

# 钻孔瞬变电磁法接收线圈定向屏蔽物理模拟研究

辛成涛, 程久龙, 李 垚, 孔孟行

(中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 钻孔瞬变电磁 (BTEM) 扫描探测方法可以利用巷道已有超前探查钻孔, 通过旋转置于钻孔内收发线圈对孔壁外围隐蔽地质异常体进行扫描探测, 因收发装置位于钻孔内, 不仅避免了巷道内电气设备和金属物的电磁干扰, 而且可以提高钻孔利用率, 减少钻探工作量。然而, 钻孔瞬变电磁法受全空间效应的影响, 在扫描探测过程中, 以收发线圈法线方向为探测方向接收异常体二次场信号的同时, 还易受到其他方向信号的叠加干扰。若无法有效压制干扰信号, 将直接影响对钻孔孔壁外围地质异常体的精确定位。利用屏蔽的方法, 在接收线圈上安装屏蔽罩, 尽可能保留线圈法线与屏蔽罩开口一致的探测方向的响应信号, 而对其他方向的信号进行压制, 从而实现钻孔孔壁径向一定范围内指向性探测。首先通过物理模拟实验探讨了不同匝数、尺寸的收发线圈对瞬变电磁场响应特征的影响, 对适用于钻孔内的收发线圈参数进行组合优选。然后针对所要屏蔽的电磁波, 选择不同种类的屏蔽材料, 开展不同材料对不同方向电磁波的屏蔽效果实验。通过对比探测方向和其他方向的感应电动势, 证实以泡沫镍制作的屏蔽罩能有效地压制非探测方向的干扰信号。通过实验分别对屏蔽罩的不同形状、磁导率等物性参数进行瞬变电磁场响应特征对比分析, 并探讨屏蔽罩开口角度与定向屏蔽效果的关系, 优化定向屏蔽罩参数, 增强屏蔽效果。最后使用参数优化后的收发线圈和定向屏蔽装置进行钻孔瞬变电磁法径向断面扫描探测现场实验, 采用基于混合分布的混沌量子粒子群和 Levenberg-Marquardt 及 Occam 组合算法的反演方法进行电阻率成像。研究表明: 以泡沫镍为屏蔽材料, 安装在接收线圈上的弧形屏蔽罩定向屏蔽效果较好, 可以有效地压制钻孔瞬变电磁法扫描探测过程中非探测方向的信号干扰, 且能较大程度的保留探测方向的异常响应信号, 进而可以实现对钻孔孔壁外围隐蔽地质异常体的精确定位。

**关键词:** 钻孔瞬变电磁法; 定向屏蔽; 瞬变电磁场特征; 扫描探测

中图分类号: P631.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)07-3178-10

## Physical simulation on directional shielding of receiving coil in borehole transient electromagnetic method

XIN Chengtao, CHENG Jiulong, LI Yao, KONG Menghang

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Borehole transient electromagnetic (BTEM) scanning detection method uses the advanced exploration boreholes in the roadway to scan and detect the hidden geological anomalies outside the borehole wall by rotating the transceiver coil inside the borehole. Because of the transceiver device is located in the borehole, it not only avoids the electromagnetic interference of the electrical equipment and metal in the roadway, but also improves the utilization rate of the borehole and

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-10-27 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0798

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41974088)

作者简介: 辛成涛 (1998—), 男, 云南普洱人, 硕士研究生。E-mail: towerxin@126.com

通讯作者: 程久龙 (1965—), 男, 安徽怀宁人, 教授, 博士生导师。E-mail: JLCheng@126.com

引用格式: 辛成涛, 程久龙, 李垚, 等. 钻孔瞬变电磁法接收线圈定向屏蔽物理模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3178-3187.

XIN Chengtao, CHENG Jiulong, LI Yao, et al. Physical simulation on directional shielding of receiving coil in borehole transient electromagnetic method[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3178-3187.



移动阅读

reduces the drilling workload. However, the BTEM is affected by the whole space effect. In the scanning and detection process, the normal direction of the transceiver coil is used as the detection direction to receive the secondary field signal of the abnormal body, it is also susceptible to the superposition interference of signals in other directions. If the interference signals cannot be effectively suppressed, it will directly affect the positioning of the geological anomaly body around the borehole wall. Using the shielding method, the shielding cover is installed on the receiving coil, and the response signal in the detection direction where the coil normal line is consistent with the opening of the shielding cover is retained as much as possible, while the signals in other directions are shielded, so as to realize the directional detection of the radial direction of the borehole wall within a certain range. First of all, the influences of transceiver coils with different turns and sizes on transient electromagnetic response characteristics are discussed through physical simulation experiments, and the parameters of transceiver coils suitable for drilling are optimized. Subsequently, aiming at the electromagnetic wave to be shielded, different kinds of shielding materials are selected, and the shielding effect experiments of different materials on electromagnetic waves in different directions are carried out. By comparing the induced electromotive force of the detection direction and other directions, it is proved that the arc-shielding made of nickel foam can effectively suppress the response signal in non-detecting direction. The transient electromagnetic field response characteristics of different shapes, permeability and other physical parameters of the shield are compared and analyzed through experiments. Relationship between the opening angle size of the shield, the distance between the shield and the receiver coil and the directional shielding effect is discussed. The parameters of the directional shielding are optimized to enhance the shielding effect. Finally, the parameters optimized transceiver coil and directional shielding device are used to carry out the borehole transient electromagnetic method radial section scanning detection field experiment. The inverse method based on a mixed distribution chaotic quantum particle swarm optimization and a combined Levenberg-Marquardt and Occam algorithms is used for resistivity images. The research shows that the arc-shaped shielding cover installed on the receiving coil with foam nickel as the shielding material has a better directional shielding effect, which can effectively suppress the signal interference in the non-detection direction during the scanning detection process of BTEM and can retain the abnormal response signal in the detection direction. Therefore, the precise positioning of the hidden geological anomaly body around the borehole wall can be realized.

**Key words:** borehole transient electromagnetic method; directional shielding; transient electromagnetic field characteristics; scanning detection

随着煤矿开采深度的增加和开采强度的提高, 矿井水害事故时有发生, 严重威胁煤矿安全生产<sup>[1]</sup>。为预防煤矿掘进巷道前方可能存在的断层、陷落柱以及采空区等隐蔽地质因素造成的矿井突水灾害发生, 通常使用钻探和地球物理方法来进行矿井掘进工作面前方的超前地质预报, 保障煤矿安全开采。钻探方法工作量大、成本高, 探测范围仅局限于钻孔内部, 无法对钻孔径向范围进行探测, 且在施工过程中由于钻探装备或人工施工过程中存在不可控因素, 有可能再次引发突水危害<sup>[2]</sup>。矿井地球物理超前探测水害方法包括直流电法、瞬变电磁法和磁共振方法等<sup>[3]</sup>。其中矿井瞬变电磁法对低阻异常体敏感, 探测距离较大, 但存在较大的探测盲区, 且因为矿井下巷道中的金属干扰, 对探测结果有较大的影响, 造成探查精度不高、分辨率降低等结果<sup>[4]</sup>。将钻孔瞬变电磁法的收发线圈置于钻孔中, 因收发装置位于钻孔内, 不仅避免了巷道内供电电缆和金属物的电磁干扰, 而且可以提高钻孔利

用率, 减少钻探工作量。WANG B 等<sup>[5]</sup>提出适用于孔内对偶双发射、径向六分量接收装置, 并使用双对数坐标系下的负变换算法对不同径向方位角和异常径向深度的异常体进行识别。其方式是对不同方向接收线圈所接收到的响应特征进行对比, 从而对异常体进行定位, 但没有考虑不同方向的信号叠加干扰。范涛等<sup>[6]</sup>提出一种煤矿井下在压裂孔内施工的收发装置, 在孔内沿钻孔逐点移动进行三分量观测, 进而实现对钻孔径向低阻异常体的高精度探测。其方法主要通过异常场的形态组合来判断异常体所在象限, 本质上无法有效剔除来自不同方位异常体叠加的干扰信号。因此考虑如何在数据采集阶段实现对非探测方向的信号进行定向屏蔽, 对钻孔瞬变电磁法指向性探测具有意义。汪凯斌<sup>[7]</sup>为了增强线圈接收到的二次场信号, 采用高磁导率磁芯和宽频低噪放大技术增强了二次场信号, 并利用法拉第屏蔽技术对感应探头进行屏蔽处理, 进一步降低了噪声的影响, 提高采集数据

信噪比。虽然采用了屏蔽技术,但所屏蔽的目标信号是来自于放大器与线圈之间的电场耦合干扰,并不是不同方向信号叠加干扰。席振铎等<sup>[8]</sup>基于等值反磁通原理,将两个发射线圈相对放置并通以反向电流,利用方向相反,强度一致的磁场互相损耗,从而屏蔽一次场的干扰,接收纯二次场响应。学者巧妙利用了屏蔽的思路,对相反方向的一次场信号进行屏蔽,但无法对不同方向的二次场信号进行屏蔽。笔者<sup>[9]</sup>为解决矿井瞬变电磁法全空间效应,通过数值模拟与物理模拟实验相结合的研究方法,验证了锥形坡莫合金屏蔽罩能屏蔽来自非探测方向的部分响应信号,实现单向屏蔽。但坡莫合金所制作的屏蔽罩体积较大,不适用于钻孔内狭小空间。笔者<sup>[10]</sup>公开了一种基于电磁感应原理的孔中扫描探测装置,在钻孔中采用发射装置发射一次场,利用接收装置获取孔壁外围地质体电磁场响应特征,并对非探测方向电磁信号进行屏蔽,以达到指向性探测目的。但对于屏蔽罩的材料,并没有深入研究。针对以上问题,笔者探索研究在钻孔瞬变电磁法收发线圈的接收端安装屏蔽罩,利用屏蔽方法对非探测方向的二次场信号进行屏蔽,然后利用钻孔扫描探测的方法,实现钻孔径向方位任意角度指向性探测,增加钻孔的利用率,对隐蔽地质异常体进行扫描探测精准定位。

## 1 定向屏蔽扫描探测方法原理

### 1.1 扫描探测基本原理与方法

钻孔瞬变电磁法的收发线圈均放置于钻孔内,为保证足够强的发射功率和响应信号,采用多匝数的重叠回线装置进行测量。如图1所示,发射与接收线圈铺设在钻孔同一深度位置,将屏蔽罩安装在收发线圈的接收端上,屏蔽罩开口方向与接收线圈一侧的法线方向一致,并设置此方向为探测方向,此时屏蔽罩主要屏蔽来自于其他方向的干扰信号。

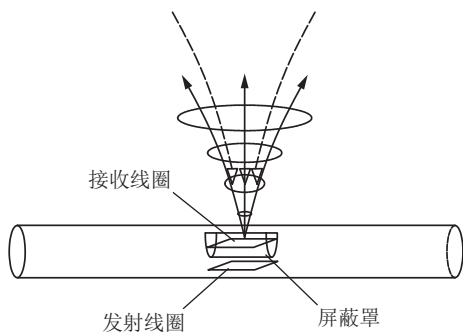


图1 钻孔瞬变电磁法探测装置

Fig.1 Borehole transient electromagnetic detection device

为实现钻孔瞬变电磁法扫描探测,对钻孔径向外

围地质异常体进行精准定位,钻孔瞬变电磁法扫描探测示意如图2所示,在钻孔中某一深度(测点)的径向断面上,每隔15°设置1个探测方向,共24个探测方向,保持收发线圈与屏蔽罩相对位置不变,依次按设置的探测方向探测,形成1个扫描探测断面,并沿钻孔不同深度(测点)逐点移动探测装置,对钻孔不同深度径向断面进行扫描探测。

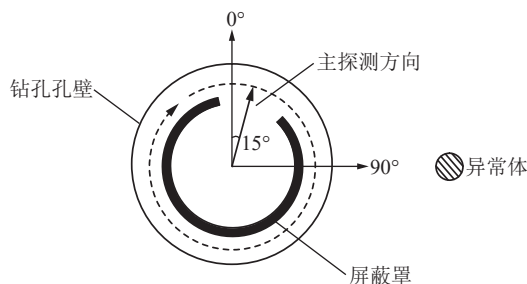


图2 钻孔瞬变电磁法扫描探测方向示意

Fig.2 Borehole transient electromagnetic scanning detection direction diagram

### 1.2 定向屏蔽理论基础

在钻孔瞬变电磁法中,形成环路的收发线圈往往会因外磁场的影响而产生感应电压,且瞬变电磁二次场频带宽,总体频率相对较低。故利用低频电磁场屏蔽材料,用于减弱或消除来自非探测方向的感应电磁场。对于低频磁场的屏蔽,往往使用铁磁性屏蔽材料,为磁场提供一个低磁阻通路,从而实现场的屏蔽,增加屏蔽效能<sup>[11-12]</sup>。

磁屏蔽效能不仅与材料本身相关,还和屏蔽体的结构形状等有关<sup>[13]</sup>,即

$$E_S = 20 \lg \left[ 2\mu_r \frac{h_2}{h_1} \frac{m}{d \left( 1 + \frac{d}{2h_1} \right)} + 1 \right] \quad (1)$$

其中,  $E_S$  为磁屏蔽效能;  $d$  为屏蔽材料垂直于磁场方向的矩形边长;  $h_1$  为屏蔽材料平行于磁场方向的矩形边长;  $h_2/2$  为屏蔽材料与被屏蔽物体之间的距离;  $m$  为屏蔽材料厚度;  $\mu_r$  为材料相对磁导率。由式(1)可知,材料相对磁导越高,其屏蔽效能越好;当  $h_2/h_1$  增大,保持  $h_1$  不变,屏蔽材料与屏蔽体间的距离增大,屏蔽性能越好;当  $m/d$  增大,保持  $d$  不变,增大屏蔽材料厚度,屏蔽效能越好。当  $d/h_1$  减小,应使得屏蔽体长边平行于外磁场方向。

在设计钻孔瞬变电磁法定向屏蔽装置时,利用屏蔽罩开口对屏蔽效能的影响,尽可能保留探测方向的响应信号。以平板屏蔽体上存在开口为例,其通过金属板开口的磁场<sup>[14]</sup>可以表示为



$$H_g = H_0 e^{-\pi m/g} \quad (2)$$

其中,  $H_0$ 、 $H_g$  分别为金属板屏蔽体前、后的磁场强度;  $g$  为开口宽度, cm。假设屏蔽体存在缝隙, 其开口长度为无限长。

由式 (2) 可知, 金属板屏蔽体后的磁场强度和金属板的厚度及其开口宽度有关, 金属板越厚 (屏蔽体开口越深), 开口宽度越小, 通过金属板屏蔽体的磁场强度越强。

## 2 物理模拟

### 2.1 相似准则

为保证物理模拟模型与实际地质异常体的响应特征与规律相似, 在物理模拟实验时必须遵守相似性准则。电磁场在介质中传播满足 Maxwell 方程组, 从 Maxwell 方程组中可以推导瞬变电磁场的物理模拟相似准则<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\sigma' \mu' L'^2}{t'} = \frac{\sigma \mu L^2}{t} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon' \mu' L'^2}{t'^2} = \frac{\varepsilon \mu L^2}{t^2} \quad (4)$$

式中,  $\sigma$  为电导率, S/m;  $\mu$  为磁导率, H/m;  $\varepsilon$  为介电常数;  $t$  为采样时间;  $L$  为所有模型的线性尺度;  $\sigma'$ 、 $\mu'$ 、 $\varepsilon'$ 、 $t'$ 、 $L'$  为要模拟的系统参数,  $\sigma$ 、 $\mu$ 、 $\varepsilon$ 、 $t$ 、 $L$  为实际参数。

由于模拟时位移电流在绝大多数情况下可以忽略不计, 介电常数的影响微乎其微, 即在时间域电磁法的模拟系统中不考虑式 (4)。因瞬变电磁法测量的为绝对值, 存在量纲, 所以还需要考虑几何相似性, 因此需要增加以下条件:

$$\frac{V}{V'} = \frac{L t'}{L' t} \quad (5)$$

其中,  $V$  为感应电动势响应值, 当  $\mu' = \mu$  时, 可简化为

$$\frac{\sigma' L'^2}{t'} = \frac{\sigma L^2}{t} \quad (6)$$

当使用同一仪器进行数据采集, 采样时间  $t$  相等, 则

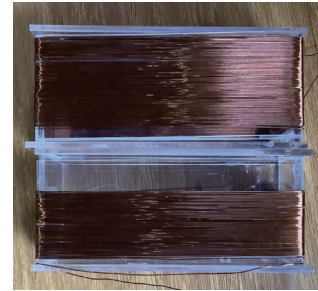
$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \left( \frac{L}{L'} \right)^2 = k_0^2 \quad (7)$$

式中,  $k_0$  为线性比例尺, 在物理模拟实验中的目标异常体大小、埋深、探测装置线性尺寸均按照  $k_0 = 1$  的线性比例设置。

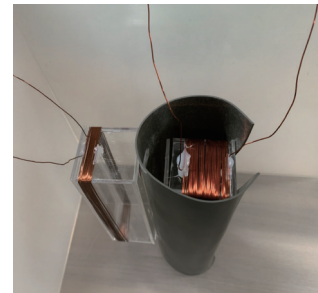
### 2.2 模型制作

绕制线圈如图 3(a) 所示, 图中收发线圈以空心 PVC 板材为骨架, PVC 板材边缘有 0.25 cm 厚的突起, 保证线圈的规整性。实际安装了屏蔽罩的收发线圈, 如图 3(b) 所示, 图中左侧线圈为发射线圈, 右侧线圈

为接收线圈, 屏蔽罩位于收发线圈之间, 且开口方向与接收线圈法线方向重合, 设置此方向为探测方向。



(a) 线圈绕制



(b) 屏蔽罩安装

图 3 收发装置实体

Fig.3 Transceiver device entity diagram

实验地点选取在电磁干扰相对较弱的野外进行, 在距钻孔中心水平距离 2 m、埋深 1 m 处放置 1 个直径 0.1 m、高 0.3 m 的不锈钢圆柱体, 模拟钻孔外围的低阻异常体。钻孔自上而下设置 1 条测线, 共 7 个测点, 对应深度分别为 0、0.5、0.8、1.0、1.2、1.5、2.0 m, 其中 1.0 m 处为正对异常体的中心位置。将收发线圈置于钻孔中, 沿测线自上而下逐点扫描测量, 探测方式如图 4 所示。

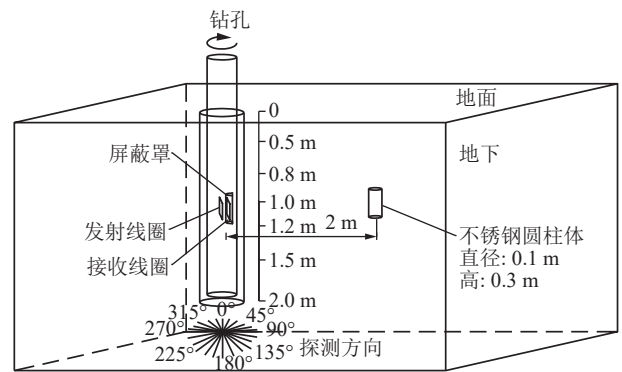


图 4 钻孔瞬变电磁法扫描探测示意

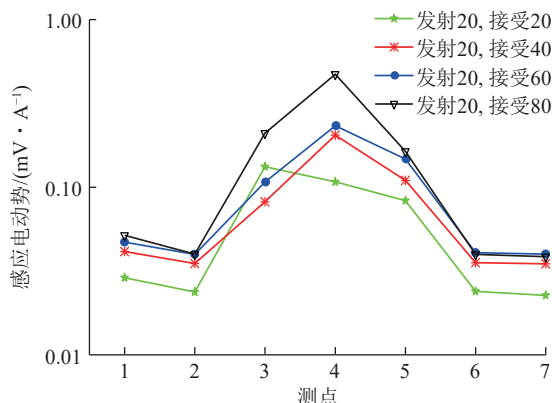
Fig.4 Borehole transient electromagnetic method scanning detection schematic diagram

### 2.3 收发线圈参数选择

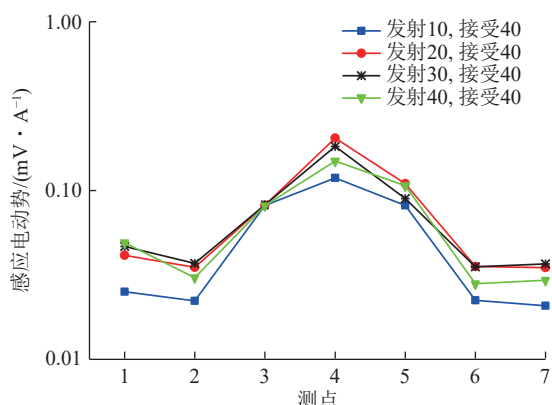
收发线圈的匝数、尺寸等参数的改变会引起发射磁矩、关断时间等参数随之变化, 影响探测效果。为选取适用于钻孔空间内线圈参数, 分别对线圈的不同

参数进行实验。设置发射电流  $\leq 3.4$  A, 采样道数 128 道, 叠加次数 128 次, 频率 25 Hz, 沿钻孔不同深度设置测点依次测量。挑选不同实验的同一测道进行对比分析, 选取代表时间为 0.318 ms 的第 50 测道进行对比, 以下实验如无特别说明, 单测道对比均选择第 50 测道的数据。

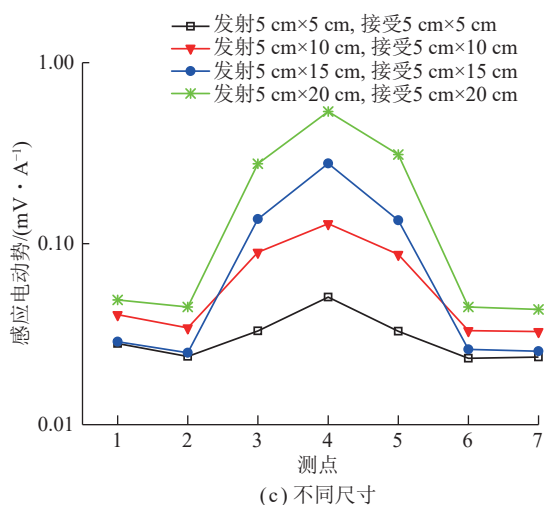
固定发射线圈匝数不变, 仅改变接收线圈匝数, 将感应电动势进行匝数、电流归一化, 结果如图 5(a)



(a) 不同接收线圈匝数



(b) 不同发射线圈匝数



(c) 不同尺寸

图 5 感应电动势单测道对比

Fig.5 Comparison of single channel measurement of induced electromotive force

所示。固定接收线圈匝数不变, 改变发射线圈匝数, 结果如图 5(b) 所示。

线圈所接收到的信号的强度不仅与源的偶极矩相关, 也和收发线圈的匝数和仪器的阻值匹配相关。在一定范围内, 当发射与接收线圈的匝数增加, 线圈阻值增加, 与仪器内阻匹配, 致使加载在仪器内阻上的电流增强, 发射电流增强, 信号增强, 所接收的二次场信号就越强。虽然发射线圈匝数的增加能增大发射功率, 有利于增强响应信号的幅值, 但发射线圈的增加也同时增大了关断时间。经过综合考虑, 当发射线圈为 20 匝, 接收线圈为 40 匝时, 对模型低阻异常的响应更为明显, 以测点 4 为中心两边衰减幅度一致, 具有较好的对称性。

固定线圈宽度为 5 cm 不变, 仅改变线圈长度。其结果如图 5(c) 所示。

由图 5(c) 可看出, 每个尺寸大小的收发线圈均对异常体有良好的响应, 随着线圈尺寸的增大, 响应幅值越大。当发射、接收线圈大小为 5 cm × 15 cm 时, 对低阻异常的响应最好, 与其他尺寸的探测结果相比, 测点 4 处响应的最大值与背景值相差 0.487 7 mV, 对低阻异常的响应差值最大, 最大值出现在测点 4 处, 其他测点响应值随着与异常体距离的增大而逐渐减小。

### 3 定向屏蔽影响因素分析

按如图 1 所示方式将屏蔽罩安装在参数优化后的接收线圈上, 并按照图模型设置, 将收发线圈置于 PVC 透明管内固定, 确保其探测装置中心点位于钻孔深度 1 m 处, 与低阻异常体中心垂直深度对应。探测方式如图 2 所示, 设置为每间隔 45° 为 1 个探测方向, 顺时针依次旋转扫描探测。探测方向 1 指向正北方向, 代表角度为 0°, 探测方向 3 正指向低阻异常体, 代表角度为 90°。

#### 3.1 定向屏蔽罩材料

屏蔽体的屏蔽能力与材料特性和电磁波的种类有关, 对于钻孔瞬变电磁扫描探测方法, 所要屏蔽的电磁波种类已定, 只需考虑屏蔽材料特性对屏蔽效果的影响。瞬变电磁场的屏蔽, 有多种屏蔽材料, 不改变其他参数, 仅改变安装在收发线圈上的屏蔽材料。实验选择了 3 种常见屏蔽材料, 分别是多壁碳纳米管、导电棉和泡沫镍。图 6(a) 为不同屏蔽材料时测得的感应电动势曲线, 图 6(b) 为不同探测方向的第 50 测道的感应电动势曲线, 图中纵坐标为感应电动势, 表示每个探测方向 (沿半径方向) 的感应电动势。

多壁碳纳米管具有独特的导电性能<sup>[16-17]</sup>, 且磁导

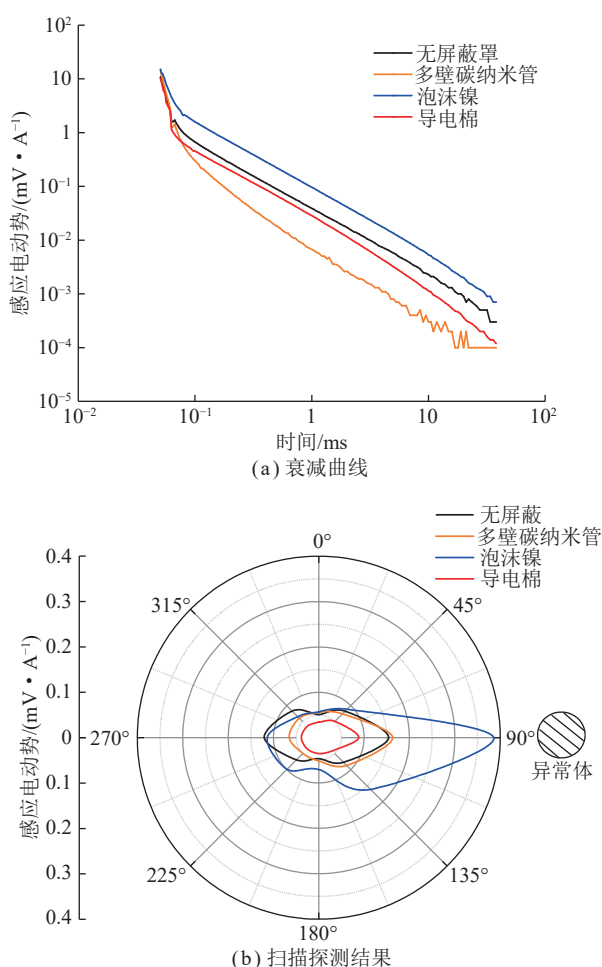


图6 不同屏蔽材料的感应电动势衰减曲线和扫描探测结果

Fig.6 Induced electromotive force attenuation curves and shielding scanning detection results of different shielding materials

率较低。对比图6可知,早期感应电动势与无屏蔽罩时大致相等,但在后期感应电动势衰减速率较无屏蔽时更大,屏蔽罩位于接收线圈和发射线圈之间,所产生的一次场被多壁碳纳米管部分吸收,在1.6 ms之后,所接受到的信号波动较大,影响观测数据质量。根据图6(b)可知,当探测方向旋转到225°~315°时,感应电动势较无屏蔽时低,尤其是270°方向的感应电动势与无屏蔽时差值最大,能屏蔽4.5%左右的信号。虽然多壁碳纳米管材料减弱了电磁场强度,但90°方向的低阻异常响应仍然能被有效接收。

当安装的屏蔽罩材料为导电棉时,其磁导率较低,而电导率较高<sup>[18]</sup>。导电棉材料主要依靠电损耗机制来达到屏蔽效果,在早期感应电动势幅值与无屏蔽罩时大致相等,在0.06 ms之后感应电动势幅值整体小于无屏蔽罩时的幅值,且对感应电动势的衰减速率不产生影响。根据扫描探测结果可知,所有方向的感应电磁场均被屏蔽,但不同方向的感应电磁场屏蔽效果

不同,探测方向屏蔽罩开口正对于90°异常体所在方向时,被屏蔽部分较少。探测方向旋转到270°时,来自其他方向的感应电磁场被无开口方向的导电棉吸收或反射,所以感应电动势幅值较小,被屏蔽部分较多,约为无屏蔽罩时感应电动势的31.2%。

由于泡沫镍属于金属材料,具有较大的相对磁导率,且由多层微小空隙的金属构成<sup>[19-20]</sup>,对收发线圈的影响较大,屏蔽罩本身在发射线圈的激励下,产生感应电磁场,响应信号整体大于无屏蔽时的信号。但是,增加泡沫镍屏蔽罩后,感应电动势衰减规律与无屏蔽罩时一致,屏蔽罩本身产生的感应电磁场并不影响对低阻异常的响应,且在晚期感应电动势变化较为均匀,数据质量更好。根据扫描探测结果可知,探测方向旋转到90°异常体所在方向时,感应电动势幅值最大,比无屏蔽材料时的感应电动势大约2.5倍,对异常的响应较为明显。探测方向旋转到其他角度时,屏蔽罩屏蔽了部分来自异常体的响应,使得感应电动势幅值与无屏蔽时大致相等。当探测方向旋转到270°方向时,其感应电动势幅值远小于90°方向,证明该屏蔽罩能有效压制来自反方向异常体的感应电磁场。

实验表明当屏蔽材料为泡沫镍时其对异常体的响应最为明显,能有效分辨出异常体所在方向。

### 3.2 定向屏蔽罩物性和几何参数

为增强屏蔽效果,对不同屏蔽罩的影响因素进行实验分析,优化屏蔽罩参数。

#### 3.2.1 定向屏蔽罩形状

对于低频磁场的屏蔽,屏蔽效果不仅与材料本身相关,还和屏蔽体的结构、形状等参数有关系。制作不同形状的屏蔽罩,对发射线圈和接收线圈分别进行屏蔽,分析讨论不同方向感应电磁场,讨论不同屏蔽罩方式的定向屏蔽效果,从而选取最佳屏蔽方案。图7分别为圆柱状、弧形屏蔽罩探测效果,低阻异常体放置于90°方向。

如图7(a)所示,无屏蔽罩时,90°和270°方向感应电动势幅值最大,受全空间效应的影响,无法分辨异常体方位。在收发线圈上安装圆柱状屏蔽罩时,感应电动势幅值整体小于无屏蔽罩时的响应,所有方向响应信号均被屏蔽,且屏蔽大小基本一致。

如图7(b)所示,在发射端安装弧形屏蔽罩,弧形屏蔽罩对每个方向的瞬变电磁场均有屏蔽作用,能屏蔽6%的瞬变电磁响应信号,但屏蔽罩对每个方向的屏蔽能力相同,依然无法分辨异常体的方位。

在接收端安装弧形屏蔽罩,屏蔽罩对0°、180°、225°、315°方向的屏蔽能力与屏蔽罩安装在发射端时



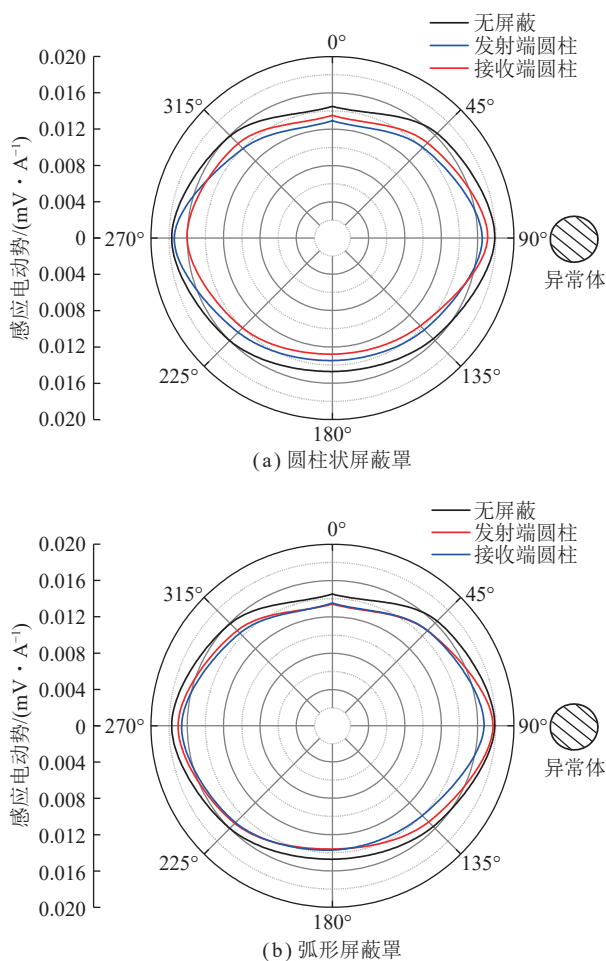


图7 圆柱状屏蔽罩和弧形屏蔽罩扫描探测结果

Fig.7 Cylindrical shield and arc shield scanning detection result

基本一致,但对于异常体所在 $90^\circ$ 方向周围屏蔽能力下降为4%,能较好的保存异常信号的响应,在 $90^\circ$ 时,屏蔽罩开口方向正对异常体,对于异常的响应屏蔽作用很小,只有1.1%,与无屏蔽时异常响应信号幅值相差不大,在 $270^\circ$ 时,接收端弧形屏蔽罩屏蔽了3.6%来自其他方向的异常响应信号。实验表明在收发线圈接收端安装弧形屏蔽罩能有效屏蔽来自其他方向的异常响应,而对于 $90^\circ$ 异常所在方向的信号能较好的进行保留。

### 3.2.2 定向屏蔽罩磁导率

选取不同磁导率的同种吸波材料进行不同磁导率屏蔽材料的实验,保持其他参数不变,将不同磁导率屏蔽材料附加在收发线圈接收端上,选取磁导率分别为 $50\mu_0$ 、 $80\mu_0$ 、 $120\mu_0$ 的屏蔽料进行实验分析( $\mu_0$ 为真空磁导率)。如图8(a)所示,屏蔽材料的磁导率与接收线圈所接收到的感应电动势并不呈明显的线性关系,高磁导率的材料对接收线圈有一定的影响,过高的材料磁导率会使得信号的失真,降低数据的质量。吸波材料磁导率为 $80\mu_0$ 时, $90^\circ$ 方向感应电动势大于

$270^\circ$ 方向感应电动势,屏蔽了9.6%的信号,且探测方向的感应电磁场能有效被接收线圈所接收,其感应电动势较大。吸波材料磁导率为 $120\mu_0$ 时,除了 $300^\circ\sim 330^\circ$ 方向感应电动势异常变大,其余方向感应电动势均小于磁导率为 $80\mu_0$ 的值,表明磁导率增大时,屏蔽效能增大,但此屏蔽罩同时屏蔽了探测方向的感应电磁场,定向屏蔽效果较差。综上所述,当磁导率为 $80\mu_0$ 时,此吸波材料的定向屏蔽效果最好。

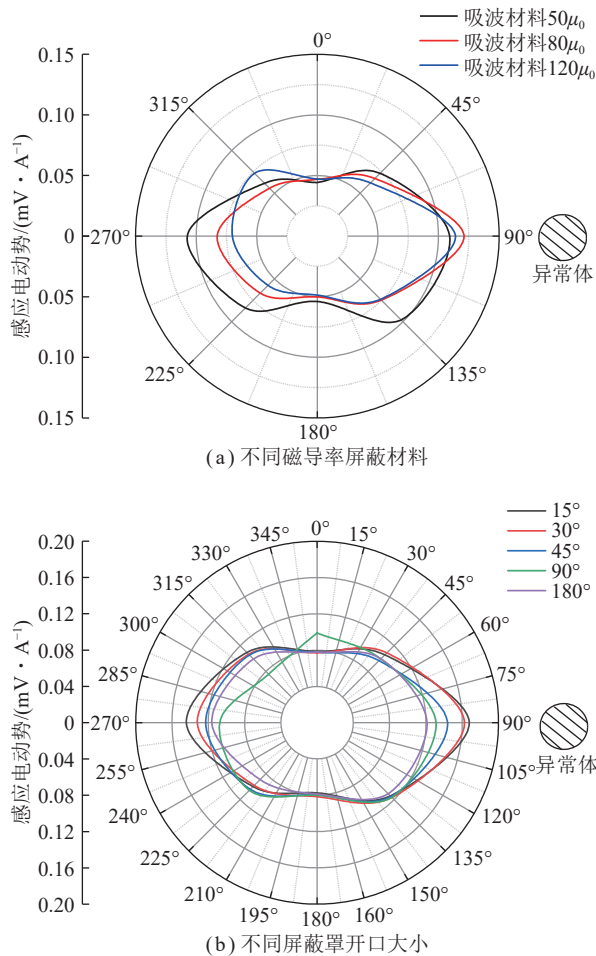


图8 不同磁导率屏蔽材料和不同屏蔽罩开口大小屏蔽扫描探测结果对比

Fig.8 Comparison of shielding scanning detection results of different permeability shielding materials and different shield opening sizes

### 3.2.3 定向屏蔽罩开口大小

当固定屏蔽罩厚度不变时,屏蔽罩开口大小与屏蔽的磁场强度有关,将弧形屏蔽罩的开口方向与收发线圈的法线方向设为一致,将其指定为探测方向,图9为开口大小为 $30^\circ$ 时的屏蔽示意。

仅改变屏蔽罩开口大小,探测结果如图8(b)所示。屏蔽罩开口为 $180^\circ$ 时,无定向屏蔽的效果。屏蔽罩开口为 $90^\circ$ 时,其感应电动势值整体较屏蔽罩开口 $180^\circ$ 时大,表明开口角度越小,屏蔽罩包裹收发线圈越紧密,

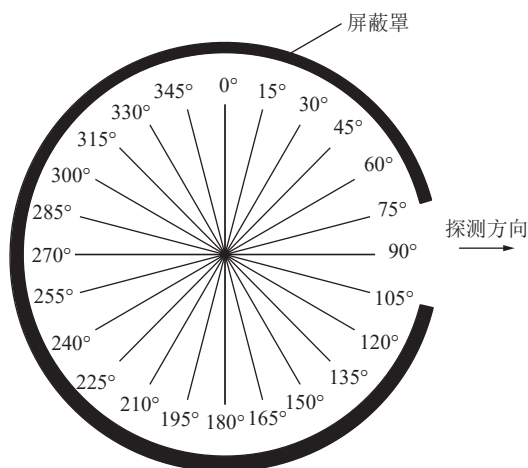


图9 屏蔽罩开口大小屏蔽示意

Fig.9 shielding cover opening size shielding schematic diagram 致使接收线圈所接收到的感应电动势增大。当屏蔽罩开口小于  $45^\circ$  时,  $90^\circ$  方向和  $270^\circ$  方向的感应电动势与  $0^\circ$  方向和  $180^\circ$  方向的感应电动势相差增大, 对异常体的响应增强。当屏蔽罩开口角度为  $45^\circ$  时, 能屏蔽 14.6% 来自其他方向的感应电磁场, 当屏蔽罩开口角度为  $30^\circ$  时, 能屏蔽 18.76% 来自其他方向的感应电磁场, 当屏蔽罩开口角度为  $15^\circ$  时, 能屏蔽 14.13% 来自其他方向的感应电磁场。综上所述, 屏蔽罩开口角度为  $30^\circ$  时定向屏蔽效果最好, 且  $90^\circ$  方向两端  $75^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $105^\circ$ 、 $120^\circ$  方向的感应电动势随着与正对异常体角度越大, 其感应电动势衰减越大。

#### 4 现场实验

选取对异常体响应较高, 安装屏蔽罩后定向屏蔽效果较好的装置进行不同位置异常体的现场实验。在地下埋入 2 个低阻异常体, 2 个异常体距钻孔均为 5 m, 将直径为 0.05 m、高 0.2 m 的低阻异常体 (异常体 1) 埋入  $90^\circ$  方向深 0.5 m 处, 将直径为 0.1 m、高 0.3 m 的低阻异常体 (异常体 2) 埋入  $0^\circ$  方向深 1.5 m 处。在接收端安装 0.2 mm 厚的泡沫镍作为屏蔽罩, 屏蔽罩开口方向与接收线圈法线方向一致, 设置为探测方向。将所述收发线圈和屏蔽罩放入 PVC 管内固定, 设置 3 个径向断面, 第 1 径向断面位于钻孔深度 0.5 m 处, 此时收发线圈中心点与  $90^\circ$  方向异常体 1 的中心点深度一致, 第 2 径向断面收发线圈中心点位于钻孔深度 1 m 处。第 3 径向断面收发线圈中心点与  $0^\circ$  方向异常体 2 的中心点深度一致, 位于钻孔深度 1.5 m 处。每隔  $15^\circ$  设置一个探测方向, 依次对每一个断面进行扫描探测。所设置的扫描探测示意如图 10 所示。

探测结果如图 11 所示, 第 1 径向断面整体感应电动势幅值最小, 第 3 径向断面的整体感应电动势幅值大于其他径向断面。第 1 径向断面主要受来自  $90^\circ$

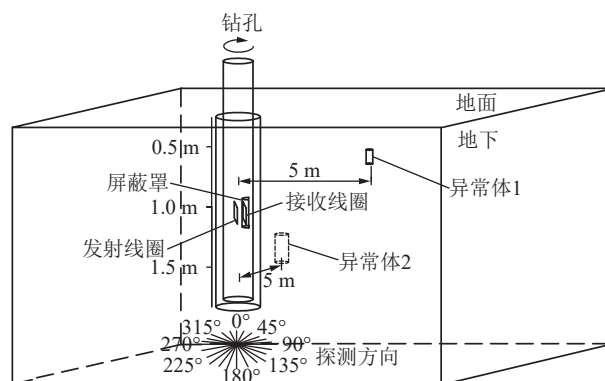


图10 2个异常体扫描探测示意

Fig.10 Two abnormal body scanning detection diagram

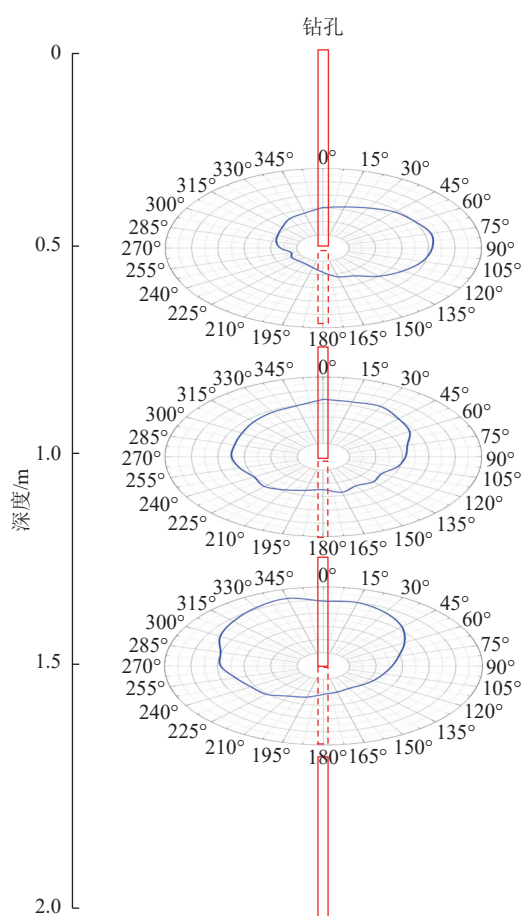


图11 2个异常体扫描探测结果

Fig.11 Two abnormal body scanning detection result

方向的异常体 1 影响, 因异常体 1 体积小, 所以其感应电动势较小。第 2 径向断面同时受来自埋深 0.5 m 处  $90^\circ$  方向的异常体 1 和来自埋深 1.5 m 处  $0^\circ$  方向的异常体 2 影响, 所以其感应电动势大于第 1 径向断面。第 3 径向断面离异常体 2 最近, 因异常体 2 体积大, 异常的响应最高, 其感应电动势也越大。收发线圈中点位于钻孔深 0.5 m 处时,  $90^\circ$  方向周围的感应电动势幅值大于  $270^\circ$  周围, 且随着离异常体  $90^\circ$  方向夹角变大, 感应电动势逐渐减小, 根据感应电动势, 能有效辨



别异常体所在方向。当收发线圈移动到钻孔 1 m 深处,因同时受到 2 个异常体的影响,其屏蔽效果较差,但可看出 0°范围感应电动势明显大于 90°范围,表明接收线圈受到体积大的异常体的影响更大。当收发线圈中点移动到钻孔 1.5 m 深处,0°范围感应电动势大于其他方向,表明屏蔽装置能有效屏蔽来自其他方向的信号,证明在接收端安装了屏蔽罩的重叠回线通过钻孔瞬变电磁法扫描探测能有效对异常体进行较准确定位。

选取代表时间为 0.069 ~ 5.926 ms 的第 15~100 测道的数据进行归一化处理,消除实测数据与数值模型电流、匝数等不一致所带来的影响。采用基于混合分布的混沌量子粒子群和 Levenberg-Marquardt、Occam 组合算法的反演方法进行电阻率成像,设置粒子数为 200,最大迭代次数为 50,最小拟合误差为  $10^{-5}$ ,进行不同方向的混沌量子粒子群一维反演,并以一维反演的电阻率设置 2.5D 反演搜索空间,进一步进行 LMO 组合算法反演<sup>[21]</sup>。图 12 为反演计算的不同深度的 3 个径向电阻率断面。

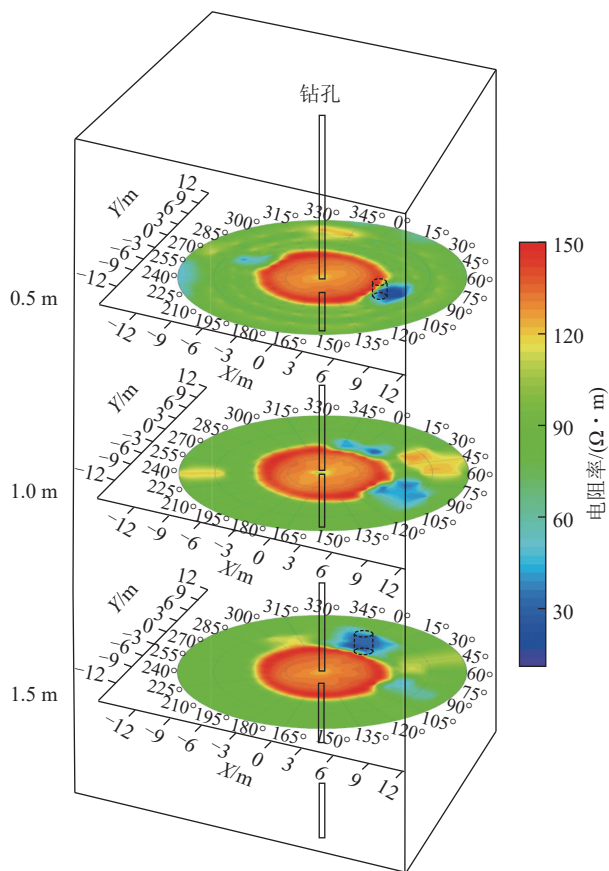


图 12 2 个异常体扫描探测反演电阻率断面

Fig.12 Two abnormal body scanning detection inversion resistivity profile

由图 12 可以看出,3 个径向断面区域内存在相对低阻区域,能有效探测出异常体实际所在方向。第 1

径向断面对应钻孔深度 0.5 m 处,由图 12 可看出钻孔周围 3 m 以内电阻率较高,在 90°方向 4.5 ~ 6.5 m 处存在 1 个相对极低阻区域,与模型实际小低阻异 1 放置位置对应。270°方向受全空间效应影响,但屏蔽罩屏蔽了来自其他方向的部分响应信号,所以此区域的假异常并不明显。第 2 径向断面对应钻孔深度 1 m 处,在该断面的径向范围并无异常体放置,但仍然受到 0.5 m 处的异常体 1 和 1.5 m 处的异常体 2 影响,在图中 345°~15°方向的 3 ~ 5 m、75°~105°方向的 6 ~ 9 m 均表现出相对低阻异常。第 3 径向断面对应钻孔深度 1.5 m 处,可明显看出 0°方向 3 ~ 6 m 处存在极低阻异常区域,与实际模型放置在钻孔深度 1.5 m 处的异常体 2 位置相互对应。90°方向 6 ~ 9 m 处受 0.5 m 处的异常影响,存在相对低阻异常区域,但随着与异常距离的增大,其响应不明显。综上所述,在重叠回线装置接收端安装 0.2 mm 厚的泡沫镍制作成的屏蔽罩,能有效屏蔽其他方向的异常响应,保留探测方向的异常响应信号,并通过钻孔瞬变电磁扫描探测反演成像对低阻异常体区域进行划分,能有效分辨不同异常体的方位,实现对异常体的较准确定位。

## 5 结 论

(1) 屏蔽效果的影响因素不仅与材料本身相关,还和屏蔽罩的结构、大小有关。屏蔽罩材料为磁性材料时,对接收信号的影响较大,其中泡沫镍材料所制作的屏蔽罩有利于定向屏蔽,既能有效探测到异常体所在方向,又能压制其他方向的干扰信号。

(2) 无开口的全封闭形屏蔽罩屏蔽能力强于有开口的屏蔽罩,但达不到定向屏蔽要求。屏蔽罩选用开口大小为 30°的弧形屏蔽罩时屏蔽效果较好,不同方向感应电动势随着屏蔽罩开口方向与异常体方向夹角增大而减小。屏蔽罩的磁导率越大,屏蔽效能越高,但对于定向屏蔽,其过大的磁导率会降低探测方向的异常响应信号。

(3) 扫描探测实验结果表明,受屏蔽罩的定向屏蔽作用,接收线圈主要接收来自探测方向的异常体响应信号,对其他方向的异常响应信号进行有效压制,实现对异常体的较准确定位。

(4) 扫描探测过程中为增强屏蔽罩开口的探测方向感应信号,下一步应考虑屏蔽收发线圈之间的互感信号和环境电磁干扰信号的压制,提高采集数据信噪比,实现钻孔孔壁外围隐蔽地质异常体精准定位。

## 参考文献(References):

- [1] 武强,崔芳鹏,赵苏启,等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J].

- 煤炭学报, 2013, 38(4): 561–565.
- WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(4): 561–565.
- [2] 程建远, 陆自清, 蒋必辞, 等. 煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 404–412.
- CHENG Jianyuan, LU Ziqing, JIANG Bici, et al. A novel technology of “long excavation/long detection” for rapid excavation in coal mine roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 404–412.
- [3] 程久龙, 李飞, 彭苏萍, 等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1742–1750.
- CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1742–1750.
- [4] 薛国强, 李海, 陈卫营, 等. 煤矿含水体瞬变电磁探测技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 77–85.
- XUE Guoqiang, LI Hai, CHEN Weiying, et al. Progress of transient electromagnetic detection technology for water-bearing bodies in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 77–85.
- [5] WANG B, LIU S D, LI S N, et al. Double-transmitting and Sextuple-receiving borehole transient electromagnetic method and experimental study[J]. *Earth Sciences Research Journal*, 2017, 21(2): 77–83.
- [6] 范涛. 基于钻孔瞬变电磁的煤层气压裂效果检测方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3195–3207.
- FAN Tao. Coalbed methane fracturing effectiveness test using borehole transient electromagnetic method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3195–3207.
- [7] 汪凯斌. 矿井瞬变电磁法感应探头的研制及其应用[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(3): 336–342.
- WANG Kaibin. Research of mining induction probe of TEM detection system[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2013, 33(3): 336–342.
- [8] 席振铎, 龙霞, 周胜, 等. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3428–3435.
- XI Zhenzhu, LONG Xia, ZHOU Sheng, et al. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(9): 3428–3435.
- [9] 王雷生, 程久龙, 徐忠忠. 矿井瞬变电磁法接收端单向屏蔽[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 9962–9967.
- WANG Leisheng, CHENG Jiulong, XU Zhongzhong. One-way magnetic shielding at the receiver of mine transient electromagnetic method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(23): 9962–9967.
- [10] 程久龙, 董毅, 温来福等. 一种基于电磁感应原理的孔中扫描探测装置: CN201921066317. X[P]. 2020–01–21.
- [11] GEETHA S, SATHEESH KUMAR K K, RAO C R K, et al. EMI shielding: Methods and materials—A review[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112(4): 2073–2086.
- [12] 王定华, 赵家升. 电磁兼容原理与设计[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995: 142–150.
- [13] 黄晓莉, 武高辉, 张强, 等. 开孔泡沫 Fe-Ni 的电磁屏蔽性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(4): 731–734.
- HUANG Xiaoli, WU Gaohui, ZHANG Qiang, et al. Electromagnetic shielding properties of open-pore Fe-Ni foams[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(4): 731–734.
- [14] SALVATORE Celozzi, RODOLFO Araneo, GIAMPIERO Lovat. 电磁屏蔽原理与应用[M]. 郎为民, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009: 120–131.
- [15] 姜志海, 焦险峰. 矿井瞬变电磁超前探测物理实验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1852–1857.
- JIANG Zhihai, JIAO Xianfeng. Physical experiment of mine transient electromagnetic advanced detection[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(11): 1852–1857.
- [16] EBBESEN T W, LEZEC H J, HIURA H, et al. Electrical conductivity of individual carbon nanotubes[J]. *Nature*, 1996, 382: 54–56.
- [17] KAUSAR A, AHMAD S, SALMAN S M. Effectiveness of polystyrene/carbon nanotube composite in electromagnetic interference shielding materials: A review[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2017, 56(10): 1027–1042.
- [18] JAGATHEESAN K, RAMASAMY A, DAS A, et al. Electromagnetic shielding behaviour of conductive filler composites and conductive fabrics—A review[J]. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 2014, 39(3): 329–342.
- [19] HE J, YE H. Measurement and analysis of low frequency magnetic shielding performance of open-cell nickel foam[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 394: 032122.
- [20] FANG Y, LI X L, SHENG M J, et al. Nickel foam encapsulated phase change composites with outstanding electromagnetic interference shielding and thermal management capability[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 160: 107056.
- [21] 程久龙, 焦俊俊, 陈志, 等. 钻孔瞬变电磁法扫描探测 RCQPSO-LMO 组合算法 2.5D 反演[J]. 地球物理学报, 2024, 67(2): 781–792.
- CHENG Jiulong, JIAO Junjun, CHEN Zhi, et al. 2.5D inversion of borehole transient electromagnetic method with scanning detection based on RCQPSO-LMO combined algorithm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(2): 781–792.