

## 直流电法在小窑采空区的应用研究

金小川 吕相军 张青

江西省地矿局赣东北地质大队, 江西 上饶 334000

[摘要]文中依托于横峰县罗家小窑采空区物理勘探工作,其目的在于查明勘察区地下小窑采空区分布、厚度和埋深等。采用DZD-6A型多功能直流电法仪开展电阻率测深和联合剖面电法工作,通过在工作区范围布置的七条测线对采空区进行监测。对物探数据进行处理形成图像,并对物探异常现象进行了合理的解释推断出采空区的分布情况。

[关键词]小窑采空区;物探异常;电测深勘探法;联合剖面勘探法

DOI: 10.33142/hst.v2i4.1060

中图分类号: TD325.3;P631.3

文献标识码: A

### Application Research of Direct Current Electric Method in Goaf of Small Kiln

JIN Xiaochuan, LYU Xiangjun, ZHANG Qing

Northeast Jiangxi Geological Brigade of Jiangxi Geology and Mineral Bureau, Shangrao, Jiangxi, 334000, China

**Abstract:** Based on the physical prospecting work of the goaf of Luoia Small Kiln in Hengfeng County, the purpose of this paper is to find out the distribution, thickness and burial depth of the goaf of underground small kiln in the prospecting area. DZD-6A multifunctional direct current electric method instrument is used to carry out resistivity sounding and combined section electrical method, and the goaf is monitored by seven lines arranged in the working area. The geophysical data are processed to form images, and the geophysical anomalies are reasonably explained to infer the distribution of the goaf.

**Keywords:** the goaf of small kiln; geophysical anomaly; electrical sounding prospecting method; combined section exploration method

### 引言

为了查明横峰县罗家小窑采空区的分布、厚度和埋深情况,根据地质地形图初步确定在工作区范围布置了七条测线,采用DZD-6A型多功能直流电法仪开展电阻率测深和联合剖面电法工作。测区民房密布、水泥及硬化道路四通八达,一定程度上影响了野外数据采集的效率和质量,为了克服以上问题,在遇到障碍物时采取偏移、舍去采集的方法。

就勘探技术及小窑采空区的稳定,国内学者进行了相关研究。罗国平等[1]以晋北某矿区为例,选择使用以重叠回线瞬变电磁法为主,2个AB极距的直流电阻率剖面法为辅的物探方法,开展采空区含水性探测应用研究;孙吉益等[2]采用三极剖面法对辽源矿业集团梅河煤矿工作面顶板采空区的含水性进行了探测分析,并取得明显效果;贾辉等[3]从分析小窑采空区的地球物理场特征入手,研究了不同物探方法在小窑采空区探测中的适宜性。通过圈门的工程实例展示了高密度电法、瞬变电磁法及多道面波法的应用效果,总结了不同物探方法的优缺点;赵忠海[4]采用了浅层地震反射波法、高密度电阻率法、大地电 磁测深法以及探地雷达法等方法探测北京门头沟地区小窑采空区的分布情况,取得了较好的效果。刘波等[5]对平朔东煤矿浅部采空区采用探地雷达和AG1高密度电法、测区深部采空区采用EH4电磁成像系统的综合物探方法,得到了采空区分布的剖面图,划分了重点异常区,取得了令人满意的探测结果;白永利[6]采用综合物探技术对六家煤矿工作面回风顺槽掘进工作面周边小窑采空区及其富水性进行全方位探查,为煤矿治理小窑采空区提供技术保障,且探查成果得到了后期打钻与实际揭露的验证;张灯亮[7]应用三维地震勘探和瞬变电磁方法来确定山西大同矿区采空区的范围、分布情况及其富水性,为矿井的建设和安全生产提供了可靠的资料。

在前人工作的基础上本文依托于横峰县罗家小窑采空区物理勘探工作,采用电阻率测深和联合剖面电法对勘察区地下小窑采空区分布、厚度和埋深等进行分析研究。

### 1 水文、地质和地球物理特征

#### 1.1 地质特征

工作区位于扬子准地台,下扬子-钱塘台拗,弋阳-玉山台陷,信江凹陷内,根据实地勘查并结合区域地质资料场地及其周边未发现较大规模的断(裂)层(带)存在,构造不发育,且第四纪以来,新构造活动微弱,未见有断裂活动迹象。工作区出露地层主要有三叠系安源组(T3a)砂岩、砂砾岩和第四系残坡积土(Q4e1)。分述如下:

### 1.2 水文地质特征

根据地下水赋存条件、含水介质的岩石特征等划分，本区地下水主要有第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。各种地下水其主要特征如下：

#### (1) 第四系松散岩类孔隙水

主要赋存于第四系冲洪积、残坡积等松散堆积层中，以潜水为主，水位埋深变化大，含水层较薄，分布面积较小，受季节性影响明显，渗透性较强，主要接受地表水和大气降水补给，以下渗方式补给基岩裂隙水。

#### (2) 基岩裂隙水

主要赋存于三叠系安源组砂岩中，由于地下水的赋存条件和岩体裂隙发育程度的差异，地层中富水性较不均一。该类型水以大气降水补给为主，由于基岩裂隙分布不均匀，无统一水力联系，以大气降水直接补给为主。且于沟谷或斜坡地带以泉的形式排泄于地表。

### 1.3 地球物理特征

根据区调及前人物性参数测试资料，从电性参数分析，不同岩土层、完整基岩与岩性破碎带、地质构造带之间有较为明显的电性差异。而当完整岩层中有地质异常时，一般地如果采空区（空洞）不含水则异常表现为相对较高的视电阻率，如果采空区（空洞）含水则异常表现为相对较低的视电阻率值，在电法电测深断面资料上会形成横向上的高阻或低阻闭合圈，这就为物探工作从物性差异上区分空洞提供了可能性。

## 2 物探工作方法与技术简介

### 2.1 电测深勘探原理简介

电测深勘探法主要是用来探查地下不同深度范围内的垂向电性变化，其特点是：供电电极（A、B）在测点O两侧沿相反方向向外移动，而测量电极（M、N）不动或与AB保持一定比例地同时移动（见图1）。本次探测采用前者，通过向地下供电，利用公式：

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

即可得到视电阻率。

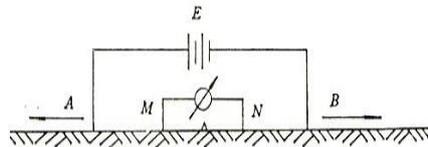


图1 对称四极电测深示意图

### 2.2 联合剖面勘探原理简介

电剖面法主要用来探查地下一定深度范围内的横向电性变化，主要由两个三极装置  $AMN\infty$  和  $\infty MNB$  联合组成，故称联合剖面装置（见图2）。其中电源的负极置于无穷远（或称C极），电源的正极可接向A极，也可接向B极。视电阻率表示为：

$$\rho_s^A = K_A \frac{\Delta U_A}{I} (AMN\infty \text{装置})$$

$$\rho_s^B = K_B \frac{\Delta U_B}{I} (\infty MNB \text{装置})$$

$$\text{式中： } K_A = K_B = 2\pi \frac{\gamma_{AM}\gamma_{AN}}{\gamma_{MN}}$$

其中， $K_A$ 、 $K_B$  为装置系数。

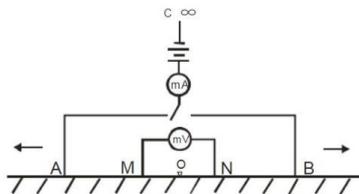


图2 联合剖面测量示意图

### 2.3 测网布置与电极距的选择

#### 2.3.1 测网布置

测网主要是依据《城市工程地球物理探测规范》(CJJ7-2007)要求来布置工作比例尺选用 1:1000, 测线为 NE~SW 方向, 测线方位角 49° 测线距 25m, 点距 5m。测线编号从 NW 向 SE 依次为 K1 线~K7 线, 每条测线上测点编号从 NE 向 SW 由小至大且垂直测线上的点编号相同。本次测线测点主要采用 RTK 控制点引测后定位放样于实地, 精度满足规范要求。在民房密集区、树林中则用罗盘和测绳进行量距放样, 在遇到障碍物时采取偏移、舍去采集的方法。设计的物探线以最大限度地均匀覆盖整个测区, 基本保证每栋民房前或屋后都有测线测点控制。

#### 2.3.2 电极距的选择

为使曲线左支应达到  $\rho_1$  渐近线、右支应达到标准层的  $\rho_s$  渐近线及使曲线光滑保证解释精度, 各供电电极距在对数的 AB/2 轴上应均匀分布一般使相邻两极距在模数为 6.25cm 对数纸上相距约为 0.5~1.5cm。为此本次电测深的电极距是 AB/2 (m): 2、3、5、7、10、15、20、30、40、50、70、100m; MN/2=1m。

#### 2.3.3 布极方向

一般地在平原地区, 当各分层界面及标准层的倾角不超过 5° 时, AB 线的方向可任意选定。当分界面倾角超过 10° 时, 应沿岩层走向选定 AB 线方向, 还应结合地形特点, 在坡度不大的斜坡上布极方向与地形等高线大致平行。防止和减小地表电流屏蔽和非各向同性等的影响。本区地层产状倾向北西, 倾角 20° 左右, 为此本次电测深的布极方向基本与测线方向一致。

### 3 物理勘探法在小窑采空区的应用

本次电法勘探共布置七条测线, 平行布置, 方位角为 49°, 测线间距 25m, 点距 5m, 完成工作量见表 1。电测深检查工作量为 75m, 16 个测深点占总工作量的 5.0%; 联合剖面检查工作量为 95m, 20 个点占总工作量的 5.0%, 视电阻率测量误差均小于 5%, 其结果如下图 3~图 9 和表 2 所示。

表 1 物探完成工作一览表

测线号	测线长 (m)	测线起止桩号	电测深(点)	联合剖面(点)
K1	340	0~340/1	33	44
K2	390	0~390/2	51	62
K3	500	0~500/3	65	75
K4	500	0~500/4	73	80
K5	335	125~460/5	41	53
K6	320	115~410/6	25	40
K7	295	105~340/7	15	26
合计	2680	2680	303	380

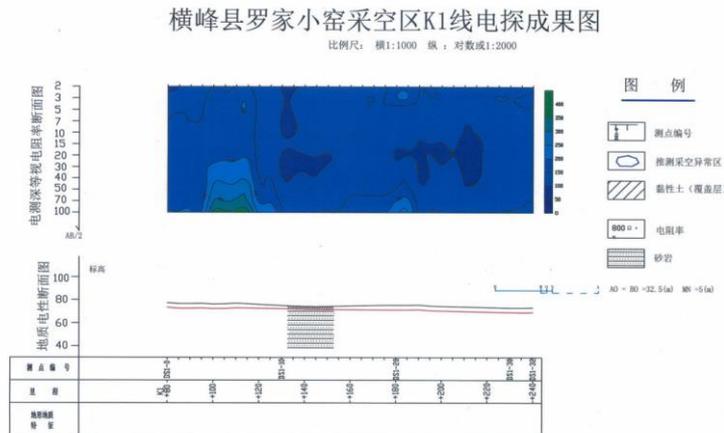


图 3 横峰县罗家小窑采空区 K1 线电探成果图

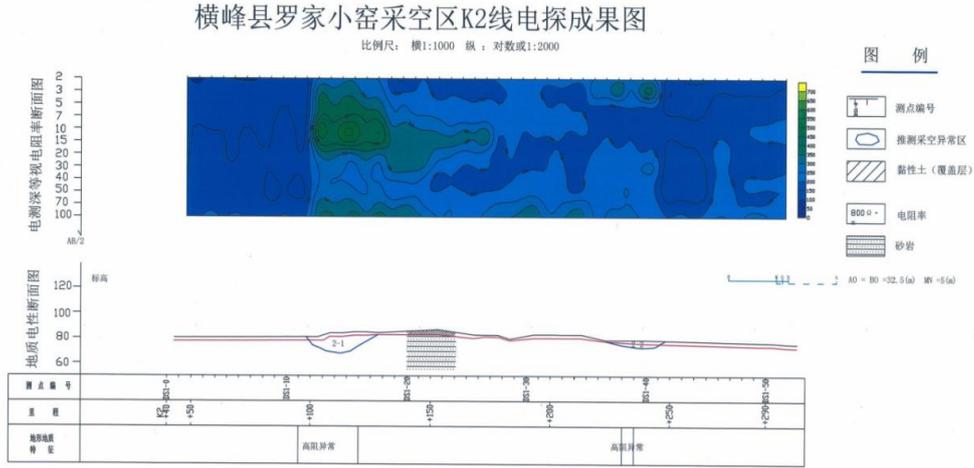


图4 横峰县罗家小窑采空区 K2 线电探成果图

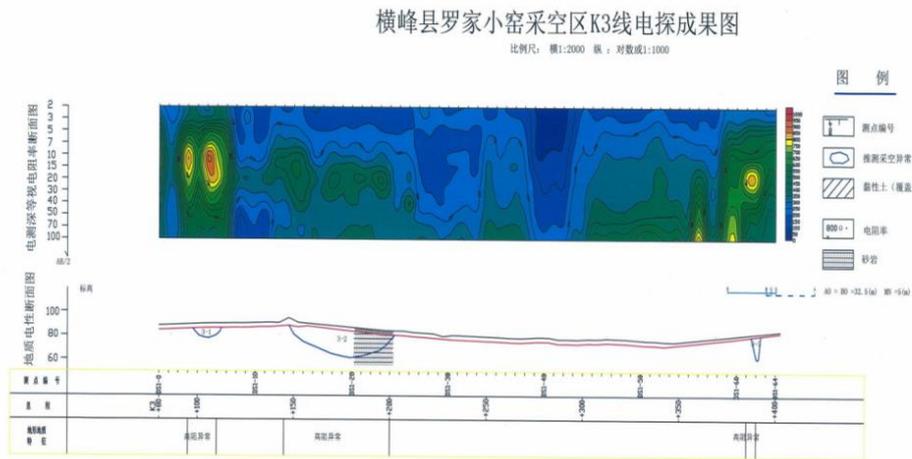


图5 横峰县罗家小窑采空区 K3 线电探成果图

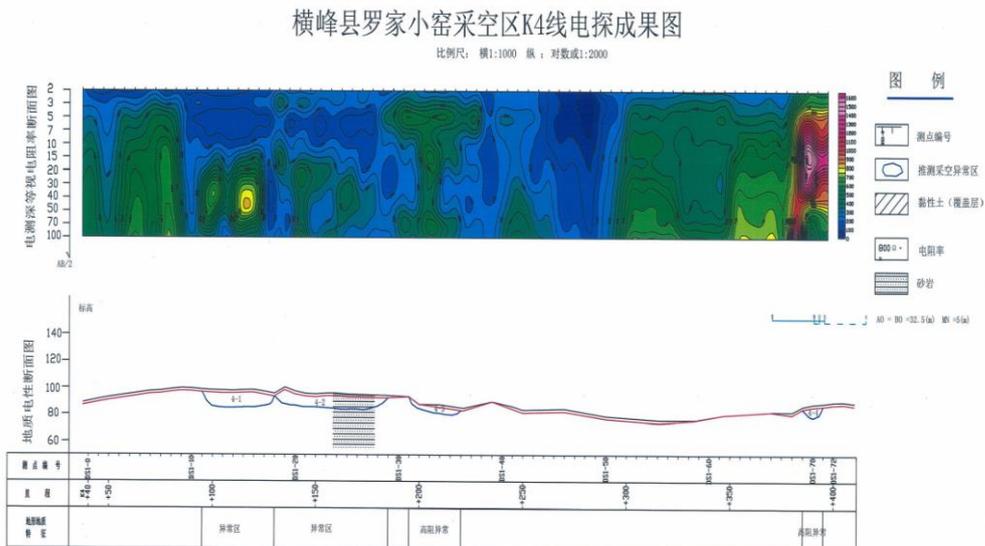


图6 横峰县罗家小窑采空区 K4 线电探成果图

横峰县罗家小窑采空区K5线电探成果图

比例尺：横1:1000 纵：对数或1:2000

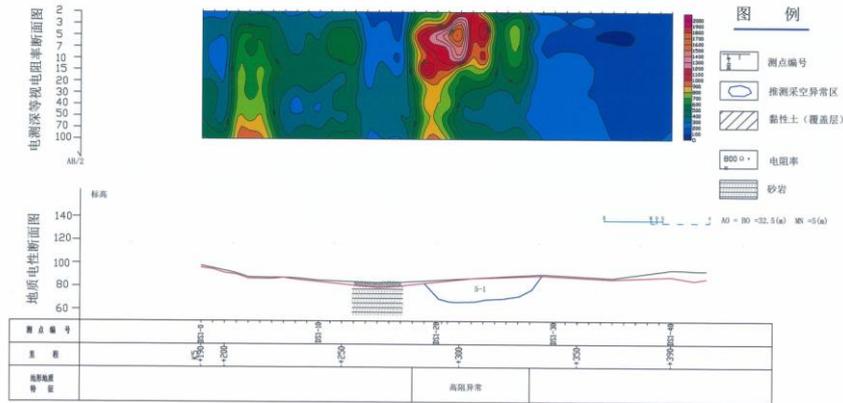


图7 横峰县罗家小窑采空区K5线电探成果图

横峰县罗家小窑采空区K6线电探成果图

比例尺：横1:1000 纵：对数或1:2000

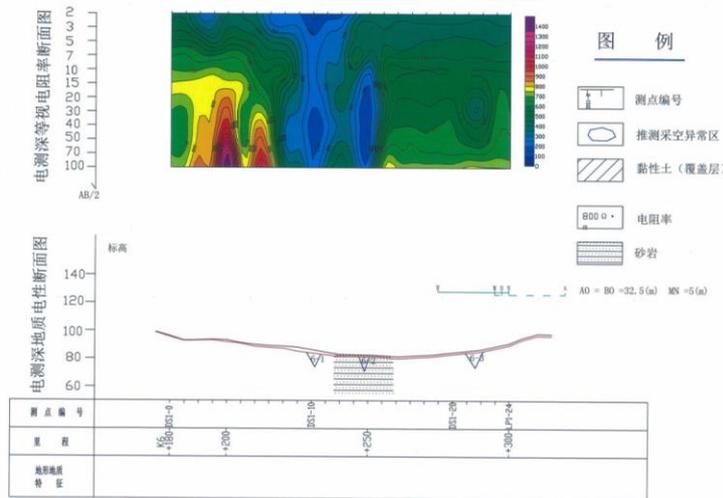


图8 横峰县罗家小窑采空区K6线电探成果图

横峰县罗家小窑采空区K7线电探成果图

比例尺：横1:1000 纵：对数或1:2000

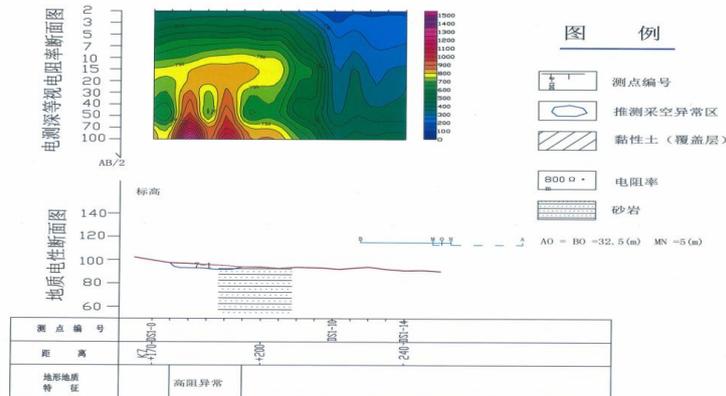


图9 横峰县罗家小窑采空区K7线电探成果图

表 2 物探异常一览表

测线号	异常编号	位置	异常特征	推断解释
K2	2-1	95~120/2	$h=12\text{m}$ , $S=5\text{m}\times 20\text{m}$ , $\rho_s \geq 400 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)
	2-2	230~235/2	$h=3\sim 4\text{m}$ , $S=2\text{m}\times 5\text{m}$ , $\rho_s \geq 300 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)
K3	3-1	95~110/2	$h=15\text{m}$ , $S=8\text{m}\times 20\text{m}$ , $\rho_s \geq 800 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)
	3-2	145~200/3	$h=20\text{m}$ , $S=7\text{m}\times 55\text{m}$ , $\rho_s \geq 350 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)
	3-3	385~390/3	$h=20\text{m}$ , $S=10\text{m}\times 5\text{m}$ , $\rho_s \geq 750 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)
K4	4-1	95~130/4	上部 $h=4\sim 8\text{m}$ , $\rho_s \leq 150 \Omega \cdot \text{m}$ 下部 $h=30\sim 55\text{m}$ , $\rho_s \geq 700 \Omega \cdot \text{m}$	上部(空洞)含水, 下部(空洞)不含水
	4-2	130~185/4	$h=3\text{m}$ 高阻体、 $h=7\text{m}$ 低阻体、 $h=20\text{m}$ 高阻体	采空区(空洞)有三层, 中间层空洞含水
	4-3	195~220/4	分别在埋深 5.5m、15m、75m 处有三个高阻体, $\rho_s \geq 500 \Omega \cdot \text{m}$ , 断面上形态呈“工”字形	采空区(空洞)共有三层
	4-4	385~395/4	$h=15\text{m}$ , $\rho_s \geq 1000 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)
K5	5-1	280~330/5	$h=3\sim 15\text{m}$ , $S=8\text{m}$ (高) $\times 50\text{m}$ (宽)	采空区(空洞)
K6	6-1	230/6	$h=30\text{m}$ , 断面形态纵长条形, $\rho_s \leq 200 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)已坍塌及含水
	6-2	250/6	顶低埋深 $h=15\sim 80\text{m}$ , 断面形态呈纵长条形, $\rho_s \leq 200 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)已坍塌及含水
	6-3	285~290/6	$h=40\text{m}$ , 断面形态椭圆形, $\rho_s \leq 400 \Omega \cdot \text{m}$	采空区(空洞)已坍塌及含水
K7	7-1	175~195/7	中心埋深为 15m, 向下未封闭。断面形态为横长条形。	采空区(空洞)

## 4 异常解释与分析

### 4.1 处理数据

在野外工作中, 由于时间和条件所限, 实测数据中有一些随机干扰信号, 数据处理前要求对实测数据进行一些必要修正。因此, 室内对野外原始测量数据进行编辑是必要的, 达到减少随机干扰、提高数据质量的目的, 为后期处理做数据准备。本次直流电法电测深数据处理是使用 GeoElectro 电法数据处理软件系统。

## 4.2 解释分析

### 4.2.1 推断解释准则

根据本区实测剖面电阻率断面特征, 建立以下推断解释准则:

①第四系残坡积土和富含水的地质电阻率较低在  $150 \Omega \cdot m$  以下, 而三叠系安源组的一套巨厚陆相含煤碎屑沉积的岩类电阻率相对较高, 一般为  $n \times 102 \Omega \cdot m$ , 随风化破碎、含水程度高低而变化, 风化破碎越强且含水反演电阻率越低。采空区 (不含水) 阻值非常高  $n \times 102 \sim n \times 103 \Omega \cdot m$ , 而采空区 (含水) 阻值则较低。

②厚层、稳定、纯净的岩层反映在电阻率断面图上为稳定的电性层; 薄层、变化大、不均匀的岩层反映在电阻率断面图上为透镜体状的电性层。

③当电阻率等值线在断面范围内有明显梯度变化, 形成横向上的高阻或低阻闭合圈时, 解释为采空区 (空洞)。

### 4.2.2 断面推断解释

#### ①K1 线

电性特征: 见附图 1, K1 线整体视电阻率较低, 均值在  $150 \Omega \cdot m$ 。点号 130~150、180~215 处, 埋深 20~30m 有一视电阻率  $100 \Omega \cdot m$  的低阻体, 但与均值  $150 \Omega \cdot m$  相差不大; 点号 95~115 埋深 20m 以下有一视电阻率大于  $200 \Omega \cdot m$  的高阻体。

解释分析: 推测该线视电阻率均值背景对应于第四系和三叠系地层, 局部的低阻体是岩层风化破碎程度不均匀、含水等造成; 而点号 95~115 处, 埋深 20m 以下视电阻率大于  $200 \Omega \cdot m$  的高阻体则可能是三叠系岩层引起, 总体该测线地层较稳定、均匀, 未见采空区 (空洞) 引起的高阻或低阻闭合异常。

#### ②K2 线

电性特征: 见附图 2, K2 线与 K1 线平行, 相距 25m, 整体视电阻率较低, 但比 K1 线要高, 均值在  $180 \sim 200 \Omega \cdot m$ 。该线有两个高阻异常, 异常 2-1 分布于 95~120 点号之间, 中心埋深约 12m, 异常规模 5m (高) \* 20m (宽), 视电阻率大于  $400 \Omega \cdot m$ ; 异常 2-2 分布于 230~235 点号之间, 中心埋深约 3~4m, 异常规模 2m (高) \* 5m (宽), 视电阻率大于  $300 \Omega \cdot m$ 。

解释分析: 该线视电阻率背景值与 K1 线相似, 对应于第四系和三叠系地层, 均值略高于 K1 线主要是所处地形略高于 K1 线, 地层岩性含水较少所致。而两个高阻体推测为采空区空洞引起。

#### ③K3 线

电性特征: 见附图 3, K3 线与 K2 线平行, 相距 25m, 整体视电阻率比 K2 线要高, 表现为测线两端高中间低, 均值在  $200 \Omega \cdot m$  左右。该线可划分三个高阻异常, 异常 3-1 分布于 95~110 点号之间, 中心埋深约 15m, 异常规模 8m (高) \* 20m (宽), 视电阻率大于  $800 \Omega \cdot m$ ; 异常 3-2 分布于 145~200 号点之间, 中心埋深约 20m, 异常规模 7m (高) \* 55m (宽), 视电阻率大于  $350 \Omega \cdot m$ ; 异常 3-3 分布于 385~390 点号之间, 中心埋深约 20m, 异常规模 10m (高) \* 5m (宽), 视电阻率大于  $750 \Omega \cdot m$ 。

解释分析: 该线视电阻率背景与 K2 线相似, 对应于第四系和三叠系地层, 均值略高于 K2 线主要是所处地形略高于 K2 线, 第四系覆盖层较薄地层岩性含水较少所致。三个高阻体推测为采空区空洞引起, 而异常 3-2 视电阻率较低则可能是空洞已部分坍塌或含少量的水所致。

#### ④K4 线

电性特征: 见附图 4, K4 线与 K3 线平行, 相距 25m, 整体视电阻率比 K3 线要高, 与 K3 线相似, 为两端高中间低, 均值在  $250 \Omega \cdot m$  左右。从断面图上看, 异常 4-1 分布于 95~130 号点, 上部顶底深度 4~8m 处有一个视电阻率  $150 \Omega \cdot m$  的低阻闭合异常, 下部 30~55m 处则有一个高阻 (大于  $700 \Omega \cdot m$ ) 闭合异常; 异常 4-2 分布于 130~185m 号点处, 浅表 3m 左右埋深有一高阻体、埋深 7m 左右的中段有一低阻体, 下部埋深在 20m 左右又有一高阻体; 异常 4-3 分布于 195~220 号点纵向上分别在埋深 5.5m、15m、75m 处有三个高阻体, 视电阻率大于  $500 \Omega \cdot m$ , 断面上形态呈“工”字形; 异常 4-4 分布于 385~395 号点之间, 有一埋深约 15m 的视电阻率大于  $1000 \Omega \cdot m$  的高阻异常体。

解释分析: 该线视电阻率背景均值与 K3 线相似, 对应于第四系和三叠系地层, 均值略高于 K3 线主要是所处地形略高于 K3 线, 第四系覆盖层较薄地层岩性含水较少所致。上述四个异常推测为采空区空洞引起。4-1 异常上部 (顶底深度 4~8m 处) 空洞已部分或全部坍塌并含水, 下部 (顶底深度 30~55m 处) 则为不含水的采空区空洞; 4-2 异常上部 (浅表 3m 左右) 空洞已部分或不含水, 中部 (埋深 7m 左右) 全部坍塌并含水, 下部 (埋深在 20m 左右) 为采空区

空洞已部分坍塌或含少量的水所致；4-3 异常及 4-4 异常为采空区空洞引起的异常。

#### ⑤K5 线

电性特征：见附图 5，K5 线与 K4 线平行，相距 25m，视电阻率均值  $400 \Omega \cdot m$ ，355 号点之后均值在  $300 \Omega \cdot m$  以下。从断面图上看，280~330 号点间有一 5-1 异常高阻体，顶底埋深 3~15m 左右，高阻体规模 8m（高）\*50m（宽）。

解释分析：该线视电阻率背景值对应于第四系和三叠系地层，前段视电阻率均值较高而后段较低，与第四系覆盖层厚薄及地层岩性含水多寡有关。而 5-1 异常为采空区空洞引起，且此空洞推测为不含水。

#### ⑥K6 线

电性特征：见附图 6，K6 线与 K5 线平行，相距分别 25m，视电阻率均值在  $500 \Omega \cdot m$  左右，该线视电阻率呈现两头高中间低的特点。从断面图上看，有三个低阻异常，其中 6-1 低阻异常位于 230 号点附近，视电阻率小于  $200 \Omega \cdot m$ ，断面形态为纵长条形，中心埋深 30m 左右；6-2 低阻异常位于 250 号点附近，断面上形态为纵长条形，视电阻率小于  $200 \Omega \cdot m$ ，顶底埋深 15~80m；6-3 低阻异常位于 285~290 号点间视电阻率小于  $400 \Omega \cdot m$ ，形态呈椭圆形，中心埋深约 40m 左右。

解释分析：该线视电阻率背景均值在  $500 \Omega \cdot m$  左右，对应于第四系残坡积土较薄和三叠系地层岩性出露地表，前段视电阻率均值较高而后段较低，与第四系覆盖层厚薄及地层岩性含水多寡有关。K6 线的三个低阻异常异常应均为采空区空洞引起，空洞推测为已部分坍塌或含水所致。

#### ⑦K7 线

电性特征：见附图 7，K7 线与 K6 线平行，相距分别 25m，视电阻率均值在  $600 \Omega \cdot m$  左右，该线视电阻率呈现 NE 端高（170~215 号点之间）SW 端低（215~240 号点间）的特点，与地形线相似。从断面图上看，175~195 号点间有 7-1 较高阻异常，中心埋深为 15m，向下未封闭。断面形态为横长条形。

解释分析：该线视电阻率背景均值在  $600 \Omega \cdot m$  左右，对应于第四系残坡积土和三叠系地层岩性出露地表有关，前半段视电阻率均值较高，与第四系覆盖层薄、三叠系安源组地层岩性出露地表有关，后半段视电阻率较低与第四系覆盖层较厚、三叠系安源组地层岩性未出露地表有关。而 175~195 号点间的 7-1 高阻异常则为采空区空洞引起，且此空洞推测为不含或含极少量水。

## 5 结语

本文运用电阻率测深和联合剖面电法对小窑采空区进行了物探测试，根据电探成果图对高电阻圈进行了解释，并对小窑采空区的分布位置、大小和深度进行了推断，取得了良好的效果。而由于无论哪种地球物理勘探方法都一定程度上受到外界环境的干扰影响，异常存在多解性，不能像钻孔一样看到真实的地层面貌。地表浅层的小窑采空区可运用物探法进行应用研究，实际工作时可结合具体要求对物探异常区进一步地钻探查验，结合两者的结果，对小窑采空区的发育情况精准判定。

### [参考文献]

- [1] 罗国平, 张春燕, 李旭. 采空区含水性探测的综合电法勘探应用研究[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(1): 44-47.
- [2] 孙吉益. 井下三极电剖面法在急倾斜煤层顶板积水采空区探测中的应用[J]. 煤矿开采, 2007, 12(5): 13-14.
- [3] 贾辉, 陈昌彦, 张辉, 等. 综合物探在京西浅层小煤窑采空区探测中的应用效果及问题探讨[J]. 工程勘察, 2017, 45(7): 73-78.
- [4] 赵忠海. 地球物理探测技术在北京门头沟小窑采空区勘查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 60-64.
- [5] 刘波, 高永涛, 金爱兵, 等. 综合物探法在平朔东露天矿铁路专用线煤窑采空区探测的应用[J]. 中国矿业, 2012, 21(9): 111-114.
- [6] 白永利. 应用综合物探技术对小煤窑破坏区的探查分析[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 130-134.
- [7] 张灯亮. 综合物探在探测矿井采空区及其富水性中的应用[J]. 勘察科学技术, 2014(4): 51-54.

作者简介：金小川（1986-），男，江西上饶人，硕士，工程师，主要从事岩土工程勘察、地基基础处理和地质灾害治理防治工作。