

考虑通风影响的寒区隧道围岩温度场及防寒保温材料敷设长度研究

谭贤君¹, 陈卫忠^{1,2}, 于洪丹¹, 刘豆豆³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. 山东财政学院 工商管理学院, 山东 济南 250014)

摘要: 基于流体力学、传热学和空气动力学的基本原理与方法, 推导出考虑通风影响的寒区隧道围岩温度场模型, 该模型包括: 围岩温度场控制方程、隧道内风温场控制方程以及风流场湍流控制方程。在此基础上, 采用数值分析方法探讨西藏嘎隆拉隧道通风条件下围岩温度场的变化规律及其防寒保温措施。研究结果表明: 隧道未开挖前, 随着季节的变化, 山体浅部温度出现明显变化, 该变化较明显的深度为 18 m, 当岩体埋深大于 18 m 后, 岩体温度随季节的变化幅值小于 0.5 °C; 隧道贯通后, 由于通风影响, 在环境温度最冷月(1 月), 隧道进出口段一定范围内的围岩温度出现了 0 °C 以下的不利工况, 进一步研究显示: 在嘎隆拉隧道进口端 600 m 和出口端 400 m 范围内, 二衬表面敷设 6 cm 厚的聚酚醛保温材料, 可以有效地防止嘎隆拉隧道衬砌和围岩发生冻融破坏。

关键词: 隧道工程; 寒区隧道; 湍流; 风流场; 温度场

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)07-1400-10

STUDY OF TEMPERATURE FIELD OF TUNNEL SURROUNDING ROCK IN COLD REGIONS CONSIDERING EFFECT OF VENTILATION AND LENGTH DESIGN OF INSULATION MATERIAL

TAN Xianjun¹, CHEN Weizhong^{1,2}, YU Hongdan¹, LIU Doudou³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 3. Business Administration Institute, Shandong Institute of Finance, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Based on the basic principle and method of fluid mechanics, heat transfer and dynamics of air, a cold temperature field model is deduced. The impact of surrounding rock tunnel ventilation is considered in this model. This model includes: temperature control equations of surrounding rock, air temperature field control equations in tunnel and wind flow control equations of turbulence field. On this basis, numerical analysis method is used to discuss the temperature field change law of surrounding rock and thermal insulation measures of Galongla tunnel in Tibet under the condition of ventilation. The study results show that: before tunnel excavation, there is a clear temperature fluctuation in the shallow mountain changing with the change of season; and the apparent change appears at the depth of 18 m. When rock depth is more than 18 m, the temperature fluctuation amplitude of rock

收稿日期: 2012-06-28; **修回日期:** 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072238, 51208499); 国家杰出青年基金资助项目(51225902)

作者简介: 谭贤君(1984-), 男, 博士, 2005年毕业于石家庄铁道学院地下工程专业, 现任副研究员, 主要从事寒区隧道及地下工程 THM 三场耦合理论与数值仿真方面的研究工作。E-mail: xjtan@whrsm.ac.cn

mass with the change of season is less than 0.5 . Due to ventilation effect , the temperature of surrounding rock presents the adverse conditions of below 0 within the scope of inlet and outlet sections of tunnel at the most coldest month(January) after the breakthrough of tunnel. Further research shows that :at the inlet section of 600 m and outlet section of 400 m in Galongla tunnel , heat preservation material such as phenolics with the thickness of 6 cm is laid on secondary lining surface , which can effectively prevent the Galongla tunnel lining and rock from freeze-thaw damage.

Key words : tunnelling engineering ; cold region tunnel ; turbulence ; airflow field ; temperature field

1 引言

随着我国经济建设的蓬勃发展及西部大开发政策的进一步落实,在高海拔、严寒等条件下修建隧道及其他交通工程的数量在不断增加。目前,我国东北高纬度和西部高原地区共修建了数十座寒区隧道,如:嫩林线的西岭 1[#]及 2[#]隧道、西罗奇 2[#]隧道、白卡门隧道,卡图们的土门隧道,西张线的大坂山隧道、国道 317 线的鹫山隧道、青藏铁路线上的昆仑山隧道、风火山隧道等。迄今为止,在我国东北和西北修建的多个隧道中,由于冻害的原因,有很多隧道将近半年以上的时间不能使用,有些完全报废。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,在较多隧道设置了电加热装置,投入的整治费用十分惊人^[1-2]。因此,针对该类恶劣环境下隧道结构冻胀破坏机制及其防寒保温技术的研究已显得异常迫切。

寒区隧道冻害产生的根本原因为:随着自然界四季交替,隧道内温度会出现从 0 以上到 0 以下反复变化的情况,使得隧道围岩经历着从非冻结状态到冻结状态以及再次融化的过程。因此,准确掌握隧道内围岩的温度场对于冻胀机制的研究以及解决实际工程冻胀问题具有重要意义。

多年来,赖远明等^[3-8]对寒区隧道的围岩温度场进行了大量研究,取得了很多可喜的成果,X. J. Tan 等^[9-12]也先后针对寒区隧道的特点,对低温相变岩体的温度-渗流耦合特性、冻融劣化规律和围岩导热系数取值方法等做了相关探索。在隧道壁面温度确定的情况下,利用上述研究成果能很容易得到围岩的温度场,进而掌握寒区隧道围岩的冻融情况。然而,为了保证隧道内空气新鲜,一般都会保证有一

定速度的风流存在,风流与隧道壁面会出现热交换,从而改变围岩的温度场,这一点对于寒区隧道而言特别明显,因为寒区隧道洞外环境温度低,而隧道内由于山体内部热能的影响,围岩温度相对而言要高很多,这样,当洞外冷空气吹入隧道内后,就会发生强烈的热交换。因此,要想准确得到隧道内衬砌及围岩的温度分布规律,就必须对隧道内风场及其与围岩的热交换情况进行深入分析。

目前,关于通风的研究成果,主要集中在 2 个方面:一是城市地铁风流分析及火灾规律研究,二是建筑节能保温与室内环境优化分析,直接针对寒区隧道风场及其与围岩热交换规律的研究并不多见^[13-15]。现有的研究成果中,由于研究对象和目的的不同,与笔者想要的结果还有一定的差距。譬如:对于地铁通风及火灾的研究,围岩壁面的热边界条件,基本上都是采用的绝热边界,而对于建筑节能、室内通风的研究,则不考虑长距离通风的问题。

鉴于此,本文基于流体力学、传热学和空气动力学的基本原理与方法,推导出考虑通风影响的寒区隧道围岩温度场模型,该模型包括:围岩温度场控制方程、隧道内风温场控制方程以及风场流场控制方程。在此基础上,采用数值分析方法探讨了西藏嘎隆拉隧道通风条件下围岩温度场的变化规律及其防寒保温措施。

2 寒区隧道围岩温度场控制方程

对于隧道工程而言,其温度场包括 2 个部分:一是山体部分,即所谓固体区域(围岩)的温度场;另一部分是空气部分,即所谓隧道净空的温度场,只有全面考虑围岩部分的地热、隧道净空部分的通风等因素的影响,才能正确求解隧道壁面附近的温度场,从而真实地了解围岩的冻融状态。下面将这 2 个部分分开考虑。

2.1 围岩温度场控制方程

围岩温度控制方程可写为

$$C_{eq} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla[-\lambda_e \nabla T_s] = Q_e \quad (1a)$$

式中： T_s 为围岩温度； C_{eq} 为岩体等效体积热容， λ_e 为岩体导热系数， Q_e 为岩体内部加热(放热)使控制体产生(消耗)的热量。这些参数中，部分参数与岩体的温度密切相关，具体表达式如下：

$$\left. \begin{aligned} C_{eq} &= \begin{cases} C_a = C_1 + \rho_w L_r \frac{\partial \theta_w}{\partial T} & (T_s \leq T_0) \\ C_2 & (T_s > T_0) \end{cases} \\ \lambda_e &= \begin{cases} \lambda_1 & (T_s \leq T_0) \\ \lambda_2 & (T_s > T_0) \end{cases} \\ Q_e &= \begin{cases} Q_1 & (T_s \leq T_0) \\ Q_2 & (T_s > T_0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1b)$$

式中： C_1, C_2 分别为已冻区和未冻区岩体的等效体积热容，表示的是密度与体积热容的乘积； ρ_w 为水的密度； L_r 为相变潜热； θ_w 为水的体积分数； λ_1, λ_2 分别为已冻区和未冻区岩体的热传导系数； Q_1, Q_2 分别为已冻区和未冻区内部加热(放热)使控制体产生(消耗)的热量； T_0 为冰/水相变点温度，在本文中取 $T = 0$ 。

2.2 隧道净空温度场控制方程

笔者^[16]详细推导了寒区隧道风流场湍流控制模型和风温场控制方程，并通过研究发现空气湿度对围岩温度场影响很小，因此。限于文章篇幅，本文不再作大量推导，直接引用该研究成果，并且不再考虑空气湿度影响。其具体表达形式如下：

(1) 连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

式中： \vec{u} 为空气运动速度； ρ 为空气的密度，可以由气体的状态方程确定。

(2) 运动方程为

$$\begin{aligned} \nabla(\rho \vec{u}) \vec{u} = \\ \nabla \left\{ -p \mathbf{I} + (\mu + \mu_t) \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \vec{u}) \mathbf{I} \right] - \frac{2\rho k}{3} \mathbf{I} \right\} + \\ \vec{S}_M \end{aligned} \quad (3)$$

式中： p 为气体的压强； μ 为空气的动力黏滞系数； μ_t 为涡黏系数，也称湍流黏性系数； $\vec{S}_M = \rho X - \partial(\mu' \nabla \vec{u}) / \partial x$ ，其中， X 为沿坐标方向的体积力， μ' 为第二黏度系数，它是一个将应力与体积变形联系起来的量； \mathbf{I} 为单位矩阵。有关第二黏度系数的研究较少，因为实际应用中其作用很小。对于气体，

一个有效的近似取值为 $\mu' = \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{u})$ 。

(3) 能量方程为

$$\nabla(\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \left[\left(\lambda_g + c_p \frac{\mu_t}{Pr_T} \right) \nabla T \right] + Q_T \quad (4)$$

式中： c_p 为空气的体积热容， λ_g 为空气的导热系数， Pr_T 为湍流普朗特数， Q_T 为内部热源， T 为空气温度。

(4) 理想气体的状态方程为

$$p = nRT/V \quad (5)$$

式中： n 为理想气体中气体物质的量(mol)； R 为比例系数(J/(mol·K))，不同状况下数值有所不同，在摩尔表示的状态方程中， R 为比例常数，对任意理想气体而言， R 为定值，取常值 8.314； V 为理想气体的体积(L)。

式(3)~(5)为经过时均化处理后控制湍流运动的几个基本方程。在这组方程中除了时均速度、压力等基本变量外，尚未确定的未知量还有湍流黏性系数 μ_t 和湍流脉动动能 k ，如果能确定计算域内及其边界上的量值，那么上述方程完全封闭，通过数值计算就能求得湍流运动的解。同样按照笔者^[16]的思路，采用两方程湍流模型。

(5) k - ε 两方程湍流模型为

$$\left. \begin{aligned} \nabla(\rho k) \vec{u} &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \\ &\mu_t P(\vec{u}) - \frac{2\rho k}{3} \nabla \vec{u} - \rho \varepsilon \\ \nabla(\rho \varepsilon) \vec{u} &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \\ &\frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} \left[\mu_t P(\vec{u}) - \frac{2\rho k}{3} \nabla \vec{u} \right] - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \right\} \quad (6a)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} P(\vec{u}) &= \nabla \vec{u} : [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] - \frac{2}{3} (\nabla \vec{u})^2 \\ \mu_t &= \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (6b)$$

式中： ε 为湍流脉动动能耗散； $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 均为经验常数，一般取 $C_\mu = 0.07, \sigma_k = 1.00, \sigma_\varepsilon = 1.30, C_{\varepsilon 1} = 1.44$ 和 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 。

3 数学模型有效性验证

D. Baly 等^[17]利用缩尺模型对室内混合对流进行了试验研究，得到了模型内的气流速度、空气温度

以及湍动能。考虑到该试验的典型性，下面应用本文推导的风流场湍流模型对该模型试验进行同等条件下的有限元分析。

3.1 试验概况

模型的长、宽、高分别为： $L=1.04\text{ m}$ ， $W=0.7\text{ m}$ ， $H=1.04\text{ m}$ 。进风口高度 $h_{in}=0.018\text{ m}$ ，进风速度 $U_{in}=0.57\text{ m/s}$ ，进风温度 $T_{in}=15^\circ\text{C}$ ，出口高度 $h_{out}=0.024\text{ m}$ 。混合对流试验模型如图 1 所示。该模型的地板温度 T_f 由加热系统始终保持为 35°C ，其余壁面温度 T_w 均为 15°C ，由此可得相应的进风口雷诺数 $Re=678$ ，阿基米德数 $Ar=0.0036$ 。

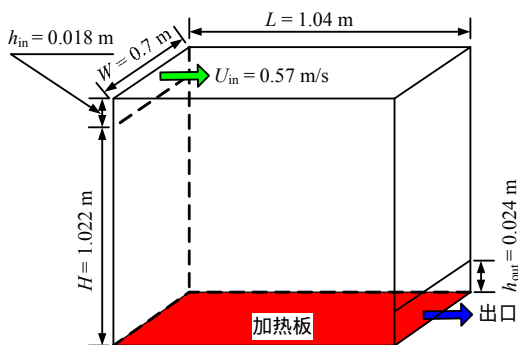


图 1 混合对流试验模型

Fig.1 Mixed convection experiment model

3.2 有限元计算定解条件与参数取值

有限元所用计算条件与试验中给出的完全相同，计算中用到的经验参数的取值见式(6)，固体与气体接触面换热系数采用温度壁面函数法得到。

D. Lacasse 等^[18]根据求解壁面处速度的壁面函数法，提出了温度壁面函数法求解总换热系数的方法。其具体表达式如下：

$$h = \frac{\rho c_p C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{T^+} \quad (7a)$$

式中： T^+ 为无因次温度，其表达式如下：

$$T^+ = \begin{cases} Pr\delta_w^+ & (\delta_w^+ < \delta_{w1}^+) \\ 15Pr^{2/3} - 500/(\delta_w^+)^2 & (\delta_{w1}^+ \leq \delta_w^+ < \delta_{w2}^+) \\ \ln(\delta_w^+)Pr/\kappa + \beta & (\delta_w^+ \geq \delta_{w2}^+) \end{cases} \quad (7b)$$

其中，

$$\delta_w^+ = \frac{\delta_w \rho C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\mu}, \delta_{w1}^+ = \frac{10}{Pr^{1/3}}, \delta_{w2}^+ = 10 \sqrt{10 \frac{\kappa}{Pr_\tau}} \quad (7c)$$

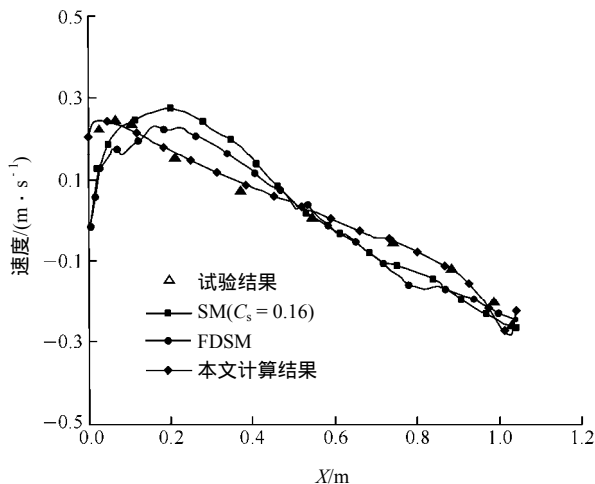
$$\beta = 15Pr^{2/3} - \frac{Pr_\tau}{2\kappa} \left[1 + \ln \left(1000 \frac{\kappa}{Pr_\tau} \right) \right]$$

式中： Pr 为普朗特数； δ_w^+ ， δ_{w1}^+ ， δ_{w2}^+ 和 β 均为与普朗特数 Pr 和湍流普朗特数 Pr_τ 相关的参数； κ 为卡曼常数。

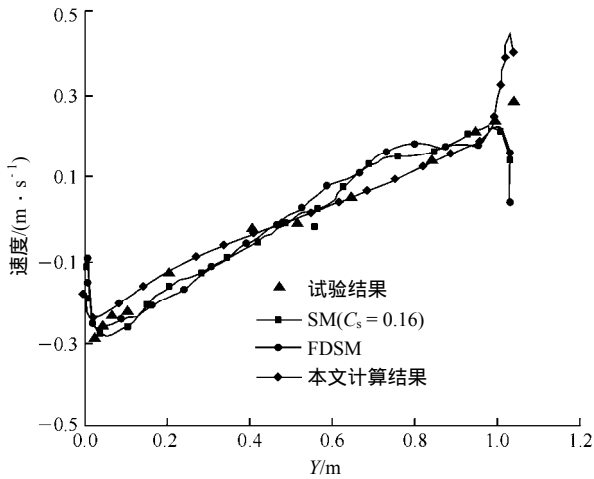
该方法的优点为：只要风流场湍流模型的计算参数确定，就可以得到固体与气体之间的热交换系数，不需要采用额外测试和假设来获取。

3.3 有限元与试验测量结果对比验证与分析

图 2、3 分别给出了不同截面上平均速度和温度的计算结果与实测值的比较图，另外，为了更好地对比分析，将 W. Zhang 和 Q. Y. Chen^[19]的研究成果也放在一起，一并讨论，图中 SM 为“司马格林斯基模型(Smagorinsky model)”的缩写，FDSM 为“过滤动态次网格尺度模型(filtered dynamic subgrid-scale model)”的缩写。从图 2 可以看到：本文计算得到的平均速度分布曲线与模型试验实测结果吻合较好，但在 $x=0.52\text{ m}$ 界面上计算得到的平均速度极值在靠近壁面位置要比实测值高，究其原因可能是实测值由于传感器布点位置和数量的限制，没能测出极值。W. Zhang 和 Q. Y. Chen^[19]在特定截面上的空气温度分布计算结果显示：其曲线形状与实测基本一致，只是各点温度值(包括温度极值)比实测值高出 1.7°C 左右，其解释是：“由于没有更详细的试验资料，无法得知当时外界的空气温度，所以认为，除了地板以外的其他壁面，在没有外热源的情况下，计算时都被假设为始终保持 15°C 而没有热量损失，可能与现场真实情况不相符，从而导致误差”。但从本文计算结果来看，之所以产生 1.7°C 左右的偏差，笔者更倾向于是由于 W. Zhang 和 Q. Y. Chen^[19]的模型与参数取值方法问题。因为采用本文建立的模型和取值方法得到的结果与实测结果很一致。



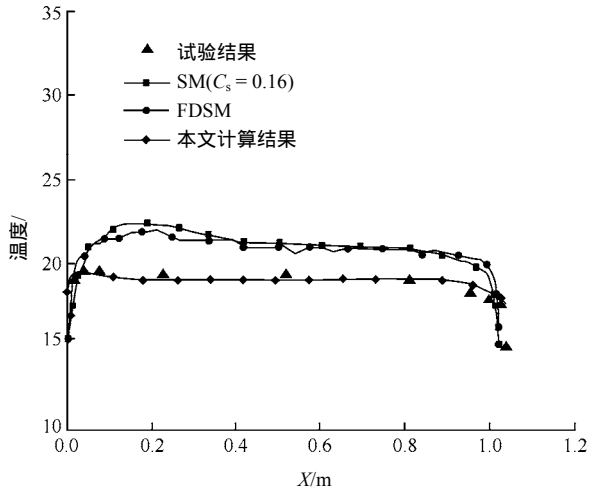
(a) $Y=0.52\text{ m}$ 截面



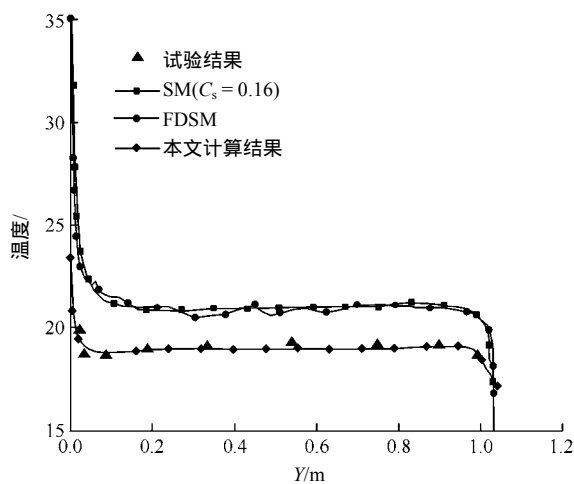
(b) X = 0.52 m 截面

图 2 不同截面处速度分布

Fig.2 Velocity distributions at different sections



(a) Y = 0.52 m 截面



(b) X = 0.52 m 截面

图 3 不同截面处温度分布

Fig.3 Temperature distributions at different sections

4 工程应用

4.1 计算模型

为了准确分析隧道建成后通风对围岩冻融范围的影响，必须认真考虑山体自身储热和当地气候条件等综合因素，因此，本次数值计算首先以隧道上方整个上覆山体和隧道下方 250 m 深度范围内的岩体作为研究对象，具体模型如图 4 所示，计算得到沿隧道轴线附近区域的初始地温场，然后，在此基础上，选取隧道横向或者纵向一定区域内的围岩，进行防寒保温措施研究。

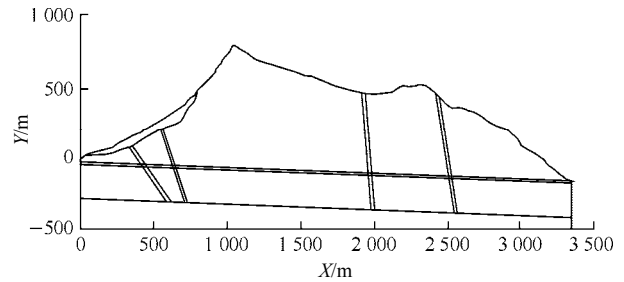


图 4 计算模型图

Fig.4 Calculation model diagram

4.2 计算参数和边界条件

(1) 计算参数

嘎隆拉隧道围岩地温实测与导热系数反演围岩的导热系数 λ_{ef} 是指每单位温度梯度下单位时间内通过单位面积岩土体的热量，单位为 $W/(m \cdot K)$ 。它的取值合理与否，直接关系到数值计算结果的准确性，因此，必须予以足够重视，谨慎对待。

目前，导热系数的取值有多种^[20-22]，如指数加权、体积加权平均等，但都是基于室内试验的结果或经验取值。由于嘎隆拉隧道目前还没有展开相应的研究，且现场地质条件复杂，所以本文围岩导热系数的值通过反演现场实测地温得到，虽然该方法较前者要费事费力，但是依据来源于现场，具有更高的可靠性。导热系数反演计算原理如图 5 所示，反演计算结果及与实测值的比较如图 6，7 所示。

其他计算参数

根据以往的研究成果，可以大致认定：在 1 a 内，大气的温度是周期性的按正弦(或余弦)规律随时间变化的，根据地勘报告，嘎隆拉隧道区域大气的极端温度变化取值为

$$T = 269 + 32.85 \sin\left(\frac{2\pi t}{360 \times 86400} + \pi/2\right) \quad (8)$$

式中： t 为时间(s)， T 为大气温度(K)。

围岩初始温度 T_0 按多年冻岩下限 1.5% 的地热梯度确定；根据地勘报告，温度垂直变化明显，其大致规律为：每升高 100 m，气温下降 0.74。根

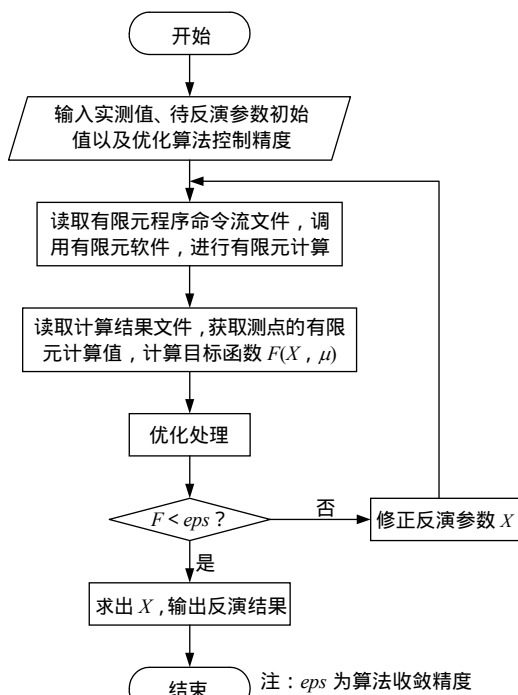


图 5 导热系数反演计算原理图

Fig.5 Schematic diagram for inversion of thermal conductivity coefficient

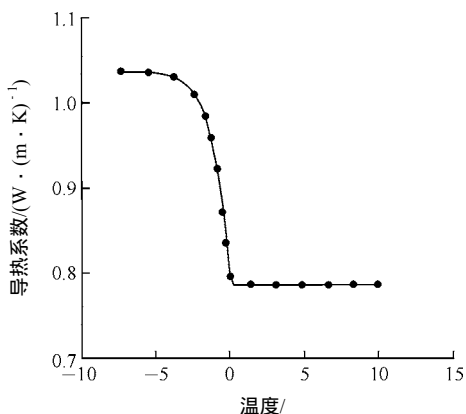


图 6 导热系数反演计算结果

Fig.6 Inversion results of thermal conductivity coefficient

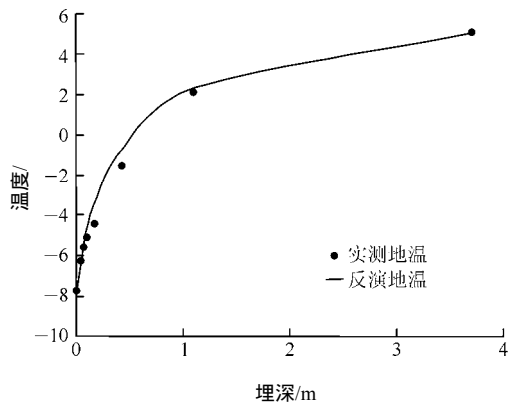


图 7 实测值与反演结果比较

Fig.7 Comparison between measured and inversion results

据地勘报告和相关室内试验，嘎隆拉隧道围岩主要

的物理参数取值见表 1。

表 1 主要计算物理参数取值

Table 1 Main physical parameters for calculation

材料名称	含水量 w/%	导热系数 $\lambda / (W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	比热容 $c_p / (J \cdot (m^3 \cdot K)^{-1})$
围岩	30	1.580	850
水	-	0.560	4 180
冰	-	2.240	2 090
福利凯保温材料	-	0.025	230

4.3 计算结果

(1) 嘎隆拉隧道初始温度场

图 8 为隧址区域山体 1 和 7 月的初始地温场。可以看出：山体地温场绝大部分区域在 1 a 内为恒温场，即温度不随季节的变化而变化，只在隧道表面很小的厚度内，山体的温度出现波动。就温度高低的具体值而言，笔者最关心的沿隧道轴线的温度最大值仅为 12 左右，究其原因，主要是隧址区域雨雪量极其丰富，山体围岩破碎，这在很大程度上降低了山体自身的储热。另外，通过对比还可以发现：山岭两侧山体表面温度差别明显，主要原因是该区域受印度洋暖湿气流与西南季风影响，印度洋暖湿气流沿雅鲁藏布江及其支流逆流而上，进入青藏高原东南内陆地区，气流强度由下游往上游逐渐减弱。同时，由于岗日嘎布山脉的阻挡，沿嘎弄曲逆流而上的水气不能过山脉进入波密，导致波密与墨脱形成 2 个不同的气候区。

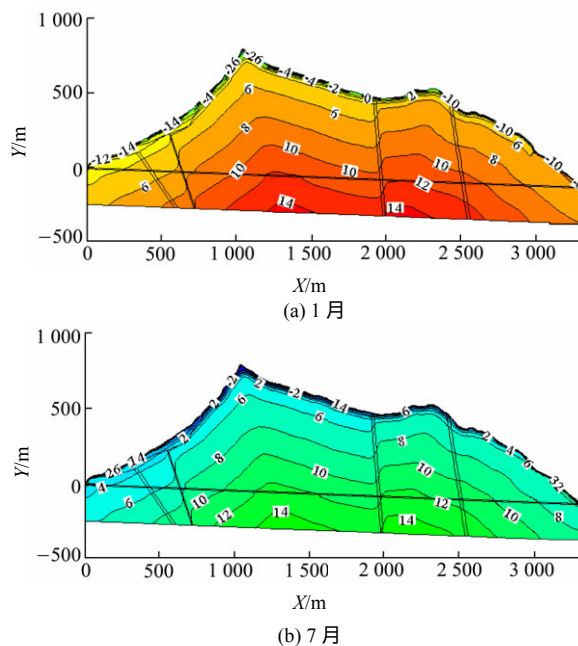


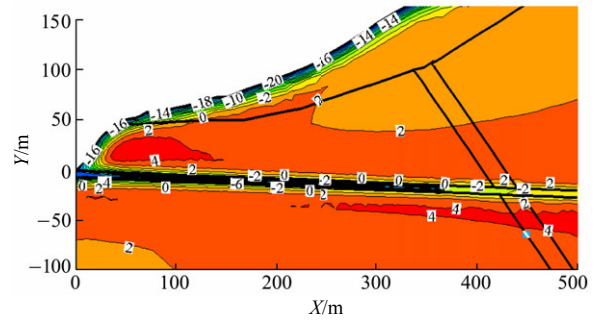
图 8 不同季节隧址区域山体初始地温(单位： °C)

Fig.8 Initial ground temperatures of Galongla tunnel area in different seasons(unit： °C)

(2) 嘎隆拉隧道运行期间围岩温度场

隧道贯通以后，由于通风的影响，围岩与隧道内空气之间会发生热交换，风速越大，则隧道外的冷空气进入隧道内的越多，围岩的温度变化也会越大。下面对不同风速条件下，围岩的温度场进行分析。需要指出的是，由于隧道较长，为了便于对比分析，下面只提取隧道进口段和出口段一定区域内温度分布图。

图 9 为隧道内不同风速条件下，嘎隆拉隧道 1 月(环境温度最冷月)进口段围岩和空气温度分布云图。下面以 4 等温线为例来说明围岩温度受隧道通风影响的规律。当风速为 6 m/s 时，围岩温度为 4 的区域还很大，当风速为 8 m/s 时，该区域有所减少，当风速为 10 m/s 时，该区域则进一步减少，而当风速为 12 m/s 时，该区域就已很小了，此时，离隧道表面很近的围岩已经处于负温状态，而隧道较深处的围岩温度则为 2 左右。

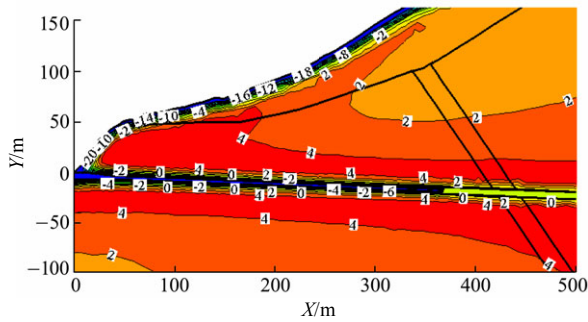


(d) 12 m/s

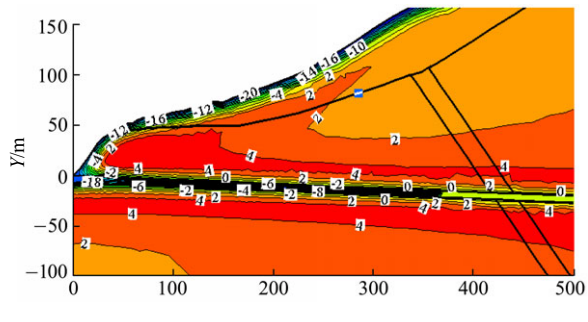
图 9 不同风速条件下隧道进口段(波密端)1 月份围岩温度分布云图(单位：)

Fig.9 Distribution nephogram of surrounding rock temperature of the tunnel entrance(Bomi side) in January under different wind speeds(unit：)

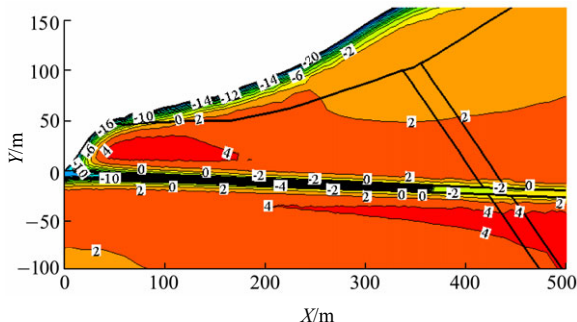
图 10 为隧道内不同风速条件下，嘎隆拉隧道 1 月(环境温度最冷月)出口段围岩和空气温度分布



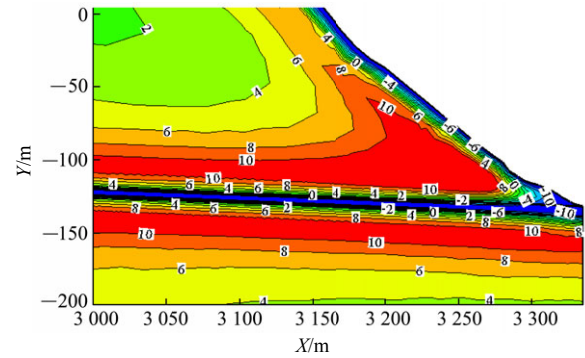
(a) 6 m/s



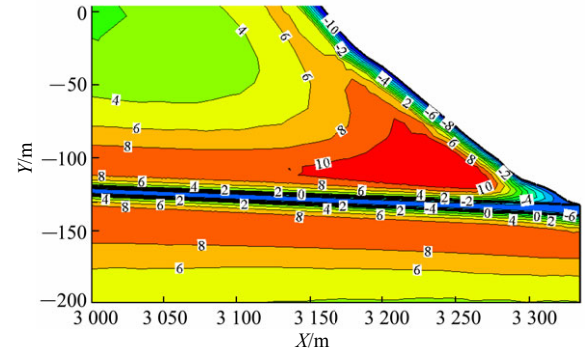
(b) 8 m/s



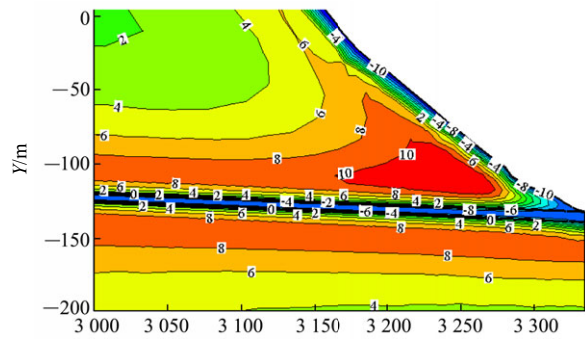
(c) 10 m/s



(a) 6 m/s



(b) 8 m/s



(c) 10 m/s

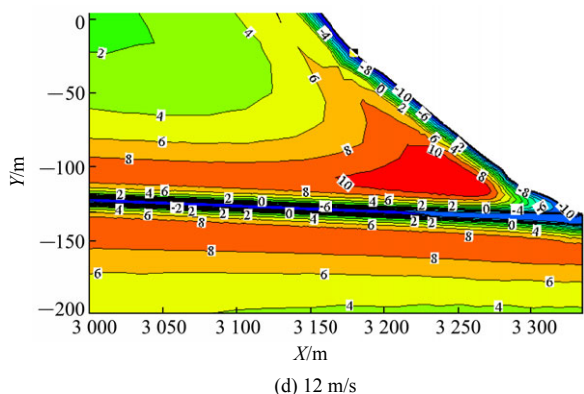


图 10 不同风速条件下隧道出口段(墨脱端)1 月份围岩温度分布云图(单位：)

Fig.10 Distribution nephogram of surrounding rock temperature of the tunnel exit(Motuo side) in January under different wind speeds(unit：)

云图。其通风条件下的围岩温度变化规律与进口端相似。综合分析图 9, 10 可以看出：在环境温度最冷月(1 月)，当隧道内风速为 6~12 m/s 时，隧道进出口段一定范围内的围岩温度均为出现了 0 以下的不利工况，这就意味着隧道进出口两端必须采取一定的防寒保温措施。

(3) 嘎隆拉隧道进、出口端保温层敷设长度确定

隧道进出口处，外界气温对围岩温度影响很大，在隧道中部由于地热的作用，围岩温度受影响程度较小，也就是说，对寒区隧道采用全长范围内都布设防寒保温材料的做法不仅是不经济的，也是不科学的。那么，接下来的问题是：在不同风速和风向条件下，隧道进出口两端需要铺设多长的保温材料？下面针对这一问题，对嘎隆拉隧道进、出口两端保温材料敷设长度进行相关研究。为突出重点，下面仅研究将 6 cm 厚的福利凯保温材料直接敷设在二衬表面工况进行分析。

隧道进口端保温材料敷设长度

图 11 为在风向一定(从隧道进口吹入)，不同风

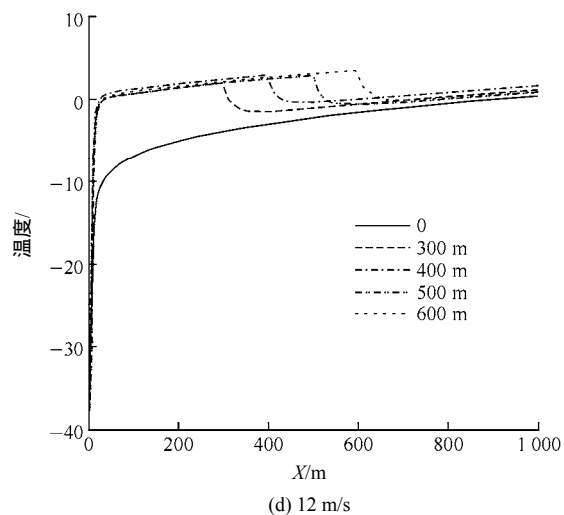
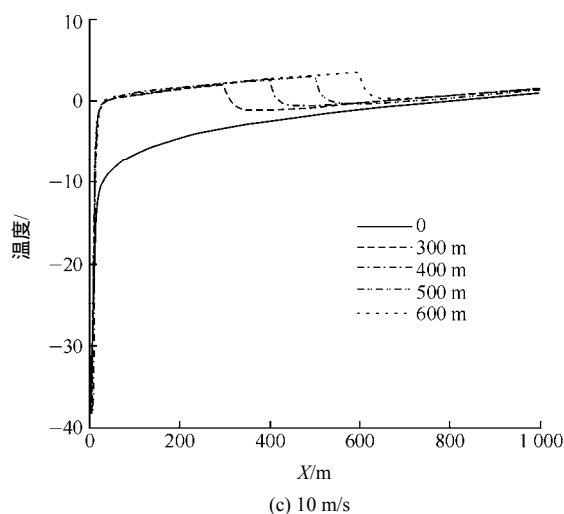
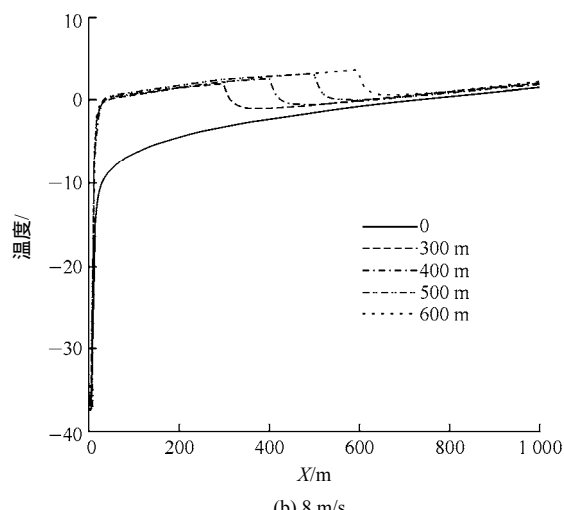
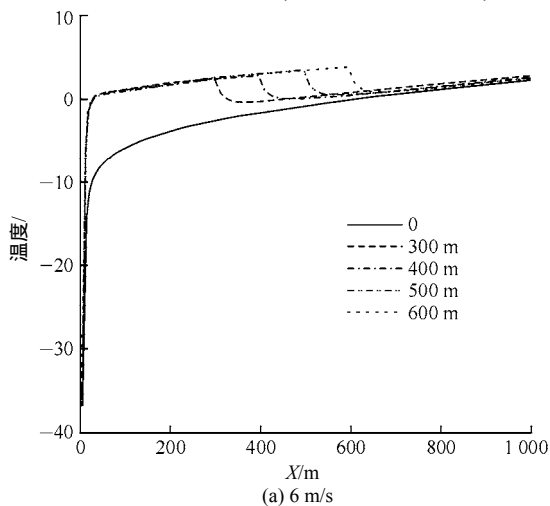


图 11 不同风速条件下，铺设不同长度的保温材料后二衬表面沿隧道轴线的温度分布图

Fig.11 Temperature distributions of secondary lining surface along tunnel axis after laying thermal insulation material with different lengths under different wind speeds

速条件下，铺设不同长度的保温材料后，二衬表面温度沿隧道轴线的分布图。

下面仅以图 11(a)加以具体说明 :该图是当隧道进口端平均风速为 6 m/s 时,在隧道表面分别铺设 300,400,500,600 m 长、6 cm 厚的聚酚醛保温层和不铺设保温层 5 种工况下,二衬表面在最冷月(1月)沿隧道纵向温度分布曲线(如果该位置温度在隧道的最冷月大于 0 ,即表明混凝土衬砌和围岩不会受到冻害的影响)。从图 11(a)可以看到:在该风速条件下,隧道不铺设保温材料时,受冻融影响的长度为 600 m 左右;当敷设 300 m 长的保温层后,围岩的冻融影响长度为 450 m 左右;当敷设 400 m 长的保温层后,除洞口一小段围岩会受到冻融影响外,隧道内部基本上已不受冻融影响;当敷设 500 和 600 m 长的保温层后,内部温度则进一步升高。说明在隧道进口端平均风速为 6 m/s 时,敷设 400 m 长的保温层已能使隧道内部混凝土衬砌和围岩免受冻害的影响。

表 2 给出了不同风速和保温材料设防长度影响条件下,隧道进口端隧道受冻融影响长度。从表 2 中可以看到,在风速一定的情况下,随着保温材料长度的增加,隧道受冻融影响的长度逐渐减小;在保温材料长度一定的条件下,随着隧道内风速的增加,隧道受冻融影响的长度逐渐增加。当风速为 12 m/s,不铺设保温材料时,隧道受冻害影响的长度最长,达到 850 m,当隧道进口段铺设 600 m 长的保温材料后,除洞口一小段围岩会受到冻融影响外,隧道内部基本上已不受冻融影响。说明在进口端保温材料设防长度为 600 m 时,已能满足隧道防寒保温的要求。

表 2 隧道进口端受冻融影响长度

Table 2 Lengths influenced by freezing-thawing at tunnel inlet section

保温材料 设防长度/m	受冻融影响长度/m			
	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s
0	600	700	780	850
300	450	550	630	700
400	0	530	580	650
500	0	0	0	600
600	0	0	0	0

隧道出口端保温材料敷设长度

出口端保温层敷设计算原理与进口端完全相同,限于文章篇幅,这里不再给出铺设不同长度的保温材料后,二衬表面温度沿隧道轴线的分布图。

表 3 给出了不同风速和保温材料设防长度影响条件下,隧道出口端隧道受冻融影响长度。从表 3 中可以看到,当风速为 12 m/s,不铺设保温材料时,隧道受冻害影响的长度最长,达到 600 m。在出口端保温材料设防长度为 400 m 时,已能满足隧道防寒保温的要求。

表 3 隧道出口端受冻融影响长度

Table 3 Lengths influenced by freezing-thawing at tunnel outlet section

保温材料 设防长度/m	受冻融影响长度/m			
	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s
0	430	450	500	600
300	0	0	450	500
400	0	0	0	0

5 结 论

借助流体力学、传热学和空气动力学的基本原理与方法,推导出考虑通风影响的寒区隧道围岩温度场模型,该模型包括:围岩温度场控制方程、隧道内风温场控制方程以及风流场湍流控制方程。在此基础上,采用数值分析方法探讨了西藏嘎隆拉隧道通风条件下围岩温度场的变化规律及其防寒保温措施,主要结论如下:

(1) 通过与 D. Baly 等^[17]试验结果及 W. Zhang 和 Q. Y. Chen^[19]数值模拟结果的比较,证明了本文提出的风流场模型及其采用的湍流数值模拟方法的可行性和优越性,开拓了寒区隧道风温场数值分析方法。

(2) 隧道未开挖前,随着季节的变化,山体浅部温度出现明显变化,该变化较明显的深度为 18 m,当岩体埋深大于 18 m 后,岩体温度随季节的变化幅值小于 0.5 ;隧道贯通后,由于通风影响,在环境温度最冷月(1月),隧道进出口段一定范围内的围岩温度出现了 0 以下的不利工况。

(3) 在嘎隆拉隧道进口端 600 m、出口端 400 m 范围内,二衬表面敷设 6 cm 厚的聚酚醛保温材料,可有效防止嘎隆拉隧道衬砌和围岩发生冻融破坏。

参考文献(References):

[1] LAI Y M, WU Z W, ZHU Y L, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature and seepage fields in cold regions tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(1), 89-96.

- [2] 陈卫忠, 谭贤君, 于洪丹, 等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1 318–1 336.(CHEN Weizhong, TAN Xianjun, YU Hongdan, et al. Advance and review on thermo-hydro-mechanical characteristics of rock mass under condition of low temperature and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1 318–1 336.(in Chinese))
- [3] 赖远明, 吴紫汪, 张淑娟, 等. 寒区隧道保温效果的现场观察研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 81–86.(LAI Yuanming, WU Ziwan, ZHANG Shujuan, et al. In-situ observed study for effect of heat preservation in cold regions tunnels[J]. Journal of China Railway Society, 2003, 25(1): 81–86.(in Chinese))
- [4] MA W, FENG G L, WU Q B, et al. Analysis of temperature fields under the embankment with crushed-rock structures along the Qinghai—Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 53(3): 259–270.
- [5] 夏才初, 张国柱, 肖素光. 考虑衬砌和隔热层的寒区隧道温度场解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1 767–1 773.(XIA Caichu, ZHANG Guozhu, XIAO Suguang. Analytical solution to temperature fields of tunnel in cold region considering lining and insulation layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1 767–1 773.(in Chinese))
- [6] 赖远明, 喻文兵, 吴紫汪, 等. 寒区圆形截面隧道温度场的解析解[J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 126–130.(LAI Yuanming, YU Wenbing, WU Ziwan, et al. Approximate analytical solution for the temperature fields of a circular tunnel in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 126–130.(in Chinese))
- [7] 杨更社, 周春华, 田应国, 等. 软岩类材料冻融过程水热迁移的实验研究初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 765–1 770.(YANG Gengshe, ZHOU Chunhua, TIAN Yingguo, et al. Primary experimental study of moisture and heat transfer of soft rock material during its freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 765–1 770.(in Chinese))
- [8] 张学富, 喻文兵, 刘志强. 寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的三维非线性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1 095–1 100.(ZHANG Xuefu, YU Wenbing, LIU Zhiqiang. Three-dimensional nonlinear analysis for coupled problem of seepage field and temperature field of cold regions tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1 095–1 100.(in Chinese))
- [9] TAN X J, CHEN W Z, TIAN H M, et al. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: numerical simulation and application[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(1/2): 74–84.
- [10] 谭贤君, 陈卫忠, 贾善坡, 等. 含相变低温岩体水热耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 455–1 461.(TAN Xianjun, CHEN Weizhong, JIA Shanbo, et al. A coupled hydro-thermal model for low temperature rock including phase change[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 455–1 461.(in Chinese))
- [11] TAN X J, CHEN W Z, YANG J P, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycle[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(2/3): 130–138.
- [12] 谭贤君, 褚以悫, 陈卫忠, 等. 考虑冻融影响的岩土类材料导热系数计算新方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(增 2): 70–74.(TAN Xianjun, CHU Yidun, CHEN Weizhong, et al. A new method to study thermal conductivity of geomaterials considering phase change[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.2): 70–74.(in Chinese))
- [13] 何春雄, 吴紫汪, 朱林楠. 严寒地区隧道围岩冻融状况分析的导热与对流换热模型[J]. 中国科学: D 辑, 1999, 29(增 1): 1–7.(HE Chunxiong, WU Ziwan, ZHU Linnan. Freeze-thaw condition analysis for heat transfer and convective heat transfer model of surrounding rock in cold region[J]. Science in China: Series D, 1999, 29(Supp.1): 1–7.(in Chinese))
- [14] 张学富, 赖远明, 喻文兵, 等. 风火山隧道多年冻土回冻预测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 170–4 178.(ZHANG Xuefu, LAI Yuanming, YU Wenbing, et al. Forecast and analysis of refreezing in Fenghuoshan permafrost tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 170–4 178.(in Chinese))
- [15] 麦继婷, 陈春光. 通风速度和外界气温对秦岭隧道温度的影响[J]. 石家庄铁道学院学报, 1998, 11(2): 6–10.(MAI Jiting, CHEN Chunguang. Influence of atmospheric temperature and airflow speed on temperature in Qinling tunnel[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1998, 11(2): 6–10.(in Chinese))
- [16] 谭贤君. 高海拔寒区隧道冻胀机制及其保温技术研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.(TAN Xianjun. Study on the mechanism of frost heave of tunnel in cold region with high altitude and related insulation technology[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.(in Chinese))
- [17] BLAY D, MERGUI S, NICULAE C. Confined turbulent mixed convection in the presence of a horizontal buoyant wall jet[J]. Fundamentals of Mixed Convection, 1992, 213: 65–72.
- [18] LACASSE D, TURGEON É, PELLETIER D. On the judicious use of the $k-\epsilon$ model, wall functions and adaptivity[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(10): 925–938.
- [19] ZHANG W, CHEN Q Y. Large eddy simulation of indoor airflow with a filtered dynamic subgrid scale model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(17): 3 219–3 231.
- [20] 吕康成, 解赴东, 张翊翔. 寒区隧道围岩导热系数反分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2000, 32(4): 379–381.(LU Kangcheng, XIE Fudong, ZHANG Yi'ao. Back analysis of the thermal conductivity of the enclosure rocks in a cold region tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science, 2000, 32(4): 379–381.(in Chinese))
- [21] ZHANG H F, GE X S, YE H, et al. Heat conduction and heat storage characteristics of soils[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2/3): 369–373.
- [22] NICOLSKY D J, ROMANOVSKY V E, TIPENKO G S. Using in-situ temperature measurements to estimate saturated soil thermal properties by solving a sequence of optimization problems[J]. The Cryosphere, 2007, (1): 41–58.