

地源热泵的研究与应用

王宇航¹ 陈友明¹ 伍佳鸿² 彭建国¹

(1 湖南大学土木工程学院 2 湖南常德卷烟厂设备工程处)

摘要 :对地源热泵技术进行了回顾 ,分析了能源结构对环境的污染和地源热泵技术应用的意义 ,介绍了地源热泵的发展历程、国内地源热泵研究的现状和最新成果以及地源热泵技术在工程中的应用 ,分析了地源热泵在中国的发展前景 ,指出了地源热泵使用中一些需要注意的问题。

关键词 地源热泵 发展过程 研究现状 应用 展望

Review on the Research and Application of Ground Source Heat Pumps

Wang Yuhang¹, Chen Youming¹, Wu Jiahong² and Peng Jianguo¹

(1 College of Civil Engineering, Hunan University;

2 Section of Equipment Engineering, Changde Cigarette Factory)

Abstract : The technology of ground source heat pump was reviewed. The pollution caused by the energy source structure and the importance utilizing ground source heat pump were analyzed. The growing progress of the ground source heat pump and its application in engineering were introduced. Good prospect of development and utilization of ground source heat pump technology in China was brought forward.

Keywords : ground-source heat pump, growing process, research status, application, prospect

0 前言

地源热泵技术是利用地下的土壤、地表水、地下水温相对稳定的特性 ,通过消耗电能 ,在冬天把低位热源中的热量转移到需要供热或加温的地方 ,在夏天还可以将室内的余热转移到低位热源中 ,达到降温或制冷的目的。地源热泵不需要人工的冷热源 ,可以取代锅炉或市政管网等传统的供暖方式和中央空调系统。冬季它代替锅炉从土壤、地下水或者地表水中取热 ,向建筑物供暖 ;夏季它向土壤、地下水或者地表水放热 ,达到给建筑物降温的目的。同时 ,它还可供应生活用水 ,可谓一举三得 ,是一种有效利用能源的方式。地源热泵 (Ground Source Heat Pumps, GSHP) 系统包括三种不同的系统 :以利用土壤作为冷热源的土壤源

热泵 ,又称为地下耦合热泵系统 (Ground-coupled heat pump systems) 或者地下热交换器热泵系统 (Ground heat exchanger) ;以利用地下水为冷热源的地下水热泵系统 (Ground water heat pumps) ;以利用地表水为冷热源的地表水热泵系统 (Surface-water heat pumps) 。

在中国 ,煤作为主要能源 ,长期以来在生产、消费中占据着绝对主导地位。尽管近年来煤炭所占比例略有下降 ,但仍保持在 65%以上 ,并再次呈现出上升的迹象。2002 年煤炭在我国能源生产、消费中的比例分别由 2001 年的 68.6%和 65.3%上升到 70.7%和 66.1%^[1]。从表 1 可以看出 ,煤炭在我国能源消费中高居榜首。特别在冬季 ,在国内的农村和部分城市几乎全部靠煤取暖。煤是各种能源中污染环境最严重的能源 ,只有减少城市地区煤的使用 ,城市大气污染问题才可能得到

解决。现在各地都在采取措施控制燃煤的数量,选用电采暖、燃油或者燃气采暖等措施,但都存在运行费用高、资源不足和排放大量 CO₂ 等问题。受能源、特别是一次能源与环保条件的限制,传统的燃油、燃煤中央空调方式将逐步受到制约。而从降低运行费用、节省能源、减少 CO₂ 排放量来看,地源热泵技术是一个很好的选择。

表 1 能源消费总量及构成

年份	能源消费总量 (万吨标准煤)	占能源消费总量的比重 (%)			
		煤炭	石油	天然气	水电
1957	9,644	92.3	4.6	0.1	3.0
1970	29,291	80.9	14.7	0.9	3.5
1980	60,275	72.2	20.7	3.1	4.0
1990	98,703	76.2	16.6	2.1	5.1
1999	122,000	67.1	23.4	2.8	6.7

1 地源热泵的发展历史

地源热泵是一种先进的技术,它高效、节能、环保,有利于可持续发展。这项技术最先开始于 1912 年,瑞士 Zoelly 提出了“地热源热泵”的概念。1946 年美国开始对地源热泵进行系统研究,在俄勒冈州建成第一个地源热泵系统,运行很成功,由此掀起了地源热泵系统在美国的商用高潮。1985 年美国安装地源热泵 14,000 台,1997 年则安装了 45,000 台,目前已安装了 400,000 台以上的地源热泵,并且以每年 10% 的速度递长。1998 年美国商用建筑的地源热泵空调系统已经占到了空调所有量的 19% 以上,其中在新建筑中占 30%^[2-3]。在欧洲国家里更多的是利用浅层地热资源来供热或者取暖。

上个世纪 70 年代以来,随着能源和环境问题变得突出,在各个方面也更多的考虑节能,以可再生的地热源为能源的地源热泵又引起了人们的重视。尤其是近年来,随着能源和环境问题的日益突出,地源热泵的研究和应用发展迅速,国内外的很多高校和研究机构相继开展了理论和实际应用方面的研究。随着研究的深入,我国地源热泵研究工作者在全国范围内举办了各种交流研讨会。中国制冷学会第二专业委员会主办了“全国余热制冷与热泵技术学术会议”;1988 年中科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”^[4];1994 年 9 月 6 日至 8 日,中国能源研究会地热专业委员会在北京召开了“第四次全国

地热能开发利用研讨会”;从 20 世纪 90 年代开始,每届全国暖通制冷学术年会上都有“热泵应用”的专题,2000 年 6 月 19 日~23 日,“中美地源热泵技术交流会”在北京召开,会议介绍了地源热泵技术,国外的应用状况和在中国的推广,2003 年 3 月 17 日,山东建筑工程学院地源热泵研究所与山东建筑学会热能动力专业委员会联合发起并承办“国际地源热泵新技术报告会”在山东建筑工程学院举行,加强了国内外地源热泵先进技术的交流。

2 研究现状及成果

从上个世纪 80 年代开始,国内外对地源热泵进行了一系列的研究工作,主要集中于以下几个方面。

2.1 地下埋管换热器的传热模型和传热研究

地源热泵地下传热模型的理论基础有三种:Ingersoll 和 Plass 提出的线源理论;1983 年 BNL 提出的修改过的线源理论;1986 年 V C Mei 提出的三维瞬态远边界传热模型理论^[5]。文献[5]同时提出了现在比较广泛应用的三种传热模型:基于能量守恒定律的 V C Mei 传热模型;IGSHPA (International Ground-Source Heat Pump) 模型,该模型提供了计算单根竖埋管、多根竖埋管及水平埋管换热器土壤热阻的方法;NWWA (National Water Well Association) 模型,运用该模型可直接给出换热器内平均流体温度。

2.2 瞬态工况数值模拟、热泵装置与部件仿真模型的理论 and 实践研究

在地源热泵的三种不同系统形式中,因采用地下埋管换热器使土壤源热泵的技术难度最大,设计和施工都很困难,所以一直也是地源热泵技术的难点和核心所在。李凡、仇中柱和于立强应用有限单元法对土壤热源地下 U 型垂直埋管周围土壤的非稳态温度场进行了数值模拟,其结果与实验测试值吻合良好。根据数值模拟计算程序可给出 U 型垂直埋管向地下放热量与埋管的埋深及埋管的热作用半径的对应关系,为 U 型垂直埋深、数量及间距的设计提供了参考依据^[6]。对于土壤源热泵在冬季工况下的启动特性,李元旦、张旭等结合实例研究表明,土壤源热泵的冬季启动时间比夏季的短,仅为 4~5 h。实测获得了单位钻孔长的取热率为 40~60 W/m,可作为设计参考数据。分析了土壤源热泵冬季制热工况的系统 COP 值和压缩机 COP 值,指出要获得好的节能效果,必须优化系统,减少循

环和风机等的能耗^[7]。丁勇、刘宪英等根据在 15 kW 浅埋竖管换热器地源热泵试验装置上做的冬季供暖效果测试,建立了地下浅埋套管式换热器的传热模型^[8]。他们还介绍了根据浅埋竖管换热器地源热泵冬季测试结果,在夏季试验中对试验装置及实验方法的改进,测试了夏季定水量(63天)的运行效果和变水量运行时各性能指标的变化。采用系统能量平衡结合热传导方程建立的地下竖埋套管管群换热器传热模型和过渡季大地温度场模拟,与实测值吻合较好^[9]。大地初始温度是地源热泵设计中的重要参数,实际测量很不现实,在文献[5]中,他们采用算法来确定大地的初始温度。在不同的地质条件下,地下换热器会受到不同的影响,付祥钊、王勇等人通过建立地源热泵岩土换热器的简易数理模型,在重庆和上海两地进行了岩土换热器试验,结果表明,岩土性能及由年平均温度决定的岩土原始温度对岩土换热器性能有显著影响,在砂岩中设置的换热器比沉积土中的性能好^[10]。李新国等人通过螺旋盘管地源热泵供暖制冷实验表明:①冬季从地下取热盘管的出口温度能保持在 10℃左右,明显高于冬季环境空气温度,有利于制热性能。但夏季制冷地下盘管的进出口温度已超过标准空调工况的条件。分析原因,认为是地下盘管布置过于密集和未使用适宜的回填土,致使盘管散热性能差。②实验测得的系统 COP 和压缩机 COP 值并不高,这与水源热泵机组设计是否匹配、优化,水泵和风机的选择是否匹配等有关。③对小型地源热泵,垂直螺旋盘管占地面积小,换热性能较优^[11]。赵军、袁伟峰等依据能量平衡,建立了地下浅埋套管式换热器传热模型,求解并分析了影响传热的主要因素,提出了强化换热的措施,给出了相应的函数关系图^[11]。郑宗和、牛宝联等人提出了把热管应用到地源热泵的水平埋管换热器中,用以提高换热器周围土壤的温度和稳定土壤周围的温度场,以减少埋管换热器的占地面积。通过实例分析,插入热管后,虽然增加了成本,但节约了土地面积,证明了利用热管提高水平埋管的换热效能是可行的^[12]。

2.3 地源热泵空调系统制冷工质替代研究

HCFC 禁用期限的临近,也推进了对地源热泵替代工质的研究。赵力、涂光备等采用 CSD 方程进行循环工质的理论计算和选择,针对以 40~45℃地热尾水为低温能源的热泵系统,在该系统中采用了循环性能较好的、质量分数比为 1:1 的非共沸二元混合工质,以达到实际运行和环保要求^[13]。R744 作为一种天然工质,

是热泵系统中最有潜力的替代工质之一,范晓伟、付光轩对此进行了研究,在文献[14]中介绍了近 10 年来美国、欧洲和日本等发达国家和地区对 R744 热泵系统进行的大量研究和取得的一些突破性研究成果,介绍了 R744 热泵样机及其压缩机、换热器、膨胀阀等重要部件的研究状况。黄华军、丁力行等运用基于 AHR (层次分析法)的综合性能评价指标体系,认为 HFCs 及其混合物具有与 R22 相近的热力性质,是目前地源热泵系统的理想替代工质,其中 R134a、R410A 和 R407C 是近期合适的 R22 的替代工质^[15]。

2.4 其他能源如太阳能、水电等与地热源联合应用的研究

为了更好的利用能源,节约能源,保护环境,也有专家学者进行了其它能源和地源热泵的联合应用方面的研究。曲云霞、方肇洪对太阳能辅助供暖的地源热泵的经济性进行了分析。他们指出,在冬季,我国北方地区土壤温度较低,并且以热负荷为主,如果采用地源热泵供暖,则机组和换热器的初投资比较高,连续运行的效率也较低,夏季运行时机组容量过大,造成浪费。可以利用太阳能集热器作为辅助能源,白天时,依靠地源热泵供暖,夜间利用太阳能集热器储存的热量,由地热和太阳能共同供暖,这样的方案比单纯用地源热泵供暖更经济节能^[16]。另外,何小龙、郑利强在文献[17]里面分析了地源热泵系统在水电站中应用的优势,对利用地下水进行了分析,不过,笔者认为,在水电站附近,可适当地选用地表水热泵系统,因为地表水丰富,所以会更加节能,降低费用。在地源热泵的三种系统形式里面,国内研究较多的是土壤源热泵和地下水热泵系统,关于地表水热泵系统研究的比较少,主要是合适的地表水资源太少了,或者是因为地理位置的原因限制了地表水热泵的发展。不过,假如条件允许的话,比如在水电站附近,或者附近有丰富的地表水资源,不妨考虑运用地表水热泵系统。

2.5 地源热泵系统的设计和施工

地源热泵系统的设计主要集中在系统地下部分的设计,包括冷热负荷的确定,地下换热器的选型、布置,室内空气组织的组织形式,热泵的容量等,不过要重视对地源热泵空调系统设计基础资料的准确性和真实性进行鉴别,特别是水文地质、地表情况、试验井(坑)、水质这些资料,以免造成系统失败或者和预期效果大相径庭。对于地下水热泵系统、土壤源热泵系统、地表水热泵系统,都有不同的设计步骤和施工方

法,具体可参考文献[18~23]。

2.6 地源热泵系统的经济性能和运行特性的研究

随着地源热泵在中国的逐渐推广,对地源热泵系统经济性能和运行特性的研究也日益受到重视。姜宝成、王永镖、李炳熙针对地源热泵钻井费昂贵、初投资比普通供暖空调高的问题,利用经济评价方法,以哈尔滨地区供暖面积 10,000 m² 为计算对象,分析比较了地源热泵 3 种驱动源(电动机、燃气机、柴油机)和 3 种辅助热源(电锅炉、油锅炉、燃气锅炉)共计 9 种系统组合的经济参数(初投资、年经营成本、年总成本、净现值、净现值率及投资回收期),分析计算出燃气机驱动、190 kW 辅助燃气锅炉的地源热泵系统为最佳的结论^[24]。许淑惠、邢云绯的研究从节能分析出发,结合工程实例,对地源热泵系统即地下水热泵系统和土壤源热泵系统与风冷热泵系统在技术性能和经济性能方面进行了对比。分析表明地源热泵系统性能参数比风冷热泵系统有较大提高,初投资和运行费用比风冷热泵系统节省 24~30%左右^[25]。王景刚、马一太依据圆柱源理论,建立了耦合地面热泵机组和地下埋管换热器特性的模拟模型,探讨了模拟过程中有关参数的确定方法,并运用模型对地源热泵的冬季和夏季运行特性进行了模拟,模拟结果和实验实际测得的数据相符^[26]。

2.7 土壤热物性及土壤导热系数的试验研究

对于土壤源热泵来说,土壤作为热泵系统的热源,对土壤热物性及土壤导热系数的试验研究显得尤为重要。张旭采用探针法,通过实验得到了土壤及其与不同比例黄沙混合物的导热系数随含水率和密度的变化规律,土砂混合比为 1:2 时混合物的导热系数最大,为寻找最佳的回填材料提供了基础数据^[27]。

3 工程应用实例

目前国内地源热泵的应用实例比较少,影响比较大的是中美合作在中国建设的三个地源热泵示范工程。1997 年,中国科技部与美国能源部签署了《中华人民共和国国家科学技术委员会与美利坚合众国能源部地热开发利用的合作协议书》。根据协议规定,中美两国政府合作在中国的北部、中部和南部建立三个地源热泵的示范工程。北部示范工程是中国食品发酵研究所综合办公楼及专家楼,中部示范工程是宁波雅戈尔工业城,南部示范工程是广州松田职业技术学院。

除了这些之外,还有其他的一些工程实例。其中

比较有代表性的工程有:

清华同方人工环境有限公司承担的山东东营市胜泰大厦的地下水热泵系统和空军丰台招待所、办公楼的地下水热泵空调改造系统。其中,东营市胜泰大厦的建筑面积 4,500 m²,制冷量 271 kW,冷冻供回水温度 7℃/14℃,输入功率 62 kW,制热量 290 kW,热水供回水温度 50℃/40℃,输入功率 83 kW。设计了 2 口水源水井,当中一口为抽水井时,另一口水源井为回灌井。空军丰台招待所、办公楼冷量 1,400 kW,热量 1,500 kW,生活热水约 265 kW,采用 3 口供水井,井深 50 米,地下水出水温度为 15℃左右,回灌井 2 口,井深 28 米^[28]。

重庆大学城市建设与环境工程学院参与的新疆米泉市小型办公楼和重庆大学 B 区暖通实验楼两个房间采用了土壤源热泵系统。其中,米泉市小型办公楼空调总面积 123 m²,冷量 10.4 kW,热量 9.84 kW,采用水平埋管土壤源热泵系统。暖通实验楼两个房间 78 m²,采用 15 根深 10 m 的浅埋套管换热器,还设有 2 组埋深分别为 1 m 和 2 m 的水平埋管,埋管长度为 50 m,运行效果良好^[21]。

山东建筑工程学院地源热泵研究所与烟台荏原空调设备有限公司合作推出地源热泵系统并成功地应用在该院学术报告厅的中央空调系统中,空调总面积为 500 m²,冷量 110 kW,采用垂直埋管土壤源热泵系统^[2~4]。

辽宁省辽阳市邮电局的两栋宿舍楼(建筑面积共计 6,000 m²)采用了由山东海阳富尔达公司与清华大学工程力学系联合研制出的富尔达地温中央空调。运行结果表明:冬季室内温度始终保持在 18℃以上,最高可达 25℃^[2]。

天津市梅江居住区一综合办公楼,建筑面积 2991 m²,建筑热负荷 147 kW,建筑冷负荷 320 kW。经过了冬季 1 个月、夏季近 3 个月的实际运行,该地源热泵系统运行稳定可靠,总体效果上达到了预期的设计目标,冬季采暖房间的室内温度稳定在 18℃以上,夏季空调房间的室内温度基本稳定在 25℃左右,均达到设计温度的要求^[29]。

内蒙古的地源热泵科技攻关项目由内蒙古机电设计研究院组织人员攻关。科技厅选择了一所宾馆和一幢具有办公、餐厅、商场、体育运动场为一体的建筑,做试验示范基地。总建筑面积为 7,900 m²。系统水源为两个深为 180 m 井,井的直径为 320 mm 的水井,其中一口井为供水井,另一口为回灌井,两口井可交替使用。该系统于 2002 年元月开始试水、试运行,通过冬季

采暖期 180 天、夏季运行 90 天的试验证实,该系统制冷时提供的出口温度为 7~12℃冷水,供热时提供出口温度为 45~50℃热水,最高可达 50℃。夏季使室温控制在 25℃以下,冬季使室温保持在 16~25℃,同时可供 42℃卫生热水,集供热、制冷、供应卫生热水为一体,是一个很成功的例子^[30]。

另外,为了将北京 2008 年奥运会办成历史上最为成功的一届,实现“绿色奥运、人文奥运”的目标,北京市政府将地热资源的开发利用列入奥运公园的能源供应规划之中。专家们预测,2008 年北京奥运会之前北京奥运公园将钻 10 眼地热产水井与回灌井,预计井深 3,000~4,000 m,每口井日出水量在 1,500 m³ 以上,水温均大于 65℃以上^[31]。这是个让暖通空调工作者振奋的好消息。

4 存在问题

地源热泵从开始研究到应用的过程中,虽然它是一种环保、节能、先进的空调方式,但仍然存在一些需要注意的问题:

①水资源利用的问题

水资源的利用应建立在合理的基础之上。对于地下水的使用问题,国家已经有相关的法律、法规、标准出台,应严格执行《中华人民共和国水法》和《城市地下水开发利用保护管理规定》等法规,确保水资源不受污染,不对地质造成灾害。

②采取可靠的回灌手段

大量的开采地下水而不采取可靠回灌手段的话,后果将不堪设想。应加强对井水抽取后进行回灌,还要对水井进行维护,增加水井的使用寿命。回灌水不应污染地下水源。

③设计过程中要注意水文地质问题

利用地下水源时,要了解地源热泵系统设计的基础资料。要在当地完成对工程所在地的井深、水温、水量、水质等原始资料的采集,并保证这些资料的有效性和正确性,对这些资料进行分析研究。这是一项很重要的工作,可是经常在工程实践中被忽视,从而造成了系统的失败。在某工业城项目中,可行性报告中列出的单井每小时出水量实际上是单井每天出水量,这使得工程最后不得不采用其他方式进行补救^[2]。

④水质处理问题

如果水质不适合直接用于地源热泵机组,则需要采取相应的水处理措施。比如用过滤器、水处理仪、沉淀池等装置处理后再用于地源热泵机组。一般情况下

地下水不能直接用于供暖,因为地下水一般含有一定数量的碳酸盐、硫酸盐、腐蚀性气体及泥沙等物质。可以经过板式换热器间接利用地下水,从而延长机组使用寿命,减少维修费用。

⑤地下换热器的设计

地下换热器的设计要注意对建筑负荷、回填材料、土壤地层特性等进行精确的勘测和分析。

⑥国产设备的质量问题

现在国内生产地源热泵产品的厂家越来越多,但大部分产品的质量和性能堪忧。由于过去没有水源热泵的国家标准,所以各厂家的规格、参数不一。有的设备厂家直接从别的公司买进设备,拆了自己照着做,没有自己的设备研究和开发能力,所以造成这样的局面也在情理之中。2002 年 12 月 6 日全国制冷设备标准化委员会会议已审订了《水源热泵》国家标准,以后可以逐渐达到统一^[32]。不过,中国暖通空调界需要更多其他的相关地源热泵的国家标准或规范。

⑦合理地配置整个系统

地源热泵虽然是绿色的空调方式,但是如果没有一套合理的系统,它的节能和环保优势就根本无法发挥出来。

5 结束语

地源热泵作为一种环保节能的空调方式,应该得到研究工作者对其进行更为深入的研究,探索其关键性技术。目前在国内地源热泵机组的设计、安装、运行、维护等各个方面还没有成型的行业标准和规范,其推广应用还有待时日。作为一门新技术,它为我国的可持续发展带来了契机,在不远的将来,随着国富民强,经济实力的提高和生活水平的进步,研究和技術人员的努力,它在中国一定有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] 王金峰. 能源结构的调整与优化必须以煤炭为基础[N]. 中国经济导报, 2003
- [2] 张群力,王晋. 地源和地下水源热泵的研发现状及应用过程中的问题分析[J]. 流体机械, 2003, 31(5): 50-54
- [3] 颜爱斌. 地源热泵应用的技术分析与思考[J]. 天津城市建设学院学报, 2002, 8(2): 120-122
- [4] 殷平. 地源热泵在中国[C]. 见: 现代空调(3). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 1-8
- [5] 丁勇,刘宪英,等. 地源热泵系统实验研究综述[C]. 见: 现代空调(3). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 11-13
- [6] 李凡,仇中柱,于立强. U 型垂直埋管式土壤源热泵埋管周围

- 温度场的理论研究[J]. 暖通空调, 2002, 32(1): 17-20
- [7] 李元旦, 张旭, 等. 土壤源热泵冬季工况启动特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2001, 31(1): 17-20
- [8] 魏唐棣, 等. 地源热泵冬季供暖测试及传热模型[J]. 暖通空调, 2000, 30(1): 12-14
- [9] 刘宪英, 丁勇, 胡鸣明. 浅埋竖管换热器地源热泵夏季供冷试验研究[J]. 暖通空调, 2000, 20(4): 1-4
- [10] 付祥钊, 王勇, 等. 两种地质气候条件对岩土换热器的影响[J]. 暖通空调, 2002, 32(3): 106-109
- [11] 李新国, 赵军, 等. 垂直螺旋盘管地源热泵供暖制冷实验研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6): 684-686
- [12] 郑宗和, 牛宝联, 等. 利用热管技术提高地源热泵水平埋管的换热效能[J]. 节能, 2003(10): 21-22
- [13] 赵力, 涂光备, 等. 混合工质在地热热泵系统中的实验研究[J]. 暖通空调, 2002, 32(3): 4-6
- [14] 范晓伟, 付光轩. R744 热泵系统研究动态[J]. 暖通空调, 2002, 32(1): 43-46
- [15] 黄华军, 丁力行, 陈季芬. 地源热泵空调系统制冷工质替代研究[C]. 见: 第十二届全国暖通空调技术信息网大会文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [16] 曲云霞, 方肇洪, 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
- [17] 何小龙, 郑利强. 地源热泵应用于水电站的前景[J]. 浙江水利科技, 2002, 3(3): 67-68
- [18] 李轶, 王海, 李永安. 地源热泵空调系统的设计[J]. 制冷, 2002, 21(2): 26-29
- [19] 谢汝镛. 地源热泵系统的设计[C]. 见: 现代空调(3). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 33-35
- [20] 庄迎春, 孙友宏. 地源热泵地下直埋式换热器的施工[J]. 探矿工程 (岩土工程) 2002 年 (3): 11-12
- [21] 肖益民, 何雪冰, 刘宪英. 地源热泵空调系统的设计施工方法及应用实例[C]. 见: 现代空调(3). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 101-105
- [22] Jeffrey D Spittler, Xiaobing Liu, Simon J Rees, et al. 地源热泵系统的模拟与设计[J]. 山东建筑工程学院学报, 2003, 18(1): 1-10
- [23] 方肇洪, 刁乃仁, 等. 竖直 U 型埋管地源热泵空调系统的设计与安装[C]. 见: 现代空调(3). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 101-105
- [24] 姜宝成, 王永鏢, 李炳熙. 地源热泵的技术经济性评价[J]. 哈尔滨工业大学报, 2003, 35(2): 195-198
- [25] 许淑惠, 邢云维. 地源热泵—供热空调特性及技术经济分析[J]. 北京建筑工程学院学报, 2002, 18(4): 26-29
- [26] 王景刚, 马一太, 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
- [27] 张旭. 土壤源热泵的实验及相关基础理论研究[C]. 见: 现代空调(3). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 82-84
- [28] 范新, 谢峤, 等. 水源热泵系统及其应用[C]. 见: 现代空调(3). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 109-111
- [29] 赵军, 张春雷, 王健, 等. 地源热泵在实际工程中的应用与研究[J]. 天津建设科技, 2003, 5(5): 14-16
- [30] 杨大明. 21 世纪的绿色空洞技术 - 地源热泵[J]. 内蒙古科技与经济, 2002, 4(9): 10-11
- [31] 司士荣. 北京奥运公园地区将钻 10 眼地热井[J]. 太阳能, 2003, 1(1): 40
- [32] 李志浩. 2002 年全国暖通空调制冷学术年会综述[J]. 暖通空调, 2003, 33(2): 8-9

(上接 26 页)

- [5] David P Colvin, Virginia S Colvin, Y Vonne, et al. Development of a cooling garment with encapsulated PCM[C]. In: Proceedings of the ASME, 2000, 47: 141-148
- [6] M N A Hawlader, M S Uddin, H J Zhu. Encapsulation phase change material for thermal energy storage: experiments and simulation [J]. Int. J. Energy Research, 2002, 26: 159-171
- [7] Belen Zalba, Jose M, Marin, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 251-283
- [8] Zhang Ying ping, Hu Xianxu, Yang Rui, et al. Preparation, thermal performance and potential application of microencapsulated PCM slurry and phase change micro-emulsion in the field of HVAC [C]. In: Cryogenics and Refrigeration-Proceedings of ICCP' 2003, 2003: 709-716
- [9] A A Ghoneim. Analysis of collector-storage building walls using phase change materials[J]. Solar Energy, 1991, 47(3): 237-242
- [10] Amar M Khudhair, Mohammed M Farid. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials [J]. Energy Conversion and Management, 2003
- [11] 冒东奎. 含相变材料的壁板的潜热蓄热试验[J]. 新能源, 1998, 20(4): 1-5
- [12] A F Rudd. Phase change material wall for distributed thermal storage in building [C]. In: ASHRAE Transaction, 1993, 99 (2): 339-34
- [13] T Lee, D W Hawes, D Banu, et al. Control aspects of latent heat storage and recovering in concrete [J]. Solar Energy Material & Solar Cell, 2000, 62: 217-237
- [14] 叶宏. 带定形 PCM 的相变贮能式地板采暖系统的热性能的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2002, 23(4): 482-487
- [15] 林坤平, 张寅平. 电加热相变蓄热地板采暖模型及其热性能模拟 [C]. 见: 2002 年全国暖通空调年会论文集. 珠海, 2002, 133-136
- [16] M Farid, W J Kong. Underfloor with latent heat storage[J]. Proc Instn Mech Engrs, 2001, 215(A): 601-609
- [17] 涂逢祥主编. 建筑节能(37) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [18] 张寅平, 康艳兵, 江亿. 相变和化学反应储能建筑供暖空调领域的应用研究[J]. 暖通空调, 1999, 29(5): 34-37