

均匀围岩介质中点源电流场的巷道影响模拟研究

王大庆, 张华恩, 许新刚
(中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 以巷道底板供电为例, 采用三维有限差分数值模拟技术对矿井下有巷道存在时的全空间点源电流场的分布进行了计算, 根据计算结果初步总结了巷道的影响规律。

关键词: 井下电法; 点源电流场; 巷道影响; 模拟研究

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2003)04-0316-04

由电磁场的基本理论^[1]可知, 无巷道均匀介质中的全空间点源场的电位可由 $U_0 = I\rho/4\pi r$ 得到 (I 为点电源的供电电流强度, r 为测量点与供电点之间的距离, ρ 为均匀介质的电阻率), 此时电位场中电位的等位面是以供电点为中心呈球对称分布。但是, 当均匀介质中存在巷道时, 不导电的巷道必然要对上述全空间点电源场产生影响, 此时, 全空间电位的等位面将不再以供电点为中心呈球对称分布, 在巷道周围, 电流线将发生偏折, 电位等值线也不再是圆形。

矿井电法理论由于其全空间效应和巷道影响规律的复杂性, 所以在理论研究上进展不大, 我们对均匀围岩条件下的研究结果, 可供矿井直流电法施工和异常解释时参考。

1 模拟方法原理

与地面电法相比, 矿井电法最大的不同之处在于供电点在巷道内, 电流场为巷道影响之下的全空间场, 全空间效应和巷道影响相互叠加, 电流场分布规律复杂。

对于求解复杂地电条件下的电场分布问题, 应用场论中经典的数理方法很难求出其解析值, 因此, 希望从电场所满足的微分方程出发, 用近似方法求其数值解。三维有限差分方法就是其方法之一, 使用三维有限差分模拟技术, 可在全空间条件下, 模拟任意三维复杂的地电断面, 电极排列可以任意组合。

自从 1979 年 Dey 和 Morrison 首先提出了电法三维有限差分法以及 Dey 和 Morrison 混合边界条

件之后, 电法三维有限差分法得到了进一步的发展。三维有限差分法是一种网格剖分方法, 它将求解区域剖分成许多正方形、长方形网格单元, 以网格节点上的场参数值来表征场空间的分布; 然后将场所满足的微分方程离散化, 得出相应的差分方程, 由此得到关于节点场参数的高阶线性方程组, 解方程组可以得出场在空间的具体分布情况^[2,3]。

一般来说, 三维模型计算结果无解析解对比。不过可以根据地电场的互换性原理来判断三维地电场计算结果的正确与否^[3]。根据电极互换性原理, 对于同样地下介质, 无论其电性分布如何, 在 A 点供电测得 M 点的电位值一定与在 M 点供电测得 A 点的电位值相等。以某三维模型的有限差分计算为例。使用 $39 \times 39 \times 20$ 的网格, 表 1 列出 10 对测量点与供电点互换测量的结果, 相对误差都非常小, 大都仅 0.01% 左右。

表 1 电极互换测量结果对比

点号	电位值 1	电位值 2	误差/%
1	0.1989437	0.1989650	0.0002075
2	0.1326291	0.1328480	0.0016506
3	0.0994718	0.0992315	0.0024163
4	0.0795775	0.0796149	0.0046990
5	0.0663142	0.0665545	0.0036185
6	0.0568411	0.0563980	0.0077952
7	0.0497359	0.0501116	0.0075543
8	0.0442097	0.0443175	0.0024378
9	0.0397887	0.0397030	0.0021539
10	0.0361716	0.0361653	0.0001729

由此可见, 用有限差分法模拟三维全空间点电源电流场, 其结果是可信的。

收稿日期: 2003-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (40074030)

2 巷道模型研究及结果分析

建立如图 1 所示的直角坐标系,其坐标原点位于巷道底板中轴线上。

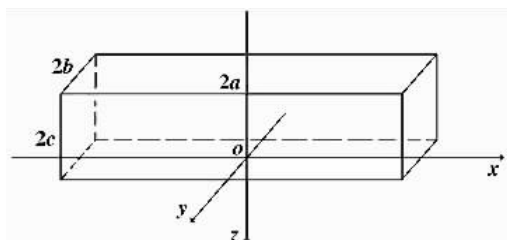


图 1 巷道模型坐标系示意

为了与无巷道的正常场电位相对比,定义参数 $E = (U_s - U_0) / U_0$, 其中 U_s 为总电位场, U_0 为无巷道时的正常场, E 所表示的是异常场相对于正常场的大小。当 $E \approx 0$ 时,巷道影响可以忽略不计;当 $E > 0$ 时,巷道影响下考察点处的总电场电位值大于正常场电位值;当 $E < 0$ 时,巷道影响下考察点处的

总电场电位值小于正常场电位值。我们将通过研究 E 值的变化规律来探讨巷道影响下电流场的分布变化规律。

2.1 供电点源位于底板中轴线上

图 2 为供电点源位于底板中轴线上 xOy 平面和 yOz 平面内对应的 E 值分布情况。从图 2a 中可以看到,在以电源点为中心大约 2 倍于巷道宽度,即 $4b$ 为半径的范围内, E 值较大;当考察点到电源点的距离超过 $10b$ 时, E 值变得较小。

图 2b 中,在底板一侧 E 值大于零,即总电场电位值大于正常场电位值,而在顶板一侧正好相反, E 值小于零,总电场电位值小于正常场电位值。底板下方的异常区域比顶板上方的异常区域大。底板下方以 z 轴为对称轴,大约 $6b \times 6b$ 的区域内 E 值都较大;顶板上以 z 轴为对称轴大约 $4b \times 4b$ 的区域内 E 值都比较大;当考察点到电源点的距离超过 $8b$ 时, E 值相对较小。

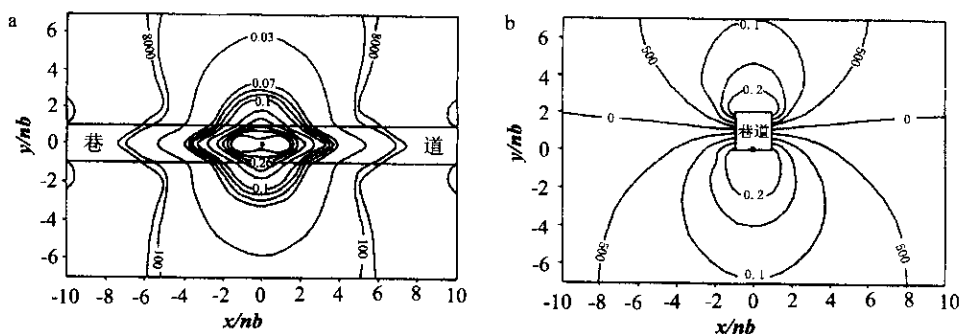


图 2 电源位于底板中心时的 E 值分布

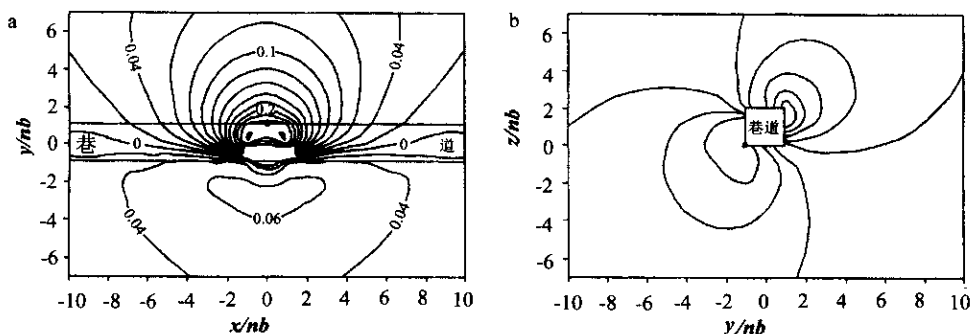


图 3 电源位于底板与侧壁的交线时的 E 值分布

2.2 供电点源位于底板与侧壁的交线上

图 3 为供电点源位于底板与侧壁的交线上的 E 值分布情况。从图 3a 中可以看到电源点所在的侧壁外侧以及底板内, E 值大于零,即总电场电位值大于正常场电位值,而另一侧壁的外侧则相反。电源点所在侧壁外侧及其对应一侧的异常区域都较大, E 值主要分布在以 y 轴为对称轴大约 $8b \times 8b$ 的范

围内。

图 3b 表明在底板和供电点源所在的侧壁外侧 E 值大于零,而在顶板和另一侧壁外侧正好相反。 E 值大致呈扇形分布,底板下方的正异常区域大约为 $10b \times 10b$ 大小;顶板上方的负值异常区域约为 $8b \times 8b$, 小于正异常区。当考察点到巷道中心点的距离超过 $8b$ 时, E 值相对较小。

2.3 供电点位于底板与堵头交线的中心点上

图4为供电点位于底板与堵头交线的中心点上时 E 值的分布情况。从图4a中可以看到,由堵头向巷道内大约 $3b$ 处开始,一直向外(均匀介质区)的区域中 E 值大于零,较大的 E 值分布在以电源为中心大约 $8b \times 8b$ 的区域内。 E 值随离开电源距离的增大而很快减小,在距离电源点大约 $10b$ 处就较小了;由堵头向巷道内大约 $3b$ 处开始向内(巷道方向),较大的区域内 E 值都小于零,绝对值较大的 E

值大致分布在 $8b \times 8b$ 的区域内。离开电源较远(大于 $10b$)的地方, E 值仍然相对比较大。

在图4b中,大致以巷道半高处为界,底板方向一侧的 $6b \times 6b$ 区域内 E 值大于零,但只是在距离电源点较大的区域 E 值才较大些;顶板方向一侧的 E 值小于零,即总电场电位值小于正常场电位值,但是相对底板方向,异常区小些,绝对值比较大的 E 值大约分布在 $4b \times 4b$ 的区域内。当考察点到巷道中心点的距离超过 $10b$ 后, E 值才变得比较小。

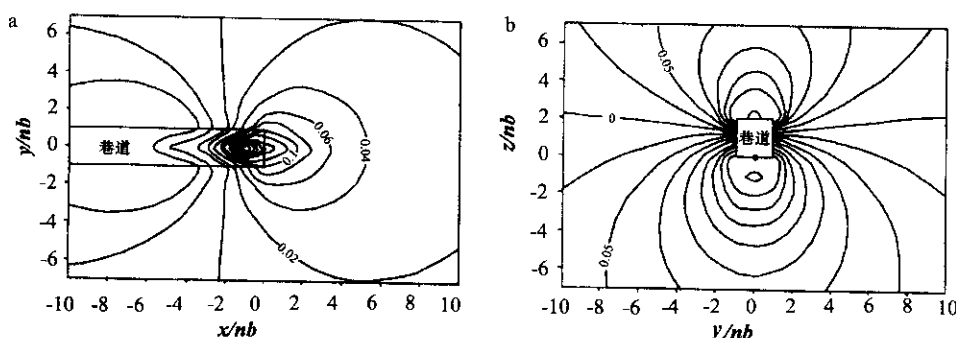


图4 电源位于底板与堵头交线的中心点时的 E 值分布

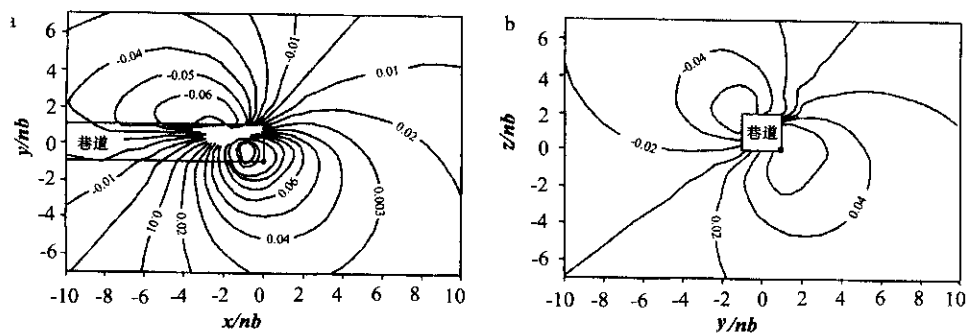


图5 电源位于巷道角点上的 E 值分布

2.4 供电点位于巷道角点上

图5为供电点位于巷道角点时的 E 值分布情况。从图5a中可以看到,在以电源点为中心的较大区域内,异常场与正常场相差比较大,正、负异常在平面上大约各占一半的区域,负值分布在有巷道的一侧,正值则大多分布在无巷道的一侧,但在巷道内以电源点为直角顶点,大约以 $4b$ 和 $2b$ 为直角边的三角形区域内, E 值为正且很大。较大正异常与负异常的分布区域大小都在 $10b \times 10b$ 左右。负值向有巷道的一侧的延伸范围较大。

在图5b中,正、负 E 值基本上是对称分布的。负值分布在巷道顶板及无电源点的侧壁一侧,正值分布在巷道底板及电源点所在侧壁的一侧,较大的正异常场与负异常场的分布区域大致都为 $4b \times 4b$ 大小。

3 结论

(1) 巷道影响引起的电流场正、负异常分布区域在空间位置上都以某个平面为界约呈对称分布,只是异常区域的大小随供电点在巷道内位置的不同而有所不同。

(2) 供电点位于底板中轴线上时,在顶、底板与侧壁的交线上巷道的的影响最小,而在顶、底板的中轴线上,巷道影响最大;供电点位于底板与侧壁的交线上时,电源点所在的底板与侧壁的交线及其斜上方的顶板与侧壁的交线上巷道影响最小,测点到这2条交线的距离越远,巷道影响就越大;供电点位于底板与堵头交线的中点上时,底板中轴线上,巷道影响最大,底板与两侧壁交线处,巷道影响最小,在顶板及侧壁上各处巷道影响相差不大。

(3) 巷道所引起的异常区域大致都分布在以供

电点为中心,以 $10b$ 为半径的空间区域内,也就是说,不导电巷道所引起的较大的异常范围大约是距离供电点 5 倍于巷道宽度的区域。

参考文献:

[1] 刘天放,李志聪. 矿井地球物理勘探[M]. 北京:煤炭工业出版社

社,1993.

[2] 邓正栋,关洪军,万乐,等. 稳定点电流源场三维有限差分正演模拟[J]. 解放军理工大学学报. 2000,1(3):45-50.

[3] 周熙襄,钟本善. 电法勘探数值模拟技术[M]. 北京:科学技术出版社,1986.

THE SIMULATION RESEARCH OF LANEWAY EFFECT ON POINT ELECTRICAL SOURCE FIELD IN ISOTROPY MEDIUM

WANG Da-qing, XU Xin-gang, YUE Jian-hua

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Take power supply for floor for example, by researching the distribute character of full-space electrical field influenced by laneway using 3DFDM simulation technology, the rule of laneway effect on the field distribution has been disclosed. This research may provide instruction for basic theory research of undermine DC method and practical application.

Key words: effect of laneway; point electrical source field; simulation

作者简介:王大庆(1977 -),男,中国矿业大学在读研究生,现主要从事应用地球物理勘探理论与技术研究。

上接 315 页

参考文献:

[1] 汪明武,王鹤龄. 声频应力波在锚杆锚固状态检测中的应用[J]. 地质与勘探,1998,34(4):54-56,59.

[2] 汪明武,罗国煜,王鹤龄. 应力波无损检测锚固质量的 BP 网络分析[J]. 水文地质工程地质,1999,(2):50-52.

[3] 王靖涛. 桩基应力波检测理论及工程应用[M]. 北京:地震出版社,1995.

[4] 夏代林,刘春生. 锚杆锚固质量快速无损检测技术研究[J]. 水利水电快报,1999,20(增刊):32-36.

[5] 夏代林. 锚杆锚固质量快速无损检测技术研究[D]. 焦作工学

院,2000.

[6] 李建平. 小波分析与信号处理—理论、应用及软件实现[M]. 重庆:重庆出版社,1997.

[7] 科恩 L. 时频分析—理论与应用[M]. 白居宪 译. 西安:西安交通大学出版社,1998.

[8] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998.

[9] 秦前清,杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994.

AN ANALYSIS OF BOLT BONDING INTEGRITY BASED ON WAVELET TIME-FREQUENCY

XIA Dai-lin¹, LU Shao-lin¹, XIAO Bo-xun²

(1. School of Info-physics and Geometrics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Yangtze River Engineering Geophysics Survey, Changjiang Water Resource Commission, 430010, China)

Abstract: The existence of various defects in the bolt bonding system results in acoustic wave energy attenuation, phase aberration and frequency scattering. With wavelet time-frequency analysis and its energy-collecting method, the phase properties of the signal can be extracted. Helped by the method of wave impedance analysis, we can accurately locate the defects in the bolt bonding system. The application of this technique to the Three Gorges Project has demonstrated its effectiveness.

Key words: Bonding integrity; Non-destructive test; wavelet; wave impedance analysis; time-frequency analysis

作者简介:夏代林(1972 -),男,现为中南大学信息物理工程学院地球探测与信息技术专业博士生,主要研究方向为检测技术及方法研究,发表论文数篇。