

# 瞬变电磁法在积水采空区探测中的应用

覃庆炎

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司 陕西 西安 710077)

**摘要:**为了研究煤矿积水采空区的瞬变电磁响应特征,建立了煤矿积水采空区的理论模型,计算了瞬变电磁响应曲线,分析了典型的积水采空区瞬变电磁响应特征。理论计算结果表明,在被探测的采空区具备地球物理条件的前提下,瞬变电磁法(TEM)对积水采空区反应明显,且横向分辨率较高;对高阻采空区反应不明显;垂向上有多层积水采空区时,瞬变电磁的延迟效应会导致瞬变电磁法纵向分辨率降低,在一定深度范围内难以分辨引起电磁异常的具体层位。桑树坪煤矿积水采空区探测应用表明:理论结果与现场实际情况相符合,表明该方法是切实有效的。

**关键词:**积水采空区;瞬变电磁法;延时效应;电磁响应

中图分类号:P631 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2014)08-0109-04

## Application of Transient Electromagnetic Method for Water Accumulated Goaf in Coal Mines

QIN Qing-yan

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to study electromagnetic response features of a water accumulated goaf in a coal mine, a theoretical model of the water accumulated goaf in the mine was established. A transient electromagnetic response curve was calculated and the electromagnetic response features of the typical water accumulated goaf were analyzed. The theoretical calculation results showed that on the premise of the goaf detected had the geophysical conditions, the transient electromagnetic method would have an obvious reaction to the water accumulated goaf and a lateral resolution would be high. The transient electromagnetic method would not have an obvious reaction to a high resistance goaf. When the goaf had several layers of water accumulation in vertical direction, a delay effect of the transient electromagnetic would make a longitudinal resolution reduced of the transient electromagnetic method and would be hard to distinguish a certain layer level to cause the electromagnetic abnormal in a certain depth scope. The detection application of the water accumulated goaf in Sangshuping Mine showed that the theoretical results and the site actual condition would be fitted and the method was real effective.

**Key words:** water accumulated goaf; transient electromagnetic method; time-delay effect; electromagnetic response

## 0 引言

近年来,采空区治理已引起越来越多矿井的重视,但是由于小煤矿开采缺乏资料以及长期以来小煤矿的乱采乱挖,使得采空区形态复杂,导致不能了解废弃矿井采掘空间分布情况及其积水情况,防水煤岩柱留设不足或缺乏必要的防水煤岩柱,从而形成了巷道掘进过程中直接或间接揭露采空区积水而造成矿井突水灾害。此外,上组(层)煤开采后所形

成的大面积采空区常有不同程度的积水,给下组(层)煤的开采带来极大的安全隐患。因此,迫切需要有效的方法探查采空区的空间分布和积水情况,从而采取必要的防治水措施,防患于未然,杜绝此类突水事故的发生。在积水采空区探测方面目前应用最为广泛的地球物理方法是瞬变电磁法及直流电法,由于瞬变电磁法具有施工效率高、对低阻体敏感、地形影响小等优点,使得其在当前的煤田水文地质勘探中成为首选方法。国内外在理论研究和应用

收稿日期:2014-04-15;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.08.027

基金项目:中国煤炭科工集团西安研究院自筹资金科技创新基金资助项目(2013XAYCX021)

作者简介:覃庆炎(1981—),男,广西梧州人,博士。Tel:13689194713,E-mail:qinqingyan@163.com

引用格式:覃庆炎.瞬变电磁法在积水采空区探测中的应用[J].煤炭科学技术 2014,42(8):109-112.

QIN Qing-yan. Application of Transient Electromagnetic Method for Water Accumulated Goaf in Coal Mines [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8):109-112.

方面均取得了一定的成果。在理论研究方面,王华军等<sup>[1]</sup>提出了从生产实践中常用的中心回线法入手,基于电磁场本身的叠加原理,从麦克斯韦方程组出发,导出了中心回线瞬变电磁2.5D二次场(纯异常)的有限单元计算公式;熊彬等<sup>[2]</sup>给出了电导率分块均匀的瞬变电磁2.5B有限单元法正演算法。在应用方面,程建远等<sup>[3]</sup>针对不同的采空区类型,提出了小煤矿采空区快速检测的最佳技术组合,即综合利用遥感地质影像分析、地面地质调查、地面地震与电法勘探以及钻探验证等多种手段,实现采空区的多方法、多参数综合探测,减少多解性,提高综合探测精度;王信文等<sup>[4]</sup>对瞬变电磁法(TEM)法地形校正技术进行了初步的探讨,提出了一些有意义的尝试;解海军<sup>[5]</sup>从理论和试验出发,研究了附加效应的特点及探测曲线的特征;解海军等<sup>[6]</sup>从正演角度出发,分析了采空区在瞬变电磁中的响应特征并在应用上取得了一些有意义的成果;刘树才等<sup>[7]</sup>应用瞬变电磁法与地震勘探进行综合水文勘探,可在一定程度上解决物探资料多解性的问题;李文等<sup>[8]</sup>采用综合电磁探测方法在鄂尔多斯矿区对采空区进行了探测,总结出来不同方法的适用性;吴超凡等<sup>[9]</sup>运用网络并行电法探测技术建立了积水区边界与视电阻率之间的关系,对圈定矿井采空区积水范围具有一定的参考价值。上述的理论研究和工程应用使瞬变电磁在采空区探测应用中得到了迅速发展。但由于地球物理条件的复杂性、地球物理技术的多解性、现有物探方法的分辨率限制等原因,采空区的物探工作仍处于经验积累和理论研究阶段,采空区的勘探研究还处于发展阶段,勘探手段和理论均不完善,还需进一步研究。基于此,笔者从TEM法2.5D正演的角度出发,研究典型煤矿积水采空区模型的瞬变电磁响应特征,为瞬变电磁法在积水采空区探测中的资料解释提供理论依据,并在韩城矿业有限公司桑树坪煤矿进行应用。

## 1 采空区积水区位置探测数值模拟

为了得到瞬变电磁探测采空区异常区域分布规

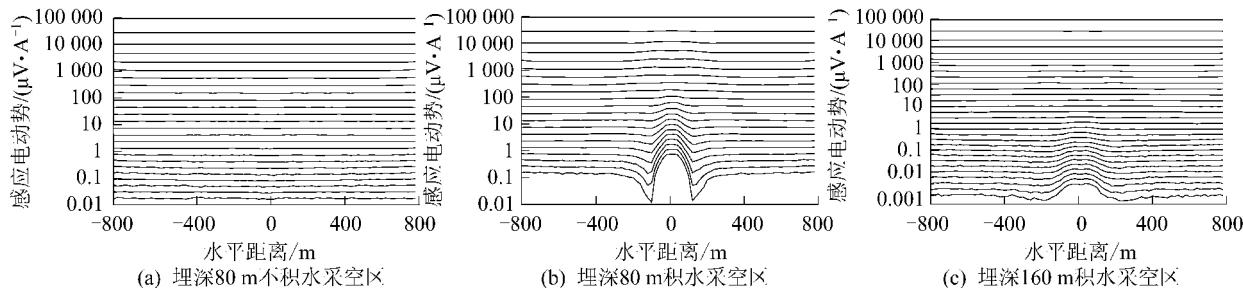


图1 单层采空区模型瞬变电磁响应多测道曲线剖面

律,笔者在磁偶源电磁场频率域2D数值模拟和2.5D波数域选择的基础上,用16点波数实现3D场源的等效,用Guptasarma算法实现了从频率域转换为时间域,从而用有限差分法实现了对时间域瞬变电磁场的2.5D有限差分数值模拟。在此基础上,综合一般煤矿地层电性特征,并根据煤矿开采的特点设计如下简化煤矿采空区(积水采空区)地质模型,从正演的角度分析采空区的瞬变电磁响应特征,为TEM探测煤矿采空区提供分析、解释依据。

### 1.1 单层采空区模型

假定地下介质为3层,分别为覆盖层、基底层、中间层(煤层),其电阻率分别为100、200、400Ω·m;第1层(覆盖层)厚度按2种情况计算,分别为80、160 m,中间层是煤层,厚度为5 m,煤层中段为采空区、采空高度5 m,长度为60 m,不充水时的电阻率为5 000 Ω·m,充水时电阻率5 Ω·m。

测量装置为中心回线装置,方形回线的边长为100 m,接收回线等效面积为10 000 m<sup>2</sup>,供电电流为1 A。单层采空区模型瞬变电磁响应多测道曲线剖面如图1所示,地下赋存目标体的横向轮廓在瞬变响应曲线中得到了很好的体现。对比分析上述模型的正演结果可知:①瞬变电磁场对高、低阻采空区反映的效果不一样,对积水采空区反应更明显;②异常体一旦引起瞬变电磁场响应,则在其后一定宽度的时间窗口上均会有所反应,这表明了瞬变电磁场存在延时效应,纵向分辨率低;③采空区埋深越浅,积水采空区引起的瞬变电磁场异常幅度越大,瞬变电磁场响应多测道在剖面图上反映越明显。

### 1.2 双层积水采空区模型

假定地下介质为5层,覆盖层和基底层电阻率分别为100、200 Ω·m,中间包含2层煤层,厚度均为5 m,电阻率均为400 Ω·m,煤层埋深分别为80、160 m,2层煤层中段均为积水采空区、采空高度5 m,长度为60 m,充水时电阻率为5 Ω·m。

测量装置为中心回线装置,方形回线的边长为100 m,接收回线等效面积为10 000 m<sup>2</sup>,供电电流为

1 A。双层积水采空区模型瞬变电磁响应多测道曲线剖面图如图2所示,地下赋存目标体的横向轮廓在正演获得的瞬变响应曲线中得到了很好的体现。分析认为,在深浅两层采空区都充水时,对应深度以及浅部均出现明显低阻异常。因此,在垂向上有多层采空区,当上层的采空区充水时,由于瞬变场的延时效应,会造成下部一定范围内出现所谓的“影子效应”,导致瞬变电磁法纵向分辨率降低,很难分辨电磁异常的具体层位。

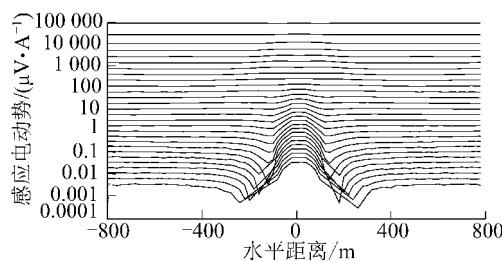


图2 双层积水采空区模型瞬变电磁响应多测道曲线剖面

## 2 TEM 法在积水采空区探查中的应用

根据对煤矿单层采空区模型和双层积水采空区模型的数值模拟研究可知,瞬变电磁法对积水采空区反映明显,横向分辨率较高;但当垂向上有多层积水采空区时,难以分辨引起电磁异常的具体层位,即纵向分辨率较低。以此作为理论依据,笔者将瞬变电磁法探测积水采空区技术应用到桑树坪煤矿积水采空区探测工程中。

### 2.1 工程概况

桑树坪煤矿由于历史原因,该矿北区周边小煤矿较多,小煤矿的无序开采直接影响到工作面布置和巷道的掘进以及下组煤安全回采,为了给煤矿设计和安全生产提供可靠的地质资料,必须对可能存在的采空区范围、采空区积水情况予以探查。井田范围内,出露地层由老到新依次为:奥陶系中统马家沟组、峰峰组,石炭系中统本溪组、上统太原组,二叠系下统山西组,下石盒子组,上统上石盒子组、石千峰组及第四系。井田的含煤地层为石炭系上统太原组和二叠系下二叠统山西组,3号煤层为该矿的主要采煤层,煤厚度约5 m,埋深100~400 m,影响3号煤层安全生产的主要因素有3号煤层采空区积水及顶板砂岩含水层。

### 2.2 探测方法

考虑到测区内采空区范围的不确定因素,因此采用了三维地震探测来确定采空区范围,在此基础上采用了瞬变电磁法来确定采空区的积水范围。经

现场试验,瞬变电磁法采用了中心回线装置,发射回线选择600 m×600 m,接收线圈有效面积为100 m<sup>2</sup>,发射电流15 A,为了获得可靠信号,采用多次叠加技术,叠加次数大于500次,选用8.333 33 Hz发射基频进行工作,探测深度200~400 m。根据已知的地质资料,所布设的测线方向应尽可能与地质推断构造走向垂直,基本网度为40 m×20 m,即线距40 m,点距20 m。

### 2.3 资料分析与地质效果

测区203线时间断面图及瞬变响应多测道曲线剖面如图3所示,由图3a可知,垂向上视电阻率值剖面左侧为中等-高逐渐变换的趋势,符合本区地层的电性分布特征;而在剖面上右侧段水平距离1 700~2 420 m点号上部约25道附近增加了一个低阻层位,形成低阻圈闭,幅值较强。由图3b可知,在剖面的右侧水平距离1 700~2 420 m点号之间归一化感应电动势明显的“上凸”,异常明显,与时间断面对应较好。根据已知地质资料分析认为异常中心在3号煤底板附近,且该区段为三维地震推断解释的小煤矿采空区,野外调查显示异常区附近存在较大面积的塌陷裂缝区,大气降水可能会通过塌陷裂缝区进入井下采空区,形成采空区积水,同时,3号煤层开采后产生的冒落带及裂隙带(即破裂带)也会使上覆含水层的水和奥灰水导入矿坑系统;另一方面,下组煤若回采完毕,所形成的裂隙带可能沟通上组煤层(3号煤层)的积水采空区,从而导致上组煤采空区积水。根据双层积水采空区模型数值模拟可知,从瞬变电磁场响应多测道剖面图无法区分

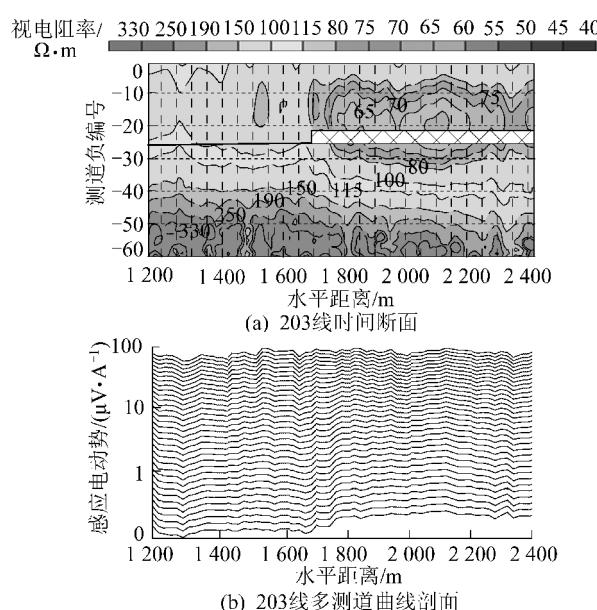


图3 测区203线时间断面及瞬变电磁响应多测道曲线剖面

是上组煤还是下组煤采空区积水引起的低阻异常，因此综合推断该异常区由采空区积水引起，富水性较强。采用瞬变电磁法探测的采空区积水位置经矿方确认，探测的异常所处位置小煤矿已淹井。瞬变电磁法测试结果与实际情况吻合，应用效果明显，该探测结果为矿方提供了矿井防治水依据。

### 3 结 论

TEM 法对积水采空区反映明显，对高阻采空区反映相对较弱；垂向上有多层积水采空区时，瞬变电磁的延迟效应会导致瞬变电磁法纵向分辨率降低，在一定深度范围内难以分辨具体哪个层位引起了电磁异常。在理论指导下，应用瞬变电磁法在韩城矿务局下属某矿进行的积水采空区范围探测工程中，成果与实际情况吻合较好，应用效果明显，该探测结果为矿方提供了矿井防治水参考资料。鉴于理论的复杂性，瞬变电磁在应用方面还有以下 3 个方面需进一步深入研究：①矿区人为设施干扰、高压线干扰的压制方法与技术；②瞬变电磁地形的影响及其校正方法与技术；③倾斜地层的瞬变电磁响应特征及倾斜地层下异常体响应特征研究。

#### 参考文献：

- [1] 王华军,罗延钟.中心回线瞬变电磁法 2.5 维有限单元算法[J].地球物理学报,2003,46(6):855-862.
- [2] 熊彬,罗延钟.电导率分块均匀的瞬变电磁 2.5 维有限元数

#### (上接第 120 页)

- [5] 张悦秋,谢广元,俞和胜.煤泥重介旋流器选煤技术现状及发展[J].煤炭工程,2005,12:14-16.
- [6] 桂夏辉,李延锋,刘炯天,等.液固流化床内颗粒沉降特性试验研究[J].煤炭学报,2010,35(8):1376-1378.
- [7] LI Yan-feng,ZHAO Wen-da,XU Shi-hui,*et al.*. Changes of Size,Ash and Density of Coalparticles on the Column Axis of a Liquid-Solid Fluidized Bed [J]. Powder Technology,2013,245(9):251-254.
- [8] 谢广元.选矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001:103-117.
- [9] 楚振峰,解京选,李延锋.液固流化床中物料属性对固体混合物分布的影响[J].中国矿业大学学报,2012,41(4):620-623.
- [10] Galvin K P,Pratten S ,Nguyen Tran Lam G. A Generalized Empirical Description for Particle Slip Velocities in Liquid Fluidized Beds [J]. Chemical Engineering Science,1998,19(11):1045-

值模拟[J].地球物理学报,2006,49(2):590-597.

- [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,2008,33(3):251-255.
- [4] 王信文,冯宏,解海军,等.TEM 技术地形校正初探[C]//陕西省地球物理文集.北京:煤炭工业出版社,2008:127-131.
- [5] 解海军.煤矿积水采空区瞬变电磁法探测技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2009.
- [6] 解海军,孟小红,王信文,等.煤矿积水采空区瞬变电磁法探测的附加效应[J].煤田地质与勘探,2009,37(2):71-74.
- [7] 刘树才,刘志新,姜志海.瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J].中国矿业大学学报,2005,34(4):414-417.
- [8] 李文,牟义,张俊英,等.煤矿采空区地面探测技术与方法优化[J].煤炭科学技术,2011,39(1):102-106.
- [9] 吴超凡,刘盛东,邱占林,等.矿井采空区积水网络并行电法探测技术[J].煤炭科学技术,2013,41(4):93-95,67.
- [10] 刘菁华,王祝文,朱士,等.煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J].煤炭学报,2005,30(6):715-719.
- [11] 张开元,韩自豪,周韬.瞬变电磁法在探测煤矿采空区中的应用[J].煤田地质与勘探,2007,35(4):341-344.
- [12] 安润莲,姚精选,杨引串.瞬变电磁勘探技术在探测采空区中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(4):116-122.
- [13] 薛国强,宋建平,闫述,等.瞬变电磁探测底下洞体的可行性分析[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(5):135-138.
- [14] 陈明生,闫述,解海军,等.二维地质体的瞬变电磁响应特征研究[J].地震地质,2001,23(2):252-256.
- [15] 殷长春,刘斌.瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究[J].地球物理学报,1994,37(S0):486-492.

1052.

- [11] Galvin K P,Pratten S ,Nguyen - Tran - lam G ,*et al.*. Dynamics of a Teetered Bed Separator [C]//International Coal Preparation Congress: Australian Coal Preparation Society,1998:225-235.
- [12] 郭德.下降介质流影响下颗粒的分层机理[J].煤炭学报,2002,27(3):325-327.
- [13] 陈文刊,李延锋,徐世辉,等.液固流化床粗煤泥分选机自动控制研究[J].煤炭工程,2011,8:84-86.
- [14] Galvin K P,Pratten S J,Nicol S K. Dense Medium Separation Using a Teetered - Bed Separator[J]. Minerals Engineering,1999(12):1059-1087.
- [15] Avimanyu Das,Biswajit Sarkar,Surya Pratap Mehrotra. Prediction of Separation Performance of Floatex Density for Processing of Fine Coal Particles [J]. Int J Miner Process,2009,41:41-49.
- [16] 吴朝龙.加重质液固流化床流化特性及分选研究[D].徐州:中国矿业大学,2013:24-41.