技术·方法

磁源边长大小对电磁场扩散速度影响规律研究

于景邨, 曾晓波, 宋金栋, 刘树才
(中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221116)

[摘 要] 全空间电磁场扩散速度计算的准确性, 直接影响矿井瞬变电磁法探测结果的精度。基于电磁场全空间"双烟圈效应"理论, 建立了全空间电磁场扩散速度数学模型。对不同边长磁源回线中心电磁场扩散速度进行了对比分析, 并对巷道底板三层地电模型全空间理论视电阻率曲线进行了时深转换, 结果表明回线边长大, 较早时间段回线中心扩散速度大, 但衰减速度快, 影响浅部地层探测能力; 较晚时间段, 不同边长磁源回线中心扩散速度趋于相等, 说明边长大小对深部地层探测能力影响小。提出了较早时间段电磁场扩散速度校正系数, 改进了磁源回线电磁场扩散速度数学模型, 为实际探测工作中磁源回线边长大小的选择提供理论依据。

[关键词] 全空间 瞬变电磁场 扩散速度 磁源 边长
[中图分类号] P631.325 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2009)04-0423-04

Yu Jing-cun, Zeng Xiao-bo, Song Jin-dong, Liu Shu-cai. A study on diffusion speed of electromagnetic field with different size of magnetic source[J]. Geology and Exploration, 2009, 45(4): 423-426.

0 引言

在矿井瞬变电磁法勘探资料反演解释中, 时深转换的实现是依据全空间电磁场扩散速度和其对应的时间乘积[1], 其计算结果的准确性直接影响探测赋水体等低阻异常体空间位置的解释精度。电磁法测量中时深转换的研究最早应用于大地电磁测深法资料解释中, 后来在 UTEM 和频率域航空电磁法资料解释中得到应用[2-4]。近年来, 国内外许多学者开始研究地面瞬变电磁法时深转换理论和技术, 取得较好的地质效果[5-7]。矿井瞬变电磁法勘探资料解释中采用地面同样时深转换数学模型时, 其结果与实际地质情况误差较大[8-11]。分析引起误差的原因主要是时深转换数学模型建立中假设发射回线为理想的磁偶极源, 以磁场对时间变化率的最大值到达的深度作为该时刻换算的深度, 且瞬变电磁感应信号为地下半空间导电介质在一次电磁场激励下产生的。而矿井瞬变电磁法勘探是在井下巷道内进行, 其瞬变电磁感应信号为巷道附近导电岩层及其中赋水体全空间瞬变电磁响应叠加结果, 井下实际发射装置为边长 2 m 左右的多匝数回线 (有效面积达 240 m^2 左右)[12,13], 不能假设为理想磁偶极子; 当发射回线边长较大时, 磁场对时间变化率最大值由回线中心扩散到边上需要一定时间[14,15], 且井下影响电磁场扩散速度的因素比地面更复杂, 国内外对全空间电磁场扩散速度理论及应用技术研究很少, 尚未见相关报道。通过对电磁场扩散速度数学模型分析, 采用方形回线的磁源边长大小是影响电磁场在巷道围岩中扩散速度的关键参数之一; 通过对不同发射回线边长全空间理论视电阻率曲线特征分析, 总结了发射回线边长变化对全空间瞬变电磁场扩散速度的影响规律, 不仅提高了矿井瞬变电磁法勘探资料的反演解释精度, 而且为实际探测工作中发射回线大小选择提供了理论依据。

1 全空间瞬变电磁场扩散速度数学模型

依据电磁场 "双烟圈效应"理论可知, 电磁场在介质中扩散速度 V 与电性介质的分布和时间有关[9,16]。为了求出电磁场扩散速度, 在井下巷道内布置一边长为 L的正方形回线, 假设巷道顶底板电

[收稿日期] 2008-11-04; [修订日期] 2009-06-01。[责任编辑] 杨 欣。
[基金项目] 国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (编号: 2007CB209400) 资助。
[第一作者简介] 于景邨 (1966年—), 男, 2001年毕业于中国矿业大学, 获工学博士学位, 教授, 现主要从事矿井地球物理勘探、工程与环境地球物理勘探等教学和科研工作。

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

阻率均为 ρ的均匀介质, 已知电磁场垂直分量在某一时间内向下或向上传播的垂直距离为 D, 则电磁波在垂直方向上的扩散速度为:

$$V = \frac{\rho\sqrt{\gamma\pi}}{\mu L}\left[C_1 + (C_1^2 + 2)^{1/2} + \left(1 + \frac{C_1}{(C_1^2 + 2)^{1/2}}\right)\gamma C_2\right] \quad (1)$$

式中 $C_1(\gamma) = \frac{3\pi^2}{4}\left[1 - \frac{\gamma}{4} - \sum_{k=2}^{\infty}\frac{(2k-3)!!}{k!\,(k+1)!}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^k\right]$

$$C_2(\gamma) = \frac{3\pi^2}{4}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(2k-1)!!}{k!\,(k+1)!}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^k$$

$\gamma = \mu L^2/4\rho t$, A 是发射回线有效面积。

对于井下巷道顶底板全空间为不均匀导电介质分布情况下, 电磁场在巷道顶底板传播规律和均匀介质一样, 必须满足麦克斯韦方程组, 其发射回线中心电磁场垂直扩散速度与均匀介质情况扩散速度满足一定比例关系, 即任意导电介质分布情况下全空间电磁场垂直扩散速度 V_S 和向下传播深度 D 为:

$$V_s = \beta\frac{\rho_t\sqrt{\gamma\pi}}{\mu L}\left[C_1 + (C_1^2 + 2)^{1/2} + \left(1 + \frac{C_1}{(C_1^2 + 2)^{1/2}}\right)\gamma C_2\right] \quad (2)$$

$$D = V_S \times t_i$$

式中 C_1, C_2, γ, 参数同式 (1), ρ_t 为 t_i 时刻对应视电阻率值, 为勘探体积范围内巷道顶底板岩层电性的综合反映, β为扩散速度数学模型换算系数[14], 为方形回线边长对电磁场扩散速度影响的校正系数。

从公式 (2)分析可知, 影响电磁场在巷道围岩中扩散速度的主要因素为发射回线边长 L 和不同时刻 t_i 对应的视电阻率 ρ_i。文章只讨论发射回线边长大小对扩散速度的影响规律, 即方形回线边长愈大, 电磁场由回线中心向周边扩散时间愈长, 反映出扩散速度愈慢, 传播深度愈小。因此, 在实际瞬变电磁法勘探中, 并非回线边长愈大, 探测深度愈大, 根据勘探地质任务的要求和探测目标地质体的埋深, 必须把增大发射回线边长和探测深度综合考虑。通过对全空间均匀介质和水平层状介质理论视电阻率曲线进行时深转换结果分析, 扩散速度数学模型换算系数 β取值范围一般在 0.6~ 1.5之间[14]。

2 发射回线边长对电磁场扩散速度影响分析

为了研究发射回线边长对电磁扩散速度的影响规律, 指导实际测量选择合理的回线尺寸, 对电阻率为 1 Ωm的均匀导电全空间介质中, 发射正方形回线, 边长 L分别为 2 m、50 m、100 m、200 m的各种回线扩散速度随时间变化曲线如图 1所示, 横坐标为电磁场扩散时间, 单位 ms, 纵坐标为电磁场扩散速度, 单位 m/ms, 图中不同类型的曲线对应不同边长发射回线电磁场随时间变化规律。由图 1中四条曲线的变化规律可以看出, 由于回线边长的变化, 电磁场扩散速度并不相同, 说明回线边长影响电磁场的扩散速度, 即影响时深换算结果。随着发射回线边长的逐渐增大, 曲线之间重合部分减少, 分离愈明显。在较晚时间段, 四条曲线趋于重合, 说明大回线中心电磁场扩散速度比同样速度的小回线时间来得晚, 这是因为电磁场由回线边传播到回线中心, 小回线所需时间比大回线少。因此, 实际进行时深换算时, 回线边长大小不能忽略。

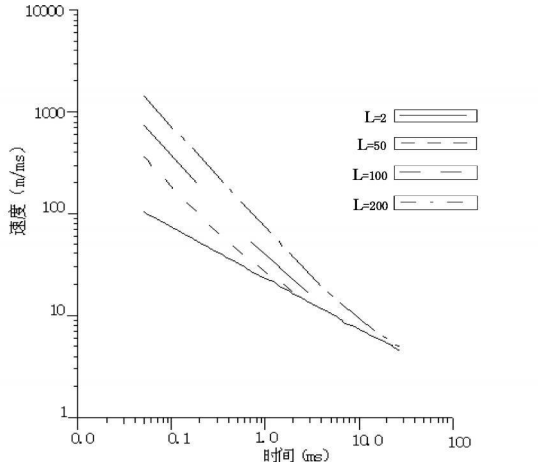


图 1 不同回线边长回线中心电磁场扩散速度随时间变化曲线

Fig 1 Diagram showing the electromagnetic field diffusion speed curve varying with time in different loop side length

图 2(a)为巷道底板下水平层状三层 K 型地电模型正演计算的视电阻率随时间变化理论曲线, 地电模型层参数为: ρ_1 = 10 Ωm, H_1 = 50 m, ρ_2 = 1000 Ωm, H_2 = 100 m, ρ_3 = 10 Ωm, 巷道顶板 ρ_0 = 50 Ωm, h_0 = 10000 m。横坐标为时间, 单位 ms, 纵坐标为视电阻率值, 单位为 Ωm。从图 2(a)中可以看出, 相同的地电模型, 当发射回线边长不同时, 视电阻率曲线首支变化差异很大, 随着回线边长的增大, 曲线首支与实际地电模型第一层层参数差别也增大, 而曲线中间段和尾支部分基本不变; 根据公式 (2)进行时深换算后, 得到图 2(b)视电阻率随深度变化曲线, 回线边长变化对换算结果的影响更明显, 从图 2(b)中可以看出, 在回线边长 L= 50 m (小于第一层厚度)时, 视电阻率随深度变化曲线首支不满足晚

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

期视电阻率计算要求,出现了畸变,曲线其它部分反映的电性特征与地电模型基本吻合。随着回线边长 L增大,巷道底板下第一电性层特征在视电阻率曲线上反映逐渐减弱(特别在边长 L= 200 m时,第一电性层特征基本无反映)。由此可见,当采用边长较大回线发射时,目的是为了增大探测深度,不仅牺牲了对浅部电性层的探测能力,而且降低了电磁场的扩散速度,从而也影响探测深度。因此,发射回线边长小,可以探测浅部电性层分布特征,扩散速度增大,发射功率减小,但探测深度受到限制; 回线边长大,扩散速度小,发射功率增大,电磁场扩散速度减小,浅部电性层探测能力降低。

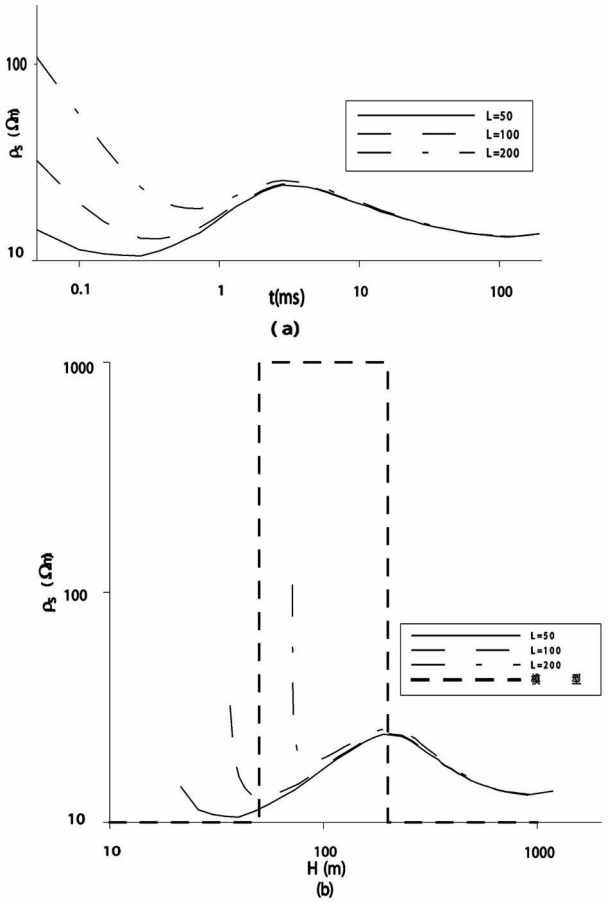


图 2　巷道底板下三层理论模型不同回线边长时深转换结果

Fig. 2　Time-depth conversion results of 3 seams theory model in laneway floor with different loop side length

(a)视电阻率随时间变化曲线; (b) 视电阻率随深度变化曲线

(a) curve of apparent resistivity varying with time; (b) curve of apparent resistivity varying with depth

3　结论

1) 建立了方形回线磁源改进的全空间瞬变电磁场扩散速度数学模型,通过对全空间均匀介质和水平层状介质理论视电阻率曲线进行时深转换结果分析,换算系数 β取值范围一般在 0.6~ 1.5之间;

2) 方形回线边长的变化影响电磁场扩散速度,即影响时深转换结果。方形发射回线边长增大,电磁场由回线边传播到回线中心,小回线所需时间比大回线少。因此,实际进行时深转换时,回线边长大小不能忽略;

3) 方形发射回线边长小,可以探测浅部电性层分布特征,扩散速度增大,但发射功率减小,探测深度受到限制; 回线边长大,发射功率增大,电磁场扩散速度减小,浅部电性层探测能力降低。因此,实际瞬变电磁法探测中应依据勘探地质任务和探测目标体的埋深,应合理选择发射回线边长。

[参考文献]

[1] WOLFGRAM P, KARLIK G. Conductivity-Depth transform of GEOTEM data[J]. Exploration Geophysics, 1995, 26(4): 179-185.

[2] 周云满. 物探方法在滇东北地区寻找隐伏矿床的应用效果[J]. 地质与勘探, 2006(3): 81-85.
Zhou Yunman. Application Effects of Geophysical Prospecting Meyhod for Hidden Deposits in the Northeastern Yunnan[J]. Geology and Exploration, 2006(3): 81-85.

[3] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 351-364.
Li Jin-ming. Geoelectric Field and Electrical Exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 351-364.

[4] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 162-190.
Jiang Bang-yuan. Applied Near Zone Magnetic Source Transient Electromagnetic Explora-tion[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 162-190.

[5] 王庆乙. 近区瞬变场的频率效应与大深度探测能力的研究[J]. 地质与勘探, 2006: 228-233.
Wang Qing-yi. Frequency Effect of Transient Field and Capability of Great Deep Exploration[J]. Geology and Exploration, 2006: 228-233.

[6] 李世峰, 梁盛军, 周建雄. 强干扰背景条件下 TEM探测铁矿资料解释方法研究[J]. 地质与勘探, 2006(3): 72-75.
Li Shi-feng, Liang Sheng-jun, Zhou Jian-xiong. Data Explanation of TEM to Explore IRON Deposit in Strong Jamming Background[J]. Geology and Exploration, 2006(3): 72-75.

[7] 张 林. 瞬变电磁测深在铝土矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2007(3): 68-71.
Zhang Lin. Application of Transient Electromagnetic Method in Exploration of Bauxite De-posits[J]. Geology and Exploration, 2007(3): 68-71.

[8] 马 宇, 张陪强. 基于小波分析的 TEM快速成像[J]. 地质与勘探, 2005(2): 72-76.
Ma yu, Zhang Pei-qiang. TEM Fast Imaging Based on Wavelet Analysis[J]. Geology and Ex-ploration, 2005(2): 72-76.

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

[9] J. D. Mcneill. Approximate calculations of the transient electromagnetic response from buried conductions in a conductive half-space[J]. Geophysics, 1984, 49(7): 918-924.

[10] A. P. Raiche, R. G. Gallagher. Apparent resistivity and diffusion velocity[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44: 1628-1633.

[11] P. Wolfgram, G. karlik. Conductivity-Depth transform of GEOTEM data[J]. Exploration Geophysics, 1995, 26: 179-185.

[12] P. K. Fullagar. Generation of conductivity-Depth pseudo-section from coincident and in-loop TEM data[J]. Exploration Geophysics, 1995, 26: 43-55.

[13] FULLAGAR P K. Generation of conductivity-Depth pseudo-section from coincident and in-loop TEM data[J]. Exploration Geophysics, 1995, 26(2): 43-55.

[14] 于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 2-6, 67-89.
Yu Jing-cun. Mining Transient Electromagnetic Exploration[M]. Xuzhou: China University of mining and Technology Press, 2007: 2-6, 67-89.

[15] LEE T. Estimation of depth to conductors by the use of electromagnetic transients[J]. Geophysics, 1977, 65(2): 61-75.

[16] RAICHE A P, GALLAGER R G. Apparent resistivity and diffusion velocity[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44(3): 1628-1633.

A Study on Diffusion Speed of Electromagnetic Field with Different Size of Magnetic Source

YU Jing-cun, ZENG Xiao-bo, SONG Jin-dong, LIU Shu-cai

(School of Resource and Geoscience, CUMT, Xuzhou 221116)

Abstract The calculation accuracy of diffusion speed in whole-space electromagnetic field affects directly the interpretative precision of TEM survey in underground coal mines. Based on the "double smoking rings theory" in whole-space electromagnetic field, we established a mathematic model of diffusion speed of electromagnetic field in whole-space. Diffusion speed of electromagnetic field was analyzed and compared with varying side length of magnetic source loop in whole-space. Converted time-depth of curve of apparent resistivity with 3 seams theory model in laneway floor, the results demonstrate that the diffusion speed of loop center is fast, but decay fast in the early period with long length loop, it's weak to survey the shallow layer; in the late period, the diffusion speed with different side length of magnetic source loop tend to be equal, which shows the side length affects depth survey weakly. The correction coefficient of diffusion speed with electromagnetic field in the early period was calculated and, the mathematic model of electromagnetic field diffusion speed was ameliorated. It might provid theory foundation for choosing magnetic source loop size in practical survey.

Key words: whole-space; transient electromagnetic field; diffusion speed; magnetic source; loop size

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