

三维直流电法三极装置的底板多含水层 异常响应特征分析

孙文斌¹, 邹旭², 孔维滕¹, 曹晰¹, 韩宜珠¹, 陈厚承², 孙硕², 高卫富²

(1. 山东能源集团南美有限公司 北京探创资源科技股份有限公司, 山东 邹城 273500;

2. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为了保障华北型煤田下组煤的安全开采, 需提高底板岩层富水性探查的准确性。针对矿井直流(DC)电法直接圈定低阻区容易产生误判的问题, 本研究基于 COMSOL 全空间模拟平台, 结合翟镇煤矿 15 煤层底板岩层特征, 构建了徐灰、奥灰层低阻体地电模型, 分析并总结了直流电法对多层低阻异常的响应特征。研究显示: 当徐灰层存在低阻体时, 无论奥灰层是否存在低阻体, 均呈现明显的低阻异常响应; 仅奥灰层存在低阻体时, 低阻异常响应效果不明显, 易被掩盖。根据上述响应特征, 提出采用三极装置电流密度比值法与三维反演数据体分析相结合的方法, 探究奥灰层异常响应特征。以翟镇煤矿 11503E 工作面为研究对象, 绘制底板 60 m 处(奥灰顶部)的视电阻率等比值线图, 圈定出奥灰层低阻异常区。现场揭露结果与分析结果相吻合, 说明该研究方法具有可行性和适用性。

关键词: 富水性探查; 直流电法; 响应特征; 三极装置; 三维反演; 比值法

中图分类号: TD745

文献标志码: A

Characteristic analysis of anomaly responses in floor multi-aquifers using a 3D DC pole-dipole array

SUN Wenbin¹, ZOU Xu², KONG Weiteng¹, CAO Xi¹, HAN Yizhu¹,

CHEN Houcheng², SUN Shuo², GAO Weifu²

(1. Beijing Exploration Resources Technology Co., Ltd., Shandong Energy Group South

America Co., Ltd., Zoucheng 273500, China;

2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To ensure the safe mining of the lower coal seams in North China-type coalfields, it is essential to improve the accuracy of water-rich zone detection in the floor strata. To address the issue of potential misinterpretation when mine direct current (DC) resistivity method is used for direct delineation of low-resistivity zones, this study constructed a geoelectrical model of low-resistivity anomalies within the Xuhui and Ordovician limestone aquifers based on the characteristics of the floor strata of the No. 15 coal seam in Zhaizhen Coal Mine, utilizing the COMSOL full-space simulation platform. It then analyzed and summarized the response characteristics of the DC method to multi-layered low-resistivity anomalies. The results indicate that when a low-resistivity anomaly exists in the Xuhui aquifer, a significant low-resistivity response is observed regardless of the presence of an anomaly in the Ordovician limestone aquifer. However, when a low-resistivity anomaly exists only in the Ordovician limestone aquifer, the response is weak and can easily be masked. Based on these response

收稿日期: 2025-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807283)

作者简介: 孙文斌(1989—), 男, 江西抚州人, 高级工程师, 主要从事矿井物探研究。

高卫富(1983—), 男, 山东淄博人, 副教授, 博士, 主要从事矿井物探研究, 本文通信作者。

E-mail: gaoweifu-2006@163.com

characteristics, an analytical approach combining the current density ratio method using a pole-dipole array with 3D inversion data was proposed to investigate the anomalous response within the Ordovician limestone aquifer. Taking the 11503E working face in Zhaizhen Coal Mine as a case study, this study generated an apparent resistivity iso-ratio contour map at a depth of 60 m below the coal seam floor (corresponding to the top of the Ordovician limestone aquifer), and delineated the low-resistivity anomalous zones within the Ordovician limestone. Field verification confirmed the consistency with the analytical results, showing the feasibility and applicability of the proposed method.

Key words: water abundance detection; DC method; response characteristics; pole-dipole array; 3D inversion; ratio method

近年来,华北型煤田上组煤开采已基本完成,当前进入下组煤层开采阶段。随着开采深度的增加,地质条件更加复杂^[1]。根据《煤矿防治水细则》规定,工作面采前需要进行底板岩层富水性探查,圈定低阻异常区,为防治水工作提供基础资料,确保工作面安全开采。目前,用于探查工作面岩层富水性的方法有瞬变电磁法、核磁共振技术、可控源音频大地电磁法及直流电法。瞬变电磁法具有对低阻体敏感、施工方便等特点^[2],但工作面周围存在大量磁性体,导致采集数据不准,影响探查结果。核磁共振技术基于水中氢核的顺磁特性,通过接收水体产生的核磁共振信号可直接区分地下水与其他低阻体^[3]。核磁共振技术具有目标特异性强,分辨率高等优点^[4],但因抗电磁干扰能力弱、仪器成本高等因素制约,尚未成为巷道探水的主流方法。可控源音频大地电磁法具有对低阻体敏感、深部探测能力强等特点^[5],但由于观测系统布设于地表,该方法探测分辨率低于井中物探方法,探测成果需要依靠钻探数据进行验证和约束。直流电法因其理论成熟^[6]、对低阻体敏感^[7]、受巷道内金属体干扰影响较小^[8]的优点,被广泛应用于矿井物探中。岳建华等^[9]结合应用实例,分别探讨了巷道底板电测深法、矿井电剖面法和高密度电阻率法的资料处理与解释方法,为矿井直流电法的发展奠定了基础;陈泉霖等^[10]根据水、煤和围岩之间电阻率差异,采用直流电法探测矿井老窑区积水范围,保障矿井安全生产。武杰等^[11]采用三极断面测深技术探测井下含水构造,并通过实践证明其可行性。刘志新等^[12]利用直流电法对煤矿工作面进行电阻率成像,为矿井水防治提供保障。施龙青等^[13]将直流电法技术从传统的二维剖面发展为三维立体成像技术,具有形象直观的特点。通过上述矿井直流电法的发展可知,该方法已成为矿井探测的重要工具。尽管该方法工程布设量大、施工流程繁琐^[14],但在煤层底板岩层富水性的探测中,依然深受矿井工作者的青睐。

华北型煤田主要聚煤期为石炭—二叠纪,具有煤层多、厚度稳定、分布广泛等特点^[15]。目前,华北型煤田已进入深部开采阶段,工作面底板出现两层及多层含水层相邻情况^[16]。多数直流电法在解释过程中存在电阻率垂向分辨率低^[17]和结果具有多解性的问题,仅凭圈定“低阻异常”无法精确确定底板富水区的层位。例如,翟镇煤矿 15 煤层开采过程中,底板主要含水层是徐灰含水层及奥灰含水层,距离煤层底板的间距分别为 25、60 m。在传统成果解释中发现,无论奥灰层是否含水,低阻异常仅在徐灰层出现明显响应,因此,物探工作者在徐灰层圈定低阻异常区。但钻探揭露后发现,徐灰层位不含水,奥灰层位富水性较强,导致对含水层富水性的判定出现失误。为防止工作面开采过程中出现底板突水事故,需要对底板多含水层异常响应特征进行分析和研究。

目前,研究直流电法的常用商业软件有 RES2D、RES3D、AGI 等,多数基于地面半空间理论开发,不能准确模拟矿井全空间电场分布。为了实现矿井全空间电场研究,本研究选用 COMSOL Multiphysics 软件,该软件可建立三维全空间地质模型,支持多物理场仿真,能够实现复杂矿井直流电法模拟。前人^[18-19]利用 COMSOL 进行了巷道超前探方面的研究,并取得了较好的效果。然而,现有研究多聚焦于巷道超前探测,鲜有学者利用 COMSOL 软件开展工作面研究。本研究借助 COMSOL 平台构建全空间直流电法探测多含水层低阻异常模型,对不同含水层低阻异常体进行数值模拟,分析直流电法对不同含水层低阻体的异常响应,总结多含水层低阻异常响应特征,为准确圈定工作面底板多含水层低阻异常区奠定理论基础。最后,结合翟镇煤矿 11503E 工作面工程实例,验证该研究的实用性和推广价值。

1 底板多含水层直流电法数值模拟

1.1 工程地质背景

研究中地电模型的资料来源于翟镇煤矿 11503E 工作面底板部分岩层柱状图(图 1),柱状图截取累计深度为 35.27~75.81 m,徐灰层顶界面距 15 煤层底板 25.43 m,视电阻率为 $3\ 000\sim 3\ 500\ \Omega\cdot\text{m}$,局部夹灰绿色黏土层,徐灰层至草灰层厚度为 27.69 m,在建立地电模型时简化为徐灰层厚度 27 m。奥灰层顶界面距 15 煤层底板 62.34 m,视电阻率为 $3\ 000\sim 3\ 500\ \Omega\cdot\text{m}$,徐灰层和奥灰层之间夹有 9.22 m 的黏土层,视电阻率为 $20\sim 30\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

矿区资料显示,观测孔揭露徐灰层富水性弱,涌水量为 $1\sim 5\ \text{m}^3/\text{h}$,水压较小,但富水性差异大,富水区分布不均。奥灰层为煤系基底,是开采下组煤的间接充水含水层,局部岩溶裂隙发育。11503W 工作面奥灰观测孔数据显示:钻孔总长 160 m,进入奥灰段长 98.9 m,揭露奥灰涌水量为 $0.4\ \text{m}^3/\text{h}$,水压为 1.8 MPa。15 煤层运输巷奥灰观测孔数据显示:钻孔总长 100.4 m,进入奥灰段长 34 m,揭露奥灰涌水量为 $25.2\ \text{m}^3/\text{h}$,水压为 2.8 MPa。以上数据说明奥灰层不同孔段水压差异大,富水性不均一,灰岩局部岩溶发育,富水性较强。

1.2 数值模拟流程

本研究采用 COMSOL 软件进行三维直流电法正演模拟,主要步骤包括:建立地电模型,完成物理场赋值与材料属性添加、网格剖分、数值计算和后处理分析。

首先,根据实际资料,基于 COMSOL 有限元软件 AC/DC 模块,选用电流物理场进行稳态模拟研究,构建低阻异常体处于不同层位下的全空间直流电法地电模型(图 2)。

其次,在完成地电模型构建与材料属性定义后,进行三维网格剖分。通过网格剖分将几何模型与有限元计算相联系,模型中各地电结构(巷道、围岩、徐灰层、奥灰层、黏土层、异常体)均采用自由四面体网格细化剖分,平均网格质量为 0.688 5,符合精度要求。

再次,完成模型剖分后进行模拟计算。对模型供电后,先计算各测点的电位值,再计算电阻率。

最后,将计算得到的电阻率导出后,根据需要绘制图件,分析电阻率的异常响应。

1.3 地电模型参数设置及测试模型构建

地电模型参数为:设置半径 1 000 m 的球体,并将球体分层,设置为外层无限元域(厚度为 10 m)和内层围岩(厚度为 990 m),模拟全空间围岩环境。设置总体模型宽 $\times$ 深 $\times$ 高为 $420\ \text{m}\times 50\ \text{m}\times 120\ \text{m}$,居于点(0,0,0)处;巷道模型宽 $\times$ 深 $\times$ 高为 $420\ \text{m}\times 6\ \text{m}\times 6\ \text{m}$,居于点(0,0,57)处。徐灰层模型宽 $\times$ 深 $\times$ 高为 $420\ \text{m}\times 50\ \text{m}\times 27\ \text{m}$,居于点(0,0,15.5)处;奥灰层模型宽 $\times$ 深 $\times$ 高为 $420\ \text{m}\times 50\ \text{m}\times 54\ \text{m}$,居于点(0,0,-33)处。以图 1 所示的视电阻率测井曲线为参考,地电模型各组成部分的电阻率参数设定为:围岩电阻率为 $300\ \Omega\cdot\text{m}$,徐灰、奥灰层电阻率为 $3\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,巷道电阻率为 $1\times 10^6\ \Omega\cdot\text{m}$,黏土层电阻率为 $20\ \Omega\cdot\text{m}$ 。将电流加载至一点,模拟供电电极,电流设置为 1 A,电势初始值为 0。

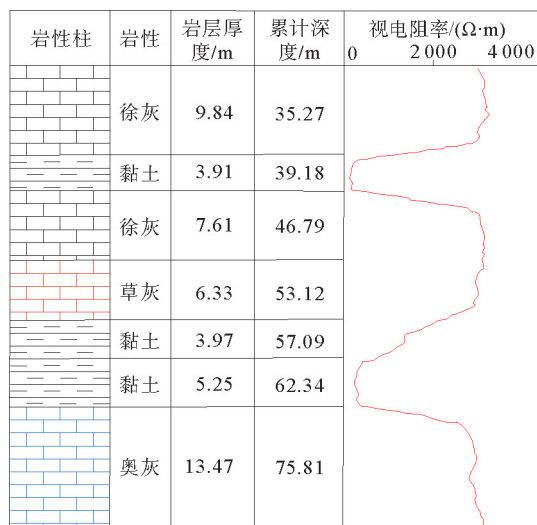


图 1 11503E 工作面底板部分岩层柱状图

Fig. 1 Histogram of some rock layers on the floor of 11503E working face

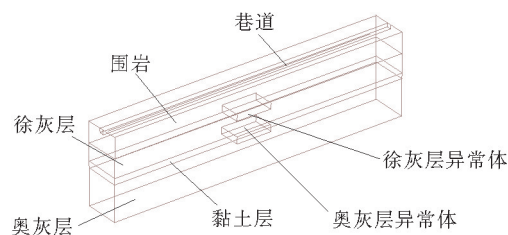


图 2 地电模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the geoelectric model

为研究地电模型在不同参数下的响应特征,构建了以下 3 个模型,模型剖面示意图如图 3 所示。

1) 模型 1。仅上部地层含异常体,此时模型为徐灰含水层存在低阻异常体,奥灰含水层不存在低阻异常体。在地电模型中设置一异常体模型,宽×深×高为 50 m×30 m×10 m,居于点(0,0,16)处,异常体电阻率设置为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 。

2) 模型 2。两个地层均含异常体,此时模型为徐灰、奥灰含水层同时存在低阻异常体。在模型 1 的基础上,奥灰含水层加入一低阻异常体,位于点(0,0,-15)处,异常体电阻率设置为 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 。

3) 模型 3。仅下部地层含异常体,此时模型为奥灰含水层存在低阻异常体,徐灰含水层不存在低阻异常体。在模型 2 的基础上,删除徐灰含水层的异常体。

1.4 三极装置联合测量模拟方案

数值模拟过程中,使用三极 AMN 和 MNB 装置联合跑极测得一条测线数据。相较于四极装置测得的梯形视电阻率剖面,该三极装置受供电电极点位限制小,更灵活,可测得矩形剖面。在相同电极距条件下,三极装置具有采集数据点多、探测深度大、垂向分辨率高、电阻率横向变化对数据质量影响小及数据更稳定等优势^[20]。三极装置联合跑极方式如图 4 所示,其中 M、N 为测量电极,A、B 为供电电极,数据记录点为测量电极中点。根据测深深度 H 为 0.5 倍供电电极距(AO 或 OB)的经验公式,模型设置 400 m 测线,满足研究深度的需求,单位电极间距为 10 m,共 40 个模拟电极点位,即 1 号点位坐标为(-200,0,54),40 号点位坐标为(190,0,54)。

以 MNB 装置为例:M 位于 1 号点位、N 位于 3 号点位时,A 电极接无穷远,B 电极向右逐点移动,NB 间距由单位间距逐渐增大至测线长度的一半,探测深度随之增大,测得该点位各深度的视电阻率。同步移动 M、N 电极并重复上述跑极方式,直至 M、N 位于 19 号点位与 21 号点位,得到左半测线视电阻率剖面数据。同理,采用 AMN 装置得到右半测线的视电阻率剖面数据。

利用公式(1)和(2)将模拟电位换算成视电阻率,三极 AMN 和 MNB 装置的全空间视电阻率计算公式分别为:

$$\rho_{sa} = 4\pi \cdot \frac{l_{AM} \cdot l_{AN}}{l_{MN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I}, \quad (1)$$

$$\rho_{sb} = 4\pi \cdot \frac{l_{MB} \cdot l_{NB}}{l_{MN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I}. \quad (2)$$

式中: ρ_{sa} 为 AMN 装置的视电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ρ_{sb} 为 MNB 装置的视电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ΔU_{MN} 为 M、N 点之间的电势差,V; I 为供电电流,A; l_{AM} 、 l_{AN} 、 l_{MN} 、 l_{MB} 、 l_{NB} 分别为电极 A、M、N、B 对应的电极间距,m。

1.5 数值模拟可行性验证与计算实现

为验证利用 COMSOL 软件开展直流电法正演模拟^[21]的可行性,本研究构建了简化验证模型:除巷

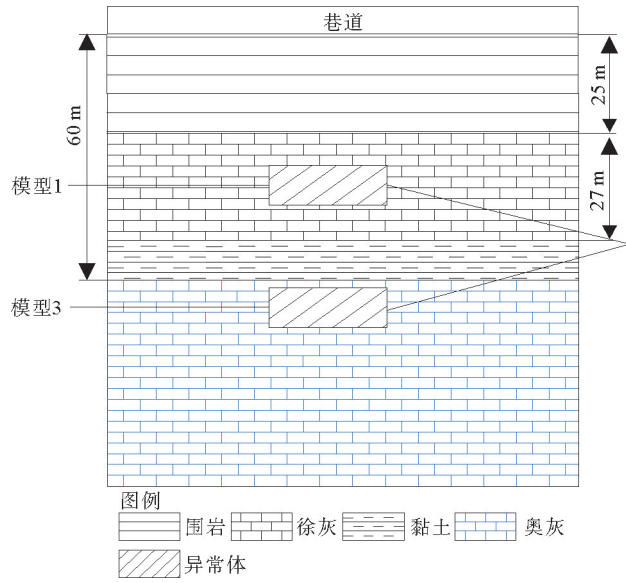


图 3 模型剖面示意图

Fig. 3 Schematic view of the model section

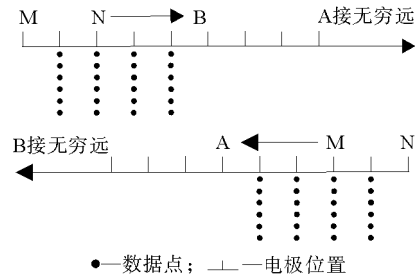


图 4 三极测量装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the pole-dipole array

道结构外,将上述地电模型的其他地电结构均赋值为围岩电阻率($300 \Omega \cdot \text{m}$),模拟直流电法在均质地层下的视电阻率响应,并将视电阻率值与理论值进行对比分析。

模拟中将测量电极 M、N 分别固定于 $x = -10 \text{ m}$ 、 $x = 10 \text{ m}$ 处,通过移动供电电极 A,得到了不同探测深度的视电阻率。模拟结果与理论值的相对误差见表 1。

表 1 COMSOL 正演模拟相对误差表

Table 1 COMSOL forward simulation relative errors

电极 A 位置/m	视电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	相对误差/%	电极 A 位置/m	视电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	相对误差/%
-200	297.55	0.816	-100	298.20	0.600
-190	298.00	0.667	-90	297.75	0.750
-180	298.02	0.660	-80	296.99	1.003
-170	298.14	0.620	-70	296.29	1.237
-160	298.11	0.630	-60	299.77	0.077
-150	298.38	0.540	-50	294.15	1.950
-140	298.25	0.583	-40	314.90	4.967
-130	298.33	0.557	-30	316.10	5.367
-120	298.13	0.623	-20	317.80	5.933
-110	298.19	0.603			

由表 1 可知,视电阻率的相对误差随着电极 A 靠近电极 M 而不断增大,呈现从深部到浅部增大趋势,最大相对误差约为 5.933%;中部深度的视电阻率误差最小,数据质量可靠性高。为了提高模拟的准确性,文章剔除了浅层数据,确保正演模拟有效开展。

根据上述模拟流程和测量方式,分别对模型 1、模型 2、模型 3 进行模拟计算,得到模型的电阻率。

2 低阻异常响应特征分析

根据现场徐灰和奥灰的地层深度,本研究采用不同深度的视电阻率曲线,分析不同模型的低阻异常响应。徐灰层和奥灰层距离煤层底板的深度分别为 25 和 60 m,结合异常体地电模型位置,分别提取 35 和 70 m 深度的视电阻率数据,绘制三种模型下对应深度的视电阻率曲线(图 5),分析直流电法对低阻异常体的异常响应。

通过分析图 5,得到以下结论。

1) 在 35 m 深度处,徐灰、奥灰层均含异常体模型的视电阻率曲线响应效果最明显;仅徐灰层含异常体模型的视电阻率曲线响应效果次之。二者均在测线 175~225 m 呈现相对低阻响应,整体响应幅度相差不大。仅奥灰层含异常体模型中,由于深部奥灰层含低阻体,观测深度有限,响应不明显,同时受徐灰层的高阻背景值影响,35 m 深度的视电阻率曲线高于 70 m 深度处。

2) 在 70 m 深度处,徐灰、奥灰层均含异常体模型的视电阻率曲线响应效果优于仅徐灰层含异常体模型,两者均在异常体模型的边界附近呈现极大值,表现为相对高电阻率响应,在测线 200~225 m 呈现极小值,即相对低电阻率响应。仅奥灰层含异常体模型的视电阻率曲线在测线 175~200 m 出现极小值,为

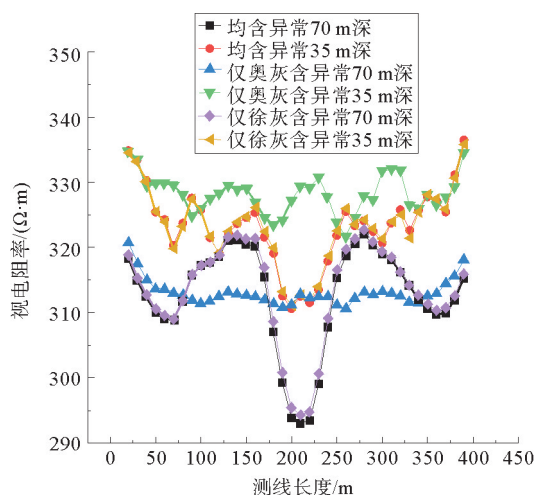


图 5 35 m 和 70 m 的视电阻率曲线图

Fig. 5 Apparent resistivity curve of the length of 35 m and 70 m

相对低阻响应,曲线整体呈现低阻趋势,响应效果仍不明显。

通过上述视电阻率响应特征可知,徐灰层低阻体响应干扰极易掩盖奥灰层弱低阻响应,难以分辨奥灰层是否含低阻体,仅根据视电阻率曲线变化特征圈定低阻异常区,容易产生误判。本研究采用电流密度比值法,通过定量对比不同模型中电流密度比值差异并分析成因,能够有效压制徐灰层低阻响应的干扰,提升对奥灰层低阻异常响应的识别能力。因此,采用比值分析法研究奥灰层异常响应,绘制奥灰层深度视电阻率等比值线图,从而实现对奥灰层位低阻响应的有效识别。

视电阻率的微分形式可表述为:

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN} \quad (3)$$

式中: ρ_s 为视电阻率值, $\Omega \cdot m$; ρ_{MN} 为 MN 处电阻率,即围岩电阻率值, $\Omega \cdot m$; j_{MN} 为 MN 处的电流密度, $A \cdot m^{-2}$; j_0 为电场均匀时的电流密度, $A \cdot m^{-2}$ 。

为分析 70 m 深度处异常体对电流密度的影响,需要去除图 3 地电模型中的异常体结构作为对比模型,即构建徐灰、奥灰层无异常体模型,并计算视电阻率比值,得到 70 m 深度处电流密度比值图(图 6)。

通过分析图 6,得到以下结论。

1) 徐灰、奥灰层无异常体模型中,徐灰、奥灰高阻地层间存在相对低阻值的黏土层,视电阻率曲线整体呈现一定程度的低阻响应。受徐灰高阻层影响,电流密度分布发生改变,浅层电流密度沿地层走向整体升高,使无异常体模型中电流密度比值的低值为 1.09~1.11。表明在特定地质结构(含徐灰高阻层)影响下,围岩视电阻率高于实际值。

2) 徐灰、奥灰层均含异常体模型与仅徐灰层含异常体模型的电流密度比值的低值均为 0.97~0.98。表明两种模型的异常响应主要受徐灰层低阻体影响,该低阻体促使电流向下发生明显聚集,导致测量电极 MN 处电流密度降低,产生显著的低阻异常响应。

3) 仅奥灰层含异常体模型中,电流密度比值的低值为 1.03~1.04,该数值低于徐灰、奥灰层均无异常体模型的基准低值,这一差异表明深部奥灰层低阻异常体对浅层电流密度的分布产生了影响。由于低阻体位置较深,对浅部电流的吸引效果相对微弱,最终表现出不明显的低阻响应。

基于上述分析,可以有效判断奥灰层是否含有低阻体。为进一步分析含水层视电阻率的横向变化特征,需绘制奥灰含水层位视电阻率等比值线图,进而圈定目标含水层的相对低阻异常区。本次模拟中,该方法采用 AMN 和 MNB 联合跑极方式,以 10 m 电极间距获取观测数据进行比值分析,视电阻率比值随观测参数和异常体大小变化而不同。在实际生产中,可以采集无低阻异常区段的数据作为预留参考值,结合上述分析结果判断奥灰层是否存在低阻异常,该方法具有一定的适用性。

3 工程实例验证

3.1 11503E 工作面观测系统设计

为了准确探查翟镇煤矿 11503E 工作面外侧底板低阻异常区,对 11503E 工作面底板岩层进行三维直流电法观测系统设计(图 7)。三维直流电法电极和电缆沿工作面环向布设:第 1 电极设于 11503 工作面运输巷 A13 点,后续沿着 11503E 工作面运输巷向外布设,此段布设 59 个电极;随后转入后十五下山巷道,继续布设至第 79 个电极;之后经巷道拐弯进入工作面轨道巷,最终完成 140 个电极的布设。电极极距为 10 m,采用三极装置,通过 AMN 和 MNB 联合跑极方式完成数据采集。

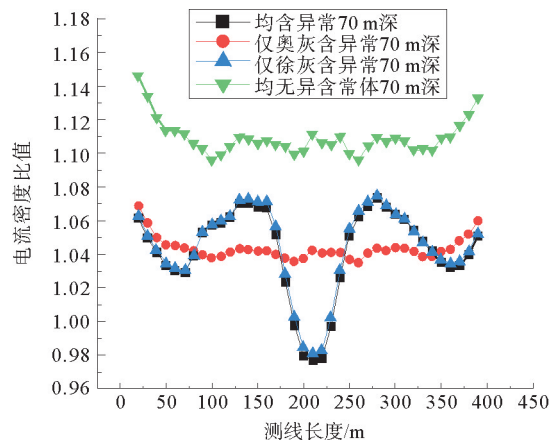


图 6 70 m 深度电流密度比值图

Fig. 6 Current density ratio map at the depth of 70 m

3.2 构建三维反演模型

数据采集完成后,进行数据预处理,首先剔除因个别电极接地电阻过大或受干扰而产生的数据突变点,避免影响后续数据处理。剔除突变点后,再对数据平滑处理,消除数据中的随机噪声干扰,提高信噪比,保证数据质量。

预处理完成后,建立三维坐标系统。本研究以 11503E 轨道巷道的方向为 X 轴方向,自第 80 电极向 X 轴做垂线,垂足为坐标原点,从原点指向 11503E 运输巷道的方向为 Y 轴。将原来的二维格式数据转换成三维数据格式,进而建立三维反演模型(图 8)。

以相邻电极点位作为构建单位模型的顶面四角,相邻电极间距分别对应单位模型的长度和宽度,第一层模型高度为 0.7 倍的单位电极间距,下层模型高度按 15% 的比例依次递增。为了提高反演精度,可以在 X 方向或 Y 方向采用半个电极距进一步细化模型,模型越细化,反演时间越长。模型构建完成后,采用圆滑约束最小二乘法构建反演目标函数。

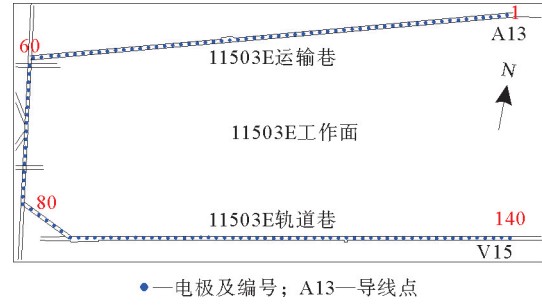


图 7 三维直流电法电极电缆布设图

Fig. 7 Electrode cable layout of 3D direct current method

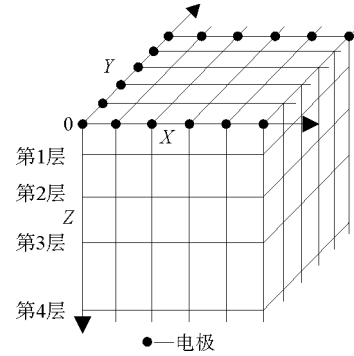


图 8 三维直流电法反演模型

Fig. 8 Inversion model of 3D direct current

$$f(\mathbf{x}) = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{x}))\|^2 + \lambda \|\mathbf{W}_x(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}})\|^2. \quad (4)$$

式中: $\mathbf{d}$ 为观测数据; $\mathbf{x}$ 为电阻率参数; $\mathbf{x}_{\text{ref}}$ 为背景电阻率参数; $\mathbf{W}_d$ 为数据加权矩阵, 其对角元素由观测数据 $\mathbf{d}$ 的标准差的倒数组成; $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 为正演理论数据; λ 为正则化参数; $\mathbf{W}_x$ 为模型约束矩阵, 对电阻率参数 $\mathbf{x}$ 施加光滑约束, 以抑制反演的多解性。该目标函数包含两项: 观测数据与正演理论响应之间的加权平方差, 反映拟合程度; 模型参数与初始参考模型之间的差值平方, 经光滑约束矩阵加权后, 抑制反演的多解性。两项之间通过正则化参数进行平衡。

反演过程使用拟牛顿法迭代计算, 如式(5)~(7)所示。在每次迭代时, 需要先构造近似的 Hessian 矩阵, 计算当前模型对应的正演理论数据及雅可比矩阵, 获得目标函数的梯度向量, 再依据 Hessian 矩阵与梯度向量确定模型修正方向, 通过一维线搜索确定最优步长, 对模型参数进行迭代更新, 直至目标函数达到收敛条件结束。反演流程图如图 9 所示。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mu_k \mathbf{B}_k^{-1} \nabla f(\mathbf{x}_k), \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k}, \quad (6)$$

$$\nabla f(\mathbf{x}_k) = -2\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_k)) + 2\lambda \mathbf{W}_x^T \mathbf{W}_x (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{ref}}). \quad (7)$$

式(5)~(7)中: $\mathbf{x}_k$ 和 $\mathbf{x}_{k+1}$ 分别为第 k 次和第 $k+1$ 次迭代后的电阻率参数向量; μ_k 为第 k 次迭代的步长, 由一维线搜索确定; $\mathbf{B}_k$ 为第 k 次迭代后的近似 Hessian 矩阵; $\nabla f(\mathbf{x}_k)$ 为目标函数 $f(\mathbf{x})$ 在 $\mathbf{x}_k$ 处的梯度向量; $\mathbf{J}$ 为雅可比矩阵; $\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$, $\mathbf{y}_k = \nabla f(\mathbf{x}_{k+1}) - \nabla f(\mathbf{x}_k)$ 。

本研究设初始电阻率参数为 $\mathbf{x}_0$ 和初始 Hessian 矩阵为 $\mathbf{B}_0$ 。首先对 $\mathbf{x}_0$ 进行正演计算, 得到正演理论数据 $\mathbf{F}(\mathbf{x}_0)$; 然后, 利用式(4)计算目标函数值 $f(\mathbf{x}_0)$ 以及残差 $(\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_0))$, 利用式(6)计算梯度 $\nabla f(\mathbf{x}_0)$; 进一步, 将 $f(\mathbf{x}_0)$ 、 $(\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_0))$ 、 $\nabla f(\mathbf{x}_0)$ 代入式(5)、(7), 得到新的电阻率参数向量 $\mathbf{x}_1$ 以及近似矩阵 $\mathbf{B}_1$ 。重复上述迭代步骤, 直至目标函数 $f(\mathbf{x}_k)$ 满足收敛条件终止。具体反演流程图如图 9 所示。

3.3 反演结果分析与验证

对数据进行反演迭代后,得到反演三维数据,将反演数据导入三维可视化软件处理,得到三维直流电法工作面底板岩层视电阻率比值数据体(图 10)和三维直流电法低阻异常体分布图(图 11)。由图 10 和图 11 可知,工作面视电阻率整体呈现西高东低的空间分布特征。西部绿色区域反映了围岩的电性特征,由于徐灰高层阻碍电流向下扩散,导致电流密度在浅部地层升高,使围岩视电阻率与理论值的比值约为 2,并以比值 2 作为背景场值。紫色区域为相对低阻区,主要分布在 30~50 m 深度,该区域的视电阻率与理论值的比值小于 1。仅根据整体视电阻率响应来圈定低阻异常区,容易忽略深部奥灰异常体的弱低阻响应,得出低阻异常区主要分布在徐灰含水层,奥灰含水层不富水的结论,与实际情况不符。

根据研究结果绘制底板 60 m 处视电阻率等比值线图,圈定奥灰含水层相对低阻区(图 12)。该工作面视电阻率比值整体呈西高东低趋势,比值为 1.01~2.41,等值线间距为 0.1,由西向东递减。西部出现相对高阻异常,比值为 2.21~2.41。运输巷右侧 10 号电极至 30 号电极范围内和轨道巷 130 号电极右侧范围出现相对低阻异常,其比值为 1.01~1.51,符合低阻响应基本规律。奥灰低阻异常在底板 60 m 工作面视电阻率等比值线图中得到显现,该异常区主要分布在运输巷及工作面右侧。结合水文地质资料分析,推断上述区域为富水区域,钻探揭露结果与该电法解释结果相吻合。

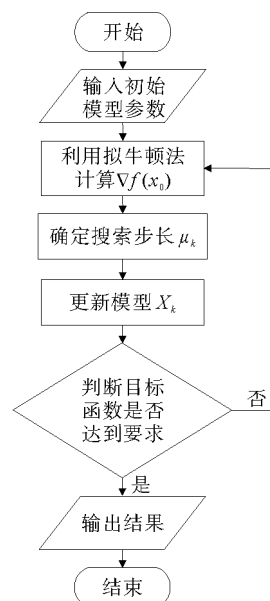


图 9 反演程序流程图

Fig. 9 Flow chart of the inversion program

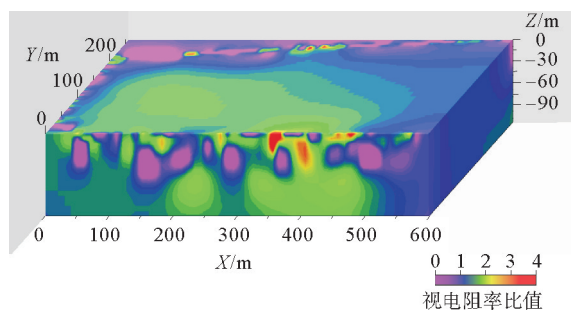


图 10 三维直流电法工作面底板岩层视电阻率比值数据体

Fig. 10 3D DC apparent resistivity ration data vollme for floor strata of the working face

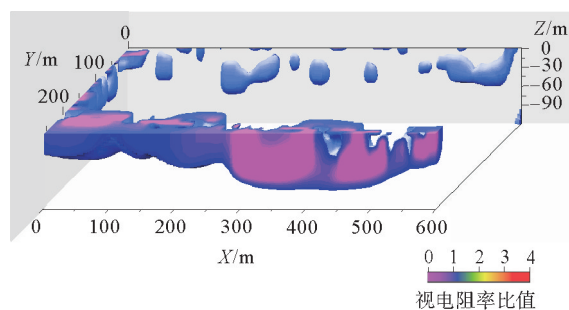


图 11 三维直流电法低阻异常体分布图

Fig. 11 Distribution of 3D direct current method low-resistance anomaly

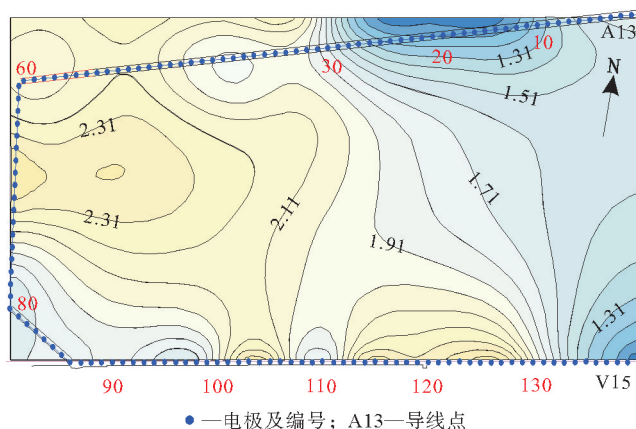


图 12 底板 60 m 工作面视电阻率等比值线图

Fig. 12 Apparent resistivity ratio contour map of the working face at 60 m below the floor

4 结论

1) 本研究通过 COMSOL 全空间模拟平台构建了徐灰、奥灰低阻体地电模型,采用 AMN、MNB 联合三极测量装置对模型进行正演模拟,验证了 COMSOL 全空间模拟平台能够实现底板多含水层异常响应特征研究。

2) 数值模拟表明,徐灰层低阻体是影响异常响应特征的主导因素。当徐灰层存在低阻体时,无论奥灰层是否存在低阻体,均呈现明显的低阻异常响应;而仅奥灰层存在低阻体时,受其埋深较大及徐灰层高阻背景干扰,低阻异常响应效果微弱,难以直接识别。因此,仅依靠视电阻率异常响应分析,无法准确判定奥灰层是否存在低阻异常体。

3) 采用电流密度比值法分析奥灰层视电阻率,并绘制比值线图,能有效压制徐灰层低阻干扰。通过定量对比不同模型的视电阻率比值与基准低值的差异,显著提升对奥灰层弱低阻响应的识别能力。结合三维反演技术,可以准确圈定目标含水层的相对低阻异常区。

参考文献:

- [1] 于景邨,刘志新,岳建华,等. 煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):586-592.
YU Jingcun, LIU Zhixin, YUE Jianhua, et al. Development and prospect of geophysical technology in deep mining[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 586-592.
- [2] 宋贵磊,公绪飞,杨富强,等. 含水采空区瞬变电磁时空响应特征研究及应用[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(12):201-212.
SONG Guilei, GONG Xufei, YANG Fuqiang, et al. Spatiotemporal response characteristics of transient electromagnetic field in water-bearing goaves and their applications[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 201-212.
- [3] 王文闯. 地巷核磁共振隐蔽含水水体响应特征[D]. 徐州:中国矿业大学,2023:13-25.
WANG Wenchuang. Surface-tunnel nuclear magnetic response characteristics of concealed water[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023: 13-25.
- [4] 邢修举,于景邨. 核磁共振探水在矿井超前地质预报的试验研究[J]. 煤炭技术,2019,38(2):83-85.
XING Xiujie, YU Jingcun. Experimental study of nuclear magnetic resonance water exploration in advance mine geological prediction[J]. Coal Technology, 2019, 38(2): 83-85.
- [5] 徐安全,秦胜君,张志亭. 基于可控源音频大地电磁法的老空区积水及富水异常区探查研究[J]. 山西煤炭,2025,45(1):75-84.
XU Anquan, QIN Shengjun, ZHANG Zhiting. Exploration of water in goaf and water-rich anomaly area based on controlled source audio-frequency magnetotellurics[J]. Shanxi Coal, 2025, 45(1): 75-84.
- [6] 施龙青,史雅迪,邱梅,等. 基于 Piper 图、灰色关联度和三维高密度电法的断层水源判别[J]. 中国科技论文,2022,17(1):1-8.
SHI Longqing, SHI Yadi, QIU Mei, et al. Identification of fault water source based on Piper diagram, grey correlation degree and 3D high density electric method[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(1): 1-8.
- [7] 高卫富,贾李博,胡安顺,等. 直流电法多装置探测在岩溶探查中的应用[J]. 地球物理学进展,2021,36(6):2687-2692.
GAO Weifu, JIA Libo, HU Anshun, et al. Research and application of DC multi array detection in karst exploration[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(6): 2687-2692.
- [8] 翟培合,张同德,任科科,等. 基于最小二乘正则化的高密度电法在小港煤矿 71502 工作面底板中的应用[J]. 中国科技论文,2022,17(1):15-20.
ZHAI Peihe, ZHANG Tongde, REN Keke, et al. Application of high density electrical method based on least square regularization in floor of working face 71502 of Xiaogang coal mine[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(1): 15-20.
- [9] 岳建华,李志聃. 矿井直流电法及在煤层底板突水探测中的应用[J]. 中国矿业大学学报,1997,26(1):94-98.
YUE Jianhua, LI Zhidan. Mine DC electrical methods and application to coal floor water invasion detecting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(1): 94-98.
- [10] 陈泉霖,陈新奇. 直流电法在探测煤矿井地质因素中的应用[J]. 中国煤田地质,2002,14(3):66-67.

- CHEN Quanlin, CHEN Xinqi. Application of D. C. electrical method on search of geological factors in coal mine[J]. Coal Geology of China, 2002, 14(3): 66-67.
- [11] 武杰, 刘树才, 刘志新, 等. 应用三极断面测深技术探测井下含水构造[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(3): 46-48.
- WU Jie, LIU Shucai, LIU Zhixin, et al. Sounding technology of three-fracture used into detection water-bearing structure in mine[J]. Coal Geology of China, 2003, 15(3): 46-48.
- [12] 刘志新, 岳建华, 刘仰光. 矿井物探技术在突水预测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 9-14.
- LIU Zhixin, YUE Jianhua, LIU Yangguang. Application of geophysical technology in forecast burst water of coal mining[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(1): 9-14.
- [13] 施龙青, 翟培合, 魏久传, 等. 三维高密度电法技术在岩层富水性探测中的应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 27(6): 1-4.
- SHI Longqing, ZHAI Peihe, WEI Jiuchuan, et al. Application of 3D high density electrical technique in detecting the water enrichment of strata[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2008, 27(6): 1-4.
- [14] 杨少文, 张平松, 许时昂, 等. 矿井直流电法技术应用现状与展望[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8): 20-29.
- YANG Shaowen, ZHANG Pingsong, XU Shi'ang, et al. Status and prospect of the application of mine DC electrical method technology[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(8): 20-29.
- [15] 徐东晶, 张瑞庆, 高卫富, 等. 华北型煤田不同覆岩类型下导水裂隙带高度分区预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 177-189.
- XU Dongjing, ZHANG Ruiqing, GAO Weifu, et al. Zonal prediction of the heights of water-conducting fracture zones under varying overburden types in North China-type coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 177-189.
- [16] 张记飞, 傅甜甜, 雷华友, 等. 基于煤炭采空影响的多含水层水文地质响应: 以新桥煤矿为例[J]. 能源与环保, 2023, 45(4): 131-136+147.
- ZHANG Jifei, FU Tiantian, LEI Huayou, et al. Hydrogeological response of multiple water layers based on influence of coal goaf: Taking Xinqiao Coal Mine as an example[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(4): 131-136+147.
- [17] 游秀珍, 吴小平, 王威, 等. 直流电阻率法的深部结构分辨: 三维模型的二维反演[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(2): 50-53.
- YOU Xiuzhen, WU Xiaoping, WANG Wei, et al. Resolution of deep structures for DC resistivity method: 2D inversion for 3D model[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(2): 50-53.
- [18] 高卫富, 王立栋, 菅建潇, 等. 掘进巷道直流电法四极装置超前探测的模拟及应用研究[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(1): 412-420.
- GAO Weifu, WANG Lidong, ZI Jianxiao, et al. Simulation and application research on the advanced detection by the dipole-dipole device of the DC method in the excavation roadway[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(1): 412-420.
- [19] 郝耀军, 李浩, 武艺. 基于COMSOL掘进巷道直流电法超前探测研究[J]. 煤矿现代化, 2020(6): 104-106.
- HAO Yaojun, LI Hao, WU Yi. Research on advance detection of direct current method in driving roadway based on COMSOL[J]. Coal Mine Modernization, 2020(6): 104-106.
- [20] 郭玉成. 基于三极装置的三维直流电法探水研究及应用[J]. 山东煤炭科技, 2023, 41(7): 193-195.
- GUO Yucheng. Research and application of three-dimensional direct current electric method for water exploration based on a triple pole device[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2023, 41(7): 193-195.
- [21] 周官群, 王亚飞, 陈兴海, 等. 掘进工作面“三角锥”型直流电法超前探测正演研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3015-3023.
- ZHOU Guanqun, WANG Yafei, CHEN Xinghai, et al. Research on forward modeling of “triangular cone” type direct current method for heading detection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3015-3023.

(责任编辑: 纪文娟)