

可控源音频大地电磁勘探在大瑞铁路 高黎贡山隧道地质选线中的应用

李 坚, 邓宏科, 张家德, 吴正刚, 常兴旺

(中国中铁二院工程集团有限责任公司地勘岩土公司, 成都 610031)

摘要: 根据 CSAMT 资料的电阻率值、电阻率梯度及异常相态, 把异常分为 V 类、IV 类和 III 类, 它们分别对应极破碎岩体 (V 级围岩)、破碎岩体 (IV 级围岩) 和较破碎岩体 (III 级围岩), 最后, 依据 CSAMT 资料所解译的异常段落和硬质岩段落分布长度, 对所作隧道的 4 个主要线路方案进行比选, 认为 C12K 线路方案为最佳工程方案。

关键词: CSAMT; 异常分类; 围岩分级; 地质选线

中图分类号: P631.3*25

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)02-0072-05

1 前言

在建大瑞铁路自云南省大理市至中缅边境的瑞丽市, 是我国唯一通向印度洋的铁路出海战略大通道, 沿线山高谷深, 活动断裂规模大, 岩浆侵入活动极为频繁, 导致内动力地质作用形成高地热与高温热泉, 热泉或沸泉温度在 40~102℃, 被认为是目前国内艰险山区地形地质条件最为复杂的一条线路, 工程地质条件具有高地热、高地应力、高地震烈度以及活跃的新构造运动、地热水环境、外动力地质条件、岸坡浅表改造过程的特征, 大瑞铁路高黎贡山隧道通过的地段正是最为典型的地段^[1]。

鉴于高黎贡山隧道复杂的地质条件, 进行了大范围的地质选线研究。在诸多的不良地质问题中, 高地热是制约隧道线路方案成立的最为关键问题, 所以, 探测与高地热密切相关的隐伏深大断裂是本次物探工作的重点。为此, 在高黎贡山隧道的物探工作中, 采用可控源音频大地电磁 (以下简称 CSAMT) 法, 先后重点对 CK、C1K、C4K 和 C12K 四个长隧道线路方案, 即分别对应于 39.6km、21km、17km 和 34.6km 长的隧道方案进行勘探, 实际共作 CSAMT 测线长度约 200km, 目的是探测地层岩性、地质构造, 特别是确定隧道洞身高程范围内与高地热密切相关的隐伏深大断裂位置、破碎带宽度及隧道围岩的完整程度, 为隧道的方案评价和比

选提供基础资料。

2 研究区概况及测线布设

2.1 地层岩性

高黎贡山越岭段地层繁多, 岩性复杂, 除白垩系缺失外, 自寒武系至第四系均有出露, 既包括不同时代的碎屑岩、碳酸盐岩、变质岩, 也包括不同时期的岩浆岩, 以下古生界变质岩分布最广。

2.2 地质构造

高黎贡山越岭段地处青、藏、滇、缅巨型“歹”字型构造西支中段弧形构造带与经向构造带之“蜂腰部”南段, 主要受印度板块向北 (偏东) 的强烈推挤和青藏高原向南南东的强力楔入的迭加作用, 活动断裂及深大断裂发育。工区内断裂以怒江断裂带、泸水—瑞丽断裂带、NE 向断裂及 NW 向断裂为主。其中, NE 向断裂带 (F3) 以黄草坝断裂带为代表, 是北东向龙陵—瑞丽断裂的北东段, 大致沿镇安—黄草坝—龙陵发育。燕山期后, 由于区内构造活动方向以南北方向为主, 故黄草坝断裂活动性很弱, 两侧又为较老的混合花岗岩与花岗岩体, 导热、导水性差, 造成水热活动性弱, 成为阻水隔热的边界断裂, 控制了高黎贡山南北两侧地下水补给、径流、排泄条件^[1]。黄草坝断裂距 CK 方案 1.8~2.8km, 距 C12K 方案 0.5~3km, 因其对地下热水的控制作用而成为对线路方案影响最大的断裂带, 所以查明黄草坝断裂带的位置及破碎带宽度也是本次物探工作的主要目的之一。

2.3 地球物理特征

在 CSAMT 探测中, 主要根据电阻率值的大小和其在地下的展布形态来划分地下地质体及其空间分布。

收稿日期: 2008-01-11; 修订日期: 2008-10-21

作者简介: 李坚 (1960-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事工程物探的生产技术和管理工作。

E-mail: lijian05qi@yahoo.com

根据工区地球物理反演结果并结合地质资料统计分析,得出各地层岩性、地质体所对应的电阻率值。统计结果表明,各地层之间,特别是较完整岩体与断层或破碎岩体之间、软质岩体与硬质岩体之间、较干燥岩体与富水岩体之间存在较大的电阻率差异,因此工区具备开展 CSAMT 法的地球物理前提条件。

2.4 测线布设

在高黎贡山隧道的物探中,累计布置 CSAMT 测线长度约 200km,测点点距均为 20m。其中,在 CK、C1K、C4K 和 C12K 四个线路方案的中线位置拉通布置一条 CSAMT 测线;为追踪不同方向断裂构造的走向及破碎带宽度,特别是追踪黄草坝断裂,加布 4 条辅助测线(在线路左右 1 300 ~ 1 400m 位置平行线路方向的测线)和 9 条横测线(穿过线路并垂直线路方向),长度分别为 3 000 ~ 7 900m 不等。

在 CSAMT 勘探工作中,使用加拿大凤凰公司生产的 V6A 和 V8 型仪器采集数据,采用赤道偶极装置、标量观测方式,供电电极距 $AB = 2\ 000\text{m}$,接收电偶极 MN 与测线方向一致, $MN = 20\text{m}$,磁探头方向与 MN 垂直。

3 测量成果分析

3.1 数据处理

使用 MTSOFT 2D 软件对所采集的 CSAMT 数据进行处理,该软件由成都理工大学新近开发,它是集数据去噪、平滑、静态校正、二维多方法多模式反演解释、二维有限元屏幕建模正演为一体的大地电磁数据处理平台,接口友好,反演信息丰富,计算精度较高。

由于山区(隧道)近地表电性结构的横向不均匀性较强,在 CSAMT 的野外数据采集过程中会产生静态效应。目前,减小静态效应比较有效的方法是对不同测点数据采用汉宁窗空间滤波器进行滤波,消除近地表电性结构的横向不均匀性。MTSOFT 2D 软件在降低静态效应和二维反演等方面有其独到之处,能最大限度地消除由静态效应引起的大地电磁深测曲线位移现象,提高资料的可信度。

在数据处理中,首先对数据进行剔非值、去噪、静态校正及近场校正等处理,然后进行一维和二维反演成像处理。对 CSAMT 数据进行处理后,得到了各测线的电阻率断面图,作为资料分析和解释的基本图件。

3.2 数据解译原则

主要根据电阻率断面图中的电阻率值大小、电阻率值变化大小(梯度)和低阻异常形态等特征,结合地质调查、测绘及钻探资料,确定数据解译原则如下:

(1)等值线梯度变化最大位置判释为岩层界线。

(2)条带状或串珠状低阻异常判释为断层破碎带。

(3)分别把“∩”字形和“U”字形低阻异常判释为背斜和向斜构造。

(4)对于高阻(低阻)岩体,结合异常形态,把电阻率值小于 $150\Omega\cdot\text{m}$ ($10\Omega\cdot\text{m}$) 的区域划分为物探 V 类异常,对应极破碎、极软弱或富水岩体或岩溶强烈发育区;把电阻率值为 $150 \sim 630\Omega\cdot\text{m}$ ($10 \sim 40\Omega\cdot\text{m}$) 的区域划分为物探 IV 类异常,对应破碎、软弱或含水岩体或岩溶中等发育区;把电阻率值为 $630 \sim 1\ 600\Omega\cdot\text{m}$ ($40 \sim 200\Omega\cdot\text{m}$) 的区域划分为物探 III 类异常,对应较破碎或较软弱岩体;把电阻率值大于 $1\ 600\Omega\cdot\text{m}$ ($200\Omega\cdot\text{m}$) 的区域划分为物探 II 类区域,对应较完整岩体。

(5)参照铁路隧道围岩分级标准^[2],宏观地对隧道围岩级别进行划分,把物探数据所判释的断层和 V 类异常区域划分为 V 级围岩;把 IV 类异常区域划分为 IV 级围岩;把 III 类异常区域划分为 III 级围岩;把 II 类区域划分为 II 级围岩。

3.3 解译成果及分析

CSAMT 法属于电磁类物探方法,在不同地层之间或同一地层中不同的赋存结构之间,电阻率存在一定的差异,按电阻率值的高低及分布形态可判释地层界线、地质构造及不良地质体并进行隧道围岩分级。

3.3.1 地层界线

对地层界线的认识是进行数据分析解释的基础,其界线划分的主要依据是电阻率断面图。地层界线一般对应电阻率断面图中等值线梯度变化最大处位置。

图 1 为 CK 方案一段的电阻率断面图。图的左半部分(小里程段)电阻率明显低于右半部分(大里程段),在中间位置等值线梯度变化较大,表明该处存在一个地层岩性界线。根据地质数据,中间位置对应了寒武系绢云板岩、千枚岩夹变质砂岩(左侧)和二迭系片麻岩、变粒岩、片岩、板岩(右侧)的界线。

3.3.2 地质构造

(1)断层

断层所对应的特征是电阻率断面图中呈条带状或串珠状低阻异常,一般,其低阻异常的宽度和倾向,对应了断层破碎带的宽度和倾向,等值线梯度变化最大处对应了破碎带的边界。图 2 所示的 3 个近于直立的条带状低阻异常,电阻率值极低,低阻异常特征非常明显,它们分别对应了 3 条断层破碎带。图 3 从上至下向小里程方向(图左侧)延伸的串珠状低阻异常,则以另一种形态对应了一处断层破碎带,物探和地质资料

均显示该断层倾向小里程(左侧)方向。

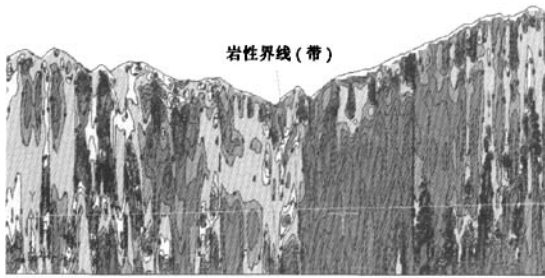


图1 存在地层界线的电阻率断面图
 Fig.1 Section plane of apparent resistivity corresponding to stratum boundary

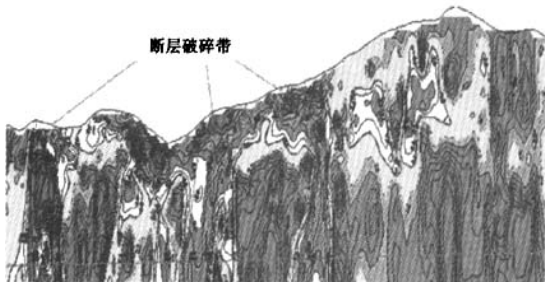


图2 存在断层的电阻率断面图
 Fig.2 Section plane of apparent resistivity corresponding to fault

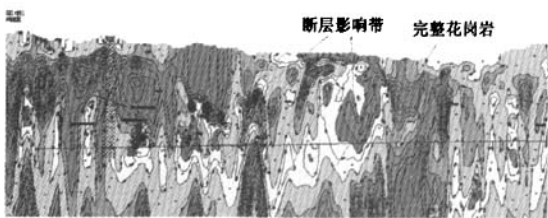


图3 存在断层的电阻率断面图
 Fig.3 Section plane of apparent resistivity corresponding to fault

(2) 褶皱(背斜和向斜)

在电阻率断面图中,背斜一般对应“∩”字形低阻异常特征,向斜则一般对应“U”字形低阻异常特征。图4所示的“∩”字形低阻和“U”字形低阻异常分别对应了一系列典型的背斜和向斜构造。

3.3.3 不良地质

本文所述的不良地质体定义为岩溶发育、破碎、软弱或含水岩体。在电阻率断面图中,不良地质体显示为团块、闭合圈或片区低阻异常等特征。图5中所示的隧道洞身高程附近的团块低阻,电阻率为150~

630Ω·m,判释为物探Ⅳ类异常,对应破碎(软弱)或含水岩体或岩溶中等发育区;洞身高程以下局部低阻,电阻率小于150Ω·m,判释为物探Ⅴ类异常,对应极破碎(极软弱)或富水岩体或岩溶强烈发育区。

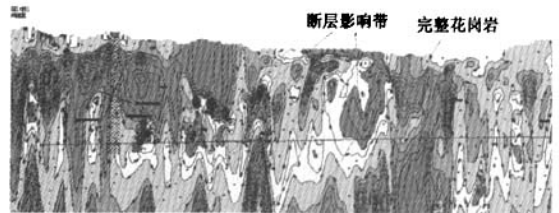


图4 存在背斜和向斜构造的电阻率断面图
 Fig.4 Section plane of apparent resistivity corresponding to anticline and syncline

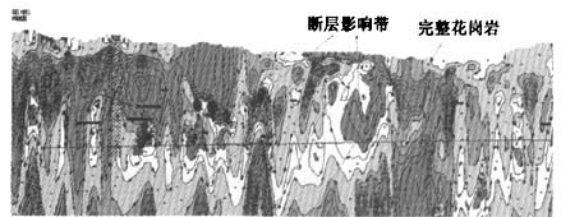


图5 存在不良地质体的电阻率断面图
 Fig.5 Section plane of apparent resistivity corresponding to unfavorable geological condition

3.3.4 围岩分级

隧道围岩级别的高低直接与隧道的造价相关,是控制工程投资的重要因素。一般围岩级别越高,隧道造价越高。在实际工作中,目前主要依据地质测绘和钻探手段进行围岩分级。地质测绘主要依靠分析地表资料并推至地下隧道洞身高程,当地质条件复杂时,下推数据的可靠性差,钻探虽然直观可靠,但因孔间距大,其数据的代表性差。因此,在地质条件复杂的情况下,隧道围岩分级与实际施工开挖结果出入较大。由于围岩分级直接控制隧道的工程投资,它也是隧道方案评价和比选的重要依据,所以现在迫切需要研究一种比较准确实用的围岩分级方法。

岩体的坚硬程度、完整程度、地下水、地应力及地震纵波速度等是划分铁路隧道围岩级别的主要依据。一方面,岩体软弱、破碎、富水,其电阻率低,围岩级别高,反之,则围岩级别低。另一方面,岩体导电矿物的

含量直接影响其电阻率,而导电矿物的含量一般却与岩体的围岩级别没有直接的关系。例如,两种不同的岩体在坚硬程度、完整程度、地下水、地应力及地震纵波速度相同的条件下,电阻率亦可能不同,如含铁量大的岩体比含铁量小的电阻率低,即两种岩体的围岩级别虽然相同,但电阻率却不同。因此,岩体的电阻率与围岩级别的关系比较复杂,它们之间虽然存在一些联系,但其直接的相关关系目前还处于研究和探索中。

近年来,我们在积极探索依据电阻率资料划分围岩级别方面积累了一些经验。在此,我们试图总结过去在其它铁路线统计的电阻率值与围岩级别的对应经验关系,结合高黎贡山隧道的实际情况,根据电阻率值的大小并结合低阻异常的形态,在直接利用 CSAMT 数据划分隧道围岩级别方面作一些尝试。

根据本工区 CSAMT 资料统计和过去工作经验的总结,宏观上大致有以下对应关系:由 CSAMT 数据所判释的断层和物探 V 类异常区域对应 V 级围岩;物探 IV 类异常区域对应 IV 级围岩;物探 III 类异常区域对应 III 级围岩;物探 II 类区域对应 II 级围岩。

4 线路方案评价

在高黎贡山隧道的物探中,针对 CK、C1K、C4K 和 C12K 方案的隧道地段进行了贯通性工作,因此,以下根据物探解译结果,对上述 4 个线路方案的隧道进行工程地质条件比较,比较的主要依据为物探资料所解译的不良地质和硬质岩段落分布长度或范围。

4.1 不良地质

4 个方案隧道洞身穿越断层破碎带、物探 V 类和物探 IV 类的异常长度统计结果见表 1。

表 1 各线路方案物探解译结果统计对比

Table 1 Compared results of CSAMT data contrasting for four tunnels(route) in the lines

线路方案	断层破碎带		V 类异常		IV 类异常		累计
	断层数(条)/总长(m)	百分比 (%)	总长(m)	百分比 (%)	总长(m)	百分比 (%)	总长(m)/百分比 (%)
CK	29/4832	12.2	1585	4.0	7936	20.0	14353/36.2
C1K	21/5297	15.3	3586	10.3	8431	24.3	17314/49.9
C4K	19/5616	15.4	4266	11.7	10248	28.1	20130/55.2
C12K	17/2844	8.2	1068	3.1	9256	26.7	12517/36.2

电阻率值的分布特征反映了地下岩性及构造的赋存情况,一般电阻率值变化不大,即电阻率断面图中异常、特别是低阻异常分布较少,说明断层等不良地质不发育;反之,则发育。比较 4 个方案的电阻率断面图及表 1 统计结果,虽然 C12K 方案隧道较长,但该方案隧

道高程范围及附近的低阻异常段落长度却最短,即隧道所穿越的断层、V 类异常和 IV 类异常段落的总长度(绝对长度)最短、百分比例(相对长度)最小,或者说 C12K 方案隧道所穿越的 V 级围岩和 IV 级围岩段落的总长度(绝对长度)最短、百分比例(相对长度)最小,CK 方案和 C1K 方案次之,C4K 方案最长。因此,C12K 方案隧道不良地质段落或围岩级别较高的段落分布最短,CK 方案和 C1K 方案次之,C4K 方案最长。故 C12K 方案的工程地质条件总体上明显优于 CK、C1K 和 C4K 方案;同理比较,CK 方案明显优于 C1K 方案,C1K 方案又明显优于 C4K 方案。

4.2 硬质岩

电阻率的大小,一定程度上反映了围岩的坚硬程度,电阻率值较高,说明围岩较坚硬,反之,说明围岩较软弱。宏观地对比 4 个方案的电阻率断面图,C12K 方案电阻率背景值稍大于 CK 方案,CK 方案电阻率背景值明显大于 C1K 方案,C1K 方案电阻率背景值又明显大于 C4K 方案,特别是在龙江隧道(C4K229 + 340 ~ C4K234 + 850 段),电阻率背景值极低。因此,认为 C12K 方案的硬质岩分布范围稍大于 CK 方案,CK 方案的硬质岩分布范围明显大于 C1K 方案,C1K 方案的硬质岩分布范围又明显大于 C4K 方案。

综上所述,虽然 C12K 方案隧道较长,C4K 方案隧道最短,但综合考虑各方案不良地质(V 级围岩和 IV 级围岩)段落的总长度(绝对长度)、百分比例(相对长度)以及硬质岩段落分布范围等因素,根据物探资料,评价 C12K 方案的工程地质条件较好,CK 方案和 C1K 方案的工程地质条件次之,C4K 方案的工程地质条件最差。

5 结论

(1) 根据 CSAMT 资料,把地下断面划分为 5 个区域,即:断层、V 类(异常)、IV 类(异常)、III 类(异常)和 II 类,它们分别对应断层(V 级围岩)、极破碎(极软弱)或富水岩体或岩溶强烈发育区(V 级围岩)、破碎(软弱)或含水岩体或岩溶中等发育区(IV 级围岩)、较破碎(较软弱)岩体(III 级围岩)和较完整岩体(II 级围岩)。

(2) 4 条物探横测线资料证实了黄草坝断裂带的存在,由于该断层阻水隔热的性质,物探资料从一个方面为高黎贡山隧道,特别是为 C12K 隧道方案的成立,提供了充分有力的证据。

(3) 根据物探资料,对高黎贡山隧道 4 个方案进行了评价和比选,认为 34.6km 隧道方案(C12K)工程地质条件较好,39.6km 隧道方案(CK)和 21km 隧道方案

(C1K)次之,17km 隧道方案(C4K)最差。

(4)根据 CSAMT 资料异常所确定的 30 余个深孔钻探大都揭示了断层或破碎岩体或岩溶发育区,钻探结果表明物探资料可靠,说明物探的作用和效果明显。通过物探,大大提高了对高黎贡山隧道工程地质条件的宏观认识水平。

参考文献:

[1] 中铁二院工程集团有限责任公司.新建铁路大理至瑞丽线高黎贡山越岭地段加深地质工作及专题地质工作工程地质勘察报告[R].成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2007.

[2] TB10012-2007 铁路工程地质勘察规范[S].

Application of geological routing about CSAMT exploration in Gaoligong Mountain tunnel of Dali-Ruili Railway

LI Jian, DENG Hong-ke, ZHANG Jia-de, WU Zheng-gang, CHANG Xing-wang
(China Railway ERYUAN Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031 China)

Abstract: Anomaly about CSAMT data are divided into three gradations (gradation V, gradation IV and gradation III, respectively) corresponding to different level of crushed rock mass according to the resistivity value, resistivity variance and shape of anomaly. Finally, four tunnels (route) in the lines is compared and one of them is recommended in the light of engineering geological condition based extent of anomaly and hard rock about CSAMT data.

Key words: CSAMT; gradations of anomaly; surrounding rock classification; geological routing

责任编辑:张明霞

(上接第 66 页)

参考文献:

[1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.

[2] 程国栋.青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J].中国科学院院刊,2002(1):21-25.

[3] 吴紫汪,程国栋.冻土路基工程[M].兰州:兰州大学出版社,1998:48-60.

Numerical analysis of preventing measures of roadbed problems in the permafrost regions of Yaling Railway

MA Li-feng, LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu
(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The roadbed problems are very serious in the permafrost regions in Northeast China. And manifold preventing measures are applied in experiment engineering to solve the roadbed problems. There are two sections (274K500~275K000m, 275K460~276K000m) in experiment engineering in the north region of Yaling Railway. And some active preventing measures such as insulated materials (XPS, EPS) and two-phase closed thermosyphon are applied in these two sections. Based on the data of temperature and geology in the region, the effectiveness of these measures is studied by numerical analysis method in this paper.

Key words: permafrost; roadbed problems; insulated materials; thermosyphon; numerical analysis

责任编辑:张明霞