

文章编号: 1001-1749(2024)03-0341-08

# 基于超高密度电法的某铁路穿越采空区工程稳定性评价研究

赖国泉, 常刚

(中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

**摘要:** 为合理评价甘钟铁路某段穿越采空区工程的稳定性, 采用宏观识别和详细识别两阶段技术手段进行分析。宏观识别阶段, 通过现场测绘、工程地质调查, 并收集采空区既有煤矿地质报告后, 基本查明采空区大致范围及采煤深度。详细识别阶段, 为解决小窑采空区难以高效、精确测定的难题, 基于现场地形条件及宏观识别阶段确定的大致范围及埋置深度, 首先利用超高密度电法物探技术特有的分辨率高、定位准确、经济、灵活等特点, 查明采空区精确分布范围、大小、深度及影响铁路范围。其次针对性地采用地质钻探验证超高密度电法探测结果的准确性, 并进一步明确了采空区采动带、采动冒落带及裂隙带特征。基于两阶段技术成果, 从地表变形特征、开采深厚比( $H/M$ )和顶板岩土体对场地稳定性影响三方面对采空区稳定性进行了定性评价, 结论为两处采空区处于欠稳定状态。定量计算表明, 1#采空区地基不稳定, 2#采空区地基欠稳定。结合定性与定量评价结果, 综合评定2处采空区地基稳定性结果为欠稳定状态。

**关键词:** 铁路采空区; 超高密度电法; 地质钻探验证; 稳定性评价

**中图分类号:** U212.2; P631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.11

## 0 引言

采空区问题是我国资源大省较为常见的地质灾害, 也是公路、铁路工程中经常遇到的不良地质现象<sup>[1-3]</sup>。目前新建铁路工程一般采取绕避措施解决采空区问题, 部分既有低等级铁路从采空区通过。由于采空区存在隐蔽性、复杂性、突发性及长期性等特点<sup>[4]</sup>, 给既有铁路的安全运营带来了极大的挑战, 特别是低等级铁路提速后, 既有线下伏采空区稳定性问题更加突出。如何快速查明采空区边界条件并对其稳定性作出客观评价是既有采空区上方铁路安全运营面临的首要问题<sup>[5]</sup>。

查阅技术文献<sup>[6-11]</sup>可知, 识别铁路采空区, 一般采取两个阶段技术手段。第一阶段为宏观识别阶段, 基于收集区域地质资料, 整体上掌握区域工程地

质、水文地质、矿层分布。对项目区临近的煤矿开展调研, 详细了解区内钻孔资料, 掌握煤层的埋深、展布及产状要素等; 调查走访当地居民, 了解项目区小窑开采的历史、方法及埋深、范围。第二阶段为详细识别阶段, 采用测绘、物探、钻探及试验等技术手段进一步识别采空区。首先基于第一阶段的分析结果, 结合地形, 采空区大致埋深及各种物探方法的适用条件, 针对性地采用合理的物探技术进行采空区识别。其次采用钻探手段验证物探判定结果及边界范围。最后基于前两个阶段取得的成果结合变形监测、数值分析、理论分析等方法对其稳定性作出评价分析。

这里以某小型采空区穿越甘钟铁路某段为例, 采用两阶段识别方法, 主要基于超高密度电法结合钻探验证查明了采空区范围和甘钟线的相对位置关系及采空区大小、埋藏深度、开采时间、开采方式、回

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 中国中铁重大专项(2022—专项—07); 中铁九局科技开发计划(YGSJSZX202308-01)

第一作者: 赖国泉(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害治理相关研究方面的工作, E-mail: 273085646@qq.com。

填塌落等情况,并基于综合勘察结果对采空区稳定性进行了合理评价。

## 1 采空区概况

甘钟线是陕西省境内一条连接甘泉北站与钟家村站的铁路,运营里程 227 km。甘钟铁路地处关中平原与陕北黄土高原的过渡带,项目区位于甘钟线 K158+500~K159+050 段,位于洛河东部河谷阶地,紧邻澄城县安里煤矿。项目区煤炭资源丰富,埋深较浅,含主要可采煤层 2 层(3#煤、5#煤),总厚度在 3.5 m 左右。上世纪初至本世纪初,受当地煤炭资源开采影响,导致区内采空区较发育,曾引起局部地表发生塌陷变形。

### 1.1 地形地貌

项目区地处渭北高原,洛河之畔,由于地表经受长时间的剥蚀及流水下切冲刷,形成了黄土梁峁沟壑

地貌,见图 1。南北向“V”型冲沟发育,地形比较复杂。探测区地形呈东高西低之势,海拔标高 +490 m~+400 m,相对高差约 100 m,铁路西侧约 200 m,洛河自北向南流经本区。

### 1.2 地层岩性

区内出露地层从上至下为第四系松散层,下伏基岩为石炭系上统太原组—二叠系下统山西组( $C_{2t}$ — $P_{1sh}$ )石英砂岩、砂质页岩。具体地层岩性特征见表 1。



图 1 采空区地形地貌

Fig. 1 The goaf topography and landform

表 1 项目区地层特征表

Tab. 1 Stratum characteristic

系名	统名	组列	符号	地层特征
第四系	中更新统	Q	$Q_{2eol}$	分布于二级黄土台塬,沟谷两侧斜坡出露,岩性为离石黄土夹古土壤,裂隙和孔隙发育,厚度 20 m~30 m。
			$Q_{2al}$	分布于离石黄土之下,岩性为黄土状亚砂土,致密,底部为砂砾石、卵砾石,为洛河 II~III 级基座阶地,厚度 5 m~10 m。
二叠系	下统山西组	P	$P_{1sh}$	岩层近水平。一般厚度约 45 m,下部含 3 号煤层。 下部:以各级粒度砂岩、粉砂岩为主,砂质泥岩次之,为区域含煤层段(3 号煤层)。底部为一层灰白色中粒石英砂岩。 上部:岩性以碎屑岩为主,粘土岩次之,一般不含煤。
石炭系	上统太原组	C	$C_{2t}$	出露于区内西南部洛河河岸,岩性以石英砂岩、粉砂岩、铝质泥岩、碳酸盐岩组成,地层厚度平均 40 m。 为本区主要含煤地层,含煤 2 层,分别为 5 号、10 号,5 号煤层为附近安里煤矿主要可采煤层。

### 1.3 地质构造及地震

区域大地构造位置处于祁吕贺山字型构造前弧东翼内侧与新华夏系第三沉降带鄂尔多斯盆地东南缘复合部位,基本构造形态是一向北倾斜的单斜构造,沿倾向和走向均发育有次一级褶曲,伴有北东向及东西向断裂。

安里煤矿矿井东南部边界外有 F29 正断层穿过铁路 K158+850。F29 正断层,走向北 55°东,倾向南东,倾角 70°左右,断距 90 m 左右。

### 1.4 水文地质

区内年平均降水量 491.21 mm,降水主要集中在

在 7—9 月,平均降水强度 8 月为最大,均值为 92.76 mm。

区内常年流水河流为长宁河,从项目区西部经过,最后汇入洛河,区内实测水面宽度 1.5 m,水深 0.18 m,流速 0.55 m/s,河流流量 0.14 m<sup>3</sup>/s。

区内地下水分为第四系松散层孔隙裂隙水以及石炭—二叠系碎屑岩裂隙水。第四系松散层孔隙裂隙水由黄土状土、砂砾石,以及冲洪积相的粉细砂及含砾砂含水层构成,厚度 5 m~10 m。其地下水主要接受大气降水和侧向径流补给。石炭—二叠系碎屑岩裂隙水主要赋存于二叠统至上石炭统的细至粗

粒砂岩和砾岩层中。

## 2 采空区综合识别分析

### 2.1 宏观识别分析

通过现场测绘、工程地质调查,并收集项目区既有煤矿地质报告后综合分析表明,探测区北侧约 800 m 处存在一煤矿,名为安里煤矿。探测区处于安里煤矿采煤区边界,探测区西侧洛河河畔发现一处煤矿巷道口(图 3)。探测区煤矿以小煤窑开采,开采历史久远,开采方式简单,平硐放顶,人力镐采,开采深度和规模有限,区内 3 号煤埋深相对较浅,5 号煤、10 号煤埋深较深,小煤窑开采难度较大,因此判断探测区内煤矿开采以 3 号煤为主。

现场调查表明,甘钟线 K158+600~K158+750 段以挖方路堑形式通过,该段铁路护栏可见明显沉降(图 4),路基道砟相对较厚,铁路部门在路基沉降后,对轨道进行起道补砟工作,确保铁路运营安全。根据现场调查的沉降范围,可初步圈定铁路采空区影响范围。

基于以上综合分析绘制了铁路与采空区空间平面位置图(图 2)。

### 2.2 详细识别分析

由于小煤窑采空区分布规律差,直接采用钻孔核査效果差,详细识别阶段根据宏观阶段所识别的地形条件、采空区大致埋置深度,首先选择合理物探勘查技术进行详査,然后根据物探结果进行针对性钻探验证。

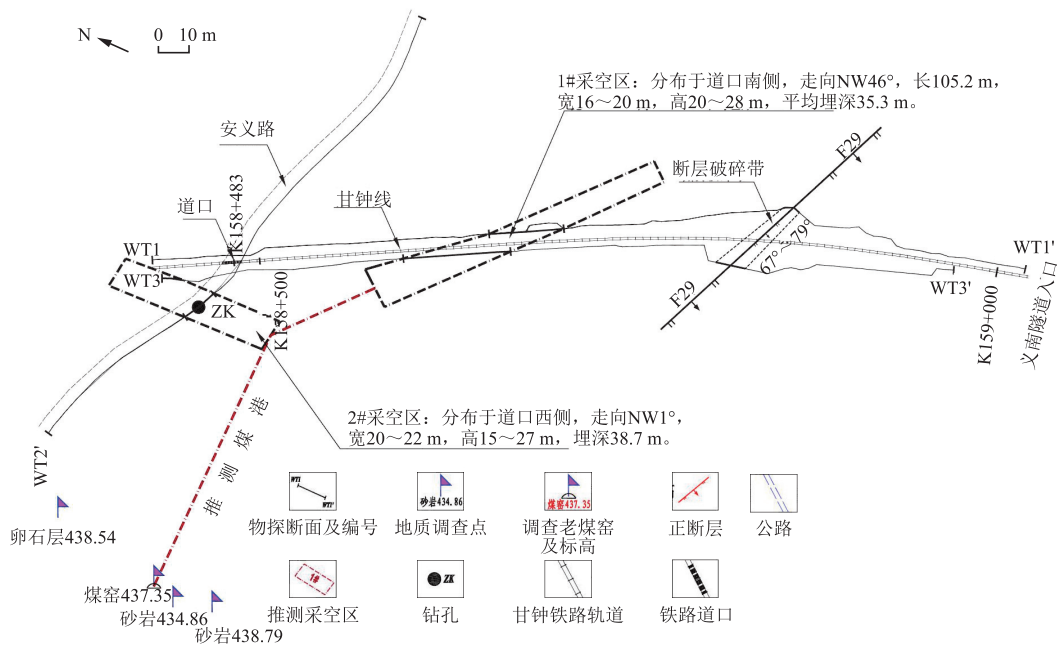


图 2 铁路—采空区空间关系平面图

Fig. 2 Plan of railway-goaf spatial relationship



图 3 煤矿巷道口

Fig. 3 Coal mine roadway opening

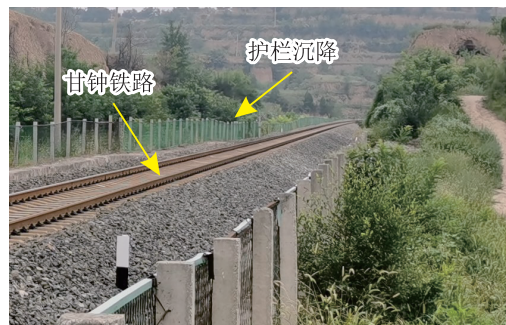


图 4 铁路围网沉降现状

Fig. 4 Current situation of settlement of railway purse seine

2.2.1 超高密度电法物探结果分析

根据宏观阶段识别结果,采空区深度估计小于 100 m,采空区地形条件较好,物探技术选择采用超高密度电法进行。

在探测区布设 3 条断面,分别为 WT1-1'(沿铁路方向靠东侧)、WT2-2'(沿铁路方向靠西侧)、WT3-3'(沿安义路垂直于铁路),见图 2。具体物探探测成果解译如下。

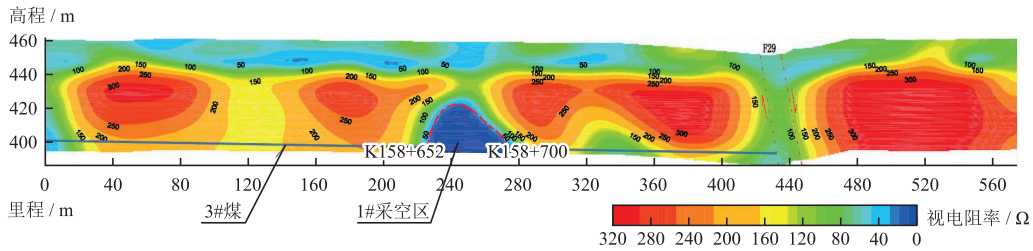


图 5 WT1-1'断面物探反演成果图

Fig. 5 The geophysical inversion result map of WT1-1'

图 5 为 WT1-1'(沿铁路方向靠东侧)断面高密度电法反演成果图。由图 5 分析可知,整体呈“纵向分层,横向分块”的特点。电性结构分两层,顶部为相对低阻体,为表层黄土及砂卵石层的电性反映,底部为相对高阻区,为底部相对完整基岩的电性反映。其中,电性结构揭示在铁路 K158+652~K158+700 段存在一低阻异常区,沿铁路分布长度约 50 m,高度 26 m,最小埋深 36.6 m,分布深度与煤层埋深一致,结合区域地质资料判断该处为采空区(1#采空区),且顶板岩层已经发生了垮塌。K158+865 处发现一处明显低阻异常带,推测可能为区域 F29 断层破碎带。

图 6 为 WT2-2'(沿铁路方向靠西侧)断面高密度电法反演成果图。由图 6 分析可知在探测区起点至 K158+452 段存在一低阻异常区,最大高度约 14 m,分布深度与煤层埋深一致,结合区域地质资料判断该处为采空区(2#采空区),且顶板岩层已经发生了垮塌与上部土洞导通,最小埋深 47.0 m。K158+594.8~K158+665.4 段为一低阻异常区,沿铁路分布长度 70.6 m,最小埋深约 34 m。分布深度与煤层埋深一致,结合区域地质资料判断该处为采空区(1#采空区),且顶板岩层已经发生了垮塌。

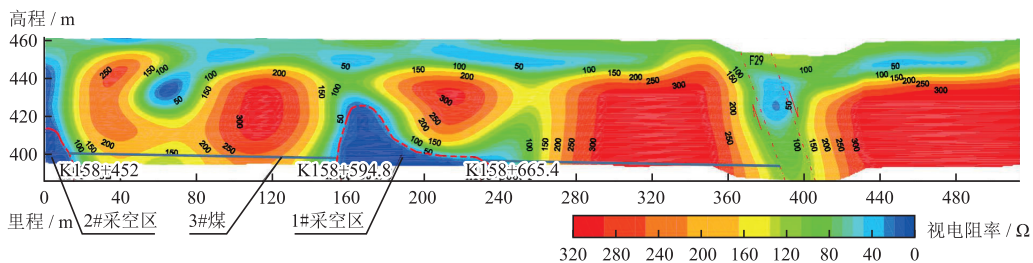


图 6 WT2-2'断面物探反演成果图

Fig. 6 The geophysical inversion result map of WT2-2'

图 7 为 WT3-3'(沿安义路垂直于铁路)断面高密度电法反演成果图。由图 7 分析可知在道口以西沿义安路约 33 m~52 m 段存在一低阻异常区,沿义安路分布长度约 21 m,最大高度约 19.8 m,埋深 38.7 m,分布深度与煤层埋深一致,结合区域地质资料判断该处为采空区(2#采空区),且顶板岩层已经发生了垮塌。

由图 5~图 7 综合分析可知,1#采空区走向

NW46°,宽 16 m~20 m,平均埋深 35.3 m,沿线路直接影响里程 K158+594.8~K158+700 段,长 105.2 m,与现场调查最大塌陷区分布基本一致;2#采空区走向 NW1°,宽 20 m~22 m,埋深 38.7 m,沿线路直接影响里程探测区起点~K158+452 段。

2.2.2 钻探验证结果分析

根据物探成果并结合现场实际可施钻条件,选择在物探揭示的 2#采空区顶部地面沿义安路路肩



小的情况下,地表将出现大裂缝、台阶状断裂,甚至出现塌陷坑。

根据工程地质调查、物探、钻探结果分析,采空区主采煤层为 3# 煤,采深约 57 m~64 m。顶板岩层为以砂岩、泥岩为主,厚度约 30.5 m,属中硬岩 ( $f_{rk} \geq 30$  MPa),地表覆盖层为第四系黄土、砂土及卵石层,厚度约 26.5 m。结合区域资料,3# 煤平均厚度约 1.0 m,开采深厚比为 57/64,根据《煤矿采空区岩土工程勘察规范》(GB51044-2014)表 12.2.3-3 及《采空区公路设计与施工技术细则》(JTJ/TD31-03-2011)表 4.2.1-4,采用不规则柱式开采情况下,两处采空区稳定性判定为欠稳定。

### 3.1.3 顶板岩土体对场地稳定性影响

采空区顶板埋深约 57 m,地表覆盖层厚约 26.5 m,下伏基岩厚度约 30.5 m,按《铁路工程不良地质勘察规程》(TB10027-2012)说明表 10.5.8,当第四系覆盖层按 1/3 换算为基岩厚度时,采空区顶板基岩换算厚度为 39.3 m,介于 30 m~60 m 之间,处于 II-可能变形区。

### 3.2 定量评价分析

按《煤矿采空区岩土工程勘察规范》(GB51044-2014)及《工程地质手册》(第五版),当建筑物处在采空区影响范围内时,可按下式验算地基稳定性。

设建筑物基底单位压力为  $P_0$ ,则作用在采空区顶板的压力  $Q$  为:

$$Q = G + BP_0 - 2f$$

$$= \gamma H \left[ B - H \tan \varphi \times \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + BP_0 \quad (1)$$

式中:

$G$ ——巷道单位长度顶板上岩层所受的总压力(kN/m), $G = \gamma BH$ ;  $B$ ——巷道宽度(m);

$f$ ——巷道单位长度侧壁的摩阻力(kN/m);

$H$ ——巷道顶板的埋藏深度(m);

$\varphi$ ——岩层的内摩擦角( $^\circ$ );

$\gamma$ ——岩层的重度(kN/m<sup>3</sup>)。

当  $H$  增大到某一深度,使顶板岩层恰好保持自然平衡(即  $Q = 0$ ),此时的  $H$  称为临界深度  $H_0$ ,即:

$$H_0 = \frac{B\gamma + \sqrt{B^2\gamma^2 + 4B\gamma P_0 \tan \varphi \times \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}}{2\gamma \tan \varphi \times \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} \quad (2)$$

根据《煤矿采空区岩土工程勘察规范》(GB51044-2014)及《工程地质手册》(第五版):当  $H < H_0$  时,地基不稳定;当  $H_0 \leq H \leq 1.5H_0$  时,地基稳定性差;当  $H > 1.5H_0$  时,地基稳定。

根据现场实际,1# 采空区顶部为甘钟铁路,附加荷载为火车荷载,2# 采空区顶部为公路,由于其紧邻安里煤矿,附加荷载按运输车辆满载考虑。按照以上所列公式分别对 1# 采空区及 2# 采空区稳定性进行了计算,参数取值见表 2,计算结果见表 3。

计算结果表明,现状条件下,2# 采空区顶板厚度  $H_0 \leq H \leq 1.5H_0$ ,说明地基欠稳定,1# 采空区  $H \leq H_0$ ,说明地基不稳定。

### 3.3 综合评价分析

根据地面变形情况、开采深厚比( $H/M$ )、顶板岩土体性质及地面荷载情况定性、定量评价结果,采空区稳定性综合评价结果见表 4。

综合分析可知,2 处采空区现状条件处于欠稳定状态。由于甘钟铁路为国家重点工程,根据《铁路工程不良地质勘察规程》((TB10027-2012)),需结合基础类型、采空区规模及空洞顶板以上岩体的完整情况进行地基处理。

表 2 计算参数取值

Tab. 2 Calculation parameter value

采空区	附加荷载类型	顶板厚度 $H/m$	巷道宽度 $B/m$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	上覆岩层厚度 加权平均重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	附加荷载 $P_0/kPa$
2#	满载运输车	38.7	6.0	40.0	20.50	30.0
1#	火车、路基	35.3			19.85	80.0

表 3 稳定性计算结果

Tab. 3 Stability calculation result

采空区	建筑物类型	巷道宽度 $B/m$	临界深度 $H_0/m$	$1.5H_0/m$	$2.0H_0/m$	顶板厚度 $H/m$	评价
2#	公路	6.0	34.35	51.52	68.70	38.7	欠稳定
1#	甘钟线		36.58	54.86	73.15	35.3	不稳定

表 4 稳定性综合评价结果

Tab. 4 Results of comprehensive stability evaluation

采空区	各因子评价结果				综合评价
	地表变形	开采深厚比	顶板岩土体性质	地面荷载	
1#	基本稳定	欠稳定	可能变形区	不稳定	欠稳定
2#	基本稳定	欠稳定	可能变形区	欠稳定	欠稳定

## 4 结 论

通过对甘钟铁路穿越某小型煤炭采空区探测,可以得出以下几方面的认识:

1)宏观识别阶段,通过现场测绘、工程地质调查,并收集项目区既有煤矿地质报告后,基本查明采空区大致范围及采煤深度。

2)详细识别阶段,首先利用超高密度电法物探技术特有的分辨率高、定位准确、经济、灵活等特点,查明采空区精确分布范围、大小、深度及影响铁路范围。其次针对性地采用地质钻探验证超高密度电法探测结果的准确性,并进一步明确了采空区采动带、采动冒落带及裂隙带特征。

3)从地表变形特征、开采深厚比( $H/M$ )、顶板岩土体对场地稳定性三方面对采空区稳定性进行了定性评价,结论为两处采空区欠稳定。

4)定量计算表明,1#采空区地基不稳定,2#采空区地基欠稳定。结合定性与定量评价结果,综合评定2处采空区地基稳定性结果为欠稳定状态。

### 参考文献:

- [1] 张莹,杜宇本,蒋良文,等. 玉磨铁路道班河铜矿采空区工程稳定性评价[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 29-32.  
ZHANG Y, DU Y B, JIANG L W, et al. Engineering stability evaluation on daoban river copper mine goaf of yuxi-mohan railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12): 29-32. (In Chinese)
- [2] 刘熙,张昆,李晓凡. 铁路穿越小型采空区稳定性的评价方法研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(12): 32-35.  
LIU X, ZHANG K, LI X F. Research on the assessment method for stability of railway crossing small-sized mined-out region[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(12): 32-35. (In Chinese)
- [3] 彭志雄,董道军. 采空区对高速铁路的稳定性评价分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(17): 212-220.  
PENG Z X, DONG D J. Evaluation and analysis of the stability of the high speed railway in the mined out area [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(17): 212-220. (In Chinese)
- [4] 冯兴亮,曹小亮. 某高速公路采空区稳定性综合评价及治理方案研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 126-130.  
FENG X L, CAO X L. Study on comprehensive evaluation and treatment scheme of goaf stability of an expressway[J]. Highway, 2022, 67(10): 126-130. (In Chinese)
- [5] 严栋. 高速铁路紧邻深厚采空区稳定性分析及对策[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(6): 37-42.  
YAN D. Stability analysis and treatment measures of high-speed railway adjacent to deep coal mine goaf[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(6): 37-42. (In Chinese)
- [6] 雷旭友,李正文,折京平. 超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 340-347.  
LEI X Y, LI Z W, ZHE J P. Applications and research of the high resolution resistivity method in exploitation of caves, mined regions and Karst Region [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 340-347. (In Chinese)
- [7] 徐亮,董建军,樊东峰,等. 变电站下伏采空区安全稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(4): 230-236.  
XU L, DONG J J, FAN D F, et al. Safety and stability analysis of mined-out area underlying substation [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(4): 230-236. (In Chinese)
- [8] 李志华. 铁路煤矿采空区综合物探技术研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(10): 26-31.  
LI Z H. The research of comprehensive geophysical technology in railway coal mine goaf exploration [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(10): 26-31. (In Chinese)
- [9] 谢猛. 综合勘察方法在蒙华铁路石膏矿采空区选线勘察中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 58-64.  
XIE M. Application of comprehensive survey methods in the gypsum mine goaf for Mengxi-Huazhong railway route selection [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard

- and Control, 2021, 32(1): 58–64. (In Chinese)
- [10] 题正义, 张小双, 乔宁, 等. 瞬变电磁法在煤矿不明采空区积水探测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 102–107.
- TI Z Y, ZHANG X S, QIAO N, et al. Transient electromagnetic method applied to the detection of unknown goaf water in coal mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 102–107. (In Chinese)
- [11] 张淑坤, 张向东, 陆启珂. 枣木高速公路下伏采空区综合物探方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 94–98.
- ZHANG S K, ZHANG X D, LU Q K. Application of comprehensive geophysical exploration in detection of mined area under Zaomu highway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(1): 94–98. (In Chinese)

## Research on engineering stability evaluation of a railway runs through a goaf based on high density electrical method

LAI Guoquan, CHANG Gang

(Northwest Research Institute Co., Ltd. of C. R. E. C., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to reasonably evaluate the stability of a section of Ganzhong Railway crossing goaf, two stages of technical means of macro identification and detailed identification are adopted. In the macro identification stage, the general scope of the goaf and the depth of coal mining are found after site surveying and mapping, engineering geological survey, and collecting the geological report of the coal mine in the goaf. In order to solve the problem that small kiln goaf is challenging to measure efficiently and accurately, based on the field terrain conditions and the general range and burial depth determined at the macro identification stage, the precise distribution range, size, depth, and influence railway range of the goaf are identified first by using the characteristics of ultra-high density electrical geophysical exploration technology, such as high resolution, accurate positioning, economy, and flexibility. Secondly, geological drilling was used to verify the accuracy of the detection results of the ultra-high density electrical method, and the characteristics of the mining zone, mining caving zone, and fracture zone in Goaf were further defined. Based on the technical achievements of the two stages, the stability of goaf is qualitatively evaluated from three aspects: surface deformation characteristics, mining depth ratio ( $H/M$ ), roof rock and soil mass influence on-site stability, and the conclusion is that the two goafs are in an unstable state. The QUANTITATIVE calculation shows that the 1# goAF foundation and the 2# GOAF foundation are unstable. Combined with the qualitative and quantitative evaluation results, the comprehensive evaluation results of the two goaf foundation stability are in an unstable state

**Keywords:** railway goaf; ultra high density electrical method; geological drilling verification; evaluation of stability