文章编号: 0451- 0712(2011)05- 0214- 05 中图分类号: U452.1 文献标识码: A

瞬变电磁法对隧道含水不良地质体的探测规律

孟陆波[1], 李天斌[1], 段 铮[2], 赵晋乾[3], 薛 伟[4]

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都市 610059; 2. 中铁第三勘察设计院集团有限公司 天津市 300142; 3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉市 430063; 4. 中国水电工程顾问集团昆明勘测设计研究院 昆明市 650000)

摘 要: 瞬变电磁法是一种对水体较为敏感的预报方法,为探索瞬变电磁法对探测隧道含水不良地质体的探测规律,通过现场大量瞬变电磁法探测实例,总结其对涌水通道、含水溶洞、含水裂隙的反应规律,以及后方低阻体对探测的干扰影响。结果表明,当探测前方存在含水通道时,视电阻率等值线会在其含水通道所在区域明显降低,且呈条带状分布,条带宽度与管道分布有关;当探测前方存在含水溶洞时,视电阻率等值线会在溶洞所在区域发生弯曲甚至闭合,且视电阻率值较其他区域明显降低;当探测前方内存在多处含水裂隙(溶隙)时,视电阻率等值线会在含水裂隙区域发生小范围的闭合,且视电阻率值降低;当掌子面附近后方存在金属低阻体及大量地面积水时,可能出现假异常“低阻闭合环”。并提出在瞬变电磁法探测预报过程中强调重视两点,一是探测环境,二是地质分析与成果图件相结合的解释方法。

关键词: 瞬变电磁法; 超前地质预报; 不良地质体; 地下水

深埋特长隧道的岩溶涌突水问题是隧道施工中的重大难题,如果隧道区岩溶较发育,在其富水地段就会存在严重涌(突)水或突泥、突砂的可能,不但影响施工进度,而且会危及施工人员的生命。因此对含水不良地质体的准确预报一直是隧道超前地质预报工作中的重点和难点。

瞬变电磁法是一种对地下水体较敏感的探测方法,近几年来逐步应用于公路隧道超前地质预报,但人们对其成果图件中不良地质的响应规律还未进行系统总结,各种不良地质的解译方法没有完善统一。由此本文通过瞬变电磁法现场大量成功探测案例和失败案例,探讨其对含水不良地质体的反应规律。

1 瞬变电磁法原理与工作方法

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Methods,简称 TEM)是一种时间域电磁法[1-5],利用阶跃波形电磁脉冲激发,用不接地回线向前方发射一次场,在一次场的激励下在地质体内产生涡流,其大小取决于该地质体的导电能力,导电能力强则感应涡流强。一次场消失后,涡流不能立即消失,有一个过渡过程(衰减过程),该过渡过程又产生一个衰减的二次场向地下传播。用接收线圈接收二次场,该二次场的变化将反映地下介质的电性情况,在接收机中按不同的延迟时间测量二次感应电动势,得到二次场随时间的衰减特性,从而达到探测各种不良地质的目标[5,6]。

隧道内进行瞬变电磁探测属于全空间环境,目前等效导电平面法[7](又称“视纵向电导解释法”)是比较合适的解释方法,视纵向电导对低阻导电薄层反应灵敏,有利于解释低阻充水的不良地质体,本文研究的瞬变电磁视电阻率等值线图都是基于等效导电平面法原理解译获得。

现场探测仪器采用 IGGETEM- 20 瞬变电磁仪,发射线圈采用 3 m×3 m×8 匝,接收探头采用 SB- 250K(P)屏蔽探头。仪器连接后,根据测线布置,每隔一定距离移动一次发射线圈(移动距离一般为 0.5 m,即测点点距为 0.5 m),进行一次探测,获得探测结果数据后,采用 IGGETEM- 20 瞬变电磁仪配套反演软件(TEM 工作站[8])进行分析处理。

2 瞬变电磁法典型探测分析

2.1 含水通道探测

以华蓥山公路隧道 K33+ 394 涌水探测为例。2007 年 7 月 18 日,已建成通车的位于南广邻高速

基金项目: 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助,项目编号 GZ2007- 06
收稿日期: 2010- 04- 06

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

公路上的华蓥山隧道左线 K33+ 394 附近左侧电缆沟槽发生严重涌水, 水流通过电缆沟槽水泥预制盖板板缝渗入车道, 约 5 min 后涌水逐渐加大, 车道出现大量积水。此后, 水量逐渐加大, 并掀翻预制盖板, 大量泥砂和水涌入车道。涌水给行车安全造成了极大的隐患。

2.1.1　地质分析

本次涌水主要与地层岩性、地质构造和当地气候有关。一是涌水段地层为三叠系下统嘉陵江组至志留系下统韩家店组地层, 岩性以灰岩、泥灰岩为主, 且灰岩质较纯, 溶隙、裂隙非常发育, 容易形成较大溶腔。二是隧道涌水段附近穿越了一条较大断层, 断层带内多为碎裂岩、糜棱岩和断层泥, 并且受断层影响, 两侧岩体节理发育, 透水性较好。三是华蓥山地区雨热同季, 降水量较大, 特别是在 2007 年 7 月间华蓥山地区普降大到暴雨, 而且在涌水段上部地形条件特殊, 位于华蓥山脉中段, 地势中部高、东西两侧低, 雨水汇集低洼处形成汇集区。

2.1.2　瞬变电磁法探测

为了进一步查明涌水通道, 采用瞬变电磁法对涌水点(K33+ 394) 附近隧道左、右边墙进行探测。左右边墙测线测点各 27 个, 线圈移动方向及测点点号、点距如图 1 所示。

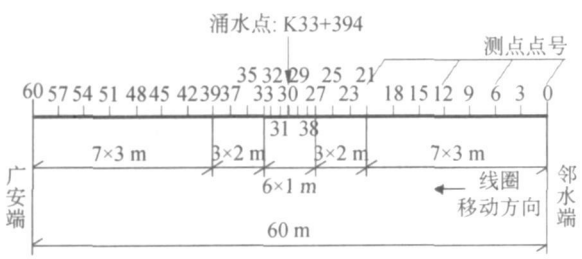

图 1　测线布置

左边墙视电阻率等值线纵深剖面如图 2 所示。从图中可以看出, 出现两处低阻异常区域, 分别位于横向 25~ 60 m、纵向 25~ 40 m 范围内和横向 35~ 53 m、纵向 50~ 55 m 范围内。而且由于探测深度有限, 后者的范围可能更大。可见, 在涌水点 K33+ 394 后方左侧围岩内存在两个规模较大的溶洞, 且溶洞距离左边墙较近(约 20 m) 。

右边墙视电阻率等值线纵深剖面如图 3 所示。从图中可以看出, 出现两处低阻异常区域, 分别位于横向 35~ 55 m、纵向 25~ 45 m 范围内和横向 15~ 30 m、纵向 37~ 45 m 范围内。而且前者在浅部有扩散的趋势, 推测与隧道右边墙更加接近, 甚至贯通。

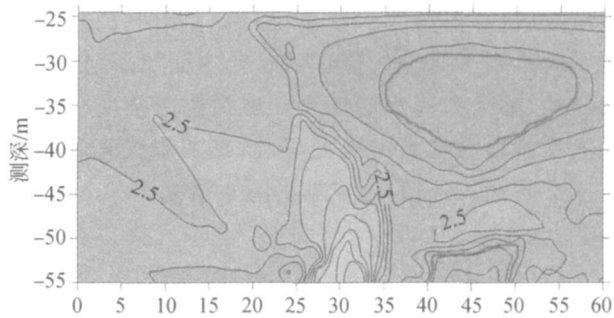

图 2　左边墙视电阻率等值线图

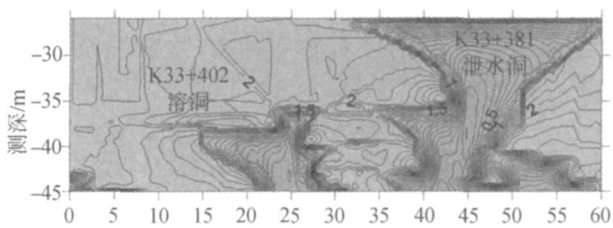

图 3　右边墙视电阻率等值线图

2.1.3　解译

图 4 为华蓥山隧道泄水洞分布平面图, 将其与上述探测结果结合分析。图 4 中在涌水点左边墙后方有一条纵向泄水洞, 但是在左边墙视电阻率等值线纵深剖面图(图 2) 中并没有显示。这是由于此泄水洞距离左边墙约 3 m 左右, 距离较近, 而瞬变电磁法存在浅部探测盲区所致, 没有探测到该泄水洞。

图 4 中在涌水点 K33+ 394 后方右侧约 15 m 处有一横向泄水洞(即桩号为 K33+ 381 附近) , 其与图 3 中横向 35~ 55 m、纵向 25~ 45 m 范围内的低阻异常区域相对应, 说明此低阻异常区就是 K33+ 381 处横向泄水洞。图 3 中横向 15~ 30 m、纵向 37~ 45 m 范围内的低阻异常区域为桩号 K33+ 402 附近的充水溶洞。

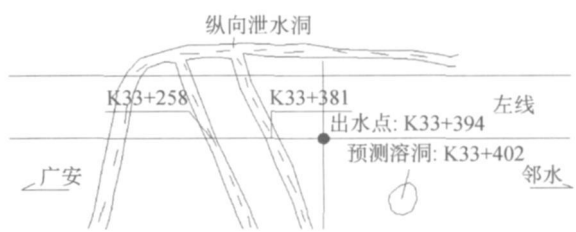

图 4　推测泄水洞分布平面

2.1.4　成因分析

涌水段岩性以灰岩为主, 溶隙、裂隙非常发育, 溶洞通过溶隙、裂隙连通, 并且与隧道连通。2007 年 7 月间华蓥山地区普降大到暴雨, 未发生涌水事故前, 地表排水沟水量剧增且径流时间较长; 发生涌

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

水事故后, 排水沟内水量减小且径流时间变短。这说明大量雨水通过裂隙、溶隙、导水断层, 或通过岩溶洼地、漏斗和落水洞汇聚于隧道附近溶洞。溶洞内蓄水量增大且水压加大, 从而在围岩破碎的地方击穿二衬涌入隧道, 形成本次涌水涌泥。

2 2 含水溶洞探测

以明月山公路隧道 YK6+ 471 突水探测为例。2007 年 12 月 8 日明月山隧道右洞 YK6+ 474 左侧拱腰(已喷射混凝土) 开始出现小股状水。12 月 14 日下午 5 时左右, YK6+ 471 拱顶偏左部位喷射混凝土被水冲穿, 并伴有碎渣等冲出, 水质浑浊, 为泥黄色, 含泥大, 出水压力时大时小, 出水量约 28 800 m^3/ d。随着 YK6+ 471 处出水量变大后, 原 YK6+ 474 右侧拱腰处的股状出水消失。

2 2 1 地质分析

涌水段地层为雷口坡组, 岩层走向与隧道轴线大角度相交, 倾向洞内, 倾角大约在 20° ~ 30° 之间。现场地质调查发现, 在涌水冲出的碎石中存在大量石膏, 表明此洞段雷口坡组岩层内夹有膏岩。由于石膏易受地下水溶蚀, 形成溶腔, 所以富含裂隙水、溶隙(孔) 水甚至溶洞水, 里程 YK6+ 471 很可能是隧道轴线与膏岩岩层面的交汇处。

2 2 2 瞬变电磁法探测

为进一步查明涌水原因, 现场在 YK6+ 447~ YK6+ 465 段开展瞬变电磁法探测。在出水点 YK6+ 471 的拱顶和两侧拱肩各布置一条测线, 共三条测线, 测线布置如图 5 所示。测线探测获得视电阻率图如图 6~ 图 8 所示, 每测点距离约为 1. 5 m。

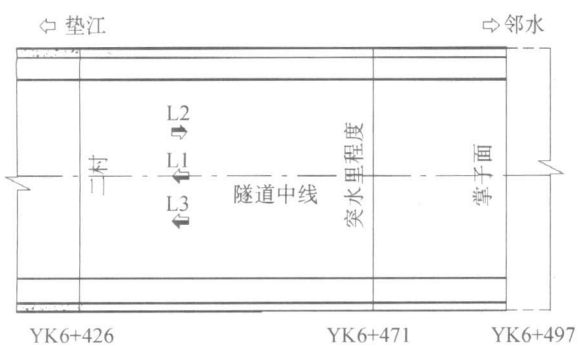

图 5 测线布置

图 6 显示在 YK6+ 456~ YK6+ 465 里程(即测点 5~ 35) 内, 拱顶上方 43 m 以上存在低阻区域, 且从出水点至洞口方向低阻区逐渐变深, 可以将视电阻率等值线近似拟合成一条直线, 用 X 轴表示实际测线长度, Y 轴表示测深, 则该直线与 X 轴的夹角

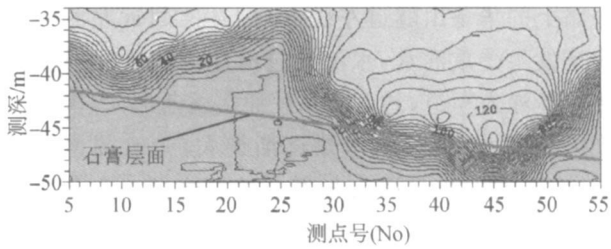

图 6 拱顶测线 L_1 探测视电阻率等直线图

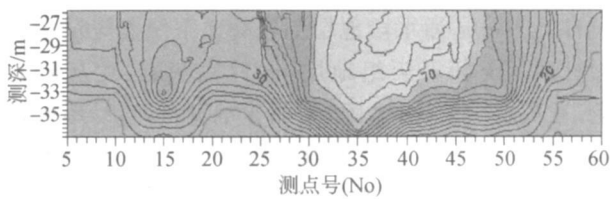

图 7 左拱肩测线 L_2 探测视电阻率等直线图

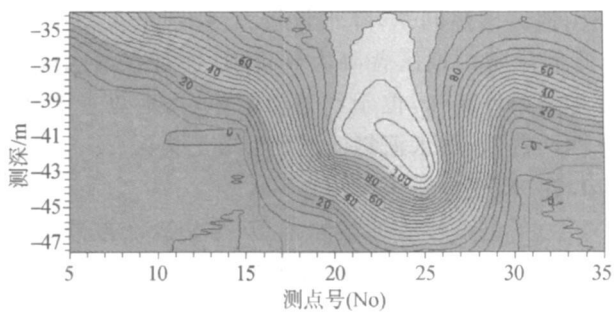

图 8 右拱肩测线 L_3 探测视电阻率等直线图

大约在 15° ~ 25° 之间。

图 7 和图 8 同样可以反映出上述现象。通过上述分析可知, 在探测工作面(拱顶) 上方存在一个低阻异常层状带, 且该层状带与隧道轴线的夹角大约在 15° ~ 25° 之间, 与岩层倾角基本一致。

2 2 3 解译与成因分析

综合地质和瞬变电磁法探测结果分析, 图 6~ 图 8 中的低阻异常层状带即为雷口坡组岩层内所夹的石膏, 该石膏夹层位于 YK6+ 447~ YK6+ 465 段拱顶上方约 40 m 左右, 在地下水强烈的活动下溶蚀, 形成溶腔且充满大量水体。水体顺着围岩破碎、溶隙或溶蚀层面发育的部位运移至隧道上方, 在 YK6+ 471 点处击穿初期支护喷射混凝土, 从而产生本次突水。

2 3 含水裂隙探测

以明月山公路隧道 YK7+ 004 裂隙水探测为例。明月山隧道 YK7+ 004 掌子面地质调查结果为: 岩性以中~ 薄层灰黑色灰岩、泥灰岩为主, 岩体为层状镶嵌结构, 岩层走向与隧道轴线垂直, 岩层倾角较小, 近水平产出, 岩层倾向洞外, 节理、裂隙较发

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

育, 岩体较破碎, 层间结合力一般, 掌子面整体干燥, 围岩整体稳定性一般。

在 YK7+ 004 掌子面开展瞬变电磁法超前探测, 获得掌子面前方视电阻率剖面(图 9) 。图 9 表明, 在掌子面前方 35~ 45 m 范围内视电阻率明显偏低, 在 50~ 55 m, 测线中部的视电阻率较周围也偏低, 存在低阻异常区域。初步判断在该处存在较为丰富的裂隙或溶隙水。

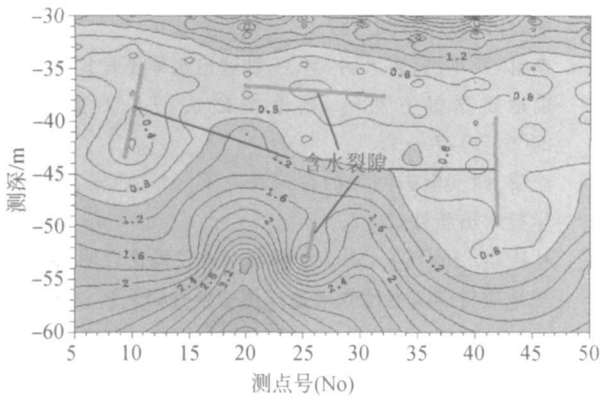

图 **9　YK7+ 004** 掌子面视电阻率等值线图

后经开挖验证, 此洞段岩性以灰岩、泥灰岩为主, 节理裂隙较发育, 围岩稳定性一般~ 较差。YK6 + 972~ YK6+ 970 里程(即测深 32~ 34 m) 段内, 裂隙水较丰富, 呈线状淋水。随着开挖的继续进行, 水量有所减少, 地下水呈渗水~ 滴水状, 与预报结果吻合。

2 4　后方低阻体干扰

以铜锣山公路隧道 K34+ 430 探测为例。掌子面地质调查结果为: 岩性以薄层状灰岩, 泥灰岩为主; 节理裂隙较发育, 裂隙中充填黄色泥沙, 比较光滑, 岩体间层间接合力较差; 掌子面整体潮湿, 地下水呈滴水~ 淋水状; 岩层缓倾, 偶有掉块现象, 整个掌子面岩体呈碎裂结构, 围岩稳定性较差。

在 K34+ 430 掌子面开展瞬变电磁法超前探测, 将所测数据经处理后得到掌子面前方视电阻率剖面(图 10) , 每测点距离为 1. 0 m。图 10 表明, 视电阻率等直线呈闭合环形式, 且视电阻率从中心向周边逐渐递减, 即中心呈现高阻形态, 周边呈现低阻形态。预测结果为: K34+ 460~ K34+ 490 段(即测深 30~ 60 m) 已进入三叠系嘉陵江组地层, 岩性以灰岩, 白云质灰岩, 泥质灰岩, 白云岩为主; 该段不应有大的涌水, 但是有可能存在溶隙及溶隙充泥现象, 可能存在小股裂隙水, 应注意做好防排水工作准备。

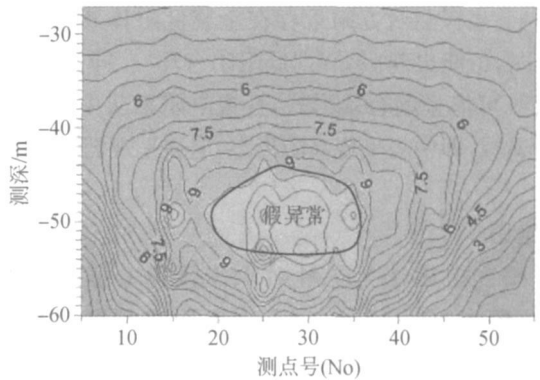

图 **10　K34+ 430** 掌子面探测视电阻率等值线图

但是实际开挖情况并没有溶隙、溶隙充泥现象和小股裂隙水, 与瞬变电磁法探测预报结果不同。

调查分析原因是该掌子面后方存在较强低阻体的影响, 瞬变电磁法探测环境较差。由于 K34+ 430 掌子面后方围岩稳定性较差, 采用进尺较短, 钢拱架紧跟掌子面施作。另外, 掌子面后方地面大量积水, 掌子面湿润。如果将钢拱架和地面积水看作一个整体, 则这个整体就是一个类似于环绕掌子面的“ 低阻闭合环”。视电阻率等值线图中表现出来的信息夹杂着掌子面后方的干扰信息, 且由于掌子面后方低阻体较多, 这些干扰信息占了主导地位, 将大部分有用信息淹没。所以该掌子面视电阻率等值线闭合现象其实表现的是“ 钢拱架和地面积水” 这个“ 低阻闭合环”。

由此可见, 在探测时一定要尽量避免掌子面后方低阻体的干扰, 如果不可避免时, 必须在探测前对探测环境进行详细的调查并记录, 考虑掌子面后方低阻体的影响, 尤其是钢拱架和地面积水的影响, 为分析探测结果提供依据。

3　含水不良地质体探测规律

总结上述大量现场瞬变电磁法对含水不良地质体的探测实例, 得到以下几点探测规律。

(1) 当探测前方存在含水通道(包括管道) 时, 视电阻率等值线会在其含水通道所在区域明显降低, 且呈条带状分布, 条带宽度与管道分布有关。

(2) 当探测前方存在含水溶洞时, 视电阻率等值线会在溶洞所在区域发生弯曲甚至闭合, 且视电阻率值较其他区域明显降低。

(3) 当探测前方内存在多处含水裂隙(溶隙) 时, 视电阻率等值线会在含水裂隙区域发生小范围的闭合, 且视电阻率值降低。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(4) 当探测后方附近存在金属低阻体及大量地面积水时, 可能出现假异常"低阻闭合环"。即: 视电阻率等直线可能呈闭合环形式, 且视电阻率从中心向周边逐渐递减, 即中心呈现高阻形态, 周边呈现低阻形态。

4 结语

瞬变电磁法是一种对水体较为敏感的预报方法, 一般为 30~ 50 m, 属于中短距离预报。通过瞬变电磁法成功与失败探测实例表明, 为获得合理的解译结果, 需重视两点: 一是要探测环境, 避免探测后方低阻体干扰, 如远离台车等金属支护结构, 尽量保证探测后方地面干燥; 二是要重视地质分析, 结合预报图件、地质资料、水文资料以及掌子面地质描述, 开展综合细致的解译工作。

参考文献:

[1] 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.

[2] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.

[3] SPIES B R, PARKE P D. Limitation of large- loop transient electromagnetic surveys in conductive terrains [J]. Geophysics , 1984, 49(7): 902- 912.

[4] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990.

[5] 静恩杰, 李志聃. 瞬变电磁法基本原理[J]. 中国煤田地质, 1995, 7(2): 83- 87.

[6] 李貅, 武军杰, 曹大明, 等. 一种隧道水体不良地质体超前地质预报方法——瞬变电磁法[J]. 工程勘察, 2006, (3): 70- 75.

[7] 李貅. 瞬变电磁测深的理论及应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.

[8] 杜庆丰. IGGETEM- 20 瞬变电磁仪操作说明[R]. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 2005.

Regularity of Transient Electromagnetic Methods for Detecting Hydrous Unfavorable Geological Body in Tunnel

MENG Lu-bo[1], *LI Tian-bin*[1], *DUAN Zheng*[2], *ZHAO Jin-qian*[3], *XUE Wei*[4]

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. China Railway SanYuan Survery and Design Group, LTD, Tianjin 300142, China; 3. China Railway SiYuan Survery and Design Group, LTD, Wuhan 430063, China; 4. China kunming Hydr. Engineering Corporation, Kunming 650000, China)

Abstract: Transient Electromagnetic Method is a good method of detecting underground water. For finding detection regularity of unfavorable geological body containing underground water in tunnel, the paper generalizes the transient electromagnetic response regularity of run-off pipe with water, solution cavity containing underground water, fracture with underground water, and response characters of low electric resistance body disturb transient electromagnetic field by field typical cases. The results indicate that apparent resistivity contour plays down obviously with ribbon and contact with pipe distributing, when run-off pipe containing water appears in front of detection workface; apparent resistivity contour can play down obviously and format flexual or closed curve when hydrous cavity appears in front of detection workface; apparent resistivity contour can play down slowly and format smally closed curve when hydrous cracks appear in front of detection workface; apparent resistivity contour chart will display fake abnormal phenomenon that is the closed loop of low electric resistance, when lots of metal support and abundant surface water appear in back of workface. It accentuate two points about transient electromagnetic method detecting, one is environment of detecting, and the other is interpretation method of combine geology with charts.

Key words: Transient Electromagnetic Methods; advanced geological prediction; unfavorable geological body; ground water

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net