

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0044

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. [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.]

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

李 根^{1,2}, 李双洋¹, 董长松³, 杨佳乐^{4,1}, 姜 琪^{1,2}

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室, 陕西 西安 710065;
4. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为了提高季节冻土隧道的防冻保温性能, 常采用铺设聚氨酯类有机保温层的方式以防止围岩冻结, 但由于有机材料在冻融循环过程中老化速度快、保温结构设计缺少科学依据等局限性, 使得部分隧道在长期运营过程中反复出现冻融病害。以西藏圭嘎拉隧道为研究对象, 通过建立热流固耦合计算模型, 对现行保温措施的防冻效果进行分析, 发现距离洞口一定长度范围内的围岩仍会发生冻融破坏。在隧道运营后第20年2月15日, 距洞口5 m处断面拱顶围岩的边界温度仅为 -0.91°C , 并且该关键位置的纵向冻结长度超过500 m, 严重影响隧道结构的安全。为防止此隧道出现冻害问题, 提高其服役能力, 拟采用新型无机建筑材料气凝胶毡对隧道的保温结构进行加固, 其具有良好的保温、阻燃和耐久性能, 并且铺装简便、易于操作。此外通过对不同厚度气凝胶毡条件下的围岩温度场进行多维度分析, 确定了最不利时刻气凝胶毡厚度与拱顶围岩关键位置纵向冻结长度之间的关系。研究成果可为圭嘎拉隧道防冻保温优化设计提供技术支持, 不仅能保障隧道结构的安全性和稳定性, 也能为季节冻土隧道保温结构的设计、施工及维护提供参考依据。

关键词: 季节冻土; 隧道; 冻融破坏; 气凝胶毡; 数值模拟; 温度场

中图分类号: U45; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0510-13

0 引言

我国冻土分布广泛, 其中多年冻土和季节冻土面积约占国土总面积的四分之三^[1]。依托于“一带一路”、东北老工业基地振兴战略和西部大开发等政策的计划与实施, 全国的交通运输网络正逐渐向高海拔、高纬度等严寒地区扩展。为了克服高程障碍、缩短路线长度, 修建隧道成为穿越冻土高山的最佳选择^[2]。但随着寒区隧道数量的增加, 冻害问题也日益突出, 根据2014年调查结果显示, 全国50%以上的寒区隧道都存在不同程度的冻害问题^[3], 部分隧道一年中有近半年的时间不能正常使

用, 有些甚至已经报废^[4], 如冻融破坏引起的衬砌漏水、挂冰, 围岩积冰冻胀和衬砌混凝土开裂、酥碎、剥落等问题^[3], 严重影响了隧道的结构安全和稳定运营, 增加了病害整治和维护的费用。

为了提高寒区隧道的防冻保温能力, 减少因冻融循环导致的工程病害问题, 许多学者进行了相关的试验和研究。赖远明等^[5]通过在大坂山隧道进、出口端设置防寒保温门, 阻止了大量冷空气进入隧道内部, 使洞内的平均气温得到提升。但当车流量较大时, 频繁地开关防寒门会降低保温效果, 影响行车安全和隧道的高效运营。此外, Lai等^[6]在东南里隧道进行了“电伴热+保温隔热层”复合保温系统

收稿日期: 2020-09-23; 修订日期: 2021-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672315); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y201975); 西藏自治区科技计划项目(XZ201801-GB-07)资助

作者简介: 李根, 硕士研究生, 主要从事寒区隧道数值模拟研究. E-mail: ligen@lzb.ac.cn

通信作者: 李双洋, 研究员, 主要从事寒区岩土与隧道工程数值分析方法及应用研究. E-mail: Lisy@lzb.ac.cn

的现场试验,通过供电使埋设在隧道结构中的加热电缆升温,产生的热量提升了衬砌及围岩内部的温度,有效防止了排水系统的冻结。但主动加热法在工作期间需要消耗大量能源,增加了隧道的运营成本。相较于防寒保温门和主动加热法,目前国内隧道常采用铺设有机材料保温层的方式来减少围岩与外界环境的热量交换,进而防止冻害问题的出现。周晋筑^[7]针对昆仑山隧道面临的冻害防治难题,提出了铺设隔热保温层的技术方案以及相应的施工方法;谢红强等^[8]以鹧鸪山隧道围岩监测温度为依据,利用数值方法评价了不同材料保温层的防冻保温效果;姚红志等^[9]对施工期间鄂拉山隧道不同保温层铺设方式下的围岩温度变化过程进行了预测和研究;周小涵等^[10]分析了保温层铺设位置和厚度对围岩温度场的影响,结果发现当聚氨酯保温板的厚度为 5 cm 时,保温效率最高,而且外贴式铺设方法有更好的保温效果;张耀等^[11]通过当量换算法验证了风火山隧道设置 5 cm 聚氨酯保温层后,围岩在 20 年内不会发生季节性融化。但聚氨酯、酚醛泡沫和聚苯乙烯等有机材料在冻融作用下老化速度快,保温性能逐渐减弱^[12-13],增加了隧道结构冻融破坏发生的风险,例如聚氨酯材料在 50 次冻融循环后导热系数增加了 27%^[13],并且有机材料防火性差、燃烧时会释放大量有毒气体等特点也为隧道的运营埋下安全隐患^[14]。现阶段由于不同隧道在地质和气候条件方面的差异,使得保温结构设计要求并没有统一的标准,仅根据工程类比法设置的保温措施缺乏科学依据,导致一些寒区隧道中出现保温层长度、厚度设计不足或过于保守等情况,因此需要应该进一步完善我国隧道冻害防治技术。

本文以西藏地区圭嘎拉隧道为研究对象,该隧道借鉴了国内高寒地区公路隧道保温防冻的设计经验,在洞口段二次衬砌内表面全断面设置了 5 cm 硬质聚氨酯保温层,但该保温结构的实际使用效果并没有得到验证。本文通过建立热流固耦合计算模型,对隧道运营期间围岩的冻结情况进行分析,结果显示距离洞口一定长度范围内的围岩仍会遭受冻融破坏。针对此问题拟提出采用气凝胶毡对当前的保温结构进行改良加固,并分析了服役期间隧道洞口段气温和围岩温度在不同厚度气凝胶毡条件下的演变过程,从而确定出满足防冻保温要求的气凝胶毡最优铺设长度与厚度之间的关系。研究成果可用于圭嘎拉隧道保温层的优化设计,并为

今后季节冻土区隧道保温层的设计、材料选择、施工及维护方法提供技术参考,以期降低冻融破坏对围岩和衬砌造成的危害。

1 温度场热流固耦合控制方程

寒区隧道在运营期间,洞内空气流动会与衬砌、围岩进行对流换热,隧址区原始温度场的热平衡状态被破坏,围岩在外界气温的作用下发生冻融循环,引起混凝土衬砌发生开裂,进而诱发材料劣化和耐久性能下降等问题。因此隧道结构温度演变过程涉及流体和固体区域两部分,二者通过耦合作用共同影响着寒区隧道温度场。

1.1 流体区域控制方程

假设隧道内空气为不可压缩理想气体,其密度、动力黏性系数和导热系数均不随温度发生改变^[15-16],洞内空气以湍流流动为主^[17-19],则流体区域的传热控制方程可用以下公式进行描述^[16-19]:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: x_i 为空间点的坐标; u_i 为坐标 x_i 点的速度分量($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $i=1,2,3$ 。

(2) 动量守恒方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

式中: ρ 为密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); p 为空气的压强(Pa); μ 为空气的动力黏性系数($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$); μ_t 为空气的湍流黏性系数($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

(3) 能量守恒方程

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\lambda_a}{c} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

式中: c 为空气定压比热容($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$); λ_a 为空气的导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$); σ_T 为经验常数,一般取 $\sigma_T=0.95$; T 为空气温度(°C)。

(4) k - ε 湍流模型

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{C_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: k 为湍流脉动动能($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$); ε 为脉动动能耗散

率($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$); $\sigma_k, \sigma_e, C_1, C_2, C_\mu$ 为经验常数, 一般取 $\sigma_k=1.00, \sigma_e=1.30, C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09$ 。

1.2 固体区域控制方程

在热量传递的过程中, 土体孔隙中介质水的蒸发吸热、对流换热和质量迁移较少, 可以忽略不计^[20], 仅考虑土骨架热传导及冰水相变问题, 则固体区域瞬态温度场的热平衡控制微分方程^[17,21-22]为

$$C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中: C^* 为土体的等效体积热容($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$); λ^* 为土体的等效导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); T 为温度; t 为时间。

在计算中, 假设模型中含水介质的冰水相变发生在 T_m 附近某一温度区间 ΔT 内, 而且介质在冻结、融化状态下的比热容和导热系数不取决于温度, 则通过显热容法可得到相变区间内不同温度下的等效体积热容和等效导热系数, 其表达式^[23]为

$$C^* = \begin{cases} C_f & T < T_m - \Delta T \\ \frac{L_s}{2\Delta T} + \frac{C_f + C_u}{2} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ C_u & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda^* = \begin{cases} \lambda_f & T < T_m - \Delta T \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ \lambda_u & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_f 为冻土的体积热容; C_u 为融土的体积热容; λ_f 为冻土的导热系数; λ_u 为融土的导热系数; L_s 为相变潜热; T 为温度。

2 数值模型

2.1 隧道工程概况

圭嘎拉隧道(图1)位于青藏高原中南部, 作为连接拉萨与泽当的双向四车道高速公路隧道, 左线长度 12.813 km, 右线长度 12.890 km, 平均海拔在 4 100 m 以上, 其中左线进口端海拔约为 4 270 m (图2)。隧址区为构造侵蚀切割中高山地貌, 因植被稀少, 基岩裸露较好, 岩石以物理风化为主, 沿线出露地层多为第四系堆积层、白垩系板岩、砂岩及侏罗系片岩。该地区干燥、缺氧、昼夜温差大且日照充足, 属高原温带半干旱气候区, 干湿季分明, 高原气候特征明显, 年平均气温 2.8 °C, 极端最高气温超过 30 °C, 极端最低气温为 -17.5 °C, 最大风速可达 30 m·s⁻¹。

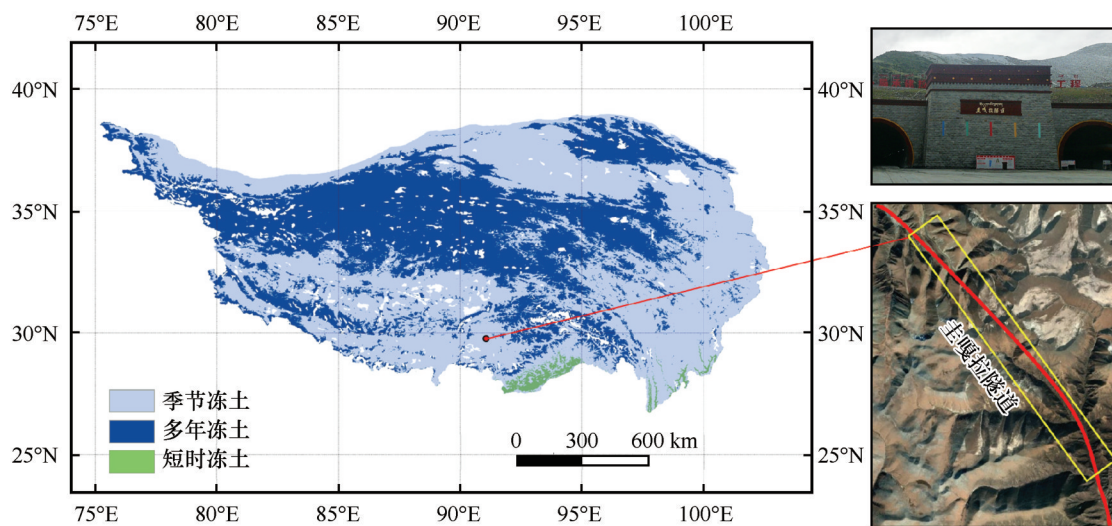


图1 圭嘎拉隧道位置示意图

Fig. 1 Schematic location of the Guigala Tunnel

图3为隧道外环境温度实测数据, 持续监测时间超过1年。从图中可知当地气温随时间呈现正弦规律变化, 则隧道外空气温度可简化为

$$T = 2.62 + 10.79 \sin\left(\frac{2\pi}{8760} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha_0\right) \quad (9)$$

式中: t_h 为时间(h); α_0 为相位角, 假设隧道施工的起始日期为7月15日, 所以文中取 $\alpha_0=0$ 。

图4为洞口处风速的监测资料, 由变化曲线可知该地区冬季风速较大, 夏季风速相对较小, 虽然风速在短期内波动较大, 但大致可利用正弦函数进行拟合, 因此风速的变化规律可简化成以下形式。

$$v = 2.5 + 1.2 \sin\left(\frac{2\pi}{8760} t_h + \frac{3\pi}{2} + \alpha_0\right) \quad (10)$$

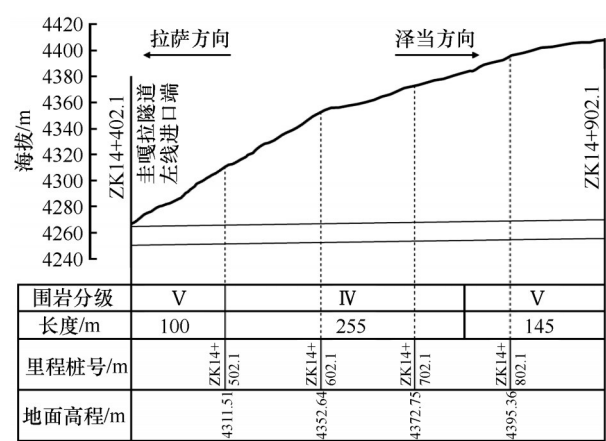


图2 圭嘎拉隧道洞口段纵断面图

Fig. 2 Longitudinal section of the Guigala Tunnel in the entrance

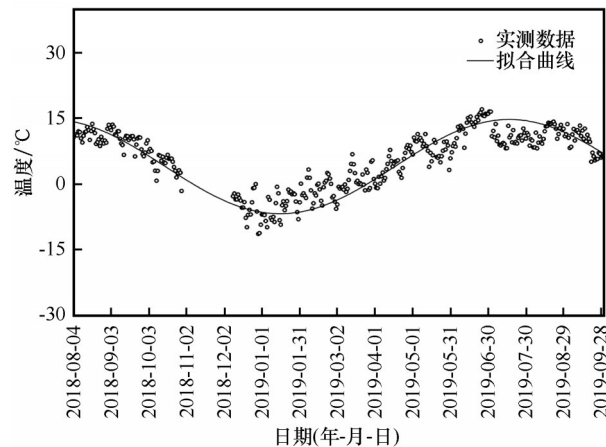


图3 隧道外气温变化

Fig. 3 Temperature changes outside the tunnel

2.2 模型尺寸及边界条件

由于隧道洞口段埋深较浅,受外部环境温度变化影响明显,通常是冻害发生的关键位置^[18,24],因此根据设计方案和地质勘探资料,选取隧道洞口段500 m长度建立数值模型并进行流固耦合传热分析。圭嘎拉隧道衬砌结构形式如图5所示,模型的

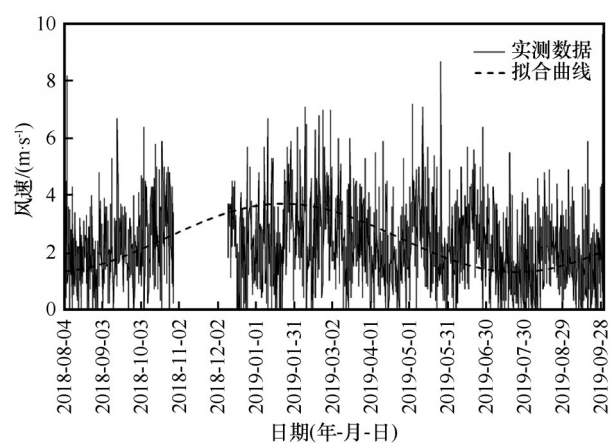


图4 隧道外风速变化

Fig. 4 Wind speed changes outside the tunnel

整体宽度56 m,下边界距隧道中心点的距离为39 m,上边界直至天然地表,各固体介质和空气的热物理参数如表1~2所示^[2,17,25,27~28]。在网格划分时,全部采用六面体单元以提高计算的精度,数值模型尺寸及计算网格的划分可见图6。

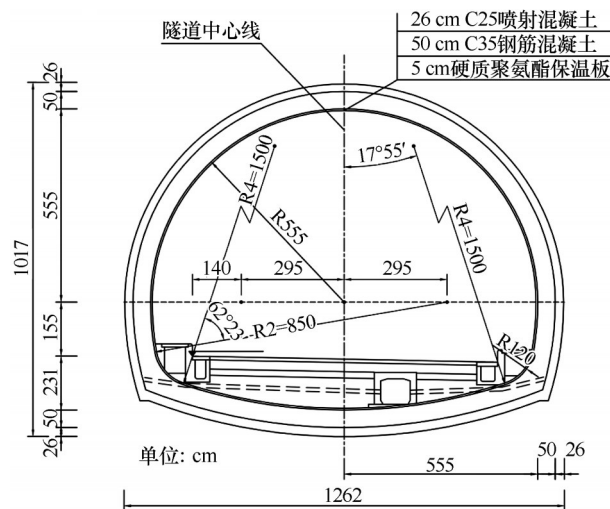


图5 圭嘎拉隧道衬砌结构图

Fig. 5 Structural drawing of Guigala Tunnel lining

表1 固体区域中各介质的热物理参数

Table 1 Thermal and mechanical parameters of various media in solid regions

材料	$\lambda_u/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$c_u/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$\lambda_f/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$c_f/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
碎石土	1.600	1 266.1	1.980	977.2	1 800
弱风化岩	1.470	1 350.6	1.820	1 025.5	2 150
衬砌混凝土	1.560	927.0	1.560	927.0	2 300
聚氨酯保温板	0.030	1 852.0	0.030	1 852.0	56
气凝胶毡	0.018	502.3	0.018	502.3	180

注:下标符号f、u分别表示土体处于冻结、融化状态。

表2 空气的热物理参数

Table 2 Thermal and mechanical parameters of air

参数	取值
比热容 $c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	1.004×10^4
导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	2.0×10^{-2}
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.641
动力黏性系数 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.85×10^{-5}

数值模型的边界条件如下,受太阳辐射、植被覆盖等因素的综合作用,模型上边界天然地表的

温度可根据附面层理论^[16,21,29-30]和实测温度设置为

$$T = 5.12 + 11.29 \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha_0\right) \quad (11)$$

模型左、右和后侧设置为绝热边界,前侧路面以上隧道洞门端墙位置给定与天然地表相同的温度条件,路面以下的岩体部分,设置为绝热边界,底部定义热流密度为 $0.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。计算域的初始温度是在隧道未开挖贯通前,通过长期瞬态计算结果确定的^[30]。

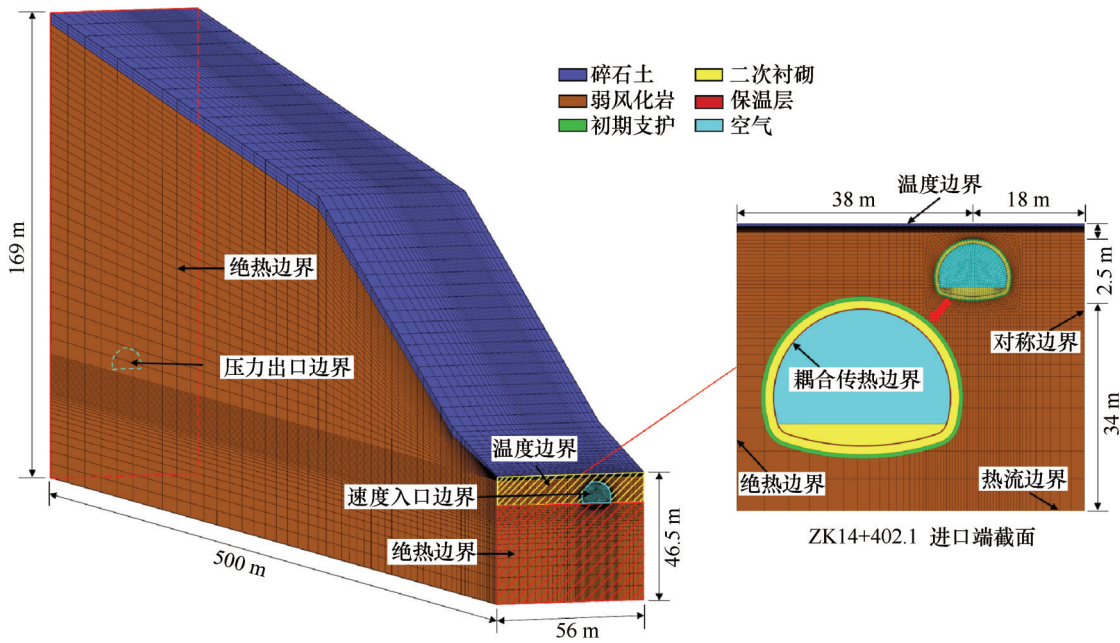


图6 数值计算网格

Fig. 6 Numerical grid

在洞内空气流动区域,设置隧道进口处为速度入口边界,给定风速和环境温度条件,并将空气与衬砌的接触面设置为对流换热耦合边界,以实现气体与衬砌、围岩的热量交换过程。

3 圭嘎拉隧道现阶段保温结构防冻效果分析

3.1 计算模型校验

为了验证数值模型的准确性,将现场天然孔地温实测值与模拟值进行对比分析,从图7中可以看出,隧址区地温的模拟结果与实测数据吻合程度较高。在靠近地表埋深较浅的土层中,由于受外界复杂气候因素的影响,实测值与拟合值之间略有差异,但随着埋深的增加,二者变化趋势相近,因此本文所采用的计算模型可以真实合理地描述隧道的

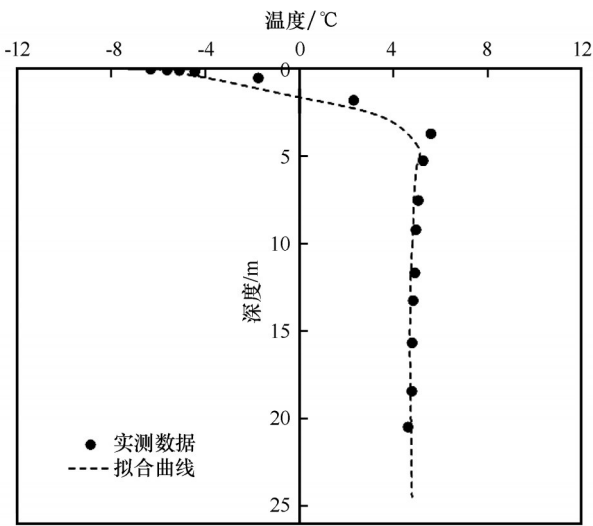


图7 地温实测值与模拟值对比情况(1月15日)

Fig. 7 Comparison between the measured and simulated values of ground temperatures (January 15th)

温度变化过程和分布状况,保障了隧道流固耦合传热质计算的合理性。

3.2 温度监测位置

在隧道运营期间,洞口段部分直接暴露于外部环境中,冻害发生的频率远高于隧道中部,为了对

围岩温度场进行详细的分析和研究,在距洞口不同长度的位置分别设置了若干个监测断面和监测点(图8),从而得到围岩温度随时间,以及沿断面径向、纵深方向的时空演变特征,以对现阶段根据工程类比法设置的保温结构的防冻效果进行评价。

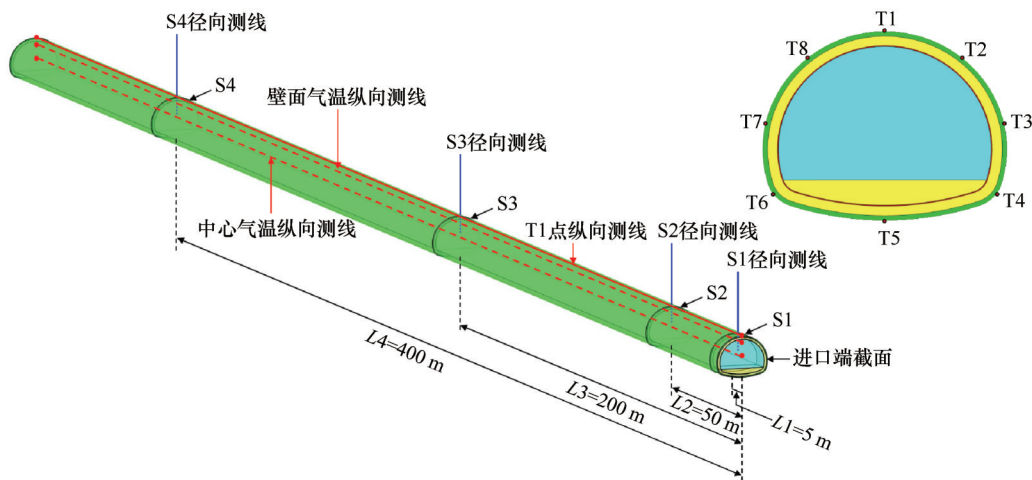


图8 监测断面和监测点分布

Fig. 8 Distribution of monitoring sections and monitoring points

3.3 最不利冻害时空特征点

通过计算对隧道施工和运营期间的热状况进行分析,确定出围岩受气温影响下最易发生冻害的时间和位置。以监测断面S2内点T1的温度变化情况为例,从图9中可以看出,受隧道施工热扰动和混凝土释放水化热的影响,监测点T1的温度在起始阶段波动较大,随着隧道的开通运营,围岩的温度随外界气温的影响呈周期性变化,但监测点T1的年最低温度都在 0°C 以下,并且逐年下降,在第20年2月15日达到最小值 -0.78°C ,所以选取第20年2月15

日作为围岩发生冻害的最不利时刻。基于此对围岩边界上温度最低的位置进行确定,图10比较了不同监测断面中各点在最不利时刻的温度。对比发现,在四个不同的监测断面上,拱顶围岩边界点T1都是温度最低的位置,如距离洞口最近的S1断面,关键位置T1的温度仅为 -0.91°C 。相比而言,仰拱处围岩的温度较高,在距洞口较远的S4断面上,监测点T4、T5和T6的温度在最不利时刻均大于 0°C ,因此该围岩位置在运营期间不会发生冻害问题。

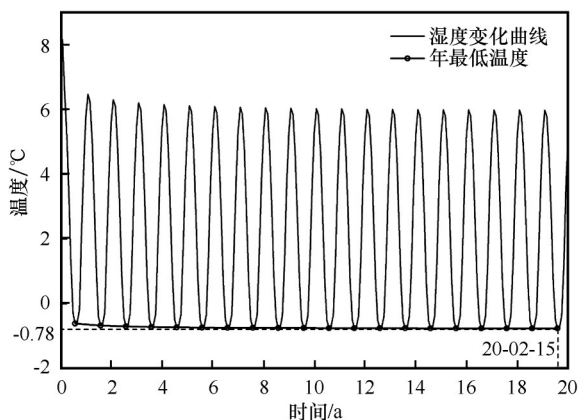


图9 S2断面拱顶位置T1点温度随时间的变化曲线

Fig. 9 Temperature change curve of T1 at S2 section vault position with time

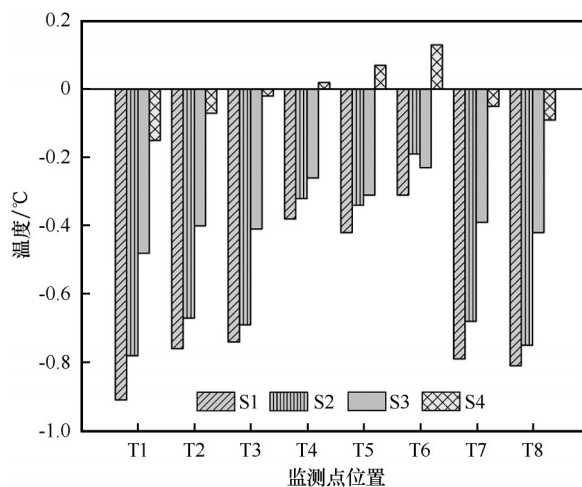


图10 最不利时刻各监测点温度对比

Fig. 10 Temperature comparison of each measuring point at the unfavorable time

从计算结果中可知,在隧道洞口段拱顶及拱腰大部分区域,围岩每年都会经历冻融循环。这表明圭嘎拉隧道现阶段所使用的保温结构并不能有效地防止冻害问题的发生。对于季节冻土隧道而言,冬季冷空气的侵入会导致围岩积冰冻胀、衬砌混凝土开裂等工程病害问题,因此需要对该隧道的保温结构进行优化加固,以减少冻融破坏对隧道安全稳定运营造成的危害。

4 保温结构优化方法及温度场对比分析

4.1 保温层改良材料选择

气凝胶毡作为一种新型无机保温材料,在常温常压下的导热系数仅为 $0.013 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[31],目前被广泛应用于石化油气输送管道,电力、热力管网,航空航天和房屋建筑等领域,但是在寒区隧道防冻

保温中还较少使用。与聚氨酯等有机材料相比,其保温性能更好,达到相同防冻效果时厚度较小,在保温层维护、改良过程中能够最大程度地保证隧道内建筑限界的要求。此外气凝胶毡优良的防火和耐久性能,不仅可以降低隧道内火灾发生的风险,而且能够减少保温材料的更换次数,延长使用寿命。

如图 11 所示,拟采用气凝胶毡对保温结构进行改良维护,作为柔性材料,气凝胶毡对于拱顶、拱脚等弧度较大的区域具有较好的贴合度,可以通过胶结法将毡体直接粘贴在原有聚氨酯保温板的表面,以增加保温结构的防冻性能。该铺装方法无需通过开孔、锚固的方式将气凝胶毡进行固定,简化了施工操作步骤,节约了工程成本,而且不会对隧道原有防水保温层造成破坏,适用于维护和优化已建成季节冻土隧道的保温结构。

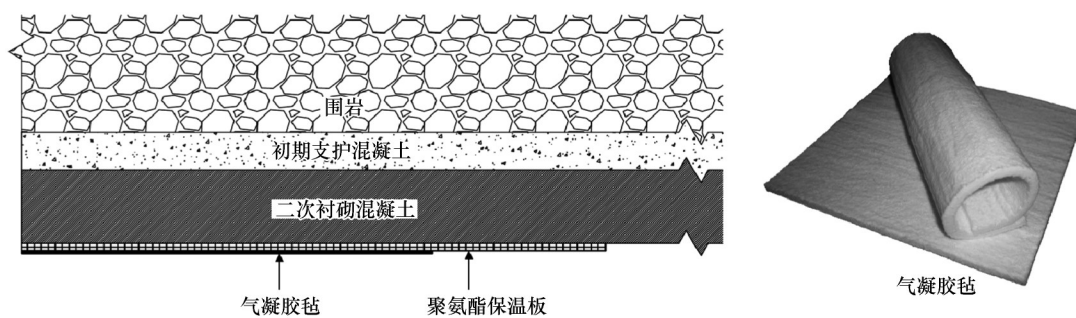


图 11 隧道保温层加固措施

Fig. 11 Optimization measures of the tunnel insulation layer

4.2 径向温度分布对比

为了确定圭嘎拉隧道洞口段保温结构的优化方案,本文计算了在现有聚氨酯保温板的基础上分别增设 5 mm、10 mm、20 mm 和 40 mm 气凝胶毡后洞口段围岩的温度场分布状况。以冻害发生的最不利时刻作为控制条件,对不同监测断面的径向温度进行对比,温度测线从隧道中部沿最不利位置向拱顶处延伸,如图 8 所示。

对于隧道内空气区域,在距离洞口较近的 S1 断面中气体温度与洞外气温基本相同,并沿径向保持不变[图 12(a)];当距洞口的纵向长度增加到 50 m 时[图 12(b)],在对流换热的作用下,靠近隧道壁面一侧的气体温度逐渐上升,而中心位置的气温仍没有显著变化。随着断面到洞口的距离继续增加,气体与围岩之间的热量交换也愈发充分;当距离洞口 200 m 时[图 12(c)],隧道中心的气体温度已经高于洞外气温,而且纵向长度越大,洞内气温越高[图 12(d)]。从图 12 中也可以对比发现,在沿径向方向

上,随着气凝胶毡厚度的增加,气温增长的速度逐渐降低。

在固体区域内,围岩温度从埋深较大的位置到壁面处逐渐降低,其中 S1 断面径向温度分布出现先增加后减小的原因是该位置距离洞口较近,隧道埋深较小,沿拱顶向上延伸的温度测线受地表温度影响较大[图 12(a)];而在其他三个监测断面上,距离壁面越近,围岩温度下降越快。当气凝胶毡厚度增加后,温度下降速度逐渐减小,例如在距离洞口 400 m 的 S4 断面上,铺设 40 mm 气凝胶毡时,距初期支护 3 m 处与边界上的围岩温差为 1.73°C ,而不铺设气凝胶毡时,两侧温差可达 3.12°C [图 12(d)]。此外在保温层内,气凝胶毡厚度越大,保温层两侧温差也越大。在 S3 监测断面上,无气凝胶毡铺设时,保温层两侧的温差仅为 3.46°C ,当铺设 40 mm 气凝胶毡后,两侧温差已达 7.16°C [图 12(c)]。这表明气凝胶毡厚度越大,对于热量传递的阻碍也越大,因此铺设气凝胶毡可以削弱外界环境

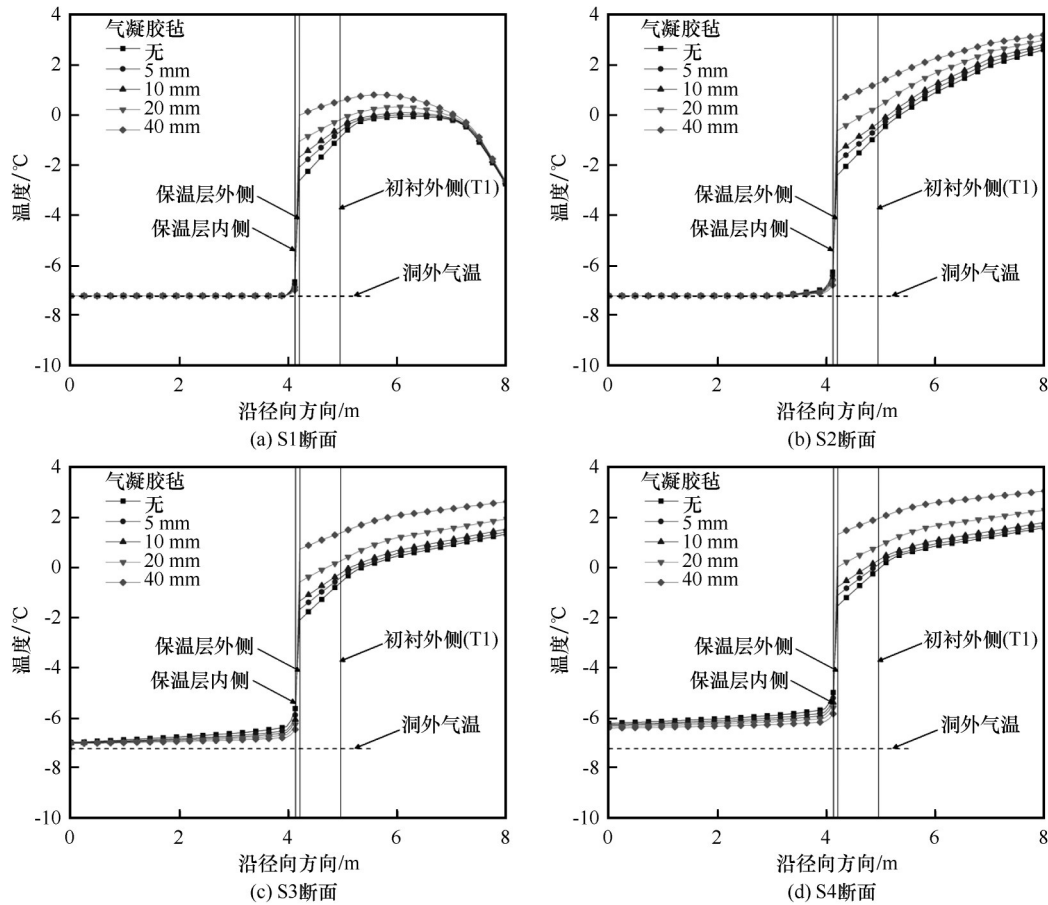


图 12 最不利时刻各监测断面温度沿径向测线变化情况

Fig. 12 The variation of the temperature of each monitored section along the radial line at the unfavorable time

对围岩原始的温度场的干扰,以达到减小冻融破坏的目的。

以 S2 监测断面为例,在最不利时刻对不同气凝胶毡厚度条件下的围岩温度等值线图进行对比,通过图 13 可以发现,当无气凝胶铺设时[图 13(a)],距离洞口 50 m 的 S2 断面上,围岩中已经出现较大范围的冻结圈,其中拱顶位置冻结深度最大,已达 0.52 m;随着厚度的增加,当气凝胶毡为 10 mm 时[图 13(c)],拱顶的冻结深度减小到 0.33 m,此时隧道左侧拱腰和仰拱位置的围岩恒为正温;当气凝胶毡厚度继续增加到 20 mm 时[图 13(d)],在最不利时刻, S2 全断面内无冻结问题发生,因此铺设 20 mm 气凝胶毡可防止 S2 断面在运营期间出现隧道结构冻融破坏。

4.3 纵向温度分布对比

图 14 中对比了在最不利时刻,不同位置温度沿隧道进深方向的演变过程。各点温度沿纵向可大致分为两个区域:入口扰动区和稳定增长区。在入口扰动区,隧道中心气温与外界环境温度基本相

同,沿进深方向温度变化趋势不明显[图 14(a)];而隧道拱顶处壁面气温在入口扰动区内增长速度较快,这是由于当外界空气进入隧道内部后,气体与围岩之间的热量交换过程最为强烈,但随着距洞口长度的增加,壁面气温的增长速度也逐渐减小[图 14(b)];拱顶围岩关键位置 T1 的温度在距离洞口 20 m 范围内,由于受地表和洞门端墙温度的双重影响,呈现出较大的波动,之后随着纵向距离的增加,其温度变化趋势也逐渐稳定[图 14(c)]。

除此之外还可以发现,随着气凝胶毡厚度的增加,隧道中心和壁面气温沿纵向增长速度慢慢变缓,而拱顶围岩关键位置 T1 的温度则呈上升趋势。以距洞口 500 m 的位置为例,铺设 40 mm 气凝胶毡时隧道中心气温比不铺设气凝胶毡时低 0.31 °C,壁面气温低 0.98 °C,而拱顶围岩关键位置 T1 的温度升高了 1.78 °C。

4.4 气凝胶毡最优铺设长度与厚度之间的关系

由拱顶围岩关键位置 T1 温度沿进深方向的变化曲线可知[图 14(c)],当隧道不铺设气凝胶毡时,

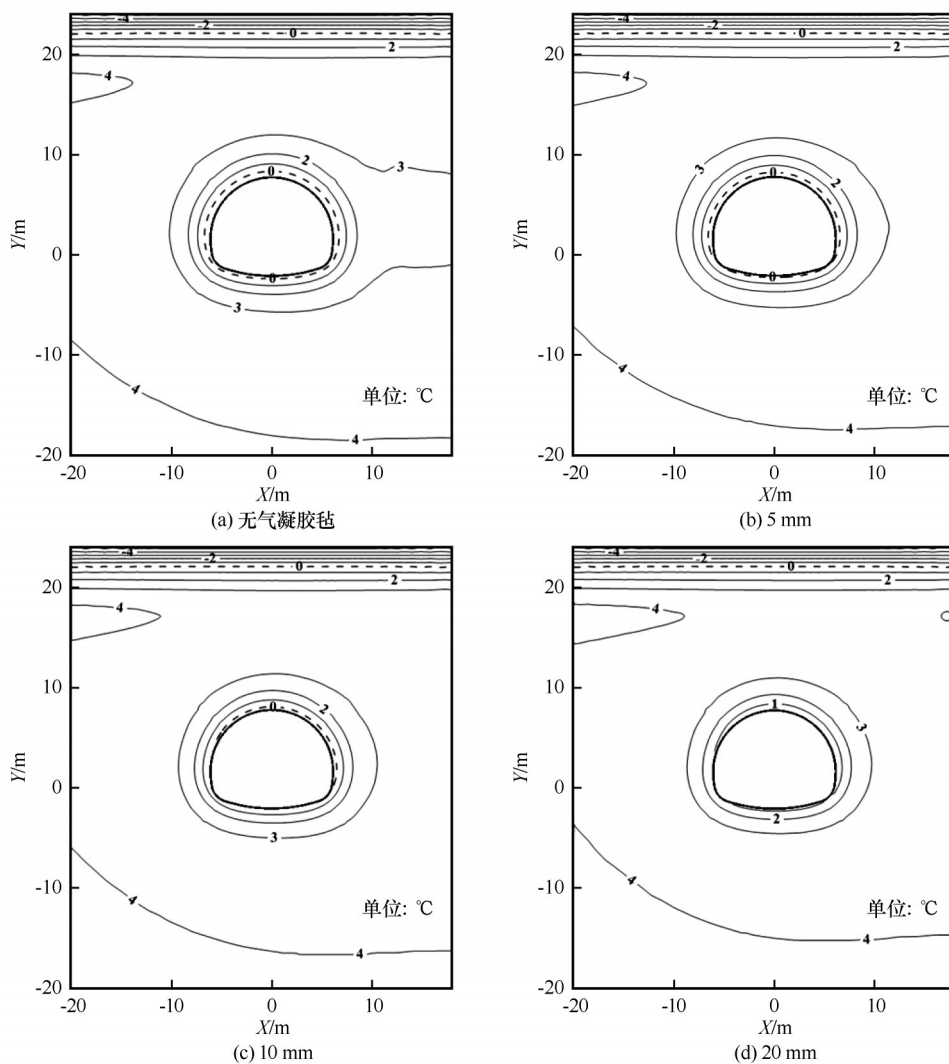


图 13 最不利时刻 S2 断面围岩温度等值线图

Fig. 13 Surrounding rock temperature isoline diagram of S2 section at the unfavorable time

在最不利时刻距洞口 500 m 处的温度为 $-0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，为了确定此时该关键位置的纵向冻结长度，利用稳定增长区的计算数据，对温度沿进深方向的变化趋势进行拟合(图 15)，温度随纵向长度的增长关系可用以下公式表示。

$$T = T_0 \left(-1.228e^{\frac{-L}{341.849L_0}} + 0.231 \right) \quad (R^2 = 0.998) \quad (12)$$

式中： T 为拱顶围岩关键位置在最不利时刻的温度 ($^{\circ}\text{C}$)； L 为距离隧道进口的长度 (m)； T_0 为温度常数，文中取 $T_0 = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ； L_0 为长度常数，文中取 $L_0 = 1\text{ m}$ ； R^2 为决定系数。

利用式 (12) 对拱顶围岩关键位置的纵向冻结长度进行计算，得到在只铺设 5 cm 厚硬质聚氨酯保温板时拱顶围岩受冻融影响的纵向长度为 571.7 m，因此需要对洞口至该长度范围内的隧道

保温层进行加固。

通过进一步分析来看，当气凝胶毡厚度不同时，所对应拱顶围岩关键位置的纵向冻结长度也不同，随着气凝胶毡厚度的增加，该位置距离洞口的冻结长度也逐渐减小。为了确定气凝胶毡厚度与拱顶围岩纵向冻结长度之间的关系，利用式 (13) 对此进行拟合。

$$D = D_0 \left(-23.988e^{\frac{L}{948.582L_0}} + 44.078 \right) \quad (R^2 = 0.998) \quad (13)$$

式中： D 为气凝胶毡厚度 (mm)； L 为距离隧道进口的长度 (m)； D_0 为厚度常数，文中取 $D_0 = 1\text{ mm}$ ； L_0 为长度常数，文中取 $L_0 = 1\text{ m}$ ； R^2 为决定系数。

从气凝胶毡厚度与距离洞口的冻结长度之间的关系可知(图 16)，二者呈指数函数变化，曲线上每一个点都对应着拱顶围岩关键位置温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

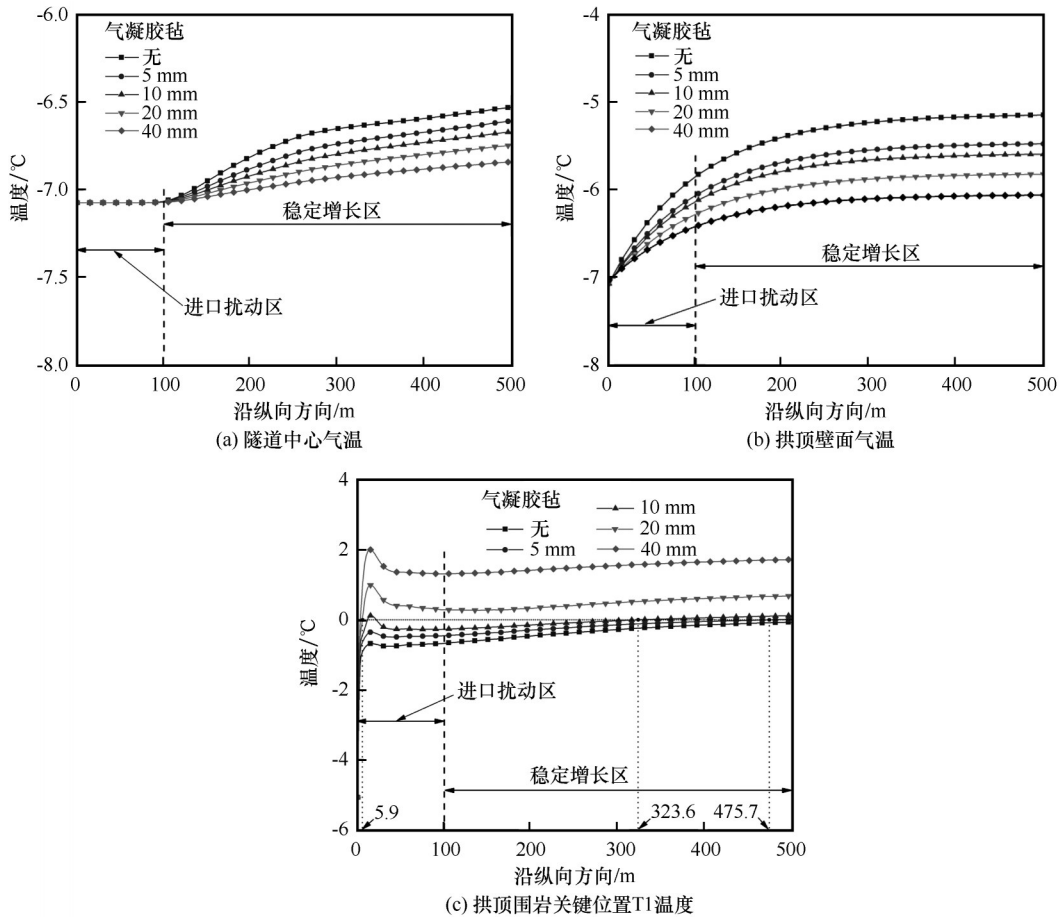


图 14 最不利时刻各点温度沿进深方向变化曲线

Fig. 14 The variation of the temperature of each point along the depth direction at the unfavorable time: air temperature in the center of the tunnel (a), vault wall air temperature (b), and the temperature of T1 (c)

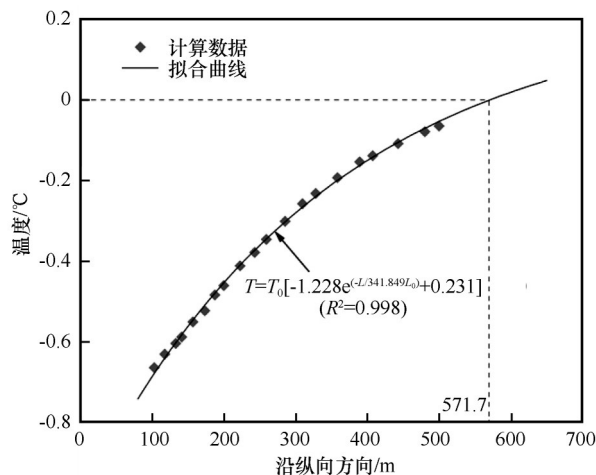


图 15 无气凝胶毡时拱顶围岩关键位置纵向冻结长度拟合曲线

Fig. 15 Fitting curve of freezing length at key positions of vault surrounding rock without aerogel felt

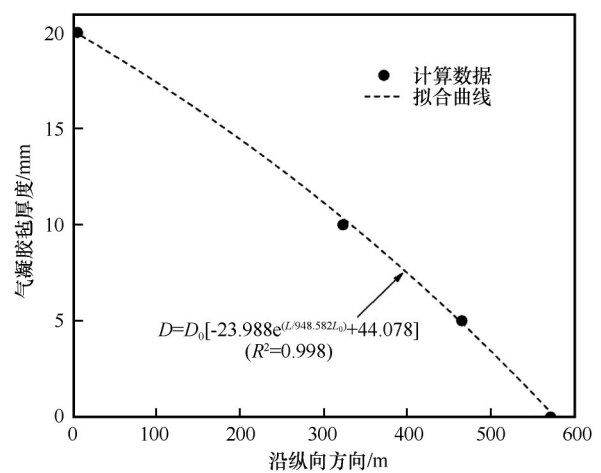


图 16 气凝胶毡厚度与拱顶围岩关键位置纵向冻结长度的拟合曲线

Fig. 16 Fitting curve between the thickness of aerogel felt and the longitudinal freezing length of the key location of the vault surrounding rock

时的最小气凝胶毡厚度。因此可利用该关系式确定圭嘎拉隧道在运营期间不发生冻融破坏所需的气凝胶毡厚度与长度,随着气凝胶毡厚度的增加,

所需铺设的长度逐渐减小,直至洞口位置,此时即为最优的保温结构优化措施。

5 讨论

本文基于三维热流固耦合计算模型,提出了将无机保温材料气凝胶毡应用到季节冻土隧道保温结构的维护和加固措施中,并以西藏圭嘎拉隧道为例对气凝胶毡铺设厚度与长度的关系进行了优化设计。在研究过程中考虑了洞内空气流动对围岩温度场的影响,相比于二维计算模型能够更加真实、全面地反映出不同位置温度的演变过程。但是在模拟计算过程中,仍然存在着一定的局限性,例如在隧道洞口位置断面,即使在衬砌表面采取了相应的保温层优化措施,但该断面路面以上的围岩温度仍为负值,这是由于在实际运营过程中,隧道入口周围洞门端墙暴露于外部环境中,受气温交替变化的影响,沿隧道进深方向仍有部分长度的围岩会经历冻融循环。因此在进行保温结构优化时,应该在洞门端墙一侧,也设置相应的保温措施。此外,本文以拱顶围岩关键位置的纵向冻结长度为优化目标,将气凝胶毡作为设计变量,对圭嘎拉隧道的保温结构进行了优化设计,加固之后的隧道在服役期间,洞口段不会出现冻融破坏问题,但文中并没有进行方案对比,因此存在保温层优化设计略微保守的问题。虽然存在着这些局限性,但是本文能够更加真实地描述隧道围岩温度与洞内空气的热流固耦合过程,以期设计出更加安全可靠的隧道保温结构。

6 结论

本文以西藏地区圭嘎拉隧道为研究对象,通过建立季节冻土隧道热流固耦合计算模型,研究了隧道围岩、洞内气体的温度演变过程及冻害孕育机理,对现行保温措施的防冻效果进行了分析,并提出了相应的优化方法,得到了以下结论:

(1)由数值计算结果可知,根据工程类比法设置的保温层不能满足圭嘎拉隧道的防冻需求,洞口段受外界气温影响仍会发生冻融破坏。在隧道运营后第20年2月15日,对比发现拱顶围岩边界位置的温度最低,其中距离洞口5 m处截面的温度仅为 $-0.91\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此选取该最不利冻害时空特征点作为控制条件对保温层进行优化设计。

(2)提出一种可用于季节冻土隧道保温结构的维护与加固方法,利用新型无机材料气凝胶毡优良的保温、阻燃和耐久性能,显著提高隧道在运营期间的安全性和稳定性,而且采用胶结法可实现无钉化

铺装,简化了施工操作步骤。

(3)隧道围岩温度、洞内气温在径向和纵向分布上都呈现出一定的规律性,随着气凝胶毡厚度的增加,对于气体与围岩之间对流换热的阻碍作用逐渐增强,减小了外界环境对围岩原始温度状态的影响,对于冻害问题的防治有着显著的作用。

(4)在保温结构的优化过程中,气凝胶毡厚度与拱顶围岩关键位置的纵向冻结长度之间呈负相关变化规律,二者之间的对应关系可通过指数函数进行拟合,利用该公式可以确定洞口段围岩不发生冻融破坏所需铺设的气凝胶毡厚度与长度。

本文的研究成果可为圭嘎拉隧道保温防冻措施的优化加固提供科学依据,并为季节冻土隧道保温结构的设计及维护方案提供参考。

参考文献(References):

- [1] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [2] Li Shuangyang, Niu Fujun, Sun Zhizhong, et al. Numerical study on moisture-heat-mechanics coupled process of Jiangluling Tunnel construction in permafrost region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 966-973. [李双洋, 牛富俊, 孙志忠, 等. 多年冻土区姜路岭隧道施工水热力数值研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 966-973.]
- [3] Gao Yan. Study on temperature field theory and thermal insulation technology of high speed railway tunnel in cold region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. [高焱. 寒区高速铁路隧道温度场理论与保温技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.]
- [4] Zhou Yuanfu. Research on optimization design of tunnel's insulating layer in cold region[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010. [周元辅. 寒区隧道保温隔热层的优化设计研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.]
- [5] Lai Yuanming, Wu Ziwan, Zhang Shujuan, et al. In-situ observed study for effect of heat preservation in cold regions tunnels[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 81-86. [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.]
- [6] Lai Jinxing, Qiu Junling, Fan Haobo, 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(12): 56-65.
- [7] Zhou Jinzhu. Constructing technology research on water-proof/drain age and heat insulation lining in Kunlunshan Tunnel of Qinghai-Tibet Railway, Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 106-111. [周晋筑. 昆仑山隧道洞内防排水及衬砌隔热保温层施工技术[J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 106-111.]
- [8] 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(Suppl 2): 4395-4401. [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(增刊2): 4395-4401.]

- [9] Yao Hongzhi, Zhang Xiaoxu, Dong Changsong, et al. Comparison analysis on heat insulating material property and laying way of highway tunnel in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 106-113. [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.]
- [10] Zhou Xiaohan, Zeng Yanhua, Fan Lei, et al. Temporal-spatial evolution laws of temperature field in cold region tunnel and temperature control measures[J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 46-52. [周小涵, 曾艳华, 范磊, 等. 寒区隧道温度场的时空演化规律及温控措施研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 46-52.]
- [11] Zhang Yao, Lai Yuanming, Zhang Xuefu. A practical method for calculating the design parameters of the heat insulation layer in cold region tunnel[J]. China Railway Science, 2009, 30(2): 66-70. [张耀, 赖远明, 张学富. 寒区隧道隔热层设计参数的实用计算方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 66-70.]
- [12] Yang Li. Study on water absorption property and thermal insulation performance under freeze-thaw cycle of tunnel insulation materials in cold region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. [杨立. 寒区隧道保温材料吸水特性及冻融循环条件下的保温性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.]
- [13] Wang Enliang, Jin Wanying, Liu Xingchao, et al. Study on water absorption characteristics and mechanical XPS insulation board under freezing-thawing cycles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(1): 47-52. [汪恩良, 靳婉莹, 刘兴超, 等. 冻融条件下XPS板吸水特性及力学性能研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(1): 47-52.]
- [14] He Xiaofang, Xia Shaoxu, Liu Yufei, et al. Research progress of aging and flame retardant in organic exterior wall insulation[J]. Materials Review, 2012, 26(7): 149-153. [何小芳, 夏少旭, 刘玉飞, 等. 有机外墙外保温材料的阻燃及老化研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(7): 149-153.]
- [15] Tao Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. [陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.]
- [16] Lai Yuanming, Zhang Mingyi, Li Shuangyang. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. [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.]
- [17] He Chunxiong, Wu Ziwang, Zhu Linnan. Analysis of freeze-thaw condition in the surrounding rock wall of Dabanshan Tunnel in Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 113-120. [何春雄, 吴紫汪, 朱林楠. 祁连山区大坂山隧道围岩的冻融状况分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 113-120.]
- [18] Tan Xianjun, Chen Weizhong, Yu Hongdan, et al. Study of temperature field of tunnel surrounding rock in cold regions considering effect of ventilation and length design of insulation material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1400-1409. [谭贤君, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1400-1409.]
- [19] Gao Yan, Zhu Yongquan, Xin Hao. Temperature measurement and simulation of long tunnel in cold region[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(1): 49-55. [高焱, 朱永全, 辛浩. 寒区长隧道温度实测与仿真[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(1): 49-55.]
- [20] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.
- [21] 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 simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1264-1273.
- [22] An Weidong. Interaction among temperature, moisture and stress fields in frozen soil[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1990. [安维东. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1990.]
- [23] Lai Yuanming, Zhang Luxin, Zhang Shujuan, et al. Cooling effect of ripped-stone embankments on Qing-Tibet Railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 598-604.
- [24] Hao Fei, Sun Quansheng. Research on the temperature fields and insulating layers of highway tunnels in a cold region[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(1): 39-43. [郝飞, 孙全胜. 寒区公路隧道温度场及保温层的研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(1): 39-43.]
- [25] Zhang Jianming. Study on roadbed stability in permafrost regions on Qinghai-Tibetan Plateau and classification of permafrost in highway engineering[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2004. [张健明. 青藏高原冻土路基稳定性及公路工程多年冻土分类研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2004.]
- [26] Du Yaohui, Yang Xiaohua, Yan Changgen. Numerical analysis of temperature field in seasonal frozen regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2): 366-374. [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.]
- [27] Lai Yuanming, Wu Ziwang, Zhu Linnan, et al. Nonlinear analysis for the coupled problem of temperature, seepage and stress fields in cold-region tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(4): 435-440.
- [28] He Fei, He Xiaodong, Li Yao. Study on thermal properties of aerogels[J]. Materials Review, 2005, 19(12): 20-22. [何飞, 赫晓东, 李焱. 气凝胶热特性的研究现状[J]. 材料导报, 2005, 19(12): 20-22.]
- [29] Zhu Linnan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(1): 8-14. [朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(1): 8-14.]
- [30] Pei Wansheng, Zhang Mingyi, Li Shuangyang, et al. Geotemperature control performance of two-phase closed thermosyphons in the shady and sunny slopes of an embankment in a permafrost region[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 986-998.
- [31] Deng Zhongsheng, Wang Yu, Chen Lingyan. The development of aerogel applications[J]. Materials Review, 1999, 13(6): 47-49. [邓忠生, 王钰, 陈玲燕. 气凝胶应用研究进展[J]. 材料导报, 1999, 13(6): 47-49.]

Research on optimum design of insulation structure of alpine tunnel : taking Guigala Tunnel in Tibet as an example

LI Gen^{1,2}, LI Shuangyang¹, DONG Changsong³, YANG Jiale^{4,1}, JIANG Qi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 4. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To improve the anti-freeze and heat preservation performance of tunnels in the seasonally frozen regions, the freezing range of surrounding rock is often reduced by laying organic insulation layer such as polyurethane at present. However, due to the rapid aging speed of organic materials during the process of freeze-thaw cycles and the lack of scientific basis for insulation design, some tunnels repeatedly appear freezing-thawing damage during long-term operation. For example, the problems of lining water seepage, hanging ice, tunnel bottle water gushing, pavement freezing, lining cracking, crumbling, spalling, etc. This paper analyzes the effect of current insulating measures by establishing the heat-fluid-solid coupling calculation model, in which the Guigala Tunnel in Tibet is taken as subject investigated, and the result showed that surrounding rock within a certain length of the entrance will still undergo freeze-thaw cycles during the operation period. The boundary temperature of the surrounding rock at the section vault at a distance of 5 m from the entrance was only $-0.91\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the frozen length of the key point was more than 500 m from the entrance on February 15th of the 20th year after the tunnel operation, which seriously affected the safety and stability of the tunnel structure. For the sake of meeting the requirements of antifreeze insulation, a new type of inorganic material—aerogel felt was proposed to reinforce the insulation structure of the tunnel. The material had excellent thermal insulation, flame retardant and durability, at the same time the paving was simple and easy to operate. In order to determine the length and thickness of the aerogel felt to be laid during the Guigala Tunnel operation, the radial and longitudinal temperature of surrounding rock as well as the air temperature in the tunnel were compared in detail under different thickness of aerogel felt. The evolution law of the surrounding rock and the air in the tunnel under different conditions was summarized, and the aerogel felt at the most unfavorable time was determined by data fitting. The relationship between the thickness and the vertical freezing length of the key positions of the surrounding rock was changed exponentially. According to the fitting formula, the relationship between the length and thickness of the aerogel felt should be laid out from the depth of the portal to the depth, which was the best reinforcement and maintenance method for the tunnel insulation structure. This work can provide technical support for the pre-reinforcement design of anti-freezing and insulating in Guigala Tunnel, which not only ensure the safety and economy of the tunnel structure, but also provide a reference for the insulation structure design, construction and maintenance of tunnel in seasonally frozen regions.

Key words: seasonally frozen soil; tunnel; freezing-thawing damage; aerogel felt; numerical simulation; temperature field

(责任编辑: 温智; 编辑: 武俊杰)