

渗流对富水土壤传热特性影响的实验模拟研究^{*}

广西大学 林俊[☆] 胡映宁 刘涛
广东工业大学 王成勇

摘要 以夏热冬暖地区富水土壤砂质土为传热介质,进行了水渗流对其传热特性影响的实验模拟研究。结果表明,无论是在制热还是制冷工况下,渗流都对换热器周围温度场产生显著影响,有渗流情况的换热效果明显提高,热量(冷量)聚集效应明显减弱。在渗流速度较大的富水地区,在保证常规换热效果的情况下,管井间距可适当减小,或在同样管井间距下,可减少管井数量或减小埋管长度。

关键词 富水土壤 渗流 热量聚集 地埋管换热器 实验

Simulating experiment on heat transfer characteristics of aqueous soil at seepage situation

By Lin Jun[★], Hu Yingning, Liu Tao and Wang Chengyong

Abstract Taking the aqueous sandy soil in hot summer and warm winter area as a heat transfer medium, studies the influence of seepage on heat transfer characteristics of the soil by a simulating experiment. The results show that seepage affects the temperature distribution around the heat exchanger obviously in both heating and cooling conditions, and the heat transfer effect is improved markedly at seepage situation, while the accumulating effect of heat quantity is significantly weakened. It is suggested that in the regions of aqueous soil with faster seepage velocity, either the tube-wells can be spaced adequately closer or for the same spacing the number of tube-wells and length of tubes can be reduced under the condition of assuring regular heat transfer effect.

Keywords aqueous soil, seepage, heat accumulation, ground heat exchanger, experiment

★ Guangxi University, Nanning, China

①

0 引言

在地源热泵空调系统运行过程中,由于冬夏两季向土壤输入的热量与冷量的不平衡,引起土壤热量或冷量的积累,从而导致土壤温度的变化,影响土壤换热器的换热效果。目前国内外关于竖直 U 形地埋管换热器的设计一般只考虑干性土壤热量或冷量的积累效应,但对于富水土壤水渗流对竖直 U 形埋管换热器换热效果影响的研究还非常欠缺。在已知的少量文献中, Eskilson 给出了移动

线热源问题的稳态解析解,讨论了渗流达到稳定状态后对地埋管换热器的影响^[1]; Chiasson 等人利用有限元法求解了二维的渗流问题,对一些实际问题进行了计算和比较,但未找到一般的规律和结论^[2]; 谭显辉等人分析了地下水流动对地下环路换

①☆ 林俊,男,1959 年 10 月生,大学,讲师
530004 广西大学东校园 7634 号信箱
(0771) 3237232 (0) 13307893397
E-mail: linjun@gxu.edu.cn

收稿日期:2006-12-22

一次修回:2007-03-15

二次修回:2007-06-05

^{*} 广西大学科学技术研究重点基金项目(编号:2004ZD02),广州市科技计划资助项目(编号:056Z211001)

热器设计的影响,阐述了地下水流动和传热控制方程及数学解法^[3];刁乃仁和李旻等人根据多孔介质中渗流时的能量方程,解析求解得到了有均匀渗流时无限大介质中线热源引起的二维温度响应^[4-5];赵军以玻璃球作为传热介质,模拟水渗流传热状态,就饱和型多孔介质传热特性进行了研究,建立了饱和型多孔介质层的理论模型^[6];范蕊等人基于热渗联合作用下的传热模型,采用整场离散、整体求解方法求得地埋管换热器、管内流体及周围土壤的温度场,分析了渗流对地埋管换热器传热的影响^[7]。这些研究对考虑渗流对换热效果的影响有一定的理论指导和借鉴意义,但由于其研究对象不是直接针对我国夏热冬暖地区富水土壤的典型砂质土,与该类型土壤的实际情况仍有较大差异。笔者所做工程及相关资料^[8]表明,地下水丰富的砂质土壤,水渗流对地埋管换热器的换热效果起主导性的作用。因此,以现有理论为依据,本文选择夏热冬暖地区富水土壤的典型砂质土作为传热介质,模拟水渗流传热状态,通过实验研究渗流对地埋管换热器周围温度场的影响,即富水土壤水渗流对热量或冷量聚集效应的影响,有利于实现夏热冬暖地区富水土壤换热器设计的合理性和经济性。

1 实验装置及测试仪器

本实验设计了一个渗流实验模拟箱(见图1),尺寸为 $2.5\text{ m}\times 1.25\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),模拟箱内填满砂质土,以此模拟大地环境;一根 4 m 长的PVC塑料管(箱体内管长为 3.6 m)埋设于实验箱中心部位,进口与一台小型热泵系统相连;热电阻为Cu50,共计18个,其中15个用于测量换热器在 xy 平面内不同点的温度(分布图见图2),16号热电阻用于测量进水温度,17号热电阻用于测量出水温度,18号热电阻用于测量环境温度。一

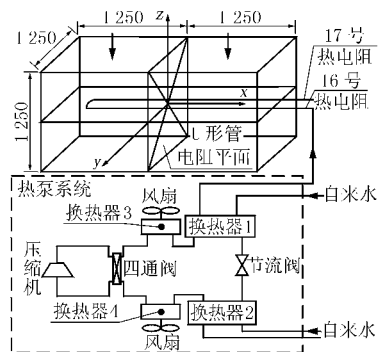


图1 渗流实验模拟系统示意图

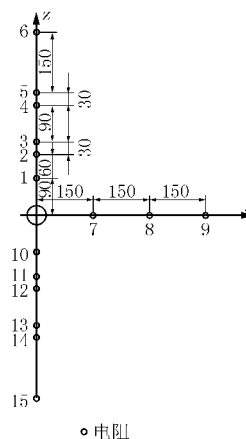


图2 测温热电阻分布图

台单通道XMTD数显调节仪,测试精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,用于显示铜电阻所测温度。实验的冷热源及室温的调节由小型热泵系统完成,室温调节范围为 $10\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,水温调节范围为 $10\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此实验条件基本不受外界环境温度的影响。

2 实验方法和步骤

实验过程分为两个阶段:

第一阶段为无渗流阶段。在此阶段首先测出箱体内砂质土的各测点原始温度 t_0 ,此时室温的原始温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (经标定),然后开始作散热实验(制冷工况),调节室温和热水温度到某一设定值,由于实验是要测量稳态温度场,因此要等待整个箱体温度稳定后再测量各测温点的温度。当散热实验完成后,箱体内砂质土的温度较高,对接下来的吸热实验(制热工况)的开始阶段影响较大,因此要等待箱体温度恢复到原始温度时再进行吸热实验。无渗流实验结束后,保持室温不变,等砂质土恢复到原始状态,为有渗流实验作准备。

第二阶段为有渗流阶段。为了保持整个渗流平面均匀渗流和渗流速度稳定,采用一块 $2.5\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ (长 $\times$ 宽)的镀锌钢板,并在钢板上按照行、列间距均为 50 mm 均匀分布直径为 5 mm 的小孔。将箱体上层的砂质土取出 50 mm ,把钢板放入,再在钢板上铺上一层棉布和塑料布,用针在塑料布上均匀地戳出小孔,然后再注满 50 mm 深的水(水温与室温相同),并保持这一水深度不变。经测试可知,渗流流量为 20 L/h ,即渗流速度为 $1.78\times 10^{-6}\text{ m/s}$ 。经测试,广西南宁市地下水渗流速度为 $4\sim 5\text{ m/d}$,即 $(4.63\sim 5.88)\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 。本实验由于模拟箱体积较小,为更好地测试热稳定

状态,因此渗流速度取值比实际小。其他与无渗流阶段实验过程相同。

3 实验结果与分析

3.1 制冷工况下渗流对温度场的影响

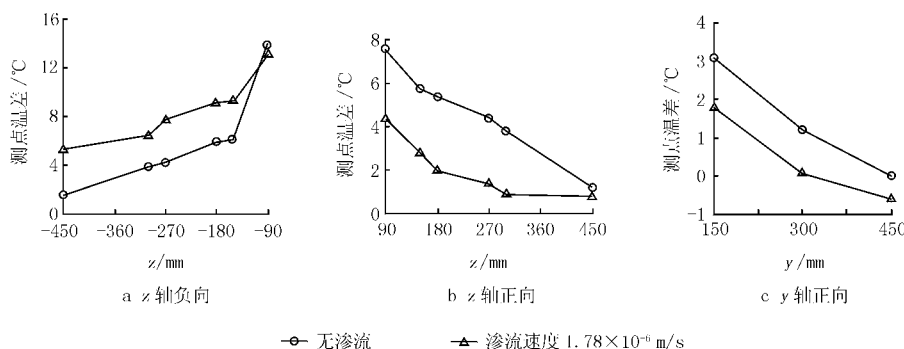


图3 制冷工况下有渗流和无渗流情况各测点热电阻的测点温差

水流量 $0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 、室内原始温度 30°C 、室外环境温度 27°C),有渗流和无渗流情况下各测点热电阻的测点温差。由图 3a 可知,此时热量传出方向与渗流方向相同,在 U 形管下方,当 $z = -90 \text{ mm}$ 时, $\Delta t_{\text{渗}} - \Delta t_{\text{无}} = -0.3^\circ\text{C}$,两者相差很小;但当 $z < -150 \text{ mm}$ 时,有渗流的测点温差明显大于无渗流的测点温差,即 $\Delta t_{\text{渗}} > \Delta t_{\text{无}}$,表明无渗流情况下,热量扩散仅靠导热和自然对流,热量向外传递速度较慢,而有渗流情况下,热量扩散的方式中增加了强迫对流,使得热量扩散速度加快,传热效果加强;当 $z \leq -300 \text{ mm}$ 时,有渗流曲线的梯度很小,说明在 $z = -300 \text{ mm}$ 处,有渗流情况的传热已基本达到稳定状态,但无渗流情况的热扩散效果则随着离换热器距离的增大而下降;在 $z = -450 \text{ mm}$ 处,有渗流的测点温差为 5.8°C ,比无渗流情况下大 4°C ,二者相差 46%,表明沿着渗流方向,渗流明显减少了热量在换热器周围的聚集效应,加快了热量扩散的速度。

由图 3b 可知,此时热量传出方向与渗流方向相反,在 $z = 90 \text{ mm}$ 处,有渗流和无渗流的测点温差相差达 3.2°C ,温升减小了 $\frac{\Delta t_{\text{无}} - \Delta t_{\text{渗}}}{\Delta t_{\text{无}}} = 42\%$;在 $z = 90 \sim 300 \text{ mm}$ 的范围内,有渗流情况下的各测点温差小于无渗流情况,相差 $2.9 \sim 3.4^\circ\text{C}$,表明有渗流情况的散热速度明显大于无渗流情况;当 $z = 300 \text{ mm}$ 时,有渗流情况下的温差值及曲线梯度变化都很小,即 $z \geq 300 \text{ mm}$ 后温升很小,散热已基本处于稳定状态;而无渗流情况下,热扩散延伸到 $z =$

实验用的热电阻没有经过标定,所以数据均采用差值的形式给出,即测点温差 Δt 指的是测点温度 t 与该点的原始温度 t_0 的差值,即 $\Delta t = t - t_0$ 。

图 3 给出了制冷工况下(进水温度 53.6°C 、进

450 mm 处才基本达到稳定状态,此时有渗流和无渗流的温差减小到 0.4°C 。由分析可知,在逆渗流方向,有渗流的热影响半径比无渗流时小。

由图 3c 可知,在 y 方向上,有渗流情况下的各测点温差均小于无渗流情况,且 $y > 300 \text{ mm}$ 时,有渗流的温度梯度比无渗流小。表明在垂直于渗流方向的平面上(xy 平面),渗流同样能使热影响半径明显变小。

综上所述,在制冷工况下,在沿着渗流方向和垂直于渗流方向的平面上,渗流都对换热器周围温度场产生显著影响,大大减少了热量在换热器周围的聚集,热影响半径减小,强化了传热效果。在实际工程中,地下水渗流将直接影响到管井的布置。因此在保证换热效果的前提下,对有渗流的富水地区,可适当减小管井间距,节约地埋管换热器的土地占用面积,也可适当减少管井数量,减少初投资。在相同的管井间距下,有渗流情况下地埋管换热器的换热效果要明显好于无渗流情况。

3.2 制热工况下渗流对温度场的影响

图 4 给出了制热工况下(进水温度 12.3°C 、进水量 $0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 、室内原始温度 30°C 、室外环境温度 32.4°C),有渗流和无渗流情况下各测点热电阻的测点温差。由图 4a 可知,此时渗流方向与吸热方向相反,在 $z = -90 \text{ mm}$ 处,有渗流温差与无渗流仅相差 1.6°C ,但随着离换热器距离的增大,温差区别越来越明显,到 $z = -450 \text{ mm}$ 处, $\Delta t_{\text{无}} - \Delta t_{\text{渗}} = 3.4^\circ\text{C}$ 。在 $z \leq -300 \text{ mm}$ 时,有渗流情况下,曲线梯度变化很小,换热基本达到稳定状

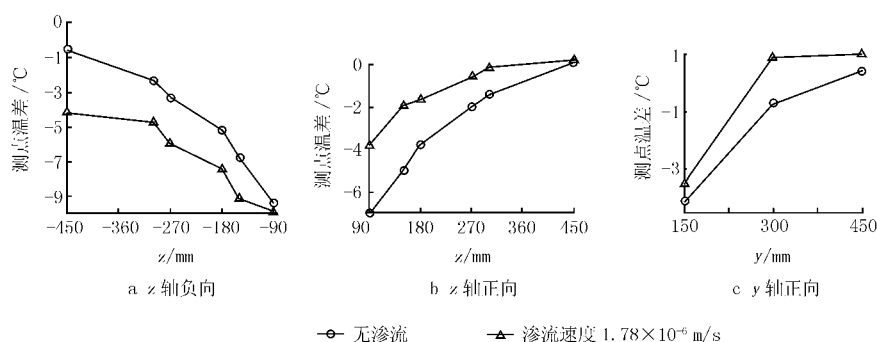


图 4 制热工况下有渗流和无渗流情况各测点热电阻的测点温差

态,温差大于无渗流曲线。与图 3a 的情况相似,渗流使得冷量在换热器周围的扩散速度加快,提高了吸热效率。

由图 4b 可知,此时渗流方向与吸热方向相同,有渗流曲线在无渗流曲线的上方,其各测点的温差绝对值较小;在 $z=90$ mm 处,无渗流情况与有渗流情况的测点温差最大相差 3.3 °C,即有渗流比无渗流温降减小了 $\frac{\Delta t_{\text{无}} - \Delta t_{\text{渗}}}{\Delta t_{\text{无}}} = 45.7\%$,换热器在该

区域的吸热效果明显提高;在 $z \geq 300$ mm 后,有渗流曲线的温度梯度明显减小,换热器影响强度减弱,即在 $z=300$ mm 处换热基本达到稳定状态,在 $z=450$ mm 处,温差相差仅为 0.8 °C。与图 3b 的情况相似,再次证明了渗流减弱了换热器在该区域的冷量聚集效应,换热效果显著提高。

由图 4c 可以看出, $|\Delta t_{\text{渗}}| < |\Delta t_{\text{无}}|$, $y \geq 300$ mm 后基本稳定,表明渗流不但加速了该区域的冷量扩散,而且减小了 y 方向的热影响半径。

通过以上分析可知,无论是在吸热还是散热情况下,渗流都对换热器周围的温度场产生较大的影响,加速了热量(冷量)的扩散速度,显著减少了热量(冷量)在 U 形管周围的聚集,明显提高了换热效果。

3.3 不同进水温度下渗流对温度场的影响

图 5 显示了在有、无渗流情况下测点 7 温差随进水温度的变化。由图 5 可知,无论是有渗流还是无渗流,在一定的环境温度条件下,测点温度受进水温度的影响都很大。在进水温度 $t_{\text{进}}=20 \sim 50$ °C 时(相当于制冷工况),无渗流的温差值均大于有渗流的温差值;在进水温度 $t_{\text{进}}=30 \sim 49$ °C 范围内,进水温度的升高对换热器的热扩散效果影响不大,说明换热器可具有较宽的稳定工作区间;当进水温度

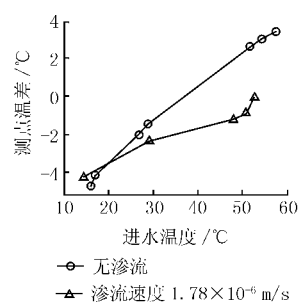


图 5 有、无渗流情况下测点 7 温差随进水温度的变化

达到 49 °C 左右时,差值达到最大,即散热的最佳状态,以后随着进水温度的升高,差值逐渐减小。而无渗流情况下,随着进水温度的提高,测点 7 的温差也显著增大,且与有渗流情况相比数值越来越大,说明换热器的换热效率要明显降低。在进水温度为 19 °C 左右时,两条曲线相交,即此处为散热和吸热温度的分界点;当温度低于 19 °C,有渗流时的温度高于无渗流,吸热效率高,且随着进水温度的降低,两者的差值越来越大。由此可知,在一定渗流速度和土壤初始温度下,渗流对某一固定点温度的影响并非随着进水温度的升高而无限增大的,而是存在某一固定的进水温度,在渗流情况下该温度可使热泵达到最高能效比。在实际工程中,制冷工况下换热器的进水温度在 40 °C 左右,由图 5 可知,在进水温度为 40 °C 时, $\Delta t_{\text{无}}=0.6$ °C,而 $\Delta t_{\text{渗}}=-1.6$ °C,表明渗流极大地改善了该点的换热环境。

4 结论

4.1 无论是在制热还是在制冷工况下,渗流都对换热器周围的温度场产生显著影响。有渗流情况的换热效果明显提高,且热影响范围明显减小。可

(下转第 14 页)

维模拟软件计算得到的试件传热系数值与测量值比较接近,相对误差小于 10%。而利用现行规范规定的方法计算得到的传热系数与测量值相差很大,相对误差甚至大于 50%。

4 结论

由于热桥的存在,与现行规范规定的一维热桥传热简化计算方法相比,实际通过建筑围护结构的传热耗热量大 30%~50%。利用一维简化方法计算得到的热桥中心点的内表面温度与实际测试结果相差较大。热桥的简化一维传热计算方法无法准确计算通过建筑围护结构中热桥的表面温度和热流强度,急需及时修订,以满足建筑节能技术科学发展的需要。

本文第二作者开发的二维模拟软件可以足够精确地模拟计算热桥稳态传热过程,为相关规范的修正提供了工具准备。

参考文献:

- [1] 刘加平. 建筑物理[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,2000
- [2] ISO. ISO 10211-1 Thermal bridges in building construction—heat flows and surface temperatures, part 1 general calculation methods[S], 1996
- [3] ISO. ISO 10211-2 Thermal bridges in building construction—heat flows and surface temperatures, part 2 linear thermal bridges[S], 2001
- [4] ISO. ISO 14683 Thermal bridges in building construction—linear thermal transmittance—simplified methods and default values[S], 1999
- [5] 中华人民共和国建设部. GB 50176—93 民用建筑热工设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,1993
- [6] 中国建筑科学研究院. JGJ 26—95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996
- [7] 林海燕. 墙体传热的三维模拟分析[C]//中国建筑学会建筑物理分会第八届年会学术论文集,2000:48—53
- [8] 刘月莉,林海燕. 建筑围护结构热桥部位的热工性能分析[C]//中国建筑学会建筑物理分会第九届年会学术论文集,2004:197—200
- [9] 赵敬源,闫增峰. 建筑外墙热损失计算误差的修正[C]//中国建筑学会建筑物理分会第八届年会学术论文集,2000:40—42
- [10] 郎四维. 公共建筑节能设计标准宣贯辅导教材[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [11] Zuk W. Thermal behaviour of composite bridges—insulated and uninsulated [J]. Highway Research Record,1965,76 (2):231—253
- [12] Threlkeld J L. Thermal environmental engineering [M]. Englewood cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc,1970
- [13] 国家建筑材料工业局. GB/T 13475—92 建筑构件稳态热传递性质的测定标定和防护热箱法[S]. 北京:中国标准出版社,1992

(上接第 10 页)

见在有渗流、特别是渗流速度较大的情况下,渗流成为影响埋管换热器换热效果的重要因素。

4.2 虽然由于实验条件的限制,本实验的渗流速度与实际地下水渗流速度相差较大,但实验结果已经明确说明:对有水渗流的富水土壤其换热模型不能套用贫水土壤的模式,而必须加入地下水渗流的影响因子。

4.3 在渗流速度较大的富水地区,在保证常规换热效果的情况下,管井布局间距可适当减小,以节约埋地换热器的土地占用面积;或在同样管井间距下,由于吸热(散热)效果明显提高,可减少管井数量或减小埋管长度,节省土壤换热器的投资。

参考文献:

- [1] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes[D]. Sweden:Lund University,1987
- [2] Chiasson A D, Rees S J, Spitler J D. A preliminary assessment of the effects of ground water flow on closed-loop ground heat pump systems [G] // ASHRAE Trans,2000,106(1):380—393
- [3] 谭显辉,丁力行. 影响地下环路热交换器设计的地下水流动的理论分析[J]. 制冷空调与电力机械,2003,24 (5):14—16
- [4] 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]. 山东建筑工程学院学报,2003,18 (3):1—5
- [5] 李旻,刁乃仁,方肇洪. 单井回灌地源热泵承压含水层渗流解析解[J]. 山东建筑工程学院学报,2006,21 (1):1—5
- [6] 赵军. 竖直埋管型地源热泵地下传热及热力性能的研究[D]. 天津:天津大学,2002
- [7] 范蕊,马最良. 热渗耦合作用下地下埋管换热器的传热分析[J]. 暖通空调,2006,36(2):6—10
- [8] Chiasson A D. Advances in modeling of ground source heat pump systems [D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1999