

寒区隧道地源热泵供热系统及优化分析

张国柱^{1,2}, 夏才初^{1,2}, 孙 猛^{1,2}, 邹一川^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:为解决寒区隧道冻害问题,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。系统由取热段、加热段、热泵和分、集水管路组成,可用于隧道洞口段衬砌和排水系统加热。在分析研究该系统传热机理的基础上,建立考虑热阻和热源的隧道取热段传热模型,利用叠加原理、格林函数法和拉普拉斯变换法相结合的方法获得其解析解。热交换管间距对热交换管换热量有显著影响,随着管间距的增加,换热量呈线性增加。热交换管换热量随隧道埋深的增加而呈线性增加,热交换管应布置在埋深深的部位。与热泵持续运行相比,间歇运行有利于土壤温度场的恢复,有助于提高热泵运行效率。

关键词: 寒区隧道;地源热泵;供热系统;优化分析

中图分类号: TU445

文献标识码: A

larger absorber pipes distance, the specific energy output of surrounding rock will increase linearly. The higher the ground temperature is, the greater the specific energy output of absorber pipes is. It is beneficial that the heat exchanger pipes should be placed in deeper depth of surrounding rock. Discontinuous operation of heat pump is good for the recover of soil temperature field around the heat exchanger pipes. Temperature increment between discontinuous and continuous operation presents an upward trend. Discontinuous operation is helpful to improve the coefficient of performance(COP) of heat pump.

Key words: tunnel in cold region; heat pump; tunnel heating system; optimum analysis

Tunnel Heating System with Heat Pump in Cold Region and Its Optimization

ZHANG Guozhu^{1,2}, XIA Caichu^{1,2}, SUN Meng^{1,2}, ZOU Yichuan^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Tunnel heating system with heat pump was introduced for the first time at Linchang tunnel in Inner Mongolia Autonomous Region of China to prevent freezing damage in cold regions tunnels. Tunnel heating system consists of the heating section, absorbing section, heat pump, collector, and distributor line. This system can be used for heating lining and drainage system in tunnel portal. The heat transfer model of absorber pipes is obtained by considering thermal resistance and heat generation. The analytical solution can be obtained with the Green's function method and Laplace transform technique. The distance of heat exchanger pipe has a great influence on specific energy output. With

寒区隧道在冬季要面临冻害的威胁,我国76%的寒区隧道都发生了不同程度的冻害破坏。利用电能和煤炭的隧道加热系统虽能永久根除隧道冻害,但却增加了隧道的运行管理费用,并带来环境污染等问题^[1]。因此急需研发一种既节能又环保的新型加热系统。

Brandl^[2]首次提出了采用地热能的隧道技术,即利用布置于隧道初衬和二衬之间的能源土工布吸收围岩地温能,地源热泵将其提升后,用于隧道附近建筑供暖。Brandl开展了采用地热能的隧道现场试验研究,该试验工程用6台地源热泵将提取的地温能为附近一所学校供暖。该试验工程能提供150 kW功率的热能,一个供暖季度可提供214 MW·h的能量。Islam等^[3]研发了水平单U管道路加热系统,利用埋于隧道中部路面下1.2 m处的水平单U管吸收围岩地温能,对隧道洞口段的路面加热。该技术成功应用于Nanaori-Toge隧道,现场温度监测表明,隧道洞口路面温度始终处于冰点以上,达到了预期

收稿日期: 2011-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(50878150);交通部西部交通建设科技项目(2009318822047);长江学者和创新团队发展计划(IRT1029);内蒙古自治区交通科技项目(NJ-2008-25)

第一作者: 张国柱(1982—),男,博士生,主要研究方向为隧道及地下建筑工程、能源地下工程。E-mail: zhangguozhu240101@163.com

通讯作者: 夏才初(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为隧道及地下建筑工程。E-mail: tjxiacbb@126.com

效果.夏才初等^[4]在分析总结国外先进技术的基础上,提出了能源地下工程新概念,并对其应用前景做了详细论述.陈小龙等^[5]对能源地下工程的适宜性进行了研究.上述研究表明,寒区隧道围岩可提供足够的地温能用于隧道加热系统.

传热模型的研究是地源热泵型供热系统设计及优化计算的前提和基础. Adam 等^[6]采用现场试验和数值模拟方法进行采用地热能隧道的分析计算,但未给出适合于采用地热能隧道的传热模型.曹诗定^[7]提出了能源地铁车站板式换热构件传热模型,但该模型未考虑管间距对热交换的影响. Islam 等^[8]采用理论研究和室内模型实验的方法,提出了简化的水平单 U 管隧道路面加热系统传热模型.该模型仅适用于均匀介质,对于考虑衬砌和隔热层的复合介质,该简化模型并不适用.

内蒙古博牙高速林场隧道右幅入口首次采用地源热泵供热系统.建立考虑热阻和热源的隧道传热模型,利用叠加原理^[9]、格林函数法^[10]和拉普拉斯变换^[11-14]相结合的方法获得其解析解.分析热交换管间距、隧道埋深及热泵的工作状态对换热量的影响.

1 林场隧道地源热泵供热系统

隧道位于可供地源热泵利用的恒温层中,将隧道围岩作为热源,将热交换管埋设在隧道初衬与复合式防水板之间,从围岩中获取地温能,实现对隧道洞口段的加热.寒区隧道地源热泵供热系统如图 1 和图 2 所示.

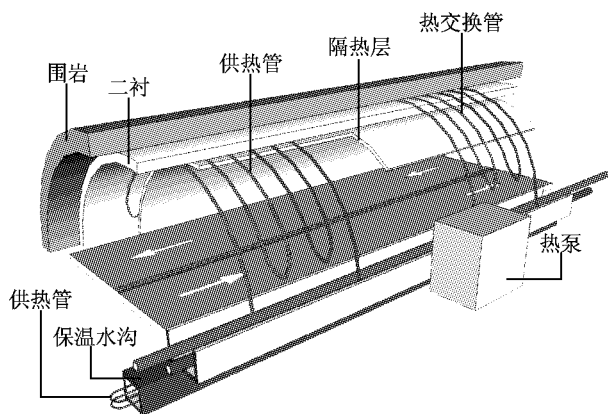


图 1 寒区公路隧道地源热泵供热系统效果图

Fig.1 Schematic view of the tunnel heating system with heat pump

该系统由取热段,加热段,热泵和分、集水管路组成.取热段位于隧道中部,由埋设于隧道初衬和复

合式防水板之间的热交换管路(PE 管)组成;加热段位于隧道洞口处,由安装于二衬与隔热层之间的供热管和保温水沟内的供热管路组成.系统工作原理如下:热交换管由分、集水管与地源热泵前端相连,形成封闭系统,系统内注满循环介质(含防冻液),在水泵的驱动下,热交换管内的循环介质在管内循环流动,吸收围岩中的地温能,经地源热泵对其提升后,用于加热与地源热泵末端相连的供热管内的循环介质,对隧道衬砌及保温水沟进行供热.

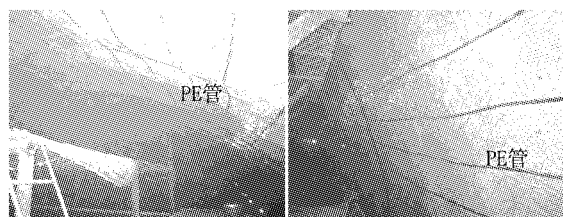


图 2 林场隧道热交换管现场布置图

Fig.2 Schematic view of heat exchanger in Linchang tunnel

2 取热段的传热模型

林场隧道取热段热交换管现场布置如图 2 所示.热交换管在隧道初衬内表面以一定的环向间距与隧道轴线平行布置,每组热交换管的总长度为 400 m,纵向宽度为 10 m,环向间距为 0.5 m,热交换管的进、出口设计温差为 5 °C,相邻热交换管内循环介质的温差非常微小,取单根热交换管为研究对象,相邻热交换管的影响用绝热边界替代.沿隧道轴线方向的每延米热交换管的设计进、出口温差仅为 0.012 5 °C,忽略热交换管轴线方向的热传导.

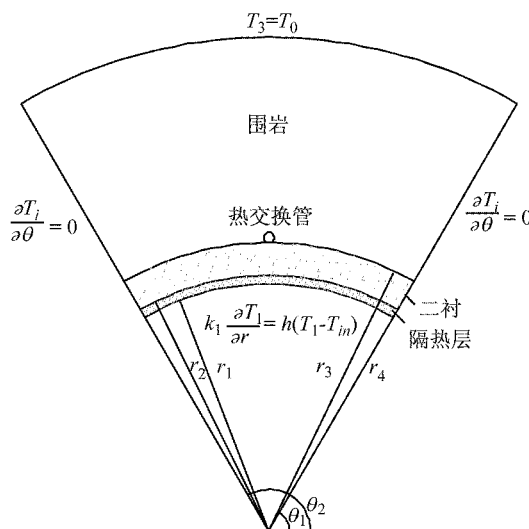


图 3 隧道 2 维传热计算模型

Fig.3 Schematic view of two dimensional analyses

由上述分析可得:含热交换管的隧道温度场可采用 2 维传热模型计算,隧道取热段的计算模型如图 3 所示。

为便于理论分析和计算,需作如下假设:隧道初衬与隧道围岩为同一传热介质;位于初衬和二衬之间的复合式防水板非常薄,计算时以热阻的形式来考虑;二衬与保温隔热层接触良好,无接触热阻;隧道围岩、二衬和隔热层均为常热物理性,不随温度而变化;热交换管直径仅为 2.5 cm,计算时以线热源的形式考虑;在隔热层作用下,隔热层及二衬的初始温度与隧道围岩相同。

2.1 传热方程

根据圆形复合介质热传导理论^[9],隧道取热段传热模型为含热源的复合介质 2 维传热问题,其传热方程如下:

$$\frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}(r, \theta, t) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_i}{\partial r}(r, \theta, t) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta^2}(r, \theta, t) + \frac{g_i(r, \theta, t)}{k_i} \quad (1a)$$

边界条件为

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -h(T_1 - T_m), r = r_1, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (1b)$$

$$T_3 = T_0, r = r_4, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (1c)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial \theta} = 0, \theta = \theta_1, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (1d)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial \theta} = 0, \theta = \theta_3, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (1e)$$

连续条件为

$$T_1 = T_2, r = r_2, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (1f)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, r = r_2, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (1g)$$

$$T_2 + Rk_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = T_3, r = r_3, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (1h)$$

$$k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = k_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, r = r_3, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (1i)$$

初始条件为

$$T_i = T_0, t = 0, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (1j)$$

式中: T_1 为隔热层温度; T_2 为二衬温度; T_3 为围岩温度; T_0 为隧道围岩地温; k_i 为第 i 层传热介质的导热系数; ρ_i 为第 i 层传热介质的密度; c_{pi} 为第 i 层传热介质的比热容; h 为洞壁与洞内气体之间的对流换热系数; r_0 为热交换管半径; R 为围岩与二衬之间的接触热阻; $g_i(r, \theta, t)$ 为热交换管引起的热源, $g_i(r, \theta, t) = q(t) \delta(r - r_3) \delta(\theta - \pi/2)$; $q(t)$ 为每延米热交换管的换热量; T_m 为洞内气体的温度。

2.2 传热方程的解析解

方程(1)为含热源的非齐次边界条件复合介质的 2 维传热问题,为便于求解,利用叠加原理^[9]将方程(1)分解为含热源的复合介质齐次边界条件和不含热源的复合介质非齐次边界条件 2 维传热问题。

$$T_i(r, \theta, t) = T_0 + \zeta_i(r, \theta, t) + \psi_i(r, \theta, t) \quad (2)$$

函数 $\zeta_i(r, \theta, t)$ 和 $\psi_i(r, \theta, t)$ 是下列问题的解。函数 $\zeta_i(r, \theta, t)$ 与原问题具有相同定义域,有热源,但具有齐次边界条件的非稳态热传导问题的解

$$\rho_i c_{pi} \frac{\partial \zeta_i}{\partial t} = k_i \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \zeta_i}{\partial r} \right) + k_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \zeta_i}{\partial \theta^2} + q(t) \delta(r - r_3) \delta\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3a)$$

边界条件为

$$k_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial r} - h\zeta_1 = 0, r = r_1, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (3b)$$

$$\zeta_3 = 0, r = r_4, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (3c)$$

$$\frac{\partial \zeta_i}{\partial \theta} = 0, \theta = \theta_1, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (3d)$$

$$\frac{\partial \zeta_i}{\partial \theta} = 0, \theta = \theta_3, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (3e)$$

连续条件为

$$\zeta_1 = \zeta_2, r = r_2, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (3f)$$

$$k_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial r} = k_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial r}, r = r_2, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (3g)$$

$$\zeta_2 + Rk_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial r} = \zeta_3, r = r_3, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (3h)$$

$$k_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial r} = k_3 \frac{\partial \zeta_3}{\partial r}, r = r_3, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (3i)$$

初始条件为

$$\zeta_i = 0, t = 0, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (3j)$$

方程(3)的解析解可利用格林函数法求解。Ozisk^[9]和 Haji-sheik^[10]给出了该问题的求解过程。

$$\begin{aligned} \zeta_i(r, \theta, t) = & \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_{i, nm}(r) \theta_m(\theta)}{N_{r, nm} N_{\theta, m}} \cdot \\ & \int_{\tau=0}^t \exp[-\lambda_{nm}^2(t-\tau)] \cdot \\ & \int_{\theta'=\theta_1}^{\theta'=\theta_2} \left[\int_{r'=r_3}^{r'=r_4} r' Y_{3, nm}(r') g_3(r', \theta', \tau) dr' \right] \cdot \\ & \theta_m(\theta') d\theta' d\tau \end{aligned} \quad (3k)$$

$$N_{\theta, m} = \int_{\theta=\theta_1}^{\theta=\theta_2} [\theta_m(\theta)]^2 d\theta \quad (3l)$$

$$N_{r, nm} = \sum_{i=1}^{i=3} \int_{r=r_i}^{r=r_{i+1}} \rho_i c_{pi} r [R_{i, nm}(r)]^2 dr \quad (3m)$$

式中: $R_{i, nm}(r)$ 和 $\theta_m(\theta)$ 分别为坐标 r 和 θ 的特征函数; λ_{nm} 为特征值。

函数 $\psi_i(r, \theta, t)$ 与原问题具有相同定义域,无热

源,但具有非齐次边界条件的非稳态热传导问题的解

$$\rho_i c_p \frac{\partial \psi_i}{\partial t} = k_i \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial \psi_i}{\partial r}) + k_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial \theta^2} \quad (4a)$$

边界条件为

$$k_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial r} - h \psi_1 = h(T_0 - T_{in}), r = r_1, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (4b)$$

$$\psi_3 = 0, r = r_4, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (4c)$$

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} = 0, \theta = \theta_1, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (4d)$$

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} = 0, \theta = \theta_3, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (4e)$$

连续条件为

$$\psi_1 = \psi_2, r = r_2, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (4f)$$

$$k_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial r} = k_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial r}, r = r_2, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (4g)$$

$$\psi_2 + Rk_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial r} = \psi_3, r = r_3, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (4h)$$

$$k_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial r} = k_3 \frac{\partial \psi_3}{\partial r}, r = r_3, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (4i)$$

初始条件为

$$\psi_i = 0, t = 0, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, r_1 \leq r \leq r_4 \quad (4j)$$

Lu 等^[11-13]提出了求解具有周期变化的非齐次边界条件复合介质温度场的新方法. 夏才初等^[14]利用该方法求得了考虑衬砌和隔热层的隧道温度场. 该方法可用于如下方程的求解:

$$\psi_i(r, \theta, t) = \text{Re}[F(\omega i, r, \theta) T_{A, in} e^{i(\omega t + \varphi)}] + \bar{F}(r, \theta)(T_0 - T_{M, in}) \quad (4k)$$

式中: $T_{M, in}$ 为洞内气体的年平均温度; $T_{A, in}$ 为洞内气体的温度振幅; $\omega = 2\pi/T$; φ 为相位; $F(\omega i, r, \theta)$ 和 $\bar{F}(r, \theta)$ 为计算过程函数^[14].

3 林场隧道工程概况

3.1 工程概况

博牙高速公路林场隧道位于内蒙古牙克石市免渡河镇. 林场隧道设计为双洞分离式. 左幅起点里程桩号 K225+955, 终点里程桩号 K228+470, 全长 2.515 km; 右幅起点里程桩号 K225+965, 终点里程桩号 K228+490, 全长 2.525 km.

隧道洞口供热段长度为 75 m; 保温水沟的加热长度为 100 m. 隧道供暖总热负荷为 50 kW.

3.2 围岩地温

为获得林场隧道围岩地温分布规律, 距离洞口 50 m 处布置了地温测试钻孔, 钻孔深度为 70 m, 于

2009 年 7 月进行了地温测试. 具体测试结果如图 4 所示.

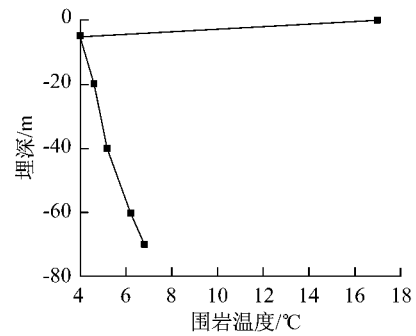


图4 土壤温度随埋深变化曲线

Fig.4 Relation of ground temperature and depth

由图 4 可得, 隧道围岩地温随隧道埋深增加呈线性增加, 林场隧道围岩地温约为 7 °C.

3.3 洞内气温

为获得隧道洞内气温, 首先需要获得隧道洞口处气温分布规律, 然后利用隧道洞内年平均气温及年温度振幅理论计算公式^[4-16]计算距洞口任意距离处的洞内气体温度场. 图 5 为洞口处气温随时间变化规律.

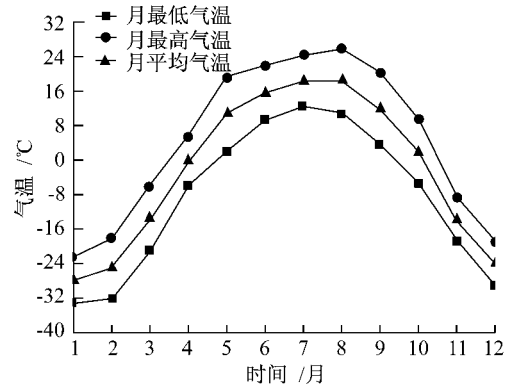


图5 隧道洞口气温分布规律

Fig.5 Air temperature of tunnel mouth

4 优化分析

隧道地源热泵供热系统的取热段设计主要包括热交换管间距、热交换管埋设位置及热泵运行状态等. 通过供热系统传热模型理论解优化上述参数.

为便于分析计算, 取衬砌钢筋混凝土的热物性参数与围岩相同, 复合式防水板热阻为零, 洞内气温与围岩地温相同.

计算所需的热物性参数如表 1 所示.

隧道结构几何参数如下: 隔热层厚度为 2 cm; 二衬厚度为 40 cm; 初衬厚度为 20 cm; 围岩厚度取 6 m.

表1 传热介质热物性参数

Tab.1 Materials' thermal properties

传热介质	导热系数 $k/$ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容 $C/$ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)
隔热层	0.05	55	1210
混凝土	3.22	2544	1293
围岩	3.22	2544	1293

4.1 热交换管间距

为获得热交换管间距对换热量的影响,计算系统运行时间分别为 90, 120 和 150 d 时,管间距对其换热量的影响,计算结果如图 6 所示。

由图 6 可得,在系统不同运行时刻,热交换管换热量随管间距的增加而线性增加,且运行时间越短,增长速率越快。

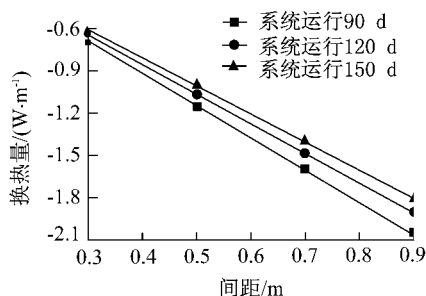


图6 热交换管间距对其换热量的影响

Fig.6 Effect of absorber distance on the specific energy output

4.2 埋设位置

供热系统取热段的热交换管埋设位置应综合考虑隧道埋深和洞内气温的影响。隧道洞内气温对围岩温度场有显著影响^[17-18]。若隧道二衬内侧安装了足够厚度的保温隔热层,洞内气温对隧道围岩地温的影响很小^[19],隧道围岩地温主要由隧道埋深决定。图 7 为热交换管间距为 50 cm 时,围岩地温对热交换管换热量的影响关系曲线。

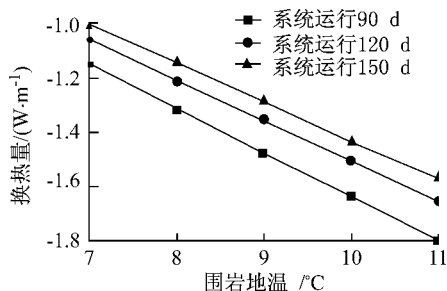


图7 围岩地温对热交换管换热量的影响

Fig.7 Effect of ground temperature on the specific energy output

由图 7 可得:随着围岩地温的增加,热交换管换

热量呈线性增加,而围岩地温又随着埋深的增加而增加,所以,隧道埋深越深,越有利于围岩地温能的提取。热交换管应布置在埋深深的部位。林场隧道最大埋深为 100 m,热交换管布置在距离洞口 575~775 m 处,该段隧道埋深为 80~100 m。

4.3 热泵工作状态

热泵的运行时间受隧道洞口段加热所需热负荷的控制,当洞口段大气温度较高,隧道衬砌不需要加热时,热泵则会自动停止工作。所以,在寒区隧道整个加热季节,热泵系统并不是 24 h 连续工作,而是间歇运行的。为便于分析计算,热泵的间歇工作状态定义为每天运行 18 h,停 6 h。间歇运行工况下,热交换管吸热量如下:

$$q(t) = \begin{cases} q_d(t), & 0 < t < 18 \\ 0, & 18 < t < 24 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)为周期函数,利用傅里叶变换将其变换成三角函数,展开式如下:

$$q(t) = q_d(t) \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\sin\left(\frac{3n\pi}{2}\right) \cos(2n\pi t) + \left(1 - \cos\left(\frac{3n\pi}{2}\right)\right) \sin(2n\pi t) \right] \right] \quad (6)$$

从图 8 可以得出,热交换管从围岩的取热量对其周围温度场有显著影响。在运行初期,土壤温度下降非常迅速,运行 20 d 后,土壤温度呈缓慢下降趋势。

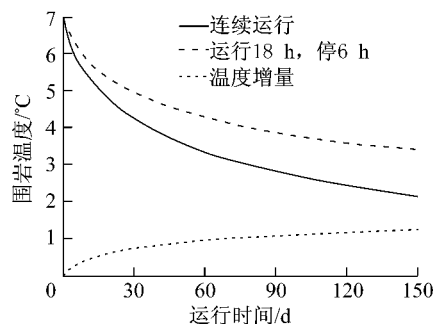


图8 热泵长期运行对围岩温度场影响

Fig.8 Effect of heat pump working state on rock surrounding temperature

从图 8 还可以得出,间歇运行有助于土壤温度的恢复,随着时间的增加,两种运行状态下的温度增量呈增加趋势。在运行初期,温度增量的增长最快,随着时间的增加,呈缓慢增长趋势。当系统运行 15, 30, 60, 90, 120 和 150 d 后,温度增量分别为 0.52, 0.71, 0.94, 1.08, 1.17 和 1.24 °C。热泵间歇运行对土壤温度恢复非常有力,有助于热泵运行效率的提高。

5 结论

利用地温能的地源热泵供热系统可以解决寒区隧道冻害问题.与普通采用电能加热的隧道加热系统相比,该系统降低了运行及管理费用;与燃煤锅炉相比,该系统既节能,又环保.

建立了考虑热阻和热源的隧道传热模型,利用叠加原理、格林函数法和拉普拉斯变换法相结合的方法获得其解析解.并对林场隧道地源热泵供热系统取热段进行传热计算,具体结论如下:

(1) 热交换管间距对热交换管换热量有显著影响,随着管间距的增加,换热量呈线性增加.

(2) 隧道埋深对围岩取热量同样具有显著的影响,隧道埋深越深,越有利于围岩地温能的提取.热交换管应布置在埋深深的部位.

(3) 在同样的运行条件下,热泵间歇运行有助于热交换管周围围岩温度场恢复,应采取间歇运行方案.

参考文献:

- [1] 夏才初,张国柱,曹诗定,等.寒区公路隧道防冻保暖技术及其发展趋势[C]//2009年全国公路隧道学术会议.重庆:重庆大学出版社,2009:13-19.
XIA Caichu, ZHANG Guozhu, CAO Shiding, et al. Antifreeze and warmth retention technology and develop trend road tunnel in frigid areas[C]//2009 Nation Conference on Road Tunnel, Chongqing: Chongqing University Press, 2009:13-19.
- [2] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active structures[J]. Geotechnique, 2006, 56(2):81.
- [3] Ialam M S, Fukuhara, Watanabe T H, et al. Horizontal U-tube road heating system using tunnel ground heat[J]. J of Snow Eng of Japan, 2006, 22(3):23.
- [4] 夏才初,曹诗定,王伟.能源地下工程的概念、应用与前景展望[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):419.
XIA Caichu, CAO Shiding, WANG Wei. An introduction to energy geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(3):419.
- [5] 陈小龙,曹诗定.能源地下工程在上海地区的适用性研究[J].土木工程学报,2009,42(10):122.
CHEN Xiaolong, CAO Shiding. Applicability of energy saving geo-technology in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(10):122.
- [6] Adam D, Markiewicz R. Energy from earth-coupled structures, foundation, tunnel and sewers[J]. Geotechnique, 2009, 59(3): 229.
- [7] 曹诗定.能源地铁车站主要热交换构件传热计算方法研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2009.
CAO Shiding. Study on the calculation method of main heat-exchangers in energy subway station[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.
- [8] Ialam M S, Fukuhara, Watanabe T H. Simplified heat transfer model of horizontal U-tube (HUT) system[J]. J of Snow Eng of Japan, 2007, 23(3):232.
- [9] Ozisik M N. Heat conduction[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- [10] Sheikh A H, Beck J V. Temperature solution in multi-dimensional multi-layer bodies[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45: 1865.
- [11] Lu X, Tervola P, Viljanen M. A new analytical method to solve the heat equation for a multi-dimensional composite slab[J]. J Phys A: Math Gen, 2005, 38: 2873.
- [12] Lu X, Tervola P, Viljanen M. Transient analytical solution to heat conduction in multi-dimensional composite cylinder slab[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2006, 49:1107.
- [13] Lu X, Viljanen M. An analytical method to solve heat conduction in layered spheres with time-dependent boundary conditions[J]. Physics Letters A, 2006, 365:274.
- [14] 夏才初,张国柱,肖素光.考虑衬砌和隔热层的寒区隧道温度场解析解[J].岩石力学与工程学报,2010,26(9):1767.
XIA Caichu, ZHANG Guozhu, XIAO Suguang. Analytical solution to temperature fields of tunnel in cold region considering lining and insulation layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,26(9): 1767.
- [15] Kawamura T, Mikami T, Fukumoto K. An estimation of inner temperatures at cold region tunnel for heat insulator design[J]. Structural Engineering Symposium,2008, 54: 32.
- [16] 张国柱,夏才初,殷卓.寒区隧道轴向及径向温度分布理论解[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(8):1117.
ZHANG Guozhu, XIA Caichu, YIN Zhuo. Analytical solution to axial and radial temperature of tunnel in cold region[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(9):1117.
- [17] 陈建勋,罗彦斌.寒冷地区隧道温度场的变化规律[J].交通运输工程学报,2008,8(2):44.
CHEN Jianxun, LUO Yanbin. Changing rules temperature field for tunnel in cold area[J]. Journal of traffic and transportation engineering,2008,8(2):44.
- [18] 乜凤鸣.寒冷地区铁路隧道气温状态[J].冰川冻土,1988,10(4):450.
Nie Fengming. Dynamic state of air temperature in railway tunnel in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988,10(4):450.
- [19] 陈建勋.梯子岭隧道防冻保温层效果现场测试及分析[J].公路,2006(8):221.
CHEN Jianxun. Field test and analysis of effect of antifreeze thermal insulation layer in Tiziling tunnel[J]. Highway, 2006, (8): 221.