

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0042

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. [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.]

季节性寒区隧道温度场数值分析

杜耀辉^{1,2}, 杨晓华¹, 晏长根¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为解决寒区隧道冻害问题, 以祁连山某隧道为依托, 采用 ANSYS 对铺设保温层与主动辅热相结合的隧道温度场进行了数值模拟, 研究了保温层对隧道衬砌的保温效果以及安装电伴热系统后隧道的温度场分布规律, 确定了电伴热系统的开启与关闭时间及正常运行功率。结果表明: 围岩最大冻深月份比外界大气的最冷时间推迟一个月左右; 在隧道大约运行 5 a 之后, 保温层的保温效果开始衰退, 围岩重新出现负温状态; 安装电伴热系统能彻底解决寒区隧道运营期间的冻害问题, 最佳发热功率为 $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 持续加热时间为 80 d, 年消耗电能为 $10\,000 \text{ W} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-2}$, 数值模拟结果与理论计算结果吻合良好。研究成果可为寒区隧道的保温防冻提供理论依据, 并可为类似工程提供借鉴。

关键词: 季节性寒区隧道; 保温防冻; 数值模拟; 主动辅热; 温度场

中图分类号: P **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2017)02-0366-09

0 引言

随着我国基础设施建设的不断发展和西部大开发政策的大力推进, 为了更好地优化及完善公路交通网, 穿越高海拔、严寒山区的隧道不断增多。众所周知, 寒区隧道的修筑要比一般隧道复杂的多, 由于夏季-冬季的轮回交替, 隧道内温度将会出现正负交替的情况, 使得围岩不断循环着非冻结-冻结-融化的过程, 导致一系列不同程度的冻害问题。从我国在东北和西北已修建的大部分寒区隧道的运营情况来看, 因为冻害的缘故, 隧道的使用功能被大大地削弱, 很多隧道的年运营时间较短, 有些甚至完全报废。因此, 要解决季节性寒区隧道的修筑技术及长期运营管理问题, 就必须对寒区隧道围岩的温度场进行分析, 以确定防冻措施^[1-4]。

张学富等^[5]根据传热学和渗流力学的基本理论, 研究了冻土渗流场和温度场的耦合问题, 结果表明渗流场对隧道围岩的温度场影响较大, 在寒区隧道工程设计时不能忽略。谭贤君等^[6]考虑隧道通风的影响, 采用数值分析方法探讨了西藏嘎隆拉

隧道通风条件下围岩温度场的变化规律及其防寒保温措施。叶朝良等^[7]采用 ABAQUS 有限元建立计算模型, 讨论了寒区隧道贯通前后保温层厚度对温度场的影响, 得到了保温段长度的具体数值。谢红强等^[2]结合寒区公路隧道气候特点, 采用相变温度场有限元模型, 对不同材料及厚度保温材料性能进行了对比分析, 并结合现场跟踪测试手段, 确定了合适的保温层材料。霍润科等^[8]结合哈尔滨天恒山公路隧道现场监测数据, 提出考虑相变的平面瞬态温度场计算模型, 利用有限元软件对隧道温度场进行了数值模拟。张广龙^[9]以图珲高速东南里隧道为依托, 利用有限元软件对隧道温度场和加保温层及电伴热系统的温度场进行了模拟, 给出了电伴热系统的设防长度建议值。杨建德等^[10]基于榆高线中设置的水消防系统, 阐述了管道电伴热技术在高速公路隧道消防系统中的应用方案。张国柱等^[11]将地源热泵型供热系统应用于内蒙古博牙高速林场隧道中, 并根据现场监测数据进行参数反演, 获得了林场隧道围岩的综合热物性参数。

对于季节性寒区隧道而言, 仅采用铺设保温层

收稿日期: 2016-12-11; 修订日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(41272285)资助

作者简介: 杜耀辉(1981-), 男, 甘肃榆中人, 高级工程师, 2008年在长安大学获硕士学位, 现为长安大学在读博士研究生, 从事岩土工程方面的研究及高速公路建设管理工作。E-mail: 360489245@qq.com.

的方式一般难以防止隧道冻害的发生, 大多情况下需要对隧道进行主动辅热。然而, 目前针对寒区隧道主动辅热方法的研究相对较少, 对于寒区隧道主动加热保温时衬砌温度场的研究还相对不足。鉴于此, 本文以祁连山某隧道为工程依托, 采用铺设保温层与主动辅热相结合的防冻措施, 运用 ANSYS 有限元软件中 PLANE55 分析单元进行数值计算分析, 选取典型断面进行温度场研究, 对比分析安装电伴热系统前后的保温效果, 并确定电伴热系统合理的启动和关闭时间以及正常运行的功率。研究成果可为寒区隧道保温防冻提供理论依据, 也可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

隧址区位于祁连山高寒亚干旱区, 海拔高程约 2 567 ~ 3 137 m。隧道右线全长 6 868 m, 起讫里程桩号 YK2397 + 352 ~ YK2404 + 220, 纵坡 2.544% ~ -2.10%, 隧道最大埋深 470 m, 属深埋特长隧道。

该区地貌类型属中高山岭谷地貌区, 沟谷深切呈“V”型谷, 山势陡峻, 相对高差大。年最低气温 -24 °C, 最高气温达 35 °C, 平均气温 12.4 °C。冰冻期为 11 月 - 次年 3 月。隧道进出口段分布有 1.5 ~ 2 m 左右厚的饱冰冻土外, 其余为少冰段。

2 保温层温度场数值模拟

2.1 隔热保温材料及其热传导原理

2.1.1 保温材料

寒区隧道为了保持围岩的原始热状况, 防止因冻胀和融沉而发生破坏, 大多采用铺设保温材料的方法^[12]。常见的隧道保温材料的主要技术指标如表 1 所示^[13]。

众所周知, 隧道作为一个相对密闭的工程, 在发生火灾时, 会对社会以及个人财产造成巨大损失, 对保温材料的阻燃性(可燃性)要求较高, 因此, 保温材料的可燃性是必须考虑的重要因素。从表 1 中不同保温材料的技术指标比选中可以看出,

表 1 保温隔热材料的性能指标

Table 1 Performance indicators of the insulating materials

性能	酚醛泡沫	聚氨酯	聚苯乙烯	聚乙烯	橡塑	岩棉	玻璃棉
密度/(kg · m ⁻³)	41 ~ 100	25 ~ 40	30	22 ~ 30	80 ~ 150	100	60
耐热/°C	190	90 ~ 120	70	60 ~ 70	106	500	300
耐冷/°C	-180	-110	-80	-	-40	-60	-60
导热系数/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	0.02 ~ 0.033	0.022 ~ 0.036	0.033 ~ 0.04	0.029 ~ 0.035	0.031 ~ 0.036	0.033 ~ 0.064	0.03 ~ 0.042
可燃性	难燃	助燃	易燃	易燃	易燃	燃	燃
燃烧气体毒性	无毒	毒	毒	无毒	毒	-	-
抗老化性	最好	差	差	差	良	好	好
抗化学溶剂性能	好	好	好	好	良	好	好
吸水率/(kg · m ⁻³)	0.02	0.03	0.2	0.02	0.3	<2	<2
抗压强度/MPa	0.216	0.127	0.107	0.033	0.03	0.107	0.107

酚醛泡沫更加适合作为隧道保温材料。

2.1.2 保温处理方式

参考相关调研资料及现场实测围岩及结构温度结果, 为保证隧道背部不发生冻结, 偏于安全控制, 设计中以防冻保温层背部(即二次衬砌的表面处)的温度 ≥ 0 °C 作为防冻措施选取的控制要求。目前, 敷设隔热保温材料普遍方式有两种: 一种是敷设在初期支护与二次衬砌之间, 另一种是直接敷设在二衬的表面上。从结构的安全和耐久性上来看, 选取第二种敷设方式更为合理、可靠。同时, 为了防止季节性寒区隧道在其使用年限内发生冻害, 在保温层和二衬之间安装电伴热系统, 见

图 1^[14]。

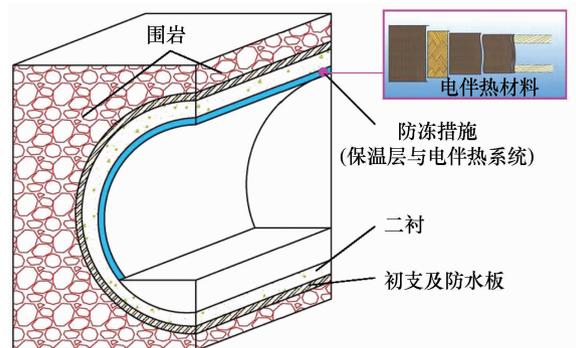


图 1 保温结构示意图

Fig. 1 Sketch showing the insulation structure

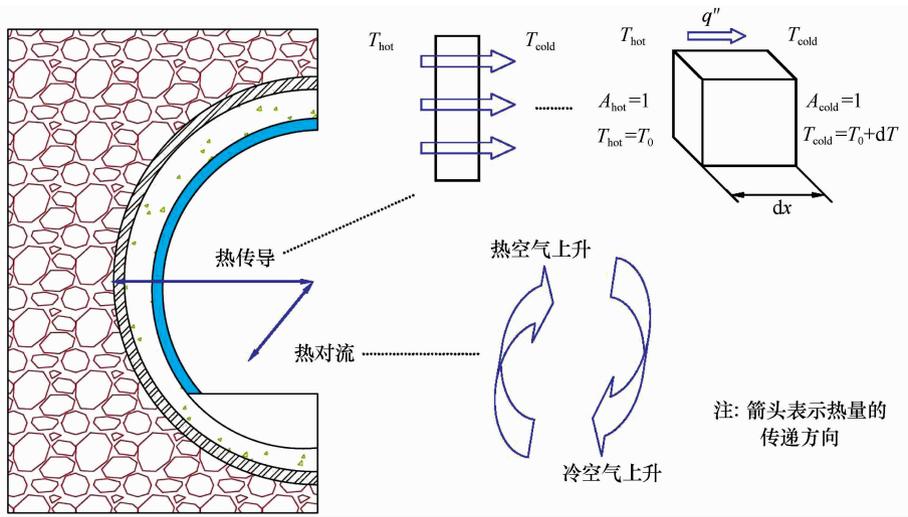


图2 寒区隧道热传导原理简图

Fig. 2 The heat conduction principle of tunnel in cold region

2.1.3 热传导原理

当隧道开挖完成后,冷空气在隧道内流通时将与之发生热量交换,分为两个过程,一是洞口附近气体与固体之间的对流换热过程,二是隧道内固体与固体之间的热传导过程。如图2所示。

电伴热系统和保温层共同承担隧道整体结构的保温效应,电伴热系统起主动保温的作用,而保温层起被动保温的作用。电伴热系统发热功率的理论值由以下公式确定。

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{1}$$

$$Q_2 = Q - Q_1 = \frac{\Delta T}{\frac{1}{\lambda_1 \ln(r_0 + d/r_0)} - \frac{\Delta T}{\lambda_2 \ln(r_0 + c/r_0) + \frac{1}{\lambda_3 \ln(r_0 + c + \delta/r_0 + c)}}} \tag{2}$$

式中: λ_1 为围岩的导热系数; λ_2 为衬砌混凝土的导热系数; λ_3 为防冻隔温层的导热系数; r_0 为隧道的当量半径; d 为围岩的当量厚度(围岩最大冻结深度); δ 为防冻隔温层的厚度^[9]。 Q 表示隧道整体结构与外界气温进行热交换的总热流量; Q_1 表示经由保温层及衬砌传递的热流量; 可以通过最大冻深当量换算法或数值计算等方法得出; Q_2 表示由电伴热系统中电缆发热所产生的总热量。

2.2 基本假定

(1) 为了便于分析、获得隧道围岩传热的解析解,隧道内轮廓断面近视为圆形;(2) 认为隧道衬砌各层之间完全接触,可忽略接触热阻;(3) 隧道围岩具有相同的初始温度,即地层温度;(4) 认为隧道内气体的流速保持恒定。考虑到隧道本身的结

构特点,将隧道传热等效为一维圆筒壁热传导问题。

2.3 模型建立

依据隧道断面的实际尺寸建立隧道模型,保温层以及衬砌厚度参照隧道洞口段设计值。由于隧道横断面的对称性,取其左半部分进行研究分析,隧道内轮廓半径取 5 m,保温层选用耐火型酚醛泡沫材料,厚度取 0.05 m,衬砌(初支与二衬)厚度取 0.8 m。模型见图3^[15-16]。

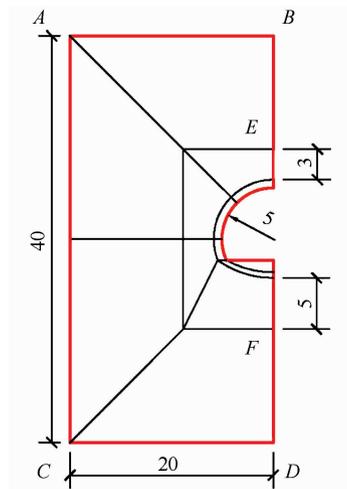


图3 隧道模型尺寸简图(单位: m)

Fig. 3 A dimensional sketch of the tunnel (units: m)

采用 ANSYS 有限元软件中的 PLANE55 二维热实体单元建模,该单元具有四个节点,每个节点只有一个温度自由度,如图4所示。可用于二维稳态、瞬态热分析。图5为隧道网格划分模型,整个模型由 3 162 个节点、2 596 个单元组成。

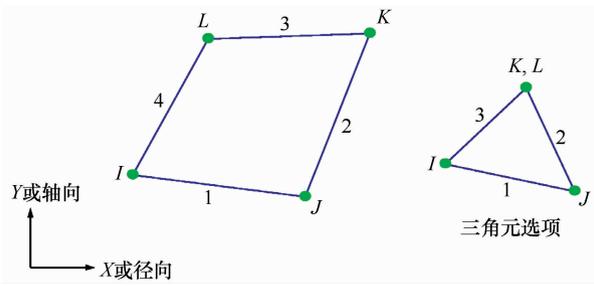


图4 PLANE55 单元

Fig. 4 The units of the PLANE55

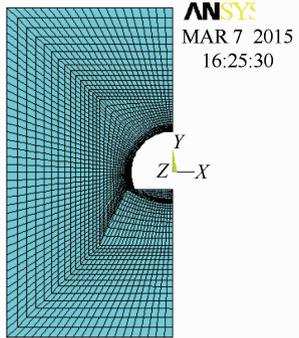


图5 有限元网格划分

Fig. 5 The finite element mesh

2.4 计算参数及边界条件

隧道模型的内边界为对流换热边界，考虑最不利荷载条件，洞内大气温度选取隧道进口洞外大气温度曲线对应值，对流换热系数取为 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [3,17]。由隧道大气温度实测结果可知，大气温度在一年中按正(余)弦曲线变化，且在半月的时间内温度变化较小，因此在数值模拟过程中，隧道内壁对流换热按式(3)计算出的温度进行阶跃式加载。

$$T_i = -1.77 + 15.23 \times \sin\left(\frac{2\pi \times t}{24} + \pi\right) \quad (3)$$

式中： t 为时间，单位为半个月(15 d)。

在数值计算时，一年分为24步，每步时间为半个月(15 d)，总时间确定为50 a，对应的总步数为1 200步。每2 d为一时间子步，最小时间子步为1 d，最大为时间子步4 d。模型上下边界和左边界条件为恒温边界，其温度值以及模型的初始温度取

表2 介质的热物理参数

Table 2 Thermal physical parameters of the mediums

材料	热传导系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	重量比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
衬砌混凝土	2.650	970	2 400
围岩	1.160	1 293	2 544
酚醛泡沫	0.030	1 756	41

当地地温为 $7 \text{ }^\circ\text{C}$ ，模型的右边界为绝热边界。

3 温度场分析

3.1 围岩最大冻深月份确定

围岩温度监测数据表明，围岩内部温度值的变化情况较外界大气温度变化稍有迟缓，即在外界气温最冷时，处于同一深度围岩温度不一定达到最低值，也就是说，外界气温最冷的月份并非围岩冻深最大的月份。这是由于热量传递并非瞬间发生，其过程要经历相应的时间。因此确定围岩冻深最大的月份，对研究围岩最不利温度场意义重大。

(1) 温度场分布云图分析

由于隧道围岩温度与外界大气温度相同，都呈周期性变化，因此仅需模拟加载第一年内隧道围岩温度场变化情况，而一年内，隧道围岩冻深最大的时刻，应该处于外界大气由最低温度回升的过程中。因而提取第一年外界大气温度最低月份(第6步)以及其后1个月(第8步)的围岩温度场数值模拟结果，其温度模拟云图见图6与图7。

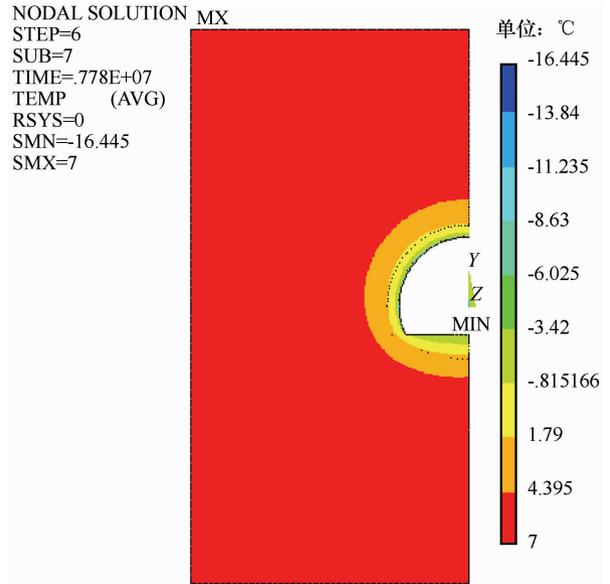


图6 第一年最冷月

Fig. 6 The cloud of temperature simulation in the coldest month of the first year

对比图6和图7两幅云图可以看出，虽然外界大气温度已经开始回升，但是由于隧道内气体温度仍然低于围岩温度，因此热量仍然继续由围岩向隧道内气体扩散，冻结线继续沿隧道径向向围岩内部传递；而再次提取第9步数值模拟云图，结果发现围岩温度开始回升，因此确定围岩最大冻结深度发生在外界气温达到最低温度后一月左右。此结论与

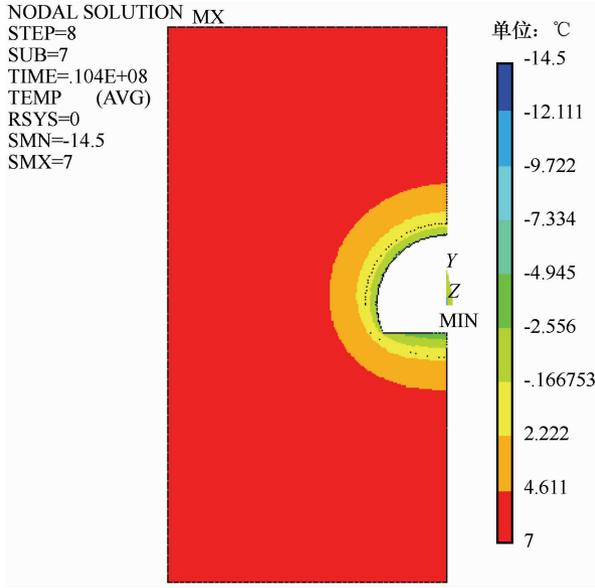


图7 第一年最冷月后一月

Fig. 7 The cloud of temperature simulation in a month after the coldest month of the first year

围岩径向温度实测值相符。

3.2 运营期围岩温度场分析

为了保证每年最冷月份后的一个月隧道衬砌背后围岩温度值 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，将每年该时刻隧道衬砌背后温度值作为控制条件，对每年此时隧道衬砌和围岩的温度场进行进一步研究。考虑到对流换热条件中温度加载函数的特点，第一年该时刻对应于ANSYS数值模拟计算中的第8步，第 n 年的该时刻对应于数值计算中的第 $24(n-1)+8$ 步。

为了精确地确定二衬背后温度下降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的时间，分别提取第1 a、第3 a、第5 a沿隧道径向各节点温度，提取时由于围岩深处温度变化较小，考虑到曲线图显示结果的清晰性，因此选取节点路

径时仅选取距离隧道内壁2.5 m深度左右，该路径对应于节点1 544至节点255所确定的沿隧道径向的线段。路径示意图见图8，该路径上温度变化曲线见图9^[18]。

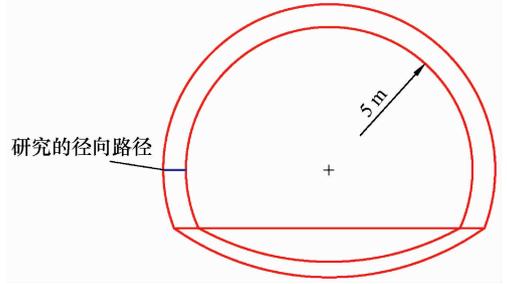


图8 沿围岩径向路径示意图

Fig. 8 The studying radial path of surrounding rock

由图9(a)和图9(b)可以看出，温度变化曲线由三段组成，保温层中温度变化曲线斜率远大于其他两者，进一步验证保温层的在寒区隧道中的显著保温效果；在温度加载第3 a，衬砌背后温度以降至 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，其后在第5 a其温度至 $-0.102\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，这并未考虑保温层老化和破损的因素，即实际中，同一时刻同一位置的温度只会较数值模拟结果中温度值更低，显然，对于该隧道而言，仅仅依靠保温层并不能保证隧道不发生冻害。

4 安装电伴热系统后温度场分析

4.1 考虑热源的边界条件

计算模型与前述模型相同，边界条件取值如下：隧道模型内边界为对流换热边界，洞内气体温度仍按式(3)取值，其对流换热系数仍取 $15\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，模型上下边界以及左边界为恒温边界，其温度值以及模型的初始温度取当地地温 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，模型的

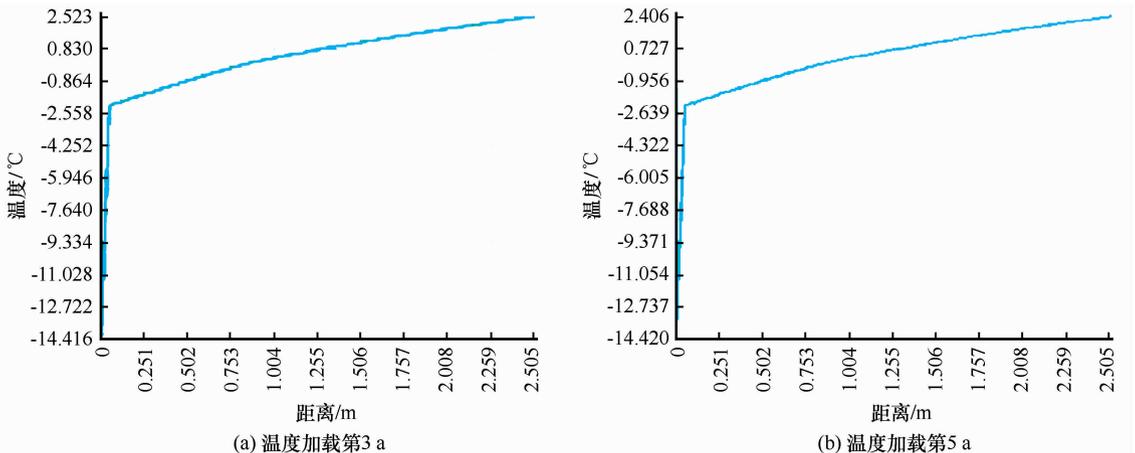


图9 沿隧道径向温度变化曲线

Fig. 9 Simulated temperature changing changes along the tunnel radial direction in the third year (a) and the fifth year (b)

右边界为绝热边界, 由于在保温层和衬砌之间安装电伴热系统, 因此数值模拟时要考虑热生成率的加载。

4.2 模拟过程与结果分析

考虑到我国自然资源的日益减少, 低碳环保成为当前所倡导的生活理念, 因此如何使主动供热系统更加节能, 是使该系统能够广泛应用于季节性寒区隧道的必要前提。主动供热系统的作用是补充围岩在与外界大气发生相互热交换时所损失的热量, 由于外界大气温度变化具有周期性, 因此理想状态下, 围岩年损失热量应该为一定值, 实际中可能稍有出入, 但影响不大。因此如何既能使该系统所发出的热量充分利用, 又能保证衬砌背后围岩温度 $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 需要进一步讨论。

如何确定主动供热系统的开启时间和关闭时间, 这对工程应用十分重要。先对未安装主动供热系统时围岩温度场进行模拟, 并提取第 50 a 时, 隧

道围岩沿径向温度最不利变化情况, 以及衬砌背后 (节点 232) 温度、大气温度随时间变化情况, 分别见图 10 和图 11^[19]。

由图 10 可以看出, 在第 50 a, 衬砌背后温度与隧道内壁温度差值为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即当外界大气温度在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时, 衬砌背后温度值处于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 能够保证隧道不发生冻害。由图 11 可以看出, 当外界大气温度下降至 $-12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 节点 232 温度下降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其后温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 当外界大气温度回升至 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时, 节点 232 温度值回升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其后温度 $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对应的时间分别为第 50 d 至第 190 d, 但是考虑到主动供热系统需要一定的预热时间, 因此主动供热系统开启时间应该为外界温度首次下降至 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时刻, 其关闭时间可确定为外界温度回升至 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 (多次数值模拟的结果), 其对应的时间分别为第 50 d 和第 140 d, 因此大致确定该系统工作时间约为 90 d。

若加热时间由第 50 d 持续至 140 d, 则加热功率可由式 (2) 确定, 计算得其最大加热功率约为 $130\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此当加热时间为 90 d, 选取加热功率为 130、125、120、115 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 4 种不同工况进行模拟, 并提取衬砌背后第 50 a 的温度值, 绘制温度时间曲线见图 12。

由图 12 可知, 当主动供热系统安装于隧道深埋段, 系统开启时间为一年中日均温度首次降低至 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 关闭时间为外界温度回升至 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 时间约为 90 d, 此时系统的加热功率最低为 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 若高于 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 会产生不必要的浪费, 若低于 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 则会导致衬砌背后围岩温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 进而发生冻胀, 因此, 系统发热功率可选为 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。此时, 系统一年消耗电能为 $10\ 800\text{ W}\cdot\text{d}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

进一步分析图 12(c), 发现系统开启加热的时间较早, 经济性欠佳。为确定系统的最佳开启时间, 在原来开启时间基础上向后延迟 5 d、10 d, 关闭时间不变, 发热功率选取 $125\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 进行此两种工况的数值模拟, 模拟结果见图 13。如图 13(b) 所示, 当发热功率为 $125\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 系统工作时间为 80 d (开启时间延迟 10 d) 时, 衬砌背后节点 232 温度基本全部与 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线相切, 能够更加充分利用该系统所发出的热量。此时系统一年消耗电能为 $10\ 000\text{ W}\cdot\text{d}\cdot\text{m}^{-2}$, 小于系统加热功率为 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 开启时间 90 d 时的年消耗电能。另外, 发热功率为 $125\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 加热时间为 80 d 数值计算结

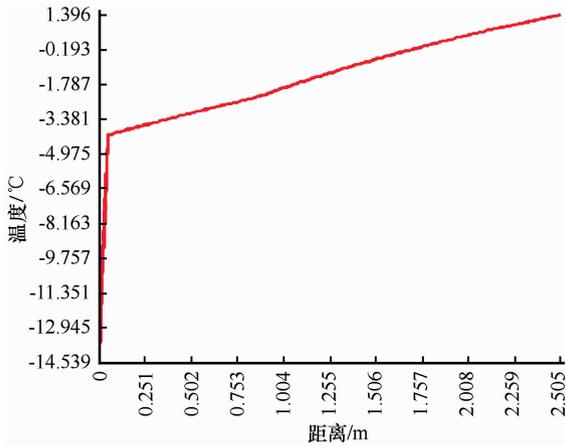


图 10 第 50 a 隧道围岩沿径向变化曲线

Fig. 10 Simulated temperature changing along the tunnel radial direction in the fiftieth year

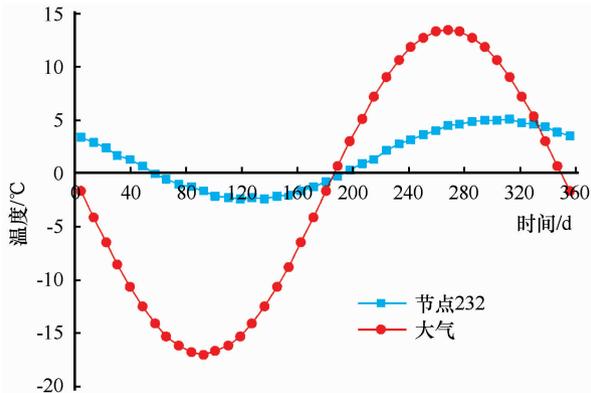


图 11 第 50 a 节点 232 及大气温度随时间变化曲线

Fig. 11 Simulated daily variations of temperature at Node 232 and surrounding temperature in the fiftieth year

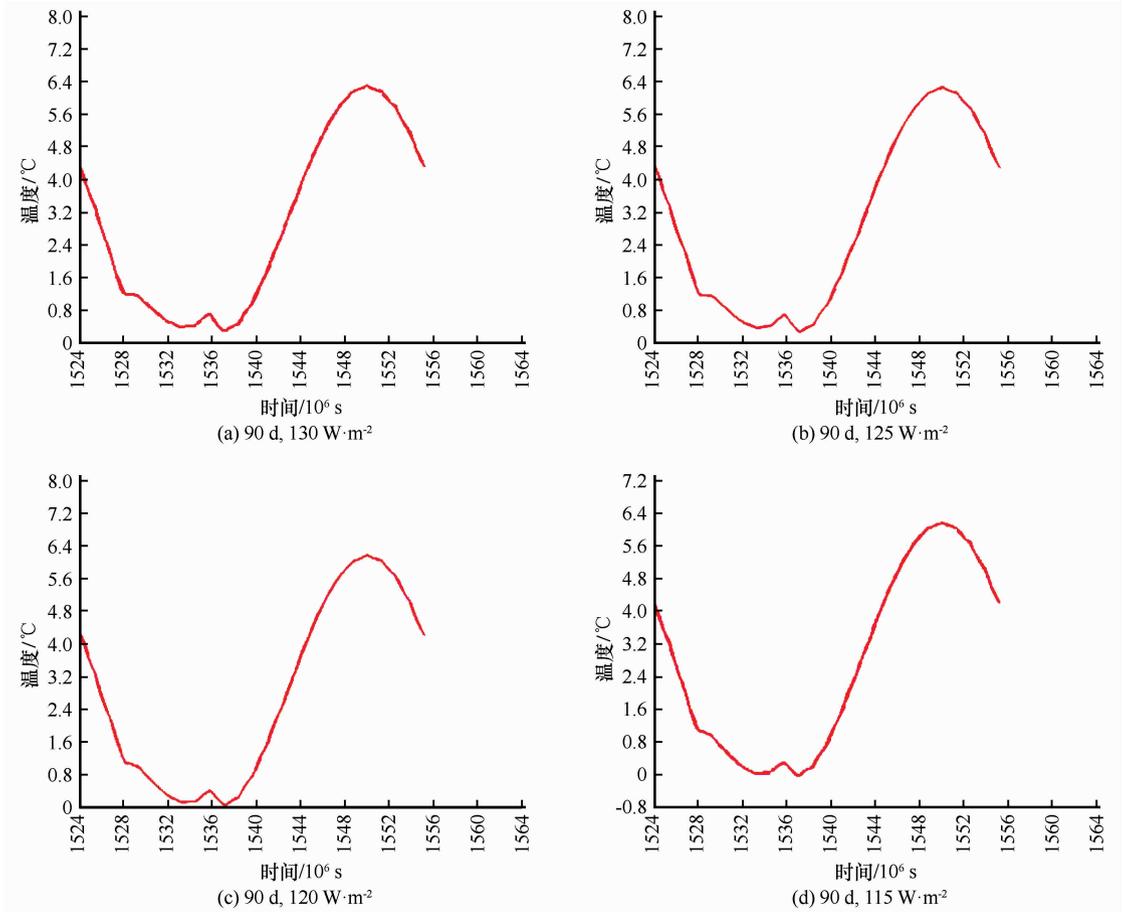


图 12 不同工况对比

Fig. 12 Simulated temperature changing with time for 90 d heating with heating power of 130 (a), 125 (b), 120 (c) and 115 (d)

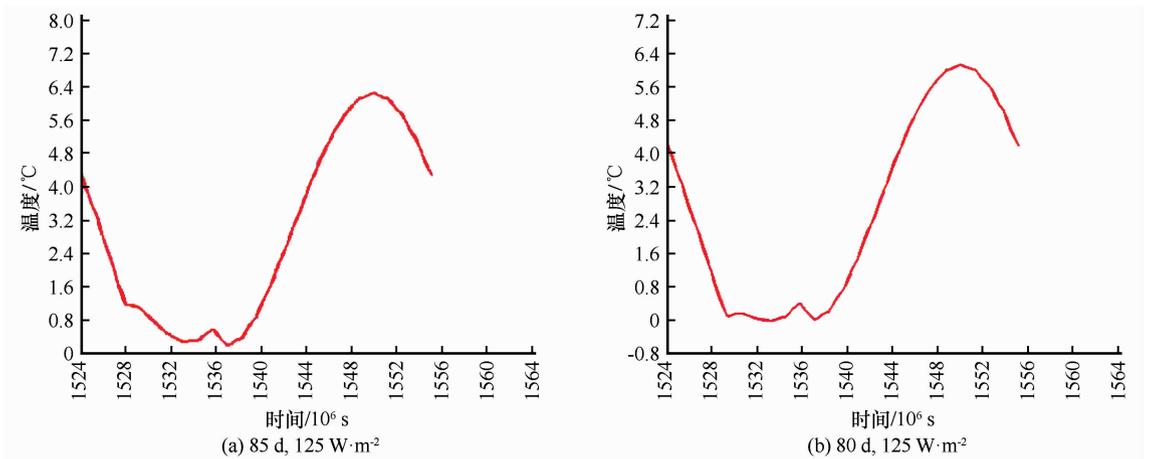


图 13 开启时间长短对比

Fig. 13 Simulated temperature changing with time with heating power of $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (b) for 85 d (a) and 80 d (b)

果与式(2)所得理论值 $11\ 889 \text{ W} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-2}$ 差异较小, 理论计算与数值模拟计算结果吻合良好。但理论计算中忽略了对流换热热阻的作用, 理论计算值偏于保守。

综上所述, 结合隧址附近祁连山气温状况, 隧道电伴热系统开启时间为气温降到 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ 之后的

10 d 左右, 持续时间大约 80 d, 期间发热功率恒定, 为 $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

5 结论

(1) 隧道围岩最大冻深并非发生于每年外界大气温度达到最低值的时刻, 而是在后一个月左右,

表明在外界大气温度由最低值开始回升的一段时间, 围岩内热量仍然继续向外界传递。

(2) 对于季节性寒区深埋段隧道, 仅仅铺设保温层, 隧道衬砌背后围岩年最低温度在 5 ~ 10 a 内将逐渐降低至 0 °C 以下, 直至隧道衬砌在冻胀作用下发生破坏; 安装电伴热系统后, 隧道使用年限内衬砌背后围岩年最低温度 > 0 °C, 隧道防冻效果显著。

(3) 电伴热系统工作的时间以及发热功率可以根据外界的气温变化进行的调节。对于与文中依托工程类似的隧道, 最佳发热功率为 125 W · m⁻², 系统开启时间为外界气温降到 -12 °C 之后 10 d 左右, 持续加热时间为 80 d, 模拟结果与理论值吻合良好。

(4) 对于寒区隧道浅埋段(以埋深为 10 m 为例), 若采用铺设保温层结合电伴热系统的防冻措施, 需要的发热功率更大, 加热时间也 longer, 损耗的能量远远大于隧道深埋段。而且随着埋深减小, 所需热量增加, 后期运营费用较高, 因此, 隧道浅埋段电伴热系统适用性较差。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Xuefu, Su Xinmin, Lai Yuanming, et al. Analyzing the effect of tunneling on temperature of permafrost in the Kunlun Mountains, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 621 - 627. [张学富, 苏新民, 赖远明, 等. 昆仑山多年冻土隧道施工温度影响分析[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 621 - 627.]
- [2] Xie Hongqiang, He Chuan, Li Yonglin, et al. 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. [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(S2): 4395 - 4401.]
- [3] Feng Qiang, Jiang Binsong. Analytical method for insulation layer thickness of highway tunnels with multilayer dielectric in cold regions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1879 - 1887. [冯强, 蒋斌松. 多层介质寒区公路隧道保温层厚度计算的一种解析方法[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1879 - 1887.]
- [4] Mao Yuncheng, Li Guoyu, Zhang Qinglong, et al. Research on the moisture and temperature variation of loess roadbed in seasonally frozen ground regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 1011 - 1016. [毛云程, 李国玉, 张青龙, 等. 季节冻土区黄土路基水分与温度变化规律研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 1011 - 1016.]
- [5] Zhang Xuefu, Yu Wenbing, Liu Zhiqiang. Three-dimensional nonlinear analysis for coupled problem of seepage field and temperature field of cold regions tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(9): 1400 - 1409. [张学富, 喻文兵, 刘志强. 寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的三维非线性分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(9): 1400 - 1409.]
- [6] 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.]
- [7] Ye Chaoliang, Song He, Mi Junfeng. Simulation analysis of optimization design for insulation layer in Houanshan Tunnel[J]. *Railway Standard Design*, 2015(6): 122 - 125. [叶朝良, 宋鹤, 米俊峰. 后安山隧道保温层优化设计仿真分析[J]. *铁道标准设计*, 2015(6): 122 - 125.]
- [8] Huo Runke, Tang Yinjing, Ning Cuiping, et al. Numerical analysis of insulating layer setting of highway tunnel in cold regions[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 45(2): 158 - 163. [霍润科, 汤寅净, 宁翠萍, 等. 寒区公路隧道保温层设置的数值分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 45(2): 158 - 163.]
- [9] Zhang Guanglong. Insulation freezing experiment and numerical simulation of cold region tunnels based on electrical heating[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. [张广龙. 基于电加热的寒区隧道保温防冻试验与数值模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.]
- [10] Yang Jiande, Tian Qin, He Xin. The application of electric heat tracing system for fire fighting pipeline in Suiyu highway tunnel[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition)*, 2012(9): 132 - 134. [杨建德, 田秦, 贺欣. 消防管道电伴热系统在榆绥高速公路隧道的应用[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2012(9): 132 - 134.]
- [11] Zhang Guozhu, Xia Caichu, Sun Meng, et al. Temperature fields analysis of absorbing section of tunnel heating system using heat pump in cold region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 3795 - 3802. [张国柱, 夏才初, 孙猛, 等. 寒区隧道地源热泵型供热系统取热段温度场解析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 3795 - 3802.]
- [12] Hou Yandong, Wu Qingbai, Sun Zhizhong, et al. The coupled reinforcing effect of crushed rock slope protection and thermosyphons in Qinghai-Tibet Railway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 118 - 125. [侯彦东, 吴青柏, 孙志忠, 等. 青藏铁路碎石护坡-热管复合措施的补强效果研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 118 - 125.]
- [13] Zhang Yaxing. Study on frost resistance, anti-freezing and drainage technology of the Galongla Tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. [张亚兴. 嘎隆拉隧道抗防冻及防排水技术的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.]
- [14] Zhang Yao, He Shusheng, Li Jingbo. Analytic solutions for the temperature fields of a circular tunnel with insulation layer in cold region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 113 - 114. [张耀, 何树生, 李靖波. 寒区有隔热层的圆形隧道温度场解析[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 113 - 116.]
- [15] Zong Xiang. Observation and analysis of the temperature field of host well tube frozen by stages[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1179 - 1183. [宗翔. 多圈管分期冻结施工法温度场现场实测与分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1179 - 1183.]

- [16] Zhang Wei, He Yuanqing, Liu Jing. Numerical analysis on the thermal regime around an anti-frost ballast subdrain within roadbed in deep seasonally frozen regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 991 - 1001. [张蔚, 何元庆, 刘婧. 深季节冻土区路基防冻胀道碎石排水盲沟热状况的数值分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 991 - 1001.]
- [17] Cao Yuanbing, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Influence of upper boundary conditions on simulated ground temperature field in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 802 - 810. [曹元兵, 盛煜, 吴吉春, 等. 上边界条件对多年冻土地温场数值模拟结果的影响分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 802 - 810.]
- [18] Chou Wenge, Sun Bing. Model test study of frost heaving pressures in tunnels excavated in fractured rock mass in cold regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 557 - 561. [仇文革, 孙兵. 寒区破碎岩体隧道冻胀力室内对比试验研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 557 - 561.]
- [19] Geng Ke. Impacts of freeze-thaw cycle on frost heaving forces on tunnel structures in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 913 - 919. [耿珂. 冻融循环对寒区隧道结构冻胀力的影响[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 913 - 919.]

Numerical analysis of tunnel temperature field in seasonal frozen regions

DU Yaohui^{1,2}, YANG Xiaohua¹, YAN Changgen¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Gansu Changda Highway Company Limited, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To completely solve the problem of freeze injury to tunnels in cold regions, taking a tunnel in the Qilian Mountains as a case, the freeze-proofing measures with insulation layer and active auxiliary-heat were numerical simulated by using ANSYS. It is revealed that the maximum frozen time of surrounding rock will be delayed by one month as compared with the outside minimum air temperature. After about 5-year operation, the effect of insulation layer will begin to decline, and the surrounding rock temperature will begin to negative again. Installing an electric heat tracing system can completely solve the problem of freeze injury to tunnel in this case, with a heating time of 80 days and a heating power of $125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. The annual consumption of electrical energy is $10\,000 \text{ W} \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-2}$. The numerical simulation results are in good agreement with the theoretical calculation. This research results can provide theoretical basis for insulation and freeze-proofing of tunnels and is useful for similar engineering in cold regions.

Key words: tunnel in seasonal frozen regions; insulation and freeze-proofing; numerical simulation; active auxiliary-heat; temperature field

(本文编辑: 周成林)