

研究文章

Weihong Guo, Shucai Liu*, Yaoning Liu, and Shuangshuang Chen

电阻率成像在单巷隐伏地质构造探测中的应用

<https://doi.org/10.1515/geo-2020-0175>
2019 年 9 月 23 日收到; 2020 年 6 月 17 日接受

摘要: 煤矿掘进两侧煤层隐伏地质构造定位

巷道对于安全生产至关重要。

传统的电阻率成像方法大多将观测系统布置在巷道顶板和底板,在探测煤层隐伏地质构造时不可避免地存在不足。根据人工电场源的电场分布特点

接缝厚度和之间的电差异

周围的岩石和异常物体。煤层电阻率对后续极偶极系统的检测影响较小。从实际应用效果来看,平行煤层探测方法可以解决“单巷”工作面隐伏地质构造的探测问题。

关键词:电阻率成像法 平行煤层探测方法 巷道空洞影响 正演计算

提出了利用电阻率成像方法,利用巷道空洞对电流的屏蔽,提出在巷道侧煤层中布置观测系统,探测煤层隐伏地质构造的平行煤层探测方法。

在介绍后续检测方法原理的基础上,研究了巷道空洞对观测结果的影响,并提出了修正巷道空洞影响的方法。

针对工作面典型隐伏地质构造的地电特征,建立数值模型,验证平行煤层探测方法的可行性。

计算结果表明,A-MN观测系统对于工作面隐伏地质构造地电界面划分最为理想,且其探测效果受煤层影响较大。

1 简介

煤层中存在的断层、塌陷柱等隐伏地质构造,不仅危害煤层连续性,影响巷道和工作面布置,而且与含水层或瓦斯连通时极易引发突水或煤与瓦斯突出事故。富集区。因此,深入开展煤层隐伏地质构造调查,对于指导煤矿工作面布置和治水至关重要。

近年来,针对煤层围岩与隐伏地质构造在电性、磁性、波阻抗等物性方面的差异,一系列物探技术迅速发展[1],主要包括:(1)地面电磁法,包括:直流电测深法[2-5]、高密度电阻率法[6]、地面瞬变电磁法[7]。该类方法将场源和接收器均匀布置在地表,与目标耦合性较差,能较好地解析功率浅层异常体;然而,随着深度的增加,分辨率迅速下降[8]。(2)水雷透视法包括:无线电波穿透法[9]、槽波透视法[10,11]、直流穿透法[12]。方法

* 通讯作者: 刘术才, 矿井水灾害研究所
中国矿业大学资源与地球科学学院防治技术, 江苏徐州, 221116, e-mail: cumtlsc@126.com 郭伟红, 刘耀宁: 矿井水灾害防治研究所中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏省徐州市, 221116 陈双双: 长江地球物理勘探测试有限公司(武汉), 湖北省武汉市, 430010

这类类型一般在工作面相邻两条巷道之间进行施工,具有目标距离近、耦合性能好、分辨率高的特点[13];但矿井透视法易受巷道条件限制,不适用于只有一条可用巷道的“单巷”工作面。(3) 煤层地震勘探包括透射地震和反射地震。发射器、源和检测器分别布置在不同的巷道中。

源在一条巷道中被激发,探测器在另一条巷道中接收煤层内波。反射、光源和探测器布置在隧道中或工作表面上[14-16]。其施工效率低、成本高,且作为源头,炸药的使用受到严格控制。矿井瞬变电磁法是通过地面瞬变电磁法引入矿井应用,具有施工方便、对低电阻率物体灵敏度高的优点。矿井瞬变电磁法受体积效应影响,分辨率较低,难以准确识别实际地电界面,一般用于检测地层水丰度[17,18]。(4) 煤层电阻率成像方法:考虑到不同方向的探测结果

综上所述,现有的煤层电阻率成像方法大多是在单个或相邻巷道顶板、底板布置观测系统来探测隐伏构造,在探测煤层隐伏地质构造方面存在不可避免的不足[25]。根据电学领域人工场源的电场分布特点

提出了一种在巷道侧煤层布置观测系统,利用电阻率成像方法,利用巷道空腔电流屏蔽,探测“单巷”工作面隐伏地质构造的探测方法。在介绍后续检测方法原理的基础上,结合观测结果分析了巷道空洞、煤层厚度、煤层电阻率、围岩电阻率之间的相关性。

最后,本文将后续检测方法应用到实际工程检测中。

2 方法

2.1 基本原理

煤系地层隐伏地质构造与电极附近介质的电特性密切相关,可对煤系地层隐伏地质构造进行全方位勘探[19-21]。

自1958年煤炭工业部地质勘查司开展煤层电阻率实验以来,许多学者通过理论分析、数值模拟、物理模拟和工程实践等手段对电阻率成像方法进行了研究。李重点研究了直流层测深方法,并用它来追踪煤层中裸露巷道的地质构造的延伸。

Yue等利用煤层电阻率成像技术来检测煤层底板水流及含水结构,并分析了巷道空洞对检测结果的影响,取得了满意的应用效果[22]。刘提出基于三维平行电测的找矿技术,利用工作面附近巷道空间布局观测系统探测煤层顶底板隐伏结构。刘审视了演变过程

利用电阻率成像方法对煤层底板水流裂隙进行了研究,并设计了煤层底板水流裂隙区动态监测系统[23]。张在有限元数值模拟的基础上,重点研究了隧道直流电阻率全空间超前聚焦探测技术,并利用该技术对正面不良地质体进行探测[24]。

平行煤层探测方法是在煤层中布置观测系统来采集数据,图1(a)。由于巷道空腔对电流的屏蔽,供电电流大部分流入工作面,测得的电位差主要包含工作面地电异常信息。在实际应用中,电阻率成像方法中的两个电参数通常根据电极之间的电位差 ΔU_{MN} 和电极的相对位置,使用式(1)计算[26-28]。

$$\rho_K = \frac{D \text{ 在我}}{\frac{\Delta U_{MN}}{I \text{ 在我}}} \tag{1}$$

式中 ΔU_{MN} 表示电极间的电位差,mV; I 表示电源电流强度,mA; K 表示阵列系数。

在煤系中,煤层及其顶底板岩层是由具有不同电特性的层状介质组成的。对于图1(b)所示的简单三层地电模型,全空间点源的电势表达式可以用图像法求解:

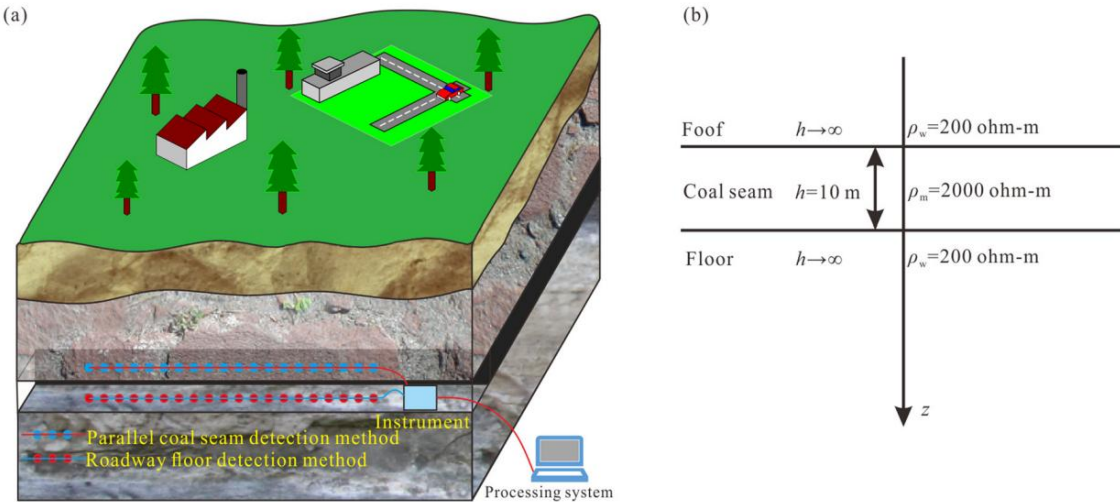


图1: (a)观测系统布局示意图和 (b)三层地电模型。

$$U_{ij} = \frac{\rho_i}{4\pi} \int_0^{\infty} [ae^{-\lambda z} + c_{ij} J_0(\lambda r)] \lambda d\lambda \quad (2)$$

其中 (r,z) 表示测量点的坐标
柱坐标; i 表示介质的数量
点源位于哪个位置; j 表示数量
观察点所在的介质; a_{ij} 表示待定系数,可以使用以下公式求解

边界条件; λ 是整型变量; $J_0(\lambda r)$ 是第一类零阶贝塞尔函数。
点源位于煤层中部

和煤层,分别采用式 (2)
计算电势,如图2所示。可得
已知: (1) 电势等值线使界面变形
煤层,但仍保持其连续性。 (2) 何时
场源位于煤层,电场
能量主要集中在地板周围
岩石;当场源位于煤层中部时
接缝,潜在的等值线呈现出大约
椭圆分布,更多电流流向煤炭
接缝。采用后续检测方法得到
有关煤炭地电异常的更多信息
接缝。

2.2 观测系统设计

一般工作面宽度小于200m ($L < 200 \text{ m}$),在此勘探范围内,电力
电阻率成像方法具有高分辨率;
因此,后续的检测方法可用于
实现隐伏地质的精细探测
“单巷”工作面的结构。在里面

- 后续检测的观察系统设计
方法,应密切注意以下几点
方面:
- (1) 数组模式:要求保证足够的
灵敏度并最大限度地减少“盲区”
勘探。
 - (2) 测量线布置:测量线应
参照裸露地质布置
结构和测量线长度应为
大于目标勘探长度
部分。
 - (3) 参数选择:极距序列应
根据勘探深度确定
巷道支护条件,保障
浅层检测精度及准确度的
深度测量。
 - (4) 干扰抑制:在实际施工中,
有必要抑制由
具有异质电特性的物体 (例如
如锚网和锚杆)和电极
接地电阻,保证信号质量。

3 数值模拟

3.1 地电模型建立

在原生状态下,煤的沉积序列
地层清晰,地电特征遵循
纵向规律变化规律

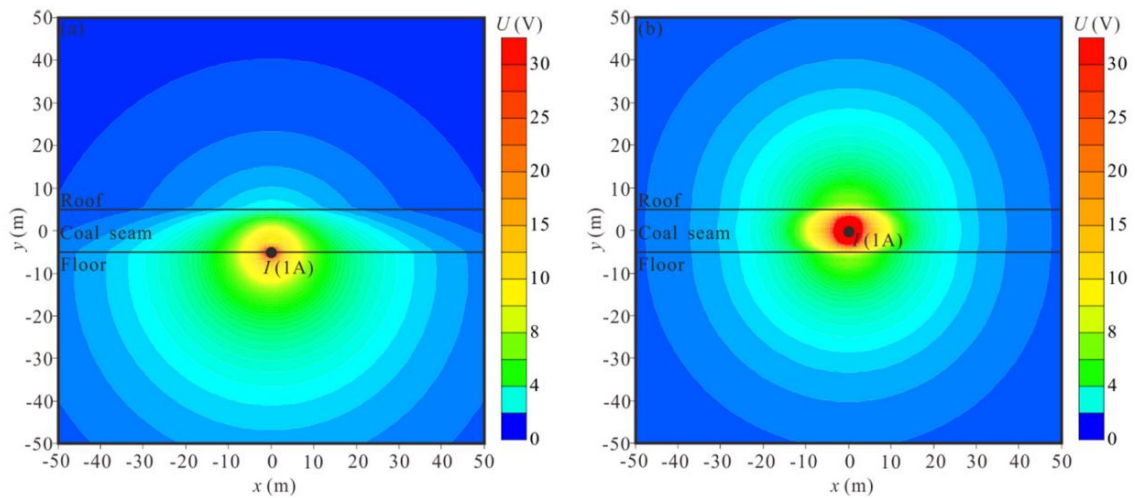


图2:点电场分布。(a) 源位于煤层底板,(b) 源位于煤层中部。

(一般表现为泥岩<砂岩<煤层的电阻率排序)。在横向上,电阻率分布相对均匀。当地质或地下水运动引起地层错位、侵蚀、崩落,形成断层裂隙带、溶洞、塌陷柱或其他隐伏地质构造时,原生煤系地层的固有电性变化规律发生改变,无论是水是否仍然存在。考虑到煤层中常见的隐伏地质构造通常是塌陷柱,因此可以将其抽象为全空间无限大介质中的长方体,如图3所示。

对于使用后续检测方法进行数据处理和解释至关重要。

为了概括起见,本文作如下假设:顶底板围岩电阻率 $\rho_w = 200 \Omega \cdot m$,煤层电阻率 $\rho_m = 10 \sim 11500 \Omega \cdot m$,巷道空腔电阻率 $\rho = \infty$ 。巷道高度 $h = 5 m$,道路宽度 $a = \dots m$ 。采用3D有限对不同巷道宽度的地电模型进行1、2、9、10正演计算,如图4(a)所示。可知:巷道空洞对小极距影响显著;随着极距的增加,巷道空电阻率对测量结果的影响呈现指数衰减,视电阻率逐渐接近围岩道路宽度(断面)的增加,

地电模型尺寸为600 m (长) \times 200 m (宽) \times 200 m (高)。崩塌柱贯穿煤层,顶板和底板均发育,尺寸为40 m \times 40 m \times 100 m。

测线布置在煤层中部。另外,本文将煤层厚度(巷道高度)设为 h ,围岩电阻率设为 ρ_w ,煤层电阻率设为 ρ_m ,巷道电阻率设为 ρ_h 。

3.2 巷道空洞影响修正

矿井巷道施工中采用平行煤层检测方法,巷道空洞的存在势必会造成全空间稳态电流场的畸变。从这个意义上说,研究巷道空洞影响的修正方法

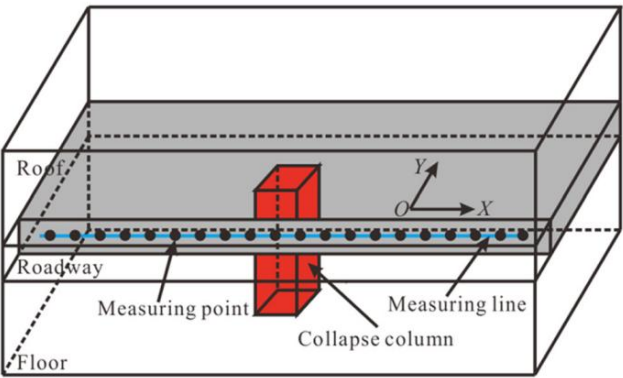


图3:塌陷柱地电模型及线路布置示意图。

巷道空洞影响范围逐渐扩大。

为了进一步研究巷道空洞影响的修正方法,本文假设巷道空洞影响下视电阻率与全空间视电阻率的关系为:

$$\rho_s^A = K_D \rho_s^D \quad (3)$$

式中, ρ_s^A 表示全空间视电阻率; ρ_s^D 表示巷道空洞影响下的视电阻率; K_D 表示修正系数,是巷道截面积和电极间距的函数; S 表示巷道横截面积; L 表示电极间距。

在实际应用中,可以现场测量围岩和煤层的电参数,建立有/无巷道的地电模型,用于背景场的正演计算。接下来,进行比率运算以获得校正系数。最后,根据测量的视电阻率数据获取全空间视电阻率。图4(b)为巷道宽度a =5 m时低电阻率塌陷柱地电模型视电阻率曲线。显然,采用式 (3)的修正方法可以有效抑制巷道空洞对小极距的影响,巷道空洞修正后的曲线与无巷道空洞的曲线基本重合;但随着极距的增大,修正后的曲线逐渐与有巷道空洞的曲线重叠,说明该修正方法不能消除巷道空洞对异常响应幅值的影响。

平行煤层探测方法将观测系统布置在巷道侧煤层中部,巷道空洞(高阻层)可视为电流屏蔽层,使更多的电流流入煤层。因此,巷道空洞可能影响异常响应幅度。

图5显示了当塌陷柱分别位于煤层和巷道外侧时斯伦贝谢阵列的视电阻率变化率(根据公式 (4)计算)。对比图 5(a)、(b)可知,巷道空洞对电流的屏蔽增大了煤层异常响应幅度,减弱了煤层异常响应幅度。

观察结果显示巷道外侧有异常物体。即巷道空洞增强了平行煤层探测方法探测工作面隐伏地质构造的能力。

$$\eta = \frac{\rho_s^A - \rho_s^D}{\rho_s^D} \quad (4)$$

式中, η 表示视电阻率变化率; ρ_s^A 表示反常视电阻率; ρ_s^D 表示反常视电阻率; x 表示观察点位置。

4 结果与讨论

考虑到不同的阵列模式对于相同的反射有不同的灵敏度

针对地电条件,采用常用的直流电测深观测系统,采用四种阵型对同一塌陷柱进行地电模型的正演计算:

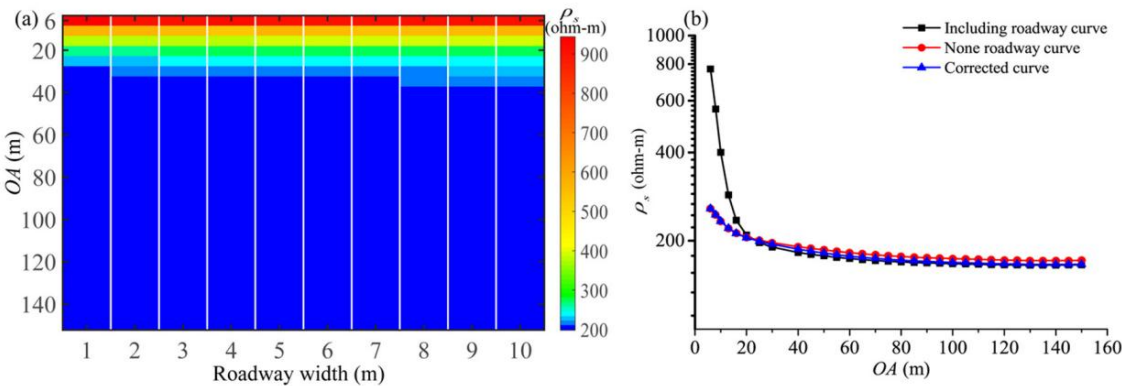


图 4:巷道空洞影响修正。(a) 不同巷道宽度视电阻率灰度图和(b) 视电阻率曲线。

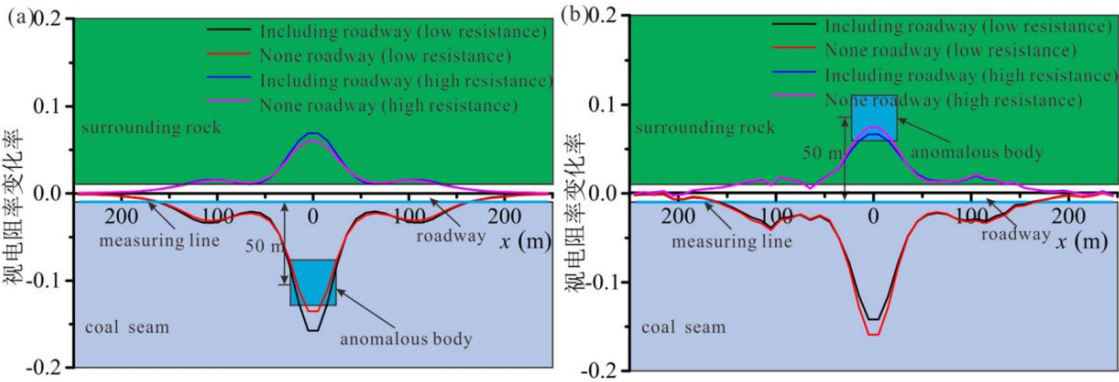


图 5:斯伦贝谢阵列的视电阻率剖面曲线 (OA = 100 m)。 (a)异常体位于煤层内; (b)异常体位于巷道外。

极-偶极阵列、斯伦贝谢阵列、偶极-偶极阵列和差分阵列。接下来,本文根据Edwards (1977)给出的“伪深度”计算公式和我们的工作经验,设置 $\times 0.6OA$ 绘制视电阻率等值线,如图6所示 $y =$ (所有视电阻率等值线代表根据公式 (3)修正巷道空洞的影响后得到的结果。

图6显示了不同阵列模式的视电阻率等值线,其中蓝色框表示塌陷柱的实际平面位置。四种阵列模式在浅部均处于薄层高阻状态,与煤层电阻率相对应;视电阻率等值线显示异常体周围的扭曲。对比图 6(a)~(d),斯伦贝谢阵列具有较强的体积效应,高阻异常区域的范围与异常体的实际位置存在较大偏差;差分阵受煤层电阻率影响较大,浅部层状高电阻率屏蔽了塌陷柱的异常响应;偶极-偶极阵中高阻异常区以塌陷柱为中心,呈“抛物线”带状分布,地电界面难以分离;受“无限大”电极影响,测线旁极偶极子阵列略有异常,在塌陷柱实际平面位置处呈现出明显的高阻闭合区,且受顶板和底板周围塌陷柱发育的影响岩石中,高阻异常区有向下延伸的趋势。另外,实际施工区域多位于巷道两侧,因此电阻率成像平行煤层检测方法一般采用极偶极子阵列方式。

以煤层厚度 h 、煤层电阻率 ρ_m 、围岩电阻率 ρ_w 等主要参数为变量,设计了三类数值模型 (表 1),并与计算结果分析了主要参数的关系。平行煤层探测方法 (图7-9)。

主要参数实验测量 (图7-9)表明: (1)煤层厚度的增加,浅部高阻层厚度增加,高阻体对电流的斥力逐渐减弱,提高视电阻率,并屏蔽由塌陷柱引起的异常响应。与厚煤层相比,平行煤层检测方法可以更有效地检测薄煤层中的塌陷柱。 (2) 煤层厚度变化仅影响小极距观测结果,随着煤层电阻率的增大,浅部视电阻率也随之增大。 (3)

围岩与异常体之间的电阻率差异对探测有着显著影响,电阻率差异的减小会逐渐减弱异常响应。低电阻率物体对电流的吸引力逐渐减弱。围岩与异常体之间的电性差异构成了平行煤层探测方法的物理前提。

5 实例分析

将平行煤层探测方法应用于实际工程中探测工作面隐伏地质构造。对某矿井工作面塌陷柱进行检测

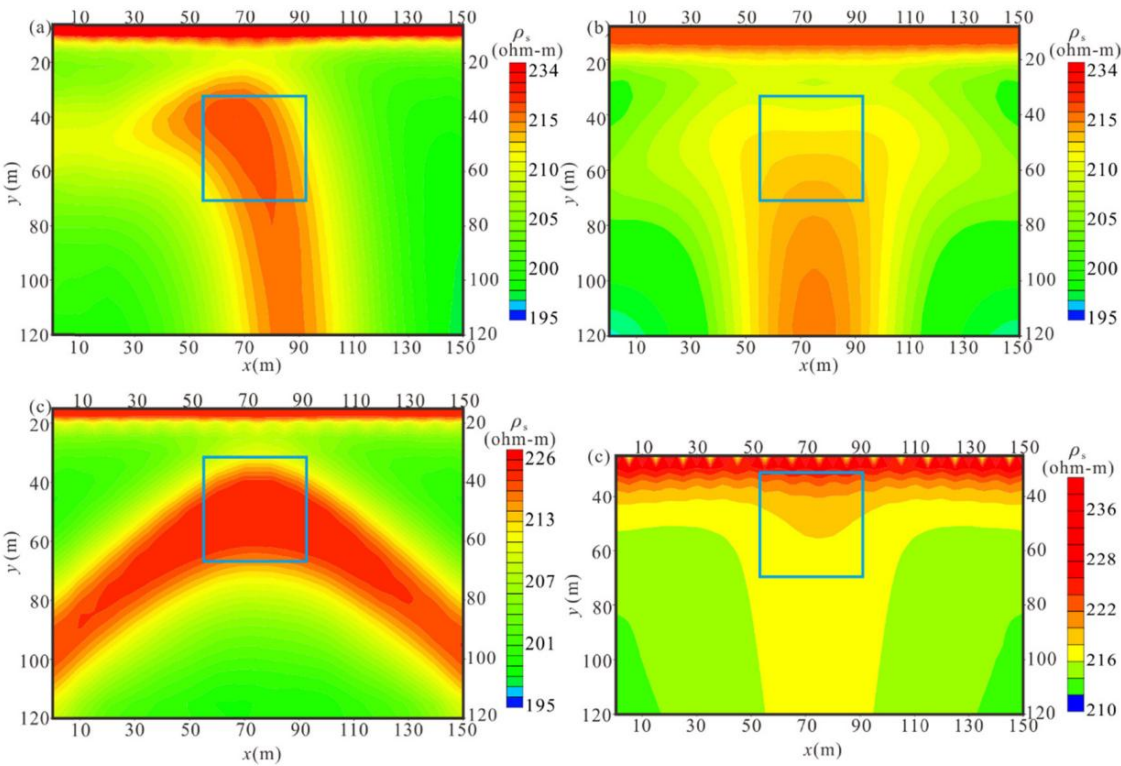


图6:不同观测系统的视电阻率等值线。(a) 极-偶极子阵列; (b) 斯伦贝谢阵列; (c) 偶极子-偶极子大批; (d) 差分阵列。

本文以江苏省为例,介绍了平行煤层检测的实际应用方法。

5.1 施工设计

输送巷道切孔开挖时
至该矿92606工作面煤层
江苏省,距约80m处塌方柱
从输送机巷道中发现。崩溃
柱的特点是缺少煤层,
岩性不完整,填料松散。既没有水
不存在爆裂或水浸的情况。初步的
判断该塌陷柱为不流水、不含水的塌陷柱。

92606工作面面积约-750m
海拔160m,宽度160m;期间气道塌陷
相邻工作面的停止;切孔具有高
坡度大且缺乏足够的支撑。以保证
考虑到检测精度和施工安全性,设计了后续极偶极子阵列检测系统,

如图 10 所示。51 个电极
从左到右排列在开孔位置
电极间距 5 m (测量线长度 = 250 m)
并使用通信线路相互连接;“无限”电极排列在

距道路沿线切口 1,000 米。因为
煤层和煤矸石的高电阻率,
电极接地电阻高。为确保
收集信号的有效性,20-30 厘米的孔
在电极位置钻孔,湿粘土

表1:数值模型程序

节目类型	参数不变	可变参数
变煤层厚度型	$\rho_{\text{煤}} = 500 \Omega \cdot \text{m}$, $r_{\text{电}} = 200 \Omega \cdot \text{m}$	$h = 1, 2, 5, 8, 10, 15 \text{ m}$
变煤层电阻率型	$H = 5 \text{ m}$, $r_{\text{电}} = 200 \Omega \cdot \text{m}$	$\rho_{\text{m}} = 100, 200, 500, 800, 1,000, 1,500 \Omega \cdot \text{m}$
变围岩电阻率型	$H = 5 \text{ m}$, $r_{\text{电}} = 500 \Omega \cdot \text{m}$	$\rho_{\text{w}} = 200, 300, 500, 800, 1,000, 2,000 \Omega \cdot \text{m}$

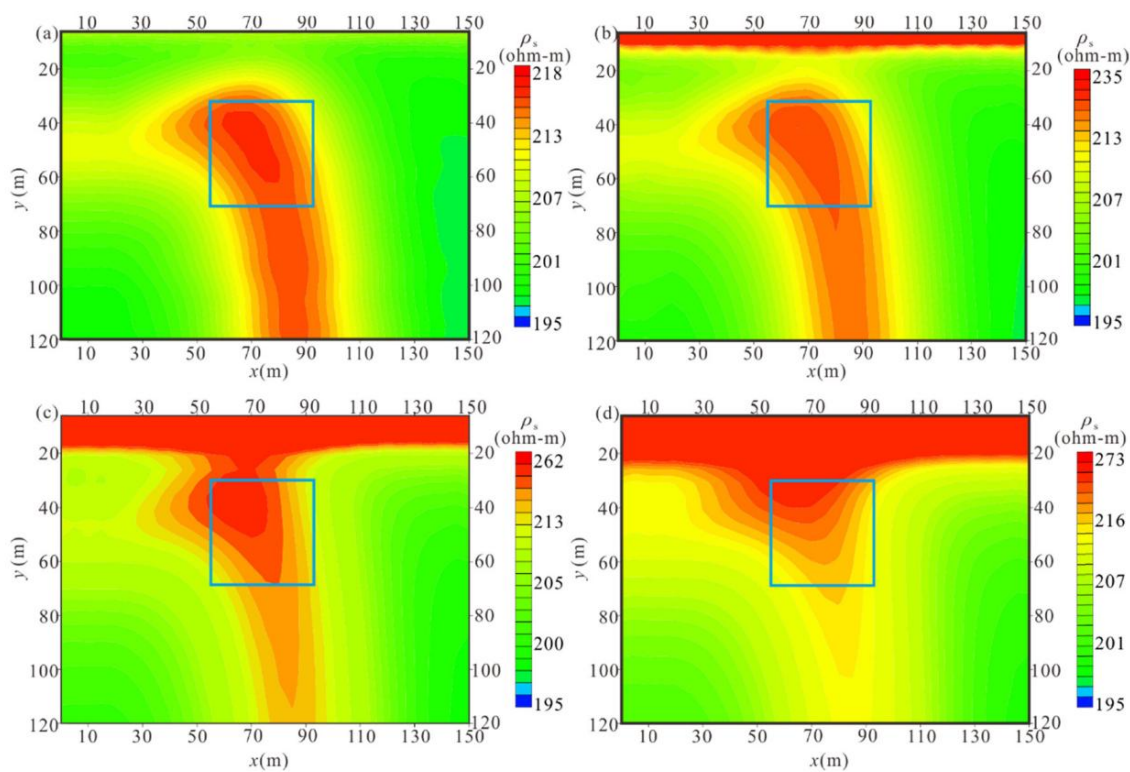


图7:不同煤层厚度的视电阻率等值线。(a) $h = 1$ m; (b) $h = 5$ m; (c) $h = 10$ m; (d) $h = 15$ m。

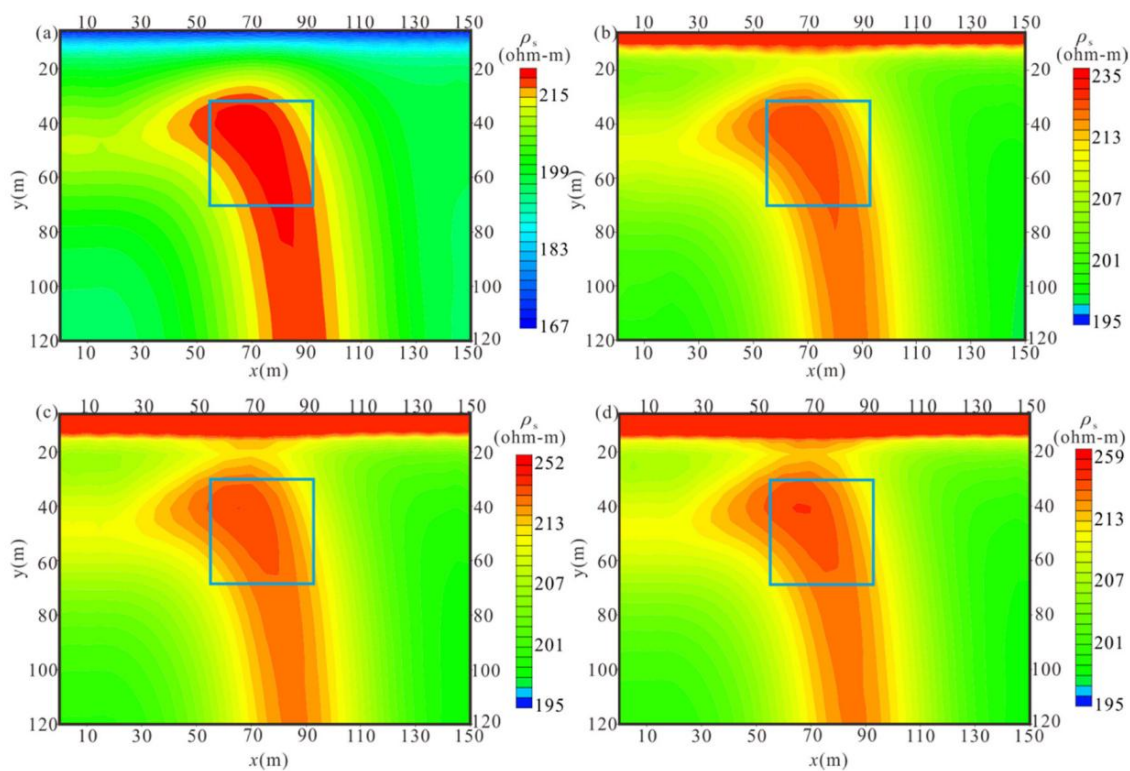


图8:不同煤层电阻率的视电阻率等值线。(a) $p_m = 100 \Omega \cdot m$; (b) $p_m = 500 \Omega \cdot m$; (c) $p_m = 1,000 \Omega \cdot m$; (d) $p_m = 1,500 \Omega \cdot m$ 。

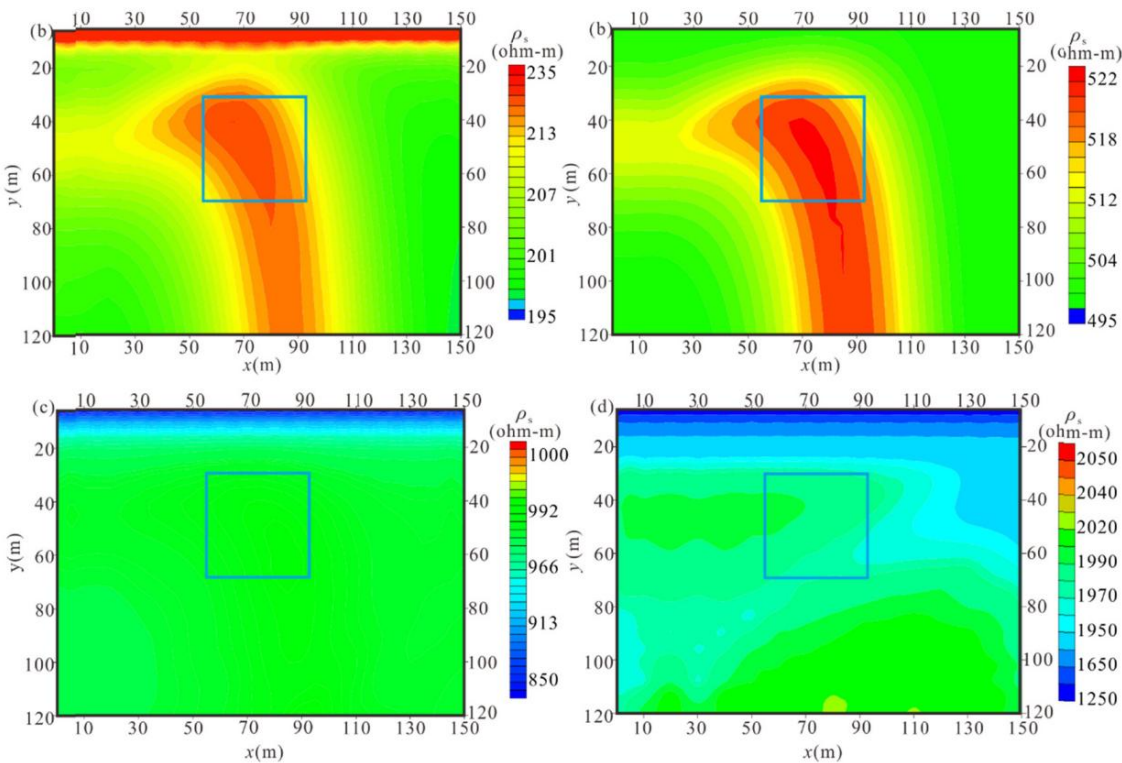


图9:不同围岩电阻率的视电阻率等值线。(a) $\rho_w = 200\Omega \cdot m$; (b) $\rho_w = 500\Omega \cdot m$; (c) $\rho_w = 1,000\Omega \cdot m$; (d) $\rho_w = 2,000\Omega \cdot m$ 。

内部填充有良好的导电性。

5.2 实测数据分析

使用基于并行电力调查的系统收集数据。系统中各电极除电源外始终保持电压采样状态;大量收集的测量数据

通过通讯线实时传输至主机。

现场数据转换后,提取极偶极子阵列数据;根据现场实测数据(巷道宽度=6 m,巷道高度=5 m,煤层电阻率=700 $\Omega \cdot m$,围岩电阻率=250 $\Omega \cdot m$),建立地电模型,影响修正系数为通过正演计算得到巷道空洞。测量数据经过校正后(图11(a)),进行平滑和插值处理,绘制视电阻率等值线,图11(b)。

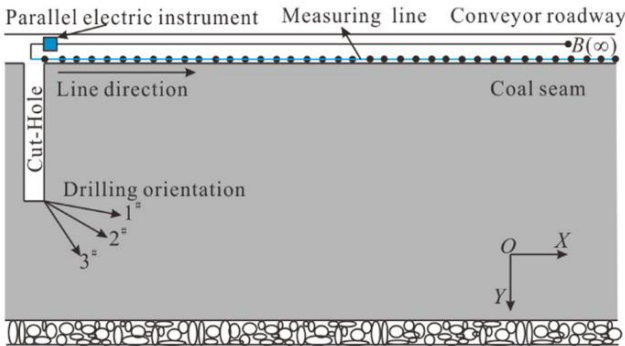


图10:92606工作面电阻率观测系统示意图。

极-偶极子阵列的实验测量如图 11(b) 所示。这些结果表明,在纵向深度20-30 m处,视电阻率普遍较低,推测这是巷道底板积水的结果,而不是异常现象。在横向5~60 m、纵向80~150 m (蓝色虚线区域)处,视电阻率较高,推测为非水作用引起的高异常响应。流动的和非含水的塌陷柱。横向位置80~100 m,纵向深度30~70 m (红色虚线区域),

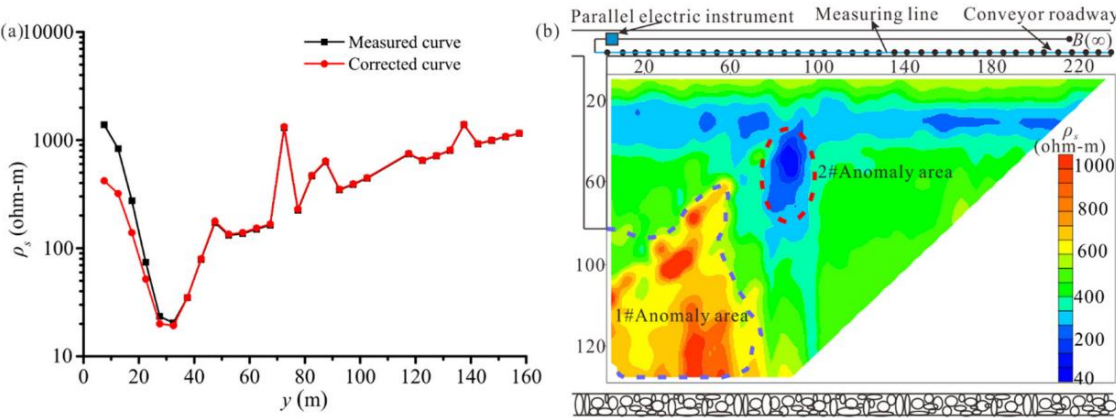


图11:极-偶极子阵列的观测结果。(a) 视电阻率曲线 ($x = 47.5$ m) 和 (b) 视电阻率等值线。

视电阻率较低,呈带状分布,推测为断层。检测结果与矿主钻探验证结果吻合较好,与实际塌陷柱位置偏差约3 m,能够满足矿主生产需求。

致谢:本研究得到“国家重点研发计划(批准号:2018YFC0807802-3)”和“江苏省高等学校优势学科建设项目(PAPD)”的资助。

6.结论

- (1)根据煤层中人工场源的电场分布特点,提出了一种在煤层中布置观测系统来探测隐伏地质构造的平行煤层探测方法。
- (2)巷道空洞对平行煤层探测方法小极距测量结果影响较大。由于巷道空洞的电流屏蔽,大部分电流流入煤层,增强了并行煤层探测方法检测煤层异常体的能力。
- (3)顺次极偶极(A-MN)观测系统对于工作面隐伏地质构造地电界面的划分最为理想,其探测效果受煤层厚度和工作面影响较大。周围岩石和异常物体之间的电差。煤层电阻率对后续极偶极系统的检测影响较小。
- (4)根据实际应用效果,平行煤层检测方法可以解决

“单巷”工作面隐伏地质构造探测问题

参考

[1] 陆涛,刘世达,王斌,吴荣兴,胡新文.对地理的回顾
我国矿井水害实物勘查技术的应用与趋势.矿井水环境. 2017;5:1-10。

[2] Krishnamurthy NS,Rao VA,Kumar D,Singh KKK,Ahmed S.
电阻率成像技术可描绘煤层屏障厚度并标定充水空隙.印度地质学会杂志. 2009;5:639-50。

[3] Maillol JM,Seguin MK,Gupta OP,Akhauri HM,Sen N.
电阻率断层扫描探测,用于描绘印度西孟加拉邦未绘制的矿井巷道.地球物理学展望. 2010;2:103-16。

[4] Bharti AK,Pal SK,Priyam P,Kumar S,Srivastava S.使用电阻率断层扫描对印度 Jharia 煤田 Patherdih 煤矿进行地下空洞检测.环境地球科学. 2016;5:1-17。

[5] Danielsen JE,Auken E,Jørgensen F,Søndergaard V,
索伦森 KI.瞬变电磁法在水文地球物理测量中的应用应用地球物理学杂志. 2003;4:181-98。

[6] 石丽,王勇,邱明,高伟,翟鹏.三维高密度电阻率法在采场开采顶板水超前探测中的应用.阿拉伯地球科学杂志. 2019;15. DOI:10.1007/s12517-019-4586-7。

[7] 薛国庆,于建昌. TEM研究与煤矿勘探应用新进展地球物理学进展. 2017;1:319-26。

[8] 赵国贵,李涛,徐凯杰,李建平.井面电阻率法在煤田安全中的研究与应用地球物理学进展. 2007;6:1895-9。

[9] 焦新峰,姜振华,刘顺华.煤层减薄区无线电波透视的异常响应特性J Min Saf 工程。 2014;6:1001-4。

[10] 杨圣通,魏建昌,程建良,史立庆,文ZJ.三维煤矿巷道模型全波场数值模拟及槽道波特 性分析。应用地球物理学。 2016;4:621-30。

[11] 胡扎安,张鹏,徐刚. 传播的色散特征 槽波与煤层厚度反演.阿克塔 地球物理学。 2018;5:1001-9。

[12] 李东,韩德普,史玉东,史晓峰.直流电穿透 同一煤层单独勘探工作面的方法。中国煤炭学会学报。 2010;8:1336-40。

[13] Bryn H, Andrew B, Lee S, Roy M, Bernd K. 钻孔间 冰川排水的电阻率成像。 J 格拉西奥尔。 1998;147:429-35。

[14] 胡正,张鹏,徐刚. 传输的色散特征 槽波与煤层厚度反演.阿克塔 地球物理学。 2018;5:1001-9。

[15] 朱明,程健,崔文,岳华. 煤层地震勘探与贝叶斯克里格法综合预测煤层厚度.地球物 理学报。 2019;4:1-12。

[16] Ge M, Wang H Jr, Hardy HR, Ramani R. 使用煤层地震法检测无烟煤矿。国际煤地 质杂志。 2008;3-4:201-12。

[17] 常建华,于建昌,刘ZX.三维数值 采空区水的全空间瞬态电磁响应建模。应用地球物理学。 2016;3:539-52。

[18] 程建良,李峰,彭SP,孙翔宇.矿井巷道工作面地球物理超前探测研究进展及发 展方向中国煤炭学会学报。 2014;8:1742-50。

[19] 岳建华,刘世华,刘ZX,王大庆,吴建. 巷道直流电测深在塌方检测中的应用.华南理工 大学学报。 2003;5:13-15。

[20] 苏本云,于建昌,李明芬.钻孔算法研究 电阻率成像法。技术期刊。 2017;3:817-20。

[21] Das P,Pal SK,Mohanty PR,Priyam P,Bharti AK.使用电阻率层析成像方法对印 度 Jharia 煤田废弃矿井进行探测。印度地质学会杂志。 2017;2:169-74。

[22]岳建华,李ZD,矿DC.煤层底板水侵检测的电学方法及应用.华南理工大学学报。 1997; 1:96-100。

[23] Liu SC, Liu XM, Jiang ZH, Xing T, Chen MZ. Research on 评价煤层底板导水断裂带的电法预测.岩石机械工程杂志。 2009;02:348-56。

[24] 张丽,阮斌,吕燕,杨涛,陈伟.全空间研究 直流聚焦电阻率法隧道超前勘探数值模拟地球物理学杂志。 2011;4:1130-9。

[25] Gyulai Á, Ormos T, Turai E, Sasvári T. 用于检测煤层结构构造扰动的矿井内 地电调查。地球物理学报。 2013;5:1184-95。

[26] Plank Z,Polgar D.直流电阻率法在喀斯特地区城市地质问题中的应用。冲浪地球物 理学。 2019;5:547-61。

[27] 洛杉矶加拉多 (Gallardo),马萨诸塞州梅朱 (Meju).具有交叉梯度约束的联 合二维直流电阻率和地震走时反演。 J Geophys Res Solid Earth。 2004;B3:B03311。

[28] Spitzer K.使用共轭梯度法进行直流电阻率建模的 3-D 有限差分算法。地球物理学 杂志国际。 2007;3:903-14。