

文章编号: 0451-0712(2006)02-0184-05

中图分类号: U451.5

文献标识码: A

# 寒区隧道结构抗防冻试验研究及仿真分析

谢红强<sup>1</sup>, 何 川<sup>1</sup> 李永林<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学地下工程系 成都市 610031; 2. 四川省交通厅 成都市 610041)

**摘 要:** 高寒地区修建交通隧道的主要技术难题是隧道主体结构尤其是洞口带的结构抗防冻能力、运营期间的安全性及结构的长期寿命等问题。根据鹧鸪山隧址区水文、地质条件, 进行隧道主体结构及围岩温度的现场测试研究, 得出了隧道区环境温度、隧道结构体和围岩的温度场变化规律, 并结合结构和围岩的热力学试验, 对围岩及隧道结构的温度场分布进行仿真模拟分析, 分析3种不同保温材料的隔热保温性能, 从而为隧道的抗防冻设计提供参考。

**关键词:** 寒区隧道; 主体结构; 抗防冻; 现场试验; 温度场; 保温材料

## 1 前言

在寒冷地区修建隧道工程, 与一般地区相比, 技术性问题要复杂得多, 最主要的问题是隧道主体结构尤其是洞口带的结构抗防冻能力、运营期间的安全性及结构的长期寿命等问题。目前我国在寒冷地区建成的公路隧道数量极少, 尚无特长公路隧道出现, 但从国内寒冷地区的铁路隧道和欧美日本等国寒冷地区的铁路、公路隧道的使用情况看, 冻害现象十分严重, 甚至出现因严重冻害而导致隧道主体结构报废和运营期间发生重大交通安全事故。如日本道路公团和日本铁道综合技术研究所最近的统计表明, 日本全国3 800座铁路隧道中有1 100座因冻害原因, 在冬季运营期间危及到行车安全; 公路隧道中, 仅北海道地区的302座大型公路隧道中发生严重冻害的就达104座, 为消除侧墙壁冰和拱部冰柱, 作为整治措施之一, 在较多隧道设置了电加热装置, 投入的整治费用十分惊人。产生这样结果的主要原因是这些隧道多在20世纪90年代前修建, 在修建时对隧道的抗防冻设计没有引起充分重视, 其经验教训是极其深刻的。

国道317线鹧鸪山隧道位于平均海拔3 350 m的高寒地区, 隧道所在地区属北温带川西高原气候区, 历年平均气温在3.3~3.8℃, 最高气温为28.2℃, 最低气温在-2.0~-3.1℃, 历年极端最低气温为-30~-31.1℃。具有年平均气温低、冻结严重、昼夜温差大的特点。鹧鸪山隧道是目前我国在高寒地

区修建的最大规模的特长公路隧道, 是四川省通向阿坝州州政府马尔康的唯一公路, 具有重大经济、政治、国防意义, 为确保长期运营安全可靠, 要求在洞口及浅埋段进行抗防冻设计。鉴于目前我国在公路隧道的抗防冻领域缺乏经验, 亟待解决抗防冻设计施工方面的关键技术问题, 结合鹧鸪山隧道工程在公路隧道的抗防冻方面开展全面深入的研究工作, 有着重要的现实意义。

## 2 气象及水文地质条件

鹧鸪山地区属川西北高原气候区, 据四川省阿坝州气象局对隧道区邻近测点进行实地观测、实地考察, 在此基础上进行相似气候的分析, 采用数理统计法、比值法、自然景观法、差值法等手段推算获取的气象资料分析统计: 海拔3 500 m处的历年平均积雪日数为105 d, 最大积雪深度0.47 m; 历年极端最高气温为28.2℃; 历年极端最低气温-31.1℃; 历年平均气温稳定通过 $\geq 0$ ℃的时段为3月25日~11月1日, 为222 d; 冻结最大深度1.01 m, 地中冻土深度层10 cm的冻结日期平均为11月下旬初, 解冻日期平均为3月下旬初; 最多风向SSW~SW、SE~SSE, 历年最大风速24 m/s, 历年平均风速为1.7 m/s。

隧道进口段受米亚罗支断裂影响较大, 岩层以炭质千枚岩为主, 地下水发育, 隧道出口段阎王曲内堆积层厚10~30 m, 层中含丰富的地下水。

### 3 现场试验研究

#### 3.1 试验目的

通过监测鹧鸪山隧道和平导进出口前部一定范围内围岩及结构体的温度变化,来确定围岩的冻融圈范围;沿隧道横、纵断面的变化规律及随环境气温的变化规律,为后期建立隧道温度近似计算关系式、保温隔热层厚度的设计、围岩的防冻技术研究提供参考数据。

#### 3.2 试验仪器

试验采用如图1、图2所示的WD—A型和WD—B型两种温度计。WD—A型温度计长5.2 m,温度计中各测点布置见图3,主要用来量测主隧洞和平导洞进出口前部横断面Ⅰ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ、Ⅲ—Ⅲ钻孔位置处的温度值。WD—B型温度计长9.2 m,温度计中各测点布置见图4,主要用来量测平导洞出口前部在安装保温隔热层后二次衬砌壁面的温度值。

与WD—A型和WD—B型两种温度计配套的电阻测量仪表为DT9203型手持式液晶显示的四位半数万用表。隧道环境温度测量采用量程为 $-40\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的WSS金属温度计。

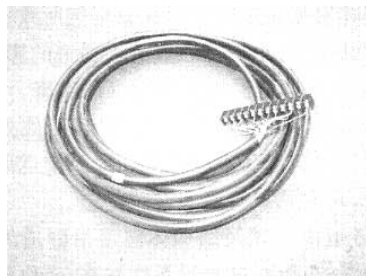


图1 WD—A型温度计



图2 安装好的WD—B型温度计

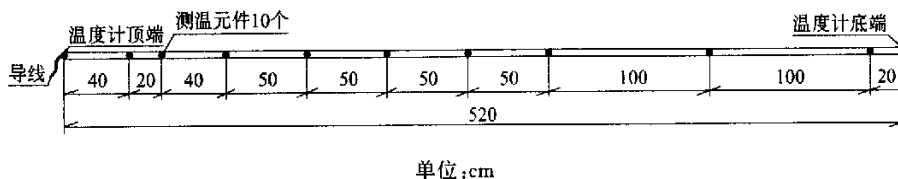


图3 WD—A型温度计测点布置

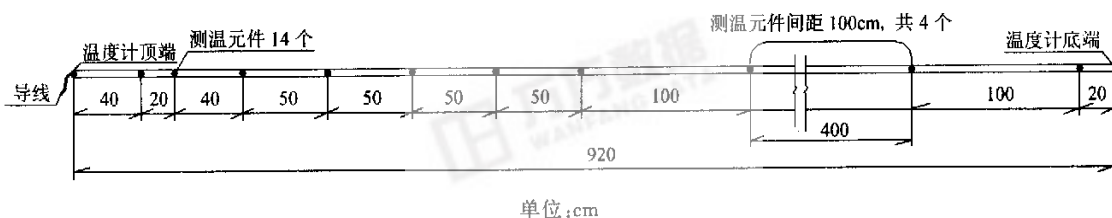


图4 WD—B型温度计测点布置

#### 3.3 测试成果分析

##### 3.3.1 隧址区域环境气温分析

鹧鸪山隧道区实测的环境温度与马尔康气象局提供的鹧鸪山地区历年月平均温度数据曲线基本一致,可见鹧鸪山隧道地区近年月平均温度与历年月平均温度相比变化较小,区域环境温度在一年中的12月下旬~次年3月上旬温度为负温月份,1月份的月平均温度最低,本月隧道最易发生冻害,为主要试验监测时间。

隧道区的环境日温度变化呈正弦曲线形状,日

温差大,进口区环境最低温度普遍出现在早上7:00~8:00,出口区环境最低温度普遍出现在早上4:00,进出口区环境最高温度普遍出现在14:00~15:00,可见初期制定的试验监测频率可以满足现场监测温度场变化的要求。

##### 3.3.2 隧道进出口温度与环境温度的关系

(1)隧道衬砌表面温度与洞内空气温度基本接近,在隧道的抗防冻研究中可近似认为是一样的。

(2)隧道贯通前,虽试验段位于洞口前部,仍与洞外环境温度相差较大,造成原因主要是由于洞内

未形成气体对流及施工车辆释放尾气所致。

(3)受隧道与平导洞连接的横通道的影响,隧道在 K0+810 区域处温度值有明显的突降,可预测隧道运营通车后采用平导压入式送风,若此处的风门打开,空气形成对流,该区域受通风系统送风温度的影响较大,将是重点的冻害设防部位。

(4)隧道围岩体及结构体温度沿隧道纵向变化快慢是不同的,距洞口越远温度越高,变化越趋于稳定。隧道围岩及结构温度在径向约 1 m 的范围内的温度梯度较大。

(5)隧道岩体内部的地温较高,均在 10.5 ℃ 以上,说明山体自身热能贮蓄大,严寒冬季时在二次衬砌表面设保温隔热层的方案,对隧道进出口地下水发育段的抗防冻是可行的。

(6)隧道围岩及结构温度沿隧道径向受外界影响是有一定的范围的,该范围内的温度随环境温度有一定的升高和降低变化,在此范围外温度趋于稳定,日最低最高温度时,径向 4.5 m 深处温度约为 8 ℃。

### 3.3.3 隧道出口各横断面口变化曲线分析

(1)隧道出口前部各监测横断面径向同一位置的温度沿洞口纵向向里,一天中温度逐渐由正弦形趋于平缓;且随横断面径向深度的增加,测点温度一天中也逐渐由正弦形趋于平缓。

(2)隧道出口前部各监测横断面径向同一位置的温度随隧道环境温度的变化,温度逐渐由正弦形趋于平缓;各曲线随测孔位置深度增加,日较差逐渐减小,日较差由 7 ℃ 逐渐减小为 4 ℃。

(3)隧道出口前部各监测横断面径向同一位置

温度曲线日较差随区域环境月平均温度的增大而增大。

### 3.3.4 平导横断面日变化曲线分析

平导横断面日变化曲线与隧道横断面日变化曲线变化趋势相似,但其日较差比主隧道的小一些。因此可利用隧道和平导洞温度场的相似性,在平导洞中做保温隔热层的试验具有可比性,且节省材料,是可行的一种方案。

## 4 温度场仿真模拟

### 4.1 计算模型及计算参数

根据隧址区的工程、水文地质及地形条件以及隧道的设计情况,拟定的隧道二维温度场有限元分析的二维温度场计算离散模型参见图5(其中节点数为 1 222,单元数 1 144),模型各类岩体及材料的热力学参数见表1。保温材料则采用干法硅酸铝纤维板和硬质聚氨酯泡沫塑料两种,相应的热力学性能指标见表1。

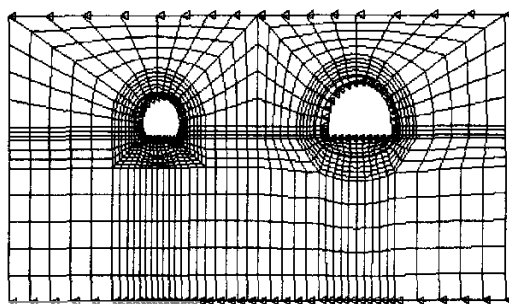


图5 有限元计算模型

表1 围岩及结构材料的热力学指标

围岩岩性或结构材料	含水量/%	干容重 g/cm <sup>3</sup>	导热系数/(W/m·K)		容积热容量 ×10 <sup>6</sup> (J/m <sup>3</sup> ·K)		导温系数 ×10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	
			20 ℃	-15 ℃	20 ℃	-15 ℃	20 ℃	-15 ℃
砂岩	0.24	2.74	3.69	3.32	2.24	1.63	1.65	2.04
炭质板岩	0.52	2.69	3.42	3.21	2.09	1.57	1.64	2.02
炭质干枚岩	1.38	2.71	3.61	3.38	2.15	1.59	1.68	2.12
衬砌混凝土	2.85	2.48	2.23	2.56	1.92	1.39	1.16	1.84
干法硅酸铝纤维板	/	0.188 0	0.037		/	/	/	/
硬质聚氨酯泡沫塑料	/	0.060 4	0.027		/	/	/	/

### 4.2 计算工况组合

根据隧址区的水文、地质条件及主体结构形式,结合围岩及主体结构温度场测试成果,并考虑保温材料的实际施工条件及实际采用保温材料厚度。

基于以上各种因素的不同组合,对不同埋深段的隧道进行了模拟分析,即构成有限元的本研究的计算工况。

### 4.3 计算结果分析

限于篇幅,文中仅列出围岩为砂岩时的部分计算结果,见图 6 和图 7 所示。

从图 6 中可以看出,在不设保温层的情况下,隧道衬砌以及围岩一定深度内的温度均为负值,在温度变化时,结构将受到围岩冻胀力的影响,从而破坏结构的稳定性。因此,必须对隧道进行抗冻冻设计,在二次衬砌外表面敷设一定性能、厚度及长度的保温层,保证隧道二次衬砌外表面温度保持在  $0^{\circ}\text{C}$  以上,防止衬砌结构受到破坏。

图 7 为设不同热力学参数和不同厚度保温层的温度场分布。从图中可以看出,当采用硬质聚胺脂泡沫塑料作为保温层,厚度为 2 cm 时,保温层背部温度已全部处于正温以上;当厚度分别为 3 cm、4 cm、5 cm、6 cm 时,结果类似,但温度相应更高一些。当

采用干法硅酸铝纤维板作为保温层,厚度为 2 cm 时,保温层背部温度局部仍处于  $0^{\circ}\text{C}$  以下;当厚度为 3 cm 时,背部温度已全部达到正温;厚度为 4 cm、5 cm、6 cm 时情况类似。

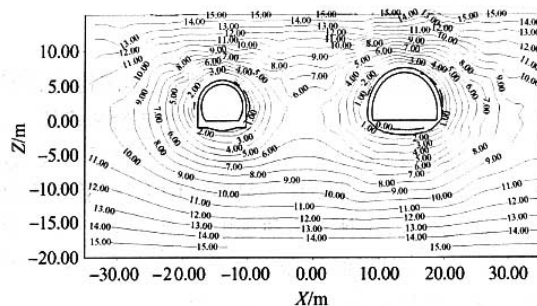
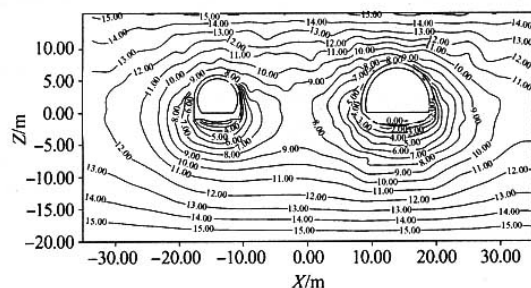
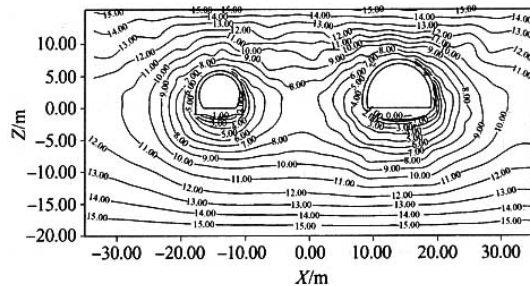


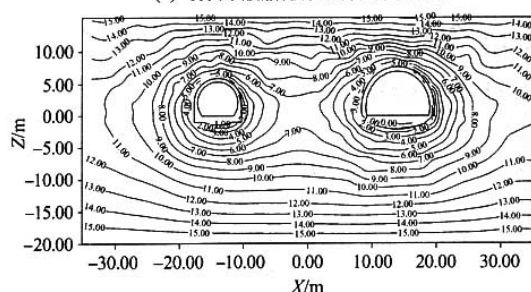
图 6 围岩温度场等值线图(不设保温层工况)



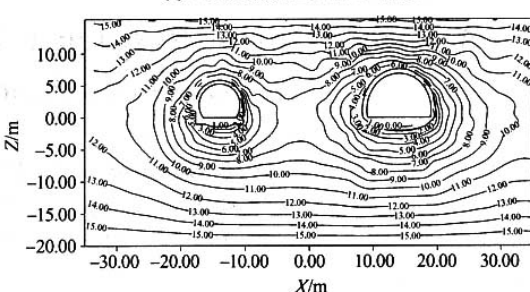
(1) 硬质聚胺脂泡沫塑料, 厚度 2 cm



(2) 硬质聚胺脂泡沫塑料, 厚度 3 cm



(3) 干法硅酸铝纤维板, 厚度 2 cm



(4) 干法硅酸铝纤维板, 厚度 3 cm

图 7 围岩温度场等值线图(不同岩性和保温材料)

在板岩和千枚岩情况下的计算结果与砂岩情况类似,但温度场的分布有所差异。因此,根据有限的计算成果,可以确定 2 种保温材料的设计厚度,即选用硬质聚胺脂泡沫塑料时,厚度至少为 2 cm,而选用干法硅酸铝纤维板时,厚度至少为 3 cm。

通过对隧道一般埋深断面和出口浅埋断面的保温隔热材料厚度进行数值模拟计算,及一般埋深断

面的一维稳态近似求解,从计算结果可看出,一般埋深断面的二维稳态数值模拟计算厚度结果是一维稳态近似求解结果的 2 倍左右,分析认为这是因一维近似求解计算中考虑了山体的蓄热量,隧道上下边界的温度梯度又未加考虑的结果。因此,设计厚度偏于安全选用了数值模拟计算值。各保温材料厚度计算结果见表 2。

表 2 保温层厚度(数值计算)

保温材料	聚氨酯泡沫板	干法硅酸铝纤维板
一般埋深段	2 cm	3 cm
出口浅埋段	3 cm	4 cm

## 5 结论

通过对鹧鸪山高寒隧道围岩及主体结构的温度测试及数值仿真模拟分析,得出如下结论和建议。

(1)高寒地区环境气温不同于一般地区的气温,气温年较差、日较差均比一般地区的大。隧道岩体内部的地温较高,山体自身热能贮蓄大,说明严寒冬季时,在二次衬砌表面设保温隔热层的方案对隧道进出口地下水发育段的抗防冻是可行的。

(2)隧道围岩及结构体温度沿隧道径向受外界影响是有一定的范围的,该范围内的温度随环境温度有一定的升高和降低变化,在此范围外温度趋于稳定,在径向约 1 m 的范围内的温度梯度较大。

(3)热传导数值计算模型中,初始边界温度的选取对隧道保温隔热材料厚度的计算结果影响较大,在同类隧道计算中,建议应以具体实测温度资料确定。

(4)数值计算初始边界温度,以月平均温度最低月时出现的连续多日气温为负低温时的温度,作为

计算值更偏于安全,经现场验证其结果与计算基本一致。

(5)在隧道洞口前部一般埋深段,采用二维稳态有限元热传导数值计算模型的方法,得到的保温隔热材料厚度结果是可以满足隧道衬砌保暖要求。而在隧道洞口前部浅埋段,采用二维非稳态有限元热传导数值计算模型的方法得到的保温隔热材料厚度结果,可以满足隧道衬砌的保暖要求。

## 参考文献:

- [1] 马建新,李永林,等. 高寒地区特长隧道温度场测试与分析[A]. 中国交通土建工程学术暨建设成果论文集[C]. 2003.
- [2] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [3] 张学富,赖远明,等. 寒区隧道围岩冻融影响数值分析[J]. 铁道学报, 2002, (4).
- [4] 梅甫良,曾德顺. 沉管隧道混凝土管段温度场的仿真计算[J]. 现代隧道技术, 2002, (4).
- [5] 陈建勋,朱计华,张建勋. 寒冷地区隧道防冻隔热层设计计算及应用[A]. 国际隧道研讨会暨公路建设技术交流大会论文集[C]. 北京:人民交通出版社, 2002.

# A Study on Frost Resistance Test of Tunnel Structure in Cold Areas and Numerical Simulation

XIE Hong-qiang<sup>1</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, LI Yong-lin<sup>1, 2</sup>

(1. Dept. of Tunnel and Underground Eng., Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China;

2. Department of Communications of Sichuan Province., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Main technical problems for building communication tunnels in high altitude and cold areas are the frost resistance capabilities, safety during operating period and long-term life of structures, especially in the mouth of tunnels. On the basis of meteorological, hydrological and geological conditions in a certain tunnel site, in-situ tests of the temperature of main structures and surrounding rock are conducted, and the variation regularities of environment temperature and temperature field are got. According to thermodynamical tests, numerical analog simulation of temperature field distribution is carried out for surrounding rock and structures, and heat insulating properties of three different heat insulating materials are analyzed, consequently that may be for reference for frost resistance design of tunnels.

**Keywords:** tunnel in cold areas; main structure; frost resistance; in-situ test; temperature field; heat insulating material