电子与计算机技术

矿井瞬变电磁探测技术与应用

岳建华,姜志海
(中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221008)

[摘 要] 扼要介绍了矿井瞬变电磁法的发展背景、技术特点、井下施工的装置形式,论述了矿井瞬变电磁法相关理论基础,指出了矿井瞬变电磁法的特点,结合实践说明矿井瞬变电磁法是一种有着良好应用前景的探测技术。

[关键词] 矿井瞬变电磁法;磁偶源;全空间
[中图分类号] P631.3+25 [文献标识码] A [文章编号] 1672-9943(2006)05-0072-04

0 引 言

地质勘查是煤矿水害和煤与瓦斯突出灾害防治工作的第一步。只有准确查明诱发灾害事故的地质因素,掌握和控制地质构造并探明水、瓦斯富集区和地应力集中区的情况,才有可能超前采取措施进行治理,从而避免或减少煤矿灾害事故的发生。目前,我国上百个煤矿开展过矿井直流电法勘探工作,取得了良好的应用效果,但当遇到巷道掘进头超前探测,破碎顶板电极接地困难,巷道极短造成的直流电法难以组织有效施工等问题时,矿井直流电法勘探有其局限性。为此,中国矿业大学资源学院地球探测与信息技术系将瞬变电磁法引入井下[1],在东部矿区十多对矿井开展了矿井瞬变电磁法的试验、应用工作,中国科学院地质与地球物理研究所白登海[2]等也进行了此类研究。

1 瞬变电磁理论发展现状

目前矿井瞬变电磁法应用借鉴的均是地面瞬变电磁法的基本理论,尚未形成自己的理论体系。对于地面瞬变电磁法,西方研究比较完善[3]。在一维层状方面,Wait给出了均匀层状大地研究理论,H.F.Morrision提出了层状半空间瞬变电磁场定量解释方法,1981年,Raich和Spies给出了适合于延时、电导率和层深改变的二层均匀大地的理论曲线;1979年,M.N.Nabighian提出了用作解释与反演的“烟圈”理论,1982年Right提出用Gaver-stehfest算法进行反演,比用傅里叶变换进行反演更为有效,更为稳定,1985年Raiche提出用共框TEM测深数据和对称四极电阻率测深数据进行联合反演。在二维方面,1980年Kuo和Cho首次用有限元法解时域中的变分方程,求任意二维地电断面的瞬变响应并用中心差分来代替热传导方程中对时间的导数。1983年Goldman等引进积分-差分的混合算法,计算了垂直磁偶极子激发下轴对称模型的TEM响应。Oristaglio等在1984年用有限差分法计算了二维地电断面,J.I.Adhidgaa,在1985年用有限差分法计算导电半空间二维体的瞬变响应,并研究了导电围岩和导电覆盖层对TEM的影响。Goldman等在1984年提出用有限元法解二维地电断面问题,并在1986年用有限元法研究了无限长线源激发下,任意二维地电断面的TEM响应。在三维方面,Hjelt给出了瞬变偶极场中两层球体的似稳态瞬变电磁场解,Lee计算了层状大地中导电球体的TEM响应,在1981年采用解积分方程的众数匹配法求解,进一步阐明了导电围岩中球体的异常与自由空间中异常的差别。San Filipo(1985)计算了矩形回线中阶跃电流激发下棱柱体的瞬变电场的数值解。Gunderson等人在1986年研究了三维层状大地的TEM响应,同年Newman和Hohman研究了层状大地中三维体的TEM响应规律[3]。

对于瞬变电磁法正反演来说,国内的有关研究与报道较少。盛圣圣与牛之琏推导了激励电流为阶跃波的中心回线及重叠回线装置情况下,层状大地的瞬变电磁感应电压的余弦积分表达式,并引入一种线性数字滤波方法来评价这种震荡类型的积分,同时利用所建立的程序库,计算了一维层状大地模型上的瞬变电磁正演响应[4]。丁世荣,

基金项目:高等学校博士学科专项科研基金资助课题(20050290501)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方文藻研究了阶跃磁偶极源球形地质体的响应，并得出了解析式[5]。唐新功、胡良俊等研究了层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应[6]。宋维琪研究了激发源为水平电偶极子 3D 时间域瞬变电磁场的有限差分算法[7]。王华军和罗延钟导出了中心回线瞬变电磁 2.5 维二次场(纯异常)的有限单元计算公式[8]。罗延钟，张胜业等导出了层状大地条件下时间域航空电磁法(偶极-偶极装置)的正演计算公式和算法[9]。杨海霞正演计算了均匀半空间及一维层状地层的时间域海洋瞬变电磁场并讨论了相应模型的海洋瞬变电磁响应[10]。

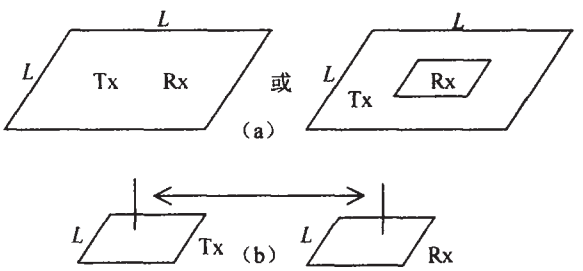
在视电阻率换算方面，蒋邦远给出了一种全区经验公式，该公式应用效果比较理想[11]。严良俊，徐世浙等利用导电全空间与均匀半空间中心回线源和磁偶极子在阶跃电流激发下磁场公式和扩散速度的定义，导出了不同条件下瞬变场的扩散速度公式[12]。苏朱刘、胡文宝根据半无限均匀介质空间中场的表达式，分析了一维层状介质情况下的中心回线方式瞬变电磁测深法的全区视电阻率定义的基本性质，并讨论了求解方法，特别地，引入了基于感应电动势的‘虚拟全区视电阻率’概念，从而解决了全区视电阻率解的唯一性和存在性等问题[13]。宋先旺、姜胜华给出了视深度的计算公式，对均匀半空间模型法和层状模型法的视深度的计算公式进行了理论推导和求解方法的对比[14]。白登海给出了一种时间域瞬变电磁法视电阻率的数值计算方法，利用该方法可以容易地求出中心方式的全程视电阻率，理论模型和实际数据计算表明，与早期和晚期近似值比较，全程视电阻率具有更高的精度和分辨率[15]。

综上，对适用于矿井勘探的多匝小回线的全空间瞬变电磁场分布规律研究较少，其对于多匝小回线装置的视电阻率换算公式与时-深转换也尚需进一步研究。

2　矿井瞬变电磁测探技术与装置形式

(1) 技术特点。矿井瞬变电磁法是利用不接地回线通以脉冲电流向地中发射一次场，在脉冲电流关断期间测量地下介质感应的二次场，通过分析二次场的衰减趋势来推断地质信息的一种非接触式的地球物理探测技术，其基本原理与地面瞬变电磁法一致。相对矿井直流电法勘探而言，有着自身的技术特点：接收的是感应信号，对低阻地质体反应灵敏；体积效应小，纵横向分辨率高；所需施工空间小，能够克服巷道掘进头超前探测、巷道极短造成的直流电法难以施工等困难；属于非接触式的探测方法，无电极接地影响；井下施工方便、简捷、快速、劳动强度小。

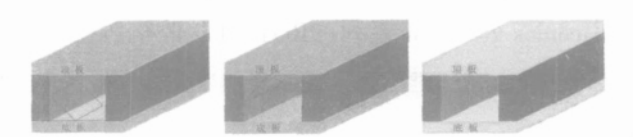
(2) 装置形式。目前矿井瞬变电磁法均采用多匝小回线磁偶极源，线框边长根据巷道空间大小设置规格为 2 m×2 m或 2 m×3 m。装置形式有重叠回线，中心回线，分离回线，如图 1 所示。重叠回线的接收线框边长与发射线框一致，此装置形式与地质探测对象有最佳耦合，响应曲线形态简单，具有较高的接收电平、较好的穿透深度及异常便于分析解释，施工方便灵活等优点，但发射与接收线圈间存在较大互感，影响早期数据采集。中心回线为重叠回线的改进形式，其接收线框采用直径 1 m的多匝圆回线或等价接收面积的磁感应探头，除具备重叠回线装置的优点外，还克服了重叠回线发射与接收线圈之间的互感，与之而来的是降低了施工的灵活性。分离回线是发射线框与接收线框分开一定距离的装置形式，对直立低阻异常体响应灵敏，但接收信号较弱。



(a) 重叠回线装置和中心回线装置　(b) 分离回线装置

图 1　瞬变电磁测深的装置形式

(3) 架设方位。图 2 为瞬变电磁井下施工时线框的架设方位示意图，根据探测方向分顶板探测、侧邦探测和底板探测。顶、底板测量时线框倾斜放置，角度大小视煤层的倾角与探测目的而定，一般情况下成 45 角；侧帮测量时线框紧贴煤壁。



(a)底板探测　(b)顶板探测　(c)侧邦探测

图 2　线框的假设方位

3　矿井瞬变电磁法和地面瞬变电磁法的区别与联系

矿井瞬变电磁测深是一种新的井下物理探测技术，其理论研究与技术方法正处于起步阶段，同

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时特殊的施工背景给其带来了许多地面瞬变电磁法所没有的问题：矿井物探固有的特殊理论问题是巷道影响下的全空间地球物理场问题，矿井瞬变电磁法在场的分布上也不可避免的受到巷道影响，弄清巷道影响下瞬变电磁场的全空间分布规律是真实认识井下地电响应特征的基础；无适合于多匝小回线装置的视电阻率换算公式，目前大多沿用通用的早、晚期视电阻率换算公式，其计算出的视电阻率公式偏小，与实际情况极不相符，不利于异常特征辨别与资料解释；多匝小回线形式增大了发射、接收线框的瞬态过程，造成发射电流关断时间过长，导致早期数据不可用，从而丢失了浅层的地电信息；井下有铆网支护、铁轨、排水管道、动力机械、电缆等金属良导体，如何压制克服它们的干扰成为井下施工技术的关键。

4 电偶源

由于井下巷道中存在不可避免的铁轨、排水管道、动力机械等金属物体，对于不接地发射线框形式的磁偶源装置势必会在金属物体激发强大的感应信号，将严重影响到测量结果，再者磁偶极源在周围空间都会产生感应信号，呈全空间效应，其测量信号为全空间地电响应的综合表现，导致对探测目的物定位困难。为此，笔者提出将电偶源发射装置形式引入井下。首先，供电线源与探测目标体直接接触，激励场分布于地质体内，而与金属干扰体分离，不会在其上产生响应，进而避免了金属物的干扰；再者由于采用线源发射装置形式，其激励场主要分布于供电一侧，全空间效应相对较弱，测量信号主要反映供电侧的地电信息，避开了非探测目标区域内干扰，利于地质异常的定位。

5 矿井瞬变电磁仪器发展现状

目前，国际上瞬变电磁仪器主要有加拿大Geonics公司EM系列(PROTEM接收机，TEM47、TEM57-MK2、TEM67发射机)、Crone公司PEM系统，和澳大利亚SIROTEM系统等三种系统，其次还有Lamontange公司UTEM系统。此外一些多功能电法仪，如加拿大phoenix公司V-6系统(fasTEM、MulTEM)和美国Zonge公司GDP系统(NanoTEM、ZEROTEM)也可用作瞬变电磁法的测量工作。国内产品有：西安物化探研究所生产的LC型电法勘探系统、长沙智通技术研究所SD-2型小功率瞬变电磁仪，物化探研究所生产的WDC-2型小功率瞬变电磁仪和中国有属工业总公司北京矿产地质研究所生产的TEM-3S型瞬变电磁仪。以上仪器均为地面仪器，而专门用于矿井勘探，适用于井下数据采集并具有防爆功能的瞬变电法仪尚待研制。

6 应用成果

(1)试验性成果。中国科学院地质与地球物理研究所白登海研究员领导的课题组发展了一种新的高分辨电阻率成像方法，可以对低阻环境中电阻率的微小变化做出反映，为瞬变电磁法成功用于地下探测奠定基础。为了验证地下瞬变电磁法探测含水构造的可行性和有效性，他们与峰峰矿务局梧桐庄煤矿合作，进行了多次实验，并在地下试验中成功地预测了一个导水构造[15]。

(2)瞬变电磁法在徐州某矿34223工作面顶板水文探测中的应用。本次勘探使用SIROTEM-III型仪器，采用多匝小线框重叠回线装置，发射线框为2 m×8 m×84匝，接收线框为2 m×8 m×60匝，共布置测点22个，点距30 m。视电阻率断面图如图2所示。从图2可看出，巷道顶板上方低阻异常带之间连通性也较好、分布范围较大集中在距联络巷210~270点、350~400点以及450~550点三个区域中，其异常深度较浅，大部位于顶板向上50 m以内，只是在240 m处顶板深度75 m存在一个深度较大的异常。经矿方打钻放水，证明物探

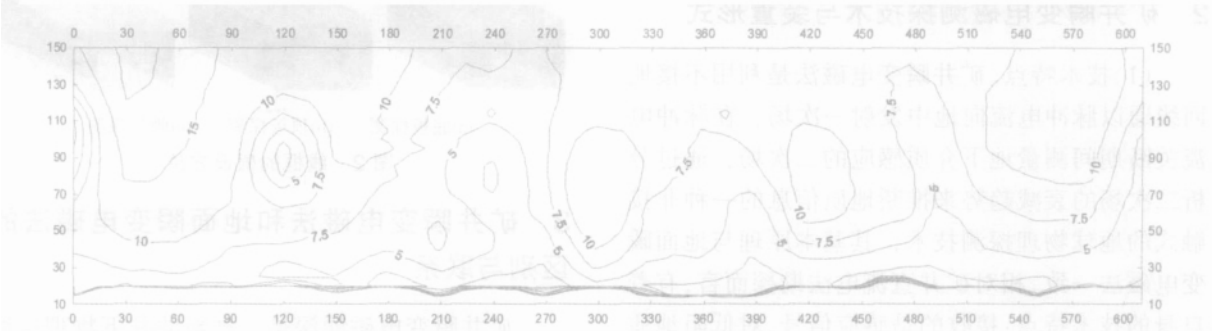


图2 皮带道TEM视电阻率断面图

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结果正确[16]。

7 结　语

矿井瞬变电磁法在煤层顶底板赋水区、导(涌)水通道、陷落柱探测中已经取得了良好应用效果,但目前仍停留在经验基础上,还有许多问题需要研究,如电磁场的全空间传播规律,人文设施干扰的压制消除,地质异常的空间定位等。但这都不妨碍其在井下物探中的应用前景, 相信随着理论研究工作的深入以及技术方法的成熟完善,其应用领域会更加广泛,应用前景会更加美好。

[参 考 文 献]

[1] 岳建华,等.矿井瞬变电磁法及其应用[D].北京:中国地球物理学会第 19 届年会论文集,2003.

[2] 束洪福.我国煤矿地下水害预测研究取得突破进展[J].科技日报,2003,12(11).

[3] 何展翔,罗延钟.西方地面瞬变电磁法理论的发展现状[J].国外地质勘探技术, 1989,(1).

[4] 盛圣圣,牛之琏.一维层状大地的瞬变电磁测深正演计算[J].煤田地质与勘探,1991,19(6):53-57.

[5] 丁世荣,方文藻.球形地质体在阶跃磁偶极源激励下的瞬变电磁响应[J].辽宁师范大学学报(自然科学版),1997,20(3):218-223.

[6] 唐新功,胡良俊,等.层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应[J].石油地球物理勘探,2000,35(5):628-633.

[7] 宋维琪.3D 瞬变电磁场有限差分正演计算[J].石油地球物理勘探,2000,35(6):751-756.

[8] 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.

[9] 罗延钟,张胜业,等.时间域航空电磁法一维正演研究[J].地球物理学报,2003,46(5):719-724.

[10] 杨海霞.勘察天然气水合物的海洋瞬变电磁法的研究[D].中国地质大学硕士学位论文.

[11] 蒋邦远.磁源瞬变电磁法测深一维反演经验式及应用效果[J],物探与化探,2000,24(4):99-104.

[12] 严良俊,徐世浙,等.中心回线瞬变电磁测深法快速电阻率成像方法及应用[J].煤田地质与勘探,2002,30(6).

[13] 苏朱刘,胡文宝.中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演方法.石油物探,2002,41(2).

[14] 宋先旺,姜胜华.瞬变电磁法全期视电阻率、视深度求解方法与应用 [J]. 矿产与地质,1997,41 (2):129-136.

[15] 白登海.时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J].地球物理学报 2003,46(5):697-704.

[16] 刘树才,岳建华.瞬变电磁法在煤矿防治水中的应用[D].北京:第 6 界中国国际地球电磁学术讨论会论文集,2003.

[作者简介]

岳建华(1964-),男,中国矿业大学资源与地球科学学院教授、博导,主要从事煤炭资源勘查地球物理和矿井地球物理勘探的研究工作。

[2006-06-23]

Technique and Application of Transient Electromagnetic Method in Mine

YUE Jian-hua, JIANG Zhi-hai

(School of Mineral Resouce and Geoscience, CUMT, XuZhou 221008, China)

Abstract:The development history, technological characteristic of transient electromagnetic method and the loop configuration in the mine are introduced, and the developed situation of the transient electromagnetic theory in and out of abroad is discussed. Problerms in the application of transient electromagnetic methods in mine are revealed at the present time, and the lately transient electromagnetic instruments are shown. According to the engineering practice, it is indicated that the transient electromagnetic method is one of promising exploration techniques with excellent applicational prospect.

Key Words:mining transient electromagnetic methods　magnetic bipolar source whole space

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net