# 综合物探法在辽宁某露天矿综合治理工程 实际应用案例分析

#### 李永华1,2

<sup>1</sup>中煤科工生态环境科技有限公司,天津 <sup>2</sup>中煤科工鑫融科技创新发展有限公司,山东 济宁

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月31日

## 摘要

辽宁某露天矿周边存在诸多煤矿老窑采空区,由于历史原因造成开采资料不齐全,探测难度大,广泛分 布于矿坑周边的采空区,对地面房屋建筑和居民生活安全造成巨大威胁,且遗留残煤引发自燃,进一步 恶化了当地生态环境。本文考虑地形环境和单一采空区调查方法的局限性,综合选用时移航磁法、半航 空瞬变电磁法、浅层二维地震法,经钻探验证,取得效果良好。

#### 关键词

采空区,二维地震,时移航磁,半航空瞬变电磁

## Case study on the Practical Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in the Comprehensive Treatment Project of an Open Pit Mine in Liaoning Province

#### Yonghua Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>China Coal Technology & Ecological Environment Technology Co., Tianjin <sup>2</sup>China Coal Industry Xinrong Technology Innovation Development Co., Jining Shandong

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 20<sup>th</sup>, 2025; published: May 31<sup>st</sup>, 2025

There are many goaf areas of old coal mines around an open pit mine in Liaoning province. Due to historical reasons, mining data are not complete and detection is difficult. They are widely distributed in goaf areas around the pit, posing a great threat to the ground buildings and residents' life safety, and residual coal causes spontaneous combustion, which further worsens the local ecological environment. Considering the limitations of topographic environment and single goaf survey method, the time-shifting aeromagnetic method, semi-airborne transient electromagnetic method and shallow two-dimensional seismic method are comprehensively selected in this paper.

#### **Keywords**

Gob Area, Two-Dimensional Seismic, Time-Shifting Aeromagnetic, Semi-Airborne Transient Electromagnetic

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ •

**Open Access** (cc)

## 1. 引言

东北及西北地区作为我国重要煤炭资源富集区,具备优良的煤层赋存地质条件。伴随综合机械化采 掘技术的普及应用,全国采空区总量已逾250亿m<sup>3</sup>[1][2]。值得注意的是,受早期粗放开采模式影响, 大型矿区周边普遍遗留大量无序开采的小型煤窑,其原始开采工艺形成的非系统性采掘行为,已严重威 胁区域生态安全及民生安全[3]-[5]。在此背景下,精准探测采空区三维空间特征及边界参数,已成为地质 灾害防治体系构建的重要基础。

当前矿山采空区勘探主要采用电法勘探、磁法勘探及地震反射波法等技术手段[6]。近年来,学界对 重力勘探在采空区探测中的应用潜力开展了初步探索[7]-[10]。本文研究区域涵盖露天矿坑及其周缘边坡, 受露井联合开采影响,存在边坡失稳、地表沉降、煤层自燃及历史遗留软弱地层等多重致灾因素。基于 场区复杂地质条件,综合确定采用时移航空磁测、半航空瞬变电磁法及二维地震反射波法构建综合探测 体系,并辅以钻孔数据验证。

#### 2. 工作区地质特征

本文基于辽西地区某露天矿综合物探数据解译成果,结合区域构造地质背景开展多源信息整合分析。 研究区勘查面积 6.22 km<sup>2</sup>, 地貌单元属构造剥蚀丘陵, 地形呈东南 - 西北向缓倾斜(见图 1), 绝对高程区 间 165 m~200 m (相对高差 35 m), 平均坡降约 0.47%。矿层赋存于陆相断陷盆地沉积序列, 岩性组合具 显著非均质性,主体由互层状砂岩-砂砾岩-砂质页岩-煤系地层构成。上覆岩组以粗粒砂岩、砂砾岩 及厚层砂质页岩为主;底板岩系发育泥质砂页岩、粉砂岩夹薄煤线。砂页岩层理发育,风蚀作用易形成 薄片状剥离结构,水化作用下呈现明显塑性特征。底板岩层天然含水量较高导致力学强度显著低于煤层 顶板岩体,这种差异风化特性极易诱发坍塌滑坡等地质灾害。

## 3. 煤层采空区地球物理特征

采动作用下覆岩结构破裂及位移演化引发应力场重构,形成具有典型工程地质分区的"三带"结构

体系,即:垮落带、导水裂隙带、弯曲下沉带[11](见图 2)。研究表明,上覆岩层受采矿扰动产生的差异 沉降变形,通过地球物理响应特征与三带空间发育参数的耦合表征,为构建采空区地质异常体识别模型 提供了理论依据[12]。



Figure 1. Topography of the project area 图 1. 项目区地形地貌





## 3.1. 波阻特征

煤层经开采后与周边未开采区域相比存在明显密度差异和波阻抗差异,其采空区域地层干涉和异常 波场为采空区勘察探测奠定了前提条件[13] [14]。煤炭开采的巷道和空洞区域改变了地球物理场在水平和 垂直方向上的连续性,这使得地震勘查无法获取具有一定振幅强度的反射波,具体表现为零星的短轴杂 射反射。根据这种波阻特性,我们可以确定采空区域的位置。

#### 3.2. 电性特征

煤层开采后"三带"的产生打破了原有地层横向上电阻率均匀分布特性,按照电阻率异常可将采空 区分为:空洞型、充填型和塌陷型三类[15]。空洞型采空区填充不完整,空气占据空洞,表现为高阻;充 填型采空区空腔被水地下水回灌充填,表现为低阻;塌陷型采空区特性介于两者之间,当采空区被上覆 松散裂隙带完全充填,表现为低阻异常,充填不完整则表现为高阻异常。这种较大的电性差异是开展采 空区地球物理勘探的前提。

采用半航空瞬变电磁方法时,我们把发射器放在了地面上,通过高能的地面发射设备发送出阶跃式 的电磁波信息,然后关闭电源以产生电磁感应的空间磁场来触发地球表面及深层地质结构中的电性差别 区域。利用无人机收集这些电性差异体产生的电磁感应二次场信号并在空中对它们进行解析,以此实现 勘探地下物体的目标[16],工作原理见图 3。



**Figure 3.** Working principle of semi-aerial transient electromagnetic method 图 3. 半航空瞬变电磁法工作原理

且半航空瞬变电磁法相较于其他地球物理勘探手段具有其自身优势特点:

(1)半航空瞬变电磁法将发射源置于地表,通过无人机携带接收装置在探测区域上空展开电磁信号 采集。这种测量手段能够产生比航空瞬变电磁法更为精确的观测数据,从而显著增强对地面探测的深度。

(2) 无人机平台的使用能够最大程度提高测点密度和工作效率,确保地半航空瞬变电磁法作业人员 在野外复杂地形条件下安全工作。

(3) 野外工作时,可根据实际情况需要,通过调整源的位置,甚至进行多辐射场源覆盖,可以更详细 探测地下异常体,大大提高分辨率和探测深度。

#### 3.3. 磁场特征

当煤层发生自燃时,覆盖其上的岩石中菱铁矿及黄铁矿结晶体由弱磁性转化为磁性矿物,随着燃烧 温度逐渐接近居里点,冷却后烧变岩所保留的热剩磁场就越强,相反则较小[17]。这导致火区覆岩磁化率 要远大于未受火焰侵袭部分,并由此产生了显著的磁性差异。为了证实这一现象,我们利用该地区钻孔 样本和地面覆盖岩石采样进行了磁化率测试,进一步验证了煤自燃后烧变岩磁性得到增强,区域烧变岩 取样和岩石磁化率测定结果如表1所示,为此磁法勘探在火区探测中起到重要作用。

表 1. 项目区岩石磁化率测定表		
序号	性质	磁化率(10 <sup>-3</sup> SI)
1	泥岩	0.42
2	砂岩	0.41
3	烧变岩	2.71
4	煤岩	0.02
5	砾岩	0.13

Table 1 Determination of magnetization rate of rocks in the project area

光泵磁力仪是主要测量设备,由光泵作用排列好的原子磁矩,在特定频率的交变电磁场的作用下, 产生共振吸收作用,打乱原子的排列。发生共振吸收现象的电磁场频率与测试地层所在点的外磁场强度 成比例关系, 故测定这一频率就可以测出外磁场的值。此种技术的主要优势在于其高度敏感, 可以达到 ±0.01 伽马级别的准确度,可测定总磁场强度的绝对值,并且不受零点掉格或温度影响。此外,它可以在 运动环境中实现高速且精准的持续监测,其原理示意如图4所示。



Figure 4. Schematic diagram of the principle of aeromagnetic measurement 图 4. 航磁测量原理示意图

## 4. 探测方法应用与成果解释

本次探测基本思路为:利用时移航磁法和半航空电磁法测量确定火区和采空区范围,通过二维地震 反射波法对异常的深度、规模进行更细致的划分,最后通过钻探对圈定异常区进行验证。

#### 4.1. 时移航磁法

本次时移航磁探测工作测线布设方向呈北东向,沿地表起伏飞行,设计飞行高度不大于 50 m,线距 10m,连续采样,飞行速度控制在11~26 km/h之间。使用设备为大疆 M300 RTK 无人机搭载铷光泵磁力 仪以和 GSM-19T 磁力仪, 共完成 2005.2 km 测量任务。

图 5 为 L5 位置反演磁化强度断面图。该测线位于勘探区南侧,断面长度 4370 m,地形整体表现为

中部低两侧高,大部分测点位于沟底,坑底下部开采煤层为太平组下部煤层。纵向上,磁性由浅至深呈 "低 - 高 - 低"的变化趋势。横向上,在太平煤层共发现异常1处,横向上位于水平距离 820~3600 m 之 间,呈相对高磁性的特征,幅值较强。高磁性异常形态主要表现为随边坡形态近一致的长轴状特征,由 于无人为工作影响,推断为原生地层下的残煤自燃所形成的火烧区。





选取相同位置对反演结果进行水平切片,获得二次航磁的约 100 m 深度反演结果水平切片。根据两次反演结果切片确定的高磁性异常区中心位置与首次航磁测量的结论几乎一致,二次航磁测量反演结果 与一次航磁测量反演结果具有很好的对应效果。

钻孔 ZKE2-2 设计孔深 92 m,终孔深度 102 m,终孔孔位位于太平上层,孔内测温超 200℃,钻孔 ZKE18-2,终孔深度 89 m,钻进过程遇异常高温,停止钻进,仅孔口位置温度超过 200℃,后测温装置仅 下到 50 m 位置,孔内温度高达 255℃,有力验证了航磁对火区的探测结果。

#### 4.2. 半航空瞬变电磁法

采用地面发射、航空接收的半航空瞬变电磁法,南坡部分区域是今后灭火治理实施的重点区域,要求高精度探测采空区,测线布置方向呈北东方向,布设线距 20 m,其余区域的探测目的是探测采空区的分布范围,布设线距 50 m,测线布置方向呈北东方向。发射系统为地面长导线电性源,发射极距 1.2 km,发射电流 40 A,基频 12.5 Hz。接收系统为空中回线框,采用旋翼无人机平行于发射源飞行采集感应电动势响应,接收线圈有效面积 2160 m<sup>2</sup>,飞行高度 50 m,飞行速度约为每秒 8 米,实时数据采集,顺利完成覆盖 10.08 km<sup>2</sup>测量任务。

图 6 为 15 线视电阻率断面图。该测线位于勘探区南侧,断面长度 4370 m,地形整体表现为中部低两侧高,大部分测点位于沟底,据前述可知,坑底下部开采煤层为太平组下部煤层。纵向上,电阻率由 浅至深呈"低 - 高 - 低"的变化趋势,与地层电性变化趋势相吻合,说明断面图较真实地反映了地下地 质情况。横向上,在太平煤层共发现低阻异常 2 处,横向上分别位于水平距离 500~1500 m 及 3560~3920 m 之间,呈相对低阻的特征。



**Figure 6.** Semi-airborne transient electromagnetic 15 line-view resistivity cross section 图 6. 半航空瞬变电磁 15 线视电阻率断面图

该层位发现低阻异常区 2 处,主要位于南侧坡顶线附近,异常区大面积位于坡顶线北侧,结合相关 地质、钻探资料及采掘资料,该区域沟底及半坡处存在明显的孙家湾层煤层采掘活动,推断低阻异常区 为采空区的电性特征,且存在局部积水的可能。

#### 4.3. 二维地震法

根据上述磁法、电法探测异常区进一步使用二维地震法进行探测,本次探测在露天矿坑南北两帮共 布设地震测线 9 条,北帮 3 条,南帮 6 条。地震试验所用设备为美国 INOVA 公司生产的 G3i 型遥测数 字地震仪和莫茨公司生产的 18 吨 M18/612HD 可控震源。震源激发 4 次震动,驱动电平 75%,观测系统 采用短边 120、长边 200,中间不对称激发接收,320 道接收,炮间距 4 m,80 次覆盖,使用 60 Hz 固定 频率检波器,采样间隔 0.5 ms,记录长度 2000 ms。

地震剖面图中,采空区的出现会打破反射波组原有的强振幅特性和同相轴的连续性[18]。图 7 为 NE 向的 Z2 测线水平叠加时间剖面,由该地震时间剖面图可知,T0 反射波为弱反射和强反射分界面。T0 反射波清晰,能量强,连续性好。浅部反射波同相轴在 CDP94-812、CDP1513-1612、CDP1693-1787、CDP2175-2244、CDP2319-2418 和 CDP2660-2787 范围连续性差,反射波组的频率突然变低,反射波杂乱无章,同相轴的突然消失,符合采空区异常特征,分析推断为采空塌陷区,引起原地层产状发生剧烈改变。



**Figure 7.** Horizontal superposition time profile of shallow seismic Z2 survey line 图 7. 浅层地震 Z2 测线水平叠加时间剖面

钻孔 ZKE18-1 揭露围岩岩性为泥岩、砂岩,中间夹多层薄煤线,设计孔深 260 m,于 250 m 发现煤 层采空区,岩芯呈碎块状,破碎严重,验证了 T0、T1 波阻对于采空区的判定。

## 5. 钻探验证

为进一步验证以上物探结果的准确性,在分析收集矿上历史资料和物探工作成果后,于半航空瞬变 电磁 15 测线和浅层地震 Z2 测线重叠处设置勘察钻孔 ZKE23-1,钻探揭露围岩为碳质泥岩、砂岩,成孔 深度 252 m,全孔漏失,于 247 m 见采空区,如图 8 所示,岩芯破碎严重、量少,含煤和泥岩碎块,采空 区底板埋深 249.6 m。钻孔验证结果与物探推断结果基本吻合。



Figure 8. Core from drill hole ZKE23-1 (left) and in-hole TV (right) 图 8. ZKE23-1 钻孔岩芯(左)及孔内电视(右)

#### 6. 结论

本文通过对辽宁某露天矿运用时移航磁法、半航空瞬变电磁法、浅层二维地震法进行采空区和火区 探测,并通过对探测异常区布设钻孔验证,取得了较好成果,为后期地质灾害治理防治提供了基础。相 较于正常地层,地下采空区常表现出各种异常地球物理特征,根据表现出的不同特性,选用合适方法对 采空区进行综合物探可以大大减少单一探测方法带来的局限性,提高对异常区域解释的准确性,对于快 速圈定采空区范围和高温着火区有着较大帮助。通过钻孔探测在异常区域进行钻探验证可进一步提高探 测的准确性。

## 参考文献

- [1] 曲强,孙雅飞,赵振华,等.采空区稳定性评价方法与治理措施研究现状及展望[J].水利水电技术(中英文), 2024,55(S1):418-421.
- [2] 代玲玲, 江勇. 综合物探技术在煤矿采空区探测应用实践分析[J]. 煤炭技术, 2024, 43(3): 115-119.
- [3] 程建远, 孙洪星, 赵庆彪, 等. 老窑采空区的探测技术与实例研究[J]. 煤炭学报, 2008(3): 251-255.
- [4] 张童. 峁底煤矿老窑破坏区残煤复采工艺研究[J]. 中国煤炭, 2019, 45(12): 107-112.
- [5] 李英宾, 张伟, 江坤. 综合物探方法在伊犁盆地采空区探测中的应用[J]. 地质论评, 2024, 70(S1): 131-132.
- [6] 薛永军, 武秀芳, 仲丛明, 等. 煤矿小窑采空区及塌陷区的地球物理勘查[J]. 物探与化探, 2012, 36(S1): 111-113.
- [7] 郇恒飞,高铁,赵海卿,等.高精度重力测量在抚顺煤矿采空区探测中的应用[J].煤田地质与勘探,2019,47(6): 194-200.
- [8] 王延涛, 潘瑞林. 微重力法在采空区勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(S1): 61-64.
- [9] 明圆圆, 王春辉, 牛雪, 等. 重力勘探在阳泉煤炭采空区中的应用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 136-139.
- [10] 孟庆旺. 综合物探方法在嘉祥县青山省级地质公园溶洞勘察中的应用效果[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1464-1469.
- [11] 郭瑞瑞,郑凯歌,席杰,等.煤层群开采覆岩运移规律及"三带"高度确定[J].煤矿安全,2023,54(8):106-117.

- [12] 王强, 田野, 刘欢, 等. 综合物探方法在煤矿采空区探测中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(2): 531-536.
- [13] 李莲英, 薛俊杰, 赵煊煊, 等. 应用综合物探方法探查煤层采空区[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 377-380.

[14] 陈坤. 地震超前探测技术在煤矿中的应用研究[J]. 能源与环保, 2024, 46(2): 84-88.

- [15] 阎述,陈明生. 高分辨地电阻率法探测地下洞体[M]. 北京:地质出版社,1996.
- [16] 林君, 薛国强, 李貅. 半航空电磁探测方法技术创新思考[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 2995-3004.
- [17] 晏磊,李海洋,郭政学.磁法勘探在探测煤层火烧区中的应用[J].陕西煤炭,2016,35(2):106-108,115.
- [18] 彭超. 浅层地震反射波法和高密度电法在石膏矿采空区勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(4): 481-485.