

隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法

李术才¹, 孙怀凤¹, 李 貅², 卢绪山², 薛翊国¹, 苏茂鑫¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过三维数值试验和模型试验研究, 分析平行磁场的响应特征, 发现一些新的现象和规律, 提出隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法。数值试验结果表明: (1) 与掌子面平行的磁场响应对于判别掌子面前方的含水构造具有非常明显的响应特征; (2) 对于垂直磁场响应无法识别的含水构造, 平行磁场响应仍然具有很明显的响应特征。 (3) 当大规模含水构造距离掌子面较近时, 平行磁场响应存在 2 次电动势反向的现象, 可直接用于工程中水体的判别。采用数值方法计算 TBM 开挖隧道进行瞬变电磁超前预报时的响应特征曲线, 提出的新探测方法有望应用于 TBM 开挖隧道的超前预报工作。

关键词: 隧道工程; 瞬变电磁法; 超前地质预报; 平行磁场响应

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2014)07 - 1309 - 10

DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.07.002

ADVANCED GEOLOGY PREDICTION WITH PARALLEL TRANSIENT ELECTROMAGNETIC DETECTION IN TUNNELLING

LI Shucai¹, SUN Huaifeng¹, LI Xiu², LU Xushan², XUE Yiguo¹, SU Maoxin¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The parallel electromagnetic responses were studied through three-dimensional numerical and physical modelling respectively. Abnormal electromagnetic responses at the planes ahead of and parallel to the tunnelling front were found, leading to the identifying of the existence of water bearing structures. Some water bearing structures being not detected by the electromagnetic responses perpendicular to tunnel front were detected by the parallel one. When large water bearing structures were very near to the tunnelling front, the paralleled electromagnetic field induced twice occurring of the back electromotive force in the fixed time windows, which can be used directly for the identification of water body in real engineering practice. These findings indicated that the parallel electromagnetic responses could be a useful method for advanced geological prediction.

Key words: tunnelling engineering; transient electromagnetic method(TEM); advanced geology prediction in tunnelling; parallel magnetic component response

1 引 言

隧道施工过程中经常面临突水、突泥等地质灾

害, 造成重大的经济损失, 有的甚至造成人员伤亡。隧道超前地质预报是提前预测、预报掌子面前方含水构造的一种有效方法, 能够在一定程度上有效避免部分突水突泥地质灾害的发生。

收稿日期: 2013 - 07 - 04; **修回日期:** 2013 - 12 - 11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036002); 国家自然科学基金重点项目(51139004); 国家自然科学基金面上项目(41174108)

作者简介: 李术才(1965 -), 男, 博士, 1987年毕业于山东矿业学院土木工程系矿井建设专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事裂隙岩体断裂损伤、地质灾害超前预报与防治等方面的教学与研究工作。E-mail: lishucai@sdu.edu.cn。通讯作者: 孙怀凤(1982 -), 男, 博士, 主要从事瞬变电磁场及电磁勘探理论、隧道超前地质预报等方面的研究工作。E-mail: sunhuaifeng@gmail.com

瞬变电磁方法是一种基于电阻率差异的电磁感应勘探方法，广泛应用于金属矿产资源勘查^[1-2]、地下水探测与评估^[3-5]、煤田采空区探查^[6]、地质调查与地质填图^[7-8]等工作中；近年来，瞬变电磁方法作为一种有效的水体探测工具被应用到隧道超前地质预报以及煤田巷道掘进迎头及侧帮的超前探测中^[9-14]，取得了较好的应用效果。

目前隧道瞬变电磁超前地质预报和煤田巷道超前探测一般采用中心回线装置；煤田侧帮瞬变电磁探测有的采用中心回线装置，有的采用偶极装置。上述装置型式在实际工作过程中只采集与发射回线垂直的磁场分量随时间的变化，即感应电动势，通过对感应电动势数据的反演和成像勾画探测工作面前方的地电断面分布。与发射回线垂直的磁场分量对异常特征的响应规律比较简单，获得的感应电动势幅值也越大。然而，笔者通过实践以及数值试验的方法发现：当含水构造距离掌子面相对较远时，观测获得的感应电动势响应曲线表现出的异常特征就不再明显，甚至与不存在含水构造的模型响应一致。此时已经不能够通过反演获得正确的地电断面分布情况。

瞬变电磁观测磁场响应的一大优势就是可以进行不接触测量，这使得能够非常方便和快速的进行三分量观测。瞬变电磁三分量响应特征已经应用于未爆炸物(UXO)探测^[15-16]中并取得了很好的效果，在隧道底板探测^[17]中也有一定的尝试。笔者通过数值试验的方法发现了一些新的现象和规律，即在隧道超前探测中与掌子面平行的磁场分量对掌子面前方的含水构造存在非常明显和特殊的响应特征，即使含水构造距离掌子面较远时，平行磁场响应特征也与不存在含水构造时的响应曲线存在明显的差异，并且当含水构造距离掌子面较近时，平行磁场响应具有非常明显的感应电动势反向现象，可以作为大规模含水构造的判断依据。在系统的分析和对比含水构造与掌子面不同距离时瞬变电磁平行磁场响应的基础上提出了隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法，并给出了实际施工过程中可直接使用的收发装置布置形式。

2 隧道瞬变电磁三维时域有限差分正演

考虑均匀、有耗、非磁性、无源媒质中，引入虚拟位移电流后的 Maxwell 方程组^[18-19]为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： \mathbf{E} 为电场强度， \mathbf{H} 为磁场强度， \mathbf{B} 为磁通量密度， σ 为电导率， γ 为虚拟介电常数， t 为时间。

考虑针对低频电磁勘探问题所进行的近似条件，可以得到直角坐标系中的电磁场计算方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \gamma \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \gamma \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= \gamma \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \\ \frac{\partial B_x}{\partial t} &= \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \frac{\partial B_z}{\partial t} &= -\frac{\partial B_x}{\partial x} - \frac{\partial B_y}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： H_x, H_y, H_z 分别为 x, y 和 z 方向的磁场强度； E_x, E_y, E_z 分别为 x, y 和 z 方向的电场强度； B_x, B_y, B_z 分别为 x, y 和 z 方向的磁感应强度。

对于激励源的施加考虑有源媒质中的 Maxwell 方程组，即在位移电流与传导电流项中再加入源电流项，式(2)变为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \gamma \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x + J_{sx} \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \gamma \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y + J_{sy} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= \gamma \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： J_{sx}, J_{sy} 为源电流密度的 2 个分量。

上述方程组采用时间离散和空间离散后，可以实现瞬变电磁三维正演计算^[20-21]。

3 数值算例

采用时域有限差分方法进行隧道瞬变电磁超前

探测的三维正演，为了便于对比，将隧道模型进行概化并采用了统一的计算参数。将隧道掌子面概化为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 的正方形，将隧道腔体概化为长方体。隧道瞬变电磁超前地质预报的掌子面前方含水构造三维模型如图 1 所示。数值建模过程中将发射回线布置在掌子面中央，统一采用 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的发送回线尺寸，在掌子面上采用均匀网格剖分(见图 2)，采用 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的立方体 Yee 晶胞单元。接收单元放置在掌子面上进行阵列式接收，发送回线内部和外部的响应均可以采集得到。

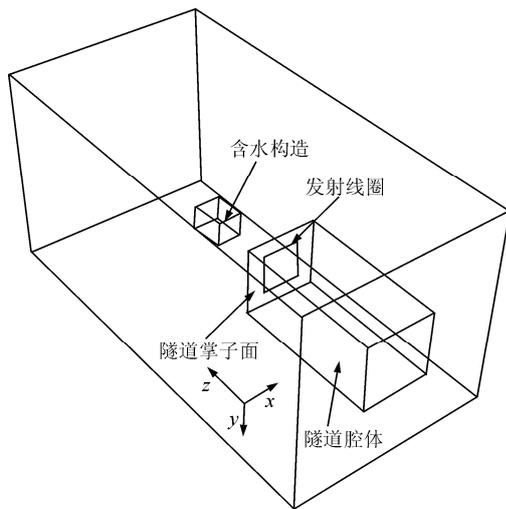


图 1 掌子面前方含水构造三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of water bearing structures in front of a tunnel face

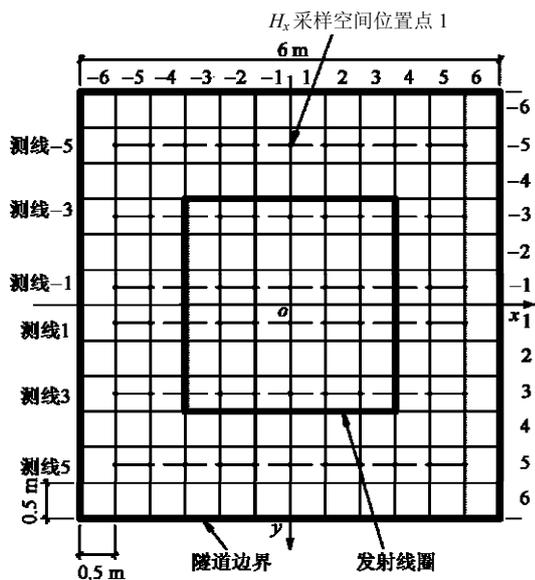


图 2 掌子面上的时域有限差分网格划分及发送回线位置

Fig.2 Finite difference time domain grid meshing on tunnel face and transmitting loop

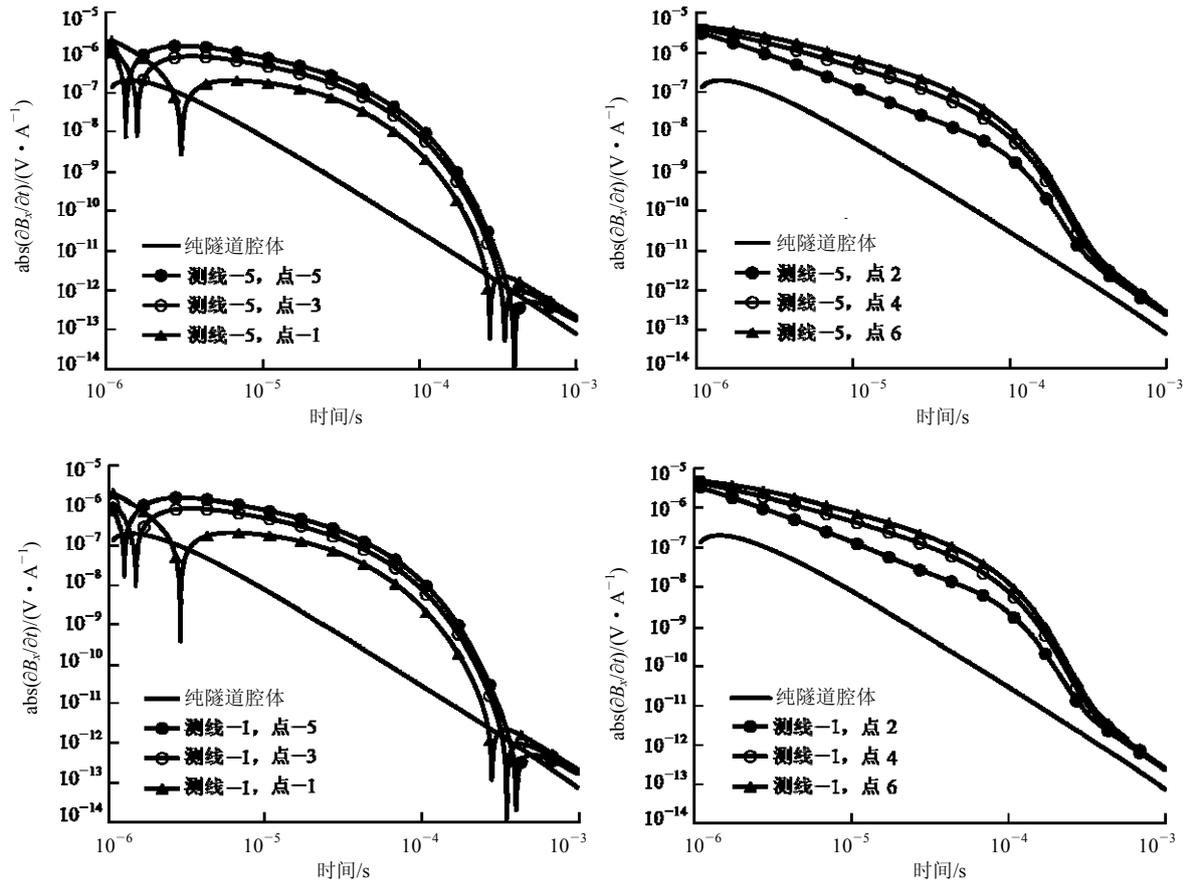
3.1 充水断层的平行磁场响应特征

采用上述统一计算模型进行充水断层模型的瞬变电磁响应计算，并分别考察断层厚度、断层与掌子面距离、断层倾角等参数对掌子面上瞬变电磁超前探测结果的影响。

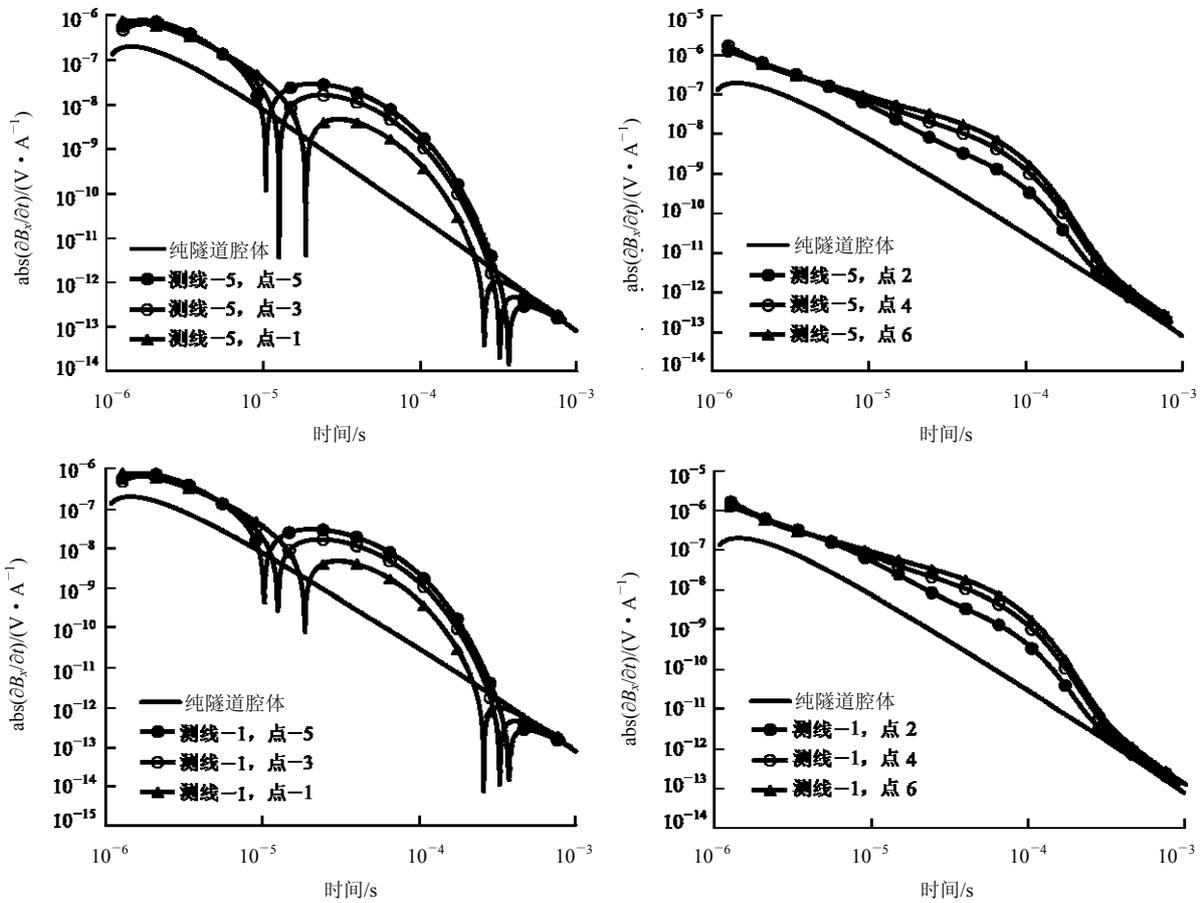
设置充水断层的尺寸为 $50\text{ m}(x\text{ 方向}) \times 50\text{ m}(y\text{ 方向})$ ，厚度为 $5\text{ m}(z\text{ 方向})$ ，位于隧道掌子面正前方，与掌子面平行(见图 1)。为了方便对比，分别计算了充水断层距掌子面为 10, 20, 30, 50 和 70 m 的瞬变电磁响应(见图 3)，每幅图中给出了掌子面上 2 条测线不同观测点与掌子面平行磁场分量的瞬变电磁响应。测线布置如图 2 所示，此处给出的是测线 -5 和 -1 两条测线上不同测点(-5, -3, -1, 2, 4, 6)的响应曲线。对于对称模型，磁场的 x 和 y 分量具有对称性，因而仅以 x 分量为例作图。同时为了便于对比，每幅曲线图中均绘制了不包含含水构造的纯隧道腔体模型的中心点响应曲线。由于平行磁场本身的特性，在观测时会出现电动势反向的现象，因而在双对数坐标系中绘图时取其绝对值，图中出现尖点的曲线就是由于进行绝对值处理造成的，实际数据中第一个尖点左侧数据为负值，右侧数据为正值；第二个尖点右侧数据为负值，以此类推，尖点两侧符号相反。

图 3 所示的 5 组对比曲线中，每组曲线由 4 幅曲线组成，其中上面 2 幅为图 2 中测线 -5 上不同测点的 H_x 分量感应电动势衰减曲线；下面 2 幅为图 2 中测线 -1 上不同测点的 H_x 分量感应电动势衰减曲线。由于同一测线上不同测点的衰减曲线差异较小，并且同一测线左右两侧不同测点的变化规律不同，为了更好地展示不同测点衰减曲线的变化规律，采用 2 幅图分别展示测线左侧和右侧的衰减曲线。

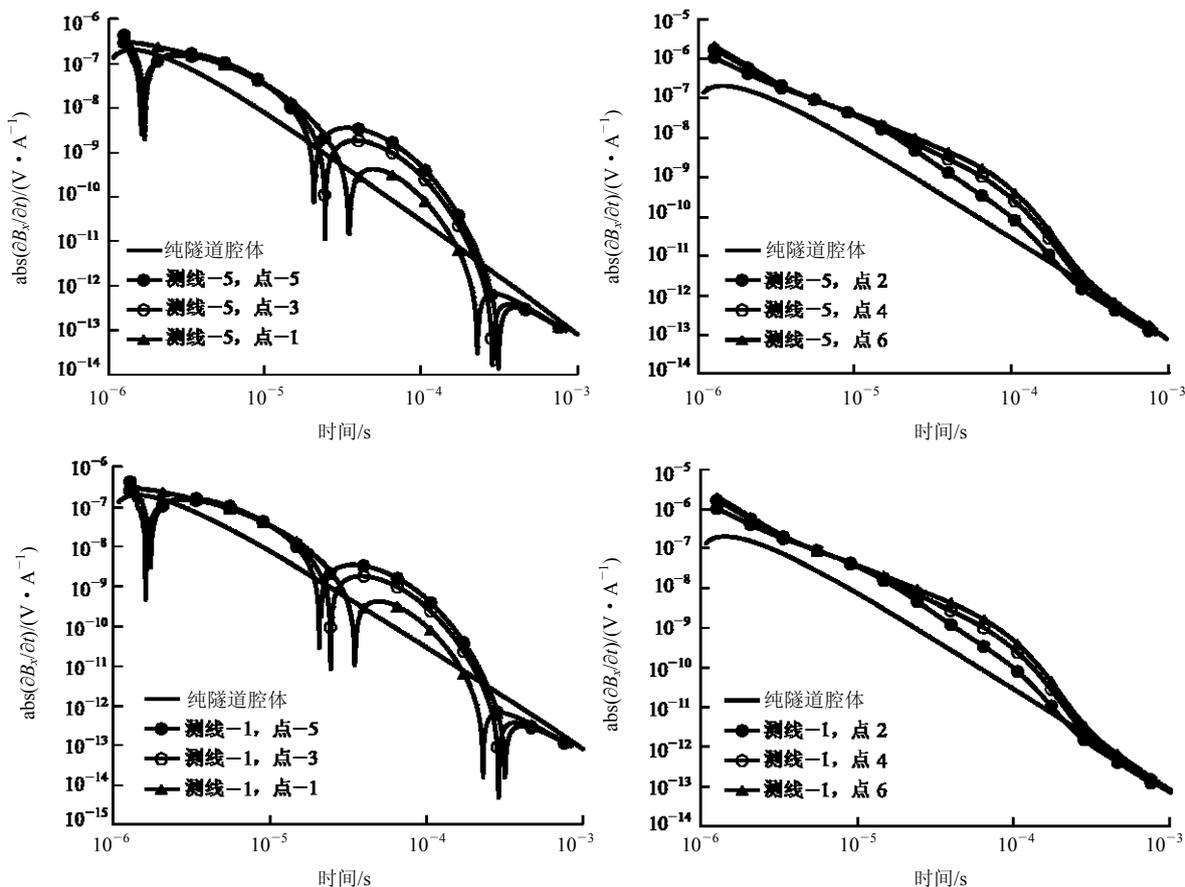
以充水断层位于掌子面正前方 10 m 为例(见图 3(a))，测线 -5 和 -1 的整体变化规律基本一致，但幅值存在明显的差别。以图 2 中给定的坐标系为准，对于测线左侧的测点(点 5~1)，在给定的观测时窗内($1\text{ }\mu\text{s} \sim 1\text{ ms}$)出现了 2 次感应电动势反向的现象，而在测线右侧的测点(点 2~6)则没有出现这一现象，这是由于磁场 H_x 和 H_y 在掌子面上的对称关系导致的，如果以 H_y 为研究对象，则在掌子面上 x 轴上部的测点会出现电动势反向现象而 x 轴下部的测点则不会出现该现象。对于充水断层位于掌子面前方 10 和 20 m 时，这一现象是一致的。



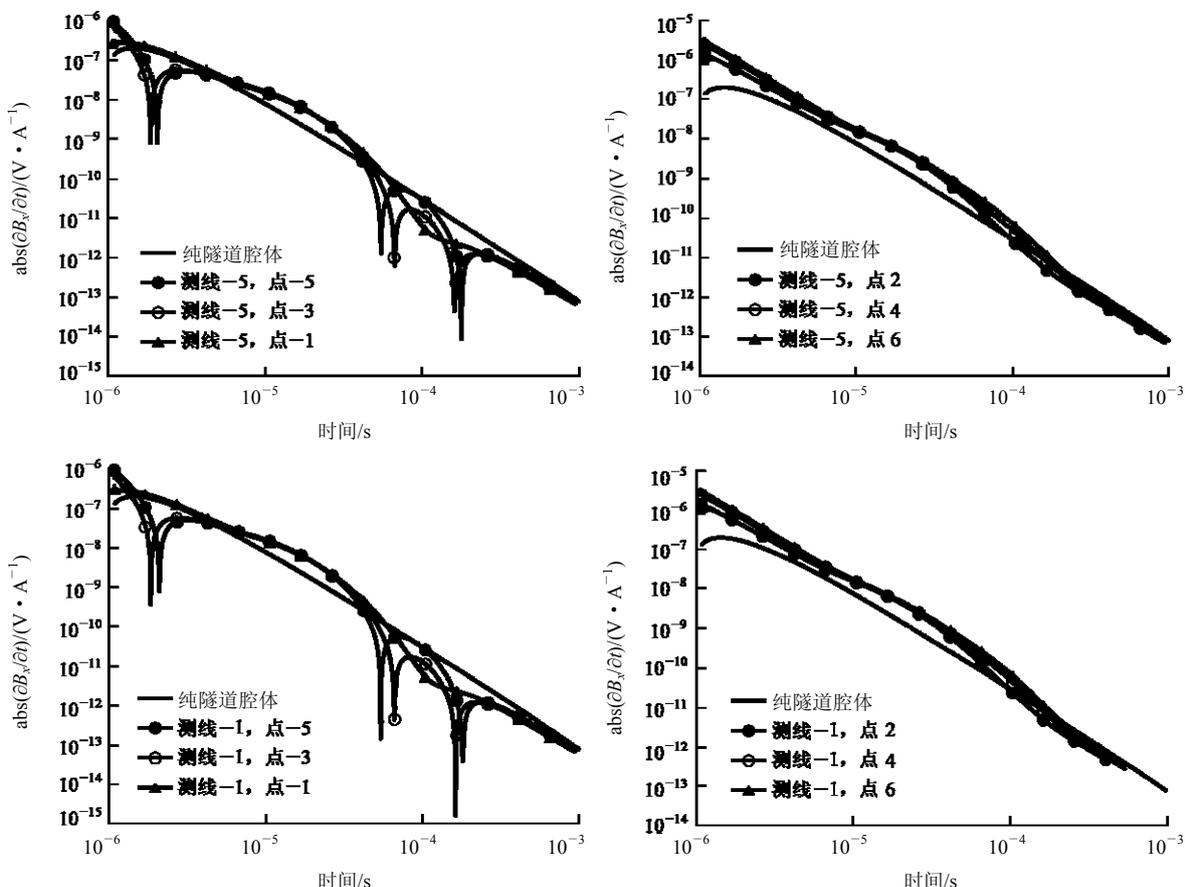
(a) 异常体距掌子面 10 m



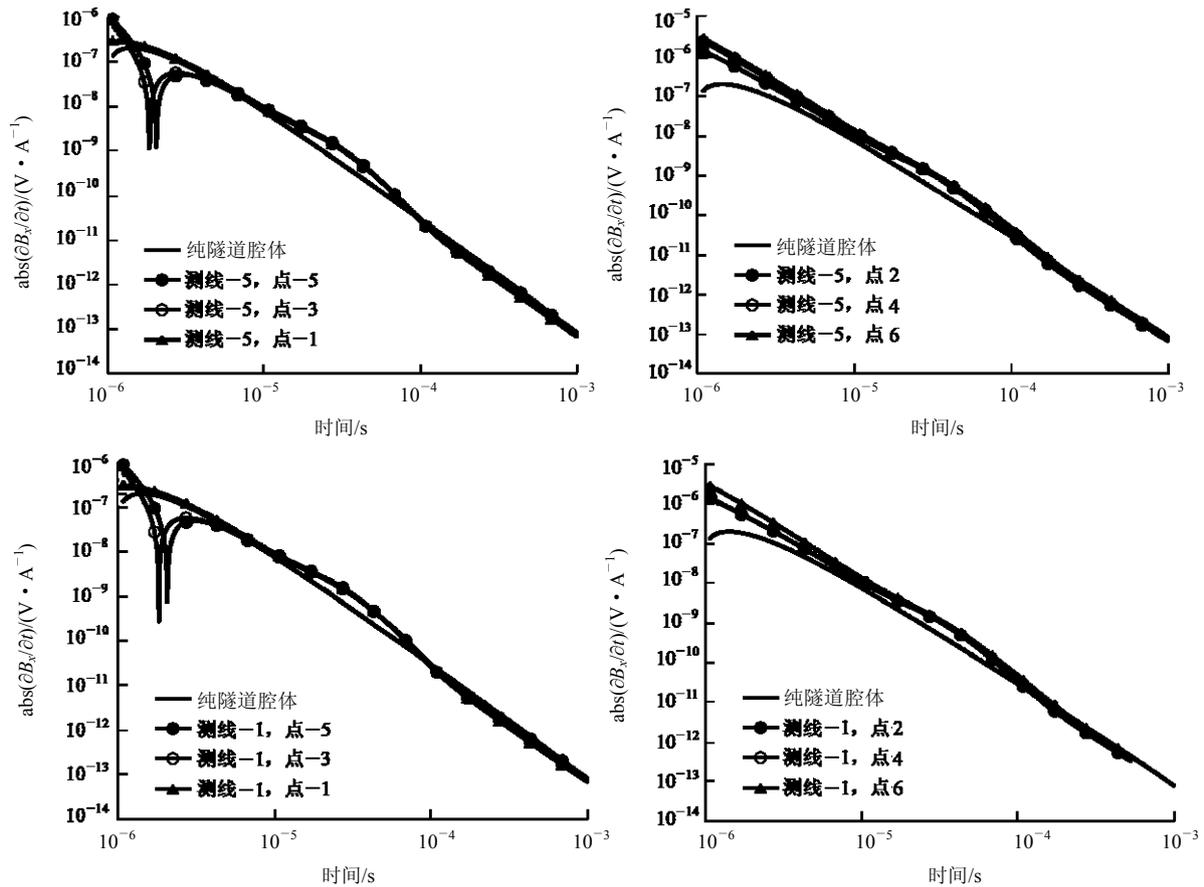
(b) 异常体距掌子面 20 m



(c) 异常体距掌子面 30 m



(d) 异常体距掌子面 50 m



(e) 异常体距掌子面 70 m

图 3 掌子面前方不同距离时平行磁场的瞬变电磁响应

Fig.3 Parallel component TEM responses under different distances with tunnel face

当保持充水断层规模不变而增大其与掌子面之间的距离时(30 和 50 m), y 轴左侧的观测点则出现了 3 次感应电动势反向的现象(见图 3(c), (d)); y 轴右侧的观测点变化规律与距离为 10 和 20 m 时的变化规律相似, 但异常响应幅值有明显的降低。

当继续增大充水断层与掌子面之间的距离到 70 m 时, y 轴左侧的观测点在给定的时间窗口范围内仅在早期出现了一次电动势反向的现象, 大部分时间的响应曲线与纯隧道模型的响应曲线接近, 但仍然能够在 15~60 μ s 范围内出现明显的异常; 而对于 y 轴右侧的观测点, 与前述模型基本类似, 仅在异常响应幅值上有明显的减小。

为了与垂直磁场响应的特征进行比较, 图 4 给出了上述 5 个模型对应的中心回线装置回线中心点的垂直磁场响应。同时采用虚线给出纯隧道模型的衰减曲线作为对比。

通过数值算例对比以及已有的工程经验可知, 中心回线垂直磁场响应对于近距离的含水构造反映明显, 当含水构造距离掌子面较远时的响应并不明显, 几乎与纯隧道模型的响应一致。例如: 当充水

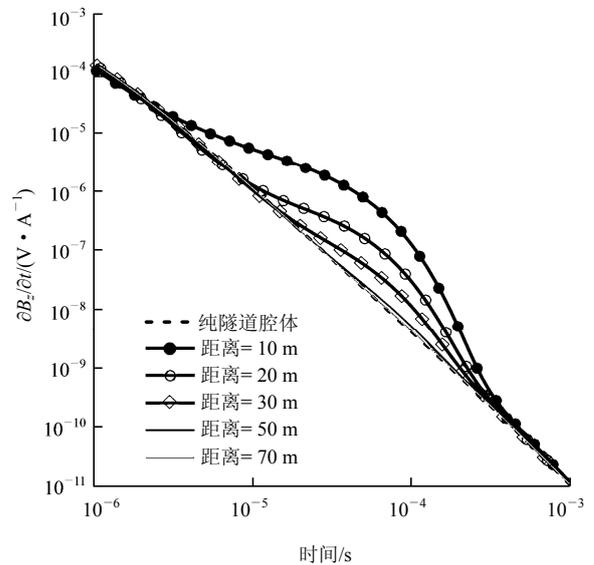


图 4 掌子面前方不同距离时发送回线中心 TEM 垂直磁场响应

Fig.4 Vertical component TEM responses at transmitting loop center under different distances with tunnel face

断层距离隧道掌子面 50 m 时, 衰减曲线的响应幅值就非常小, 但仍然能够看到与纯隧道模型衰减曲

线的细微差异；当增大距离到 70 m 时，从图 4 中可以看出中心回线装置的衰减曲线与纯隧道模型的衰减曲线几乎重合，基本无法分辨，此时的垂直磁场响应衰减曲线并没有包含掌子面前方充水断层的响应信息，因而即使通过反演手段也无法圈定异常区域。

而隧道超前探测时与掌子面平行的瞬变电磁响应无论含水构造与掌子面距离远近，都能够得到与纯隧道模型差异非常大的感应电动势衰减响应曲线，并且曲线均存在感应电动势反向的现象。

当含水构造距离掌子面较近时，其响应非常明显并具有典型的多次电动势反向现象，此现象可以在实际工程中用于判定掌子面前方是否存在大规模含水构造。

3.2 TBM 开挖隧道瞬变电磁超前探测的平行磁场响应

在 TBM 施工的隧道进行瞬变电磁超前探测时，TBM 机是最大的电磁干扰源，目前的瞬变电磁探测基本无效。采用三维时域有限差分算法，将 TBM 机概化成长圆柱形分析 TBM 机对瞬变电磁探测的影响，在掌子面上激发回线附近采用 0.2 m×0.2 m 的网格划分(见图 5)，TBM 采用圆形断面，圆形穿过网格时包含在圆内部的面积超过网格面积 1/2 时认为整个网格均为 TBM 机的参数，不超过 1/2 时采用隧道参数。用于实际工程时，可根据隧道设计尺寸及 TBM 选型等参数进行模型设计和计算。设计瞬变电磁超前探测时 TBM 刀盘距隧道开挖掌子面 5 m，TBM 长度 110 m，断面尺寸 5.8 m×5.8 m，TBM 电阻率为 0.1 Ω·m，围岩电阻率 100 Ω·m 的模型，针对掌子面前方包含和不包含直立充水断层模型进行计算。

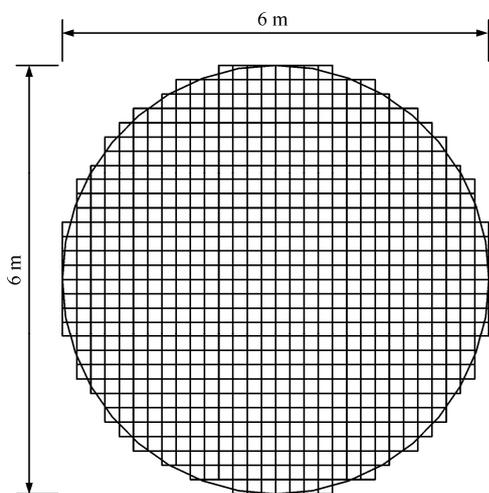
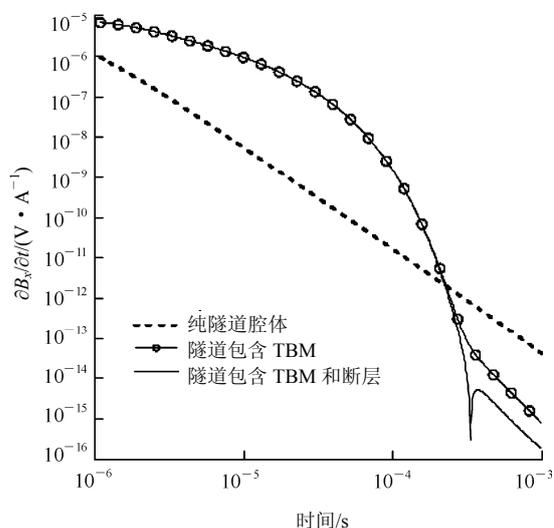


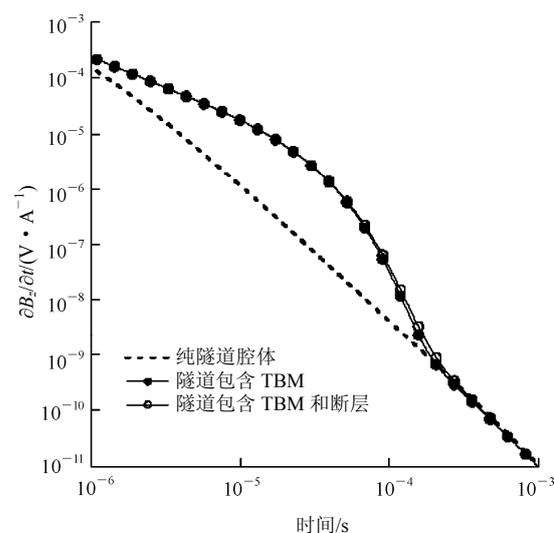
图 5 TBM 刀盘截面网格划分示意图

Fig.5 FDTD grid meshing of TBM cutter

图 6 给出了 TBM 开挖隧道的瞬变电磁响应及对比曲线。从电动势对比来看，TBM 机对瞬变电磁超前探测响应表现为非常大的低电阻率异常，这符合低阻体的响应特征，同时，注意到包含和不包含充水断层的模型存在差异，就水平感应电动势而言，在早期时刻 2 组模型的衰减曲线是重合的，但在晚期时刻，不包含充水断层时，衰减曲线没有出现电动势反向的现象，而存在充水断层时，则出现了与前述类似的电动势反向现象；就垂直感应电动势而言，主要表现为存在充水断层的模型晚期电动势幅值大于不存在充水断层模型，早期的响应仍然重合。从衰减曲线中几乎难以区分掌子面前方是否包含含水构造。



(a) 水平感应电动势响应



(b) 垂直感应电动势响应

图 6 TBM 开挖隧道的瞬变电磁响应及对比曲线

Fig.6 TEM responses comparisons of TBM with and without water filled fault

4 平行磁场响应探测工作方法

目前隧道采用的瞬变电磁勘探一般观测磁场响应信号而不观测电场响应信号，与电场响应信号相比，磁场信号具有非接触、与电性参数无关等优势，因而给实际工作过程带来极大的方便。

图 7 给出了目前常用的中心回线装置探测方法示意图，而对于平行磁场响应探测方法，只需要探测时人为控制磁探头的方向与掌子面平行即可(见图 7(b))，不需要增加任何其他成本。并且，该方法可以不需要移动发射回线，采用固定发射回线模式，一次探测所需的时间少于中心回线装置。

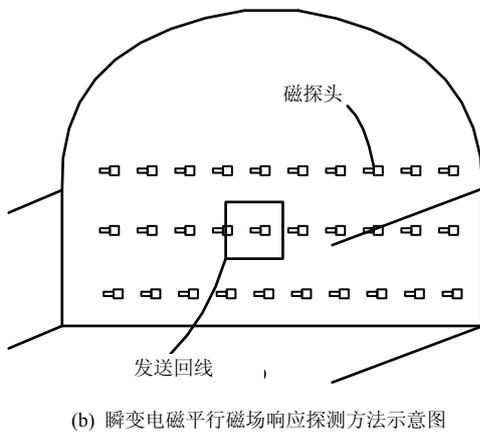
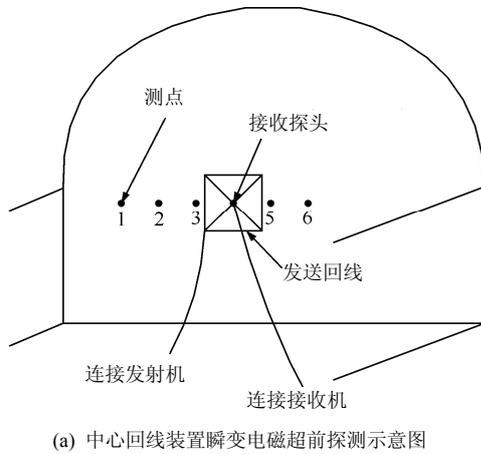


图 7 隧道瞬变电磁超前预报平行磁场与垂直磁场响应探测方法示意图

Fig.7 Schedule diagrams of parallel and vertical magnetic responses detection method in tunnels

5 物理模拟试验

根据瞬变电磁物理模拟试验的相似性准则，采用土槽模型进行物理模拟试验的设计，相关依据和相似性准则参数请参考刘志新等^[10]的研究成果。发

射线圈采用直径为 2 mm 的漆包线绕制成方形，尺寸为 30 cm×30 cm×20 匝。接收线圈采用直径为 0.15 mm 的漆包线绕成，尺寸为 10 cm×10 cm×50 匝。在地面向下挖出 50 cm×50 cm×60 cm 的土体作为隧道腔体，向下进行相当于进行隧道掌子面的超前探测，其设计如图 8 所示，采用尺寸为 40 cm×40 cm 的铜板模拟充水断层异常体。通过调节发射线圈的阻抗调整发射电流为 1 A，接收线圈按照图 7 所示的形式放置时接收到的感应电动势衰减曲线如图 9 所示，为了便于在双对数坐标中作图，图中曲线数据采用了绝对值处理，可以看到在 40 us 左右出现了感应电动势符号反转的现象，与本文采用三维正演算法计算得到的规律一致。

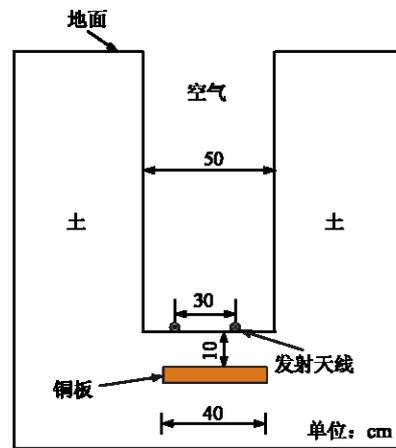


图 8 物理模拟试验设计图

Fig.8 Design of physical modeling experiment

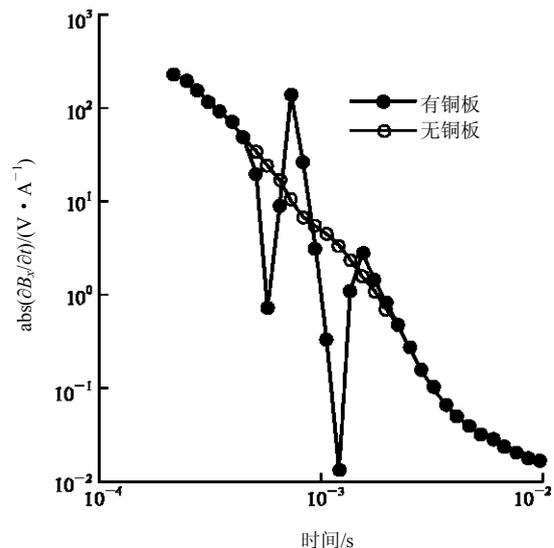


图 9 模型试验实测数据

Fig.9 Acquired data in physical modeling

采用瞬变电磁平行磁场响应进行探测，对掌子面前方的含水构造具有非常有效的识别能力。下一

步通过更多的模型试验和数值试验研究，该方法有望用于采用 TBM 开挖的隧道超前预报中来。

6 结 论

针对隧道瞬变电磁超前地质预报中含水构造距离掌子面较远时垂直磁场感应电动势响应弱的问题，提出了隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法。通过三维数值建模和规律分析发现了一些新的现象及规律：

(1) 当含水构造距离掌子面较远时，垂直磁场响应无法引起足够大的异常，而平行磁场响应的异常幅值比垂直磁场响应要明显。通过采用平行磁场响应探测方法，有望提高瞬变电磁的探测深度，或者在同等探测深度条件下，提高瞬变电磁的探测精度，即函数构造不足以引起垂直磁场响应异常特征时，其平行磁场响应可能会很明显。

(2) 当含水构造距离掌子面的距离相对较近时，水平磁场感应电动势响应会出现多次感应电动势反向现象，当充水断层距离掌子面非常近时出现了 2 次感应电动势反向现象，而不存在含水构造时则不会出现这一现象，这一特征可以作为掌子面前方存在大规模含水构造的判断依据。

(3) 隧道瞬变电磁超前地质预报时，发射回线内外的观测点对掌子面前方的含水构造均有不同的响应，并且因而采用阵列式探测或在回线内和回线外同时布置测线可能会采集到更多的信息。

目前得出的规律已经可以应用于实际工程，但进一步研究隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测反演技术能够更好地反映探测目标的地电结构。

参考文献(References)：

- [1] YANG D, OLDENBURG D W. Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit[J]. *Geophysics*, 2012, 77(2): 23–34.
- [2] XUE G Q, QIN K Z, LI X, et al. Discovery of a large-scale porphyry molybdenum deposit in Tibet through a modified TEM exploration method[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2012, 17(1): 19–25.
- [3] ELDAD L, MARK G, AVICHAY H, et al. Spatial delineation of groundwater salinity using deep time domain electromagnetic geophysical measurements: a feasibility study[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): w12404.
- [4] EZERSKY M, LEGCHENKO A, AL-ZOUBI A, et al. TEM study of the geoelectrical structure and groundwater salinity of the Nahal Hever sinkhole site, Dead Sea shore, Israel[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75(1): 99–112.
- [5] YANG C, TONG L, HUANG C. Combined application of dc and TEM to sea-water intrusion mapping[J]. *Geophysics*, 1999, 64(2): 417–425.
- [6] XUE G Q, CHENG J L, ZHOU N N, et al. Detection and monitoring of water-filled voids using transient electromagnetic method: a case study in Shanxi, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(5): 2 263–2 270.
- [7] CHEN C S. Mapping plate boundaries using TEM along the Longitudinal Valley, Taiwan[J]. *Geophysics*, 1998, 63(3): 868–879.
- [8] PELLERIN L, BEARD L, MANDELL W. Mapping structures that control contaminant migration using helicopter transient electromagnetic data[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2010, 15(2): 65–75.
- [9] 杨海燕, 岳建华. 巷道影响下三维全空间瞬变电磁法响应特征[J]. *吉林大学学报 地球科学版*, 2008, 38(1): 129–134.(YANG Haiyan, YUE Jianhua. Response characteristics of the 3D whole space TEM disturbed by roadway[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science*, 2008, 38(1): 129–134.(in Chinese))
- [10] 刘志新, 刘树才, 刘仰光. 矿井富水体的瞬变电磁场物理模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 259–266.(LIU Zhixin, LIU Shucai, LIU Yangguang. Research on transient electromagnetic field of mine water-bearing structure by physical model experiment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 259–266.(in Chinese))
- [11] 苏茂鑫, 李术才, 薛翊国, 等. 隧道掌子面前方低阻夹层的瞬变电磁探测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增 1): 2 645–2 650.(SU Maoxin, LI Shucai, XUE Yiguo, et al. Research on detection of low resistivity interbed in front of tunnel face by means of transient electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Supp.1): 2 645–2 650.(in Chinese))
- [12] 孙怀凤, 李术才, 李 貅, 等. 隧道瞬变电磁多点阵列式探测方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(11): 2 225–2 233.(SUN Huai Feng, LI Shucai, LI Xiu, et al. Research on transient electromagnetic multipoint array detection method in tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2 225–2 233.(in Chinese))
- [13] 苏茂鑫, 李术才, 薛翊国, 等. 隧道地质预报中的瞬变电磁视纵向电导解释方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(11): 1 722–1 726.

- (SU Maoxin ,LI Shucai ,XUE Yiguo ,et al. TEM apparent longitudinal conductance interpretation in tunnel geological forecast[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2010 ,32(11) :1 722 – 1 726.(in Chinese))
- [14] 于景邨,刘志新,汤金云,等. 用瞬变电磁法探查综放工作面顶板水体的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4) : 542 – 546.(YU Jingcun ,LIU Zhixin ,TANG Jinyun , et al. Transient electromagnetic detecting technique for water hazard to the roof of fully mechanized sub 2 level caving face[J]. Journal of China University of Mining and Technology , 2007 , 36(4) : 542 – 546.(in Chinese))
- [15] PASION L R , BILLINGS S D , OLDENBURG D W , et al. Application of a library based method to time domain electromagnetic data for the identification of unexploded ordnance[J]. Journal of Applied Geophysics , 2007 , 61(3/4) : 279 – 291.
- [16] GASPERIKOVA E , SMITH J T , MORRISON H F , et al. UXO detection and identification based on intrinsic target polarizabilities—a case history[J]. Geophysics , 2009 , 74(1) : B1 – B8.
- [17] SUN H F , LI X , LI S C , et al. Multi-component and multi-array TEM detection in karst tunnels[J]. Journal of Geophysics and Engineering , 2012 , 9(4) : 359 – 373.
- [18] 孙怀凤. 隧道含水构造三维瞬变电磁场响应特征及突水灾害源预报研究[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2013.(SUN Huaifeng. Three-dimensional transient electromagnetic responses of water bearing structures in tunnels and prediction of water inrush sources[Ph. D. Thesis][D]. Jinan : Shandong University , 2013.(in Chinese))
- [19] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005 : 12 – 13.(GE Debiao ,YAN Yubo. Finite difference time domain method of electromagnetic wave[M]. 2nd ed. Xi'an : Xidian University Press , 2005 : 12 – 13.(in Chinese))
- [20] 孙怀凤, 李 貅, 李术才, 等. 考虑关断时间的回线源激发 TEM 三维时域有限差分正演[J]. 地球物理学报, 2013 , 56(3) : 1 049 – 1 064.(SUN Huaifeng , LI Xiu , LI Shucai , et al. Three-dimensional FDTD modeling of TEM excited by loop source considering ramp time[J]. Chinese Journal of Geophysics , 2013 , 56(3) : 1 049 – 1 064.(in Chinese))
- [21] WANG T , HOHMANN W G. A finite-difference , time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics , 1993 , 58(6) : 797 – 809.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 一种冲击地压多参量前兆信息辨识模型及方法;
- (2) 基于 Kalman 滤波融合算法的库区滑坡动态变形监测综合信息提取;
- (3) 增层开挖对既有建筑物桩基承载刚度影响分析;
- (4) 富水断层破碎带井筒围岩控制;
- (5) 碱侵蚀红土的工程指标与受损物质的关系探析;
- (6) 光滑接触条件下隧洞支护断面形状优化;
- (7) 程潮铁矿西区地下开采引起的地表变形规律初探;
- (8) 裂缝干扰下页岩储层压裂形成复杂裂缝可行性。