

# 基于地质雷达的北山地下实验室花岗岩岩体断裂探测试验

师钦俊\*, 周俊杰, 王 恒, 高凌举, 李淮阳, 胡跃彬

核工业北京地质研究院物化探研究所, 北京

收稿日期: 2026年1月31日; 录用日期: 2026年2月7日; 发布日期: 2026年2月25日

## 摘 要

为寻找适用于北山地下实验室场址花岗岩岩体断裂的地球物理探测方法, 在地下实验室斜坡道及平巷道开展了地质雷达方法试验。通过数据采集, 精细化处理, 解译获得了斜坡道K720-820段30米以浅的断裂分布以及-280平巷道15米以浅的断裂分布以及干扰异常。结果表明, 地质雷达对花岗岩深部地质环境地球物理探测效果较好, 揭示了地下实验室巷道周围一定空间范围内的断裂构造空间展布特征, 为场址精细化三维地质建模提供关键数据支撑。但是受天线主频率及现场施工限制, 未进行50 MHz天线试验, 对构造深部发展方向探测效果不够理想。

## 关键词

北山地下实验室, 地质雷达, 断裂

# Georadar-Based Testing of Granite Rock Mass Fractures at the Beishan Underground Research Laboratory

Qinjun Shi\*, Junjie Zhou, Heng Wang, Lingju Gao, Huaiyang Li, Yuebin Hu

Institute of Geochemistry and Geophysics, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing

Received: January 31, 2026; accepted: February 7, 2026; published: February 25, 2026

## Abstract

To find suitable geophysical exploration methods for detecting fractures in the granite rock mass at the Beishan Underground Research Laboratory site, ground-penetrating radar (GPR) trials were

\*通讯作者。

文章引用: 师钦俊, 周俊杰, 王恒, 高凌举, 李淮阳, 胡跃彬. 基于地质雷达的北山地下实验室花岗岩岩体断裂探测试验[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(2): 249-260. DOI: 10.12677/ag.2026.162024

conducted in the ramp and drift tunnels. Through data acquisition, refined processing, and interpretation, the fracture distributions within 30 meters depth along the K720-820 section of the ramp and within 15 meters depth in the -280 m drift, along with interference anomalies, were obtained. The results indicate that GPR is effective for geophysical exploration in the deep granite geological environment, revealing the spatial distribution characteristics of fracture structures around the tunnel areas and providing key data support for refined 3D geological modeling. However, due to limitations such as antenna main frequency and on-site construction conditions, 50 MHz antenna tests were not conducted, and the detection effect for the deep development direction of structures was not ideal.

## Keywords

Beishan Underground Research Laboratory, Ground-Penetrating Radar (GPR), Fracture

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高水平放射性废物(简称高放废物)具有放射性强、毒性大、半衰期长的特点,对其进行最终安全处置难度极大,面临一系列的科学、技术和工程挑战[1]。北山地下实验室能否最终安全处置高放废物是关系到核工业可持续发展和环境保护的战略性课题。目前,国际上普遍认为技术可行的最终处置高放废物的方式为深地质处置,即将高放废物埋置在 500~1000 m 深度范围内稳定的地质体中。高放废物地质处置库工程具有建设条件复杂、安全等级高、服务期限长(数万年计)等特点,研发难度很大。为此,根据国外研究经验,需要先在处置库深度建设高放废物处置地下实验室,进行场址特性评价、处置技术现场试验和验证,为处置库建设提供必要的科研基础和实践经验。

北山地下实验室环境复杂,存在多队施工、工业机械噪音大、空气质量差等特点,且巷道岩壁为曲面,对地球物理方法的选择提出了严苛的要求。地质雷达法凭借其效率高、施工便捷、对地形要求较小等优点被用于地坪病害检测[2]、古城墙墙体隐患的探测[3]、沥青面层压实质量评价[4] [5]、路基下伏病害体探测[6]、道路塌陷检测[7]等领域。基于此优点,项目考虑选用地质雷达法进行北山底下实验室花岗岩体断裂探测试验。

## 2. 自然地理概况及地质特征

我国高放废物地质处置北山地下实验室位于甘肃省西北部和内蒙古西部,行政区划隶属于甘肃省酒泉市及内蒙古阿拉善盟额济纳旗,其距玉门市直线距离约 80 km。行政区划隶属甘肃省肃北县和玉门市管辖。南距兰新铁路和 312 国道约 80 km,有简易公路可达 312 国道黄闸湾地段(图 1)。

地下实验室场址位于甘肃北山预选区新场地段中部。新场地段花岗岩体西以旧井断层为界,东至金庙沟煤矿;北以东西走向的 F6 韧性剪切带为界,南界为东西走向的 F7 韧性剪切带。地貌表现为中山至低山山地,花岗岩体基岩裸露,出露面积约为 100 km<sup>2</sup>。

地下实验室地段位于天山-阴山纬向构造体系北山段的柳园-天仓褶皱带中段,属二道井-西铅炉子-旧寺墩北断褶带。该区发育褶皱构造、断裂构造。主干构造线为压性、压扭性断裂带和褶皱轴面,均呈 EW 向或近 EW 向。与其配套的为 NE、NW 向扭性和张扭性断裂构造。

地下实验室场址地段属塔里木-南疆地层大区天山地区的中天山-北山地层分区红柳园地层小区

[8] [9]。出露地层主要为前长城系敦煌岩群的鱼脊山岩组(AnChD)、长城系咸水井群(Chxs)、侏罗系(J)、下白垩统新民堡群(K1xn)和第四系(Q)。其中, 敦煌群和咸水井群是该地段花岗岩的围岩, 侏罗系和第四系覆盖于花岗岩之上。

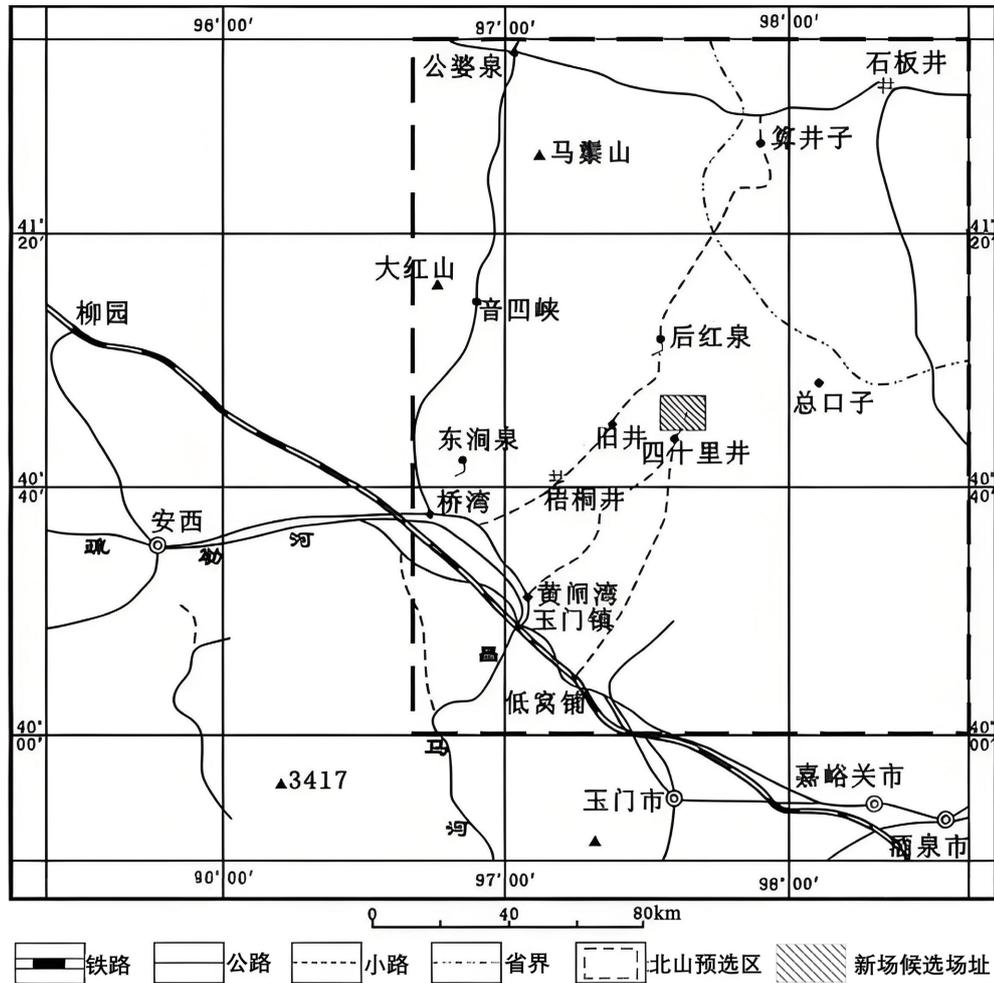


Figure 1. Traffic location map of the Beishan underground research laboratory site  
图1. 北山地下实验室场址交通位置图

### 3. 地质雷达探测原理

地质雷达通过发射电磁脉冲波, 利用地下介质电性参数的差异(表 1), 根据回波的振幅、波形和频率等运动学和动力学特征来分析和推断介质结构和物性特征。本次试验主要利用 100~200 MHz 频率天线, 斜坡道侧壁探测与平巷道探测相结合, 以实现对抗道外围 30 m 半径范围内地质结构的精细探测。

Table 1. Common medium wave speed statistical values  
表 1. 常见介质波速统计值

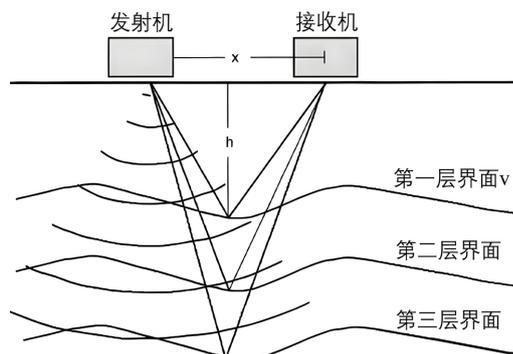
介质	空气	干土	花岗岩	混凝土	路面	页岩	湿土	淡水
速度(m/ns)	0.3	0.15	0.13	0.08~0.12	0.1	0.09	0.06	0.033

地质雷达工作时, 由地面通过发射天线 T 将高频电磁波以宽频带窄脉冲形式辐射进入地下空间, 在

地下地层或目的体上发生反射后返回地面，为接收天线 R 所接收。如图 2 所示，图中  $h$  为异常体或界面的深度， $X$  为两天线之间的距离，其中电磁波在介质中的传播速度  $V$  可由：

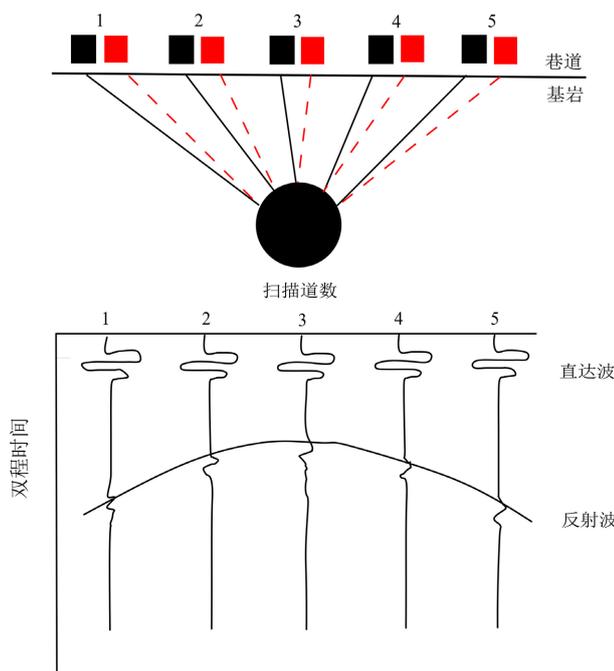
$$V = C / \sqrt{\epsilon} \tag{1}$$

近似计算，其中  $C$  为电磁波在真空中的传播速度， $\epsilon$  为介质的相对介电常数。



**Figure 2.** Schematic diagram of ground penetrating radar (GPR) working principle  
**图 2.** 地质雷达工作原理图

地质雷达测线垂直于不良地质结构的走向时，从左到右拖动天线，天线可以探测到不良地质结构的异常信号。如图 3 所示，由于发射天线向地下辐射电磁波具有一定的角度，这样在位置 1 时发射天线辐射的电磁波能量遇到不良地质体发生反射，反射的回波被位置 1 的接收天线接收到并且把信号反馈给主机，位置 2~5 具有相同的工作机理，在位置 3 即不良地质结构正上方时，发射天线和接收天线距离管线的距离最短，这样反射回波的时间也最短。测点 1~5 所接收到的波形在数学物理上具有双曲线特征，即不良地质体探测的回波一般表现为双曲线型异常信号。



**Figure 3.** Schematic diagram of the formation principle of hyperbolas in ground penetrating radar detection  
**图 3.** 地质雷达探测双曲线形成原理图

#### 4. 数据采集

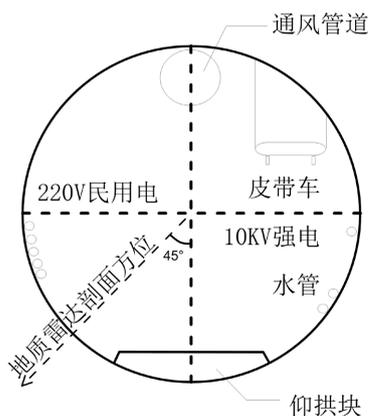
本次地质雷达数据工作采用加拿大产的 pulseEKKO 大深度地质雷达[10][11], 采集参数如表 2 所示。

**Table 2.** pulseEKKO acquisition parameters table

**表 2.** pulseEKKO 采集参数表

指标	参数
天线主频	100 MHz/200 MHz
天线类型	非屏蔽式数字化天线(收发分离)
发射电压	≤1000 V
接收灵敏度	1.5 μV
叠加次数	65535 次
动态范围	186 dB
触发方式	手动

在洞壁测量时, 需要先做测地工作。由于右侧洞壁及洞顶均有障碍物, 选定左侧洞壁为勘查区, 且距离仰拱块约 1 m 左右。其剖面角度为 45° (图 4)。选定起点桩号后, 采用皮尺定距的方式打点放样, 每 20 cm 一个点, 满足地质雷达的最小探测间距要求。打点结束后, 再开始地质雷达测量工作。



**Figure 4.** Schematic diagram of ground penetrating radar detection profile position on a slope

**图 4.** 斜坡道地质雷达探测剖面位置图



**Figure 5.** Site photo of geological radar survey work

**图 5.** 地质雷达采集工作照

测量时要求测量员不能携带金属物品,且在 5 m 范围内没有明显的干扰源,如汽车、机械等,以免污染采集的原始数据。测量时(图 5),指定发射机所在位置为点位,且其天线的右下角与点位标识对齐。测量过程中遇到障碍物时,可适当进行偏移。如障碍物无法躲避,则测量地面数据,在数据处理时按坏道处理。

## 5. 正演模拟

地质雷达正演模拟是通过构建数学模型来模拟电磁波在地下介质中的传播过程,从而预测雷达图像和信号。本文基于频率-波数域相移校正算法,实现了地质雷达正演模拟。其基本原理包括以下几个步骤:

1) 建立模型:首先根据地质体的形状、产状和物性数据,构建一个数学模型。这个模型通常包括地下介质的电性参数(如介电常数、电导率等)和几何尺寸等信息。

2) 计算模拟:在建立的数学模型基础上,通过数值计算方法(如时域有限差分法)来模拟电磁波的传播过程。这个过程涉及到在计算机中设置电性参数和尺寸,然后模拟电磁波的传播,生成雷达图像。

3) 结果分析:通过正演模拟,得到电磁波在地下介质中的传播规律和反射波形态。这些结果可以对实际地质雷达测量的解译提供支撑,帮助地质研究者理解地下介质的分布和物理特性,从而优化地质雷达的解释。

### 5.1. 充泥断层模拟响应

如图 6、图 7 所示,采用 100 MHz 主频作为地质雷达模拟天线,设计如下断层模型:围岩为花岗岩,电阻率为  $800 \Omega \cdot \text{m}$ ,相对介电常数为 5.3,相对磁导率为 1,波速为  $0.13 \text{ m/ns}$ ,岩体断层导致破碎,断层泥等导致电阻率降低,为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,相对介电常数升高,为 100,相对磁导率仍为 1,波速为  $0.02 \text{ m/ns}$ 。采用  $500 \times 300$  的网格剖分规模,1000 个时间采样点,0.25 ns 的采样间隔,得到模拟结果如图。可见,断层的性态被较好的体现出来,且其宽度在表面较窄,深度略微发散。此外,断层对面还出现了虚假的反射同相轴。这说明若出现两个象限的同相轴,则可能为断层的反映,且较强一边为断层所在位置。

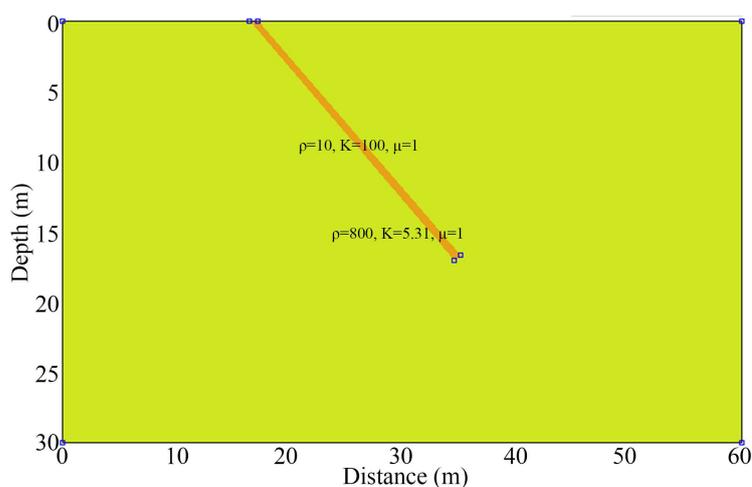


Figure 6. Mud-filled fault model

图 6. 充泥断层模型

值得注意的是,由于断层泥的介电常数要高于围岩,反射率会出现负值(约为 $-62\%$ ),因此其同相轴为黑色。实际上,由于岩体的充性,水断层泥的反射可能会更弱一些,因此同相轴异常并不明显。

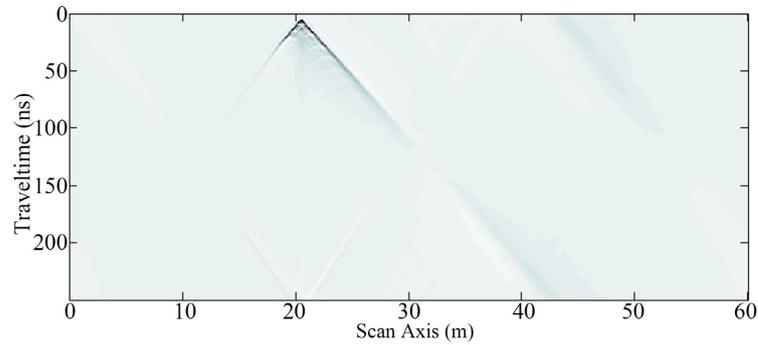


Figure 7. Response of mud-filled fault model

图 7. 充泥断层模型响应

## 5.2. 干燥断层模拟响应

对图 6 模型新增一条断裂获得新模型(图 8), 电阻率  $105 \Omega \cdot \text{m}$ , 较高, 相对介电常数为 1, 模拟空气情形, 所得结果如图 9。此时, 反射率为正值, 约为 39%。可见, 和含泥断裂相比, 其反射要更为强烈, 且相位相反, 为正异常, 而含泥为负异常。尽管断裂和围岩的介电常数更为接近, 但其异常却更清晰。因此, 探测干燥断裂要比含泥断裂更为容易。

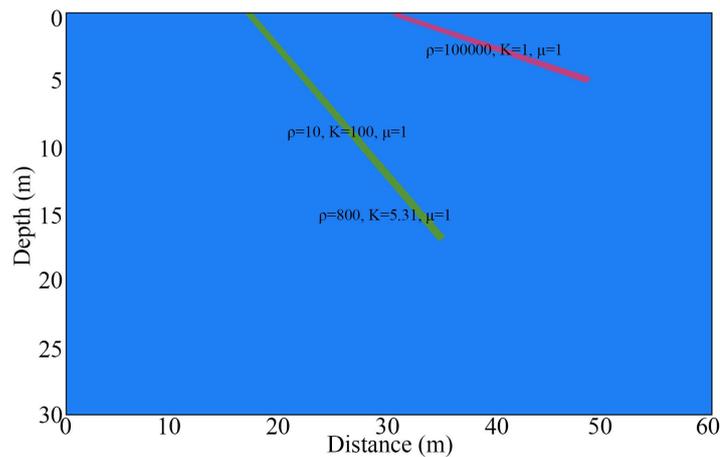


Figure 8. Dry fracture model

图 8. 干燥断裂模型

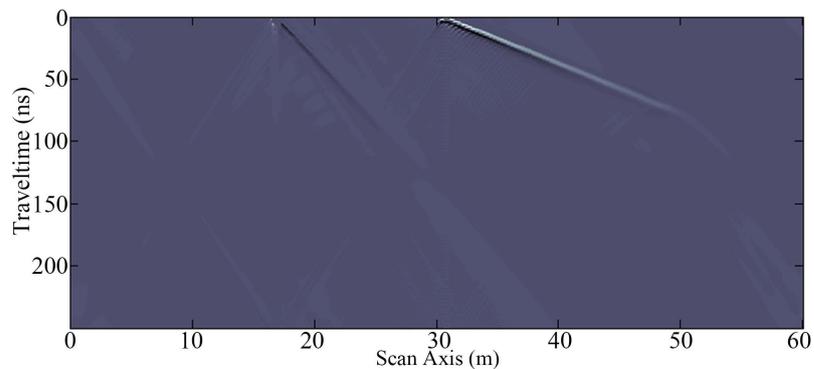


Figure 9. Response of dry fracture model

图 9. 干燥断裂模型响应

## 6. 数据处理

探地雷达预处理方式主要包括：雷达数据的编辑、去直流分量、DEWOW 滤波、高通滤波、数据增益、去除背景值等。

数据文件在采集后通常需要进行排序、重新排列或合并处理；而数据中明显的废道信号，也需要从回波数据中剔除。

去除直流分量(DC Removal)是地质雷达数据处理中的一个重要步骤，主要用于去除信号中的直流分量。该方法从雷达信号中减去其平均值，使信号的均值接近于零。去除直流分量的主要功用是消除低频干扰、提高信号质量、增强信号的可读性。首先，直流分量和低频信号会导致波的振幅均值偏离零值，影响后续处理(如增益调整等)的效果。去除直流分量可以有效减少这种干扰。其次，通过去除直流分量，可以使雷达信号更加清晰，便于后续的分析解释。再次，去除直流偏移后，信号的特征更加明显，有助于提高地质雷达数据的解译精度。去除直流分量的具体作法是：首先计算信号的平均值，再从信号中减去平均值。对每道数据进行累加求和，然后除以每道的采样点数以获得均值；将每道数据的每个采样点减去其均值，从而得到去除直流分量后的数据。

DEWOW 滤波方法是一种用于去除低频漂移的处理技术。其主要目的是消除由于仪器漂移、环境噪声或其他因素导致的低频干扰。DEWOW 滤波器对每一道数据(即每个雷达扫描道)独立进行处理。和去直流分量不同，DEWOW 方法通过计算每一道的滑动平均值，再对道数据进行滑动平均值去除，从而达到去低频偏移的效果。首先，对于每一道数据，DEWOW 方法会计算一个滑动平均值。滑动平均值的计算基于一个设定的时间窗口(time window)，该窗口的大小需要根据数据的主频来确定。之后，计算出的滑动平均值将从每一道数据的中心点减去，从而去除低频漂移或直流分量。这种方法特别适用于去除随时间变化的低频偏移，而不仅仅是恒定的直流偏移。

高通滤波主要用于去除信号中的低频噪声和干扰。地质雷达数据中可能包含由仪器漂移、环境变化或其他因素引起的低频噪声。高通滤波可以有效去除这些低频干扰，提高信号的质量。高通滤波还可以去除信号中的直流分量，使信号的均值接近于零，便于后续处理。地质雷达信号中的高频成分通常包含更多的细节信息。高通滤波可以突出这些高频特征，有助于识别地质结构的细节。

地质雷达增益的主要目的是补偿电磁波在地下传播过程中的衰减，使深部和浅部的信号强度差异减小，便于后续的分析解释。本次处理使用自动增益及 SEC 增益(图 10)。

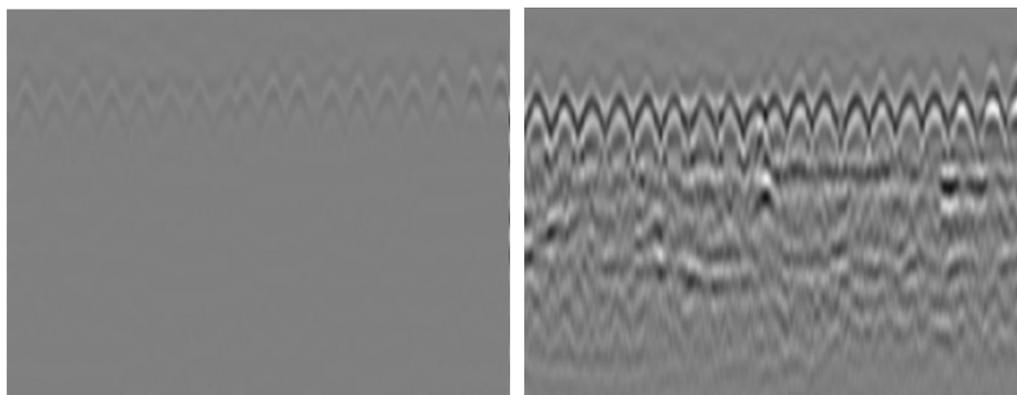


Figure 10. Data images before and after gain processing

图 10. 增益前后的数据图像

去除背景值是地质雷达数据处理的选做环节。去除背景值的主要目的是提高信噪比，突显目标信号。

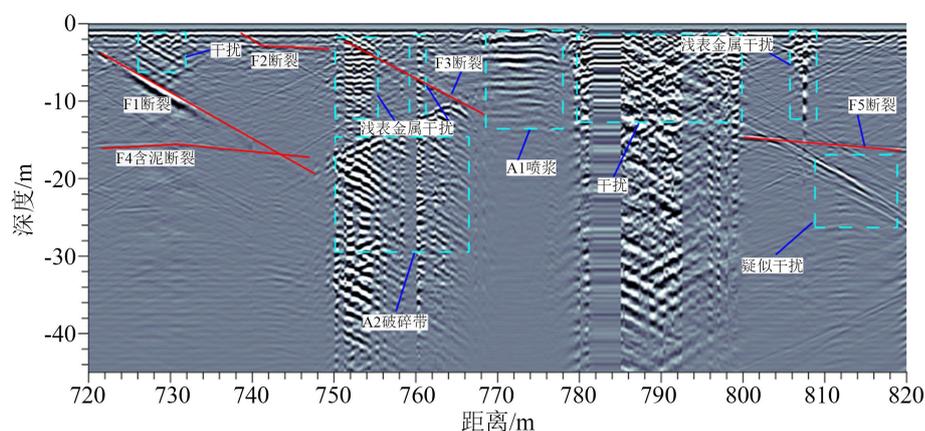
在地质雷达数据中,背景信号通常包括天线间耦合信号、地下不同介质层面反射信号及地杂波等。这些背景信号可能会掩盖目标反射信号,从而对目标信号的提取造成干扰。通过去除背景值,可以有效减少这些干扰,使目标信号更加清晰,便于后续的解释。

## 7. 地质雷达结果

在斜坡道 K720-820 段进行了 100 MHz 天线的地质雷达探测。在-280 平巷段进行了 200 MHz 天线的地质雷达探测,结果如下。

### 7.1. 斜坡道 K720-820 段

此段剖面采用了 100 MHz 天线进行了测量,收发距为 1 m,点距为 0.2 m,此段剖面总长度为 100 m (图 11)。



**Figure 11.** Interpreted results of 100 MHz geological radar profile across the K720-K820 section of the ramp  
**图 11.** 斜坡道 K720-K820 段地质雷达 100 MHz 剖面解译成果

由于斜坡道内敷设有含钢筋的仰拱块,且存在电缆、皮带车、鼓风机、抽水机、钢拱架等设施,对地质雷达的探测造成较大影响,地质剖面含有较多噪声。结合典型干扰源异常特征对干扰进行识别,在 K720-K820 段共识别出噪声 6 处。

首先在 K725-K730 段,浅表有倾斜 45°左右的不同轴交错出现,和裂隙异常混在一起,造成识别困难。其干扰呈双向出现,且间隔规律,因此识别为电磁干扰;在 K750-K755 段,出现明显的振铃异常,是由浅表金属引起的;在 K760-K761 段,出现明显的振铃异常,是由浅表金属引起的;在 K780-K800 段,波形突然增大,是由大型隧道设备引起的;在 K805-K810 段,出现明显振铃异常,是由浅表金属引起的;在 K805-K820 段的 350~550 ns 处,有明显的同相轴异常,但其延伸线位于金属设备处,因此怀疑由金属设备引起的。

对异常进行识别,解译出断裂(裂隙)5 处、异常区 2 处。

**F1 断裂:** 在 K720-K750 处,三个主频下均存在一右倾轴状异常,其中 100 MHz 和 200 MHz 均为负-正-负相位,50 MHz 为正-负相位,正向主峰明显,为干燥断裂。但在 730 以右的深部,异常幅值变低,仅 200 MHz 显示明显,推测为规模变小或充水,也可能破碎增多。F1 断裂邻近区域在 3 个主频的雷达图像上有倾斜轴状干扰,这对断裂的识别造成了影响。因此仅推断出最大、最明显的 F1 断裂,其余均以干扰为论。

**F2 断裂:** 在 K735-K745 处浅表有负-正-负轴状异常,伴随较多杂波。该异常可能在 K735 处出露。

F3 断裂：在 K750-K765 处浅表存在轴状异常，以 50 MHz 为甚，为正 - 负特征，连续性差，邻近杂波干扰多。在 100/200 MHz 图像隐约为负 - 正 - 负，推断为干燥裂缝，中等规模，呈破碎状，在 K750 处出露。

F4 断裂：在 K722-K748 处存在轴状异常，呈现未出露的正 - 负 - 正异常，连续性较差，推断为含水断裂。

F5 断裂：在 K800-K820 处 350 ns 附近有未出露的负 - 正 - 负轴状异常，各主频图像均有清晰显示，推断为干燥裂缝。值得注意的是，该区域还有一条更为明显的轴状异常，但其延伸至洞壁的位置为 K785 附近，该处有金属设备，因此推测此异常为干扰；此外在 K805-K810 段，出现明显振铃异常，是由浅表金属引起的。

A1 区域异常：在 K770-K775 处浅表，出现了典型的平整多次波异常，这是脱空或层位错断现象，现场验证为混凝土喷浆造成的。

A2 区域异常：在 K750-K765 处深部有异常高振幅多次波，在各主频下均有体现，由于波形混杂，推断为破碎带，但主峰无法理清正负，仅根据 100 MHz 推断为正，因此可能部分含水。该区域下界因多次波干扰而无法判定，仅能推断出上界为倾斜状。

图 12 为本段素描图，其中 K734 处 F06 断裂和 K748 处 F06 断裂与雷达解译较为吻合。因此认为雷达图像解译是具有可信度的。

综合分析，在 K720-K820 段，隧道壁内相对干燥，含水区域较少，断裂和裂隙规模不大，分布也较少，围岩总体稳定性良好。

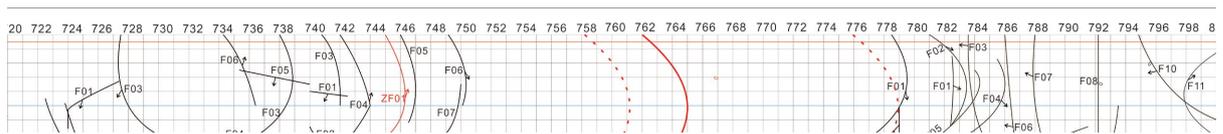


Figure 12. Sketch map of the fracture in the K720-K800 section of the ramp  
图 12. 斜坡道 K720-K800 段断裂素描图

## 7.2. -280 平巷段

此段剖面采用了 200 MHz 天线进行了测量，收发距为 1 m，点距为 0.2 m，此段剖面总长度为 97 m (图 13)。

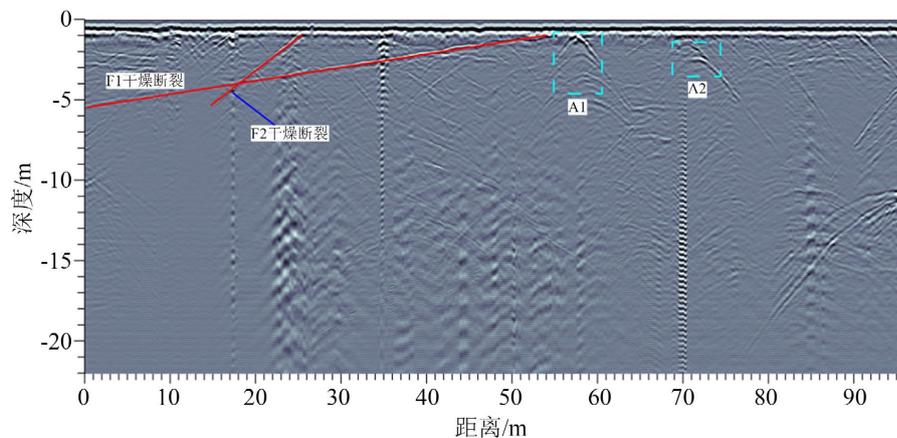


Figure 13. Interpreted results of 200 MHz geological radar profile along the left wall of the disposal pit excavation tunnel, from K0 to K96  
图 13. 处置坑开挖巷道左壁 200 MHz K0-K96 段地质雷达解译成果

处置坑开挖巷道左壁位于-280米平巷内, 200 MHz的地质雷达解译成果如图8所示。

结合典型干扰源异常特征对干扰进行识别, 得出典型噪声3处, 在K17处、K35处、K70处, 有明显振铃异常, 为金属物引起。对异常进行识别, 解译出断裂2处, 异常区2处。

F1断裂: 规模较大, 倾斜状异常, 负-正-负特征, 推断为干燥裂隙, 但在55处出露点无法辨识。

F2断裂: 介于15~25之间, 负-正-负特征, 推断为干燥裂隙。

A1异常区: 56~58之间有局部双曲线异常, 推断为凹槽或小空洞。

A2异常区: 在72位置有局部双曲线异常, 推断为凹槽或小空洞。

综上所述, 处置坑开挖巷道左壁岩体稳定性良好。平巷段因在施工阶段, 故未能获取地质素描图等其他资料进行验证, 该段分析结果为本文作者及地质雷达专家进行综合分析所得。

## 8. 结论

通过在北山地下实验室斜坡道及平巷段开展地质雷达探测, 主要获得以下结论:

(1) 通过现场试验、资料分析, 初步确定了地质雷达在不同频率下数据采集参数、数据处理和解释流程, 建立了不同地质构造和干扰源的响应特征, 通过在斜坡道和-280水平巷的试验, 解释了测段内的断裂和裂隙, 取得了较好的效果。

(2) 地质雷达在花岗岩巷道围岩断裂和裂隙方面探测效果较好, 但是受天线主频率限制, 对倾向和构造深部发展方向探测效果不够理想。

(3) 此次试验, 在数据采集过程中极易受到环境如铁磁类金属架、输电线路、车辆等影响, 对于探测效果造成了一定的影响。因此下一步需要采用一些去噪和抗干扰的算法, 消除采集过程中环境干扰, 提高探测精度。

## 致 谢

本文写作过程中得到了周俊杰博士, 曹成寅博士, 王恒工程师, 李淮阳工程师及胡跃彬工程师的技术支持及所领导的帮助, 在此一并表示感谢。

## 基金项目

本次研究得到了北京基地地球物理数据资源建设(项目编号: 物 YZY2601-4)与地下实验室巷道地球物理探测试验与解译(项目编号: 物 FZ2101-4)的资助, 在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 核工业北京地质研究院. 《中国北山地下实验室建设过程中科研项目——地下实验室场址深部地质环境研究项目任务书》(D版)[R]. 北京, 2021.
- [2] 赵莽, 吴大国, 姚运昌. 地质雷达在地坪病害检测中的应用[J]. 价值工程, 2024, 43(17): 135-137.
- [3] 孟张勇, 高维强, 马杰, 等. 地质雷达在古城墙墙体隐患的探测应用[J]. 工程勘察, 2024(7): 75-80.
- [4] 凌天清, 刁航, 田波, 等. 基于探地雷达技术的沥青面层压实质量评价研究[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(6): 2724-2733.
- [5] 任仲山, 马辉. 基于探地雷达的沥青面层压实质量应用研究[J]. 交通科技, 2024, 50(6): 28-34.
- [6] 肖坤林, 张健, 贾小杰, 等. 微动和地质雷达法在路基下伏病害体探测中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2024, 39(4): 564-569.
- [7] 陈国房, 朱小伟, 薛凯喜, 等. 基于探地雷达技术的道路塌陷检测应用研究[J]. 科技通报, 2025, 41(9): 58-66.
- [8] 核工业北京地质研究院. 《中国高水平放射性废物地质处置地下实验室建设工程项目初步设计》(D版)[R]. 北京, 2021.

- [9] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2005) Äspö Hard Rock Laboratory-Characterisation Methods and Instruments: Experiences from the Construction Phase. TR-05-11.
- [10] 李远强. Pulse EKKO Pro 探地雷达勘查地质灾害的原理和方法[J]. 城市地质, 2012, 7(2): 49-51.
- [11] 刘伟科. Ultra pulseEKKO 雷达在水域探测中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2023(10): 118-121.