

坑道大极距偶极电阻率测深异常特征

黄俊革¹, 王家林², 阮百尧³

(1. 上海应用技术学院土木建筑与安全工程学院, 上海 200235;

2. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 3. 桂林工学院, 广西桂林 541004)

摘要 本文着重计算和讨论坑道内大极距偶极-偶极测深异常特征. 首先介绍有限元模拟大极距电阻率测深时的区域剖分和坑道模型设计方法; 然后对坑道和全空间电阻率测深结果进行计算和分析. 计算结果表明, 当坑道内偶极测深的极距大于坑道截面尺寸时, 坑道角与坑道面断面异常形态差异不大; 视电阻率值只与断面和地质体间的距离有关; 坑道空腔的屏蔽效应并不明显, 坑道内各个测深断面的异常幅值和形态与全空间中观测结果非常相似.

关键词 坑道, 电阻率测深, 偶极-偶极, 有限元

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)06-1935-07

Anomalous of large polar distance dipole-dipole resistivity sounding in tunnel

HUANG Jun-ge¹, WANG Jia-lin², RUAN Bai-yao³

(1. School of Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China

2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract The anomalous character of large polar distance dipole-dipole resistivity sounding in tunnel is calculated and discussed in this paper. Firstly, division of region and design of tunnel model in modeling using FEM are introduced. Then, the sounding sections of resistivity in tunnel and full space are calculated and analyzed. The results show, when polar distance is bigger than the size of cross section of tunnel, the difference of anomalous feature between the corner-sections and wall-sections in tunnel is very small. The apparent resistivity is only related to the distance between section and bodies. The shielding effect of the tunnel is not so evident that the character and value of anomalous are similar with those in full space.

Keywords tunnel, resistivity sounding, dipole-dipole, FEM

0 引言

近年来,坑道、矿井中的安全事故频繁发生. 瓦斯爆炸、矿井塌方、坑道透水等重大事故动辄夺去数十人,甚至上百人的生命. 实施地下工程施工安全预警,防范此类重大事故的发生已刻不容缓. 在地下工程施工过程中,施工工作面的前方以及上下左右岩石,而坑道、隧道等地下施工工作面内部和顶底板的地质构造,尤其是含水导水断层、软弱层等危险构造,是导致透水、塌方事故的主要因素. 对地下介质,

尤其是施工工作面周边危险构造的精确性与定位,可及时对灾害隐患提出预警,是确保地下生产安全的重要手段. 地下危险构造与围岩间较大的电性差异,为电阻率法检测提供了良好的地球物理前提.

另外,攻深找盲是当今地球物理勘探工作者追求的共同目标. 大多数的金属矿山、煤矿所面临的资源枯竭问题日趋严重;面对埋深大、异常幅值小的隐伏矿床,地表地球物理手段鞭长莫及. 利用现有坑道资源对异常体进行近距离探测,可有效提高探测深度和分辨率. 坑道电阻率法与其他地球物理方法相

收稿日期 2007-08-10; 修回日期 2007-10-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40064001)、(40774057)和上海博士后基金资助项目(05R214143)同济大学理科发展基金联合资助.

作者简介 黄俊革,男,1966年生,湖南宁乡人,博士,教授. 2003年于中南大学信息物理工程学院获博士学位. 主要研究方向:电法勘探、地球物理数值模拟、土木工程地球物理. (E-mail: hjpg@sit.edu.cn)

比,具有勘探效率高、投入少、施工方便灵活、装置形式多样等特点,是目前采用的主要手段之一^[1~5].由于坑道内的电阻率测量受坑道空腔影响较大,且影响程度与坑道尺寸、测量装置、观测极距等因素有关,因此,对坑道周边地质体在各种电阻率装置下的异常特征分析必不可少.刘志新、岳建华、刘树才、李志聪等^[6~12]对坑道内的电阻率偶极、对称四极、三极测深的异常进行了正演模拟分析;刘煜洲等^[13]利用边界元法对坑道内壁上的电阻率剖面测量进行了计算;岳建华^[14]利用边界积分方程对巷道层状围岩介质中稳恒电流场分布规律进行研究,并采用边界元法对巷道底板的电测深进行了正演计算;刘树才等^[15]讨论了矿井三维直流电阻率法数值模拟问题.刘志新等^[16]利用三维有限元计算方法对矿井间直流电透视的若干种装置形式的电场分布进行正演模拟.岳建华等^[17]利用不同方位巷道直流三极电测深探测陷落柱位置并讨论不同方位的电测深异常特征.黄俊革等讨论了坑道超前探测的正演计算和快速反演问题^{[18][19]}.笔者针对坑道特点,提出在坑道内的4个坑道面和4个坑道角上共布设8条测线方法对坑道周边地质体进行探测,并采用有限元法对小极距情况下的偶极-偶极电阻率异常进行正演模拟,计算结果表明,在异常体断面尺寸、埋深及所用电极距与坑道截面尺寸相差不大时,由于坑道空腔无穷大电阻率的屏蔽作用,坑道面上的测深断面反映的基本是本坑道面外侧地质体的信息,其他位置的地质体没有明显反映,坑道角断面则反映的是相邻两个坑道面外侧地质体的综合信息^[20].实际工作中,小极距电阻率测深主要探查坑道周边埋藏较浅的不均匀体,在工程勘查中应用较广;以寻找隐伏矿产等为目的的坑道电阻率法,要求探测深度大,勘探范围广,所要求的电阻率测深极距较大.本文为文献^[20]的续篇,着重计算和分析大极距电阻率偶极-偶极方法对大尺寸地质体(相对于坑道截面尺寸而言)的异常特征.

1 坑道有限单元异常电位算法、单元剖分和测线布置

在电阻率法正演数值模拟的方法中,最常用的大致分为三种:有限差分法和边界单元法以及有限单元法.三种数值模拟方法在电阻率正演计算方面都有一定的优势和不足;有限差分法的优点是方法简便易算,其缺点是,当物性参数复杂分布或场域的几何特征不规则时,适应性比较差.而边界单元法的

优势是正演速度快,内存需求少,主要用于地形改正和地下少量地质体的正演模拟.有限单元法与前述方法相比,在电阻率法正演方面有独到的优势:

(1)在变分问题中,自然边界条件已经隐含地得到满足,只需考虑加强边界条件(第一类边界条件),推导过程简单.

(2)在处理复杂的几何形状时,其灵活性和适应性比其他方法要好,适用于多种介质和非均匀连续介质问题.

由于多种介质和非均匀介质是物探场域的基本特征,特别是地下坑道空腔无限大电阻率的存在,这是其他数值模拟方法难以胜任之处.

为了提高有限单元法求解三维电场的精度,采用异常电位法进行计算^[21],将全区域的积分分解为每个单元的积分,将各单元的积分相加,可以得到

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{K}'\mathbf{u}_0, \quad (1)$$

其中 \mathbf{K} 和 \mathbf{K}' 为系数矩阵, \mathbf{u} 为待求异常电位向量, \mathbf{u}_0 为正常电位向量.解方程组(1),可得各结点的异常电位 \mathbf{u} .

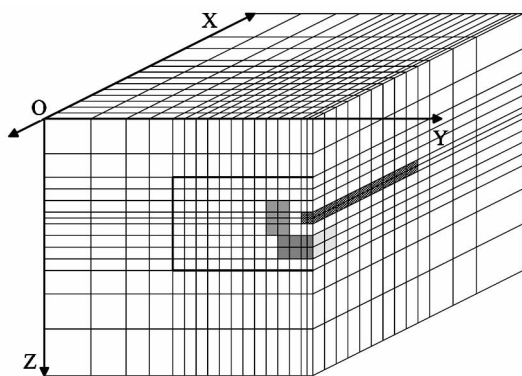


图1 区域剖分和坑道、地质体截面示意图
Fig. 1 Diagram of division of region and section of geologic body

图1为区域剖分和坑道、地质体截面示意图.图中加粗线以内的区域为异常地质体及坑道模型的覆存区域,称为目标区;除坑道所在平面内的网格外,目标区网格为均匀网格,网格单元大小为5 m.加粗线外围为边界区域,网格剖分不均以模拟无穷大边界.

坑道截面的宽度(Y方向)和高度(Z方向)均为4 m,由两个单元构成,单元格剖分宽度和高度均为2 m,长度(X方向)5 m.坑道总长度为540 m,空腔电阻率在理论上应为无穷大,在算法中用电阻率

$5 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 模拟,坑道顶部距离地表 360 m.

坑道内的电阻率测量,反映的是整个空间的综合效应,由于坑道空腔的存在,测量断面与异常地质体间相对的位置有较大不同,各个断面的视电阻率异常同样有很大区别.为了比较坑道内不同位置的异常地质体的响应,在坑道内的四个坑道面和四个坑道角上布置 8 条剖面进行观测(图 2),测线走向与坑道方向一致,坑道面测线布置于各个坑道面的中心位置,坑道角测线位于两个坑道面的交线上.

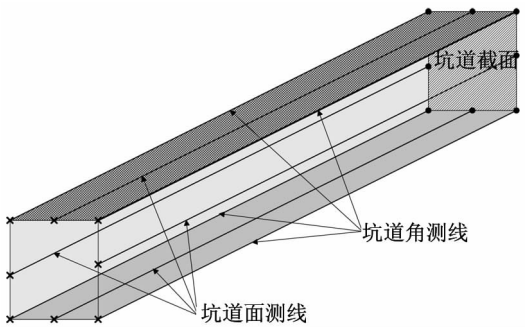


图 2 坑道及测线布置示意图

Fig. 2 Diagram of tunnel and surveying lines

2 坑道周边均匀介质的视电阻率异常

设坑道周边介质均匀,在坑道中进行直流电阻率测量时,点电源 A(+)、B(-) 供电,如果忽略地表反射面对地下电流场的影响,测量电极 MN 间的电位差为:

$$\Delta u = \frac{I\rho}{\omega} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right), \quad (1)$$

式中 I 为点电源 A 的供电电流, ρ 为坑道周边介质的电阻率, AM 、 AN 、 BM 、 BN 分别为点电源 A、B 到测量电极 M、N 的距离, ω 为空间对电源点所张的立体角,均匀半空间中 $\omega = 2\pi$,均匀全空间中 $\omega = 4\pi$.

观测视电阻率采用下式计算:

$$\rho_s = K \frac{\Delta u}{I}, \quad (2)$$

式中 Δu 为测量电极间的电位差, K 为全空间中各装置电阻率法的装置系数,

$$K = 4\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN). \quad (3)$$

在坑道周边介质均匀的情况下,视电阻率的大小只与空间对电源点所张的立体角 ω 有关.电源位于坑道面上,测量点与电源点间距离较小(相当于坑道截面大小而言)时,大地对电源点所张的立体角近似为 2π ,测量点与电源点间距离较大时,逐渐与全

空间的情况类似,大地对电源点所张的立体角近似为 4π ;因此观测视电阻率应随着极距的增大而逐渐减小.图 3 为坑道面和坑道角上偶极-偶极装置视电阻率与观测极距的关系曲线,为有限单元法模拟计算结果.图中纵坐标为视电阻率,横坐标为偶极装置的探测深度 $oo' = na$, $a = 10 \text{ m}$;介质电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,坑道宽度 4 m,高度 4 m.当极距 oo' 距离较小时(最小隔离系数 $n = 1$, oo' 为 10 m),视电阻率受坑道空腔影响较大,最大相对异常可达 11%; oo' 等于 20 m 时,视电阻率基本为围岩电阻率一致,基本不存在坑道空腔的影响.另外,坑道面与坑道角上的视电阻率值差异很小.

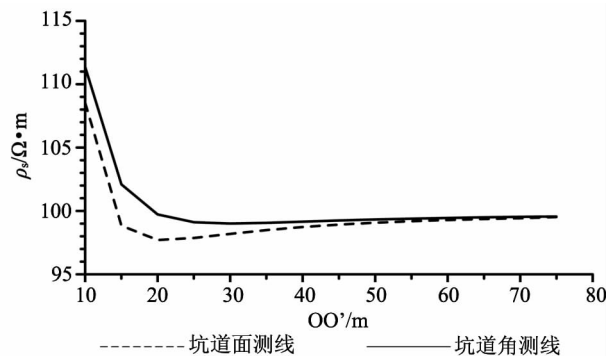


图 3 大极距偶极-偶极视电阻率与 OO' 的关系

Fig. 3 Relationship between apparent resistivity and OO' in large polar distance dipole-dipole

3 坑道大极距视电阻率异常特征

当异常体断面尺寸、埋深及所用电极距与坑道截面尺寸相差不大时,沿坑道面布置的测深断面,主要反映的是本坑道面外侧地质体信息,与其他坑道面外侧地质体的分布基本无关;沿坑道角布置的测深断面,了解的是相邻两坑道面外侧地质体的综合信息.这是文献[19]的主要结论.

当电阻率测深的观测极距大于坑道截面时,电流密度的分布与变化主要反映深部地质体的覆存情况,坑道内各个断面的异常响应与小极距电阻率断面相比有较大变化.采用偶极-偶极装置进行测量, $AB = MN = 10 \text{ m}$,点距 10 m,均大于坑道截面的边长(4 m).

算例 1:

坑道底面下方存在低阻长方体,长方体走向与坑道相同,围岩电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$,低阻体电阻率为 $5 \Omega \cdot \text{m}$,埋深 5 m,长方体大小为 $30 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times$

20 m,低阻体中心位于坑道 X 方向 865 m 处. 偶极-偶极测深的隔离系数 n 从 1 增大到 14, 剖面总长为 150 m.

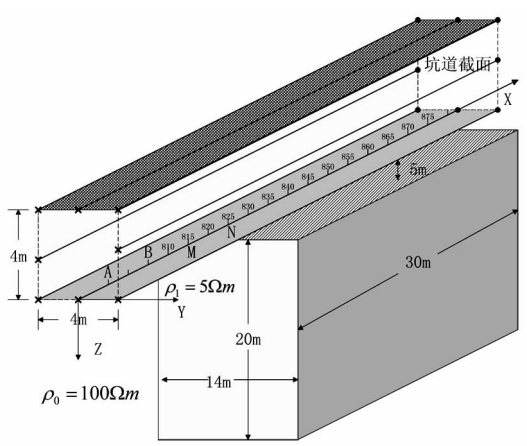


图 4 坑道内低阻体模型及测线示意图
Fig. 4 Diagram of conductive body and surveying lines in tunnel

图 5 为坑道内 4 个坑道面和 4 个坑道角剖面的测深结果. 从 8 个断面的视电阻率异常图中可以看到, 由于地质体相对于坑道走向轴线呈对称分布, 坑道左右两侧断面视电阻率异常形态完全相同. 坑道底面上的三个断面, 异常幅值最大, 尤其是坑道底面断面, 最低视电阻率只有 $41 \Omega \cdot m$. 其次为坑道两侧坑道面断面, 低阻异常幅值也达到 40% 左右; 坑道顶面上的三个视电阻率断面的异常幅值最小.

总的来说, 各个断面均可清晰反映坑道底面下方低阻体, 异常位置与低阻体所在的水平位置完全对应. 位于同一水平面上的断面, 无论断面位于坑道角还是坑道面, 其电阻率异常幅值差异较小, 形态也十分相似; 位于同一垂直平面上的断面, 无论断面位于坑道角还是坑道面, 异常幅值随着剖面与地质体距离的逐渐增加而减小.

从上述分析可知, 坑道内大极距偶极的视电阻率异常幅值和形态只与断面和异常体之间的距离有关, 换句话说, 绝缘的坑道空腔没有起到小极距测深时的屏蔽作用. 大极距的电阻率测深对坑道周边地质体的探测与坑道空腔无穷大的电阻率基本无关.

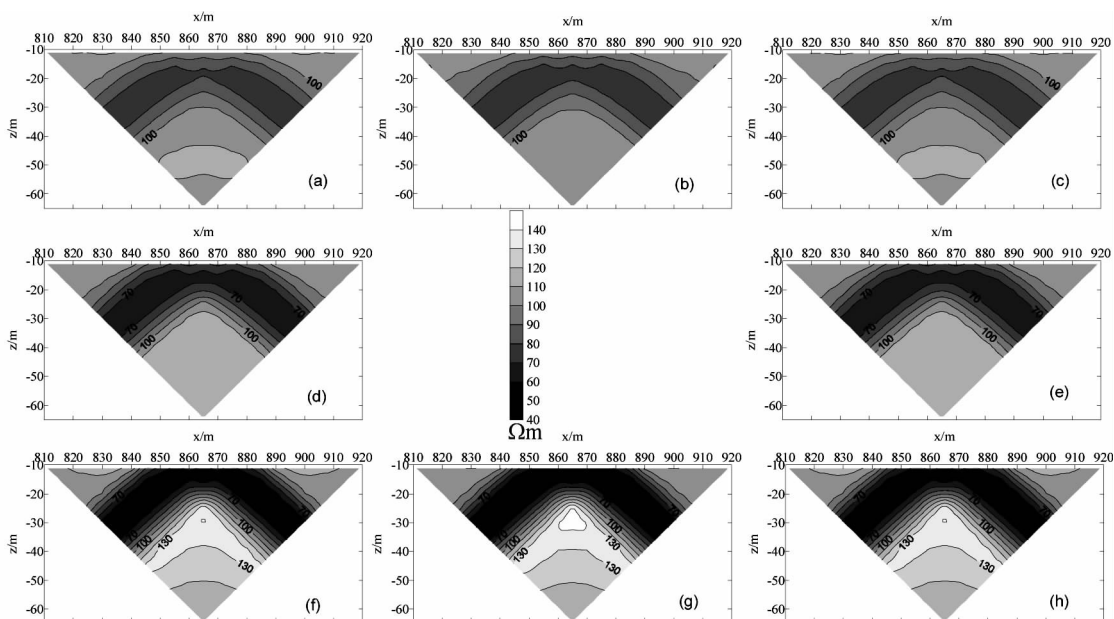


图 5 坑道内各剖面上的视电阻率断面
a. 坑道左上角断面; b. 坑道顶面断面; c. 坑道右上角断面; d. 坑道左侧面断面
e. 坑道右侧面断面; f. 坑道左下角断面; g. 坑道底面断面; h. 坑道右下角断面

Fig. 5 Sounding sections of apparent resistivity in tunnel
a. Up-left coner section; b. Top section; c. Up-right coner section;
d. left section; e. right section; f. Down-left coner section;
g. Bottom section; h. Down-right coner section

根据各个断面的异常特点可知,如果在坑道电阻率测深工作中仅仅布置一个断面,虽然可以推断地质体的水平位置,但不能依次推断地质体的空间位置,显然难以满足勘探要求.要准确推断坑道外测地质体空间分布,在坑道内的四个坑道面和坑道角上分布布设测线非常必要.根据 8 条测线的断面观测结果在异常形态、异常幅值上的差异进行整体推断,可以大大提高解释精度.

算例 2:

低阻体分布与算例 1 相同,与算例 1 不同的是坑道左侧还有一高阻长方体存在,该高阻体位于坑道 X 方向的 830 ~ 850 m 之间,高阻长方体中心与低阻体中心在 X 轴上相距 25 m.高阻体 XYZ 方向上的大小为 20 m × 15 m × 14 m,其中心与坑道左侧面测线位于同一水平面上.高阻右侧面距离坑道左侧面的垂直距离 5 m.详见图 6 所示示意图.

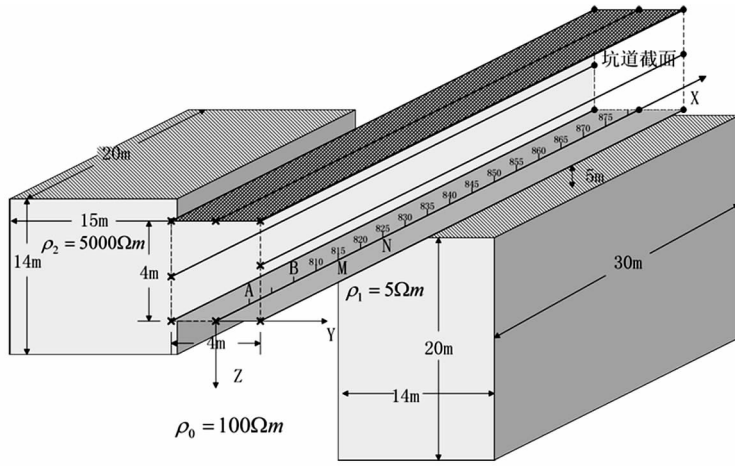


图 6 坑道内高阻体、低阻体分布示意图

Fig. 6 Diagram of resistive and conductive bodies and surveying lines in tunnel

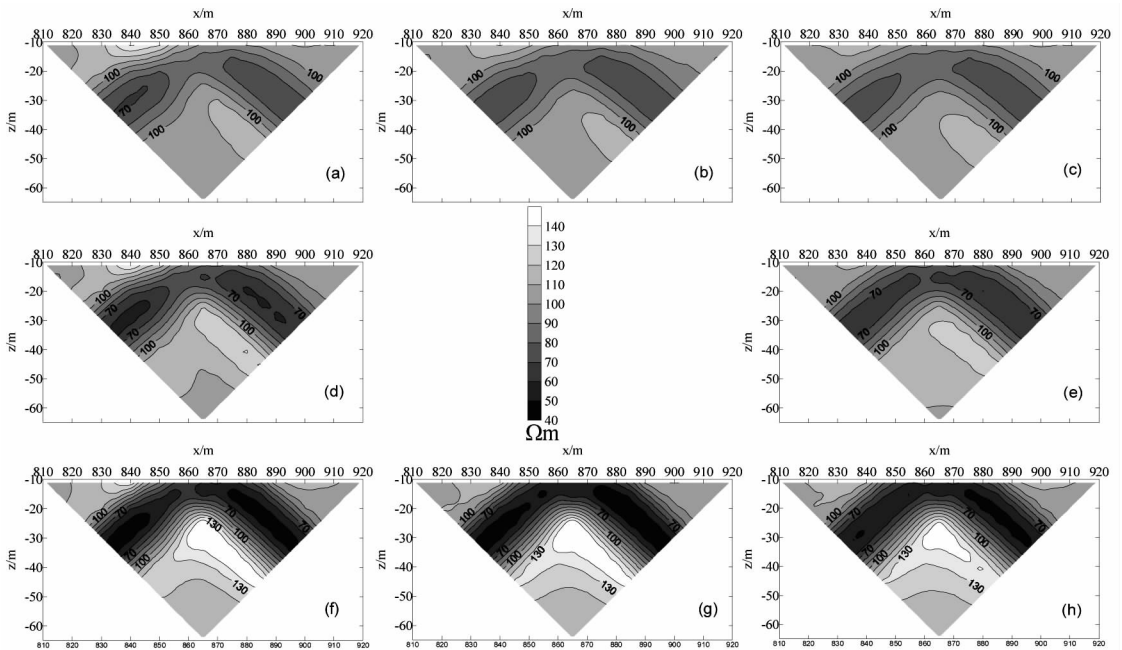


图 7 坑道内各剖面上的视电阻率断面

- a. 坑道左上角断面; b. 坑道顶面断面; c. 坑道右上角断面; d. 坑道左侧面断面;
- e. 坑道右侧面断面; f. 坑道左下角断面; g. 坑道底面断面; h. 坑道右下角断面

Fig. 7 Sounding sections of apparent resistivity in tunnel

- a. Up-left coner section; b. Top section; c. Up-right coner section;
- d. left section; e. right section; f. Down-left coner section;
- g. Bottom section; h. Down-right coner section

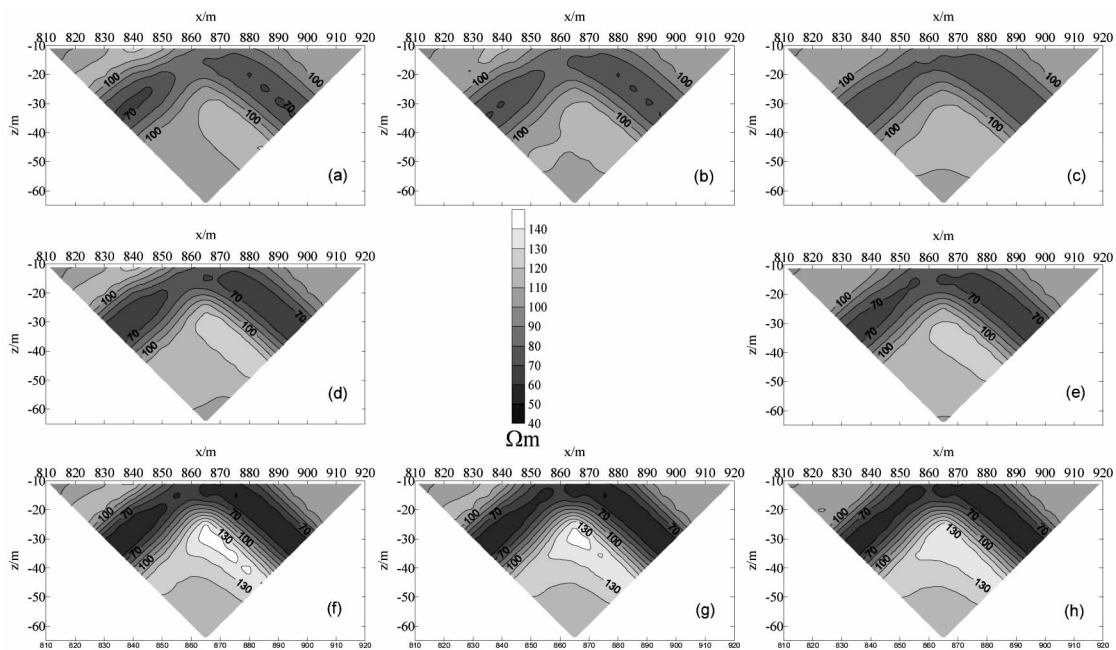


图 8 全空间中各剖面上的视电阻率断面

a. 左上角断面; b. 顶部断面; c. 右上角断面; d. 左侧面断面
e. 右侧面断面; f. 左下角断面; g. 底部断面; h. 右下角断面

Fig. 8 Sounding sections of apparent resistivity in full space

a. Up-left corner section; b. Top section; c. Up-right corner section; d. left section;
e. right section; f. Down-left corner section; g. Bottom section; h. Down-right corner section

从图 7 的各个断面中均可以看到高、低阻地质体的混合视电阻率异常响应. 高阻异常幅值由左到右逐渐减小, 低阻异常幅值由下而上逐渐减弱, 各个断面的低阻“八字形”异常由于受高阻体影响均表现为明显地不对称. 坑道左侧面上的断面(坑道左底角、坑道左面、坑道左顶角断面)上 840 m 左右的高阻异常明显, 其形态与幅值也基本相同. 由于断面和高阻地质体之间的距离不断增大, 坑道底面和顶面、坑道右侧面的视电阻率断面的高阻异常逐渐减小, 这一点与低阻异常随着断面与低阻体距离不断增加而减小的现象完全一致. 而坑道角与坑道面断面的异常形态差别很小. 算例结果同样表明, 坑道空腔对大极距电阻率测深的屏蔽效应非常小, 异常幅值只与观测装置与地质体间的距离有关. 这一现象与全空间中的电阻率异常规律非常相似.

为进一步验证这一结论, 设计全空间情况下与算例 2 同样异常体分布的模型进行计算, 观测剖面位置与极距也完全一致, 各断面计算结果见图 8. 为方便起见, 各测深断面仍采用坑道内各相应位置的断面进行命名.

比较图 7 和图 8 中各个相应位置的断面视电阻

率异常可以明显看出, 除去图 7 的偶极视电阻率断面中隔离系数 $n=1$ 时由于坑道空腔影响而使断面视电阻率有所升高的因素以外, 全空间中相应断面的视电阻率幅值和形态与坑道内断面的差异非常小, 最大相对误差仅为 2%. 而采用小极距(小于坑道截面尺寸)进行观测时, 由于坑道空腔的屏蔽作用, 坑道面和坑道角断面视电阻率异常分别反映坑道周边不同位置的异常体电性特征. 这一点, 是大极距与小极距进行电阻率测量时的主要差别.

4 结论

(1) 坑道内大极距电阻率测深正演计算结果表明, 坑道角与坑道面视电阻率断面在异常形态上的差异不大.

(2) 断面中视电阻率异常幅值只与观测剖面 and 地质体间的距离有关, 坑道空腔的屏蔽效应并不明显; 测深异常幅值与全空间中观测结果非常相似.

参 考 文 献 (References):

- [1] 徐振超, 敬荣中, 徐诗春, 畅宝兆. 用坑道直流电法圈定祁雨沟砾岩筒型金矿富集带及其产状[J]. 地质与勘探, 1994, 30(1): 49~54.

- Xu Z C, Jing R Z, Xu S C, Chang B Z. Using DC resistivity in tunnel to Determine the abundance zone and existence form in QiYuGou gravel-trunk golden mine[J]. *Geology and prospecting*(in Chinese), 1994, 30(1): 49~54.
- [2] 徐振超. 几种常规直流电法在矿山坑道中的应用[J], *矿产与地质*, 1995, 49: 337~340.
- Xu Z C. The application of DC resistivity methods in mine tunnels[J]. *Mineral Resources and Geology* (in Chinese), 1995, 49(5): 337~340
- [3] 敬荣中, 鲍光淑, 周纪. 坑道综合物探方法在生产矿山中的应用[J]. *中南工业大学学报*, 2000, 31(1): 4~8.
- Jing R Z, Bao G S, Zhou Q. The application of composite geophysical methods in mine tunnels [J]. *Journal of Central South University*(inChinese), 2000, 31(1): 4~8.
- [4] 岳建华, 李志聃. 矿井大极距偶极电剖面法及其应用[J]. *煤田地质与勘探*, 1994, 22(3): 47~50.
- Yue J H, Li Z D. Technique and application of multiple-array-spacing dipole-dipole electrical profiling in coal mine[J]. *Coal Geology and Exploration*(inChinese), 1994, 22(3): 47~50.
- [5] 岳建华, 李志聃. 矿井直流电法及在煤层底板突水探测中的应用[J]. *中国矿业大学学报*, 1997, 26(1): 94~98.
- Yue J H, Li Z D. Mine DC electrical methods and application to coal floor water invasion detecting[J]. *Journal of China University of Mining&Technology*, 1997, 26(1): 94~98.
- [6] 岳建华, 李志聃. 矿井直流电法勘探中的巷道影响[J]. *煤炭学报*, 1999, 24(1): 7~10.
- Yue J H, Li Z D. Roadway influence on electrical prospecting in underground mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(1): 7~10.
- [7] Koichi S, Eiji N, Masayuki M, *et al.* Naoyuki yamada. Estimation of the zone of excavation disturbance around tunnels, using resistivity and acoustic tomography[J]. *Exploration Geophysics*, 2004, 35: 62~69.
- [8] 岳建华, 李志聃. 巷道空间对矿井电测深曲线影响的模型实验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 1993, 21(2): 56~59.
- Yue J H, Li Z D. A study of model and experience of roadway influence on DC sounding in mine tunnel[J]. *Coal Geology and Exploration*(inChinese), 1993, 21(2): 56~59.
- [9] 刘志新, 岳建华, 刘树才. 矿井直流电透视方法技术研究[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 23(3): 6~13.
- Liu Z X, Yue J H, Liu S C. Research on the technology of mining DC electrical penetration[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2003, 23(3): 6~13.
- [10] 岳建华, 刘树才, 李志聃. 巷道顶、底板电测深曲线的自动反演解释[J]. *中国矿业大学学报*, 1995, 24(3): 62~67.
- Yue J H, Liu S C, Li Z D. Automatic iterative inverse method of drift roof&floor sounding curves[J]. *Journal of China University of Mining&Technology*, 1995, 24(3): 62~67.
- [11] 武杰, 刘树才, 刘志新, 甘会春. 应用三极断面测深技术探测井下含水构造[J]. *中国煤田地质*, 2003, 15(3): 46~48.
- Wu J, Liu S C, Liu Z X, Gan H C. Sounding technology of three-fracture used into detection water-bearing structure in mine[J]. *Coal Geology of China*, 2003, 15(3): 46~48.
- [12] 甘会春, 刘树才, 刘志新, 姜志海. 直流电法在井壁探测中的应用研究[J]. *山东煤炭科技*, 2003, 6: 35~36.
- Gan H C, Liu S C, Liu Z X, Jiang Z H. Study and application of DC resistivity method in log [J]. *ShanDong Coal Science & Technology*, 2003, 6: 35~36.
- [13] 刘煜洲, 陈福集, 寇绳武, 周晋国. 全空间中内壁点电源场电位的边界元算法及其应用[J]. *物探化探计算技术*, 1997, 19(4): 317~322.
- Liu Y Z, Chen F J, Kou S W, *et. al.* The boundary element method used for calculating the electric potential of point power supply field on the internal wall of empty cavity in 3-D space and application [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (inChinese), 1997, 19(4): 317~322.
- [14] 岳建华. 巷道层状围岩介质中稳恒电流场的边界积分分解[J]. *中国矿业大学学报*, 1998, 27(2): 128~131.
- Yue J H. Boundary integral solution of DC electric field in layered surrounding rocks of roadway [J]. *Journal of China University of Mining&Technology*, 1998, 27(2): 128~131.
- [15] 刘树才, 刘志新, 姜志海, 岳建华. 矿井直流电法三维正演计算的若干问题[J]. *物探与化探*, 2004, 28(2): 170~172.
- Liu S C, Liu Z X, Jiang Z H, Yue J H. The soil layer seismic reaction in the engineering site and the model sample analysis [J]. *Geophysical&Geochemical Exploration*, 2004, 28(2): 170~172.
- [16] 刘志新, 许新刚, 岳建华. 矿井电法三维有限元正演模拟——直流电透视方法技术研究[J]. *物探化探计算技术*, 2003, 25(4): 302~307.
- Liu Z X, Xu X G, Yue J H. 3D finite element simulation for mine DC electrical method——Research of the DC penetration method [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 25(4): 302~307.
- [17] 岳建华, 刘树才, 刘志新, 王大庆, 武杰. 巷道直流电测深在探测陷落柱中的应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(5): 479~481;
- Yue J H, Liu S C, Liu Z X, Wang D Q, Wu J. Application of roadway DC electrical sounding in detecting collapse-columns [J]. *Journal of China University of Mining&Technology*, 2003, 32(5): 479~481.
- [18] 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 J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(5): 1529~1538
- [19] 黄俊革, 阮百尧, 王家林. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 619~624.
- Huang J G, Ruan B Y, Wang J L. The fast inversion for advanced detection using DC resistivity in tunnel [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(2): 618~624.
- [20] 黄俊革, 鲍光淑, 阮百尧. 坑道直流电阻率测深异常研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 222~228.
- Huang J G, Bao G S, Ruan B Y. A study on anomalous bodies of DC resistivity sounding in tunnel [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(1): 222~228.
- [21] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 178~188.
- Xu S Z. The finite element method in geophysics [M]. (inChinese) Beijing: Science Press, 1994, 178~188.