

# 物探方法在圆梁山隧道超前地质预报中的应用

王 光 权

(铁道第二勘察设计院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 圆梁山隧道穿越由碳酸盐岩构成且地质情况十分复杂的毛坝向斜。应用物探方法, 进行了超前地质预报的研究。结果表明: 在灰岩地区深埋长大隧道做物探超前地质预报, 最好先开展可控源音频大地电磁法勘探, 查明各种构造、岩溶发育区、油气囊等的位置、形状、规模和埋深, 对地质情况有一个半定量认识, 然后在开挖的掌子面附近开展负视速度地震反射波法, 精确预报掌子面前方的不良地质。

**关键词:** 圆梁山隧道; 可控源音频大地电磁法; 负视速度地震反射波法; 地质超前预报

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2005)04-0369-05

圆梁山深埋特长隧道是重庆至怀化铁路的关键性控制工程, 隧道总长 11.068 km, 最大埋深约 780 m, 隧道穿越的主要地质构造为毛坝向斜。开挖发现, 在毛坝向斜核部和东翼的隧道穿越地带, 发育大型深埋充填溶洞(具宽大构造-溶蚀裂隙特征), 在向斜轴部有一挤压破碎带。隧道开挖通过上述两段(特别是大型深埋充填溶洞)时发生了大规模的突泥、涌水等地质灾害, 致使施工严重受阻。为了确保施工安全顺利地通过该段, 我院在圆梁山隧道毛坝向斜段开展了综合物探超前地质预报应用研究, 取得了较好的效果, 为隧道顺利贯通提供了有力保障。

本预报的应用研究分为两部分:

(1) 在圆梁山隧道毛坝向斜轴部 DK354+000~DK355+400(DK 表示隧道正洞里程)段的地表采用可控源音频大地电磁法(CSAMT), 查明断层的产状、破碎带宽度、岩溶洞穴或油气囊的规模及埋深。

(2) 在隧道内采用负视速度地震反射波法预报掌子面前方的不良地质。

## 1 CSAMT 在超前地质预报中的应用

众所周知, 电磁场也是一种物质, 它在空间的分布和传播遵循麦克斯韦方程组。麦克斯韦方程组实质上是反映了电荷、电流、电场、磁场随时间和空间变化规律的定律, 它综合了电磁现象的一切相互作用。电磁波进入介质中要产生传导、极化、磁化现象, 而这些现象反过来又要改变原来电磁场的状态, 这就是电磁波和介质的相互作用。

经过复杂推导过程, 最终得到 CSAMT 常用的

视电阻率公式<sup>[1]</sup>

$$\rho_s = 0.2T \left( \frac{E_x}{H_y} \right)^2 = \frac{0.2}{f} \left( \frac{E_x}{H_y} \right)^2,$$

式中  $E$  为电场强度,  $H$  为磁场强度,  $T$  为时间,  $f$  为频率。

下面讨论 CSAMT 应用中的几个重要问题。

### 1.1 发射点、接收点和收发距的确定原则

根据电磁波的传播理论, CSAMT 的发射点和接收测线应满足图 1 所示的关系, 且同时应考虑供电电极的接地条件和测线与岩层产状的关系。实践证明: 一般来说, 应通过改变供电电极的位置和改善供电条件使接地电阻小于  $10 \Omega \cdot m$ , 测线布置应与岩层走向小角度相交。

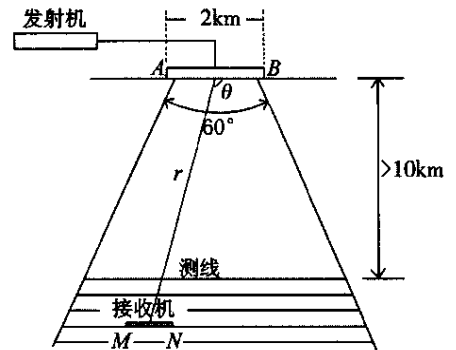


图 1 CSAMT 工作示意

### 1.2 发射点、测网和采集参数的确定

CSAMT 法因采用人工场源, 所以在采集数据时, 既存在因收发距  $r$  太小, 使观测区过早进入近区(或  $s$  区)的问题; 又存在因  $r$  太大, 使信噪比太低,

难于保证观测精度的问题。根据理论推导及结合野外工作实践经验,认为  $r$  应满足以下 2 个条件

- ①  $r \geq (3 \sim 6)h$ ;
- ②  $r_{max} = (I \times AB \times \rho_1 \times \sin(\theta/\pi) \times E_{min})^{1/3}$ 。

式中: $h$  为勘探深度, $I$  为发射电流, $AB$  为供电偶极长度, $\theta$  为  $r$  与  $AB$  之间的夹角, $E_{min}$  为接收机能观测到的最小信号(一般取  $7 \mu V$ )。

发射偶极  $AB$  及接收偶极  $MN$  的大小,主要考虑要满足偶极子的条件,即  $AB$  与  $MN$  相对于  $r$  要足够小。通常我们取  $AB \leq (1/3 \sim 1/5)r$ ,  $MN \leq (1/10)r$  即可。

发射点、接收点和收发距的确定对取得有效资料会起到关键作用,因此在工点资料采集前,应根据探测目的、测区情况和上述发射点、接收点和收发距的确定原则,在 1 : 50 000 或 1 : 10 000 的军用地图上确定发射点和测网,然后通过大量的试验确定最佳发射点、测网和采集参数。

根据上述原则和工区的实际情况及试验结果,确定了发射点、测网和采集参数。本次工作使用加拿大凤凰公司生产的多功能大地电磁仪(V5),采用标量法采集,工作频率范围为 8 192~0.667 Hz;测

线沿隧道中线方向布置,点距 20 m;发射点选在距测区 13~14 km 的黑水坝,供电极距 2 km。

### 1.3 资料处理和分析

资料处理流程见图 2。

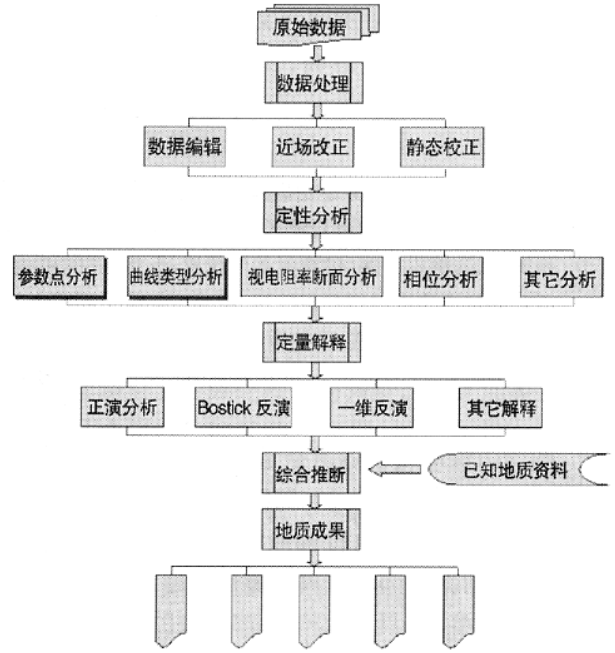


图 2 CSAMT 资料处理流程

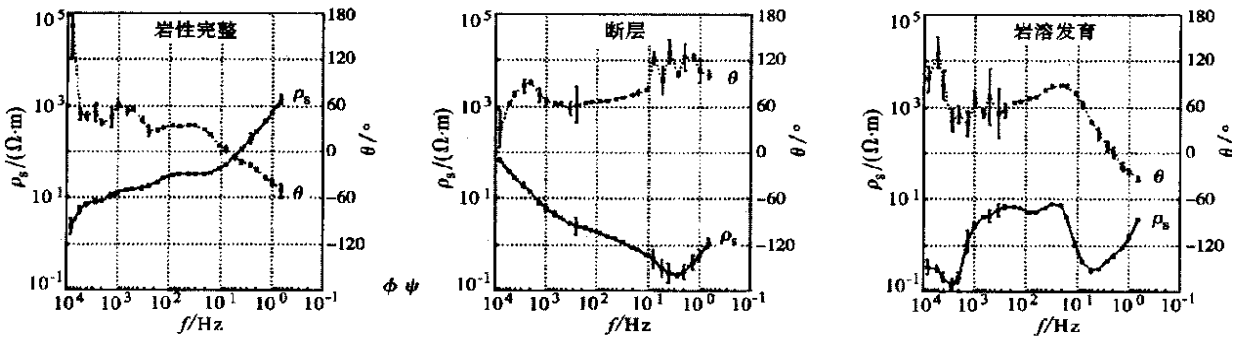


图 3 CSAMT 典型单点视电阻率和相位曲线

资料分析着重从单点曲线、视电阻率断面图和反演拟合 3 个方面的资料,结合地质资料进行综合分析。

(1)从单点视电阻率曲线上看,整个工区内难以找出代表完整地层的典型曲线。通过对整个工区单点曲线的分析,可将曲线划分为三类,即岩性完整、断层和岩溶发育区(图 3)。其中,从高频到低频,岩性较完整的单点曲线前端形状较平缓;断层内的单点曲线视电阻率较低,曲线呈下降趋势;岩溶发育区的单点曲线呈零乱、锯齿状。

(2)分析视电阻率断面图,测区内视电阻率值普遍偏低( $0.1 \sim 800 \Omega \cdot m$ ),为富水地区的电性反应。断层破碎带和岩溶洞穴的特征见图 4。

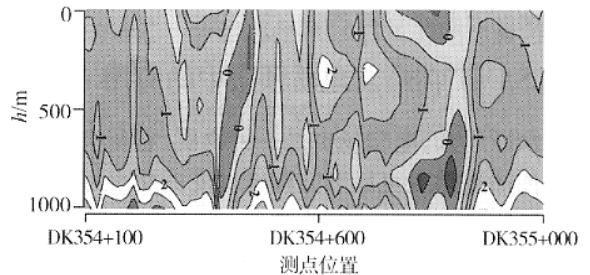
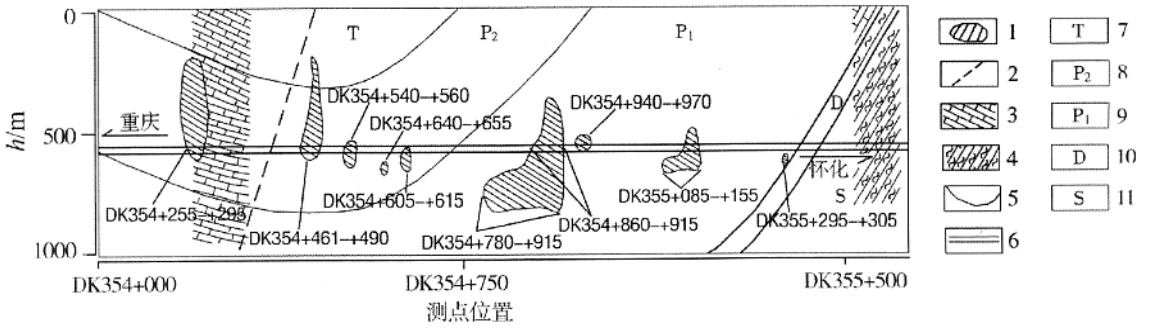


图 4 CSAMT 视电阻率断面

(3)在上述分析的基础上对资料进行解释,得到最终解释成果(图 5)。

### 1.4 CSAMT 资料的精度

CSAMT 法属于一种解决中深部地质问题的物探方法,因此它仅能对异常进行半定量解释,其资料



1—岩溶发育区;2—断裂;3—灰岩;4—泥岩;5—地层分界线;6—隧道;7—三叠系地层;8—上二叠统地层;9—下二叠统地层;10—泥盆系地层;11—志留系地层

图 5 圆梁山隧道毛坝向斜中线 CSAMT 成果

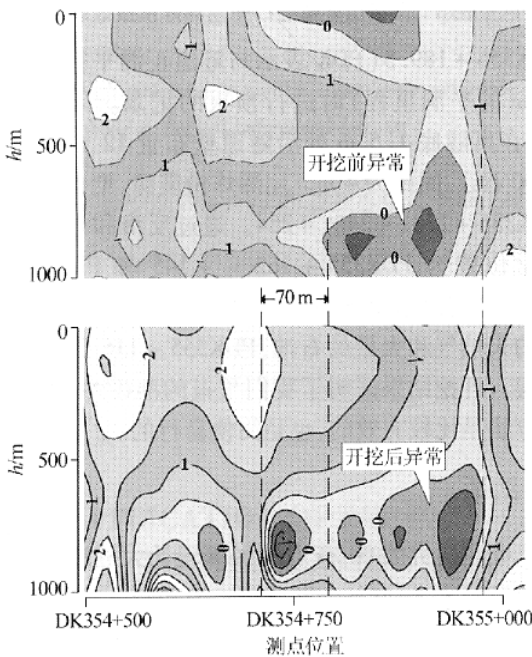


图 6 DK354+879 岩溶开挖前后  $\rho_s$  断面对比

的定量解释有一定误差。实践证明,该方法对查明各种构造、岩溶发育、油气囊是行之有效的,它应是灰岩地区深埋长大隧道物探超前地质预报的一种有效方法。

图 6 是 DK354+879 溶洞开挖前(上图)后(下图)的视电阻率断面,从图上看,开挖后异常位置 DK354+710~+915 明显比开挖前异常位置 DK354+780~+915 向小号里程方向延伸 70m,分析其原因,认为是由于该岩溶洞穴被揭露后隧道内被大量突泥、突水填充使异常范围扩大所致。这个对比可以说明 CSAMT 法对岩溶洞穴规模的划分达到了半定量解释的精度。

## 2 负视速度地震发射波法的应用

地震反射法超前地质预报利用了“负视速度原

理”,并充分利用了现代地震勘探“VSP”先进技术及其计算机处理技术。这种预报方法具有明显的方向特性,可以有效地区分开挖面前方的反射信息与周围干扰,提高识别断层和不良地质界面的可靠性,预报探测时不占用开挖工作面,对施工干扰很小。

### 2.1 方法原理及波场特征

沿隧道轴向布置 1 条纵测线 L1,并与反射界面 R 正交于 A 点(图 7),震源布置在远离反射界面的

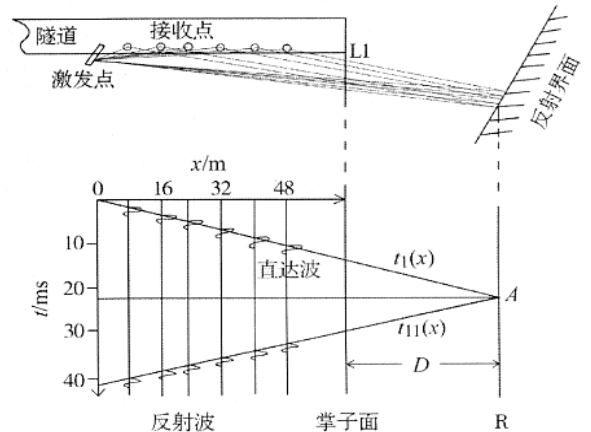


图 7 负视速度地震反射波法工作原理

一端,之间布置若干个检波器接收。设激发点的里程为  $X_p$ ,接收点里程为  $X_g$ ,反射界面与隧道轴线交点的里程为  $H_j$ ( $H_j =$ 掌子面里程 $+D$ ),隧道轴线垂面与反射界面夹角为  $\varphi$ ,反射面前地层的平均速度为  $v$ ,则反射波时距曲线方程为双曲线方程

$$t = \{ [2H_j \cos\varphi \cos\varphi - 2X_p \cos\varphi \cos(\varphi - 1) - X_g]^2 + [2H_j \cos\varphi \sin\varphi - 2X_p \cos\varphi \sin(\varphi + 1) + X_p]^2 \}^{1/2} / v ;$$

当  $\varphi = 0^\circ$  时,为下降直线方程(反射波)

$$t = (2H_j - X_g - X_p) / v ,$$

当  $\varphi = 90^\circ$  时,为上升直线方程(直达波)

$$t = (X_g - X_p) / v .$$

由于反射路径与入射路径相反,而入射波的时

距曲线  $t_1(x)$  具有正视速度的特征,所以反射波的时距曲线  $t_{11}(x)$  具有负视速度的特征。将正、负视速度的时距曲线顺势外延,其交点就是预报的反射界面的横座标。

### 2.2 现场测试方法

本次工作使用美国生产的 R24 型地震仪。观测系统沿开挖工作面后面隧道侧壁或底部布置,为获取“负视速度”,震源应设在预报物的远端。接收点距采用小道间距(一般为 2~5 m),12 道或 24 道接收。根据需要与设备条件,测点可采用单分量、三分量或组合检波器。测试方式可选择多道共炮式或多炮共道式,前者有利于保证激发条件的一致性,后者则有利于记录条件的一致性。

### 2.3 资料处理与解释

资料处理主要包括编辑、平衡、叠加、频谱分析与带通滤波、波场分离等项目,利用上行波能量较弱和下行波能量较强的特征,最主要的是两者视速度的不同,采用速度滤波、 $\tau$ -P 变换、中值滤波及奇异值分解,均能实现波场分离。速度滤波、 $\tau$ -P 变换可在频率域中实现,但道数较少时,可能引起的假频较严重。中值滤波及奇异值分解是在时间域中进行的,不会引起假频。但当上行波和下行波视速度差异不大时,所有分离技术都可能失败,故主要选用了速度滤波和中值滤波。对于岩性预测,在条件有利时,根据恢复的地震波振幅的变化,有可能估计出地层的岩性以及岩石孔隙中的流体成分。

在测线与反射界面正交的情况下,由于入射路径与反射路径相反,将有限的正、负视速度时距直线外延,则交点横座标就是预报的反射界面位置。

若测线不与反射界面正交时,理论证明反射波时距曲线为双曲线,其极小点将随界面视倾角的增大而不断往界面上倾方向偏移,使极小点的左半支相对震源而言,仍具有负向时距曲线特征。根据镜像原理以及构制发射界面的时间场原理,直达波  $t_1(x)$  与反射波  $t_{11}(x)$  的走时在界面 A 点应满足  $t_1(x_A) = t_{11}(x_A)$ 。因此,利用开挖工作面附近实测的直达波与反射波时距曲线段,按照各自的曲线规律或趋势,依势顺延,并使之相交,则交点的横坐标为预报的反射界面的位置。反射界面与隧道中线的夹角可利用三角关系计算出。

### 2.4 应用实例

图 8 是在圆梁山隧道出口端平道开挖至

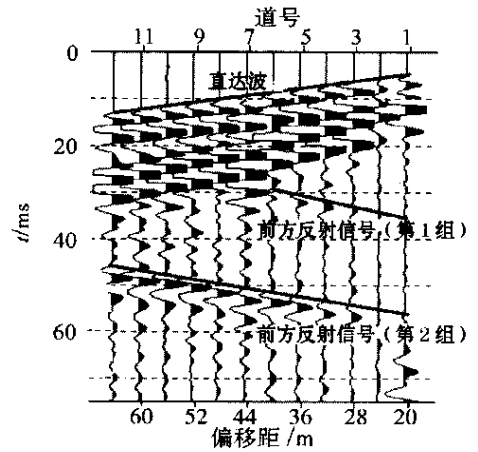


图 8 圆梁山隧道出口开挖部分预报记录

PDK355+189.5(PDK 表示与隧道正洞平行且相距 25 m 的平洞里程)时进行预报的记录。采集方法是:在离隧底 1.5 m 处沿隧道壁布置 12 个检波器(100 Hz),间距为 4 m。用爆炸做震源,炮点位置为 PDK355+238、+246、+254。通过反演和计算得出异常位置为 PDK355+162~+145 和 PDK355+115。开挖揭示出 PDK355+161.2~+144 有高浓度的天然气和大量的石油,PDK355+116 为一泥岩夹层。开挖结果证明了我们预报的准确性,也说明该方法是比较有效的,也是简便易行的。

### 3 结语

应用研究发现:灰岩地区深埋长大隧道物探超前地质预报,最好首先开展可控源音频大地电磁法,勘探查明各种构造、岩溶发育区、油气囊等的位置、形状、规模和埋深,对隧道通过位置的地质情况有一个半定量认识,然后在隧道开挖的掌子面附近开展负视速度地震反射波法精确预报掌子面前方的不良地质,为隧道安全、顺利开挖提供有力保障。随着判释准确率提高,该综合物探预报方法的发展空间和应用前景将更为广阔。

### 参考文献:

[1] 石昆法. 可控源音频大地电磁理论与应用[M]. 北京:科学出版社,1999.  
 [2] Sandberg S K, Hohmann G W. Controlled-source audio magnetotellurics in geothermal exploration[J]. Geophysics, 1982, 47(1):100-116.

## THE APPLICATION OF GEOPHYSICAL EXPLORATION METHOD TO THE GEOLOGICAL BEFOREHAND FORECAST OF MAOBA SYNCLINE IN YUANLIANGSHAN TUNNEL

WANG Guang-quan

(No. 2 Railway Survey & Design Institute, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Yuanliangshan tunnel is a key engineering site in Chongqing to Huaihua Railway. The tunnel passes through the Mao-ba syncline formed by carbonate rocks with very complex geological setting. The author conducted the applied research of more than one geophysical exploration methods in the tunnel and reached some conclusions. In geological beforehand forecast in the relatively deeply buried and long tunnel of carbonate rocks, we should first carry out controllable audio-frequency terrestrial electromagnetic exploration to find out positions, shapes, sizes and burial depths of various structures, karst areas and oil-gas reservoirs so as to get semi-quantitative understanding of the geological background. On such a basis, the negative visual velocity seismic reflection method should be used near the mined face so as to exactly detect unfavorable geological conditions in front of the face.

**Key words:** Yuanliangshan tunnel; controllable audio-frequency terrestrial electromagnetic method; negative visual velocity seismic reflection method; geological beforehand forecast

作者简介:王光权(1966—),男,重庆忠县人,高级工程师,成都理工大学在读博士研究生。主要从事工程物探、检测工作。

上接 368 页

## THE APPLICATION OF BOREHOLE ACOUSTIC TELEVIEWER LOGGING RESULTS TO THE CLASSIFICATION OF ROCK WEATHERING DEGREES

KONG Guang-sheng

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The borehole ultrasonic imaging method can precisely reflect the smoothness of the borehole wall, and then judge the weathering degree of the rock and determine thickness of the weathering bed. This paper describes traveltime and amplitude image characteristics of borehole ultrasonic imaging, and gives an application example in Hong Kong area.

**Key words:** borehole ultrasonic imaging; weathering of rocks; sonic wave traveltime; amplitude of sonic wave

作者简介:孔广胜(1965—),男,1987年毕业于长春地质学院应用地球物理系,1995年获中国地质大学(北京)应用地球物理专业硕士学位。在地质矿产部物化探所地下物探室长期从事物探工作。