

# 风火山隧道温度特性非线性分析

张学富<sup>1,2</sup>, 张闽湘<sup>1</sup>, 杨风才<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 河南省永煤集团城郊矿, 河南 永城 472000)

**摘要:** 风火山隧道是青藏铁路的控制性工程之一, 全隧道位于多年冻土之中, 这种特殊隧道的温度分布将直接影响隧道结构的稳定性。根据带相变瞬态温度场问题的热量平衡控制微分方程, 应用 Galerkin 法推导出了三维有限元计算公式。根据风火山隧道内的实测大气温度, 利用三维有限元计算公式, 计算分析了该隧道在未来 50 a 的温度特性, 并与现场实测围岩温度进行了对比分析, 分析表明计算理论、模型、参数和条件是可靠的, 风火山隧道在未来 50 a 内不会出现季节性融化。从而为寒区工程设计提供理论依据和计算方法。

**关键词:** 寒区隧道; 温度特性; 气候变暖; 数值分析

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)11-1680-06

**作者简介:** 张学富(1972-), 男, 重庆合川人, 教授, 博士, 从事岩土与隧道工程等方面的科研与教学工作。E-mail: zhangxuefu400074@126.com。

## Nonlinear analysis on temperature characteristics of Fenghuo Mountain tunnel

ZHANG Xue-fu<sup>1,2</sup>, ZHANG Min-xiang<sup>1</sup>, YANG Feng-cai<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold & Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Chengjiao Coal Mine, Rongcheng Coal Mine Group Company of Henan, Rongcheng 472000, China)

**Abstract:** Fenghuo Mountain tunnel, lying in permafrost, is a key project in Qinghai-Tebet Railway. The temperature distributions of this special tunnel will directly affect the stability of tunnel structure. Based on the governing differential equations of the problem of temperature field with phase change, the finite element formulae of three-dimensional temperature fields are obtained from the Galerkin's method. Three-dimensional temperature fields of Fenghuo Mountain tunnel in coming 50 years are forecast on the basis of the air temperature measured inside the tunnel. A comparison between the numerical results and the measured temperature of the rock surrounding the tunnel is made. The results show that the theory, model, parameters and conditions are all credible, and that there will not occur a seasonally thawed range in the rock surrounding Fenghuo Mountain tunnel in coming 50 years. It can provide theory basis and a numerical method for actual engineering design in cold regions.

**Key words:** tunnel in cold regions; temperature characteristic; air temperature warming; numerical analysis

## 0 引言

随着西部大开发的深入, 青藏铁路建设项目和西气东输工程的开工, 寒区工程将愈来愈多, 寒区隧道也将逐渐增多。寒区隧道与其他隧道不同, 就是必须分析隧道围岩的温度场, 这往往是寒区隧道成功与否的关键。因为修建隧道打破了围岩的原始热状况, 使隧道衬砌或因围岩冻胀或因围岩融化沉降而发生破坏, 隧道由于冻害的影响, 常年有 8~9 个月不能使用, 有的隧道由于冻胀力的作用, 衬砌裂缝宽达 5 cm, 严重影响正常交通<sup>[1]</sup>。目前对寒区隧道温度场的研究非

常多, 1973 年 Bonacina 等提出了相变热传导温度场的数值求解方法<sup>[2]</sup>, 1974 年 Comini 等对相变热传导温度场的非线性问题进行了有限元分析<sup>[3]</sup>, 1995 年何春雄等对大坂山隧道围岩冻融状况变化趋势进行了初步分析预测<sup>[4]</sup>, 1999 年何春雄等运用对流换热模型分析了严寒地区隧道围岩冻融状况<sup>[5]</sup>, 1998 年赖远明等进行了寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合非线性

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701038)

收稿日期: 2008-09-01

问题方面的研究<sup>[6]</sup>, 1999 年赖远明等运用 Galerkin 法对寒区隧道温度场和渗流场耦合非线性问题进行了分析研究<sup>[1]</sup>, 2000 年赖远明等运用无量纲量和摄动技术求出了寒区圆形截面隧道温度场的解析解<sup>[7]</sup>。但所有这些研究都是二维的, 根据乜凤鸣 1988 年的现场气温实测结果<sup>[8]</sup>可知, 寒区隧道内的温度分布不是均匀的, 而是变化的, 并且隧道围岩的初始温度一般也是变化的, 要清楚隧道围岩沿轴向的冻融范围, 就必须对隧道进行三维空间分析。迄今为止, 很少人对寒区隧道三维空间温度场非线性问题进行分析, 仅 2004 年张学富等运用有限元方法分析寒区隧道的三维温度特性, 但没有与隧道围岩的实测温度进行对比分析<sup>[9]</sup>, 因而其计算理论、模型与结果是否可靠就不得而知。

青藏铁路是西部大开发的重大建设工程项目, 风火山隧道是青藏铁路的控制性工程之一, 全隧道位于多年冻土之中, 这种特殊隧道的温度分布将直接影响隧道结构的稳定性。因此本文根据带相变瞬态温度场问题的热量平衡控制微分方程, 应用 Galerkin 法推导出了三维有限元计算公式, 计算分析了该隧道的温度特性, 并与现场实测围岩温度进行了对比分析。

### 1 工程概况

根据苏新民 (2003)、余文忠 (2000) 和吴应明 (2003) 的风火山隧道的地质状况调查资料<sup>[10-12]</sup>可知, 风火山隧道属于低高山区, 地形起伏较大, 地表冲沟较为发育, 隧道通过部位山顶最高海拔为 4996 m, 相对高差约为 110 m, 进口里程 DK1159+000, 出口里程 DK1160+338, 全长 1338 m, 其纵剖面如图 1 所示。

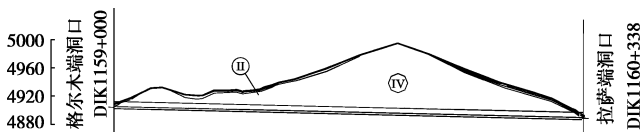


图 1 风火山隧道纵剖面图

Fig. 1 Longitudinal profile of Fenghuo Mountain tunnel

根据五道梁气象站以及七十年代风火山临时气象观测资料, 风火山地区年平均气温 $-6.11^{\circ}\text{C}$ , 极端最高气温 $23.2^{\circ}\text{C}$ , 极端最低气温 $-37.7^{\circ}\text{C}$ 。风火山主要地层为第四系全新统洪积和坡积粉质黏土, 下伏第三系砂岩、泥岩。砂岩和泥岩为风火山隧道通过的主要岩层, 基本以砂岩为主, 夹泥岩层, 节理裂隙较发育。风火山隧道为高原多年冻土隧道, 其洞身全部位于冻岩之中, 进出口端含土冰层、饱冰和富冰冻土发育: 进口山坡为阴坡, 多年冻土上限 $1.45\sim 1.8\text{ m}$ ; 出口山坡为阳坡, 多年冻土上限 $1.2\sim 1.5\text{ m}$ ; 隧道洞身通过的基

岩多为少冰和多冰冻土, 基岩风化层厚度一般 $8.0\sim 10.0\text{ m}$ , 局部基岩风化层中发育 $1.0\sim 2.5\text{ m}$ 厚的富冰和饱冰冻土, 多年冻土上限一般 $1.5\text{ m}$ 左右。

由于隧道处于低温基本稳定区, 所以设计时采用保护冻土的原则<sup>[10]</sup>。设计从应用隔热保温技术、加强防排水及优化衬砌结构等方面出发, 采取了综合防治措施。在两层衬砌之间铺设保温层, 如图 2 所示。保温层采用聚氨脂泡沫板, 洞外预制, 其规格为 $1900\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ , 主要性能为: 保温层导热系数 $\lambda$ 小于 $0.03\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ , 抗压强度大于等于 $0.5\text{ MPa}$ , 体积吸水率低于 $3\%$ , 自重大于 $60\text{ kg}/\text{m}^3$ , 弹性模量 $E$ 为 $7\sim 10\text{ MPa}$ , 老化寿命高于 $50\text{ a}$ <sup>[13]</sup>。

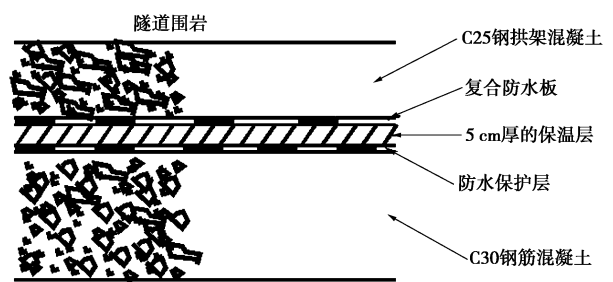


图 2 两层衬砌之间铺设保温层的示意图

Fig. 2 Insulation layer between two linings

### 2 计算理论

在寒区, 无论是天然条件下的浅层岩土或人工开挖具有自然通风的地下洞室围岩每年均要发生冻结和融化, 所以本问题应该是具有相变的传热问题。带相变瞬态温度场问题的热量平衡控制微分方程<sup>[9]</sup>:

在 $\Omega_f$ 内,

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \right), \quad (1)$$

在 $\Omega_u$ 内,

$$C_u \frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial z} \right), \quad (2)$$

式中, 符号 $f, u$ 分别表示冻、融状态,  $T_f, C_f, \lambda_f$ 分别为冻结区 $\Omega_f$ 内围岩的温度、体积比热和导热系数, 带“ $u$ ”者为融区 $\Omega_u$ 内的相应物理量。

在移动边 $s(t)$ 上, 必须满足连续条件和守恒条件, 即

$$T_f(s(t), t) = T_u(s(t), t) = T_m, \quad (3)$$

$$\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial n} - \lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial n} = L \frac{ds(t)}{dt}, \quad (4)$$

式中,  $T_m$ 为冻结峰面温度, 由岩土性质和岩土的含水率确定,  $L$ 为含水岩土的相变潜热。

固定边界上的边界条件为

$$T = T_a, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T_a - T), \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为常数,  $T_a$  为环境温度。

初始条件为:

在  $\Omega_u$  内,

$$T_u|_{t=0} = T_0, \quad (6)$$

此时  $T_0$  为正值; 或在  $\Omega_f$  内,

$$T_f|_{t=0} = T_0, \quad (7)$$

此时  $T_0$  为负值。

假设相变是发生在  $T_m$  附近的一个温度范围内 ( $T_m \pm \Delta T$ )。在构造等价热容时还必须计入  $\Delta T$  的影响, 构造的热容表达式和导热系数的表达式为<sup>[6]</sup>:

$$C = \begin{cases} C_f & (T < T_m - \Delta T), \\ \frac{L}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} & (T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T), \\ C_u & (T > T_m + \Delta T); \end{cases} \quad (8)$$

和

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_f & (T < T_m - \Delta T), \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & (T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T), \\ \lambda_u & (T > T_m + \Delta T). \end{cases} \quad (9)$$

应用式 (8) ~ (9), 将式 (1) ~ (4) 简化为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (10)$$

由于围岩的比热和导热系数是随着温度的变化而变化的, 加上两相界面的位置也不是固定的, 因此, 界面的能量守恒条件是非线性的。所以该问题在数学上是一个强非线性问题。无法获得解析解, 故采用数值计算方法获得数值解。本文采用伽辽金法, 可得该问题的有限元计算公式为

$$[M] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{F\}, \quad (11)$$

式中,

$$M_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} CN_i N_j d\Omega, \quad (12)$$

$$K_{ij} = \sum \int_{\Omega^e} \lambda \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega + \sum \int_{\Omega^e} \lambda \left( \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega, \quad (13)$$

$$F_i = \sum \int_{\Gamma^e} \alpha T_a N_i d\Gamma, \quad (14)$$

式中,  $N_i, N_j$  为单元形函数,  $\Gamma^e, T_a$  为单元与大气接触的边界及大气温度。

计算时, 首先根据初始温度条件, 确定冻结峰面的位置, 各个单元的初始状态, 确定各个单元的体积

比热和导热系数, 然后进行一个时间步计算。根据上一个时间步的计算结果的温度, 再确定冻结峰面的位置, 各个单元的状态, 从而确定各个单元的体积比热和导热系数, 又进行一个时间步计算。这样, 直到所要计算的时间点时为止。

### 3 计算分析

#### 3.1 计算模型

风火山隧道位于不同级别的围岩中。而隧道围岩的级别不同, 其隧道衬砌尺寸也有所不同。但是, 隧道衬砌尺寸差别不是很大, 而且与温度场有主要关系的保温材料厚度是一样的, 所以为了简化模型, 在计算中隧道衬砌结构均按照如图 3 所示的结构来分析。

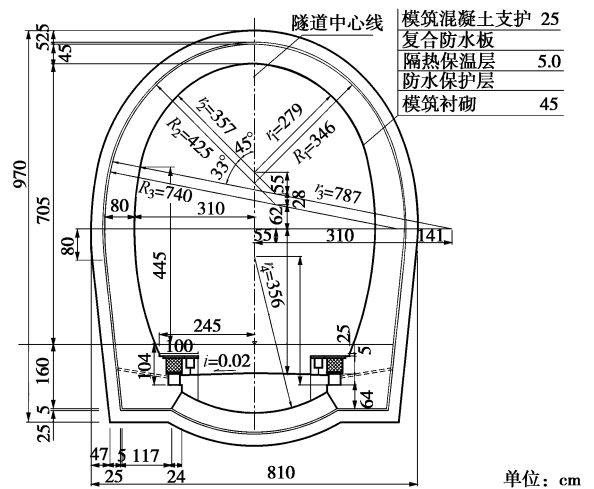


图 3 风火山隧道的衬砌结构图

Fig. 3 Structure of Fenghuo Mountain tunnel

由图 2 还可以看出, 在保温层内外都有一层防水层, 由于厚度较小, 对温度影响也较小, 因此计算时这两层防水层忽略不计。在计算时将风火山整个隧道围岩划分了 86904 个单元, 98262 个节点; 隧道内衬砌划分了 17340 个单元, 24720 个节点; 保温材料层划分了 6798 个单元, 6528 个节点; 隧道外衬砌划分了 13056 个单元, 20394 个节点; 隧道内空气划分了 21420 个单元, 26368 个节点; 共计 145248 个单元和 156766 个节点。其计算模型和单元划分如图 4 所示。

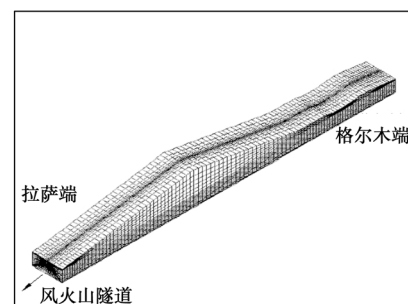


图 4 计算模型和单元划分

Fig. 4 Computational model and element meshes

### 3.2 计算参数及条件

计算域的初始温度  $T_0$ , 根据风火山地区的平均地温为  $-3.0^{\circ}\text{C}$ , 然后冻土中按 2.5% 的地热梯度增加可得到隧道围岩的初始温度。计算模型底面的地热热流密度  $q=0.06\text{ W/m}^2$ 。保温材料的导热系数  $\lambda$  为  $0.03\text{ (W/(m}\cdot^{\circ}\text{C))}$ , 厚度  $h$  为  $5\text{ cm}$ 。风火山隧道围岩的热容、热传导系数和未冻水含量与温度的关系根据文献[5]计算。其中的参数同样根据隧道的围岩特点, 查得如下:  $\lambda_s=3.0\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $\lambda_l=2.22\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $\lambda_w=0.55\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $C_w=4.182\text{ kJ/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $C_{us}=0.84\text{ kJ/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $C_{fs}=0.75\text{ kJ/(kg}\cdot^{\circ}\text{C)}$ 。根据现场实测资料可知, 风火山隧道的 DK1159+000~DK1159+440 和 DK1160+290~DK1159+360 两段的体积含水率为 50%, 水份扩散系数  $D$  为  $2.2\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ ; 其余地段的体积含水率为 30%, 水份扩散系数  $D$  为  $6.6\times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 。风火山地区的年平均气温为  $-6.11^{\circ}\text{C}$ , 空气与山顶的对流换热系数  $\alpha=15.0\text{ (W/(m}^2\cdot\text{k))}$ [14]。

在 2004 年以后, 隧道完全贯通, 施工完成, 所以在 2004 年的气温是在隧道内空气与围岩对流换热条件下的气温, 具有代表意义。通过计算, 风火山隧道 11 个测点在 2004 年的实测月平均气温和气温月较差如图 5 和图 6 所示。

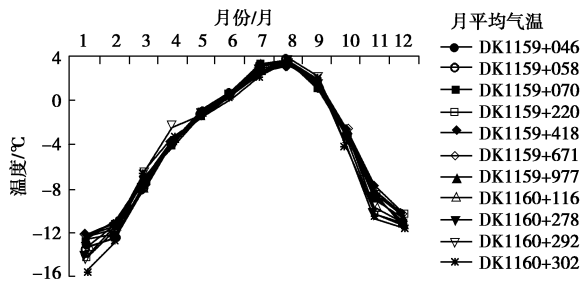


图 5 2004 年隧道内的月平均气温

Fig. 5 Monthly average air temperatures inside the tunnel in 2004

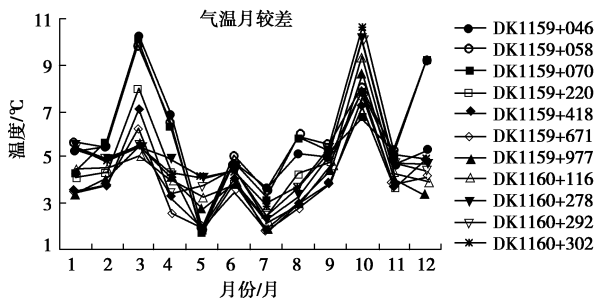


图 6 2004 年隧道内的气温月较差

Fig. 6 Monthly differential air temperatures inside the tunnel in 2004

由图 5 和图 6 可以看出, 各个测点的月平均气温  $T_1$  是不等的, 月较差  $A$  也不等的, 所以隧道各个断面的内部边界条件也是不同的。考虑气候变暖 50 a 升高

$2.6^{\circ}\text{C}$ , 则隧道内部在未来 50 a 的气温边界条件为

$$T_a = T_1 + \frac{2.6}{50 \times 8760} \times t_h + A \sin\left(\frac{2\pi}{720} t_h\right), \quad (15)$$

式中,  $T_1$  为月平均气温,  $A$  为月较差,  $t_h$  为时间步长 (小时)。隧道内部没有监测的断面的边界条件可用相邻监测断面数据的插值得到。

根据气候资料, 风火山地年平均气温为  $-6.11^{\circ}\text{C}$ , 年较差为  $24.0^{\circ}\text{C}$ 。所以, 在隧道的顶面, 有太阳辐射以及植被的影响, 根据中国科学院寒区旱区环境与工程研究所吴紫汪研究员的研究成果[15], 其气温边界条件为

$$T_a = -6.11 + 2.5 + \frac{2.6}{50 \times 8760} \times t_h + 12 \sin\left(\frac{2\pi}{8760} t_h\right). \quad (16)$$

空气与围岩的对流换热系数  $\alpha=15.0\text{ (W/m}^2\cdot\text{k)}$ [14]。

### 3.3 计算结果分析

将以上的各种参数、边界条件和初始条件, 代入有限元公式中, 进行有限元计算。由于隧道较长, 如果按照横向和纵向 1:1 的比例画出图形, 则图形不清楚, 所以以下的温度分布图都是按照横向和纵向 5:1 的比例画出。为了验证计算理论、模型、参数和条件的正确性, 将 2004 年 9 月 30 日和 12 月 30 日的计算结果与对应时刻的现场观测值进行了分析比较, 如图 7 (a) 和图 7 (b) 所示。

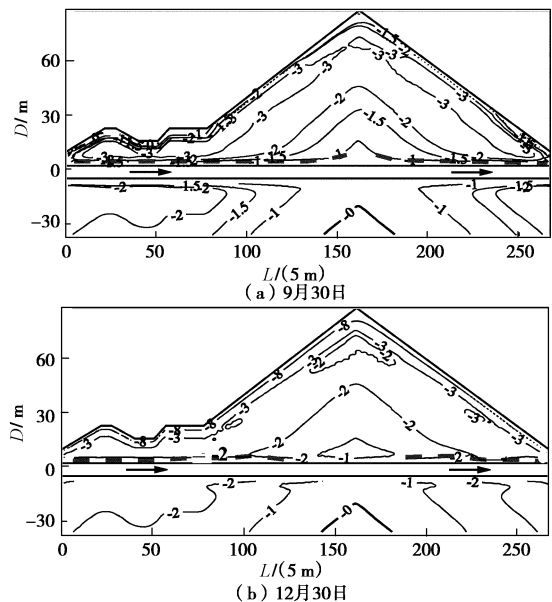


图 7 风火山隧道 2004 年的温度分布图

Fig. 7 Temperature distributions of rock surrounding Fenghuo Mountain tunnel in 2004

从图 7 可以看出, 风火山隧道围岩没有融化。图 7 (a) 中, 粗虚线为实际观测值, 实线为计算值, 由此可以看出, 2004 年 9 月 30 日,  $-1.0^{\circ}\text{C}$  的粗虚线和实线等值线基本重合。从图 7 (b) 可以看出, 2004 年 12 月 30 日,  $-2.0^{\circ}\text{C}$  粗虚线和实线等值线之间的距离很

小。这说明本文的计算理论、模型、参数和条件是可靠的，可正确预测分析围岩的温度特性。

考虑气候变暖 50 a 升高 2.6℃，取出隧道围岩第 2009、2014、2034 和 2054 年 7 月 15 日和 9 月 30 日的温度分布，如图 8~11 所示，具体分析如下：

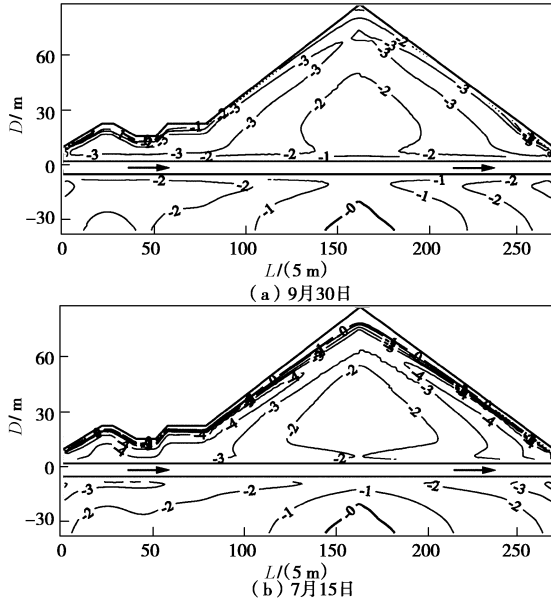


图 8 风火山隧道 2009 年的温度分布图

Fig. 8 Temperature distributions of rock surrounding Fenghuo Mountain tunnel in 2009

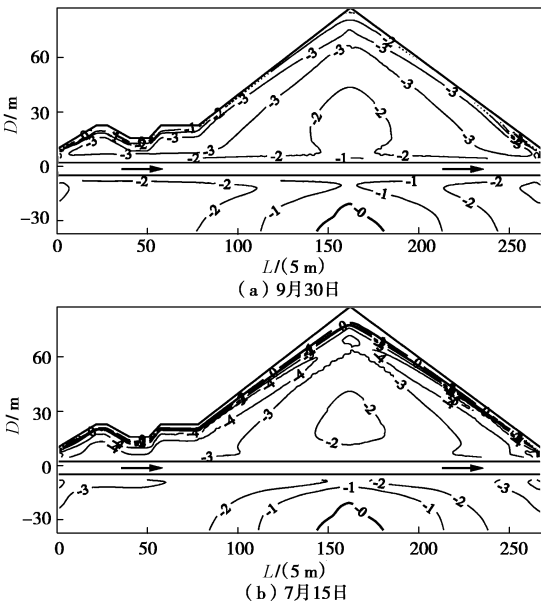


图 9 风火山隧道 2014 年的温度分布图

Fig. 9 Temperature distributions of rock surrounding Fenghuo Mountain tunnel in 2014

从图 7~11 可以看出，风火山隧道衬砌附近围岩在 2009~2054 年间没有出现季节性融化。

比较图 7 (a)~9 (a) 在 9 月 30 日的温度分布图可知，在 2004 年到 2014 年间，隧道附近围岩的 -1℃ 逐渐减少。这说明从第 1 个冻融循环到第 10 个冻融

循环，虽然气候变暖（气温 50 年升高 2.6℃），但冻结指数（指一年中连续高于 0℃ 气温的持续时间和其数值乘积的总和）大于融化指数（指一年中连续低于 0℃ 气温的持续时间和其数值乘积的总和），因此隧道内空气流动对围岩起着降温作用。相反，比较图 9 (a)~11 (a) 在 9 月 30 日的温度分布图可知，在 2014 年到 2054 年间，隧道附近围岩的 -1℃ 的温度范围逐渐增加。这说明从第 10 个冻融循环到第 50 个冻融循环，由于气候变暖（气温 50 年升高 2.6℃），使融化指数大于冻结指数，因此隧道内空气流动对围岩起着降温作用。

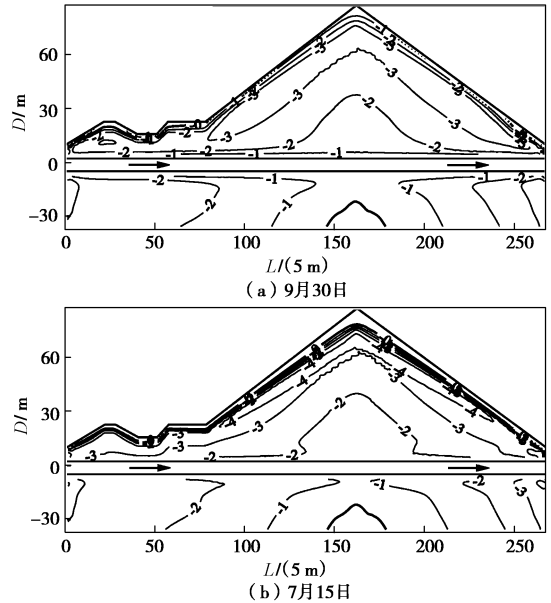


图 10 风火山隧道 2034 年的温度分布图

Fig. 10 Temperature distributions of rock surrounding Fenghuo Mountain tunnel in 2034

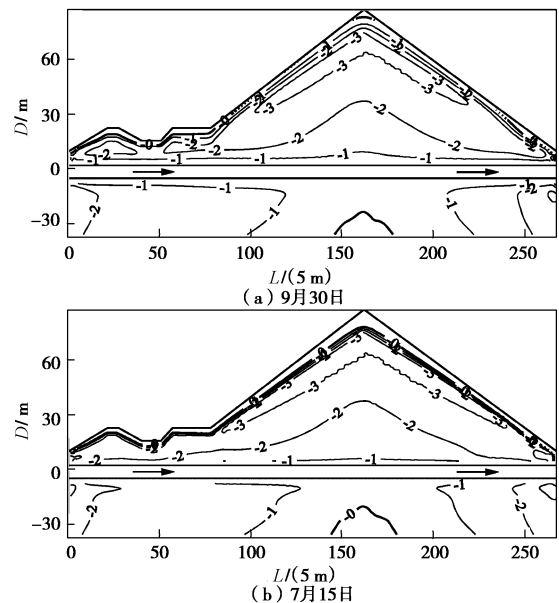


图 11 风火山隧道 2054 年的温度分布图

Fig. 11 Temperature distributions of rock surrounding Fenghuo Mountain tunnel in 2054

同理, 比较图 7 (b) ~11 (b) 7 月 15 日的温度分布可以得到相同的结论。

## 4 结 论

(1) 本文提出的计算理论、模型、参数和条件是可靠的, 可为工程设计提供理论计算依据。

(2) 即使考虑气候变暖——50 a 升高 2.6℃, 风火山隧道衬砌附近围岩在 2054 年内还是不会出现季节性融化。

(3) 从第 1 个冻融循环到第 10 个冻融循环, 风火山隧道内空气流动对围岩起着降温作用; 从第 10 个冻融循环到第 50 个冻融循环, 隧道内空气流动对围岩起着加热作用。

### 参考文献:

- [1] LAI Y M, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold-region tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, **29**(1): 89 - 96.
- [2] BONACINA C, COMINI G, FASANO A, et al. Numerical solution of phase-change problems[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1973, **16**(6): 1852 - 1832.
- [3] COMINI G, GUIDICE Sdel, LEWIS R W, et al. Finite element solution of nonlinear heat conduction problems with special reference to phase change[J]. Inter J for Numerical Methods in Engineering, 1974, **8**(6): 613 - 624.
- [4] 何春雄, 吴紫汪, 朱林楠. 大坂山隧道围岩冻融状况变化趋势的初步分析预测[C]//第五届全国冰川冻土学大会论文集(上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 419 - 425. (HE Chun-xiong, WU Zi-wang, ZHU Lin-nan. Preliminary prediction for the freezing-thawing situation in rock surrounding Dabanshan tunnel[C]// Proc of the Fifth National Conference on Glaciology and Geocryology. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 419 - 425. (in Chinese))
- [5] 何春雄, 吴紫汪, 朱林楠. 严寒地区隧道围岩冻结状况分析的对流-传导模型[J]. 中国科学(D 辑), 1999, **29**(增 1): 1 - 7. (HE Chun-xiong, WU Zi-wang, ZHU Lin-nan. A convection-conduction model for analysis of the freeze-thaw conditions in the surrounding rock wall of a tunnel in permafrost regions[J]. Science in China (Series D), 1999, **29**(S1), 1 - 7. (in Chinese))
- [6] LAI Y M, WU Zi-wang, ZHU Yuan-lin, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature, seepage and stress fields in cold-region tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, **13**(4): 435 - 436.
- [7] LAI Yuan-ming, LIU Song-yu, WU Zi-wang, et al. Approximate analytical solution for temperature fields in cold regions circular tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, **13**(4): 43 - 49.
- [8] 乜凤鸣. 寒冷地区隧道气温状态[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(4): 450 - 453. (MIE Fong-ming. The air temperature situation in cold regions tunnels[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **10**(4): 450 - 453. (in Chinese))
- [9] 张学富, 赖远明, 喻文兵, 等. 寒区隧道温度场三维空间非线性分析[J]. 土木工程学报, 2004, **37**(2): 47 - 53. (ZHANG Xue-fu, LAI Yuan-ming, YU Wen-bing, et al. Nonlinear analysis for the three-dimensional temperature fields in cold region tunnels[J]. Journal of Civil Engineering, 2004, **37**(2): 47 - 53. (in Chinese))
- [10] 苏新民. 多年冻土区隧道设计特点[J]. 铁道工程学报, 2003(增): 106 - 107. (SU Xin-min. The tunnel-design characteristic in permafrost[J]. Journal of Railway Engineering, 2003(S): 106 - 107. (in Chinese))
- [11] 余文忠. 风火山隧道施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2002, **4**: 7 - 11. (YU Wen-zhong. The construction technology of Fenhua mountain tunnel[J]. Railway Architecture Technology, 2002, **4**: 7 - 11. (in Chinese))
- [12] 吴应明. 高原多年冻土隧道施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2003, **1**: 5 - 9. (WU Ying-ming. The construction technology of tunnel in the plateau-permafrost[J]. Railway Architecture Technology 2003, **1**: 5 - 9. (in Chinese))
- [13] 周晋筑. 昆仑山隧道洞内防排水及衬砌隔热保温层施工技术[J]. 冰川冻土, 2003, **6**: 45 - 50. (ZHOU Jin-zhu. The construction technology of defending draining off water in the hole of Kunlun Mountain tunnel and insulation layer of linings[J]. Glaciology and Geocryology, 2003, **6**: 45 - 50. (in Chinese))
- [14] 张正荣. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社. 1989. (ZHANG Zheng-rong. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989. (in Chinese))
- [15] 吴紫汪, 程国栋, 朱林楠, 等. 冻土路基工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1988. (WU Zi-wang, CHENG Guo-dong, ZHU Lin-nan, et al. Geocryology roadbed engineering[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988. (in Chinese))