

文章编号:1673-3363(2010)03-0316-06

采动影响下导水构造电性变化的视电阻率特征分析

刘树才, 刘鑫明

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在采用矿井高密度电阻率法测量装置的前提下,总结了典型煤矿导水构造,建立了煤矿底板导水构造电性变化的地电模型.利用三维电法正演软件对不同参数的导水构造(导电性变化和规模尺寸变化)的地电模型进行了数值模拟.结果表明:在文中的观测条件下,煤矿导水构造的导电性变化幅度超过 20% 时其视电阻率特征就出现明显变化,而其规模尺寸要增大 4 倍后,其视电阻率特征才开始出现明显变化,说明地质构造的导电性变化对视电阻率的影响更直接;采用三极法装置探测更容易发现产状陡立的低阻体;为使低阻体反映更明显,探测过程中尽量使测线通过勘探目标的上方.

关键词: 煤矿突水; 矿井电法; 导水构造; 电性变化; 视电阻率

中图分类号: P319 **文献标识码:** A

Characteristics of Apparent Resistivity with the Electrical Changing of Water Conducted Structures Under the Mining-Induced Effect

LIU Shu-cai, LIU Xin-ming

(State Key Laboratory of Deep Geomechanics & Underground Engineering, School of Resource and Earth Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: On the premise of applying mine high-density resistivity method, we study some typical water conducted structures in coal mines, and establish some geoelectric models for water conducted structures in coal mine floor with electrical changing. In addition, we numerically simulated, using three-dimensional electrical forward software, the geoelectric model with different parameters of water conducted structures (conductivity changing and the scale of size changing). The results show that, under the observation conditions in our study, the apparent resistivity has a significant change (over 20%) with the change of conductivity of water conducted structures, but its size increases by 4 times. This indicates that the conductivity of geological structure has more direct effect on the apparent resistivity. It is easier to detect steep dipping beds with low-impedance by using Pole-Dipole system. In order to more clearly reflect the low resistivity body, we should make sure to lay the surveying line as far as possible over the exploration target.

Key words: mine water inrush; mine electric method; water conducted structure; electrical changing; apparent resistivity

岩体电阻率是反映其导电性的物理量,与岩体成分和内部结构有密切关系.当岩体成分基本确定

时,岩体结构对于岩体来说就成了引起电阻率差异的主要原因之一.若岩体中存在大量孔隙,当流体

收稿日期: 2009-10-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400)

作者简介: 刘树才(1963-),男,山东省潍坊市人,教授,博士,博士生导师,从事矿井地球物理学理论及工程应用方面的研究.

E-mail: Liushucai@cumt.edu.cn Tel: 13505212809

加入其中之后,由于流体的导电性远高于岩体本身,因此岩体中流体的含量变化便成为岩体电阻率变化的主导因素^[1-2]。

国内外关于岩体(地质体)电阻率变化的研究主要集中在地震地电阻率观测领域,研究重点是地电介质电阻率的各向异性,用于探索地震预报的电阻率变化前兆规律。早在1920年,Schlumberger就认识到在直流电法勘探中,地下介质存在电阻率各向异性,20世纪50年代初A. П. Краев研究了均匀各向异性介质中视电阻率的计算方法^[3]。后来,W. F. Brace和陈大元等^[4-7]研究了岩体(土)标本加载过程中视电阻率的各向异性变化,钱复业等^[8-10]进行了大量的地震地电阻率连续观测。1984年,王新华等对断层失稳前的扩展及电阻率变化前兆进行了研究,探讨了与应变有关的电阻率变化前兆一般规律^[11]。

在工程勘探领域,1966年,布雷斯和奥林奇基于三轴压力试验得出,初始完整岩体一旦有断裂形成,其电阻率进一步变化不会太明显^[12]。20世纪80年代,波兰学者曾在矿井下观测到由于岩层受压或发生动力破坏时的电阻率变化,并进行了有关现象的总结,预示通过长期观测电阻率的变化可能进行矿山岩体动力灾害的预测预报^[13]。近些年,刘树才、刘鑫明等采用直流电阻率法观测采动过程中的煤层底板视电阻率的变化,以此研究底板破坏带深度及导水构造在采动过程中的电性变化,预报底板突水,也取得了一些成果^[14-16]。除此之外,还有学者对煤岩孔隙中瓦斯充填后的电性变化进行了研究^[17]。

综上所述可知,在岩体(地质体)本身电性变化与其受力状态、液体含量变化的关系研究方面较为深入全面。而对于含水异常体本身的电阻率和体积大小变化后引起的视电阻率变化特征的研究则刚刚起步。煤矿导水构造由于受天然的地质运动或人为采动影响而形成大量的裂隙,当有深部岩溶水进入充填其中时,其电阻率相对原始状态要低几个数量级。因此,在进行矿井电阻率法探测时,视电阻率值与地质体电阻率(与充填其中的液体含量及矿化度密切相关)和体积大小(与裂隙发育程度密切相关)都有关系。而电法资料解释过程中,通常是根据经验对视电阻率的变化特征进行分析,圈定勘探富水异常区或煤层底板突水预测,但缺乏视电阻率变化特征与导水构造电性变化之间的对应关系的理论指导。

近年来,采用矿井高密度电阻率法实时动态探

测煤层底板破坏深度、监测煤层底板导水裂隙带变化,建立煤矿突水预测、预警系统服务的研究工作逐步开展起来^[14-16]。研究视电阻率的变化特征和导水构造的规模及其赋水情况之间的对应关系,对于指导矿井电阻率法的资料解释,提高探测精度和可靠度,满足煤矿防治水工作的需要具有重要理论和实际意义。

1 地电模型的建立

导水通道的存在是矿井突水的必备条件。废弃井口、采后冒裂带、岩溶地面塌陷坑(洞)、陷落柱、断层带及煤层顶底板或封闭不良的旧钻孔都会成为可能的导水通道^[18]。根据多个矿井突水情况的分析,将底板突水类型分为无构造和有构造(断层含水裂隙带、陷落柱)两类^[19]。

近年来,开展了采用矿井高密度电阻率法探测(或监测)煤层底板岩层电阻率变化,并由此判断是否会有因采动影响而发生底板岩层破坏突水,逐步成为煤矿突水预警预报中的主要技术之一。为此,在模型设计时,采用目前常用的高密度观测系统和参数。而导水构造以目前最为常见的底板断层裂隙带和陷落柱突水构造为典型代表,建立地电模型,如图1,2所示。

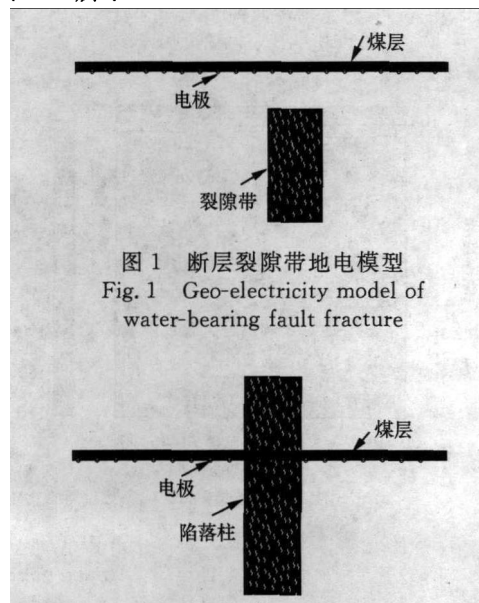


图1 断层裂隙带地电模型
Fig. 1 Geo-electricity model of water-bearing fault fracture

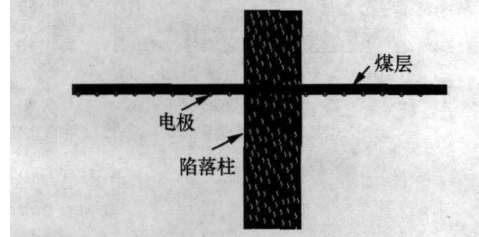


图2 陷落柱地电模型
Fig. 2 Geo-electricity model of water-bearing sink hole

为不失一般性,设围岩的电阻率为 $200\ \Omega\cdot\text{m}$,煤层电阻率为 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,煤厚6 m,巷道宽3 m,高6 m。由于巷道内为空气,设其电阻率为 $10^{10}\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

1) 断层裂隙带地电模型:设断层含水裂隙带宽度为15 m,走向与巷道垂直,裂隙带顶界位于煤

层下方 15 m;设其电阻率初始值设为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,对裂隙带电阻率初始值的 20% 递减,即以 80,60,40 $\Omega\cdot\text{m}$ 进行数值模拟。

2) 陷落柱地电模型:设陷落柱大小为长 15 m,宽 15 m,高 200 m^[20-21] 的方形直立柱体,位于巷道(测线)一侧 20 m.其电阻率初始值设为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,在模拟导电性变化时,与断层裂隙带相同.讨论其规模变化时,保持高度不变,长度和宽度以初始值的 1 倍递增,即 30,45 和 60 m.

采用有限元三维电法正演软件进行数值模拟,设置 Dirichlet 边界条件,观测系统采用矿井直流电法中常用的高密度三极法观测系统,电极间隔 5 m,测线长度 100 m.同时,相对于点电源场在地表

分布为半空间而言,井下空间应为全空间,考虑到回采工作面煤层的电阻率高(若煤层为低阻时,应采用全空间场计算),而顶底板围岩一般为砂页岩类,其电阻率比煤层低得多.因此,回采工作面底板岩层的电流分布可近似看做是半空间^[22].

由此,可分别建立导水构造的导电性变化和导水构造规模变化时的若干模型,分别研究其导电性和规模变化时的视电阻率特征的变化情况。

2 导电性变化对视电阻率的影响

图 3 为断层裂隙带电性变化时的视电阻率等值线图.裂隙位于横坐标方向 62.5 m 处,沿测线轴向方向裂隙发育宽度为 15 m.

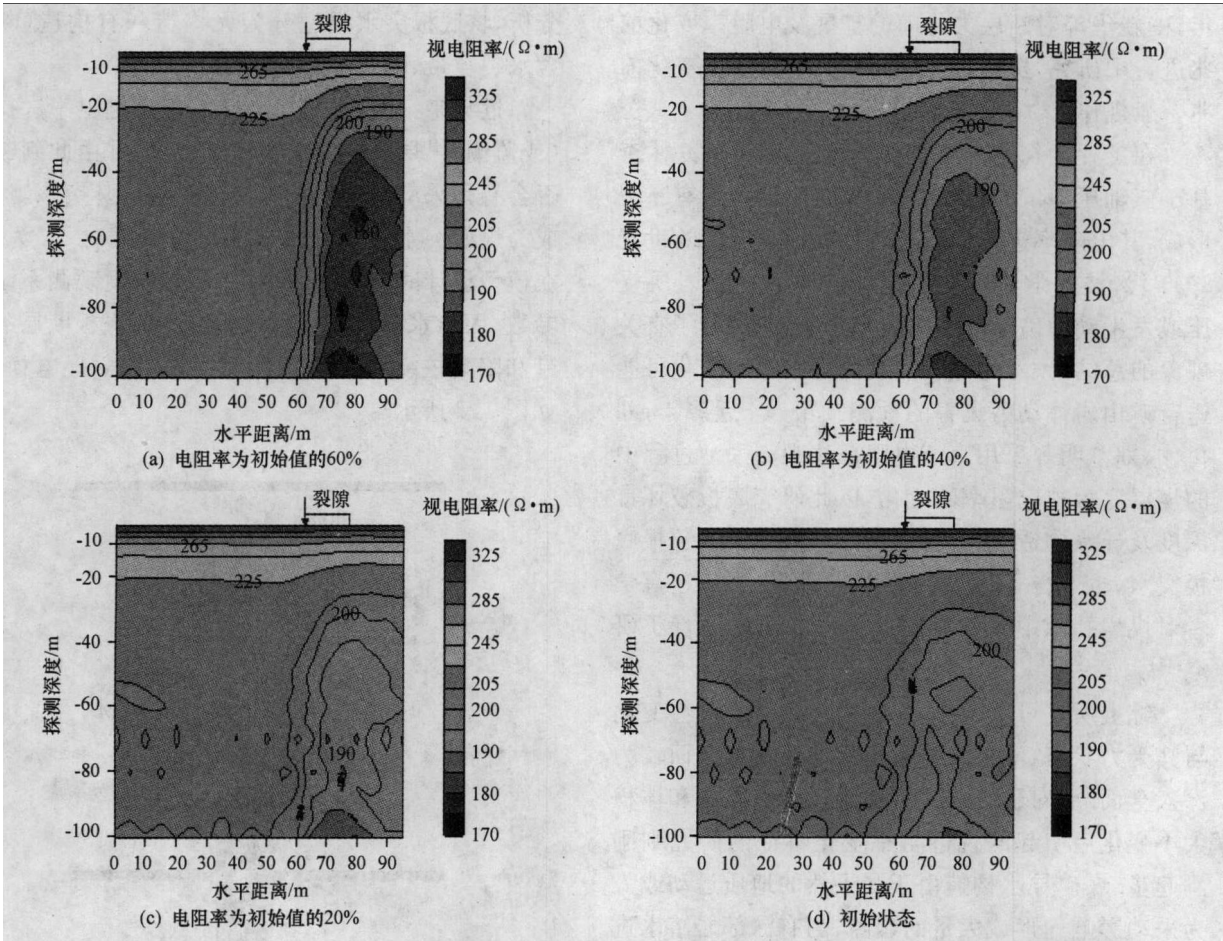


图 3 电性变化视电阻率等值线图
Fig. 3 Apparent resistivity contour of electrical change

以 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 为界,图中开始出现明显变化的区域都在横向位置 60 m 以后,故选择 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 为划分低阻异常区,由以上模拟的 4 种情况可看出,图 3a,b,c 中的低阻异常区的范围与图 3d 中的情形基本一致,异常区范围并没随着裂隙带的电阻率的降低而发生明显变化.同时,从 4 幅图中可看出,大约在横坐标 60 m 的位置处,开始出现较为明显的低阻区域,这说明在保持导水构造空间位置

不变的前提下,只降低导水构造的电阻率,低阻异常区开始出现的横向位置基本保持一致,并没有明显变化;但低阻异常区在深度方向上的变化略有不同,导水构造的电阻率值越低,等值线开始出现波动的深度越接近导水构造的真实深度(15 m),异常区内包含的更低阻值的区域也逐渐增多.除此之外,横向上,其他区段视电阻率比较均匀,浅部受高阻巷道和煤层的共同影响,视电阻率值较高;深部

视电阻率值较低,更加接近背景值.

为了突出断层导水构造电阻率降低过程中探测结果的视电阻率特征的变化,可以把电阻率变化

后的等值线图与初始等值线图做差值处理,即将 3a,b,c 三图与 3d 图的网格文件做减法,然后将相减之后的网格文件成图 4,方便进一步分析.

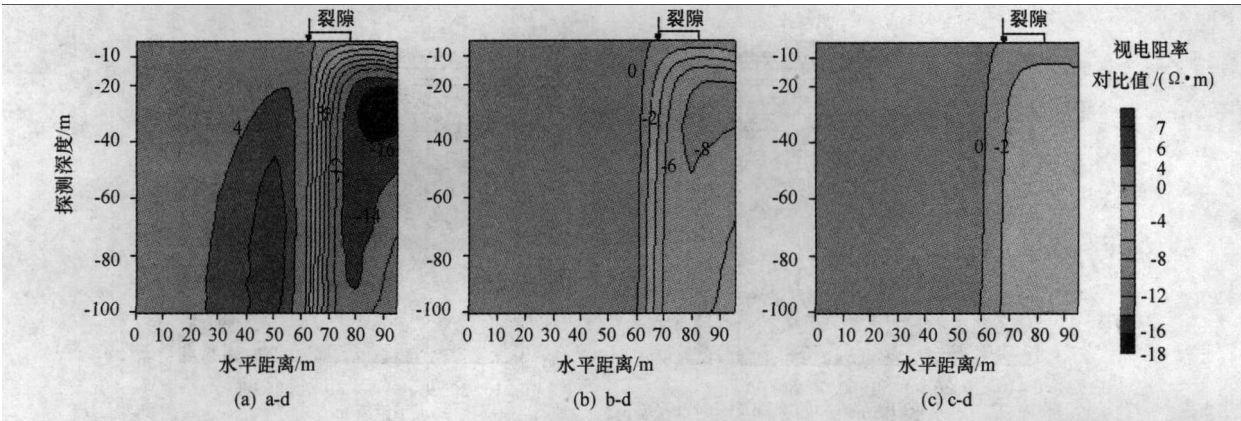


图 4 视电阻率对比图
Fig. 4 Comparison chart of apparent resistivity

通过分析图 3,4 可以发现,当导水构造的电阻率降低 20%,减为 $80\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,图 3c 中的低阻异常区内开始出现零星的视电阻率值低于 $190\ \Omega\cdot\text{m}$ 的区块,但是这一变化与图 3d 相比并不明显,与此同时,视电阻率值低于 $195\ \Omega\cdot\text{m}$ 的区域范围明显大于图 3d 中的区域,这表明,在导水构造的电阻率减少小于 20% 的情况下,其电性变化不足以引起明显的视电阻率特征变化(图 4c). 当导水构造电阻率减少 40% 的时候,对应图 3b 中低于 $190\ \Omega\cdot\text{m}$ 的区域显著增多,明显有别于图 3c,d,这时的视电阻率特征变化比较明显,视电阻率值相对于初始值降低了约 5%(图 4b). 当导水构造的电阻率进一步降低,减少 60% 时,对应图 3a 中低于 $190\ \Omega\cdot\text{m}$ 的区域范围占到整个低阻区域范围的 90% 左右,阻值更低($185\ \Omega\cdot\text{m}$)的区域范围甚至多于图 3b 中低于 $190\ \Omega\cdot\text{m}$ 的区域范围,这时,视电阻率值相对于初始值降低了约 7.5%(图 4a),视电阻率特征变化更为明显. 通过分析上述情况可以发现,在导水构造保持空间位置、规模大小不变的情况下,当电性变化程度超过 20% 后,导水构造的视电阻率特征变化才开始明显,视电阻率值随导水构造电阻率的降低而降低,但是其降低程度远低于导水构造电阻率降低的幅度,这主要是受电法勘探体积效应的影响,因此可以推知,当构造埋藏越深,其电法勘探的反应越不明显,视电阻率值随导水构造电阻率降低而降低的程度也越小.

3 导电体规模变化对视电阻率的影响

图 5 为陷落柱导水裂隙规模变化时的视电阻率等值线图. 陷落柱的初始体积设为 $15\ \text{m}\times 15\ \text{m}$

$\times 200\ \text{m}$,属于煤田常见陷落柱中规模较小的一类,水平距离距测线约为 65 m;保持陷落柱的电阻率不变,长和宽依次以 1 倍于初始值递增,相应的与测线之间的水平距离依次变为 50,35 和 20 m,即随着陷落柱的体积增大,愈靠近测线. 由于预设的陷落柱截面为正方形,因此,随着陷落柱规模的依次增大,陷落柱沿测线轴向方向长度依次增加到 15,30,45 和 60 m.

由图 5a 可以看出,当陷落柱发育的规模较小,且水平距离测线较远的情况下,电法勘探对它的反映很不明显,等值线图上的浅部受到高阻的巷道和煤层共同影响,视电阻率值较高;深部视电阻率值较低,而且电阻率值分布非常均匀,接近背景值;随着陷落柱的长度和宽度各增加 1 倍,高度保持不变,体积相对于初始值增加 4 倍,等值线图上的深部开始出现小范围的低阻区域,但整体反映依然不明显,图 5b 中的情形与图 5a 中的情形大体一致,两图中视电阻率特征变化基本不大.

随着陷落柱的长度和宽度再一增加 1 倍,体积相对于初始值增加 9 倍之后,等值线图明显有别于前两幅图,视电阻率特征出现较为明显的变化. 图 5c 中横坐标大约 30 m 处的深部开始出现范围较大的视电阻率值低于 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 的区域,其原因一方面是导水构造的体积进一步增加,勘探区域内整体电阻率有所下降,另一方面,随着陷落柱体积的增加,其距测线的距离更近,有更多的电流受低阻体的“吸引”,这是由于接收电极附近的电流密度更大造成的. 将导水陷落柱体积再次增大,达到初始值的 16 倍,视电阻率特征进一步变化,等值线图上的低阻区域范围进一步扩大,视电阻率值也有所降

低(图 5d). 分析上述数值模拟结果可以发现,当导水构造的规模增大为初始规模的 4 倍以后,其反映才比较明显,且越靠近测线,反映越灵敏. 图 5c,d

中开始出现低阻区域的横向坐标均与导水构造的空间横向位置相对应. 这表明,在有效勘探范围内,三极法容易发现陡立的良好导体.

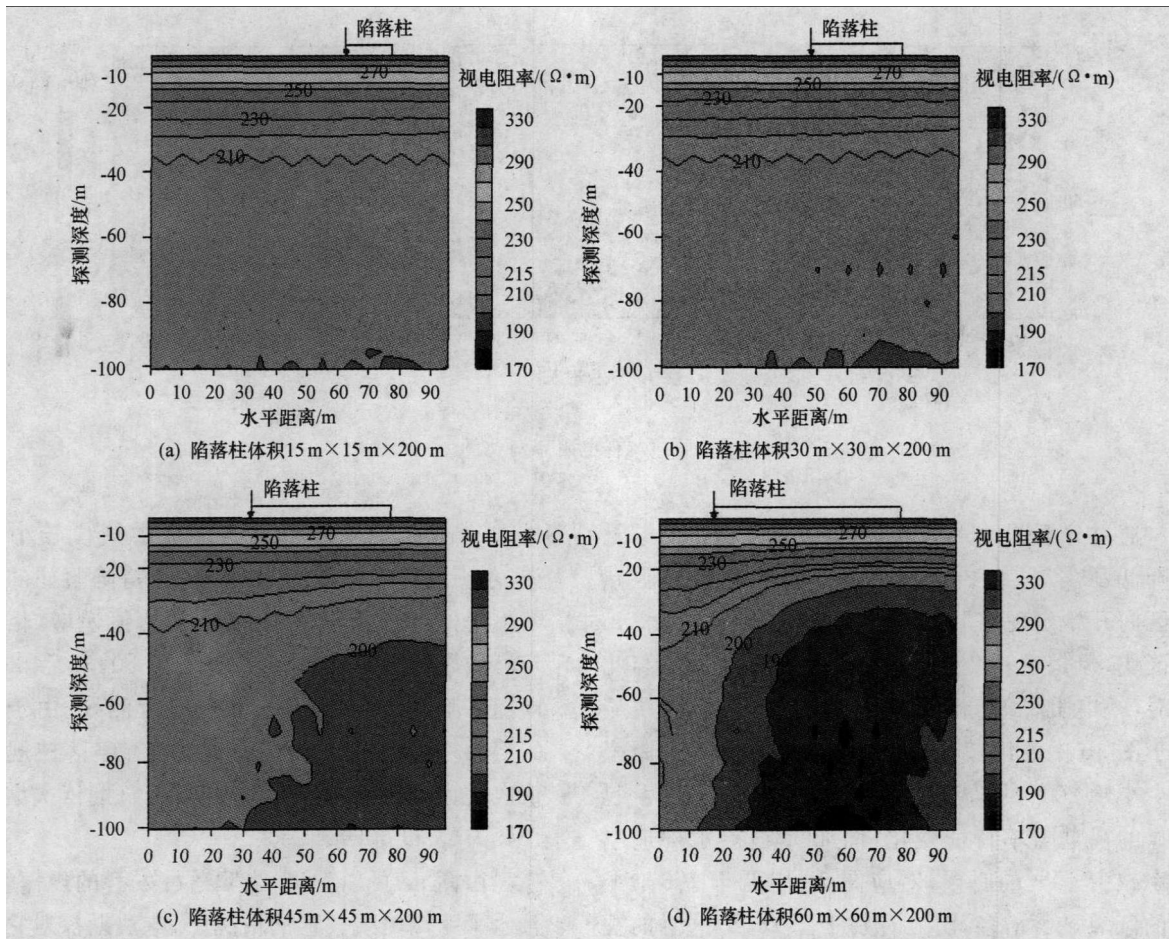


图 5 规模变化视电阻率等值线图
Fig. 5 Apparent resistivity contour of size change

4 结 论

1) 在保持导水构造空间位置和规模尺寸不变的情况下,等值线图中异常区域的横向位置和范围基本不随其导电性变化而变化;在导水构造的电性变化小于 20% 时,其视电阻率特征变化不明显;当导水构造的电性变化高于初始值 20% 时,视电阻率特征开始变化明显,其趋势是随着导电性变化幅度的增加,视电阻率值明显减低,但是视电阻率值的变化程度明显小于其真电阻率的变化程度.

2) 若保持导水构造视电阻率不变,当其规模增大程度小于初始值的 4 倍时,等值线图中异常区域反应不明显,当其规模增大至初始值的 4 倍以上时,等值线图中异常区域的才出现明显增多的情况. 其趋势是随着导电构造体积规模的增加,视电阻率值明显降低,视电阻率的变化程度与导电构造的体积规模成正比,即体积越大,视电阻率变化程度越明显.

3) 通过模拟发现,三极法对良导陡立目标体的反映比较明显. 所以,在进行矿井直流电法探测时,尽量将测线布置在靠近勘探目标的巷道中.

4) 影响视电阻率变化的因素很多,而且各种因素之间彼此影响,关系异常复杂,本次研究内容只是初步尝试. 在后续工作中,在尽量减少或排除其它影响因素的情况下,还应结合导水构造的导电性和规模同时变化的情况进行综合分析.

本次数值模拟的意义在于,研究煤矿导水构造电性变化(导电性、规模)与电法观测结果之间的某种较为简单的关系,为煤矿井下实测资料解释分析提供参考依据,达到对煤矿导水构造进行精细解释的目的,提高矿井电阻率法监测技术的精度.

参考文献:

[1] 李德春,葛宝堂,舒继森. 岩体破坏过程中的电阻率变化试验[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(5):491-493.

- LI De-chun, GE Bao-tang, SHU Ji-sen. Experiment of resistivity variation of rocks in failure process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(5): 491-493.
- [2] 王新华. 前兆电阻率的实验研究[J]. 华北地震科学, 1984, 2(1): 70-75.
- WANG Xin-hua. Experimental study of precursor resistivity [J]. North China Earthquake Sciences, 1984, 2(1): 70-75.
- [3] KPAEB A II. Geoelectrical Principle[M]. 张可迁, 陈培光, 译. 北京: 地质出版社, 1954: 333-340.
- [4] BRACE W F. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and fractional sliding[J]. Geophysical Research, 1968, 73(4): 1170-1178.
- [5] 陈大元, 陈峰, 王丽华, 等. 单轴压力下岩石电阻率的研究—电阻率的各向异性[J]. 地球物理学报, 1983, 26(增刊): 783-792.
- CHEN Da-yuan, CHEN Feng, WANG Li-hua, et al. Study of rock resistivity under uniaxial press-Anisotropy of resistivity[J]. Acta Geophysica Sinica, 1983, 26 (Supp): 783-792.
- [6] 钱家栋, 陈有发, 安金忠. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [7] 陆阳泉, 王玉祥, 温新民. 受压岩(土)体地电阻率变化的原地实验及大地震前后地电异常的初步分析[C]//第二届构造物理学术讨论会文集. 北京: 地震出版社, 1990: 158-168.
- [8] 钱复业, 赵玉林, 黄燕妮. 地电阻率各向异性参量计算及地震前兆实例[J]. 地震学报, 1996, 18(4): 480-488.
- QIAN Fu-ye, ZHAO Yu-lin, HUANG Yan-ni. Anisotropic parameters calculation of earth resistivity and seismic precursory examples [J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(4): 480-488.
- [9] 毛桐恩, 王铁城, 姚家榴, 等. 唐山地震地电阻率各向异性变化研究[J]. 地震学报, 1995, 17(4): 505-510.
- MAO Dong-en, WANG Tie-cheng, YAO Jia-liu, et al. On study of the anisotropic variation of earth resistivity of the Tangshan earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(4): 505-510.
- [10] 杜学彬, 阮爱国, 范世宏, 等. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, 2001, 23(3): 289-297.
- DU Xue-bin, RUAN Ai-guo, FAN Shi-hong, et al. Anisotropy of the variation rate of apparent resistivity near the epicentral region of strong earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(3): 289-297.
- [11] 王新华, 齐贵仲, 赵玉林. 断层失稳前的扩展及电阻率前兆[J]. 中国科学: B辑, 1984, 11: 1026-1038.
- WANG Xin-hua, QI Gui-zhong, ZHAO YU-lin. Expansion and precursor electrical resistivity before faults failure[J]. Science in China: Ser B, 1984, 11: 1026-1038.
- [12] 钱家栋. 地震地电学译文集[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [13] STOPINSKI W, TEISSEYRE R. Precursory rock resistivity variations related to mining tremors[J]. Acta Geophys, 1977, 30(4): 293-320.
- [14] 刘树才. 煤矿底板突水机理及破坏裂隙带演化动态探测技术[D]. 徐州: 中国矿业大学资源与地球科学学院, 2008.
- [15] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 348-356.
- LIU Shu-cai, LIU Xin-ming, JIANG Zhi-hai, et al. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 348-356.
- [16] 刘鑫明. 煤矿底板破坏带动态监测技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学资源与地球科学学院, 2009.
- [17] 刘保县, 徐龙君, 鲜学福, 等. 煤岩多孔介质及其充瓦斯后的电特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1861-1866.
- LIU Bao-xian, XU Long-jun, XIAN Xue-fu, et al. Study on electrical properties of rock-coal porous media with gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1861-1866.
- [18] 刘树才, 岳建华, 刘志新. 煤矿水文物探技术与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- [19] 赵贤任. 煤层底板破坏带电流场特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学资源与地球科学学院, 2008.
- [20] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 华北煤矿区岩溶陷落柱特征及成因探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 120-123.
- YIN Shang-xian, WU Qiang, WANG Shang-xu. Studies on characters and forming mechanism of karstic collapse columns at mine area of north china [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 120-123.
- [21] 张茂林, 尹尚先. 华北型煤田陷落柱形成过程研究[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(6): 26-29.
- ZAHNG Mao-lin, YIN Shang-xian. Forming process of subsided column in coalfields of North China[J]. Coal Geology and Exploration, 2007, 35(6): 26-29.
- [22] 刘天放, 李志聘. 矿井地球物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.