

引用本文:赵鹏宇,黄解放,陈建勋,等.寒冷地区隧道防冻保温层等效厚度计算方法误差分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(4):135-143.

ZHAO Pengyu, HUANG Jiefang, CHEN Jianxun, et al. Error analysis of equivalent thickness calculation method of tunnel thermal insulation layer in cold area[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 135-143.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04109

# 寒冷地区隧道防冻保温层等效厚度计算方法误差分析

赵鹏宇<sup>1,2</sup>, 黄解放<sup>3</sup>, 陈建勋<sup>1,2</sup>, 罗彦斌<sup>1,2</sup>, 董体健<sup>1</sup>, 荀文杰<sup>1</sup>, 刘 浏<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 寒冷地区隧道气象与结构力学状态交通运输行业野外科学观测研究基地, 陕西 西安 710064; 3. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024)

**摘要:**为分析寒冷地区隧道防冻保温层等效厚度计算方法的计算误差,考虑年周期下的隧道沿径向深度瞬态传热特性,提出了基于数值模拟计算的防冻保温层等效厚度法误差计算方法。同时采用控制变量法计算分析空气年平均温度、年温度振幅、围岩初始温度、围岩导热系数和导温系数 5 类因素对等效厚度法计算误差的影响。结果表明:在隧道衬砌表面铺设防冻保温层后,围岩温度影响深度减小,衬砌结构和围岩最大冻结深度出现时间较无防冻保温层铺设时,提前近 20 d,说明防冻保温层铺设前后隧道结构内部传热状态存在差异,此外,衬砌结构和围岩内部为瞬态传热,因此等效厚度法计算原理、假定条件与实际不符,计算结果存在误差;等效厚度法计算结果整体偏小,但在空气年温度振幅较小或围岩初始温度较大时,计算结果存在偏大的情况;空气年平均温度、围岩初始温度、围岩导热系数越低,空气年温度振幅、围岩导温系数越高,计算误差越大;围岩导热系数和围岩初始温度对计算误差影响较大,当围岩导热系数为  $2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 、围岩初始温度为  $5^\circ\text{C}$  时,计算误差分别可达 1.6 cm 和 1.4 cm,其余参数变化所形成的计算误差均小于 1 cm。

**关键词:**隧道工程;寒冷地区;防冻保温层;等效厚度法;计算误差

中图分类号:U452

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)04-0135-09

## Error analysis of equivalent thickness calculation method of tunnel thermal insulation layer in cold area

ZHAO Pengyu<sup>1,2</sup>, HUANG Jiefang<sup>3</sup>, CHEN Jianxun<sup>1,2</sup>, LUO Yanbin<sup>1,2</sup>, DONG Tijian<sup>1</sup>,  
XUN Wenjie<sup>1</sup>, LIU Liu<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Scientific Observation and Research Base of Transport Industry of Meteorology and Structural Mechanical State of Tunnels in Cold Areas, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100024, China)

**Abstract:** In order to analyze the calculation error of the equivalent thickness calculation method for thermal insulation layer in tunnel in cold areas, the transient heat transfer characteristics of tunnel along the radial depth under annual cycles was considered. A calculation method for the

收稿日期:2022-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2268214, 52208385);陕西省杰出青年科学基金项目(2020JC-28);

新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2018A03003-4);西藏自治区科技计划项目(XZ201801-GB-07)

作者简介:赵鹏宇(1989-),男,工学博士,讲师,E-mail:903716642@qq.com。

通信作者:陈建勋(1969-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:chenjx1969@chd.edu.cn。

error of the equivalent thickness calculation method of thermal insulation layer based on numerical simulation was proposed. Meanwhile, the control variable method was adopted to calculate and analyze the influence of the five factors, including of annual average air temperature, annual air temperature amplitude, initial temperature, thermal conductivity and thermal diffusion coefficient of rock mass, on the calculation error of the equivalent thickness method. The results show that after the thermal insulation layer is laid on the tunnel lining surface, the influence depth of surrounding rock temperature is decreased, and the maximum freezing depth of lining and surrounding rock occurs nearly 20 d earlier compared to when there is no thermal insulation layer. It indicates that there are differences in the internal heat transfer state of tunnel lining and surrounding rock before and after the thermal insulation layer laid. Additionally, the transient heat transfer occurs within the tunnel lining and surrounding rock, Therefore, the calculation principle and assumed condition of the equivalent thickness calculation method do not conform to the actual situation, resulting in an error in the calculation results. The calculation results of the equivalent thickness method are generally smaller. However, there are cases where the calculation results are larger when the annual temperature amplitude is low or the initial temperature of the surrounding rock is high. The calculation error is larger when the annual average air temperature and the initial temperature and thermal conductivity of the surrounding rock are lower. Conversely, the calculation error is larger, when the annual air temperature amplitude and thermal diffusivity of the surrounding rock are higher. The thermal conductivity and the initial temperature of the surrounding rock have a significant impact on the calculation error. When the thermal conductivity of the surrounding rock is  $2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  and the initial temperature of the surrounding rock is  $5^\circ\text{C}$ , the calculation errors can reach 1.6 cm and 1.4 cm, respectively. The calculation errors resulting from variations in other parameters are all less than 1 cm.

**Key words:** tunnel engineering; cold area; thermal insulation layer; equivalent thickness method; calculation error

## 0 引言

寒冷地区隧道在低温作用下易发生地下水结冰冻胀<sup>[1-3]</sup>,引发冻害问题,主要表现为衬砌开裂、挂冰和路面冒水、结冰等<sup>[4-6]</sup>,严重影响隧道结构长期稳定,威胁隧道行车安全<sup>[7]</sup>。目前,寒冷地区隧道主要采用主动供热<sup>[8,9]</sup>、设置防寒保温门<sup>[10]</sup>、铺设防冻保温层的方法来防止冻害发生。其中,铺设防冻保温层施工简单,工程费用低,不影响隧道正常行车,在国内外被广泛采用<sup>[11-14]</sup>。

铺设防冻保温层的目的是为了保证防水板背部初期支护和围岩温度不出现负温,防止围岩地下水结冰冻胀<sup>[15-16]</sup>。防冻保温层厚度计算方法主要包括数值模拟计算方法和等效厚度法两类。数值模拟计算方法理论和原理明确,能够有效保证防冻保温层厚度计算结果的准确性,因此在大量的研究进行了应用<sup>[17-19]</sup>。等效厚度法由陈建勋等<sup>[20-21]</sup>基于稳

态传热原理研究提出,因其计算简单,容易掌握,而被广泛采用<sup>[22-23]</sup>。目前,该计算方法已被纳入《季节性冻土地区公路设计与施工技术规范》(JTG/T D31-06—2017)<sup>[24]</sup>和《公路隧道加固技术规范》(JTG/T 5440—2018)<sup>[25]</sup>。该计算方法的准确性一直未进行验证,相关研究较少,仅陈建勋等<sup>[21]</sup>将数值模拟计算法和等效厚度法计算得出的防冻保温层厚度进行了比较,发现等效厚度法计算结果较数值模拟计算结果偏小,然而该研究采用的工况相对单一,且两种方法关联性不强,等效厚度法采用的围岩最大冻结深度为实测结果,而数值模拟计算与现场实测不相关。

本文针对寒冷地区公路隧道防冻保温层表面铺设,从等效厚度法和数值模拟计算法原理出发,开展等效厚度法计算误差研究,提出基于数值模拟计算的防冻保温层等效厚度法误差计算方法,并揭示相关因素对其误差的影响。

# 1 防冻保温层厚度计算方法

## 1.1 基本假定

(1)隧道衬砌结构和围岩内部仅发生沿径向的热传递。

(2)隧道各材料包括二次衬砌、初期支护、围岩、路面结构等是均匀的、各向同性的连续介质,且随着温度和时间变化,各材料热物理性质不变。

(3)各材料层接触良好,不存在接触热阻。

(4)不考虑围岩地下水渗流和相变。

(5)洞内气温沿高度方向相等,即同一断面净空内部不同位置气温相等。

## 1.2 等效厚度法

由于隧道横断面衬砌结构和围岩内部仅发生沿径向的热传递,为了简化计算,将隧道简化为多层圆筒<sup>[26]</sup>,如图1所示。

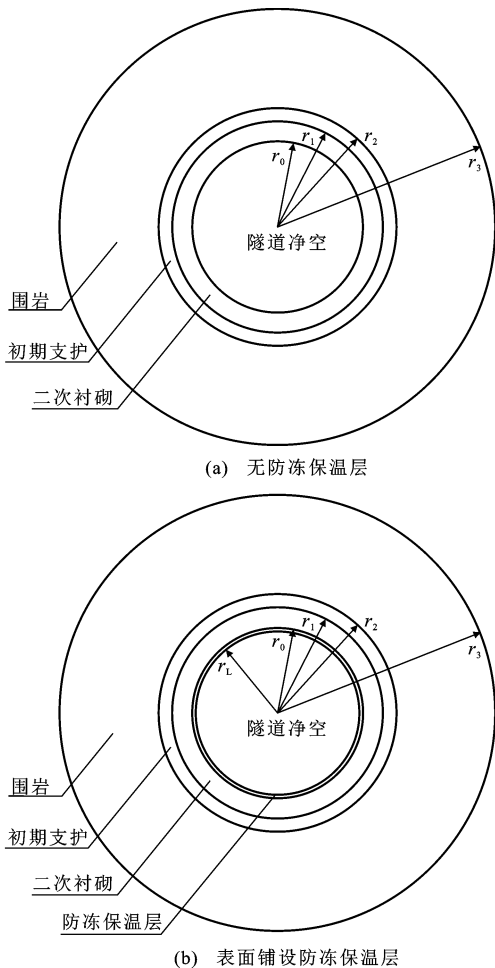


图1 隧道热传递模型

Fig.1 Heat conduction model of tunnel

根据稳态传热原理,在考虑空气与衬砌表面发生对流换热时,隧道围岩最大冻结深度处至空气传

递的热流量计算公式为

$$Q_1 = 2\pi(t_f - t_a) / \left[ r_0 h_1 + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_3} \ln\left(\frac{r(x)}{r_2}\right) \right] \quad (1)$$

式中: $Q_1$  为单位长度隧道结构向空气传递的热流量; $h_1$  为空气和二次衬砌结构之间的对流换热系数; $t_f$  为围岩最大冻结深度处温度,取  $0^\circ\text{C}$ ;  $t_a$  为气温; $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  分别为隧道二次衬砌、初期支护、围岩内表面(净空侧)半径; $r(x)$  为隧道围岩最大冻结深度处的半径; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  分别为隧道二次衬砌、初期支护、围岩导热系数。

防水板至空气之间的热流量计算公式为

$$Q_2 = 2\pi(t_p - t_a) / \left[ r_0 h_2 + \frac{1}{\lambda_L} \ln\left(\frac{r_0}{r_L}\right) + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \right] \quad (2)$$

式中: $Q_2$  为衬砌表面铺设防冻保温层后单位长度隧道结构向空气传递的热流量; $h_2$  为空气和防冻保温层之间的对流换热系数; $t_p$  为防水板位置处温度; $r_L$  为防冻保温层内表面半径; $\lambda_L$  为防冻保温层导热系数。

令  $Q_1 = Q_2$ , 并取  $t_p$  为  $0^\circ\text{C}$ , 则

$$r_0 h_1 + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_3} \ln\left(\frac{r(x)}{r_2}\right) = r_0 h_2 + \frac{1}{\lambda_L} \ln\left(\frac{r_0}{r_L}\right) + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad (3)$$

因此,在确定围岩最大冻结深度的前提下,将各隧道几何参数和热物理参数值代入式(3),便可以求得隧道所需的最小防冻保温层厚度( $r_0 - r_L$ )。

基于以上分析可以发现,隧道防冻保温层等效厚度法计算存在两个关键问题:①整个计算公式推导是基于稳态传热计算原理,但是实际上隧道洞内气温随时间周期性变化,并总体呈三角函数变化规律[式(4)]<sup>[27-28]</sup>,因此隧道结构内部实际发生瞬态传热;②防冻保温层与衬砌结构、围岩热物理性质差异显著,其铺设前后隧道结构向空气传递的热流量是否不变,即  $Q_1$  和  $Q_2$  是否相等,缺乏有效依据。因此,防冻保温层等效厚度法计算原理、假定条件与实际情况不完全相符,将存在一定的计算误差。

$$t_{in} = t_M + t_V \sin[\pi(\tau - \varphi) / 15\,552\,000] \quad (4)$$

式中: $t_{in}$  为隧道洞内气温; $t_M$ 、 $t_V$  分别为年平均温度和年温度振幅; $\tau$  为时间; $\frac{\pi\varphi}{15\,552\,000}$  为初相位。

## 1.3 数值模拟计算方法

数值模拟计算方法是建立隧道数值计算模型,根据瞬态传热原理[式(5)]<sup>[29]</sup>,对隧道在铺设不

同厚度防冻保温层后的衬砌结构和围岩随时间变化进行试算。根据计算结果,以隧道二次衬砌和初期支护间防水板位置不出现负温为标准,确定所需的防冻保温层厚度。

$$\frac{\partial t(x,y,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda(x,y)}{\rho(x,y)c(x,y)} \left[ \frac{\partial^2 t(x,y,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x,y,\tau)}{\partial y^2} \right] + q(\tau) \tag{5}$$

式中: $t(x,y,\tau)$ 为随时间变化的不同位置点温度; $\lambda(x,y)$ 为不同位置点导热系数; $\rho(x,y)$ 为不同位置点密度; $c(x,y)$ 为不同位置点比热容; $q(\tau)$ 为外部热源热流密度,本次计算不考虑,其值为0。

与等效厚度法计算模型相似,本次计算建立以断面外轮廓为基准向外延伸的环形边界数值计算模型(图2),进行隧道衬砌结构和围岩温度计算。防冻保温层外表面、路面与空气接触,为对流换热边界,对流换热系数统一取为 $15\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。模型外边界为围岩温度影响边界,可设置为恒温边界,其温度为围岩初始温度。需要指出的是,本次计算以围岩年温度振幅低于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为标准<sup>[30]</sup>,确定围岩温度影响边界,即模型外边界。因此,在进行防冻保温层计算时,需要提前计算确定模型外边界,以保证计算结果准确性。

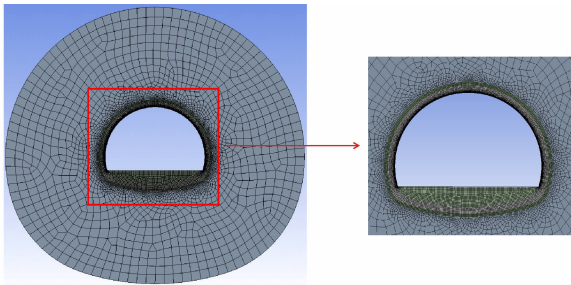


图2 衬砌表面铺设防冻保温层数值计算模型  
Fig. 2 Numerical calculation model with thermal insulation layer laid on lining surface

模型防冻保温层、衬砌结构和围岩平均网格长度分别取0.01、0.1、1 m。采用热分析软件Fluent对隧道径向温度场进行计算,进而确定所需的防冻保温层厚度。

2 等效厚度法误差计算

2.1 误差计算方法

由式(3)可知,防冻保温层等效厚度法计算的关键是确定隧道围岩最大冻结深度。本次计算首先对一定边界条件下的无防冻保温层隧道衬砌结构和围岩温度场进行数值模拟计算,确定围岩最大冻结深

度,然后将该值代入至式(3),通过等效厚度法计算得到所需的防冻保温层厚度。本次隧道衬砌结构和围岩温度场计算原理、方法和上述防冻保温层厚度数值模拟计算相同,具体计算模型如图3所示。

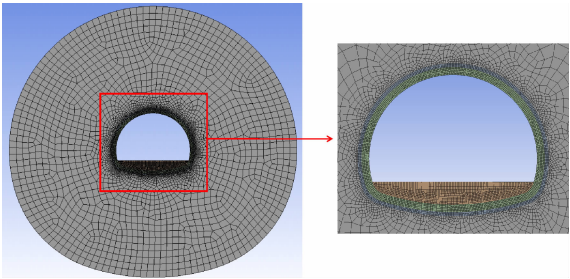


图3 无防冻保温层数值计算模型  
Fig. 3 Numerical calculation model without thermal insulation layer laid

模型衬砌结构和围岩平均网格长度大小与铺设防冻保温层计算模型一致,材料热物理参数和边界条件也保持不变,采用FLUENT热分析软件对隧道衬砌结构和围岩温度场进行计算,进而确定围岩最大冻结深度。

为了验证模型网格大小对计算结果的影响,将衬砌结构和围岩平均网格长度分别减小至0.05 m和0.2 m,得到有、无防冻保温层铺设时的衬砌结构和围岩温度场计算结果与原计算结果最大差值分别为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无防冻保温层铺设时的围岩最大冻结深度仅相差0.02 m,相应地,采用数值模拟计算法和等效厚度法计算得到的防冻保温层厚度基本不变。因此,本文数值模拟计算模型采用的网格大小选择合理,对计算结果基本没有影响。

基于以上分析,防冻保温层厚度等效厚度法计算和数值模拟计算法所采用的材料热物理参数、边界条件等计算参数是完全对应的,且隧道温度场数值模拟计算方法的有效性已得到了诸多研究成果的验证<sup>[17-19,21]</sup>,网格大小选择合理,计算误差小,因此通过将两种方法计算结果进行比较,可以有效反映等效厚度计算方法的准确性。

2.2 计算实例分析

由于寒冷地区隧道洞内气温随时间呈周期性的近似三角函数变化规律,本次计算取洞内气温边界条件为

$$t_{in} = 3 + 17\sin(\pi\tau/15\ 552\ 000) \tag{6}$$

二次衬砌、初期支护和围岩热物理计算参数取值见表1。二次衬砌和初期支护厚度分别为50 cm和26 cm。围岩外边界温度和模型初始温度均取 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将以上计算参数代入模型中,通过试算,可以得

表 1 模型各材料计算参数

Table 1 Calculation parameters of model materials

材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热容 $c/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	导热系数 $\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	导温系数 $\alpha/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
二次衬砌混凝土	2 500	920	1.74	$7.57 \times 10^{-7}$
初期支护混凝土	2 300	1 000	2.23	$9.70 \times 10^{-7}$
路面混凝土	2 300	920	1.51	$7.14 \times 10^{-7}$
围岩	2 800	950	3.50	$1.32 \times 10^{-6}$

出隧道围岩温度影响边界距衬砌表面距离为 14.5 m,因此为了消除边界效应的影响,将计算模型外边界统一设置在距衬砌表面 16 m 深度处。本次计算步长取 6 d,计算总时间为 10 年,以保证模型整体传热充分。计算过程中,对每一步温度计算结果进行保存。

对第 10 年隧道温度计算结果进行汇总,可相应统计得出衬砌结构和围岩冻结深度随时间变化,如图 4 所示。隧道衬砌结构和围岩冻结深度随时间推移不断增大。在计算第 3 570 d,围岩最大冻结深度达到最大,为 3.07 m,相应的衬砌结构和围岩温度沿径向分布如图 5 所示。该时刻衬砌表面温度仅为  $-6.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,显著高于空气最低气温  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并滞后于最低气温出现时间(第 3 510 d)60 d。将围岩最大冻结深度计算结果以及表 1 各材料导热系数值代入式(3),可以得到防冻保温层等效厚度法计算结果为 0.024 cm。

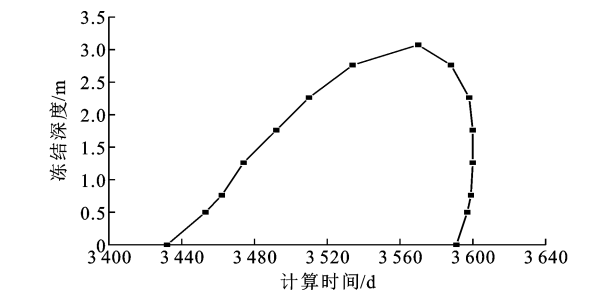


图 4 隧道衬砌结构和围岩冻结深度随时间变化

Fig. 4 Variation of freezing depth of tunnel lining and surrounding rock with time

建立不同防冻保温层厚度的隧道数值计算模型,采用上述相同的边界条件、初始温度和材料热物理参数值,对相应的隧道衬砌结构和围岩温度进行计算。由计算结果可知,当防冻保温层厚度取 3.0 cm 时,气温径向影响深度小于 11 m,与不铺设保温层相比,温度影响深度减小了约 4 m。在计算第 3 552 d,衬砌结构和围岩温度分布如图 6 所示,防水板位置处温度为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且为全年最低。防水板背部初期支护和围岩全年为正温。由数值模拟计算得出的防冻保温层厚度为 3.0 cm,与等效厚度法计算

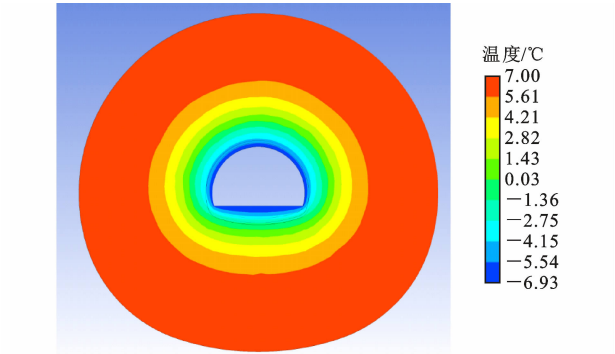


图 5 围岩冻结深度最大时衬砌结构和围岩温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of lining and surrounding rock at maximum freezing depth of surrounding rock

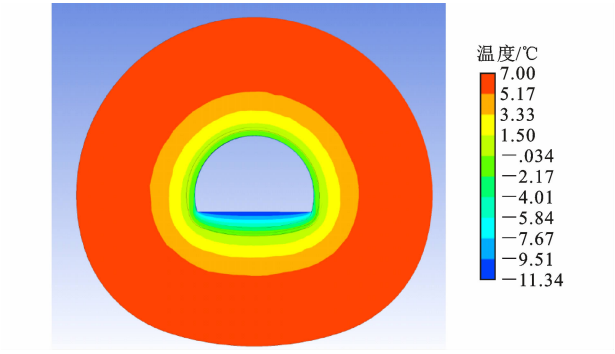


图 6 防水板处温度最低时衬砌结构和围岩温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of lining and surrounding rock when temperature at waterproof board is the lowest

结果相比,增大了 0.6 cm。此外,由计算结果可知,在铺设 3.0 cm 厚的防冻保温层时,隧道衬砌结构最大冻结深度出现时刻滞后于气温最低时刻 42 d,早于无防冻保温层铺设时。

综上所述,防冻保温层铺设降低了气温径向影响深度,并使得衬砌结构和围岩最大冻结深度出现时刻发生改变,因此防冻保温层铺设前后隧道结构内部热传递状态发生变化,防冻保温层等效厚度法计算结果与数值模拟计算存在偏差。

### 3 等效厚度法误差影响因素分析

为了揭示空气年平均温度、空气年温度振幅、围岩初始温度、围岩导热系数和围岩导温系数 5 个主



要因素对防冻保温层等效厚度法计算误差的影响,采用控制变量法建立了包括上述计算工况(工况 1)在内的 21 种工况(表 2),对等效厚度法和数值模拟计算法计算得到的防冻保温层厚度进行比较。

表 2 不同工况下的计算参数

Table 2 Calculation parameters under different working conditions					
工况	$T_{av}/^{\circ}\text{C}$	$T_{am}/^{\circ}\text{C}$	$T_{ri}/^{\circ}\text{C}$	围岩导热系数/ [ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	围岩导温系数/ ( $10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	3	17	7	3.5	1.32
2	5	17	7	3.5	1.32
3	4	17	7	3.5	1.32
4	2	17	7	3.5	1.32
5	1	17	7	3.5	1.32
6	3	15	7	3.5	1.32
7	3	13	7	3.5	1.32
8	3	11	7	3.5	1.32
9	3	9	7	3.5	1.32
10	3	17	5	3.5	1.32
11	3	17	9	3.5	1.32
12	3	17	11	3.5	1.32
13	3	17	13	3.5	1.32
14	3	17	7	3.0	1.32
15	3	17	7	2.5	1.32
16	3	17	7	2.0	1.32
17	3	17	7	1.5	1.32
18	3	17	7	3.5	1.50
19	3	17	7	3.5	1.10
20	3	17	7	3.5	0.90
21	3	17	7	3.5	0.70

注: $T_{av}$ 为空气年平均温度; $T_{am}$ 为空气年温度振幅; $T_{ri}$ 为围岩初始温度。

3.1 空气年平均温度

通过对工况 2~5 在无防冻保温层状态下的衬砌结构和围岩温度场进行计算,可得其围岩最大冻结深度分别为 2.44、2.75、3.40、3.70 m。相应地,通过等效厚度法计算得出各工况防冻保温层厚度分别为 2.1、2.2、2.5、2.7 cm,而数值模拟计算得到的防冻保温层厚度分别为 2.2、2.6、3.5、3.8 cm。结合工况 1 计算结果,可以发现采用等效厚度法计算得到的防冻保温层厚度整体变化量为 0.6 cm,小于数值模拟计算结果的变化量 1.6 cm(图 7)。数值模拟计算结果整体较大,在年平均气温为 1℃时,两者差值为 1.1 cm,而随着空气年平均温度升高,两者差值逐渐减小,升高至 5℃时,两者差值约为 0 cm。

3.2 空气年温度振幅

通过对工况 6~9 在无防冻保温层状态下的衬

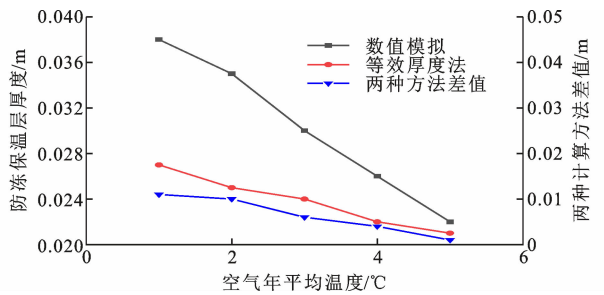


图 7 防冻保温层厚度计算结果随空气年平均温度变化

Fig. 7 Variation of thickness calculation results of thermal insulation layer with annual average air temperature

砌结构和围岩温度场进行计算,可得其围岩最大冻结深度分别为 2.77、2.05、1.96、1.47 m。相应地,通过等效厚度法计算得出各工况防冻保温层厚度分别为 2.2、1.8、1.8、1.5 cm,而数值模拟计算得到的防冻保温层厚度分别为 2.6、2.0、1.5、1.0 cm。结合工况 1 计算结果,可以发现采用等效厚度法计算得到的防冻保温层厚度整体变化量为 0.9 cm,同样小于数值模拟计算结果的变化量 2.0 cm(图 8)。在空气年温度振幅约为 12.2℃时,两种方法防冻保温层厚度计算结果基本相等。而当空气年温度振幅大于 12.2℃时,数值模拟计算结果大于等效厚度法,且两者差值随空气年温度振幅升高而增大。在空气年温度振幅达到 17℃时,两者差值为 0.06 cm。当空气年温度振幅小于 12.2℃时,数值模拟计算结果小于等效厚度法,且两者差值随空气年温度振幅下降而增大。在空气年温度振幅下降至 9℃时,两者差值为 0.05 cm。

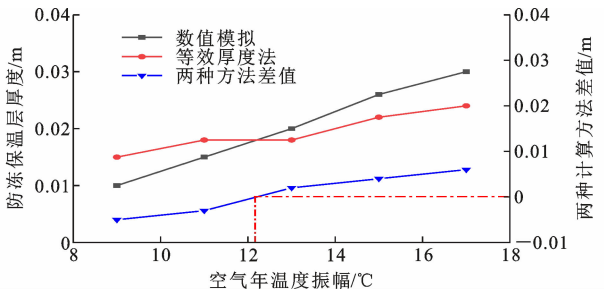


图 8 防冻保温层厚度计算结果随空气年温度振幅变化

Fig. 8 Variation of thickness calculation results of thermal insulation layer with annual air temperature amplitude

3.3 围岩初始温度

通过对工况 10~13 在无防冻保温层状态下的衬砌结构和围岩温度场进行计算,可得其围岩最大冻结深度分别为 3.50、2.70、2.40、2.17 m。相应

地,通过等效厚度法计算得出各工况防冻保温层厚度分别为 2.6、2.2、2.0、1.9 cm,而数值模拟计算得到的防冻保温层厚度分别为 4.0、2.4、1.9、1.6 cm。结合工况 1 计算结果,可以发现采用等效厚度法计算得到的防冻保温层厚度整体变化量为 0.7 cm,同样小于数值模拟计算结果的变化量 2.4 cm(图 9)。在围岩初始温度约为 10.4 °C 时,两种方法防冻保温层厚度计算结果基本相等。当围岩初始温度小于 10.4 °C 时,数值模拟计算结果大于等效厚度法,且两者差值随围岩初始温度减小而增大。在围岩初始温度达到 5 °C 时,两者差值为 1.4 cm。当围岩初始温度大于 10.4 °C 时,数值模拟计算结果小于等效厚度法,且两者差值随围岩初始温度升高而增大。在围岩初始温度达到 13 °C 时,两者差值为 0.3 cm。

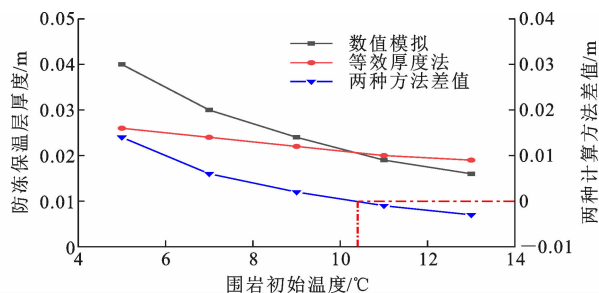


图 9 防冻保温层厚度计算结果随围岩初始温度变化

Fig. 9 Variation of thickness calculation results of thermal insulation layer with initial temperature of surrounding rock

### 3.4 围岩导热系数

通过对工况 14~17 在无防冻保温层状态下的衬砌结构和围岩温度场进行计算,可得其围岩最大冻结深度分别为 3.23、3.45、3.65、3.90 m。相应地,通过等效厚度法计算得出各工况防冻保温层厚度分别为 2.7、3.2、3.8、5.1 cm,而数值模拟计算得到的防冻保温层厚度分别为 3.4、3.7、5.4、6.5 cm。结合工况 1 计算结果,可以发现采用等效厚度法计算得到的防冻保温层厚度整体变化量为 2.7 cm,同样小于数值模拟计算结果的变化量 3.5 cm,如图 10 所示。数值模拟计算结果整体大于等效厚度法,且围岩导热系数越小,两者差值越大。当围岩导热系数小于  $2.0 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  时,两者差值可达 1.6 cm,而围岩导热系数大于  $2.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  时,两者差值小于 0.7 cm。

### 3.5 围岩导温系数

通过对工况 18~21 在无防冻保温层状态下的衬砌结构和围岩温度场进行计算,可得其围岩最大冻结深度分别为 3.23、2.76、2.55、2.25 m。相应

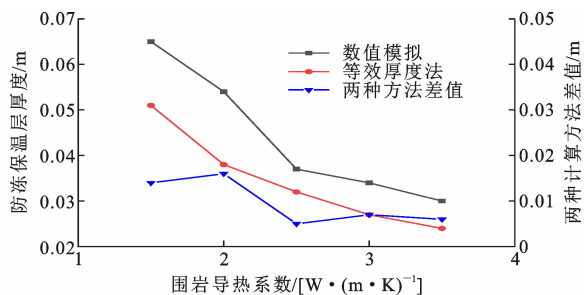


图 10 防冻保温层厚度计算结果随围岩导热系数变化

Fig. 10 Variation of thickness calculation results of thermal insulation layer with thermal conductivity coefficient of surrounding rock

地,通过等效厚度法计算得出各工况防冻保温层厚度分别为 2.5、2.2、2.1、2.0 cm,而数值模拟计算得到的防冻保温层厚度分别为 3.3、2.9、2.6、2.2 cm。结合工况 1 计算结果,可以发现采用等效厚度法计算得到的防冻保温层厚度整体变化量为 0.5 cm,同样小于数值模拟计算结果的变化量 1.1 cm,如图 11 所示。数值模拟计算结果整体大于等效厚度法,且围岩导温系数越大,两者差值越大。当围岩导温系数为  $1.50 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时,两者差值可达 0.8 cm,而围岩导温系数  $0.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时,两者差值仅为 0.2 cm。

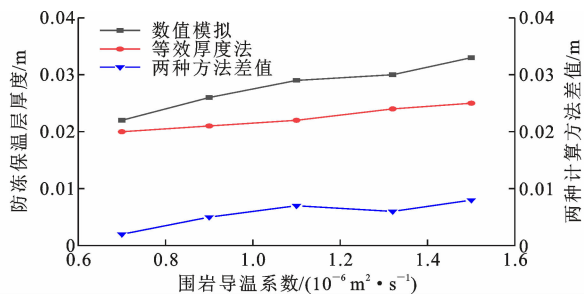


图 11 防冻保温层厚度计算结果随围岩导温系数变化

Fig. 11 Variation of thickness calculation results of thermal insulation layer with thermal diffusion coefficient of surrounding rock

## 4 结 语

(1)在周期性变化的洞内气温作用下,隧道衬砌结构和围岩内部一直发生瞬态热传递。当隧道衬砌表面铺设防冻保温层后,洞内气温对隧道围岩温度影响深度减小,衬砌结构和围岩最大冻结深度出现时间较无防冻保温层铺设时提前近 20 d,说明防冻保温层铺设前后隧道衬砌结构和围岩内部传热状态不同。因而,等效厚度法计算原理、假定条件与实际不相符,计算结果存在误差。

(2)根据隧道防冻保温层等效厚度法计算原理,提出了以数值模拟计算结果为标准,考虑年周期下隧道瞬态传热的等效厚度法误差计算方法。

(3)防冻保温层等效厚度法计算结果整体偏小,但在空气年温度振幅较小或围岩初始温度较大时,计算结果存在偏大的情况。

(4)空气年平均温度、围岩初始温度、围岩导热系数越低,空气年温度振幅、围岩导温系数越高,等效厚度法计算误差越大,其中围岩导热系数和围岩初始温度对计算误差影响相对较大。当围岩导热系数为  $2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 、围岩初始温度为  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,计算误差最大,分别可达  $1.6 \text{ cm}$  和  $1.4 \text{ cm}$ ,其余参数影响较小,计算误差均小于  $1 \text{ cm}$ 。

## 参考文献:

## References:

- [1] 赖远明,张明义,李双洋,等.寒冷地区工程理论与应用[M].北京:科学出版社,2009.  
LAI Yuanming, ZHANG Mingyi, LI Shuangyang, et al. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] ZHAO X, YANG X H, ZHANG H W, et al. An analytical solution for frost heave force by the multifactor of coupled heat and moisture transfer in cold-region tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 175: 103077.
- [3] 张玉伟,谢永利,李又云,等.基于温度场时空分布特征的寒区隧道冻胀模型[J].岩土力学,2018,39(5): 1625-1632.  
ZHANG Yuwei, XIE Yongli, LI Youyun, et al. A frost heave model based on space-time distribution of temperature field in cold region tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1625-1632.
- [4] 吴紫汪,赖远明,藏恩穆,等.寒冷地区隧道工程[M].北京:海洋出版社,2003.  
WU Ziwan, LAI Yuanming, ZANG Enmu, et al. Tunnel engineering in cold area[M]. Beijing: Ocean Press, 2003.
- [5] XIA C C, LYU Z T, LI Q, et al. Transversely isotropic frost heave of saturated rock under unidirectional freezing condition and induced frost heaving force in cold region tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 152: 48-58.
- [6] ZHAO X, ZHANG H W, LAI H P, et al. Temperature field characteristics and influencing factors on frost depth of a highway tunnel in a cold region[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 179:

103141.

- [7] ZHOU Y F, ZHANG X F, DENG J H. A mathematical optimization model of insulation layer's parameters in seasonally frozen tunnel engineering[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 101: 73-80.
- [8] ZHANG G Z, XIA C C, YANG Y, et al. Experimental study on the thermal performance of tunnel lining ground heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2014, 77: 149-157.
- [9] LAI J X, WANG X L, QIU J L, et al. A state-of-the-art review of sustainable energy based freeze proof technology for cold-region tunnels in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 3554-3569.
- [10] LAI Y M, WU Z W, ZHANG S J, et al. Study of methods to control frost action in cold regions tunnels[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2003, 17(4): 144-152.
- [11] 陈建勋.公路隧道冻害防治技术[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(4):68-70.  
CHEN Jianxun. Technique of preventing frost damage in highway tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26(4): 68-70.
- [12] 陈建勋,张建勋,朱计华.硬质聚氨酯在寒冷地区隧道冻害防治中的应用[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(5):66-68.  
CHEN Jianxun, ZHANG Jianxun, ZHU Jihua. Application of hard urethane foam for prevention of frost damage in tunnels at cold area[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26(5): 66-68.
- [13] LUO Y B, CHEN J X. Research status and progress of tunnel frost damage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019, 6(3): 297-309.
- [14] 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.  
WAN Jianguo. Review on and present situation and prospect of antifreezing technologies for tunnels in cold areas in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1115-1131.
- [15] LI S Y, NIU F J, LAI Y M, et al. Optimal design of thermal insulation layer of a tunnel in permafrost regions based on coupled heat-water simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1264-1273.
- [16] LU T S, ZHANG G Z, LIU S Y, et al. Numerical investigation of the temperature field and thermal insu-



- lation design of cold-region tunnels considering air-flow effect[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 191:116923.
- [17] 冯 强,刘炜炜,蒋斌松,玉希莫勒盖隧道温度场及保温层厚度的研究[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(5): 78-84.
- FENG Qiang, LIU Weiwei, JIANG Binsong. Study on the temperature field and insulation layer thickness of the Yuximolegai tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(5): 78-84.
- [18] MA Q G, LUO X X, LAI Y M, et al. Numerical investigation on thermal insulation layer of a tunnel in seasonally frozen regions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 138: 280-291.
- [19] 王志杰,周飞聪,周 平,等. 高寒高海拔隧道保温层敷设方式及设计参数优化[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(8): 182-194.
- WANG Zhijie, ZHOU Feicong, ZHOU Ping, et al. Laying method and design parameter optimization of the thermal insulation layer in alpine and altitude tunnels[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(8): 182-194.
- [20] 陈建勋. 寒冷地区隧道防冻保温层设计计算方法及应用[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(11): 85-88.
- CHEN Jianxun. Design method and application for anti-freezing thermal-protective layers in cold-area tunnels[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(11): 85-88.
- [21] 陈建勋,罗彦斌. 寒冷地区隧道防冻保温层厚度计算方法[J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(2): 76-79.
- CHEN Jianxun, LUO Yanbin. Calculation method of antifreezing layer thickness in cold region tunnel[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(2): 76-79.
- [22] 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司. 川西高原公路隧道设计与施工技术指南[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd. Design and construction guide for highway tunnels in Western Sichuan Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [23] 赵 勇. 隧道设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- ZHAO Yong. Tunnel design theory and method[M]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [24] 季节性冻土地区公路设计与施工技术规范: JTG/T D31-06—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- Technical specifications for design and construction of highway in seasonal frozen soil region: JTG/T D31-06—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [25] 公路隧道加固技术规范: JTG/T 5440—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- Technical specifications for strengthening of highway tunnel: JTG/T 5440—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [26] 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解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(9): 1767-1773.
- 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): 1767-1773.
- [27] 陈建勋,罗彦斌. 寒冷地区隧道温度场的变化规律[J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(2): 44-48.
- CHEN Jianxun, LUO Yanbin. Changing rules of temperature field for tunnel in cold area [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008, 8(2): 44-48.
- [28] ZHAO P Y, CHEN J X, LUO Y B, et al. Investigation of the insulation effect of thermal insulation layer in the seasonally frozen region tunnel: a case study in the Zuomutai tunnel, China [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 4978359.
- [29] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [30] TAKUMI K, TAKASHI M, KOUICHI F. An estimation of inner temperatures at cold region tunnel for heat insulator design [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 54A: 32-38.