孔径相匹配且孔壁完整条件下栓塞能够承受的最大压力。

#### 2.1.8 栓塞自缩压力 Self shrinking pressure of packer

无外水压条件下，栓塞膨胀后能够克服水柱压力自行收缩到初始状态对应的最高水柱压力。

#### 2.1.9 双管法 Double tube method

采用两条管路分别连接栓塞和试验孔段进行试验的设备组建方法。

#### 2.1.10 单管法 Single tube method

采用单一管路、通过切换阀进行水路操作和试验的设备组建方法。

#### 2.1.11 工作管 Working tube

连通孔口和试验段、试验过程中高压水流经的管路。

#### 2.1.12 透水率 permeability rate

表达试验段岩体透水性的指标。

#### 2.1.13 吕荣 (Lu) Lugeon

透水率的单位，定义为在单位压力 (MPa) 下每米试验段每分钟压入的水量。

#### 2.1.14 临界压力 critical pressure

岩体在临界劈裂或结构面张开时所需要的最小压力。

## 2.2 符号

$d$ ——工作管内径；

$g$ ——重力加速度；

$H$ ——试验水头；

$k$ ——岩体渗透系数；

$l$ ——试段长度；

$l_p$ ——工作管长度；

$P$ ——试验压力；

$P_c$ ——临界压力；

$P_h$ ——地面安设压力表、压力传感器至试段中心的水柱压力；

$P_m$ ——最高试验压力；

$P_p$ ——地面安设压力表、压力传感器显示压力；

$P'_p$ ——安设在试段上的压力传感器显示压力；

$P_s$ ——管路压力损失；

$P_z$ ——地面安设压力表、压力传感器安装水平面至压力计算零线的水柱压力；

$Q$ ——压入流量；

$q$ ——透水率；

$r_0$ ——钻孔半径；

$v$ ——管内流速；



$Z$ ——孔深；

$\lambda$ ——摩阻系数。

### 3 基本规定

3.0.1 钻孔高压压水试验宜分段进行，试段长度宜为 5m，同一试段不宜跨越透水性相差悬殊的两种岩层。

3.0.2 钻孔高压压水试验应进行升降压循环试验，可根据下列情况采用不同方法进行：

- 1 完整岩体宜选用快速法。
- 2 较完整岩体宜选用中速法。
- 3 其他类型岩体宜选用慢速法。
- 4 加载卸载频繁岩体宜选用多循环法。

3.0.3 最高试验压力应根据下列情况确定：

- 1 最高试验压力宜为建筑物工作水头的 1.2 倍。
- 2 地面钻孔的上部试验宜降低最高试验压力。
- 3 平洞内试验宜调高最高试验压力。
- 4 低压深埋隧洞工程可按照外水压力确定最高试验压力。
- 5 基岩面以下较浅部位可进行少量试验确定最大试验压力，并应以不引起岩体变形抬动和岩体破裂为准。

3.0.4 压力阶段和级差应按下列规定执行：

- 1 压力阶段宜取 5 级~10 级。
- 2 级差宜采用 0.5MPa 或 1.0MPa。

3.0.5 升压阶段的稳定流量均低于 3L/min 时，可不再进行降压阶段的压水试验。

3.0.6 试验压力确定应按本规程附录 A 的规定进行。

3.0.7 压力计算零线宜采用工作管内的水头观测结果，其位置确定应符合下列要求：

- 1 当地下水位在试段以下时，压力计算零线应为通过试段中点的水平线。
- 2 当地下水位在试段以内时，压力计算零线应为通过地下水位以上试段中点的水平线。
- 3 当地下水位在试段以上时，压力计算零线应为地下水位线。

### 3.0.8 管路压力损失的确定应采用下列方法：

1 当工作管内径不一致时，管路压力损失宜根据实测资料确定。实测方法应符合《水利水电工程钻孔压水试验规程》SL 31-2003 附录 A 的规定。

2 当工作管内径一致且内壁粗糙度变化不大时，管路压力损失可按下式计算：

$$p_s = \lambda \frac{L_p}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3.0.8)$$

式中：

$\lambda$  ——摩阻系数，取  $2 \times 10^{-4} \text{MPa/m} \sim 4 \times 10^{-4} \text{MPa/m}$ ；

$L_p$  ——工作管长度，m；

$d$  ——工作管内径，m；

$v$  ——管内流速，m/s；

$g$  ——重力加速度，取  $9.8 \text{m/s}^2$ 。

### 3.0.9 试验人员应经过专门培训，并应持证上岗。

### 3.0.10 安全生产和环境保护应符合下列规定：

1 试验设备在工作状态下，不得进行拆卸和检修；出现异常时，应停机检查。

2 用于试验的管路、仪表、阀门、胶管、连接件的耐压强度，均应大于最高试验压力值的 1.5 倍。

3 用于膨胀栓塞的气体应选择对人无危害和不可燃的气体。

4 压水试验过程中产生的油污和垃圾应及时清理，从孔内返出的污水应按环境保护要求进行处理。

## 4 试验设备

### 4.1 止水栓塞

4.1.1 止水栓塞应符合下列规定：

- 1 承压能力应大于 1.5 倍最高试验压力。
- 2 栓塞长度不应小于 8 倍钻孔孔径。

4.1.2 液压栓塞在钻孔水位至孔口的水柱压力大于栓塞自缩压力时，应配置卸压装置。

4.1.3 绳索取心钻杆为工作管时可选用不起钻压水试验装置。

### 4.2 供水设备

4.2.1 试验用的水泵应符合下列要求：

- 1 水泵出水应保证压力稳定，流量均匀，工作安全可靠。
- 2 额定工作压力宜大于最高试验压力的 1.5 倍。
- 3 在最高试验压力下，水泵的总输出流量应大于 100L/min；当单台水泵不能满足试验供水要求时，可用多台水泵并联供水。

4.2.2 试验进水管路宜设置稳压罐（筒）。

4.2.3 供水调节阀门宜采用高压球阀。

### 4.3 压力管路

4.3.1 钻孔高压压水试验应根据现场情况选用双管法或单管法。

4.3.2 工作管宜采用钻进所用钻杆。另配工作管应等内径且不小于 20mm，内壁光滑。

4.3.4 双管法试验时压力管路应符合下列要求：

- 1 止水栓塞对应压力管路宜采用高压软管。
- 2 通水截面大的管路应作为工作管。
- 3 高压软管应可靠固定在工作管上。

4.3.5 单管法试验时应符合下列要求：

- 1 工作管底部应安装管路切换阀。
- 2 切换阀最小通水截面积宜大于  $177\text{mm}^2$ 。

### 4.4 量测设备

4.4.1 量测设备宜具备实时显示、全过程数据采集和存储功能。

4.4.2 量测设备应定期检定或校准，现场试验前应校验。

4.4.3 压力表和压力传感器应符合下列要求：

1 压力表卸压后指针应回零，量测范围应控制在极限压力值的  $1/3 \sim 3/4$ ，精度应优于 2.5 级。

2 压力传感器压力范围应大于试验压力，精度应优于  $0.5\%F.S.$ 。

4.4.4 高压水表和流量计额定工作压力应大于 1.5 倍最高试验压力，量程不应小于所匹配水泵额定流量的 120%，精度应优于  $0.5L/min$ ，且宜具备下列功能：

1 信号电子化，可输出数字信号。

2 具有双向测量能力。

4.4.5 数显及数据记录设备宜具备下列功能：

1 数据实时显示。

2 采集频率范围在  $0.1Hz \sim 10Hz$  之间。

3 具有 2 个或 2 个以上的压力传感通道，1 个或 1 个以上的流量传感通道。

4 模/数转换位数不小于 8 位。

5 原始数据可转化为电子表格文档。

4.4.6 水位计应灵敏可靠，可测量钻孔和工作管内部水位，且不应受孔（管）壁附着水或孔（管）内滴水的影响。

4.4.7 量测设备应专门保管。

## 5 试验准备

5.0.1 现场试验前应对现场试验条件进行确认，主要内容应包括下列事项：

- 1 试验钻孔壁稳定、总体完整。
- 2 钻孔已冲洗达标。
- 3 现场备有充足清水。
- 4 钻机及附属设备状况良好，试验设备与钻杆连接可靠。

5.0.2 试段孔深应依据试验任务、钻孔岩心或孔内电视资料确定，栓塞应置于孔壁完整部位。

5.0.3 试段的试验方法、最高试验压力和压力阶段级差应分别确定。

5.0.4 现场试验前应组装试验设备并进行试运行，其中主要查验事项和技术要求应符合下列规定：

- 1 止水栓塞性能符合试验要求，状况良好，备有易损件。
- 2 供水设备和量测设备性能参数符合试验要求，运行状况良好。
- 3 所有试验管路已进行密封处理，无堵塞和渗漏情况。

## 6 现场试验

### 6.1 试段隔离

6.1.1 栓塞应安置在预定孔深。

6.1.2 当栓塞隔离无效时，应采取移动栓塞、起塞检查、更换栓塞或灌制混凝土塞位等措施。混凝土塞位灌制方法应符合《水电工程钻孔压水试验规程》NB/T35113-2018 附录 B 的规定。

6.1.3 液压式止水栓塞宜在孔口施加 3MPa~5MPa 压力，气压式止水栓塞应试验确定可靠胀塞压力。胀塞压力应小于岩体破裂压力，试验期间宜保持不变。

### 6.2 水位观测

6.2.1 试段隔离前应观测钻孔水位，试段隔离后宜观测工作管内和钻孔水位。

6.2.2 水位观测应每隔 5min 进行一次。当水位平均变化速度连续两次均小于 5cm/min 时，观测工作可结束，应用最后的观测结果确定压力计算零线。

6.2.3 水位观测过程中发现承压水时，宜进行承压水头观测和涌水量观测，观测工作结束标准宜符合本规程第 6.2.2 条的规定。

6.2.4 承压水头远高于孔口时，应将工作管路密闭后进行压力观测，观测应每隔 5min 进行一次，宜以压力平均增加小于 0.5kPa/min 为观测结束标准。

### 6.3 试验压力和流量观测

6.3.1 试验前工作管应充分排气，当试验压力达到预定值并保持稳定后应进行流量观测。

6.3.2 高压压水试验流量观测的压力阶段结束时间应符合表 6.3.2 的规定，在采用流量读数法时还应遵循“流量无持续增大趋势，且连续 5 次读数中最大值与最小值之差小于最后一次读数的 10%，或最大值与最小值之差小于 1L/min。”作为结束依据。

表 6.3.2 压力阶段结束规定

试验方法	流量读数法			曲线观测法	
	观测间隔	每级压力稳定阶段维持时间	流量认定	结束依据	流量认定
快速法	1min	不小于 5min	最后一次读数	流量曲线平直无变化持续 5min	最后 1min 均值

中速法	3min	不小于 30min		流量曲线平直无变化持续 30min	最后 3min 均值
慢速法	10min	不小于 120min		流量曲线平直无变化持续 120min	最后 10min 均值

6.3.3 试验压力调整到下阶段的压力值后，应重新进行流量观测，并应符合本规程第

6.3.2 条的规定。

6.3.4 在降压试验阶段，若出现水由岩体向孔内回流的现象，应保持压力，应继续进行压水直至符合本规程第 6.3.2 条的压力阶段结束规定。

6.3.5 在试验过程中，应记录或全程采集试验数据，及时分析异常情况，保证试验结果的准确性、完整性。



7 资料整理与报告

7.1 资料整理

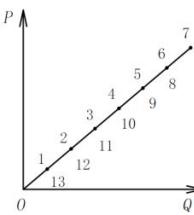
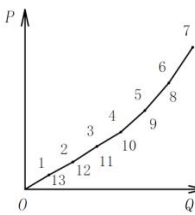
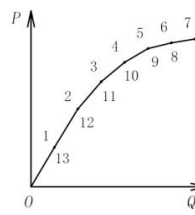
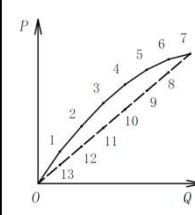
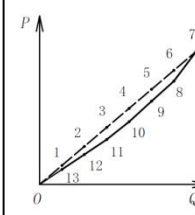
7.1.1 试验资料整理应包括校核原始记录，绘制压力流量时间曲线（ $P-Q-t$  曲线）、稳定阶段压力流量（ $P-Q$  曲线）和压力试段透水率曲线（ $P-q$  曲线）。试验表格和曲线绘制格式应符合本规程附录 B 的要求。

7.1.2 设有观测孔、观测平洞时，应绘制试验压力与观测孔、观测平洞出水量关系曲线。

7.2 结果分析

7.2.1 高压压水  $P-Q$  曲线可划分 A 型（层流型）、B 型（紊流型）、C 型（扩张型）、D 型（冲蚀型）和 E 型（充填型）。应根据升压及降压阶段  $P-Q$  曲线的形状和相互关系确定试段的  $P-Q$  曲线类型， $P-Q$  曲线的典型类型及曲线特点应符合表 7.2.1。可按照图 7.2.1 所示流程进行  $P-Q$  曲线类型判断。

表 7.2.1  $P-Q$  曲线的典型类型及曲线特点表

类型	A（层流）型	B（紊流）型	C（扩张）型	D（冲蚀）型	E（充填）型
$P-Q$ 曲线					
曲线特点	升压曲线为直线，降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 Q 轴，降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 P 轴，降压曲线与升压曲线基本重合	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	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

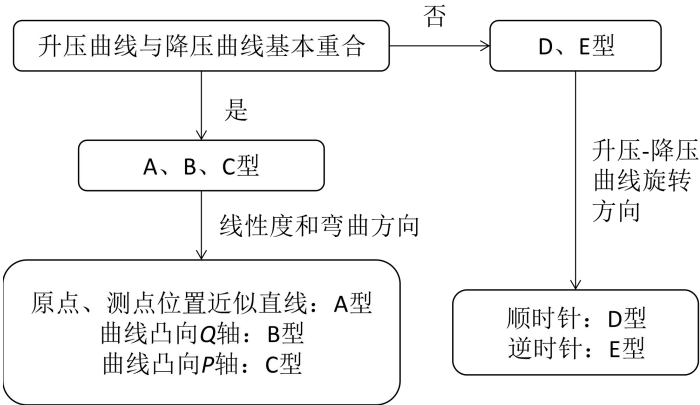


图 7.2.1  $P-Q$  曲线类型判断流程

7.2.2  $P$ - $Q$  曲线中同压力阶段在升压阶段和降压阶段的流量差不大于 1L/min 或相对差不大于 5% 时，可认为基本重合。

7.2.3 完整或较完整岩体应根据  $P$ - $Q$  曲线最大曲率或切线交点法确定临界压力，多循环高压压水试验，应分别确定各循环的临界压力和稳定临界压力。

7.2.4 对于紊流型（B 型） $P$ - $Q$  曲线，临界压力之前的压力和流量之间的关系可用截距为零的二次多项式或幂次函数拟合，拟合函数参数可用最小二乘法计算确定。

7.2.5 设有观测孔、观测平洞的高压压水试验，应根据其出水量与压力关系，确定是否存在临界压力。应根据临界压力和渗径计算临界水力坡降。

7.2.6 各级试验压力下的透水率应按下式分别计算，宜取结果的最大值作为试段透水率，试验压力大于临界压力的结果不宜认定为透水率：

$$q = \frac{Q}{lP} \quad (7.2.6)$$

式中： $q$ ——试段的透水率，吕荣（Lu）；

$l$ ——试段长度，m；

$Q$ ——某级压力下稳定阶段的流量，L/min；

$P$ ——某级压力下稳定阶段的试段压力，MPa。

7.2.7 当需要计算岩体渗透系数时，宜采用试验压力 1MPa 时对应的流量计算，并应符合本规程附录 C 中的规定。

### 7.3 报告提纲

7.3.1 试验报告内容宜包括前言、工程地质概况、技术标准及依据、试验目的和内容、试验设备和试验方法、试验数据及整理资料、成果分析、结论和建议。

## 附录 A 试验压力确定方法

## A.0.1 试验压力确定方法应符合下列要求：

1 当用安设在试段内的压力传感器（图 A.0.1-1）测压时，传感器测得的压力与压力计算零线至试验段的水柱压力的差应为试验压力，试验压力应按下列式计算：

$$P = P'_p - P_h + P_z \quad (\text{A.0.1-1})$$

式中：

$P$ ——试验压力，MPa；

$P'_p$ ——试段压力传感器记录压力，MPa；

$P_h$ ——孔口至试段中心的水柱压力，MPa；

$P_z$ ——孔口至压力计算零线的水柱压力，MPa。

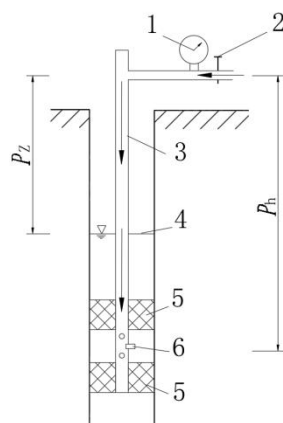


图 A.0.1-1 压力计算零线在孔口以下的钻孔高压压水试验

1-孔口压力表或压力传感器；2-进水阀门；3-工作管；4-压力计算零线；5-栓塞；6-试段压力传感器

2 当用安设在地面进水管上的压力表或压力传感器（图 A.0.1-1）测压时，试验压力应按下列式计算：

$$P = P_p + P_z - P_s \quad (\text{A.0.1-2})$$

式中：

$P_p$ ——孔口部位压力表、压力传感器显示压力，MPa；

$P_s$ ——管路压力损失，MPa；

3 压力计算零线在孔口以上时（图 A.0.1-2），应按本规程式（A.0.1-1）和式（A.0.1-2）计算，试验压力时  $P_z$  应反号。

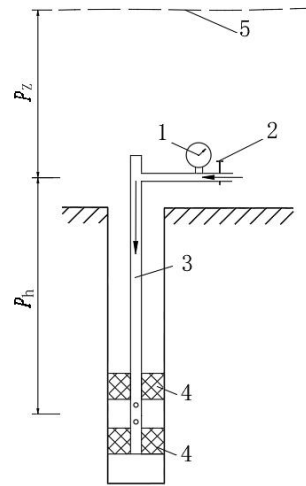


图 A.0.1-2 压力计算零线在孔口以上钻孔高压压水试验

1-孔口压力表或压力传感器；2-进水阀门；3-工作管；4-栓塞；5-压力计算零线



B.0.2 试段安装记录表宜符合表B.0.2的规定，电子化试验的结果报告中应包含表中主要信息。

表B.0.2 试段安装记录表

序号	工作管组成			试段		
	工作管内径/接头内径 (mm)	根数 (根) / 接头数 (副)	总长 (m)	孔深 (m)	试段中心至孔口距离 (m)	试段长度 (m)
1						
2						
3						
4						
5						
...						

B.0.3 试验水位观测记录表宜符合表B.0.3的规定。

表B.0.3 试验水位观测记录表

时间		孔口至孔内水位 (m)	水位差 (cm)
时	分		

B.0.4 试验岩体透水率和渗透系数计算成果表宜符合表B.0.4的规定，电子化试验的结果报告中应包含表中主要信息。

表B.0.4 岩体透水率和渗透系数计算成果表

$P$ - $Q$ 曲线类型		
计算参数	选用压力 $P$ (MPa)	
	流量 $Q$ (L/min)	
	试段长度 $l$ (m)	
计算结果	透水率 $q$ (Lu)	
	渗透系数 $K$ (m <sup>3</sup> /d)	

B.0.5 试验 $P$ - $Q$ - $t$ 曲线可采用纸质绘制或电子图形制作，纸质绘制时坐标轴比例（图B.0.5）宜符合下列1-3款规定，电子图形制作时宜符合第4-6款的规定：

1  $P$ 轴坐标 1mm 代表 0.1MPa。

2  $Q$ 轴坐标 1mm 代表 1L/min。

3  $t$ 轴坐标 1mm 代表 1min。

4  $P$ 轴、 $Q$ 轴和 $t$ 轴坐标的次要网格的单位长度宜一致，分别代表 0.1MPa、1L/min

和 1min，主要网格单位 10 倍于次要网格，可不显示次要网格。

5 压力坐标轴最大值宜为 10MPa、流量坐标轴最大值宜为 100L/min。当实际压力或流量低于或超出上述限值时，宜同比例缩小或增加压力和流量的最大值。

6 曲线图上各点应依次用直线相连，升压阶段用实线，降压阶段用虚线，彩色印刷时可采用彩色线条。

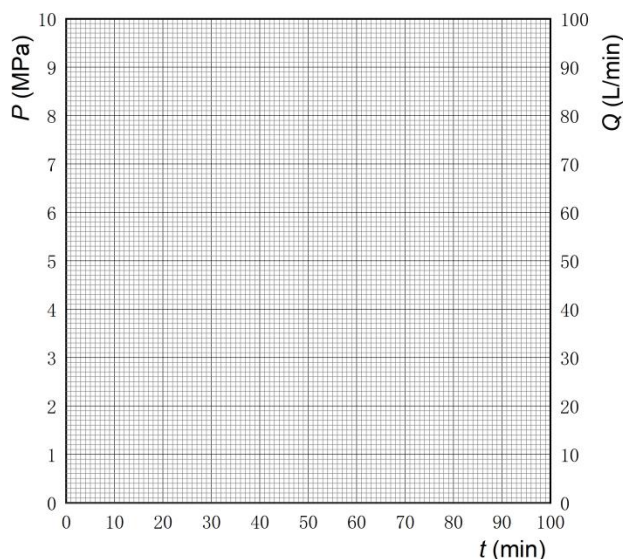


图 B.0.5  $P$ - $Q$ - $t$  曲线绘制比例

B.0.6 稳定阶段试验 $P$ - $Q$ 曲线可采用纸质绘制或电子图形制作，纸质绘制时坐标轴比例

（图B.0.6）宜符合下列1-2条规定，电子图形制作时宜符合第3-5款规定：

1  $P$  轴坐标 1mm 代表 0.1MPa。

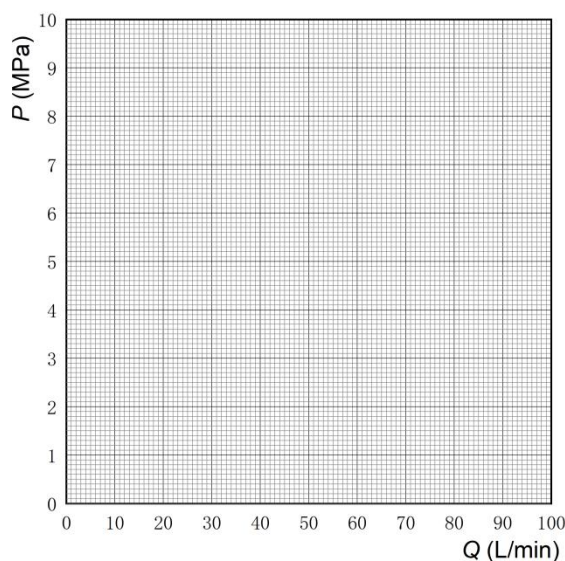
2  $Q$  轴坐标 1mm 代表 1L/min。

3  $t$  轴坐标 1mm 代表 1min。

3  $P$  轴、 $Q$  轴和  $t$  轴坐标的次要网格的单位长度宜一致，分别代表 0.1MPa、1L/min 和 1min，主要网格单位 10 倍于次要网格，可以不显示次要网格。

4 压力坐标轴最大值宜为 10MPa、流量坐标轴最大值宜为 100L/min。

5 曲线图上各点应依次用直线相连，升压阶段用实线，降压阶段用虚线，彩色印刷时可采用彩色线条。

图 B.0.6  $P$ - $Q$  曲线绘制比例

B.0.7 试验的 $P$ - $q$ 曲线绘制可采用纸质绘制和电子图形制作，纸质绘制的比例（图B.0.7）应符合1-2款规定，电子图形制作应符合第3-5款规定：

1  $P$  轴坐标 1mm 代表 0.1MPa。

2  $q$  轴坐标 1mm 代表 0.1Lu。

3  $P$  轴和  $q$  轴坐标的次要网格的单位长度宜一致，分别代表 0.1MPa 和 0.1Lu，主要网格 10 倍于次要网格，可不显示次要网格。

4 压力坐标轴最大值宜为 10MPa、透水率坐标轴最大值宜为 10Lu。当压力和渗透率均较小时，宜同比例缩小最大值。

5 曲线图上各点应依次用直线相连，升压阶段用实线，降压阶段用虚线，彩色印刷时可采用彩色线条。

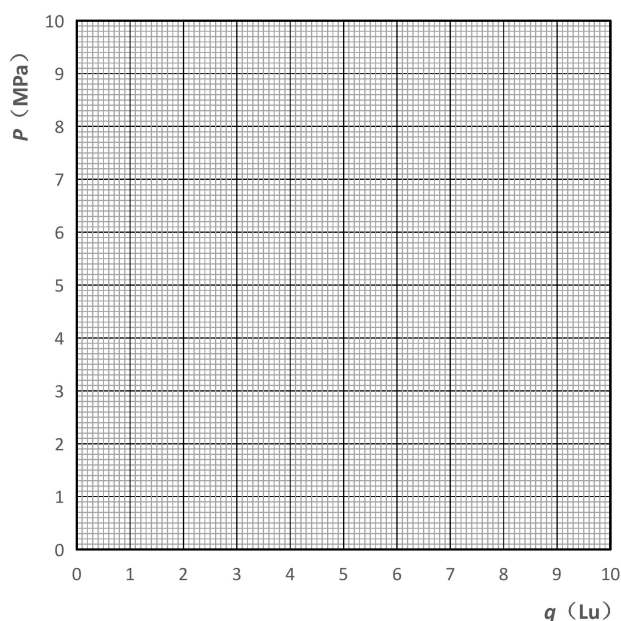




图 B.0.7  $P$ - $q$  曲线绘制比例

B.0.8 钻孔高压压水试验成果汇总表宜符合表B.0.8的规定，电子化采集的试验报告应包含表中的主要内容项。

表B.0.8 工程钻孔高压压水试验结果汇总表

试 段 编 号	试验段					$P$ - $Q$ 曲线类 型	试段透水率 (Lu)	对应试验 压力(MPa)	备 注
	深度 (m)		试段长 度 (m)	高程 (m)					
	起	止		起	止				

## 附录 C 岩体渗透系数计算

C.0.1 当试段位于地下水位以下，透水率 $q$ 小于10Lu，稳定阶段 $P$ - $Q$ 曲线为层流型（A型）时，可按下列公式计算岩体渗透系数：

$$K = \frac{Q}{2\pi Hl} \ln \frac{l}{r_0} \quad (\text{C.0.1})$$

式中： $K$ ——岩体渗透系数， $\text{m}^3/\text{d}$ ；

$Q$ ——压入流量， $\text{m}^3/\text{d}$ ；

$H$ ——试验水头， $\text{m}$ ；

$r_0$ ——钻孔半径， $\text{m}$ 。

C.0.2 当岩体透水率大于10Lu时，宜采用其它水文地质试验方法测定岩体渗透系数。

## 本规程用词说明

- 1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
  - 1)表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
  - 2)表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
  - 3)表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
  - 4)表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合...规定”或“应按...执行”。

## 引用标准名录

工程岩体分级标准 GB/T 50218

水利水电工程钻孔压水试验规程 SL 31

水电工程钻孔压水试验规程 NB/T 35113

团体标准

水利水电工程钻孔高压压水试验规程

标准编号 (四号宋体)

条文说明

## 制 定 说 明

依据《工程建设标准编写规定》（建标[2008]182号）的要求，经编写组广泛调查研究，认真总结钻孔高压压水试验相关工程经验，在广泛征求意见的基础上，参考并与国家和行业相关技术标准相衔接，数次易稿编制而成。

为便于广大技术人员和科研人员在使用本标准时能准确理解条文要义，编写组按章、节、条、款、项等顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明，供读者作为理解和把握标准规定的参考。

限于编写时间和水平有限，本标准难免有疏漏之处，希望广大读者批评指正，以便再版修订时加以改进。

# 目 次

1 总则 .....	27
2 术语和符号 .....	28
3 基本规定 .....	29
4 试验设备 .....	34
4.1 止水栓塞 .....	34
4.2 供水设备 .....	34
4.3 压力管路 .....	35
4.4 量测设备 .....	36
5 试验准备 .....	38
6 现场试验 .....	53
6.1 试段隔离 .....	39
6.2 水位观测 .....	39
6.3 压力和流量观测 .....	39
7 试验资料整理 .....	41
7.1 资料整理 .....	41
7.2 结果分析 .....	43

## 1 总则

1.0.1 本规程总结二十多年来钻孔高压压水试验科技成果和工程经验，首次将最高试验压力调整、压力管路、电子化量测设备要求等内容纳入规程，厘清了在试段内进行压力采集情况下试验压力计算方法，明确了试验准备内容，这体现了新世纪以来试验技术和装备的进步。本规程是国内第一部关于钻孔高压压水试验的专门性规程，填补了水利水电行业在钻孔高压压水试验方面的标准空白。

钻孔高压压水试验有了解岩体在高水压下的“渗透特征”、“渗透稳定性”和“岩体结构面的张开压力”的三个目的。“渗透特征”在规程中采用不同压力下的透水率表征。“渗透稳定性”指岩体内松散物质抵抗渗透变形的能力，由不同试验压力下岩体的渗透流量数据和  $P$ - $Q$  曲线的分型体现。岩体结构面的张开压力在本规程和其他相关规程中由“临界压力”表征，其概念与《水工隧洞设计规范》（SL279-2016）中提出的“水力劈裂”含义（未释义，被归入地应力范畴）接近，本规程原有框架拟将水力劈裂试验包含在内，送审稿审查认为后者宜独立编写规程，相关内容可参考其他文献。

1.0.2 本规程将试验压力 1MPa 作为区分常规压水试验和高压压水试验的标准，但包括仅最高试验压力大于 1MPa、主要采用本规程规定进行的钻孔高压压水试验。



## 2 术语和符号

2.1.3 透水率的单位吕荣 (Lu) 定义为在 1MPa 试验压力下单位长度单位时间内压入的水量，编者注意到该单位在水利水电工程勘察设计中具有特殊含义，为了将其应用于高压压水试验并与行业习惯用法相适应，本规程扩展了吕荣的含义，将其定义为在单位压力 (MPa) 下每米试验段每分钟压入的水量。

### 3 基本规定

3.0.1 试段隔离方法有单栓塞法和双栓塞法，鉴于双栓塞试验可提升造孔效率，并能保证高压封隔的可靠性，本规程推荐采用双栓塞法。

压水试验求得的透水率是试段的平均值。如果试段过长可能影响岩层透水率的精度，如果试段过短，又会增加压水试验的次数和费用。国内外有关规程规定的试段长度在3m~6m之间，多数为5m。本规程与上述规定保持一致。

孔壁不完整可能会导致栓塞止水失效或破损，为了保证试验结果可靠和保护止水栓塞，当试验孔段分布有断层破碎带、裂隙密集带、溶蚀带等强透水带孔段，或遭遇溶岩洞穴、孔壁破碎等状况孔段时，试段长度可根据具体情况进行调整。

3.0.2 钻孔水文地质条件多变情况下，不同试段的试验结果可能有较大差异，需要有经验的试验人员掌控试验进程，而根据岩体完整性情况采用不同试验方法可稳妥取得数据。同时，由于高压压水试验是一种破坏性的原位试验，一旦岩体的原始特性被破坏将无法复原，因此，在必要时试验人员可与地质人员沟通，根据其要求决定下一步试验方法。一般而言，应按照岩体完整性和工程运行期岩体受力情况采用不同方法进行升降压循环试验。比如在完整和较完整岩体中，应分别采用快速法和中速法，对于其他类型岩体采用慢速法，对于工程运行期存在加载卸载的情况，通常采用多循环法。岩体完整性划分可参考《工程岩体分级标准》GB 50218 3.2.3 条的规定。在抽水蓄能电站引水隧洞，调压井、地下厂房等一些重要建筑物的钻孔压水试验中，为了解高压状态下的岩体渗透特性和渗透稳定性的临界压力，可采用多种方法结合，为设计提供参考依据。

3.0.3 高压压水的最高试验压力一般按照建筑物工作水头乘以安全系数，安全系数一般取值1.2~1.5，本规程建议安全系数取值1.2，可向上取整。但在以下情况时，为了减少不必要的试验过程或取得更多的试验数据，可对最高试验压力进行动态调整。例如：在地面钻孔上部试验时，为了减少试段劈裂情况的发生，可降低的最高试验压力；在平洞内进行试验时，为了形成与地面试验同等程度的水力坡降，可调高最高试验压力。此外，我国深埋引调水隧洞工程有压隧洞的工作水头一般低于1MPa，按照上述“外水”压力加上安全系数的最高试验压力不超过1.5MPa。以引江补汉工程为例，水文监测结果显示部分隧洞岩体的承压水（外水）压力超过6MPa，高压力下的承压水与隧洞交汇有可能导致隧洞围岩劈裂和衬砌失效，该类工程的最高试验压力可参照隧洞部位的水文监测资料结果进行。当试段位于基岩面以下较浅部位时，还可以进行少量试验用以确定最大试验压力，以不引起岩体变形抬动和岩体破裂为准。

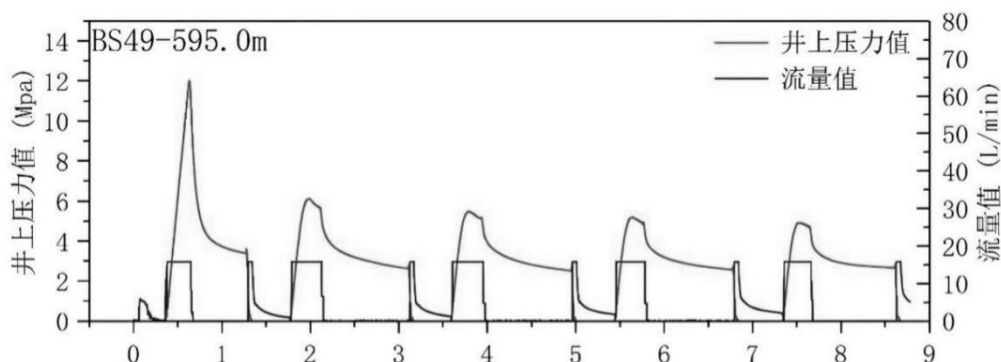
3.0.4 采用多级压力循环试验可以将不同压力下流量变化情况进行对比分析，更为详细准

确的了解渗流状态或裂隙状态的具体情况、合理可靠的确定岩体真实的渗透性，了解岩体的渗透稳定性。规程规定高压压水级差分为 5 级~10 级，一般而言，分级越多试验成果精度越高，但需要考虑时间和费用因素。鉴于当前最多的水电工程项目为抽水蓄能电站，其工作水头一般为 500m 左右，最高试验压力超过 5MPa，故在压力分级 5 级至 10 级的情况下，建议压力阶段的级差设定为 0.5MPa~1.0MPa。而对于工作水头低于 5MPa 或者大于 10MPa 的情况，压力阶段的级差可进行适当调整。表 3.0.4 为一些工程高压压水试验的压力取值。

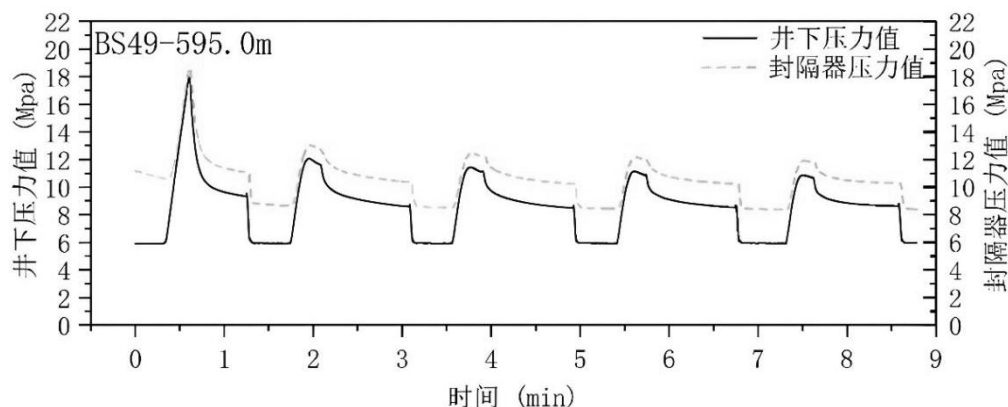
高压压水试验在断层、裂隙发育带的多循环试验中，断层和裂隙中的充填物被冲走后易形成通道，每一循环最大试验压力会减小，分级压力值可进行适当调整。

3.0.5 当试段渗透率低于 1Lu 时  $P$ - $Q$  曲线接近直线，在试段长度为 3m~6m 的条件下，规定为各压力阶段的稳定流量均小于 3L/min 时不再进行降压阶段试验，该规定保证了各压力阶段的渗透率均低于 1Lu。

3.0.6 已有深孔地应力测试经验显示（图 1），试段内的压力传感器读取压力（ $P_p'$ ）为试段实际压力，数值等于地面水泵施加压力（ $P_p$ ）和地面至试段的水柱压力（ $P_h$ ）之和减去工作管的损失压力（ $P_s$ ）。采用该数据进行透水率计算时，还需要减去岩体裂隙水压力，因此，试段内进行压力数据采集时，试验压力需要减去地面至试段的水柱压力，加上地面至压力计算零线的水柱压力（ $P_z$ ），结果为本规程的式（A.0.1-1）。



(a) 地面（井上）压力和流量采集曲线



(b) 试段内（井下）试验压力采集曲线

图 1 地面（井上）和试段内（井下）采集试验压力对时间曲线

某抽水蓄能电站接近高程同岩层中地面和洞内试验结果进行对比显示（图 2），洞内试验时的孔口压力（ $P_p$ ）减去试段至压力计算零线的水柱压力（ $P_z$ ）曲线（深色曲线）与地面试验曲线规律较为一致。分析认为，除非试验岩体为干燥岩或地下建筑物开挖后形成“地下水空腔”，则平洞内试验时试段至压力计算零线的水柱压力（ $P_z$ ）将作为“反向”的、由岩体深部至试段的压力坡降，高压压水试验需要首先平衡该压力，之后才能形成由孔内至钻孔孔壁岩体的压力坡降并产生渗透流量。因此，若有试段呈涌水状态，所获得的水位观测压力应在试验压力中扣除，无观测资料且钻孔水位与孔口持平时  $P_z$  宜赋予零值。

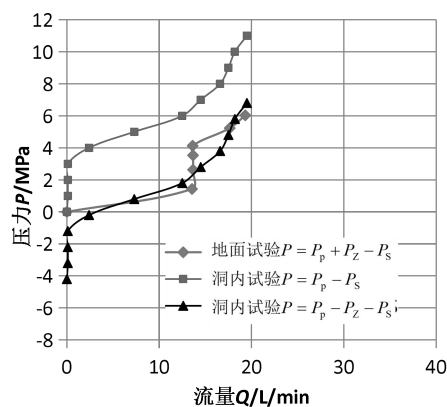
图 2 地面与洞内高压压水  $P$ - $Q$  曲线比较

表 1 代表性工程高压压水试验压力取值

序号	工程	压力阶段 压力分级	孔深区间 (m)	压力值(MPa)	试段 长度(m)	单位
1	呼和浩特抽水蓄能电站	3 阶段 5 分级	—	1、3、5、3、1	5.0	北京国电水利电力工程有限公司
2	地应力对裂隙岩体渗流特性影响的研究	3 阶段 5 分级	—	2、4、6、4、2	5.0	中国科学院武汉岩土力学研究所
3	绩溪抽水蓄能电站	5 阶段 9 分级	50~100	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、2.0、1.5、1.0、0.5	5.0	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
			100~150	0.6、1.2、1.8、2.4、3.0、2.4、1.8、1.2、0.6		
			150~200	0.8、1.6、2.4、3.2、4.0、3.2、2.4、1.6、0.8		
4	福建周宁抽水蓄能电站	5 阶段 9 分级	—	1.6、3.2、4.8、6.4、8.0、6.4、4.8、3.2、1.6	5.0	
5	长龙山抽水蓄能电站	6 阶段 11 分级	5~100 (探洞内)	2.2、4.4、6.6、8.8、11、13、11、8.8、6.6、1.4、2.2	5.0	
6	琼中抽水蓄能电站	15 阶段 29 分级	380~520 (探洞内)	0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、6.5、6.0、5.5、5.0、4.5、4.0、3.5、3.0、2.5、2.0、1.5、1.0、0.6、0.3	5.0	中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司
7	深圳抽水蓄能电站	7 阶段 13 分级	80~102	1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、6.0、5.0、4.0、	5.0	长江水利委员会 长江科学院
8	安徽桐城抽水蓄能电站	6 阶段 11 分级	77~350	1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、5.0、4.0、3.0、2.0、	4.0	
9	福建云霄抽水蓄能电站	7 阶段 13 分级	346~421 85~121 (平洞内)	1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、6.0、5.0、4.0、3.0、2.0、1.0	4.2	
10	湖北花园抽水蓄能电站	6 阶段 11 分级	最大测深 529m(钻孔底部 100m)	1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、5.0、4.0、3.0、2.0、1.0	4.5	
11	滇中引水工程	5 阶段 9 分级	270~275	0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、1.5、1.0、0.6、0.3	5.0	
12	引江补汉工程	6 阶段 11 分级	407~993 (钻孔底部 100m)	1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、5.0、4.0、3.0、2.0、1.0	3.0~4.5	

3.0.7 复杂地质条件钻孔中不同试段的地下水压力有可能存在较大差异，这在地面深钻孔中时有发现，例如：局部有承压水、套管部位漏水而其它部位正常。对此，单个试段栓塞座封以后，对工作管进行水位或压力观测极为重要，其结果代表了该试段真正的压

力计算零线，可提升试验结果的准确度。在无观测结果的情况下，图 3.0.7 显示了采用稳定水位作为压力计算零线与试段关系的一般确定原则方法，对竖直钻孔和倾斜钻孔都适用。

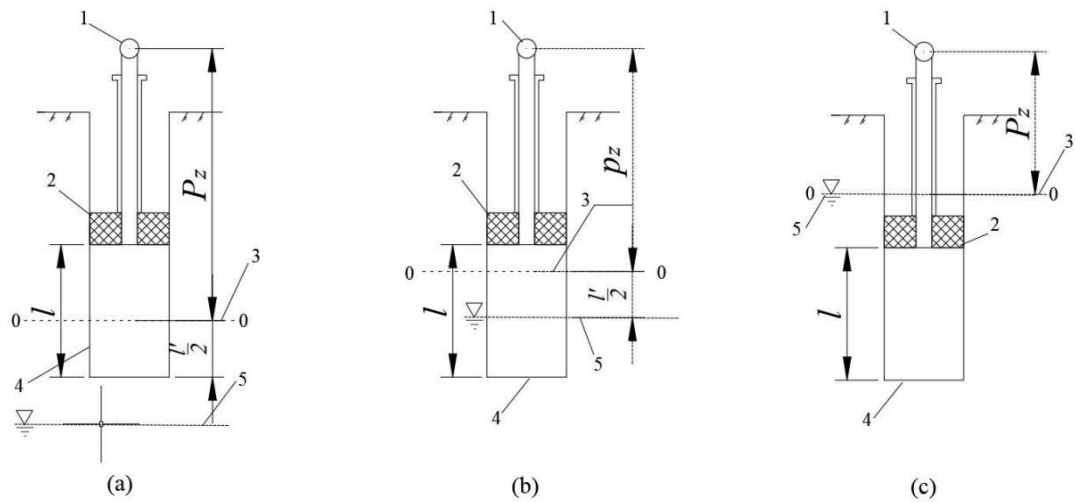


图 3 压力计算零线确定示意图

1-压力表；2-试验栓塞；3-压力计算零线；4-试段长度；5-地下水位

3.0.8 确定工作管路压力损失方法有实际测定和公式计算两种。对内径不一致的管路，用公式计算与实际测定结果可能差异较大，因此，当采用钻杆作为工作管进行压水试验时，应在地面测定每米管路压力损失，确定方法如下：钻杆和每副接头在不同流量下的压力损失，并编制出图表供现场试验时使用。原水利部东北勘测设计研究院对管路压力损失进行了实测，实测所用每根钻杆长度为 5m，钻杆外径 50mm，内径 38mm，接头外径 50mm，内径 22mm，管路压力损失测定结果见表 3.0.8。此外，按照计算公式（3.0.8）对上述尺寸钻杆在不同工况条件下的压力损失进行了计算，结果见表 2。

表 2 管路压力损失测定结果

流量 (L/min)	每米钻杆 压力损失 (10 <sup>-2</sup> MPa)	每副接头 压力损失 (10 <sup>-2</sup> MPa)	不同管长的压力损失(10 <sup>-2</sup> MPa)			
			25m	50m	75m	100m
25	0.010	0.090	0.61	1.31	2.01	2.71
50	0.085	0.211	2.97	6.15	9.33	12.51
75	0.140	0.591	5.86	12.32	18.77	25.23
100	0.212	1.177	10.01	21.19	32.38	43.56

3.0.10 用于膨胀栓塞的气体不应选用氢气等易燃、易爆或有毒气体，氧气具有氧化作用能加速设备老化，也不宜适用，推荐使用氮气或者压缩空气，以确保试验过程满足安全和环境保护的要求。

## 4 试验设备

### 4.1 止水栓塞

4.1.1 止水可靠是对栓塞的基本要求,承压能力和栓塞长度是保证其止水能力的具体要求。其中栓塞长度对栓塞附近岩体的渗流稳定性具有较大影响,已有试验结果表明,当栓塞长度达到 7.5 倍钻孔孔径时,绕渗量增加速度减缓。该成果与伯利斯(J.C.Bliss)和拉许顿(K.R.Rushton)用数学模型研究栓塞长度的影响得出的结论基本一致。水压致裂法地应力试验所使用、长度为 1m 止水栓塞的可靠止水能力大于 20MPa,该类栓塞可应用于高压压水试验。

4.1.2 止水栓塞有双管循环式、单管顶压式、液压式、气压式和气液混合式等多个类型,只要栓塞性能达到相关要求均可使用。其中双止水栓塞在钻孔为干孔且孔口至稳定水位的水柱压力高于栓塞自缩压力时,液压栓塞在试验结束后由于胶囊内的水无法排出会导致栓塞无法缩回解封,会导致试验无法连续试验且有可能造成钻杆和试验设备损失。对此,双管法必须采用气压式栓塞,单管法则必须配置栓塞卸压装置。

4.1.3 不起钻压水试验止水栓塞可在钻进过程中不起钻试验,与绳索取心钻杆的高效钻进相匹配,该类型栓塞在通过能力验证后可应用。

### 4.2 供水设备

4.2.1 目前用于高压压水的水泵种类多样,在设备动力、转速、活塞数量等方面具有较大差异。其中设备动力类型有电动、内燃机和液压,电动水泵转速范围有 750 转/分至 3 000 转/分多个类型、活塞数量有更大差异。为了保证出水稳定和高压条件下稳定供水,应尽量选用高转速、多活塞数量、水泵的工作压力大于最大试验压力的 1.5 倍的水泵。一般而言,最大输出压力等于 10MPa 的水泵可基本满足高压压水试验需求。

钻孔高压压水延续常规压水试验对水泵流量的要求,即总流量应大于等于 100L/min,但该流量只能测试试段长 5m 时岩体透水率为 20Lu 的试段达到 1MPa,最大试验压力为 5MPa 时岩体的透水率小于 4Lu。因此,渗透率大的地层需要增加水泵数量或选用更大流量的水泵。基于国内钻孔孔位多数交通不便、设备运输不易、钻机孔位一般不具备大功率电源的实际情况,本规程增加了可变通的情况:采用多台水泵并联供水或采用内燃机直接驱动型水泵。

4.2.2 高压压水的压力波动影响试验结果和压力量测,而试验供水受水泵类型、进水状况和管路组建等条件易产生压力波动,在试验管路中增设空气储能器可抚平部分压力和流量波动。以绳索取心钻杆或者液压钻机匹配钻杆作为工作管大大增加了工作管容积,可减小试验压力波动,该情况下可不设置稳压罐(筒)。

### 4.3 压力管路

4.3.1 高压压水试验设备组建依据工作管路数量可分为双管法和单管法两类。双管法采用两条管路从钻孔孔口连接到测试部位，分别对应止水栓塞和试验孔段，工作管对应试验孔段。该方法试验设备多，操作复杂，一般适用于孔深小于 200m 的浅钻孔。单管法适用于深钻孔测试，孔口连接测试部位的仅有工作管，需要在其底部设置切换阀以实现对止水栓塞和试验孔段水路的操控。除了上述孔深原因外，工作管类型会影响设备组建方法。当工作管路为地质钻杆或自备工作管时，一般单管和双管试验均可选用。当采用绳索取心钻杆或液压钻机配套钻杆作为工作管进行双管试验时，封隔器对应管路需要置于钻杆内，该情况下栓塞下放和收回操作均较为繁琐，不建议采用该方法试验。

4.3.2 从提高试验效率和钻机配合安全的角度出发，推荐采用钻孔钻进所使用钻杆作为试验工作管。目前有小口径轻型压水管供选择，但部分压水管在大流量试验时压力损失很大。对此，本规程要求工作管内径不应小于 20mm。按照式 3.0.8 对 20mm 内径工作管和 50 钻杆进行了压力损失对比计算，结果见表 3，其中 $\lambda$ 取值为  $3 \times 10^{-4} \text{MPa/m}$ 。工作管内径为 20mm、不同流量和工作管长度下的压力损失结果序号为 1~12，50 型地质钻杆（50 钻杆内径为 38mm，钻杆接头内径 22mm，单根长 5.0m）在不同工况下的计算结果序号为 13~24。

结果显示，当工作管内径为 20mm、长度为 100m、流量为 50L/min 时，长管压力损失已不可忽略；当流量为 100L/min、工作管长度为 1 000m 时，长管压力损失超过 5MPa。因此，更小内径的工作管不应用于高压压水，尤其是渗透率大的地层试验。对比 50 型地质钻杆压力损失的计算结果和实测结果（表 2）显示，当工作管长度为 100m 时，流量在 50L/min 以下时计算值大于实际测定值，在 50L/min 以上时计算值小于实际测定值，但均小于内径为 20mm 水管的长管压力损失计算值。

表 3 高压压水工作管内径压力损失计算

序号	工作管内径/mm	流量/L·min <sup>-1</sup>	工作管长度/m	长管压力损失/MPa	序号	工作管内径/mm	接头内径/mm	流量/L·min <sup>-1</sup>	工作管长度/m	长管/总压力损失/MPa
1	20	10	100	0.01	13	38	22	10	100	0.00/0.00
2	20	20	100	0.02	14	38	22	20	100	0.00/0.01
3	20	50	100	0.13	15	38	22	50	100	0.02/0.06
4	20	100	100	0.52	16	38	22	100	100	0.09/0.25
5	20	10	500	0.03	17	38	22	10	500	0.00/0.01
6	20	20	500	0.10	18	38	22	20	500	0.02/0.05
7	20	50	500	0.60	19	38	22	50	500	0.11/0.31
8	20	100	500	2.36	20	38	22	100	500	0.44/1.26
9	20	10	1 000	0.05	21	38	22	10	1 000	0.01/0.03
10	20	20	1 000	0.18	22	38	22	20	1 000	0.03/0.10



11	20	50	1 000	1.40	23	38	22	50	1 000	0.22/0.63
12	20	100	1 000	5.45	24	38	22	100	1 000	0.87/2.52

4.3.3 双管法高压压水试验有两种组建形式，一种是双软管形式，通过额外设置的钢索进行定位安装；另一种采用钻杆或自带金属管作为工作管路，止水栓塞回路采用高压软管。前者不依赖钻机设备独立进行试验，需要配备软管和卷扬设备，容易因管路缠绕而造成设备损失。后者为常用形式，采用普通钻杆时软管固定在工作管外，以绳索取心钻杆和液压钻机配备钻杆作为工作管路时，止水栓塞对应软管需要悬挂在钻杆内。

4.3.4 单管双止水栓塞试验工作管底部必须接入切换阀，切换阀设计不合理会导致水路较大压力损失，建议切换阀最小通水截面积大于  $177\text{mm}^2$ ，相当于直径为  $15\text{mm}$  的通水截面积，这在技术上可以实现。

#### 4.4 量测设备

4.4.1 本规程未排除读水表和压力表进行试验的传统做法，符合要求的量测设备均可用于高压压水试验。本规程推荐使用可将压力和流量数据电子化、可全过程显示和存储试验数据的量测设备。

4.4.2 高压压水试验所用压力和流量计量设备属于计量器具，按照国家计量要求应定期送检或校准。此外，量测设备经过运输和存放，为了确保设备正常和数据准确，在现场使用前应进行校验，其中压力数据采集数据可与压力表读数比对，流量计所采集数据应与准确流量进行比对。

4.4.3 压力量测设备包括压力表和压力传感器，为了兼顾测量范围和测量精度，规定工作压力宜保持在极限压力值的  $1/3 \sim 3/4$  有效范围内。压力表在运输和存储过程中可能被损坏，因此要求压力表指针反应灵敏，卸压后指针回零。压力传感器应采购线性度好、性能稳定的压电陶瓷式传感器。为了保证测试结果的准确，对压力表和压力传感器提出了测量精度指标。

4.4.4 流量是压水试验需要准确量测和记录的数据，常规钻孔压水试验多采用水表的公称压力一般为  $1.0\text{MPa}$ ，若直接用于高压压水试验存在安全隐患，将之串联在回水管中，利用水泵出水量推算流量的做法极易造成流量偏差。因此，本规程禁止采用低压水表，可以采用符合试验压力要求的高压水表。

流量计按照测量原理可分为容积式、压差式、浮子、涡轮、电磁和流体振荡等不同类型，行业内主要采用电磁式和涡轮式流量计。其中电磁流量计利用法拉第感应定律来检测流量，不受液体的温度、压力、密度或粘度的影响，具有检测含污染物液体、无压力损失、不易磨损的优点。涡轮流量计采用转子（涡轮）感受流体平均流速，用于高压压水试验转子易出现磨损和高压抱死情况。流量计的测量精度与测量量程相关，为了保

证较高的测量精度，建议单台水泵匹配流量传感器的量程在水泵额定排水量的 120%左右，采用多台水泵供水分别匹配流量计时，总的流量测量范围应不小于 120L/min。同压力量测设备一样，为了保证测试结果的准确，对流量计提出了测量精度指标

4.4.5 数显及记录设备种类多样，有的直接在压力传感器和流量计基础上做成数显式，并不输出信号，有的可输出模拟或数字信号，但无数显部件，具备上述全部功能既有集成一体的设备，也有分体组装、利用 IPAD 和笔记本电脑作为显示和存储的设备。推荐采用具备全部功能的设备，类似技术已在多个单位进行了多年应用，已是成熟技术。

1 数显及记录设备至少应具备数字化显示功能，这样可以通过人工读数完成试验，相对于读水表确定流量的方法，快速法试验也可以轻松应对。利用该类设备只能读取局部时间点的试验数据，是数字化的初阶应用，推荐采用数据电子化、全过程实时显示和存储的试验设备，这样可以直观观察压力和流量变化，方便掌控进程，后续还可以复现试验过程、快速进行数据处理。

2 对于数据采集频率而言，高采集频率可以详细记录压力和流量变化，但过高的频率并无太大意义，数据采集频率过低则会丢失部分试验变化细节，基于实践经验，建议数据采集频率范围宜为 0.1Hz 至 10Hz。

4 对于数据转换位数的要求在于保证数据转换的精度，采用 8 位的模/数转换足以满足试验要求、也匹配当前的技术发展水平。

4.4.6 当前压力计算零线主要参考钻孔稳定水位，试段的压力零线测量较少进行，建议对渗透率较大岩体部位的试段进行工作管内水位观测，以准确获得的压力计算零线。水位量测设备有水深测试仪、电阻式双线钻孔水位计、钻孔水文地质综合测试仪等，基本可以满足试验需求。

## 5 试验准备

5.0.1 为了保证现场试验能够高效、流畅和安全的完成，需要对钻孔稳定性、孔内清洁程度、试验用水、钻机及附属设施状况进行确认，发现条件不具备时应及早处理。

1 钻孔稳定和孔壁完整是高压压水试验的基本要求。钻孔不稳定条件下进行高压压水试验有可能导致钻孔坍塌，进而可能导致试验设备损失。孔壁不完整可造成止水栓塞绕渗和栓塞破裂，都会导致试验失败。

2 钻孔冲洗要求把钻具下到孔底、进行大流量冲洗，直至孔口回水清洁，肉眼观察无岩粉时方可结束。当孔口无回水时，洗孔时间不应少于 15min。洗孔要考虑大流量冲洗对孔壁稳定的影响，当在破碎地层或孔壁不稳定的孔段进行钻孔冲洗时，可视情况减少或增加冲洗时间。

3 高压压水应采用清水进行试验，现场需要具备充足的清水水源。当水源的泥砂含量较多时、或者含有漂浮物或油料等杂物时，前者需要对试验用水进行沉淀处理，后者需要事先采取去油污处理，否则会加速设备磨损或者影响试验结果准确性。

4 多数高压压水试验采用钻杆作为工作管路，试验过程中需要使用钻机和钻杆，试验前应确认钻机和钻杆的状况，否则可能影响试验进程，对钻杆需要检查有无破裂、弯曲、堵塞等现象。钻杆型号多样，需要确保试验钻杆与试验设备连接螺纹型号统一、连接可靠，否者也会影响试验进行。

5.0.3 为了保证现场试验过程高效且不出差错，有必要提前确定每个试段的采用试验方法，应依据建筑物高程、上库蓄水水位和试验段高程确定每个试段的最高试验压力、压力阶段和级差。

5.0.4 高压压水试验设备众多，历经长途运输和装卸，有必要在现场试验前组装设备，对高压水泵、管路、阀门和止水栓塞等进行试运行，以确保设备完备且完好可用。以钻杆为工作管时，现场试验前应进行密封性检验，不合格时要及时进行密封处理。

## 6 现场试验

### 6.1 试段隔离

6.1.3 采用液压或气压式双栓塞时，首先要对止水栓塞回路加压，使得双止水栓塞坐封于岩壁上。一般而言，液压式双止水栓塞胀塞压力在地面压力 3MPa~5MPa 情况下足以保证栓塞的止水效果。但对于深钻孔或孔壁极为光滑的情况，胀塞压力可能需要加大。采用气体膨胀气压式栓塞止水栓塞时，由于气体压缩比大，应试验验证其止水能力。无论何种止水栓塞，若岩体变形影响止水效果，也要选择较高的胀塞压力。

为了保证止水效果，不发生绕渗等现象，胀塞压力应小于岩体破裂压力，岩体劈裂压力可从前期的地应力试验资料中获取。止水栓塞回路在施加密封水（气）后在整个试验期间应保持密闭状态，但试验过程中其压力有明显降低时，应补液（气）以保证栓塞止水效果。

### 6.2 水位观测

6.2.1 下塞前后进行地下水位观测的目的是确定压力计算零线。当地层为同一含水层时，在下塞前后观测的地下水位是一样的。当存在多个含水层时，下塞前后观测的地下水位可能不同。对钻孔高压压水试验来说，起作用的是试段的地下水位而不是整个孔的混合水位，所以要求栓塞隔离试段后在工作管内观测水位。通过下塞后观测工作管内外的地下水位，可以了解岩体中含水层的分布和变化等水文地质特性，在某种意义上，这比一次压水试验更有价值。

6.2.3 当发现承压水时要获得一个相对准确的地下水位来确定压力计算零线，承压水在孔口附近时，可以参照 6.2.2 条的观测标准进行水位观测。

6.2.4 存在承压水水位远高于孔口的情况，此时不宜再进行水位观测，应将试段隔离且对工作管路充分排气后进行试段压力观测，依据观测结果计算压力计算零线，观测结束标准参考水位观测标准，仅将其换算为同等的压力标准。

### 6.3 压力和流量观测

6.3.1 高压压水试验前工作管应充分排气，然后再开始试验，否则将对试验结果有影响。当试验压力达到预定值并保持稳定后，方可进行流量观测。压力流量观测工作方式有两种方式：一种是调节压力使之稳定不变，观测流量随时间变化情况；另一种是调节流量使之稳定不变，观测压力随时间的变化情况。本规程根据水电工程习惯推荐第一种。

6.3.2 钻孔高压压水试验流量观测未排除水表观测法，还可以采用直接数显的量测设备，因此共有两种流量观测方式：人工观测记录方式和电子记录方式。第一种是传统方法，

现场读数、现场记录数据并及时做出试段结束的决定。第二种可以详细记录全过程的试验数据，具有避免现场读取和填写数据错误，可长期保存数据的优点。但该方式也需要在现场及时做出压水阶段是否结束的决定，因此仍需要有试验人员观测试验曲线，根据流量变化情况及时发出指令。本规程推荐采用第二种方式。具体规定如下：

(1) 观测方法。对于直读式流量计来说，及时了解试验流量变化并无困难，但采用水表测流量方式每分钟观测一次则过于紧张，故本规程如其它规程规定一致，每隔 1 分钟观测一次，视现场的具体情况而定。采用电子化记录方式时，流量曲线可以直观显示流量变化情况。一般情况下，压力稳定后流量也可以很快稳定，快速法只需要流量曲线保持平直无变化 5 分钟就可以判定试段结束。

(2) 观测结束标准和取值。理论上，流量在向稳定值趋近的进程中其变化值是随时间递减的。为了使试验成果更可靠，要求在某一时段内流量的变化值不大于某一标准，这样试验虽未达到真正稳定，但至少已进入缓变段，因而可以把试验误差控制在一定范围之内。参考国外资料，规定流量稳定后，连续 5 次流量读数最大值和最小值的相对差不大于最后一次读数的 10%即可结束阶段试验。

上述判定标准较为严谨，但高压压水流量计原理多样，在高压、流量基本稳定、高频次采集的情况下，有时流量数据在某些压力下（多是高压时）跳动增大，但平均流量在短时间内基本保持恒定，因此，若流量读数波动较大时，现场难以采用相对差和绝对差指标作为观测结束判定标准（原有标准规定以不大于 1L/min 为另一判断依据），对此，只需要流量曲线平直、且无明显的趋势变化超过规定时间即可结束阶段试验。采用相对差读数法取最后一次读数作为计算值，比取该时段内的平均值更合理。同理，采用电子化采集数据提交阶段流量时，宜采用最后一段时间的平均流量，这样一段时间内的平均流量可消除小的流量波动影响。

(3) 流量变化问题。理论上，当压力保持不变时，不会出现流量随时间变化的现象。因此，当出现这种情况时，需要查明原因。如果不是设备、仪表发生故障，压力和流量无法稳定，则需要在稳定回流量情况下并持续压水，直至压力和流量稳定，此时压力可以不遵守压力阶段的规定。流量无法稳定原因多数在于地面问题，如水泵取水口堵塞、高压下发电机供电电压（功率）降低和稳压筒稳压能力不足等。

6.3.4 在降压试验阶段，有时会出现水从岩体流入钻孔的现象，这种现象称为回流。产生回流现象的原因，是由于试验压力下降的瞬间，钻孔附近岩体内的水压力暂时高于试验压力，因而使水自岩体返流。这个过程一般持续数分钟至十余分钟。随着岩体内水压力逐渐下降，回流量逐渐降至为零，当岩体内水压力继续调整至低于试验压力之后，水重新流向岩体。在试验过程中，若出现回流时，建议保持试验压力，直至正向的流量出现并趋于稳定。需要注意的是，不可把流量从负经零到正这个变化过程中的试验流量认为零。

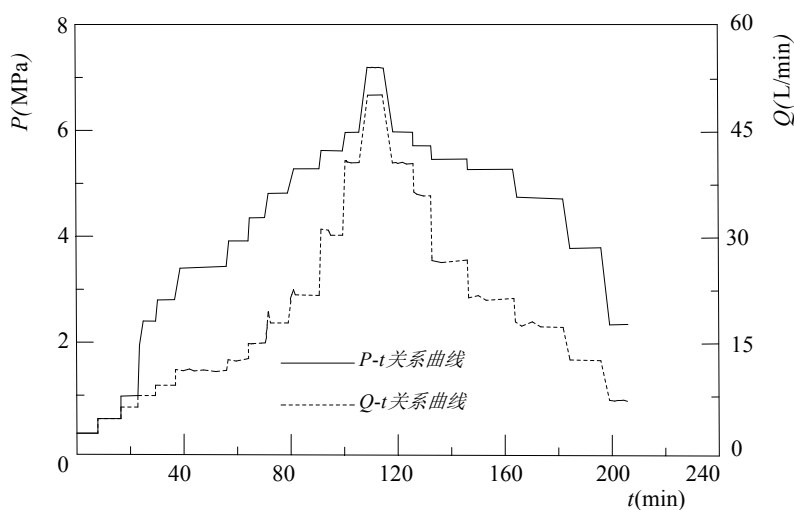
## 7 试验资料整理

### 7.1 资料整理

7.1.1 高压压水试验应以时间  $t$  为横轴、以试验压力  $P$  和压入流量  $Q$  为纵轴绘制  $P-Q-t$  关系曲线。该曲线既是高压压水试验最原始的记录，又是判别试验成果可靠性并绘制  $P-Q$  关系曲线的重要依据。图 4 (a) 给出了某抽水蓄能电站工程高压岔管区一钻孔试段采用快速法的  $P-Q-t$  关系曲线。与常规压水试验不同，当岩体较为破碎或试验压力高于岩体的临界压力时，试验压力可能难以稳定而发生衰减，这种情况下高压压水试验的终止需要符合规程 6.3.2 条的规定，还要再一次对该压力阶段进行试验。若试验压力不能维持稳定，则本阶段压力下高压压水试验成果的可靠性差，需要在试验成果的整理分析中予以剔除。

根据各级压力下稳定阶段的流量和压力值绘制高压压水试验的  $P-Q$  关系曲线，如图 4 (b) 所示。与常规压水试验类似，该曲线可用于确定  $P-Q$  关系曲线的类型，并判断岩体的渗透稳定性。根据各级压力下渗透率的计算成果，可绘制稳压阶段  $P-q$  关系曲线，如图 4 (c) 所示。完整、较完整试段岩体被完全劈裂后（超过临界压力），试验流量和透水率数据迅速增加，该情况下的流量和透水率增加来自于岩体裂隙的扩张，而非岩体透水率的增加，因此，本规程建议在岩体透水率分析中将岩体劈裂后的计算结果进行标示，并在数据统计时排除在外。

本规程推荐采用全过程电子化采集记录的试验技术， $P-Q-t$  关系曲线可以由试验记录数据快速生成，且包含试验细节，体现了技术进步。依据该技术获得的  $P-Q-t$  试验曲线和稳压阶段  $P-Q$  曲线分别见图 5 (a) 和图 5 (b)。



(a)  $P-Q-t$  关系曲线

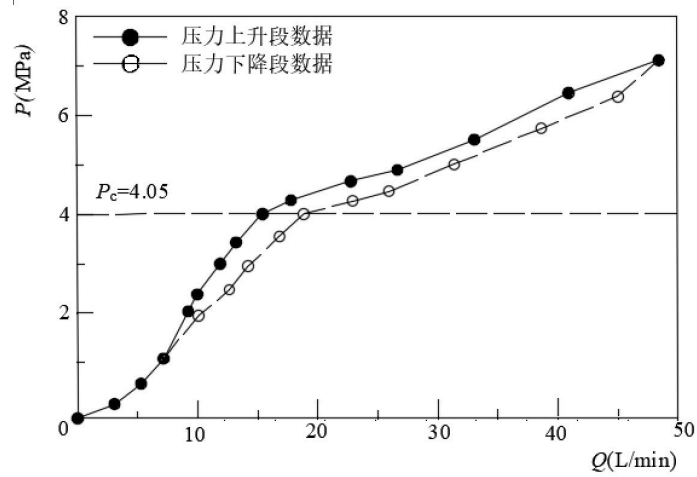
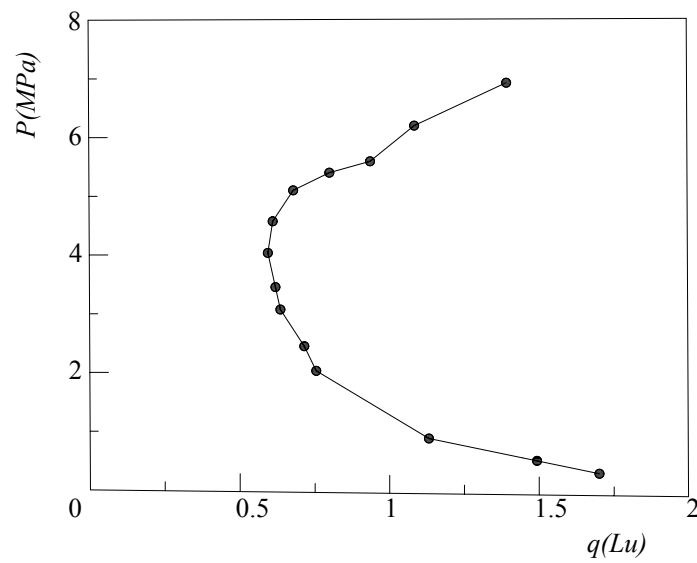
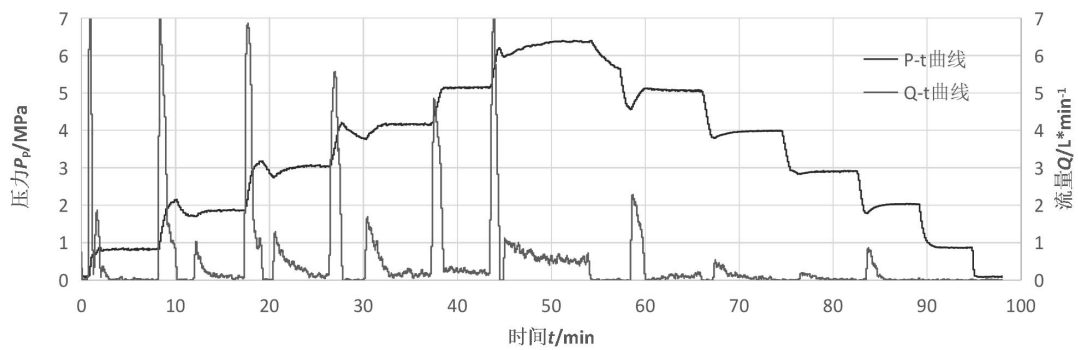
(b) 稳压阶段  $P$ - $Q$  关系曲线(c) 稳压阶段  $P$ - $q$  关系曲线

图 4 典型高压压水试验成果

(a) 电子化采集  $P$ - $Q$ - $t$  曲线

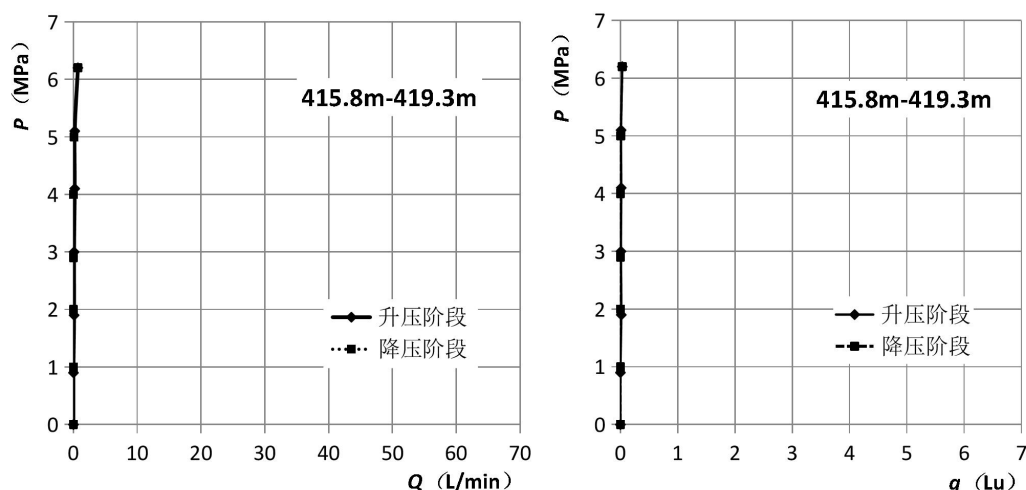
(b) 电子成图的  $P$ - $Q$  曲线和  $P$ - $q$  曲线

图 5 电子化采集及成图曲线

计算机成图与传统的手工格子纸绘图不同，未统一规定容易导致成图扭曲，影响成图质量。

7.1.2 设有观测孔、观测平洞时，通常是针对断层、节理密集带等不良地质体进行渗透试验，试验加压的钻孔通常被称为主动孔，观测孔被称为被动孔，通过在主动孔进行的高压压水试验，在被动孔（洞）观察渗透情况，在试验过程中要时刻关注观测孔、结构面及洞壁等变化情况，判断主动孔加压到什么压力值时，不良地质体发生渗漏，是否有析出物等现象，通过对比分析主动孔和观测孔（洞）的  $P$ - $Q$  关系曲线可以判断不良地质体的渗透特定和渗透稳定性，并通过主动孔和被动孔的总流量与试验总注水量的对比分析，判断不良地质体的影响范围。

## 7.2 结果分析

7.2.1 通过调研国内外压水试验的研究成果显示，目前针对高压压水  $P$ - $Q$  曲线类型的判断标准尚不全面和统一。表 7.2.1 中所显示典型曲线类型参考了钻孔常规试验方法的分类，采用的豪斯比和库兹纳尔的分类法，五种典型类型分别为：A 型（层流型）、B 型（紊流型）、C 型（扩张型）、D 型（冲蚀型）和 E 型（充填型）。具体判断方法为：根据升压阶段  $P$ - $Q$  曲线的形状和降压阶段  $P$ - $Q$  曲线与升压阶段  $P$ - $Q$  曲线之间的关系确定试段的曲线类型。

大量的高压压水试验表明，随着试验压力的增大， $P$ - $Q$  曲线的非线性将逐步增强，紊流型往往占据主导地位。对于非循环试验，曲线类型的确定方法对照典型曲线即可。对于循环试验，由于循环试验法往往用于破碎或较破碎岩体，随着循环次数的增加，不良地质体渗透特性会发生变化，即每一循环的曲线类型可能存在差别，此时曲线类型宜



按照最不利原则确定。

五种典型  $P$ - $Q$  曲线类型的特征及解释详细说明如下：

#### (1) 层流型 (A) 型

曲线特征： $P$ - $Q$  曲线中升压曲线为通过坐标原点的直线，降压曲线与升压曲线重合。

解释：渗流状态为层流。在整个试验期间，裂隙状态没有发生变化。

#### (2) 紊流型 (B) 型

曲线特征： $P$ - $Q$  曲线升压曲线为凸向  $Q$  轴的曲线，降压曲线与升压曲线基本重合。

解释：渗流状态为紊流（这里所谓的紊流，是所有非线性的压力-流量关系的统称）。在整个试验期间，裂隙状态没有发生变化。

#### (3) 扩张型 (C)

曲线特征： $P$ - $Q$  曲线中升压曲线大体上为凸向  $P$  轴的曲线，降压曲线与升压曲线基本重合。C 型曲线关键之处在于：在某压力之后流量显著增大，以 7 压力阶段试验为例（下同，略），且第 2 点与第 13 点（倒数第 2 点），第 3 点与第 11 点（倒数第 3 点），以此类推，第 6 点与第 8 点（倒数第 6 点）基本重合，至于第 1 和第 7 两点之间，可以通过坐标原点的直线，也可以是凸向  $Q$  轴的曲线。

解释：在试验压力作用下裂隙状态产生变化（原有裂隙加宽，隐裂隙劈裂），岩体渗透性增大，但这种变化是暂时的、可逆的，随着试验压力下降，裂隙又恢复到原来的状态，呈现出一种弹性扩张性质。从整个  $P$ - $Q$  曲线的变化中，可以看出裂隙弹性扩张作用与试验压力之间的关系，以及这种作用对原来渗流状态的干扰。

#### (4) 冲蚀型 (D 型)

曲线特性： $P$ - $Q$  曲线中升压曲线大体上为凸向  $P$  轴的曲线，降压曲线与升压曲线不重合，位于升压曲线的右侧，整个  $P$ - $Q$  曲线呈顺时针环状。D 型曲线关键之处在于，在某一压力之后，流量显著增大，具有  $Q_1 > Q_{13}$ ,  $Q_2 > Q_{12}$ , ...,  $Q_6 > Q_8$  特征。曲线中的其他变化对曲线类型划分来说不是本质的。

解释：在试验压力作用下裂隙状态产生变化，岩体渗透性增大，这种变化是永久性的、不可逆的。流量显著增大且不能恢复原状，多半是由于隐裂隙劈裂且与原有的裂隙相通或裂隙中的充填物被冲蚀、移动造成的。

冲蚀型  $P$ - $Q$  曲线中的升压曲线和降压曲线都会出现一些不同的变化。如升压曲线中的第 1 至 7 点与原点之间可能为直线，也可能为凸向  $Q$  轴的曲线，分别说明在产生冲蚀作用之前流态为层流或紊流；降压曲线可能为凸向  $P$  轴的曲线（说明一部分为可恢复的

弹性变形，一部分为不可恢复的冲蚀作用），也可能为直线或凸向  $Q$  轴的曲线（分别说明在冲蚀作用产生之后流态为层流或紊流）。总之，从整个  $P-Q$  曲线的变化中，可以看出隐裂隙劈裂或充填物冲蚀作用与试验压力之间的关系，这种作用对原来渗流形态的干扰，冲蚀作用的程度以及冲蚀后对渗流形态的影响等。

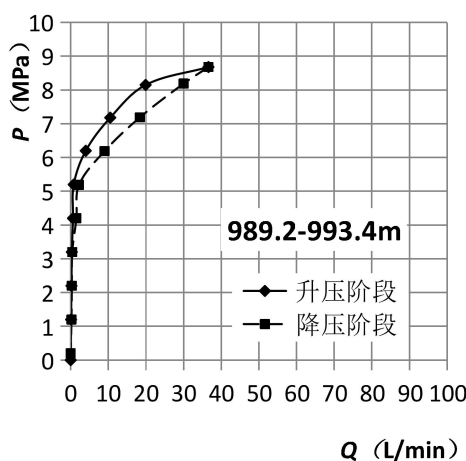
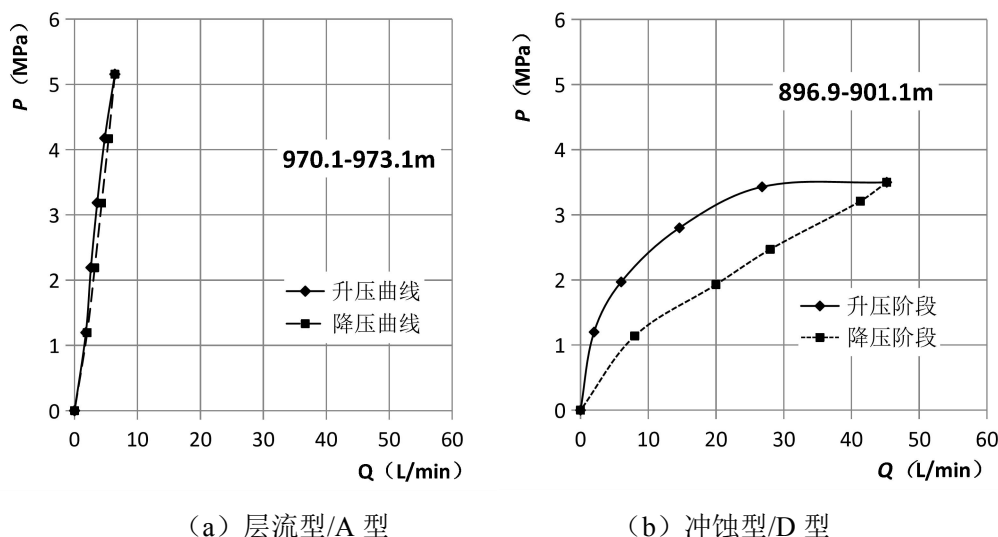
#### （5）充填型（E 型）

曲线特性： $P-Q$  曲线中，升压曲线为直线或凸向  $Q$  轴的曲线，降压曲线与升压曲线不重合，位于升压曲线的左侧，整个  $P-Q$  曲线呈逆时针环状。E 型曲线关键之处在于：具有  $Q_1 < Q_{13}$ ,  $Q_2 < Q_{12}$ , ...,  $Q_6 < Q_8$  特征,至于升压，降压曲线的形状对类型划分不起什么作用。

解释:试验期间裂隙状态发生了变化，岩体渗透性减小，这种减小大多是由于裂隙被部分堵塞造成的。此外，如裂隙处于半封闭状态，当被水充满后，流量即逐渐减小，甚至趋近于零。其曲线特点是：升压曲线凸向  $Q$  轴，降压曲线凸向  $P$  轴。把 E 型称为充填型，有两个含义，一是在试验过程中裂隙被移动的固体所充填；二是半封闭的裂纹被水所充填。

实际上，由于存在试验选段非单一岩层、试段岩体岩性、完整性、裂隙发育程度等岩石性状差异、试验程序不严格、试验数据量测误差、曲线画法不标准等各种原因使得试验所得  $P-Q$  曲线形态多样，与典型测试曲线形态有一定差异，致使  $P-Q$  曲线类型划分难以进行。对此，钻孔高压压水试验应尽量准确得到试验数据，并在压力计算零线确定、现场试验过程和结果整理过程中严格执行规程规定。图 6 为部分深孔地应力高压压水试验曲线及其类型判定结果。

$P-Q$  曲线中的试验压力计算均以“内外水压差”的方式进行，主要反映的是试段渗透特征，其类型划分具有表征试段渗透稳定性的含义。完全劈裂试段劈裂后的试验流量主要用于裂隙扩展，其后的流量和压力数据（包括回程至裂隙关闭前）的主要部分不是渗透流量，上述过程对曲线形态有较大的破坏作用。已有资料显示，该类型曲线往往在初始劈裂压力前呈现层流型特点，劈裂过程及劈裂后的形态可归为冲蚀型，整体上呈现非典型性形态（如图 6（c））。

图 6  $P$ - $Q$  曲线的画法及曲线类型判定

7.2.3 临界压力仅出现在完整和较完整岩体中, 对于完整岩体中的高压压水试验, 可根据  $P$ - $Q$  曲线最大曲率点法确定临界压力, 该方法也叫“拐点法”。对于较完整岩体, 临界压力的可按照图 7 所示图形, 通过前段和后段切线的交点确定临界压力。对于多循环试验, 完整岩体的临界压力值基本保持不变; 而对于较完整岩体, 临界压力值通常呈现先降低后趋于稳定的变化特征, 最后稳定的压力即为稳定临界压力。之前规程未明确临界压力计算方法, 应与附录 A 的试验压力确认方法一致。主编单位认为临界压力与岩体劈裂压力概念基本一致, 该试验压力计算存在争议, 相关问题有待进一步厘清。

7.2.4 对于紊流型 (B 型)  $P$ - $Q$  曲线, 若曲线存在临界压力, 则临界压力之前的曲线段可采用截距为零的二次多项式或幂函数拟合。其中, 截距为零的二次多项式或幂次函数拟合。其中, 截距为零的二次多项式的表达式如下:

$$H = c_1 Q + c_2 Q^2 \quad (1)$$

式中:

$H$ ——水头，m；

$Q$ ——流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$c_1$ 、 $c_2$ ——拟合参数。

式（1）表达了流量和压力之间的函数关系，可借助 Excel 等统计画图软件求得。当试验压力大于临界压力时，流量随试验压力的增大而急剧增大，岩体中的裂隙发生明显的扩张或水力劈裂，临界压力之后的试验曲线段对于近似确定岩体的渗透性与试验压力的相关性具有一定意义，如有必要，该曲线段可用其它函数拟合。对于不存在临界压力的紊流型  $P$ - $Q$  曲线，显然可采用上述函数拟合。

选用上述拟合函数的原因时其具有明确的物理意义，相应的拟合参数可直接用于确定水文地质参数。式（1）中，拟合参数  $c_1$  为  $P$ - $Q$  曲线的初始斜率，实质上表征了岩体渗透性的大小；而拟合参数  $c_2$  则反应了  $P$ - $Q$  曲线对线性流的偏离程度，即岩体中非线性流的发展程度，当  $c_2=0$  时退化为层流型（A 型）曲线。由此可见，上述拟合函数不仅反映了岩体中的渗流流态，且可退化为线性流公式，是线性流拟合公式在非线性流条件下的拓展，因此，本规程推荐采用上述函数对  $P$ - $Q$  曲线进行拟合。

7.2.5 水力坡降为水流岩渗透路径的水头降落值与相应渗透路径长度的比值。岩体中的临界水力坡降是一种近似理想状态下的值。渗流场中任一点的水力坡降（ $i$ ）可按下式计算：

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

其中  $\Delta H = H_1 - H_2$

式中：

$i$ ——水力坡降，无量纲；

$\Delta H$ ——流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$H_1$ ——主动孔水头，m；

$H_2$ ——观测孔水头，由渗压计得到，m；

$L$ ——渗透路径，主动孔至被动孔的距离，m。

7.2.6 抽水蓄能电站一般要求采用建筑物工作水头计算透水率以表征岩体渗透特征，该处理方式确定的透水率未必能够正确表征岩体的透水特性。以紊流型（B 型） $P$ - $Q$  曲线为例（图 7），由本规程式（7.2.6）可知，某一级试验压力下的透水率实质上与  $P$ - $Q$  曲线该点的割线斜率成反比，若建筑物工作水头小于临界压力，则随着试验压力的增大，透水率逐步减小（参阅图 4（c））。由于在该试验压力范围内，岩体中的渗流通道变化

不大，其渗透特性也基本保持不变，因此透水率的变化以及  $P$ - $Q$  曲线的非线性主要受岩体中的非达西流态控制；而当建筑物工作水头大于临界压力时，透水率将随着试验压力的增大而逐步增大，其原因是在临界压力之后，岩体中的裂隙逐渐扩张、裂隙网络的连通性逐渐增强，此时岩体的透水性显著增强，呈现出明显的试验压力相关性。一般情况下，初始阶段的透水率最大，该透水率恰好表征了岩体的本质渗透特性，与流态无关。

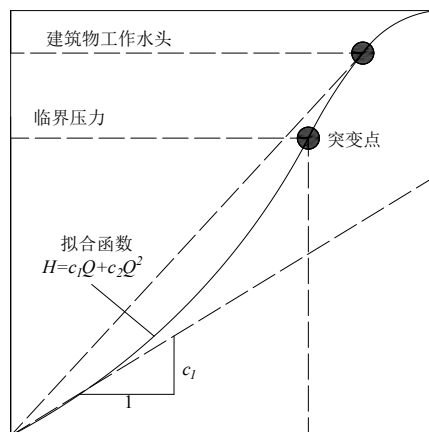


图 7 高压压水试验典型的紊流型  $P$ - $Q$  曲线

对于扩张型（C 型）和冲蚀型（D 型） $P$ - $Q$  曲线，按最不利原则选择各级压力下最大的透水率，则在一定程度上表征了高压压水试验过程中，岩体在扩张或冲蚀之后的渗透性，采用该透水率进行工程设计显然更为合理。对于充填型（E 型） $P$ - $Q$  曲线，则与紊流型（B 型）类似，其透水率在初始阶段达到最大值，显然工程设计宜以未充填情况下岩体的渗透性为依据。

本规程规定采用各阶段的试验压力和稳定流量数据进行透水率计算，其中流量  $Q$  取为某级压力下稳定阶段的平均流量。当试验压力超过临界压力可判定岩体已劈裂，此时的流量主要被用于裂隙扩展，而非岩体的渗透，因此不建议将劈裂后的计算值统计为渗透率。此外，为了能够反映反映极微透水地层的测试结果，建议透水率取值至小数点后 2 位有效数字，对第 3 位数字四舍五入处理。

7.2.7 由于钻孔高压压水试验压力相对较高，岩体中出现非线性渗流可能性较大，利用现有岩体渗透系数计算方法在行业内存在较大争议，还需要工程参与各方加强岩体渗流规律研究，为工程设计提供符合实际的计算方法。本规程参照常规压水试验规程的相关规定，暂时采用试验压力 1MPa 及其对应流量进行渗透系数计算。