

坑道直流聚焦超前探测电阻率法有限元数值模拟

柳建新^{1,2}, 邓小康^{1,2}, 郭荣文^{1,2}, 刘海飞^{1,2}, 童孝忠^{1,2}, 柳卓^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 通过有限元法数值计算, 对影响坑道直流聚焦法超前探测距离的主要因素及该方法的超前探测距离进行研究。模拟含水层体积变化、测量电极距变化、异常电阻率比值、坑道旁侧异常体的变化和掘进面后方坑道中的金属体对超前探测距离的影响。结果表明: 掘进面到含水层的距离、测量电极距变化和异常电阻率比值对聚焦法超前探测距离的影响不大, 当坑道后方存在金属体时对超前探测距离没有影响; 而坑道正前方目标体(含水层)的体积变化对聚焦法超前探测距离的确定影响较大, 聚焦法超前探测的有效距离为 10~11 m。

关键词: 坑道; 聚焦电流法; 有限元; 超前探测距离

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

Numerical simulation of advanced detection with DC focus resistivity in tunnel by finite element method

LIU Jian-xin^{1,2}, DENG Xiao-kang^{1,2}, GUO Rong-wen^{1,2}, LIU Hai-fei^{1,2}, TONG Xiao-zhong^{1,2}, LIU Zhuo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By finite element method, the focus of DC method detection distance influence factors and the valid detection distance were studied. The effects of the aquifer bed volume variation, the range of potential electrode, the ratio of anomalous resistivity and the metallic anomalies existing behind the tunnel face on the advanced detection distance were simulated. The results indicate that the distance between the tunnelling surface and aquifer bed, the range of potential electrode and the ratio of anomalous resistivity have a slight influence on the detection distance, meanwhile, the effect of the metallic anomalies existing behind the tunnel is not obvious. However, the detection distance can be affected greatly by the volume variation of the target (the aquifer bed) right ahead the tunnel, and effective detection range is 10–11 m.

Key words: tunnel; DC focus method; finite element method; advanced detection distance

随着我国经济的发展, 隧道工程和矿井开采的挖掘深度不断增加, 挖掘过程中坑道承担的水压也越来越大。坑道中水灾事故不断发生, 轻则造成经济损失, 重则造成重大的人员伤亡事故。所以, 在坑道掘进工作面进行超前预测预报成为目前重点研究的课题之一, 近年来有关这方面的研究成果取得了一些进展^[1-3]。目前, 国内有许多超前预报的方法, 从专业技术方面可分为常规地质法和物探法两大类。常规地质

法主要包括超前导坑、正洞地质素描和水平超前探孔, 但在运用钻探方法进行超前探测时, 由于设备笨重、工期长、效率低, 可能造成人为的突水通道, 形成新的不安全因素, 带来次生危害。物探法主要包括弹性波反射法、声波测试法、红外探水法和电阻率法^[4-7], 其中, 直流电阻率法投入少、效率高、可以测量工作面前方含水介质的视电阻率, 对分析前方水文地质状况比较有效^[8-10]。在实际施工过程中, 坑道中机电设

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174103); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAB04B08); 国家博士点基金资助项目(20110162130008); 湖南省研究生科研创新项目(CX2011B101)

收稿日期: 2011-12-01; **修订日期:** 2012-01-04

通信作者: 柳建新, 教授, 博士; 电话: 13807486248; E-mail: ljx6666@126.com

备在测量过程中很难撤出, 对测量结果会产生干扰, 所以采用正确的方法, 避免各种因素对超前探测距离的影响, 保证超前探测距离的准确性, 为坑道防治水工作提供可靠的依据是本研究重点探讨的问题。

本文作者运用直流聚焦超前探测法^[11-12]对坑道中确定超前探测距离的影响因素进行研究, 采用已成熟的轴对称二维有限单元算法和程序对各种不同的地电模型进行数值模拟。

1 直流聚焦超前探测法原理及装置

直流聚焦超前探测法的工作原理如图 1(a)所示, 由工作原理图可以看出, 在掘进工作面上设置的环状屏蔽电极环 A 形成屏蔽电场, 使供电电极 A_0 产生的电流呈放射状向隧道纵深传播得更远, 观测掘进面上测量电极环 M 的电位随掘进深度的变化情况; B 电极作为接地电极置于“无穷远”处。电极布置方式如图 1(b)所示, 命名为 $A-M-A_0$ 装置, 在 $A-M-A_0$ 装置中, 掘进面的中心设置一供电电极 A_0 , 测量电极环 M 和屏蔽电极环 A 也分别对称地分布在供电电极 A_0 的四周。

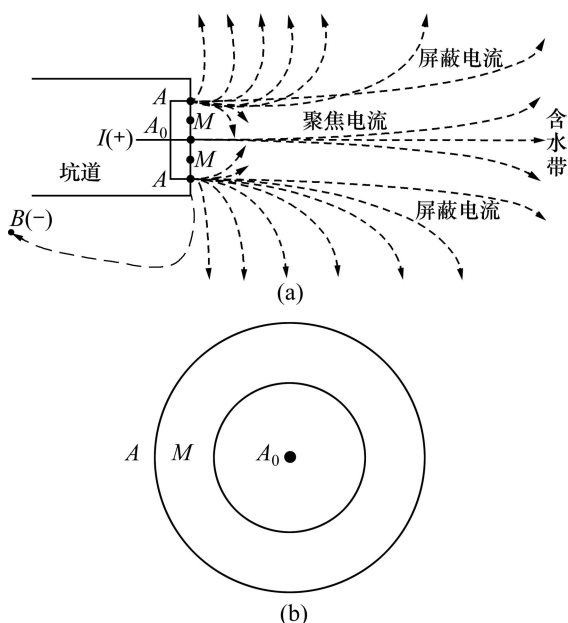


图 1 聚焦探测方法示意图(a)及 $A-M-A_0$ 装置(b)

Fig. 1 Focus detection method sketch map (a) and $A-M-A_0$ array (b)

2 坑道轴对称电性介质二维有限元数值模拟

点电源稳定电流场的电位 v 的微分方程为^[13-14]

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla v) = -2I\delta(A) \quad (1)$$

在数值模拟过程中, 为消除场源奇异性的影响, 采用异常电位有限单元法, 以提高近场源处电位的计算精度。假定坑道是水平且圆柱状的、掌子面呈圆形, 地下介质、供电和测量电极是关于坑道轴对称的。

地下点源所产生的总场电位 v 、正常电位 u_0 和异常电位 u 三者的关系如下:

$$v = u_0 + u \quad (2)$$

在柱坐标系中, 展开式(1), 得

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \sigma \frac{\partial v}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{1}{r} \sigma \frac{\partial v}{\partial \phi} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -2I\delta(r_A) \quad (3)$$

对于二维轴对称电性介质构造, 由于电位是轴对称的, 则 $\partial u / \partial \phi = 0$, 式(3)可变为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[r \sigma \frac{\partial v}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[r \sigma \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -2I\delta(r_A)r \quad (4)$$

简记为

$$\nabla \cdot (r \sigma \nabla v) = -2I\delta(r_A)r \quad (5)$$

式中: $\nabla = \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial z}$, $\mathbf{e}_r$ 和 $\mathbf{e}_z$ 分别为 r 和 z 方向上的单位向量。

当场源和介质都对称时, 式(5)就是电位在柱坐标系下满足的微分方程。但要得到偏微分方程的定解, 还必须给定所涉及问题的边界条件。

选取足够大的矩形区域, 如图 2 所示, Γ_s 表示介质与空气的接触面 af 、 ab 和 bc 及坑道轴 cd ; Γ_∞ 表示无穷远边界 de 和 ef ; Ω 表示 $abcdef$ 所包围的区域。图中 $abc'b'a'$ 为坑道空腔, 地下介质关于坑道轴 cd 对称, 即区域 Ω 与 Ω' 是以 cd 轴对称的。由于地面线和坑道轴上电流强度的法向分量为零, 因而异常电位 u 在接触面 af 、 ab 和 bc 及坑道轴 cd 上外法向分量导数为零。即

$$\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_{\Gamma_s} = 0 \quad (6)$$

假设在无穷远边界 de 和 ef 上任一点 P 处电位满足

$$u = c/R \quad (7)$$

于是有

$$\frac{\partial u}{\partial n} = -\frac{u \cos \theta}{R} \quad (8)$$

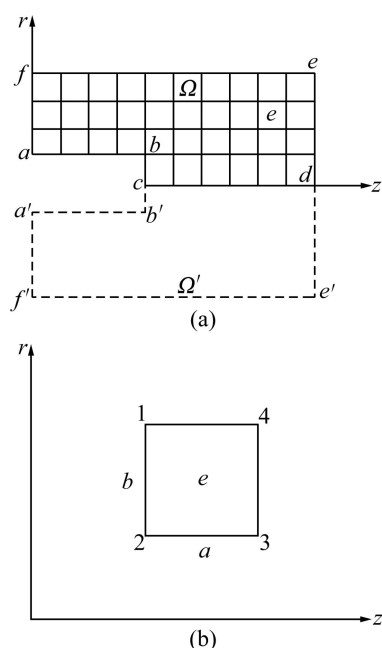


图2 区域剖分(a)及单元编号(b)示意图

Fig. 2 Schematic diagram of division of region Ω (a) and element number (b)

其中: R 为源点到边界点的矢径; θ 是边界外法线方向 n 和 R 的夹角。

将式(2)代入式(5), 得

$$\begin{aligned}\nabla \cdot (\sigma \nabla v) &= \nabla \cdot [r \sigma \nabla (u + u_0)] = \\ &= \nabla \cdot [r \sigma \nabla u + r(\sigma_0 + \sigma') \nabla u_0] = \nabla \cdot (r \sigma \nabla u) + \\ &= \nabla \cdot (r \sigma_0 \nabla u_0) + \nabla \cdot (r \sigma' \nabla u_0) = -2I \delta(r_A) r \\ \text{令} \\ \nabla \cdot (r \sigma_0 \nabla u_0) &= -2I \delta(r_A) r \\ \text{则}\end{aligned}$$

$$\nabla \cdot (r \sigma \nabla u) = -\nabla \cdot (r \sigma' \nabla u_0) \quad (9)$$

式中: σ_0 为电源所处介质的电导率; σ 表示介质的电导率; σ' 表示异常电导率: $\sigma = \sigma' + \sigma_0$ 。在柱坐标系下二维地电断面异常电位满足的边值问题为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (r \sigma \nabla u) + \nabla \cdot (r \sigma' \nabla u_0) = 0 \in \Omega \\ \partial u / \partial n = 0 \in \Gamma_s \\ \partial u / \partial n = -u \cos \theta / R^2 \in \Gamma_\infty \end{cases} \quad (10)$$

与上述边值问题等价的变分问题为

$$\begin{cases} F(u) = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} r \sigma (\nabla u)^2 + r \sigma' \nabla u_0 \nabla u \right] d\Omega + \\ \int_{\Gamma_\infty} \left[\frac{1}{2} r \sigma \frac{\cos \theta}{R} u^2 + r \sigma' \frac{\cos \theta}{R} u_0 u \right] d\Gamma \\ \delta F(u) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

选用矩形为网格剖分单元, 电位双线性插值, 电导率分块均匀。有限单元法详细计算见文献[15]。

3 直流聚焦超前探测法超前探测距离影响因素

确定隧道前方是否存在含水层和含水层到掘进面的距离是直流聚焦超前探测法研究的主要内容之一。在实际工作中, 电阻率测量允许 4%~5% 的相对均方误差; 依据误差理论可知, 只有异常幅度大于 3 倍电阻率相对均方误差时该异常才可靠, 即大于 12% 的视电阻率异常才能判定为地下异常体的反映^[16]。影响聚焦法超前探测距离的主要因素有含水层的大小、异常电阻率比值 $\mu_{21} (\mu_{21} = \rho_2 / \rho_1)$ (ρ_1 和 ρ_2 分别为含水层与围岩的电阻率值)、测量电极距、坑道旁侧异常体和掘进面后方坑道中的金属管道。

3.1 异常电阻率比值 μ_{21} 对探测距离的影响

在含水层和坑道体积不变的条件下, 研究异常电阻率比值 μ_{21} 变化对聚焦法超前探测距离的影响, 具体模型参数如图 3(a) 所示。采用 $A-M-A_0$ 装置进行观测, 极距 $A_0A=5$ m, $A_0M=3$ m, d 表示坑道掘进的尺度, V/V_0 表示归一化电位值; 分别模拟了异常电阻率比值

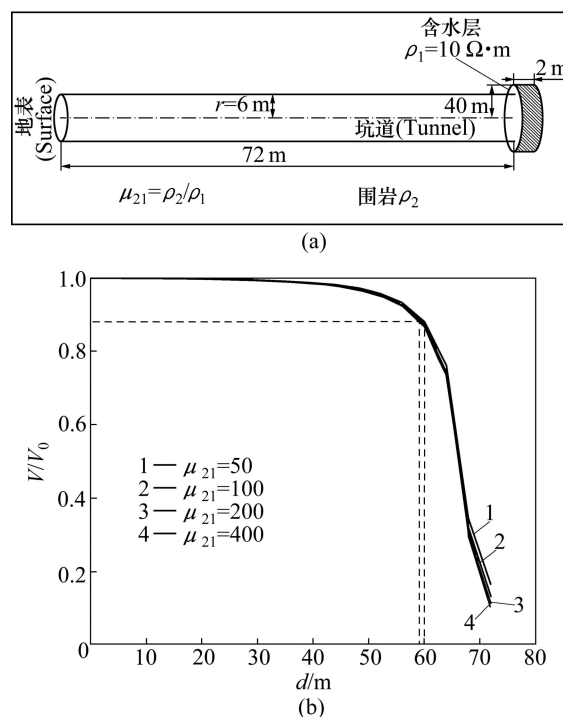


图3 异常电阻率比值 μ_{21} 对探测距离的影响: (a) 坑道模型; (b) 异常曲线图

Fig. 3 Influence of ratio of anomalous resistivity on detection distance: (a) Tunnel model; (b) Anomalous curve

μ_{21} 为 50、100、200 和 400 时的异常曲线, 如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可知, 当各条电阻率异常曲线幅值位于临界值 12% 时超前探测距离最大相差 1 m。这说明异常电阻率比值 μ_{21} 变化对聚焦法超前探测距离的影响也不大。

3.2 测量电极距变化对探测距离的影响

采用 $A-M-A_0$ 观测装置对图 4(a) 所示电模型进行模拟, 分析不同供电电极距对聚焦法超前探测距离的影响。图 4(b) 所示为不同测量电极距的模拟结果, 其中供电电极距 A_0A 固定为 5 m, 测量电极距 A_0M 从 1 m 增加到 4 m, 每次增加 1 m。从图 4 可以看出, 当各条电阻率异常曲线幅值位于临界值 12% 时超前探测距离最大相差 1 m。这说明测量电极距的大小对聚焦法超前探测距离的影响也不大。

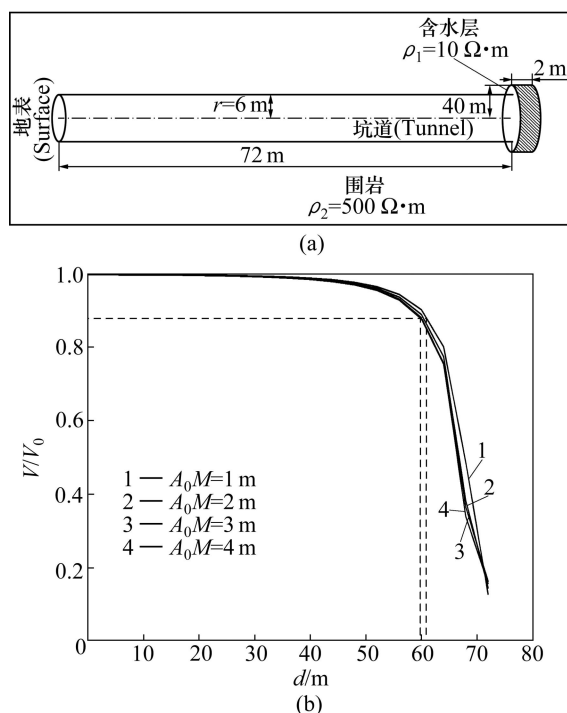


图 4 测量电极距的大小对探测距离的影响: (a) 坑道模型; (b) 异常曲线图

Fig. 4 Influence of range of potential electrode on detection distance: (a) Tunnel model; (b) Anomalous curve

3.3 坑道内金属对探测距离的影响

坑道掘进施工中掘进面附近常有大型施工机械, 且很难撤出, 这对电阻率类的探测方法影响很大。为了考察隧道内金属机械对聚焦法超前探测距离的影响, 设坑道内有一金属圆环, 在掘进面后方 6 m 的位置, 具体参数如图 5(a) 所示。采用 $A-M-A_0$ 装置进行观测, 极距 $A_0A=5$ m, $A_0M=3$ m, 分别对掘进面后方

坑道内存在金属体和不存在金属体的地电模型进行模拟计算。从图 5(b) 中可以看出, 当掘进面后方坑道内存在金属体和不存在金属体的情况下, 两者得到的异常曲线变化规律几乎一致。说明坑道后方存在金属体时对超前探测距离影响很小。

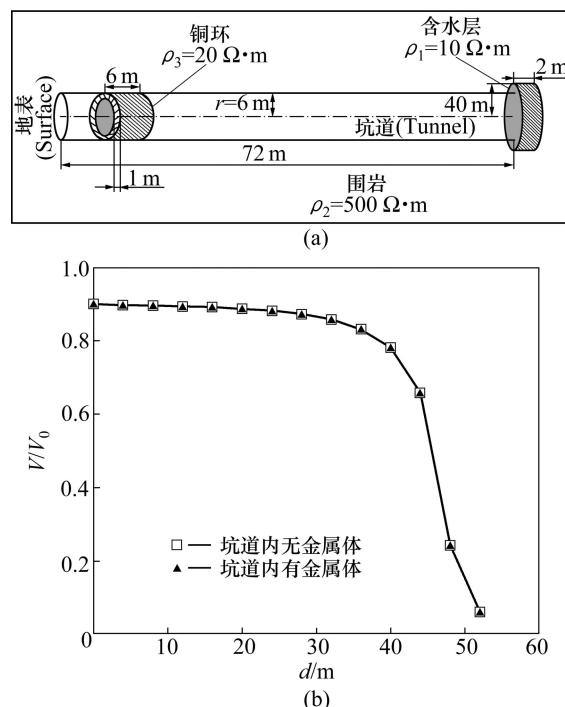


图 5 坑道内金属体对探测距离的影响: (a) 坑道模型; (b) 异常曲线图

Fig. 5 Influence of metal of body in tunnel on detection distance: (a) Tunnel model; (b) Anomalous curve

3.4 坑道旁侧异常体对探测距离的影响

假定在坑道掘进面前方 20 m 处有一圆环形旁侧异常体, 具体形状和参数如图 6(a) 所示。并假设在掘进面前方 20 m 处有一个以坑道轴为圆心的圆柱体含水层与旁侧异常体进行对比, 其半径为 2 m, 高为 2 m。采用 $A-M-A_0$ 装置进行观测, 极距 $A_0A=5$ m, $A_0M=3$ m。图 6(b) 所示为旁侧异常体到坑道壁的距离 h 分别为 1 m、2 m、3 m 和含水层位于坑道正前方时坑道旁侧异常体对探测距离的影响。图 6 表明, 当各条电阻率异常曲线幅值位于临界值 12% 时旁侧异常体异常曲线的梯度变化比较小, 而位于坑道正前方的含水层引起的异常曲线梯度变化比较大, 两者差别很明显, 可以据此判断此时产生的异常究竟是由旁侧异常体引起的还是由坑道正前方含水层引起的。

3.5 含水层体积变化对探测距离的影响

在没有旁侧异常体影响的情况下, 改变含水层圆

柱体半径的大小, 观察含水层体积变化对聚焦法超前探测距离的影响。模型各种参数和形状如图 7(a)所示

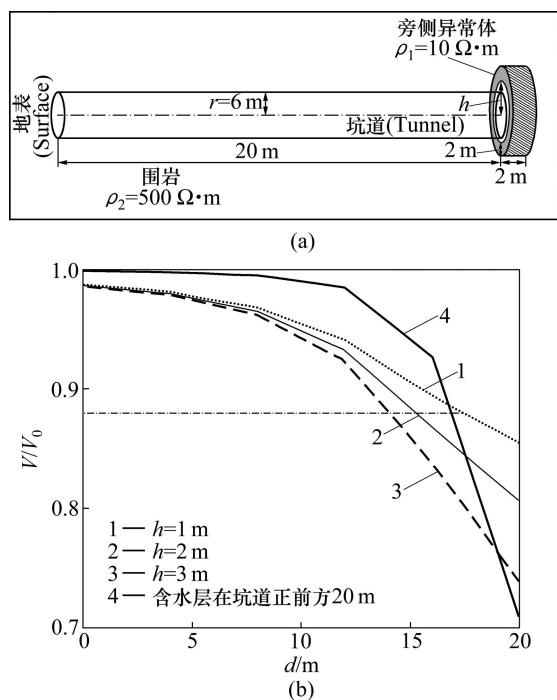


图 6 坑道旁侧异常体对探测距离的影响: (a) 坑道模型; (b) 异常曲线图

Fig. 6 Influence of side anomalous body in tunnel: (a) Tunnel model; (b) Anomalous curve

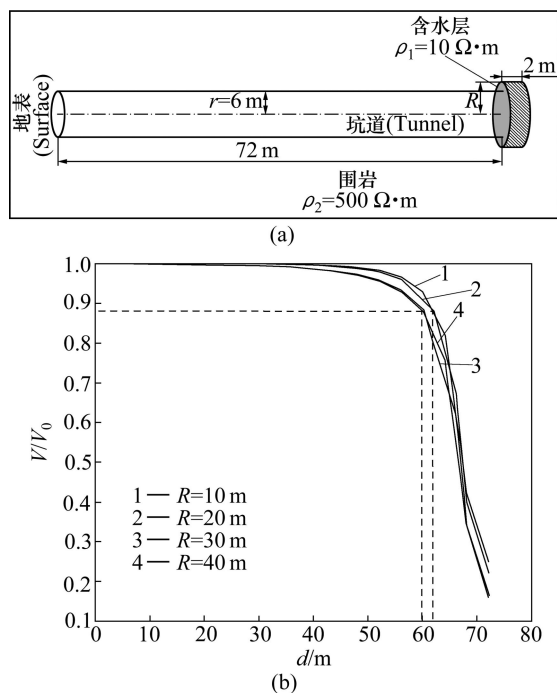


图 7 含水层体积变化对探测距离的影响: (a) 坑道模型; (b) 异常曲线图

Fig. 7 Influence of volume range of aquifer bed on detection distance: (a) Tunnel model; (b) Anomalous curve

示。采用 $A-M-A_0$ 装置进行观测, 极距 $A_0A=5$ m, $A_0M=3$ m。分别观测含水层半径 R 等于 10、20、40 和 50 m 时异常曲线的变化情况, 如图 7(b)所示。从图 7(b)中看出, 当各条电阻率异常曲线幅值位于临界值 12% 时, $R=10$ m 和 20 m 时的超前探测距离为 10 m, $R=40$ m 和 50 m 时的超前探测距离为 12 m。因为掘进面到含水层的距离、测量极距大小和异常电阻率比值对聚焦法超前探测距离的影响为 1 m, 所以, 可以认为聚焦法超前探测的距离为 10~11 m。

4 结论

1) 将归一化电位曲线上 12% 的幅值变化处作为判定前方异常的临界值, 即归一化电位异常大于 12% 的幅值变化判定为掌子面前方异常体的反映。在该临界值条件下, 掌子面到含水层的距离、测量极距大小以及异常电阻率比值对聚焦法超前探测距离的影响不大。坑道后方存在金属体时对超前探测距离没有影响。

2) 坑道正前方目标体(含水层)体积变化对聚焦法超前探测距离的确定影响较大, 聚焦法超前探测的有效距离为 10~11 m。

REFERENCES

- [1] 宋先海, 顾汉明, 肖柏勋. 我国隧道地质超前预报技术述评[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 605-613.
SONG Xian-hai, GU Han-ming, XIAO Bo-xun. Overview of tunnel geological advanced prediction in China [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 605-613.
- [2] 吕乔森, 罗学东, 任浩. 综合超前地质预报技术在穿河隧道中的应用[J]. 隧道建设, 2009, 29(2): 189-193.
LÜ Qiao-sen, LUO Xue-dong, REN Hao. Application of integrated advance geology forecast technology in a river-crossing tunnel [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(2): 189-193.
- [3] 席继红, 闫小兵, 周永胜. 快速钻探技术在岩溶隧道超前预报中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(1): 89-94.
XI Ji-hong, YAN Xiao-bing, ZHOU Yong-sheng. Application of rapid drilling technology in forecast of karst tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(1): 89-94.
- [4] 丛皖平, 张鹏, 王继矿. 多道瑞利波在矿井独头巷道超前探中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 67-69.
CONG Wan-ping, ZHANG Peng, WANG Ji-kuang. Application of multichannel rayleigh wave method on the advanced detecting technology to blinded leading [J]. Coal Geology and Exploration, 2008, 36(4): 67-69.

- [5] 陆礼训, 邓世坤, 冉 弥. 探地雷达在隧道施工超前探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(2): 201–206.
LU Li-xun, DENG Shi-kun, RAN Mi. The application of GPR in the advanced detection for tunnel excavating [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(2): 201–206.
- [6] ZHAO Yong-gui, JIANG Hui, ZHAO Xiao-peng. Tunnel seismic tomography method for geological prediction and its application [J]. Applied Geophysics: English Edition, 2006, 3(2): 69–74.
- [7] 薛国强, 李 貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 894–900.
XUE Guo-qiang, LI Xiu. The technology of TEM tunnel prediction imaging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 894–900.
- [8] 刘 斌, 李术才, 李树忱, 钟世航. 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 Shu-cai, LI Shu-zhen, ZHONG Shi-hang. Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3093–3101.
- [9] 张平松, 刘盛东, 曹 煜. 坑道掘进立体电法超前预报技术研究[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(2): 50–53.
ZHANG Ping-song, LIU Sheng-dong, CAO Yu. A study on stereo electric method advance prediction technology in tunnel excavation [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(2): 50–53.
- [10] 杨卫国, 王立华, 王力民. BEAM 法地质预报系统在中国TBM 施工中应用[J]. 辽宁技术工程大学学报, 2006, 25(增刊): 161–162.
YANG Wei-guo, WANG Li-hua, WANG li-ming. Application of BEAM method prediction of geology condition system in TBM construction [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(suppl): 161–162.
- [11] 强建科, 阮百尧, 周俊杰. 三维坑道直流聚焦法超前探测的电极组合研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 695–699.
QIANG Jian-ke, RUAN Bai-yao, ZHOU Jun-jie. Research on the array of electrodes of advanced focus detection with 3D DC resistivity in tunnel [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 695–699.
- [12] 阮百尧, 邓小康, 刘海飞, 周 丽, 张 力. 坑道直流电阻率超前聚焦探测的影响因素及最佳观测方式[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1380–1386.
RUAN Bai-yao, DENG Xiao-kang, LIU Hai-fei, ZHOU Li, ZHANG Li. The influential factor and optimum surveying method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(4): 1380–1386.
- [13] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 159–205.
XU Shi-zhe. The finite element method in geophysics [M]. Beijing: Science Press, 1994: 159–205.
- [14] 欧东新, 阮百尧. 电性轴对称分布电阻率测井的有限元法模拟[J]. 桂林工学院学报, 2002, 22(2): 123–128.
OU Dong-xin, RUAN Bai-yao. FEM simulating logging with axial-symmetric resistivity distribution [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2002, 22(2): 123–128.
- [15] 阮百尧, 邓小康, 刘海飞, 周 丽, 张 力. 坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(1): 289–296.
RUAN Bai-yao, DENG Xiao-kang, LIU Hai-fei, ZHOU Li, ZHANG Li. Research on a new method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 289–296.
- [16] 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 Jun-ge, WANG Jia-lin, RUAN Bai-yao. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1529–1538.

(编辑 龙怀中)