

## 地质与测量

# 大定源建场电激励下球状隐患综合特征研究

朱德兵<sup>1</sup>, 王猛<sup>1</sup>, 邓红卫<sup>2</sup>, 周科平<sup>2</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 资源与安全工程学院 湖南 长沙 410083)

**摘要:**为了克服电法超前地质预报中巷道内供电的诸多不便,及数据解释复杂化的问题,采用地面供电的长极距大定源建场模式,通过测量工作面附近的电位差及激发极化率异常,判定地下工程隐患是否存在。物理模拟试验表明:在迫近低阻地下工程隐患时,电位差出现明显的增大,而极化率异常出现负值,且不断减小;采用三维观测系统测量,可以实现对隐患的实时预警,通过对各个方向异常的比较分析,可以确定隐患的空间位置。这种预报方法用于地下掘进工程隐患超前预报,对工作面前方或附近异常体有一定的分辨能力。

**关键词:**电法超前预报;长极距定源建场;电场异常;激发极化异常;掘进工程

中图分类号:P631.324 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2013)03-0107-04

## Study on Comprehensive Features of Sphere Hidden Dangers Under Electric Excitation of Large Fixed Power Site Building

ZHU De-bing<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, DENG Hong-wei<sup>2</sup>, ZHOU Ke-ping<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences and Info - Physics Central South University Changsha 410083 China;

2. School of Resources and Safety Engineering Central South University Changsha 410083 China)

**Abstract:** In order to overcome the inconvenient power supply in the mine roadway during the electric advance geological prediction and the complicated problems of the data explanation, a long pole span fixed power site building mode with a power supply from the surface ground was provided. With the measurement of the potential difference near the coal mining face and the abnormal of excitation polarization, hidden dangers were judged. The physical simulation experiments showed that when the low resistances sphere hidden danger was reached closely, the potential difference would be increased obviously, abnormal of the polarization rate would be a negative value and would be reduced continuously. The 3D observation system measurement was applied to realize the real time early warning of the hidden danger. With the comparison analysis on the abnormal in each direction, the space location of the hidden danger could be determined. The prediction method applied to the advance prediction of the hidden danger in the underground excavation project could have a certain distinguishing ability of the abnormal mass in front or near the working face.

**Key words:** electric advance prediction; fixed power site building with long pole span; abnormal of electric field; abnormal of excitation polarization; mine excavation project

## 0 引言

巷道或隧道掘进工作面前方存在的地质异常体,包括瓦斯聚集体、采空区以及岩溶、断层等,其周围围岩存在明显的电性差异,这种特性为电法勘探用于此类隐患的超前预报提供了地球物理探测前提。目前,德国开发研制的 Beam 测试系统以交流

电法和激发极化法为探测手段,代表了电法超前预报的先进水平<sup>[1-2]</sup>。但该技术需要在巷道掘进工作面开展布电极供电作业,其解释程序需要专门软件才能完成,专业化程度高,难以推广应用。国内的电法超前预报主要有定点源三极法<sup>[3-4]</sup>、单极-偶极电阻率法<sup>[5]</sup>以及聚焦直流<sup>[6]</sup>等方法,而激发极化法在隐患超前探测中还停留在理论研究阶段,很少应

收稿日期:2012-12-25;责任编辑:曾康生

基金项目:湖南省科技重大专项资助项目(2011Fj1003)

作者简介:朱德兵(1968—),男,湖北仙桃人,副教授,博士。Tel: 0731-8877091, E-mail: zhudbing@mail.csu.edu.cn

引用格式:朱德兵,王猛,邓红卫,等.大定源建场电激励下球状隐患综合特征研究[J].煤炭科学技术,2013,41(3):107-110.

用于工程实践<sup>[7]</sup>。与其他方法相比,对用于隐患超前预报的电法勘探尚停留在巷道内供电测量的作业方式<sup>[8~10]</sup>,受空间限制和现场电场干扰等诸多因素的影响,小电流供电条件下难以获得信噪比高的电位数据资料。此外,每次超前预报都需要专业技术人员将电法仪器带到井巷中,电极数量多,作业周期长,且不能实时解释,施工协调难度较大。为克服电法勘探中的缺点,笔者提出一种长极距大定源建场下掘进前方电法超前预报的方法,通过对低阻球状异常电场及激发极化率异常特征的综合研究,达到超前探测的目的,并采用多条测线进行三维观测,从而确定隐患的相对位置,为电法勘探用于地下巷道工程地质超前预报乃至仪器装备研究提供了思路。

## 1 理论分析

自然界中存在的近似等轴状地质体,如地下溶洞、采空区空腔或囊状矿体等,可近似看作球体。笔者对均匀电流场背景下低阻球状结构体的综合异常特征进行了研究。在均匀各向同性半空间条件下,通过位于地下的供电电极A、B,可以形成于AB中间1/3段的近似均匀电流场,如图1所示。假设在电阻率为 $\rho_1$ 的均匀各向同性半空间,掘进工作面前方存在一球体结构构造,其内充填介质电阻率为 $\rho_2$ ( $\rho_2 < \rho_1$ )。 $j_0$ 为均匀电流场的电流密度,方向与隧道前进方向相同,设轴的正方向 $x'$ ,球心在隧道轴线上投影点为坐标原点O, $x$ 为P点横坐标, $h$ 为球心到隧道轴距离, $H$ 为球体中心的埋深,并假设球心电位为零电位。应用镜像法,可计算图1中沿隧道从球体左侧接近时球外任意一点P的电位 $U^{[11]}$ :

$$U = j_0 \rho_1 r \cos \theta + \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 j_0 \rho_1 r \cos \theta + \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} \left( \frac{r_0}{r'} \right)^3 j_0 \rho_1 r' \cos \theta' \quad (1)$$

其中: $\theta$ 为P点和球体中心的连线与水平轴 $x'$ 的夹角; $r_0$ 为球体的半径; $r$ 为观测点距球体中心的距离; $r'$ 为镜像球中心与P点距离; $\theta'$ 为P点和球体在均匀半空间外的镜像球体中心的连线与水平轴 $x'$ 的夹角。式(1)中第1项为均匀电流场的正常电位,第2项为球体存在时的异常电位,第3项为半空间地面影响条件下存在的附加异常电位。以存在球体异常时的电位 $U$ 与正常电位 $j_0 \rho_1 r \cos \theta$ 之差来表示电位异常变化量,则在正常电位背景下异常电位

的百分变化量,即相对百分比 $T_U$ 为

$$T_U = \left[ \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} \left( \frac{r_0}{r} \right)^3 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} \left( \frac{r_0}{r'} \right)^3 \frac{r' \cos \theta'}{r \cos \theta} \right] \times 100\% \quad (2)$$

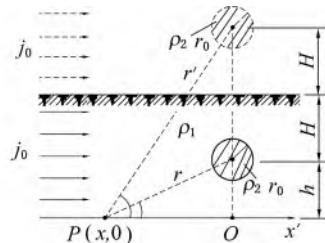


图1 均匀半空间中球体电场异常计算示意

当球体中心位于隧道轴线上,且 $r_0 \ll H$ 时, $h=0$ ,式(1)中 $U$ 的表达式近似为

$$U = \left[ 1 + \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} \left( \frac{r_0}{|x|} \right)^3 \right] j_0 \rho_1 |x| \quad (3)$$

电位相对异常百分比为

$$T_U = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} \left( \frac{r_0}{|x|} \right)^3 \times 100\% \quad (4)$$

设典型低阻球状具有安全隐患,其半径 $r_0$ 取10 m,电阻率为 $0.1 \Omega \cdot m$ ,围岩电阻率为 $10 \Omega \cdot m$ ,电流密度 $0.1 \text{ mA/m}^2$ , $x$ 取 $10 \sim 100 \text{ m}$ ,即观测距离,据式(3)计算得到掘进工作面前方低阻球体异常的理论模拟电位及电位差曲线(图2)。

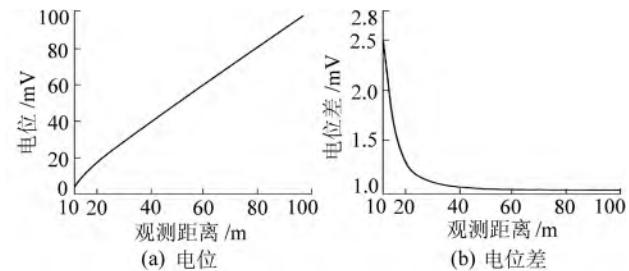


图2 电位和电位差异常曲线

从图2可以看出,对于低阻模型隐患,在观测点接近隐患时,电位下降幅度不明显,而电位差的变化幅度则急剧增加。电位及电位差相对异常对比如图3所示,当观测距离为30 m或距球体表面20 m时,即相当于球体直径时,电位异常百分比约为3.49%,电位差异常约为7.54%。

综合分析可以看出,对于低阻球体隐患,当观测距离从100 m前移至10 m时,仅在观测点迫近球体时,电位和电位差异常才有较大的相对变化,才能够清晰地区分隐患的存在;同样,随着球状隐患的迫

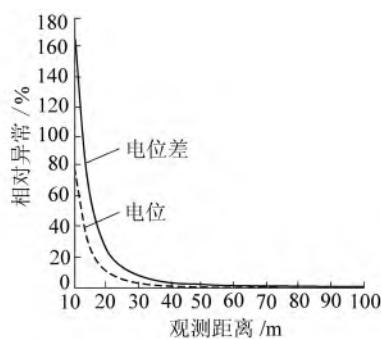


图3 电位差与电位相对异常对比

近, 相对异常快速增大; 由图3可知, 电位差相对异常的幅度要大于电位相对异常幅度, 因此野外测量中以电位差为测量值。若以10%以上的相对异常为分辨能力界限, 则电位差有效探测距离不小于17 m, 其深径比即球体顶面与测量记录点之间距离同球体直径之比大于1。如果异常体为低阻的圆柱体, 垂直于巷道走向方向, 电法勘探的分辨能力还可以提高; 对于断层构造等近似板状体低阻异常隐患, 隐患的相对电阻率越低, 异常幅度越大。

## 2 物理模拟试验

根据低阻异常球体在均匀全空间中电位和电位差的变化规律, 在迫近隐患时会出现明显的异常。为验证理论计算的正确性, 进行了水槽物理模拟试验, 并结合激发极化率异常特征, 通过多条测线进行三维观测, 确定隐患的相对位置。

试验装置如图4所示, 模拟隧道为直径5 cm的塑料棒, 长度110 cm, 在隧道外周对称的4个方向上分别布置测量电极M、N, 供电电极A、B相距3 m。隧道位于AB中间1/3处, MN极距为3 cm, M距隧道掘进工作面1 cm。将此装置置于深2 m、长宽分别为3和4 m的水槽中央, 距水面80 cm; 水的极化率为0.3, 低阻铝球直径25 cm。用数字激电仪和SQ系列双频道数字激电仪分别测量MN之间的电位差和极化率, 以MN中点为记录点。

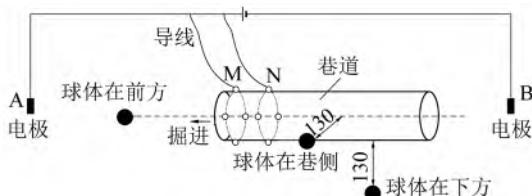


图4 物理模拟试验装置

首先, 将铝球置于隧道正前方, 采用4个M、N

电极分别并联的方式进行测量, 电位差异常和极化率异常曲线如图5所示, 由图5a可知, 随着观测点迫近球体电位差异常逐渐增大, 最大可达18% (图5b), 若以10%以上的相对异常为分辨能力界限, 有效探测距离为130 mm, 深径比接近1, 与理论值基本相符, 达到探测效果, 说明此方法的可靠性和正确性。由图5b可知其极化率异常为负异常, 随着观测点迫近球体, 极化率逐渐减小, 最小可达-16。根据此特征即电位差异常曲线随着观测距离的减小而递增, 极化率递减, 可以确定隐患位于隧道前方的位置和大小。

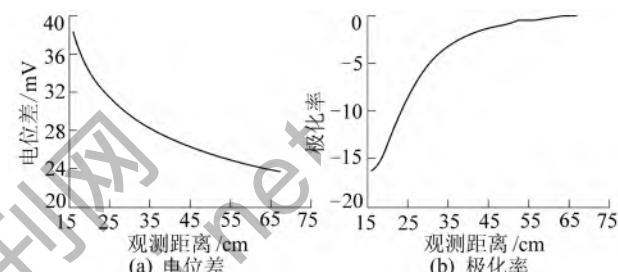


图5 隐患位于前方电位差和极化率异常曲线

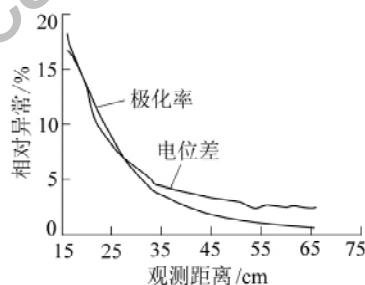


图6 隐患位于前方电位差与极化率相对异常对比

但在实际工作中, 异常体可能位于隧道或巷道的各个方向上, 因此对隐患的定位研究很重要。为此在试验中, 将铝球置于侧面距隧道130 mm处, 取隧道与球心垂直的位置为坐标原点O, 并取靠近掘进工作面一侧的观测点距铝球中心的距离为负值, 另一侧为正。分别测量隧道各个方向及并联时MN的电位差和极化率, 如图7所示。可以看出, 在观测点经过坐标原点时电位差和极化率均出现极值, 且采用4个并联的测量方式, 电位差变化幅度最大, 而靠近球体一侧的电位差略大于远离球体一侧的值, 其差为变化幅度很小的正值。由图7b可知, 极化率表现为正异常, 且靠近球体一侧的变化幅度大于远离球体的幅度。根据以上2个异常特征可以联合确定隐患的相对位置, 朝巷道掘进方向为正。

图8 分别显示球状隐患位于隧道侧面和下方

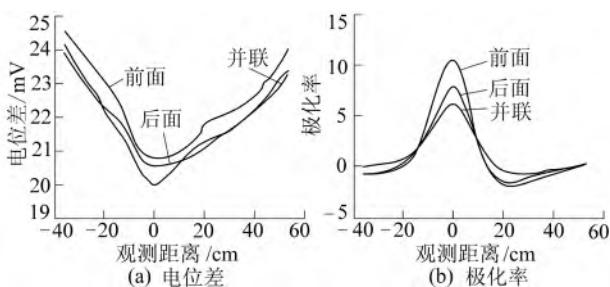


图7 隐患位于隧道侧面电位差和极化率异常曲线

13 cm 处,MN 四个电极并联时电位差相对异常和极化率相对异常的对比。由图8可知,两者均在观测点经过球心处出现极大值,且幅度基本相同,最大异常达5%左右。

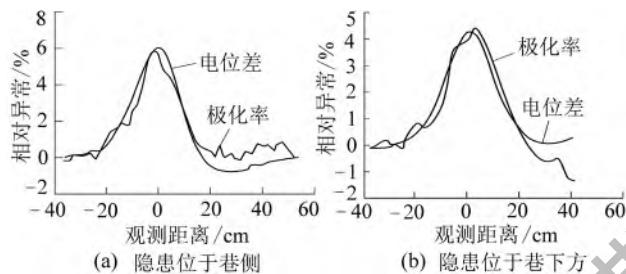


图8 隐患位于隧道侧面与下方电位差与极化率相对异常

### 3 野外测量方法设计

通过物理模拟试验,实现对球状隐患的超前预警,并可确定其位置。为应用到工程实践中,设计出如图9所示的野外工作方式。为了获得近似均匀的电场覆盖在待测掘进巷道区段上,可以采取在地面供电和钻孔供电2种模式,测量巷道内2个测量电极MN之间的电位差和极化率。

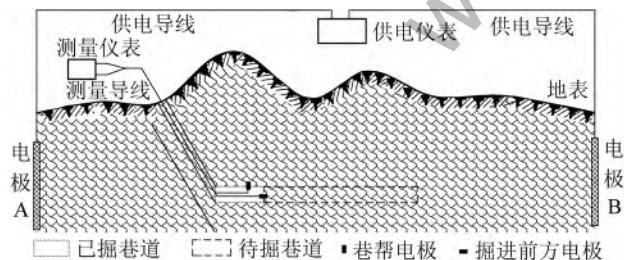


图9 以电位为测量参数时超前预报系统工作布置示意

准备电法勘探所用电场测量仪器和激发极化法测量仪器各1套。根据设计隧道或巷道的进出口位置以及前进方向,在地表沿走向上,与待测巷道区段外延长线上布置供电电极A、B,并通过导线分别连接至探测仪器的正、负极。在保证待测区段位于均匀电流场的同时,供电电极AB的距离可以灵活控制。对于深埋巷道,可以通过钻孔埋设供电电极,以

保证待测巷道区段有足够的电流密度。

测量电极MN极置于巷道内一侧,其中M极可位于掘进工作面,在后续测量中确保测量电极MN的极距不变,测量时记录点位于MN中点,M、N电极通过导线分别连接至勘探仪器的输入端;测量电位差或极化率通过端口连接至电脑,绘制电位差异常曲线或极化率异常曲线,进行实时处理,并通过多条测线测量的方式,确定隐患所在位置。

### 4 结语

超前预报是地下掘进工程中的关键环节,笔者提出的长极距大定源电法预报方法克服了在巷道内布极供电的复杂作业程序,改为地表或钻孔供电一次完成;测量现场只需电极布置和操作测量仪表,可以由非专业化人员现场完成;测量数据为电位差或激发极化率,无须复杂计算程序,可通过软件实现可视化并进行实时预警。通过理论和物理模拟,对球状隐患的电位差及极化率异常进行了分析和研究;并通过各方向多条测线测量的方式,确定隐患的相对位置。此外,该方法可用于生产矿山的巷道物探中,也能够探测巷道周围或掘进工作面前方的隐伏矿体,为矿山资源开发做出贡献。

#### 参考文献:

- [1] 朱劲,李天斌,李永林,等. Beam超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 258-262.
- [2] 罗玉虎. 激发极化法在隧道超前地质预报中的应用[J]. 铁道建筑, 2009(11): 37-39.
- [3] 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.
- [4] 李玉宝. 矿井电法超前探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(2): 1-3.
- [5] 程久龙. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(4): 60-62.
- [6] 阮百尧, 邓小康, 刘海飞, 等. 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.
- [7] 张伟杰, 郝明锐, 杜毅博, 等. 基于双频激电法的煤矿巷道超前探测新技术初探[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 73-79.
- [8] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 等. 隧道超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 460-464.
- [9] 赵永贵. 国内外隧道超前预报技术评析与推介[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1344-1352.
- [10] 高致宏, 闫述, 王秀臣, 等. 巷道超前(电法)探测的应用现状与存在的问题[J]. 煤炭技术, 2006, 25(5): 120-121.
- [11] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.