

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-641-09

内嵌埋管对防护工程口部内空气温湿度度的影响

宋信明 任福胜 葛秀丽 王新广 左 陶 赵乾凤 何长林

(中国人民解放军 66469 部队 北京 100042)

【摘 要】 地埋管具备节能、环保的特点, 可用于处理工程内部余热, 同时埋管换热会对工程口部的空气产生一定影响。为了分析在岩土不同初始温度的情况下, 埋管换热对口部的影响。基于有限元软件, 建立了埋管换热模型, 岩土初温分别取值 14℃、18℃、22℃, 得出了口部内空气的温湿度分布情况。结果发现岩土初温为 14℃、18℃、22℃时, 口部内空气的温度场分布存在一定的差异。在埋管换热的过程中, 口部横截面内的空气从上至下, 温度均出现分层。上层空气温度高于下层的空气温度。而相比较于埋管传入岩土侧的热量, 传入空气的热量很小。埋管换热同样影响了空气的相对湿度, 空气的相对湿度分布与温度分布相反, 研究发现相对湿度的降低有利于口部防潮。

【关键词】 内嵌埋管; 相对湿度; 防护工程

中图分类号 TU96+2 文献标识码 A

Influence of Embedded Pipe on Temperature and Humidity of Protective Engineering Mouth

Song Xinming Ren Fusheng Ge Xiuli Wang Xinguang Zuo Tao Zhao Qianfeng He Changlin

(Unit 66469 of the People's Liberation Army, Beijing, 100042)

【Abstract】 The buried pipe has the characteristics of energy saving and environmental protection, and can be used to deal with the internal waste heat of the project, at the same time the heat transfer of the buried pipe will have a certain impact on the air at the engineering mouth. In order to analyze the influence of buried pipe heat transfer on the mouth under different initial temperature of rock and soil. Based on the finite element software, the heat transfer model of buried pipe was established. The initial temperature of rock and soil was set at 14℃, 18℃ and 22℃ respectively, and the distribution of air temperature and humidity in the mouth was obtained. The results show that when the initial temperature of rock and soil is 14℃, 18℃ and 22℃, the distribution of air temperature field in the mouth is different to some extent. In the process of heat transfer in the buried pipe, the temperature of the air in the cross section of the mouth is stratified from top to bottom. The upper air temperature is higher than the lower air temperature. Compared with the heat into the soil side of the buried pipe, the heat into the air is small. The heat transfer of the buried pipe also affects the relative humidity of the air. The relative humidity distribution of the air is opposite to the temperature distribution. The decrease of the relative humidity is conducive to the moisture-proof of the mouth.

【Keywords】 embedded pipe; Relative humidity; Protection engineering

0 引言

防护工程在运行期间, 内部设备及人员产生的余热较多。为了及时排除内部热量^[1], 部分学者提出了多种解决方案^[2-4]。比如在内部设置巨型水

库, 把热量传入水库中。水库处理余热的效果较好, 但处理能力很有限, 热恢复比较困难。也可以利用水环热泵, 通过水环路将多余的热量转移到工程其他区域, 但是这种方式可靠性还需要进一步的探

作者简介: 宋信明 (1998.09-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, E-mail: xinming19032760797@163.com

通讯作者: 任福胜 (1967.03-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 2654351070@qq.com

收稿日期: 2023-04-27

讨。目前,有学者提出采用地下埋管来处理内部余热。地下埋管因为运行效率高、环保的特点已用于大量的地上建筑^[5-8]。其中,地下能源隧道作为地埋管的一种,近年来已被多位学者研究并应用。Barla et al^[9]基于意大利都灵 1 号地铁线的新建隧道,建立了能源隧道埋管的数值模型,研究了隧道埋管系统的运行效率和长期可持续性。发现隧道衬砌埋管可以极大的利用地下储存热,具有巨大的经济和环境效益。Ogunleye et al^[10]对能源隧道的间歇运行效果进行了研究,发现间歇运行有利于埋管换热效率的提升,对埋管的传热效果起到了很重要的作用。当隧道埋管处于不同的运行阶段时,应选取合适的运行策略,才能使得能源隧道高效运行。Cousin et al^[11]基于巴黎某处隧道,建立了三维能源隧道有限元模型,重点研究隧道埋管的热性能和经济可行性。结果发现增加管内流量可以提高热性能,但流量的连续升高也会导致效率下降。Yang et al^[12]将能源隧道运用在地下隧道中,并对隧道埋管的运行进行了经济分析,发现将埋管用于地下隧道节省了大量的投资以及运行费用,性价比很高。

该型隧道埋管不仅铺设方便,而且换热效果较好。为了处理内部余热,可以将地下能源隧道运用于防护工程,即埋管铺设在工程口部岩土内表面以内,将埋管与工程结构相结合,这样可以极大地利用口部的岩土面积释放内部热量,并节省铺设成本。

防护工程口部经常会受到潮湿的困扰^[13-16],常用的方法是在工程口部处设置除湿机或者在过渡季采取自然通风。然而,如何有效应对工程潮湿问题已是工程的重点问题之一。

内嵌埋管在工程口部运行时,会同时将热量传入周围岩土、口部空气内,空气温度上升之后,相应的相对湿度也会降低,起到了口部防潮的效果。目前没有学者考虑过地埋管换热对地下工程内部空气以及周围土壤温度的影响,分析该部分热量传入空气内对研究工程口部防潮效果至关重要。对此建立地埋管传热模型,分析在不同岩土初始温度条件下空气的温度分布及湿度分布。

1 数学模型

1.1 物理模型

图 1 即为防护工程内嵌埋管的几何模型。图 1

(a) 为内嵌埋管的三维示意图,工程口部全长 50m。该埋管为拱形埋管,并排列在衬砌内部,串联相连,共有一个入口端,一个出口端。如图 1 所示,埋管一排表示一根埋管,埋管实际管数 $N=40$,埋管总长为 744m。

图 1 (b) 为防护工程口部的横截面,工程口部宽 8m,起拱高 4.4m,拱高 1.1m。从图中可知,工程内部为空气,而由空气至模型远边界依次为保温层、二衬、初衬、围岩,初衬与二衬共同组成衬砌,埋管埋设于初衬内部。

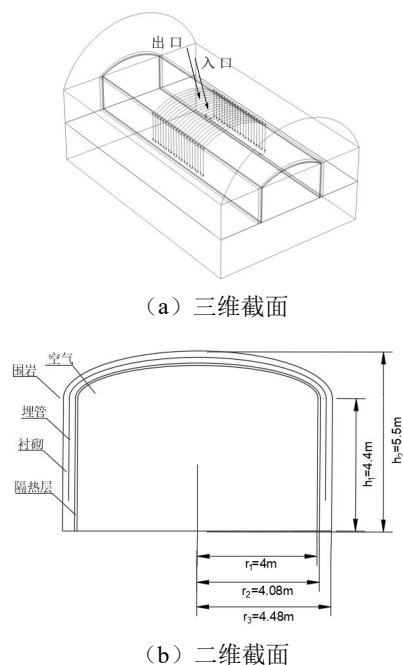


图 1 工程口部的内嵌埋管模型图

Fig.1 Embedded tube model in the engineering port department

口部的空气在封闭空间内,流体流速很小,Re 数达不到临界值,空气流动可视为层流流动。空气的组成成分为干空气与水蒸气,物质浓度扩散方程用来描述水蒸气的对流扩散过程。空气传热方程为气体对流换热方程。

浓度扩散方程:

$$M_v \left(\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c_v) + u_w \cdot \nabla c_v \right) = 0 \quad (1)$$

空气传热方程:

$$\rho_w C_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_w \nabla T_w) + \rho_w C_{p,w} u_w \cdot \nabla T_w = Q_w \quad (2)$$

层流流动方程:

$$\rho_w \left(\frac{\partial u_w}{\partial t} + u_w \cdot \nabla u_w \right) = -\nabla p_w + \nabla \cdot \left(\mu_w \left(\nabla u_w + (\nabla u_w)^T \right) - \frac{2}{3} \mu_w (\nabla \cdot u_w) \mathbf{I} \right) + \rho_w \mathbf{g} \quad (3)$$

质量方程:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w u_w) = 0 \quad (4)$$

其中: c_v 为水蒸气浓度, $c_v = \phi c_{sat}(T)$, mol/m^3 ; c_{sat} 为水蒸气饱和浓度, mol/m^3 ; ϕ 为相对湿度, $\phi = \frac{p_v}{p_{sat}}$; p_v 为空气中的水蒸气分压力, Pa ; p_{sat} 为空气的总压力, Pa ; t 为时间, s ; D 为浓度扩散系数, m^2/s ; M_v 为相对分子质量; u_w 为空气流速, m/s ; T_w 为湿空气温度, K ; ρ_w 为空气密度, kg/m^3 ; $C_{p,w}$ 为空气比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_w 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Q_w 为空气内热源及粘性耗散能, W ; p_w 为空气压力, Pa ; μ_w 为空气动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{g}$ 为重力加速度, m/s^2 。

岩土、保温层及衬砌的传热方程为固体热传导方程:

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) \quad (5)$$

其中: ρ_s 为固体密度, kg/m^3 ; $C_{p,s}$ 为固体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_s 为固体温度, K ; t 为时间, s ; k_s 为固体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

将管内流体简化为一维流动, 其传热方程、连续性方程、动量方程如下:

管内流体连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u_f) = 0 \quad (6)$$

流体动量方程:

$$\rho_f \frac{\partial u_f}{\partial t} = -\nabla p_f - \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f}{d_h} |u_f| u_f \quad (7)$$

流体能量方程:

$$\rho_f A C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f A C_{p,f} u_f \cdot \nabla T_f = \nabla \cdot (A k_f \nabla T_f) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f A}{d_h} |u_f|^3 + q_{wall} \quad (8)$$

其中:

$$q_{wall} = h_f (T_f - T_{ext}) \quad (9)$$

$$h_f = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_{p,in} h_{int}} + \frac{1}{k_p} \ln \left(\frac{d_{p,out}}{d_{p,in}} \right)} \quad (10)$$

式中, ρ_f 为管内流体密度, kg/m^3 ; T_f 为管内流体温度, K ; U_f 为管内流体流速, m/s ; p_f 为管内流体压力, Pa ; t 为时间, s ; d_h 为埋管水力直径, m ; f_D 为埋管内流体的达西摩擦因子; A 为埋管的横截面积, m^2 ; $C_{p,f}$ 为埋管内流体的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_f 为埋管内流体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q_{wall} 为埋管内流体通过管壁传到管外的热流量, W/m ; T_{ext} 为埋管管壁的外部温度, K ; $d_{p,in}$ 为埋管内径, m ; $d_{p,out}$ 为埋管外径, m ; k_p 为埋管管壁导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h_{int} 为埋管内壁的对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

埋管模型是在给定的建筑负荷条件下运行的, 建筑负荷为 $Q_f(t)$, 埋管侧释放的冷凝热为 $Q_b(t)$ 。两者通过热泵系统的性能系数 COP 而相互关联, 如式 (11) 所示。

$$Q_b(t) = Q_f(t) \left(1 + \frac{1}{COP} \right) \quad (11)$$

其中性能系数 COP 可以表示为埋管出口温度 T_{out} 的函数^[17], 如式 (12) 所示。

$$COP = 0.0064 \times (T_{out} - 273.15)^2 - 0.4275 \times (T_{out} - 273.15) + 11.2849 \quad (12)$$

埋管进口水温根据式 (13) 可得:

$$T_{in} = T_{out} + \frac{Q_b(t)}{\rho_f C_{p,f} S V_{in}} \quad (13)$$

其中: T_{in} 为埋管进口温度, K ; T_{out} 为埋管出口温度, K ; V_{in} 为埋管进口流速, m/s 。

设定热泵埋管侧进出口温差为 6°C , 从而得出进出口流速。

通过这种循环, 可以得出每时刻埋管的进出口水温, 即可实现在给定建筑负荷为 $Q_f(t)$ 下, 热泵系统正常运行。

基于有限元软件 COMSOL, 建立埋管数值传热模型。采用向后差分公式法求解微分代数方程。基于 LU 分解, 使用直接求解器的 MUMPS 算法求

解线性方程组。计算误差若低于相对容差,没有达到最大迭代次数,则认为模型在该时间步上收敛。

1.2 初始条件及边界条件

初始条件:口部空气流速初始值为零,内部压力为标准大气压,即 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。空气、围岩、初衬及保温层等温度初始值为 291.15 K 。

边界条件:远边界设置为热绝缘。

1.3 网格无关性检验

为了分析网格大小对数值解精度的影响,采用由疏至密共五种网格,网格数依次为 24 万、35 万、50 万、76 万、90 万、128 万。以埋管出口温度作为网格无关性检验的指标,图 2 即为不同网格数量下,埋管每米换热量随时间的变化。

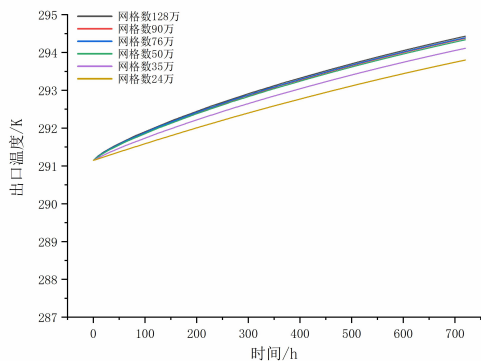


图 2 网格无关性检验

Fig.2 Grid independence test

从图 2 中发现粗放型网格下的换热量与密集型的有较大差距。网格数为 24 万、35 万时,出口温度的曲线明显偏低于高网格数的曲线。而伴随着网格数量的增多,曲线拟合度较高。当网格数高为 50 万时,曲线已经高度重合,此时认为网格数不再影响模型结果。这里取网格数为 76 万的网格模型作为标准模型。

1.4 运行参数的设置

表 1 为埋管传热模型的标准参数。岩土初始温度的取值范围为 14°C 、 18°C 、 22°C ,从而分析不同岩土初始温度对空气温度场、湿度场的影响。埋管运行时间为 1 个月。

根据地源热泵系统设计规范,埋管运行时的出口温度不易高于 33°C [17]。该型埋管共有 40 个环路,共计 744m,在一定的建筑负荷下运行一个月。因此以埋管出口温度不高于 33°C 为标准,采用试算法选取合适的建筑负荷。经过多次试算,确定了不同岩土初温及空气初温下的合适建筑负荷 Q_j 。当岩

土初温取 14°C 、 18°C 、 22°C 时,建筑负荷 Q_j 为 10050 W 。

表 1 埋管传热模型参数

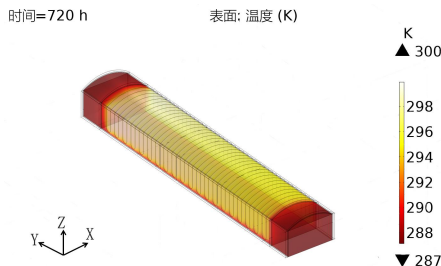
Table 1 The model parameters of the buried pipe

参数	数值
岩土初始温度	291.15 K
口部空气初始度	291.15 K
岩土导热系数	$2.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
衬砌导热系数	$1.86 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
岩土比热容	$1400 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
衬砌比热容	$2000 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
埋管管数	40
埋管间距	1 m
埋管直径	37 mm
空气初始相对湿度	70%
埋管总管长	744 m

2 岩土初始温度对工程口部的影响

2.1 不同岩土初温下口部空气温度场的变化

为了研究岩土不同初始温度对工程口部温度场的影响,以上述建立的埋管换热模型为基础,埋管模型运行一个月后,得到了空气初温为 18°C ,岩土初温分别为 14°C 、 18°C 、 22°C 时空气的温度场分布。图 3 (a)、3 (b)、3 (c) 分别表示岩土初温为 14°C 、 18°C 、 22°C 时口部空气的温度分布。不同的岩土初温对空气的温度分布有一定程度的影响。图 3 (a)、3 (b)、3 (c) 所示的空气最高温度分别为 300 K 、 304 K 、 308 K ,最低温度分别为 287 K 、 291 K 、 295 K 。说明岩土初温越高,最终的空气温度也越高。因为岩土初始温度越高,使得岩土与空气间的温度梯度越大,岩土向空气传热。而且与岩土换热的埋管流体温度也会增高,会向空气侧输出更多的热量,使得空气温度会更高。



(a) 岩土初温为 14°C

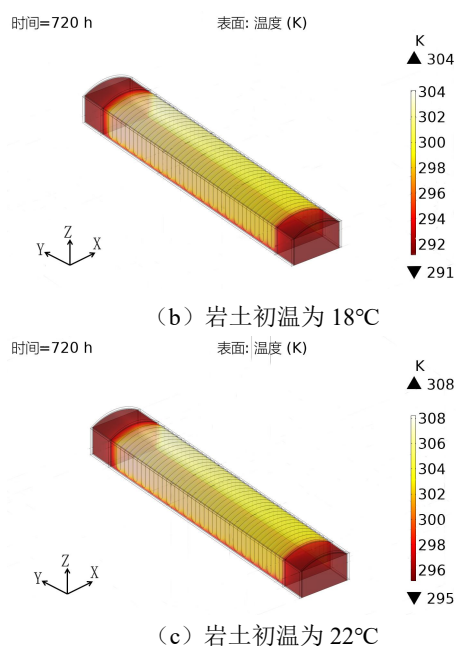


图 3 口部空气的温度分布

Fig.3 Temperature profile of mouth air

该型埋管的铺设方式较为独特,无法使口部内的空气温度处处均匀一致。为了分析口部内不同区域的空气温度分布,截选了口部两端以及中间的截面,即截面 1、截面 2、截面 3。口部的三个横截面如图 4 所示。

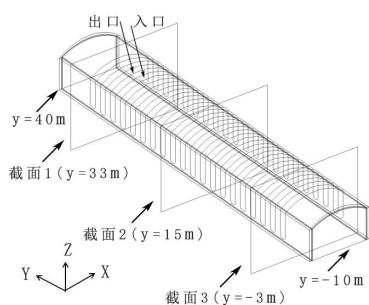


图 4 工程口部处横截面

Fig.4 Cross section of the engineering port

图 5 (a)、5 (b)、5 (c) 分别为岩土初温为 18°C 时, 截面 1、截面 2、截面 3 上的温度分布。

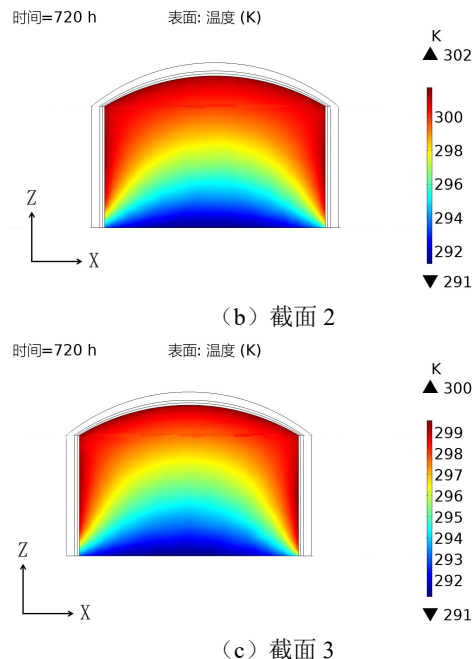
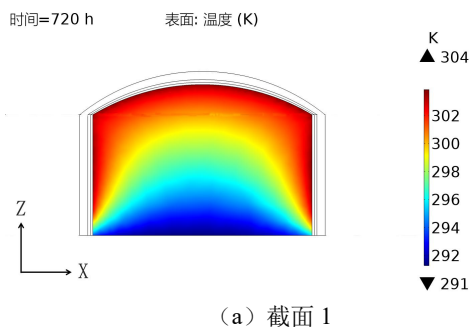


图 5 岩土初温 18°C 时口部横截面处的温度分布

Fig.5 Temperature distribution at the mouth cross

section when the initial rock and soil temperature is 18°C

从图 5 中可知,工程口部不同截面处空气的温度场分布规律相同,而温度值不相等。由于内嵌埋管未能全面覆盖口部壁面,导致口部从上至下,空气温度出现分层。温度场沿着中间对称,下层的空气由于离埋管最远,温度最低,靠近埋管的最上层空气温度最高。

该型内嵌埋管是串联相连,管内流体不断将热量传入周围岩土以及口部内的空气。然而距离埋管入口越远,管内流体温度越低,向空气及岩土传递的热量就变少。截面 1 离埋管入口最近,截面 3 最远,所以截面 1 处的空气温度最大,其次是截面 2,截面 3 处的空气温度最低。

当岩土初始温度为 14°C、22°C 时,口部的三个横截面处的温度分布规律与图 5 所示的相似。

埋管运行期间,换热效率会变低,影响到空气温度的变化趋势。为了分析空气温度场的变化情况,在图 4 中三个横截面的相同位置处分别选取 11 个域点,域点如图 6 所示。位于横截面中间 $x=0\text{m}$ 处共有 6 个域点,均匀分布在截面中间,间距 1m。位于侧边 $x=3.8\text{m}$ 处共有 5 个域点,均匀分布,间距为 1m。

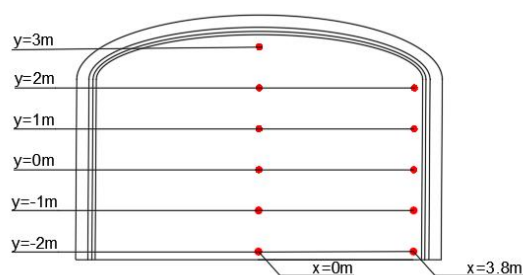
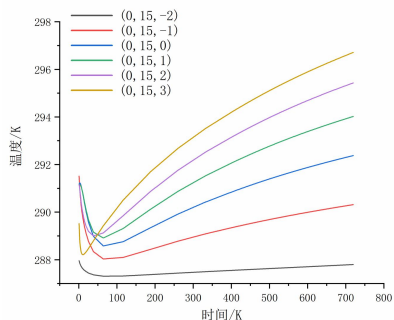


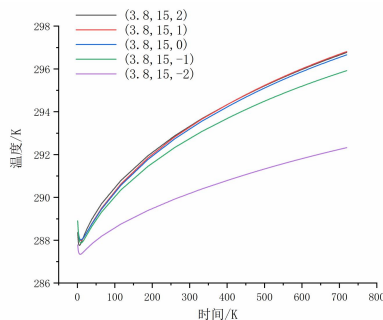
图6 口部横截面上的域点

Fig.6 Domain points on the cross section of the mouth

经分析发现,当岩土初温为 14°C 、 18°C 、 22°C 时,三个横截面上的域点温度变化规律相同。因此选取岩土初始温度 14°C 时的截面 2,分析截面不同位置处空气温度的变化趋势。图 7 (a)、7 (b) 分别为岩土初温 14°C 时,截面 2 上的中间域点、侧边域点的温度变化曲线。



(a) 中间域点



(b) 侧边域点

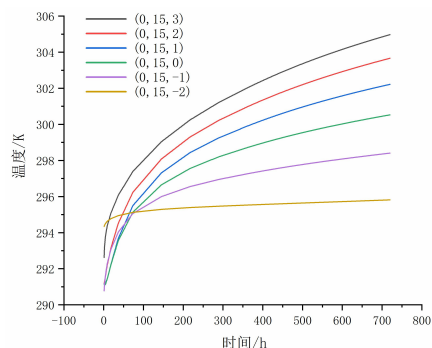
图7 岩土初温 14°C 时截面 2 上的空气域点温度Fig.7 Air domain point temperature on section 2 when the initial rock and soil temperature is 14°C

从图 7 中可知,11 个域点的初始温度不相等。这是因为岩土初温为 14°C ,口部空气的初温为 18°C ,中间存在温度过渡区,即靠近口部壁面处的空气初温在 14°C 到 18°C 之间,而口部中间的主体空气初温仍为 18°C 。

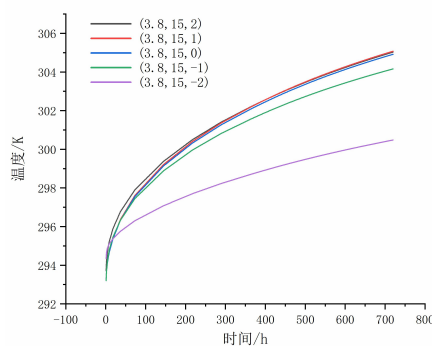
由于空气初温高于岩土初温,换热初期空气向岩土传热,空气温度下降。之后因为埋管温度升高,开始向岩土侧、空气侧传热,致使空气温度经过短暂的下降后开始迅速回升。即图 7 (a)、7 (b) 中所示,空气中不同域点温度在初期下降,而后开始升高。图 7 (a) 中位于 $(0, 15, 3)$ 的点靠近壁面,由于最先受到埋管传热的影响,温度升高的时间点会提前,而其他各点温度依次上升。图 7 (b) 各域点均靠近壁面,故温升的时间点一致。

图 7 (a) 显示截面中间的各个域点温度变化曲线相差较大,越靠近壁面,温度上升越快,温度越高。这与图 5 描述的空气分层现象相对应。图 7 (b) 中各域点的温度变化情况与 7 (a) 不同,很明显域点 $(3.8, 15, 2)$ 、 $(3.8, 15, 1)$ 、 $(3.8, 15, 0)$ 变化趋势基本一致,而域点 $(3.8, 15, -2)$ 虽然靠近壁面,但没有被埋管覆盖,因此温度上升曲线缓慢。

图 8 (a)、8 (b) 分别为岩土初温 22°C 时,截面 2 中间处、侧边处的域点温度变化曲线。



(a) 中间域点



(b) 侧边域点

图8 岩土初温 22°C 时截面 2 上的空气域点温度Fig.8 Air domain point temperature on section 2 at initial rock and soil temperature 22°C

与图 7 相比, 图 8 所示的温度变化曲线初期急速上升, 中后期的温度曲线变化规律与图 7 一样。这时因为岩土初温为 22°C , 空气初温为 18°C 时, 换热初期岩土与空气间的温度梯度较大。因此初始阶段空气温度迅速上升。之后岩土与空气间温差逐渐减小, 埋管将热量同时传入岩土与空气中, 空气温度进入匀速上升阶段。

岩土初温为 18°C 时, 截面处的域点温度变化与图 8 所示的基本一致。区别在于岩土初温 18°C 时, 换热初期无温度梯度, 所以域点温度刚开始时的上升趋势平稳。

为分析不同岩土初温下, 传入空气内的热量, 给出了如图 9 所示的每时传入口部空气的热量。由于岩土初温为 14°C 时, 空气会传热到岩土中, 因此图中显示的热量为负值。

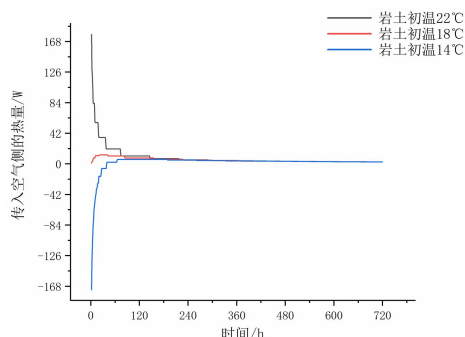


图 9 不同岩土初温下传入空气的热量

Fig.9 Incoming air heat at different initial temperatures of rock and soil

从图 9 中可知, 埋管换热初期, 由于空气与岩土间的温度梯度较大, 传入空气内的热量较多。到了换热中后期后, 图 9 中所示的传热曲线基本重合, 说明初期存在的温度梯度影响时间较短, 对后续热量传入空气的大小并无影响。而当岩土及空气初温均为 18°C 时, 传入空气的热量曲线波动不大。说明埋管每时传入空气内的热量固定, 对工程口部的空气影响比较稳定。

根据模拟结果发现, 埋管传入口部空气及岩土的热量值差异较大。埋管的传热量维持在 12000W , 而传入口部空气内的热量最高为 170W 。所以传入岩土的热量远高于传到空气中的, 相比传入围岩的热量, 传入空气的热量可以忽略不计。

2.2 不同岩土初温下口部空气湿度场的变化

埋管将热量传入空气中, 一方面空气温度升

高, 另一方面会降低空气的相对湿度。图 10 (a)、10 (b)、10 (c) 为岩土初始温度分别为 14°C 、 18°C 、 22°C 时, 换热一个月后空气的相对湿度分布。

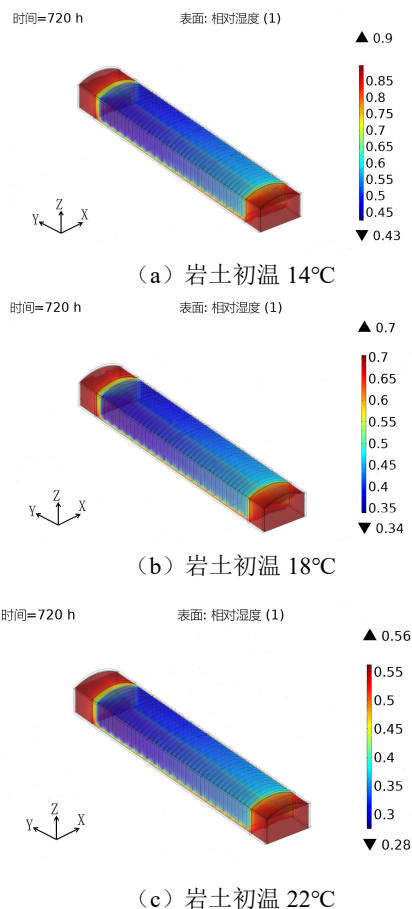


图 10 不同岩土初温时口部内空气的湿度分布

Fig.10 Air humidity distribution in the mouth at different initial temperatures of rock and soil

口部空气被加热, 根据焓湿图, 空气含湿量不变, 相对湿度降低, 有利于防止口部受潮湿问题困扰。此时空气的湿度分布与温度分布相反, 即温度高的区域相对湿度低, 而温度低的区域相对湿度高。相比于岩土初温 18°C , 当岩土初温为 22°C 时, 空气与岩土存在初始温度梯度, 使得空气温度更高, 因此相对湿度更低, 即图 10 (c) 所示, 空气的相对湿度在三种工况下是最低。而当岩土初温为 14°C 时, 初始的温度梯度方向相反, 空气温度更低, 相对湿度更高, 即图 10 (a) 所示, 此时的相对湿度最高。

不同岩土初温时, 口部的截面 1、截面 2、截面 3 仍出现相对湿度分层现象。图 11 为岩土初温 14°C 时, 三个截面最终的相对湿度分布图。

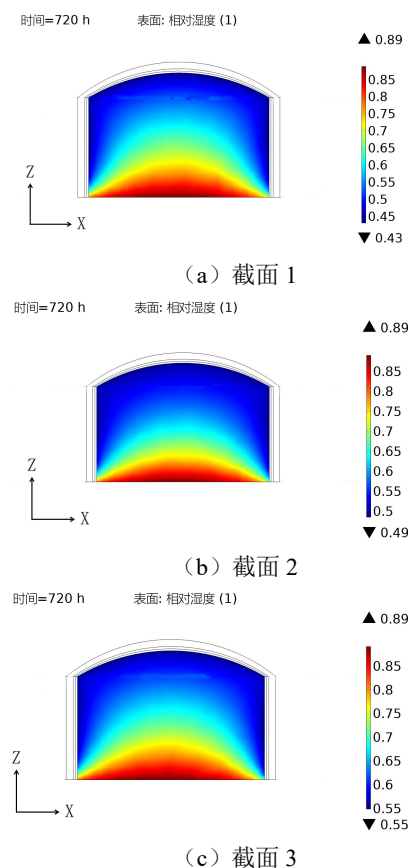


图 11 岩土初温 14°C 时口部截面处的相对湿度分布

Fig.11 Relative humidity distribution at the mouth section when the initial rock and soil temperature is 14°C

图 11 (a)、11 (b)、11 (c) 分别表示岩土初温 14°C 时, 截面 1、截面 2、截面 3 处的相对湿度分布。从图中可发现, 口部不同位置处的截面湿度分布并无较大的差别。最高相对湿度相同, 最小相对湿度略有不同。三个截面上相对湿度的分布规律与温度分布规律正相反, 如图 5 所示, 三个截面上的最小温度均相同, 最大温度略有差别, 这与图 11 所示的相对湿度变化规律相对应。

而当岩土初温取 18°C 、 22°C 时, 截面 1、截面 2、截面 3 上的相对湿度分布规律与图 11 相同。相对湿度的变化规律与截面上域点的温度分布规律一一对应。

根据图 6 所设定的域点, 得出了不同岩土初温下, 截面 1、截面 2、截面 3 上的中间域点、侧边域点的相对湿度。不同截面上相对湿度的变化规律相同, 因此仅分析岩土初温为 14°C 时, 截面 2 上的域点。图 12 表示岩土初温 14°C 时, 截面 2 上域点的相对湿度变化曲线。

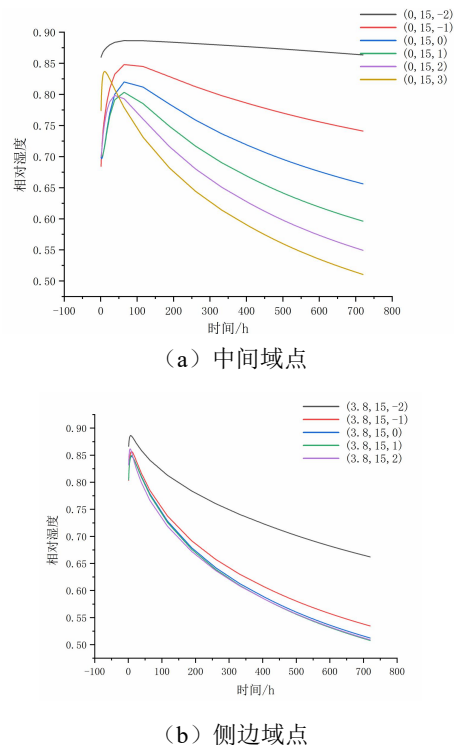


图 12 岩土初温 14°C 时截面 2 上的空气域点温度

Fig.12 Air domain point temperature on section 2 when the initial rock and soil temperature is 14°C

当岩土初温为 14°C 时, 空气初温为 18°C 。因此, 在空气一侧存在一段温度 14°C 至 18°C 的温度过渡区。在此过渡区的空气含湿量与主体空气的相同, 而温度却小于 18°C , 这使得初始相对湿度高于 70%。中间域点 $(0, 15, -2)$ 、 $(0, 15, 3)$ 及侧边域点均在口部壁面附近, 因此初始相对湿度更大。各个域点的相对湿度变化情况与其温度变化规律正相反, 初期空气传热至岩土, 温度降低, 相对湿度初期升高。而后受埋管传热的影响, 空气温度开始升高, 相反, 相对湿度下降。

图 13 为岩土初温 22°C 时的相对湿度变化图。相对湿度的变化趋势与图 8 中温度的变化相反。由于受到岩土与空气过渡区的影响, 中间域点 $(0, 15, -2)$ 、 $(0, 15, 3)$ 及侧边域点初始相对湿度均小于 70%。换热初期由于岩土与空气存在温度梯度, 空气温升较快, 因此相对湿度初期的下降趋势较快, 而后开始稳定降低。当岩土初温为 18°C 时, 由于换热初期岩土与空气初期无温度梯度, 相较于图 13, 空气温升较慢, 相对湿度下降得较慢, 而后域点相对湿度变化与图 13 基本相同。

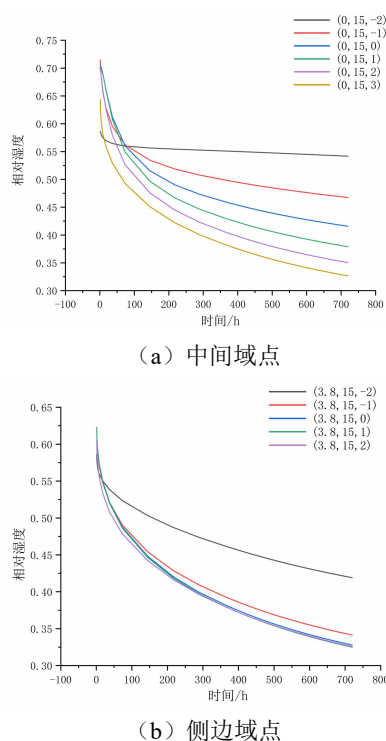


图 13 岩土初温 22℃时截面 2 上的空气域点温度

Fig.13 Air domain point temperature on section 2 when the initial rock and soil temperature is 22℃

3 结论

(1) 岩土初温为 14℃、18℃、22℃时空气最终的温度场分布存在差异。当岩土初温为 14℃、18℃、22℃时, 经过埋管一个月的运行后, 空气的最高温度分别为 300K、304K、308K, 最低温度分别为 287K、291K、295K。

(2) 当岩土初温 18℃时, 选取埋管运行一个月后口部两端及中间的横截面, 即得截面 1、截面 2、截面 3。发现截面内空气从上至下, 温度出现分层。此时温度场沿着中间对称, 下层的空气由于离埋管最远, 温度最低, 而靠近埋管的最上层空气温度最高。而且当岩土初始温度为 14℃、22℃时, 口部的三个横截面处的温度分布规律与上述规律相同。

该型埋管串联相连, 由于截面 1 最靠近埋管进口端, 因此截面 1 处的空气温度最大, 其次是截面 2, 而截面 3 处的空气温度最低。

(3) 当空气与岩土初始温度不相等时, 由于空气与岩土之间存在较大温度梯度, 换热初期传入空气侧或岩土侧的热量很多。而到了换热中后期

后, 传入空气的热量很小并固定不变。当岩土及空气初始温度相等时, 传入空气的热量曲线波动不大, 此时埋管换热对工程口部内的空气影响比较稳定。

根据模拟结果发现, 埋管传入岩土侧的热量远大于流入空气侧的热量。埋管的传热量维持在 12000W, 而传入口部空气内的热量最高为 170W, 之后稳定在 10W 以下。虽然传入空气的热量很小, 但对空气温度场的影响较大。

(4) 经过模拟研究发现, 埋管传热一方面影响空气温度, 另一方面影响了空气的相对湿度。随着热量的不断传入, 工程内空气的相对湿度下降趋势明显, 起到了工程口部防潮的效果。

参考文献:

- [1] 茅靳丰, 李永, 耿世彬, 等. 防护工程内部热环境保障的研究进展[J]. 暖通空调, 2012, 42(9): 7.
- [2] 刘英义, 王士荣, 金云平, 等. 防护工程冷却塔设置位置探讨[J]. 防护工程, 2012, 34(1): 65-67.
- [3] 侯普民, 茅靳丰, 陈飞, 等. 防护工程相变型水库方案应用及蓄热特性研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(4): 95-100.
- [4] 廖露, 茅靳丰, 陈尚沅, 等. 防护工程垂直 U 形地埋管换热性能的实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(2): 99-104.
- [5] J-Y Lee. Current status of ground source heat pumps in Korea[J]. Renew. Sustain. Energy Rev., 2009, (13): 1560-1568.
- [6] J Hu. An improved analytical model for vertical borehole ground heat exchanger with multiple-layer substrates and groundwater flow[J]. Appl. Energy, 2017, (202): 537-549.
- [7] J Luo, Z Luo, J Xie, et al. Investigation of shallow geothermal potentials for different types of ground source heat pump systems (GSHP) of Wuhan city in China[J]. Renew Energy, 2018, (118): 230-244.
- [8] W Xu, C Liu, A Li, et al. Feasibility and performance study on hybrid air source heat pump system for ultra-low energy building in severe cold region of China[J]. Renew Energy, 2020, (146): 2124-2133.
- [9] Barla M, Donna A D, Perino A. Application of energy tunnels to an urban environment[J]. Geothermics, 2016, 61(5): 104-113.

(下转第 655 页)