



竖直埋管地源热泵系统 研究进展*

上海交通大学 余鑫[☆] 王如竹 翟晓强

摘要 介绍了竖直埋管地源热泵的国内外研究情况。理论研究主要是针对地埋管换热器进行模拟,准三维模型已经被广泛接受;实验研究相比理论研究要少一些,但也得出了一些指导性的结论;系统耦合利用和技术经济性的研究也有进展。目前我国的地源热泵应用处于起步阶段,但发展迅速,随着政府及群众的重视,这项技术将有广阔的发展空间。

关键词 竖直埋管 地源热泵系统 地埋管换热器 理论研究 实验研究

Progresses in research of vertical pipe ground-source heat pump systems

By Yu Xin[★], Wang Ruzhu and Zhai Xiaoqiang

Abstract Presents the study status of the system. The theoretical study focuses on the simulation of ground heat exchangers and the quasi three-dimensional model has been popularly accepted. The experimental study is less carried out but still yields some instructive conclusions. The technical and economic study of the couple system also makes some progresses. Application of ground-source heat pump systems is still in primary stage in China, but it will be developed with growing recognition of the government and people.

Keywords vertical pipe, ground-source heat pump system, ground heat exchanger, theoretical study, experiment

① ★ Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China

0 引言

我们当前面临着两大能源挑战:保障可靠的、廉价的能源供应以及实现向低碳、高效、环保的能源供应体系的迅速转变^[1]。世界经济的现代化得益于矿物能源,如石油、天然气、煤炭与核裂变能的广泛应用,因而是建立在矿物能源基础之上的一种经济。然而,这一经济的资源载体将在 21 世纪上半叶迅速地接近枯竭^[2]。目前,世界上大部分国家能源供应不足,各国努力寻求稳定充足的能源供应,都对发展能源的战略决策给予了极大的重视,其中可再生能源的开发与利用尤为引人注目。

国际能源署(IEA)的可再生能源工作小组对

可再生能源做了如下定义^[3]:可再生能源是来自大自然中能够不断得到补充的能源,各种形式的可再生能源都是直接来自于太阳或者地球深层储存的热量,包括电能、太阳能、风能、海洋能、水力发电、生物质能、地热能以及生物燃料和氢能。到目前为止,世界各国对可再生能源的利用已经取得了一定的进展,表 1 是世界各国发展可再生能源的状况^[4]。可以看出,太阳能、风能、沼气能等可再生能源的利用已经引起各国重视并得到了较快的发展。

①☆ 余鑫,男,1983 年 9 月生,博士研究生
200240 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学机械动力学院 C 楼 358
(0) 13816719366
E-mail: yuxty@sjtu.edu.cn
收稿日期:2009-01-13
修回日期:2009-06-08

* 上海市科委科研计划项目资助(编号:07DZ12021)

表 1 世界各国可再生能源利用状况

	可再生能源发展状况
美国	风能、太阳能以及垃圾沼气能发展很快,在光伏发电技术开发、制造水平等方面居世界领先地位
英国	风能发电历史悠久,技术居世界领先地位;是欧盟所有成员国中最大的沼气生产国
德国	风力发电总装机能力和光伏发电能力居全球领先地位;是全球使用生物柴油最多的国家;拥有两座世界上功率最大的太阳能电站
日本	是世界上能源利用效率最高的国家;太阳能技术全球独领风骚
印度	风力发电在发展中国家中处于领先地位,已成为世界上第四大风力发电国
巴西	生物液体燃料大国
法国	欧洲生物燃料生产大国
丹麦	风力发电设备制造业具有全球竞争力
西班牙	风力发电装机容量居世界第二位

目前,发达国家的建筑能耗一般占总能耗的 1/3 左右^[5],因此建筑节能是节约能源的有效途径。实际上,除了太阳能、风能等可再生能源得到广泛应用外,利用浅层地热能热泵技术相结合形成的为建筑物供暖、制冷的地源热泵空调系统也在各国得到了广泛的发展。地源热泵空调系统的出现,很大程度上降低了建筑物使用空调带来的能源消耗。

1 地源热泵介绍

按室外换热方式不同地源热泵系统可分为三类^[6]:地埋管系统、地下水系统、地表水系统,其中地埋管地源热泵系统应用最为广泛。地埋管地源热泵的埋管分为水平埋管和竖直埋管,目前,采用较为普遍的是竖直埋管。1995 年的国际地热学术会议上,英国学者 Curtis 代表国际地热组织发表了一篇关于应用地埋管地源热泵系统的调查报告,其中总结性的结论为:1) 地埋管地源热泵系统是世界能源市场上技术成熟的系统之一,与用电供热、制冷技术相比具有稳定性好、可靠性高、花费更少的优势;2) 地埋管地源热泵系统经济上与燃油和燃气锅炉不相上下;3) 如果考虑到环境效益、能源保障和长期利用,地埋管地源热泵系统是常规供热、制冷系统最好的、技术含量最高的替代产品。根据国际上 1995—1999 年的统计数字,发达国家地源热泵产品的发展势头十分可观^①。

2 竖直埋管地源热泵的国内外研究情况

国内外学者对竖直埋管地源热泵作了很多的研究,主要分成四个方面:理论研究、实验研究、系统耦合利用研究、技术经济性研究。

2.1 理论研究

国内外的学者对竖直埋管地源热泵系统进行了大量的模拟研究,主要针对地埋管换热器进行模拟。地埋管换热器模型大都基于线性源理论,国外近期提出了多种模型研究方法。Lamarche 等人提出了地埋管有限线性源模型的一种解析解模型,并和线性源模型的数值解模型进行了对比,两种模型的模拟结果很接近。这种解析解模型能够很容易地得到不同结构的地埋管的换热结果^[7]。Lee 等人对圆柱源模型和线性源模型的地埋管换热计算结果进行了对比,发现随着钻孔尺寸的加大,两者的差别也增大,指出圆柱源模型比线性源模型更接近实际情况^[8]。Ozgener 等人用质量守恒、能量守恒、动量守恒方程建立模型,研究了有太阳能辅助的竖直埋管及水平埋管换热器的性能,得出热泵的 COP 为 3.12~3.64,而系统的 COP 为 2.72~3.43,并指出这种模型对所有地源热泵的设计、模拟及测试都很有帮助^[9]。Abu-Nada 等人提出了三维的圆柱源理论模型,并对 1 月份的使用情况进行了模拟,发现 U 形管出口温度随埋管深度的增加而升高,同时还与埋管的地理位置有关^[10]。Esen 等人用模糊理论提出了一个地埋管换热器模型,并得出了令人满意的结果^[11]。

国内的竖直埋管地源热泵模型研究也取得了很大的成果。有模拟研究测试地下岩土热物性的模型,有地埋管换热器的模型,也有整个地源热泵系统的模型。

设计地源热泵系统的地埋管换热器时需要知道地下岩土的平平均热物性参数,如果热物性参数不准确,则设计的系统可能不能满足负荷需要,也可能规模过大,增加初投资。清华大学和山东建筑工程学院共同研究提出了用于现场测量岩土导热系数的方法。2002 年,于明志等人提出了测试岩土导热系数的二维准非稳态传热模型和二维非稳态传热模型。二维准非稳态传热模型是将钻孔内的传热问题按二维处理,当模拟时间尺度足够大(大于 10 h)时,将钻孔内的传热近似看成稳态导热。而二维非稳态传热模型在二维准非稳态传热模型的基础上去掉了对钻孔内进行稳态处理的假

① 吴永华,刘宪英. 地源热泵的特点及发展前景. 全国暖通空调制冷 2006 学术年会资料集,2006

设^[12]。2003 年,于明志等人提出了一种更简单、更适合工程使用的岩土导热系数测量方法。该方法采用将钻孔内的总热阻作为一个变量、不计钻孔内具体状况的简化模型,无需确定钻孔中埋管的具体位置、上升管和下降管之间的距离以及埋管和回填材料的物性等参数^[13]。方肇洪研制了一套深层岩土热物性测量仪器^[14]。

地埋管换热器是地源热泵的重要组成部分,其设计计算正确与否对地源热泵的性能有很大影响。工程中单 U 形管与地层的传热通常按两部分来处理,一是钻孔内的传热,二是由钻孔壁面至外部地层之间的传热。刁乃仁等人指出,钻孔壁至地层远处的传热应按非稳态考虑,工程计算中常可采用线性源模型来求解。而对钻孔内的传热提出了 U 形地埋管的二维稳态传热模型,给出了基于钻孔内温度场的二维解析解,得出了钻孔热阻的表达式。之后他们又提出准三维传热模型,考虑流体在深度方向上的温度分布,给出了钻孔内热阻的解析表达式,并在此模型基础上开发了地埋管换热器的设计模拟软件^[15-19]。唐志伟等人通过改进现有二维传热模型,建立了准三维传热模型模拟 U 形竖直地埋管换热器的运行工况,通过引入换热功率函数,提高了模型在系统运行开始阶段的瞬态响应能力^[20]。杨卫波等人将 U 形地埋管的传热区域以管壁为界划分为钻孔内、外两个部分,钻孔外采用变热流圆柱源模型来求解钻孔瞬时壁温,在考虑埋管流体温度的沿程变化及 U 形管两支管间热干扰的基础上,基于能量平衡建立了钻孔内 U 形地埋管的稳态传热模型^[21]。Li Zhongjian 等人提出了一种无组织三维网格数值模型,该模型将 U 形管入口温度作为边界条件,并充分考虑了两支管直接的换热,模拟结果与实验结果能够很好地吻合^[22]。舒海文等人根据对流换热、导热理论和能量平衡方程,在借鉴 IGSHPA 模型方法的基础上,得出了地埋管换热系统设计的简明算法模型。该模型的突出特点是,根据需要可以得到满足相同换热量要求的多种埋管设计方案,供设计人员选择,为实际工程的设计提供了极大的方便^[23]。宋小飞等人采用 CFD 仿真模拟软件对 U 形地埋管换热器系统中的流动和传热进行了数值模拟,研究了地埋管换热器的换热效率与管间距、回填材料导热系数的关系^[24]。范蕊等人研究了热渗耦合作用下的地埋管

换热器传热模型,分析了地下水渗流对传热过程的影响,结果表明,渗流能增强地埋管换热器的传热能力;如果设计时不考虑渗流的影响,会导致设计容量偏大;渗流速度大的地区更有利于地埋管换热器工作;地埋管换热器宜埋在导热系数大的土壤中^[25]。刘晓茹以全年负荷为基础,采用专业软件从岩土全年热平衡的角度分析了地埋管地源热泵系统工程的可行性,结果表明,在寒冷地区以及夏热冬冷地区,地埋管地源热泵系统一般都能得到很好的应用^[26]。

目前国内对于地源热泵的模拟研究多集中在地埋管换热器方面,很少对地源热泵系统的整体性能进行研究。而实际上地源热泵系统的性能不仅与地埋管换热器的配置有关,而且也与匹配的热泵机组的性能有关^[27]。王景刚等人依据圆柱源理论,建立了耦合地面热泵机组和地埋管换热器特性的模拟模型,该模型可用于长期运行的地源热泵系统的短时间步长的运行特性模拟。该模型地埋管换热器部分采用圆柱源理论计算,热泵机组部分采用热泵性能数据拟合公式计算,两者耦合建立系统模型^[28]。曲云霞等人采用竖直 U 形地埋管换热器的准三维模型与热泵机组模型联合建立了地源热泵系统模型。地埋管换热器模型采用准三维传热模型,热泵机组部分采用根据实际部件结构参数建立的确定性模型,分别建立热泵机组各部件(压缩机、膨胀阀、冷凝器和蒸发器)模型,再耦合建立地源热泵系统模型。利用该模型可以计算出任意时刻系统的各项性能参数,也可以对地埋管换热器进行优化设计^[29]。

余延顺等人总结了国内外土壤耦合地源热泵系统地埋管换热器的各种传热模型:Ingersoll 模型、Hart 和 Couvillion 模型、IGSHPA 模型、Kavanaugh 模型、考虑土壤冻结的 Mei 模型以及 Mei 竖直套管式换热器传热模型^[30]。袁艳平等人对地源热泵地埋管换热器的传热研究进行了综述,介绍了地埋管换热器的分析解(包括线性源理论和圆柱源理论)、数值解的研究情况,分析了埋管之间的热干扰、地下水、回填材料以及管内循环流体的流量对地源热泵运行特性的影响^[31]。

2.2 实验研究

与模拟研究相比,实验测试研究要少一些,这主要是因为竖直埋管换热器占用的场地比较大,进

行实验比较困难。但国内外的学者还是针对竖直埋管地源热泵系统的制冷、供热以及全年长期运行工况进行了实验测试研究。

Hwang Yujin 等人在韩国一所学校的建筑内对一套地源热泵系统进行了实验研究。该地源热泵系统包括 24 口钻井,每口钻井深 175 m,实验测试了 2007 年一个夏季的供冷运行情况,计算得出的平均制冷 COP 为 8.3,在 65% 负荷下系统的 COP 为 5.9 左右^[32]。Hepbasli 在土耳其一所大学的研究所测试了其某个房间供冷的地源热泵系统的性能。该房间面积为 65 m²,冷负荷为 4.2 kW,测试结果显示地埋管换热器单位孔深的换热量达到 51 W/m^[33]。国内关于地源热泵性能的实验研究不是很多,这可能是由于实验研究需要进行长期的测试,对实验要求比较高。但是,随着国内地源热泵的发展,还是出现了一些地源热泵系统性能测试的研究。李芄等人对青岛地区首个竖直 U 形地埋管地源热泵系统进行了制冷工况的实验研究,得出了制冷量与竖直 U 形地埋管长度之间的关系,并拟合得出了热泵的制冷性能系数的经验公式^[34]。程群英等人对重庆地区 50 m 埋深的地源热泵系统夏季间歇运行时的制冷性能进行了测试,研究了地埋管水流量对地源热泵系统的制冷量、地下换热量以及 COP 的影响,发现水流量越大,单位管长换热量越大,机组 COP 越大^[35]。杨卫波等人对南京地区地埋管地源热泵的夏季运行性能进行了测试,发现夏季制冷工况下的启动时间约为 8~9 h,与连续运行工况相比,间歇运行工况可以有效地改变埋管周围土壤温度的变化趋势,降低其温升率,从而可在改善机组运行效率的同时,提高单位孔深埋管的换热能力^[36]。

Kara 在土耳其对一套地源热泵系统的供热性能进行了实验测试。地埋管深度为 55 m,结果显示这套地源热泵系统冬季供热时系统的 COP 为 2.09,而热泵的 COP 为 2.57,单位孔深换热量为 33.6 W/m^[37]。周亚素等人对一套地埋管地源热泵系统实验装置进行了冬季启动工况的实验研究,采用 4 根地埋管换热器并联运行,得出上海地区地埋管地源热泵系统供热性能系数为 3.1 左右^[38]。崔萍等人对济南地区一个室内游泳池的地源热泵供暖系统进行了实验研究,该地源热泵系统可满足游泳池供暖、空调和池水加热等三项负荷的需求,

研究发现采用地源热泵系统要远远优于冷水机组与锅炉的组合^[39]。

Michopoulos 等人在希腊一个空调面积为 1 350 m² 的建筑物内对地源热泵系统进行了为期 3 年的实验测试,该地源热泵系统共有 21 口钻井,每口井深 80 m。研究发现,3 年后建筑物周围土壤温度与实验开始前仍保持一致,说明该地区冬夏冷热负荷比较平衡,很适合使用地源热泵系统进行制冷和供暖^[40]。王华军等人对天津地区一个地源热泵示范项目进行了 3 年的长期测试研究,结果表明,长期运行条件下,热泵机组平均 COP 分别为 3.55(冬季)和 2.80(夏季),冬季工况和夏季工况的系统 COP 随运行时间分别呈递增和递减趋势;同时,长期运行条件下,冬夏负荷不平衡问题可能会对夏季工况产生一定危害,必要时应采取有效措施消除不利影响^[41]。

范蕊等人在实验室内建立小型砂箱模型,系统地研究了地下水流动对地埋管换热器换热的影响,结果表明,地下水流动增强了地埋管换热器的换热能力,同时增强了周围土壤转移热量的能力,减少了土壤热量或冷量堆积^[42]。

Hamada 等人在日本研究了一种提高地源热泵系统地埋管换热器换热性能的方法——no-dig 法,普通的竖直埋管换热器与 no-dig 法埋管换热器的对比如图 1 所示,研究结果表明,采用 no-dig 法埋管的系统要比普通的系统节能 78%^[43]。

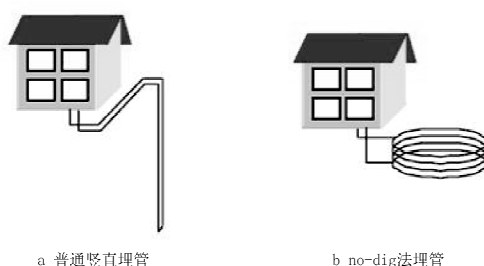


图 1 普通竖直埋管与 no-dig 法埋管对比

2.3 系统耦合利用研究

太阳能和地热能一样,都属于清洁的可再生能源,目前,国内有很多关于太阳能-地源热泵联合运行的研究。太阳能-地源热泵联合运行系统示意图如图 2 所示。

太阳能-地源热泵联合运行系统主要是在原来地埋管地源热泵的基础上加上太阳能集热器,通过地埋管换热器换热后的水再流入太阳能集热器进

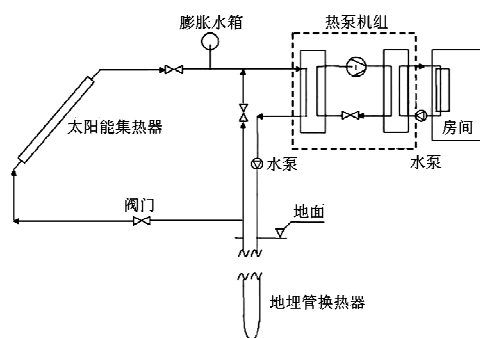


图2 太阳能-地源热泵联合运行系统示意图

行加热,从而提高热泵机组的冷凝器的进水温度,提高供暖效果。

曲云霞等人分析了我国北方地区使用太阳能-地源热泵联合运行系统进行供暖的经济性,指出我国北方地区土壤温度较低,冬季热负荷较大,若完全采用地源热泵来供暖,则地埋管换热器和机组的初投资比较高,连续运行效率较低。因此可利用太阳能集热器作为辅助热源,白天完全依靠地源热泵供暖,夜间利用太阳能集热器储存的热量二者联合供暖,此种方案的埋管换热器可按供暖热负荷的60%设计^[44]。杨卫波等人针对青岛地区的气候条件,对太阳能-地埋管地源热泵系统有、无蓄热水箱时各联合供暖运行模式进行了数值模拟。结果表明,与单独的地埋管地源热泵相比,联合供暖运行模式具有明显的节能效果,有、无蓄热水箱时的节能率分别为14.5%和10.4%,可见有蓄热水箱时节能效果更加明显^[45]。国外也有学者针对太阳能辅助地源热泵供热系统进行了研究。Ozgener等人对土耳其某绿色建筑采用的太阳能辅助地源热泵供热系统分别进行了性能实验测试研究和模拟研究,计算得出热泵COP为2.13~2.84,而系统COP要比热泵COP低5%~15%,每11~13 m深的U形管能够提供1 kW的热量^[46-47]。Yumrutas等人对土耳其一个带蓄热罐的太阳能辅助地源热泵空调系统的供热性能进行了研究,得出在阴天蓄热罐内水温(即蓄热温度)较低时,热泵COP在2.5左右,而晴天蓄热温度较高时,热泵COP达到3.5左右,并指出这种带蓄热罐的太阳能辅助系统很适合在土耳其南部太阳能丰富的地区使用^[48]。

除了太阳能辅助地源热泵系统外,还有学者对地源热泵空调系统和其他设备的结合使用情况进

行了研究。秘文涛等人分析了国内首个地源热泵及冰蓄冷集中空调系统工程的经济性。地源热泵与冰蓄冷空调联合运行系统主要由室内供热系统、三工况热泵机组工质循环系统、冰蓄冷空调系统和地埋管换热器系统构成。在夏季电力低谷时段,启动热泵机组制冷工况运行蓄冰,将冷量储存在蓄冰槽中,用于白天用电高峰时段供冷。如果白天冷负荷需求较小,单独采用冰蓄冷空调系统供冷;若白天冷负荷需求较大,开启三工况热泵机组,与冰蓄冷空调系统联合供冷。冬季采用地源热泵系统供暖。经济性分析结果表明,在供热模式下,相对于燃煤锅炉,该联合系统运行费可降低7.4%,相对于燃油、燃气、电锅炉,运行费可降低50%左右;在制冷模式下,相对于常规空调系统,运行费可降低42.7%~71.4%^[49]。Gasparella等人研究了地源热泵与溶液除湿的复合系统,该系统中地源热泵只负责给末端空调箱(AHU)提供冷水冷却空气,而空气的除湿则由AHU内的溶液除湿系统完成,这样,地源热泵系统需要提供的冷水温度不用很低,大大降低了地埋管换热器的负荷。与普通地源热泵系统的对比发现,在相同负荷的情况下,普通的地源热泵系统需要22口150 m深的钻孔,而复合系统只需要12口150 m深的钻孔,大大降低了成本^[50]。

2.4 技术经济性研究

贾孟立等人对河南地区一个已使用地源热泵的建筑进行了常规供暖设计与计算,以比较常规供暖与地源热泵供暖的技术经济性。结果发现,从初投资上看地源热泵为400万元,常规供暖为330万元;但从运行费用(运行8 h)上看,天然气锅炉供暖为0.10元/m²,而地源热泵供暖为0.05元/m²。同时,锅炉供暖会对环境造成污染,随着人们对环境问题的关注,地源热泵供暖就有了保护环境这个优势。另外,地源热泵在夏季还能供冷,这样一套系统就可以满足全年的需要^[51]。朱汉宝等人在上海某办公楼对地源热泵系统与空气源热泵系统的技术性能和经济性能进行了对比研究。在供暖季,由于室外温度很低,空气源热泵供热量很小,有时还需要除霜,一般除霜能耗约占热泵总能耗的10.2%;而土壤的温度稳定,环境对地埋管地源热泵的影响很小。制冷工况下,空气源热泵的COP在2.995~3.350之间,地源热泵的COP在4.2~

4.8 之间;供热工况下,空气源热泵的 COP 在 2.65~3.80 之间,而地源热泵的 COP 在 3.90~4.55 之间。对于初投资来说,地源热泵要高于空气源热泵,二者分别为 23.9 万元和 19.5 万元,而地源热泵的运行费用要远低于空气源热泵,二者分别为 2.2 万元/a 和 4.05 万元/a。可见地源热泵相比空气源热泵有很大优势^[52]。龙激波等人针对广州地区的一栋别墅分析了地埋管地源热泵、冷却塔水冷机组、空气源热泵和地表水地源热泵 4 种集中制冷空调系统的初投资、年运行费用,比较了各系统的经济性指标。各系统的初投资及年运行费用比较如图 3 所示^[53]。

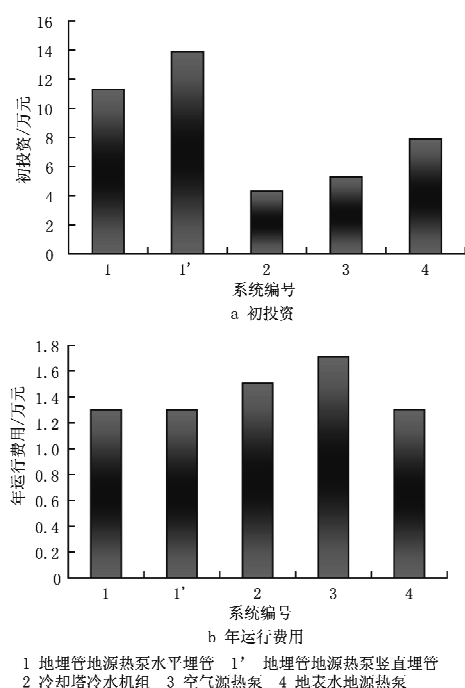


图 3 各方案初投资及年运行费用比较

可以看出,地埋管地源热泵的运行成本较低,但其初投资很高,当空调系统在广州这样的地区使用时,往往只需要夏季供冷,因此并不经济。何耀东等人针对天津地区的一个项目,根据《地源热泵系统工程技术规范》对比分析了地下水地源热泵系统和地埋管地源热泵系统的技术经济性、造价、共同的优点等,阐述了地下水地源热泵存在的弊端以及地埋管地源热泵的节能潜力^[54]。

同样,国外也有不少学者对竖直埋管地源热泵系统和其他空调系统进行了对比。de Swardt 等人对地源热泵空调系统和空气源热泵空调系统进行了实验及模拟对比。研究得出,供热工况下,地

源热泵系统比空气源热泵系统的供热量大 13%, COP 高 14%;在室外温度比较低的情况下,地源热泵系统的供热量比空气源热泵大 24%,效率高 20%。而在初投资方面,地源热泵系统比空气源热泵系统高 20%,使用地源热泵系统的投资回收期为 2 a^[55]。Urchueguia 等人对地源热泵系统和空气源热泵集中空调系统进行了制冷和供热工况的对比,在相同负荷的情况下,供热工况时,地源热泵系统比空气源热泵集中空调系统节能 43%±17%;而在制冷工况时,地源热泵系统比空气源热泵集中空调系统节能 37%±18%^[56]。Genchi 等人对东京一个高能耗地区的一套地源热泵系统和空气源热泵系统进行了对比,研究了二者 CO_2 排放量的关系,计算得出使用地源热泵系统每年的 CO_2 排放量为 33 935 t,而使用空气源热泵系统每年的 CO_2 排放量为 73 454 t,前者比后者减少了 54%^[57]。

3 地源热泵在国内的应用

我国地源热泵技术的研究始于上世纪 80 年代,1988 年中国科学院广州能源研究所主办了“热泵在我国应用与发展问题专家研讨会”。1998 年我国科技部与美国能源部分别代表两国政府签署了中美两国政府地源热泵合作协议,引进和推广美国先进的地源热泵技术^[58]。第八届全国人民代表大会常务委员会第二十八次会议审议并通过了《中华人民共和国节约能源法》,从政策上促进地源热泵事业的发展。建设部 2006 年制订了《地源热泵供热空调技术规范》(2007 年 1 月 1 日实施),为地源热泵空调系统的推广应用提供了可靠的技术保障。这对地源热泵技术在中国的推广起到了巨大的推动作用。

中国地源热泵产业在 2001 年初和 2005 年中期出现了两次发展高潮,市场竞争表现得日趋激烈。近几年,在国内地源热泵技术不断获得推广和应用的大环境下,少数经济发达城市的政府部门已经着手有计划、有规模地推广地源热泵,中国的地源热泵技术发展迎来了巨大的机会。据统计,目前北京使用地源热泵系统的建筑面积已超过 800 万 m^2 ,计划到 2010 年达到 3 500 万 m^2 ;沈阳已超过 2 000 万 m^2 ,计划到 2010 年达到 6 500 万 m^2 ,占全市供暖面积的 32.5%。全国地源热泵市场年销售额已超过 50 亿元,并以 20% 以上的速度在增长^[59]。吕悦等人于

2005 年对地源热泵的应用情况进行了调查, 调查结果显示, 在我国地源热泵的应用日益广泛, 调查的地源热泵应用工程共有 2 537 项^[58]。在我国, 地源热泵技术日益受到各级政府的重视, 有关地源热泵学术交流的会议也越来越多, 这都说明地源热泵在我国将会得到很好的发展。

随着地源热泵空调系统逐渐被政府及群众接受, 这种节能的新系统已经越来越多地出现在各城市中, 但是其应用仍然受到了一些限制。

1) 中国地源热泵的发展还不够规范, 基础研究还有待进一步完善, 包括土壤的特性、地埋管换热器的传热机理及冷热负荷的匹配平衡等。

2) 初投资太高。与空气源热泵系统相比, 竖直埋管地源热泵系统的初投资要高 30%~50%, 高出的部分主要是地埋管的投资^[60]。

3) 占地面积大。除了在郊区、农村地区采用竖直埋管地源热泵系统可以有足够的土地用于埋管外, 在城市内可使用的土地面积很少, 因此竖直埋管地源热泵系统的埋管间距往往较小, 不利于土壤热量的转移。

4 结语

4.1 国内对地源热泵系统的模拟研究已经比较成熟, 目前广泛使用的准三维模型已得到认可, 对地源热泵系统的设计、模拟、应用有很好的导向性作用。相对于国内的研究, 国外的模拟研究开展得比较早, 早期的线性源、圆柱源模型已被广泛认可, 国内的模拟设计大都是基于这些模型, 而近期国外学者研究地源热泵地埋管换热器的模型时考虑了一些其他的方法, 比如守恒方程、模糊理论等, 各种类型的模拟方法的提出, 有利于使模拟结果更接近实际的运行情况, 对今后的地源热泵系统设计研究有很好的指导作用。

4.2 对于地源热泵系统的实验测试, 国内外都进行了一些研究, 有的对地源热泵系统的制冷工况、供热工况分别进行了测试, 也有的对系统进行了 1 a 甚至更长时间的长期测试。研究发现地源热泵系统的性能与地埋管的深度、地理位置等因素有很大关系, 尤其是对土壤环境, 不同的地区有不同的影响。总体来说, 实验测试研究相对于模拟研究要少很多, 尤其是在国内, 这一方面是因为对地埋管进行实验测试本身比较困难, 另一方面也是因为地源热泵系统的投资比较高, 要进行实验测试就需要

投入较多的资金。

4.3 随着世界能源的紧缺, 能源的综合利用已经引起重视, 国内外的一些学者对太阳能-地源热泵的综合利用进行了研究, 针对供暖工况, 由太阳能辅助地源热泵系统进行供热, 减轻了地源热泵系统的负担。另外还有地源热泵系统与冰蓄冷系统综合利用及地源热泵系统与溶液除湿设备综合利用的研究。这都说明地源热泵系统可以与其他可再生能源综合利用, 以减缓能源紧缺带来的问题, 保护环境。

4.4 与空气源热泵等常规空调系统相比, 地源热泵系统的初投资较高, 但地源热泵这一套系统就可以满足建筑物供冷和供暖的需求, 同时运行费用也要比常规系统低很多, 一般来说比空气源热泵系统低 20%~30%。此外, 地源热泵系统的 CO₂ 排放量要比空气源热泵系统少很多, 对减缓温室效应很有帮助。

参考文献:

- [1] 国际能源署. 2008 世界能源展望 (2008 World Energy Outlook) [OL]. http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_chinese.pdf
- [2] 李一成. 能源危机与对策[OL]. <http://www.aura.cn/aurakm/energy/181625322.html>
- [3] 香港特别行政区机电工程署. 香港使用可再生能源的可行性研究——第一阶段摘要[OL]. http://www.emsd.gov.hk/emsd/c_download/sc/stage.pdf
- [4] 李春华, 张德会. 国外可再生能源政策的比较研究[J]. 中国科技论坛, 2007(12):124-126
- [5] 江亿. 我国建筑能耗状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5):30-40
- [6] 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
- [7] Lamarche L, Beauchamp B. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes[J]. Energy and Buildings, 2007, 39:188-198
- [8] Lee C K, Lam H N. Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems[J]. Renewable Energy, 2008, 33:1286-1296
- [9] Ozgener O, Hepbasli A. Modeling and performance evaluation of ground source (geothermal) heat pump systems[J]. Energy and Buildings, 2007, 39:66-75
- [10] Abu-Nada E, Akash B, Al-Hinti I, et al. Modeling of a geothermal standing column well [J].

- International Journal of Energy Research, 2008, 32: 306-317
- [11] Esen H, Inalli M, Sengur A, et al. Modeling a ground-coupled heat pump system using adaptive neuro-fuzzy inference systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31: 65-74
- [12] 于明志, 方肇洪. 现场测试地下岩土平均热物性参数方法[J]. 热能动力工程, 2002, 17(5): 489-492
- [13] 于明志, 彭晓峰, 方肇洪. 用于现场测量深层岩土导热系数的简化方法[J]. 热能动力工程, 2003, 18(5): 512-514
- [14] 刁乃仁, 方肇洪. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [15] Zeng Heyi, Diao Nairen, Fang Zhaohong. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers [J]. Heat Transfer—Asian Research, 2002, 31(7): 558-567
- [16] 崔萍, 刁乃仁, 方肇洪, 等. 地热换热器 U 型埋管的传热模型及热阻计算[J]. 暖通空调, 2003, 33(6): 108-110
- [17] Fang Zhaohong, Diao Nairen, Cui Ping. Discontinuous operation of geothermal heat exchangers [J]. Tsinghua Science and Technology, 2002, 7(2): 194-197
- [18] 刁乃仁, 曾和义, 方肇洪. 竖直 U 型管地热换热器的准三维传热模型[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 882-886
- [19] 方肇洪, 刁乃仁, 曾和义. 地热换热器的传热分析[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 685-687
- [20] 唐志伟, 时晓燕, 黄俊惠, 等. 地源热泵 U 型管地下换热器的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(1): 62-66
- [21] 杨卫波, 施明恒. 地源热泵中 U 型埋管传热过程的数值模拟[J]. 东南大学学报, 2007, 37(1): 78-83
- [22] Li Zhongjian, Zheng Maoyu. Development of a numerical model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 29: 920-924
- [23] 舒海文, 端木琳, 谷彦新, 等. 地源热泵竖直地埋管系统设计的简明算法模型研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(12): 74-77
- [24] 宋小飞, 温治, 司俊龙. 地源热泵 U 型管地下换热器的 CFD 数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(3): 329-333
- [25] 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
- [26] 刘晓茹. 地埋管地源热泵系统热平衡及其地域性分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(9): 57-59
- [27] 曲云霞, 张林华, 方肇洪, 等. 地源热泵名义工况探讨[J]. 西安建筑科技大学学报, 2003, 35(3): 221-225
- [28] 王景刚, 马一太, 张子平, 等. 地源热泵的运行特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 361-366
- [29] 曲云霞, 李安桂, 张林华, 等. 闭环地源热泵系统建模[J]. 西安建筑科技大学学报, 2007, 39(2): 235-239
- [30] 余延顺, 马最良. 土壤耦合热泵系统地下埋管换热器传热模型的研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 26-31
- [31] 袁艳平, 雷波, 余南阳, 等. 地源热泵地埋管换热器传热研究(1): 综述[J]. 暖通空调, 2008, 38(4): 25-32
- [32] Hwang Yujin, Lee J K, Jeong Y M, et al. Cooling performance of a vertical ground-coupled heat pump system installed in a school building [J]. Renewable Energy, 2008, 34: 578-582
- [33] Hepbasli A. Performance evaluation of a vertical ground-source heat pump system in Izmir, Turkey [J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26: 1121-1139
- [34] 李芃, 于立强, 张晶明. U 型垂直埋管式土壤源热泵制冷性能的实验研究[J]. 建筑热能通风空调, 2000, 19(3): 14-17
- [35] 程群英, 罗明智, 孙纯武, 等. 地源热泵夏季性能测试及传热模型[J]. 暖通空调, 2005, 35(3): 2-7
- [36] 杨卫波, 施明恒, 陈振乾. 土壤源热泵夏季运行特性的实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(9): 1012-1016
- [37] Kara Y A. Experiment performance evaluation of a closed-loop vertical ground source heat pump in the heating mode using energy analysis method [J]. International Journal of Energy Research, 2007, 31: 1504-1516
- [38] 周亚素, 张旭, 陈沛霖. 土壤源热泵机组冬季供热性能的数值模拟与实验研究[J]. 东华大学学报, 2002, 28(1): 5-9
- [39] 崔萍, 苏登超, 孙长亮, 等. 地源热泵在室内游泳池供暖空调中的应用研究[J]. 可再生能源, 2003(6): 18-21
- [40] Michopoulos A, Bozis D, Kikidis P, et al. Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece [J]. Energy and Buildings, 2007, 39: 328-334
- [41] 王华军, 赵军, 沈亮. 地源热泵系统长期运行特性的实验研究[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(2): 52-54
- [42] 范蕊, 马最良, 姚杨, 等. 地下水流动对地下埋管换热器影响的实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(8): 874-880

- [43] Hamada Y, Nakamura M, Saitoh H, et al. Improved underground heat exchanger by using no-dig method for space heating and cooling [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32: 480–495
- [44] 曲云霞, 方肇洪, 张林华, 等. 太阳能辅助供暖的地源热泵经济性分析[J]. *可再生能源*, 2003(1): 8–10
- [45] 杨卫波, 施明恒, 董华. 太阳能-土壤源热泵系统联合供暖运行模式的探讨[J]. *暖通空调*, 2005, 35(8): 25–31
- [46] Ozgener O, Hepbasli A. Experimental investigation of the performance of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating [J]. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29: 217–231
- [47] Ozgener O, Hepbasli A. Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study [J]. *Building and Environment*, 2005, 40: 1040–1050
- [48] Yumrutas R, Kaska O. Experimental investigation of thermal performance of a solar assisted heat pump system with an energy storage [J]. *International Journal of Energy Research*, 2004, 28: 163–175
- [49] 秘文涛, 张建一, 陈天及, 等. 一种新型的地源热泵与冰蓄冷空调联合运行系统[J]. *流体机械*, 2007, 35(8): 72–75
- [50] Gasparella A, Longo G A, Marra R. Combination of ground source heat pumps with chemical dehumidification of air [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 295–308
- [51] 贾孟立, 侯中兰, 赵廷林, 等. 地源热泵与常规供暖的经济性比较[J]. *可再生能源*, 2005(5): 71–72
- [52] 朱汉宝, 周亚素. 地源热泵与风冷热泵的技术经济性比较[J]. *可再生能源*, 2006(5): 86–89
- [53] 龙激波, 裴清清. 地埋管地源热泵空调系统在广州地区应用经济性分析[J]. *暖通空调*, 2006, 36(4): 34–39
- [54] 何耀东, 何青. 两种快速发展的地源热泵技术经济性对比分析及节能技术[J]. *建筑节能*, 2007, 35(3): 42–46
- [55] de Swardt C A, Meyer J P. A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump [J]. *International Journal of Energy Research*, 2001, 25: 899–910
- [56] Urchueguia J F, Zacaes M, Corberan J M, et al. Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49: 2917–2923
- [57] Genchi Y, Kikegawa Y, Inaba A. CO₂ payback-time assessment of a regional-scale heating and cooling system using a ground source heat-pump in a high energy-consumption area in Tokyo [J]. *Applied Energy*, 2002, 71: 147–160
- [58] 吕悦, 杨立平, 周沫. 国内地源热泵应用情况调查报告[J]. *工程建设与设计*, 2005(6): 5–10
- [59] 刘畅. 地源热泵技术在中国的发展与前景展望[J]. *中国建设信息供热制冷*, 2008(9): 16–17
- [60] Akpınar E K, Hepbasli A. A comparative study on exergetic assessment of two ground-source (geothermal) heat pump systems for residential applications [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 2004–2013

(上接第 75 页)

参考文献:

- [1] 方肇洪, 刁乃仁, 曾和义. 地热换热器的传热分析[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(4)
- [2] 赵军, 张春雷, 李新国, 等. U 型管埋地换热器三维传热模型及实验对比分析[J]. *太阳能学报*, 2006, 27(1)
- [3] 何雪冰, 丁勇, 刘宪英. 地源热泵埋管换热器传热模型及应用[J]. *重庆建筑大学学报*, 2004, 26(2): 76–80
- [4] 魏紫娟, 秦萍. 土壤源热泵地下垂直埋管换热器常用传热模型的研究[J]. *制冷与空调*, 2004(3): 17–21
- [5] Georgios F, Soteris K. Ground heat exchangers—a review of systems, models and applications [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(3): 2461–2478
- [6] Zeng H Y, Diao N R, Fang Z H. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(4): 4467–4481
- [7] Cui P, Yang H X, Fang Z H. Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(1): 1169–1175
- [8] 管昌生, 刘卓栋, 陈绪义. 地源热泵埋管可靠性设计方法研究[J]. *节能*, 2008(10): 29–33
- [9] 杨卫波, 施明恒. 基于先热源理论的垂直 U 型埋管换热器传热模型的研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(5)