

文章编号: 1001-1986(2013)01-0078-04

矿井直流电法超前探中巷道影响的数值模拟

马炳镇¹, 李 貅²

- (1. 中煤科工集团西安研究院, 陕西 西安 710077;
2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 影响井下直流电法超前探测效果的因素较多, 巷道空腔对全空间电场分布的影响就是其中之一。论述了有限单元法模拟井下稳定电流场正演模型, 介绍了全空间条件下三维模型中的点源电场的边值及变分问题; 模拟在巷道内加载定点电流源, 通过巷道影响因子研究巷道空腔对全空间稳定电流场分布的影响。数值模拟结果表明, 巷道影响与巷道几何尺寸大小、供电电极布置及巷道围岩导电性有关。

关键词: 电阻率法; 三维模拟; 超前探测; 巷道影响

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2013.01.016

Roadway influences on advanced DC detection in underground mine

MA Bingzhen¹, LI Xiu²

- (1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China;
2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The paper focuses on simulating the forward modeling of steady electric currents down the hole by means of finite element method systematically. Firstly, the boundary values and variable problem of the electric field caused by a point source in 3D models of full space are given. Fixed electric point source in roadway was simulated in roadway. The influence of roadway space on the distribution of full space steady electric field was studied through influencing factors of roadway. The results of numerical simulation indicate that the roadway influences are related to the geometrical dimension of roadway, the location of current electrodes and the conductivity of surrounding rocks.

Key words: resistivity method; 3D simulation; advanced detection; roadway influences

现阶段我国煤炭的开采已经由浅层转向深层, 开采环境和条件变得更为复杂。积水老窑采空区突水、隐伏导含水地质构造等灾害的预测及处理已成为煤矿安全生产和发展亟须解决的要务^[1-2]。

目前井下直流电法超前探测已经取得了较好的探测效果^[3-4], 但是矿井条件下影响探测效果的因素较多^[5], 导致信噪比降低, 影响了探测精度^[5-9]。为了提高探测效果, 须对井下各种影响因素进行研究, 其中巷道空腔对全空间电流场分布的影响不容忽视。深入研究巷道影响规律, 对区分巷道影响的畸变异常与地质异常及消除巷道影响都具有重要意义。

对此, 笔者利用有限单元法模拟井下稳定电流场正演模型, 讨论了全空间条件下三维模型中的点源电场的边值及变分问题; 模拟在巷道内加载定点电流源, 通过巷道影响因子研究巷道空腔对全空间稳定电流场分布的影响。

1 边值及变分问题

如图 1 所示, 将点电源置于地下 A 点, 电流强度为 I , 在空间做任意闭合面 Γ , Ω 是 Γ 所围的区域, 那么, 在直角坐标系中, 构造三维电场电位 U 的边值问题可归纳为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\sigma \frac{\partial u}{\partial z}) =$$

$$-I\delta(x_A)\delta(y_A)\delta(z_A) \in \Omega$$

$$u_1 = u_2 \in \Gamma_1$$

$$\sigma_1 \frac{\partial u_1}{\partial n_1} + \sigma_2 \frac{\partial u_2}{\partial n_2} = 0 \in \Gamma_1$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} + \frac{\cos(r, n)}{r} u = 0 \in \Gamma_\infty$$

式中 Γ_1 为区域内的介质分界面; Γ_∞ 为无穷远边界; σ 为地下介质的电导率; δ 为狄拉克函数; n 为

收稿日期: 2011-12-12

作者简介: 马炳镇(1984—), 男, 宁夏固原人, 硕士, 助理工程师, 从事矿井物探研究。

边界法线方向的坐标变量; r 为源点到边界上点的向径。区域 Ω 内部的边界是自然边界条件的界面, 所以在泛函数取极值的过程中会自动满足, 不需要再考虑^[10]。

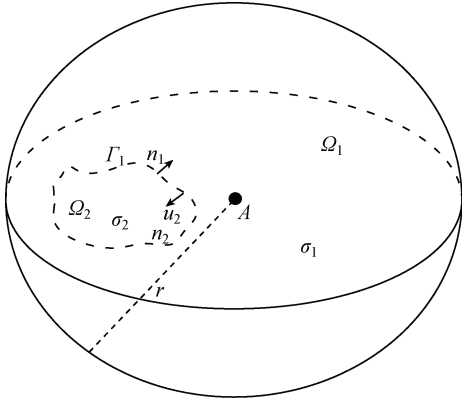


图 1 点电源边界示意图

Fig. 1 Sketch map of point source boundary

用有限单元法求解上述边值问题时, 首先要将其变换成变分问题。构造一个泛函:

$$I(u) = \int_{\Omega} [\frac{\sigma}{2} (\nabla u)^2 - I\delta(A)u] d\Omega$$

其变分为:

$$\begin{aligned} \delta I(u) &= \int_{\Omega} [\sigma \nabla u \cdot \nabla \delta u - I\delta(A)\delta u] d\Omega \\ &= \int_{\Omega} \{ \nabla \cdot (\sigma \nabla u \delta u) - [\nabla \cdot (\sigma \nabla u) + I\delta(A)\delta u] \} d\Omega \end{aligned}$$

将式(1)代入得:

$$\delta I(u) = \int_{\Omega} \nabla \cdot (\sigma \nabla u \delta u) d\Omega = \int_{\Gamma_s + \Gamma_{\infty}} \sigma \frac{\partial u}{\partial n} \delta u d\Gamma$$

将式(4)代入得:

$$\begin{aligned} \delta I(u) &= \int_{\Gamma_s + \Gamma_{\infty}} \sigma \frac{\partial u}{\partial n} \delta u d\Gamma = - \int_{\Gamma_{\infty}} \sigma \frac{\cos(r, n)}{r} u \delta u d\Gamma \\ &= - \delta \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{\infty}} \frac{\sigma \cos(r, n)}{r} u^2 d\Gamma \end{aligned}$$

移项后, 得:

$$\delta [I(u) + \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{\infty}} \frac{\sigma \cos(r, n)}{r} u^2 d\Gamma] = 0$$

所以三维电场的边值问题的等价变分问题为:

$$\begin{aligned} F(u) &= \int_{\Omega} [\frac{1}{2} \sigma (\nabla u)^2 - I\delta(A)u] d\Omega + \\ &\quad \frac{1}{2} \int_{\Gamma_{\infty}} \frac{\sigma \cos(r, n)}{r} u^2 d\Gamma \\ \delta F(u) &= 0 \end{aligned}$$

如图 2 所示, 为求解上述变分问题, 先对模型进行剖分将其离散化, 再采用四面体单元以不均匀网格来对模型进行网格划分。在电源点和异常体周围网格

划分较密, 随着距模型中心距离的增大网格逐渐稀疏, 这样既提高精度又加快了计算速度。

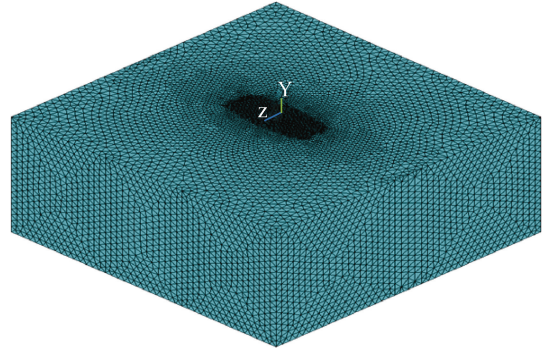


图 2 模型剖分示意图

Fig. 2 Sketch map of model grids

2 纯巷道影响下稳定电流场电位

在空间中存在横截面尺寸较小的巷道时, 其掘进面处置一点电流源, 激发的电位场如图 3 所示。在点电源后方布置一条测线, 通过测量前方异常引起的电位“畸变”来获取其前方的电性信息, 直流电阻率法超前探测就是在此基础上建立起来的。

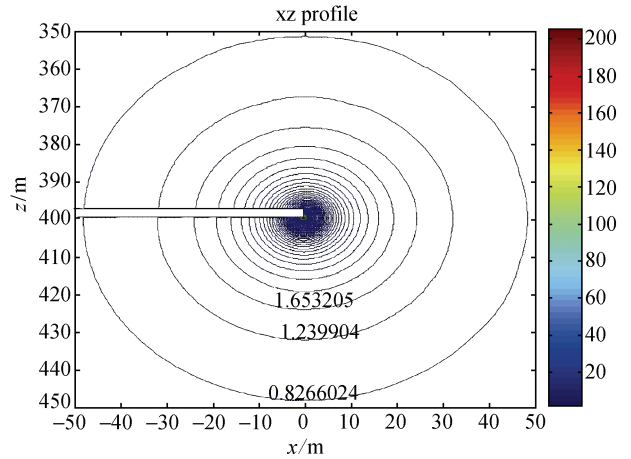


图 3 巷道空间点电源电位分布图

Fig. 3 Sketch map of power potential distribution

3 巷道影响的数值模拟结果分析

在有限元法数值模拟的基础上, 求解全空间巷道影响下的视电阻率 ρ_s 定义为:

$$\alpha = \frac{\rho_s(r)}{\rho_a(r)} \quad (5)$$

巷道影响因子 α 是由岳建华教授首次引出并用于研究巷道影响特征。式(5)中 $\rho_s(r)$ 为由含巷道模型计算的视电阻率值, $\rho_a(r)$ 为均匀介质时的电阻率值。在 $\alpha = 1$ 时可以认为巷道对电流场分布没有影响; 曲线偏离 $\alpha = 1$ 越大, 巷道影响越严重。三极装置时,

可认为 α 是巷道影响下的电位差与没有巷道影响下的正常电位差的比值^[6]。

3.1 巷道影响与巷道几何尺寸的关系

如图 4 所示,为研究巷道几何尺寸变化对稳定电流场分布的影响,假设围岩电阻率 $\rho_0 = 100 \Omega \cdot \text{m}$,在巷道掌子面底板中线上采用单极供电(电流强度为 1 A),巷道横截面为正方形,边长为 a ,分别取 3 m、4 m 和 5 m。

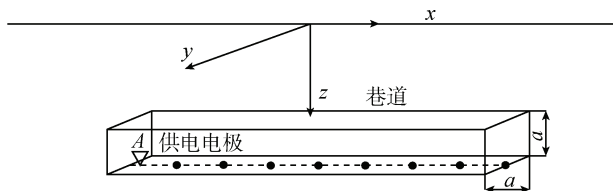


图 4 不同巷道几何尺寸模型示意图

Fig. 4 Schemes of geometrical dimensioning of the roadway

从数值模拟结果(图 5)可看出,巷道影响与巷道的几何尺寸有关。对于在巷道底板中线布极的装置形式,在巷道迎头处巷道影响最为严重,横截面边长越大巷道影响越严重。随供电电极距的加大,距巷道掌子面约 30 m 处,曲线开始变的平直,逐渐趋近于 $\alpha = 1$,此时的巷道影响可以忽略,可近似认为巷道对电流场分布没有影响。可见,实际测量时应取极距大于 30 m 后的数据,这样可以认为不受巷道的影响。

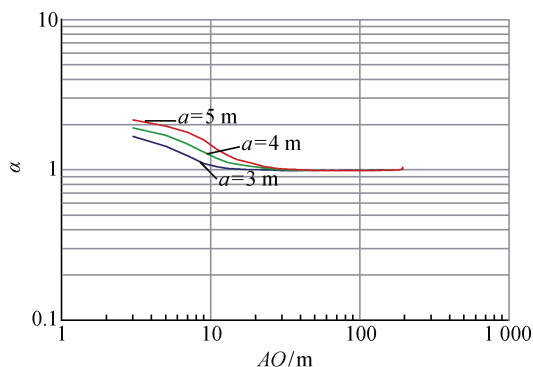


图 5 巷道横截面边长与巷道影响因子关系曲线

Fig. 5 The relationship between cross section sides of roadway and roadway influences factor

3.2 巷道影响与电极布置位置的关系

建立如图 6 所示的地电模型,坐标系的原点在巷道顶板的上表面,其投影与巷道底板中心点重合, x 方向与巷道走向一致; A 、 A' 为单极供电点的供电位置,距巷道掌子面为 4 m;巷道横截面为正方形,其边长为 4 m;围岩的电阻率 $\rho_0 = 100 \Omega \cdot \text{m}$,巷道空腔

的电阻率为 $1.0 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$;供电电流 I 为 1 A。依次在供电点供电,采用三极装置形式测量。

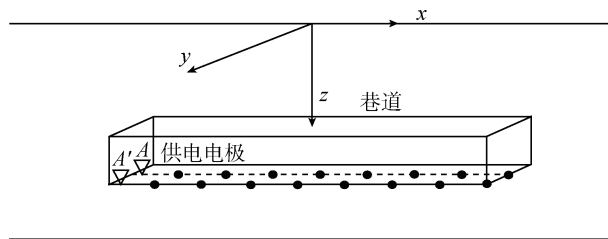


图 6 电极布置位置模型示意图

Fig. 6 Schemes of location of current electrodes

图 7 为供电位置不同时的巷道影响因子 α 曲线。从图 7 中可以看出,当供电电极与测量电极都位于巷道底板交界线上时,其巷道影响因子曲线首支距 $\alpha = 1$ 偏离较小(较电极位于底板中轴线时),说明电流场分布受巷道的影响较小;而当整个装置置于巷道底板中轴线上时,巷道影响因子曲线首支偏离 $\alpha = 1$ 明显增大。对两种施工方式及不同供电形式,巷道迎头附近的巷道影响都表现的较为严重。当距巷道掌子面一段距离(大于 30 m)后,曲线基本重合,巷道影响因子 α 曲线趋于 $\alpha = 1$,此时电流场分布受巷道影响可以忽略。

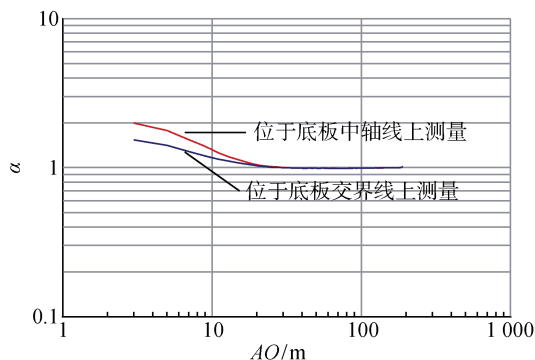


图 7 供电点位置不同时的巷道影响因子

Fig. 7 Influencing factors of roadway with different power supply position

3.3 巷道影响与围岩导电性的关系

为研究巷道影响与围岩导电性的关系,假设巷道所在层与顶、底板岩层的导电性存在差异,模型如图 8 所示。巷道顶、底板电阻率 ρ_1 、 ρ_3 均取 $1 \Omega \cdot \text{m}$,巷道所在层的围岩电阻率 ρ_2 (分别取 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $0.5 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $5 \Omega \cdot \text{m}$ 、 $10 \Omega \cdot \text{m}$),在距巷道掌子面 4 m 处巷道中心线上单极供电,供电电流 I 为 1 A。

图 9 为围岩导电性不同时的巷道影响因子 α 曲线。从图 9 中可以看出,在巷道迎头处的巷道影响因子值较大,说明巷道迎头处的巷道影响很严重。当巷

道围岩介质电性不均匀时, 巷道影响特征取决于巷道所在层与其顶、底板岩层的相对电性差异。在三层介质模型中, 当巷道所在层电阻率小于顶、底板岩层电阻率时, 与均匀围岩介质相比, 层状围岩介质底板三极电探测的巷道影响因子曲线存在极小值; 当介质的电性差异越大(顶底板的电阻率越小), 极小值的位置越靠前, 且极小值的幅值越小, 对应的巷道影响因子 α 值较均匀围岩介质也越偏低。当巷道所在层电

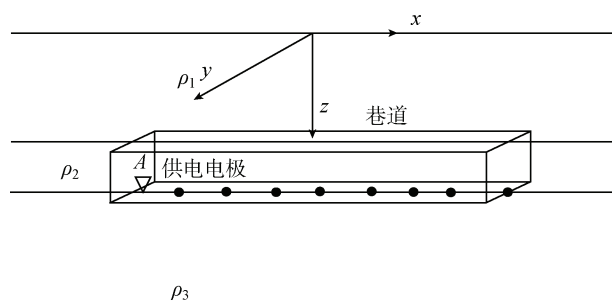


图 8 层状介质模型示意图

Fig. 8 Layered medium model schemes

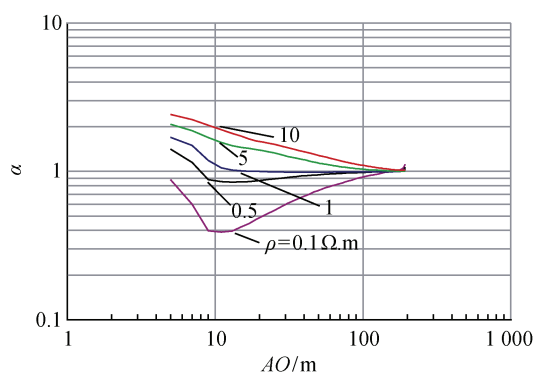


图 9 巷道围岩导电性不同时的巷道影响因子

Fig.9 The influencing factors of roadway in surrounding rock with different electric conductivity

阻率大于顶、底板岩层电阻率时, 层状围岩介质的巷道影响因子 α 曲线位于均匀围岩介质 α 曲线的上部, 且在双对数坐标系中曲线近似斜直线, 此时电性差异越大, 斜线越直, 其斜率也越大。

4 结 论

在矿井直流电法超前探中, 巷道改变了迎头附近的电流场分布; 巷道体的几何尺寸越大, 对探测效果的影响越严重; 同时供电点在巷道中的位置及巷道围岩导电性均影响探测效果。

参考文献

- [1] 张梁, 张业成, 罗元华, 等. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [2] 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.
- [3] 冯于静, 王邦成, 李玉宝, 等. 点电源法在煤矿巷道超前探测中的应用及效果[J]. 河北煤炭, 1998(4): 9-11.
- [4] 刘青雯. 井下电法超前探测方法及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(5): 60-62.
- [5] 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.
- [6] 岳建华, 李志聃, 刘世蕾. 巷道层测深理论曲线数值模拟及资料解释方法[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(1): 52-56.
- [7] 邓小康, 刘海飞. 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.
- [8] 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.
- [9] 刘树才, 岳建华, 刘志新. 煤矿水文勘探技术与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- [10] 刘志新, 许新刚, 岳建华. 矿井电法三维有限元正演模拟[J]. 物探化探计算技术, 2003, 25(4): 302-307.