



International Congress

On Rock Mechanics

Montreal/Canada/1987

# 岩石力学的进展

重庆建筑工程学院建筑工程系

重庆大学资源及环境工程系

石油大学北京研究生部

重庆大学出版社

# 岩石力学的进展

---

重庆建筑工程学院建筑工程系  
重庆大学资源及环境工程系  
石油大学北京研究生部

重庆大学出版社

## 内 容 简 介

本书是第六届国际岩石力学会论文选集，书中介绍了近几年国际岩石力学界在岩体中液体的流动和核废料隔离、岩石基础和岩石边坡、岩石爆破和开挖、以及高应力岩石中的地下硐室四个方面的主要研究成果；所选择内容与当前我国的岩体工程实际紧密联系，对从事建筑、采矿、石油、交通及水利工程等专业的师生、科研工作者以及现场工程技术人员是一本难得的参考书。

## 岩 石 力 学 的 进 展

重庆建筑工程学院建筑工程系  
重庆大学资源及环境工程系  
石油大学北京研究生部  
责任编辑：宋德勋

重庆大学出版社出版发行  
新华书店经销  
重庆建筑工程学院印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：20.25 字数：505 千

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数：1—2500

标准书号：ISBN 7-5624-0276-0 定价：7.25元  
P·7

## 前 言

---

《岩石力学的进展》是第六届国际岩石力学会议论文选集。第六届国际岩石力学会议于1987年8月31日至9月3日在加拿大蒙特利尔城召开。这次大会是在国际岩石力学学会主持下，并在加拿大国家小组、加拿大冶金采矿学院和加拿大岩土工程学会的协助下召开的。出席这次大会有来自中国、美国、苏联、日本、英国、法国、联邦德国、奥地利、澳大利亚、冰岛等34个国家的代表577人。中国代表13人出席了这次会议。这次大会的召开正值国际岩石力学学会成立25周年，所以格外隆重，它是岩石力学发展的一个里程碑。

会议论文集分三卷出版，第一、二卷为会前收到的论文，第三卷包括总报告和专题讨论等内容。论文集分四个专题，即岩体中液体的流动和核废料隔离，岩石基础和岩石边坡，岩石爆破和开挖，高应力岩石中的地下硐室，共刊入论文253篇。中国代表提交的论文15篇。为了及时出版国际会议的学术报告，了解国际上的学术动态，我们根据出席这次会议的代表朱敬民教授和黄荣樽教授带回的论文集，选编了这本译文选集。

本书是由重庆建筑工程学院、重庆大学和石油大学的有关同志翻译。我国代表的15篇论文，因在国内易于交流，故未选入本书，全书分四个专题合订一册出版。第六届国际岩石力学会议论文集的全部论文题目列入附录，供读者参阅。

为了加快翻译进度，参加译校人员较多，加之时间仓促，难免有疏漏或不妥之处，敬请读者指正。重庆大学出版社为本书的出版给予了大力支持，谨此表示感谢。

朱敬民 鲜学福 黄荣樽

1987年11月

# 目 录

## 一 岩体中液体的流动和核废料隔离

- 【1.1】 盐岩的应力松弛特性：现场测量结果与实验室试验结果的比较  
(联邦德国)..... 1
- 【1.2】 非连续结晶型岩体渗透性的确定 (英国) ..... 4
- 【1.3】 在深成岩体中地下水流动、热及放射性核素迁移的有限元模拟  
(加拿大).....14
- 【1.4】 含饱和流体多孔介质的位移不连续模型 (加拿大) .....23
- 【1.5】 确定裂隙岩体水力学性质的新技术 (巴西) .....29
- 【1.6】 裂隙介质中流动的物理和数值模拟研究 (美国) .....36
- 【1.7】 为设计核废料贮藏室测量华盛顿的哈佛特地区的应力  
(美国).....41
- 【1.8】 考虑地下水流动、用霍克—布朗破坏准则及脆—弹塑性岩石特  
性对隧道地层响应曲线的分析 (西班牙) .....47
- 【1.9】 对于放射性废料与裂隙和流路有关的远场和近场之间的联系  
(日本).....56
- 【1.10】 用有限元模型预测水压裂隙的延伸 (日本).....62
- 【1.11】 海水在裂隙岩体中渗流和扩散的实验研究 (日本).....67
- 【1.12】 地下工程围岩的热力—水力—力学特性 (日本).....72
- 【1.13】 单轴压应力间隔对岩石各向异性变形的影响 (葡萄牙).....77
- 【1.14】 德克萨斯地下战略石油贮存库所在地——BIG-HILL 盐丘中  
的井眼蠕变闭合测量和数值计算 (美国).....81
- 【1.15】 低渗透岩石中自然裂隙的水力学和力学性质 (美国)..... 88
- 【1.16】 层状岩石的实验室强度和变形特性的测试及分析 (新西兰).....96
- 【1.17】 用遥感技术——声发射/微震(AE/MS)监测加热岩石内部的  
微观破裂 (西班牙)..... 102
- 【1.18】 节理岩石的准静态及动态水力破裂模型 (美国)..... 108
- 【1.19】 控制接近岩石界面与断裂性质有关材料参数的研究 (美国)..... 115
- 【1.20】 评价一定尺度的非均匀岩体力学特性的计算—实验方法  
(苏联)..... 123
- 【1.21】 通过对热传导方程的差分演算测量岩石的热扩散性 (日本)..... 127
- 【1.22】 张开型裂隙模型中气液界面的稳定性 (日本)..... 133

## 二 岩石基础和岩石边坡

|        |                                |     |
|--------|--------------------------------|-----|
| 【2.1】  | 岩崩的三维动力计算(瑞士) .....            | 138 |
| 【2.2】  | 用岩石锚杆改善大坝基础稳定性的研究(瑞士) .....    | 145 |
| 【2.3】  | 岩石剪切破坏的一般规律(苏联) .....          | 153 |
| 【2.4】  | 风化花岗岩长边坡稳定性和地基承载力的评价(日本) ..... | 157 |
| 【2.5】  | 岩石力学性质离散性对岩石地基稳定性的影响(日本) ..... | 162 |
| 【2.6】  | 日本花岗岩的微观结构与各向异性之间的关系(日本) ..... | 169 |
| 【2.7】  | 节理岩体的岩块非线性稳定性分析(葡萄牙) .....     | 174 |
| 【2.8】  | 露天采矿边坡加固的预置锚索(澳大利亚) .....      | 179 |
| 【2.9】  | 严重碎裂岩体的概率分析(美国) .....          | 185 |
| 【2.10】 | 节理化各向异性岩体的经验破坏准则(波兰) .....     | 192 |
| 【2.11】 | 注浆岩体基础的声发射监测(日本) .....         | 199 |

## 三 岩石爆破和开挖

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 【3.1】 | 冲击式钻机凿岩率的预测(西班牙) .....            | 206 |
| 【3.2】 | 用实验方法确定振动方程(朝鲜) .....             | 211 |
| 【3.3】 | 邻近爆破引起隧道衬砌的动力特性(日本) .....         | 217 |
| 【3.4】 | 岩石晶粒结构对其可钻性及岩石力学性质的影响(澳大利亚) ..... | 221 |
| 【3.5】 | 影响深钻孔稳定性的因素(加拿大) .....            | 227 |
| 【3.6】 | 双向集中荷载作用下岩石的抗拉强度(联邦德国) .....      | 232 |
| 【3.7】 | 掩护式盾竖井掘进机的性能与动力特性(日本) .....       | 239 |
| 【3.8】 | 裂隙岩体中具有较小覆盖层隧道顶部的掘进(奥地利) .....    | 244 |

## 四 高应力岩石中的地下硐室

|       |                                           |     |
|-------|-------------------------------------------|-----|
| 【4.1】 | 不同温度单轴压缩试验中岩石的力学性质(法国) .....              | 251 |
| 【4.2】 | 具有软弱面的介质中滑移线的绘制及地下硐室稳定性分析<br>(南斯拉夫) ..... | 256 |
| 【4.3】 | 深埋马蹄形硐室变形特性的研究(日本) .....                  | 260 |
| 【4.4】 | 岩石脆性破坏的新线性准则(波兰) .....                    | 265 |
| 【4.5】 | 岩石和岩体的流变模型(葡萄牙) .....                     | 272 |
| 【4.6】 | 岩石锚杆的质量控制(芬兰) .....                       | 280 |
| 【4.7】 | 软岩性质的研究和变形特性的模拟(巴西) .....                 | 288 |
| 【4.8】 | 岩石隧道的地震特性(日本) .....                       | 293 |
| 【4.9】 | 非连续岩体中岩石锚杆加固的试验研究(日本) .....               | 300 |
| 附录    | 第六届国际岩石力学会议论文集全目录 .....                   | 306 |

# 一、岩体中液体的流动和核废料隔离

## 【1.1】 盐岩的应力松弛特性：现场测量结果 与实验室试验结果的比较

K. BALTHASAR, M. HAUPT, CH. LEMPP, O. NATAU

(联邦德国)

**摘要** 在盐岩矿里用预压的压力盒进行了应力测量，观察到盐岩有显著的应力松弛现象。所以，研制了一种特殊的单轴松弛试验装置在实验室研究应力松弛现象以比较在现场和实验室试验结果。

### 1 导 言

在德国的西北部用压力盒进行的盐岩应力测量时，观察到盐岩应力松弛现象。在最后处理测量数据时，认为在观察中现场应力松弛现象的基础上，有必要研究其应力松弛特性。本文是在应力条件和测量方法存在有显著差别的情况下，比较实验室试验结果和现场测量结果。

理论上，现场测量和实验室测量时，两者边界条件如图1所示。两者边界条件主要区别在于实验室测量是在单轴应力条件下完成，而现场测量是在三向应力状态下进行的。

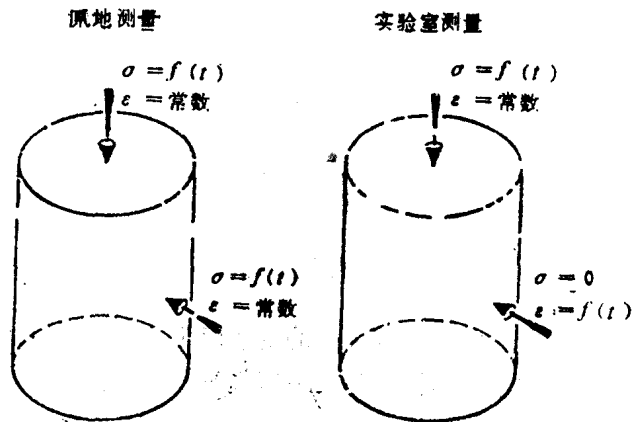


图1 应力松弛测量：现场和实验室情况下的应力—应变关系

### 2 实验室和现场 测量的结果比较

由于应力条件不同，单轴松弛试验结果与现场测量结果之间的直接比较是有疑问的。可是两者之间也存在某些一致性：在单轴松弛试验中发生的应力减少伴随着横向蠕变的发生（径向膨胀）即：一旦轴向应变保持恒定，径向产生应变和松弛过程便同时出现。因此，即使使用试验试样，完全的单轴应力状态是不可能实现的。

此外，使用一种特别适用于粘塑性盐岩体应力技术的液压式压力盒进行应力测量，在无需假设岩体应变条件下，能分别测量每个正应力分量。使用这些测量技术能准确地记录到现场盐岩的松弛过程。这一点是通过把定向的液压压力盒容器放在岩体中来完成的。这些量器

能测量出应力张量中几个正应力分量。使用压力盒测量技术，在给定的空间方向都能观察到应力松弛，研究常规多轴应力状态和它的变化情况。在实验室试验中和现场记录应力松弛过程都伴随着蠕变的产生。一般情况下，这两个过程是同时发生的，因此，设计了测量技术和试验条件来分别“提取”并记录应力松弛过程。

### 3 现场测量方法

使用液压的压力盒容器进行应力测量特别适用于粘塑性的盐岩体。这是因为压力盒埋在盐岩体内，且压力传递过程中没有损失。将压力盒埋在盐岩体中的技术归功于 WOHLBIER 和 NATAU(1966)：第一步，定向放在井眼内预先确定位置上的液力测量器并与井眼围岩接触，井眼充满类似盐岩的灰泥，硬化后的灰泥具有与盐岩类似的机械特性，于是压力盒被粘性的盐岩包围着。第二步，将合成树脂注射到充满灰泥井眼里来实现对埋在盐岩体中的压力盒预加应力，预加的压应力值比实际岩石压力大，压力能加到使岩体破裂的压力值。合成树脂

的注入产生一个达到破裂压力值的应力场（可与水力压裂时的瞬时停泵压力相比较），注射一旦完成，压力值便变到等于岩石中的实际压力，同时，在某一方向上便产生了应力差。

1985年，NATAU 等人讨论了使用这种预压的压力盒对西德西部二叠纪盐岩体应力测量的应用，讨论了包括这种测量技术的详细细节（在井眼中的安装步骤，预加应力技术）。NATAU 等（1982年），使用互相独立的测得的正应力分量来计算盐岩地层的所有应力张量。可是，只有当所有的压力盒记录到相等的压力值时，亦即当盐岩中的压力

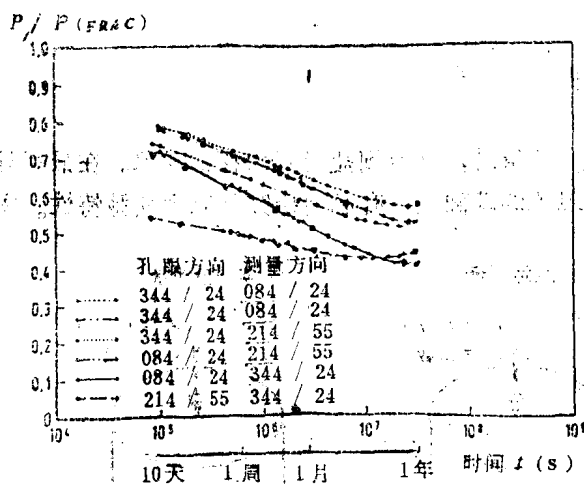


图2 现场应力测量的结果

达到稳定时，才完成最后的现场应力测量。达到这种状态前，得到下面的观察结果：注射一完成，由于注射而产生的液压超过盐岩的实际压力值，盐岩短暂的膨胀，在不同方向上的压力盒上将分别记录到盐岩的应力释放。在上述例子中，应力测量是在没有受到钻井干扰的盐岩井眼里进行的，因此可以认为记录到的应力释放是在围岩没有明显应变的情况下发生的。在不同方向上，记录的应力松弛是由所选用的压力盒结构来实现的。在这种情况下，选择在三个不同井眼里测量。在正交压力方向上进行了对岩体预压后，现场应力的变化实例示于图2中。

### 4 现场测量结果

当树脂注射完成时，所有压力量器都记录到压力减小这一结果，这种减小有自然规律：应力降低的速率是稳定的。在半对数坐标中（对数时间坐标），应力变化几乎完全是线性的，

直到达到稳定的压力值及完成应力松弛（图2）。松弛时间（达到稳定状态所必须的时间）和最大注射压力与实际岩石压力的差值组成描绘应力随时变化的曲线的基本数据（NATAU等，1986年）。

放在互相垂直的井眼里，方向相同的压力盒测量结果表明：所记录的松弛性质虽有细小的差别，但最后的压力值却相当。比较压力盒安置方向不同的三口井测量值表明：所有方向的记录曲线都是均匀上升的直线，只是在某些情况下在不同地点松弛时间不同。

NATAU 等人在1986年认为所绘制的松弛曲线在数学上可以用双曲正弦函数来表示。

## 5 应力松弛试验系统

应力松弛系统装置的特点是成本低，结构不复杂，不需更多的维修。在另一方面，对装置的精度有特殊要求，结果是在两种极限情况中取折衷方案。我们试验系统能满足试样长度的测量偏差在 $\pm 0.5\text{mm}$ 范围内。

试验装置由四根具有高刚度的载荷柱框架组成，试样加载是用螺旋千斤顶来实现，螺旋千斤顶由带有减速齿轮电动机来驱动，为了测量试验荷载，千斤顶内装有电子荷载传感器，如图3所示。

即使用高强度设计，要建造一个具有无限大刚度的荷载柱框架是不可能的，所以有试样变形的调节功能是必要的。因此，建立了由微机支配的电子驱动螺旋千斤顶的闭环控制系统，靠数字应变仪来获得试件的实时长度，其精度为 $1\mu\text{m}$ 。

装置的最大调节速度取决于电机的输出功率，载荷柱框架的刚度、螺旋千斤顶及试样本身由于在应力松弛试验中，停止加载后，立刻会出现很高的应力速率，所以，达到并保持常位移值，只需几秒钟时间，在这段时间里无法实现准确的调整，以后在试验曲线中会出现 $0.5\mu\text{m}$ 的突变值，此值可不加考虑。

环境温度对松弛性质影响很大，甚至温度变化 $1\text{K}$ ，对应力也会产生显著的影响，鉴于上述原因，整个装置安放在温度波动能控制在 $\pm 0.1\text{K}$ 范围内的箱子里，通过 $\epsilon - t$ 记录仪，记录试验结果。

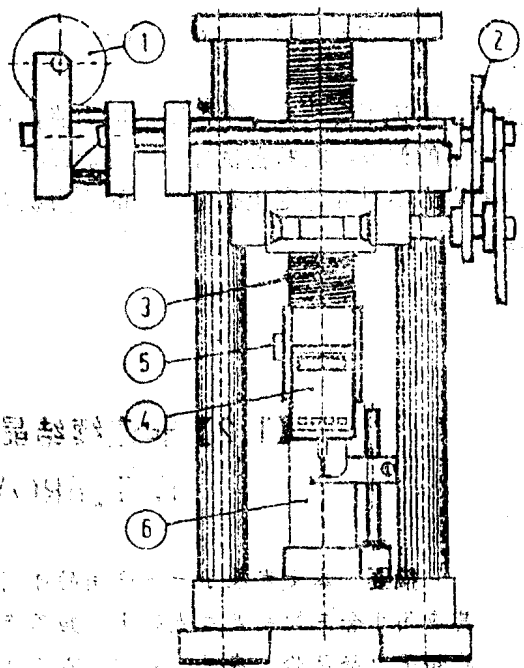


图3 松弛装置

- (1) 电机， (2) 减速齿轮，  
(3) 螺旋千斤顶， (4) 数字应变仪，  
(5) 载荷传感器， (6) 试件

## 6 实验室测量结果

所有的现场试验都出现一个连续减小的应力，应变达到并保持恒定值后，立刻观察到应力快速减小。在大多数情况下，在 $1(h)$ 松弛时间内，应力减小量超过初始应力的30%，有

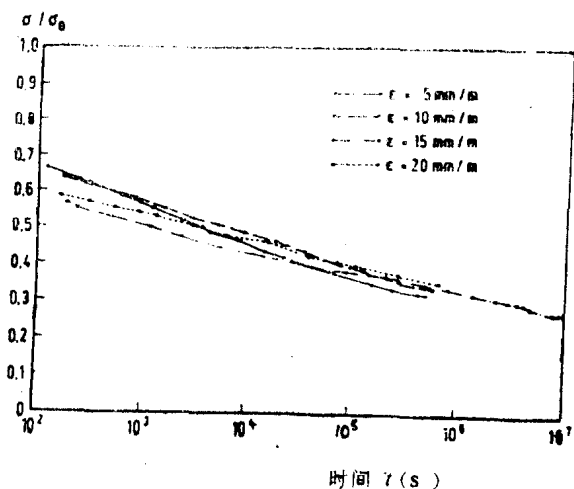


图4 单轴试验的应力松弛

时,在相同的时间内,应力减小量超过初始应力的50%,但是应力速率减小的过程很快消失,所以在大多数情况下,在100(d)松弛时间内的应力大约不会超过原应力的25%。象现场测量一样,在半对数坐标中,实验室试验也会得出几乎是直线的曲线。一些试验结果绘在图4中,这些曲线说明了另一个结果:到目前为止,发现在松弛期间松弛特性与保持恒定的应变没有什么关系。这个事实使现场与实验室试验结果比较成为可能,因为准确的现场应变状态是不知道的。

与现场测量相反,在实验室试验时间内,永远不会达到一个恒定的应力值,这是导致上面描述的不同应力条件的原因,并且导致以下的假设:在盐岩试样中,可能存在的残余应力值很小或者是零,同时证明了现场测量到的应力不对称稳定状态是当时的应力状态,不可能存在由于预加应力引起的残余应力状态。

(周方荣 译 黄荣樽 校)

## 【1.2】非连续结晶型岩体渗透性的确定

E.T.BROWN, P.I. BOODT (英国)

**摘要** 本文发展了一种通用的可用标准件组装构成的钻孔压力测试系统,并将其应用于含三组相互垂直的大间距不连续面的花岗岩上进行了一系列常压头注入试验和压力降试验。在单一和少量不连续面上进行的小规模试验得出了与在实验室获得的相似的结果。而在长达28m的截面上进行的大规模试验结果表明,在这种规模下,连续概念不能用于研究岩体中流体的流动。

### 1 概 述

近年来对非连续结晶型岩体的流体传输性的兴趣越来越浓厚。这主要是由于研究放射性废料从地质上进行隔离时,这些性质具有重要的意义。这激发了研究者对单一不连续面的热力-水力学行为的实验研究,对模拟单一不连续面和裂隙网路中流体流动数值模型的发展,和对单一不连续面、不连续岩体的水力学特性的现场研究。然而,后一种研究代价是昂贵的,并且有很多实际困难。因此,在可查到的文献中只有很少几组数据可供利用。本文旨在增加这些数据。

这里描述了放射性废料贮存室设计的评价方法的研究的一部分工作,它得到了英国环境部建筑研究所(BRE)的合作(Hudson, 1983)。该工作是在一种坚硬、含节理、结晶型和流体在其内部的流动主要受自然裂隙控制的岩体上进行的压力试验研究。关于连续理论在这种不连续介质内的应用范围是一个基本问题。流体通过这些岩体的流动是否能由一个等效连续渗透率张量来描述?如果能,那么应用连续理论需要什么样的具代表性的单元体积(Bear, 1972)。

## 2 试验场地

试验在英格兰西南部康沃(Comwall)处恩(Troon)附近卡恩美丽莉斯(Carnmenellis)花岗岩体的一个试验场地进行。这里的地下设施已用于作为BRE研究计划的一些其它目的(如Cooling, Tunbridge和Hudson, 1984),它们由一系列大致相互垂直的隧道组成(图1),入口在一个已废弃的采石场的底基上。试验在图1所示的在7 m长、6 m宽、3 m高的小洞室内钻凿的三个垂直孔中进行。上覆表层层厚34m。对钻孔中水位的监测表明地下水的初始水位大约在地表下10m深处。

在采石场和开凿工程中,明显地出露了两组走向集中在 $103^\circ$ 和 $194^\circ$ 方向的主要的近乎垂直的不连续面。它们的间距在1 m数量级之内,可能具有清洁而紧密吻合的接触面,或由不同厚度的其他物质充填。另一组近似水平的裂隙,其间距小于1 m,紧靠地表以下。这一间距在深度增大到100m时增大到5—10m量级。硫化物、锡石以及一些斑岩侵入体的原生矿化脉走向为 $050^\circ$ ,与区域走向趋于平行。具有 $45-70^\circ$ 倾角和倾向不稳定的不连续面远少于急倾斜不连续面(Bourke等, 1981)。

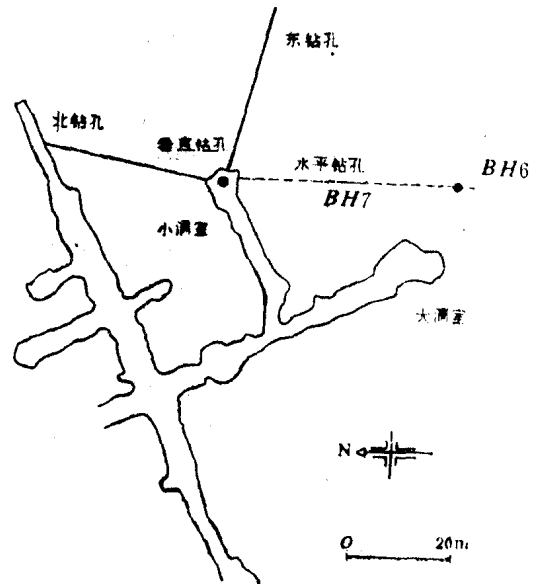


图1 实验场地开凿工程和钻孔的布置

在本文的现场试验和BRE计划的其它部分中,都采用了水平扫描线对试验场地的不连续面进行了调查。这与在采石场进行调查的结果一起使我们能确定出存在的三组主要不连续面的主要趋势。三个直径为100mm、长30m的钻孔分别称为北、东和垂直试验钻孔,从试验洞室中钻凿,分别垂直于上述三组不连续面(图1)。为方便起见,北、东钻孔向上与水平成 $5^\circ$ 角钻凿。

于是,对所有与三个试验钻孔相交的不连续面都采用亨兹(Hinds, 1974)发明,由布朗、哈帕和亨兹(Brown, Harper和Hinds, 1979)进一步改进的钻孔印记袋探测仪(B.I.P.P)来确定其位置和方向。在近似水平的东钻孔中记录到了约33个不连续面。在近似水平的北钻孔中记录到了16个不连续面。在垂直钻孔中记录到了7个不连续面,并且该钻孔相交了间距最宽的一组近似水平的不连续面。

### 3 试验方法选择

试验方法必须与现场施以的客观限制和对岩体预计的水力学性质相适应。预期进行的实验为单一不连续面的小规模试验和影响涉及较多不连续面的大规模试验。由于低渗透、不连续结晶型岩体水力学性质可能是各向异性的,我们认为需要采用由多钻孔组成的三维试验方法。这里,研究的注意力仅限于不连续面和岩体的水导率或渗透率,而不考虑其存贮率。

可供利用的试验方法已由威尔逊等(Wilson等,1979)在其他文献中进行了回顾总结。预计渗透率和水流流量很小以致可以说抽水试验是适用的。我们发现特雷斯尔(Tracer)试验也适用于试验场地。作为一个总的原则,采用稳定状态方法优于如斯拉格或脉冲瞬态方法,这是因为在瞬态试验结果的解释中包含了严重的不稳定性。为试图减小非线性流对岩石不连续面钻孔试验结果的巨大影响,压头和流量应限制在相应层流区内。考虑到以上各种因素,导致了选择常压头注入试验(CHIT)作为主要的试验类型。由于压力降试验(PDT)可在常压头注入试验结论之上方便地进行,它也被用来提供更多的数据资料,以便同CHIT的结果进行比较。

斯诺(Snow,1966)、路易斯和梅莉(Louis和Maini,1970),以及最近布德特、梅莉和布朗(Boodt, Maini 和 Brown, 1982)已分别讨论过不连续岩体中三维渗透性试验的条件。一般认为试验钻孔应取向垂直于存在的主要不连续面组的平均平面,以便能独立地确定各组不连续面的水力学性质。在三钻孔压力实验中,钻孔轴线应与三个主渗透方向一致(假

设此概念可以运用)。象现在这种情形,三组主要不连续面大致相互垂直,那么每一试验钻孔都能取向与两组不连续面的交线相平行,并且与第三组不连续面几乎正交。

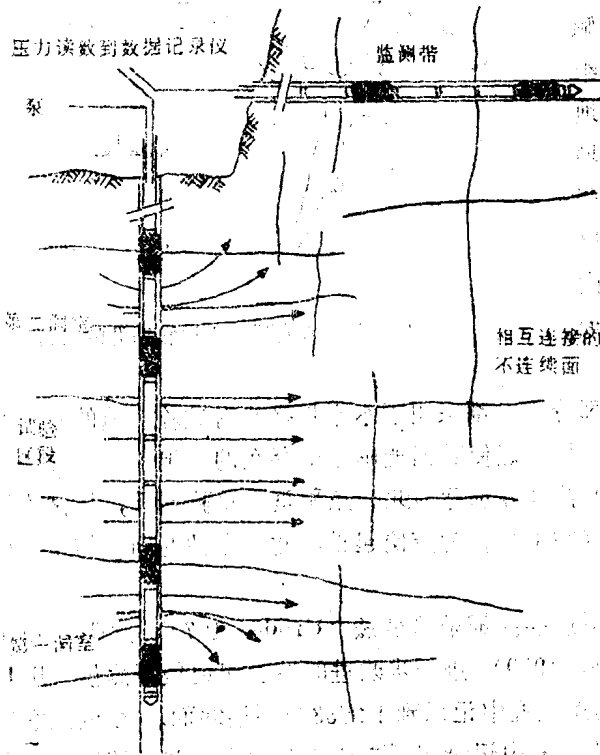


图2 典型试验布置

### 4 试验设备与试验过程

#### 4.1 钻孔内设备

没有可供利用的商用钻孔内设备能适用于以上提出的试验,因而设计和制造了新的设备。设计新设备的准则包括必须适合试验范围内的使用和必须能在有限的地下场地在可能的试验结构中迅速安装好。设备系统必须适用于夏普(Sharp,1970)提出的试验结构。在该结构中采用了从两分离的试验区端部获得水流,以便能保证试验区段获得的水流是径向的,这一概念说明于图2中。同时还应能测

量孔中试验区段的流体压力和流量。最后,因没有拥有要求的分辨率和足够小体积的流量计安装在试验单元之内,因此流量只有在钻孔口进行监测。

试验中采用了可由标准件组装的设计方案以便能灵活而方便地使用。设备系统由三个单元组成——监测或分配单元、橡皮带单元和间隔单元。监测或分配单元上有孔状接缝,通过它们把水分布开来。它们设计使得名义最小试验区段长度为0.5m。在每一单元上还安装了能测从0~1 MPa绝对压力的压阻压力传感器。

气动橡皮袋单元长2.0m,当在100mm直径钻孔中充气时能产生1.25m长的密封区段。为防止由于过大的缩短而产生的橡皮材料(柔性管)撕裂,把可充气的两端分别装上滑块,它们在橡皮袋充气时可自由地在轴向滑动。间隔单元长度为0.5m和1.5m,用于增加试验区段长度和把水或空气分别导入试验区段和橡皮袋。

每一单元都有独立的引线和防水接头,它们用于连接孔内传感器、传感器电源以及数据记录仪。最后是设计接头,它们能连接两个分隔的水源(一个给试验区段,另一个给线性化区段)、橡皮袋的空气源和电力引线,而不让水进入或排出系统。

#### 4.2 地面设备

表面设备示意图见图3。电动离心泵应在1.0MPa下能以22.25l/min的流速输水。流量用三种流量计测量。这三种流量计为磁性流量计,对0.07~7.0l/min范围内的流量精确到1.0%;透平流量计,计量范围在0.02~1.3l/min,精确度为±1.0%;转子流量计,计量范围为0.001到0.25l/min,精确到0.0003l/min。

压力由两个压力调节器控制,一个为试验区段,一个为试验区段两边的线性化区段。测量水压的设备也安装于地面上。最初的试验表明常水压注入试验取得的稳定状态流量很少超过0.5l/min,而常常是大大小于这个值。由布德特和布朗(Boodt and Brown, 1985)给出的详细计算表明在这种流量下,供水管路中的水压头损失小于试验用的最低超额压力的1.5%。这在压力传感器的精度范围内,说明在地面(即在岩石试验洞室内)测量压力并非不合理。

#### 4.3 试验过程

在较多的小规模试验之中,用两个气动橡皮袋把与试验钻孔相交的各个不连续面隔离在它们之间。也有少量几例,不连续面存在于间距小的两个或更多不连续面群之中,这使其不能单独进行测试。在东钻孔和垂直钻孔进行的大规模试验中,多个不连续面与试验区段相交。试验时首先把一个橡皮袋和一个分配单元放到距孔底5m远处,并依次进行压力试验。然后把橡皮袋和分配单元向上移动5m,并重复压力试验。反复进行上述过程,直到橡皮带达到钻孔顶部。

当把测试设备放入钻孔后,打开控制水阀(图3),让水注入试验钻孔。一旦钻孔充满水后,就把水泵关闭,并向橡皮袋充气,而水控制阀开着以防止在试验区段建立起压力。监

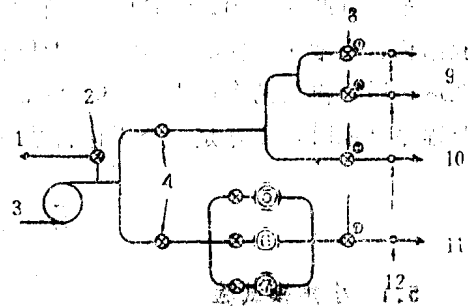


图3 地面设备示意图

- 1) 排出水返回蓄水处; 2) 初调压阀  
压阀; 3) 泵; 4) 压力控制阀;  
5) 磁性流量计; 6) 透平流量计;  
7) 转子流量计; 8) 水控制阀;  
9) 监测孔; 10) 线性化区段;  
11) 试验区段; 12) 压力传感器

控孔用同样的程序注水,但只放一个橡皮袋在孔的顶端。

为进行常水压注入试验,期望获得的试验压力是用通过阀1与试验区段相连接的压力控制阀设定的。为了获得处于层流区内的、小的但可测量的流量和把不连续面变形的影响降低到最低限度,紧接初始试验后的过量压力限制在0.15—0.5MPa范围内。当阀1开着时,水流将通过磁性流量计;而当处于低流量时,水流则通过透平和转子流量计,当流量稳定下来时,即可结束试验。为进行压力降试验,关闭阀1并且监测出钻孔内压力的下降。

整个试验过程中,CHIT试验和PDT试验是按照一个特定的程序来进行。对于给定的试验结构,在增压过程中进行三个CHIT试验,而在第三次CHIT试验之后进行一次PDT试验。在这之后,再接两个或更多的CHIT试验,然后在最终压力下进行一次PDT试验。当上述试验程序结束时,正好是一个工作日结束,最后的一次PDT试验可让其做一整夜。

## 5 试验结果

### 5.1 小规模试验

布德特和布朗 (Boodt and Brown, 1985) 曾已给出了一整套记录下来的CHIT试验的

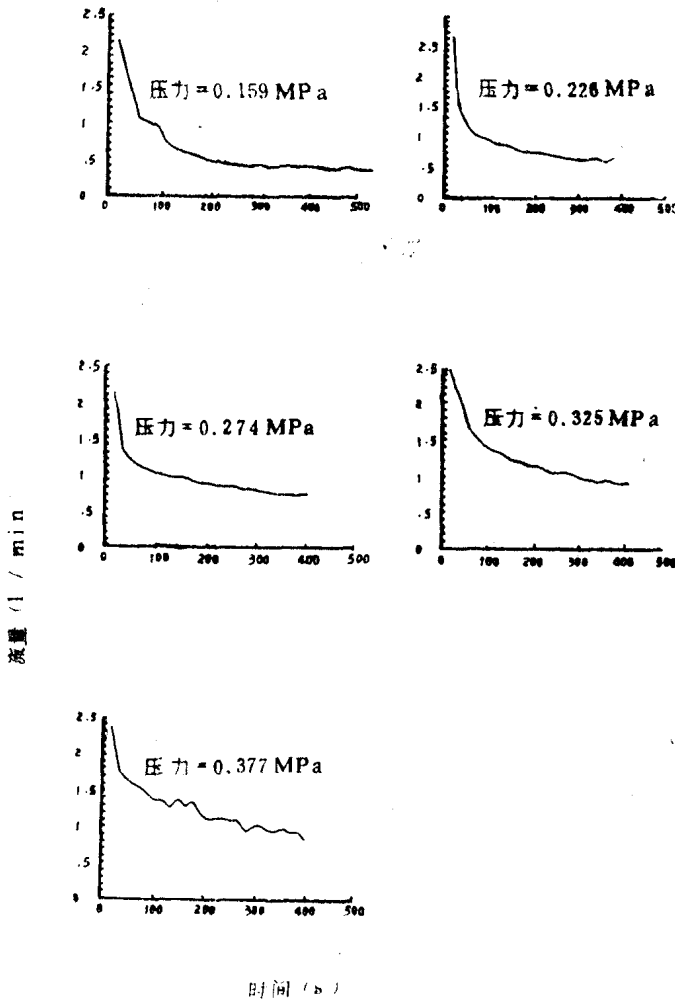


图4 东钻孔5.25m深处常水压注入试验的流量—时间曲线

流量—时间曲线和PDT试验的  $\ln(P/P_0)$ -时间曲线。在东钻孔5.25m深处试验的曲线示于图4和图5。对于CHIT试验,给出了其稳定状态的流量( $Q$ )与过剩压力( $P_0$ )的曲线,并确定了曲线梯度。该值被用于计算与不连续面等效的平行板口孔径( $e$ )。

$$e = \left[ \frac{6\gamma Q}{\pi g n H_0} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \right]^{1/3} \quad (1)$$

式中  $\gamma$  = 水的动力粘度;

$R$  = 试验影响半径,任意地假设为30m;

$r_0$  = 钻孔半径 (51mm);

$n$  = 与试验区段相交的不连续面的数量;

$H_0$  = 在试验区段稳定状态的过剩水压头。

由此,不连续面的水导率计算为

$$K_f = \frac{e^2 g}{12\gamma} \quad (2)$$

对于PDT试验,等效平行板

口孔径由梅莉 (Maini, 1971) 导出的方程计算

$$e = \left[ \frac{6\gamma r_0^2}{gn} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \frac{\ln(H_0/H_1)}{(t_1 - t_0)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

式中  $H_0$  为时间  $t_0$  时, PDT 试验开始时 试验区段中心的过剩压力压头;  $H_1$  为时间  $t_1$  时, 试验区段中心的压力压头。每一试验的  $[\ln(H_0/H_1)]/(t_1/t_0)$  值从图5所示的半对数曲线的直线段获得。不连续面的水导率可由方程(2)计算。

式(1)一(3)的获得 依赖于下述假设:

(i) 试验区段为垂直的, 并且被水平不连续面所切割。(ii) 不连续面可由两光滑平行板之间的不变口径代表。(iii) 在 每一个不连续面中都呈径向层流。

很清楚, 这些假设对这里 描述的现场压力试验类型并不总是适用的。里斯勒尔(Risslor, 1978) 和鲍尔克等 (Bourker et al, 1981) 已 曾 分 析 过 钻 孔 和 不 连 续 面 方 位 变 化 的 影 响。两项研究都表明, 对于垂直孔相交于倾斜不连续面, 只有当倾角超过  $45^\circ$  时, 由 这 些 方 程 导出的流量才偏离那些可供比较的水平不连续情况的 5 % 以上。里斯迎尔 (Rissler, 1978) 也获得了垂直钻孔相交于倾斜不连续面的数值解。他发现对于倾角小于  $45^\circ$  的 不连续面, 其偏离水平不连续面情形时的流量可忽略不计; 对于倾角为  $85^\circ$  的不连续面, 流量在小于水平不连续面的 20 % 以内。

这些结果表明对于许多小规模试验不需进行方位修正, 但对包括与东和北钻孔相切割的近垂直不连续面的试验可能需要修正。然而, 因为每一情况下确定这样的修正不如用数值模拟更有意义, 所以在计算列于表 1、表 2 和表 3 中的等效平板口孔径 ( $e$ ) 和不连续面水导率 ( $k_f$ ) 的值中, 没有进行方位修正。示于表 1 - 3 中的这两个参数的范围在实验室试验 中 对

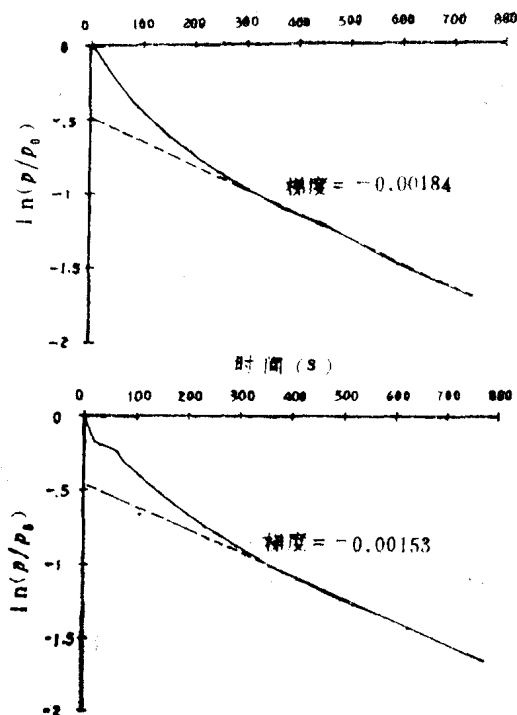


图5 东钻孔5.25m深处压力降试验的  $\ln(P/P_0)$  时间曲线 ( $P_0$  为钻孔中时间  $t_0$  时的初始过剩压力  $P$  是时间  $t_1$  时的压力)

表 1 小规模试验结果, 北钻孔

| 测试深度 | 不连续面数目 | 口径 $e(\times 10^{-6}m)$ |      |               | 传导率 $k_f(\times 10^6 m/s)$ |      |               | 不连续面走向/倾角      |
|------|--------|-------------------------|------|---------------|----------------------------|------|---------------|----------------|
|      |        | CHIT                    | PDT1 | PDT2          | CHIT                       | PDT1 | PDT2          |                |
| 3.5  | 2      | 10.1                    | 79.0 | 82.3          | 64.5                       | 3920 | 4260          | 092/21, 095/22 |
| 8.5  | 2      | 15.2                    | 81.4 | 87.0          | 144                        | 4170 | 4750          | 099/20, 101/15 |
| 10.1 | 1      | 30.1                    | 116  | 110<br>77.7*  | 568                        | 8410 | 7610<br>3790* | 180/85         |
| 22.8 | 1      | 42.9                    | 55.0 | 72.0<br>61.0* | 1160                       | 1900 | 3260<br>2340* | 208/36         |
| 26.4 | 1      | 24.0                    | —    | 54.0          | 361                        | —    | 1840          | 124/54         |

\* 长时间试验

同类岩石的单一自然不连续面测得的范围 ( $20-1000 \times 10^6 \text{m}$  和  $0.5-10 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ) 相似 (Boodt and Brown, 1985, Elliot et al, 1985)。实验室试验表明这两个参数都高度依赖于压力。

表2 小规模试验结果, 东钻孔

| 测试深度<br>(m) | 不连续面数目 | 口径 $e (\times 10^{-6} \text{m})$ |      |               | 传导率 $k_f (\times 10^6 \text{m/s})$ |       |              | 不连续面走向/倾角                                    |
|-------------|--------|----------------------------------|------|---------------|------------------------------------|-------|--------------|----------------------------------------------|
|             |        | CHIT                             | PDT1 | PDT2          | CHIT                               | PDT1  | PDT2         |                                              |
| 2.40        | 2      | —                                | 70.1 | 68.5          | —                                  | 3090  | 2950         | 185/76, 194/84                               |
| 6.15        | 5      | 20.7                             | 165  | 153           | 270                                | 17100 | 14700        | 114/89, 111/89,<br>226/60, 149/80,<br>152/78 |
| 7.40        | 1      | —                                | 43.9 | 50.6          | —                                  | 1210  | 1610         | 175/69                                       |
| 14.10       | 2      | 26.9                             | 52.6 | 60.1          | 454                                | 1740  | 2270         | 177/34, 149/73                               |
| 16.00       | 2      | 6.72                             | 25.8 | 50.8          | 28.4                               | 419   | 1620         | 207/76, 170/90                               |
| 19.50       | 1      | 16.1                             | 73.2 | —             | 170                                | 3370  | —            | 240/35                                       |
| 20.40       | 1      | 13.8                             | 119  | 125.5         | 119                                | 8850  | 9900         | 261/82                                       |
| 22.30       | 1      | 10.1                             | 74.6 | 88.2          | 64.0                               | 3500  | 4890         | 257/62                                       |
| 23.70       | 1      | 8.6                              | 41.8 | 51.2<br>30.1* | 46.7                               | 1100  | 1670<br>570* | 198/76                                       |

\* 长时间试验

表3 小规模试验结果, 垂直孔

| 测试深度<br>(m) | 不连续面数目 | 口径 $e (\times 10^{-6} \text{m})$ |      |               | 传导率 $k_f (\times 10^6 \text{m/s})$ |       |               | 不连续面走向/倾角                                            |
|-------------|--------|----------------------------------|------|---------------|------------------------------------|-------|---------------|------------------------------------------------------|
|             |        | CHIT                             | PDT1 | PDT2          | CHIT                               | PDT1  | PDT2          |                                                      |
| 4.75        | 1      | 74.7                             | 108  | 136           | 3510                               | 7300  | 11500         | 262/82                                               |
| 5.25        | 2      | 35.5                             | 221  | 216           | 500                                | 19400 | 18500         | 351/82, 234/88                                       |
| 6.00        | 3      | 38.5                             | 225  | 205           | 768                                | 26300 | 21800         | 284/88, 333/89, 322/72                               |
| 7.85        | 6      | —                                | —    | 69.3          | —                                  | —     | 3020          | 286/90, 298/75,<br>300/50, 299/62,<br>284/74, 291/72 |
| 10.2        | 2      | —                                | —    | 125           | —                                  | —     | 9760          | 320/88, 258/88                                       |
| 11.50       | 6      | 5.94                             | 39.4 | 38.7          | 22.5                               | 97.5  | 944           | 271/88, 263/59,<br>267/65, 274/76,<br>273/88, 259/90 |
| 12.20       | 3      | 8.88                             | 158  | 161           | 49.5                               | 15600 | 16300         | 273/88, 259/90, 253/78                               |
| 14.35       | 2      | 8.55                             | 43.0 | 46.0          | 46.0                               | 1160  | 1330          | 293/48, 282/73                                       |
| 18.15       | 2      | 40.1                             | 111  | 115           | 1010                               | 7680  | 8360          | 292/62, 259/70                                       |
| 19.30       | 1      | —                                | 275  | 265           | —                                  | 47500 | 44200         | 330/82                                               |
| 25.20       | 2      | 78.8                             | 172  | 121<br>24.5*  | 3900                               | 1870  | 9180<br>397*  | 288/77, 299/75                                       |
| 26.80       | 2      | —                                | 57.7 | 54.6          | —                                  | 2070  | 1870          | 291/85, 356/81                                       |
| 28.40       | 1      | —                                | 745  | 95.7<br>80.4* | —                                  | 3490  | 5750<br>4080* | 253/71                                               |

\* 长时间试验

## 5.2 大规模试验

图6表示了在东近水平钻孔中试验间距为2—30m所进行的大规模CHIT试验记录下来的流量时间曲线。对每一个CHIT试验,确定了常流量—过剩压力水头曲线的斜率,并将其用于计算等效孔隙介质的渗透系数( $k_e$ ),计算方程为

$$k_e = \frac{Q}{H_0} \frac{\ln(R/r_0)}{2\pi l} \quad (4)$$

式中 $l$ 是试验区段长度。

图7表示了在东孔中试点间距为2—30m所进行的两次大规模PDT试验记录下来的 $\ln(P/P_0)$ -时间曲线。曲线直线段的梯度用于式(2)计算等效孔隙介质渗透率,式(2)中的 $e$ 值由梅莉(Maini, 1971)导出的方程给出

$$e = \left[ \frac{6\gamma r_0^2}{gl} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \frac{\ln(H_0/H_1)}{(t_1 - t_0)} \right]^{1/3} \quad (5)$$

表4和表5分别列出了由在东钻孔和垂直孔中进行的大规模试验结果计算得出的 $k_e$ 值。

图6和图7说明了在解释和协

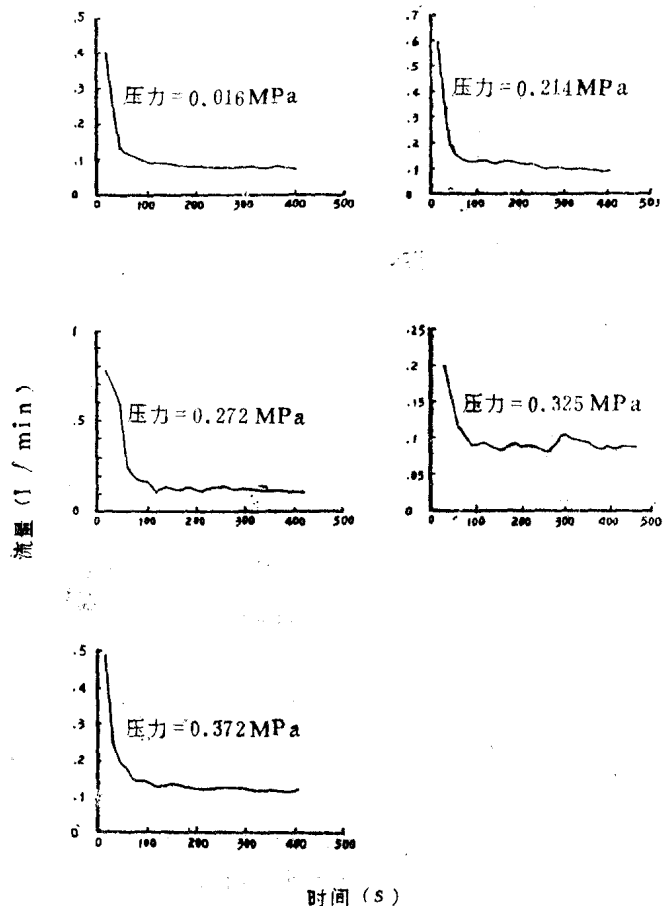


图6 东钻孔中试验区段为2—30m的大规模常水压注入试验的流量—时间曲线。

表4 东孔大规模试验的等效孔隙介质的渗透系数 $k_e$

| 试验区段间距 | $k_e (\times 10^9 \text{ m/s})$ |      |      |
|--------|---------------------------------|------|------|
|        | CHIT                            | PDT1 | PDT2 |
| 25~30  | 47.8                            | 2930 | 1500 |
| 20~30  | 26.3                            | 1020 | 708  |
| 15~30  | 22.4                            | 79.6 | 528  |
| 10~30  | 17.2                            | —    | —    |
| 5~30   | 74.4                            | 152  | 106  |
| 2~30   | 20.9                            | 170  | 13.5 |

调试验结果中十分重要的试验程序的一个方面。图6表明在CHIT试验中使用6—9 min试验时间有时不足以使其达到稳定状态。虽然这种情况在小规模试验中更加显著,但相似的特征