

地埋管管群换热器温度场影响因素的模拟研究

尚少文¹,刘金玉¹,刘兵红²,纪 森¹,李龙新¹

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 三祥万力工业设备(北京)有限公司,北京 102628)

摘要 目的 研究不同影响因素下地埋管管群换热后土壤温度场的变化,为实际工程地埋管设计提供理论依据. 方法 通过 Gambit 建立地埋管管群模型,在 Fluent 中设置不同的参数,模拟地源热泵运行一年土壤温度变化情况. 结果 回填材料的导热系数分别为 $1.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $2.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,一年后土壤温度的加权平均值分别为 $15.114 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15.137 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15.134 \text{ }^\circ\text{C}$;顺排和叉排排列方式下,一年后土壤温度加权平均值分别为 $15.13 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $15.12 \text{ }^\circ\text{C}$;渗流速度分别为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、 $2.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、 $3.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 时,一年后土壤温度的加权平均值分别为 $15.900 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15.988 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15.993 \text{ }^\circ\text{C}$;孔隙率分别为 0.232 、 0.332 、 0.432 时,一年后土壤温度的加权平均值分别为 $15.017 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15.027 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $15.08 \text{ }^\circ\text{C}$. 结论 回填材料的导热系数不宜大于土壤的导热系数,叉排方式下的换热效果优于顺排,地下水渗流速度越大,越利于土壤温度的恢复,孔隙率较大时,土壤温度变化波动较小.

关键词 地源热泵;地埋管管群;热渗耦合;换热性能;数值模拟

中图分类号 TK124 文献标志码 A

Ground-Coupled Group Heat Exchanger Factors Affecting Temperature Simulation

SHANG Shaowen¹, LIU Jinyu¹, LIU Binghong², JI Miao¹, LI Longxin¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Sanxiang Wanli Industrial Equipment (Beijing) Co. Ltd, Beijing, China, 102628)

Abstract: To study the change of soil temperature field after heat transfer from ground-coupled group under different influencing factors, which provides theoretical basis for practical engineering design of buried pipe. The model of ground-coupled group was established by Gambit and different parameters were set up in Fluent to simulate the variation of ground temperature in ground source heat pump (GSHP) for one year. When the respectively thermal conductivity of backfill materials are $1.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $2.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, the weighted average values of soil temperature after one year are as follows: $15.114 \text{ }^\circ\text{C}$, $15.137 \text{ }^\circ\text{C}$, $15.134 \text{ }^\circ\text{C}$; Under the cross management and the series management, the weighted average values of soil temperature after one year are as

收稿日期:2017-09-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51408376);辽宁省住房和城乡建设厅项目(SZJT2015008)

作者简介:尚少文(1970—),男,副教授,主要从事室内环境质量保障技术和建筑节能方面研究.

follows: 15.13 °C and 15.12 °C; When seepage velocity are 1.0×10^{-6} m/s, 2.0×10^{-6} m/s, 3.0×10^{-6} m/s, respectively, the weighted average value of soil temperature after one year are as follows: 15.900 °C, 15.988 °C, 15.993 °C; When the soil porosity are 0.232, 0.332 and 0.432, respectively, the weighted average values of soil temperature after one year are as follows: 15.017 °C, 15.027 °C and 15.08 °C. The thermal conductivity of backfill material should not be greater than that of soil, and the heat transfer efficiency of cross arrangement is better than that of series arrangement. The larger seepage velocity of groundwater is, the more favorable of soil temperature recovers. When the soil porosity is larger, the fluctuation of soil temperature becomes smaller.

Key words: ground source heat pump; ground-coupled group; heat and seepage coupling; heat transfer performance; numerical simulation

在实际工程中,地源热泵系统中的地下部分一般是由几十组甚至更多组的地理管换热器组成^[1-5],单一的管井无法满足所需的热量,垂直埋管换热器单管换热的研究只能从理论上说明规律,将其理论直接用于地理管管群换热器的实际应用中会不合适,所以对垂直地理管管群的换热研究更有利于实际工程.而地理管管群换热的好坏直接影响地源热泵系统设计的合理性,从而影响对建筑物的供冷或供热^[6-10].土壤的温度随着地理管管群换热器的运行而变化,而管与管之间由于热量的传递,也会相互影响,土壤温度的高低也会影响地理管换热的效果,所以两者之间是相互制约的^[11-15].地理管换热器总是从地下取热或者取冷,导致地下土壤温度产生不平衡,而热量不能及时散开,则会产生冷堆积或者热堆积,长此以往,地理管换热器的换热效率会受到影响^[16-18].

笔者利用 CFD 模拟手段,对地理管管群在不同的回填材料、不同管群排列方式、考虑渗流时不同渗流速度、不考虑渗流时土壤孔隙率等影响下运行一年周围土壤温度场的变化情况进行模拟比较,得到在不同因素作用下地理管换热器换热效果的变化趋势,研究表明.回填材料的导热系数不宜大于土壤的导热系数,叉排方式下的换热效果优于顺排,地下水渗流速度越大,越利于土壤温度的恢复,孔隙率较大时,土壤温度变化波动较小.

1 数值模型的建立

1.1 模型假设

地源热泵的地下换热系统是非常复杂的非稳态换热过程,在工程模拟时通常会进行模拟假设.笔者主要研究地源热泵的长期运行,考虑到地源热泵管群运行时间较长,将模拟进行简化.将地理管管壁看作是一个热源,冬季热流量从土壤传递到管壁,夏季管壁产生热通量与土壤进行换热.为了减少计算时间,求解更方便,进行如下假设:

(1)假设在整个传热过程中,土壤的物性参数不随土壤温度的变化而改变.

(2)忽略土壤温度的波动,认为地表温度以及深度对其影响很小.

(3)认为回填材料与地理管外壁、钻井外土壤是完全无缝隙接触,忽略它们之间的接触热阻.

(4)不考虑土壤与空气的对流换热.

1.2 模型几何参数与网格划分

利用 Gambit 软件建立地源热泵管群的二维平面模型(见图1).管井与管井之间的中心距离为 4 m,最外面的管井距离土壤边界的距离也为 4 m,钻孔直径为 160 mm.根据网格划分原则,在温度场变化剧烈的地方划分网格密集,在温度场变化缓慢的地方划分网格疏松,地理管周围及钻孔周围的温度变化剧烈,所以密集布置网格,其他地方可以疏松划分网格,顺排和叉排方式下的管群网格划分见图2.

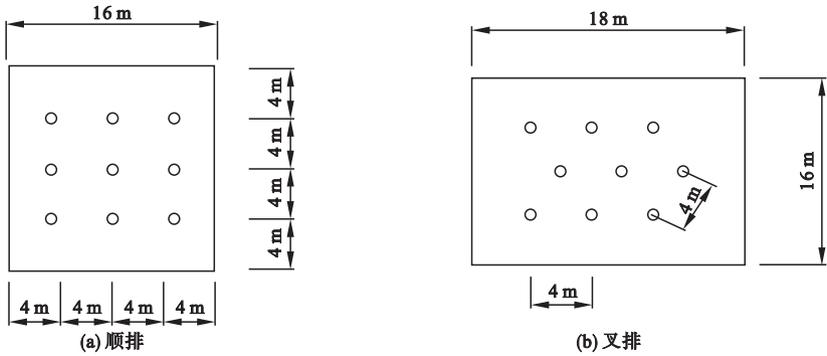


图1 管群布置方式

Fig. 1 The arrangement of tubes

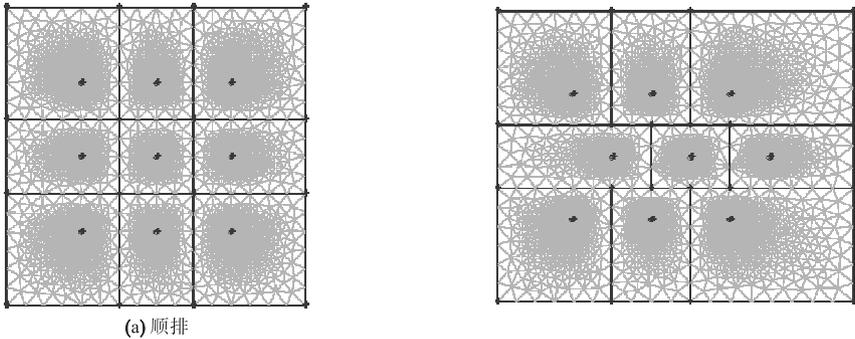


图2 管群网格划分

Fig. 2 The mesh of tubes

1.3 边界条件的设置及模型输入参数

(1)管群外围土壤边界设定为定温边界条件。

(2)管壁处设为第二类边界条件,认为管壁处的热流密度近似为定值。

笔者参考文献[19]中的实验测试参数,取夏季井深换热量为 60 W/m ,冬季单位井深取热量为 46 W/m 。土壤的初始温度设为 $16 \text{ }^\circ\text{C}$,模型中各材料的物性参数见表1。

表1 模型各材料的热物性参数

Table 1 Model the material thermal physical parameters

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)
土壤	1 600	1.80	1 645
回填材料	1 900	2.20	850
U型管	950	0.45	2 300

2 不同因素对管群换热的影响

埋管换热器的垂直U型管周围都是回填土,有些工程会直接将钻井得到的土直接填回到钻井,而理论研究时会考虑其他的回填材料,由于回填材料的热物性,尤其是回填材料的导热系数,对埋管换热器有重要影响,从而也对周围土壤温度的变化有相当重要的作用^[20]。笔者取导热系数 λ 分别为 $1.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $2.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $2.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的回填材料进行埋管换热器管群周围温度的模拟。

地源热泵系统的地下换热部分都是由很多个独立的埋管组成的,众多埋管就会有不同的埋管排列方式,而不同的埋管排列方式会对地下换热系统产生影响,从而影响土壤温度场的分布。笔者分别对顺排和叉排两

种方式下的管群换热器温度场进行模拟.

土壤中含有大量的地下水,而地下水并非静止不动,大多数时候是流动的,方向不定且流动速度非常微小.地下水流动过程中会带走一定热量,所以也会对管群换热产生影响.笔者假设地下水在一年中都存在,且速度的大小和方向都恒定,设速度 v 在 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、 $2.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、 $3.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 的情况下,模拟地理管管群周围的土壤温度场的情况.

土壤孔隙率的大小决定土壤中存在液态水的多少,土壤的孔隙率越大,说明含水量越大,土壤的孔隙率越小,则说明土壤体越接近纯固体.由于水的比热容相比于其他任何一种土体的比热容都要大,所以水的多少直接

影响整个土壤的总比热容,即孔隙率越大,土壤的总比热容越大.与之相反的是,水的导热系数却很小,根据多孔介质中选取有效导热系数的公式,土壤的孔隙率越大,有效导热系数越小.由此可见,土壤的孔隙率对地理管换热有着不可忽视的作用.笔者分别取 $\phi = 0.232$ 、 $\phi = 0.332$ 、 $\phi = 0.432$ 三种孔隙率,在不考虑存在渗流速度的情况下,模拟土壤温度场的变化情况.

3 模拟结果及分析

3.1 回填材料对管群换热的影响

不同回填材料时夏季运行两个月时土壤温度场模拟结果见图3.

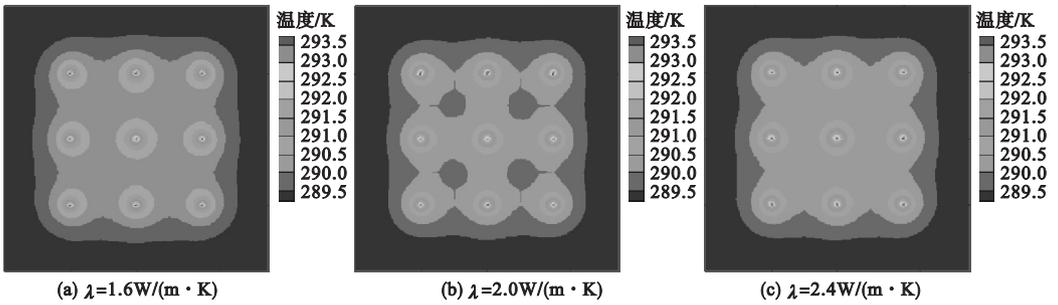


图3 不同回填材料夏季运行两个月时的温度场

Fig. 3 The temperature field in different backfill material after summer condition 2 months

从图3可以看出,夏季运行两个月后,地理管管群周围的土壤温度都有所上升,随着回填材料导热系数的增大,地理管换热器与周围土壤的换热进行的越快,热量传递的范围也越大,且位于管群中心位置的地理管周围土壤同

一直的温度线范围要大,因为每一根埋管都向四周散热,中心处的埋管接受四个方向的热量,所以其周围的土壤温度升高较快.

三种回填材料下夏季恢复三个月后土壤温度的恢复情况模拟结果见图4.

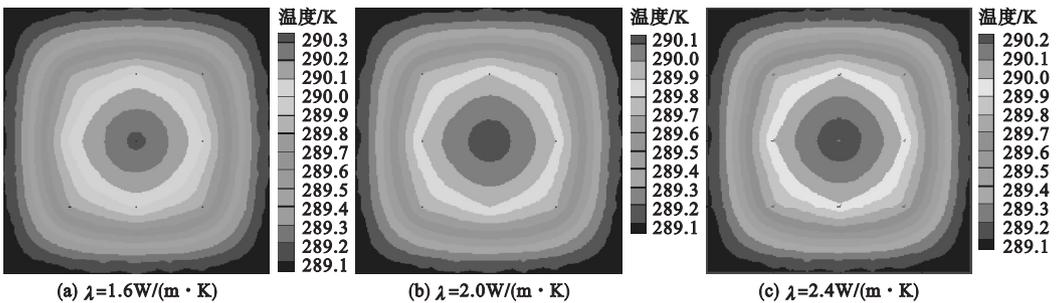


图4 不同回填材料夏季运行后恢复三个月的温度场

Fig. 4 The temperature field in different backfill material after summer recovery 3 months

由图4可以看出,三种不同的回填土导热系数下,夏季供冷整体土壤温度都比原始土壤温度略高一点,且地理管管群中心处的土壤温度最高,最不易恢复到初始温度.导热

系数处于中间值的情况,土壤是恢复最好的,导热系数最小的情况土壤恢复最差.

三种不同回填材料下冬季运行五个月后的土壤温度场模拟结果见图5.

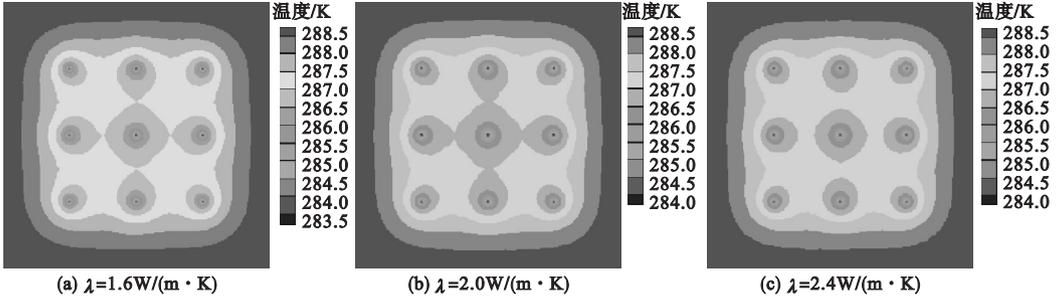


图5 不同回填材料冬季运行五个月的温度场

Fig. 5 The temperature field in different backfill material after winter condition 5 months

从图5可以看出,三种情况下整体土壤温度都有所下降,但下降的程度各不相同.对比图5(a)、(b)可以看出,前者的中心井与周围的四口井的14℃的等温线已连接,而图5(b)中连接程度更大,说明其热量交换进行地比较快.图5(c)中等温线未连接,究其原因

因可能是回填材料导热系数大的情况下,夏季运行后其周围温度升高幅度也大,所以在经过冬季运行后,换热器周围土壤的整体温度相对下降较小.

三种不同回填材料下冬季运行后土壤自然恢复两个月后的温度场模拟结果见图6.

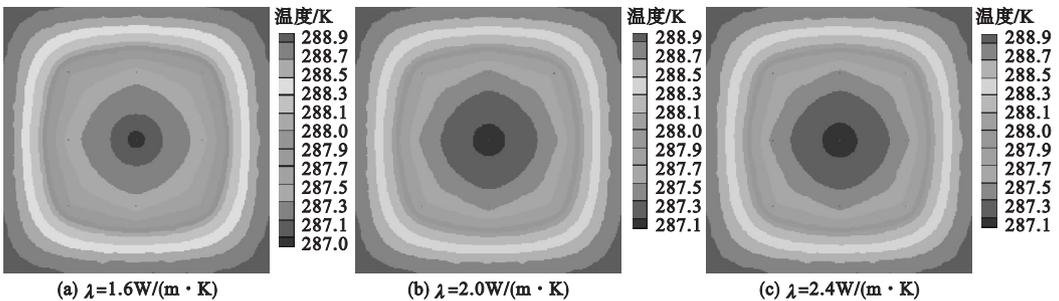


图6 不同回填材料冬季运行后温度场的恢复情况

Fig. 6 The temperature field in different backfill material after winter recovery

从图6可以看出,地源热泵经过一年的运行,管群周围的土壤温度都有所下降,原因是由于冬季运行时间较长,夏季运行时间相对较短,地理管换热器从周围吸收的热量大于释放的热量.此时土壤温度的加权平均值分别为15.114℃、15.137℃、15.134℃.由此可知,当导热系数大于土壤的导热系数时,对整体土壤温度的影响不大.

3.2 排列方式对管群换热的影响

不同排列方式下夏季运行后土壤温度场

的变化情况如图7所示.

从图7可以看出,顺排排列方式下的温度场17℃等温线的范围明显小于叉排排列方式下的范围,位于管群四个角上的地理管换热器周围土壤温度的等温线半径是最小的.分析原因,叉排排列方式下的管群换热比顺排方式下的换热更充分,更有利于地理管与土壤进行换热,但同时土壤的温度影响也更大.

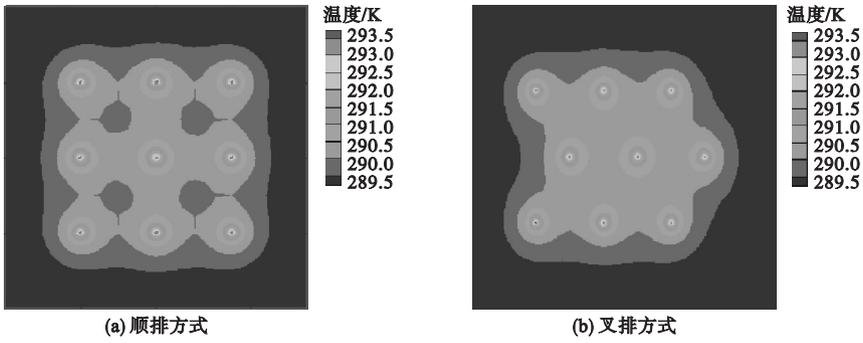


图7 夏季运行后土壤温度场情况

Fig. 7 The temperature field after summer condition 2 months

两种排列方式下夏季运行过后土壤温度场的自然恢复情况的模拟结果如图8所示。

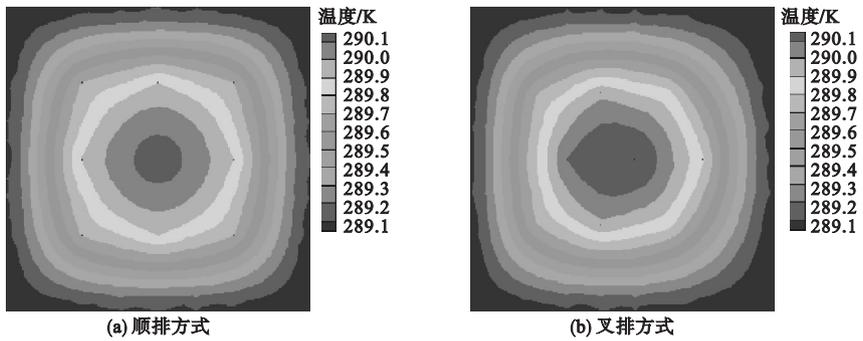


图8 夏季运行后土壤温度场恢复情况

Fig. 8 The temperature field after summer recovery

从图8可以看出,叉排排列时,最外边界的相同温度值的范围要大于顺排排列时,最大区别在于管群中心位置的地理管换热器周围的土壤温度.说明叉排排列方式下的管群在土壤温度进行自然恢复后,产生热堆积的

现象更明显,不利于管群中心位置的热扩散,但管群四周的温度恢复地较好.

两种排列方式下冬季运行后土壤温度场的变化情况如图9所示.

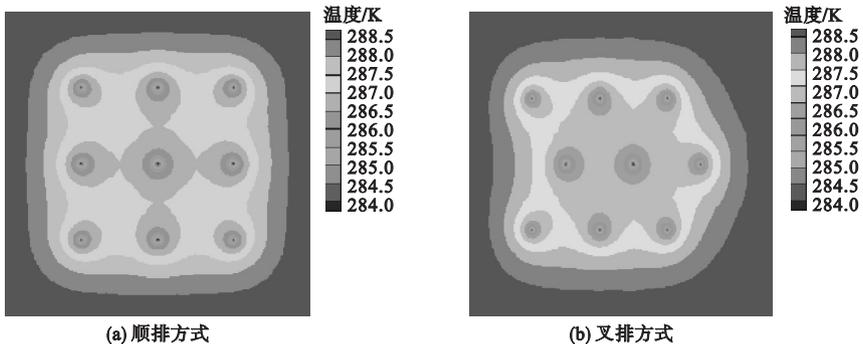


图9 冬季运行后土壤温度场情况

Fig. 9 The temperature field after winter recovery

从图9可以看出,叉排排列方式下,地理管附近地土壤温度最低达到10.5℃,与顺排方式下相比低0.5℃.由此可知,叉排排列方

式下在冬季运行后,土壤温度更易降低.

两种排列方式下冬季运行后土壤温度场的恢复情况如图10所示.

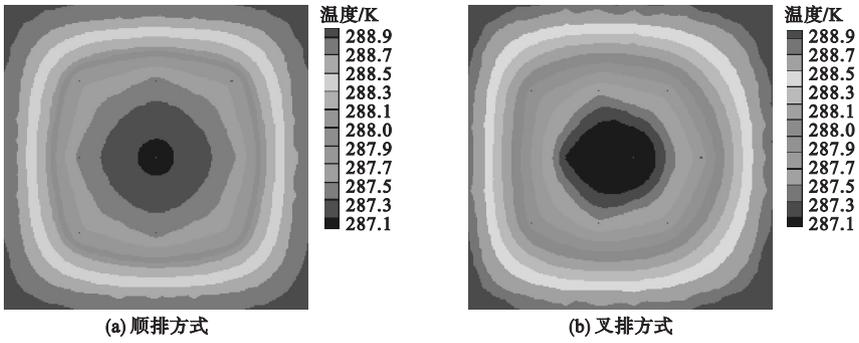


图 10 冬季运行后土壤温度场恢复情况

Fig. 10 The temperature field after winter recovery

从图 10 可以看出,当管群的排列方式为叉排时,管群中心位置的最低温度达到 14 °C,且该温度范围半径比顺排排列时管群中心最低温度 14.1 °C 的半径范围还要大.叉排排列方式下管群四周同一值的等温线半径大于顺排排列方式,此时顺排和叉排排列方式下土壤温度加权平均值分别为 15.13 °C 和

15.12 °C.由此可知,冬季运行过后,叉排排列方式下的地理管管群的换热产生冷堆积的现象更明显.

3.3 渗流速度对管群换热的影响

三种流速下夏季运行后土壤温度场的变化情况如图 11 所示.

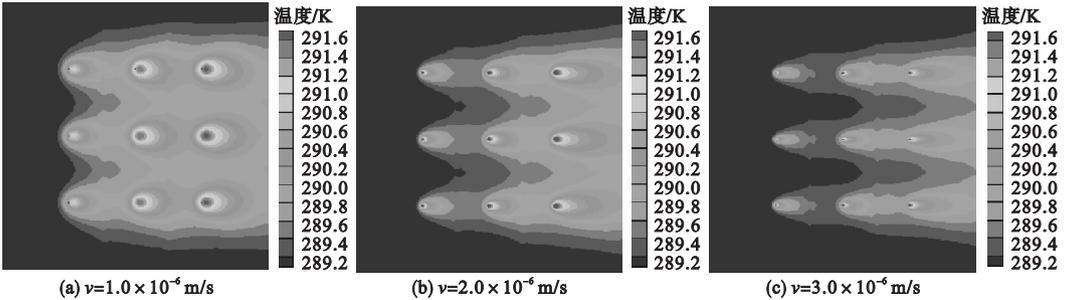


图 11 不同渗流速度时夏季运行后土壤温度场情况

Fig. 11 The temperature field after summer condition in different seepage velocity

从图 11 可以看出,当考虑渗流速度时,地下水上游处的土壤温度较低,地下水下游处的土壤温度较高,等温线沿流动方向偏移.随着渗流速度的增大,各个等温线的偏移程

度越来越大.

三种不同渗流速度时夏季运行后土壤温度场的恢复情况如图 12 所示.

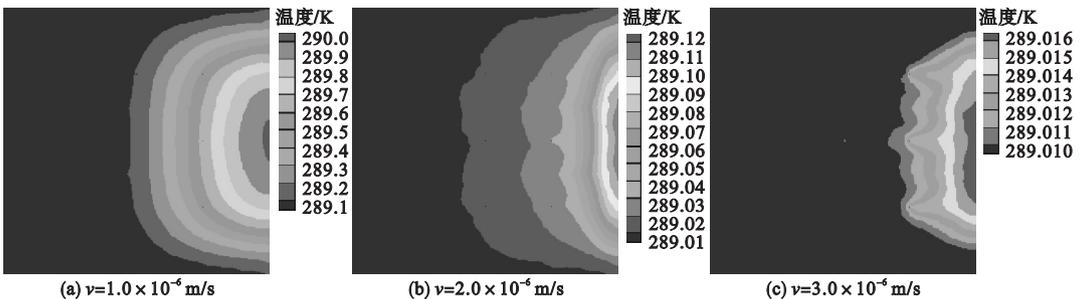


图 12 不同渗流速度时夏季运行后土壤温度场恢复情况

Fig. 12 The temperature field after summer recovery in different seepage velocity

从图 12 可以看到,夏季运行后土壤温度进行自然恢复,随着渗流速度的增大,地理管群周围土壤温度场越来越接近土壤初始

温度.

三种不同渗流速度下冬季运行后土壤温度场的变化情况如图 13 所示.

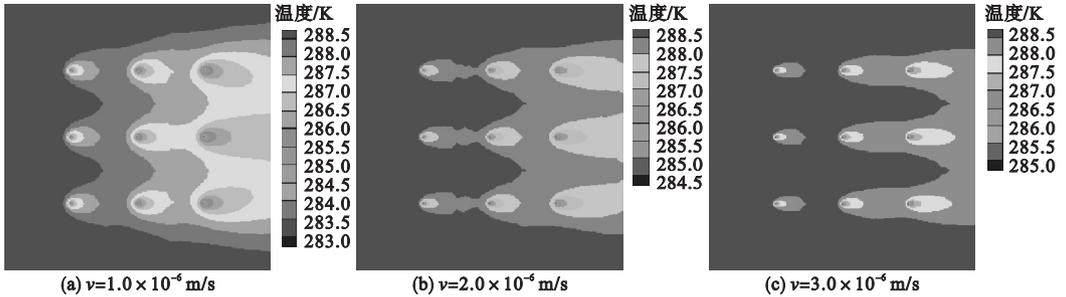


图 13 不同渗流速度时冬季运行后土壤温度场情况

Fig. 13 The temperature field after winter condition in different seepage velocity

由图 13 可以看出,冬季运行过后,随着渗流速度的增加,地理管周围的温度降低的幅度变小,各等温线的范围越来越小.

三种渗流速度下冬季过后土壤温度自然恢复情况的模拟如图 14 所示.

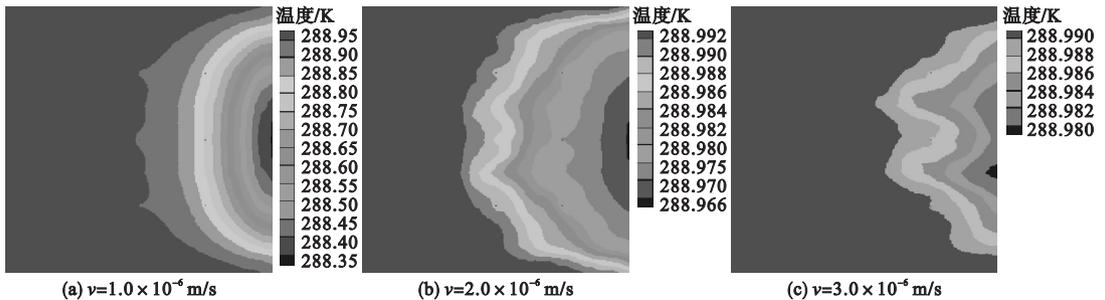


图 14 不同渗流速度时冬季运行后土壤温度场恢复情况

Fig. 14 The temperature field after winter recovery in different seepage velocity

由图 14 可以看出,地热热泵经过一年的运行,土壤中的热量都被地下水带到下游区域,所以最低温度区域集中在下游地区,按渗流速度从小到大的顺序,三种情况下计算区域内土壤温度的加权平均值分别为 $15.900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15.988\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15.993\text{ }^{\circ}\text{C}$. 由此可知,渗流速度越大,各区域的土壤温度值越接近土壤的初始温度. 一方面由于地下水的存在增加了土壤的总热容量,使单位体积土壤的热容量也增加,因此减小了单个钻孔的热作用半径;另一方面地下水的流动能够将地理管周围的热量带走,减少了地理管周围的冷

热量堆积,更有利于土壤温度的恢复.

3.4 不同孔隙率对管群换热的影响

不同孔隙率时夏季运行后土壤温度场情况的模拟结果如图 15 所示. 从图 15 可以看出,将土壤看成多孔介质且不考虑渗流速度时,随着孔隙率的增大,地理管换热器的热作用范围越来越小,通过观察 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的等温线可以看出,管群中心位置的地理管周围的温度范围半径大于其他位置地理管的温度范围半径.

不同孔隙率时夏季运行后土壤温度场的恢复情况模拟结果如图 16 所示. 从图 16 可

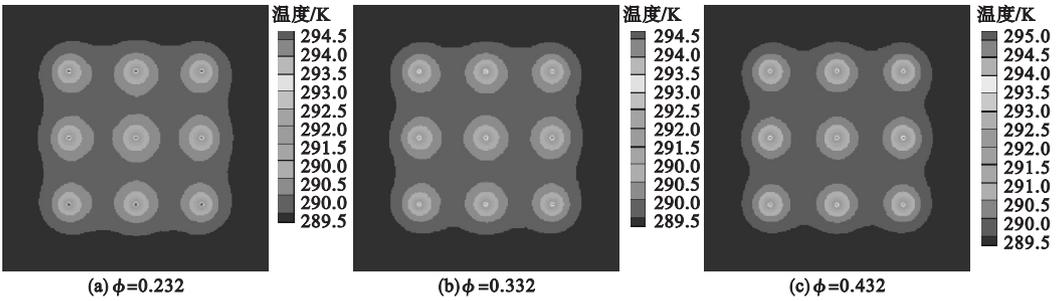


图 15 不同孔隙率时夏季运行后土壤温度场

Fig. 15 The temperature field after summer condition in different porosity

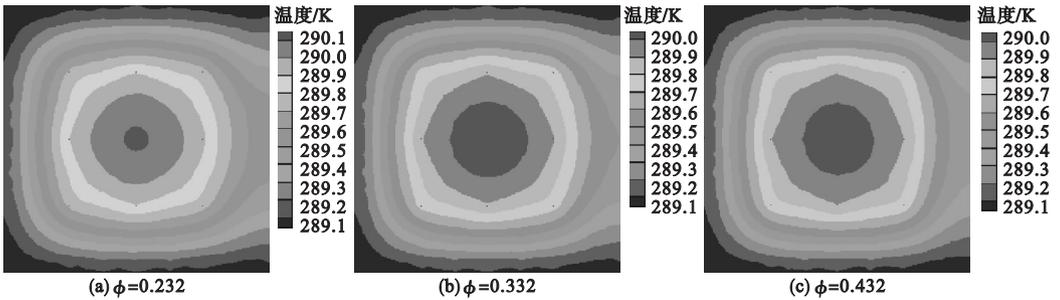


图 16 不同孔隙率时夏季运行后土壤温度场恢复情况

Fig. 16 The temperature field after summer recovery in different porosity

以看出,孔隙率较大时,管群中心位置最高温度的范围半径较小;当孔隙率增大到 0.432 时,每一条等温线的半径都有所增大,夏季运行后土壤进行自然恢复后的土壤温度加权平均值分别为 16.552 °C、16.537 °C、16.534 °C。将土壤作为多孔介质且不考虑渗流速度时,

土壤温度的加权平均值随着孔隙率的增大而减小,即土壤温度的加权平均值随着孔隙率的增大越接近土壤原始温度。

不同孔隙率时冬季运行后土壤温度场变化情况的模拟结果如图 17 所示。

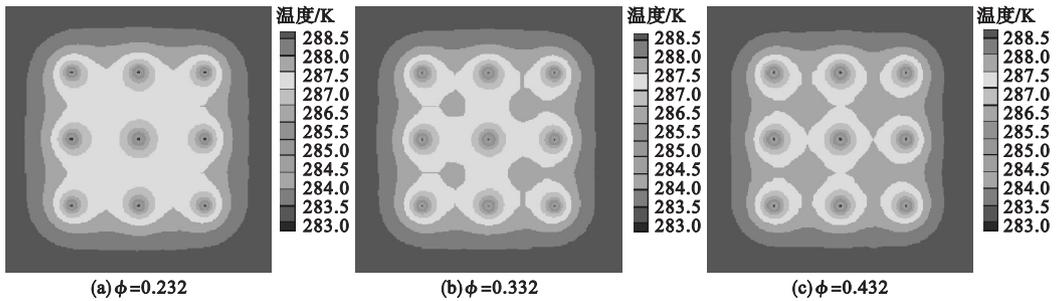


图 17 不同孔隙率时冬季运行后土壤温度场情况

Fig. 17 The temperature field after winter condition in different porosity

从图 17 可以看出,随着孔隙率的增大,热作用半径也相应减小,对比 14.5 °C 的等温线可以看出,当孔隙率较小时,埋管管群的管与管之间相互连接,随着孔隙率的增大,此等温线的相接程度越来越小,当孔隙率增大

到 0.432 时,管群边角处的埋管周围的此等温线不再与中心管周围的此等温线相连。

不同孔隙率时冬季运行后土壤温度场的恢复情况模拟结果如图 18 所示。

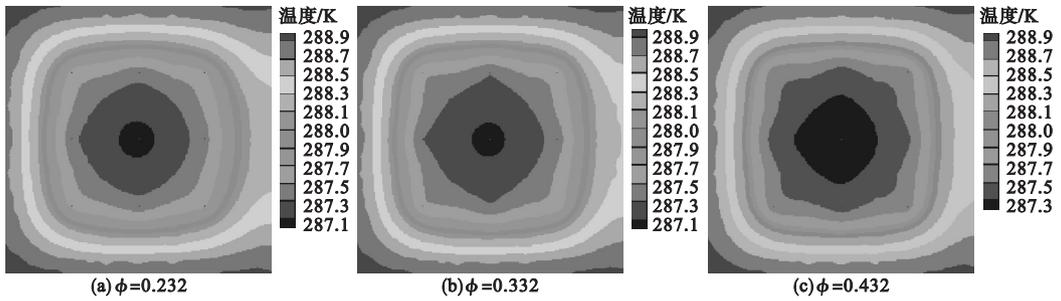


图 18 不同孔隙率时冬季运行后土壤温度场恢复情况

Fig. 18 The temperature field after winter recovery in different porosity

由图 18 可以看出,地源热泵运行一年时,孔隙率较大时,土壤区域最低温度的范围半径较小;当孔隙率增大到 0.432 时,每一条等温线的半径都有所增大.此时,三种孔隙率时土壤温度的加权平均值分别为 $15.017\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15.027\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15.08\text{ }^{\circ}\text{C}$. 同样,孔隙率较大者,恢复后土壤的最终温度越接近初始土壤温度.由于孔隙中充满比热容较大的液态水,增大了土壤的总热容,所以土壤中储存的热量或冷量也较多,导致温度降低较小.

4 结 论

(1)通过设置三种不同的回填材料的导热系数,地源热泵运行一年后,回填材料的导热系数为 $2.0\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,最接近初始土壤温度,而回填材料导热系数为 $2.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,其效果不明显.说明在一定范围内,随着回填土导热系数的增大,地理管换热效果越好,但当回填土的导热系数大于土壤的导热系数后,其效果却不显著.

(2)比较顺排排列和叉排排列的管群换热,地源热泵运行一年后,土壤温度的变化:叉排排列时,对土壤的热作用范围较大,但中心位置的温度也较低,说明叉排排列换热更充分,地理管之间相互影响作用更大.

(3)考虑渗流速度大小对管群换热后土壤温度场的变化,存在渗流比无渗流时整体土壤温度要更接近土壤初始温度.渗流速度越大,整个土壤温度与初始温度相差越小,地理管管群中的最低温度降低的幅度越小.由

于地下水流动时会将地理管周围堆积的热量带走,有利于土壤温度的恢复,不容易出现冷热堆积的现象.

(4)把土壤看作是多孔介质但不考虑渗流速度时,多孔介质的孔隙率对地理管管群的换热也有一定影响.随着地理管孔隙率的增大,地理管管群换热的热作用半径减小,相同值的等温线的范围减小.

参考文献

- [1] 鲍建镇. 地理管换热器三维非稳态传热数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2011.
(BAO Jianzhen. Numerical simulation of three dimensional unsteady heat transfer of the ground heat exchanger ground heat exchanger [D]. Chongqing:Chongqing University,2011)
- [2] 周超. 竖直埋管换热器传热过程的数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2012.
(ZHOU Chao. Numerical simulation of heat transfer in a vertical ground heat exchanger [D]. Chongqing:Chongqing University,2012)
- [3] 张安娜,唐远明. 环保节能地源热泵技术应用研究[J]. 环境保护与循环经济,2008(12): 34-37.
(ZHANG Anna, TANG Yuanming. Study on the application of environmental protection and energy saving ground source heat pumps [J]. Environmental protection and circular economy,2008(12):34-37).
- [4] 陆观立. 地下水渗流对土壤源热泵地理管换热特性影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
(LU Guanli. Study of effect of ground water seepage on characteristics of heat transfer in ground source heat pump systems [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2009.)
- [5] 刁乃仁,方肇洪. 地源热泵-建筑节能新技术[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(3):18-23.

- (DIAO Nairen, FANG Zhaohong. Ground source heat pumps—a promising technology for energy conservation in buildings [J]. *Building energy & environment*, 2004, 23(3): 18–23.)
- [6] 余延顺. 寒区太阳能—土壤源热泵系统运行工况的模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
(YU Yanshun. Solar energy in cold region-simulation study on operating conditions of ground source heat pump systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.)
- [7] 刘宪英, 张素云. 地热源热泵冬夏暖冷联供试验研究[J]. *水利电力施工机械*, 2000, 21(1): 14–22.
(LIU Xianying, ZHANG Suyun. Ground source heat pump heating in winter and cooling in summer experiment [J]. *Hydro-electricity construction machinery*, 2000, 21(1): 14–22.)
- [8] 李新国, 赵军, 周倩. U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(5): 703–707.
(LI Xinguo, ZHAO Jun, ZHOU Qian. Numerical simulation of soil temperature around the pipe-group of u-tube vertical heat exchanger [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2004, 25(5): 703–707)
- [9] 高青, 李明, 闫燕. 群井地下换热系统初温和构造因素影响传热的研究[J]. *热科学与技术*, 2005, 4(1): 34–40.
(GAO Qing, LI Ming, YAN Yan. Effect on ground source field heat transfer of original earth temperature and configuration of multi-boreholes [J]. *Journal of thermal science and technology*, 2005, 4(1): 34–40.)
- [10] 赵军, 王华军. 密集型桩埋换热器管群周围土壤换热特性的数值模拟[J]. *暖通空调*, 2006, 36(2): 11–14.
(ZHAO Jun, WANG Huajun. Numerical simulation on heat transfer characteristics of soil around compact pile buried underground heat exchangers [J]. *HAVC*, 2006, 36(2): 11–14.)
- [11] 刁乃仁, 李琴云, 方肇洪. 有渗流时地热换热器温度响应的解析解[J]. *山东建筑大学学报*, 2003, 18(3): 1–5.
(DIAO Nairen, LI Qinyun, FANG Zhaohong. An analytical solution of the temperature response in geothermal heat exchangers with groundwater advection [J]. *Journal of Shandong jianzhu university*, 2003, 18(3): 1–5.)
- [12] 李新国. 地理换热器内热源理论与地源热泵运行特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
(LI Xinguo. Study on inner heat source of underground heat exchanger and the ground coupled heat pump's performance [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.)
- [13] 田福军. 计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
(TIAN Fujun. The Principle and application of CFD software for fluid computational dynamics analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [14] 任艳. 中埋双U管地源热泵系统运行特性的分析与实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
(REN Yan. Performance characteristic analysis and experimental study of moderate-buried double-U tube ground-source heat pump system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.)
- [15] 章熙民, 任泽霖, 梅飞铭. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
(ZHANG Ximin, REN Zexu, MEI Feiming. Heat transfer [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.)
- [16] 朱聘冠. 换热器原理及计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
(ZHU Pinguan. Principle and calculation of heat exchanger [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987.)
- [17] 张坤. 地下水渗流对管束式埋管换热器的影响[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2010.
(ZHANG Kun. Heat exchanger effects of the underground tube bundle by groundwater seepage [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2010.)
- [18] 凌晨. 东华大学图书馆地源热泵运行性能及周围土壤温度场研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
(LING Chen. Operation performance and surrounding soil temperature research of library gshp in donghua university [D]. Shanghai: Donghua University, 2011.)
- [19] 杨志昆. 埋管地源热泵换热器的热响应测试与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
(YANG Zhikun. Thermal response test and numerical simulation of vertical heat exchanger of ground source heat pump [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.)
- [20] 王鹏轩. 严寒地区土壤源热泵系统热平衡问题分析[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2014.
(WANG Pengxuan. The study on GSHP system's geothermal equilibrium in extreme cold area [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2014.)