DZ

中华人民共和国地质矿产行业标准

DZ/T 0132－94

钻 孔 压 水 试 验 规 程

1994-10-31发布　　1995-07-01实施

中华人民共和国地质矿产部　发 布

目　　次

1　主题内容与适用范围……（1）
2　试验方法……（1）
3　试段长度……（1）
4　试验压力……（1）
5　试验阶段……（1）
6　试验钻孔与试验用水……（1）
7　试验设备与仪表……（2）
8　洗孔……（2）
9　试段隔离……（2）
10　水位观测……（2）
11　压力与流量观测……（2）
12　资料整理……（2）
附录A　条文解释(参考件)……（5）

中华人民共和国地质矿行业标准

DZ/T 0132—94

钻 孔 压 水 试 验 规 程

1 主题内容与适用范围

1.1 本规程规定了为测定岩体的透水性而进行的钻孔压水试验基本方法。

1.2 本规程适用于工程勘察中的钻孔压水试验工作

2 试验方法

2.1 本规程采用吕荣试验法作为基本的钻孔压水试验方法。

2.2 钻孔压水试验一般随钻孔的加深自上而下地分段进行。

3 试段长度

3.1 试段长度一般为 5m。

3.2 断层破碎带，岩溶洞穴等特殊孔段，应根据具体情况确定试段长度。

3.3 相邻试段应互相衔接。

4 试验压力

4.1 压水试验采用三级压力(p_1、p_2、p_3)，一般分别为 0.3MPa、0.6MPa 和 1.0MPa。

4.2 当试段埋深小于 30m 或岩体软弱破碎时，应适当降低试验压力。

4.3 试验压力按公式(1)计算

$$p = p_P + p_Z - p_S \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：p——试验压力，MPa；

p_P——压力表指示压力，MPa；

p_Z——压力表中心至压力计算零线的水柱压力，MPa；

p_S——管路压力损失，MPa。

4.4 压力计算零线的确定方法

4.4.1 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。

4.4.2 当地下水位在试段以上时，压力计算零线为地下水位线。

4.4.3 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。

4.5 管路压力损失宜根据实测资料确定。

5 试验阶段

5.1 压水试验一般分为五个阶段，其试验压力分别为 p_1、p_2、p_3、p_2、p_1。

5.2 当试段的透水率(q)小于 1Lu 时，可不进行降压阶段的试验。

6 试验钻孔与试验用水

6.1 压水试验钻孔的孔径一般为 59～150mm。

中华人民共和国地质矿产部 1994-10-31 批准　　1995-07-01 实施

6.2 压水试验钻孔宜采用金刚石或合金钻进，严禁使用泥浆钻进。在碳酸盐类地层钻进时，应选用合适的冲洗液。

6.3 试验钻孔的孔口管管脚应进行止水。

6.4 试验用水应保持清洁。

7 试验设备与仪表

7.1 止水栓塞应止水可靠，安装方便，止水段长度不小于七倍孔径。

7.2 水泵应压力稳定，出水均匀，在 1MPa 压力下流量能保持 100L/min。

7.3 压力表应反应灵敏，卸压后指针回零。工作压力宜保持在极限压力值的 1/3 至 3/4 范围内。

7.4 流量计应能在 1.5MPa 压力下正常工作，量测范围为 100L/min，能测定正向和反向流量。

7.5 水位计应灵敏可靠，不受孔壁附着水或孔内水滴的影响。

7.6 试验用仪表应专门保管，不得与钻进共用，并应定期进行检验。

8 洗孔

8.1 一般孔段采用正循环法洗孔，洗孔钻具应下到孔底，流量应达到水泵的最大出力。

8.2 岩粉堵塞较严重的孔段宜采用活塞抽吸法洗孔。

8.3 洗孔结束的标准是孔口回水清洁，孔底沉淀物厚度小于 0.2m。

9 试段隔离

9.1 止水栓塞定位要准确，应尽量安设在孔壁较完整的部位。

9.2 当栓塞隔离无数时，可向上移动，其范围不超过上一次试验的塞位。

10 水位观测

10.1 试验前的水位观测工作一般应在试段隔离后的工作管内进行。

10.2 水位观测时间间隔为 5min。当水位呈下降趋势且连续两次其下降速度均小于 5cm/min 时，观测工作即可结束，用最终读数确定压力计算零线。

10.3 水位观测中如发现承压水等现象时，应按有关规定继续进行观测。

11 压力与流量观测

11.1 将试验压力调整到予定值并保持稳定，开始进行压力和流量观测。

11.2 压力流量观测时间间隔为 1 或 2min，当压力保持不变，流量无持续增大趋势，且五次流量读数中最大值与最小值之差小于最终值的 10%，或最大值与最小值之差小于 1L/min 时，本阶段试验即可结束，取最终值作为计算值。

11.3 按予定的压力阶段及相应的压力值，重复上述试验过程，直至完成该试段的试验。

11.4 在降压阶段，如出现回流现象，应记录回流情况，待回流停止，流量达到 11.2 条规定的标准，方可结束本阶段试验。

11.5 在试验过程中，应对试验孔附近的井、洞、孔、泉等进行水位或流量观测。

11.6 试验结束前，应在现场绘制 p—Q 曲线，以检验试验成果的正确性。

12 资料整理

12.1 试验资料整理包括校核原始记录，绘制 p—Q 曲线、确定 p—Q 曲线类型和计算试段透水率(q)等步骤。

12.2 绘制 p—Q 曲线。

12.2.1 绘制 p—Q 曲线应采用统一的比例尺，即纵轴(P 轴)1mm 为 0.01MPa，横轴(Q 轴)1mm 为 1L/min。

12.2.2 曲线图上各点应标明序号，并依次用直线相连，升压阶段用实线，降压阶段用虚线。

12.3 划分 p—Q 曲线类型

12.3.1 确定 p—Q 曲线类型的依据，是升压阶段 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。

12.3.2 p—Q 曲线分为五种类型，即：A(层流)型、B(紊流)型、C(扩张)型、D(冲蚀)型和 E(充填)型，见表 1。

12.4 计算试段透水率

12.4.1 透水率(q)的单位为吕荣(Lu)。当试验压力为 1MPa，每米试段的压入流量为 1L/min 时，定义为 1Lu。

12.4.2 当 p—Q 曲线类型为 A 型、C 型、D 型和 E 型时，透水率按公式(2)计算。

$$q=\frac{Q_3}{p_3}\cdot\frac{1}{L} \qquad (2)$$

式中：q——透水率，Lu；

L——试段长度，m；

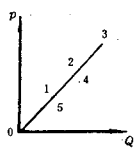
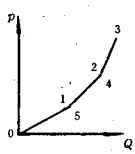
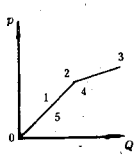
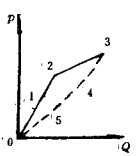
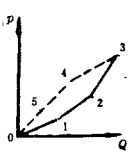
Q_3——第三阶段的流量；L/min；

p_3——第三阶段的试验压力，MPa。

12.4.3 当 p—Q 曲线类型为 B 型时，透水率按公式(3)和(4)计算。

$$q=\frac{Q_3}{\sqrt{p_3}}\cdot\frac{1}{L} \qquad (3)$$

表 1

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

$$m=\frac{\lg p_3-\lg p_2}{\lg Q_3-\lg Q_2} \qquad (4)$$

式中：m——曲率系数；

Q_2——第二阶段的流量，L/min；

p_2——第二阶段的试验压力，MPa。

其余符号的意义与12.4.2条相同。

12.4.4 透水率取两位有效数字。小于0.10Lu时记为零。

12.4.5 每个试段的压水试验成果用透水率(q)和p—Q曲线类型代号表示，如0.20A、12B、8.5D等。不能确定曲线类型的试段只用透水率表示。

附 录 A
条文解释
（参考件）

A1 主题内容与适用范围

A1.1 主题内容

钻孔压水试验是将水压入用栓塞隔离的一定长度的孔段内，观测其压力与流量，以了解岩体透水性的一种野外渗透试验方法。测定岩体透水性的方法较多，由于压水试验简单易行，适应性强，在地下水位以上和以下都可进行，可应用于较深的孔段，通过分段试验能了解岩体透水性在空间的变化，因此在工程勘察中被广泛应用，是测定和评价岩体透水性的主要方法。

A1.2 适用范围

本规程规定的方法，适用于水利水电、矿山、隧道等工程地质勘察中的压水试验工作。在灌浆等防渗处理施工前、后，钻孔压水试验是确定灌浆参数和检查灌浆质量的重要手段，为此目的而进行的压水试验是否执行本规程，由有关部门确定。

A2 试验方法

A2.1 本规程采用吕荣法作为基本的压水试验方法。

我国建国初期，采用苏联1953年规程推荐的压水试验方法。这种方法，过份强调理论上的合理性，忽视了实际上大量发生的岩体裂隙状态（开度、充填物的位置等）在试验过程中的变化，致使许多试验成果无法解释和使用，每次试验花费的时间也比较长。1978年原水电部颁发试行的压水试验规程，采用了一阶段试验，避开了一些矛盾，试验时间大量缩短，但现在看来，似乎失之过简。

目前世界上没有统一的压水试验方法，但多数国家采用吕荣试验法。吕荣试验法是1933年吕荣（M·Lugeon）首先提出的。初期的试验方法比较粗糙，在实践中经过多次修正而渐臻完善。这种方法主要特点是：

a. 采用多级压力，多阶段循环的试验方法；

b. 试验压力较大，最大压力通常为1MPa；

c. 每个阶段的试验时间较短，一般为10min左右；

d. 用吕荣（Lu）作为岩体透水率的单位。

吕荣试验方法的优点是：

a. 能了解在不同压力下及最大压力前、后同一压力下岩体透水性的变化情况，所得资料更丰富，更全面；

b. 能取得多组数据，可以相互校核，所得资料更为可靠；

c. 试验时间较短。

钻孔压水试验是一项常规性试验，我国采用国际通用的试验方法和计量单位是合情合理的，有利于国际间的工程合作和技术交流。

近年来，在岩石水力学理论研究和试验设备改进取得巨大进展的基础上，许多学者提出并采用了一些专门性的压水试验方法，以适应防渗设计对水文地质参数提出的更高要求。这些方法大致有：

a. 根据裂隙调查资料设计钻孔方向，使钻孔与一组裂隙正交，从而单独求出该裂隙的渗透性。

国外一些工程（例如法国的大麦森坝）就是据此设计坝基的帷幕和排水设施的。我国的小浪底工程也做过类似的试验。

b. 采用二至四个栓塞组成的试验器，隔离出二或三个试段，同时进行压水，其中上、下试段为辅助

试段，渗流为三维流，中间试段为正式试段，渗流为平面流。

c. 在压水试验孔附近设置一批观测孔，孔内安装双栓塞进行多孔压水试验，以了解压水试验的影响范围和岩体渗透性的非均质性和各向异性。

d. 在压入水中加入示踪剂，以测定渗透途径和渗透速度。

e. 以压气代替压水。压气试验的用途有两个方面，一是用于干燥岩石或冻结岩石中，二是用于需要了解岩体透气性的工程中，如地下核电站、水电站的密闭调压室等。

f. 高压压水试验（或水力劈裂试验），试验压力可高达 10MPa 以上，用于研究岩体的应力状态及应力与透水性之间的关系。

g. 自由振荡试验。短暂地输入压缩空气，使试段内的地下水位产生振荡，据此计算岩体的渗透性。

h. 源——汇试验。在某一地质体两侧，分别进行压水和抽水试验，以了解两侧的水力联系并计算该地质体的渗透性。

专门性试验方法很多，且仍在不断发展中。这些专门性试验有鲜明的目的性和针对性，是对常规压水试验的重要补充。

A2.2 钻孔压水试验通常采用自上而下逐段钻进，逐段压水的办法进行。除此之外，还有双栓塞试验方法，即首先将整个或部分钻孔钻出，然后用双栓塞逐段隔离进行试验。这种方法的优点是：

a. 试验工作与钻探工作可以部分或全部分离，因而费用较低；

b. 某些操作步骤（如洗孔，地下水位测量等）可以合并进行，试验时间较短；

c. 可以根据孔内实际情况合理确定栓塞位置和试段长度，试验成果与地质条件联系较紧密。

双栓塞试验存在的问题是：

a. 下栓塞的止水可靠性不易检验；

b. 由于钻程较长，岩粉堵塞裂隙的可能性增大。

目前我国已研制出气压双栓塞，在结构上采取措施保证了下栓塞的工作可靠性。但在全国范围内，双栓塞应用仍不广泛。

关于双栓塞试验的裂隙堵塞影响问题，国内一些单位做过对比试验。成果表明，采用金刚石钻进工艺，岩粉堵塞裂隙致使双栓塞试验成果偏小的出现机率不大，约为 10%。但目前可供比较的资料尚不够充分，为慎重计，在国标中没有推荐双栓塞试验方法，有条件的单位可以采用，但一次钻进长度不宜超过 40m，且应将钻孔清洗干净。

A3 试段长度

A3.1 试验段是编制渗透剖面图，进行渗透计算的基本单位。由于压水试验求得的透水率是该段的平均值，因此，试段过长，势必影响成果的精度，试段过短，又会增加试验工作量。国外有关规定中的段长为 3～5m，多数为 5m，与我国规定基本一致。

A3.2 试段长度选择应考虑实际地质条件，即不应使一个试段内含有透水率相差悬殊的地质体，同时还应考虑下一试段止水栓塞的位置和可靠性。因此，对断层破碎带、岩溶洞穴等特殊孔段，应根据具体情况确定试段长度。

A3.3 相邻试段应互相衔接，不应有漏试的孔段，以保证资料的完整性。必要时试段可以有少量重复。

A4 试验压力

A4.1 由于吕荣值的定义压力为 1MPa，故试验的最大压力（p_3）一般应达到该值。为了使试验成果均匀分布，其余两级压力（p_1、p_2）应分别为 $1/3p_3$、$2/3p_3$，即一般为 0.3MPa 和 0.6MPa。

一般说来，确定最大试验压力可不考虑建筑物的规模，因为压水试验影响范围内的压力分布与水工建筑物蓄水后地基内的压力分布情况完全不同，两者不具有可比性，个别工程如规模巨大，且地基内含有可能被冲蚀的充填物时，应视具体情况进行专门性试验。

A4.2 当试段位置距岩面较近时，采用最大压力为 1MPa 进行试验，可能会导致岩体抬动变形，使所得的渗透性失真。因此，多数国家都对岩面以下一定深度内的试段所用的最大试验压力(p_3)加以限制。国外常采用的压力递增标准是每英尺 1 磅/英寸²(lpsi per foot)，亦即每米 0.023MPa。

实际上，在压水试验时，岩体是否会产生抬动变形，取决于很多因素。例如：

a. 裂隙中渗透压力的大小是岩体能否会产生抬动变形的关键，而渗透压力的分布情况与裂隙的性态(产状、延伸长度、宽度、渗透性的变化等)有关。试验时裂隙中的渗透压力不是均匀分布的，往往在孔壁附近较大，向远处迅速衰减，情况比较复杂。

b. 要使岩体上抬，除了克服岩体的自重压力外，还必须克服岩体间镶嵌、咬合作用形成的结构力，结构力的大小与岩体强度、风化程度、裂隙产状和裂隙发育程度有关，其变化范围较大。

鉴于上述情况，本规程没有对浅埋试段的最大试验压力作出具体规定。在试验中，建议采取如下措施：

a. 在每个工程工作开始时，对浅埋试段进行少量试验，以确定不引起岩体变形抬动的试验压力；

b. 在岩层产状平缓、强度较低的沉积岩地区，下列数值可供参考：

当试段埋深小于 15m 时，p_3=0.3MPa；当试段埋深为 15～30m 时，p_3=0.6MPa。

A4.3 试验压力通常由三部分组成，即压力表指示压力(p_p)、水柱压力(p_z)和管路压力损失(p_s)。公式(1)表示的是压力表安设在进水管上这种一般情况下的试验压力计算方法。如果采用双管柱栓塞，或压力表安设在与试段连通的测压管上，则 p_s=0。如采用安设在试段内的压力传感器测压，则可直接测得试验压力。

A4.4 压力计算零线的确定方法对竖直和倾斜钻孔都可适用。不同情况下的压力计算零线确定方法见图 A1。

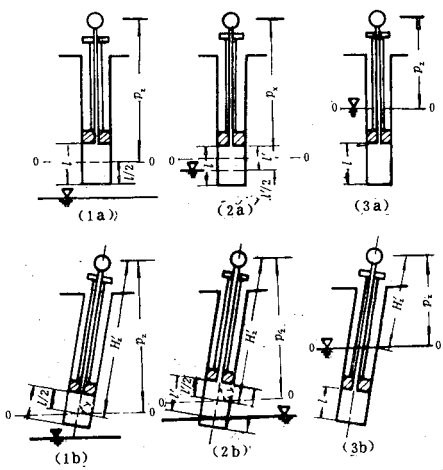


图 A1

这些确定方法的前提是岩体为均质的。显然，对于非均质岩体，上述原则只能是近似的。

当地下水位位于试段以内时，严格地说，即使对均质岩体而言也是不正确的，但误差不大，故仍沿用过去的习惯做法，未予修改。

A4.5 管路压力损失的确定方法有两种，即公式计算和实际测定。用公式计算管路压力损失，因参数不易确定，计算结果往往矛盾较大，特别是当钻杆和接头内径不一致时计算误差更大。

管路压力损失的实测方法是用压水试验实际使用的钻杆先后配两套管路，其长度相同，但接头数差三付以上。将不同流量的水输入管路，测定流量值和两端的压力差。绘制两套管路的压力损失与流量关系曲线，量得两者的压力损失差，由此分别算出每付接头和每米钻杆的压力损失。将所得资料编成图表，供试验时使用。

表 A1 是水利部东北勘测设计院实测的流量——压力损失表(摘录)。所测定的钻杆内径为 38mm，接头内径为 22mm。从表中可以看出，管路压力损失随流量的增大而急剧增大，且压力损失主要产生在接头部位。由此可见，不计压力损失将使试验成果产生较大误差，还可能改变 p—Q 曲线形状，使 B 型曲线的比例增大。

表 A1

流　　量 (L/min)	每米钻杆压力损失 (kPa)	每付接头压力损失 (kPa)
25	0.10	0.90
50	0.85	2.10
75	1.40	5.90
100	2.10	11.20

A5 试验阶段

A5.1 初期的吕荣试验是用 10kg/cm² 的压力进行一阶段试验，后来人们逐渐认识到一阶段试验的局限性。大量的试验成果表明：

a. 在不同的压力下，岩体裂隙内的渗流状态是不相同的；

b. 在不同的压力下，岩体的裂隙状态会发生变化，因而其渗透性也会发生变化。

只有采用多级压力进行循环试验，将不同压力下的流量变化情况以及最大压力前、后同一压力下的流量变化情况进行分析，才能了解渗流状态和裂隙状态的具体情况，从而合理地确定岩体的渗透性。只做一阶段试验，特别是只做压力高达 1MPa 的一阶段试验，难以判断岩体是否已产生变形或冲蚀现象，所得成果是不够全面的。

目前，国外多采用多级压力循环试验方法，但具体规定不尽一致。多数国家采用三级压力五个阶段，即逐级升压至最大压力，然后按原压力逐级下降(p_1—p_2—p_3—p_2—p_1)。有的国家采用四级压力七个阶段，即 p_1—p_2—p_3—p_4—p_3—p_2—p_1。美国垦务局采用五级压力八个阶段，即 p_1—p_2—p_3—p_4—p_5—p_4—p_3—p_2—p_1。他们采用较多压力阶段的原因，是希望求出 p—Q 曲线的曲率系数 m，并据此计算渗透性。日本建设省的《吕荣试验技术方法》中规定为五级压力九个阶段，且对最大压力不加限制，而是企图通过试验求出流量突然增大时的临界压力。

本规程采用三级压力五个阶段的试验方法，这样既能达到压水试验的基本目的，又不致使试验时间过长。当某个工程认为有必要时，也可以采取较多的试验阶段。

A5.2 当试段的透水率小于 1Lu 时，p—Q 曲线通常为直线，从工程的实际需要和试验可能达到的精度出发，区分曲线类型的意义不大，因此，可以不进行降压阶段的试验。国外资料中也采用类似的方法。

A6 试验钻孔与试验用水

A6.1 试验钻孔的孔径对压水试验成果有一定影响，但一般来说，在通常的孔径(59～150mm)范围内，这种影响很小，可以忽略不计。当孔径特大或特小时，其渗流边界条件差异较大，这类钻孔的试验成果与普通钻孔的试验成果之间的关系，应进行专门的对比试验。予以论证。

A6.2 为了减少岩粉堵塞，压水试验钻孔最好采用金刚石或合金钻进。泥浆钻进会使孔壁上形成一层

泥膜，并堵塞裂隙，因此压水试验钻孔严禁使用泥浆钻进。

在金刚石钻进中，通常使用乳化冲洗液。乳化液由水、油和表面活性剂组成。乳化液破乳后，将产生大量的油泥，泡沫和胶状物，这些物质会严重堵塞裂隙，妨碍水流通过。石灰岩、白云岩及其他含有二价金属元素的岩石，对活性剂有强烈的吸附作用。将产生严重破乳，故在这类岩石中钻进时，应选用合适的冲洗液。

A6.3 为了使钻进冲洗液能从孔口返出，减少岩粉堵塞的机会，试验钻孔应下入孔口套管，并对套管脚进行止水。

A6.4 试验用水应保持清洁，防止水中物质进入岩石裂隙，影响试验成果质量。

A7 试验设备与仪表

A7.1 止水栓塞是压水试验的关键设备。目前国内使用的止水栓塞有双管循环式，单管顶压式，水压式和气压式等几种类型。双管循环式栓塞的优点是不必考虑管路压力损失；缺点是需下两套管路，安装费时，钻孔较深时尤其如此，这种栓塞目前已很少采用。单管顶压式栓塞的优点是操作简单，但塞长较短，当孔壁岩石不太完整时，止水效果往往较差。水压式和气压式栓塞的共同特点是胶囊易与孔壁紧贴，接触面积大，栓塞可以做得较长，止水可靠性好，操作较方便，宜优先采用。但鉴于我国各地区，各部门的设备情况各不相同，故规程中只提出一般要求，未作具体规定。

关于止水栓塞长度问题，东北勘测设计院曾进行电拟试验，比较不同栓塞长度的绕渗量大小（假设地层为均质体）。试验结果表明，当栓塞长度达到钻孔孔径的 7.5 倍时，绕渗量所占比例不大，且随着栓塞加长，绕渗量下降的速度显著减缓。国外有人用数学模型研究栓塞长度的影响，也得出类似的结论。因此，规程中规定栓塞的止水段长度不小于试验钻孔孔径的七倍。

A7.2 本条对试验用水泵提出了基本要求。应当指出，供水能力为 100L/min 的水泵只能使岩体透水率小于 20Lu 的试段达到吕荣试验的定义压力 1MPa。因此，岩体透水性较大的地区，特别是岩溶发育地区，宜选用供水能力更大的水泵。有条件的地方，宜采用电动离心泵。当使用往复式水泵时，应在出水口处安设容积不小于 5L 的稳压空气室，以提高出水口压力的稳定性。

自流供水压力稳定，调节方便，无疑是压水试验的最佳供水方式，条件允许时宜优先采用。

A7.3 近年来，我国新型测压仪表的研制工作取得了可喜的进展。在水利、能源系统现已通过鉴定的试段压力计有 SCY-1 型钻孔压水试验测压仪和 ZS-1 000 型水文地质综合测试仪，这些仪器不仅能直接量测试段内的实际试验压力，有的还具有自记、打印和计算功能。但这些仪表的普遍推广应用看来尚需较长的时间，目前主要使用的测压仪器仍然是压力表，故本规程只对压力表提出了一些基本的技术要求。

A7.4 目前我国压水试验用的测定流量的仪表多为指针式水表，必须测读两次并进行计算才能求出一定时段的平均流量。吕荣试验法的流量测读时间间隔短（1～2min），每阶段的试验时间也不长，用水表测流、读数、计算比较紧张，容易出错，要准确、及时地判断是否已达到试验结束标准有一定困难。适应试验工作的需要，应逐步推广采用能表示瞬时流量的直读式流量计，这种流量计国内已有厂家生产。和压力表一样，直读式流量计也有一定的流量适用范围，而实际试验时，流量将在 1～100L/min 的范围内变化，工地应当有不同规格的全套流量计，根据不同情况分别选用。

多阶段循环试验的降压阶段，有时会出现水自岩体流入钻孔的现象（称为“回流”）。要观察和记录回流情况，所用的流量计就必须能测定正向的和反向的流量。

A7.5 目前我国的地下水位量测设备，大多是在导线的一端接测头，另一端接万能表，无专用设备。由于测头绝缘不好，往往反应不灵，并常有误读，应尽快改进、提高。

A7.6 为了保持试验仪表的精确性，应专管专用，按有关规定，仪表应定期送检。

A8 洗孔

A8.1 正循环洗孔法（亦称压水洗孔法）是从工作管内送入清水，使孔内岩粉从工作管与孔壁之间的环

状间隙向上返出孔外，排粉效果随水流上返速度加快而增大，因此要求在洗孔时采用可能达到的最大水量。当孔径大于91mm时，岩粉上返速度较慢，应在孔底附近安设接砂筒。孔径如有强渗漏段，用此法洗孔效果较差，应进行堵漏或换用其他洗孔方法。

A8.2 活塞抽吸洗孔法在供水水井中已被广泛应用，其原理是快速上下提动活塞，使活塞以下的孔段产生负压，从而将附在孔壁上以及进入孔壁附近裂隙内的岩粉吸出。这种方法设备简单，操作方便。用金刚石钻进的钻孔，由于孔壁规整，活塞提动形成的抽吸作用更大，因而效果更好。在岩石比较破碎的孔段，抽吸洗孔可能导致孔壁坍塌，不宜采用。

此外，洗孔方法还有泵吸抽水洗孔法和压缩空气抽水洗孔法。受水泵吸程限制，泵吸抽水洗孔法效果往往不明显。压缩空气抽水洗孔效果较好，有条件的地方可以采用。

A8.3 规程中未对洗孔时间作具体规定，而是提出洗孔标准，达到此标准，洗孔工作即可结束。

A9 试段隔离

A9.1 选择适当的栓塞位置，对于保证隔离效果，提高成果质量极为重要。国外有关规定十分强调栓塞位置的选择，如英国《场地勘察标准(BS 5930·1981)》中要求在确定栓塞位置时，除了仔细观察岩心外，还应进行测井或电视观测。

A9.2 当栓塞隔离无效时，最常见的措施是移动塞位。考虑到试验孔段要连续、不出现漏试，故规定只能向上移动，且不应超过上次试验的塞位。

除此之外，可供选择的措施还有起塞检查，换用其他止水效果更好的栓塞等。当上述措施无效时，可以灌制混凝土塞位。做法是先扩孔，将中细砂填入待试孔段，然后灌注水泥砂浆，形成长度大于2m的混凝土段。待混凝土凝固后，钻开混凝土，将砂子冲出，即可将栓塞置放在混凝土段内。

A10 水位观测

A10.1 试验前的地下水位观测工作，其主要目的，是确定水柱压力的起算点，即确定压力计算零线。

在水位观测问题上。看法不尽一致。例如，豪斯比(A. C. Houlsby)认为，在计算试验压力时，无需考虑水柱压力，当然也就不必测定地下水位。大多数学者则认为，初期的吕荣试验不考虑水柱压力的影响，成果过于粗糙，特别是在高山峡谷地区，地下水位埋藏较深的情况下，这样做将出现成倍的误差。至于如何进行观测，除日本建设省的《吕荣试验技术准则》外，大多未作具体规定。

在分析国内外资料的基础上，本规程规定观测工作一般在试段隔离后，在工作管内进行，理由是：第一，测得的是试段内的水位，理论上合理；第二，只要有合适的仪器，并确定适当的标准，这样做并不费事；第三，更主要的，通过观测，有可能了解到岩体中含水层分布和变化等水文地质资料，这些资料甚至比一次压水试验更有价值。

在水文地质条件简单，有足够资料说明只存在一个含水层的地区，也可以用钻孔水位代替试段水位。

A10.2 水位观测结束标准的确定原则，是既使因水位观测未达稳定引起的压力误差控制在合理的范围内，又不致因此而花费过多的时间。

为此，分别对下述两种情况进行估算：

a. 试段位于天然地下水位以下

由于钻进给水的影响，孔内水位高于天然地下水位。栓塞隔离后，工作管内的水位逐渐下降，向天然地下水位接近。管内水位的下降速度取决于试段的透水率以及管内水位与天然地下水位的高差。这个过程，可视为一次变水头的压水试验，如图A2所示。若试段长度为L(m)，工作管内径为r(cm)，试段透水率为q(Lu)，则某一瞬时管内水位与天然地下水位的高差H(m)与该瞬时水位下降速度n(cm/min)之间的关系如下：

$$H=\frac{\pi nr^2}{10Lq} \quad \cdots\cdots (A1)$$

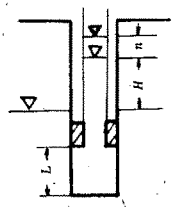


图 A2

允许的 H 值应与压力表的精度等级相适应。对于极限压力为 1.5MPa 的压力表，允许误差为 22.5～37.5kPa，取 30kPa，即相当于 $H=3$m。

若 $L=5$m，$r_0=2$cm，则得

$$H=0.25\frac{n}{q} \quad \cdots\cdots (A2)$$

由此可得 n、q 和 H 之间的关系，见表 A2。

表 A2

H(m) \ q(Lu) / n(cm/min)	0.5	1.0	2.0
1	0.5	0.25	0.125
2	1.0	0.5	0.25
5	2.5	1.25	0.625
10	5.0	2.5	1.25

从上表可知，如取 $n=5$cm/min，则当试段透水率 $q<0.50$Lu 时均可满足 $H<3$m 的标准，反之，如 $H>3$m，则该试段 $q<0.50$Lu，岩体的透水性很小，超出了仪表精度和实际需要研究的范围。因此，水位观测结束标准定为 5cm/min 是合适的。

b. 试段位于天然地下水位以上

在这种情况下，岩体本来是干燥的，由于钻进时向孔内给水，使岩体中存在一个悬挂于天然地下水位之上的暂时性水体，在钻孔内可以测到水位，且逐渐下降。这个暂时性水体在压水试验过程中是否起作用，看法不尽相同，但多数人认为，由于钻进时间较长，这个水体的范围会大于压水试验的影响范围，因而可以起与天然地下水位相似的作用，这一点已为大量的野外压水试验成果所证实。

在压水试验期间，这个暂时性水位的变化规律很难精确地表达。一般地说，由于试验水的加入，将会出现水位下降速度减慢、水位不变以至水位上升等不同情况。但在估计暂时性水位对压水试验的影响时，不妨假设最极端的情况，即在压水试验过程中暂时性水位仍与压水试验前相同的速度下降，且在整个试验期间速度不变。吕荣试验的试验时间一般为 1 小时左右，若水位允许误差为 3m，则压水试验前孔内水位的允许下降速度为 5cm/min，也就是说，在这训情况下，水位观测结束标准也可以确定为 5cm/min。

以上估算无疑都是粗略的，但这些估算结果表明，对于试验压力大，历时较短的吕荣试验而言，放宽水位测量标准，不为此花费过多的时间，不仅是必要的，而且是可能的。

A10.3 当观测过程发现承压水等水文地质现象时，观测的目的就不仅是确定压力计算零线，而是进一

步收集资料，查明水文地质问题。为此应根据当地地质条件和工程需要制定具体要求，包括延长观测时间，安设长期观测装置等。

A11 压力与流量观测

A11.1 压力、流量观测工作有两种方式，一种是调节压力使其稳定不变，观测流量随时间的变化情况；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。本规程采用前一种观测方法。对于目前常用的试验仪表来说，这种方法实际上是唯一可行的。

A11.2 本条中有四个问题需要说明，即短时间试验成果的可靠性，观测间隔、观测结束标准和取值以及流量增大问题。

1. 短时间试验成果的可靠性

吕荣压水试验的一个重要特点，就是试验持续时间短。国外资料中规定不完全相同，每个阶段大体上在5～10min之间。

许多学者对压水试验达到稳定所需的时间进行了研究，一致认为，该时间与试段的渗透性成反比，即岩体渗透性愈小，达到稳定所需的时间愈长。

从理论上分析，当试段位于地下水位以下，岩体原已处于饱和状态时，压水试验的流量需要经历一段时间之后才能达到稳定，其原因可能有两方面，一是当裂隙网互相切割，且大体上均匀分布时，压水使钻孔附近的地下水位上升，这部分岩体充水饱和需要一定时间；二是试段附近的岩体在压水时处于承压状态，在试验压力作用下，岩体产生弹性变形，具有一定的储水能力，这部分体积充水需要一定的时间。岩体渗透性愈小，补充水量所需的时间也就愈长。不论是哪一种情况，试验过程中流量都应当逐渐减小，最后趋近于恒定值。因此，如果试验时间不足，则所得流量值应当偏大。

一些学者用数学模型计算试验达到稳定(96%)所需的时间，由于假设的边界条件不同，计算结果也有差异。例如，当岩体渗透性为0.1m/d(大致相当于10Lu)时，伯利斯(J. C. Bliss)和拉许顿(K. R. Rushton)为20.4min，而布拉辛顿(F. C. Brassington)和瓦特豪尔(S. Walthall)为30min。

野外试验不可能达到96%的标准，而稳定所需的时间随着标准的放宽将显著缩短。因此，还应当从实际使用的角度出发，对延续时间为10min左右的试验成果的可靠性进行分析。由于我国吕荣试验的实际资料不多，故利用了豪斯比文中列举的四个坝址811次试验资料，以及布鲁斯(O. A. Bruce)和米尔摩尔(J. P. Millmore)列举的基尔德(Kielder)坝的77次试验资料，见表A3。表中所列数字均为占总段数的百分比。曲线类型划分采用豪斯比的方案，即分为A(层流)型、B(紊流)型、C(扩张)型、D(冲蚀)型和E(充填)型五种。五种类型的详细说明见A12.3条。

表A3

透水率 / 曲线类型 / 试验地点	<1Lu	1～3Lu					>3Lu				
	不分	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1号坝	30	33	7	0	1	2	0	14	2	8	3
2号坝	17	52	5	1	0	3	3	11	2	3	3
3号坝	8	11	5	0	3	6	2	46	5	7	7
4号坝	22	16	0	3	3	5	8	11	8	16	8
基尔德坝	29	10	0	4	0	0	12	13	12	16	4
平均	24	32	5	1	1	2	3	17	4	7	4

从试验成果可靠性的角度看，A、B、C三种类型在最大压力前、后同一压下的流量值相同或基本相

同，这不太可能是偶然的巧合，应当能够说明，试验时间虽短，但对成果的精度影响甚小，从工程实际使用的观点看，成果是可靠的。O 型成果最大压力前的流量小于最大压力后同一压力下流量（即 $Q_5>Q_1$，$Q_4>Q_2$），显然与试验延续时间不足，流量未达到完全稳定无关。只有 E 成果最大压力前的流量大于最大压力后同一压力下的流量（即 $Q_5<Q_1$，$Q_4<Q_2$）。产生这种类型曲线的可靠因素比较复杂，包括裂隙在试验过程中被堵塞，部分裂隙处于封闭状等，当然也不能完全排除试验延续时间不足这种可能性。但这种类型成果所占的比例很小；在五个坝址近 1 000 段成果中仅占 6%。由此说明，延续时间为 10min 左右的试验成果，至少对 90% 以上的试段而言，不影响其实际使用，成果是可靠的。

2. 观测时间间隔

缩短观测时间间隔，是短时间内完成试验的关键。国外的观测间隔通常为 1min，考虑到我国的实际情况，规定为 1 或 2min，东北勘测设计院做过一批生产性试验，由经过短期培训的工人操作记录，使用指针式水表测流。实践表明，在上述时间间隔内测读流量是可以做到的。当然，改用直读式流量计，无疑将更有利于试验工作的顺利进行。

3. 观测结束标准和取值

理论上，流量在向稳定值趋近过程中，其变化率是随时间递减的。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超过某一标准，这时试验虽然未达到真正稳定，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。

参考国外有关资料，规程规定，五次流量读数的相对差不大于 10%，或绝对差不大于 1L/min，该阶段试验即可结束。绝对差的标准主要是根据流量计实际可能达到的精度确定的。

取最后一次流量读数作为计算值，比取该时段内的平均值更合理，也较方便。

4. 流量增大问题

理论上，当压力保持不变时，不应出现流量随时间持续增大的现象。因此，如出现这种情况，应首先进行检查，如果不是设备、仪表有故障，则应延长试验时间，直至流量不再增大，且达到前述标准方可结束。

A11.3 本条无解释

A11.4 在压水试验过程中，当试验由高压力转到较低压力时，有时会出现水从岩体流入钻孔的现象，这种现象称为回流。

产生回流原因，是由于在试验压力急剧下降时，钻孔附近岩体内的水压力暂时高于试段内的压力，因而使水自岩体流入钻孔内。这个过程一般持续数分钟至十余分钟，随着岩体内水压力的逐渐下降而消失。当岩体内的水压力下降到低于试段压力时，水重新自试段流向岩体。回流现象是岩体储水效应的反映。储水效应是岩体具有储存一定压力的水体的能力，其大小与岩体的弹性变形性质有关。因此，有人指出，可以利用回流资料估算岩体的变形模量。

在巴西的圣伊萨贝尔(Santa lsabel)坝址，17 个钻孔中共出现 38 次回流，并总结出如下规律：

1. 第五阶段全部出现回流，第四阶段有一半出现回流；
2. 回流量小于总压入水量的 20%；
3. 有半数试段的 p—Q 曲线为 C 型。

东北勘测设计院在临江和哈泥河两坝址的压水试验中也多次发现回流，其规律与圣伊萨贝尔坝址相似。

在压水试验中若出现回流现象，应详细记录有关情况（回流时间、回流流量等），以便积累资料。尤其要注意，切不可把流量从负经零到正这个变化过程中的暂时停滞，误认为是流量为零。

A11.5 本条规定的目的，是为了了解岩体裂隙的连通情况和压水试验的影响范围。必要时，可配合使用示踪剂进行观测。

A11.6 本条在现场绘制 p—Q 曲线，可根据 p—Q 曲线形状判断试验成果是否正确，如存在问题应及时采取补救措施。

A12 资料整理

A12.1 吕荣试验的成果解释和资料整理方法是近几年来逐渐发展完善的，主要包括划分类型和计算透水率两个组成部分，这与我国过去的压水试验只是计算单位吸水量 ω 是不相同的。

应当指出，各国吕荣试验的成果整理方法也不完全一致。例如，美国垦务局是分别计算均匀介质和裂隙组两种等价渗透系数 (equivalent permeability)。日本建设省则用临界压力，吕荣值和换算吕荣值三个指标表示试验成果，但多数国家采用的方法与我们基本上一致。

A12.2 p—Q 曲线是划分类型的基础，绘制 p—Q 曲线应采用统一的比例尺。实践经验证明，如果采用不同的比例尺，例如在流量较小时用较大的比例尺，就会人为地扩大曲线的不规则程度，使判读和划分类型产生困难。

在豪斯比的文章中原来并不是按 p—Q 曲线划分类型，而是分别计算出五个阶段的吕荣值，画出直方图，以此作为分类依据。这两种办法实质上是一致的，但我们认为，在 p—Q 曲线图上标明各点序号，并分别用实线和虚线表示升压曲线和降压曲线，能更清晰、直观地表示出试验过程中压力与流量之间的变化情况。

A12.3 划分 p—Q 曲线类型

划分类型的主要依据有两点，一是升压阶段 p—Q 曲线的形状，即 1、2、3 三点与原点的联线是直线，凸向 Q 轴的曲线还是凸向 p 轴的曲线；二是降压阶段 p—Q 曲线与升压阶段 p—Q 曲线是否重合及其相对关系。这些类型划分依据显然是豪斯比在其论文《吕荣压水试验的常规解释》中提出的。

下面，对五种 p—Q 曲线类型作进一步说明。

1. A(层流)型

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。

渗透状态为层流。在整个试验期间，裂隙状态没有发生变化。

2. B(紊流)型

升压曲线凸向 Q 轴，降压曲线与升压曲线基本重合。

渗透状态为紊流(这里的紊流是对一切非线性的压力——流量关系的统称)。在整个试验期间，裂状态没有发生变化。

3. C(扩张)型

升压曲线凸向 p 轴，降压曲线与升压曲线基本重合。

C 型曲线最关键之处在于，在某一压力之后，流量突然增大，且第四点与第二点，第五点与第一点基本重合。至于第一、二两点之间，可以是通过原点的直线，也可以是凸向 Q 轴的曲线，表明在流量突增之前的渗流状态，但不作划分曲线的依据。

C 型曲线说明，在试验压力作用下，裂隙状态发生了变化，岩体渗透性增大，但这种变化是暂时性的，可逆的，随着试验压力下降，裂隙又恢复原来状态，呈现出弹性扩张的性质。从整个 p—Q 曲线的变化中，可以看出裂隙弹性扩张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. D(冲蚀)型

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。

D 型曲线主要特点是，在某一压力之后，流量突然增大，且 $Q_4>Q_2$，$Q_5>Q_1$。p—Q 曲线中的其他变化，对曲线类型划分来说不是本质性的。

D 型曲线说明，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。由于选择试验压力时已根据试段位置作了限制，因而基本上排除了因压力过大导致岩体抬动变形的可能性。因此，流量突然增大，且不能恢复原状，多半是由于裂隙中充填物被冲蚀，移动造成的。

冲蚀型 p—Q 曲线中的升压曲线和降压曲线都可能出现一些不同的形态。如升压曲线中的第一、第二两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的流态为层

流或紊流；降压曲线可能为凸向 p 轴的曲线(说明一部分可恢复的弹性变形)，直线(层流)或凸向 Q 轴的曲线(紊流)。总之，从整个 p—Q 曲线的变化中，可以看出渗流对裂隙充填物的冲蚀作用与试验压力之间的关系，这种冲蚀作用对原来渗流形态的干扰，冲蚀作用的程度以及冲蚀后的渗流形态等。

5. E(充填)型

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。

E 型曲线的关键之点在于 $Q_4<Q_2$，$Q_5<Q_1$，至于升压，降压曲线的形状对类型划分不是主要因素。

豪斯比原来对 E 型曲线的定义是五个试验阶段的吕荣值持续减小，亦即升压曲线凸向 Q 轴，降压曲线凸向 p 轴。他对这种类型的解释是，试段附近的裂隙或空隙处于半封闭状态，当水充满裂隙或空隙后，流量即逐渐减小，甚至趋近于零。实际上，产生 Q 型曲线的原因可能更为复杂。除了上述因素之外，可能还有：在试验过程中裂隙被外来的固体颗粒所充填；试验时间不足，试验附近的流网变化较大；忽视回流影响，造成流量选择错误。

为了进一步判别曲线产生的原因，最好适当延长试验时间。

A12.4 计算试段透水率

A12.4.1 以吕荣(Lu)为计量单位来表征岩体的透水性是大多数国家的习惯用法。吕荣原来的定义压力为 10kgf/cm²。根据我国公布的法定计量单位，作为压力单位，kgf/cm²已被废除，应统一采用 Pa (帕斯卡，简称帕)，对压水试验来说，采用 MPa(兆帕)较为方便。MPa 与 kgf/cm² 之间不是简单的十进制关系，10kgf/cm²＝0.98MPa。如果把吕荣的定义压力直接换算为 0.98MPa，似乎过于繁琐，也不便于应用，故将定义压力改为 1MPa，从压水试验实际可能达到的精度看，这种改变不会对成果使用造成明显的影响。

A12.4.2 当 p—Q 曲线为 A 型时，流量与压力呈线性关系，选用任一阶段的压力和流量值计算透水率，其结果都相近。当 p—Q 曲线为 C 型，D 型或 E 型时，说明在压水试验过程中，孔壁附近的渗流条件产生较大的变化，裂隙受到了扩张，冲蚀或堵塞。这种变化关系复杂，难以用数学公式来表达。在这些情况下，选用与定义压力最接近的最大压力阶段的压力和流量值，用线性比例关系计算透水率是比较合理的。

应当指出，在豪斯比的原文中，不同类型的试段选的透水率计算参数是不同的，但选择的依据在理论上不易阐明，解释也不尽令人满意，容易造成混乱，本规程没有采用。

A12.4.3 当 p—Q 曲线为 B 型时，说明试验时的渗透状态为紊流或混合流，且试验期间未发生明显变化。在这种情况下，若仍按线性计算透水率，成果可能偏大较多，如进行适当的数学处理，可使误差减小。

曲率系数 m 通常并非常数，往往随压力的不同而有较大变化，故规程规定，用较高压力的 m 值来计算透水率。理论上，m 值不应大于 2，因此，当 $m>2$ 时，如检查计算无误，可取 $m=2$。

A12.4.4 透水率取两位数字，与压水试验需要和可能达到的精度是相适应的。当 $q<0.10$Lu 时，数字本身已无意义，记为零是合适的。

A12.4.5 吕荣试验是五阶段试验，因此，单纯用透水率大小来表示压水试验成果显然是不够全面的。本规程采用了英国基尔德坝的成果表示方式，即同时表示透水率和 p—Q 曲线类型，这样可以更全面地反映出该试段岩体的渗透特征和数值大小。

事实上，p—Q 曲线类型能揭示出岩体裂隙的某些工程特性，它们本身也具有一定的规律性。

从表 A3 所列举的统计资料中可以看出，当透水率小于 3Lu 时，p—Q 曲线以 A 型占压倒优势，其余四种类型很少出现。当透水率大于 3Lu 时，p—Q 曲线以 B 型为主，C，D，E 型三种类型也比渗透性小时显著增加，而 A 型由大大减少。

许多学者研究了裂隙的渗透规律后得出，渗流形态与裂隙的开度，粗糙度和平直度有关。对于壁面平直，光滑的裂隙，当其开度小于 0.15mm 时，其流态均为层流，当开度大于 0.4mm 时为紊流。开度为 0.15—0.4mm 的裂隙，在低压时为层流，高压时为紊流。由此可见，室内模型试验与野外试验统计结果是一致的。

帷幕灌浆大多以水泥作为灌浆材料。水泥是一种粉状的固体物质，普通水泥粒径为30～60μ。磨细水泥粒径为10～30μ。一般认为，要使某一粒径的颗粒顺利地通过某一空隙，空隙的宽度应大于三倍颗粒直径，否则将发生堆叠、拥塞现象。国内外的一些资料指出，水泥浆可以灌入的最小裂隙宽度，大致在0.1～0.2mm之间。这就是说，渗流为层流的裂隙宽度的上限，大体上相当于水泥浆可以灌入的裂隙宽度的下限。据此，库兹纳尔(C. Kutzner)得出这样的结论，只要p—Q曲线是A型，就无需灌浆，即使灌了也将是无效的。

库兹纳尔还认为，p—Q曲线为C型的试段，大多数耗浆量很小，因而可以停止灌浆。当出现升、降压曲线凸向相反的E型曲线时，表明透水岩石孤立地存在于渗透性小得多的岩石内，在这种情况下，即使渗透性很大，也可能无需灌浆。当然，要准确地鉴别这种类型的试段，应该进行更细致的试验工作。

许多学者对O型曲线给予特殊的注意，因为这种曲线表明，岩体裂隙中存在着高压力下会被冲蚀的充填物。基尔德坝的压水试验成果中，有12个试段p—Q曲线为O型，其中有8个试段位于帷幕最深处。为了防止充填物被冲蚀，选择了多排帷幕方案。

当p—Q曲线畸型，不属于上述五种类型中的任何一种(这种情况极少)时，或由于某种原因，未进行五个压力阶段的试验时，试验成果只用透水率值表示。

附加说明：

本标准由全国地质矿产标准化委员会提出。

本标准由全国地质矿产标准化委员会水文地质工程地质分技术委员会归口。

本标准由能源部水利部水利水电规划设计总院、东北勘测设计院、地矿部湖北地矿局负责起草。

本标准起草人王行本、张性一、李绍基、刘广润、鞠占斌。