

巷道激电三维超前探测技术正演研究

吕玉增^{1,2}, 赵荣春¹, 韦柳柳¹, 吴玉玲¹, 戴咸毅¹

(1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对超前探测技术是巷道掘进的关键技术问题, 利用三维有限元数值模拟技术实现了巷道三维复杂条件下激电观测异常场的快速正演。在三维正演基础上, 分析计算了巷道本身、巷道掘进工作面及旁侧异常体等对巷道底板激电探测的影响规律, 利用最小二乘拟合法导出了校正巷道空腔影响的近似公式。研究结果表明: 近似校正公式能较好地拟合巷道本身的影响, 校正结果与正演模拟结果拟合误差小于3%, 可用于实测数据的巷道影响校正; 对于巷道掘进超前探测, 与电阻率异常相比, 三极法探测的视极化率异常具更好的超前探测效果; 对于底板和侧帮的探测, 三极法探测主要反映测线所在面外侧的地电信息。

关键词: 巷道掘进; 超前探测; 三维有限元; 激发极化; 正演模拟

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)04-0160-07

Study on forward modeling of tunnel IP 3D advanced detection technology

Lyu Yuzeng^{1,2}, Zhao Rongchun¹, Wei Liuye¹, Wu Yuling¹, Dai Xianyi¹

(1. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004; 2. Engineering Research Center of Exploration for Hidden Non-ferrous and Precious Metal Deposits of Ministry of Education, Guilin 541004)

Abstract: Aiming at the key technology of tunnel advance detection, fast forward modeling on 3D complex conditions of tunnels was realized by 3D finite element numerical simulation technique. Based on 3D fast forward modeling and program, this paper analysed and calculated the influence laws of tunnel itself and lateral abnormal bodies on induced polarization (IP) detection of tunnel floor. The least squares fitting formula was applied to deduce the approximate correcting formula which could correct the inference of super high resistivity of the tunnel itself. Results of research showed that the approximate correcting formula had a good fitting effect on the influences of tunnel itself, the fitting error was less than 3%, and could be used for actual tunnel influence correction. For tunnel front advanced detection, compared to the abnormal of resistivity, apparent polarization abnormal gained by three electrode method has better effects of advanced detection. For advanced detection of tunnel floor and side wall, three electrode method is usually applied to reflect geo-electric information on the outer direction of the line surface.

Key words: tunnel excavation; advanced detection; 3D finite element; induced polarization; forward modeling

0 引言

目前我国大多数矿山已进入中、晚开采期, 许多矿种已查明的资源储量和可供能力日趋下降, 浅表矿区资源面临枯竭, 资源勘探向立体、纵深方向发展^[1-2]。在地下工程施工过程中, 若工作面前方、巷道四周附近存在断层、溶洞、陷落柱等不良

地质体时, 如不提前探测, 就可能导致灾难性事故^[3-5]。因此, 研究巷道超前探测方法和技术, 进行准确的灾害预报, 在煤田、矿山、隧道、地下工程建设等方面有着广阔的应用前景^[6-7]。近年来, 国内外对坑道、巷道探测技术一直非常重视, 特别是针对巷道的超前预报, 研究出基于直流电阻率法、多频激电法、瞬变电磁法、无线电波透视法、地质

收稿日期: 2016-12-12; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.04.028

基金项目: “十二五”国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2012YQ030126); 广西自然科学基金资助项目(2013GXNSFBA019212); 广西高校科学技术研究重点资助项目(2013ZD029); 有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心资助项目(2015GCZX002)

作者简介: 吕玉增(1978—), 男, 河北邢台人, 副教授, 博士。Tel: 13788562104, E-mail: lyz@glut.edu.cn

引用格式: 吕玉增, 赵荣春, 韦柳柳, 等. 巷道激电三维超前探测技术正演研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 160-166, 210.

Lyu Yuzeng, Zhao Rongchun, Wei Liuye et al. Study on forward modeling of tunnel IP 3D advanced detection technology[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 160-166, 210.

雷达法、地震波反射法、瑞雷波法和红外测温法等方法的超前预报方法,研制出了专用仪器^[8-12]。这些仪器和方法为探测和预报井下、巷道地质灾害做出了重大贡献^[13-14]。

通过长期的认知,地下水、金属矿体、断裂破碎带等探测目标与其周围的围岩存在着明显的电性差异,通常表现为低阻、高极化等特征,这为运用激发极化法探测这些目标异常体奠定了物理基础^[15]。目前,国内外学者在地面、井中等三维激电正反演方面取得了很大进展,基本实现了地面和井中激电的三维反演的实用化^[16-19]。但是,现有的巷道激电探测方式基本沿用地表剖面法的探测形式,对于巷道掘进工作面超前探测,则主要是采用直流电阻率定点源三极法进行观测,当探测巷道顶、底板及侧方时,则常采用高密度电法中的偶极-偶极、温纳等排列^[20],对数据的解释沿用地面半空间或全空间的解释技术和软件,并假定在巷道周围无干扰体且忽略巷道本身对场的影响的理想状态下^[21],但这些假定通常是不成立的,巷道本身及其周围的地质体往往会影响观测,如果忽略这些影响,超前预报就会出现误判,而这种失误通常是致命的^[22]。

针对巷道三维探测的特殊环境,笔者采用基于巷道为中心的三维放射状全空间四面体网格剖分技术,运用异常电位法实现巷道三维激电探测有限元高精度正演,分析讨论了巷道本身、巷道旁侧异常体等对观测电场的影响规律,探索巷道底板、侧方激电超前探测的合理观测方式。

1 巷道三维点源场有限单元法

1.1 边值和变分问题

三维地电断面点电源异常电位的边值问题可归纳为^[23]

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla u) = -\nabla \cdot (\sigma' \nabla u_0) \in \Omega \\ \partial u / \partial n = 0 \in \Gamma_s \\ \partial u / \partial n + u \cdot \cos(r, \mathbf{n}) / r = 0 \in \Gamma_\infty \end{cases} \quad (1)$$

其中: ∇ 为哈密顿算子; σ 为介质的电导率; u_0 为正常电位; u 为异常电位; σ' 为异常电导率; Ω 为三维区域; Γ_s 为区域 Ω 的地面边界; Γ_∞ 为区域的地下边界; $\mathbf{n}$ 为边界的外法向方向; r 是测点至电源点的距离。

于是有式(1)等价的变分问题为^[24]

$$\begin{cases} F(u) = \int_{\Omega} [1/2 \sigma (\nabla u)^2 - \sigma' \nabla u_0 \cdot \nabla u] d\Omega + \\ \int_{\Gamma_\infty} \left[\frac{1}{2} \sigma \cdot \cos(r, \mathbf{n}) \cdot u^2 / r + \sigma' \cdot \cos(r, \mathbf{n}) \cdot u_0 u / r \right] d\Gamma \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对于巷道观测而言,巷道空腔本身电阻率为无穷大、无极化率,如果用一个很大的数来表示巷道空腔的电阻率,那么就可以把巷道当作一个高阻异常体对待,这样正常场计算就可直接用全空间的点电源场解析公式计算,实现异常电位法正演计算。对于巷道空腔部分,则有

$$\begin{cases} \sigma \rightarrow 0 \\ \sigma' = \sigma - \sigma_0 = -\sigma_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, σ_0 为源所在处的电导率。将式(3)代入式(2)可得巷道空腔部分的变分方程^[24]为

$$\begin{cases} F(u) = \int_{\Omega} (\sigma_0 \nabla u_0 \cdot \nabla u) d\Omega - \int_{\Gamma_\infty} [\sigma_0 \cdot \\ \cos(r, \mathbf{n}) \cdot u_0 u / r] d\Gamma \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

1.2 单元分析和电场求解

将方程式(1)中对区域 Ω 和边界 Γ_∞ 的积分分解为对各四面体单元 e 和边界 Γ_e 的积分之和。分别对(2)式、(4)式的各项单元进行积分后,将其积分结果相加,扩展成由全体节点组成的矩阵可得

$$\begin{aligned} \bar{F}_e(u) &= \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T (\mathbf{K}_{1e} + \mathbf{K}_{2e}) \mathbf{u}_e + \mathbf{u}_e^T (\mathbf{K}'_{2e} - \mathbf{K}'_{1e}) \mathbf{u}_{0e} \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}_e + \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}'_e \mathbf{u}_{0e} = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{K}}_e \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{K}}'_e \mathbf{u}_0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\tilde{F}_e(u) = \mathbf{u}_e^T (\mathbf{K}'_{2e} - \mathbf{K}'_{1e}) \mathbf{u}_{0e} = \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}'_e \mathbf{u}_{0e} = \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{K}}'_e \mathbf{u}_0 \quad (6)$$

其中: $\mathbf{K}_e = \mathbf{K}_{1e} + \mathbf{K}_{2e}$, $\mathbf{K}'_e = \mathbf{K}'_{2e} - \mathbf{K}'_{1e}$, $\mathbf{K}_{1e}$ 、 $\mathbf{K}'_{1e}$ 是与节点坐标相关的系数, $\mathbf{K}_{2e}$ 、 $\mathbf{K}'_{2e}$ 是与四面体单元在 Γ_∞ 上的三角面积相关的系数矩阵^[25]; $\mathbf{u}$ 与 $\mathbf{u}_0$ 分别是全体节点异常电位 u 点与正常电位 u_0 点组成的列向量; $\bar{\mathbf{K}}_e$ 与 $\bar{\mathbf{K}}'_e$ 分别是 $\mathbf{K}_e$ 与 $\mathbf{K}'_e$ 的扩展矩阵, $\bar{F}_e(u)$ 和 $\tilde{F}_e(u)$ 是由四面体单元中相应系数组成的大型矩阵。

由全部单元的 $\bar{F}_e(u)$ 、 $\tilde{F}_e(u)$ 相加,得

$$\bar{F}(u) = \sum \bar{F}_e(u) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \sum \bar{\mathbf{K}}_e \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \sum \bar{\mathbf{K}}'_e \mathbf{u}_0 =$$

$$\frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} + \mathbf{u}^T \mathbf{K}' \mathbf{u}_0 \quad (7)$$

$$\tilde{F}(u) = \sum \tilde{F}_e(u) = \mathbf{u}^T \sum \bar{\mathbf{K}}_e' \mathbf{u}_0 = \mathbf{u}^T \mathbf{K}' \mathbf{u}_0 \quad (8)$$

分别令式(7)、式(8)的变分为0,并合成到全体单元网格节点,得线性方程组为

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = -\mathbf{K}' \mathbf{u}_0 \quad (9)$$

其中 $\mathbf{K} = \sum \bar{\mathbf{K}}_e$ 、 $\mathbf{K}' = \sum \bar{\mathbf{K}}_e'$ 是总体系数矩阵。

解方程组(9),可得到巷道各节点的异常电位,异常电位 u 和正常电位 u_0 相加得到总电位 V 进而计算视电阻率。按照 Seigel 理论,等效电阻率 ρ^* 与真电阻率 ρ 之间的关系为

$$\rho^* = \rho / (1 - \eta) \quad (10)$$

视极化率的计算公式为

$$\eta_s = (\Delta U_z - \Delta U_1) / \Delta U_z \times 100\% = \Delta U_2 / \Delta U_z \times 100\% \quad (11)$$

其中: ΔU_z 为观测总电位差; ΔU_1 为无激电效应的一次电位差; ΔU_2 为二次电位差。

2 巷道对点源场的影响

为了解巷道空腔对视电阻率观测的影响,设计巷道模型如图1所示。以巷道轴线中点为直角坐标 xoy 系原点,巷道走向沿 x 轴方向;测线布设与巷道轴线平行,根据测线在巷道壁周围相对位置不同分为面测线和角测线,其中面测线位于巷道顶板、侧面或底板上,角测线位于两巷道面交线上。

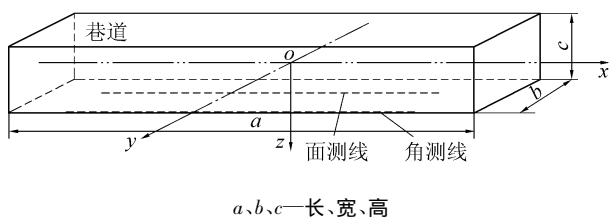


图1 巷道模型及测线布设示意

Fig. 1 Sketch of tunnel survey lines

将巷道观测环境看作是全空间情况,并按照全空间正常场的计算方法,采用点电源二极法观测对其分别讨论。

2.1 不同测线的巷道空腔影响

模型参数:巷道无限长,宽 $b=4\text{ m}$ 、高 $c=4\text{ m}$;巷道周围为均匀介质,电阻率为 $\rho_0=1\ \Omega \cdot \text{m}$;巷道空腔电阻率为无穷大,有限元计算时取为 $1 \times 10^{12}\ \Omega \cdot \text{m}$ 。以巷道底板为例,共布设3条测线分别计算巷道空腔对单点源视电阻率的影响,3条测线分别为:位于

巷道底板与侧面交线的底角测线($y=2$)、巷道面测线($y=1$)和位于巷道底板中线的底板面测线($y=0$)。图2为点电源场面测线和角测线 $\tau-r$ 曲线(其中, $\tau = \rho_s / \rho_0$, ρ_s 视电阻率),面测线点源坐标分别为 $(0, 0, 2)$ 、 $(0, 1, 2)$,角测线点源位于巷道侧帮与底板交线中点,坐标为 $(0, 2, 2)$,极距 r 为相应测线上观测点到电源点的距离。

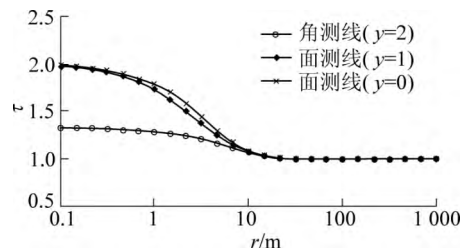


图2 不同测线巷道点源场观测 $\tau-r$ 曲线

Fig. 2 Curves of $\tau-r$ with different survey lines by point source powered in tunnel

对比点源场不同测线二极排列 $\tau-r$ 曲线,巷道空腔对点源场影响的主要特征。

1) 由于巷道本身对电流的排斥作用,电源点附近观测电位大于无巷道影响的正常电位, $\tau > 1$,巷道空腔对观测电位表现为正影响;远离电源点观测电位趋于无巷道空腔影响相同介质点源场电位值, $\tau \rightarrow 1$ 。

2) 巷道空腔影响与测线相对位置有关,不同测线受巷道空腔影响程度不同,巷道面测线受空腔影响大,角测线受空腔影响相对较小。

3) 巷道面上不同位置面测线($y=1, 2$) $\tau-r$ 曲线形态相似,仅在曲线下降段有微小差异,影响规律基本相同。

4) 对于点源场,不同测线 $\tau-r$ 曲线变化趋势相同,曲线由首支下降段和尾支水平渐近线两部分组成。首支 τ 趋于定值(面测线 $\tau \rightarrow 2$ 、角测线 $\tau \rightarrow 4/3$) 随着极距 r 的增大 τ 逐渐减小,曲线缓慢下降;当 $r > 20\text{ m}$ (约为巷道宽度 b 的5倍) 时, $\tau-r$ 曲线趋于一条直线, $\tau \rightarrow 1$ 。

综合分析,巷道空腔对视电阻率的影响取决于测线布设情况,面测线和角测线受空腔影响程度不同,取决于电源点相对于巷道面所张立体角的大小。由于巷道视电阻率计算采用统一的全空间装置系数,则:

1) 对于测线在巷道底板、侧方等面上布设时(面测线),当极距较小时,观测的电场应该是近似半空间情况,因此换算得到的视电阻率值是2倍围

岩电阻率,但随着极距的逐渐变大,巷道本身的影响逐渐减小,观测电场逐渐与全空间的情况类似,因此大极距($r \geq 5b$)用全空间的装置系数计算视电阻率是合适的。

2) 对于测线沿巷道角布设时(角测线),巷道对电源点所张的立体角为 3π (全空间是 4π),因此小极距时,观测的视电阻率是围岩电阻率的 $4/3$,随着极距增大($r \geq 5b$),逐渐与全空间的情况类似,视电阻率接近围岩电阻率。可见,对于巷道视电阻率观测,巷道本身对不同极距的观测影响不同,而用统一的全空间装置系数计算视电阻率带来一些假异常,假异常主要集中在极距小于 5 倍巷道大小的观测点上。

2.2 巷道大小对观测视电阻率的影响

以单点源面测线(底板中线)观测为例,分析巷道空腔影响与巷道大小的关系。为不失一般性,假定巷道宽度 b 和高度 c 相等,测线位于巷道底板中心线上,其他模型电性参数与第 2.1 节中模型相同。2 m×2 m、4 m×4 m、6 m×6 m、8 m×8 m、10 m×10 m 五种截面尺寸巷道空腔对单点源场影响的 $\tau-r$ 曲线如图 3 所示。

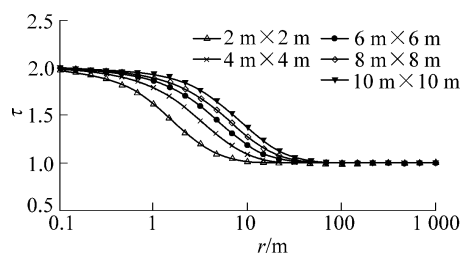


图 3 不同截面巷道点源场 $\tau-r$ 曲线

Fig. 3 Curves of $\tau-r$ with different size of tunnel

图 3 表明,空腔影响与巷道截面大小关系密切,曲线形态特征表现为:①不同大小截面巷道 $\tau-r$ 曲线形态相似,曲线初段 $\tau \rightarrow 2$;②曲线中段($1 < x < 5b$)随着极距 r 增大, τ 逐渐由 2 逐渐减小到 1,不同尺寸巷道曲线下落速度不同,巷道截面越大曲线下落速度越慢;③不同截面的巷道,当 $r > 5b$ 时, $\tau \rightarrow 1$,曲线为水平直线。

2.3 巷道空腔影响的校正公式

由于巷道本身不会引起极化率的假异常,因此观测视极化率数据不需要进行校正,但巷道对视电阻率影响与观测极距 r 、巷道宽度 b 及测线位置等因素有关,主要影响极距小于 5 倍巷道宽度的小极距($r < 5b$)观测视电阻率,应予以校正。

为寻求一种简单的函数来拟合巷道对小极距视电阻率观测曲线的影响,并进行近似校正。考虑到巷道对视电阻率的影响是随极距增大而衰减的特征,构造以 e 为底的指数函数 $k(r, b) = \alpha e^{-\beta r} + \gamma$,使用该函数对各条曲线进行最小二乘法拟合,确定函数待定系数并给出经验公式。

对于单点源场二极法观测,巷道空腔影响函数 $k(r, b)$ 的经验公式为

$$\alpha = 1 \quad \gamma = 1 \quad \beta = \begin{cases} 1/(2x) & x \geq b/2 \\ 1/[2(b-x)] & x < b/2 \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \quad \gamma = 1 \quad \beta = 1/(2b) \quad (\text{角测线})$$

因此,对于一般的巷道底板中心测线(面测线)和角测线情况, $k(r, b)$ 公式退化为

$$\begin{cases} k(r, b) = e^{-\frac{r}{b}} + 1 & (\text{面测线}) \\ k(r, b) = \frac{1}{3}e^{-\frac{r}{2b}} + 1 & (\text{巷道角测线}) \end{cases} \quad (11)$$

不同巷道截面单点源巷道底板中心面测线观测时巷道影响的拟合曲线如图 4 所示,巷道角测线的拟合曲线如图 5 所示,其中实线为对应拟合函数 $k(r, b)$ 曲线,点线为围岩为 $1 \Omega \cdot m$ 对应巷道 $\tau-r$ 观测曲线。图 4 中 5 条不同巷道的拟合曲线最大拟合误差为 1.88%,平均误差为 0.45%;图 5 角测线观测拟合曲线最大拟合误差为 2.87%,平均误差为 0.57%。

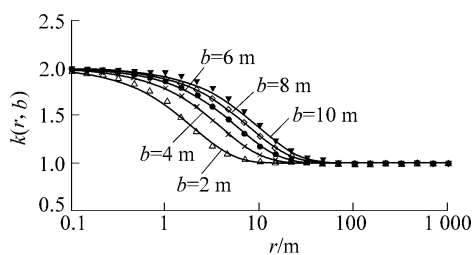


图 4 点源不同截面巷道面测线影响的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves between empirical formula and numerical simulation method on tunnel face survey line

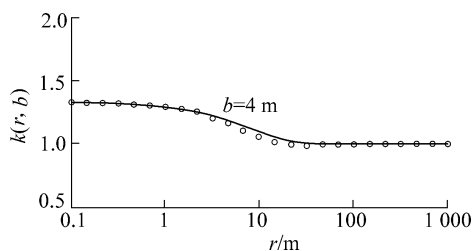


图 5 点源巷道角测线影响的曲线拟合

Fig. 5 Fitting curve between empirical formula and numerical simulation method on tunnel corner survey line

对于三极、对称四极等其他装置的观测影响,利用其与二极装置的换算关系,可应用式(11)对巷道实测数据进行巷道影响的近似校正。同样,根据场的对称关系,巷道本身对底板的影响和校正关系同样适用于巷道侧帮的勘探。

3 不同位置异常体对巷道超前探测的影响

在煤层巷道底板、侧方和掘进工作面进行超前勘探时,通常会受到不同位置异常体的影响,为考察不同位置异常体对巷道观测的影响,寻找其规律性,下面将对不同位置异常体进行模拟计算。

3.1 巷道掘进工作面前方低阻异常体的响应特征

建立有限元模型,巷道断面为正方形(边长 $d=4\text{ m}$),围岩电阻率 $\rho_0=1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$,极化率为 0,巷道空腔电阻率取 $1\times 10^{12}\ \Omega\cdot\text{m}$,供电电极点 A 位于巷道底板中线上,测量电极间距 $MN=2\text{ m}$,从掘进工作面开始,间隔 2 m 布设 1 个电极。假定异常体位于掘进工作面正前方,至掘进工作距离 $D=8\text{ m}$,电阻率为 $10\ \Omega\cdot\text{m}$,极化率 20%;异常体大小为 $4\text{ m}\times 8\text{ m}\times 4\text{ m}$,如图 6 所示,下面计算三极法超前探测的探测曲线。

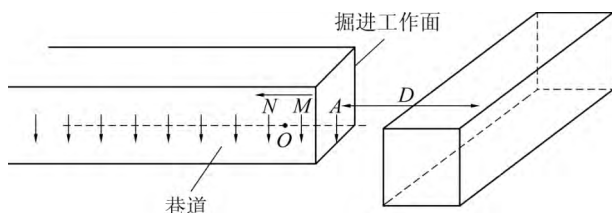


图 6 巷道掘进工作面超前探测模型示意

Fig. 6 Model sketch of the tunnel frontal advanced detection

以巷道掘进工作面为 x 轴的原点位置,掘进工作面前方为正,后方为负,三极观测的记录点为 MN 的中点,供电点在 x 轴上的坐标为 x_A ,图 7a、图 7b 分别为上述模型的视电阻率 ρ_s 和视极化率 η_s 计算结果,分析曲线的特征可知:

1) 视电阻率异常:观测得到的视电阻率异常是巷道本身和前方异常体的综合影响,在极距 AO 较小时,巷道本身的影响大,而异常体引起的异常小,曲线特征上几乎掩盖了前方异常体的影响,但观测的视电阻率值比无异常体时小。分析巷道三极法超前探测的原理,发现对于巷道掘进工作面的前方探测,观测的目的异常来源于异常体本身产生的二次场,而二次场本身是越接近异常体、二次场越强。那么,从观测的角度就是越靠近掘进工作面观测值越

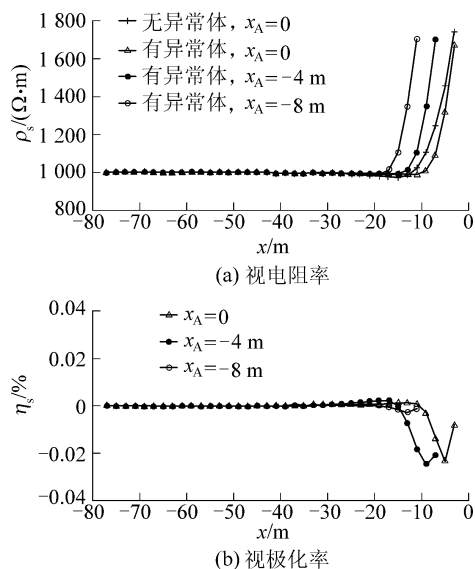


图 7 巷道掘进面工作超前探测结果

Fig. 7 Results on tunnel frontal advanced detection

异常,而恰恰在掘进工作面附近的观测正是小极距观测,巷道本身影响大,常掩盖了有用异常;而当观测电极远离掘进工作面的时候,也就远离了掘进工作面前方的探测的目标异常体,观测的异常也逐渐减弱,因此大极距观测也无法获得很好的异常观测效果。

2) 视极化率异常。巷道空腔本身没有极化率,不会引起视极化率异常,因此观测的视极化率异常是极化异常体的反应。巷道三极法由于布极方向与掘进工作面超前探测方向相反,因此对于掘进工作面前方的低阻高极化异常体,视极化率异常为较小的负极化率异常。随着供电点远离掘进工作面,视极化率异常幅值变小。

3) 在巷道底板布设电极排列,巷道掘进工作面对观测的影响是非常有限的。即利用巷道底板三极法进行巷道掘进工作面的超前探测效果不佳,主要是巷道本身的影响和观测系统本身所致。

3.2 巷道底板及侧方超前探测的异常响应

分别设计 2 种模型,如图 8 所示:①异常体位于巷道底板正下方,距离底板 $H=4\text{ m}$;②异常体位于巷道侧帮外侧,距离侧帮 $H=4\text{ m}$ 。以巷道掘进工作面为坐标 x 为 0 点,掘进工作面前方为正,后方为负,异常体中心在测线上的投影为 $x=-40\text{ m}$ 点,测线布置于底板中线上,异常体大小为 $4\text{ m}\times 8\text{ m}\times 4\text{ m}$ 。围岩电阻率为 $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$,极化率为 0,巷道空腔电

阻率取值 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$, 测量电极间距 $MN=2 \text{ m}$, 低阻高极化异常体电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$, 极化率 20%, 采用三极法超前探测计算结果。

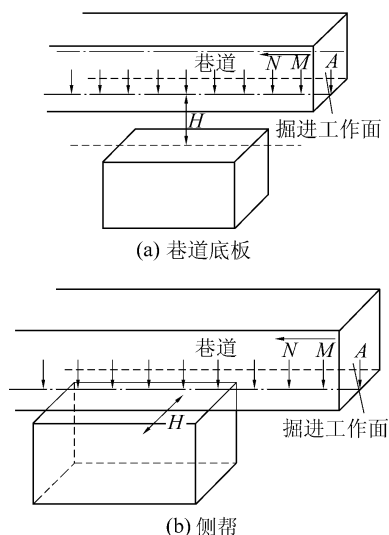


图 8 超前探测计算模型示意

Fig. 8 Model sketch for tunnel roof floor and sides advanced detection

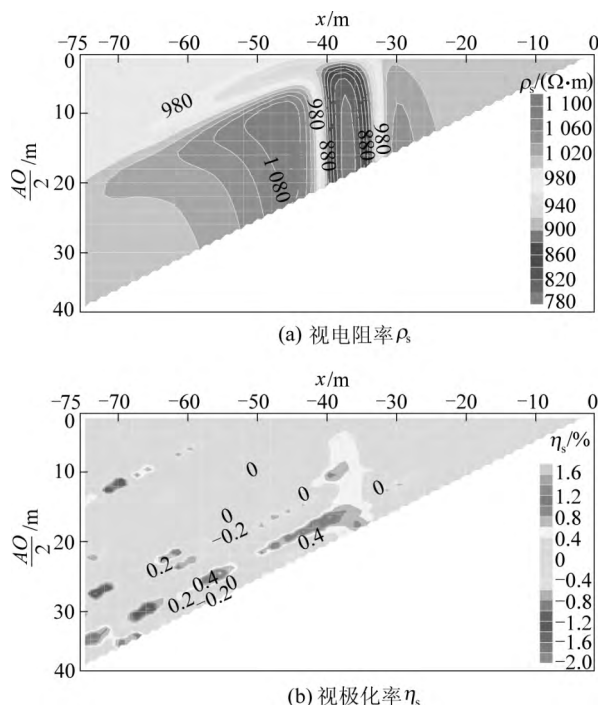


图 9 巷道底板超前探测结果

Fig. 9 Results on tunnel floor advanced detection

图 9、图 10 分别是以上 2 种情况下的三极法视电阻率和视极化率正演计算结果, 参照地面三极法的观测记录方法, 观测记录点 X 为 MN 的中点, 纵坐标以 $AO/2$ 表示, 绘制视参数拟断面图。对比异常

体位于巷道不同位置的计算结果可知:

1) 对于异常体位于底板之下或位于侧帮, 视电阻率拟断面图都很好地反映出异常体的位置, 在测线约 $x=-40 \text{ m}$ 处有明显的低阻异常出现, 其中底板探测异常体的视电阻率为 $780 \sim 860 \Omega \cdot \text{m}$, 由于受巷道本身以及测量装置的影响, 图 9a 与图 10a 中都有部分假异常, 综合比较可见相比于侧帮的探测, 底板探测所得到的效果更好。

2) 尽管巷道本身不会引起视极化率异常, 但扭曲了视极化率异常的形态, 使图 9b 与图 10b 中出现呈条带状向左下方倾斜的极化率异常, 当异常体位于底板之下时, 由图 9b 可见异常体的位置可以较清晰地反映出来, 在测线约 $x=-40 \text{ m}$ 处有明显的椭圆状高极化异常, 对于位于侧帮的异常体, 视极化率异常反映的则不够明显。

综合比较图 9 与图 10, 可以看出当测点位于底板中线时, 相比于位于侧帮的异常体, 对巷道底板之下的异常体可以获得更好的探测效果。因此, 在巷道工作面布极探测时, 需要探测巷道某方向上的异常, 就应该在该探测方向面上布设电极观测。

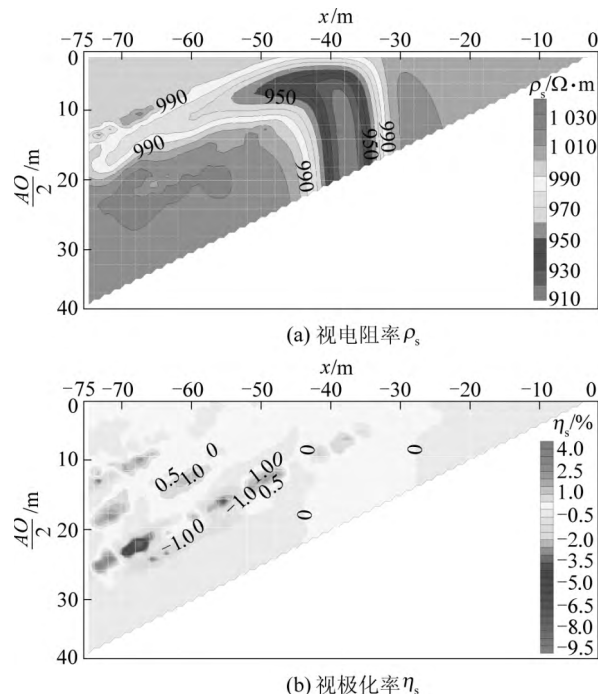


图 10 巷道侧帮超前探测结果

Fig. 10 Results on tunnel side advanced detection

3 结 论

1) 煤层巷道本身会对巷道激电观测产生很大的干扰, 本文导出的巷道空腔影响校正的经验公式,

能较好地拟合巷道本身的影响规律,可用于实测数据的巷道影响校正。

2) 巷道三极法掘进工作面超前探测由于观测方式本身还存在不足,掘进工作面超前探测对异常体的分辨率有待提高,还应探索新的探测系统及其解释技术。

3) 对于巷道底板和侧帮的探测,利用地面传统的三极法探测技术能很好地反映测线所在面外侧的地电信息,来自巷道其他方向上的影响较小;在消除巷道本身的影响后,可为后续的反演成像打下很好的基础。

参考文献(References):

- [1] 宁建国,刘学生,史新帅,等.矿井采空区水泥-煤矸石充填体结构模型研究[J].煤炭科学技术,2015,43(12):23-27.
Ning Jianguo, Liu Xuesheng, Shi Xinsui, *et al.* Study on cement-coal refuse backfill structure model of mining goaf in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 23-27.
- [2] 王智.井中激电正反演及其应用研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2015.
- [3] 杨参参,申青春,张春光,等.矿井特大型突水原因分析及防治对策[J].中州煤炭,2015(5):16-18.
Yang Cancan, Shen Qingchun, Zhang Chunguang, *et al.* Reason analysis and control measures of super-huge water inrush in mine shaft[J]. Zhongzhou Coal, 2015(5): 16-18.
- [4] 郭临明.多区域复杂条件下矿井通风系统优化研究[J].中州煤炭,2015(12):41-42.
Guo Linming. Optimization Study on Ventilation System in mines for multizone with complex conditions[J]. Zhongzhou Coal, 2015(12): 41-42.
- [5] 齐庆新,程志恒,张浪,等.近距离突出危险煤层群上保护层开采可行性分析[J].煤炭科学技术,2015,43(4):43-47.
Qi Qingxin, Cheng Zhiheng, Zhang Lang, *et al.* Analysis on feasibility of upper protective layers mining in contiguous seam with coal and gas outburst hazard[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(4): 43-47.
- [6] 张平松,吴健生.中国隧道及井巷地震波法超前探测技术研究分析[J].地球科学进展,2006,21(10):1033-1038.
Zhang Pingsong, Wu Jiansheng. Research and analysis of forward prediction technology using seismic reflection wave in tunnel and laneway in China[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(10): 1033-1038.
- [7] 毛永欣,解海军.煤矿巷道超前探测技术及应用[J].煤炭技术,2009,28(9):149-150.
Mao Yongxin, Xie Haijun. Application of advanced detection technology to mine roadway[J]. Coal Technology, 2009, 28(9): 149-150.
- [8] Andisheh A, Moradzadeh A, Naderi R, *et al.* Prediction of geological hazardous zones in front of a tunnel face using tsp-203 and artificial neural networks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 711-717.
- [9] Jiang Z H, Yue J H, Yu J C. Experiment in metal disturbance during advanced detection using a transient electromagnetic method in coal mines[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(6): 861-862.
- [10] 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, Xiao Xianfeng. Physical experiment of mine transient electromagnetic advanced detection[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1852-1857.
- [11] 刘斌,李术才,李树忱,等.隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究[J].岩土力学,2009,30(10):3093-3101.
Liu Bin, Li Shucai, Li Shuchen, *et al.* Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3093-3101.
- [12] 赵庆彪,张建公,王海桥.华北型煤田深部开采底板突水机理与区域治理关键技术[J].华北科技学院学报,2015,12(4):1-7.
Zhao Qingbiao, Zhang Jiangong, Wang Haiqiao. Mechanism of coalfield deep mining floor water burst and key technology of regional control in North China[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2015, 12(4): 1-7.
- [13] 黄俊革,王家林,阮百尧.坑道直流电阻率法超前探测研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1529-1538.
Huang Junge, Wang Jialin, Ruan Baiyao. A study on advanced detection using DC Resistivity Method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1529-1538.
- [14] Reddy I K. Three-dimensional modeling in magnetotelluric and magnetic variational sounding[J]. Geophysics, 1977, 51: 313-325.
- [15] 李长伟,熊彬,吕玉增.电法测井的三维有限元模拟[J].物探与化探,2012,36(4):585-590.
Li Changwei, Xiong Bin, Lyu Yuzeng. Three dimensional finite element modeling of electrical well logging[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 585-590.
- [16] Mogi T. Three-dimensional modeling of magnetotelluric data using finite-element method[J]. Journal of Applied Geophysics, 1996, 35: 185-189.
- [17] Zyserman F I, Santos J E. Parallel finite element algorithm with domain decomposition for three-dimensional magnetotelluric modeling[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44: 337-351.
- [18] 吴小平,徐果明,李时灿.利用不完全 Cholesky 共轭梯度法求解点源三维电场[J].地球物理学报,1998,41(6):848-855.
Wu Xiaoping, Xu Guoming, Li Shican. The calculation of three-dimensional geoelectric field of point source by incomplete Cholesky conjugate gradient method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(6): 848-855.

(下转第210页)

- [15] Bourre I M ,Artix /France D Bernard.Properties of Binary mixtures of anionic and cationic surfactants: micellization and microemulsions[J].Tenside Detergents ,1984 ,21(6) : 311-317.
- [16] Kahlwait M ,Strey R.Phase behavior of quinary systems: tracing the three-phase body [J].Phys Chem ,1987 ,91: 1553-1557.
- [17] Kahlwait M ,Strey R.Phase behavior of quinary mixtures of the type H_2O -oil-nonionic amphiphile-ionic amphiphile-salt [J].PhysChem ,1988 ,92: 1557-1563.
- [18] 郝京诚 ,郝立强 ,李干佐 ,等.阳离子表面活性剂相图和微乳液结构的电导研究 [J].山东大学学报: 自然科学版 ,1996 ,31(2) : 196-201.
- Hao Jingcheng ,Zheng Liqiang ,Li Ganzuo ,et al. A study on the phase diagram of cation surfactant and the structure of microemulsion by electrical conductivity measurement [J].Journal of Shandong University: Natural Science Edition ,1996 ,31(2) : 196-201.
- [19] 李干佐 ,郝树萱 ,李 英.阳离子表面活性剂胶束的增溶过程及微乳液相图研究 [J].山东大学学报: 自然科学版 ,1994 ,29(4) : 437-444.
- Li Ganzuo ,Hao Shuxuan ,Li Ying. A study on the solubilizing procedure of cation surfactant micelles and the phase diagram of microemulsion [J].Journal of Shandong University: Natural Science Edition ,1994 ,29(4) : 437-444.
- [20] 李 琳 ,刘炯天 ,王运来 ,等.阴-非离子表面活性剂微乳捕收剂的制备及应用 [J].煤炭学报 ,2014 ,39(11) : 2315-2320.
- Li Lin ,Liu Jiongtian ,Wang Yunlai ,et al. Preparation and application of anionic-nonionic surfactant microemulsified collector [J]. Journal of China Coal Society ,2014 ,39(11) : 2315-2320.
- [21] Aktas ,Woodbum E T. The adsorption behavior of nonionic reagents on two low rank British coals [J].Miner Engineering ,1994 ,7(9) : 1115-1126.
- FEM modeling of point source borehole-ground electrical potential measurements [J]. Chinese J Geo Phys ,2010 ,53(3) : 129-136.
- [22] 王齐仁.灾害地质体超前探测技术研究现状与思考 [J].煤田地质与勘探 ,2005 ,33(5) : 65-69.
- Wang Qiren. Research actuality and considerations on the advanced detecting technology for hazard geological body [J]. Coal Geology & Exploration ,2005 ,33(5) : 65-69.
- [23] 吕玉增.地-井、井-地 IP 三维快速正反演研究 [D].长沙: 中南大学 ,2008.
- [24] 徐世浙.地球物理中的有限单元法 [M].北京: 科学出版社 ,1994.
- [25] Mitsuata Y ,Uchida T. 3D magnetotelluric modeling using the T-finite-element method [J]. Geophysics ,2004 ,69: 108-119.
- (上接第 166 页)
- [19] 吕玉增 ,阮百尧 ,彭苏萍.地-井方位激电观测异常特征研究 [J]. 地球物理学进展 ,2012 ,27(1) : 201-216.
- Lyu Yuzeng ,Ruan Baiyao ,Peng Supeng. A study on anomaly of surface-borehole direction induced polarization survey [J]. Progress in Geophys ,2012 ,27(1) : 201-216.
- [20] 周熙襄 ,钟本善 ,严忠琼 ,等.有限单元法在直流电法勘探正问题中的应用 [J].物化探电子计算技术 ,1980(3) : 59-67.
- Zhou Xixiang ,Zhong benshan ,Yan Zhongqiong ,et al. Finite element method in the application of direct current prospecting [J]. Journal of Geophysical-Geochemical Digital Computing Technology ,1980(3) : 59-67.
- [21] 李长伟 ,阮百尧 ,吕玉增 ,等.点源场井-地电位测量三维有限元模拟 [J].地球物理学报 ,2010 ,53(3) : 129-136.
- Li Changwei ,Ruan Baiyao ,Lyu Yuzeng ,et al. Three-dimensional