

综合物探技术在电厂采空区探测中的应用

曾亮¹, 邓卫红¹, 程伦星¹, 夏健¹, 储韬玉¹, 李红立^{1,2}

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;

2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 徐州 221008)

摘要: [目的]煤电一体化模式是近年来火力发电厂的一个发展方向,对有些规划建在煤矿产区的火力发电厂,其厂址区内存在的煤矿采空区对电厂的安全带来很大威胁,而采空区探测是其评价和治理的基础,因此采空区探测是一项十分重要的工作。[方法]针对贵州煤电一体化大方电厂厂址内煤矿采空区的特点,开展综合物探技术在煤矿采空区探测中的研究,克服单一物探技术的缺点,根据地质体的电性和弹性差异,采用高密度电法、瞬变电磁法和浅层地震映像法相结合的方法,开展采空区探测。[结果]通过物探技术的综合解释,给出了采空区巷道和空间分布并进行了钻探验证,取得了较好的效果,为后续煤电一体化电厂采空区探测积累了宝贵经验。[结论]采空区的探测需根据所在煤矿的地形、地质特点及其地球物理特征选择物探技术,并且应进行多种方法的试验,发挥各方法的优点,才能得到符合实际的探测结果。

关键词: 综合物探; 采空区; 高密度电法; 瞬变电磁法; 地震映像法

中图分类号: TM611; P631

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0204-05

Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Techniques in Goaf Detection Under Coal-fired Power Plant

ZENG Liang¹, DENG Weihong¹, CHENG Lunxing¹, XIA Jian¹, CHU Taoyu¹, LI Hongli^{1,2}

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: [Introduction] The coal-electricity integration mode is a development direction of coal-fired power plant in recent years, some planning power plant built in the coal mined area, the goaf is a big threat to the safety of power plant, and goaf detection is the basis of evaluation and treatment, so the goaf detection is a very important work. [Method] According to the characteristics of the goaf in Guizhou Dafang coal-fired power plant, the comprehensive geophysical exploration technology in coal mine goaf detection, overcome the single geophysical technology shortcomings. according to the electrical and elastic geological differences, using the method of high density resistivity method, transient electromagnetic method and seismic imaging method combining the development of goaf detection. [Result] Through comprehensive interpretation of geophysical technology, this work provide achieved good results, gives the goaf roadway and the spatial distribution and drilling verification, and accumulated experience for the subsequent detection of the integration of coal power plant in the goaf. [Conclusion] The detection of goaf need to choose the geophysical techniques which based on the topography, geological features, and geophysical characteristics of the coal mines, and a variety of methods should be tested to give full play to the advantages of each method, so as to obtain an actual detection result.

Key words: comprehensive geophysical prospecting; goaf; high density resistivity method; transient electromagnetic method; seismic imaging method

收稿日期: 2018-02-27

修回日期: 2018-05-25

基金项目: 中国能建广东院科技项目“测试(室内试验、原位测试和物探)成果数据库建立”(EX01481W)

能源资源是事关国民经济和社会发展的重要基础产业,我国电力装机容量已居世界首位^[1],且以“煤炭为主体、电力为中心”的能源战略在长期内将不会改变^[2]。“煤电一体化”是一种循环化、集约型

的循环经济运行模式。该模式一方面提升了自然资源的利用效率, 延伸煤炭产业的产业链; 另一方面使经济不再是线性运行, 而是转变为循环运行, 推动经济的可持续发展^[2-3]。在煤矿产区建设火电厂, 采空区是不可回避的对构筑物安全构成威胁的重要因素之一, 准确探明采空区的分布范围意义重大。在很多缺乏完整资料的煤矿产区, 地球物理探测方法在采空区探测中发挥了重要作用, 其中代表性的有李娟娟等^[4]、李学良等^[5]、冉志杰等^[6]、王善勋等^[7]、肖波等^[8]对高密度电法、浅层地震法、探地雷达法, 可控源音频大地电磁法、钻孔电视技术、电导率成像技术及瞬变电磁法等进行了实践并取得了一定的探测效果; 霍军鹏等^[9]则进行了三维地震勘探技术的应用, 解释成果与实际资料吻合良好。本次在贵州大方电厂的采空区探测实践中, 采用了瞬变电磁法、高密度电法和浅层地震映像法相结合的方法, 由面到线, 再由线到点, 既把控了总体采空区的范围, 又对重要的巷道位置进行了准确定位。

1 大方电厂采空区地球物理特征

贵州煤电一体化大方电厂(2×660 MW)新建工程位于贵州省毕节市大方县, 厂址区属低山丘陵地貌, 场地中部、南部位于山前坡脚地段, 地形较平缓, 北部位于山间沟谷和低缓山丘地段, 地形起伏较大。场地地面标高 1 659~1 747 m, 相对高差约 88 m。场地地表主要种植玉米、毛豆、荞麦等农作物, 部分种植松树、核桃树等乔木, 局部地段零星分布有房屋。根据钻孔揭露, 场地岩土层复杂, 岩性多样, 上覆为第四系人工回填素填土, 坡洪积次生红粘土、碎石土及残积粘土; 下伏基岩为二迭系上统长兴组(P2c)灰岩夹砂泥岩和龙潭组(P2L)砂泥岩互层夹煤层。

煤层平均厚度约 1.2 m, 煤层倾角 10°左右, 开采煤层位于地表以下 30 多米, 开采巷道高度约 1.8 m, 宽约 1.5 m, 经大面积开采, 在地下几乎形成贯通测区的连片采空区。由于煤矿已废弃多年, 开采资料丢失, 只能从地表出露的通风口和出入口判断巷道大概走向, 以及从当地矿工处得知大概开采范围。

测区煤层上覆岩性主要为砂岩、页岩及泥岩, 明显与采空区存在波阻抗差异, 另外从电性参数实

测结果看, 砂岩、页岩及泥岩电阻率较低, 一般小于 600 Ω·m, 在 300~500 Ω·m。由于煤矿已经废弃, 巷道及采空区内被水充填, 因此基本可以判断本区煤层采空区为低电阻率异常特征, 加之采空区埋深不大, 一般仅 30m 左右, 且采空区在水平方向和垂向上又具有相当规模, 这就为地球物理方法探测采空区提供了有利的条件。

2 物探技术应用

根据各物探方法的特点, 结合现场地形条件进行测线布置。高密度电法避开地形变化大的区域, 沿场区纵横向布置测线 7 条; 瞬变电磁法沿测线和面状布置, 沿测线布置时主要针对高密度电法测线的异常段, 以便进行联合解释, 点距采用 1 m, 面状布置为场区全覆盖探测, 弄清采空区范围, 点距采用 10 m; 浅层地震映像法由于受地形影响大, 主要选择地形变化较小的电磁法异常区域布置短测线 16 条。

针对场区采空区特点, 本次采空区探测采用多种物探方法, 主要工作思路: 首先对全场区进行瞬变电磁探测, 勾画出采空区大致范围, 为下一步测线布置提供靶区; 针对性的布置高密度电法测线, 圈定采空区范围和巷道大致位置; 最后选择异常段进行加密瞬变电磁探测和浅层地震映像法探测, 确定采空区范围及巷道具体位置。

2.1 瞬变电磁法

瞬变电磁法也称时间域电磁法(Time domain electromagnetic methods), 简称 TEM, 工作时通过不接地的回线或接地的线源向地下发射脉冲交变电磁场, 断电后在一次脉冲磁场间歇期间, 利用线圈或接地电极观测二次涡流场。瞬变电磁法基于电磁感应定律基本原理, 一般将脉冲磁场衰减过程划分为早、中和晚期。其中衰减早期的电磁场相当于频率域中的高频成分, 特点是衰减快, 且趋肤深度小; 而衰减晚期成分则相当于频率域中的低频成分, 特点是衰减慢, 且趋肤深度大。因此, 通过测量断电后各个时间段的二次场随时间变化规律, 可换算得到不同深度的地电特征。

由于场地地形复杂, 施工较为困难, 结合 Terra TEM-3 型瞬变电磁仪特点, 工作装置采用重叠回线装置, 该装置适用于条件复杂地区, 常用于地质普查、矿产勘查和复杂条件下的工程勘察工作。

通过场区全覆盖的瞬变电磁探测发现，采空区并不直接呈现低阻，而是顶部呈现次低阻，底部呈现低阻，这说明采空区并没有完全充填，而是半充填。对目标层进行顺层切片，可以初步圈定采空区范围，如图1所示。沿高密度电法测线异常段进行加密点瞬变电磁探测，进一步探明采空区范围及巷道位置，如图2所示。

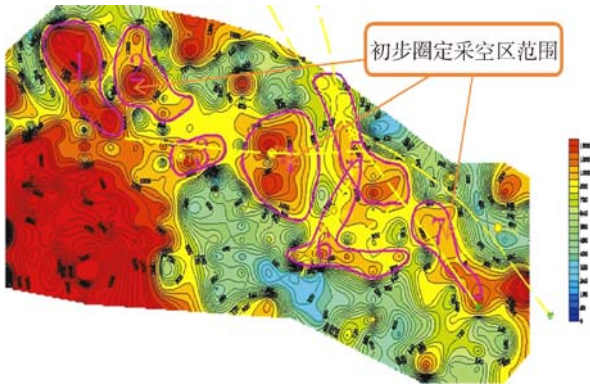


图1 瞬变电磁法顺层切片初步圈定采空区范围
Fig. 1 Preliminary delineation of the range of mined out area by transient electromagnetic method

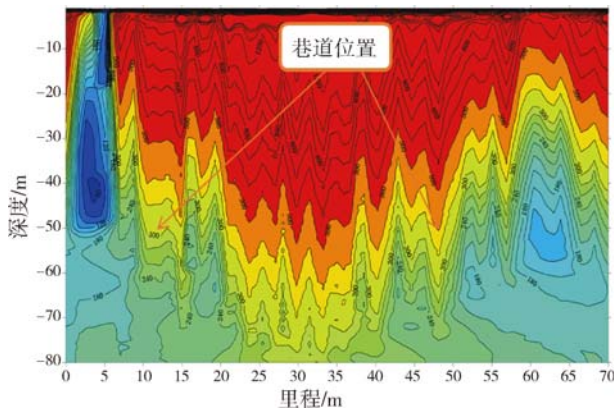


图2 瞬变电磁法剖面上的采空区及巷道异常 (S08 测线)
Fig. 2 Mined-out area and roadway anomaly in transient electromagnetic profile (S08 survey line)

2.2 高密度电法

高密度电法是以岩土体或探测目标体的电性差异为基础的一种直流电法勘探方法，其工作原理与常规电阻率法大体相同，不同之处在与其观测数据体量更大，得到的电阻率信息更多，对地下具有不同电阻率的地质体的赋存情况推断更准确。高密度电法工作时自动选择四个电极并不断转换，和常规电阻率法一样，通过 A、B 电极向地下供电流 I ，通过 M、N 电极测量电位差 ΔV ，从而计算该测点

的视电阻率值 $\rho_s = K \Delta V / I$ 。根据测得的视电阻率剖面，进行数据处理、反演解释等，可获得地下电阻率分布情况，在此基础上划分地层，判定异常等^[10]。

根据场地地形地物分布条件，进行了现场试验，高密度电法采用了温纳装置、温施 2 装置，电极距为 2~3 m 进行了方法试验选择。试验结果显示，该场地地表为红粘土和耕植土层，电极接地良好，且地表无积水，为高密度电法工作的有利条件；但地形起伏较大，地下低阻煤层等为高密度电法探测效果带来不利影响。

高密度电法探测发现，采空区在剖面上呈现低阻特征，电阻率值小于 $100 \Omega \cdot m$ ，相对于周围地质体表现出明显的低阻异常，如图3所示。

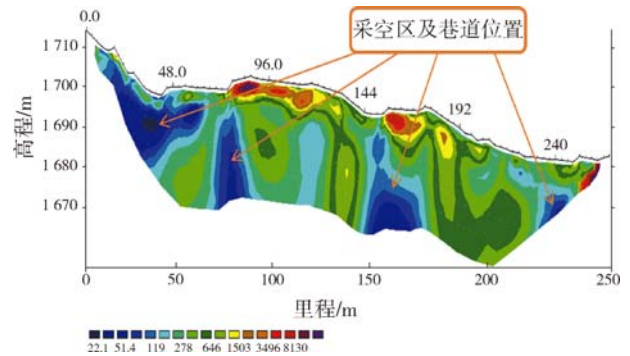


图3 高密度电法剖面上的采空区及巷道异常 (M02 测线)

Fig. 3 Anomalies of mine goaf and laneway in high density resistivity section (M02 survey line)

2.3 地震映像法

地震映像法，又称地震反射共偏移距法，是以地层之间或目标异常体与周围介质的波阻抗差异为基础，用相同的一个或几个固定的偏移距逐步移动测点接收地震反射信号，是基于最佳偏移距技术发展起来的一种浅层地震反射波勘探方法。地震映像法开始工作前通过试验选取一个或几个固定的偏移距，且保证在该偏移距接收的反射波具有良好的信噪比和分辨率^[11]。地震映像法工作模式如图4所示。

浅层地震映像法在数据采集之前也进行了试验，包括检波器一致性检查试验和长排列试验(如图5所示)。检波器一致性检查试验的目的是检查检波器质量的好坏；长排列试验的目的是选取最佳观测系统和选取合适的地震数据采集参数。最终确

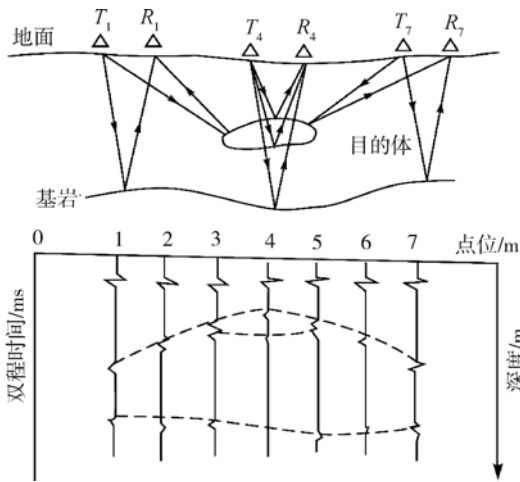


图 4 地震映像法工作原理及简化波形图^[9]

Fig. 4 Working mode of seismic mapping method and simplified waveform diagram^[9]

定选择 14 磅大锤敲击铁板作为震源, 100 Hz 纵波检波器作为信号接收器进行数据采集; 通过长排列试验, 确定地震波数据采集参数为: 采样间隔: 0.125 ms; 带通滤波范围: 50 ~ 250 Hz; 时间窗口长度: 0.250 s; 炮间距: 1 m; 道间距: 2 m; 最小炮检距: 6 m; 接收信号道数: 3 道。

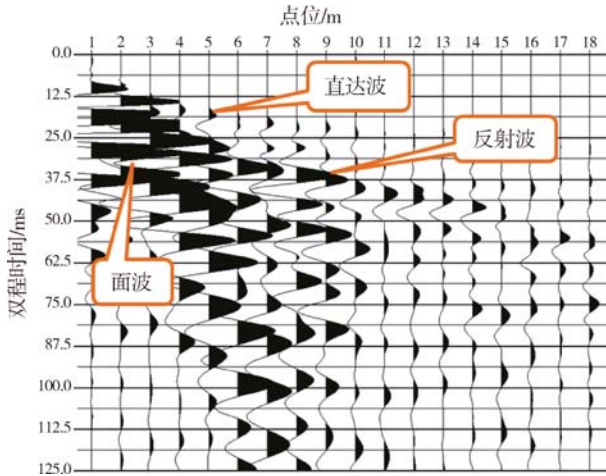


图 5 地震映像法长排列试验剖面

Fig. 5 Long permutation test section of seismic mapping method

探测表明, 采空区在反射剖面上表现为杂乱无章的波形或者无反射, 而采空区巷道则出现明显的绕射波或振幅异常, 如图 6 所示。

3 解释成果及钻探验证

根据三种物探方法综合解释成果, 共发现 7 处采空范围和 3 条主巷道。在场地内布置了 8 个钻孔

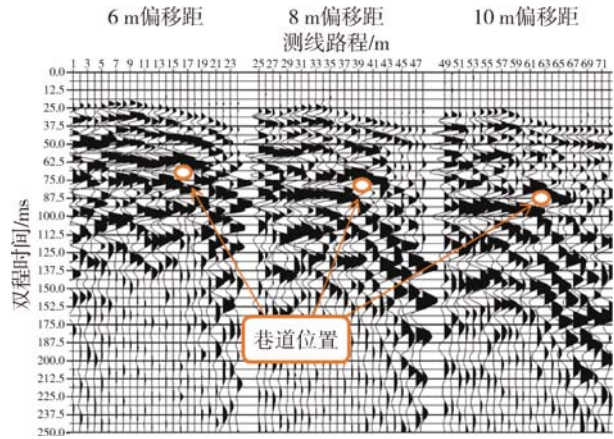


图 6 不同偏移距剖面上巷道异常 (D16 测线)

Fig. 6 Laneway anomaly on different offset sections (D16 survey line)

进行验证, 编号 Y01 ~ Y08, 钻探结果中异常描述如表 1 所示:

表 1 物探解释成果与钻探验证

Tab. 1 Interpretation of geophysical technology and drilling verification

孔号	钻探异常情况	结论
Y01	钻探过程中出现严重漏水, 发现松散回填煤矸石。	推测为采空回填区
Y02	钻探过程中出现严重漏水。	推测为裂隙发育区
Y03	钻探过程中出现严重漏水, 发现松散回填煤矸石。	推测为采空回填区
Y04	4.50 ~ 4.90 m 段为空洞; 下部为炭质泥岩, 岩芯呈柱状及块状, 段长 8 ~ 16 cm, 块径 3 ~ 6 cm。	推测为采空区顶板垮塌, 底部残留碎渣。
Y05	27.00 ~ 27.40 m 段为空洞; 27.40 ~ 28.00 m 段为松散填土, 主要由碎石、炭质泥岩及煤矸石组成, 碎石块径 2 ~ 5 cm。	27.00 ~ 28.00 m 推测为采煤层, 底部残留碎渣。
Y06	37.60 ~ 39.00 m 段为空洞, 顶底高差 1.40 m, 底部混松散碎石。	推测为采煤时运煤和人员出入的巷道。
Y07	钻探过程中出现严重漏水, 发现松散回填煤矸石。	推测为采空回填区
Y08	钻探过程中出现严重漏水。	推测为裂隙发育区

4 结论

1) 选择物探方法前, 必须先对采空区的地形、地质情况及开采深度等充分了解, 并在此基础上进行必要的现场方法试验。

2) 瞬变电磁法面积覆盖广, 可用于初步圈定采空区的范围; 在地形变化较大的情况下, 瞬变电磁法工作装置宜采用重叠回线装置。

3) 高密度电法对在本场地内寻找巷道位置的勘探效果明显, 但水平分辨率稍低, 且对煤层和采空区引起的低阻异常较难区分。

4) 地震映像法对采空区巷道的异常反映明显, 分辨率高, 可用于确定巷道的具体位置和采空区的分布范围。

参考文献:

- [1] 王伟, 徐婧, 赵翔, 等. 中国煤电机组调峰现状分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 18-23.
WANG W, XU J, ZHAO X, et al. Analysis on peak load regulation status quo for coal-fired power plants in China [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 18-23.
- [2] 蔡继东, 万忠诚, 张庭烽. 燃煤电厂脱硫废水零排放工程的设计与应用 [J]. 广东电力, 2018, 31(5): 28-34.
CAI J D, WAN Z C, ZHANG T Y. Design and application of desulfurization wastewater zero discharging project of coal-fired power plant [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(5): 28-34.
- [3] 刘伟, 周健奇. 煤电一体化与煤炭产业可持续发展 [J]. 煤炭经济研究, 2008(12): 9-10.
LIU W, ZHOU J Q. Coal and electricity integration and the sustainable development of coal industry [J]. Research on Coal Economy, 2008(12): 9-10.
- [4] 李娟娟, 潘冬明, 胡明顺, 等. 煤矿采空区探测的几种工程物探方法的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(6): 728-732.
LI J J, PAN D M, HU M S, et al. Application of geophysical methods in detecting coal mined out areas [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(6): 728-732.
- [5] 李学良, 田迎斌. 煤矿采空区探测技术分析及应用 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 277-280.
LI X L, TIAN Y B. Analyses and application of detection technique for old coal mining area [J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2013, 32(3): 277-280.
- [6] 冉志杰, 杨歧焱, 翟星, 等. 浅层地震勘探在地下采空区探测中的应用 [J]. 勘察科学与技术, 2013(2): 56-60.
RAN Z J, YANG Q Y, ZHAI X, et al. Application of shallow seismic exploration in underground goaf detection [J]. Site Investigation Science and Technology, 2013(2): 56-60.
- [7] 王善勋, 杨文锋, 张卫敏, 等. 瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用研究 [J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(4): 400-405.
WANG S X, YANG W F, ZHANG W M, et al. The application of TEM to detecting coal mining goaf [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(4): 400-405.
- [8] 肖波, 郑文棠, 丁金伟, 等. 基于地下电学特征变化监测城市垃圾场有害液体的渗漏 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(2): 110-114.
XIAO B, ZHENG W T, DING J W, et al. Leakage pollution monitoring of municipal landfill based on the resistivity method [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(2): 110-114.
- [9] 霍军鹏, 周竹峰, 王万合. 三维地震勘探技术在煤矿采空区探测中的应用 [J]. 黑龙江科技信息, 2012(14): 15-16.
HUO J P, ZHOU Z F, WANG W H. Application of 3D seismic exploration technology in underground goaf detection [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(14): 15-16.
- [10] 邓超文, 周孝宇. 高密度电法的原理及工程应用 [J]. 西部探矿工程, 2006, 28(增刊1): 278-279.
DENG C W, ZHOU X Y. The principle and engineering application of high density resistivity method [J]. West China Exploration Engineering, 2006, 28(Supp. 1): 278-279.
- [11] 肖顺, 张永命, 刘天华. 地震映像法在探测超深超大管道中的应用 [J]. 测绘通报, 2013(增刊2): 246-247+261.
XIAO S, ZHANG Y M, LIU T H. The application of seismic photography in ultra-deep/large-pipeline detection [J]. West-China Exploration Engineering, 2013(Supp. 2): 246-247+261.

作者简介:



ZENG L

曾亮(通信作者)

1982-, 男, 湖北仙桃人, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 中国地质大学(武汉)物探硕士, 主要从事电力工程物探工作(e-mail) zengliang@gedi.com.cn.

(责任编辑 郑文棠)

订 阅

《南方能源建设》的办刊宗旨立足于为能源行业尤其是电力行业工程建设提供技术支持和信息服务, 推广新理论、新技术的工程应用, 提高我国能源建设质量和技术水平。主要面向全国能源行业尤其是电力行业设计、建设、制造等企业、以及相关的研究机构 and 高等院校的广大工程技术人员、管理人员、专家学者等。本刊设有能源资讯、专家论坛、规划咨询、勘测设计、施工建设、装备制造、工程管理、投资运营、运行维护、案例分析、简讯等栏目, 将优先报道低碳环保、节能减排等技术研究和工程应用以及风能、太阳能、生物质能、海洋能等可再生能源的技术研究及工程建设。

出版周期: 季刊(季末25号)

订阅年价: 60元

国内刊号: CN 44-1715/TK

国际刊号: ISSN 2095-8676

联系电话: 020-32116683

传 真: 020-32118078

期刊网站: <http://nynf.cbpt.cnki.net>

微 信 号: ceec-gedi