

齐明山, 王祥, 陈光友, 等. 电加热对高寒隧道温度和损伤影响的数值研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 135-146. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.011

QI Mingshan, WANG Xiang, CHEN Guangyou, et al. Numerical simulation study on the effect of electric heating on temperature and damage in high-altitude cold tunnels [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 135-146. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.011

电加热对高寒隧道温度和损伤影响的数值研究

齐明山¹, 王祥², 陈光友³, 晏启祥³

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 2. 贵阳市公共交通投资运营集团有限公司, 贵州 贵阳 550081; 3. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:【目的】高海拔寒区隧道工程在国家发展大环境下逐年增多, 隧道洞口冻害普遍存在, 现阶段防冻技术主要是被动保温防冻技术。【方法】基于此, 建立高寒隧道电加热主动防护数值模型, 分析不同环境温度下衬砌的受拉损伤以及电加热技术对于围岩冻胀和衬砌低温劣化的抑制效果, 并探讨不同电热带发热功率、埋置深度、工作时间及保温板厚度等参数对防护效果的影响。【结果】研究表明: (1)隧道衬砌损伤随温度降低愈加严重, 复合电加热技术可以有效解决低温损伤劣化问题; (2)随环境温度降低, 高寒隧道电加热系统热功率增大; (3)电热带应铺设于高寒隧道衬砌表面, 并配套使用厚度约5 cm的保温层效果较好; (4)隧道衬砌温度随环境温度变化具有滞后性, 建议在寒季开始前约15天左右开启电加热系统, 提前7天关闭系统。【结论】电加热技术在隧道保温防冻中能极大程度提高保温防冻效果, 不同环境温度下所需的电加热系统功率不同。通过对电加热进行参数化分析, 提出合理的施工建议, 以指导电加热技术在隧道工程中的应用。

关键词: 隧道工程; 高海拔寒区; 数值计算; 电加热技术; 低温损伤

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)03-0135-12



Numerical simulation study on the effect of electric heating on temperature and damage in high-altitude cold tunnels

QI Mingshan¹, WANG Xiang², CHEN Guangyou³, YAN Qixiang³

(1. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Guiyang City Public Transportation Investment and Operation Group Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] Tunnel projects in high-altitude cold areas are increasing year by year under the national development environment. Tunnel opening frost damage is widespread, and at this stage, the frost protection technology is mainly passive thermal insulation and frost protection technology. [Methods] Based on this, a numerical model of electric heating active protection for high-altitude cold tunnels is established. The tensile damage of the lining under different ambient temperatures, the

收稿日期: 2024-03-29; 修回日期: 2024-04-01; 录用日期: 2024-05-23; 网络出版日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U21A20152); 国家自然科学基金面上项目(52278416)

作者简介: 齐明山(1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事隧道与轨道交通设计研究工作。E-mail: shuzhimn@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

inhibition effect of electric heating technology on the freezing of the surrounding rock, and the low-temperature deterioration of the lining are analyzed. And the influence of different electric heating power, burial depth, working time, and thickness of insulation board on the protection effect are explored. [Results] The result of the study show that: (1) The damage of tunnel lining becomes more and more serious with the decrease of temperature. Composite electric heating technology can effectively solve the problem of low-temperature damage deterioration; (2) With the lowering of the ambient temperature, the thermal power of the electric heating system of the alpine tunnel increases; (3) Electric heating tape should be laid on the surface of the alpine tunnel lining, and supporting the use of a thickness of about 5 cm of the thermal insulation layer is more effective; (4) The tunnel lining temperature with the change in the ambient temperature with hysteresis. It is recommended to switch on the electric heating system about 15 days before the start of the cold season, and switch off the system 7 days in advance. [Conclusion] Electric heating technology in tunnel insulation and frost protection can greatly improve the effect of insulation and frost protection. Different ambient temperatures require different power of the electric heating system. Through the parametric analysis of electric heating, reasonable construction recommendations are made to guide the application of electric heating technology in tunnel engineering.

Keywords: tunneling; high altitude cold region; numerical calculation; electric heating technology; low-temperature damage

0 引言

近年来铁路与公路隧道等基础工程开始逐渐向我国中西部和北部的高山多年冻土地区扩展, 这些高海拔寒区隧道的规模更大、设计施工技术要求更多, 面临的冻害危险系数更高^[1-2]。隧道保温防冻技术, 成为国内外众多学者的研究重点。

寒区隧道温度场分布规律是后续保温防冻设计的基础, 张力杰等^[3]通过 Laplace 变换分析了考虑与不考虑气温日变化过程隧道衬砌结构温度的变化规律; 姜海强^[4]和高炎等^[5]基于数值模拟手段研究了寒区隧道温度场分布规律; 王建军等^[6]对隧道通风竖井的温度场以及保温措施展开了研究。隧道洞口防冻段长度直接联系到保温防冻有效性和施工过程, TAKUMI 等^[7]考虑隧道地面与隧道内气流之间的热传导与热对流作用, 确定了隧道洞口段抗冻设防长度; 郑波等^[8]和吴剑等^[9]在川西高原隧道现场调查的基础上, 给出了高海拔寒区隧道保温层厚度、保温层设防长度等确定方法并结合现场试验探讨其正确性; 张生^[10]对季节性冻区隧道入口保温段长度、衬砌保温、排水沟保温等进行了分析, 给出了相应设计计算方法。夏才初等^[11]依托青海知亥代公路隧道, 借助 ANSYS 有限元计算软件, 对知亥代隧道非冻土段保温层铺设长度进行优化。

在防冻技术措施^[12-13]上, 熊泽琛等^[14]以西宁—成都高速铁路寒区特长隧道为例, 分析了埋管间距、围岩导热系数、进水温度等因素对洞口排水沟保温防冻的影响; 王仁远等^[15]进行了寒区隧道温度场模型试验, 分析隧道温度场变化规律并提出了一种空气幕隧道保温措施; 王志杰等^[16]以高寒高海拔特长珠角

拉山隧道为例, 采用数值模拟手段, 探讨了不同气温下隧道保温层结构设计参数的合理取值范围。李根等^[17]建立了热流固耦合计算模型, 检验了现行铺设聚氨酯类有机保温层措施的防冻效果。此外, 严健^[18]和高炎等^[19]对寒区隧道冻胀特性进行了研究, 张弛^[20]和马志富等^[21]研究了隧道防冻设计标准。电加热技术在地板采暖等众多领域^[22-23]也得到了广泛应用。

上述研究在隧道保温和防冻技术领域取得了丰硕成果, 尤其是隧道表层保温结构这类被动防护技术方面^[24-25], 形成了较为成熟的设计与应用经验。然而目前电加热主动保温防冻技术应用于高寒隧道工程尚处于新发展阶段, 相关可参考的隧道电热带设计施工经验仍然较少。有鉴于此, 本文借助有限元软件, 建立结合内热源与保温材料的围岩—隧道—洞内环境三维传热模型, 探明保温层配合电加热作用下隧道衬砌结构温度时空演化规律, 研究不同电热带发热功率、埋置深度、不同保温板厚度及不同工作时间内高寒隧道抗防冻效果, 得到了高寒隧道保温层配合电加热复合防冻技术的最佳配置指标, 提出了有关施工建议, 助力电加热技术的隧道工程防冻应用。

1 高海拔寒区隧道概况

我国疆域辽阔, 冻土地区分布众多, 主要分为以东北为代表的高纬度冻土区和以西部高山高原及东部一些较高山地为代表的高海拔冻土区。随着国家综合立体交通建设需要, 各方交通基础设施加速发展。在高海拔寒区已完工或正在修建的隧道工程逐年增多, 但隧道冻害问题也与之而来。特别是本文重点讨论的高海拔寒区隧道, 隧道建设难度高、地质条件恶劣、

地表气象多变、地下水运动复杂, 冻害威胁突出, 隧道抗防冻设计亟待优化。我国已开通高海拔寒区隧道典型工程如表 1 所列。

表 1 典型高海拔寒区隧道

Table 1 Typical high-altitude cold tunnel

| 隧道名称 | 隧道长度/m | 平均海拔/m | 年均气温/℃ | 最低气温/℃ |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 新关角隧道 | 32.645 | >3 600 | -0.5 | -35.8 |
| 大坂山隧道 | 1.530 | 3 800 | -3.1 | -34.0 |
| 昆仑山隧道 | 1.686 | ≈4 650 | -4.4 | -37.7 |
| 风火山隧道 | 1.338 | 5 010 | -7.0 | -41.0 |
| 雀儿山隧道 | 7.079 | ≈4 300 | -9.5 | — |
| 鹧鸪山隧道 | 4.423 | 3 500 | — | -31.1 |
| 祁连山隧道 | 9.490 | ≈3 500 | 1.8 | -31.5 |
| 奎先隧道 | 6.154 | 2 982 | — | -33.0 |

2 有限元模型

建立马蹄形隧道三维模型如图 1 所示, 模型网格中围岩、初支、二次衬砌和保温层均采用三维实体单元, 加热电缆通过析取采用一维管单元模拟。模型各结构网格组通过布尔运算实现耦合, 无锁紧单元。

围岩初始温度设置为 5 ℃, 隧道初支厚度 0.2 m, 二次衬砌厚度 0.4 m, 保温层厚度依据不同工况需求设置为 0~13 cm, 加热电缆芯带宽度选用

12 mm, 沿隧道环向均匀布设。确定模型整体尺寸为 100 m×90 m×48 m。模型材料参数如表 2 所列。

表 2 模型材料参数

Table 2 Model material parameters

| 名称 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{℃})^{-1}$ | 比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{℃})^{-1}$ |
|-----|----------|------|-------------------------------------|---|---|
| 隔热层 | 0.5 | 0.45 | 60 | 0.020 | 2 500 |
| 混凝土 | 30.0 | 0.16 | 2 500 | 2.400 | 1 390 |
| 围岩 | 5.0 | 0.30 | 2 000 | 2.500 | 900 |

模型荷载与边界条件拟定了有限元软件热传递分析中的特定工况, 是反应到热荷载向量、热传导矩阵或节点温度里的外在因素, 如图 2 所示。

对流是流体由温度较高区域向温度较低区域热传递的现象, 有限元软件中的自由对流由外部温度 T_{∞} 和对流系数 β_{∞} 决定, 对流热流量具体公式如下

$$R_i = \int_s \beta_{\infty} N_i (T - T_{\infty}) ds \quad (1)$$

式中, T 为对流表面温度 (℃)。

对流系数参考《大体积混凝土施工标准》GB 50496—2018, 按平板计算不同厚度下保温层表面与隧道洞内大气间的传热系数, 如公式(2)所示。

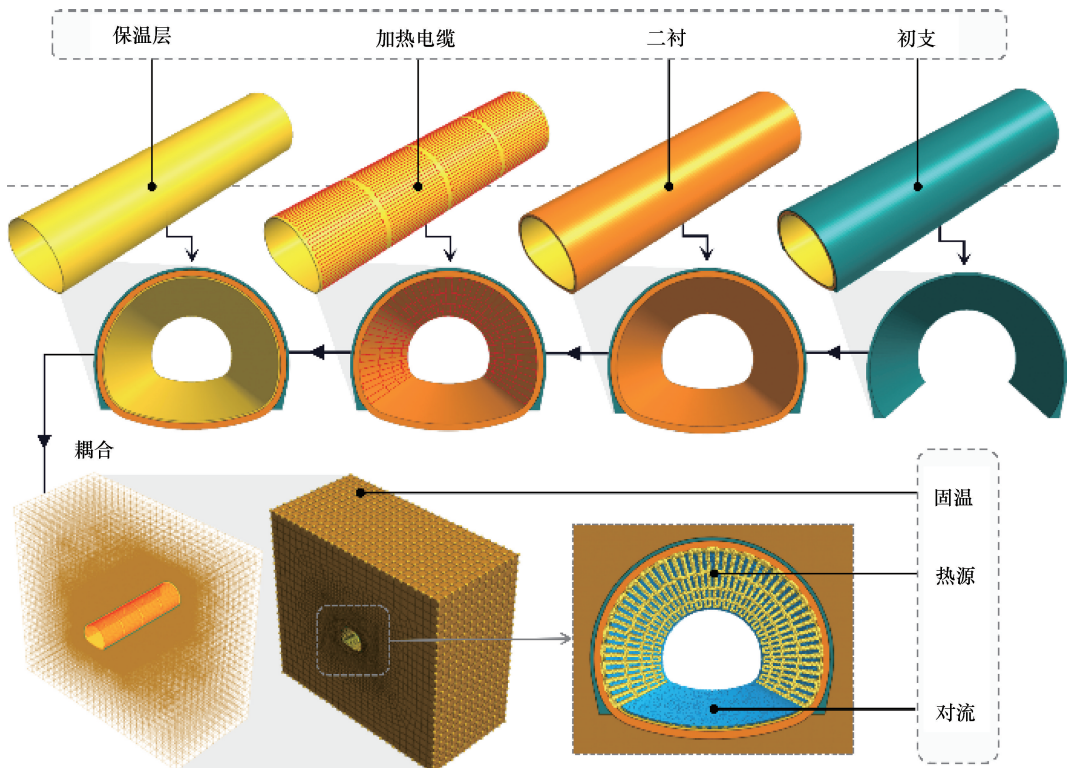


图 1 高寒隧道电加热数值模型

Fig. 1 Numerical modeling of electric heating in alpine tunnels

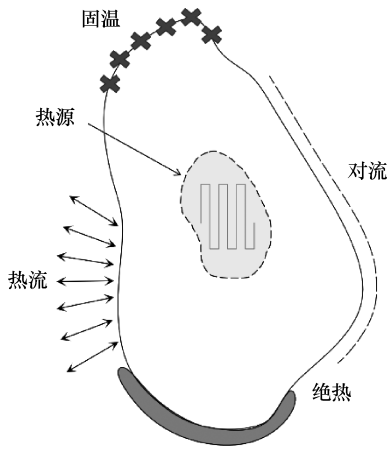


图2 热荷载与边界条件

Fig. 2 Thermal loads and boundary conditions

$$\beta = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{con}} + \sum \frac{h_i}{\lambda_i}} \quad (2)$$

式中, β 为保温层表面总传热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; R 为保温层总热阻 $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; β_{con} 为混凝土在空气中的

传热系数 $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$; h_i 为第 i 层保温材料厚度 (m) ; λ_i 为第 i 层保温材料导热系数 $[W/(m \cdot ^\circ C)]$ 。

3 电加热效果

衬砌材料采用基于修正的混凝土参数的塑性损伤本构模型^[26], 并根据 Birtel-Mark 损伤理论, 确定低温环境混凝土受压和受拉损伤因子, 从而建立混凝土破坏塑性函数, 形成低温环境混凝土塑性损伤本构模型。Birtel-Mark 损伤理论中损伤因子确定方式如下

$$d_k = 1 - \frac{\sigma_k E_0^{-1}}{\varepsilon_k \left(\frac{1}{b_k} - 1 \right) + \sigma_k E_0^{-1}} \quad (k = c, t) \quad (3)$$

式中, ε_k 为塑性应变; b_k 为塑性应变与非弹性应变之比, 受压取为 0.7, 受拉取为 0.1; c, t 分别表示受压和受拉。

根据高寒隧道常见低温范围, 拟定隧道环境温度为 $-15^\circ C$ (工况一)、 $-20^\circ C$ (工况二)、 $-30^\circ C$ (工况三) 与 $-40^\circ C$ (工况四) 进行衬砌损伤计算。洞内不同环境温度下衬砌受拉损伤演变过程如图 3 所示。

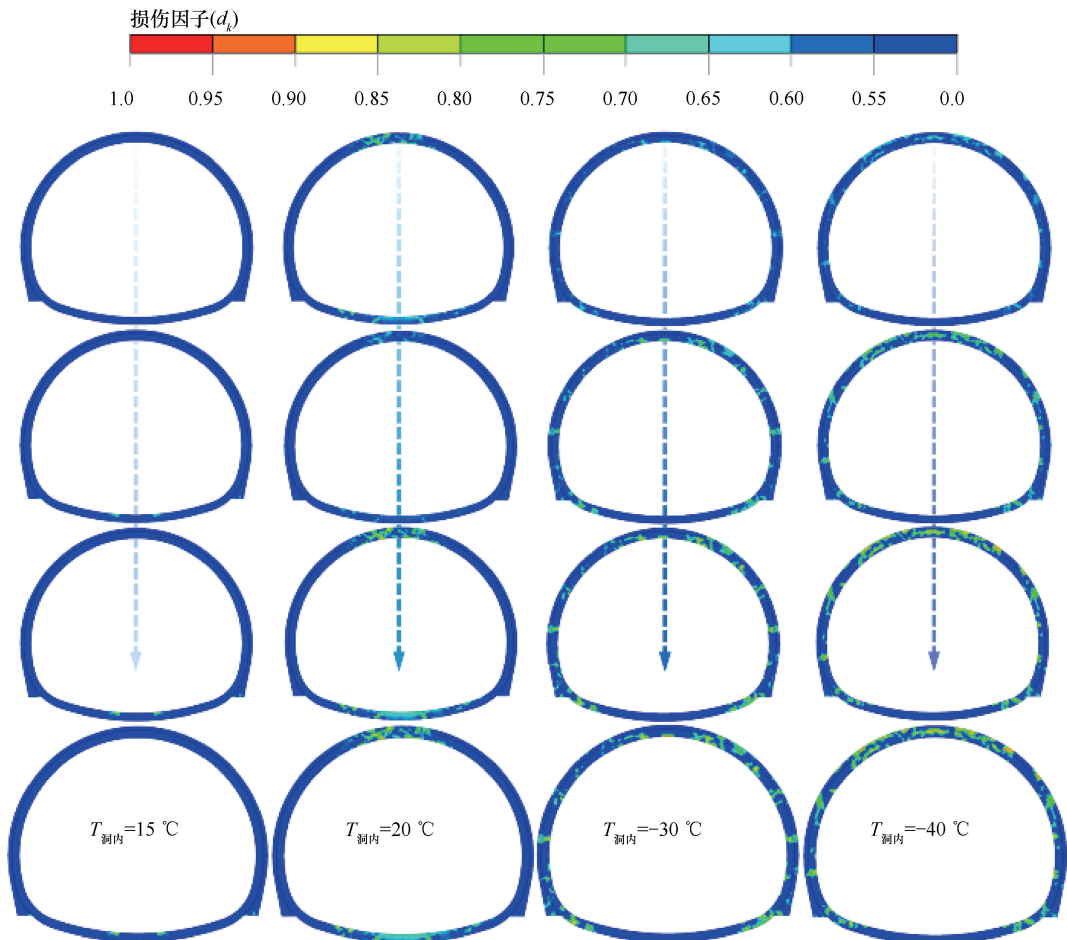


图3 洞内不同环境温度下衬砌受拉损伤演变过程

Fig. 3 Evolution of lining tensile damage under different ambient temperatures in caves

由图3可知,在工况一条件下,隧道衬砌受拉损伤最先在拱底位置出现,最终集中于拱底与初支墙角处,整体损伤程度较轻;在工况二条件下,隧道衬砌受拉损伤始于拱顶与拱底部位,最终衬砌拱底部位体现为环向贯通损伤,产生大于0.9的受拉损伤;在工况三条件下,隧道衬砌受拉损伤同步在拱顶、拱腰与拱脚等多个部位演变,受拉损伤水平有所提升;在工况四条件下,隧道衬砌受拉损伤集中区进一步扩散,处于0.9~1.0受拉损伤区间的衬砌部分明显增加,特别是隧道衬砌拱顶附近区域,高损伤表现突出。随着隧道洞内环境温度的降低,衬砌最大损伤区域逐渐由隧道顶底部位向两侧拱腰拱脚转移,且损伤范围增大。

隧道洞内环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时衬砌出现区间值大于0.9的受拉损伤区域,故以环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温层厚度为5 cm,电加热功率为 $190\text{ W}/\text{m}^2$,电热带敷设于二次衬砌与保温层之间建立模型,分析电加热技术防冻效果。隧道衬砌温度与损伤云图如图4所示。

图4反映出电加热对隧道衬砌温度与损伤分布具有显著影响。对比图4中(a)(b)可知,在未使用

电加热情况下,隧道衬砌温度介于 $-6\sim-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内;在使用电加热情况下,隧道衬砌沿环向、纵向、径向上的温度水平均有大幅提升。对比图4(c)(d)可知,在未使用电加热的低温初始情况下,隧道衬砌在拱顶与拱底出现了明显的因低温而造成的受拉损伤劣化区域;在使用电加热情况下,隧道衬砌损伤明显减小,最大的受拉损伤仅0.153。

为直观体现电加热前后衬砌损伤变化规律,统计各受拉损伤区间占比,绘制得到如图5所示的电加热前后各损伤区间柱形分布图。

由图5可知,在应用电加热前,隧道衬砌受拉损伤主要集中在0.4~0.5区间,0.5~0.6区间次之,部分衬砌处于0.8~1.0高损伤区间,中高损伤区间占比90%以上;在应用电加热后,隧道衬砌受拉损伤全部转为0~0.2区间,对中高损伤控制率达到100%,单元损伤程度很低,说明复合电加热技术可以有效解决低温损伤劣化问题,消除衬砌受拉高损伤现象,保障隧道正常作业。

4 电加热参数

在电加热技术有效控制隧道洞口损伤的基础上,

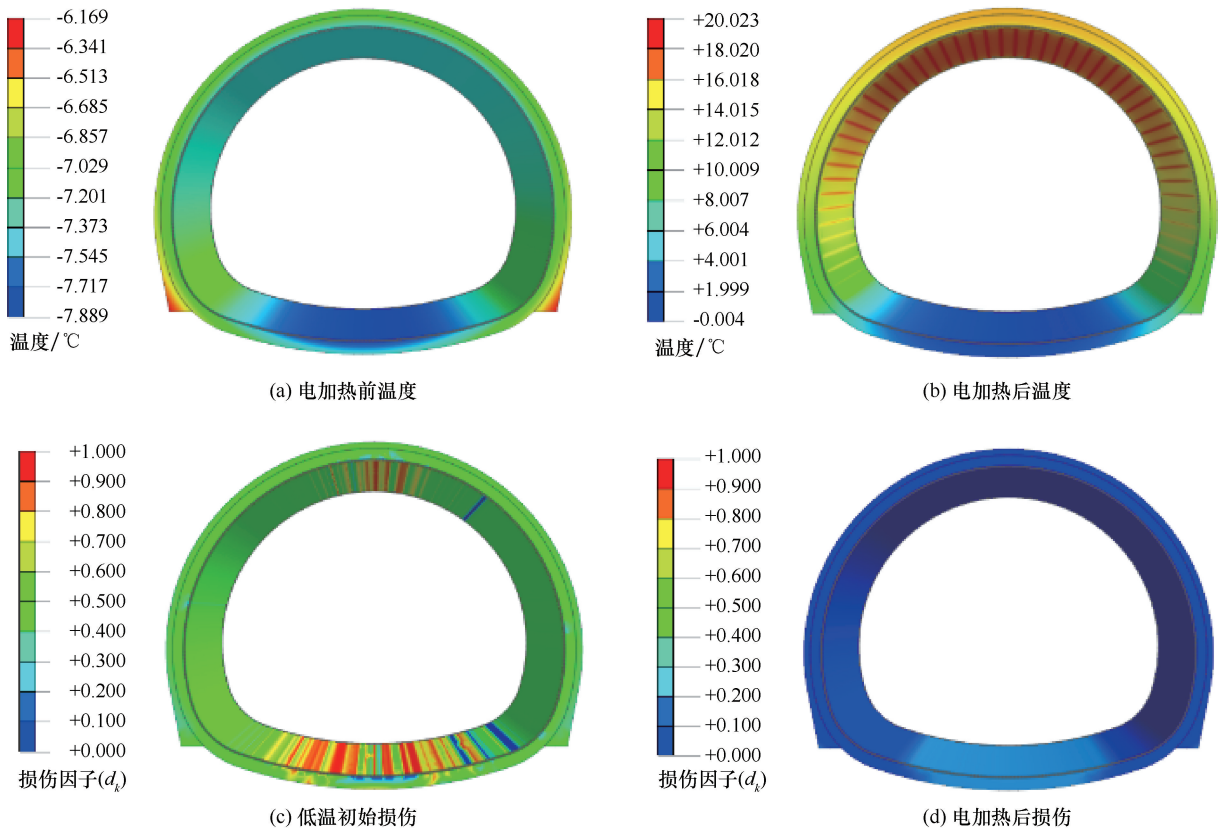


图4 隧道衬砌温度场与损伤场(受拉损伤为主)分布

Fig. 4 Distribution of tunnel lining temperature field and damage field

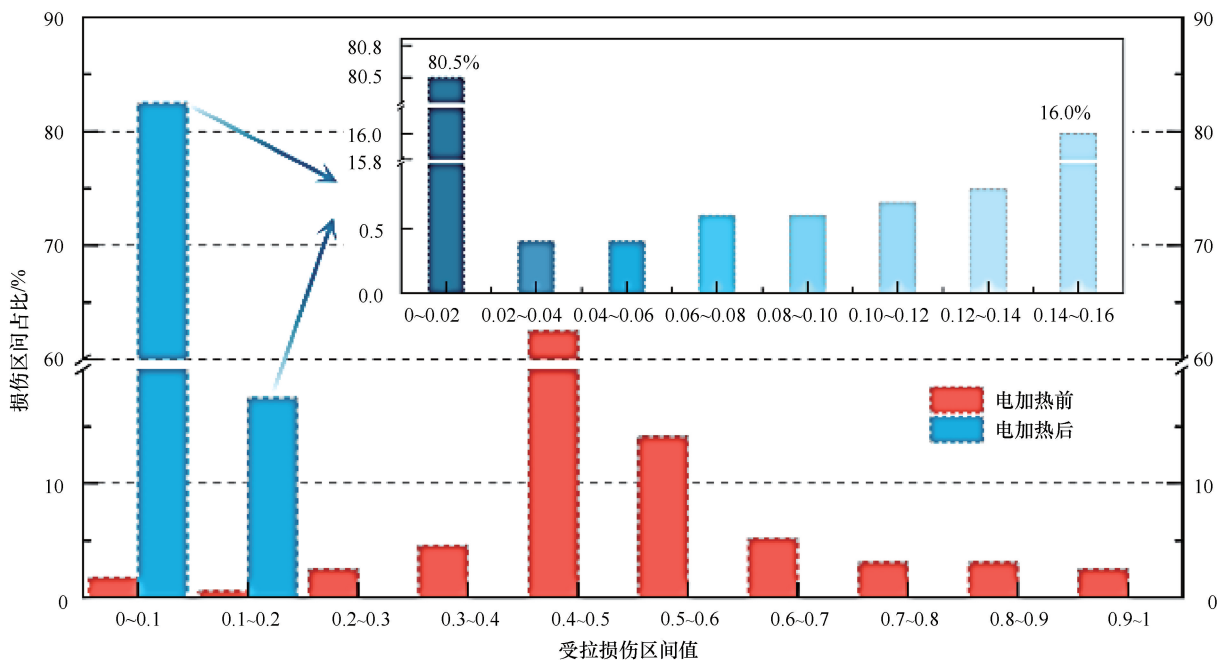


图5 隧道衬砌电加热前后损伤区间分布变化

Fig. 5 Changes in damage interval distribution before and after electrical heating of tunnel lining

进一步对不同的电加热系统参数进行分析, 为电加热应用提供参考。

4.1 不同电热带功率

模型施工阶段共分为两个阶段, 阶段一激活地层-隧道结构, 加载固温与对流温度荷载, 表征在保温层作用下高寒隧道热传递特征; 阶段二启动加热电缆部分热源, 选择瞬态或稳态分析, 在阶段一稳态结果

基础上进行高寒隧道电加热计算。其中, 瞬态分析设置总时间为 75 d, 共分为 10 步, 每步时间为 0.25 m。提取洞内温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时阶段二瞬态与稳态分析下隧道二次衬砌随电加热功率变化的最低温度与最高温度曲线, 如图 6 和图 7 所示。瞬态下隧道二次衬砌的整体温度伴随电加热系统功率的增大而逐渐上升。从最低温度看, 电加热功率增大对二次衬砌抗冻

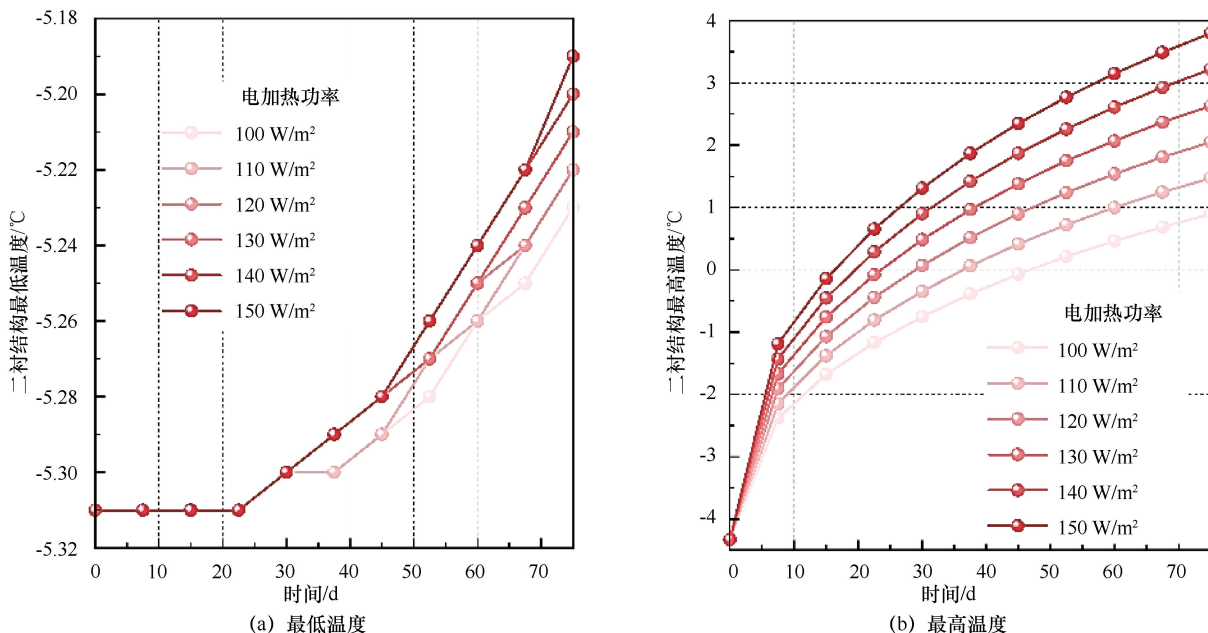


图6 隧道二次衬砌温度随电加热功率的变化曲线(瞬态)

Fig. 6 Variation curve of tunnel secondary lining temperature with electric heating power

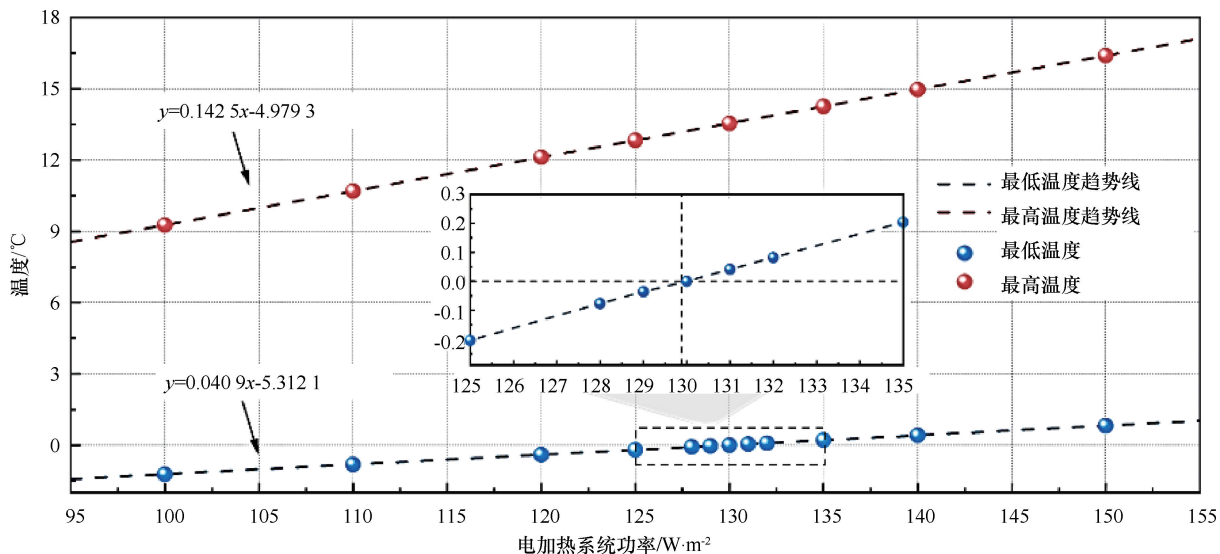


图7 隧道二次衬砌温度随电加热功率的变化曲线(稳态)

Fig. 7 Variation curve of tunnel secondary lining temperature with electric heating power (steady state)

性能改善的效果在0~22.5 d期间有限,在22.5 d后效果明显,在30 d后表现出电加热系统功率大小设置的差异;从最高温度看,在0~7.5 d期间效果显著,在7.5 d后效果开始变缓,随着加热时间累积,不同电加热系统功率下二次衬砌产生的最高温度差值越来越大。

图7中稳态下隧道二次衬砌温度与电加热系统功率间的正线性关系。在温度低于0℃时,隧道衬砌和围岩可能发生冻胀破坏,图中隧道二次衬砌最低温度达到0℃时,对应电加热系统功率为129.880 W/m²,为保证隧道结构安全将温度稳定于正温范围,减少产生围岩与衬砌冻胀作用,电加热系统功率宜在130 W/m²左右。

为进一步拓展得到洞内不同环境温度下高寒隧道电加热系统最佳发热功率,改变洞内环境温度介于-5~-30℃,以隧道衬砌结构最低温靠近0℃为判定标准,得到电加热系统功率设置建议值如表3所列。

表3 电加热系统功率设置建议值

Table 3 Recommended values for power settings for electric heating systems

| 洞内气温/℃ | -5 | -10 | -15 | -20 | -25 | -30 |
|----------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 功率/W·m ⁻² | 4 | 67 | 130 | 193 | 256 | 319 |

由此可知,当洞内环境温度低于-30℃左右时,高寒隧道电加热发热功率需求较大,在实际工程中考虑到经济效益,建议可以适当减小电加热运行开支,在隧道洞口段配合防寒门等保温措施使用。

4.2 不同电热带埋置深度

出于方便现场施工和后期维护考虑,加热电缆往

往埋设在高寒隧道二次衬砌与隔热保温层之间。为验证该埋设方式合理性,取一衬砌段为例,设置洞内环境温度为-15℃,电热带功率为130 W/m²,保温层厚度为5 cm,得到电加热系统铺设于二次衬砌表面时隧道各结构温度变化曲线与二次衬砌表面温度3D曲面如图8所示。

由图8可知,在电加热作用下,由于电热带直接铺设于二次衬砌表面,二次衬砌表面温度呈波浪型分布,隧道初支表面与围岩表面的温度变化相对平稳。大部分区域内,二次衬砌表面温度最大,初支表面次之,围岩表面温度最小,在拱脚区域,逐渐显现出相反顺序,反映了沿隧道环向电加热作用减弱而周围地温影响增强的趋势。同时由二次衬砌表面温度3D曲面图可以发现,在衬砌两端存在边界条件的影响,二次衬砌表面温度沿纵向方向上,自衬砌段两端向中间逐渐升高。

图9为不同电热带埋置深度下二次衬砌表面与内部温度曲线。由此可知,不同电热带埋置深度下二次衬砌最高温均在电热带所在表面附近处,四种工况下温度最高值依次为13.542℃、13.247℃、13.119℃、13.024℃。由于热传导距离的差异,二次衬砌表面温度与电热带埋置深度成负相关,二次衬砌内部温度与电热带埋置深度成正相关。在距表面约15 cm后便趋于一致,可见电热带埋置深度对二次衬砌内部温度的影响作用有限。

4.3 不同电热带表面保温层厚度

在原模型基础上,改变保温层厚度,分为

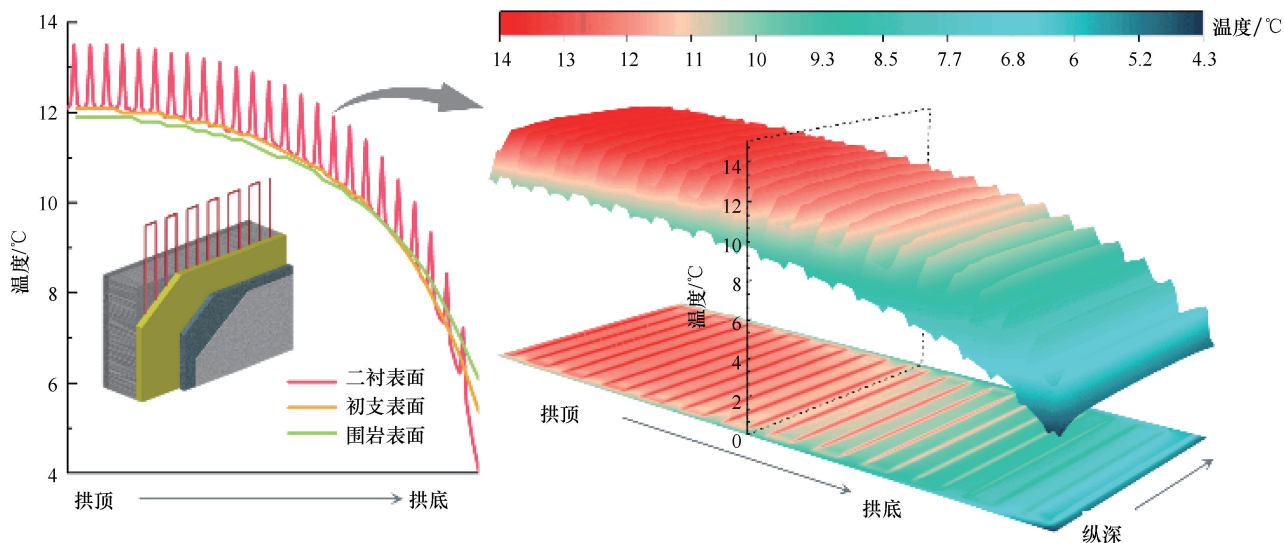


图8 电加热系统铺设于二次衬砌表面各结构温度分布特征

Fig. 8 Structure temperature distribution characteristics

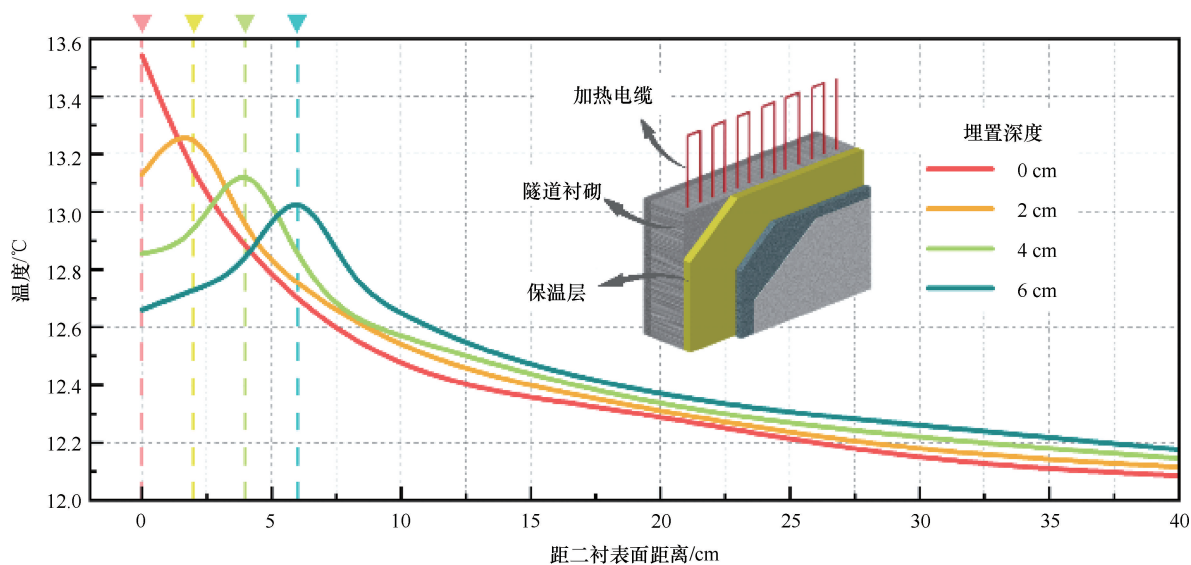


图9 不同电热带埋置深度下二次衬砌表面与内部温度曲线

Fig. 9 Surface and internal temperature curves at different burial depths of electric heating tapes

$h = 3 \text{ cm}$ 、 5 cm 、 7 cm 、 10 cm 、及 13 cm 共五个工况, 取洞口一衬砌段为例, 提取不同厚度保温层覆盖电加热系统情况下隧道初期支护、二次衬砌与保温隔热层的温度云图, 如图 10 所示。

图 10 表现出随着覆盖加热电缆的保温层厚度逐渐增大, 隧道衬砌吸收的热量更多, 加热效果更好。相较于保温层, 隧道初期支护与二次衬砌的温度则具有明显的整体上升趋势, 除拱底位置外, 隧道混凝土结构均处于正温范围, 说明保温层可以有效隔绝隧道洞内寒冷环境。

图 11 为不同保温隔热措施下衬砌温度变化。单独使用电加热系统不能有效提高衬砌温度, 增加保温

层后衬砌温度有明显的提升。以保温层厚度 5 cm 为例, 复合电加热技术下温度上升 $33 \text{ }^\circ\text{C}$, 其中保温层单独作用温度上升 $13 \text{ }^\circ\text{C}$, 贡献度为 39.4% 。当电热带表面覆盖的保温层厚度达到 5 cm 后, 其保温防冻增效明显下降。单独使用电加热系统损耗较大, 电加热系统需要配套使用适当厚度保温层。

4.4 不同电热带工作时间

针对电加热系统开启时间, 设定电加热总工作时间为冬季 (90 d), 并以冬季开始时间点为基准, 分为延后 15 d 、提前 0 d 、提前 7.5 d 、提前 15 d 、提前 22.5 d 以及提前 30 d 共六种工况。选取衬砌最低温节点 ($1\ 825$) 为特征点, 绘制得到各工况下该衬砌

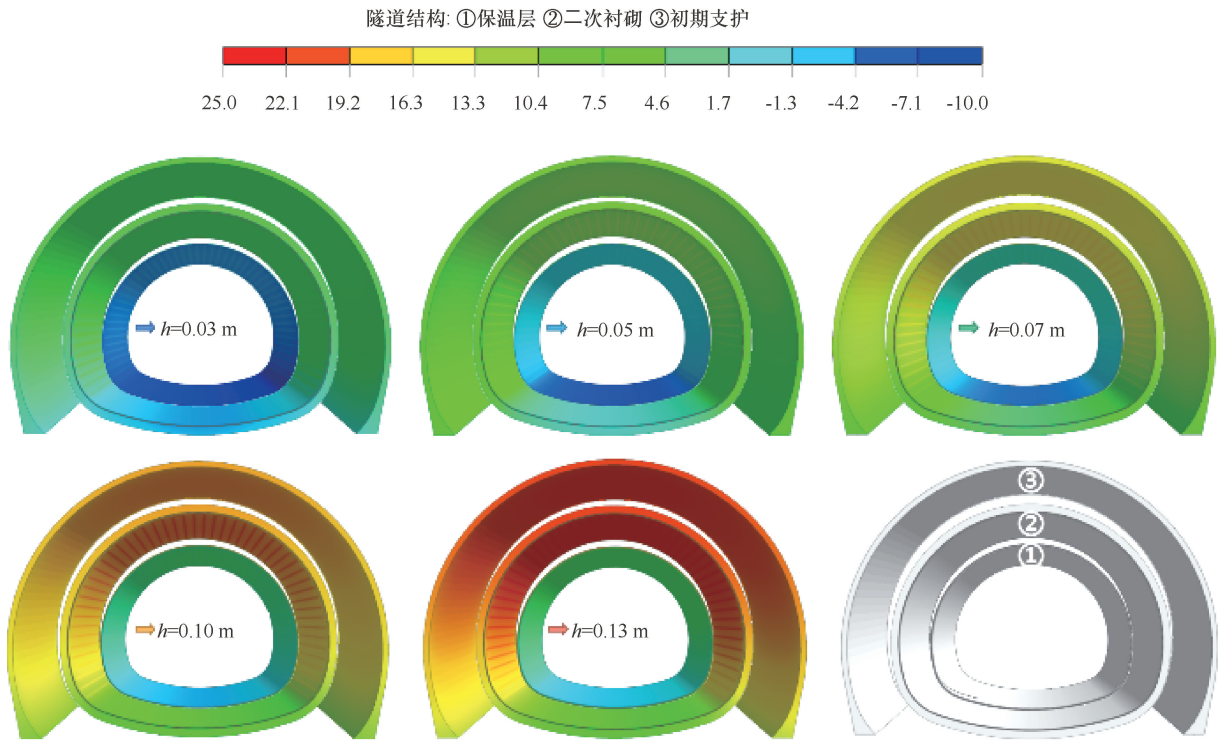


图 10 不同电热带表面保温层厚度下隧道结构温度云图(单位:℃)

Fig. 10 Temperature cloud of tunnel structure with different thickness of insulation layer on the surface of electric heat tape (Unit:℃)

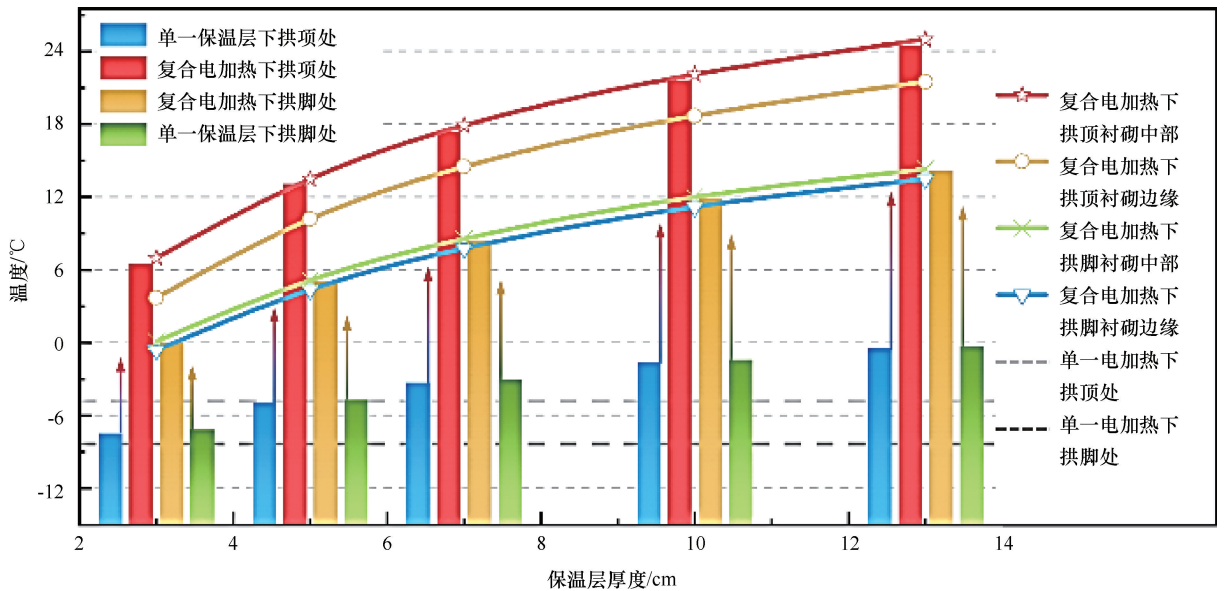


图 11 不同保温隔热措施下衬砌温度变化

Fig. 11 Variation of lining temperature under different thermal insulation measures

内壁处温度随时间变化曲线, 如图 12 所示。

图 12 反映了电加热主动保温防冻系统需要一定的预热时间。延后 15 d 到提前 7.5 d 工况下, 衬砌温度曲线会出现低于 0℃, 热量不足以维持隧道衬砌结构正温; 提前 22.5 d 到提前 30 d 工况下, 衬砌温度曲线则与 0℃ 线相离, 提供的热量有余; 在提前 15 d

工况下, 衬砌温度曲线基本恰好与 0℃ 线相切, 电加热系统产生的热量得到充分利用, 故建议高寒隧道电加热系统开启时间为提前 15 d 左右。

同时由图 12 可知, 在电加热关闭后, 即当洞内环境温度逐渐回暖时, 衬砌温度亦有一定程度的提升, 表明了前期工作时间内电加热系统产生了不必要

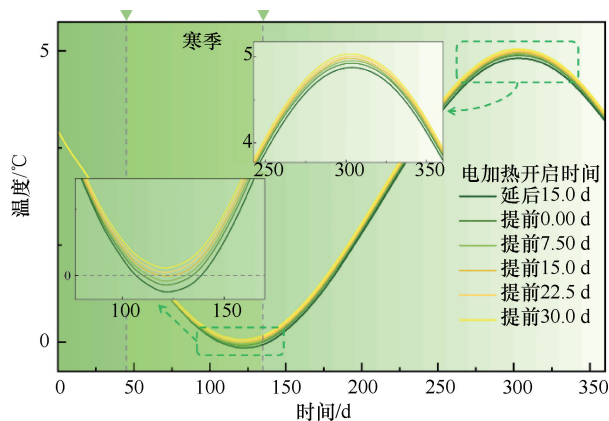


图 12 不同电加热开启时间下衬砌温度变化

Fig. 12 Variation of lining temperature with different electric heating on time

的热量浪费。为节省支出,应在冬季结束前适当提前关闭电加热系统。出于经济性与安全性考虑,建议高寒隧道电加热系统关闭时间为冬季结束前 23 d 左右。

综合上述分析,确定电加热系统最佳作用时间为冬季开始前 15 d 至最冷月后 7 d,共计约 82 d。为验证该电加热系统工作时间合理性,绘制如图 13 所示的隧道衬砌温度随时间变化曲线与各阶段对应温度云图,图中阴影部分为冬季时期,虚线间区域为电加热工作阶段。

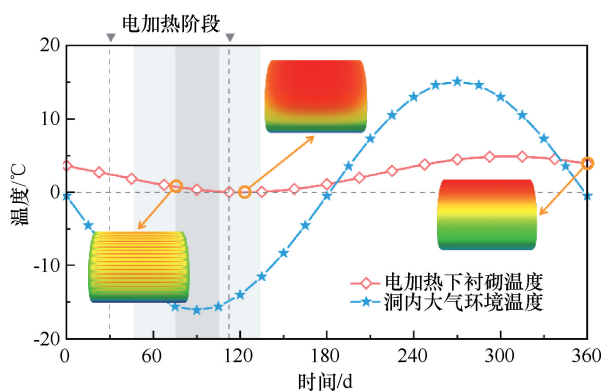


图 13 最佳电加热工作时间内衬砌温度变化

Fig. 13 Change in lining temperature at optimum electric heating operating time

图 13 对比了电加热开启前、工作中与关闭后三个阶段内衬砌温度与隧道洞内大气温度。相较于洞内大气温度,隧道衬砌温度变化具有滞后性,即使电加热工作时间提前于冬季时期,隧道衬砌滞后大气约 30 d 后达到最低温度。同时观察云图可知,在电加热工作时期,加热电缆布设位置的温度提升较快;在电加热系统关闭后,隧道衬砌温度在纵向上逐渐分布均衡,在环向上统一表现出由拱顶至拱底逐渐减小的

规律。

5 结论

为解决高海拔寒区隧道工程中隧道洞口冻害问题,基于现阶段被动保温技术引入电加热主动防冻技术,并对电加热技术的效果以及电加热系统参数展开分析,得到以下结论。

(1)应用电加热前,中高损伤区间占比 90% 以上;应用电加热后,对中高损伤控制率达到 100%,有效控制了隧道衬砌损伤程度。

(2)稳态下隧道二次衬砌温度与电加热系统功率间的正线性关系,为保证隧道结构安全将温度稳定于正温范围,洞内温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电加热系统功率宜在 $130\text{ W}/\text{m}^2$ 左右。

(3)电热带铺设于隧道衬砌表面,配套使用厚度约 5 cm 的保温层效果较好,复合电加热技术中保温层防冻贡献度约 40%。

(4)为兼顾电加热技术防冻的安全性和经济性,建议类似高寒隧道工程中的电加热系统在冬季开始前半个月左右开启,持续电加热时间约 82 d。

参考文献 (References):

- [1] 魏立,周希涛. 高寒地区铁路隧道高地应力地段仰拱病害分析与处治措施:以兰渝铁路木寨岭隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40 (S2): 249-255.
WEI Li, ZHOU Xitao. Analysis and countermeasures for inverted arch diseases in high geostress section of railway tunnel in plateau and cold region: a case study on Muzhailing Tunnel of Lanzhou-Chongqing Railway [J]. Tunnel Construction, 2020, 40 (S2): 249-255.
- [2] 郑新雨. 寒区富水隧道围岩冻胀力及衬砌结构裂损演化规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
ZHENG Xinyu. Evolution Law of Lining Cracking and Frost Heaving Pressure of Water-Rich Tunnel Surrounding Rock in Cold Regions [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [3] 张力杰,穆彦虎,田毅,等. 考虑日变化过程的寒区隧道温度场解析解与现场监测研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21 (6): 2406-2416.
ZHANG Lijie, MU Yanhu, TIAN Yi, et al. Analytical solution and field observation on temperature field of cold regions tunnel with consideration of diurnal variation in air temperature [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(6): 2406-2416.
- [4] 姜海强. 寒区高铁隧道温度场演化特征及冻害防治对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
JIANG Haiqiang. Investigation on Evolution Characteristics of

- Temperature Field and Anti-freezing Measures of High-speed Railway Tunnel in Cold Regions [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [5] 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.
- [6] 王建军, 杨林霖, 杨文波, 等. 高寒地区通风竖井温度场分布规律及防冻保温研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 118-126.
WANG Jianjun, YANG Linlin, YANG Wenbo, et al. Study on the distribution pattern of temperature fields and anti-freezing and heat preservation of ventilation shafts in high-altitude and cold regions [J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(4): 118-126.
- [7] 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, 54: 32-38.
- [8] 郑波, 吴剑, 郭瑞, 等. 川西高原隧道冻害类型与防冻设计参数研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S1): 58-65.
ZHENG Bo, WU Jian, GUO Rui, et al. Study on freezing damage types and anti-freezing parameters for the tunnels in Western Sichuan Plateau [J]. Modern Tunnel Technology, 2019, 56(S1): 58-65.
- [9] 吴剑, 郑波, 方林, 等. 寒区隧道洞口保温层设防长度确定方法探讨[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(10): 81-86.
WU Jian, ZHEG Bo, FANG Lin, et al. Discussion on the methods to determine the laying length of the insulation layer at tunnel portals in cold region [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(10): 81-86.
- [10] 张生. 高寒隧道保温设计研究及热工计算方法初探[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3): 59-63.
ZHANG SHENG. Discussion on insulation design for tunnels in high-altitude and severe cold region and thermal calculation method [J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(3): 59-63.
- [11] 夏才初, 汪超, 黄文丰. 寒区隧道保温层铺设长度及衬砌防冻措施研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 100-106.
XIA Caichu, WANG Chao, HUANG Wenfeng. Laying length of tunnel thermal insulation layer and anti-freezing measures of lining in cold region [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(3): 100-106.
- [12] MA Y, XU L, SHI X. The multi-factor influence of frost resistance and prevention effect of tunnel thermal insulation layer in cold areas [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 78: 15-25.
- [13] LI Y, SUN Y, QIU J, et al. Moisture absorption characteristics and thermal insulation performance of thermal insulation materials for cold region tunnels [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117765-117765.
- [14] 熊泽琛, 王天麟, 郭红仙, 等. 基于浅层地热能的寒区隧道排水沟保温防冻可行性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 556-563.
XIONG Zechen, WANG Tianlin, GUO Hongxian, et al. Feasibility study on insulation and antifreeze of drainage ditch in cold area tunnel based on shallow geothermal energy [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 556-563.
- [15] 王仁远, 朱永全, 高焱, 等. 寒区隧道温度场模型试验及空气幕保温措施[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(3): 70-82.
WANG Renyuan, ZHU Yongquan, GAO Yan, et al. Model test of temperature field of tunnel in cold region and air curtain insulation measures [J]. China Railway Science, 2021, 42(3): 70-82.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 严健. 高海拔寒区特长公路隧道冻胀特性及防冻研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
YAN Jian. Study on the Frost Heaving Characteristics and Anti-freezing for Extra-long Highway Tunnel in High-altitude Cold Region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [19] 高焱, 朱永全, 董宇苍. 寒区隧道冻胀力模型试验及围岩注浆效果研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 95-99.
GAO Yan, ZHU Yongquan, DONG Yucang. Frost-heaving force model tests of tunnel in cold region and study on grouting effect on surrounding rock [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(2): 95-99.
- [20] 张弛. 寒区铁路隧道衬砌抗冻主要设计标准与施工技术探讨[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(3): 185-191.
ZHANG Chi. Discussion on main design standards and construction techniques for frost-resistance of railway tunnel linings in cold regions [J]. Railway Standard Design, 2024, 68(3): 185-191.
- [21] 马志富, 杨昌贤. 寒区隧道抗防冻设计标准研究[J]. 隧道建设

(中英文), 2021, 41(11): 1931-1942.

MA Zhifu, YANG Changxian. Design standards for anti-freezing of tunnels in cold regions [J]. Tunnel Construction, 2021. 41(11): 1931-1942.

[22] 管数园. 电缆加热系统进行融雪的数值分析研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

GUAN Qiyuan. A Simulation Study of Electric Cable Heating System Used in De-snowing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.

[23] DRAGAN C, ALEKSANDAR N. The impact of heat source at radiant electric heating panel [J]. Energy Buildings, 2021, 239(15): 110843.

[24] 李葳. 东北寒区铁路隧道防寒抗冻措施研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2022.

LI Wei. Study on Cold and Frost Proof Measures of Railway Tunnel in Northeast Cold Area [D]. Beijing: China Academy of Railway Science, 2022.

[25] 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.

YU Jianyou, JIANG Yifan, LIN Ming, et al. Calculation method of tunnel insulation layer thickness in seasonal cold zone [J]. Science, Technology and Engineering, 2022, 22(36): 16219-16228.

[26] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.

(责任编辑 王璐)