

引文格式:陈建勋,董体健,赵鹏宇,等.寒区隧道防冻保温层隔热作用机理及其厚度影响因素研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(3):129-137.

CHEN Jianxun, DONG Tijian, ZHAO Pengyu, et al. Research on mechanism of insulation effect and thickness influencing factors of tunnel anti-freezing insulation layer in cold regions[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 129-137.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05059

寒区隧道防冻保温层隔热作用机理及其厚度影响因素研究

陈建勋^{1,2}, 董体健¹, 赵鹏宇^{1,2}, 黄解放³, 杨野东⁴

(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; 4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:针对寒冷地区公路隧道防冻保温层表面铺设,共设置了21组计算工况,通过对年周期下隧道防冻保温层、衬砌结构和围岩沿径向温度场变化以及各工况所需的防冻保温层厚度进行数值模拟计算,研究隧道防冻保温层隔热作用机理及其所需厚度的影响因素。结果表明:防冻保温层隔热作用显著,主要体现在使隧道衬砌结构和围岩年温度振幅降低上,同时年平均温度也有一定升高;随着防冻保温层铺设厚度增大,隧道衬砌结构和围岩年平均温度和年温度振幅分别呈指数函数升高和降低,相应的年最低温度也呈指数函数升高,防冻保温层厚度越大,隔热效果越好,但是隔热效率不断降低;围岩导热系数越大,导温系数越小,防冻保温层隔热效果越显著;防冻保温层所需厚度随围岩导热系数和围岩初始温度升高呈指数函数减小,随围岩导温系数升高呈对数函数增加,随年平均气温和年温度振幅升高分别呈线性减小和增加,防冻保温层厚度应综合考虑以上各因素进行计算确定。

关键词:隧道工程;寒冷地区;防冻保温层;隔热机理作用;影响因素

中图分类号:U452.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)03-0129-09

Research on mechanism of insulation effect and thickness influencing factors of tunnel anti-freezing insulation layer in cold regions

CHEN Jianxun^{1,2}, DONG Tijian¹, ZHAO Pengyu^{1,2}, HUANG Jiefang³, YANG Yedong⁴

(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. China First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China; 4. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: 21 calculation working conditions were set for the highway tunnel in cold regions with anti-freezing insulation layer laid at the lining surface. By conducting numerical simulation calculations on the radial temperature field of tunnel anti-freezing insulation layer, lining, and

收稿日期:2023-05-11

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目: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:陈建勋(1969-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:chenjx1969@chd.edu.cn.

通信作者:赵鹏宇(1989-),男,工学博士,副教授,E-mail:903716642@qq.com.

surrounding rock under annual cycle, as well as the required thickness of the anti-freezing insulation layer for each working condition, the mechanism of insulation effect of the tunnel anti-freezing insulation layer and influencing factors on the required thickness were studied. The results show that the insulation effect of the anti-freezing insulation layer is significant, which mainly reflects in reducing the annual temperature amplitude of the tunnel lining and surrounding rock, meanwhile the annual average temperature also increases to a certain extent. As the thickness of the anti-freezing insulation layer increases, the annual average temperature and temperature amplitude of the tunnel lining and surrounding rock increase and decrease exponentially, respectively, and the corresponding annual minimum temperature also increases exponentially. The thicker the anti-freezing insulation layer, the better the insulation effect, but the insulation efficiency continues to decrease. The larger the thermal conductivity coefficient, and the lower the thermal conductivity coefficient of the surrounding rock, the more significant the insulation effect of the anti-freezing insulation layer. The required thickness of the anti-freezing insulation layer decreases exponentially with the increase of the thermal conductivity coefficient and initial temperature of the surrounding rock, increases logarithmically with the increase of the thermal conductivity coefficient of the surrounding rock, and linearly decreases and increases with the increase of the annual average temperature and annual temperature amplitude, respectively. The thickness of the anti-freezing insulation layer should be calculated and determined by considering all the above factors comprehensively.

Key words: tunnel engineering; cold region; anti-freezing insulation layer; mechanism of insulation effect; influencing factor

Author resumes: CHEN Jianxun(1969-), male, PhD, professor, E-mail: chenjx1969@chd.edu.cn; ZHAO Pengyu(1989-), male, PhD, associate professor, E-mail: 903716642@qq.com.

0 引 言

寒冷地区隧道易出现冻害问题,主要表现为衬砌开裂、剥落、挂冰和路面冒水、结冰等^[1-4],严重影响隧道结构长期稳定,威胁隧道行车安全。寒冷地区隧道冻害防治措施包括主动供热^[5-8]、设置防寒保温门^[9]、铺设防冻保温层^[10-13]等,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。

陈建勋等^[14-15]通过现场隧道温度场测试,发现防冻保温层隔热效果显著,可以有效减小洞内气温对衬砌温度影响,使其在冬季保持较高的温度状态。Zhao 等^[16]根据隧道温度场长期监测结果,分析了防冻保温层两侧最冷月平均温度和最低日平均温度变化,揭示了防冻保温层隔热效果。张玉伟等^[17]建立了隧道防冻保温层中间铺设室内试验模型,对恒温边界条件下的衬砌结构和围岩温度变化进行实时观测,提出防冻保温层可以有效提升其背部初期支护和围岩温度。谢红强等^[18-22]通过数值模拟计算,发现防冻保温层隔热作用可以有效保证隧道围岩不

出现负温,防止冻害发生。然而,上述研究缺乏对防冻保温层两侧温度在年周期下的变化规律分析,未能有效揭示防冻保温层隔热作用对衬砌结构和围岩温度场变化的具体影响。

实际上,防冻保温层的隔热效果是有限的^[23-25],且受不同因素的影响。冯强等^[26]通过计算发现,当防冻保温层达到一定厚度时,继续增加厚度,其隔热效率(防冻保温层单位厚度增加,衬砌年最低温度的升高量)会明显减小,不够经济。Ma 等^[27-28]对多种工况下的数值模拟计算结果进行总结,发现防冻保温层背部年最低温度随防冻保温层厚度和导热系数增加,分别呈指数函数升高和降低,提出防冻保温层设计应以热阻为标准,选择满足防冻要求的防冻保温层厚度和导热系数。然而,以上研究仅从防冻保温层自身出发,没有考虑围岩热物理性质对防冻保温层隔热效果的影响。气温、围岩初始温度、围岩导热系数和导温系数等因素对隧道所需防冻保温层厚度影响不明确。此外,缺乏不同防冻保温层厚度下其背部衬砌结构温度随时间变化的差异性分析,难以有效揭示防冻保温层隔热效率随其厚度增加而减

小的原因。

本文以寒冷地区公路隧道为研究对象,设置21组计算工况,采用数值模拟算法,通过对防冻保温层背部衬砌结构和围岩在年周期下的温度场变化以及各工况所需的防冻保温层厚度进行计算,探明寒冷地区隧道防冻保温层隔热作用机理,揭示空气年平均温度、空气年温度振幅、围岩初始温度、围岩导热系数和导温系数5类因素对所需防冻保温层厚度的影响。研究成果可为寒冷地区隧道防冻保温层厚度设计计算提供理论参考和依据。

1 数值计算模型与方法

1.1 基本假定

(1)隧道防冻保温层、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(包括防冻保温层、二次衬砌、初期支护、围岩等)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)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 计算模型建立

取隧道二次衬砌厚度为50 cm,初期支护厚度为26 cm,建立两车道公路隧道防冻保温层、衬砌结构和围岩温度的二维数值计算模型。防冻保温层设置在二次衬砌内表面(净空侧)。由于假定隧道衬砌结构和围岩内部仅发生沿径向的热传递,且相关理论计算中将隧道衬砌结构和围岩温度计算模型简化为多层圆筒^[1],因此在本次计算中建立以断面外轮廓为基准向外延伸的环形边界温度计算模型,如图1所示。

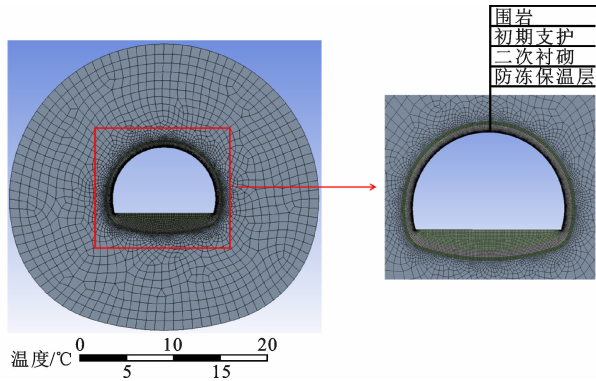


图1 隧道防冻保温层衬砌结构和围岩温度计算模型

Fig.1 Calculation model of tunnel anti-freezing insulation layer lining and surrounding rock temperature

模型外边界为围岩温度影响边界,可将其设置为恒温边界,温度取围岩初始温度。外边界径向深度以年温度振幅低于0.05 °C为标准进行确定。

1.3 计算方法

洞内空气与防冻保温层内表面之间采用对流换热方式,其温度计算满足

$$\lambda_1 \frac{\partial t_{1,s}}{\partial r} = h(t_a - t_{1,s}) \quad (1)$$

式中: λ_1 为防冻保温层导热系数; t_a 和 $t_{1,s}$ 分别为洞内气温和防冻保温层内表面温度; h 为隧道洞内空气和防冻保温层内表面之间对流换热系数; r 为距隧道衬砌表面径向距离。

防冻保温层、衬砌结构和围岩之间采用瞬态热传导方式,其温度计算采用方程为

$$\alpha_i \left(\frac{\partial^2 t_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial L}{\partial \tau} = \frac{\partial t_i}{\partial \tau} \quad (2)$$

式中: α_i 为隧道不同材料层的导温系数; t_i 为不同材料层温度; τ 为时间; L 为相变潜热。

根据文献调研可知,寒冷地区隧道温度场计算可不考虑潜热因素^[23],因此本文计算模型中各热物理参数取值为常数。本次计算采用Fluent数值计算软件,通过有限容积法对年周期下隧道防冻保温层及衬砌结构和围岩沿径向温度场变化进行计算。

2 防冻保温层隔热效果计算分析

2.1 防冻保温层背部衬砌结构和围岩温度场变化

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,本次计算假定洞内气温边界条件为

$$t_a = 3 + 17 \sin(\pi \tau / 15\,552\,000) \quad (3)$$

计算模型中防冻保温层、二次衬砌、初期支护和围岩热物理参数取值见表1。围岩外边界温度和模型初始温度均假定为7 °C^[23]。洞内空气和防冻保温层内表面之间对流换热系数 h 取15 W·(m²·K)⁻¹。

将以上计算参数代入模型中,通过试算可以得出隧道围岩温度影响边界距衬砌表面距离约为10 m。为了消除边界效应影响,将计算模型外边界取为距衬砌表面11 m深度处。

将第10年的温度计算结果进行统计,可以发现防冻保温层背部衬砌结构和围岩温度仍随时间呈周期性的三角函数变化,如图2所示。因此,对衬砌结构和围岩沿径向不同深度处年平均温度和年温度振幅进行计算和统计,分析年周期下防冻保温层背部衬砌结构和围岩温度场沿径向深度变化特征。

表 1 模型各材料计算参数

Table 1 Calculation parameters of materials of model

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 $\alpha/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
防冻保温层	35	1 400	0.027	5.51×10^{-7}
二次衬砌混凝土	2 500	920	1.740	7.57×10^{-7}
初期支护混凝土	2 300	1 000	2.230	9.70×10^{-7}
路面混凝土	2 300	920	1.510	7.14×10^{-7}
围岩	2 800	950	3.500	1.32×10^{-6}

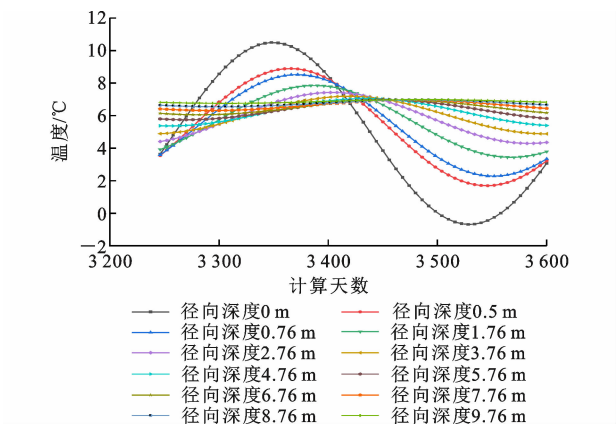


图 2 防冻保温层背部衬砌结构和围岩温度随时间变化
Fig. 2 Variation of lining and surrounding rock temperature at back of anti-freezing insulation layer with time

衬砌结构和围岩年平均温度沿径向深度变化如图 3 所示,围岩年平均温度沿径向深度的拟合结果如图 4 所示。由于防冻保温层的隔热作用,使得空气至衬砌表面年平均温度明显升高,至防水板位置,升高了 2.3℃。衬砌结构和围岩年平均温度随径向深度增加逐渐升高,其中衬砌年平均温度上升速率大,近似呈线性变化,而围岩呈对数函数变化规律,并随径向深度增加,年平均温度逐渐接近于围岩初始温度 7℃。

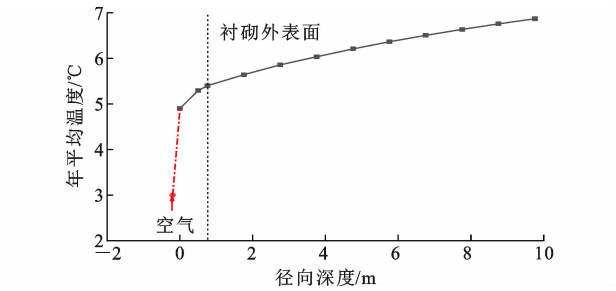


图 3 衬砌结构和围岩年平均温度沿径向深度变化
Fig. 3 Variation of annual mean temperature of lining and surrounding rock along radial depth

衬砌结构和围岩年温度振幅沿径向深度变化如图 5 所示。由于防冻保温层的隔热作用,使得空气至衬砌表面年温度振幅显著降低,由 17℃下降到了 5.29℃。衬砌结构年温度振幅沿径向深度衰减速

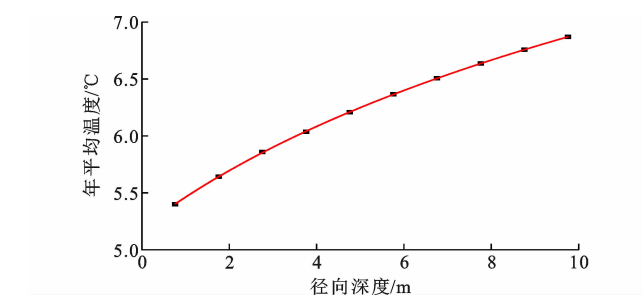


图 4 围岩年平均温度沿径向深度的拟合结果
Fig. 4 Fitting results of annual average temperature of surrounding rock along radial depth

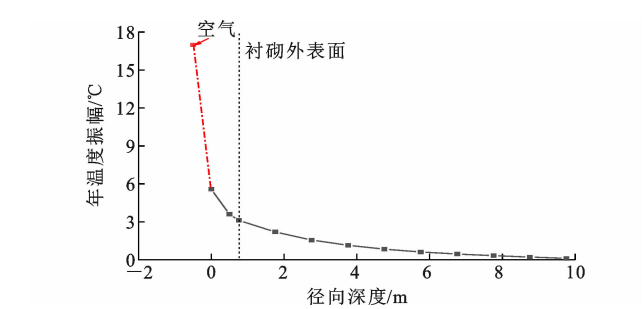


图 5 年温度振幅沿径向深度变化
Fig. 5 Variation of annual temperature amplitude along radial depth

率明显较大。围岩年温度振幅沿径向深度呈指数函数衰减,即径向深度越大,年温度振幅衰减速率越小,至 10 m 深度处,围岩年温度振幅已基本达到 0.05℃,如图 6 所示。

因此,防冻保温层隔热效果明显,可以有效提高

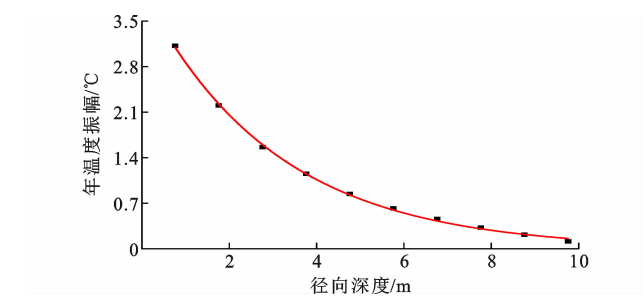


图 6 围岩年温度振幅沿径向深度拟合结果
Fig. 6 Fitting results of annual temperature amplitude of surrounding rock along radial depth

隧道衬砌结构和围岩年平均温度,降低年温度振幅,从而使年最低温度升高,保证防水板位置处温度大于 0℃,以达到隧道防冻要求。而且,从上述计算结果来看,防冻保温层隔热作用主要体现在年温度振幅的降低上。

2.2 不同厚度防冻保温层背部温度变化

采用上述计算模型和方法,将围岩导热系数调整为 $1.5\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,对铺设不同厚度防冻保温层下的隧道衬砌结构和围岩温度场进行计算。提取第 10 年的计算结果,并进行相应的年平均温度和年温度振幅计算,分析不同防冻保温层厚度的隔热效果变化。由于衬砌表面设置防冻保温层的目的是保证二次衬砌和初期支护之间防水板位置处不出现负温,以防止围岩地下水发生结冰冻胀,因此本次研究主要针对防水板位置处的温度变化进行分析。

防水板位置处年平均温度随防冻保温层厚度变化如图 7 所示。随着防冻保温层厚度增大,防水板处年平均温度呈指数函数升高,防冻保温层厚度由 3 cm 增大至 12 cm,年平均温度增大了 $1.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而,随着防冻保温层厚度增加,年平均温度的上升速率不断减小,由 3 cm 时的 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 下降至 12 cm 时的 $0.065\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

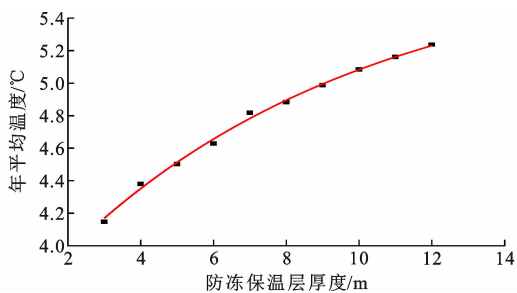


图 7 防水板处年平均温度随防冻保温层厚度变化
Fig. 7 Variation of annual average temperature at waterproof board with thickness of anti-freezing insulation layer

防水板位置处年温度振幅随防冻保温层厚度变化如图 8 所示。随着防冻保温层厚度增大,防水板处年温度振幅呈指数函数衰减,防冻保温层厚度由 3 cm 增大至 12 cm,年温度振幅降低了 $4.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而,随着防冻保温层厚度增加,年温度振幅的衰减速率不断减小,由 3 cm 时的 $1.10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 下降至 12 cm 时的 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

综上所述,随着防冻保温层厚度增大,防水板处年平均温度和年温度振幅分别呈指数函数升高和降低,进而使得防水板处年最低温度随防冻保温层厚度增加,也呈指数函数升高(图 9)。该结果与 Ma

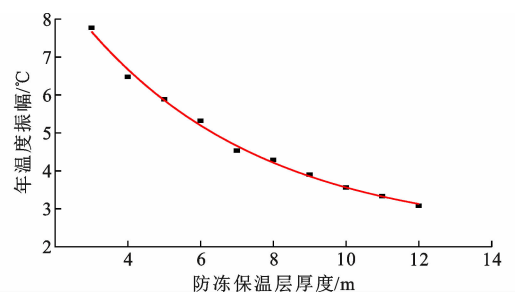


图 8 防水板处年温度振幅随防冻保温层厚度变化
Fig. 8 Variation of annual temperature amplitude at waterproof board with thickness of anti-freezing insulation layer

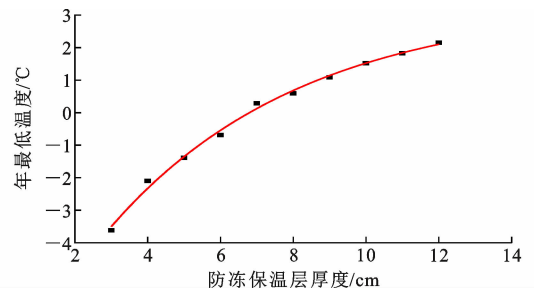


图 9 防水板处年最低温度随防冻保温层厚度变化
Fig. 9 Variation of annual minimum temperature at waterproof board with thickness of anti-freezing insulation layer

等^[27-28]计算结果一致,因此从防冻保温层背部年平均温度和年温度振幅变化,解释了防冻保温层厚度越大,其隔热效果越好,但是隔热效率却逐渐降低的原因。

2.3 围岩热物性对防冻保温层隔热效果影响

本文采用控制变量法,设置了 9 组计算工况,见表 2。在各工况衬砌表面均设置 5 cm 厚的防冻保温层,通过对隧道衬砌结构和围岩温度场进行数值模拟计算,研究围岩导热系数和导温系数对防冻保温层隔热效果的影响。

2.3.1 围岩导热系数

提取工况 1-1~1-5 在第 10 年的温度计算结果,并对隧道防水板位置年平均温度和年温度振幅进行计算和汇总。防水板处年平均温度随围岩导热系数和导温系数变化如图 10 和图 11 所示。随着围岩导热系数增大,防水板处年平均温度呈对数函数升高,而年温度振幅呈指数函数衰减。因此,围岩导热系数越高,防冻保温层隔热效果越好。

2.3.2 围岩导温系数

提取工况 1-6~1-9 在第 10 年的温度计算结果,并对隧道防水板位置年平均温度和年温度振幅进行计算和汇总。结合工况 1-1 计算结果可以发

表 2 围岩热物理性质计算工况

Table 2 Thermophysical property calculation working conditions of surrounding rock

工况编号	年平均气温/℃	年温度振幅/℃	围岩地温/℃	围岩导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	围岩导温系数/(10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)
1-1	3	17	7	3.5	1.32
1-2	3	17	7	3.0	1.32
1-3	3	17	7	2.5	1.32
1-4	3	17	7	2.0	1.32
1-5	3	17	7	1.5	1.32
1-6	3	17	7	3.5	1.50
1-7	3	17	7	3.5	1.10
1-8	3	17	7	3.5	0.90
1-9	3	17	7	3.5	0.70

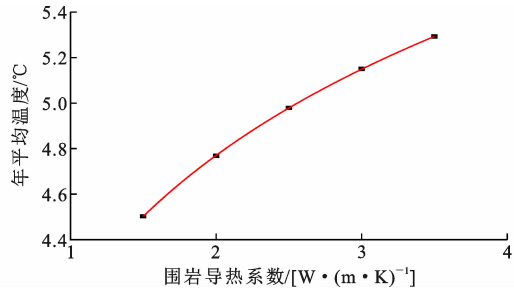


图 10 防水板处年平均温度随围岩导热系数变化
Fig. 10 Variation of annual average temperature at waterproof board with thermal conductivity of surrounding rock

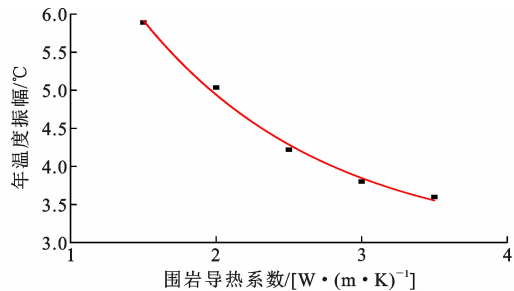


图 11 防水板处年温度振幅随围岩导热系数变化
Fig. 11 Variation of annual temperature amplitude at waterproof board with thermal conductivity of surrounding rock

现,随着围岩导温系数增大,防水板处年温度振幅呈指数函数升高,但变化量较小,低于 0.8℃,如图 12 所示。防水板处年平均温度随围岩导温系数变化保持不变。因此,随着围岩导温系数升高,防冻保温层隔热效果有所降低,且仅体现在年温度振幅衰减上。

3 防冻保温层厚度影响因素分析

同样采用控制变量法,在上述 9 组计算工况的基础上再增加 12 组工况,见表 3。对铺设不同厚度

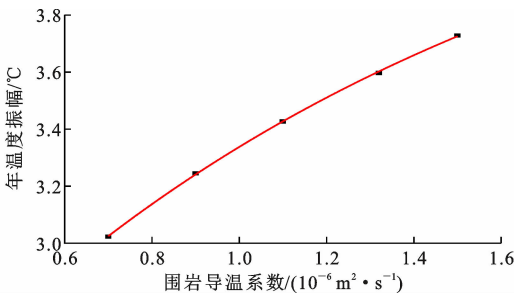


图 12 防水板处年温度振幅随围岩导温系数变化
Fig. 12 Variation of annual temperature amplitude at waterproof board with thermal diffusion coefficient of surrounding rock

表 3 防冻保温层厚度影响因素计算工况

Table 3 Calculation working conditions of influencing factors of anti-freezing insulation layer thickness

工况	年平均气温/℃	年温度振幅/℃	围岩地温/℃	围岩导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	围岩导温系数/(10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)
2-1	3	17	5	3.5	1.32
2-2	3	17	9	3.5	1.32
2-3	3	17	11	3.5	1.32
2-4	3	17	13	3.5	1.32
2-5	5	17	7	3.5	1.32
2-6	4	17	7	3.5	1.32
2-7	2	17	7	3.5	1.32
2-8	1	17	7	3.5	1.32
2-9	3	15	7	3.5	1.32
2-10	3	13	7	3.5	1.32
2-11	3	11	7	3.5	1.32
2-12	3	9	7	3.5	1.32

防冻保温层的衬砌结构和围岩温度场进行试算,以防水板位置不出现负温为标准,确定各工况所需的防冻保温层厚度并进行比较,以揭示围岩导热系数、导温系数、围岩初始温度、空气年平均温度和年温度振幅 5 个因素对防冻保温层厚度的影响。

3.1 围岩导热系数

对工况 1-1~1-5 所需的防冻保温层厚度进行计算,并进行汇总分析,如图 13 所示。随着围岩导热系数升高,所需的防冻保温层厚度总体呈指数函数减小。围岩导热系数由 1.5 W·(m·K)⁻¹ 上升至 3.5 W·(m·K)⁻¹ 时,所需的防冻保温层厚度由 6.4 cm 下降至 3.0 cm,整体变化了 3.4 cm。围岩导热系数越高,其值变化对防冻保温层厚度影响越小。当围岩导热系数为 1.5 W·(m·K)⁻¹ 时,防冻保温层厚度变化率为 3.8 cm·[W·(m·K)⁻¹]⁻¹,围岩导热系数为 3.5 W·(m·K)⁻¹ 时,变化率仅为 0.76 cm·[W·(m·K)⁻¹]⁻¹。

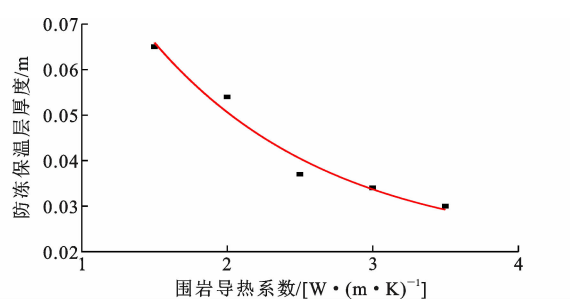


图 13 防冻保温层厚度随围岩导热系数变化

Fig. 13 Variation of anti-freezing insulation layer thickness with thermal conductivity of surrounding rock

3.2 围岩导温系数

对工况 1-6~1-9 所需的防冻保温层厚度进行计算,同时结合工况 1-1 计算结果,进行汇总分析。随着围岩导温系数升高,所需的防冻保温层厚度总体呈对数函数增大,如图 14 所示。围岩导温系数由 $0.7\times10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 上升至 $1.5\times10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 时,所需的防冻保温层厚度由 2.2 cm 增加至 3.3 cm,整体变化了 1.1 cm。围岩导温系数越高,其值的变化对防冻保温层厚度影响越小。当围岩导温系数为 $0.7\times10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 时,防冻保温层厚度变化率为 $2.35\times10^{-6}\text{ cm}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$,围岩导温系数为 $1.5\times10^{-6}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 时,防冻保温层厚度变化率仅为 $0.78\times10^{-6}\text{ cm}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})^{-1}$ 。

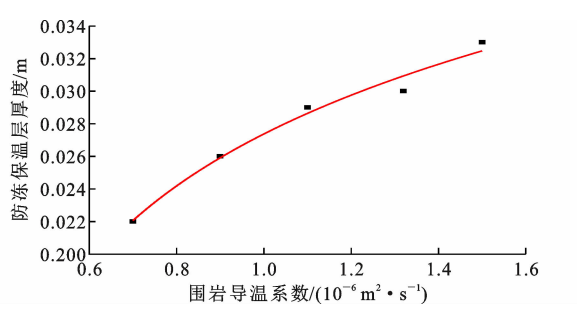


图 14 防冻保温层厚度随围岩导温系数变化

Fig. 14 Variation of anti-freezing insulation layer thickness with thermal diffusion coefficient of surrounding rock

3.3 围岩初始温度

对工况 2-1~2-4 所需的防冻保温层厚度进行计算,同时结合工况 1-1 计算结果进行汇总分析。随着围岩初始温度升高,所需的防冻保温层厚度呈指数函数减小,如图 15 所示。围岩初始温度由 5℃ 上升至 13℃ 时,所需的防冻保温层厚度由 4.0 cm 下降至 1.6 cm,整体变化了 2.4 cm。围岩初始温度越高,其值的变化对防冻保温层厚度影响越小。当围岩初始温度为 5℃ 时,防冻保温层厚度变化率为 $0.58\text{ cm}\cdot\text{℃}^{-1}$,而当围岩初始温度为 7℃ 和 13℃

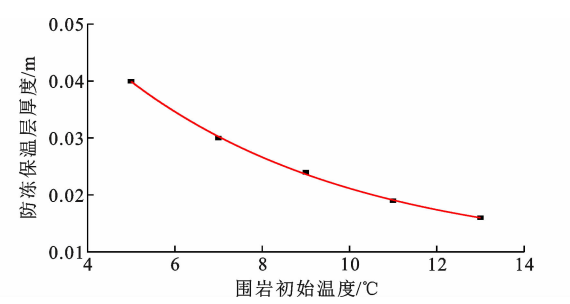


图 15 防冻保温层厚度随围岩初始温度变化

Fig. 15 Variation of anti-freezing insulation layer thickness with initial temperature of surrounding rock

时,防冻保温层厚度变化率分别为 $0.4\text{ cm}\cdot\text{℃}^{-1}$ 和 $0.13\text{ cm}\cdot\text{℃}^{-1}$ 。

3.4 空气年平均温度

对工况 2-5~2-8 所需的防冻保温层厚度进行计算,同时结合工况 1-1 计算结果进行汇总分析。随着空气年平均温度升高,所需的防冻保温层厚度呈线性降低,如图 16 所示。空气年平均温度由 1℃ 上升至 5℃,所需的防冻保温层厚度由 3.8 cm 下降至 2.2 cm,整体变化了 1.6 cm。空气年平均温度每上升 1℃,所需的防冻保温层厚度下降 0.4 cm。

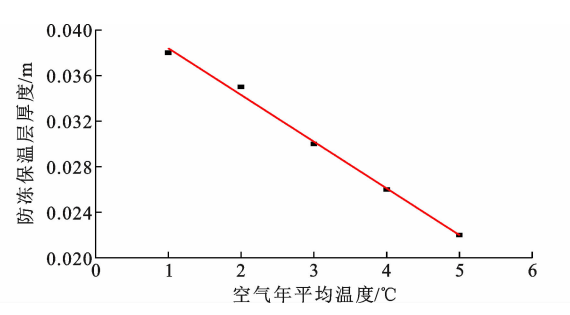


图 16 防冻保温层厚度随空气年平均温度变化

Fig. 16 Variation of anti-freezing insulation layer thickness with annual average air temperature

3.5 空气年温度振幅

对工况 2-9~2-12 所需的防冻保温层厚度进行计算,同时结合工况 1 计算结果,进行汇总分析。随着空气年温度振幅升高,所需的防冻保温层厚度呈线性增加,如图 17 所示。空气年温度振幅由 9℃ 上升至 17℃ 时,所需的防冻保温层厚度由 1.0 cm 增加至 3.0 cm,整体变化了 2 cm。空气年温度平均振幅每上升 1℃,所需的防冻保温层厚度增加 0.25 cm。

4 结 语

(1)防冻保温层背部衬砌结构和围岩温度受洞内气温影响,随时间呈周期性三角函数变化规律。

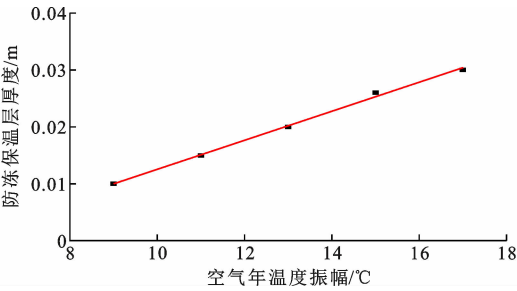


图 17 防冻保温层厚度随空气年温度振幅变化
Fig. 17 Variation of anti-freezing insulation layer thickness with annual air temperature amplitude

防冻保温层隔热作用显著,其两侧年温度振幅存在大幅度衰减,同时年平均温度也有一定提高,从而使得防冻保温层背部衬砌结构和围岩年最低温度升高,以达到隧道防冻要求。

(2)随着防冻保温层厚度增大,隧道衬砌结构和围岩年平均温度和年温度振幅分别呈指数函数升高和降低,相应的年最低温度也呈指数函数升高,说明防冻保温层厚度越大,其隔热效果越好,但是隔热效率却逐渐降低。围岩导热系数越大和导温系数越小,防冻保温层隔热效果越显著。

(3)防冻保温层厚度随围岩导热系数和围岩初始温度升高呈指数函数减小,但随围岩导温系数升高呈对数函数增加,随空气年平均气温和年温度振幅升高分别呈线性减小和增加,因此防冻保温层厚度设计应综合考虑以上各因素进行计算确定。

参考文献:

References:

[1] 赖远明,张明义,李双洋,等. 寒区工程理论与应用[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] 吴紫汪,赖远明,藏恩穆,等. 寒区隧道工程[M]. 北京:海洋出版社,2003.
WU Ziwan, LAI Yuanming, ZANG Enmu, et al. Tunnel engineering in cold regions [M]. Beijing: Ocean Press,2003.

[3] XIA C C, LV 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] ZHOU X H, REN X C, YE X Q, et al. Temperature field and anti-freezing system for cold-region tunnels through rock with high geotemperatures[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103843.

[7] 邱军领,赖金星,张广龙,等. 季节性寒区隧道主动加热保温防冻方法及其试验[J]. 地下空间与工程学报, 2017,13(4):982-987.
QIU Junling, LAI Jinxing, ZHANG Guanglong, et al. A case study on antifreeze of tunnel in seasonal cold-region using the electric heat tracing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(4):982-987.

[8] 杜耀辉,杨晓华,晏长根. 季节性寒区隧道温度场数值分析[J]. 冰川冻土,2017,39(2):366-374.
DU Yaohui, YANG Xiaohua, YAN Changgen. Numerical analysis of tunnel temperature field in seasonal frozen regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2017,39(2):366-374.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.
- [14] 陈建勋, 咎勇杰. 寒冷地区公路隧道防冻隔温层效果现场测试与分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 75-79.
- CHEN Jianxun, ZAN Yongjie. Field test and analysis of antifreezing thermal-protective layer effect of the highway tunnel in cold area[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 75-79.
- [15] 陈建勋. 梯子岭隧道防冻隔温层效果现场测试及分析[J]. 公路, 2006(8): 221-224.
- CHEN Jianxun. Field test and analysis of effect of antifreeze thermal insulating layer in Tiziling tunnel[J]. Highway, 2006(8): 221-224.
- [16] 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.
- [17] 张玉伟, 谢永利, 李又云, 等. 寒区隧道合理保温型式及保温效果试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1569-1577.
- ZHANG Yuwei, XIE Yongli, LI Youyun, et al. Rationality of heat preservation mode in cold region tunnels and model test verification[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1569-1577.
- [18] 谢红强, 何川, 李永林. 寒区公路隧道保温层厚度的相变温度场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4395-4401.
- XIE Hongqiang, HE Chuan, LI Yonglin. Study on insulating layer thickness by phase-change temperature field of highway tunnel in cold region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4395-4401.
- [19] TAN X J, CHEN W Z, YANG D S, et al. Study on the influence of airflow on the temperature of the surrounding rock in a cold region tunnel and its application to insulation layer design[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67(1/2): 320-334.
- [20] YAN Q X, LI B J, ZHANG Y Y, 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.
- [21] 李根, 李双洋, 董长松, 等. 高寒隧道保温结构的优化设计研究: 以西藏圭嘎拉隧道为例[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 510-522.
- LI Gen, LI Shuangyang, DONG Changsong, et al. Research on optimum design of insulation structure of alpine tunnel: taking Guigala tunnel in Tibet as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 510-522.
- [22] 高焱, 朱永全, 耿纪莹, 等. 寒区隧道温度场分布规律及保温层适应性研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 105-111.
- GAO Yan, ZHU Yongquan, GENG Jiying, et al. Research on distribution law of temperature field of tunnel in cold region and thermal insulation layer adaptability[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 105-111.
- [23] 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.
- [24] LAI J X, QIU J L, FAN H B, et al. Freeze-proof method and test verification of a cold region tunnel employing electric heat tracing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 56-65.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] LU T S, ZHANG G Z, LIU S Y, 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.