

强干扰条件下矿井电梯井井壁损伤精细探测

周超群

五矿邯邢矿业有限公司北洛河铁矿, 河北 武安
Email: 276332560@qq.com

收稿日期: 2020年12月18日; 录用日期: 2021年1月14日; 发布日期: 2021年1月21日

摘要

为了准确有效地探测矿井电梯井井壁损伤情况, 为下一步采取安全措施提供技术支撑, 以北洛河铁矿电梯井井筒为例, 阐述了地质雷达在矿井井壁损伤探测中的应用。利用高频电磁波的反射, 准确的探测出井壁破碎情况, 经过对探测数据的处理, 发现目前该井壁主要存在21处隐患, 其中10处井壁破损情况较严重, 集中在0.4~1.2 m深度范围内; 井壁浅部附近空鼓和张裂情况有18处, 主要集中在0.3~0.7 m深度范围内, 本次探测结果为下一步的防治工作提供了一定的依据。结合探测结果综合分析表明: 地质雷达在矿井井筒损伤探测与治理中作用巨大, 能够为矿井的安全生产提供技术保障。

关键词

地质雷达, 井壁损伤, 探测, 安全生产

Fine Detection of Mine Elevator Shaft Wall Damage under the Condition of Strong Interference

Chaoqun Zhou

Beiminghe Iron Mine of Minmetals Hanxing Co., Ltd., Wuan Hebei
Email: 276332560@qq.com

Received: Dec. 18th, 2020; accepted: Jan. 14th, 2021; published: Jan. 21st, 2021

Abstract

In order to accurately and effectively detect the mine elevator shaft wall damage and provide technical support for taking safety measures in the next step, taking Beiminghe Iron mine elevator

shaft as an example, this paper expounds the application of geological radar in mine shaft wall damage detection. Using the reflection of high-frequency electromagnetic wave, we can accurately detect the broken situation of the shaft lining. After processing the detection data, we find that there are 21 hidden dangers in the shaft lining, of which 10 are seriously damaged, concentrated in the depth range of 0.4~1.2 m; there are 18 hollowing and tension cracks near the shallow part of the shaft lining, mainly concentrated in the depth range of 0.3~0.7 m. The detection result is the next step. It provides a certain basis for the prevention and control of the disease. Combined with the detection results, the comprehensive analysis shows that geological radar plays an important role in the detection and treatment of mine shaft damage, which can provide technical support for the safety production of the mine.

Keywords

Ground Penetrating Radar, Shaft Lining Damage, Detection, Safety Production

Copyright © 2021 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

矿井井筒的破裂、井壁的空鼓以及钢筋的移位都给矿井的安全生产带来了严重的威胁，全国已经有多个井筒发生井壁破碎的事故。此类事故不仅影响矿井的正常生产，还会引发更严重的安全隐患，造成巨大的经济损失[1] [2]。对于井筒损伤的治理工作，通常是采用地面注浆或者井壁直接注浆的方法，但是由于井筒的损伤类型和损伤范围难以确定，导致注浆位置也难以确定，不能有效保证注浆效果，经常出现注浆效果不理想甚至失败的情况[3] [4] [5]。所以，如何确定井筒的损伤程度以及注浆位置，对于矿井井筒损伤的防治工作至关重要。

鉴于矿井井筒损伤位置较浅、深度较小，且井壁全部由钢筋混凝土浇筑而成，导致传统的矿井物探方法在实际应用中存在一定的局限性[6]，其中矿井瞬变电磁法受关断效应的影响不可避免的在浅部存在盲区，给浅部资料解释带来困难；高密度电法体积效应大，分辨率较低，同时需要良好的接地条件，无法在钢筋混凝土井壁上进行数据采集。而地质雷达对浅部地层介质具有较高分辨率，同时其抗干扰能力强，被广泛应用于结构物无损检测、公路路面塌陷探测等勘察领域[7] [8] [9]。因此，本文采用地质雷达方法，对北洛河铁矿电梯井井壁的损伤情况进行了详细的检测，对后期的治理工作提供了基础数据，为该矿井的安全生产提供了技术保障。

2. 地质雷达原理

地质雷达(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR)是一种利用高频电磁波(1 MHz~1 GHz)的反射来探测地下不同地层分界面或者目标体的物探方法[10]。该方法是以宽频带短脉冲形式激发，通过发射天线(T)将高频电磁波送入地下，经地下地层分界面或目标体反射后由接收天线(R)接收，如图 1 所示。地下地层界面或目标体的反射波的走时为[11]：

$$t = \sqrt{4z^2 + x^2} / v \quad (1)$$

其中， z 是目标体的埋藏深度， v 是地下各层介质电磁波的速度， x 是发射天线和接收天线之间的距离。

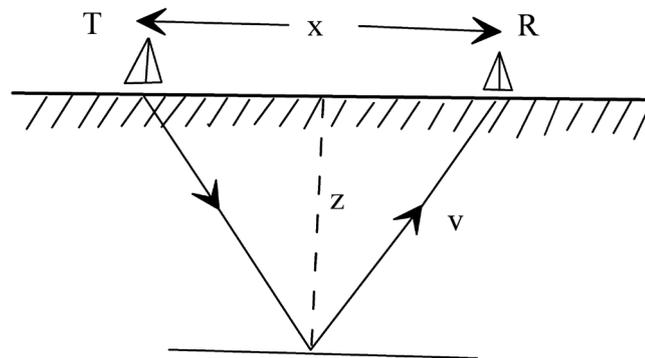


Figure 1. Principle of reflection detection
图 1. 反射探测原理

当地下介质中的电磁波速度 v 为已知时, 就可以根据采集到的时间 t 值求出地层界面或目标体的深度。在剖面测量中, x 值一般是固定不变的。图 2 是对于一个简单的地质模型, 雷达探测记录的波形示意图。在波形记录图上各测点均以测线的铅垂方向记录波形, 最终构成雷达剖面。

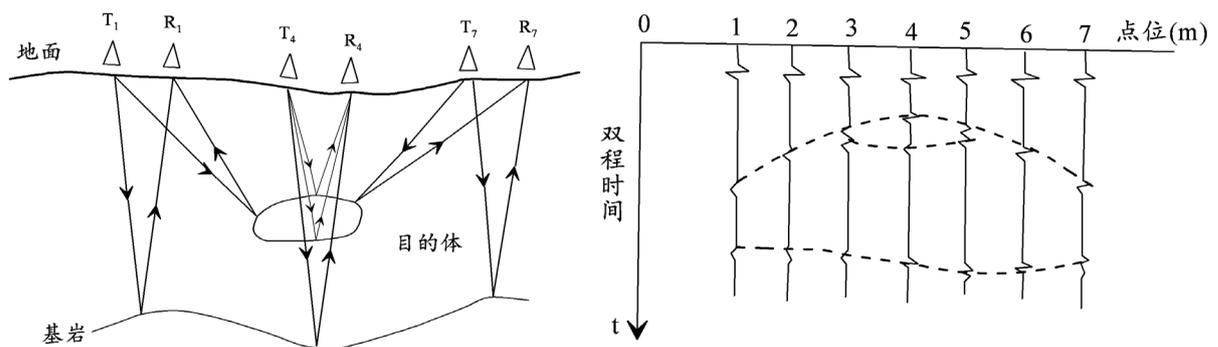


Figure 2. Schematic diagram of the waveform recorded by radar detection
图 2. 雷达探测记录的波形示意图

当矿井井筒井壁存在破裂、空鼓以及钢筋的移位时, 井壁后的地层完整性也会遭到破坏, 此时其介电常数与围岩存在明显差异。在地质雷达测量剖面上, 反射波信号幅度会发生变化, 导致同相轴不连续或者局部连续, 这也是地质雷达探测地下地层分界面或目标体的地球物理基础[12][13]。

3. 数据采集

3.1. 地质概况

在矿区内, 均为第四系黄土及河床卵石层所覆盖。据钻孔所见, 矿区内地层(由新至老)如下[14]: 1) 第四系黄土砾石层: 上部黄土层厚 1~1.5 m。分布于河床两侧。中部砾石层厚度 10~143.21 m, 在基岩上部有一层厚 2~10 m 的红色粘土层。2) 石炭、二叠系含煤岩系: 主要分布在矿区东端, 为呈 NNE 走向, 倾向南东, 缓~中倾斜的一套含煤岩系地层, 属云驾岭煤田矿区范围。3) 中奥陶系灰岩层: 地层由于受后期岩浆岩的侵入影响, 岩石大都变质, 重结晶作用明显。包括奥陶系中统上马家沟组一段(O₂-1)、奥陶系中统上马家沟组二段(O₂-2)、奥陶系中统上马家沟组三段(O₂-3)、奥陶系中统峰峰组一段(O₂-1)以及奥陶系中统峰峰组二段(O₂-2)。在垂向上, 矿区灰岩上覆有第四系砂砾卵石层、砂质粘土砾石层和底部粘土层, 下为燕山期火成岩托底。

矿区内的主要控矿构造为次级的背斜，主要发育在奥陶系中统马家沟石灰岩中部 O₂2-2 层位中，在背斜轴部有一宽 200~300 m 的断裂带，其宽度向上递减，为闪长玢岩、磁铁矿、砂卡岩及角砾岩所充填。到 O₂3-1 岩层，由于原岩为角砾状灰岩，岩石疏松破碎，又受后期褶皱影响，岩层产状紊乱，层间滑动剧烈，岩石破碎及糜棱岩化发育。至上部 O₂3-2 岩层中，岩层产状渐趋平缓。

矿区含水层主要有奥陶系中统石灰岩含水层、石炭二迭系砂岩薄层灰岩含水层、第四系砂砾石含水层以及闪长岩裂隙含水层。第四系底部粘土层、煤系地层泥页岩和未经风化、构造破坏的完整闪长岩侵入体为矿区主要隔水层。

北洛河铁矿电梯井井筒采用钢筋混凝土井壁结构，井筒长为 5.3 m，宽 3.15 m，混凝土井壁厚 0.3 m。在电梯运行过程中，发现电梯井马头门侧井壁有渗水、局部淋水、钢筋凸起和混凝土脱落现象，如图 3 所示。为了查明井筒的破裂、井壁的空鼓以及钢筋的移位等情况，为后续加固工作提供依据，需要对电梯井井壁进行地质雷达探测。

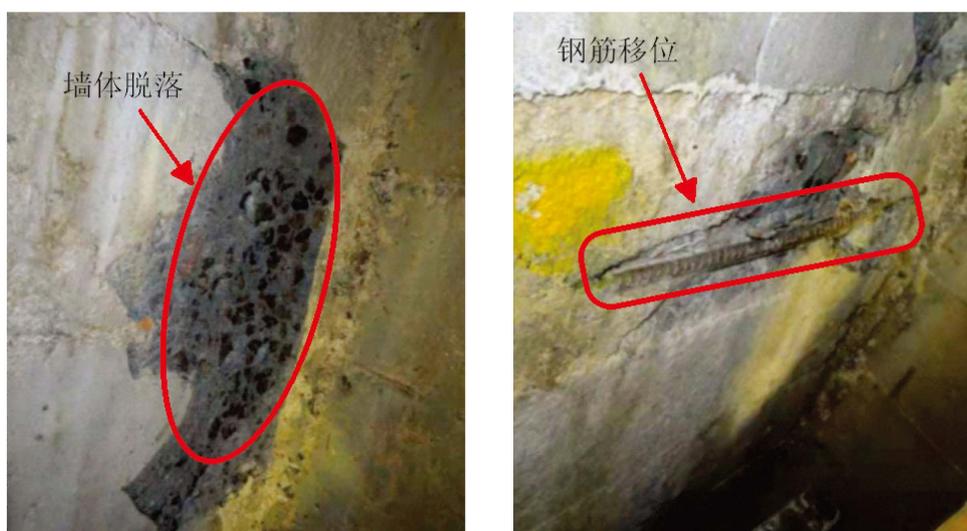


Figure 3. The diagram of Wall damage
图 3. 井筒井壁损伤图

3.2. 仪器参数

对于本次井筒损伤探测，使用国产的 KON-LD(A)型地质雷达系统。该系统由主机、天线、控制显示单元、数据采集处理软件及配件组成。不同频率的天线，可以满足不同探测深度的要求。由于电梯井筒内金属架较多，所以为了避免电磁波的多次反射，采用了屏蔽式耦合天线。由于不同天线反映的地质细节深度不同，所以为了能够全面将该矿电梯井井壁的破裂、空鼓以及钢筋的移位探查清楚，综合考虑探测深度和精度，对于同一侧线，分别使用 500 MHz 和 1 GHz 天线，采样时窗为 100 ns，采样率为 1024。

3.3. 探测施工

根据井筒实际情况，在电梯井筒马头门一侧，布置 4 条测线，测线间距 0.5 m，探测起点为-200 m 深度处，结束点位-227.9 m 深度，测线布置如图 4 所示。在现场探测时，为了方便施工，工作人员站在电梯轿厢顶，将雷达的发射和接收装置也放在轿厢顶，随后电梯匀速下降，探测点也匀速往下移，进行连续测量。为了方便记录以及解释位置与实际位置对应，在数据采集过程中，每隔 5 m 进行一次标定，两组天线顺序进行。

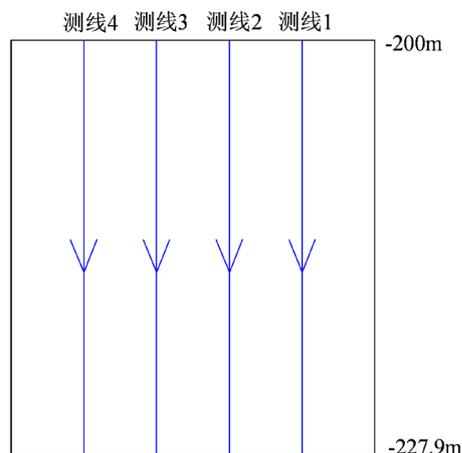


Figure 4. The diagram of line layout
图 4. 测线布置示意图

4. 数据处理及解释

4.1. 数据处理

由于矿井井筒内金属架、电梯等各种干扰，导致电磁波信号与原始信号发生变化，产生差异，所以在数据处理过程中需要对接收到电磁波反射信号进行处理，数据处理主要包括以下几个方面[15] [16] [17]: 1) 道间平均处理来压制干扰波; 2) 滤波处理，用于突出有效波，压制和消除干扰波、多次波; 3) 信号的增益和衰减处理，用于校正信号损失; 4) 速度分析，为时深转换提供速度数据。通过以上处理，可以有效突出异常区域，最大程度的降低电梯井内各种金属干扰的影响，最终实现井筒损伤的精细解释。

4.2. 数据解释

图 5~8 分别是测线 1~测线 4 不同天线雷达探测的深度剖面图，其中图(a)为 500 MHz 天线所得结果，反映的是井壁后方 4 m 范围内的破碎情况; 图(b)为 1 GHz 天线所得的结果，反映的是井壁附近 2.5 m 范围内空鼓、钢筋的移位情况，图中椭圆圈定的部位是可能存在缺陷的部位。

从雷达图像中波形幅度以及同相轴的连续性来看，在图 5(a)中存在多处反射波振幅变弱、同相轴不连续以及反射界面不明显的情况。其中，在-204.3~-204.5 m 位置处，深度在 0.4~0.9 m 处推断有一个小型的裂隙; 在-210~-211.5 m 的排水口处，深度 0.6~1.4 m 推断有一裂隙。在-216~-217.5 m 位置处，深度在 0.4~0.6 m 处推断有一小型空洞。在-224~-226.8 m 位置处，深度 0.4~1.2 m 处推断有一小型裂隙群。从图 5(b)可以看出，在井壁附近整体缺陷、空鼓和张裂情况较多，特别是在 0.3~0.7 m 深度，在-203~-205.5 m，-206~-207.5 m，-207.5~-211 m，-214~-214.5 m，-215~-216 m，-217.5~-222 m，-224.5~-227 m 范围内反射波同相轴不连续以及反射界面不明显，推断空鼓情况严重。但通过观测，钢筋整体深度分布均匀，没有较大的位移，说明墙面膨胀较为一致。

从雷达图像中波形幅度以及同相轴的连续性来看，在图 6(a)中存在多处反射波振幅变弱、同相轴不连续以及反射界面不明显的情况。其中，在-203.5~-204.5 m 位置处，深度在 0.3~0.7 m 处推断有一个小型的裂隙; 在-207.5~-214 m 位置处，深度 0.3~0.7 m 推断为一破碎带。在-217.5~-224 m 位置处，深度在 0.6~0.9 m 处推断有一破碎带。在-224~-226.5 m 位置处，深度 0.2~0.6 m 处推断有一小型破碎。从图 6(b)可以看出，该测线与测线 1 情况基本一致: 在井壁附近整体缺陷、空鼓和张裂情况较多，特别是在 0.3~0.7 m 深度空鼓情况严重。其中，在-212~-214.5 m，-215.5~-218 m，-221~-222 m，-224~-227 m

范围内反射波同相轴不连续以及反射界面不明显，推断存在空鼓情况。但通过图中可以看出钢筋整体深度分布均匀，没有较大的位移，说明该测线墙面膨胀较一致。

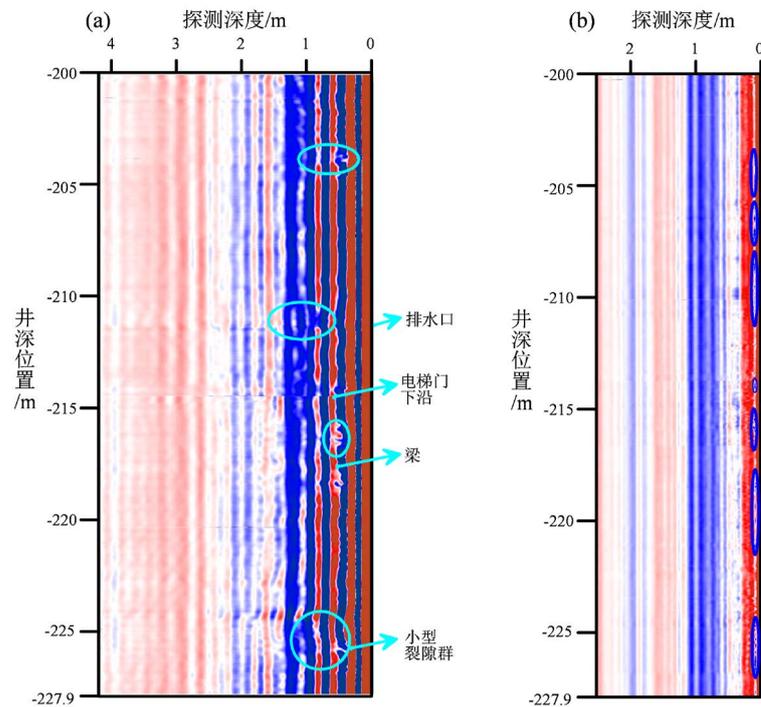


Figure 5. The depth profile of Line 1 (a) the result of 500 MHz; (b) the result of 1 GHz
图 5. 测线 1 深度剖面图(a) 500 MHz 天线探测结果; (b) 1 GHz 天线探测结果

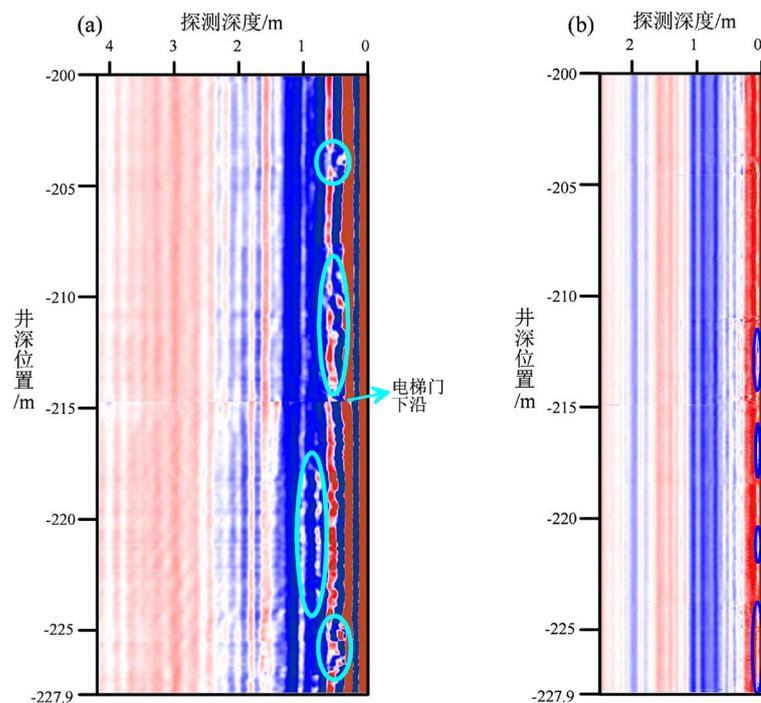


Figure 6. The depth profile of Line 2 (a) the result of 500 MHz; (b) the result of 1 GHz
图 6. 测线 2 深度剖面图(a) 500 MHz 天线探测结果; (b) 1 GHz 天线探测结果

从雷达图像中波形幅度以及同相轴的连续性来看,在图 7(a)中存在多处反射波振幅变弱、同相轴不连续以及反射界面不明显的情况。其中,在-200.5~-201.5 m 位置处,深度在 0.3~0.7 m 处推断有一个小型的裂隙;在-203~-204 m 位置处,深度 0.3~0.7 m 处推断为一破碎带;在-209.5~-212.5 m 位置处,深度在 0.2~0.7 m 处推断有一破碎带;在-213.7~-214.9 m、-215.4~-220 m 和-221.5~-224.5 m 位置处,深度 0.3~0.9 m 处推断有一小型破碎。从图 7(b)中可以看出,该测线井壁附近整体空鼓、张裂情况较小,主要集中在 0.3~0.7 m 深度。在-201~-201.5 m, -214~-216 m 以及-224~-227 m 处反射波同相轴不连续以及反射界面不明显,推断以上位置存在空鼓情况。与测线 1 和测线 2 一致,该测线范围内钢筋整体深度分布均匀,没有较大的位移,说明墙面膨胀较一致。

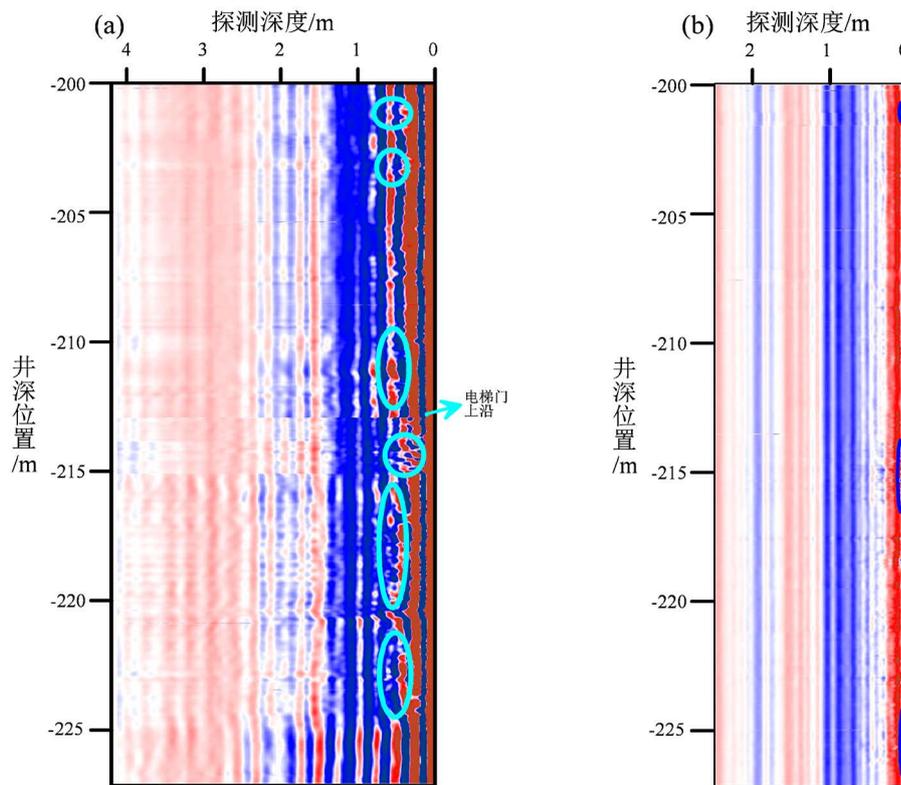


Figure 7. The depth profile of Line 3 (a) the result of 500 MHz; (b) the result of 1 GHz
图 7. 测线 3 深度剖面图(a) 500 MHz 天线探测结果; (b) 1 GHz 天线探测结果

从雷达图像中波形幅度以及同相轴的连续性来看,在图 8(a)中存在多处反射波振幅变弱、同相轴不连续以及反射界面不明显的情况。其中,在-201.5~-202.3 m 位置处,深度在 0.4~0.8 m 处推断有一个小型的空洞;在-203~-204 m 位置处,深度 0.3~0.7 m 处推断为一破碎带;在-206.7~-208.5 m 位置处,深度在 0.4~0.7 m 处推断有一破碎带;在-213.5~-216 m 位置处,深度 0.2~0.6 m 处推断有一小型破碎;在-217.3~-218 m、-222.5~-223 m 位置处,深度 0.4~0.7 m 处推断有一小型破碎;在-224.6~-225.5 m 位置处,深度 0.2~0.7 m 处推断有一小型破碎;在-218~-222 m 位置处,深度 1.4~2.4 m 处推断有一小型破碎区。从图 8(b)中可以看出,该测线井壁附近整体空鼓、张裂情况也比较小,同样主要集中在 0.3~0.7 m 深度。其中,-203.9~-204.9 m, -210.2~-211 m, -226~-227.9 处反射界面不明显,推断存在空鼓情况;-226~-227.9, 30~40 cm 处反射波同相轴不连续,推断该位置存在破碎情况。该测线范围内钢筋整体深度分布均匀,没有较大的位移。

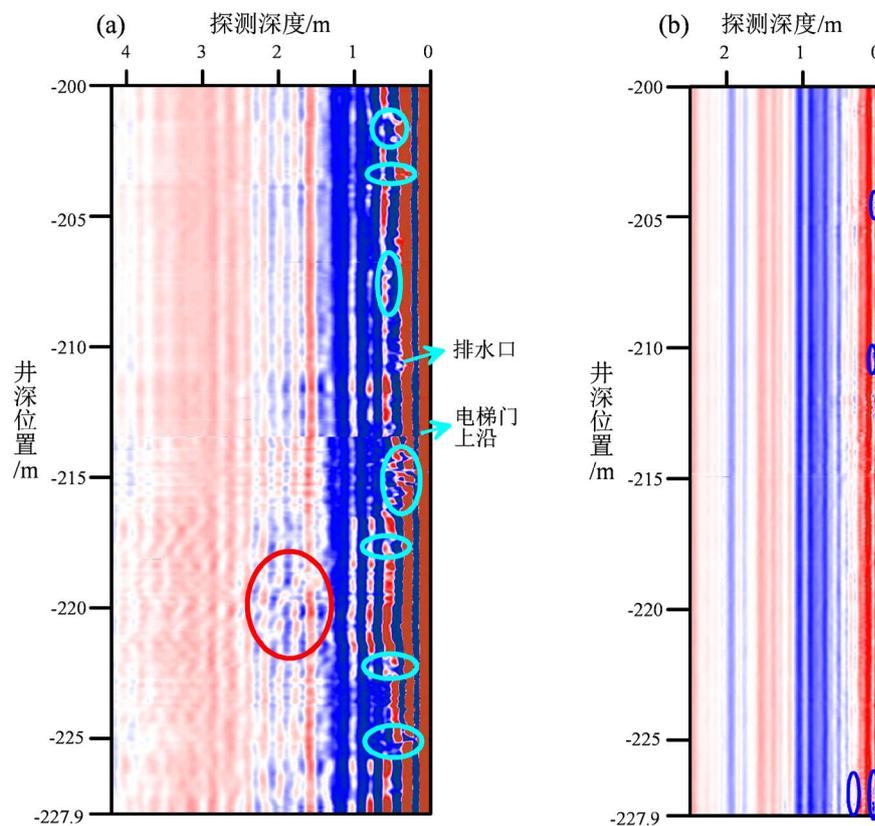


Figure 8. The depth profile of Line 4 (a) the result of 500 MHz; (b) the result of 1 GHz
图 8. 测线 4 深度剖面图(a) 500 MHz 天线探测结果; (b) 1 GHz 天线探测结果

综合 4 条测线探测结果分析发现电梯井马头门一侧井壁深部整体性较好, 井壁后方破碎和裂隙发育较浅, 最深为 2.4 m, 大部分在 1 m 以内, 推断是由于地下水浸泡引起膨胀变形导致。井壁浅部附近(0.3~0.7 m)的空鼓和张裂情况在井壁右侧比较严重, 越靠近左侧, 浅部损伤越轻。由于破碎和裂隙发育较浅, 且发育面积较小, 可以直接采用锚网支护加固的方法进行治理。

5. 结论与建议

5.1. 结论

采用地质雷达探测技术对电梯井井筒损伤探测表明, 损伤位置主要集中于深部(0.4~1.2 m)范围内, 岩石破碎和裂隙发育情况较为严重, 而浅部虽然存在一定的空鼓和张裂, 但钢筋分布较为均匀, 没有明显移位。通过分析认为井壁后方围岩遇水膨胀变形是造成井筒损伤的主要原因。

从整体结果来看, 对于铁矿电梯井井筒损伤的探测, 采用地质雷达能够满足探测精度的要求, 探测结果达到了预期目的。同时, 本次地质雷达探测结果, 为后续井壁治理工作提供了指导和依据。

5.2. 建议

1) 由于井筒内干扰因素较多, 对于数据处理和解释也带来一定的困难, 这也是后续需要进一步研究解决的问题。

2) 随着开采水平的不断下移, 回采错动界限逐渐向电梯井靠近, 受爆破冲击及地压作用, 电梯井井壁后期产生变形、开裂的几率相应增加。因此, 后期需加强对井壁的监测工作。

基金项目

国家十三五重点研发计划项目(编号: 2016YFC0801600)。

参考文献

- [1] 潘冬明, 张华, 赵修军. 探地雷达在井壁注浆及其效果检测中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(2): 24-26. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.0253-2336.2007.02.006>
- [2] 张华, 刘松. 地质雷达在治理井壁破裂工程中的应用[J]. 煤矿安全, 2009, 40(12): 42-44.
- [3] 张基伟, 刘志强, 单仁亮, 等. 复杂地层井筒冻结壁异常状况监测技术研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 103-109.
- [4] 田景对, 李昌同. 地面注浆技术在治理井筒破裂中的应用[J]. 探矿工程, 2003(2): 29-31. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.1672-7428.2003.02.011>
- [5] 夏红春, 周国庆. 地面注浆加固地层法在治理井壁破裂中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(4): 25-27. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.1008-4495.2008.04.009>
- [6] 徐栓祥, 程久龙, 董毅, 王开斌. 矿井瞬变电磁与红外测温联合超前探测方法与应用[J]. 中国矿业, 2019, 28(5): 136-139+145.
- [7] 肖想, 朱自强, 刘湘成, 魏元泵. 探地雷达在隧道超前地质预报中的应用[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(5): 447-452. <https://doi.org/10.12677/AG.2020.105040>
- [8] 王春庆, 陈辉. 隧道混凝土结构理论模型及其雷达波反射特征的研究[J]. 地球科学前沿, 2012, 2(3): 163-166. <http://dx.doi.org/10.12677/AG.2012.23024>
- [9] 黄宏伟, 杜军, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 243-248. <http://dx.chinadot.cn/10.3321/j.issn:1000-4548.2007.02.015>
- [10] 赵富萌, 张毅, 孟兴民, 苏晓军, 石伟. 基于小基线集雷达干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 142-152. <http://dx.chinadot.cn/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201902020>
- [11] 刘波, 吕玉增. 地质雷达在国内的应用现状及发展[J]. 煤炭技术, 2020, 39(6): 60-63. <http://dx.chinadot.cn/10.13301/j.cnki.ct.2020.06.019>
- [12] 韩佳明, 仲鑫, 景帅, 刘平. 探地雷达在黄土地区城市地质管线探测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1476-1481.
- [13] 何军, 刘磊, 黎清华, 刘道涵, 陈标典, 张傲, 赵永波. 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 47-56.
- [14] 殷娜. 河北邯郸北洛河铁矿成因矿物学及矿床成因研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [15] 陶连金, 魏光远, 韦宏鹤, 孙玉辉, 蒯本秋, 管诚. 地质雷达在矿井塌方空洞及松动区检测中的应用[J]. 岩土工程界, 2008, 11(7): 63-66. <http://dx.chinadot.cn/10.3969/j.issn.1674-7801.2008.07.019>
- [16] 刘东坤, 魏昶帆, 吴勇, 赵勇, 王远传. 地质雷达法在桩底岩溶探测中的频谱差异分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 971-975.
- [17] 杜翠. 铁路路基地质雷达检测数据智能里程校正方法[J]. 铁道建筑, 2020, 60(2): 82-85.