

文章编号:1006-2106(2014)04-0015-04

# 地热勘察中地温测试关键技术分析<sup>\*</sup>

刘争平<sup>\*\*</sup>

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 714300)

**摘要:**研究目的:拉日铁路在雅鲁藏布江峡谷区色麦至仁布段,近垂直地通过那曲—羊八井—尼木水热活动带,在铁路隧道的地热勘察中,采用钻孔内地温测试的方法对地温场进行评价,并对其地温测试关键技术进行总结和研究。

**研究结论:**(1)拉日铁路地温测试的关键技术主要包括:地温测试元件选择、钻孔及孔内结构、测试时间以及数据处理;(2)地温元件选择热敏电阻,其精度高,操作简单,反复利用性强;(3)钻孔施工要注意孔斜控制,孔内要安装测温管以便地温测温绳反复利用,地温测试时间在终孔后 30 d 为宜;(4)地温测试数据的处理主要包括:确定恒温带深度、大地热流值、隧道洞身温度推算等;(5)本文的研究成果可以为同类地区地热地温测试工作提供依据和借鉴,对地热勘察工作及地热研究有一定的参考意义。

**关键词:**地热;地温;测试;勘察

中图分类号:P314 文献标识码:A

## Analysis of the Key Technology for Ground Temperature Test in Geothermal Investigation

LIU Zheng - ping

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd, Xi'an, Shanxi 710043, China)

**Abstract: Research purposes:** In the Yarlung Zangbo Canyon, the Semai - Renbu section of Lhasa - Rikaze railway goes near vertically across the hydrothermal active belt of Naqu - Yangbajing - Nimu. In the engineering geologic investigation for railway tunnel of geothermal region, we use the ground - temperature test method in drilling - hole to evaluate the geothermal conditions. This paper summarizes and studies on its geothermal test's key technology.

**Research conclusions:** (1) In the geologic investigation of Lhasa - Rikaze railway, the key technology of ground temperature test mainly includes: sensor for ground - temperature measuring, drilling - hole, the hole structure, test time and data processing. (2) It is suitable that the thermostat was choose as the sensor for ground - temperature test, with high precision, simple operation, well repeated use. (3) Pay attention to the hole deviation control in the process of drilling. Put the temperature tube in the drilling - hole, so that the temperature measuring cable can be repeated used. The temperature test time should be 30 days after the drilling. (4) The data processing about ground temperature mainly includes: determining depth of constant temperature layer, calculating the ground heat flux, forecasting the tunnel temperature, etc. (5) The results of this study can provide the basis and reference for geothermal ground temperature measuring of similar region, have certain reference significance to the geothermal investigation and geothermal research.

**Key words:** geothermal; ground temperature; test; investigation

\* 收稿日期:2014-01-06

\*\* 作者简介:刘争平,1971 年出生,男,教授级高级工程师。

## 1 概述

拉日铁路在雅鲁藏布江峡谷区色麦至仁布段,近垂直地通过那曲-羊八井-尼木水热活动带,线路通过长度约 60 km<sup>[1]</sup>。在地热地区修建铁路工程时,如何准确进行地温测试是铁路工程地质勘察的重要环节。

拉日铁路地热勘察中,采用了在钻孔内进行地温测试的方法对其地温场进行研究。地温测试结果直接影响着地热地质评价,对工程设计思想和处理措施起着决定性作用。如果不能正确掌握地温测试的关键技术,测试结果将有很大差异。

拉日铁路地温测试是在钻孔中安置防水套管,管内安装地温测试元件,然后进行测试,测试结果通过数据分析,以提出地温梯度、大地热流值以及预测隧道洞身温度。

本文通过拉日铁路地热隧道勘察,对孔内地温测试的关键技术进行了总结和研究,其研究结果可为地热勘察中地温测试工作提供依据。

## 2 地温测试的影响因素及关键技术

在钻孔中进行地温测试,要准确获得地温数据,其影响因素主要有:测试元件、测试过程、测温管安装、钻孔及孔内结构、数据处理等。另外测试时的时间点、测试人员、天气情况等也是地温测试误差的客观因素。

针对这些影响因素,其地温测试的主要关键技术就包括:测试元件的选择、钻孔施工及孔内结构、测试时间掌握以及数据处理。

## 3 地温测试元件的选择

在地热区钻孔中直接测温,一般可采用水银温度计、热电偶、热敏电阻或更高温度计来进行测试<sup>[2]</sup>。热敏电阻测试精度高,操作简单,重复利用性强,特别是近年来,利用热敏电阻进行地温测试的研究越来越成熟,使用也越来越广泛。

与水银温度计、热电偶相比较,热敏电阻的特性是其电阻值随着温度的变化而有着显著变化,即随温度变化电阻值变化范围大,灵敏度高;对于仪表的要求不高,采用最小单位为 1  $\Omega$  的普通数字电阻表就可以进行测试;温度测试精度高,可达 0.05  $^{\circ}\text{C}$  甚至更高;另外热敏电阻体积可以制作的很小,地温测试的热敏电阻每个直径 3~5 mm、长 5~10 mm,非常便于制作成很长的电缆于钻孔内测试。

热敏电阻可分为两种类型:一种是电阻值随温度的升高而增大,称为正温度系数热敏电阻;另一种是电

阻值随温度的升高而减小,称为负温度系数热敏电阻<sup>[3]</sup>。二者电阻值随温度变化曲线如图 1 所示。

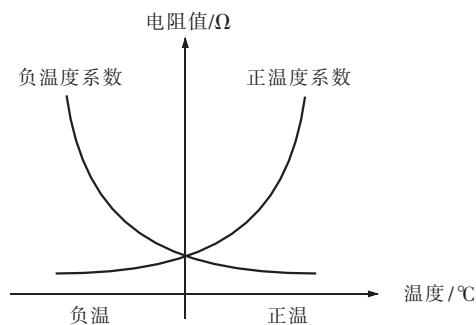


图 1 热敏电阻的阻值随温度变化示意图<sup>[3]</sup>

由图 1 可见,正温度系数热敏电阻在正温度环境下其阻值变化范围更显著,可用在地热地温测试中;负温度系数热敏电阻在负温度环境下,其阻值变化范围更显著,一般用在冻土地温测试中。所以在制作地温测试所用的热敏电阻时,一定要先预估测试的地温值,以便选用合适的热敏电阻和测试量程。

拉日铁路地热勘察中,采用了正温度系数的热敏电阻。首先,按照测试需要定制地温测绳(又称地温测试电缆),即要求制作方将热敏电阻按照每 2.5~10 m 间距连接后过塑成一条电缆,电阻之间采用电学并联方式,地温测绳长度与钻孔深度相等,拉日线地热隧道钻孔深度一般 100~150 m;其次,将地温测绳放入钻孔中一段时间,用数字电阻表测试其每个深度热敏电阻的电阻值;最后,根据热敏电阻标定程序将电阻值换算成地温值。

## 4 测温钻孔的关键技术

对于铁路勘察中地温测试钻孔,一般利用隧道勘察钻孔,其深度达到隧道内路肩设计高程以下 3~5 m 即可,如有特殊研究可适当加深。钻探过程中,严格执行《铁路工程地质钻探规程》中的钻探方法和技术作业程序。对于测温孔强调以下几点:

(1) 地温孔要进行孔斜控制,可按照水文地质钻孔的要求 100 m 孔深钻孔顶角允许偏差 1.5 $^{\circ}$  来控制<sup>[4]</sup>,这样有利于孔内作业。

(2) 对于地层破碎的地层,孔口段最好用套管护壁,并适当加大钻探泥浆比重和黏度,以保证孔口稳定,便于后期孔内工作。

(3) 根据铁一院在青藏铁路地温测试的经验,钻孔内最好放置测温管,测温管一般采用镀锌铁管为宜;管节连接牢固,管底封堵,防止进水;管径不小于 50 mm,以能够顺利将地温测绳放下为原则;钻孔终孔

孔径不宜小于 89 mm,最好使用 108 mm,以能够使测温管顺畅下到孔底为原则<sup>[5]</sup>;测温管要高出孔口 30 cm 以上,并做好保护装置,防止人为造成管内堵塞而报废。

安装测温管的目的是为了地温测绳的反复利用,如果开展地温长期观测,那么可将地温测绳永久埋置在钻孔内,就没有必要下测温管了。

(4) 钻孔内放置测温管以后,管外与钻孔之间的环状间隙要进行填充,最好用干净的细沙填充,以使得孔壁地温能够准确传递到测温管。

(5) 钻探完成后,孔口要培土填高,避免局部地面积水或雨水流入孔内,影响测试结果。

(6) 地层取样要按照岩性特征、地层破碎程度有代表性地进行。通过室内试验获取地层岩样的各热物理参数。

## 5 测试时间点的研究

钻探过程中使用泥浆或冲洗液会干扰钻孔周围的温度场,因此终孔后,如果停钻时间没有让孔内温度与围岩温度趋于平衡时,那么此时测得的地温就不能真实反映地温的实际情况。事实上,很多钻孔停钻后,孔内温度要完全达到平衡所需要的时间长达几个月,甚至更长<sup>[6]</sup>,所以,地温测试必须在钻孔终孔后一段时间进行。

根据铁一院在青藏铁路多年冻土区地温测试经验,拉日铁路勘察中采用终孔 10 d 后,再每隔 10 ~ 15 d 进行 1 次测温的方法,测温次数不少于 3 次<sup>[5]</sup>。测试时,如果时间允许,可以每隔 10 d 测试一次,分析每两次之间的地温差异,当误差小于某一设定值时(如误差小于 0.5 °C 时),可近似地认为地温值已经稳定。如果误差比较大,则需要再推迟 10 d 进行补测。

从实际测试结果来看,在拉日铁路地热发育地区,各钻孔在终孔后 20 ~ 30 d 不等,地温测试误差就小于 0.5 °C,故建议取 30 d 为宜。

## 6 地温数据处理的关键技术

### 6.1 恒温带深度的确定

地表以下某一深度范围内地温随昼夜及四季气温的变化而明显变化,将这一范围称为变温带(层),即大气温度影响的深度范围。

在变温层以下地温常年保持不变的地带,称为恒温带(层)<sup>[7]</sup>,也称之为常温带(层)<sup>[6]</sup>。地热研究过程中,主要研究恒温带的地温变化,所以首先要确定恒温带埋藏深度及其温度。习惯上,将恒温带顶部的埋藏深度简称为恒温带深度(用  $d_0$  表示),亦即变温带厚

度,该深度处地温年较差为零,这一深度的地温值习惯上称为恒温带温度(用  $T_0$  表示)。

关于恒温带深度的确定方法有两种。

#### 6.1.1 通过长期观测资料统计得出

利用恒温带的定义,通过地温长期观测数据,绘制不同时间段、不同时期的地温实测曲线,曲线上部交汇点即为恒温带深度,其地温值即为恒温带温度。此方法的优点是取得的数据准确性高,缺点是需要很长时间、多次测试。

#### 6.1.2 通过当地的年平均气温得出

根据《浅层地热能勘查评价规范》的释义:恒温带在自然状态下,该层热能受太阳能和大地热流的综合作用,地球内热形成的增温带与上层变温带影响达成平衡,所以该层温度与当地的年平均气温大致相当<sup>[7]</sup>。

因此,现场可收集当地气象部门的年平均气温数据,在一次地温测试曲线上就可以直接读出恒温带深度,当然此时的恒温带温度就是其年平均气温值了。此方法的优点是省时,缺点是误差比较大,由于是一次测温资料,故受地温测试的准确度影响很大;受气象资料影响也很大,如果当地没有气象资料,或气象站点气候特征与实测点相差很大,均无法实施。

如果数据充足,采用此两种办法时,可根据计算结果取其大值。

拉日铁路地热分布区位于雅鲁藏布江峡谷区,地形变化大,气候特征与附近的尼木县城气候特征有很大差异,尼木县城的年平均气温资料依此法不可用,故勘察中采用了多次测温资料进行统计分析。结果显示,各钻孔恒温带深度各不相同,主要是由于拉日线地热分布受断层构造影响,在构造带中心地温高,边缘低温度,因此各钻孔恒温带深度及温度也迥异。

### 6.2 地温梯度的确定

地温梯度是指地表以下不受大气温度影响的地层中温度随深度增加的增长率。通常用恒温带以下每 100 m 深度所增加的地温值来表示,也称为地热增温率<sup>[8]</sup>。

根据地温曲线计算地温梯度时,首先将变温带厚度以内的数据先剔除掉,只剩余恒温带的地温实测数据,由于温度  $T$  是深度  $H$  的线性函数,然后用最小二乘法进行曲线拟合,求出地温随深度变化的线性方程,其形式为:

$$T = aH + T_s \quad (1)$$

式中  $a$ ——直线的斜率,即为地温梯度,可换算成用 (°C/100 m) 表示的形式;

$T_s$ ——直线与地表交点处的温度,即为地表的年平均地温。

拉日铁路隧道钻孔中均未见地下水,隧道地热表现形式主要为高岩温,地热曲线类型为直线型,如拉日线钻孔 JWZ-1 的地温曲线(如图 2 所示),其地温梯度为  $38.37\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。地温随深度变化的线性回归方程为:  $T=0.3837H+23.60$ 。

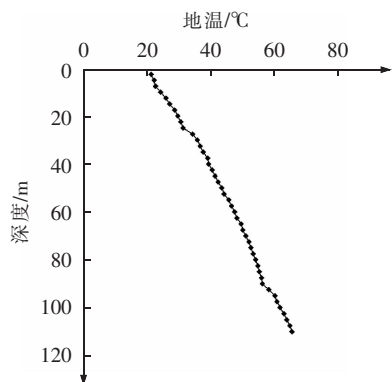


图 2 拉日铁路钻孔 JWZ-1 地温曲线

地温梯度与地形、地质构造、岩石导热性能、水文地质条件、岩浆活动等因素有关。各地区差异很大,同一地区不同部位也有差异<sup>[2]</sup>,计算结果不能按照常数考虑。

### 6.3 大地热流计算

大地热流是地球内热以传导方式传输至地表的热量,在单位时间内通过单位面积的大地热流为大地热流值<sup>[7]</sup>,它是一个综合参数,能反映该地区的地热场基本特点,铁路勘察中主要判定其大地热流值是否异常,为地热选线和地热采暖工程提供设计依据。大地热流计算公式<sup>[6]</sup>如下:

$$Q = -100K_t \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

式中  $q$ ——大地热流( $\text{mW}/\text{m}^2$ );  
 $K_t$ ——岩石导热率 [ $\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ];  
 $\frac{dT}{dz}$ ——地温梯度( $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ )。

从公式可以看出,计算大地热流时,首先,应分析地温测试曲线求出地温梯度。其次,要获得整个地层的岩石导热率,可以通过室内试验测出不同深度岩样的导热率,按照岩样代表的地层厚度求出其地层的等效导热率,所以这就要求钻孔过程中一定要加强取样工作;如果没有试验值,可以用经验值进行估算。最后,将计算结果与同类地区的大地热流进行比较,就可判定该地区的热流值是否异常。

以钻孔 JWZ-1 为例,其地温梯度为  $38.37\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,地层主要为花岗闪长岩及闪长岩,导热系数取  $2.72\text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ ,其大地热流值为  $104.37\text{ mW}/\text{m}^2$ 。我国西南地区的大地热流统计值一般在  $70\sim85\text{ mW}/\text{m}^2$

之间<sup>[9]</sup>;沿雅鲁藏布江缝合带,高热流值在  $91\sim364\text{ mW}/\text{m}^2$  之间<sup>[9]</sup>,拉日铁路地热发育地区位于雅鲁藏布江缝合带上,该大地热流值计算值正好位于此范围。

隧道选线时,由于线路与地热活动带近垂直通过,无法绕避该地热带,所以尽量抬高线路高程,采用了浅埋隧道的方案<sup>[10]</sup>。

### 6.4 隧道洞身温度确定

预测洞身温度对于隧道施工组织和隧道设计有积极的指导作用。

如果钻孔位置及深度正好位于隧道洞身附近,可以根据地温实测曲线很直接地确定隧道洞身位置处的温度。

实际勘察中,钻孔平面位置往往偏离隧道一定距离,此时需要根据孔内实测温度推算设计洞身温度。根据傅立叶热传导理论,地热传导在均质空间存在较规则的等温面,所以可按照等厚度原则进行推算,即按照实际隧道埋深,在地温曲线上相同深度处的地温即可近似等于洞身温度。

如果隧道埋深很大,而钻孔深度远远没有到达隧道洞身范围,此时就需要根据地温梯度进行推算,公式如下<sup>[11]</sup>:

$$T_z = 100(H_z - H_0) \frac{dT}{dz} + T_0 \quad (3)$$

式中  $T_z$ ——洞身温度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $\frac{dT}{dz}$ ——地温梯度( $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ );  
 $H_z$ ——洞身埋深(m);  
 $H_0$ ——恒温带深度(m);  
 $T_0$ ——恒温带温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

拉日线吉沃希嘎隧道勘察钻孔 JWZ-1 偏差隧道中线  $15\text{ m}$ ,孔内最高温度  $65.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,推测洞身温度应该在  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右;而在 2012 年施工中实测掌子面温度最高为  $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,误差约为  $17\%$ 。分析其原因主要是由于风钻钻进为带水钻进、隧道内预先采用淋水降温等措施,所以掌子面表层温度有所降低。由此可见,勘察期间地温测试结果能够反映实际掌子面岩温。

## 7 结论

(1)拉日铁路地热勘察中,地温测试的关键技术主要包括:地温测试元件、钻孔及孔内结构、测试时间以及数据处理等。

(2)地温元件选择热敏电阻,其精度高,操作简单,反复利用性强,适用于地热勘察地温测试。

(下转第 62 页 To P.62)