

中国地源热泵技术应用及进展

孙友宏^{1,2}, 仲崇梅^{1,3}, 王庆华^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 教育部地热资源开发工程研究中心, 吉林 长春 130026; 3. 长春工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:地源热泵技术在中国应用时间不长,但推广应用速度非常快,几乎以每年20%以上的速度增长,尤其在2010年上海世博场馆中大面积推广,取得了很好的节能效果。随着该技术的推广应用和深入研究,我国已掌握了地源热泵的全套技术,并在浅层地热能勘查评价规范、钻孔热反应测试技术、高效地下热交换井以及太阳能与地源热泵技术的联合应用等方面都取得了一些新进展,这些成果的取得将为实现我国2050年的节能减排目标提供技术保障。

关键词:地源热泵;热物性;换热井;回填材料;太阳能

中图分类号:TK529;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)10-0030-05

Progress and Application of Ground Source Heat Pump Technology in China/SUN You-hong^{1,2}, ZHONG Chong-mei^{1,3}, WANG Qing-hua^{1,2} (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Research Center of Geothermal Resource of Ministry of Education of China, Changchun Jilin 130026, China; 3. Changchun Engineering College, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Ground source heat pump (GSHP) technology was used in China not long, but the application speed is very fast, almost at an annual rate of over 20% growth, especially applied in the Expo 2010 Shanghai in large scale, to obtain good energy saving effect. With the application of the technology and in-depth research, China has mastered the full range of GSHP technology, and in the technical regulations for shallow geothermal energy investigation and evaluation, bore thermal response testing techniques, efficient underground heat exchange wells, and joint application of solar and GSHP technology have made new progress, these achievements will be the realization of China's energy-saving emission reduction targets by 2050 to provide technical support.

Key words: ground source heat pump (GSHP); thermal property; heat exchange well; back full material; solar energy

0 引言

浅层地热能 (shallow geothermal energy) 是指地表以下一定深度范围内 (一般为恒温带至 200 m 埋深), 温度低于 25 ℃, 在当前技术经济条件下具备开发利用价值的地球内部的热能资源。该能源具有分布范围广、储量巨大、开采成本低等优点。目前, 开采浅层地热能最有效的方法是地源热泵技术, 该技术主要利用地下地层温度变化较小和蓄能的特点, 夏天通过热泵机组向地下存储热量, 同时提取冷能; 冬天向地下提取热能, 同时存储冷能, 从而对室内进行夏天制冷和冬天供暖。该技术是一种先进的开发利用浅层地热资源的新技术, 具有节能、环保、高效等优点, 科学家将其列为 21 世纪最有应用前景的 50 项新技术之一。地源热泵技术自上世纪 90 年代初在我国开始示范应用以来, 应用时间并不长, 但推广速度非常快, 几乎以 20% 以上的速度推广, 根

据推广使用中出现的问題, 不断进行研发、总结和和改进, 取得了一些新的技术进展。

1 中国地源热泵技术应用

目前, 我国每年使用地源热泵系统的项目已超过 2000 个, 建筑面积近 8000 万 m²。其中, 北京市的地源热泵项目已达 700 多个, 建筑面积达 1800 万 m²; 河北省达到 920 万 m²; 辽宁省沈阳市达到 3400 万 m²[1]。另外, 山东、天津、甘肃、江苏、内蒙古、吉林、江西等省 (市、区) 采用地源热泵为城市建筑供暖和制冷的面积迅速增加。资料显示, 2005 年我国地源热泵应用面积为 3000 万 m², 2007 年应用面积达到 7000 万 m², 而地源热泵系统在城市示范工程中的单体规模已达 80 万 m²。2008 年, 我国热泵行业的年销售额超过 50 亿元, 并连续多年实现 20% 以上的持续增长, 仅 2008 年我国使用该技术, 实现

收稿日期: 2010-09-10

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项“地层热物理性质原位测试方法及仪器研究”(项目编号:200811066); 中国地质调查局项目“浅层地热能钻采新技术研究与示范”(项目编号:科[2003]020-07)

作者简介:孙友宏(1965-), 男(汉族), 江苏如皋人, 吉林大学建设工程学院院长、教授, 博士生导师, 地质工程专业, 从事地质工程和新能源勘探开发的的教学与科研工作, 吉林省长春市西民主大街6号, syh@jlu.cn。

二氧化碳减排 1987 万吨^[2]。如图 1 所示,预计到 2020 年,全国利用地源热泵供暖和制冷面积将达到 2 亿 m^2 ,到 2030 年预计为 4 亿 m^2 ,到 2050 年将达到 10 亿 m^2 。

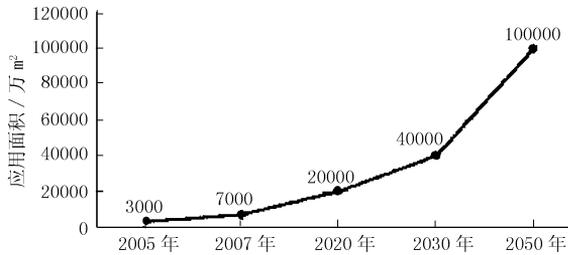


图 1 中国地源热泵技术应用面积增长趋势

2010 年上海世博场馆和 2008 年的北京奥运会场馆为我国地源热泵技术应用最成功的典型。2010 年上海世博会主题是“城市,让生活更美好”,为体现世博会节能环保的理念,在世博能源规划中,夏季供冷系统优化集成了江水源热泵、水(冰)蓄冷技术和地源热泵技术,冬季供热则集成了江水源热泵和天然气锅炉的技术组合。世博场馆采用热泵技术的总建筑面积达 86.8 万 m^2 ,其中,世博轴采用了江水源热泵与地源热泵技术,建筑面积为 24.8 万 m^2 ;世博中心采用了江水源热泵与冰/水蓄冷技术,建筑面积为 14 万 m^2 ;世博演艺中心采用了江水源热泵与冰蓄冷技术,建筑面积为 8 万 m^2 ;浦西新能源中心采用了江水源热泵技术,建筑面积为 40 万 m^2 。

“世博轴”位于黄浦江边,地下地上各 2 层,占地面积 13.6 万 m^2 ,总建筑面积 24.8 万 m^2 ,是世博园区最大的单体项目和世博园区的标志性建筑之一,也是世博会的入园主通道与核心区域。该建筑的空调系统由同济大学和南京丰盛新能源科技股份有限公司作为技术支持和承建单位,采用了江水源热泵结合土壤源热泵的复合系统,实现空调冷热源 100% 采用可再生能源。该空调系统中江水源热泵承担 2/3 负荷,土壤源热泵承担 1/3 负荷。江水源热泵系统采用 3 台 1000 冷吨的单冷离心机组,土壤源热泵系统采用了 5 台 350 冷吨螺杆机组,总装机容量 4750 冷吨。经过测算,每年可节约运行费用约 530 万元,节能率约 40%,可节电约 660 万 kWh,相当于节约煤炭 2640 t,节水 26400 t,减少 5440 t 二氧化碳的排放量。土壤源热泵根据项目所在地的岩土热物性实验结果,因地制宜的利用了 6000 根建筑桩基布置土壤换热器形成能源桩,这一技术创新性的将建筑桩基与空调系统结合起来,节省了投资和土地,达到了运行高效节能^[3]。

2 浅层地热能调查评价

浅层地热能的调查评价是地源热泵技术应用的基础,为规范浅层地热能的勘查与评价,2009 年 7 月 29 日,国土资源部发布了《浅层地热能勘查评价规范》^[4],并于 7 月 31 日开始实施。作为行业规范,这一举措有效促进了浅层地热能的开发利用。该规范规定了浅层地热能勘查评价的目的任务、基本工作内容、勘查工程控制程度、勘查质量要求、浅层地热能资源计算与评价、浅层地热流体质量评价、浅层地热能利用的环境评价和经济评价,以及勘查资料整理和报告编写等基本要求。该规范适用于区域和地源热泵工程浅层地热能的勘查、资源评价、报告验收以及资源/储量登记统计,可以作为区域浅层地热能调查设计书编制、工作布置、资源评价、报告编写和审批的依据,同时也作为地源热泵工程的浅层地热能勘查、资源评价和开发利用的依据。

3 钻孔热反应测试技术

钻孔热反应测试技术,也成为地层热物性现场原位测试技术,该技术对于正确合理经济地设计地源热泵系统是一种行之有效的方法,对于较大的地源热泵系统工程,显得尤为必要。地层热物性主要包括地层导热系数和钻孔热阻,是地源热泵系统设计的 2 个主要参数。对于地层热物性的确定,IG-SHP(国际地源热泵协会)推荐 2 种方法,一种是对水平埋管热泵系统,根据现场钻孔取出的岩样在实验室直接测定,或查有关手册确定导热系数;另一种是对大型的垂直埋管热泵系统,需进行现场地层热物性原位测试,即钻孔热反应现场测试。

3.1 测试原理

该技术测试原理如图 2 所示,首先,在将要埋设地下换热器的现场施工测试井,井深与实际工程井深相同,井中埋设热交换管并按设计要求进行回填;然后,进行井内原始温度测量,通过测量埋管内回流到测试仪内的初始水温来确定;最后,启动测试仪所配备的热泵机组,利用数据采集模块连续测定地下埋管换热器的进出水温度 T_1 和 T_2 ,根据测得的温度数据,利用传热模型反推钻孔周围岩层的平均热物性参数。由于实验室取的岩样的水份、温度和压力等测试环境与地下发生较大的变化,故测得的数据与实际数值相差较大。采用现场原位测试,可以直接得到较准的钻孔的地层平均导热系数和钻孔的热阻^[5]。

3.2 测试仪器

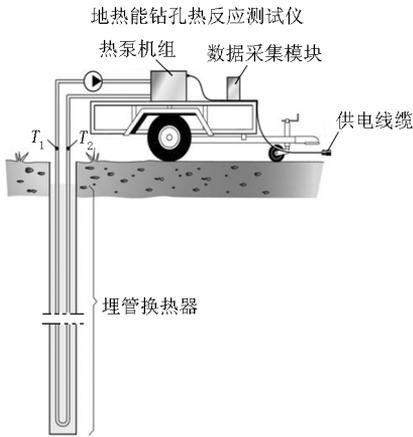


图2 地层热物性原位测量方法示意图

国内一些研究单位和大学也对地层热物性原位测试进行了大量的研究,如北京华清公司、山东建工学院地源热泵研究所、北京工业大学和中国地质大学都研制了测试土壤热物性参数的设备。2007年,吉林大学在国土资源部公益性行业科研专项经费资助的基础上,研制成功了BTR-600型地层热物性测试仪。该测试仪外形如图3所示,经北京、河北、天津和吉林等十多项工程应用,取得了很好的效果。



图3 BTR-600型钻孔热反应测试仪

该测试仪主要是由水泵、热泵、电动三通分流阀、冷凝器、加热器、补水水箱、温度传感器、压力传感器、电磁流量计等构成。其主要技术指标如下:

(1) 温度:采用铂电阻温度传感器,量程为 -20°C ~ 60°C ,输出 $4\sim 20\text{ mA}$ 电流信号,精度为A级。

(2) 压力:采用压力变送器,量程为 $0\sim 0.6\text{ MPa}$,输出 $4\sim 20\text{ mA}$ 电流信号,误差 $\leq \pm 0.2\%$ 。

(3) 流量:采用电磁流量计,量程为 $0\sim 3.5\text{ m}^3/\text{h}$,输出 $4\sim 20\text{ mA}$ 电流信号,误差 $\leq \pm 0.2\%$ 。

该测试仪具有以下特点:

(1) 为车载式的测试设备,可以方便地运达到不同测试现场。

(2) 有3种工作状态,可以自由切换各状态以适应不同工况;状态I为只使用电加热器;状态II为热泵与电加热器联合工作;状态III为热泵与电动三通调节阀联合工作。

(3) 不仅可以进行储热工况下的测试,也可以进行取热工况下的测试。

(4) 在使用热泵时,采用电加热器或电动三通调节阀进行辅助调节,保证输入或提取的热量恒定,以便更好的直接利用线源模型和柱源模型来分析计算土壤的热物性参数。

4 高效地下热交换井技术

影响地下换热井高效换热的主要因素是地下换热器的类型和回填材料的性能。90年代以来,国际上地源热泵技术的研究重点和热点主要集中在地下换热井技术方面,包括地下换热器的换热机理、强化换热及热泵系统与埋地换热器匹配等方面。

4.1 地下换热器的类型

如图4所示,地下换热器形式分为单U型、双U型、1+2型和套管型4种^[6]。U型地下换热器是目前常用的换热器,包括单U和双U型。U型管管径一般在 50 mm 以内,钻孔深度一般 $20\sim 200\text{ m}$,换热指标一般在 $20\sim 50\text{ W/m}$ (孔深)。虽然双U型换热器比单U型换热器每冷吨需要更多的管道,但是,因少钻井而节省的费用完全可以补偿管道数量加倍导致的费用增加^[7]。由于U型管自身进出管之间温度场相互影响,存在较严重的热短路,对换热效果影响较大。为此,2004年,吉林大学研发了同轴套管换热器,如图5所示,主要由外管、夹层套管和内管组成。同轴套管式换热器外管可采用无缝钢管、聚丁烯或聚乙烯管,外管直径可达 200 mm ;内管采用聚丁烯或聚乙烯管;在内管和夹层套管间充空气,

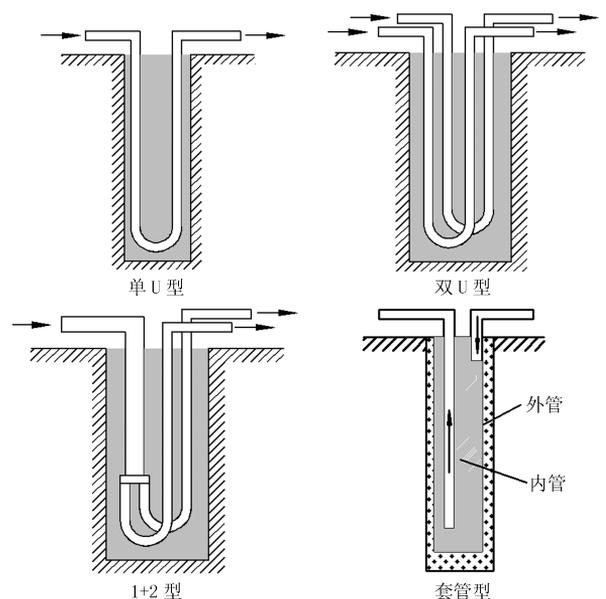


图4 地下换热器形式示意图

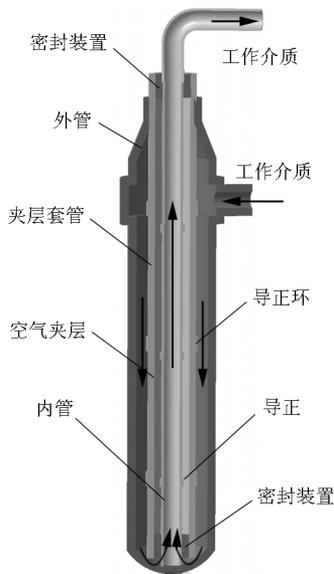


图5 同轴式套管换热器结构示意图

可防止热短路。其工作原理是:换热器的循环工作介质从外管和夹层套管之间注入,冬季供暖时,低于地层温度的工作介质,在向下流动的同时,通过外管与地层间进行热交换,使得工作介质不断升温,到达孔底后从内管回到地面热泵中进行放热;制冷时,高于地层温度的工作介质在地下循环时进行降温,再从内管回到地面热泵中。在相同条件下,同轴换热装置的热提取效率要好于U型管装置,但造价高。其优点主要是增大换热面积,可减少钻孔数和埋深。

同轴套管外管也可全部采用HDPE管进行加工,通过内衬电阻丝加热法熔接HDPE管,将管箍与管材形成一体,由于增加了过渡处的厚度,接头处的强度反而增大,从而保证了套管的强度。施工时采用边下管边熔接的方法,具体施工方案如下:首先将内管与管箍热熔联接,管箍间隔2 m,然后将夹层套管与管箍联接,等熔接处冷却后,将已联接好的内管送入夹层套管内。为了保证内管与夹层套管间形成空气夹层,必须将两端部进行密封处理。经试压后,方可下管。由于外管较粗,不易弯曲,本实验首先采用熔接法密封孔底外管端部,边下管边熔接。通过100 m深的同轴套管换热器实践证明,该方法简便易行,可以在工程中推广使用。

4.2 高导热的回填材料

回填材料是换热器和周围地层之间的热交换介质,优化灌注材料的导热性能可以提高热泵系统的COP、减少初期安装成本。细粒状的膨润土-水混合物普遍的用作直埋式换热器的回填材料。然而这种材料的导热系数相对较低,一般在0.65~0.90

W/m·K。另外,膨润土回填材料还会收缩,失水也比较严重。这种回填材料在地层比较干燥的条件下不稳定,以及由于随着失水而引起导热性能下降而对换热器性能带来负面影响。

2005年,为了提高回填材料的导热性能,我们采用2种途径:一是在回填材料中选择具有高导热系数的骨料;二是采用高效减水剂减少回填材料中的水分。试验中采用通过控制回填材料的W/C比、骨料物质等手段得出相应的试验结果。为了得出一些理论数据,并基于以上原则,我们采用的试验方案如下:

(1) 纯水泥混合物。通过控制水灰比得到相应的结论。选择的水灰比为0.4、0.6、0.8。得到含水量对传热性能的影响。

(2) 膨润土+水泥+水(MixI)。关于这种配方可以通过水:(膨润土+水泥),即W/C来分析其对导热性能的影响。

(3) 膨润土+水泥+粉煤灰(MixII)。粉煤灰的化学组成类似于粘土的化学成分,主要包括SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO和未燃尽炭。在水泥中掺入粉煤灰,可以降低水泥的用水量,这是粉煤灰的一个明显的优越性。粉煤灰中的光滑颗粒均匀地分散在水泥微颗粒之间,能有效地减少吸水性和内摩擦;由于粉煤灰密度较小,加入后使混合物的胶凝含量增加,浆骨比随之增大,因而流动性好,有利于泵送,提高了其和易性。实验从MixI中选取一种导热性能良好的配方,加入不同的粉煤灰测其导热性能。

(4) 膨润土+水泥+硅砂(MixIII)。硅砂中SiO₂的含量高,可以达到98%,而硅砂的导热率很高,比一般的水泥、膨润土都高,所以想通过提高骨料的导热性来提高混合物的传热性能。

通过试验研究,经过分析得出,在膨润土中加入砂子或水泥都能提高回填泥浆材料的导热系数,随含砂量的增加,其导热系数也增加,但考虑含砂量过大后,增加泵的注浆难度,故其含砂量控制在10%~30%之间,以此作为回填材料的最佳配方^[8]。实验证明,热交换性能良好的物质或混合物作为填充材料,可以提高热泵系统的热利用效率,减少埋管长度,降低安装成本,节约能源。

5 地源热泵与太阳能联合技术

地源热泵系统依靠埋管换热器从地层中提取能量,热泵机组的热源都是一定扩散半径范围内的土壤。由于埋管换热器冬夏两季累计向土壤的放

热量与取热量并不一定相等,这样就会造成地下土壤的冷热失衡,取放热量不平衡逐年堆积就会超过土壤自身恢复能力,造成其温度不断偏离初始温度,并导致冷却水温度随之变化和系统运行效率逐年下降^[9]。对于寒冷地区使用地源热泵系统,这种现象尤为突出,由于冬季的供热需求远大于夏季的制冷要求,因而冬季从地下提取的热量和夏季灌入地下的热量显著不平衡,这就会导致地下换热器周围的土壤温度逐年降低,换热效率也会逐年下降,将有可能不满足室内的供暖需求。对这种地层热不平衡问题,利用太阳能等其他能源作为辅助供热或者进行地下储能,可大幅度提高地源热泵系统的效率。

如图6所示,2006年,吉林大学在已建立的地源热泵实验平台的基础上,通过安装聚焦式同步跟踪太阳能集热器,建立了联合供暖系统实验平台^[10],并针对该系统配备了整套的自动控制系统和数据采集系统。在对地源热泵系统模型研究的基础上,利用机理建模方法建立起整个联合系统的动态仿真模型,对系统进行数值模拟。针对中国北方的气候特点,在系统仿真模型的基础上对联合系统中地源热泵和太阳能集热器的设计供热负荷分配比例、运行模式及循环介质流速设定等参数进行了优化分析。该研究为供暖为主的北方寒冷地区地源热泵及太阳能集热器联合系统提供了研究基础,对推广地热能 and 太阳能的综合利用具有重要的指导意义和实用价值。

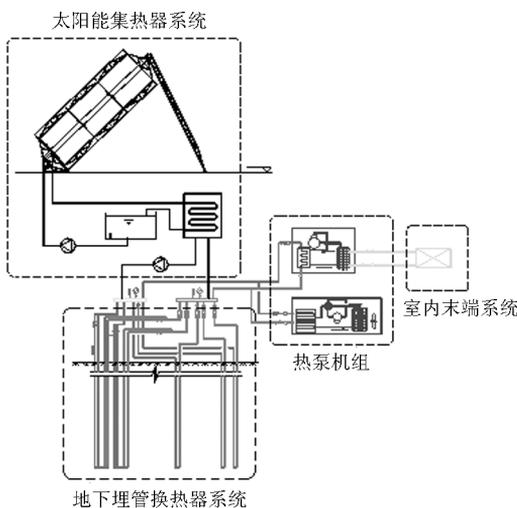


图6 地源热泵与太阳能联合供暖系统

2007年,山东方亚地源热泵空调技术有限公司在山东省德州市某办公楼工程中,将地源热泵与太阳能供热空调复合系统进行了成功应用,应用的建筑物为3层,建筑面积为5000 m²,层高为3 m。夏

季:室内温度24~26℃;相对湿度<65%。冬季:室内温度18~22℃。办公楼建筑冷负荷指标为70 W/m²、热负荷指标为60 W/m²;冷负荷为350 kW,热负荷为300 kW。该项工程地质条件为土层,采用单U型管形式换热器,管径DN32,单位埋深热量约为42 W/m,换热器总长度约为1万m,换热井深为100 m,换热井数量为100口,井间距为5 m。设计太阳能集热器集热面积为480 m²,每组集热器集热面积为6 m²,集热器共80组。该太阳能系统主要用于夏季制冷,冬季辅助地源热泵供热,过渡季节太阳能多余热量,用埋管蓄热。该系统供热和制冷共用1套装置,冬季供暖循环水温在35~45℃之间,夏季制冷循环水温在7~12℃之间。这样能满足房间冬季供暖温度不低于18℃,夏季制冷温度不高于26℃的要求^[11]。

6 结论

我国已具备了较完备的地源热泵工程技术,在浅层地热能勘查评价技术规范、钻孔热反应原位测试技术、高效地下热交换井技术,地源热泵与太阳能联合技术等方面研究都取得了新的进展。这些技术的推广应用将更有助于地源热泵技术在我国的大量推广应用,有助于实现我国2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%的节能减排目标。

参考文献:

- [1] 浅层地热能引领节能新潮流[J]. 中国建设信息:供热制冷, 2010,(2).
- [2] 李元普. 我国地源热泵技术发展现状与趋势[J]. 中国建设信息:供热制冷, 2009,(5).
- [3] 马宏权,龙惟定. 世博园区江水源热泵技术应用[J]. 建设科技, 2010,(12):58-64.
- [4] DZ/T0225-2009,浅层地热能勘查评价规范[S].
- [5] 孙友宏. 地层热物性原位测试方法及仪器[J]. 中国建设信息:供热制冷, 2008,(11).
- [6] 孙友宏. 岩土钻掘工程应用的又一新领域——地源热泵技术[J]. 探矿工程, 2002,(S1).
- [7] 程金明,王巧真. 地源热泵土壤源换热器的施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009,36(7).
- [8] 庄迎春. 直埋闭式地源热泵回填土性能研究[J]. 太阳能学报, 2004,(2).
- [9] 陈昌富,吴晓寒,王陈栋. 埋管地源热泵系统及存在问题分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009,3(10).
- [10] 李朝佳. 太阳能辅助地源热泵联合供暖(制冷)运行模式分析[J]. 能源工程, 2008,(6).
- [11] 樊玉杰,吴建华. 地源热泵与太阳能供热空调复合系统的工程应用[J]. 中国建设信息:供热制冷, 2010,(3).