

文章编号: 1671-6612 (2020) 01-039-10

综合管廊地埋管换热器的全年运行特性分析

李思茹 袁艳平 曹晓玲 孙亮亮 向波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 建立综合管廊地埋管换热器的二维非稳态传热数理模型,并以寒冷地区的城市西安为例,通过模拟计算得到管廊内地埋管埋设的管长和管间距的最优组合,即管间距为0.75m,管长为67m。采用最优间距和管长的组合对地埋管换热器进行了全年周期的模拟计算,得出结论如下:供冷期内,地埋管的单位管长换热量变化范围为170~210W/m,采暖期内,地埋管的单位管长换热量变化范围125~170W/m;管廊混凝土结构的顶板、侧壁及底板的温度变化趋势不一致,距离地面越近则受到地表气温的影响越大;全年运行过程中,有地埋管运行时管廊内空气的出口温度与无地埋管运行时的差值最大为1.3℃,可见地埋管在管廊壁面内长期运行时对管廊内空气温度造成的影响很小,且不会对管廊内的通风系统造成影响。

【关键词】 地热能;地源热泵;综合管廊;全年运行;数值模拟

中图分类号 TK529 文献标识码 A

Annual Operation Characteristic Analysis of Buried Pipe Heat Exchanger in Utility Tunnel

Li Siru Yuan Yanping Cao Xiaoling Sun Liangliang Xiang Bo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 A two-dimensional unsteady heat transfer mathematical model of the buried pipe heat exchanger in utility tunnel is established. Taking Xi'an in cold area as an example, the optimal combination of the buried pipe length and the pipe spacing in utility tunnel is obtained by simulation calculation, that is, the pipe spacing is 0.75 m and the pipe length is 67 m. The result shows, during the cooling period, the change range of heat flux of unit pipe is 170-210 W/m, while the change range during the heating period is 125-170 W/m. The temperature variation trend of concrete roof, side wall and floor of concrete structure of utility tunnel is not consistent. The closer the concrete is to the ground, the greater the influence of surface temperature on concrete is. During the whole year's operation, the maximum difference between the outlet temperature of air in utility tunnel with buried pipes and that without buried pipes is 1.3 C. It turns out that the long-term operation of buried pipes in the concrete structure has little effect on the air temperature in utility tunnel, and has no effect on ventilation system in utility tunnel.

【Keywords】 geothermal energy; geothermal heat pump; utility tunnel; full-year operation; numerical simulation

基金项目: 建筑环境与能源高效利用四川省青年科技创新研究团队项目(2015TD0015)

作者简介: 李思茹(1994.4-),女,在读硕士研究生, E-mail: 949455482@qq.com

通讯作者: 曹晓玲(1984.8-),女,博士,工程师, E-mail: xlcao@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-10

0 引言

二十一世纪初,由于节省地下空间,且绿色无污染的优点,能源地下结构在国内逐渐得到研究和

运用。能源地下结构是由传统地源热泵技术引申而来的一种崭新的建筑节能技术,它的原理是将地埋管直接埋入地下建筑结构内,与地下工程部分结构

一起形成地下换热器,进而吸收地下工程内及其围岩的热量供地上建筑使用^[1],系统运行更加稳定,且维修费用低。

目前能源地下结构主要有四种类型:能源桩、能源连续墙、能源隧道和能源管廊。

2008年, J Gao^[2]等对能源桩中埋管内的布置形式以及管内流体流速进行了换热能力的比较分析,其中埋管形式包括 W 型、单 U 型、双 U 型和三 U 型,流速依次为低速、中等速度以及高速,研究得出了中等流速下的 W 型管的换热效果是最高的并将其投入了运用。2009年, D Adam 等^[3]从埋管的换热量和成本这两个方面对地下连续墙内埋管的间距进行了优化,提出了针对 LT44 电厂几何、经济条件下的最佳埋管间距。2012年,张国柱等人^[4]通过在寒区公路隧道中的岩土热响应试验对寒区能源隧道内地埋管的入口水温、流体流速及管间距进行了影响因素分析;之后,夏才初等人^[5]在此基础上对寒区能源隧道内地埋管的管间距进行了优化分析,得到了最优埋管间距区间: 0.5~0.8m。同年,谈昊晨^[6]分析了土层热物性、埋管间距和布置方式对垂直埋管换热器换热的影响作用。2014年, Duncan P Nicholson 等人^[7]对英国横贯铁路工程进行了详细的能源隧道的系统设计,其中包括埋管的管径、在隧道衬砌内布置的管间距、布置形式以及成本等参数的设计计算,并给出建议:为了减小隧道内自然灾害对埋管换热器的影响,埋管在隧道衬砌内埋设的位置最好距离隧道内壁 200mm 以上。2016年,刘胜^[8]对围岩热物性对隧道衬砌热交换器换热特性的影响进行了研究分析,得出了以下结论:围岩比热容的增加有助于增加埋管的换热量,但是其影响具有时效性,建议埋管换热器采用间歇运行模式。

2013年至2016年,青岛理工大学的赵蕊^[9]和孙福杰^[10]分别对隧道内的毛细管换热器进行了长期的模拟计算,但是均将围岩的温度视为定值,且能源隧道与能源管廊虽然均为能源地下结构,但由于建筑功能的差异性,研究成果也不一定具有普适性,因此应当针对管廊混凝土结构内的埋管换热器进行全年周期的研究分析。

1 系统构成

综合管廊埋管换热系统是由埋管换热器、

分水管、集水管、热泵机组及与用户相连的供回水管道组成,系统原理如图 1 所示。其中埋管换热器是将埋管埋设在综合管廊四壁的混凝土结构内组成的地下换热器。

系统夏季时通过埋管吸收管廊围岩的冷量,并在综合管廊内设置能源站,能源站内设置热泵机组,通过热泵机组将冷量提升后为建筑供冷,冬季则吸收热量为周围建筑供热。由于埋管埋设在管廊混凝土结构中,因此系统运行更稳定可靠,且维修费用低。

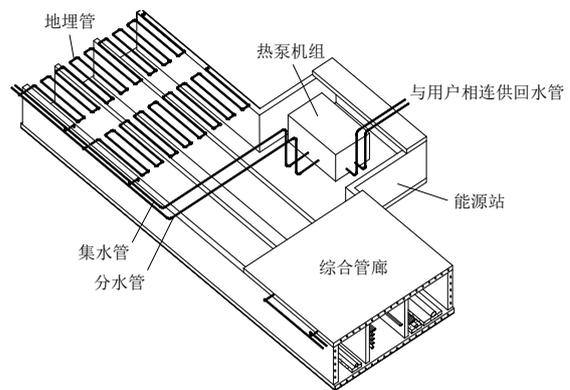


图 1 综合管廊埋管换热系统原理图

Fig.1 Schematic of GSHP in utility tunnel

2 埋管换热器数理模型的建立

本文建立了埋管内流体传热模型、管廊内空气传热模型及混凝土和土壤的耦合传热模型。埋管内流体传热模型与混凝土、土壤传热模型通过埋管内壁的第三类边界条件耦合;管廊内空气传热模型与混凝土、土壤传热模型通过管廊内壁的第三类边界条件进行耦合。

2.1 埋管换热器物理模型的建立

由于埋管与综合管廊的混凝土结构及土壤的换热是一个复杂的过程,为简化其传热模型,做出以下假设:

(1) 埋管内流体流速恒定,且流体温度仅沿轴向变化,径向温度分布一致;

(2) 埋管、管内流体、管廊内空气、现浇混凝土结构及土壤的物性参数不随温度变化;

(3) 忽略埋管和综合管廊混凝土结构及混凝土和围岩之间的接触热阻;

(4) 不考虑热湿迁移的影响,认为土壤的传热为纯导热问题。

基于以上假设, 取综合管廊的一个舱室进行研究, 管廊位置取地下三米深度, 在舱室顶板、侧壁及底板的混凝土结构内分别布置 25mm 的埋管, 管间距为 0.5m, 模型示意图如图 2 所示。

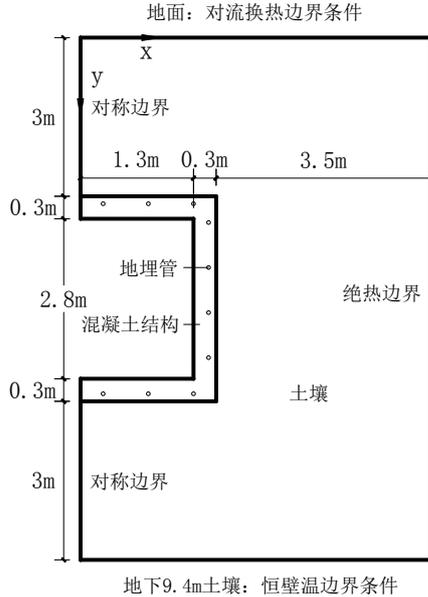


图 2 埋管换热器传热物理模型示意图

Fig.2 Physical model of ground heat exchanger

2.2 埋管换热器传热数学模型

2.2.1 土壤及混凝土传热数学模型

将混凝土和土壤的传热视为纯导热过程, 其传热的控制方程为如式 1、2 所示, 模型的边界条件设置如图 2 所示。

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho_h c_h \frac{\partial T_h}{\partial t} = \lambda_h \left(\frac{\partial^2 T_h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_h}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

式中, T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; s 代表土壤; h 代表混凝土。

2.2.2 埋管内流体传热数学模型

将埋管内流体分成若干个微元体, 每个微元体长度为 dx 。埋管内微元体的能量守恒方程如下^[11]。

$$\frac{\partial T_w(x,t)}{\partial t} + v_w \frac{\partial T_w(x,t)}{\partial x} = \frac{p_g h_w}{\rho_w A_g c_w} [T_g(x,t) - T_w(x,t)] \quad (3)$$

式中, x 为沿埋管轴向的距离, m ; t 为时间, s ; p_g 为埋管横断面周长, m ; h_w 为流体与管壁

的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; ρ_w 为流体的密度, kg/m^3 ; A_g 为埋管的横截面积, m^2 ; c_w 为流体的定压比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

将上述方程等号右侧部分视为源项, 得到离散方程形式为:

$$T^{t+\Delta t}(P) = T^t(P) + \frac{A_g v_w [T^{t+\Delta t}(W) - T^{t+\Delta t}(E)] + S_w \Delta x \Delta t}{A_g \cdot \Delta x} \quad (4)$$

$$\text{其中, } S_w = \frac{h_w p_g (t_g - t_w)}{c_w \rho_w}。$$

2.2.3 管廊内空气传热数学模型

管廊内空气传热数学模型与埋管内流体传热模型原理一致, 区别之处在于管廊内有管线会散热, 因此空气传热模型在埋管传热模型的基础上增加了内热源项 Q , 离散方程这里不再赘述。

2.3 计算参数

2.3.1 综合管廊内空气风速的确定

根据 GB 50838—2015 《城市综合管廊工程技术规范》第 7.2.2 条规定^[12], “综合管廊的通风量应符合下列规定: 一般舱室正常通风次数不小于 2 次/h, 天然气管道舱正常通风换气次数不应小于 6 次/h”, 这里选取最低通风次数 2 次/h。取 50m 长度的管廊作为研究对象, 通过公式 (5) 计算得到管廊内空气风速为 0.028m/s。

$$v_a = \frac{n_g \times V_g}{A_g \times 3600} \quad (5)$$

式中, v_a 为管廊内空气的风, m/s ; n_g 为管廊的通风次数, h^{-1} ; V_g 为管廊的内体积, m^3 ; A_g 为管廊的横截面积, m^2 。

2.3.2 综合管廊舱室散热量计算

综合管廊是用于容纳各种类型工程管线的地下隧道空间, 可容纳电力、通信、供热、给排水、燃气等管线, 而各种管线在运行时会散发一定热量, 从而升高管廊内的气温。在不同类型的舱室内, 电力管道及热力管道的散热量相对较高, 下面对电缆舱及热力舱的散热量进行计算。

(1) 电缆舱

选取上海某综合管廊的电缆舱作为研究对象, 舱室内共布置 10 回 110kV 电缆, 分层布置在电缆舱两侧, 如图 3 中右侧舱室所示。取 110kV 电缆热流量近似为 $18\text{W}/\text{m}^2$ ^[13], 将 10 回电缆等效为 10 个半径为 160mm 的圆柱体, 根据文献^[14], 电缆单位长度热流量为:

$$Q = n \cdot A_l \cdot q \quad (6)$$

式中, Q 为电缆散热量, W; n 为电缆数量; A_l 为单根电缆表面积, m^2 ; q 为单位面积的单根电缆散热量, W/m^2 ;

根据上式计算得到电缆舱内管线单位长度的散热量 Q 为 181W/m。

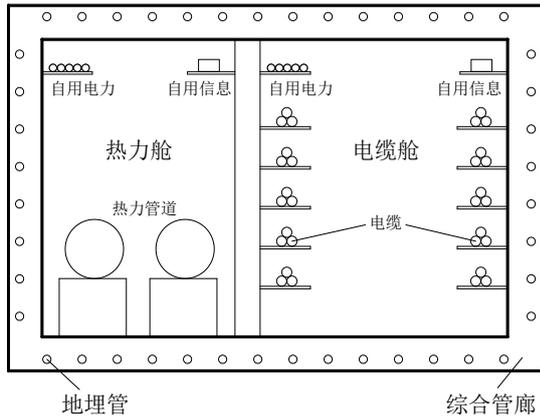


图3 不同舱室布置示意图

Fig.3 The arrangement of different cabins

(2) 热力舱

热力舱中的热力管道主要包括热水管道、蒸汽管道等, 此处假定热力舱内有两根 DN800 预制聚氨酯保温热力管道, 布置方式如图 3 中左侧舱室所示。根据 GB 50838—2015 《城市综合管廊工程技术规范》第 6.5.3 条规定^[12], “管道及附件保温结构的表面温度不得超过 50℃”, 因此取管道表面温度为极限温度 50℃。

将空气与热力管道的传热过程视为纵掠平壁对流换热, 取舱内通风次数为 2 次/h, 即空气流速为 0.028m/s, 计算得到单位长度热力舱内管道的散热量为 11.5W/m。

由上述计算可看出, 电缆舱内管线的散热量远高于热力舱的散热量, 因此采用电缆舱的散热量进行后续的计算。

2.3.3 材料的物性参数

计算中所用到材料的物性参数如表 1 所示。

表 1 材料物性参数

材料	密度	比热	导热系数
土壤	1985	1190	1.76
混凝土	2400	840	2.8

PE 管	1230	1510	0.35
------	------	------	------

2.3.4 土壤初始温度

由于综合管廊位于地下三米左右的深度, 处于地下变温带内, 即会受到地表太阳辐射等气候因素的影响, 所以在土壤初始温度设置时需考虑温度分层现象。本文以寒冷地区西安的夏季工况为例, 通过不同深度处土壤的计算公式^[15]计算得到不同深度处的土壤温度如表 2 所示。

表 2 夏季西安土壤温度分布

Table 2 Soil temperature distribution of Xi'an in summer

土壤深度/m	夏季土壤初始温度/℃
0-1	28.2
1-2	24.2
2-3	20.8
3-6.4	17.0
6.4-9.4	14.6

2.4 求解方法

利用 GAMBIT 软件建立地理管内流体、管廊内空气与混凝土结构及土壤耦合换热的二维物理模型, 并利用对称的边界条件对其进行简化, 计算以有限体积法为基础, 使用软件 Fluent 6.3.26 进行。土壤及混凝土传热的能量及动量方程均采用二阶迎风格式进行离散, 采用 Standard 进行压力校正, 压力速度耦合采用 PISO 算法。

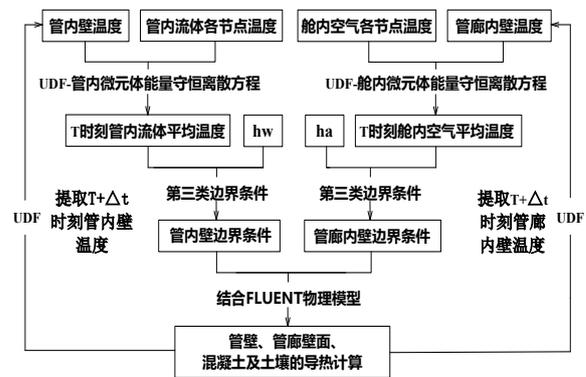


图 4 计算流程图

Fig.4 Flowchart of calculation

将地理管内流体传热数学模型、管廊内空气传热数学模型及混凝土和土壤的传热数学模型进行耦合计算, 具体计算过程如图 4 流程图所示。通过网格无关性验证和时间步长无关性验证分别确定网格数量为 371134, 时间步长为 20s。

2.5 模型验证

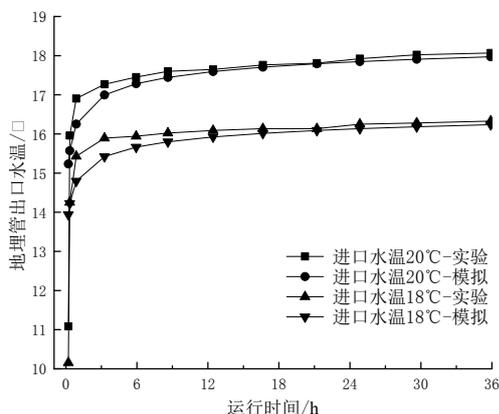


图 5 埋地管出口水温对比

Fig.5 Comparison of outlet water temperatures

以张国柱在布置有埋地管的寒区隧道中所做岩土热响应实验^[4]的数据来验证本研究中数值计算方法的准确性。按照其实验条件,分别计算埋地管内流体进口水温为 18℃和 20℃的工况,得到流体的出口水温,并将其与实验中流体的出口水温进行比较,拟合情况如图 5 所示。

从图 5 中可看出在不同的进口水温工况下,随着运行时间的增加,模拟值与实测值逐渐接近,系统运行 18h 以后,模拟值与实测值的误差小于 1%,证实了本研究中数值模拟方法的准确性。

而在系统运行初期,埋地管出口水温的模拟值与实测值误差较大,造成误差可能的原因如下:

(1) 模拟计算中未考虑隧道内复合式防水板的隔热效果对埋地管换热器的限制作用,因此在运行初期模拟计算的埋地管出口水温比实验值低;

(2) 模拟计算中忽略了埋地管与隧道初衬之间的接触热阻,因此模拟工况下埋地管的进出口温差比实验工况要大。

3 埋地管换热器全年运行特性分析

3.1 计算参数确认

3.1.1 管长和管间距最优值的确认

埋地管布置的疏密程度和埋地管的长度都会直接影响到其换热能力,一般来说管间距越大,单根埋地管的单位管长换热量则越大;而随着管长的增大,埋地管的单位管长换热量呈现先增大后减小的趋势。本文将埋地管的管间距和管长进行组合优化,采用管外径为 25mm 的 PE 管,取总长 600m

的埋地管,即总换热面积为 47m²,选取合适的管间距和管长组合如表 3 所示,并在相同的工况下进行模拟计算。

表 3 埋地管管间距和管长优化组合

Table 3 The combination of pipe spacing and length		
埋地管间距/m	埋地管管根数	埋地管管长/m
0.25	24	25
0.50	12	50
0.75	9	67
1.0	7	86
1.25	6	100

(1) 埋地管的换热性能

将各管间距和长度的埋地管组合进行为期 15 天的模拟计算,得到埋地管的单位管长换热量随埋地管间距的变化情况如图 6 所示。

从图中可以看出,随着运行时间的增加,在相同的埋地管换热面积下,随着管间距的增大,亦即埋地管管长的增加,埋地管的单位管长换热量是逐渐增大的。埋地管管间距值分别为 0.25m、0.5m、0.75m、1.0m 和 1.25m 时,两个相邻点之间的埋地管单位管长换热量的差值依次为 41.77W/m, 14.52W/m, 4.84W/m 和 0.42W/m,可以看出埋地管间距和管长的增大对埋地管单位管长换热量的增强效果是逐渐减弱的。从图 6 中可看出,当地埋管间距大于 0.75m 以后,曲线出现明显的拐点,埋地管换热量的增长速率明显减慢,而且随着管间距的不断增大,单位长度管廊内埋设得埋地管根数减少,经济性变差,因此不能无限增大埋地管的间距。

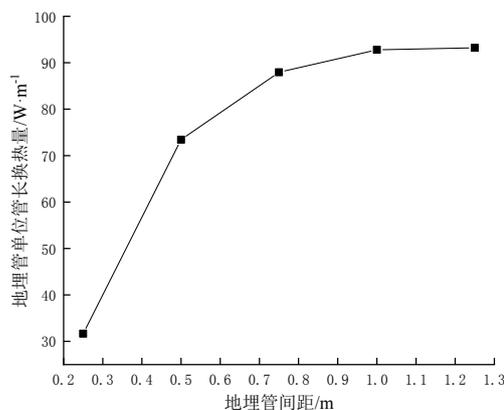


图 6 埋地管单位管长换热量随管间距的变化

Fig.6 Variation of heat flux of unit pipe with pipe spacing

(2) 管廊内气温变化

不同管长和管间距组合下,管廊内空气的出口

温度如图 7 所示。

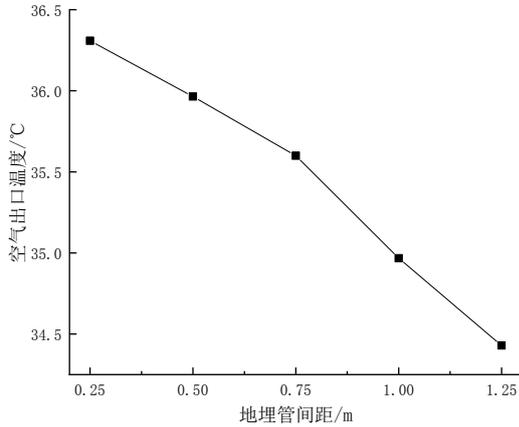


图 7 空气出口温度随时间的变化

Fig.7 Variation of air outlet temperature with pipe spacing

从图 7 中可以看出，随着地埋管间距的不断增大，管廊内空气的出口温度逐渐降低。这是由于地埋管间距越小，管廊内壁温度升高的就越快，且达到稳定后的温度越高，因此混凝土结构对管廊内空气的冷却效果则较差，从而空气出口温度偏高，反之亦然。

综合以上两个参数，可见随着地埋管管间距和管长的增大，地埋管的单位管长换热量逐渐增大，管廊内空气的出口温度逐渐降低，地埋管换热面积可以进行组合优化，这里选取管间距为 0.75m，管长为 67m 为最优组合。

3.1.2 运行参数的设置

本章在之前得出的管长和管间距最优值的基础上，对综合管廊地埋管换热器进行全年周期内的模拟计算，探究全年不同运行阶段地埋管的换热性能、围岩温度场的变化以及地埋管在混凝土内运行对管廊内气温的长期影响。地埋管换热器采用 1:1 的启停比进行全年四个不同运行阶段的模拟计算，同时为了更直观地观察地埋管的运行对管廊围岩的温度场和管廊内空气温度所造成的影响，选取对照组——供冷期和采暖期内无地埋管进行换热的工况进行对比分析。

各参数设置见表 4^[16,17]，并分别在管廊顶板、侧壁和底板外壁中心设置测点，监测全年四个运行阶段内不同位置处混凝土的温度变化情况。

表 4 运行参数设置

Table 4 Running parameter setting

季节	月份	天数	气温 /°C	地埋管进出口水温/°C
供冷期	6.16-8.31	77	25.3	38
过渡期 1	9.1-11.14	74	16.7	—
采暖期	11.15-2.28	106	2.5	3
过渡期 2	3.1-6.15	107	14.2	—

3.2 供冷期运行特性分析

3.2.1 地埋管的换热性能

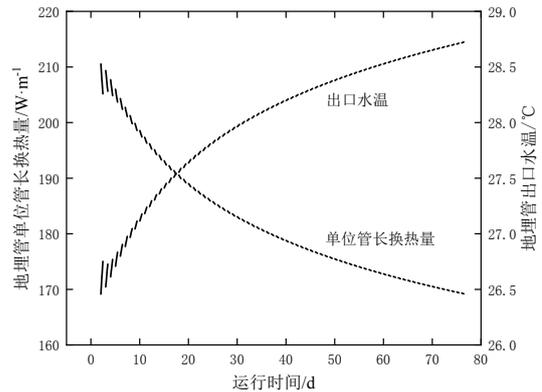


图 8 地埋管出口水温和换热量随时间的变化

Fig.8 Variation of outlet water temperature and heat flux of buried pipe with time

从图 8 中可以看出，在制冷工况下，地埋管的出口水温随运行时间的增加逐渐升高，增长趋势逐渐减缓。同时，随着运行时间的增加，地埋管的单位管长换热量逐渐降低但降低的速率逐渐减小，供冷期结束时，地埋管换热器单位管长换热量为 170W/m。

3.2.2 混凝土的温度

供冷期内不同位置处混凝土外壁的温度随时间的变化曲线如图 9 所示。

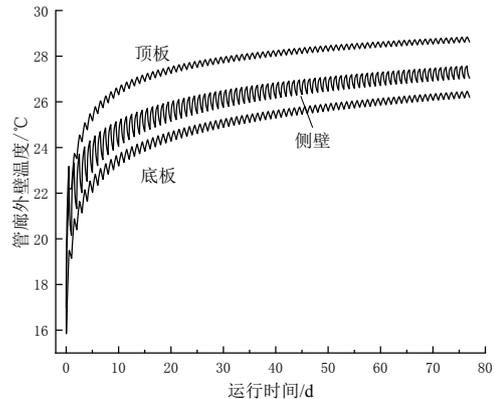


图 9 管廊外壁温度随时间的变化

Fig.9 Variation of outer wall temperature of concrete with time

从图 9 可以直观地看出供冷期内各位置处混

凝土的温度均成升高趋势,且管廊顶板外壁温度的升高幅度显然大于侧壁和底板。供冷期结束后,管廊顶板外壁测点温度为 28.63℃,侧壁和底板外壁温度依次为 27.04℃和 26.20℃,顶板温度比侧壁高 1.59℃,比底板温度高 2.43℃。这是由于顶板位于地下 3m 深度,周围土壤温度较高,因此降温效果较差,顶板的温度较高;而底板位于地下 6.4m 的深度,虽未达到恒温带,但是周围土壤温度较低,对混凝土的降温效果较好,因此管廊外壁温度较低,而管廊侧壁的温度则介于顶板和底板之间。

3.2.3 管廊内的空气温度

图 10 为供冷期内管廊混凝土结构中有地理管和无地理管运行工况下综合管廊内空气出口温度的对比。

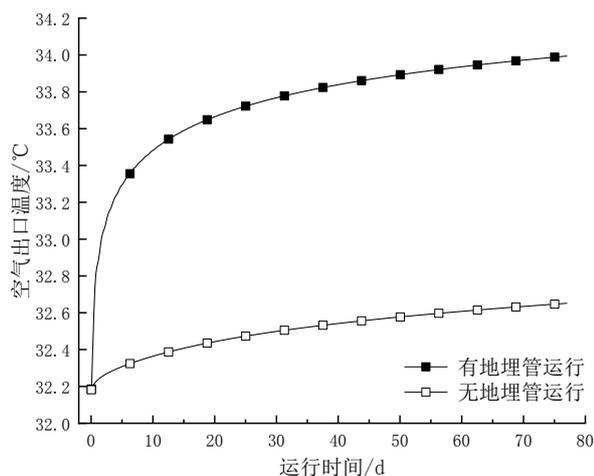


图 10 管廊内空气出口温度随时间的变化

Fig.10 Variation of air outlet temperature with time

从图 10 可以看出管廊内空气的出口温度是随运行时间的增加逐渐升高的。这是由于在系统运行之初,混凝土的温度低于管廊内被管线加热后的空气温度,所以混凝土是为管廊内空气降温的。当管廊混凝土结构内有地理管运行时,混凝土结构被地理管加热,其温度随着运行时间的增加而逐渐升高,所以混凝土为管廊内空气降温的效果逐渐减弱,因此空气出口温度逐渐升高。

而当管廊内无地理管运行时混凝土的温度相对较低,所以为管廊内空气降温的效果相对较好,因此空气的出口温度也相对较低,比较如图 10 中所示,供冷期运行结束后有地理管运行时的空气出口温度比无地理管运行时高 1.3℃。

3.3 过渡期 1—秋季运行特性分析

3.3.1 混凝土温度变化

秋季恢复期内,三个不同位置处管廊外壁的温度变化曲线如图 11 所示。从图中可以看出,混凝土的温度均随运行时间的增加逐渐降低。秋季围岩恢复之初管廊顶板外壁测点温度为 28.6℃,恢复结束后温度降为 18.8℃,降幅为 9.8℃,侧壁和底板的温度降幅依次为 7.1℃和 6.8℃。

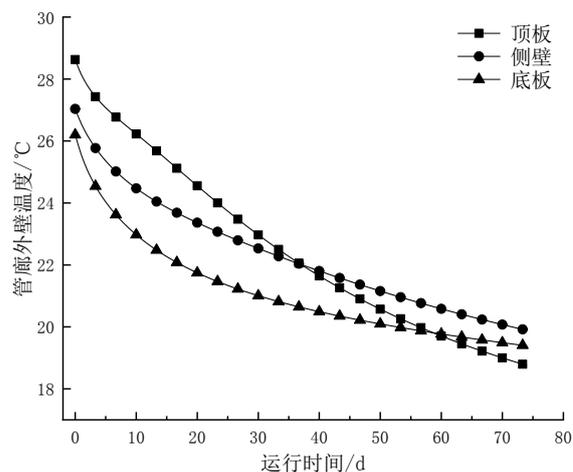


图 11 管廊外壁温度随时间的变化

Fig.11 Variation of outer wall temperature of concrete with time

从图 11 可看出顶板、侧壁和底板的温度变化趋势是不一致的,顶板的下降速率明显大于侧壁和底板,而初始温度值又高于顶板和侧壁,因此曲线存在交叉。这是由于夏季运行结束时管廊顶板的温度是最高的,底板的最低,秋季恢复期内,地表的空气温度降低,因此受空气温度影响最大的顶板的温度下降幅度最大,且秋季结束后温度最低。而秋季恢复结束后管廊底板的温度低于侧壁,这是由于底板的位置虽然远离地表空气,但是靠近地下恒温带,恒温带内土壤的温度低于供冷期内被地理管加热后混凝土的温度,因此为混凝土底板起到了快速降温的作用。综合上述两条原因,由于未能得到较好的降温,因此管廊侧壁的温度下降的较慢且最终温度最高。

3.3.2 管廊内空气温度变化

秋季恢复阶段内,地理管不运行,围岩温度得以恢复,管廊内空气出口温度的变化情况如图 12 所示。

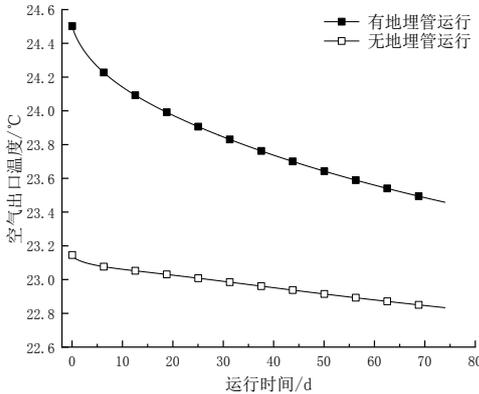


图 12 空气出口温度随时间的变化

Fig.12 Variation of air outlet temperature with time

从图 12 中可看出，过渡期 1—秋季内管廊内空气的出口温度随运行时间的增加逐渐降低。这是由于秋季时管廊内空气温度较低，而管廊的混凝土结构经过夏季地理管的加热后温度较高，所以管廊内空气被混凝土加热。而随着围岩恢复时间的增加，混凝土中的热量逐渐传给周围土壤，温度逐渐降低，因此为管廊内空气加热的效果逐渐减弱，空气出口温度逐渐降低。

有地理管运行时，由于夏季地理管运行时混凝土及围岩蓄存了一定的热量，秋季运行时混凝土的温度高于无地理管运行时的温度，混凝土对空气的加热作用也就大于无地理管运行的对照组，因此管廊内空气的出口温度较高，秋季恢复结束后有地理管运行时的空气出口温度比无地理管运行时高 0.6 °C。

3.4 采暖期运行特性分析

3.4.1 地理管的换热性能

图 13 为采暖期地理管的出口水温 and 单位管长换热量随时间的变化曲线图。

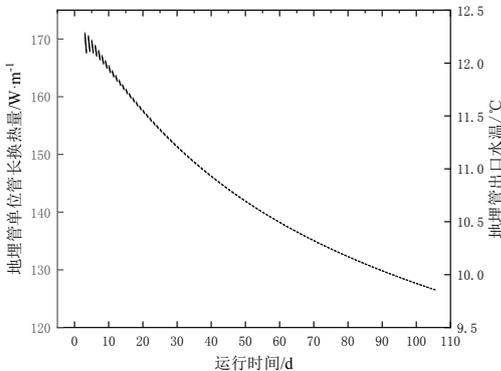


图 13 地理管出口水温和单位管长换热量随时间的变化

Fig.13 Variation of outlet water temperature and heat flux of buried pipe with time

由图可见，地理管换热器运行过程中，地理管的出口水温和单位管长换热量均随着运行时间的增加逐渐降低，降低的趋势随时间的增加逐渐减缓，运行至冬季结束时，地理管换热器单位管长换热量为 127W/m。

3.4.2 混凝土温度变化

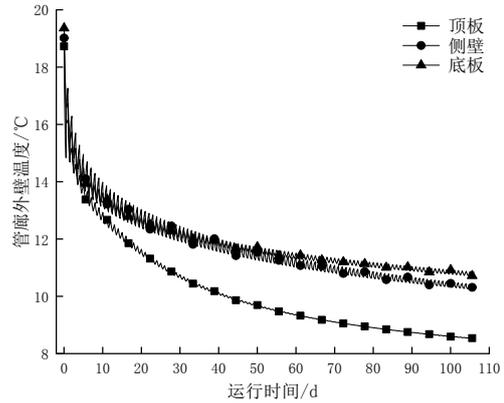


图 14 管廊外壁温度随时间的变化

Fig.14 Variation of outer wall temperature of concrete with time

从图 14 中可以直观地看出管廊顶板外壁温度下降的幅度明显大于侧壁和底板，采暖期运行结束时，管廊顶板、侧壁和底板外壁测点的温度分别为 8.52°C，10.41°C 和 10.85°C，顶板温度比侧壁低 1.89°C，比底板温度低 2.33°C。这种差距产生的原因与供冷期一致，采暖期内，地表空气温度很低，而管廊的混凝土结构距离地面越近则受地表气温影响越大，所以管廊顶板温度的下降幅度依次大于侧壁和底板。

3.4.3 管廊内空气温度变化

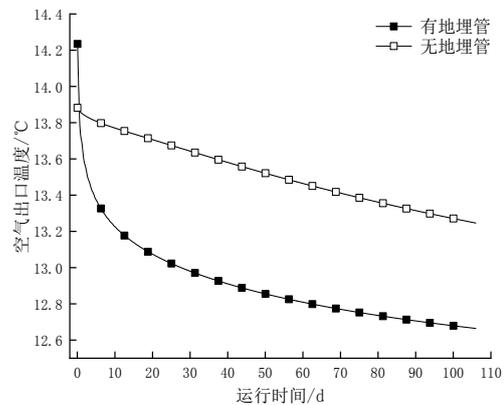


图 15 空气出口温度随时间的变化

Fig.15 Variation of air outlet temperature with time

从图 15 中看出，管廊内空气的出口温度是随

运行时间的增加逐渐降低的,且温度低于无埋管运行时的空气出口温度。这是由于采暖期内空气温度很低,而混凝土的温度相对较高,管廊内空气是被混凝土加热的。但随着运行时间的增加,混凝土温度不断降低,为空气的加热作用逐渐减弱,所以空气出口温度逐渐降低。

而有埋管运行时埋管会释放冷量使混凝土的温度低于无埋管运行时的温度,所以有埋管运行时混凝土为管廊内空气的加热作用较弱,空气出口温度低于无埋管运行时的空气出口温度,采暖期结束时有埋管运行时管廊内空气的出口温度比无埋管运行时低 0.6°C 。

3.5 过渡期 2—春季运行特性分析

3.5.1 混凝土温度变化

图 16 为过渡期 2—春季时不同位置处混凝土外壁测点的温度变化曲线。

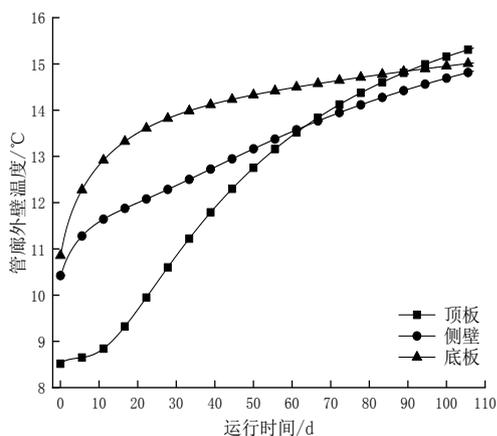


图 16 管廊外壁温度随时间的变化

Fig.16 Variation of outer wall temperature of concrete with time

从图 16 可以看出,春季恢复结束后,管廊不同位置处外壁的温度逐渐升高。这是由于春季空气的加热作用使土壤温度得到恢复,而不同位置处外壁温度升高的速度不同,其中顶板大于侧壁大于底板。这是由于管廊的顶板位置更靠近地表,受空气温度的影响最大,因此在春季时温度升高地最快,反之,底板则最慢,侧壁介于两者之间。

3.5.2 管廊内空气温度变化

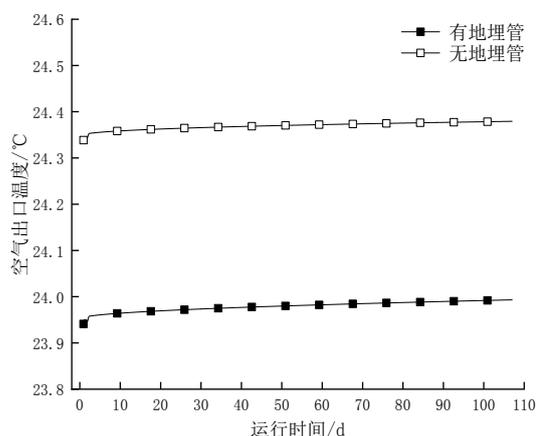


图 17 空气出口温度随时间的变化

Fig.17 Variation of air outlet temperature with time

从图 17 中可看出,过渡期 2—春季内管廊内空气的出口温度随运行时间的增加逐渐升高。这是由于春季时空气温度较高,而管廊的混凝土结构经过冬季埋管吸收热量后温度较低,所以管廊内空气被混凝土降温。而随着围岩温度逐渐升高,混凝土逐渐吸收周围土壤和地表空气的热量,温度逐渐升高,因此为管廊内空气降温的效果逐渐减弱,空气出口温度逐渐升高。

有埋管运行时,由于冬季运行时混凝土及围岩蓄存了埋管的冷量,春季运行时混凝土的温度低于无埋管运行时的温度,混凝土对空气的降温作用也就大于无埋管运行的对照组,因此管廊内空气的出口温度也就相对较低,春季恢复结束后有埋管运行时管廊内空气的出口温度比无埋管运行时低 0.4°C 。

4 总结

本文建立了综合管廊埋管换热器的二维非稳态传热数理模型,并通过数值模拟计算得出了当前工况下埋管换热器的管间距和管长的最优组合,即管间距为 0.75m ,管长为 67m 。并采用管间距和管长的最优组合,以寒冷地区的西安为例,对综合管廊埋管换热器进行了全年周期的模拟计算,以埋管的换热量,混凝土的温度以及管廊内空气的出口温度这三个参数为指标对埋管换热器在不同运行阶段的传热特性进行了分析,得出结论如下:

(1) 供冷期内,埋管的单位管长换热量变化范围为 $170\sim 210\text{W/m}$,采暖期埋管的单位管

长换热量变化范围 125 ~ 170W/m，地埋管在供冷期的换热量高于采暖期，这是由于所选城市西安为寒冷地区，土壤温度相对较低，因此夏季时的换热量比冬季高；

(2) 管廊顶板、侧壁及底板混凝土的温度变化趋势不一致，距离地面越近则受到地表空气的影响越大；

(3) 在供冷期、过渡期 1（秋季）、采暖期和过渡期 2（春季）内，管廊内的空气依次是被混凝土冷却、加热、加热和冷却的，空气出口温度的变化趋势分别是升高、降低、降低和升高。供冷期和过渡期 1（秋季）内有地埋管运行时空气的出口温度高于无地埋管运行工况，而采暖期和过渡期 2（春季）内地埋管运行时空气的出口温度低于无地埋管运行工况。全年不同阶段内有地埋管运行时空气的出口温度与无地埋管运行时的差值最大为 1.3℃，可见地埋管换热器在管廊混凝土结构内的全年运行对管廊内空气温度的影响很小，每个季节系统运行时都不会对管廊内的通风系统造成影响。

参考文献：

- [1] 夏才初, 张国柱, 孙猛. 能源地下结构的理论及应用—地下结构内埋管的地源热泵系统[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- [2] Jun Gao, Xu Zhang, Jun Liu, et al. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17/18): 2295-2304.
- [3] D Adam, R Markiewicz. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers[J]. Geotechnique, 2009, 59(3): 229-236.
- [4] 张国柱, 夏才初, 马绪光, 等. 寒区隧道地源热泵型供热系统岩土热响应试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 99-105.
- [5] 夏才初, 邹一川, 张国柱. 寒区隧道地源热泵加热系统埋管间距优化分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1802-1807.
- [6] 谈昊晨. 岩土热一流耦合模型研究及其在地源热泵埋管换热器中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [7] Duncan P. Nicholson, Qing Chen, et al. The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK[J]. Engineering Sustainability, 2014, 167(ES3): 118-134.
- [8] 刘胜. 围岩热物性对隧道衬砌热交换器换热的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1593-1599.
- [9] 赵蕊. 毛细管壁面换热器应用于地铁环控系统的传热问题研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- [10] 孙福杰. 地铁隧道围岩毛细管热泵系统换热器传热特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [11] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1767-1773.
- [12] GB 50838—2015, 城市综合管廊工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [13] 周游, 伟国. 综合管廊电缆舱通风数值模拟研究[J]. 建筑节能通风空调, 2016, 5(11): 29-33.
- [14] GB 50217—2018, 电力工程电缆设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [15] 《地下建筑暖通空调设计手册》编写组. 地下建筑暖通空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [16] 常青. 基于寿命周期分析的土壤耦合热泵系统区域适宜性评价方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [17] 石维群. 基于地源热泵系统的运行参数优化设计与分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2012.