

竖直地埋管换热器在地下工程中的应用研究

解放军理工大学 茅靳丰[☆] 李永[△] 张华 耿世彬 韩旭
 南京军区空军后勤部机场营房处 张俊林
 解放军理工大学 李伟华 王利军

摘要 竖直地埋管换热器替代冷却塔用于地下工程中,有利于工程防护能力和能源效率的提高。探讨了地埋管换热器在地下工程中的应用形式,包括与冷热源和末端的联合使用;基于地下工程的负荷特点和时间特性及山区岩土体的特性,探讨了地埋管换热器的适用性,结果表明地下工程的热负荷特性有利于地埋管换热器周围温度场的恢复,岩土体较大的导热系数和渗流的存在有利于换热效率的提高;分析了地埋管换热器使用可能导致的热红外暴露问题,提出采用表面覆土的方法来解决这一问题,建议覆土厚度为2 m。

关键词 竖直地埋管换热器 地下工程 温度场 红外暴露 负荷特性

Application of vertical ground heat exchanger to underground works

By Mao Jinfeng[★], Li Yong, Zhang Hua, Geng Shibin,
 Han Xu, Zhang Junlin, Li Weihua and Wang Lijun

Abstract Replacing cooling tower with the vertical ground heat exchanger (VGHE) is helpful for improving the protection capacity and energy efficiency in underground works. Discusses application forms of VGHE, including those combined with cold and heat source devices and combined with end units. Based on the load and time characteristics of underground works and the geotechnical characteristics of mountain area, explores the practicability of the VGHE. The results show that the thermal load characteristics are helpful for temperature field restoration around VGHE and that the higher heat transfer coefficient of rock and seepage in soil can improve the heat exchange efficiency. Analyses the problem of thermal infrared exposure caused by VGEH, puts forward the eliminating measure of soil covering, and the proposed thickness of soil layer should not be less than 2 m.

Keywords vertical ground heat exchanger, underground works, temperature field, infrared exposure, load characteristic

★ PLA University of Science and Technology, Nanjing, China

①

0 引言

地下工程是一个相对封闭的空间。为满足功能要求,其内部有大量的通信指挥设备,当满负荷运行时内部会产生大量的余热余湿,传统的方法是采用集中通风空调的方式处理进风,采用冷却塔处理冷凝热。为了便于散热,冷却塔一般安装在工程外部,庞大的冷却塔往往会成为敌方高精度武器打击的靶子,一旦冷却塔被摧毁则内部空气温湿度保障系统将无法正常运行^[1]。另一

方面,通过对冷却塔的侦查也可得知防护工程的级别配置和大体位置。

①[☆] 茅靳丰,男,1963年8月生,博士,教授,博士生导师

[△] 李永(通信作者)

210007 南京海福巷一号解放军理工大学工程兵工程学院内
 部设备教研室

(O) 15996275349

E-mail:liyong25dan@163.com

收稿日期:2012-06-26

修回日期:2012-07-23

冷却塔需消耗大量的水资源,传统的冷却系统一般采用大型水库+室外冷却塔,平时用室外冷却塔对冷却循环水进行降温处理,战时抽取水库内的水直流进入空调冷凝器后再回到水库,当水库的水温上升到压缩机保护的上限温度(37℃)时,空调将无法工作。由于水库容量有限,该模式一般只能保障满负荷运行几个小时。有的工程甚至设置了上千 m³ 容量的“超级水库”,不利于节能,也不便在地下水资源匮乏的地区使用。

另一方面,传统的地下工程内部采用集中式空气处理系统,不便于内部不同区域进行不同的温湿度调节;集中式空调模式往往带来大量的能耗,这意味着内部柴油电站的容量需加大,对排烟降温处理不利。基于地下工程冷凝热处理的冷却塔替代研究和内部节能研究的需要,提出了采用地埋管换热器处理工程冷凝热的方法,分析了地埋管换热器与地下工程空气保障系统联合运行的模式,对地埋管换热器在地下工程的适用性进行了相关研究。

1 地埋管换热器在地下工程空气保障系统中的应用形式

空气源热泵以室外空气为热源,随着气候的变化热源的温度会出现较大的波动,夏季需要制冷时室外空气温度最高,冬季需要制热时室外空气温度最低。而地层温度常年恒定,不随季节变化,因此竖直地埋管换热器的换热效率高于空气源热泵。地埋管换热器利用岩土体的蓄放热能力,夏季将热量排放到岩土体中,冬季从岩土体中吸收热量。防护工程的负荷变化与地面工程有较大的差异,其空气保障系统也有一定的差别,地埋管换热器可以与空气保障系统的冷热源联合使用,也可与末端设备直接联合使用。

1.1 地埋管换热器+巷道内冷却塔+调温除湿机组模式

如图1所示,当工程内部出现满负荷,即内部设备全部运行,人员较多时,首先打开阀门 V7, V8,运行地埋管换热器和调温除湿机组,通过换热水箱1和埋管内水循环带走冷凝热;当运行时间过长,地埋管换热器的效率降低时,为防止地埋管换热器不能满足需求,打开阀门 V5, V6,运行巷道内冷却塔,同时采用工程内温度较低的排风处理冷凝热,使冷却塔保持较高的效率,地埋管换热器、巷道内冷却塔、调温除湿机组联合运行保障内部热湿环

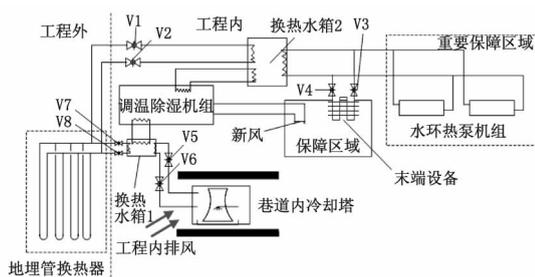


图1 地埋管换热器在地下工程中的应用形式

境。该模式可以避免使用庞大的水库和工程外冷却塔,同时可以充分利用排风的冷量,有利于提高工程的防护能力和节能。

1.2 地埋管换热器与末端设备联合运行

当工程处于维护管理阶段,即工程内的人员最少,且较少设备开启时,仅需保证部分重要区域的温湿度,可以采用地埋管换热器+水环热泵机组/处理末端的模式进行节能运行。关闭阀门 V7, V8,打开阀门 V1, V2,水源热泵机组和末端设备通过水环路进行吸热放热,地埋管换热器通过换热水箱2进行热量交换。采用该模式运行可以缩短调温除湿空调机组的开启时间或不开启空调机组,解决了维护管理期间需要开启集中空调的弊端,可大大降低工程的能耗。

2 地埋管对工程负荷特性的适用性

负荷特性对地埋管换热器的换热性能有重要的影响,当工程内负荷发生变化时,机组运行相应变化,以适应负荷变化,地埋管换热器的换热状态也随之动态变化,这表明地埋管的换热性能与其承担的换热负荷有极大的关联。根据工程内负荷的时间特性,地埋管换热器存在运行和停机两种状态,即地埋管换热器处于间歇运行模式。停机后地埋管换热器处于热恢复状态,该状态持续的时间越长,对地埋管换热器的高效运行越有利。如果地埋管换热器长期处于连续换热状态,则换热性能会逐渐恶化,甚至会使岩土体温度和进水温度十分接近,即换热器失去换热能力。

防护工程内部负荷的变化与地面工程冷热负荷的变化有较大的不同,受深埋围护结构蓄热能力的影响,防护工程内部负荷随季节变化幅度较小^[2]。演习或战时工程内部人员和设备散热达到最大,工程的冷负荷也达到最大;平时工程多处于维护管理状态,内部人员较少,设备基本不开,负荷大大减小。地下工程的演习时间约为1个星期,演

习后工程内部人员很少,设备基本不运行,埋管换热器处于停机热恢复状态。探讨地下工程的负荷强度及时间特性,有利于埋管换热器的设计。

2.1 满负荷运行分析

以南京某地下工程为例,假定战时满负荷(演习)运行5天,探讨停机1个月和2个月钻孔周围的温度变化。如图2所示,建立埋管周围二维瞬态传热模型,相关参数见表1。

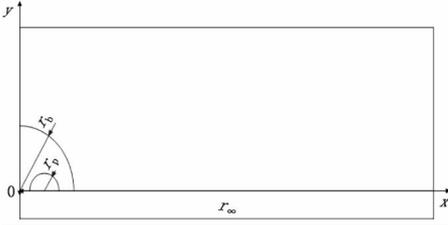


图2 埋管周围的二维传热模型简化

表1 埋管换热器的相关参数

岩土体初始热力学温度 T_0/K	290.55
钻孔半径 r_b/m	0.06
埋管内半径 r_{pi}/m	0.016
埋管外半径 r_{po}/m	0.0185
支管间距(两支管中心距离的一半) s_c/m	0.023
埋管导热系数 $\lambda_p/(W/(m \cdot K))$	0.4
回填材料导热系数 $\lambda_g/(W/(m \cdot K))$	2.0
回填材料单位体积热容 $(\rho c)_g/(J/(m^3 \cdot K))$	3.2×10^6
岩土体导热系数 $\lambda_s/(W/(m \cdot K))$	2.4
岩土体单位体积热容 $(\rho c)_s/(J/(m^3 \cdot K))$	2.0×10^6
埋管长度 H/m	100
单位长度埋管热负荷(满负荷) $q_1/(W/m)$	60
单位长度埋管热负荷(部分负荷) $q_2/(W/m)$	15
多孔介质含水率 $\phi/\%$	25
岩土体内水渗流速度 $u/(m/s)$	$1 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-5}$

埋管与回填材料之间的传热满足式(1):

$$(\rho c)_g \frac{\partial T_g}{\partial \tau} = \lambda_g \left(\frac{\partial^2 T_g}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中 T_g 为回填材料的热力学温度, K; τ 为时间, s; r 为距钻孔中心的距离, m。

岩土体内传热满足式(2):

$$(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \lambda_s \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right), \sqrt{x^2 + y^2} \geq r_b \quad (2)$$

式中 T_s 为岩土体的热力学温度, K; x, y 为坐标, m。

渗流情况下满足式(3):

$$(\rho c)_{por} \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\rho c)_f u \nabla T - \lambda_{por} \nabla^2 T = s \quad (3)$$

其中

$$(\rho c)_{por} = (1 - \phi)(\rho c)_s + \phi(\rho c)_f \quad (4)$$

$$\lambda_{por} = (1 - \phi)\lambda_s + \phi\lambda_f \quad (5)$$

式(3)~(5)中 $(\rho c)_{por}$ 为多孔介质的单位体积热容, $J/(m^3 \cdot K)$; T 为热力学温度, K; $(\rho c)_f$ 为岩土体内渗流水的单位体积热容, $J/(m^3 \cdot K)$; λ_{por} 为多孔介质的导热系数, $W/(m \cdot K)$; s 为蓄热量, W/m^3 ; λ_f 为岩土体内渗流水的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

初始条件:南京地区年平均温度为 $17.4^\circ C$, 当埋深大于 15 m 时,地温基本不发生变化,基于本文分析的重点不是地温变化的影响,取 $\tau=0, T_s = T_g = T_0$ 。

边界条件:在埋管壁与回填材料交界处,

$$-\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r} \Big|_{r=r_p} = \begin{cases} \frac{q}{2\pi r_p} & \text{系统运行时} \\ 0 & \text{间歇期即系统停止运行时} \end{cases} \quad (6)$$

岩土体远边界的温度设为初始温度。

为了便于分析,对埋管内的流体传热进行了简化处理,假定埋管内流体向周围以导热的形式传热,引入等效传热系数 K_{peff} 。

$$K_{peff} = \frac{\ln \frac{r_{po}}{r_{pi}}}{\frac{1}{r_{pi} h_{p-w}} + \frac{1}{\lambda_p} \ln \frac{r_{po}}{r_{pi}}} \quad (7)$$

式中 h_{p-w} 为管内流体与管壁的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$, 可通过努塞尔数 Nu 求得,参见文献[3]。

采用有限元模拟软件 COMSOL 对该二维瞬态模型进行模拟,得到钻孔周围不同距离处岩土体温度随时间的变化曲线,如图3所示。

由图3可知,在满负荷运行模式下,钻孔周围的岩土体温度随时间逐渐上升,钻孔壁处温度在第5天运行结束时达到 $307.5 K$,这是由于连续运行,使得热量在钻孔附近积聚,使得钻孔壁处温度不断升高;距钻孔中心的距离越远,达到的最高温度越低,在距钻孔中心 $0.8 m$ 处岩土体温度在第 7.5 天时达到了最高温度 $293.2 K$,这是由于岩土体的蓄热能力,使得热量的传递具有一定的延时,因此在停机 2.5 天后该处才达到最高温度。

机组停止运行后,埋管周围的温度场进入热恢复阶段,到第30天时,钻孔壁处温度恢复到

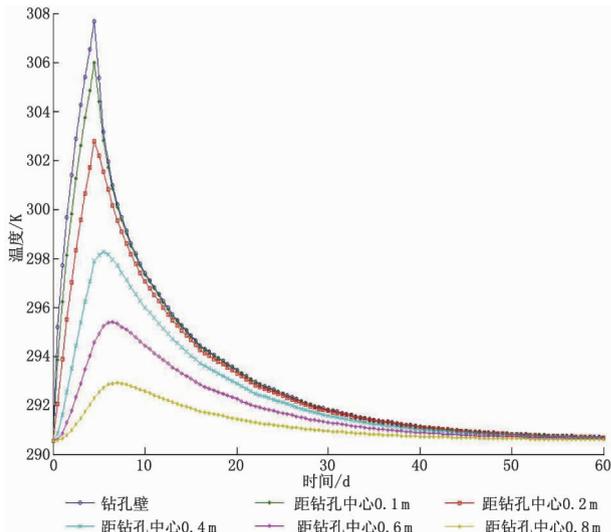


图3 钻孔周围不同距离处岩土体温度随时间的变化曲线

293.5 K;距钻孔中心的距离越远,温度恢复得越快,即需要的恢复时间越短;停机50天后,埋管周围的岩土体温度已基本恢复到初始温度,即290.55 K。

由以上分析可知,由于防护工程战时连续高负荷运行的时间相对较短,给埋管换热器提供了有利的恢复期,使得下个阶段埋管换热器能高效运行。

2.2 维护管理阶段间歇小负荷运行特性研究

工程处于维护管理阶段时,工程内的负荷较小,且一般为间歇负荷(即白天运行,晚上停机)。设定负荷的间歇变化特性满足式(8);如图4所示,

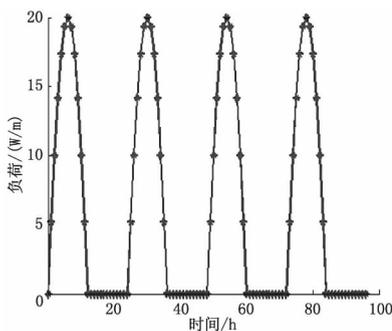


图4 工程间歇运行时埋管负荷变化

部分负荷的峰值取20 W/m,运行模式设置为12 h运行、12 h停机;其他参数设置见表1。计算得到钻孔周围不同距离处温度随时间的变化趋势,如图5所示。

$$q = \frac{1}{2} q_{\max} \sin(\omega x) + \frac{1}{2} q_{\max} |\sin(\omega x)| \quad (8)$$

式中 q 为维护管理阶段的负荷, W/m; q_{\max} 为部分负荷的峰值, W/m; $\omega = 2\pi/24$ (以24 h为运行周期)。

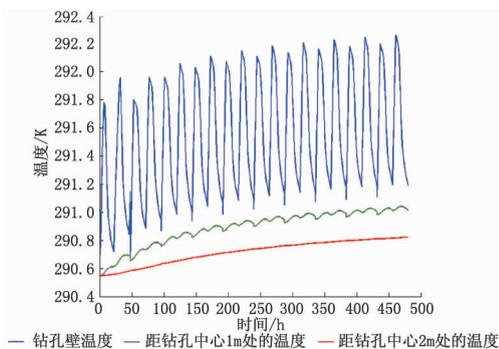


图5 间歇运行模式下钻孔周围温度变化

由图5可以看出,在间歇周期负荷运行模式下,钻孔周围的温度缓慢上升,距钻孔中心越近温度变化越剧烈,并表现出明显的间歇特征;运行20天后,钻孔壁处的温度约上升1.6℃,距钻孔中心1 m处的温度约上升0.5℃,而距钻孔中心2 m处的温度变化不大。总体来看钻孔周围的温度上升缓慢,变化幅度较小,有利于埋管换热器的高效运行。防护工程维护管理阶段的间歇周期运行模式适合采用埋管换热器。

3 埋管换热器在山区的传热特点分析

埋管换热器的换热能力不仅与负荷强度和运行模式有关,同时与换热器周围的岩土体特性如岩土体的传热系数及岩土体内水的含量和运动特性有关。防护工程大多设置于山区,地质以岩石为主,同时由于山势的影响,岩石内存在大量的渗流水,因此有必要探讨山区岩土体特性对埋管换热器性能的影响。

3.1 岩土体导热系数的影响分析

以表1中的基本参数为基础,建立埋管换热器的二维稳态传热模型,改变钻孔周围岩土体的导热系数,得到不同导热系数下钻孔周围的温度场分布情况,如图6,7所示。

由图6可以看出,随岩土体导热系数的增大钻孔周围的温度逐渐降低,导热系数为2.4 W/(m·K)时钻孔周围的温度明显低于导热系数为1.2 W/(m·K)时的情况,这是由于岩土体的导热系数增大,使得钻孔附近的热量可以较快地向周围扩散,避免了热量在埋管附近聚积。相关的研究表明,砾岩的导热系数为1.8~3.0 W/(m·

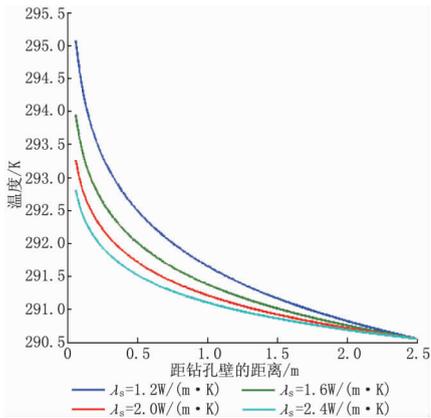


图6 不同岩土体导热系数下钻孔周围温度变化

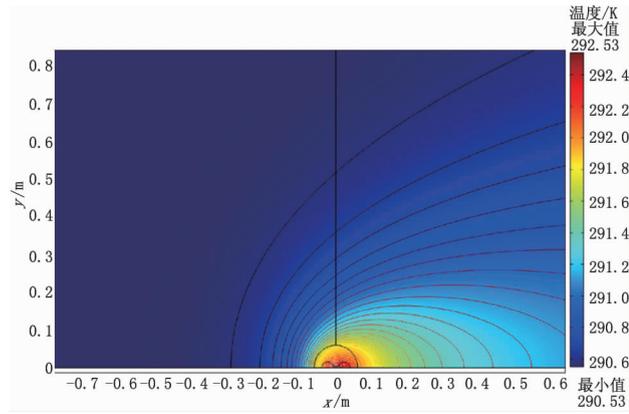


图8 渗流情况下换热器周围温度分布

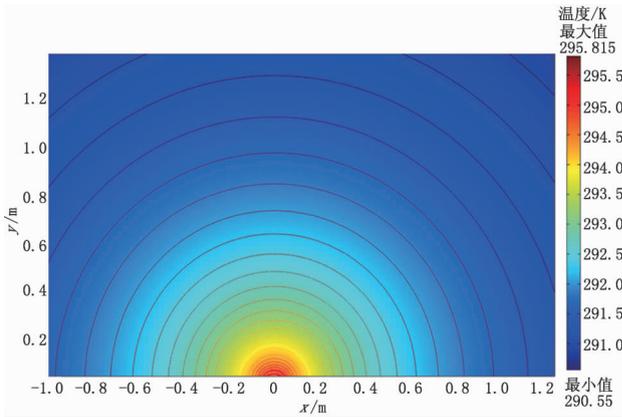


图7 纯导热情况下换热器周围温度场

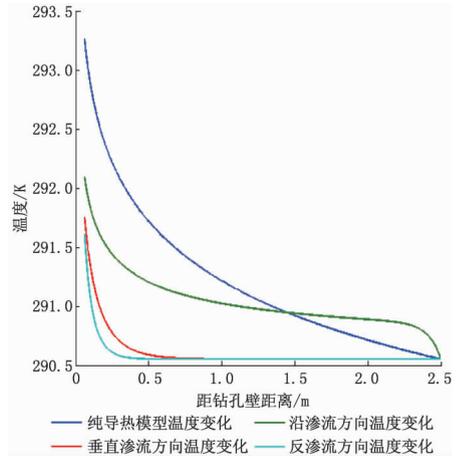


图9 纯导热和渗流(3个方向)模式下温度随距离的变化

K),而黏土的导热系数约为 $0.8 \sim 1.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,对于山区而言其地下土质以砾岩为主,其导热系数要大于一般的土质岩石。一般而言防护工程设于山区,其所在的地质条件有利于埋管换热器的应用。

3.2 岩土体内渗流的影响分析

埋管周围的岩土体实质上是一种多孔介质,其内部存在大量的渗流水,在水力梯度的作用下,渗流水以一定的速度流动,使得埋管周围不仅存在岩土体导热,同时也存在水的导热和流动换热。相关研究表明,当岩土体内存在地下水时,会大大加强埋管换热器的换热效率,减少热量在埋管附近聚积,有利于整个系统的运行^[4-5]。基于式(3),采用表1中的相关参数,得到渗流速度为 $4 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{s}$ 、岩土体导热系数为 $1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时埋管周围的温度场,如图8,9所示。对比图7,8稳态情况下纯导热和考虑渗流时埋管周围的换热情况,可以看出由于渗流的存在,埋管周围的温度场发生了较大的变化,等温线趋于扁平化,并沿渗流方向延伸,埋

管周围的热量被带到了更远处。图9对比分析了纯导热模式和渗流模式(3个不同方向)的钻孔周围温度变化情况,可以看出渗流情况下埋管周围的温度基本低于纯导热情况下的温度,这是由于地下水渗流产生了水平对流换热。地下水流动有利于埋管换热器的传热,也有利于减弱或消除由于埋管换热器吸放热不平衡而引起的热量累积效应;在沿渗流方向上当距钻孔壁一定距离后,渗流情况下的温度高于纯导热情况下的温度,渗流的影响使得热量在下游聚积,温度升高。由于山势的影响,山区岩土体内往往存在大量的渗流水,降低了埋管周围的热量聚积,有利于埋管换热器性能的提高。

从以上分析可知,由于防护工程的负荷强度特性、负荷时间特性及山区岩土体较大的传热系数和渗流的影响,使得埋管换热器具有合理的热恢复期,岩土体的特性避免热量在埋管附近聚积,因此埋管换热器适合在防护工程内使用。

4 埋管换热器对地表温度的影响

冷却塔的使用使工程具有可见光暴露的危险,埋管换热器的使用可以消除庞大的冷却塔暴露特征,然而由于埋管换热器需不断处理工程内散发的热量,使得埋管周围的温度明显高于周围岩土体的温度,容易出现热红外暴露特征,也不利于工程的防护。图 10 为基于稳态导热的单埋管周围的温度变化情况,其中埋管负荷考虑为满负荷 100 W/m,其他参数见表 1。由图 10 可知,埋管周围的

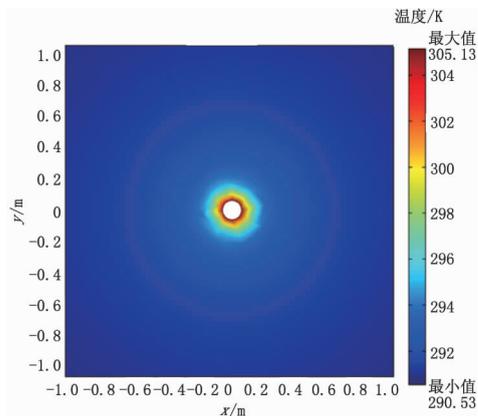


图 10 单埋管无覆土时周围地表温度的变化

温度与远边界的岩土体初始温度(290.55 K,即南京地区年平均地表温度)相差 5℃以上,最大温差可达 10℃,当多埋管同时使用时,会使整片埋管区域的地表温度明显高于周围地表温度,具有明显的红外温差特征。

为了解决埋管区域因温度高于周边而引起热红外暴露的问题,采用将埋管深埋,即在埋管表面设置一定厚度的覆土和植被的处理方式。为了分析覆土厚度的要求,建立单埋管和覆土的三维传热模型,预设覆土厚度为 5 m,单管的单位长度热流取 100 W/m,其他参数见表 1,得到覆土内的温度变化,如图 11,12 所示。

从图 11,12 可以看出,埋管对覆土层内温度的影响主要集中在一个较小的范围内,当覆土层厚度在 0~0.5 m 范围内时,埋管对其温度场影响较大;当覆土层厚度在 1 m 以上时,埋管对其温度场影响较小,这说明埋管对覆土层的热作用距离约为 1 m。考虑到地面周围环境温度的变化幅度大,因此建议覆土层的厚度设为 2 m,同时在覆土层表面设置植被等,避免因埋管换热而出现热红外暴露特征。

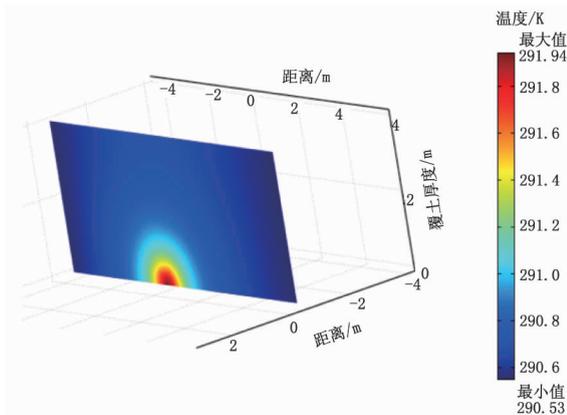


图 11 覆土温度场截面图

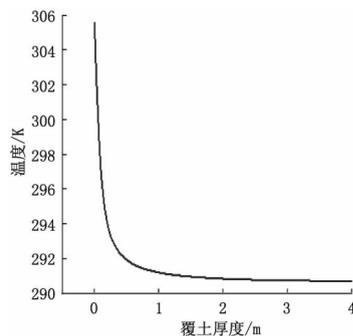


图 12 覆土内温度随厚度变化图

5 结论

5.1 竖直埋管换热器可以与空气环境保障系统的冷热源联合使用处理冷凝热,如埋管换热器+巷道内冷却塔+调温除湿机组模式,这种模式比传统的模式更安全,且效率更高;竖直埋管换热器也可以与空气保障系统末端设备联合使用,如埋管+水环热泵机组模式,这种模式可以满足工程维护管理的小负荷特点,避免造成巨大的能源消耗。

5.2 以南京某地下工程为例,探讨了竖直埋管换热器的适用性。地下工程的负荷具有明显的时间特性,满负荷运行 5 天后,经 1 个月的恢复,可以使埋管周围的岩土体温度基本恢复到初始温度,有利于下次满负荷运行;在间歇运行小负荷模式下,埋管周围岩土体的温度上升缓慢,运行 2 个月后,钻孔壁处温度仅上升 2℃,可以保证埋管换热器相对高效工作。

5.3 防护工程通常位于山区,地下岩土体的导热系数相对较大,且存在渗流,埋管换热器运行时埋管周围的热量扩散快,温度场恢复快,效率相对较高。

(上接第 30 页)

5.4 为了避免埋管换热器使用时会因埋管区域的温度相对较高而引起红外暴露,提出了在埋管表面覆土的处理方法,覆土的厚度应设为 2 m,同时应在覆土层上设置植被层。

参考文献:

- [1] 耿世彬,李永,韩旭,等. 水环热泵空调系统在地下工程中的应用[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2011,12(2):139-144
- [2] 茅靳丰,韩旭. 地下工程热湿理论与应用[M]. 北京:

中国建筑工业出版社,2009

- [3] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998
- [4] Molina-Giraldo N, Bayer P, Blum P. Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011,3(12):1-9
- [5] 於仲义,陈焰华,胡平放. 基于渗流型传热机制的埋管换热特性研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009,36(12):63-66