

寒区隧道地源热泵加热系统埋管间距优化分析

夏才初, 邹一川, 张国柱

(同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为预防寒区隧道冻害问题, 将地源热泵型供热系统应用于内蒙古博牙高速公路林场隧道中, 用于对隧道洞口段衬砌和排水系统加热. 采用有限元计算方法, 首先通过对初始温度场的计算反演出岩体各项热物性参数, 再以试验所得热交换管实际换热量作为模型中管壁的内边界条件进行热交换管的岩土热响应分析. 计算结果显示, 隧道内热交换管管壁温度及管间温度与现场试验结果能够很好地吻合, 满足工程精度要求. 利用验证后的有限元计算模型对热交换管间距进行优化, 得到埋管最优间距为 0.5~0.8 m.

关键词: 寒区隧道; 地源热泵; 有限元计算; 优化埋管间距
中图分类号: U45 **文献标识码:** A

Pipe Distance Optimization of Geothermal Resource Heat Pump in Cold Region

XIA Caichu, ZOU Yichuan, ZHANG Guozhu

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to prevent freezing damage to tunnels in cold regions, tunnel heating system with geothermal resource heat pump was introduced for the first time at Linchang tunnel in Inner Mongolia Autonomous Region of China. Finite element method (FEM) was employed to analyze the process of heat exchange. First, the thermal properties of rock mass was inverted by calculating initial temperature field. Then, a heat flow function was obtained which is fitted with the heat flow calculated by the experiment data, and a transient heating analysis was made. A comparison between the numerical and experiment temperature proves that the accuracy requirement can be met. Finally, the distance between pipes was optimized by this method, and the most economic distance between pipes ranges from 0.5 to 0.8 m.

Key words: tunnel in cold region; geothermal resource heat

pump; finite element method; optimization of distance between pipes

寒区隧道在冬季面临冻害威胁, 我国 76% 的寒区隧道都受到了不同程度的冻害损坏. 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 等^[2-3]首次提出了采用地温能的隧道技术, 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的供暖. Ialam 等^[4-5]研发了水平单 U 管道加热系统, 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. 夏才初、曹诗定等^[6-7]在分析总结国外先进技术的基础上将寒区隧道地源热泵型供热系统应用于内蒙古博牙高速公路林场隧道, 该项技术在国内尚属首次应用, 其计算理论和设计方法尚处于发展阶段, 需要通过现场岩土热响应试验^[8]等手段对其计算理论进行验证和优化.

Li 等^[9]利用恒温法开展不同类型的埋管换热器的岩土热响应试验, 获得了不同类型埋管换热器的换热能力. Brandl^[2]分析了热交换管内循环介质的传热特性, 建立了能源桩-热泵-室内空调三者耦合传热方程, 并且利用有限元法进行了能源桩换热器的热响应分析. 结合有限元数值计算和现场监测的方法对依托工程进行计算分析. Hamada 等^[10]开展了用于建筑物加热的能源桩空调系统的运行效果测试, 能源桩空调系统的能效比高达 3.9, 起到了很好的节能效果. Gao 等^[11]开展了能源桩的基于恒定入口温度的岩土热响应试验, 并对能源桩的

收稿日期: 2011-11-01

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

第一作者: 夏才初(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为节能和能源地下工程、隧道与地下工程建设新技术、隧道与地下工程健康理论及诊断技术、隧道与地下工程模拟实验与数值模拟分析. E-mail: tjxiaccb@126.com

通讯作者: 邹一川(1986—)男, 硕士生, 主要研究方向为隧道及地下建筑工程、能源地下工程. E-mail: zouyichuan@126.com

热交换器布置形式进行了优化分析,利用有限元程序预测系统运行多年后能源桩周围土壤的热响应,并分析计算土壤的热平衡问题,给出了依托工程的优化设计参数。

但能源桩属于垂直埋管系统,其特点是周围均为岩土体介质,可从桩周均匀传热,而应用于隧道内的地源热泵系统的热交换管仅在一侧接触岩土体,另一侧接触隧道衬砌及洞内空气,加之由于后期保温隔热层的施工,隧道衬砌一侧可近似看作绝热边界,因此两者的传热特性并不相同,需对寒区隧道内应用地源热泵系统另行试验分析。

以内蒙古博牙高速公路林场隧道为依托工程,采用恒温法进行隧道内地源热泵系统埋管的热交换试验。将试验结果与 ANSYS 计算结果进行对比,以验证计算结果的准确性,进而可在后续研究中采用该方法对地源热泵埋管系统的埋管间距等进行优化,并最终确定该工程所能获取的最大换热量。

1 寒区隧道地源热泵型供热系统

由于隧道位于可供地源热泵利用的恒温层中,因此可将隧道围岩作为热源,将热交换管埋设在隧道初衬或二衬中,以隧道结构作为热交换器,从周围地层中获取地温能,以实现隧道洞口段的加热。林场隧道以隧道初衬作为热交换构件,将热交换管埋设于隧道初衬和复合式防水板之间,吸收隧道围岩的地温能。

图1为地源热泵供热系统的效果图。该系统由取热段、供热段、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环路(聚乙烯塑料管,即PE管)组成;

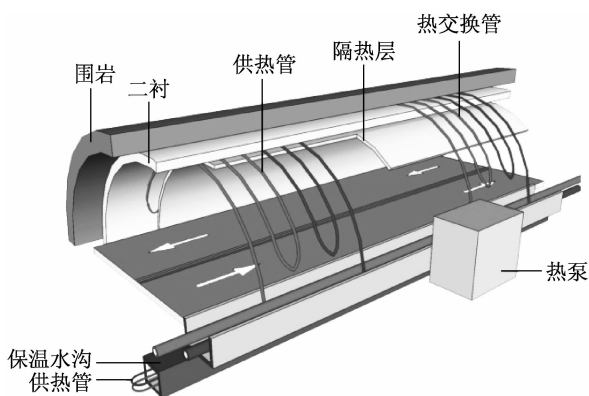


图1 寒区公路隧道地源热泵供热系统

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

供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环路组成。

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,经地源热泵对其温度进行提升后用于对隧道洞口段的衬砌及保温水沟进行加热。

2 岩土热响应实验

2.1 工程概况

绥满国道主干线博克图至牙克石高速公路的林场隧道位于内蒙古自治区牙克石市免渡河镇(东经 $120^{\circ}27'$ ~ $120^{\circ}29'$,北纬 $49^{\circ}04'$ ~ $49^{\circ}05'$)距免渡河镇东约30 km处,设计为双洞分离式。隧道区地层上覆第四纪坡洪积层(Qhdl-pl),下伏基岩为泥盆系下大民山组(D2-3x)流纹岩和奥陶系多宝山组(O2d)砂岩、板岩。

隧道最大埋深102 m,历年最高气温 36.5°C (1969年),最低气温 -46.7°C (1970年)。多年平均风速 $3.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均最大风速 $18.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,历年最大风速 $29.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。多年平均无霜期95 d,最大冻结深度3.0 m。

林场隧道供热系统取热段距离洞口550 m,取热段总长度200 m;隧道洞口供热段长度为75 m,保温水沟的加热长度为100 m;总热负荷50 kW。试验段隧道围岩为弱风化砂岩,节理、裂隙发育。地下水为基岩裂隙水,隧道开挖时出现渗水现象。隧道埋深80 m,洞内平均气温 11°C 左右,距离初衬内表面2.8 m处的围岩温度为 5°C 左右。

2.2 试验仪器

测试仪器由以下部分组成:保温水箱(带温控电加热器)、循环水泵、流量控制阀和循环管道、温控设备、温度传感器、流量计、压力表和数据采集系统。测试仪器如图2。温度控制器根据设定的温度调节加热器的工作状态,获得试验所需恒温液体,在水泵的驱动下,流经布置在热交换管入口端的温度传感器、流量计和压力表,流入热交换管,与隧道围岩进行热交换,向围岩释放或吸收热量,冷却或加热后的循环介质再流经布置在热交换管出口端的温度传感器,最后流入保温水箱,如此反复循环,持续运行。

2.3 试验方案

采用恒温法的思路对埋管间距为100 cm的1

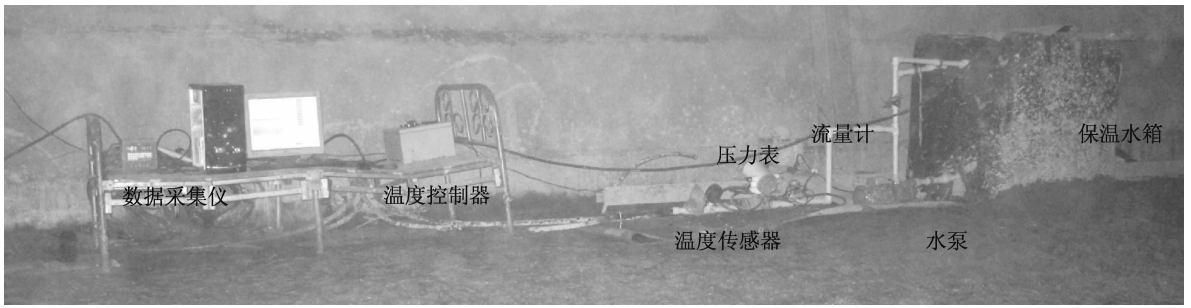


图 2 岩土热响应试验装置

Fig. 2 Experimental system of rock-soil thermal response test

组热交换管的换热能力进行测试,其温度传感器以及热交换管的布置情况如图 3. 编号前面的“2”是第 2 个断面,后面的数字是序号.

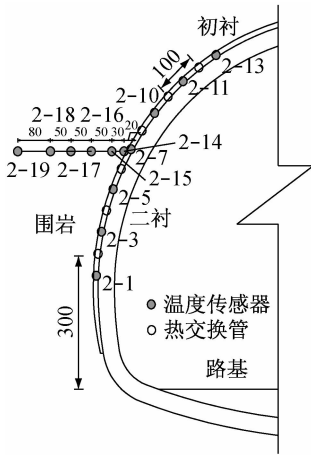


图 3 热交换管及传感器布置(单位:cm)

Fig. 3 Scheme of heat exchanger and temperature sensors (unit: cm)

热交换管(外径 25 mm 的 PE 管)沿隧道轴向布置,管长 50 m,间距为 0.1 m. 热交换管布置于隧道左侧边墙,在管周及围岩一定深度范围内共埋设 14 个温度传感器,监测热交换管管周及围岩温度场. 热交换管及温度传感器布置如图 4.

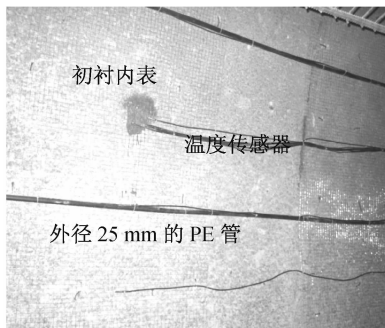


图 4 热交换管及温度传感器现场布置

Fig. 4 Photograph of heat exchanger and temperature sensors

在地源热泵岩土热响应试验中通过控制循环介质的入口温度恒定并测量其经过埋管与围岩进行充分热交换后的出口温度得到进出口温差,再结合循环介质的流量计算热交换管的换热量. 试验连续运行 42 h.

3 围岩温度场的有限元计算

3.1 计算思路和计算模型

采用 ANSYS 软件热分析对隧道内地源热泵换热管环路系统的换热过程进行模拟. 计算采用四节点四边形单元 plane55 作为有限元计算的单元类型.

计算主要分为 2 个部分:①计算围岩的初始温度场;②以热交换管换热量作为计算模型中管壁的内边界条件进行岩土热响应计算^[12].

在试验中地源热泵热交换管沿隧道纵向布置,由于隧道纵向单位长度上围岩温度基本恒定,加之管内流体在沿管长方向的温度梯度很小,因此可将三维传热问题简化为二维问题进行计算^[5].

计算模型中的隧道结构按林场隧道衬砌断面图建立:隧道内径 5.75 m,二衬厚度 0.45 m,一衬厚度 0.26 m,围岩厚度 2.80 m. 一衬和二衬单元为混凝土材料,围岩单元为岩石材料.

根据试验监测数据,在传热试验连续进行了 42 h 后发现位于围岩深度 2.80 m 处的温度传感器监测温度并无明显上升,由此可确定隧道传热的影响范围较小,计算中取为 2.80 m.

在有限元计算中,热交换管内的边界条件采用施加一变化热流密度的形式,并且认为热交换管管壁与周围围岩紧贴,二者之间没有接触热阻以及显著温差,因此在有限元计算中可不考虑管壁的传热作用,并以紧邻管周的围岩温度作为热交换管壁温度进行对比分析. ANSYS 软件模拟计算的模型如图 5.

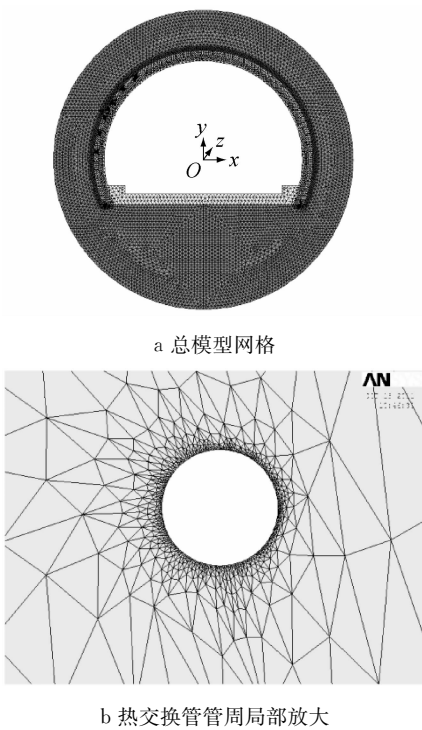


图 5 ANSYS 计算模型网格

Fig.5 Heat transfer model in ANSYS

3.2 计算模型边界条件

试验数据显示,在围岩 2.80 m 深度处的温度稳定于 5.05 °C,并在试验进行的 42 h 内无明显变化,因此在有限元计算中围岩外边界设定为恒定的 5.05 °C.

试验监测气温数据为一波动数值,振幅为 2.00 °C 左右,为便于计算,假定在整个传热过程中气温恒定,取监测平均值施加到隧道洞内边界上,其值为 11.20 °C.

在瞬态热分析中,根据试验数据计算出的热交换管每延米换热量 $q(t)$ 随时间的变化拟合为函数如式(1)所示,并见图 6,将其以热流密度的形式均匀施加于计算模型中的换热管管壁上.

$$q(t) = 31.61 + 5.94 \times e^{-\frac{t}{105}} \quad (1)$$

式中, t 为运行时间, min.

3.3 参数反演

由于岩体的导热系数 λ 、比热容 c 和密度 ρ 由水和岩石的热物性参数及岩体的孔隙率决定^[11-12],所以

$$\lambda = \epsilon \lambda_w + (1 - \epsilon) \lambda_r \quad (2)$$

$$c = \epsilon c_w + (1 - \epsilon) c_r \quad (3)$$

$$\rho = \epsilon \rho_w + (1 - \epsilon) \rho_r \quad (4)$$

式中: ϵ 为岩体孔隙率; λ_r, λ_w 分别为岩石和水的导热系数; c_r, c_w 分别为岩石和水的比热容; ρ_r, ρ_w 分别为

岩石和水的密度.

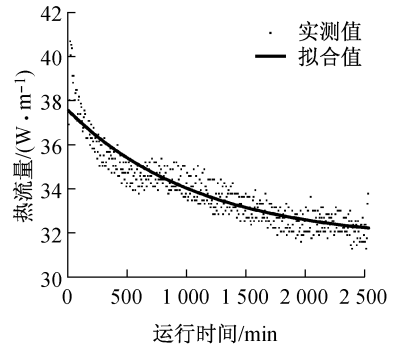


图 6 热流量拟合

Fig.6 Heat flow fitting

由于岩体的孔隙率小于 1,由式(2)~(4)可得隧道围岩的导热系数、比热容和密度位于水和岩石之间,水和岩石的热物性参数如表 1.

表 1 材料的热物性参数

Tab.1 Thermal properties of materials

材料	导热系数/ (W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	比热容/ (J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)
水	0.56	4 180	1 000
岩石 ^[13]	3.49	1 000	2 700
混凝土 ^[14-15]	1.85	970	2 400

由于组成隧道围岩的水和岩石的热物性参数已知,只需反演隧道围岩的孔隙率即可确定隧道围岩的热物性参数.系统处于稳态热传递时,温度在不同介质中的分布情况仅与材料的导热系数有关.经计算,当围岩导热系数 $\lambda = 3.22$ 时,计算得到的初始温度场与隧道监测数据最为吻合,对比结果见表 2.

表 2 温度对比

Tab.2 Comparison of temperatures

围岩深度/m	监测值/°C	计算值/°C	偏差/%
0	10.06	9.82	2.35
0.2	9.34	9.21	1.36
0.5	8.57	8.59	0.22
1.0	7.76	7.77	0.12
1.5	6.91	6.94	0.43
2.0	6.16	6.15	0.11
2.8	5.05	5.05	0

由式(2)可得围岩孔隙率为 9.15%,将其代入式(3)和式(4)得到 $c = 1 293 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, $\rho = 2 544 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

4 计算结果与试验数据的对比分析

4.1 瞬态传热计算

将热流量的拟合函数式(1)编入 ANSYS 软件

中,并施加至计算模型中的换热管管壁上,设定总时间步长为 42 h,每一时间子步长 2 h,进行瞬态热分析.对计算结果与试验监测结果进行热交换管管壁温度对比和管间温度对比.

4.2 热交换管管壁温度对比

由图 7 可见,在系统连续运行 2 h 后实测管壁温度变化渐趋平稳,这与模拟计算结果相似;在系统运行 8 h 后计算结果与现场实测值逐渐靠拢,直至试验结束,最大误差为 3.10%.

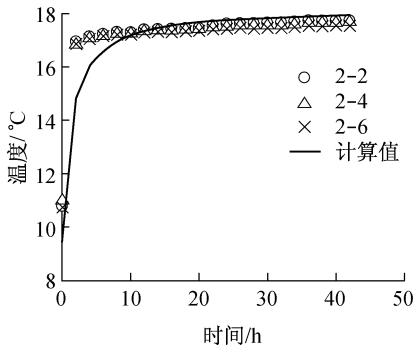


图 7 管壁温度变化对比

Fig. 7 Comparison of temperatures of pipe walls

计算所得的管壁温度在初始时刻略低于试验值的主要原因:在试验之前为检验热交换管有无漏水或压瘪预先进行了压水试验,并且在试验设备启动初期由于水流不稳各温度传感器的测量值并未记录,但管壁温度却由于循环介质的流动而有所升高,这造成了试验数据记录的零时刻管壁温度较计算值略微偏高.

4.3 热交换管管间温度对比

由于有限元计算结果中热交换管两两之间的中点处温度相差很小,因此仅选取其中 1 个计算节点处的温度计算值与实测值进行对比,结果如图 8. 由

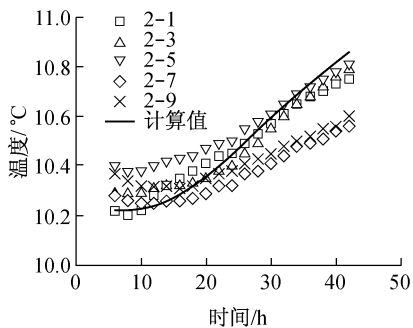


图 8 管间温度对比

Fig. 8 Comparison of temperatures between pipes

图 8 可见,管间温度的提升速率由小而大,在运行初期管间温度升幅很小,但在系统运行 8 h 后管间温度上升速率逐渐加大,试验结果和计算结果规律完全相同.

造成管间温度提升速率由小变大的原因主要是因为热交换管在持续的换热过程中其温度影响范围逐渐扩大:当运行时间较短时,由于热交换管的温度影响范围还未达到管间中点处,管间温度的提升并不明显;当系统持续运行 8 h 后,热交换管的温度影响范围逐渐扩展至管间中点处,因而其温度的提升速率逐渐加大.

5 埋管间距优化

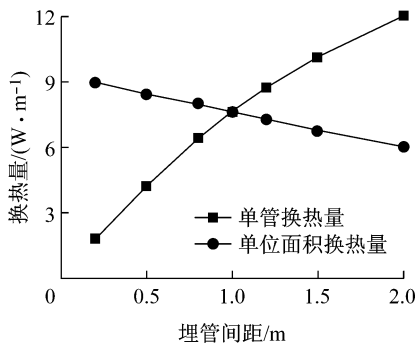
埋管间距的优化依据经济最优原则,即达到预定工作要求的情况下造价最低.

根据隧道实地气温监测数据可将当地气温 $T(t)$ 随时间的变化拟合为正弦函数,如式(5):

$$T(t) = 1.61 + 21.04 \sin\left(9.28 + \frac{2\pi t}{365}\right) \quad (5)$$

将此温度波动函数施加至计算模型的洞内计算隧道洞口段温度场得到隧道洞口段每年的加热天数为 120 d,并由前期设计可知隧道所需加热功率为 50 kW.

由以上的预定工作条件即可确定地源热泵系统取热段不同埋管间距下每延米热交换管所能提供的最大换热量,如图 9a. 由图 9a 可知,随着管间距的增大,单根热交换管的换热量随之增大,而单位面积围岩的换热量却随之逐渐减小.反映到造价上,则热交换管的管材费随埋管间距增大而减少,而保温隔热材料的费用却与之相反,随埋管间距的增大而增大.因此需计算取热段的总造价以获得一最优埋管间距.



a 换热量

b 总造价

图 9 埋管间距的影响

Fig. 9 Effect of pipe distance

由图9b可知,埋管间距介于0.5~0.8 m时取热段的造价最低,而超出这一范围无论埋管间距是更大还是更小,取热段的总造价都将会大大增加,因此热交换管的最优间距为0.5~0.8 m,埋管的单管换热量为 $4.2\sim 6.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$,单位面积换热量为 $8.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右。

6 结论

(1)在热交换管换热过程的有限元计算中,由于初始温度场的复杂性,必须先通过稳态热分析得到一较为贴近实际的初始温度场,基于此的导热系数反演则为确定较为复杂的岩体各项热物性参数提供了一种简便易行的方法。

(2)在瞬态传热计算中,将反演出的岩体热物性参数代入计算,得到了与试验监测数据较为吻合的温度场。其中管壁温度在系统运行2 h后很快达到了稳定,而管间温度却在系统运行初期缓慢爬升后提升速率逐渐加大,主要是由于热交换管的温度影响范围扩展至管间中点需要一段时间所致。

(3)利用反演所得参数在保证预定工作时间以及供热功率的前提下,通过有限元计算得到不同埋管间距下热交换管的换热量,进而计算出取热段的总造价,依据经济最优原则,最终确定最优埋管间距为0.5~0.8 m。此时埋管的单管换热量为 $4.2\sim 6.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$,单位面积换热量为 $8.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右。

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] Adam D, Markiewicz R. Energy from earth-coupled structures, foundation, tunnel and sewers [J]. Geotechnique, 2009, 59(3): 229.
- [4] Ialam M S, Fukuhara T, Watanabe H, et al. Horizontal U-tube road heating system using tunnel ground heat[J]. Journal of Snow Engineering of Japan, 2006, 22(3):23.
- [5] Ialam M S, Fukuhara T, Watanabe H. Simplified heat transfer model of horizontal u-tube(HUT) system[J]. Journal of Snow Engineering of Japan, 2007, 23(3):232.
- [6] 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.
- [7] 曹诗定.能源地铁站主要热交换构件传热计算方法研究[D].上海:同济大学,2009.
CAO Shiding. Study on the calculation method of main heat-exchangers in energy subway station [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50366—2009 地源热泵系统工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50366—2009 Technical code for ground-source heat pump system [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [9] Li X, Chen Y, Chen Z, et al. Thermal performances of different types of underground heat exchangers[J]. Energy and Building, 2006, 38(5):543.
- [10] Hamada Y, Saitoh H, Nakamura M, et al. Field performance of an energy pile system for space heating [J]. Energy and Building, 2007, 39(5):517.
- [11] Gao J, Zhang X, Liu J, et al. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: a case study[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28:2295.
- [12] Saeed Moaveni.有限元分析——ANSYS理论与应用[M].3版.王崧,刘丽娟,董春敏,译.北京:电子工业出版社,2009.
Saeed Moaveni. Finite element analysis—theory and application with ANSYS [M]. 3rd ed. Translated by WANG Song, LIU Lijuan, DONG Chunmin. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [13] Ozisik M N. Heat conduction[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1980.
- [14] 闫治国.隧道衬砌结构火灾高温力学行为及耐火方法研究[D].上海:同济大学,2007.
YAN Zhiguo. A study on mechanical behaviors and fireproof methods of tunnel lining structure during and after fire scenarios[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [15] 肖建庄,宋志文,张枫.混凝土导热系数试验与分析[J].建筑材料学报,2010,13(1):17.
XIAO Jianzhuang, SONG Zhiwen, ZHANG Feng. An experimental study on thermal conductivity of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2010,13(1):17.