

# 基于水-热耦合模型的多年冻土隧道 隔热层厚度优化研究

郭硕栋<sup>1</sup>, 王晓川<sup>2</sup>, 张耀阳<sup>2</sup>, 陈泽盟<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中交二公局第四工程有限公司, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 为了使多年冻土隧道围岩保持冻结状态, 经常选择在隧道衬砌结构中铺设保温隔热层的方法以防止围岩产生冻融破坏。保温隔热层的厚度是影响多年冻土隧道结构的稳定性和工程经济的一个重要参数。针对这一问题, 建立了考虑渗流和冰水相变的水-热耦合模型, 并将该模型嵌入 COMSOL Multiphysics 数值软件中加以应用。以青海省某隧道为研究对象, 对该隧道洞口段保温隔热层厚度的优化设计进行研究。结果表明: 隧道仰拱位置被确定为优化设计的不利位置, 隧道开挖在第 1 年的 5 月 23 日温度达到最高, 被确定为优化设计的不利时间; 不利位置处的最高温度随保温隔热层厚度的增加而下降, 通过拟合公式计算出最优隔热层厚度为 7.2 cm; 在最优保温隔热层厚度下隧道衬砌背后围岩温度均处于 0 °C 以下, 不会产生冻融破坏。隧道在设计隔热结构时采用 7.2 cm 的隔热层厚度提高了围岩隧道结构的稳定性。

**关键词:** 隧道隔热层厚度; 多年冻土; 水-热耦合; 温度场; 数值模拟

中图分类号: U452.1<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0192-09

## Optimal design of thermal insulation layer thickness in permafrost tunnel based on hydro-thermal coupling model

GUO Shudong<sup>1</sup>, WANG Xiaochuan<sup>2</sup>, ZHANG Yaoyang<sup>2</sup>, CHEN Zemeng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. CCCC-SHEC Fourth Highway Engineering Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

**Abstract:** To maintain the surrounding rock in a frozen state, permafrost tunnels often incorporate an insulation layer within the tunnel lining structure to prevent freeze-thaw damage. The thickness of the insulation layer is a critical parameter affecting the stability and economic viability of permafrost tunnel structures. Addressing this concern, we developed a hydro-thermal coupling model that takes seepage and ice-water phase transition into account. This model was integrated into COMSOL Multiphysics for practical application. Focusing on a tunnel located in Qinghai Province, we conducted an optimization study of the insulation layer thickness at the tunnel entrance section. The findings revealed that the tunnel arch position was identified as the unfavorable position for the optimization design, and the highest temperature within the tunnel excavation occurred on May 23 of the first year, which was deemed unfavorable for the optimization design. Moreover, the highest temperature at the unfavorable position decreased with the increase of the insulation layer thickness, and through a fitting formula, the optimal insulation layer thickness was calculated to be 7.2 cm. Under this optimal thickness, the temperature of the surrounding rock behind the tunnel lining can remain below 0 °C, effectively preventing freeze-thaw damage. In the design of the tunnel's insulation structure, an insulation layer thickness of 7.2 cm can enhance the stability of the surrounding rock tunnel structure.

**Key words:** tunnel insulation layer thickness; permafrost; hydro-thermal coupling model; temperature field; numerical simulation

收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2023-11-21

基金项目: 中交二公局局级重点课题(2020-4-17)

作者简介: 郭硕栋(1997—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向为岩土与地下工程。

## 1 研究背景

对于高寒区隧道而言,围岩长期暴露在极端低温的环境下会对隧道工程的稳定性造成严重威胁,极易造成隧道衬砌表面开裂、挂冰等冻害,从而影响隧道的正常使用和行车安全<sup>[1-3]</sup>。大量的工程实践表明,合理的抗寒防冻措施对防止隧道围岩产生冻融破坏具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。在高寒区隧道衬砌结构上铺设保温隔热层是一种简单有效的措施,多年冻土区域保温隔热层的作用主要是利用保温材料较低的热传导率阻隔洞内热量向围岩传播<sup>[6-7]</sup>,使衬砌背后的围岩保持原有的热状态,防止围岩出现冻融破坏。寒区隧道的保温措施对于提高工程的安全性、促进可持续发展和提升经济效益等方面具有重要意义。对于寒区隧道而言,特别是多年冻土区的隧道,其环境温度比一般隧道工程更低,故在设计隧道的保温防寒措施时,更应该严格控制其经济性和施工的安全性<sup>[8]</sup>。因此,对多年冻土区隧道保温隔热层厚度的设计需要找到一个合理的参数值,以保证隧道的长期安全稳定。

为进一步提高高寒隧道的保温抗冻能力,减少冻害发生,国内外学者对此类问题做了大量的研究工作。于建游等<sup>[9]</sup>以棋盘梁隧道为研究对象,采用现场实测、数值模拟和理论分析相结合的方法,提出了保温隔热层厚度的计算公式。白赞等<sup>[10]</sup>基于对流-导热耦合数值模型研究了多年冻土隧道保温隔热层厚度优化设计,确定了最佳保温隔热层厚度方案。周元辅等<sup>[11]</sup>以风火山隧道为例,通过扩展内点罚函数法优化了保温隔热层厚度。刘星辰等<sup>[12]</sup>以现场温度监测为数据支撑,建立了瞬态温度场计算模型,得出了尼格隧道最优保温隔热层厚度。Li等<sup>[13]</sup>以姜路岭隧道为工程依托,通过数值模拟提出了一种计算隧道最佳保温隔热层厚度的方法。Yan等<sup>[14]</sup>基于温度场耦合理论的数值模型,结合德格隧道的现场实测数据验证,提出了合理的保温隔热层设计参数。Zhao等<sup>[15]</sup>通过室内试验和数值模拟相结合的方法,提出了一种简化的一维隧道模型,研究了在高温条件下保温隔热层厚度对隧道内空气温度及围岩温度的影响。Lu等<sup>[16]</sup>通过现场调研和室内试验,验证了考虑对流传热的三维数值模型,研究了影响寒区隧道保温隔热层的主要因素。上述研究成果有助于很好地了解多年冻土隧道的冻融过程,为进一步研究隧道防寒抗冻措施提供理论指导。但是,以上研究往往忽略或者简化了土壤在冻融过程

中的物理变化,如水分迁移<sup>[17-18]</sup>、冰水相变<sup>[19-20]</sup>等,大多数数值模拟只是单独通过显热容法来模拟寒区隧道围岩的温度变化<sup>[21-22]</sup>,忽略了隧道周围土体的水-热耦合传递过程对隧道结构的影响,因此,这类方法计算的保温隔热层厚度往往存在一定的偏差,且未考虑隧道工程的经济性和安全性,具有一定的局限性。

针对上述问题,本文建立了考虑水分渗流作用及冰水相变影响的水-热耦合数学模型,依托青海省某隧道,结合有限元方法模拟了该隧道围岩的温度及水分的变化,再根据隧道围岩的温度场和水分场的变化特征,通过一系列的模拟计算,得到了多年冻土隧道最佳的保温隔热层厚度,分析了最佳保温隔热层厚度条件下隧道围岩的温度场变化过程。该研究可为多年冻土区隧道保温隔热层厚度的选择提供计算依据,以期为高寒地区多年冻土隧道的建设和结构的设计提供参考。

## 2 水-热耦合数学模型与模型验证

### 2.1 基本假定

为更加方便数值计算,引入以下简单假设作为本文研究的前提。

(1)不考虑空气影响,岩体孔隙中充满水或冰,假定岩体处于饱和状态。

(2)岩体为均质、各向同性多孔介质,由岩体骨架、水、冰组成,满足混合物理论的基本假定。

(3)岩体中孔隙率为恒定值,不随时间的变化而变化,且在岩体中均匀分布。

(4)考虑局部热平衡假设,即相接触的流体温度和固体温度相等。

(5)对于冻结区岩土体,液态水未完全发生相变转换为冰,假定剩余的未冻水不发生水分迁移,按照固定流体计算。

### 2.2 温度场与渗流场耦合的控制方程

在岩体冻结过程中,当温度低于土体冻结温度时,孔隙水冻结成冰释放相变潜热,从而影响多孔介质传热。为此,本文把冰水的相变过程视为发生在一个较小温度范围内,将其产生的相变潜热折算为该范围内的显热容,从而把相变问题转换为冻结过程中的一个“单向”非线性导热问题来求解。

徐光苗等<sup>[23]</sup>认为正冻区在  $T_{pc} - \Delta T/2$  和  $T_{pc} + \Delta T/2$  之间存在一个温度区间,在计算岩体的温度时,在多孔介质传热方程中加入了相变潜热  $L$ 。在正冻区内,采用 Heaviside 二阶阶跃函数  $H(T)$  来建模表达冰

水相变的过程。以  $\theta$  表示冰水相变前的相分数,其值在  $T_{pc} - \Delta T/2$  之前为 1,在  $T_{pc} + \Delta T/2$  之后为 0; $H$  为比焓,则有效密度  $\rho_f$  和函数  $H(T)$  的表达式见公式(1)和(2)。

$$\rho_f = \theta_i \rho_i + \theta_w \rho_w \quad (1)$$

$$H(T) = \frac{1}{\rho} (\theta_i \rho_i H_i + \theta_w \rho_w H_w) \quad (2)$$

根据  $C_p = \frac{\partial H}{\partial T}$ ,可得含相变潜热的流体显热容的表达式为公式(3)。

$$C_{p,f} = \frac{1}{\rho_f} (\theta_i \rho_i C_{p,i} + \theta_w \rho_w C_{p,w}) + L \frac{\partial \left( \frac{\theta_i \rho_i - \theta_w \rho_w}{\theta_w \rho_w + \theta_i \rho_i} \right)}{2 \partial T} \quad (3)$$

式中: $\theta_i$ 、 $\theta_w$  分别为冰、水的相分数; $\rho_i$ 、 $\rho_w$ 、 $\rho_f$  分别为冰、水以及等效密度,kg/m<sup>3</sup>;  $H_i$ 、 $H_w$  分别为冰、水的比焓,J/kg;  $L$  为单位质量的冰水相变释放的潜热值,J/kg。

基于局部热平衡条件,考虑流体渗流引起的对流换热,通过混合法则推导固体和流体传热方程得到含相变的多孔介质传热方程<sup>[24]</sup>。

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_L C_{p,f} \vec{\mu} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{q} = -k_{eff} \nabla T \quad (5)$$

式中: $(\rho C_p)_{eff}$  为恒压下的等效体积热容,J/(m<sup>3</sup>·°C);  $\rho_L$  为水的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $C_{p,f}$  为含相变潜热的流体显热容,J/(m<sup>3</sup>·°C);  $\vec{\mu}$  为达西速度矢量,m/s;  $k_{eff}$  为岩体的等效导热系数,W/(m·°C);  $\nabla T$  为温度梯度,°C/m;  $\vec{q}$  表示传热热容量,J/°C。

根据质量守恒定律推导出单元体内含冰体的水流连续性方程<sup>[25]</sup>。

$$\frac{\partial (\varepsilon S_i + \varepsilon S_w \rho_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \vec{\mu}) = 0 \quad (6)$$

式中: $\varepsilon$  为岩体孔隙率,%;  $\rho_w$  为流体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $S_i$ 、 $S_w$  分别为冰、水的饱和度,% ,满足  $S_w + S_i = 1$ ; 水的密度主要取决于压力,忽略温度对密度的影响,

引入流体压缩性  $\beta = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial P}$ ,1/Pa;同时相较于水的压缩性,冰的压缩性忽略不计,化简公式(6)得到用压力形式表示的冰-水系统连续性微分方程。

$$S_w \varepsilon \rho_w \beta \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_w \vec{\mu} + \varepsilon (\rho_w - \rho_i) \frac{\partial S_w}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$\vec{\mu} = -\frac{k}{\eta} (\nabla P + \rho_w g) \quad (8)$$

式中: $k$  为渗透率,m<sup>2</sup>;  $\eta$  为水动力黏度,Pa·s;  $P$  为

压力,Pa;  $g$  为重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

低温岩体孔隙中水冻结成冰,堵塞孔隙限制了水的流动,造成渗透率的减小。为表达冰对渗透率的影响,提出相对渗透率  $k_r$ ,在冰的饱和度大于 0 的情况下,相对渗透率小于 1,但是相对渗透率不能过小,否则无法计算,因此设定一个最小值,即

$$k_r = \max \{ 10^{-\Omega \varepsilon_i}, 10^{-6} \} \quad (9)$$

式中: $\Omega$  为阻抗因子。

冰-水系统中岩体的渗透率表示为

$$k = k_r \cdot k_{int} \quad (10)$$

式中: $k_{int}$  为渗透系数,m<sup>2</sup>。

公式(1)~(10)组成了冻融土壤中水-热耦合模型。通过大型数值软件 COMSOL Multiphysics 的多孔介质传热模块和达西定律模块来进行求解。在一个时间步中,首先通过温度场控制方程(1)~(5)计算温度;其次,将饱和度  $S_w$  和温度  $T$  作为基本未知量,采用非线性牛顿迭代法对水-热耦合控制方程进行求解。

### 2.3 水-热耦合数学模型验证

为了验证水-热耦合数学模型的正确性以及可行性,利用经典饱和水-热耦合模型案例进行验证。Grenier 等<sup>[26]</sup>提出了一个典型的模型计算案例,通过对多年冻土地区的土壤冻结和融化的研究,建立了饱和状态下冻土水-热耦合的数学模型。Grenier 等<sup>[26]</sup>所建立的数值模型演示了多孔介质空间中冻土的水是如何传热和渗流的。冻土夹杂物模型的长和宽分别为 3 m 和 1 m,初始温度为 5 °C,矩形中间设置一块初始温度为 -5 °C 的冻土夹杂物,其尺寸为 0.333 m × 0.333 m;矩形顶部和底部不透水,顶部、底部和右端为热绝缘边界,左右边界水头相差 0.03 Pa,流体流动按 3% 的水头梯度驱动。冻土夹杂物模型及边界条件如图 1 所示,求解器为瞬态计算,计算时长为 56 h。通过 2.2 节的水-热耦合控制方程来建立模型,用以求证数学模型的正确性。

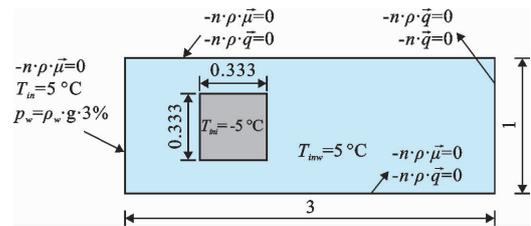


图 1 冻土夹杂物模型(单位:m)

为了验证水-热耦合模型的可靠性,计算冻土夹杂物的总体温度,并将 Grenier 的计算结果与本模型

的计算结果进行对比(图2)。从图2可以看出,模型整体温度值在0~2.5 h内变化剧烈,曲线斜率较陡,从5~20 h开始逐渐趋向平缓,20 h之后温度呈非线性增大的趋势,在56 h左右模型整体温度达到最大值。水-热耦合模型的计算结果与Grenier模型的计算结果相比整体偏小,原因是冰和水状态的方程存在差异,2.2节建立的模型未考虑水的压缩性,水压的作用会引起体积的变化,从而影响温度场的分布,但两个模型的计算结果呈现相同的基本规律,说明2.2节建立的模型可以较好地描述冻土区隧道的温度变化。

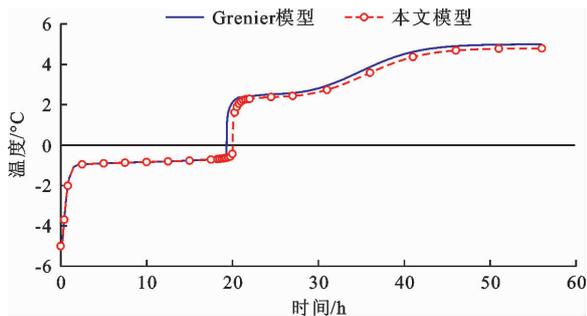


图2 本文模型与Grenier模型冻土夹杂物总体温度变化对比

### 3 多年冻土隧道保温隔热层数值分析

#### 3.1 工程概况

青海省某高海拔公路隧道纵向长度为2 840 m,其气候及周边地貌条件如图3所示。

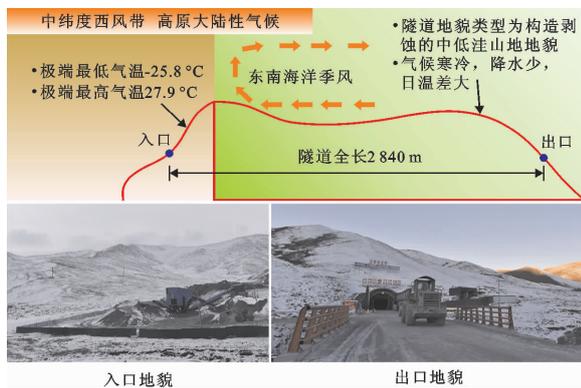


图3 青海省某隧道气候及周边地貌条件

该地区处于中纬度西风带区,属于高原大陆性气候。冬季受来自西伯利亚干冷空气影响,气候比较寒冷干燥。区内降水量少,蒸发量大,多年平均温度在 $-4^{\circ}\text{C}$ 左右,极端最高气温为 $27.9^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温为 $-25.8^{\circ}\text{C}$ ,日温差极大。9月份以后气温开始下降;至10月气温显著下降,地表水开始冻结;到1月份气温达到最低,平均气温为 $-26.1^{\circ}\text{C}$ ,最

低可达 $-36^{\circ}\text{C}$ ,隧址区内最大冻结深度可达2.5 m。该隧道内壁净空宽度约为11.8 m,净空高度约为6.8 m,二次衬砌厚度为50 cm,隧道衬砌及路面均为混凝土材料。现场的工程勘察报告表明,隧道进出口段为多年富冰-饱冰冻土,出口段为富冰冻土,冻胀融沉性的级别为弱融沉,由于冻土在冻结状态下强度较高,融化状态下强度较低,故隧道开挖引起的冻土融化必然会导致围岩产生融沉变形。因此,应采取科学、经济的保温防寒措施来预防该隧道周围的多年冻土围岩融化,以保证隧道正常的安全生产施工和运营。

#### 3.2 数值分析模型建立

以隧道洞口段为研究对象,依托工程保温隔热层的铺设方式夹层铺设,即在初衬与二衬之间设置。根据2.2节建立的水-热耦合模型,研究隧道洞口段温度场和水分场的变化,并优化设计了该隧道的保温隔热层厚度。

**3.2.1 几何模型建立、网格划分及求解器设置** 为缩减模型计算的时间,假定隧道断面是二维对称的,并取模型的一半进行计算。为了减少边界条件对温度场的影响,计算模型的尺寸应距离模型边界足够远,故设计模型宽度为40 m( $x$ 方向),高度为72 m( $y$ 方向)。在利用COMSOL Multiphysics数值模拟软件进行计算分析时,网格的质量决定了计算精度和时间长短。因此,在设置网格时采用物理场控制和人工控制相结合的方法。首先对数值模型整体进行网格划分;其次对计算复杂部位如初衬、二衬及路面进行二次网格加密,网格采用自由三角形网格,单元格大小设置为0.5 m,单元增长率设置为1.1,划分后共计3 522个单元、47个顶点单元和479个边界单元;再对其求解器进行设置,为保证计算的收敛性和提高模拟结果的精度,先后采用2种求解器计算,由于达西定律模块为稳态流动,流量和速度为常数,故采用稳态求解器;最后在其稳态计算结果的基础上,对多孔介质模块采用稳态求解和瞬态求解相结合的方式,免去了时间步长的选择和调整,减少了模型求解的难度和计算量,很好地保证了结果的准确性,隧道计算模型断面及网格划分详见图4(a)。

**3.2.2 数值计算监测点的选取与布置** 为了探究隧道保温隔热层厚度对隧道衬砌温度的影响,以期得出最优保温隔热层厚度,利用COMSOL Multiphysics中的探针函数功能,在隧道初次衬砌与围岩的交界面上设置温度探针,用以监测温度的变化情况。共设置了5个温度探针,探针的位置分别命名为拱

顶的 L1、边墙的 L2 和 L3、拱腰的 L4 以及仰拱的 L5,保温隔热层厚度作为研究变量用  $X_i$  表示,在 1 ~ 11 cm 范围内取值。各监测点及保温隔热层的位置详见图 4(b)。

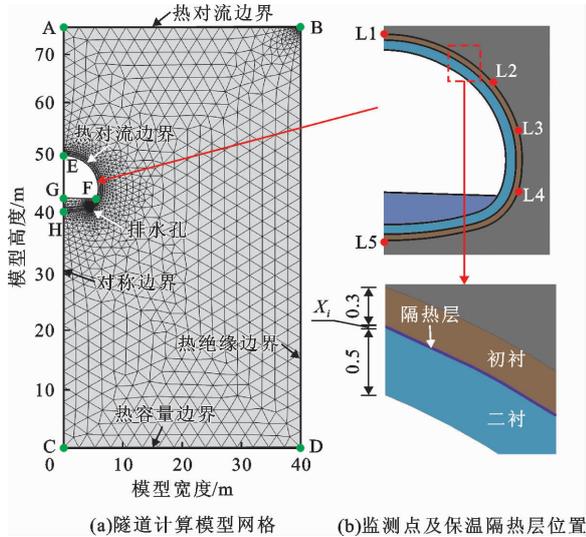


图 4 隧道计算模型监测点及保温隔热层位置图(单位:m)

3.2.3 材料参数及边界条件设置 地勘报告显示,青海省某隧道洞口段附近围岩主要为微风化砂岩,且在衬砌外表面喷射了 50 cm 厚的 C30 混凝土作为二次衬砌材料,选择硬泡聚氨酯作为保温隔热层材料。依据地勘报告以及文献[27],冰、水、围岩、衬砌和保温材料的主要热物理参数如表 1 所示。

表 1 材料的主要热物理参数

材料	导热系数/ [W·(m·°C) <sup>-1</sup> ]	比热容/ [J·(kg·°C) <sup>-1</sup> ]	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	孔隙 率/%
冰	2.14	2 100	917	
水	0.56	4 180	1 000	
围岩	3.00	850	2 530	30
衬砌混凝土	1.74	940	2 400	10
硬泡聚氨酯	0.022	1 500	37	

围岩的初始温度设置为 2 °C,模型图 4(a)中的 AE、HC 为对称边界,CD 为热容量边界,取其热流密度为 0.06 W/m<sup>[28]</sup>,BD 为热绝缘边界,EGF、AB 为热对流边界,对其施加大气温度荷载,大气温度与围岩对流换热系数取 15 W/(m<sup>2</sup>·°C)。模型中的地下水渗流满足达西定律,AE、HC 为对称边界,EGF、CD 为不透水边界,AB、CD 为水头边界,F 点处设置排水孔,且考虑到大气压强对地表温度会产生一定的影响,对 AB 边界施加大气压强校准。

采用正弦函数的形式对隧道大气温度进行拟合,拟合关系见公式(11)。

$$T = T_m + T_a \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + \varphi\right) \quad (11)$$

式中:  $T$  为隧道大气温度,°C;  $T_m$  为年平均温度,°C;  $T_a$  为年平均振幅,°C;  $t$  为时间,a;  $\varphi$  为与时间有关的相位常数。

地勘报告给出的年平均温度为 - 3.12 °C,年平均温度振幅为 20.23 °C,代入公式(11)得:

$$T = - 3.12 + 20.23 \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + \varphi\right) \quad (12)$$

### 3.3 保温隔热层厚度优化设计方法

首先,对无保温隔热层下隧道温度场进行计算,并根据隧道围岩的冻融变化,选出隧道衬砌背后最容易融化的位置和时间点,命名为不利时间和不利位置;其次通过计算不利时间下不利位置的温度,将其视为因变量,通过计算不同保温层厚度下不利位置的温度变化,得出不利位置下温度与保温层厚度的函数关系式,通过函数关系式来确定最佳的保温层厚度;根据调研文献[29]~[30]的研究结果可知,保温隔热层的厚度一般在 1 ~ 11 cm 之间,故将保温层厚度  $X_i$  设定为在 1 ~ 11 cm 之间变化的自变量;最后,在确定保温层最佳厚度的基础上,对隧道及围岩的水分场和温度场进行全面的模拟分析,从而对隧道结构稳定性进行评估。

## 4 结果与分析

### 4.1 无隔热层条件下隧道水-热分布特征

隧道开挖边界受外界大气温度和初始地温的影响,其温度是不稳定的,在没有保温隔热层的情况下即使温度最高也无法进行优化设计。隧道在开挖后其邻近区域的围岩会受到施工扰动的影响,导致其原有的冻融状态发生改变。为确定隧道围岩的不利时间,将图 4 中监测点 L5 视为一个关键点,计算该位置处 10 年内的温度变化,结果如图 5 所示。

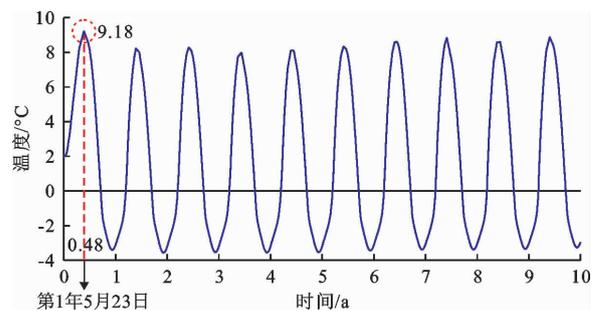


图 5 隧道施工运营 10 年内 L5 监测点的温度变化

从图 5 可以看出,L5 的温度随着时间的推移以正弦曲线形式呈周期性变化,曲线的最高温度随时间变化而逐渐趋于稳定。隧道在开挖 1 年后的 5 月 23 日温度达到 9.18 ℃,该时间点的温度达到最高且会影响隧道围岩的冻融状态,故将隧道开挖后第 1 年的 5 月 23 日命名为不利时间,用于本文的优化设计。

图 6 为无保温隔热层条件下不利时间的隧道横断面温度分布。从图 6 可以看出,靠近地表面的等温线基本呈层状分布,隧道衬砌背后的围岩温度范围处于 -1.50 ~ 0.56 ℃ 之间,其衬砌结构极不稳定,极易引发冻胀融沉而影响隧道的稳定性。因此,需要在初次衬砌与二次衬砌之间铺设保温隔热层来避免隧道衬砌结构产生冻害。

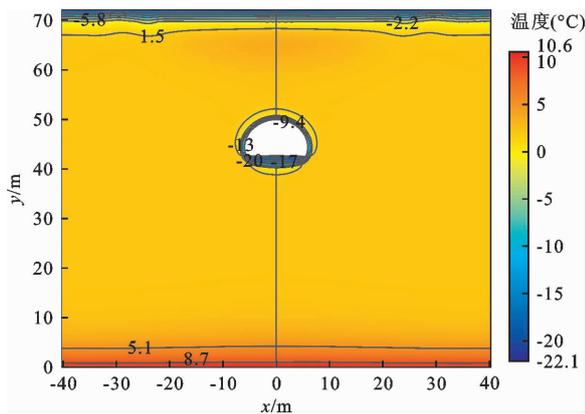


图 6 无保温隔热层时不利时间的隧道横断面温度分布

隧道周围冻土中的孔隙水在温度梯度的驱动下随温度的变化而重新迁移和分布,通常冻土中的未冻水含量和含冰量呈层状分布。图 7(a)、7(b) 分别给出了隧道在不利时间时,无保温隔热层条件下隧道围岩的含水量和含冰量分布,从图 7(a) 中可以看出,围岩水分基本呈环形分布,且越靠近衬砌支护的位置含水量越高,其总的体积含水量在 2% ~ 20% 之间,而图 7(b) 含冰量的分布也呈现相同的规律。隧道周围总的含水量(未冻水含量与含冰量之和)分布已经超过了围岩的孔隙度,这会导致围岩孔隙的水分向冻结锋面迁移,从而产生冻胀。

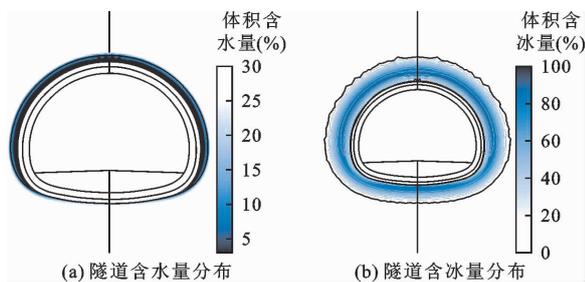


图 7 不利时间无保温隔热层隧道含水量与含冰量分布

为了确定隧道在施工运营期围岩冻土最容易融化的位置,测定不利时间点下 L1、L2、L3、L4、L5 的温度,结果见图 8。从图 8 可以看出,在不利时间下各个测点的温度均在 0 ℃ 以上,且 L5 温度最高,达 6.3 ℃。因此,选择以 L5 关键测点的温度作为相关变量来进行保温层厚度的优化设计是合理的。

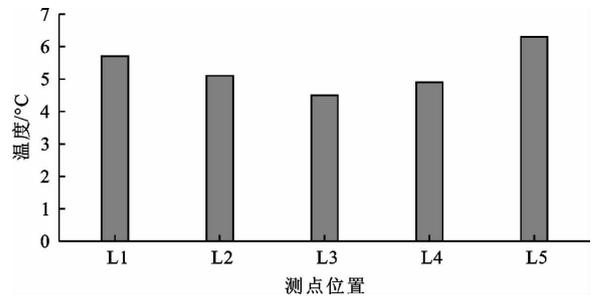


图 8 不利时间下 L1 ~ L5 测点的温度

#### 4.2 不同隔热层厚度下隧道保温效果分析

通过 4.1 节的分析,确定采用 L5 作为隧道保温隔热层厚度优化设计的测点,然后对不同保温隔热层厚度下的隧道保温效果进行分析,以此来确定隧道最佳保温隔热层厚度的范围。保温隔热层的铺设方式为夹层式铺设,建立 6 种计算工况,计算隧道在施工运营后 7 个月温度分布规律,具体工况设计详见表 2。

表 2 数值模拟计算工况

计算工况	1	2	3	4	5	6
隔热层厚度/cm	1	3	5	7	9	11

通过改变模型多孔介质传热模块中保温隔热层的厚度得到 6 种工况下隧道的温度分布(图 9)。从图 9 可以看出,随着保温隔热层厚度的增加,外界温度对隧道洞内温度的影响也随之降低。0 ℃ 等温线的范围随之向外扩张,这是由于较厚的保温隔热层会提供更好的隔热效果,从而更有利于减少隧道洞口和外界气温之间的热量交换。当隔热层厚度 ≥ 5 cm 时,隧道结构基本被 0 ℃ 以下的多年冻土包围,这说明最佳保温隔热层厚度在 5 ~ 11 cm 之间。

#### 4.3 最优保温隔热层厚度的确定

为确定最优保温隔热层厚度,提取了 6 种工况下 L5 测点的最高温度绘制出保温隔热层厚度与最高温度关系曲线(图 10)。从图 10 可以看出,关键测点 L5 的最高温度随着保温隔热层厚度的增加而呈非线性地降低,其关系可用公式(13)进行拟合。

$$T_{L5} = -0.155 + 11.588 e^{\frac{-x_i}{1.776}} \quad (R^2 = 0.997) \quad (13)$$

式中： $T_{L5}$  为在不利时间下 L5 测点的最高温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $X_i$  为保温隔热层厚度， $\text{cm}$ ； $R^2$  为决定系数，用于评估数据的拟合程度， $R^2$  越接近于 1，说明计算模型对数据的拟合程度越好。

通过公式(13) 拟合可以看出，当  $X_i = 7.2 \text{ cm}$  时， $T_{L5}$  的温度接近于  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，这就意味着此时围岩不会经历任何冻融变化，可以认为最优保温隔热层厚度为  $7.2 \text{ cm}$ 。

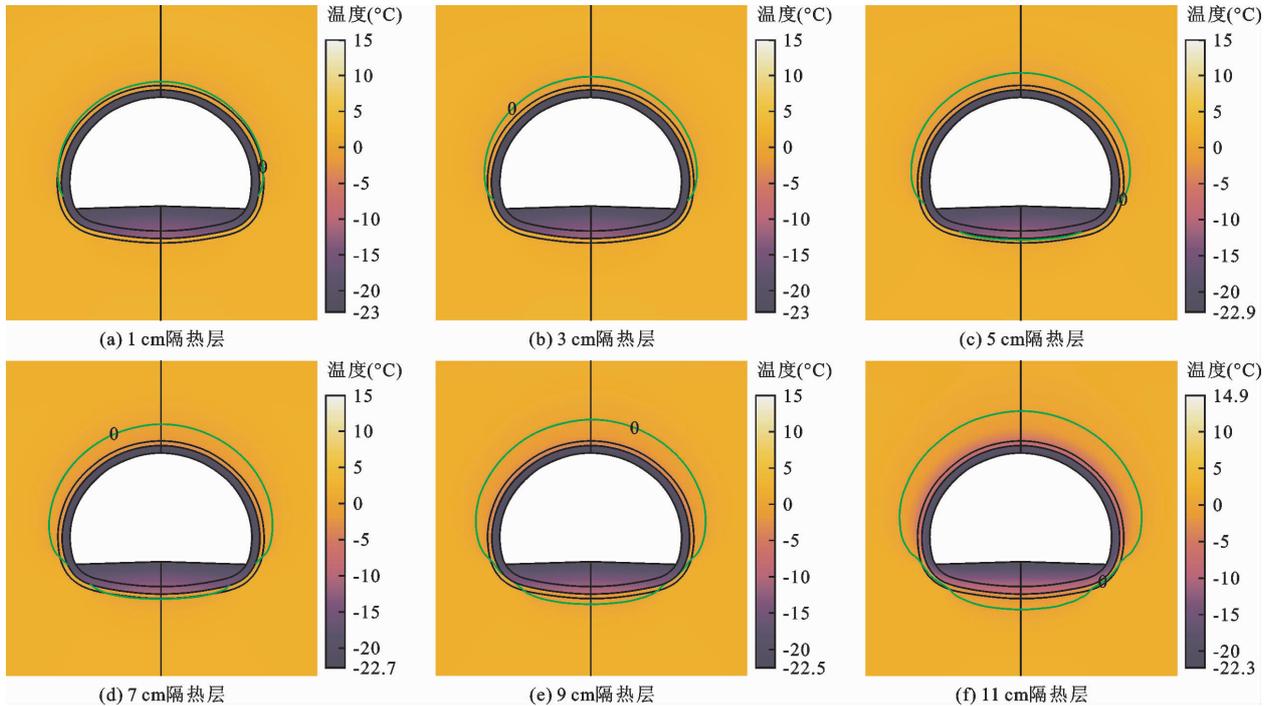


图 9 6 种工况下隧道的温度分布

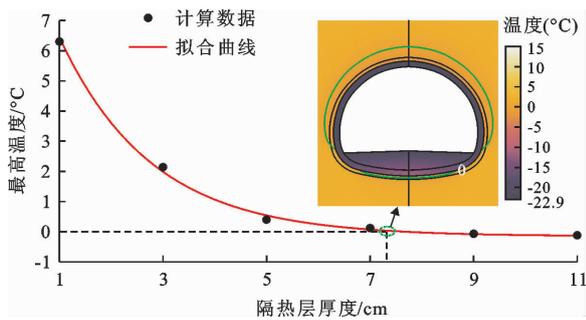


图 10 保温隔热层厚度与 L5 测点最高温度的关系

#### 4.4 最优保温隔热层厚度下隧道温度分布特征

为了评估隧道保温隔热层厚度的优化效果，绘制出最优保温隔热层厚度为  $7.2 \text{ cm}$  时的隧道温度场分布图(图 11)。

从图 11 可以看出，等温线总体上沿着地表呈层状形式分布，靠近隧道区域的等温线呈环形分布，隧道衬砌背后的围岩完全被  $-1.7 \sim 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的冻土区域包围，表明在此保温隔热层厚度下隧道围岩始终处于冻结状态，不会产生冻胀融沉变形。

图 12 为在最优保温隔热层厚度下各个关键测点位置 5 年内的温度场变化。

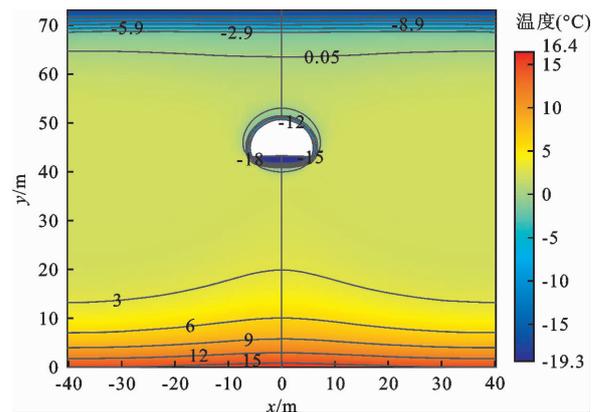


图 11 最优保温隔热层厚度 ( $X_i = 7.2 \text{ cm}$ ) 下隧道温度场分布

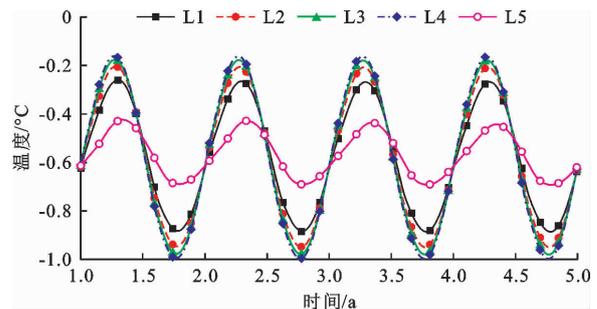


图 12 最优保温隔热层厚度 ( $X_i = 7.2 \text{ cm}$ ) 下各测点温度随时间变化

从图12可以明显看出,各个关键测点5年内温度呈周期性变化,且最高温度都在0℃以下,L5测点的温度振幅明显小于其他测点,这是L5测点上方填充的仰拱混凝土起到了一定的保温作用,使得L5测点的温度变化幅度较小。

## 5 讨论

基于多孔介质传热学、水力学以及流体力学等原理,建立了水-热耦合数学模型,并借助数值软件COMSOL Multiphysics对水-热耦合模型进行了验证。通过水-热耦合模型,提出一种多年冻土区隧道的保温隔热层厚度优化设计的计算方法,并以青海省某隧道工程为依托,优化了该隧道保温隔热层厚度。运用水-热耦合理论得出的结果和观点与前人的研究成果既有共同之处又存在一定的差异<sup>[13,22,25,30]</sup>。本文模型与谭贤君等<sup>[25]</sup>所建立的水-热耦合控制方程类似,但本文通过引入流体的压缩性,用压力形式表示冰-水系统连续性的微分方程,对水-热耦合方程进行改进,并将改进的模型嵌入至COMSOL Multiphysics中,其数值计算结果更加符合工程实际,且通过该数值软件可以精确计算隧道工程周围的水分场和渗流场对保温隔热层的影响。Tan等<sup>[30]</sup>的研究中将文献<sup>[25]</sup>中建立的水-热模型成功运用于寒区隧道工程中,本模型计算的结果与Tan等<sup>[30]</sup>的研究成果类似,也进一步证明了本模型理论的可靠性。Li等<sup>[13]</sup>、赵希望等<sup>[22]</sup>也通过建立水-热耦合模型,计算了寒区隧道保温隔热层的最佳厚度,得出的结论与本文的一致,其中一些细小的差异可能是由使用的不同数值软件所导致。

本研究考虑了水的渗流和冻融循环对多年冻土区的影响,较以往隧道工程对水-热耦合的研究有了很大的进步,但仍具有一定的局限性。多年冻土区隧道保温结构的失效和破坏是一个极其复杂的过程,围岩在冻胀融沉过程中产生的冻胀力同样也是一个重要的影响因素,本文的研究中并没有考虑这个因素,同样,大气降水及地下水的涌水量等因素也不能被忽视。另外,二维数值模型也不能很好地体现多年冻土水-热耦合过程的机理以及隧道真实的温度场,因此,在未来研究中有待建立考虑多种影响因素下(如冻胀力、大气降水以及地下水)的三维有限元模型。本文的研究虽有其局限性,但在一些特定的多年冻土区隧道工程中也能较好地指导工程的防寒抗冻设计。

## 6 结论

(1)建立了考虑水分渗流和冰水相变效应的水-热耦合模型,通过与Grenier等<sup>[26]</sup>的数值仿真结果进行对比,发现二者结果十分接近,从而验证了水-热耦合模型的可靠性。该模型可用于模拟多年冻土区隧道围岩的水-热耦合过程。

(2)隧道仰拱处是隧道产生冻害最不利的位置,且拱顶处的温度在隧道施工运营5年内呈正弦函数周期性变化,在隧道施工运营第1年的5月23日温度达到最高,选取该点的温度作为保温隔热层厚度优化设计的控制条件,计算得到保温隔热层的最优厚度为7.2 cm。

(3)在最优保温隔热层下隧道衬砌背后围岩均处于冻结状态,各个监测点的温度都在0℃以下,可以满足隧道保温结构稳定性的要求。

### 参考文献:

- [1] 严晓东,伍毅敏,许鹏,等.寒区隧道衬砌挂冰病害成因及预测预警技术[J].中国安全科学学报,2019,29(S2):174-180.
- [2] WU Yiming, XU Peng, LI Wenbo, et al. Distribution rules and key features for the lining surface temperature of road tunnels in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 172: 102979.
- [3] 唐波涛,王兴,王伟,等.季冻区高速公路隧道保温层铺设方法及温度场分布规律研究[J].公路交通科技,2023,40(5):152-161.
- [4] 万建国.我国寒区山岭交通隧道防冻技术综述与研究展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(7):1115-1131.
- [5] 袁金秀,王道远,马海龙.季节性冻土区隧道保温层御寒保温技术研究[J].铁道标准设计,2018,62(8):100-105.
- [6] 张矿三,刘建友,季娟,等.寒区隧道防寒抗冻技术研究综述及防冻设防新技术[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S2):210-214.
- [7] 田四明,王伟,吕刚,等.寒区隧道洞内温度场分布规律及防寒设计探讨[J].铁道标准设计,2022,66(12):84-90.
- [8] 许鹏,伍毅敏,严晓东,等.严寒地区高铁隧道温度场及保温层有效性分析[J].中国铁道科学,2022,43(4):64-73.
- [9] 于建游,姜逸帆,林铭,等.季节性寒区隧道保温隔热层厚度计算方法[J].科学技术与工程,2022,22(36):16219-16228.
- [10] 白贇,曾艳华,周小涵,等.基于对流-导热耦合作用的寒区隧道保温隔热层研究[J].隧道建设(中英文),2017,37(S2):94-101.
- [11] 周元辅,张学富,周元江.冻土隧道的保温隔热层参数设计

- 新方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(14): 314-319.
- [12] 刘星辰, 黄锋, 周洋, 等. 高温隧道隔热层厚度优化及衬砌热力耦合响应分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 108-117.
- [13] LI Shuangyang, NIU Fujun, LAI Yuanming, et al. Optimal design of thermal insulation layer of a tunnel in permafrost regions based on coupled heat - water simulations [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1264-1273.
- [14] YAN Qixiang, LI Binjia, ZHANG Yanyang, et al. Numerical investigation of heat-insulating layers in a cold region tunnel, taking into account airflow and heat transfer [J]. Applied Sciences, 2017, 7(7): 679.
- [15] ZHAO Zhihong, XU Haoran, LIU Guihong, et al. A robust numerical method for modeling ventilation through long tunnels in high temperature regions based on 1D pipe model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104050.
- [16] LU Taishan, ZHANG Guozhu, LIU Songyu, et al. Numerical investigation of the temperature field and thermal insulation design of cold-region tunnels considering airflow effect [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 191: 116923.
- [17] 吕清硕, 张志红, 戴福初. 双梯度驱动的非饱和冻土水热耦合模型[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(2): 202-207.
- [18] 李昱春, 张文兵, 任杰, 等. 基于正交试验法的河岸带水热耦合模型敏感参数识别[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 136-143.
- [19] 黄加明, 夏才初, 白雪莹. 冻融循环下隧道非冻土段底部融沉变形规律[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 453-460.
- [20] 雷飞亚. 考虑相变过程岩体孔隙率对寒区隧道温度场时空规律影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S1): 245-256.
- [21] 郑波, 吴剑, 郑金龙, 等. 高海拔严寒地区特长公路隧道保温层铺设长度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 353-359.
- [22] 赵希望, 张恒. 水-热耦合作用下严寒地区高速铁路隧道温度场分布规律[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 2069-2078.
- [23] 徐光苗, 刘泉声, 张秀丽. 冻结温度下岩体 THM 完全耦合的理论初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(21): 3709-3713.
- [24] 张慧梅, 杨更社, 刘慧. 冻融环境下岩体隧道水热耦合模型及数值分析[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(3): 305-309.
- [25] 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(7): 1455-1461.
- [26] GRENIER C, ANBERGEN H, BENSE V, et al. Groundwater flow and heat transport for systems undergoing freeze - thaw: intercomparison of numerical simulators for 2D test cases [J]. Advances in Water Resources, 2018, 114: 196-218.
- [27] 马印怀, 林铭, 姜逸帆, 等. 延崇高速公路金家庄特长螺旋隧道温度场分布规律及保温层研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(11): 1853-1862.
- [28] 冯强, 蒋斌松. 多层介质寒区公路隧道保温层厚度计算的一种解析方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1879-1887.
- [29] 姚红志, 张晓旭, 董长松, 等. 多年冻土区公路隧道保温隔热层铺设方式及材料性能对比分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 106-113.
- [30] TAN Xianjun, CHEN Weizhong, WU Guojun, et al. Numerical simulations of heat transfer with ice - water phase change occurring in porous media and application to a cold-region tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 170-179.