

# 综合钻孔测量技术在导水构造 水文地质特征评价中的应用

苏 锐, 宗自华, 季瑞利, 陈伟明, 徐 健, 王 驹, 郭永海

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要:** 导水构造水文地质特征评价是高放废物地质处置系统场址选取和评价研究的重要任务。钻孔雷达测量可以提供断裂构造在岩体中横向的延展特征。钻孔声波电视测量可以获得钻孔孔壁 360° 连续图像。从这些图像上可以解译出岩性特征、结构面的走向和相互关系等信息。多参数水化学测井直接获得深部环境地下水水化学数据和垂向变化特征。双栓塞压水试验技术可以分段测量钻孔揭露岩体的渗透参数。任何单一的钻孔测量技术都不能准确、完整地描述导水构造的特征。综合钻孔测量技术将单一的钻孔测量技术有机结合起来, 综合分析所获得的数据, 既发挥综合效应, 各类数据又可以相互验证, 提高数据的可靠性。将综合钻孔测量技术应用于高放废物地质处置系统场址预选和评价研究中, 以甘肃北山预选区 3<sup>#</sup>(BS03)钻孔为例, 建立导水构造的水文地质特征模型。

**关键词:** 水文地质; 综合钻孔测量技术; 导水构造; 水文地质特征; 高放废物地质处置; 钻孔雷达; 声波钻孔电视; 多参数水化学测井

**中图分类号:** P 641

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 3866 - 08

## APPLICATION OF INTEGRATED BOREHOLE MEASUREMENT TECHNIQUES TO HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS EVALUATION OF WATER-CONDUCTIVE FAULT

SU Rui, ZONG Zihua, JI Ruili, CHEN Weiming, XU Jian, WANG Ju, GUO Yonghai

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The hydrogeological characteristic of water-conductive fault is a critical part of site selection and evaluation of high-level radioactive waste geological disposal system. Borehole radar measurement provides the useful information of geological features of extension in the rock mass. Acoustic borehole televiewer measurement provides the borehole-wall images in the degree of 360. The lithologic character, orientation and structural planes, and the relation between structural planes can be defined for studies of fault on the basis of borehole-wall images. Multi-parameter hydrochemical logging is a useful technique for identifying the vertical distribution of hydrochemical parameters in the deep environment. Injection test with double-packer can measure permeability coefficient of hydraulically conductive intervals intersecting boreholes. Data obtained from a single technique cannot provide a definitive and full estimation of hydrogeological properties of water-conductive fault. Integrated borehole measurement technique is the combined application of several techniques with integrated interpretation which not only exerts synergistic effect of borehole measurements but also improves the credibility of data in comparison of the results obtained by single measurement. An example is presented to perform the combined application of these techniques to characterize the hydraulic properties of water-conductive fault intersected by

**收稿日期:** 2007 - 03 - 08; **修回日期:** 2007 - 03 - 30

**作者简介:** 苏 锐(1973 -), 男, 1997年毕业于华东地质学院地球科学系, 现为博士研究生, 主要从事核废物深地质处置方面的研究工作。E-mail: su\_rui@vip.tom.com

BS03 in the potential site, Beishan preselected area, Gansu Province for high-level radioactive waste geological disposal. Hydrogeological model of water-conductive fault is established.

**Key words:** hydrological geology; integrated borehole measurement techniques; water-conductive fault; hydrogeological characteristics; high-level radioactive waste geological disposal; borehole radar; acoustic borehole televiewer; multi-parameter hydrochemical logging

## 1 引言

高水平放射性废物(高放废物)的安全处置正日益得到公众的广泛关注。目前,深地质处置是安全处置高放废物的可行方式<sup>[1]</sup>。高放废物地质处置库选址过程中,选择低渗透性岩体作为处置库的地质屏障在开展高放废物地质处置研究中已得到共识。目前,结晶岩(如花岗岩)、凝灰岩、黏土岩等是主要的处置库候选围岩。众所周知,在低渗透性岩体中,有害的放射性核素迁移到人类环境最可能的机制就是地下水的搬运<sup>[2]</sup>,而且放射性核素到达人类环境最快速的通道就是断裂构造。因而,断裂构造的水文地质特征评价是高放废物处置库选址和场址性能评价研究的关键任务之一<sup>[3]</sup>。

断裂构造的水文地质特征评价需要收集断裂构造的空间几何特征(位置、产状、厚度和延伸特征等)资料和水文地质条件(渗透特征参数测量,地下水水化学特征,地下水流速、流向和水动力特征等)等资料,并在此基础上建立裂隙含水层的水文地质模型。

综合钻孔测量技术就是在同一钻孔中应用不同的技术手段进行重复测量,综合分析所获得的信息,服务于不同的研究目的。F. L. Paillet 和 W. H. Pedler<sup>[4]</sup>成功运用综合钻孔测量技术解决水源保护问题并取得了很好的成果。R. Schepers 等<sup>[5]</sup>在岩土工程勘察中成功地运用钻孔测井技术并取得了良好的效果。J. H. Williams 和 C. D. Johnson<sup>[6]</sup>详细论述了钻孔声波电视和光学电视测量技术的基本原理和特点,并对两种测量技术进行了比较研究;运用钻孔声波电视和光学电视综合测量技术开展裂隙含水层评价研究取得了良好的效果。但是由于钻孔声波电视和光学电视测量技术本身的技术缺陷,他们未能解决裂隙含水层空间几何特征(位置、产状、厚度和延伸特征等)的准确描述和水文地质条件(渗透特征参数,地下水水化学特征,地下水流速、流向和水动力特征等)的描述问题。

本文着重介绍如何应用综合钻孔测量技术解决导水断裂构造的空间几何特征的准确描述和水文地质条件的描述等问题,并论述在高放废物地质处置库预选场址评价研究中综合钻孔测量技术的应用成果。

## 2 综合钻孔测量技术

钻孔测量技术包括钻孔岩心编录和取样、常规地球物理测井(井径、温度、密度、伽马测井等)、钻孔雷达测量、钻孔孔壁成像测井(如声波钻孔电视测量、光学电视测量等)、多参数水化学测井、钻井液电导率测井、钻孔水文地质试验等。在工程实践中,钻孔岩心编录和取样、常规地球物理测井是常用的钻孔测量技术,国内外均有大量的研究<sup>[7~9]</sup>。本文重点论述钻孔雷达测量、声波钻孔电视测量、多参数水化学测井和双柱塞压水试验等钻孔测量技术在导水构造水文地质特征评价研究中的应用。

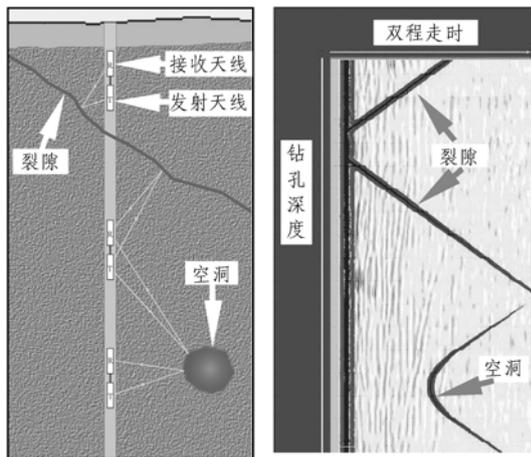
### 2.1 钻孔雷达测量

钻孔雷达和地面雷达统称为探地雷达。探地雷达是20世纪70年代后期逐步发展起来的一种地球物理方法。该技术借鉴了其他地球物理方法的优点,并依托于迅速发展的电子技术、计算机技术和光纤通信技术,从仪器制造到软件设计充分显示了现代地球物理的特点。探地雷达技术具有如下显著特点:分辨率高(从几厘米至几米),测量速度快(纳秒级的采样速度),信号叠加次数多(从1次至3万多次叠加,可充分抑制背景噪声),数据传输快(采用光缆传输),测量方式多样(空中、地面、钻孔、速度测量、透视测量、跨孔CT),低功耗、轻便,有一定的探测深度(从几厘米至数百米)。

20世纪80年代,瑞典研究人员为评价高放废物地质处置库场址深部岩石的完整性,开始研究地面雷达在钻孔中的应用。到20世纪90年代,钻孔雷达技术基本成熟。同时,加拿大、瑞士和美国等国家也应用钻孔雷达评价高放废物地质处置库场址深部岩石的完整性<sup>[10]</sup>。

本节介绍的钻孔雷达设备是瑞典Mala地学仪器有限公司(Mala GeoScience)生产的RAMAC钻孔雷达系统。该系统的构成和主要技术参数具体见王 驹等<sup>[10]</sup>的研究。

钻孔雷达的测量原理是：利用宽频带短脉冲形式的高频电磁波(主频为数十至数百兆赫)，以钻孔轴线为测线，固定发射和接收天线间的距离(发/收距)，沿钻孔提/放天线进行测量。由于电磁波在介质中传播时，其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性及几何形态而变化，因而，根据接收到的波的传播时间(亦称双程走时)、幅度与波形资料，通过图像处理和分析，确定钻孔侧向一定范围内的陡倾角(或垂直)裂隙等结构面和空洞(见图1)的空间位置或结构。



(a) 钻孔及地质剖面 (b) 对应的雷达图像  
R—接收天线；T—发射天线

图 1 钻孔雷达单孔反射法测量原理

Fig.1 Measurement principle by single-hole reflection method of borehole radar

根据钻孔雷达的测量原理可知，利用钻孔雷达开展钻孔裂隙、断裂构造调查的最大优势是可以确定这些结构面在岩体中的延伸和倾角特征。但是，通过钻孔雷达测量很难获得被测结构面的走向/倾向。另外，由于钻孔雷达测量所使用的光缆有较大的伸缩性，深度校正是一个繁琐的过程。

### 2.2 声波钻孔电视测量

声波钻孔电视测井技术作为一种小口径钻孔地球物理测井工具，由于探头采用了先进的声波束聚焦技术、数字记录技术和数字化数据处理技术等，其精度和测井速度较高，广泛运用于钻孔地质调查、水文地质调查、矿产勘探和开采设计、核废物深地

质处置库选址和场址评价、岩石工程等研究领域，用于开展评价断裂构造的延伸特征、岩心定位和定向排列、裂隙隙宽定量分析、钻孔偏移测量、节理裂隙统计分析等研究<sup>[11, 12]</sup>。

本文所介绍的声波钻孔电视探头是从美国 Mount Sopris 仪器公司引进的 MGXII 综合测井系统的一部分。探头型号 ALT Fac40，是一种高分辨率的钻孔成像仪器，能辨识隙宽为 0.1 mm 的裂隙，探头磁力计精度为 5%，发射的超声波频率为 1.4 MHz，超声波束尺寸为 3 mm×3 mm。最大测量深度为 1 500 m，探头适用的钻孔直径范围为 60~300 mm。

苏 锐等<sup>[11]</sup>详细介绍了声波钻孔电视测井技术的测量原理和技术特点。利用钻孔电视测量技术，可以获得钻孔孔壁连续的三维图像，进而分析被钻孔揭穿的结构面(如裂隙、断裂构造、页理、岩性分界面等)的空间结构特征和分布特征以及岩性的空间分布特征等。其技术缺陷在于钻孔电视只能“看见”钻孔孔壁特征，无法探测结构面沿垂直钻孔方向的延伸特征。

### 2.3 钻孔多参数水化学测井

深部环境水文地质特征和地下水水化学特征研究是高效废物深地质处置场址选址及评价研究的重要内容之一。为了获得深部环境水化学参数，目前，广泛采用的方法是从深部取出地下水样品，然后现场测量和送实验室分析测量。这种方法的特点是分析精度高；可以根据需要分析地下水的水化学组分。其不足之处是取得的样品数总是有限的，测量周期长，无法获得地下水化学参数随深度变化特征曲线；受到取样技术的限制，特别是在干旱低渗透裂隙岩地区，由于含水介质非均一性、各向异性、涌水量小，获得深部有代表性的原状地下水样品既是一项技术难度大的任务，又是一项费时、费力、费钱的工作；实际工作中，实验室往往距离取样现场遥远，如果样品送回实验室分析就需要可靠的样品储存、运输技术和设备，这也是一项费时、费力、费钱的任务。多参数水化学测井技术很好地克服了这些缺点。

本节介绍的多参数水化学测井探头型号为 IDA302 - 1000，由美国 Mount Sopris 公司提供，将多个独立的传感器——温度、压力、pH 值、氧化还原电位、电导率和氧浓度等传感器——集成在一个探头上，可以同时测量地下水的温度、pH 值、氧化

还原电位、电导率、氧浓度等, 根据压力曲线可以换算测点的深度位置。其优点是可以获得深部环境地下水的多个水化学参数, 如水温、pH 值、 $E_h$  值、氧浓度、电导率、盐度等, 以及其连续变化曲线。特别是深部地下水环境的  $E_h$  值及其变化, 对于定量研究深部环境的氧化还原特征, 具有十分重要的意义。由于钻进过程中使用的钻井液和润滑剂会污染地下水, 如果进行钻孔多参数水化学测井前没有将钻井液和润滑剂排除干净, 则所获得水化学值不能反映地下水真实的水化学特征。

根据温度和电导率测井曲线, 可以定性判断地下水在垂向上的流动特征。下面介绍根据温度测井曲线定性判断地下水在垂向上的流动特征的基本原理。

假设一钻孔揭穿 3 个含水层。含水层在剖面上的位置如图 2 所示,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  分别表示不同含水层与钻孔的交汇点, 也可称为出水口。图中,  $V$  为地下水的垂向流速, 双线箭头表示地下水的流向。根据热扩散定律, 如果钻孔中地下水无垂向流动, 则在出水口附近的温度测井曲线应该关于出水口对称, 如图 2(a)所示; 否则在出水口附近的温度测井曲线不对称, 沿水流方向偏移, 如图 2(b), (c)所示。因而, 根据温度测井曲线的形态可以定性判断地下水在钻孔中的垂向流动特征, 进而了解不同含水层的水力特征。

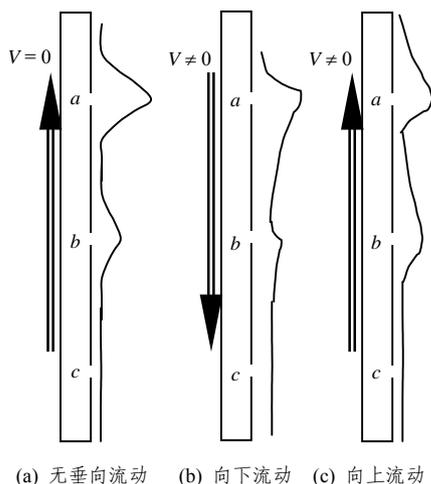


图 2 地下水垂向流动与温度测井曲线形态之间的关系  
Fig.2 Relation between vertical flow of groundwater and shape of temperature logging curve

#### 2.4 双栓塞钻孔水文地质试验

双栓塞钻孔水文地质试验是现场获得岩体渗透参数的常用的成熟的钻孔测量技术之一, 广泛应用

于水利水电、岩土工程、水资源评价和石油勘探等领域。其基本原理是: 用双栓塞(也称为封隔器)将目标含水层/岩体与其他含水层/岩体隔离开, 达到准确测量目标含水层/岩体的渗透参数的目的。

对于低渗透性含水层/岩体, 普遍采用双栓塞压水试验技术获得渗透参数<sup>[13]</sup>。其特点是设备较简单, 试验历时较短, 效率高。

### 3 综合测井技术的应用及数据分析

尽管单一的钻孔测量可以获得含水构造某些有用的信息, 但是由于钻孔测量技术本身的缺陷, 很难利用单一的钻孔测量资料评价导水构造的综合特征。只有综合分析各类钻孔测量资料才能对导水构造的水文地质特征进行有效评价。利用钻孔雷达测量数据和声波钻孔电视测量数据, 可以建立导水构造的空间几何模型。利用钻孔多参数水化学测井数据可以获得深部环境地下水的水化学特征并定性判断地下水在垂向上的流动特征。结合钻孔水文地质试验资料, 可以对导水构造的渗透特征进行评价。

目前, 位于我国甘肃省的北山地区被选为最有前景的高放废物地质处置库预选区<sup>[14]</sup>。自 2 000 年以来, 在该区开展了初步的场址特性评价研究, 在方圆 1 600 km<sup>2</sup> 的范围内施工了 4 口深钻孔(北山 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup> 钻孔), 并开展了钻孔综合测量。下面重点介绍北山 3<sup>#</sup>(BS03) 钻孔综合测井应用研究成果。

BS03 钻孔于 2003 年 5 月 6 日开孔, 2003 年 9 月 3 日终孔, 终孔孔深 501.01 m。0.00~92.00 m 孔段孔径为 130 mm, 下直径 108 mm 套管后用油井水泥固井止水; 92.00~501.01 m 孔段为直径 95 mm 的裸孔。全孔采用清水钻进并添加荧光黄钠示踪剂。BS03 钻孔所揭露的岩性以海西期似斑状黑云母二长花岗岩为主, 夹杂加里东期英云闪长岩和中粗(细)粒花岗岩、伟晶岩、细晶岩等。这类岩石的声学物性差异不明显, 因而钻孔声波电视无法区分这类岩石。

钻孔水化学测井技术方法不仅能获得钻孔各个构造的水化学参数值, 而且还可以通过水化学参数值随深度的连续变化曲线获取不同含水构造的水动力特征。结合钻孔电视测量、钻孔雷达测量和岩心编录结果, 根据水化学参数值随深度的连续变化曲线, 对 BS03 钻孔所揭露的断裂构造的水文地质特征进行了分析。

(1) 220.50~226.50 m 孔段, 如图 3 所示, 根据声波钻孔电视图像和孔径测量曲线, 钻孔孔径较大;

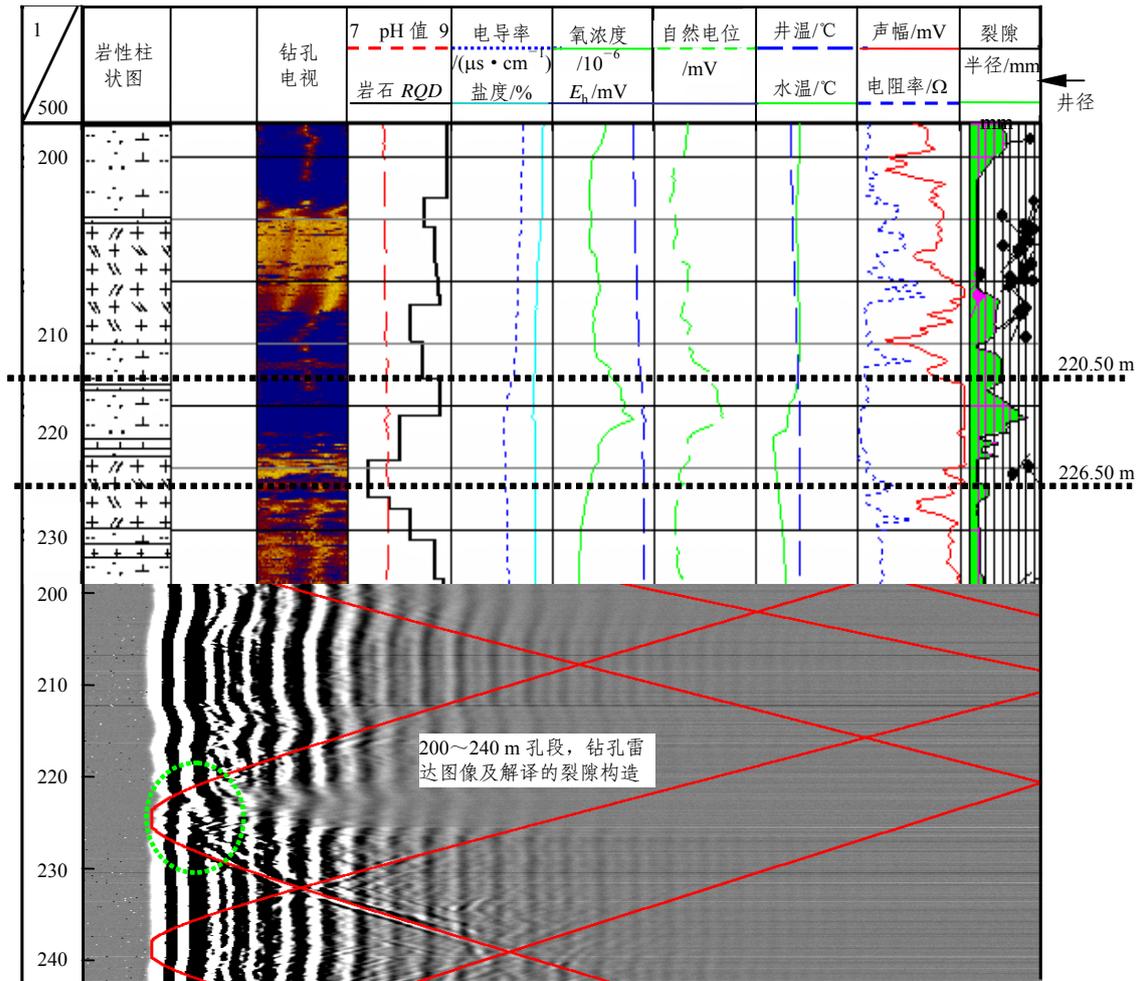


图3 BS03 钻孔 220.50~226.50 m 钻孔雷达、声波钻孔电视、多参数水化学测井综合成果图

Fig.3 Results of combined application of borehole radar, acoustic borehole televiewer and multi-parameter hydrochemical logging in the section of 220.50 m to 226.50 m in borehole BS03

在振幅图像上表现为深绿色，表明大部分声波被孔壁吸收；电阻率很低，自然电位较高。这些现象表明，该孔段是一个裂隙密集的低阻带(断裂构造)。从水化学特征看，地下水温度突然升高，电导率和盐度降低，溶解氧浓度增高，pH 值增大。这些特征表明，该孔段为含水断层，而且地下水从裂隙带流向钻孔。地下水的一些水化学参数值如下：pH 值为 7.81；电导率为 2 838  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ；盐度为 3 269%；溶解氧浓度为  $44.3 \times 10^{-6}$ ；水温  $T = 13.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据钻孔雷达测量结果(图 3 下方)，该断层的倾角为  $74.4^\circ$ ，横向延伸至少 8 m。该导水构造水文地质模型如图 4 所示。

(2) 431.50~433.80 m 孔段，如图 5 所示，钻孔孔径较大；在振幅图像上表现为深绿色，表明大部分声波被孔壁吸收；电阻率很低，自然电位较高。从水化学特征看，地下水温度增高，溶解氧浓度与氧化还原电位增高，pH 值降低，电导率和盐度无显

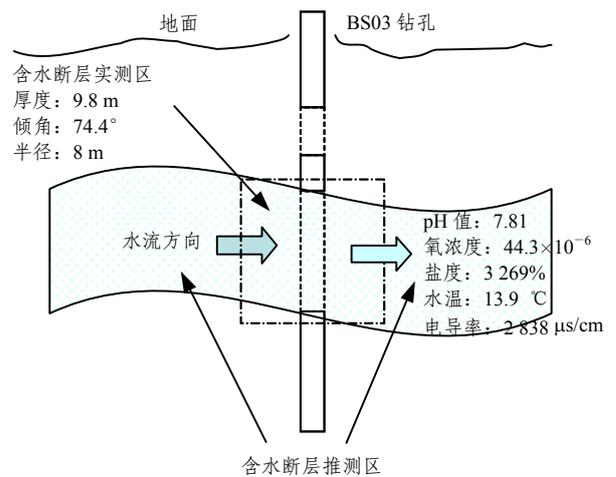


图4 BS03 钻孔 216.50~226.30 m 孔段导水断裂带水文地质模型及其地下水水化学特征

Fig.4 Hydrogeological model of water-conductive fault and groundwater hydrochemical properties in the section of 216.50 m to 226.30 m in borehole BS03

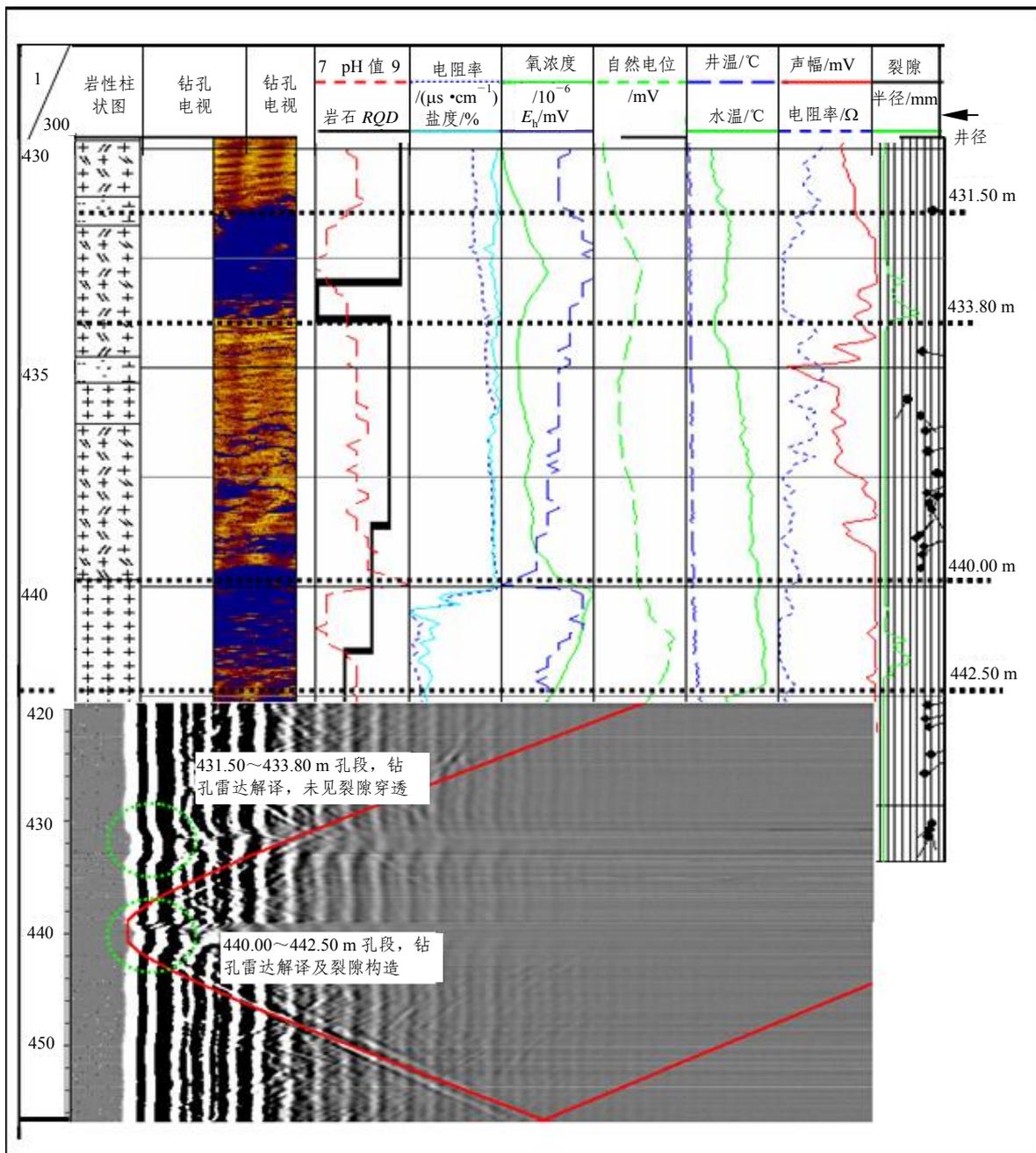


图 5 BS03 钻孔 431.50~442.50 m 钻孔雷达、声波钻孔电视、多参数水化学测井综合成果图

Fig.5 Results of combined application of borehole radar and acoustic borehole televiwer and multi-parameter logging in the section of 431.50 m to 442.50 m in BS03

著变化。这些水化学参数值变化特征表明，该低阻带是一个含水的裂隙密集带。地下水从裂隙带流向钻孔。该含水带地下水的一些水化学参数值：pH 值 7.57；电导率为  $3\ 036\ \mu\text{s}/\text{cm}$ ；盐度为  $3\ 108\%$ ；溶解氧浓度为  $35.5 \times 10^{-6}$ ； $E_h=169\ \text{mV}$ ；水温  $T=18.9\ ^\circ\text{C}$ 。该导水构造水文地质模型如图 6 所示。

(3) 440.00~442.50 m 孔段，如图 5 所示，钻孔孔径较大；在振幅图像上表现为深绿色，表明大

部分声波被孔壁吸收；电阻率很低和自然电位较高。从水化学特征看，地下水温度增高，溶解氧浓度与氧化还原电位增高，pH 值降低，电导率和盐度显著变小。这些水化学参数值变化特征表明，该低阻带是一个导水的裂隙构造带。地下水从裂隙带流向钻孔。该含水层地下水的一些水化学参数值：pH 值为 7.57；电导率为  $3\ 042\ \mu\text{s}/\text{cm}$ ；盐度为  $3\ 113\%$ ；溶解氧浓度为  $35.5$ ； $E_h=163\ \text{mV}$ ；水温  $T=18.9\ ^\circ\text{C}$ 。

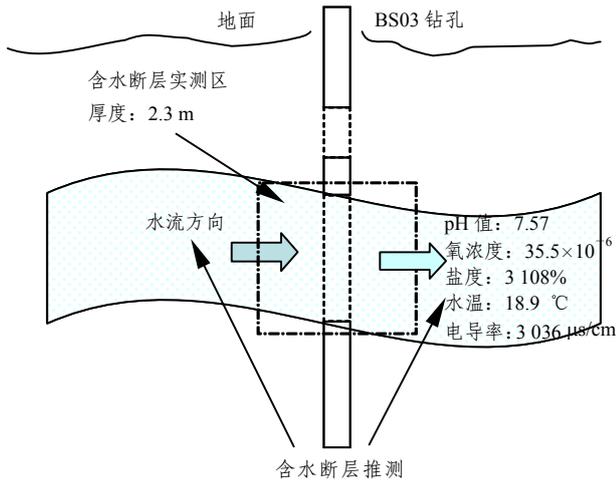


图 6 BS03 钻孔 431.50~433.80 m 孔段导水断裂带水文地质模型及其地下水水化学特征

Fig.6 Hydrogeological model of water-conductive fault and groundwater hydrochemical properties in the section of 431.50 m to 433.80 m in borehole BS03

根据钻孔雷达测量结果(图 5 中下部), 该断层的倾角为 72.4°, 横向延伸至少 8 m。该导水构造水文地质模型如图 7 所示。

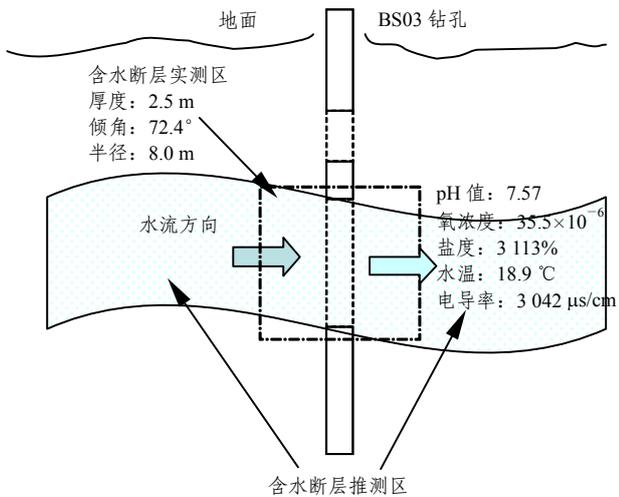


图 7 BS03 钻孔 440.00~442.50 m 孔段导水断裂带水文地质模型及其地下水水化学特征

Fig.7 Hydrogeological model of water-conductive fault and groundwater hydrochemical properties in the section of 440.00 m to 442.50 m in borehole BS03

在BS03钻孔完成了18段双栓塞压水试验。这18个试验段均包含不同数量的裂隙。对于无裂隙的完整孔段未开展压水试验。试验结果见表1。压水试验结果表明, 渗透系数变化较大<sup>[1]</sup>, 从 $7.71 \times 10^{-9}$  m/s到 $1.14 \times 10^{-7}$  m/s, 这反映了裂隙花岗岩体的非均质各向异性的特点。图 8 反映了BS03钻孔渗透系数随深度变化特征, 图中数字代表试验编号。

表 1 BS03 钻孔双栓塞压水试验及其结果

Table 1 Injection tests with double-packer in borehole BS03 and corresponding results

试验编号	试验段深/m	渗透系数/( $m \cdot s^{-1}$ )
1	127.5~134.0	$1.28 \times 10^{-8}$
2	135.0~141.5	$7.71 \times 10^{-9}$
3	148.0~154.5	$1.14 \times 10^{-7}$
4	156.0~162.5	$1.75 \times 10^{-7}$
5	171.5~178.0	$1.16 \times 10^{-7}$
6	187.5~194.0	$1.22 \times 10^{-7}$
7	195.5~202.0	$9.43 \times 10^{-9}$
8	209.9~216.4	$5.37 \times 10^{-8}$
9	223.0~229.5	$1.82 \times 10^{-7}$
10	252.0~258.5	$4.12 \times 10^{-8}$
11	276.0~282.5	$6.50 \times 10^{-8}$
12	313.5~320.0	$5.17 \times 10^{-8}$
13	384.7~391.2	$3.53 \times 10^{-8}$
14	392.2~398.7	$2.90 \times 10^{-8}$
15	402.0~408.5	$3.38 \times 10^{-8}$
16	455.0~461.5	$1.79 \times 10^{-7}$
17	467.0~473.5	$3.50 \times 10^{-7}$
18	487.0~493.5	$2.00 \times 10^{-7}$

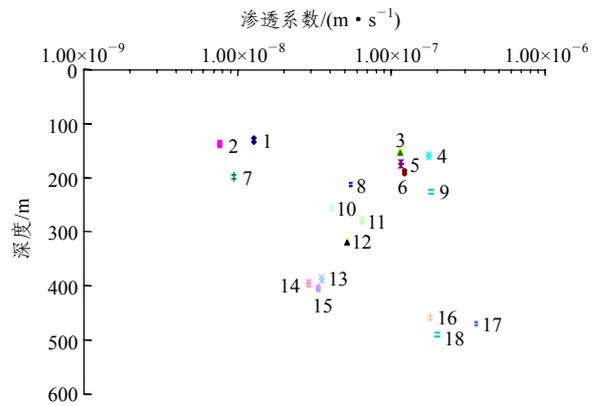


图 8 BS03 钻孔渗透系数随深度变化特征

Fig.8 Change characters of permeability coefficient with depth in borehole BS03

## 4 结 论

断裂构造的水文地质特征评价是高放废物地质处置研究需要解决的关键科学问题之一<sup>[3]</sup>。本文从钻孔综合测量角度探究解决这一问题的方法。

钻孔雷达测量可以探测断裂构造在钻孔中的分布特征以及横向的延展特征等信息。这为评价断裂构造的空间延展特征提供了有用的数据。但是, 通过钻孔雷达测量很难获得被测结构面的走向/倾向。另外, 由于钻孔雷达测量所使用的光缆有较大的伸缩性, 深度校正是一个繁琐的过程。

钻孔声波电视测量可以获得钻孔孔壁 360° 连续图像。从这些图像上可以解译出岩性特征、结构面的产状和相互关系等信息。对于岩性较单一的钻孔或者岩性的声学物性差异不明显的钻孔, 如北山 3# 钻孔, 根据孔壁声波电视图像区分岩性比较困难。

多参数水化学测井技术可以直接获得深部环境地下水水化学数据和垂向变化特征。根据水化学参数在垂向上的变化特征可以识别导水断裂构造, 并定性判断地下水的流动特征。

双栓塞压水试验技术可以分段测量岩体的渗透系数, 技术比较成熟, 应用比较广泛。

断裂构造水文地质特征评价需要获得断裂构造的空间位置、厚度、产状、在岩体中的延伸特征、渗透特性等信息, 还需收集深部环境的水文地质特征和水化学特征等信息。任何单一的钻孔测量技术都不能准确完整地提供描述断裂构造的水文地质特征的数据。综合钻孔测量技术将单一的钻孔测量技术有机地结合起来, 综合分析所获得的数据, 既发挥了综合效应, 各类数据又可以相互验证, 提高数据的可靠性。

将综合钻孔测量技术应用于甘肃北山预选区旧井地段深部环境断裂构造水文地质特征评价研究中取得了良好的效果。利用钻孔雷达和钻孔声波电视测量准确地探测到被钻孔揭露的裂隙密集带、断裂构造带的空间位置、分布及其产状特征; 通过多参数水化学测井技术识别导水断裂构造, 并定性判断钻孔中地下水的垂向流动特征。在此基础上, 建立了 3 个导水断裂构造的水文地质特征模型。

## 参考文献(References):

- [1] WANG J, SU R, CHEN W M, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 649 - 658.
- [2] International Atomic Energy Agency. Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste[R]. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 1999.
- [3] 王 驹, 陈伟明, 苏 锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801 - 812. (WANG Ju, CHEN Weiming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 801 - 812. (in Chinese))
- [4] PAILLET F L, PEDLER W H. Integrated borehole logging methods for wellhead protection application[J]. Engineering Geology, 1996, 42(2/3): 155 - 165.
- [5] SCHEPERS R, RAFAT G, GELBKE C, et al. Application of borehole logging, core imaging and tomography to geotechnical exploration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6): 867 - 876.
- [6] WILLIAMS J H, JOHNSON C D. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies[J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 55(1): 151 - 159.
- [7] WILLIAMS J H, LANE J W, JR SINGHA K, et al. Application of advanced geophysical logging methods in the characterization of a fractured-sedimentary bedrock aquifer, Ventura County, California[R]. Storrs, USA: U.S. Geological Survey, 2002.
- [8] JOHNSON C D, HAENI F P, LANE J W, et al. Borehole-geophysical investigation of the university of Connecticut landfill[R]. Storrs, USA: U.S. Geological Survey, 2002.
- [9] KEYS W S. Borehole geophysics applied to groundwater investigations[R]. Dublin, Ireland: National Water Well Association, 1987.
- [10] 王 驹, 陈伟明, 张 鹏, 等. 钻孔雷达在高放废物处置库场址评价中的应用——以北山 1 号孔为例[J]. 铀矿地质, 2005, 21(6): 360 - 363. (WANG Ju, CHEN Weiming, ZHANG Peng, et al. Application of borehole radar to site characterization of high-level radioactive waste repository—taking Beishan borehole No.1 as an example[J]. Uranium Geology, 2005, 21(6): 360 - 363. (in Chinese))
- [11] 苏 锐, 宗自华, 王 驹. 高分辨率声波钻孔电视及其在核废物地质处置深部岩体研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 922 - 2 928. (SU Rui, ZONG Zihua, WANG Ju. Acoustic borehole televiewer with high resolution and its application to deep formation for geological disposal of nuclear waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 922 - 2 928. (in Chinese))
- [12] ZEMANEK J R, GLENN E E, NORTON L J, et al. Formation evaluation by inspection with the borehole televiewer[J]. Geophysics, 1970, 35(2): 254 - 269.
- [13] BEAUHEIM R L, ROBERTS R M, DALE T F, et al. Hydraulic testing of Salado formation evaporites at the waste isolation pilot plant: second interpretive report[R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 1993.
- [14] 王 驹, 范显华, 徐国庆, 等. 中国高放废物地质处置十年进展[M]. 北京: 原子能出版社, 2004. (WANG Ju, FAN Xianhua, XU Guoqing, et al. Progress of the deep geological disposal of high-level radioactive waste in China: 1991 - 2000[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2004. (in Chinese))