

采空区的物探勘查方法

吴成平, 胡祥云

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 武汉 430074)

摘 要: 采空区给人类生产生活带来危害, 采空区的探测已成为重要研究课题。文章介绍了采空区的地球物理特征, 对采空区探测的各种物探方法从重、电、震、放、综合物探等方面进行分类和介绍, 有以往使用的老方法, 也介绍了采空区探测中使用的新方法。

关键词: 采空区; 地球物理特征; 物探方法

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1001-1412(2007)01-0019-05

0 引言

由于各种矿产资源的开采, 在地下形成了采空区。特别是各种小煤窑的滥开滥采, 导致许多隐性采空区的存在, 给人们的生产生活带来极大的影响, 甚至危及到人身安全。这就要求我们对采空区的稳定性、位置、范围、边界等进行勘查与评价。采空区探测多采用物探方法, 有时结合部分钻孔资料进行验证。目前, 采空区的探测已经成为一项重要的研究课题, 但是仍处于发展阶段。探测的物探方法很多, 各种方法各有所长。例如, 地质雷达、浅层地震、高密度电法、TEM 等都在采空区探测中发挥着重要作用。

1 采空区地球物理特征

1.1 采空区、采空塌陷区

地下矿层采空后形成的空间称为采空区。当采空区出现后, 打破了原有的应力平衡, 上覆岩层失去支撑, 产生移动变形, 直到破坏塌落。采空区塌陷后, 形成采空塌陷区。以煤层采空塌陷区为例, 可将它分为 3 个带: ①冒落带: 煤层采空上部岩层出现坍塌; ②裂隙带: 冒落带上方岩体因弯曲变形过大, 在

采空区上方产生较大的拉应力, 两侧受到较大的剪应力, 因而岩体出现大量裂隙, 岩石的整体性受到破坏; ③弯曲带: 裂隙带以上直到地面, 在自重应力作用下产生弯曲变形而不再破裂。

1.2 采空区密度特征

采空区采掘后形成质量亏损。在采空区塌陷而不充水时, 质量亏损值不变, 但负密度值减小而影响厚度增大; 在采空区充水时, 亏损质量得到一定补偿。

1.3 采空区电性特征

当采空区保存完整且基本上未充水时, 在电性上是典型高阻体; 采空区塌陷且基本上未充水时, 亦为高阻体; 而采空区充水或塌陷充水时, 则将成为低阻体, 且随水的含盐度与塌陷溶融状态而有程度上的不同。

2 采空区物探勘查方法

2.1 重力测量

重力勘探方法是利用地下地质体质量亏损或盈余, 在地表观测他们引起的重力异常。从而确定地下地质体的分布、大小、边界等。采空区因开采形成质量亏损, 从而形成低重力异常。在煤矿采空区保存完整时, 形成低值剩余重力异常。在采空区塌陷而不充水时, 质量亏损值不变, 但负密度值减小而影响厚度增大; 充水时, 亏损质量得到一定补偿, 比在

不充水的同样情况下, 负密度值减小。无论在采空区实际存在哪种情况, 按一般规律都可测出局部剩余重力异常。使用高密度、高精度微重力测量和适当的资料处理解释方法, 在面积上控制采空区范围。采用数字地形多剖分高精度地改方法及三维解释方法, 以达到提高解释精确性^[1]。在某大厂区, 由于煤层采空区的充水, 引起坡体蠕滑, 变形速率急剧增大, 造成厂区特别是主厂房产生严重断裂变形, 危及安全生产, 使用了重力勘探及其他方法对采空区进行了探测, 取得一定效果。

2.2 电法测量

2.2.1 电阻率层析成像法

在现场测量时, 将全部电极设置在一定间隔的测点上, 然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换器上, 使电极布设一次完成。为了准确、快速地采集大量数据, 测量时通过程序控制实现电极排列方式、极距和测点的快速转换。并利用与系统配套的电法处理软件, 对采集的数据进行各种处理, 结果进行图示, 使解释工作更加方便、直观。李清林等^[2]利用河南省义马市义马煤业(集团) $2 \times 50 \text{ MW}$ 跃进电厂采空区和电阻率层析成像测量的结果, 探讨了电阻率层析成像测量在煤矿采空区和斜风井巷道中的应用。并指出, 电阻率层析成像二维测量方法在煤矿采空区和斜风井巷道的探测和定位是准确和可行的; 煤矿采空区和斜风井巷道内若没有水体存在, 电阻率层析成像二维测量成果图中一般都是高阻异常封闭圈, 如有水体存在则表现为低阻异常封闭圈。

2.2.2 瞬变电磁法

瞬变电磁法是向地下发送一次脉冲磁场的间歇期间, 观测由地下地质体受激引起的涡流产生的随时间变化的感应二次场, 二次场的大小与地下地质体的电性有关: 低阻地质体感应二次场衰减速度较慢, 二次场电压较大; 高阻地质体感应二次场衰减速度较快, 二次场电压较小。根据二次场衰减曲线的特征, 就可以判断地下地质体的电性、性质、规模和产状等, 由于瞬变电磁仪接收的信号是二次涡流场的电动势, 对二次电位进行归一化处理后, 根据归一化二次电位值的变化, 间接解决如陷落柱、采空区、断层等地质问题。该方法具有分辨能力强、工作效率高、受地形影响小、能穿透高阻覆盖层等优势, 迅速发展成为高效、快捷的物探方法。近几年来受到人们的重视。刘君^[3]将瞬变电磁法应用于致使地表房屋出现裂缝的朔州市平鲁区井坪镇的采空区探

测, 效果良好; 山西晋城煤业集团有限公司在凤凰山矿 95313 工作面进行了地面高精度、高分辨瞬变电磁探测^[4], 推断地下存在采空区, 并判断了采空区的积水情况。

2.2.3 甚低频电磁法

甚低频电磁法一般用频率为 $15 \sim 25 \text{ kHz}$ 电台发射的电磁波作为场源。当电磁波在传播过程中遇到地质体时, 使其极化而产生二次电流, 从而引起感应二次场, 一般情况下二次场和一次场合成后的总场与一次场的振幅方向、相位均不相同, 即引起了一次场的畸变。使用专门的仪器通过测量某些参数的畸变, 可发现地质体的存在。甚低频电磁法工作方法通常又分倾角法和波阻抗法两种。在探测高阻体时, 一般选用波阻抗法进行甚低频电磁法测量, 测线方向尽量与发射台方向一致或与该方向夹角最小。对山西阳城电厂厂区内铁矿隐伏采空区的探测, 以及对附近北留铁矿进行的甚低频电磁法查找地下采空区的方法有效性试验^[5], 表明了用甚低频电磁法勘查隐伏采空区是有效的。

2.2.4 探地雷达

探地雷达是利用高频电磁波以宽频带短脉冲, 从地面通过天线 T 送入地下, 经反射体反射后返回地面, 通过天线 R 接收。在介质中传播时, 其电磁波强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化。所以, 根据接收到波的双程走时、幅度与波形资料, 可推断介质的结构。探地雷达适用于探测深度较浅的目标体, 由于可以更换不同频率的天线, 适用面较广, 且探测分辨率高, 在工程中的应用已经得到认同^[6]。探地雷达数据可采用专用软件进行处理, 着重进行振幅恢复、滤波、F-K 滤波、反褶积处理, 获得信噪比较高的时间剖面, 提高了有用信号的识别, 雷达时间剖面比较真实全面地反映了地下介质的变化情况, 保证了资料质量^[7], 并利用地下介质的电性差异来进行分层及查明地下异常地质体。山东省交通规划设计院采用 Pulse EKKO 100 型数字化探地雷达查明了煤井采空区塌陷所致的山东博山西域城地段沿路轴线及其附近地区出现的开裂和沉降^[8], 认为探地雷达系统用于地下洞室探测具有快捷、精确的特点, 尤其是对地下采空区、人防工程洞室、地下溶洞等的探测更具有优越性, 可为工程建设、规划提供可靠的地质资料。

2.2.5 MT 法、CSAMT 法和 EMAP 法

电磁排列剖面法(EMAP)是近几年来在可控源音频大地电磁法(CSAMT)成功实践的基础上发展

起来的,是对大地电磁(MT)法的一种改进^[9],既具有CSAMT的稳定性,又具有MT的轻便灵活。2004年电导率成像系统EH4引入煤矿物探,该系统对探测采空区等有较好的地质效果。运用该系统对山东某煤矿采空区进行EMAP探测^[10],确定了采空区的位置、范围。山西省太原市晋祠镇,是著名的古采破坏区。经大地电磁测量,矿区的北东部存在大片低值电磁异常,异常的规模和强度较大,轮廓规则,并呈渐变,具有典型古采积水区特征,分析资料后对采空区及积水分布进行了判断^[11]。

2.3 地震测量

地震勘探是利用地层和岩石的弹性差异来探测地质构造、寻找有用矿产资源的重要地球物理勘测方法^[12]。波在传播过程中,当遇到弹性分界面将产生反射、折射和透射,接受其中不同的波,就构成了不同的地震勘探方法。在采空区探测中,地震方法也得到广泛的应用。

2.3.1 浅层地震反射波法

地震反射波法是利用人工激发的地震波在地层的传播过程中,在波阻抗界面上产生的反射信号进行分析,用以推断界面深度、构造形态及其物性参数^[13]。在煤层采空区引起的上覆岩层破坏对地震波有很强吸收频散衰减作用,使反射波频率降低,破碎围岩及裂隙对地震波衰减还表现为反射波波形的不规则、紊乱甚至产生畸变,采空区下方则由于岩层相对完整而变化不明显,是在地震时间剖面上识别煤层采空区的另一个重要标志^[14]。即煤层采空及其顶板遭受破坏后,在地震时间剖面上反射波组的中断或消失,同时煤层顶部结构的不规则破坏,也将产生各种低频干扰^[15]。贾东新等(1998)^[12]用美国EG&G公司的ES-2401型浅层地震仪在内丘县西庞村开展煤层采空区探测工作,确定了采空区的空间分布范围,使得因采煤引起的村、矿关系得到了改善。

2.3.2 瑞雷波法

常规物探方法在对“房-柱”式开采造成的面积较小、埋深较浅的采空区进行探测时存在漏报或误报的情况。而瑞雷波法在采空区探测中更具实用性和有效性。瑞雷波是一种沿着自由界面传播的面波,如地层与空气、水之间形成的界面^[16]。瑞雷波在层状介质中传播时,相速度随频率变化而变化,有明显的频散特性,频散特性与地层瑞雷波相速度及空间分布有惟一的对应关系;瑞雷波与横波、纵波相比能量强、波速较小,容易分辨且分辨率高,重复性

好;瑞雷波相速度与层内的横波速度有着明显的相关性,当地层的泊松比较大时,瑞雷波的相速度与横波速度相差小于5%;瑞雷波的穿透深度与激发波长有关,其穿透深度为一个波长,激发的频率越低,勘探深度越大。当采空区未发生塌陷时,瑞雷波传播到这些位置时将突然消失或散射,频散曲线在采空区顶板处表现为“之”字形拐点,而且速度迅速下降,从而可以在纵向上确定未塌采空区的范围;当采空区发生塌陷后,引起煤层上部地层结构疏松,瑞雷波速度降低,在频散曲线上,受影响地段瑞雷波速度显著降低,据此可以在横向上确定出塌陷区的范围,在纵向上确定出塌陷影响范围。在山西晋城市巴公镇凤凰山煤矿采区出现直径大于10 m的采空区。为保证探测精度,在瞬变电磁法和高分辨率地震勘探的基础上,采用了多道瞬态瑞雷波法进行了探测^[17]。探测结果表明,瑞雷波探测对采空区的探测准确、可靠。

2.3.4 钻孔弹性波CT

弹性波CT方法,又称地震波层析成像技术。这种技术利用大量的地震波速度信息进行专门的反演计算,得到测区内岩土体弹性波速度的分布规律^[18]。钻孔弹性波CT是近年来随弹性波CT技术发展起来的,旨在探测钻孔间的地质构造情况。方法是在一个钻孔内不同深度放炮,在其他钻孔内安置检波器接收,从所获得的地震记录中拾取地震纵波初至,通过不同的数学方法在计算机上重建探测区内速度场,利用速度分布对应各种地质异常的分布或应力分布,直观地以剖面形式给出两钻孔间地质异常体赋存的状态,从而确定异常范围^[17]。门头沟勘探区钻孔弹性波CT探测采空区^[19]是“北京市西山地区塌陷勘探”的一部分,共打垂直钻孔12个,获得剖面16条,剖面总长度为5486.73 m,经分析和解释,给出了老窑采空区的分布情况。

2.4 放射性测量

自然界中存在的天然放射性同位素广泛存在于岩石、土壤和水体中,不同岩性和不同类型的土壤放射性元素含量不同^[20]。在采空区探测中常用的放射性方法是氡气测量。由于该方法测试场地的适应性较强,而且不受地电、地磁影响,探测深度较大,在采空区探测中有良好的应用效果。氡是天然放射性铀系气体元素,直接母体是镭,铀又是镭的母体,母体元素的含量水平在一定程度上决定了岩石、土壤中氡浓度的高低。由于团簇迁移、接力传递、扩散、对流、抽吸等作用,其表现出很强的迁移作用,容易

从深部向上扩散并进入土壤中。因此,在铀镭富集地段、地质构造破碎带上方、采空区上方都可形成氡的富集,而在其附近地段氡含量明显减少。这是寻找铀矿体、构造破碎带、采空区、陷落柱及地下水资源等的重要依据^[21]。山西煤田水文地质队多次将氡气测量法应用于地下采空区的探测,为了查明山西万家寨引黄工程北干线 1 号隧洞附近煤矿采空区及对引水隧洞的影响,对采空区进行综合地质勘查时使用了氡气测量法,收到了很好的应用效果。

2.5 综合物探方法

随着勘探工作的不断深入,人们要求的勘探的精度不断提高,待解决问题的复杂性和难度加大,单一物探方法已不能满足新形势的要求,虽然有的方法优点明显,但是单一方法往往对地质异常体很难定性,因此综合物探方法得到了广泛应用。综合物探方法根据地质体的密度、电性、弹性等多种物性对采空区进行探测,应用各种方法相互印证,使异常的确定更加准确、可靠。例如,使用地震方法探测采空区的同时辅以测氡、直流电法、磁法等物探方法,必要时配合一定的钻探工作进行验证。贺兰山脉西北端的乌兰煤矿北二采区与几个小煤矿毗邻,因采空区边界及含水性情况不明,影响了采区的设计,也严重威胁着矿井的生产安全。应用三维地震及电磁法对该区采空区进行综合物探方法勘查^[22],最大限度地克服了多解性,基本上查明了北二采区采空区的下边界,查清了采空区的含水状况,为采区设计和安全生产提供了决策依据。

3 结语

(1) 用物探方法探测采空区的过程中,应用综合物探方法能提高探测的可靠性。

(2) 尽管采空区探测的物探方法很多,许多方法的应用效果也很明显,随着科学技术的进步,各种探测方法也不断改善,探测手段层出不穷,但是关于采空区探测的研究手段和理论还不很完善,缺乏针对采空区特点的探测理论。

参考文献:

[1] 于国明,李静,韩革命.综合物探方法在深部煤层采空区检测中

的应用研究[J].陕西地质,2003,21(2):62-69.

- [2] 李清林,谢汝一,王兰甫,等.应用电阻率层析成像探测采空区、斜风井巷道稳定性计算[J].CT理论与应用研究,2005,14(3):1-7.
- [3] 刘君.瞬变电磁法在探测煤矿采空区中的应用[J].科技情报开发与经济,2005,15(16):281-282.
- [4] 牛海金,宋新华,陈永新,等.用 TEM 探测煤矿采空区的实践与探索[J].中国煤炭,2005,31(8):42-44.
- [5] 徐萱.甚低频电磁法在隐伏采空区勘察中的应用[J].河北地质学院学报,1994,17(3):252-260.
- [6] Jeffrey E Patterson, Frederick A Cook. Ground penetrating radar (GPR) as an exploration tool in near surface pegmatite mining [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004: 1472-1475.
- [7] 程久龙,胡克峰,王玉和,等.探地雷达探测地下采空区的研究[J].岩土力学,2004,25(增刊):79-82.
- [8] 刘红军,贾永刚.探地雷达在探测地下采空区范围中的应用[J].地质灾害与环境保护,1999,10(4):73-80.
- [9] 张少云.电磁排列剖面法(EMAP)原理及应用[J].江苏地质,1999,23(3):167-171.
- [10] 刘鸿泉,张刚艳,徐法奎,等.电导率成像技术在煤矿物探中的应用效果[J].煤矿开采,2005,10(3):12-14.
- [11] 罗洪发.被动源高频大地电磁系统的应用[J].地质与勘探,2002,38(6):51-54.
- [12] 张胜业,潘玉玲.地球物理原理[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [13] 王磊.浅层地震反射波法在高倾角煤层采空区勘探中的应用[J].新疆地质,1998,16(3):280-282.
- [14] 贾东新,王自强,徐庆魁.浅层地震法在煤层采空区探测中应用[J].河北煤炭,1999(3):21-23.
- [15] 靳聚盛.地震勘探方法圈定老窑采空区[J].中国煤田地质,1998,10(3).
- [16] Jiang hai Xia, Richard D Miller, Choon B Park, *et al.* Utilization of high-frequency Rayleigh waves in near-surface geophysics[J]. The Leading Edge, 2004, 23(8): 753-759.
- [17] 常锁亮,张淑婷,李贵山,等.多道瞬态瑞雷波法在探测煤矿采空区中的应用[J].中国煤田地质,1997,14(3):70-72.
- [18] 王振东.浅层地震勘探应用技术[M].北京:地质出版社,1988.
- [19] 郭恩惠,刘玉忠,赵炯,等.综合物探探测煤矿采空塌陷区[J].煤田地质与勘探,1997,(10):8-11.
- [20] 常桂兰.氡与氡的危害[J].铀矿地质,2002,18(2):122-129.
- [21] 郭崇光,李敬宇,刘君.氡气测量在山西采空区探测中的应用[J].科技情报开发与经济,2004,24(1):180-181.
- [22] 吴有信.综合物探方法在煤矿采空区及其含水性勘察中的应用[J].工程勘察,2005,(4):67-71.

GEOPHYSICAL METHODS ON SURVEY OF MINED-OUT AREA

WU Cheng-ping, HU Xiang-yun

(Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, china)

Abstract: Mined-out area brings various troubles. The survey of mined-out area has become an important subject. This paper introduces the geophysical characteristic of the mined-out area and the geophysical methods from gravity, electricity, seism, radioactivity survey and integrated geophysical techniques. It includes not only the old methods used before, but also the new ones used in the survey of mined-out area lately.

Key Words: mined-out area; geophysical characteristic; geophysical method

欢迎订阅 2007 年《地质找矿论丛》

《地质找矿论丛》为国家科技部和新闻出版总署批准, 由中钢集团天津地质研究院主办的地学科技期刊, 于 1986 年创刊, 国内外公开发行。中国标准刊号: ISSN 1001-1412, CN 12-1131/P。

《地质找矿论丛》作为中国科技核心期刊, 被美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》、《中国学术期刊文摘(中文版)》和《中国学术期刊文摘(英文版)》等国内外著名文摘刊物收录, 是《中国科技论文统计》、《中国学术期刊综合评价数据库》和《中国科学引文数据库》的来源期刊, 期刊同时全文入编《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数据系统科技期刊群》、《中文科技期刊数据库》和《华艺 CEPS 中文电子期刊》等电子出版物和数据库, 以多种媒体方式向读者提供服务。

《地质找矿论丛》主要报道矿产成矿理论与成矿预测、物质成分及综合利用、矿产地质勘查新技术新方法及其应用、地学信息技术、水文地质与工程地质、环境地质调查与治理、资源勘查工程、矿产品深加工技术、地质矿产技术经济等方面的科研成果、进展评介、研究简报, 并不断开拓报道领域与深度。

《地质找矿论丛》面向从事地质科研、矿产勘查、矿山企业、矿产品开发的科技人员和地学院校师生。热忱欢迎地矿行业、地学院校、文献信息部门的单位和个人踊跃订阅并投稿。

《地质找矿论丛》为季刊; 每期 80 页, A4(297 mm × 210 mm) 开本, 每季度末月 25 日出版; 每期定价 10.00 元, 全年共计 40.00 元。

订阅办法:

(1) 向《地质找矿论丛》编辑部函索订单订阅。

编辑部地址: 天津市河东区友爱东道平房 4 号, 中钢集团天津地质研究院《地质找矿论丛》编辑部
邮政编码: 300181 电话: 022-84283083 联系人: 王书辉

E-mail: luncong@163.com; luncong@yeah.net

(2) 通过“全国非邮发报刊联合发行部”订阅。

地址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号 全国非邮发报刊联合发行部 邮政编码: 300385

电话: 022-23973378; 23962479 传真: 022-23973378

E-mail: LHZD@public.tpt.tj.cn 网址: www.LHZD.com