

ICS 编号  
CCS 编号

# 团体标准

T/CHES XXX—20XX  
替代 T/CHES XXX-XXXX

## 水利水电工程钻孔高压压水试验规程

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

(征求意见稿)

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

根据中国水利学会团体标准编制工作安排，按照《工程建设标准编写规定》[2008]182号的规定，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，特别是在电子化量测和水力劈裂测试等方面的工程实践，在广泛征求意见的基础上，编制本标准。

本规程共7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、试验资料整理和成果报告。本标准的附录A、附录B、附录C和附录E为规范性附录，附录D为资料性附录。

本规程由中国水利学会负责管理，长江水利委员会长江科学院负责技术内容的解释，在执行过程中，如有意见和建议，请及时反馈给中国水利学会（通信地址：北京市西城区白广路二条16号中国水利学会；邮政编码：100053；电话：01063204693；电子信箱：slxhttbz2020@163.com），以供今后修订时参考。

本规程批准部门：**中国水利学会**

本规程主持机构：**中国水利学会**

本规程解释单位：

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**

本标准出版、发行单位：

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、周黎明、刘皓、黄书岭、周春华、付平、艾凯、廖品忠、王殿春、吴国荣、张新辉、王斌、罗笙、陈长生、张雨霆、周朝、李银泉、常威、钱源、张琦

本标准技术内容审查人：

本标准体例格式审查人：

## 目 次

前 言 .....	I
目 次 .....	II
Contents .....	III
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 .....	4
3.1 试验方法和试段长度 .....	4
3.2 压力阶段与压力值 .....	4
4 试验方案 .....	7
4.1 试验要求 .....	7
4.2 试验程序 .....	7
4.3 试验顺序 .....	7
4.4 试验人员 .....	7
4.5 安全生产和环境保护 .....	7
5 试验设备 .....	8
5.1 止水栓塞 .....	8
5.2 供水设备 .....	8
5.3 压力管路 .....	8
5.4 量测设备 .....	8
6 试验准备 .....	10
6.1 人员及任务安排 .....	10
6.2 设备准备 .....	10
6.3 现场试验条件确认 .....	10
6.4 试验性压水 .....	10
6.5 试验方案确认 .....	10
7 现场试验 .....	11
7.1 试段隔离 .....	11
7.2 水位或压力观测 .....	11
7.3 压力和流量观测 .....	11
8 资料整理与报告 .....	13
8.1 资料整理 .....	13
8.2 结果分析 .....	13
8.3 报告提交 .....	14
附 录 A 水力劈裂试验 .....	15
附 录 B 管路压力损失测定 .....	16
附 录 C 混凝土塞位灌制方法 .....	17
附 录 D 试验记录及成果提交格式 .....	18
附 录 E 岩体渗透系数计算 .....	24
本规程用词说明 .....	25
规范性引用文件 .....	26

## Contents

1 General Provisions .....	1
2 Terms and Symbols.....	2
2.1 Terms .....	2
3.2 Symbols .....	3
3 Basic Requirements .....	4
3.1 Test Method and Layout of Test Section .....	4
3.2 Pressure Stages and Pressure Values.....	4
4 Test layout .....	
4.1 General Requirements .....	7
4.2 Test Mequence .....	7
4.3 Test Sequence .....	7
4.4 Testing Personnel .....	7
4.5 Production Safety and Environmental Protection.....	7
5 Testing Equipment .....	8
5.1 Packer.....	8
5.2 Water Supply Equipment .....	8
5.3 Pressure Piping.....	8
5.4 Measurement Equipment .....	8
6 Test Preparation .....	10
6.1 Personnel and Task Arrangement .....	10
6.2 Equipment Preparation .....	10
6.3 Confirmation of Site Test Conditions.....	10
6.4 Pilot Water Pressure Test .....	10
6.5 Confirmation of Test Plan.....	10
7 Site Test .....	11
7.1 Separation of Test Sections .....	11
7.2 Water Level or Pressure Observation .....	11
7.3 Observation of Pressure and Flow .....	11
8 Test Data Compilation .....	13
8.1 Data Compilation .....	12
8.2 Result Analysis .....	12
8.3 Report Content .....	13
Appendix A Hydraulic Jacking Test .....	15
Appendix B Measurement for Pressure Loss of Tube .....	155
Appendix C Method of Fabricating Concrete Plug .....	17
Appendix D Calculation of Rock Mass Permeability.....	17
Appendix E Record Format of Water Pressure Test in Borehole .....	22
Explanation of Wording in This Specitication .....	23
List of Quoted Standards .....	24
Explanation of Provisions .....	25

## 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的钻孔高压压水试验，包括水力劈裂试验。
- 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 钻孔常规压水试验 conventional water pressure test in borehole

用栓塞将钻孔隔离出一定长度的孔段，并向该孔段施加最大不超过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透水性的一种原位渗透试验。

#### 2.1.2 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。

#### 2.1.3 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。单栓塞隔离时为栓塞底部至孔底的长度，双栓塞隔离时为两栓塞之间的长度。

#### 2.1.4 试验压力 testing pressure

施加在试段内的实际平均压力。

#### 2.1.5 试验水头 testing hydraulic head

试验压力对应的水柱高度。

#### 2.1.6 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。

#### 2.1.7 栓塞 packer

将钻孔隔离出单独封闭孔段的试验设备。

#### 2.1.8 透水率 permeability rate

表达试验段岩体透水性的指标。

#### 2.1.9 吕荣 (Lu) Lugeon

透水率的单位，定义为在1MPa压力下每米试验段每分钟压入的水量。

#### 2.1.10 临界压力 critical pressure

岩体在临界劈裂或者结构面张开时所需要的最小法向压力。

#### 2.1.11 水力劈裂试验 hydraulic jacking test

进行逐级升压压水试验，直至引起岩体裂缝发生与扩展，根据压入水量和施加压力大小的关系确定岩体临界劈裂压力的一种原位试验。

### 2.1.12 劈裂压力 hydraulic jacking pressure

针对劈裂试验给出的岩体在临界劈裂或者结构面张开时所需要的法向压力，与临界压力概念一致，劈裂压力有多种判断方法。

## 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；

$P_{int}$ ——中间劈裂压力；

$P_m$ ——最高试验压力；

$P_{min}$ ——初始劈裂压力；

$P_p$ ——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；

$P_{ult}$ ——最终劈裂压力；

$P_z$ ——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；

$Q_m$ ——最大压力阶段的压入流量；

$q$ ——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

#### 3.1 试验方法和试段长度

- 3.1.1 钻孔高压压水试验宜采用双栓塞分段隔离进行。
- 3.1.2 了解岩体渗透特征应进行升压和降压循环试验。
- 3.1.3 了解岩体劈裂结构面压力宜按照本规程附录 A 的规定进行水力劈裂试验。
- 3.1.4 根据试验目的和试段地质条件，可采用快速法、中速法、慢速法或多循环法。
- 3.1.5 试段长度宜为 5m。
- 3.1.6 当遇断层破碎带、裂隙密集带、溶蚀带等强透水带的孔段时，或遭遇溶岩洞穴、孔壁破碎等状况孔段时，应根据强透水带形状、厚度等情况确定试段长度。
- 3.1.7 同一试段不宜跨越透水性相差悬殊的两种岩层。
- 3.1.8 宜重点安排在隧洞设计高程孔段进行试验，建筑物高程部位相邻试段宜互相衔接。

#### 3.2 压力阶段与压力值

##### 3.2.1 最高试验压力

- 1 最高试验压力宜为建筑物工作水头压力的 1.2 倍。
- 2 地面钻孔的上部试验宜按照建筑物工作水头与高程关系降低最高试验压力。
- 3 平洞内试验宜调整最高试验压力为试段至压力计算零线的水柱压力与建筑物工作水头压力之和。
- 4 低压深埋引调水隧洞工程最高试验压力宜按照水文地质资料确定。
- 5 当试段位于基岩面以下较浅部位时，可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。

##### 3.2.2 压力阶段和级差

- 1 压力阶段宜取 5 级~10 级。
- 2 级差宜采用 1MPa。

##### 3.2.3 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。

##### 3.2.4 试验压力确定方法如下：

1 当用安设在试段内的压力传感器（图 3.2.4-1）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为试验压力，试验压力按式（3.2.4-1）计算：

$$P = P'_p - P_h + P_z \quad (3.2.4-1)$$

式中：

$P$ ——试验压力，MPa；

$P'_p$ ——安设在试段上的压力传感器显示压力，MPa；

$P_h$ ——地面安设压力表、压力传感器至试段中心的水柱压力，MPa；

$P_z$ ——地面安设压力表、压力传感器安设水平面至压力计算零线的水柱压力，MPa。

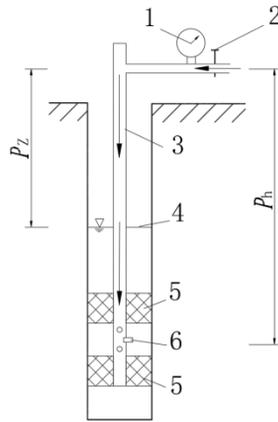


图 3.2.4-2 地面和底部均有压力量测装置的钻孔高压压水试验

1-地面安设压力表或传感器；2-进水阀门；3-工作管；4-压力计算零线；5-试验栓塞；6-安设在试段上的压力传感器

2 当用安设在地面进水管上的压力表或压力传感器（图 3.2.4-1）测压时，试验压力按式(3.2.4-2)计算：

$$P = P_p + P_z - P_s \quad (3.2.4-2)$$

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 平洞内试验有压力计算零线观测数据的，按式（3.2.4-1）和式（3.2.4-2）计算时  $P_z$  应反号，否则宜取为 0。

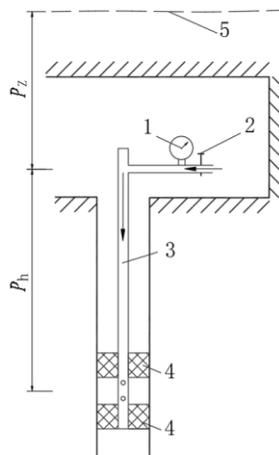


图 3.2.4-2 平洞内钻孔高压压水试验

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

3.2.5 压力计算零线应以工作管内的水头观测或压力观测结果为准，未进行观测时确定方法如下：

1 当地下水位在试段以下时，压力计算零线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，压力计算零线为地下水位线。

3.2.6 管路压力损失的确定方法如下：

- 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。实测方法见附录 B。
- 2 当工作管内径一致且内壁光滑度变化不大时，管路压力损失可用式(3.2.6)计算：

$$p_s = \lambda \frac{L_p}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3.2.6)$$

式中：

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

$l_p$ ——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， $g=9.8 \text{m/s}^2$ 。

## 4 试验方案

### 4.1 试验要求

- 4.1.1 钻孔高压压水试验应设备可靠，准备充分，过程合规，数据准确，资料整理规范，结论合理。

### 4.2 试验程序

- 4.2.1 钻孔高压压水试验应遵循下列程序：

- 1 依据现场情况进行人员配备和设备准备。
- 2 对试验条件和具体事项进行确认。
- 3 按照压力和流量观测规定进行试验。
- 4 进行资料整理和分析。
- 5 撰写并提交试验报告。

### 4.3 试验顺序

- 4.3.1 宜避开其它破坏性试验孔段最后进行高压压水试验。
- 4.3.2 高压压水试验应先进行渗透特征参数试验，再进行水力劈裂试验。

### 4.4 试验人员

- 4.4.1 试验人员应掌握试验方法和操作程序。
- 4.4.2 试验过程中应有专人根据曲线观测或采集数据情况掌握试验进程。

### 4.5 安全生产和环境保护

- 4.5.1 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。
- 4.5.2 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大试验压力值的 1.5 倍。
- 4.5.3 用于膨胀栓塞的气体应选择对人无危害和不可燃的气体。
- 4.5.4 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。

## 5 试验设备

### 5.1 止水栓塞

5.1.1 止水栓塞应符合下列要求：

- 1 可靠止水压力应大于水泵最大试验压力与地面至止水栓塞水柱压力的和，操作方便。
- 2 栓塞长度应不小于 8 倍钻孔孔径。

5.1.2 止水栓塞宜选用液压和气压共用栓塞，钻孔稳定低水位时应采用气压止水栓塞或接入卸压装置；绳索取心钻杆为工作管时可选用不起钻压水试验装置。

### 5.2 供水设备

5.2.1 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大试验压力的 1.5 倍。
- 3 在最大试验压力下，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。

5.2.2 试验进水管路宜设置稳压罐（筒）。

5.2.3 吸水笼头上应设置 1 层至 2 层孔径小于 2mm 的过滤网，吸水笼头至水池底部的距离宜大于 0.3m。

5.2.4 供水调节阀门宜采用容易调节流量的高压球阀。

### 5.3 压力管路

5.3.1 根据钻孔状况选用双管法或单管法进行试验。

5.3.2 宜采用钻进所用钻杆为工作管，工作管宜等内径，内壁光滑。

5.3.3 应按照 4.5.2 的压力要求对压力管路进行管路承压和密封试验。

5.3.4 双管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 钻孔水位至孔口的水柱压力大于止水栓塞初始膨胀压力时，应采用气体胀塞或接入栓塞卸压装置。

5.3.5 单管路试验时应符合下列要求：

- 1 工作管底部应安装管路切换装置。
- 2 切换阀最小通水截面积宜大于 177mm<sup>2</sup>。
- 3 钻孔水位至孔口的水柱压力大于止水栓塞初始膨胀压力时应接入栓塞卸压装置。

### 5.4 量测设备

5.4.1 宜采用全过程数据电子化、可实时显示和存储的量测设备。

5.4.2 量测设备应定期检定，试验前校验。

- 5.4.3 压力量测设备主要包括压力表和压力传感器，应符合下列要求：
- 1 压力表和压力传感器的最高工作压力宜为极限压力的  $1/3\sim 3/4$ 。
  - 2 压力表反应灵敏，卸压后指针回零。
  - 3 带数显的压力传感器读数应与实际压力一致。
  - 4 压力传感器的技术参数应与数显及数据记录设备相匹配。
- 5.4.4 流量量测设备主要包括高压水表和流量计，应符合下列要求：
- 1 流量量测设备宜为电子化设备，可输出数字信号。
  - 2 流量量测设备应能在 1.5 倍最大试验压力下正常工作。
  - 3 流量量测设备宜具有双向测量能力。
  - 4 带数显的流量量测设备读数应与实际流量一致。
  - 5 单台水泵匹配流量计的量程宜为其额定流量的 120%，流量计总量程应不小于 120L/min。
- 5.4.5 宜采用数显及数据记录设备进行压力和流量数据实时显示和存储，设备要求如下：
- 1 数显及数据记录设备应具备数据数字化、实时显示和存储等功能。
  - 2 数据采集频率宜为 0.1Hz-10Hz。
  - 3 数显及记录设备应具备 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 数显及记录设备模/数转换位数应大于等于 8 位。
  - 5 数显及记录格式宜为或宜转化为电子表格文档格式。
- 5.4.6 水位计应灵敏可靠，可测量钻孔和工作管内部水位，且不受孔（管）壁附着水或孔（管）内滴水的影响。
- 5.4.7 量测设备应专门保管。

## 6 试验准备

### 6.1 人员及任务安排

- 6.1.1 试验任务下达后应及时确定试验人员。
- 6.1.2 试验人员应详细了解试验任务，跟踪了解现场试验条件，形成初步试验方案。

### 6.2 设备准备

- 6.2.1 根据试验任务和现场试验条件准备合适的试验设备，易毁坏设备应配有备件。
- 6.2.2 应采取必要措施保证试验设备在运输过程中状况完好。

### 6.3 现场试验条件确认

- 6.3.1 试验钻孔应稳定、孔壁总体完整。
- 6.3.2 钻进过程中未使用泥浆护壁材料，特殊地层钻孔冲洗液合适，钻孔已清洗。
- 6.3.3 确定钻孔稳定水位。
- 6.3.4 确认钻机设备状况良好，钻杆无破裂、弯曲、堵塞等现象，接头无渗漏，试验设备和钻杆连接可靠。
- 6.3.5 现场具备充足的清水水源。当水源的泥沙含量较多时，应采取沉淀措施。当水源中有油污漂浮时，应采取去油污措施。
- 6.3.6 对其它试验设备完好性进行检查，组装试验设备并进行地面管路和栓塞密封性检验。

### 6.4 试验性压水

- 6.4.1 宜避开拟试验孔段进行试验性压水，采用水泵的最高输出压力，延续时间 15min。
- 6.4.2 在试验性压水过程中，应按正式压水试验的要求检查栓塞止水是否可靠、管路是否畅通、仪表工作及机械运行是否正常等。
- 6.4.3 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加以处理。混凝土塞位灌制方法参见附录 C。
- 6.4.4 试验性压水成功后，方可进行正式压水试验。

### 6.5 试验方案确认

- 6.5.1 明确试验内容及方法，确定最高试验压力和压力阶段级差。
- 6.5.2 依据钻孔岩心或孔内电视资料确定试段及止水栓塞具体位置。

## 7 现场试验

### 7.1 试段隔离

- 7.1.1 栓塞定位应准确，宜安设在岩石较完整部位。
- 7.1.2 液压式止水栓塞宜在孔口施加 3MPa~5MPa 压力，气压式止水栓塞宜试验确定可靠胀塞压力。胀塞压力宜小于岩体破裂压力，试验期间宜保持不变。

### 7.2 水位或压力观测

- 7.2.1 试段隔离前后宜观测钻孔水位以及工作管内水位或压力。
- 7.2.2 水位观测每隔 5min 进行一次。当水位平均下降速度连续两次均小于 5cm/min 时，观测工作可结束，用最后的观测结果确定压力计算零线。
- 7.2.3 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，观测时间至水位稳定。
- 7.2.4 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。

### 7.3 压力和流量观测

- 7.3.1 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进行流量观测。
- 7.3.2 高压压水试验流量观测可采用快速法、中速法和慢速法进行试验，压力阶段结束时间应符合表 7.3.2 的规定。

表 7.3.2 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	结束依据	流量认定	结束依据	流量认定
快速法	1 分钟	每级压力稳定阶段维持时间不小于 3 分钟；连续 3 次读数中最大值与最小值之差小于最后一次读数的 10%	最后一次读数	流量曲线平直无变化持续 3 分钟以上	最后 1 分钟均值
中速法	5 分钟	每级压力稳定阶段维持时间不小于 30 分钟；连续 3 次读数中最大值与最小值之差小于最后一次读数的 10%		流量曲线平直无变化持续 30 分钟以上	
慢速法	30 分钟	每级压力稳定阶段维持时间不小于 120 分钟；连续 3 次读数中最大值与最小值之差小于最后一次读数的 10%		流量曲线平直无变化持续 120 分钟以上	

- 7.3.3 试验压力调整到下阶段的压力值后，应重新进行流量观测，并符合第 7.3.2 条的规定。
- 7.3.4 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，继续进行压水直至流量稳定。
- 7.3.5 在试验过程中，应对附近可能受影响的露头、井、洞、孔、泉等地下水位的位置、流量及颜色进行观测。

7.3.6 在试验过程中，应认真记录或全程采集试验数据和异常情况，及时分析，保证试验结果的准确性、完整性。

## 8 资料整理与报告

### 8.1 资料整理

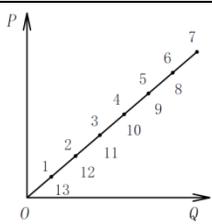
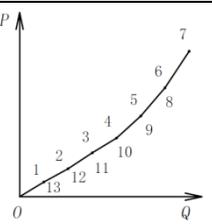
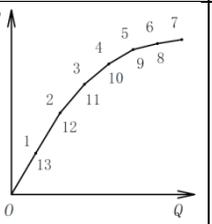
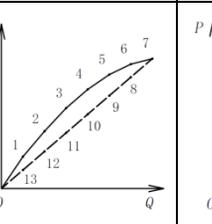
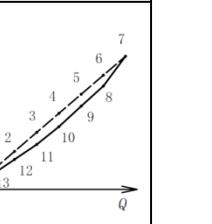
8.1.1 试验资料整理应包括校核原始记录，绘制压力流量时间曲线（ $P-Q-t$  曲线）、稳定阶段压力流量（ $P-Q$  曲线）和压力试段透水率曲线（ $P-q$  曲线）。试验表格和曲线绘制格式应符合附录 D 的要求。

8.1.2 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。

### 8.2 结果分析

8.2.1 高压压水  $P-Q$  曲线可划分为五种类型，即：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见表 8.2.1。可按照图 7.2.1 所示流程进行  $P-Q$  曲线类型判断。

表 8.2.1  $P-Q$  曲线的典型类型及曲线特点表

类型名称	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	升压曲线为通过原点的直线，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

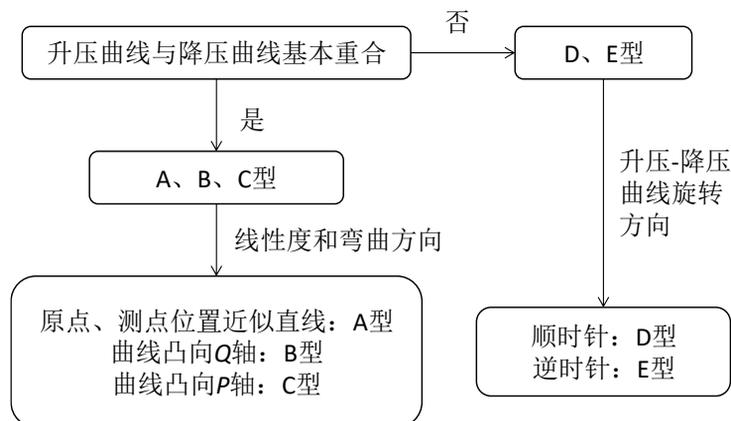


图 8.2.1  $P-Q$  曲线类型判断流程

8.2.2  $P-Q$  曲线中同压力分级的升压阶段和降压阶段的流量值绝对差不大于 3L/min 或相对差不大于 5% 时，可认为基本重合。

8.2.3 压水过程中岩体被完全劈裂的试段不宜进行曲线类型判定。

- 8.2.4 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。
- 8.2.5 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。
- 8.2.6 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。
- 8.2.7 应选择各级压力下按式（8.2.7）计算结果的最大值作为试段透水率，岩体劈裂后的计算值不宜认定为透水率：

$$q = \frac{Q}{lP} \quad (8.2.7)$$

式中： $q$ ——试段的透水率吕荣值，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。

- 8.2.8 当需要计算岩体渗透系数时，应采用最大透水率对应的压力和流量计算，并应符合本规程附录 E 中的规定。

### 8.3 报告提纲

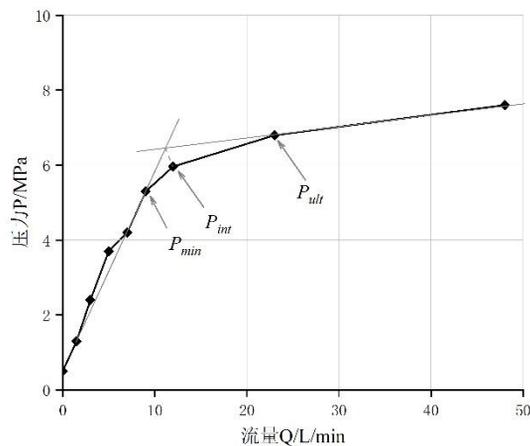
- 8.3.1 试验应编制试验报告，报告内容宜包括前言、工程地质概况、技术标准及依据、试验目的和内容、试验设备和试验方法、试验数据及整理资料、成果分析、结论和建议。

## 附录 A 水力劈裂试验

- A.0.1 水力劈裂试验宜在渗透特征参数测试完成后接续进行。
- A.0.2 宜以建筑物静水头压力的1.2倍作为最高试验压力，岩体无法劈裂时宜以建筑物工作水头压力的1.5倍为试验终止条件。
- A.0.3 试验压力级差宜参照渗透特征参数测试数据进行调整，渗透特征参数测试过程中岩体未劈裂可加大级差，临近岩体劈裂时宜减小级差。
- A.0.4 宜按本规程7.3.2条的快速法只进行升压阶段试验，流量观测应符合本规程7.3.3条的规定。
- A.0.5 劈裂压力试验的压力宜按式(A.0.5)计算。

$$P = P_p + P_h - P_s \quad (\text{A.0.5})$$

- A.0.6 水力劈裂试验宜绘制单独的稳定阶段压力-流量曲线 ( $P$ - $Q$ 曲线)，渗透特征参数测试过程中岩体被劈裂时宜作为第一次劈裂过程与本试验过程一起成图。
- A.0.7 可按照图A的取值规则进行岩体劈裂压力判定，宜采用初始劈裂压力 $P_{min}$ 作为劈裂压力。

图 A 由  $P$ - $Q$  曲线判定劈裂压力

## 附录 B 管路压力损失测定

- B.0.1 当使用钻杆作为工作管，且钻杆内径与接头内径不一致时，应实测管路压力损失，编制出每米钻杆、每副接头在不同流量下的压力损失图表。
- B.0.2 测定压力损失所用的钻杆和接头应与实际使用的规格一致。
- B.0.3 测试管路总长度不应小于40m，管路末端连接胶管，抬高2m左右放入量测水箱中。
- B.0.4 测试管路两端安装压力表或压力传感器，末端安装流量计或流量传感器，用仪器测量两端压力表的高差或计算压力传感器记录数据的差值。
- B.0.5 将不同流量的水输入管路，管路两端的压力差即为该流量下的管路总压力损失。
- B.0.6 实测流量范围10L/min~100L/min，测点不少于15个，分布要均匀，同时用流量计和水箱测定流量。实测工作应进行两次，取其平均值。
- B.0.7 测试管路为两套。测定第一套管路后，配第二套管路，第二套管路管径和钻杆总长度应与第一套相同，但接头数相差3副以上。
- B.0.8 在同一坐标上绘制出两套管路的压力损失与流量关系曲线（图A.0.8），从图上量取各流量值相应的压力损失差 $\Delta P_s$ 可从图上直接量取。
- B.0.9 各种流量下每副接头的压力损失，应按式（B.0.9）计算：

$$P_{sj} = \frac{\Delta P}{n} \quad (\text{B.0.9})$$

式中： $P_{sj}$ ——某流量下每副接头的压力损失，MPa；

$\Delta P_s$ ——该流量下两套管路的压力损失之差，MPa；

$n$ ——两套管路接头数之差。

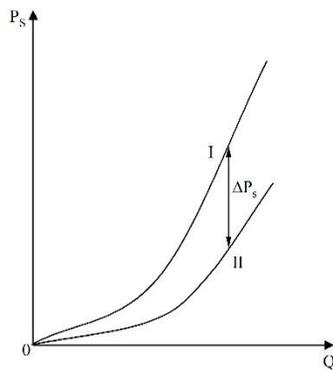


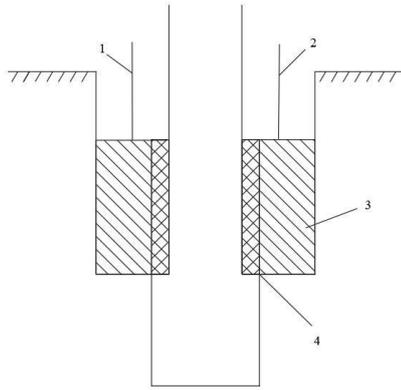
图 B 压力损失与流量关系曲线

- B.0.10 不同流量下的管路总压力损失应减去接头的压力损失，计算出不同流量下每米钻杆的压力损失值。可根据计算结果编制不同流量下每米钻杆及每副接头的压力损失图或表。

## 附录 C 混凝土塞位灌制方法

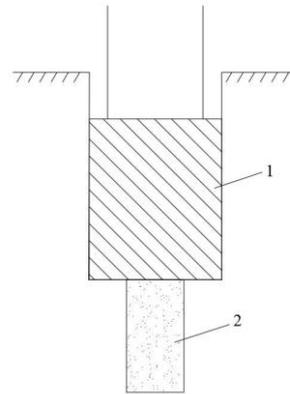
C.0.1 当栓塞止水困难，采取气体措施均无效果时，或当表部风化岩带较厚，又需要进行高压压水试验时，可采用混凝土塞位灌制法（图C.0.1）。

C.0.2 灌制混凝土塞时（图C.0.2），应将待试孔段用砂填实，并将待试孔段以上部分的孔径扩大20mm。



图C.0.1 混凝土塞位灌制法

1-套管；2-工作管；3—混凝土塞位；4-栓塞



图C.0.2混凝土塞

1-混凝土；2-充填砂

C.0.3 用导浆管向已扩孔的底部注入早强浓水泥浆或水泥砂浆，水泥浆的高度应大于2m。岩石软弱、孔壁不规则时，宜即时将护壁套管插至已扩孔的孔底。

C.0.4 待凝3d或强度达到75%，钻开混凝土，清除试段内的填砂，宜将栓塞塞在套管内或已被水泥浆固结的孔段上进行压水试验。



D.0.2 试验试段安装记录表宜符合表D.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D.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						
...						

D.0.3 试验水位观测记录表宜符合表D.0.3的规定。

表D.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		

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

表D.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 $K$ (cm/s)	

D.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D.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。

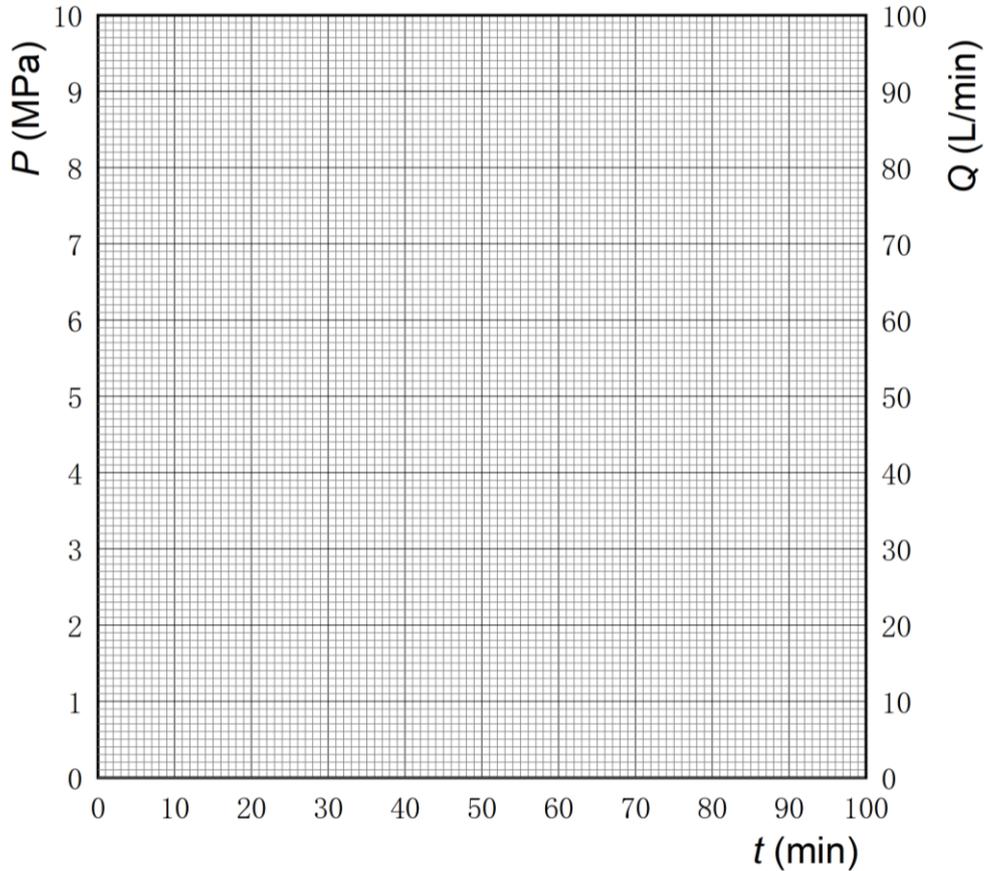


图 D.0.5  $P$ - $Q$ - $t$  曲线绘制比例

D.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D.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。

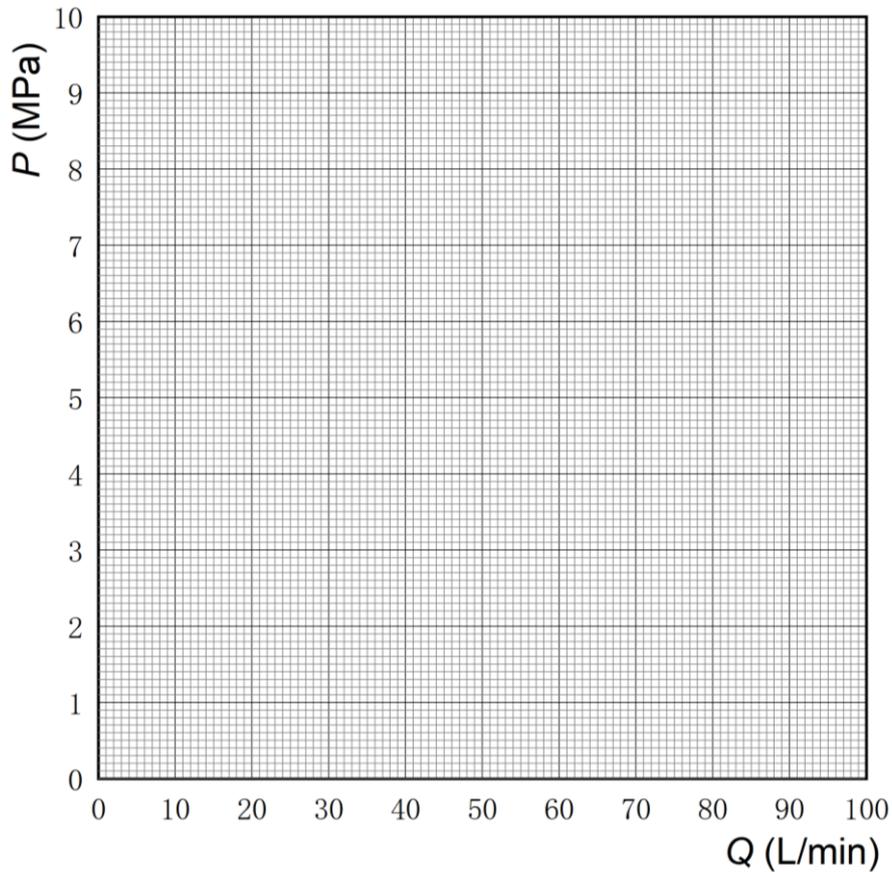
2  $Q$ 轴坐标 1mm 代表 1L/min。

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 D.0.6  $P$ - $Q$  曲线绘制比例

D.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D.0.2）宜符合1-2款规定，电子图形制作宜符合第3-5款规定。

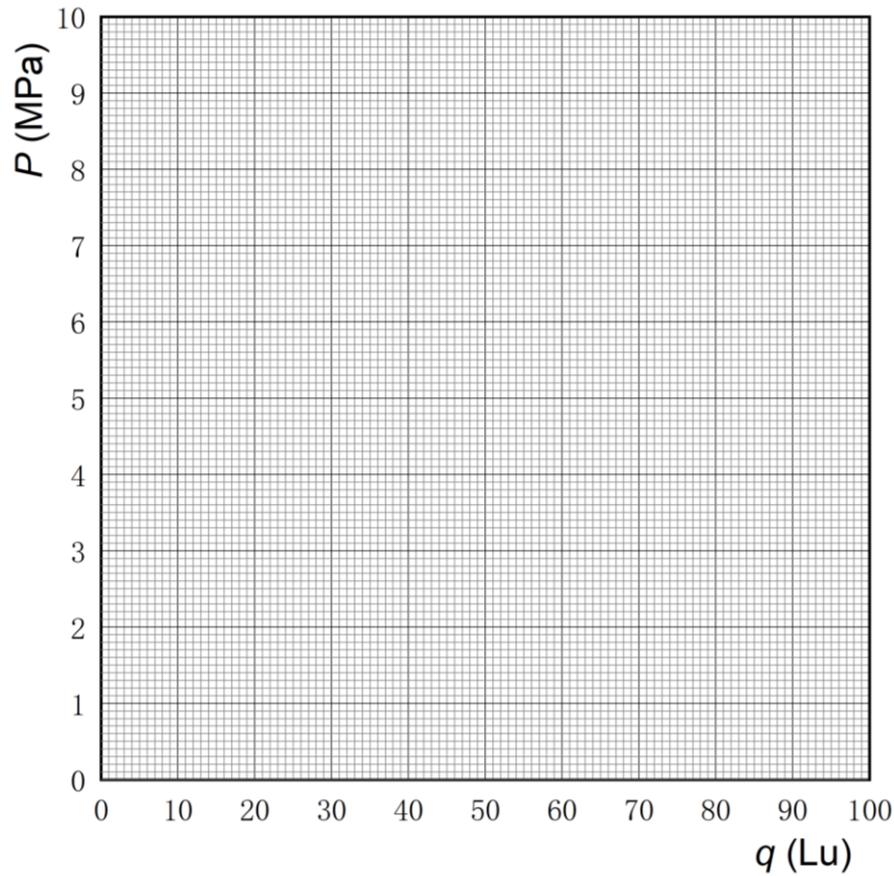
1  $P$ 轴坐标 1mm 代表 0.1MPa。

2  $q$ 轴坐标 1mm 代表 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 D.0.7  $P$ - $q$  曲线绘制比例

D.0.8 钻孔高压压水透水率和水力劈裂试验成果汇总表宜符合表D.0.8和表D.0.9的规定，电子化采集的试验报告应包含该表格的主要内容项。

表D.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	透水率 (Lu)	备注
	深度 (m)		试段长度 (m)	高程 (m)				
	起	止		起	止			

表D.0.9 工程钻孔水力劈裂试验结果汇总表

试验 编号	试验段					最大试验压力 (MPa)	劈裂压力 (MPa)	备注
	深度 (m)		试段长度 (m)	高程 (m)				
	起	止		起	止			


## 附录 E 岩体渗透系数计算

E.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，可按下列式计算岩体渗透系数：

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

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， $\text{m}$ 。

E.0.2 当试段位于水位线以下， $P$ - $Q$ 曲线为紊流（B型）时，可用第一压力阶段的压力 $P$ （换算成水头值，以 $\text{m}$ 计）和流量 $Q$ 代入式（D.0.1）近似地计算渗透系数。

E.0.3 当试验段位于地下水位以下，透水率 $q$ 小于 $10Lu$ 、 $P$ - $Q$ 曲线为扩张型（C型）、冲蚀型（D型）或充填型（E型）时，可取各级压力下最大的透水率，并用最大透水率对应的试验压力值和流量值按本规程公式（D.0.1）计算渗透系数。

E.0.4 当岩体透水性较大时，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 条文中指明应按其它有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是未注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 50487-2008	水利水电工程地质勘察规范
SL 31-2003	水利水电工程钻孔压水试验规程
NB/T 35113-2018	水电工程钻孔压水试验规程
SL 279-2016	水工隧洞设计规范
NB/T10391-2020	水工隧洞设计规范

水利水电工程钻孔高压压水试验规程  
条文说明

## 目 次

1 总则 .....	29
3 基本规定 .....	30
3.1 总体要求 .....	30
3.2 试验方法 .....	错误!未定义书签。
3.3 试验顺序 .....	错误!未定义书签。
3.4 试段布置 .....	错误!未定义书签。
3.5 压力阶段与压力值 .....	31
3.6 试验人员 .....	错误!未定义书签。
3.7 安全生产和环境保护 .....	错误!未定义书签。
4 试验设备 .....	37
4.1 止水栓塞 .....	37
4.2 供水设备 .....	38
4.3 压力管路 .....	38
4.4 量测设备 .....	40
5 试验准备 .....	41
5.1 人员及任务安排 .....	41
5.2 设备准备 .....	41
5.3 现场试验条件确认 .....	41
5.4 试验性压水 .....	41
5.5 试验方案确认 .....	41
6 现场试验 .....	42
6.1 试段隔离 .....	42
6.2 水位或压力观测 .....	42
6.3 压力和流量观测 .....	42
7 试验资料整理 .....	44
7.1 资料整理 .....	44
7.2 结果分析 .....	46

## 1 总则

1.0.1 本规程总结了几十年来钻孔高压压水试验科技成果和工程经验，首次将电子化量测和水力劈裂试验等内容纳入高压压水规程，体现了试验技术和试验装备的进步。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。

1.0.2 钻孔高压压水试验目的有三，分别是了解岩体的“渗透特征”、“渗透稳定性”和“岩体结构面的张开压力”。“渗透特征”在规程中采用不同压力下的透水率表征，该参数的试验及计算方法明确无异议。“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变化体现，在规程中主要由  $P-Q$  曲线的分型体现。《水工隧洞设计规范》（SL279-2016）和《水工隧洞设计规范》（NB/T10391-2020）中提出了“水力劈裂”概念（未释义，但明确归入地应力范畴），并以“不发生水力劈裂”作为隧洞设计原则之一。上述“岩体结构面的张开压力”正是岩体的水力劈裂特征参数，一般称为“劈裂压力”。“水力劈裂试验（hydraulic jacking test）”和“劈裂压力（hydraulic jacking pressure）”等概念由 Bolston Seed（1976）等给出，明确指出岩体的水力劈裂压力与岩体裂隙面的垂直总压力（即法向应力）有关，即与地应力有关。岩体的“劈裂压力”由升压阶段的高压压水试验测定，上述概念与该试验方法已获得行业内认可，故本规程采用上述术语。此外，本规程保留了临界压力概念，并将该术语概念与劈裂压力归为一致。本规程基于主编单位多年的水力劈裂试验经验，对水力劈裂试验程序、压力计算和资料处理等方面进行规范。

### 3 基本规定

#### 3.1 试验方法和试段长度

3.1.1 钻孔高压压水试验多由专业试验单位在终孔后进行，故只能采用双止水栓塞进行试验。此外，推荐双止水栓塞还基于试验的高效率。本规程不排除经过止水能力确认的单止水栓塞在钻进过程中进行试验。

3.1.3 抽水蓄能电站等工程的高水头引水隧洞需要承受较高的静水和动水压力，存在高压压水试验渗透特征测试过程未能或仅初步劈裂岩体的情况，在需要更多了解隧洞围岩的抗劈裂特征时，有必要在高压压水渗透特征测试完成后进行水力劈裂试验。

水力劈裂试验仅需进行升压阶段的试验。其最高试验压力受水泵的最高输出压力、最大流量和试段渗透流量等因素综合影响，所能达到的最大试验压力存在变化，但试验压力一般应大于建筑物静水头的 1.2 倍。在透水率低、试段岩体完整时存在无法将岩体劈裂的情况，该情况下只要试验压力大于静水头的 1.5 倍即可，没有必要一定要劈裂岩体，也可规定某确定压力作为试验终止的上限。

水力劈裂试验的级差决定了岩体劈裂压力的精度，最好的做法是参考高压压水试验情况动态确定试验压力级差。例如：在高压压水透水率测定过程中未劈裂或未完全劈裂岩体的情况下，可以在小于其最高压力时增大压力级差，临近岩体劈裂时减小压力级差。水力劈裂试验的压力分级一般多于高压压水渗透特征试验，故推荐采用快速法进行。

劈裂压力属于地应力范畴，反映的是试段的总应力。采用高压压水方法测试时，劈裂压力等于岩体裂隙关闭瞬间试段内的真实水压力，因此，地面记录数据时，试验压力计算应包含地面至试段的水柱压力，而非渗透特征测试试验压力计算所采用的“裂隙水压力”与试段水压力的差压力。规程中的临界压力概念，等同于岩体劈裂压力。

3.1.4 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，现场试验人员的技术水平对试验精度有很大影响，需要有经验的试验人员掌控试验进程。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，必要时试验人员可与地质人员沟通，根据已有结果决定下一步试验方法。可选择的试验方法有：

(1) 快速法：适用于完整岩体，在每阶段压力下，试验时间一般为 3min~5min，当流量趋于稳定时试验即可结束，并以此完成各阶段升降压循环。

(2) 中速法：适用于含有闭合或局部闭合、局部张开节理或裂隙的较完整岩体，在每阶段压力下，试验时间一般不小于 30min，当流量趋于稳定时试验即可结束，并以此完成各阶段升降压循环。

(3) 慢速法：适用于含有断层破碎带、裂隙密集带、层间错动带等特殊地质条件的破碎岩体，在每阶段压力下，试验时间一般不小于 120min，当流量趋于稳定时试验即可结束，并以此完成各阶段升降压循环。

(4) 多循环法：在同一试段内进行的快速、中速、慢速组合试验，适用于了解加载卸载频繁的岩体渗透稳定性地层。

在完整和较完整岩体中，常用快速法、中速法，对于较破碎和破碎岩体宜采用中速法、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。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。

3.1.5 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。国内外有关规程中规定的试段长度在 3m~6m 之间，多数为 5m 长度。本规程与上述规程保持一致。

3.1.6 孔壁不完整可能会导致栓塞止水失效或破损的后果，为了保证试验结果的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。

## 3.2 压力阶段与压力值

3.2.1 高压压水的最高试验压力一般按照建筑物工作水头乘安全系数，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。

在地面深钻孔试验时，建筑物设计高程孔段的最高试验压力应按照上述原则确定。此外，为了减少试段劈裂情况的发生，建议降低地面钻孔上部试验的最高试验压力。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，建议将最高试验压力临时调整为试段至压力计算零线的水柱压力和工作水头 1.2 倍压力之和。

目前，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，但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，对此，建议深埋引调水工程的最高试验压力参照隧洞部位的水文监测资料结果进行，以全面了解深埋隧洞岩体的渗透特征、渗透稳定性和岩体劈裂压力。

当试段位于基岩面以下较浅部位时，可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。因此多数国家采取对岩面以下一定深度内的试段最大试验压力加以限制。但实际上，压水试验时岩体是否会产生抬动变形取决于很多因素，例如：岩体完整性、裂隙中渗透压力的大小和分布情况、上覆岩体自重、上覆岩体的结构力等。鉴于上述情况，很难精确地规定具体的不引起岩体抬动变形的最大压力试验值。实际工作中常用的压力取值为上覆岩体每增加 1m 压力增加 0.025MPa~0.029MPa。

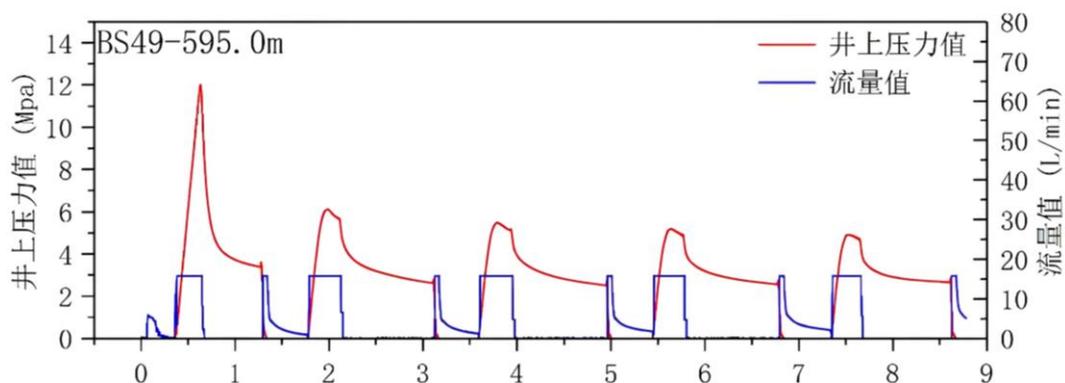
3.5.2 采用多级压力循环试验可以将不同压力下流量变化情况进行对比分析，更为详细准确的了解渗流状态或裂隙状态的具体情况、合理可靠的确定岩体真实的渗透性，了解岩体的渗透稳定性。规程规定高压压水级差分为 5 级~10 级，一般而言，分级越多试验成果精度越高，但需要考虑时间和费用因素。鉴于当前最多的水电工程项目为抽水蓄能电站，其工作水头一般为 500m 左右，最高试验压力超过 5MPa，故在压力分级 5 级至 10 级的情况下，建议压力阶段的级差设定为 0.5MPa~1.0MPa。而对于工作水头低于 5MPa 或者大于

10MPa 的情况，试验阶段级差可进行适当调整。表 3.2.2 为一些工程高压压水试验的压力取值。

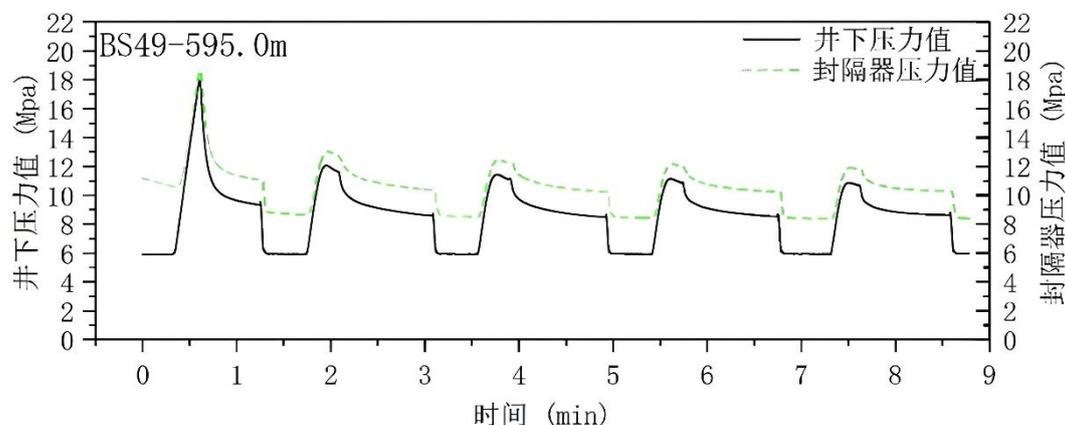
高压压水试验可按试验目的不同分为循环和非循环加压进行，以透水率测定为主要目的的试验一般采取循环加压，水力劈裂试验一般仅进行升压阶段试验。此外，当试验压力突降、即发生扩容现象时可停止加压。水力劈裂试验为了精确求得岩体的临界压力（或劈裂压力）值，前面几级压力可以按照最高试验压力等分，在临界压力（或劈裂压力）附近可适当加密试验压力分级。对于破碎和较破碎岩体，比如断层、裂隙发育带等，在多循环试验后，由于断层和裂隙中的充填物全部冲走后，易形成通道，每一循环最大试验压力会减小，此时每一级的压力值也可进行适当调整。

3.2.3 当试段渗透率低于  $1Lu$  时  $P-Q$  曲线接近直线。参照上述现有规定，在试段长度为  $3m\sim 6m$  的条件下，简单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  $1Lu$ 。

3.2.4 已有深孔地应力测试经验显示（图 3.2.4-3），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（3.2.4-1）。



(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 3.2.4-3 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 3.2.4-4），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  $P_z$  应赋予零值。

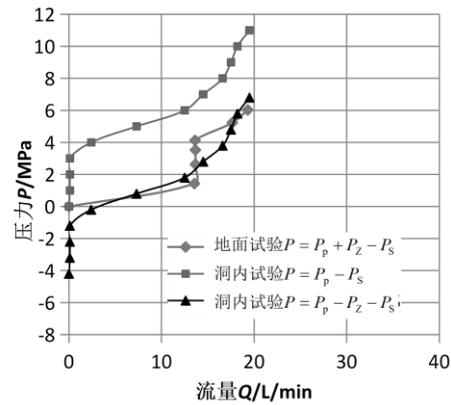


图 3.2.4-4 地面与洞内高压压水  $P-Q$  曲线比较

表 3.2.2 代表性工程高压压水试验压力取值

序号	工程	压力阶段	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 压力、5 阶段	—	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 压力、5 阶段	—	2、4、6、4、2	5.0	中国科学院岩土力学重点实验室
3	绩溪抽水蓄能电站	5 压力、9 阶段	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 压力、9 阶段	—	1.6、3.2、4.8、6.4、8.0、6.4、4.8、3.2、1.6	5.0	中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司
5	长龙山抽水蓄能电站	6 压力、11 阶段	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 压力、29 阶段	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	
7	深圳抽水蓄能电站	7 压力、7 阶段	80~102	从 1MPa 至 7MPa，级差 1MPa	5	长江水利委员会 长江科学院
8	安徽桐城抽水蓄能电站	6 压力、11 阶段	77-350	从 1MPa 至 6MPa，级差 1MPa	4.0	
9	福建云霄抽水蓄能电站	7 压力、13 阶段	346~421 85-121 (平洞内)	从 1MPa 至 7MPa，级差 1MPa	4.2	
10	湖北花园抽水蓄能电站	6 压力、11 阶段	最大测深 529m(钻孔底部 100m)	从 1MPa 至 6MPa，级差 1MPa	4.5	
11	滇中引水工程	5 压力、9 阶段	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 压力、11 阶段	407~993 (钻孔底部 100m)	从 1MPa 至 6MPa，级差 1MPa	3.0~4.5	

3.2.5 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生，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 3.2.5 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。

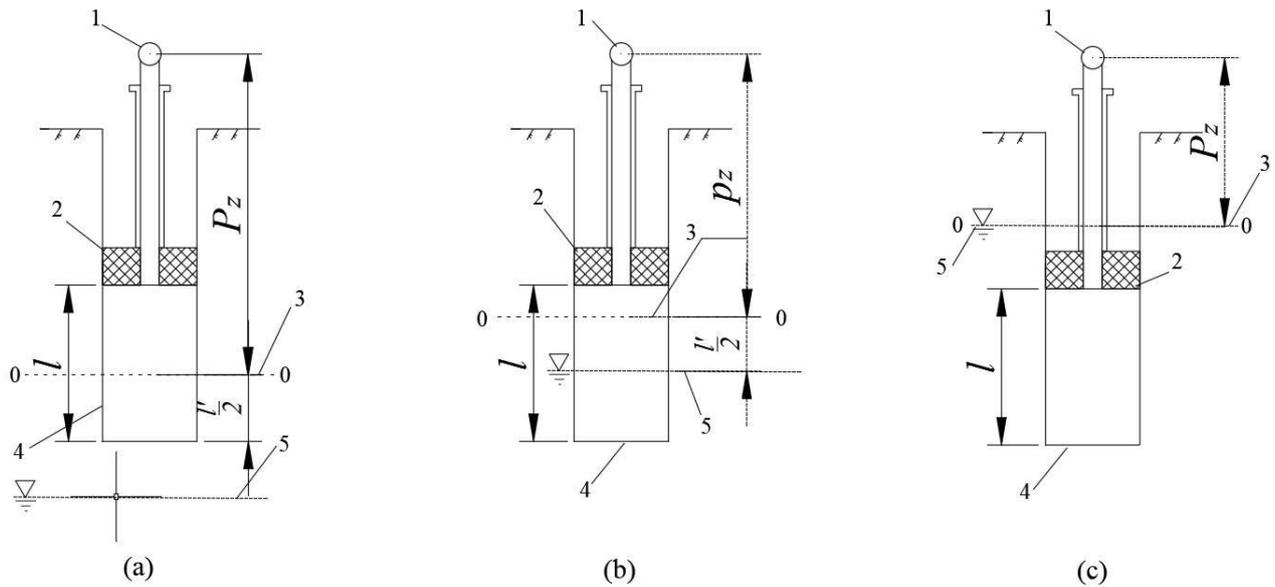


图 3.2.5 压力计算零线确定示意图

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

3.2.6 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 3.2.6。此外，按照附录 A 计算公式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 5.3.1。

表 3.2.6 管路压力损失测定结果

流量 (L/min)	每米钻杆 压力损失 ( $10^{-2}$ MPa)	每副接头 压力损失 ( $10^{-2}$ MPa)	不同管长的压力损失( $10^{-2}$ 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

## 4 试验布置

### 4.2 试验程序

4.2.1 钻孔高压压水试验资料对于高压隧洞设计具有决定性作用，准确获得相应参数意义重大，本规程从试验全过程提出要求。试验全过程可以划分为以下过程：人员和设备准备、试验条件确认、试验准备、现场试验、资料整理和报告编写。

### 4.3 试验顺序

4.3.1 水利水电工程一般对同一钻孔进行多项试验，一般应先安排非破坏性试验。此外，由于水压致裂法地应力测试孔段范围（1m）远小于高压压水试验，合适的安排是先进行地应力试验，避开地应力试验孔段再安排高压压水试验。

4.3.2 对于完整和较完整岩体而言，水力劈裂试验压力一般大于渗透特征参数试验过程的最高试验压力，更具破坏作用，因此水力劈裂试验应在后。

### 4.4 试验人员

4.4.2 采用全过程电子采集试验数据方式减少了现场读数和记录环节，但压力调整、阶段试验结束判断工作依然存在。推荐由2人专门进行试验，其中1人应观测试验采集曲线，根据试验结果掌控试验进程，另外1人协助试验。

### 4.5 安全生产和环境保护

4.5.3 用于膨胀栓塞的气体不能选用氢气等易燃、易爆的气体，更不宜选用对人体有危害性的气体，此外，氧气具有氧化作用可加速设备老化也不宜适用，推荐使用氮气或者压缩空气，以确保压水试验过程中满足安全和环境保护的要求。

## 5 试验设备

### 5.1 止水栓塞

5.1.1 止水栓塞是高压压水试验的关键设备，止水可靠、操作方便是对止水栓塞的基本要求。本规程对高压压水止水栓塞的可靠止水能力进行了量化，要求可靠止水压力必须大于最大试验压力与地面至止水栓塞水柱压力的和，这为栓塞止水能力提供了具体的检验标准。

从保持栓塞附近岩体的渗流稳定性角度出发，要求栓塞有一定的长度。此外，栓塞长度的适用性试验结果表明，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的长度为 1m 止水栓塞的可靠止水能力大于 20MPa。

5.1.2 钻孔压水试验所使用的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类型。本规程未禁止高压压水试验使用上述类型的设备，只要其性能达到 5.1.1 条款的要求均可应用。其中，双管循环式止水栓塞一般在自上而下分段灌浆孔中应用。单管顶压式栓塞的优点是操作简单，缺点是当孔壁岩石较破碎时止水效果较差，且试验必须随钻进行，采用该类型止水栓塞会降低钻进效率。单止水栓塞在高压阶段试验时，若孔壁与胶囊的摩擦力以及管路重量低于高压阶段时高压水对栓塞的推力，会导致栓塞移位。对于绳索取芯钻孔，不起钻压水试验止水栓塞使得钻进过程中不需要起钻即可进行试验，与绳索取芯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。

本规程推荐采用液压式、气压式或气液混合式双止水栓塞。该类型栓塞的共同特点是胶囊易与孔壁紧贴，即使在孔壁不太平直的情况下，也能实现面接触，且栓塞较长、止水可靠性好，对不同孔径、孔深的钻孔均能适应，操作比较方便，且该类栓塞可在终孔后进行试验，不影响钻孔钻进效率。双止水栓塞在钻孔低水位时，全液压式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解封，进而可造成严重的试验设备损失。对此，钻孔低水位时双管法必须采用气压式栓塞，且需要配备充气装置或者高压气瓶，单管法则必须接入止水栓塞泄压装置。此外，由于气体压缩性远大于液体，气压式栓塞胀塞压力要大于同等压力下液压止水栓塞设置压力才能可靠止水。表 5.1.2 列出了常见的钻孔止水栓塞和试验范围供参考。

表 5.1.2 试验止水栓塞类型和适用条件

序号	止水栓塞类别	适用条件
1	单管顶压式栓塞	不推荐使用；设备能力验证合格情况下可用于孔深 300m 以内试验
2	双管循环式栓塞	不推荐使用；一般应用于自上而下分段灌浆孔中
3	绳索取心钻杆不起钻栓塞	推荐使用；设备能力需验证
4	单管路单塞	不推荐使用；高压阶段易栓塞移位
5	单管路双塞或双管路双栓塞	推荐使用

## 5.2 供水设备

5.2.1 目前可用于高压压水水泵种类多样，在驱动设备类型、转数、水泵缸数等均有不同，例如驱动设备类型可以是电动、内燃机和液压；电动水泵常用转数可以是 3 000 转/分~750 转/分、1 缸至 3 缸等，因此对高压水泵的压力波动进行限制极为必要。从保持压力稳定角度出发，高压压水水泵宜采用高速和多缸水泵，在压力阶段级差为 1MPa 的情况下，限定出水压力波动小于 0.1MPa（压力阶段级差的 10%）是必要的。此外，为了确保水泵高压条件下稳定供水，水泵的工作压力应大于等于最大试验压力的 1.5 倍。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。

5.2.2 高压压水对供水设备的基本要求是压力稳定，出水均匀，而水泵出水流量受电源、进水等情况影响易产生压力波动，另外高速水流在地面管路中流动也容易产生压力波动。压力波动影响试验结果和压力量测，因此，在试验管路中应增设能承受最大试验压力 1.5 倍的空气储能器，可抚平部分压力和流量波动。

5.2.3 吸水管是否通畅极易影响水泵供水压力和流量稳定，为了保持试验用水清洁和保护水泵设备安全，应在吸水笼头上包设细密的过滤网，并与水池底部保持不小于 0.3m 的距离。

## 5.3 压力管路

5.3.1 高压压水试验依据工作管路数量可分为双管法和单管法两类。双管法宜实现气体胀塞，方便钻孔低水位时应用。该方法，该方法适用于孔深小于 200m 的浅钻孔。钻孔孔口有两条管路连接测试部位，分别对应止水栓塞和试验孔段，工作管对应试验孔段。单管法适用于深钻孔测试（大于 200m），孔口连接测试部位的仅有工作管，通过切换阀实现对止水栓塞和试验孔段水路的切换。

5.3.2 从充分利用钻机设备和提高钻机试验配合效率的角度出发，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 3.2.6 的压力损失计算公式，对工作管内径为 20mm、不同流量和工作管长度下的工作管压力损失计算结果见表 5.3.2，序号为 1~12；同时对采用 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）在不同工况下的压力损失计算结果进行了对比序号为 13~24。。其中公式中的  $\lambda$  取值为  $3 \times 10^{-4} \text{MPa/m}$ 。

结果显示，当工作管内径为 20mm、长度为 100m、流量大于 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 3.2.6）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 5.3.2 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

5.3.3 本规程推荐采用钻孔钻进所使用钻杆作为工作管进行高压压水试验，由于钻杆需要承受的最高压力一般大于钻进过程的供水压力，因此，为了确保钻杆能够承受试验高压、流量无泄漏，应按照 1.5 倍最大试验压力要求，在试验前应进行钻杆承压和密封试验，去除或更换不合格钻杆。

5.3.4 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，以绳索取心钻杆作为工作管路时，止水栓塞对应软管需要悬挂在钻杆内。

5.3.5 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 177mm<sup>2</sup>，相当于直径为 15mm 的通水截面积。该内径的管路切换阀在 75mm 直径的钻孔设备中可以实现，直径比工作管内径略小（一般直径在 20mm 以上）。

## 5.4 量测设备

5.4.1 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可用于高压压水试验。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。

5.4.2 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应与压力表读数比对，流量采集数据应与准确流量比对。

5.4.3 压力量测设备包括压力表和压力传感器，为了保证测量和显示精度，故规定二者的工作压力宜保持在极限压力值的  $1/3\sim 3/4$  有效范围内。此外，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，带数显功能的示数应与实际压力一致，其技术参数应与采集记录设备相匹配。

5.4.4 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  $1.0\text{MPa}$ ，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进水管流量的做法极易造成流量偏差。因此，本规程禁止将低压水表作为流量观测设备，可以采用高压表示累计水量的水表。

流量计按照测量原理不同可分为容积式、压差式、浮子、涡轮、电磁和流体振荡等类型，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，采用多台水泵供水时分别匹配流量计，总的流量测量范围应不小于  $120\text{L}/\text{min}$ 。

5.4.5 利用具有数显功能的压力传感器和流量计，采用人工读数和记录可完成高压压水试验。该方式仍然采集了局部时段的试验数据。本规程推荐采用压力和流量数据电子化、全过程试验数据实时显示和存储的试验设备，该技术已在多个单位进行了多年应用，是成熟实用技术，也体现了行业进步。显示及记录设备具备的实时处理、显示、存储压力和流量数据等基本功能是电子化数据系统的基本要求，方便现场对于试验进程的掌控。此外，对于数据采集频率而言，高频率可以详细记录压力和流量变化，但过高的数据采集频率并无太大意义，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，建议数据采集频率为  $0.1\text{Hz}$  至  $10\text{Hz}$ 。

5.4.6 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甚少进行，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，以获得准确的压力计算零线。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。

## 6 试验准备

### 6.1 人员及任务安排

6.1.2 试验任务和人员确定后，试验人员应主动了解试验内容和试验日期，基于试验钻孔孔径、水位和地质情况，以及钻杆型号、水电供应和场地交通等试验条件及早准备合适设备。

### 6.2 设备准备

6.2.1 为了确保压水试验工作顺利进行，应根据试验内容和试验条件选择合适的供水设备、止水栓塞及量测设备，止水栓塞等易损坏设备应配有备件。

### 6.3 现场试验条件确认

6.3.2 为了减少岩粉堵塞，压水试验钻孔最好采用金刚石钻进或硬质合金钻进。采用泥浆护壁材料钻进会使孔壁上形成一层泥膜，并堵塞裂隙，因此压水试验钻孔不能使用膨润土、植物胶等泥浆护壁材料。在采用金刚石钻进时，通常使用乳化冲洗液。乳化液由水、油和表面活性剂组成。乳化液中的油珠重新凝结并析出现象称为破乳。乳化液破乳后，将产生大量油泥、泡沫和胶状物，会严重堵塞裂隙，妨碍水流通过。石灰岩、白云岩及其他含二价金属元素的岩石对活性剂有强吸附作用，将使乳化液严重破乳，故在碳酸盐岩类岩石中钻进压水试验钻孔时，需要选择合适的冲洗液。

6.3.3 钻孔稳定水位影响栓塞的泄压和试验压力计算，应在洗孔后静置，经多次测量确定。

6.3.4 对钻机和作为压力通道的钻杆状况进行是否适应高压压水试验进行确认，确定钻杆是否匹配试验设备。

6.3.5 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。

6.3.6 应对运到试验现场的试验设备完好性进行检查确认。之后应组装试验设备，进行下井前的密封检验，并对量测设备状况等进行检查确认。

### 6.4 试验性压水

6.4.1 采用水泵最高输出压力进行试验性压水，大概率会劈裂试验孔段，改变试验孔段的原始状态，因此，建议避开拟试验孔段进行试验性压水。试验性压水从水泵送水开始，水流经整个试验段及试验管路及试验管路，并在规定的试验压力下，达到观测栓塞不漏水的目的。

### 6.5 试验方案确认

6.5.2 根据任务书或地质工程师要求确定试验工作量和试段沿孔深分布情况，为了确保栓塞一次性就位并可靠止水，应根据钻孔岩心或孔内电视资料，确定止水栓塞安装具体位置。

## 7 现场试验

### 7.1 试段隔离

7.1.2 采用液压或气压式栓塞时，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。为了确保止水效果，不发生绕渗等现象，胀塞压力应小于岩体破裂压力。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封堵效果。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。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。

### 7.2 水位或压力观测

7.2.1 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。

7.2.3 当在勘探平洞内进行高压压水试验、或者发现承压水时要适当延长观测时间，目的是为了获得一个相对准确的地下水位来确定压力计算零线。而对承压水的观测可以视工程需要进行，如需进行承压水观测，则执行相应的观测标准。

7.2.4 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。观测结束标准可参考水位观测标准。

### 7.3 压力和流量观测

7.3.1 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较大影响。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。

7.3.2 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 至 2 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 3 分钟就可以判定试段结束，也可以在流量基本稳定后隔 1 分钟查看一次流量数据，读数 3 次以判断是否达到阶段试验结束标准。

(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，3 次流量读数的相对差不大于 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（如 5S 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），因此，只需要流量曲线平直无变化且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（如最后 1 分钟）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。

7.3.4 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，应保持试验压力，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为零。

7.3.5 为了了解岩体裂隙连通情况和压水试验的影响范围，在试验过程中，对受压水试验影响的井、洞、孔和泉等地下水的出水位置、水位、渗水颜色以及流量进行观测，必要时可配合使用示踪剂。

## 8 试验资料整理

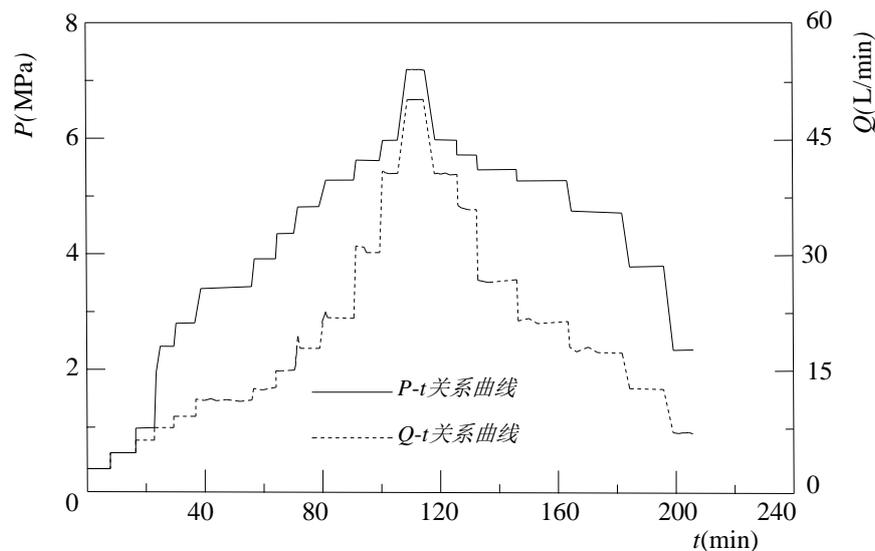
### 8.1 资料整理

8.1.1 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 8.1.1-1 (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 7.3.2 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。

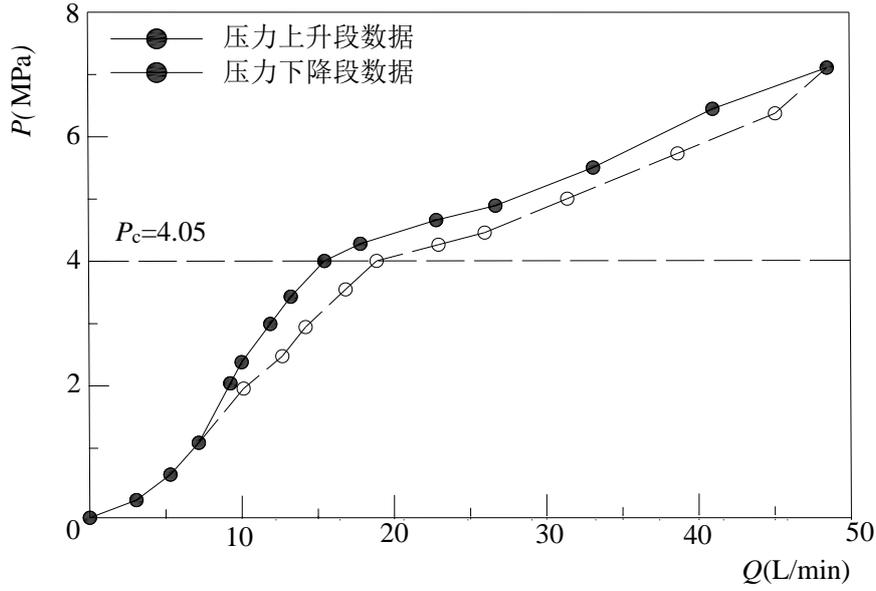
根据各级压力下稳定阶段的流量和压力值绘制高压压水试验的  $P-Q$  关系曲线，如图 8.1.1-1 (b) 所示。与常规压水试验类似，该曲线可用于确定  $P-Q$  关系曲线的类型，并判断岩体的渗透稳定性。水力劈裂试验应绘制单独的稳定阶段压力-流量曲线 ( $P-Q$  曲线)，以方便进行试段岩体临界压力  $P_c$  或劈裂压力的判定，若高压压水试验过程中岩体被劈裂应作为一次劈裂过程与水力劈裂试验过程一起成图。

根据各级压力下渗透率的计算成果，可绘制高压压水试验  $P-q$  关系曲线，如图 8.1.1-1 (c) 所示。完整、较完整试段岩体被完全劈裂后，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。

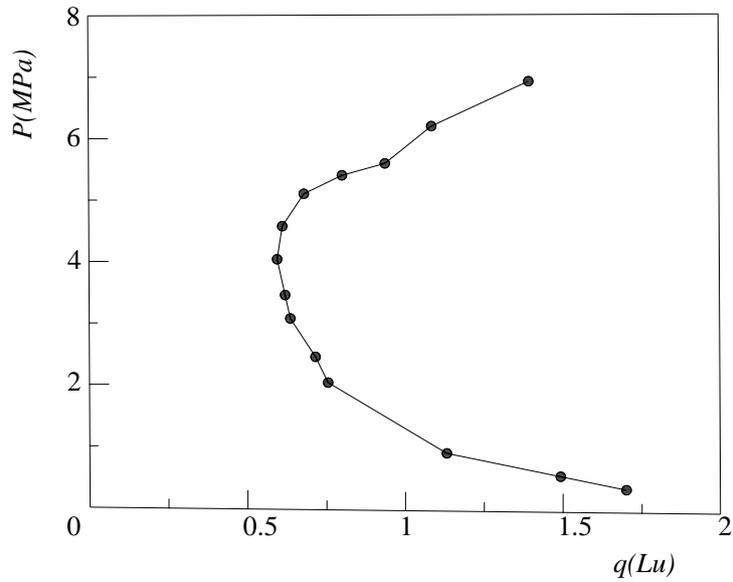
本规程推荐采用全过程电子化采集记录的试验技术， $P-Q-t$  关系曲线可以由试验记录数据快速生成，且包含试验细节，体现了技术进步。依据该技术获得的  $P-Q-t$  试验曲线和稳压阶段  $P-Q$  曲线分别见图 8.1.1-2 (a) 和图 8.1.1-2 (b)。



(a)  $P-Q-t$  关系曲线

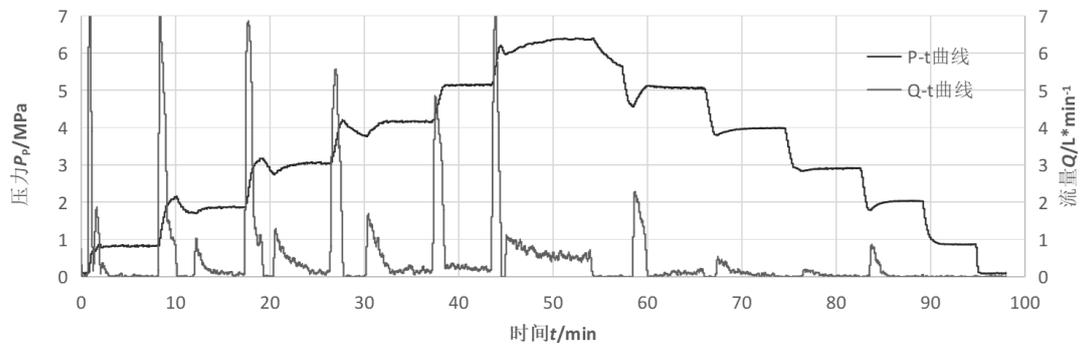


(b) 稳压阶段  $P-Q$  关系曲线



(c) 稳压阶段  $P-q$  关系曲线

图 8.1.1-1 典型高压压水试验成果



(a) 电子化采集  $P-Q-t$  曲线

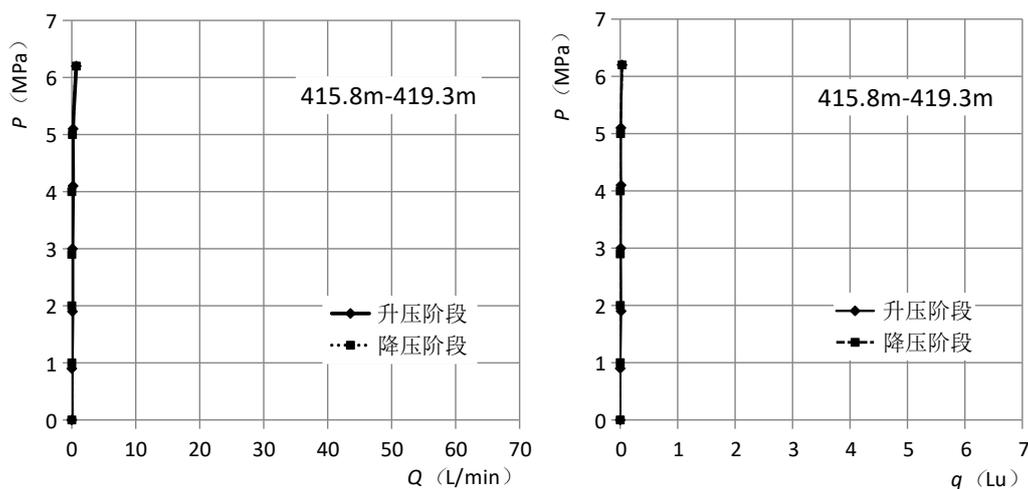
(b) 电子成图的  $P-Q$  曲线和  $P-q$  曲线

图 8.1.1-2 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多种，尤其是纵横坐标差异较大时，进而影响曲线类型判断。具体成图要求可参考本规程附录 E 的规定。

8.1.2 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。

## 8.2 结果分析

8.2.1 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 7.8.1 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，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，可以是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。试验曲线类型可按照图 7.2.1-1 所示的  $P-Q$  曲线特点进行，或者参照图 7.2.1-2 所示的简化判断流程进行。图 7.2.1-3 为部分深孔地应力高压压水试验曲线及其类型判定结果。

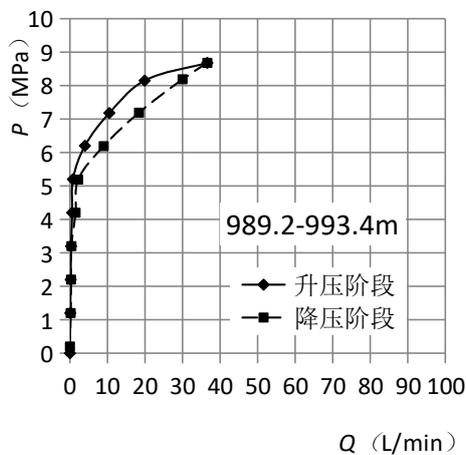
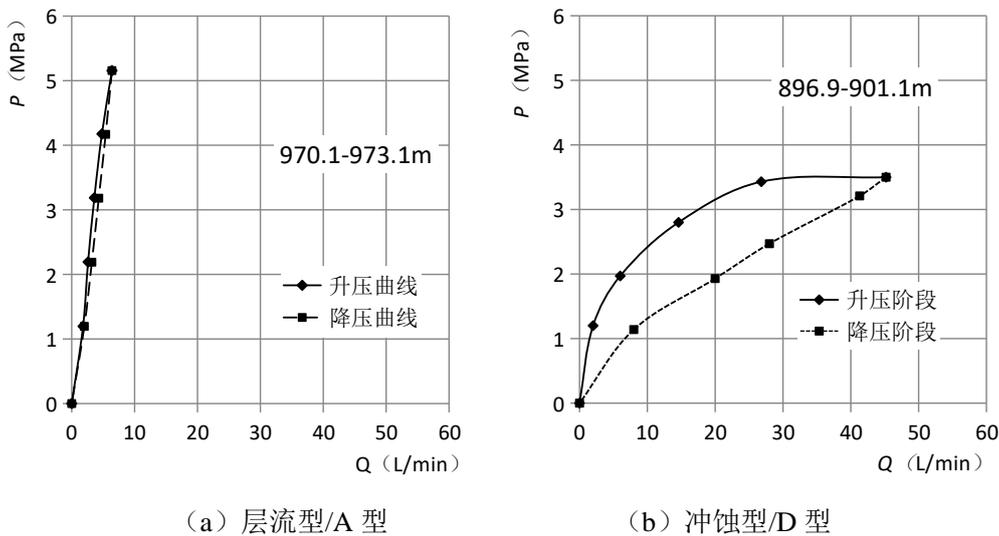


图 8.2.1-3  $P-Q$  曲线的画法及曲线类型判定

8.2.3  $P-Q$  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，初始劈裂至劈裂后的特征可归为冲蚀型，整体上呈现非典型性形态（如图 7.2.1-3（c））。

8.2.4 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 7.2.7 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。

岩体的劈裂压力概念于临界压力概念一致，通常高压压水试验只进行到最高试验压力，该过程中存在未劈裂或者初步劈裂的情况，对于岩体的抗劈裂特性了解的不充分，有需要时，可按照本规程附录 A 进行试验和资料整理。依据绘制的水力劈裂试验稳定阶段的  $P-Q$  曲线，采用与临界压力基本一致的方法可判断劈裂压力。劈裂压力可细分，如图 A 所示，初始劈裂压力  $P_{\min}$  是节理开始张开、流量明显启动时的对应压力，是保守判别方法；最终劈裂压力  $P_{\text{ult}}$  对应于节理完全张开时的压力，中间劈裂压力  $P_{\text{int}}$  根据  $P-Q$  曲线插值估计劈裂压力。

8.2.5 对于紊流型（B 型） $P-Q$  曲线，若曲线存在临界压力或劈裂压力，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：

$$H = c_1 Q + c_2 Q^2 \quad (8.2.5)$$

式中：

$H$ ——水头，m；

$Q$ ——流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$c_1$ 、 $c_2$ ——拟合参数。

式（8.2.5）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（8.2.5）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。

8.2.6 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 ( $i$ ) 可按式计算：

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (8.2.6)$$

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， $\text{m}$ ；

$H_2$ ——观测孔水头，由渗压计得到， $\text{m}$ ；

$L$ ——渗透路径，主动孔至被动孔的距离， $\text{m}$ 。

8.2.7 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 8.2.7)，由本规程式 (8.2.7) 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 8.1.1-1 (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。

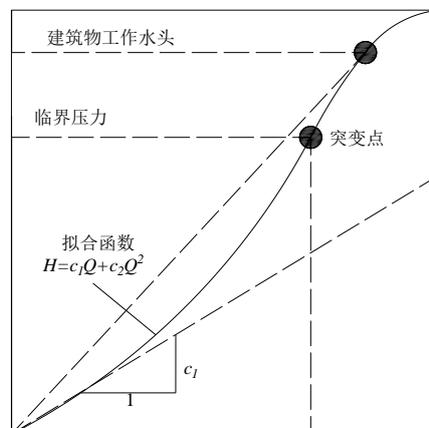


图 8.2.7 高压压水试验典型的紊流型  $P-Q$  曲线

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实际压力  $P$  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或者按照附录 A 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。

8.2.8 对于高压压水试验，由于试验压力相对较高，岩体中出现非线性渗流的可能性较大，这一点可从  $P-Q$  曲线的非线性得到验证。在非线形流条件下，达西定律不再适用，而应采用非达西流定律描述岩体中的非线性渗流规律。目前，福熙海默（Forchheimer）定律是应用最为广泛的非达西渗流定律，其表达式如下：

$$i = \frac{v}{K} + Bv^2 \quad (8.2.8-1)$$

式中：

$i$ ——水力坡降，无量纲；

$v$ ——渗透流速，m/s；

$K$ ——渗透系数，m/s；

$B$ ——福熙海默非线性系数， $s^2/m^2$ 。

福熙海默定律具有明确的物理意义，其线性项和非线性项分别对应于黏滞力和惯性力产生的压力损失。式（8.2.8-1）与第 8.2.5 条文说明中的拟合式（8.2.5）在形式上完全一致，这从另一侧面印证了选用截距为零的二次多项式进行  $P-Q$  曲线拟合的合理性。

理论分析表明，对于紊流型（B型） $P-Q$ 曲线，若岩体中的渗流服从福熙海默定律，且临界压力之前的  $P-Q$ 曲线采用截距为零的二次多项式  $H=c_1Q+c_2Q^2$  拟合，则岩体的渗透系数  $K$  和非线性系数  $B$  可利用下列公式估算：

$$K = \frac{v}{2\pi c_1} \ln \frac{l}{r_0} \quad (8.2.8-2)$$

$$B = c_2 r_0 (2\pi l)^2 \quad (8.2.8-3)$$

式中：

$l$ ——试段长度，m；

$r_0$ ——钻孔半径，m。

上述渗透系数计算公式不仅形式简单，且式(8.2.8-2)与本程式(D.0.1)在形式上完全一致。由第8.2.6条文说明可知，拟合系数为紊流型(B型) $P-Q$ 曲线的初始斜率，因此上述渗透系数计算公式表明，岩体的渗透系数与初始阶段的透水率成正比。另一方面，由第8.2.5条文说明可知，拟合系数 $c_1$ 为紊流型(B型) $P-Q$ 曲线的初始斜率，因此上述渗透系数计算公式表明，岩体的渗透系数与初始阶段的透水率成正比。另一方面，紊流型(B型) $P-Q$ 曲线的透水率通常在初始压力阶段取得最大值，当岩体的渗透系数采用最大渗透率对应的压力和流量按本规程附录E中的公式计算时，恰好得到了与流态无关的岩体本质渗透系数。

此外，由第8.2.7条的条文说明可知，对于扩张型(C型)、冲蚀型(D型)和充填型(E型) $P-Q$ 曲线，按最不利原则确定各级压力下最大的透水率，并采用最大渗透率对应的压力和流量按本规程附录E中的公式计算岩体的渗透系数，能够更好地表征岩体在扩张、冲蚀之后或未充填情况下岩体的渗透性，从而为工程设计提供更为合理的依据。