

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.002

重庆地区屋顶太阳能与地源热泵复合热水技术应用初探

——以后勤工程学院绿色建筑示范楼为例

李蒙^{1a}, 胡望社^{1b}, 陈金华², 沈小东^{1a}, 薛明^{1a}

(1. 后勤工程学院 a. 国防建筑规划与环境工程系, b. 工程技术应用研究院, 重庆 401311;
2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆, 400030)

摘要: 经过多年研究与实践, 地源热泵已发展成为一种应用较成熟的技术。然而当建筑功能及使用等原因而出现季节冷热负荷不均衡时, 容易对地源热泵系统使用效果造成不利影响。针对以上问题, 文章以实际工程项目为案例, 探讨和归纳屋顶太阳能与地源热泵复合热水技术在重庆地区的应用条件和可行方案, 并进行系统计算分析, 以期为重庆地区可再生能源利用技术应用提供参考。

关键词: 重庆地区; 屋顶太阳能; 地源热泵; 复合热水技术; 应用

中图分类号: TU832.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S2-0005-04

Application of Solar-Geothermal Water Heating System Complex in Chongqing

——With an Example of Green Demonstration Building of Logistical Engineering University

Li Meng^{1a}, Hu Wangshe^{1b}, Chen Jinhua², Shen Xiaodong^{1a}, Xue Ming^{1a}

(1a. Dept of Military Architecture and Environmental Engineering; b. Institute of Engineering and Technology, Logistical Engineering University, Chongqing 401311;
2. School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: Geothermal heat pumps have been widely used in construction projects. However, the efficiency of geothermal heat pump may be easily lowered due to the imbalance between heating and cooling loads resulting from the differences of seasons, and especially building functions. Basing on a project in LEU, this article firstly takes discussion on how the solar-geothermal water heating system complex may be applied in Chongqing. Then, the article carries out calculations and analysis to evaluate the balance of the complex system. It mainly aims at providing useful advices for the application of solar-geothermal water heating system complex in Chongqing.

Key words: Chongqing; solar energy; geothermal heat pump; water heating system complex; application

近年来, 在中国建筑可再生能源技术中, 地源热泵和太阳能热水技术已经得到充分的重视^[1]。特别是地源热泵系统, 由于能够同时实现空调供热制冷和制备生活热水的双重作用^[2], 并且随着多年的理论研究和实践应用, 其技术水平已变得越发成熟, 因此在国内许多大中城市得到广泛应用^[3]。

众所周知, 地源热泵系统的关键是维持冷热负荷的大致均衡^[4]。然而对于包含居住功能且使用人数较集中的建筑(如宾馆、宿舍等), 当冬季供热和制备生活热水的负荷大于夏季空调冷负荷的时候, 将造成土壤吸收冷热的季节性不均衡, 久而久之将影响地源热泵的使用效果。而将地源热泵与太阳能热水技术结合, 既可以克服地源热泵系统全年冬夏冷

热负荷不平衡而造成土壤温度的不断降低, 又可以克服太阳辐射受昼夜、季节、纬度和海拔高度等自然条件限制和阴雨天气等随机因素影响^[5-6]。此种复合式热泵系统的实现, 可以达到取消常规热水锅炉、降低能源消耗和减少温室气体排放的效果^[7]。因此, 本文以实际工程项目——后勤工程学院绿色建筑示范楼为依托, 对重庆地区屋顶太阳能与地源热泵复合热水技术应用进行分析, 并通过计算验证该技术方案的热平衡。

1 技术方案概述

1.1 工程项目背景

中国人民解放军后勤工程学院绿色建筑示范楼位于重

收稿日期: 2013-09-30

基金项目: 军队后勤重点科研项目(BY110C007); 2013年重庆高校创新团队建设计划(KJTD201340); 后勤工程学院青年科研基金(YQ11-42201)

作者简介: 李蒙(1983-), 男, 讲师, 主要从事绿色建筑设计及其理论研究, (E-mail) cq_limeng@163.com。

庆市大学城后勤工程学院新校区西南角,是一栋集住宿、餐饮、教学、办公、会议等功能于一体的综合体建筑,该项目既是该院内部接待、外训学员学习训练以及教学与科研实践的场所,也是中美两军 10 多年来在军事环境保护领域交流的重要成果(图 1)。

该项目用地面积 13 837.8 m²,总建筑面积 11 609 m²,建筑占地面积 2 489.7 m²,建筑地上 5 层、地下 1 层,地面绿化面积 5 960 m²,屋顶绿化面积 1 600 m²,容器型垂直绿化面积 90 m²;基地南临大学城主干道。该项目从场地环境可持续、空间形态优化、外围护结构、水资源综合利用、清洁能源利用等方面实现建筑与自然环境的和谐共生,并采用了包括地源热泵空调及热水系统、中水系统、楼宇智能控制、太阳能热水与光伏发电、可调节遮阳等在内的 20 余项生态技术^[8]。



图 1 后勤工程学院绿色建筑示范楼实景

1.2 重庆太阳能资源与地源热泵应用条件

重庆地区太阳能辐射量从 3 月份到 10 月份较为充足,夏季太阳辐射量最大,春季和秋季次之,冬季最小。东段较多在 3 500 MJ/m² 以上,而重庆主城区在 3 400 MJ/m² 左右。据相关气象资料统计,重庆地区年辐射总量为 3 400~4 180 MJ/m²,年日照时数 1 000~1 400 小时,日照百分率为 25%~35%。虽然根据我国太阳能资源分区,重庆地区的太阳能资源属于第四类地区,但太阳辐射年总量却几乎与其他大城市相当。只要应用措施得当,重庆地区太阳能的应用具备很大潜力,特别是在太阳能资源相对充足的季节,太阳能技术更具备应用条件。

而对地源热泵而言,重庆主城区典型地质结构主要以砂岩、泥岩地层为主,岩土体的传热系数大,单个换热井换热量高于一般的黏土结构,加之重庆地区地下水主要以基岩裂隙水为主,非常有利于地下换热器的传热和地下热平衡,且可钻性等级低,钻孔难度小,费用不高。

地下岩土全年温度波动小,全年平均温度 19~20℃,在冬季温度比空气温度高,夏季比空气温度低,埋管地源热泵系统的制热、制冷系数都要显著高于空气源热泵,一般可高于 30%~40%,因此可节能和节省费用 30%~40% 左右。

目前,重庆市已有“地源热泵”项目多个,并取得较为满意的效果,因此考虑采用太阳能与地源热泵系统作为该项目

主要的可再生能源利用措施。

1.3 技术方案选择

本项目通过前期大量的调研和论证,归纳提出了 3 种方案以备参考,包括“地源热泵空调+太阳能热水系统”、“空气源热泵空调系统”和“电制冷冷水机组+燃气热水锅炉”方案。通过 3 种方案的分析和比较,土壤源热泵空调系统不受外界环境的影响,运行工况稳定,节能率高,无污染,同时也是对太阳能的二次利用,技术也较为成熟;另一方面太阳能热水系统也具备成熟的应用技术条件。通过前期综合计算,考虑到项目使用人数集中,且冬季供热和制热水负荷较大的特点,故在该项目中考虑应用屋顶太阳能与地源热泵复合热水技术。

1.4 技术方案简介

本工程地源热泵系统采用地下垂直埋管闭式系统,以减少占地面积和避免对地下水体的污染。热泵机组采用在机房集中布置方式,以便于运行管理和调节。在夏季等需要空调供冷时,空调用热泵机组和热水热泵机组采用串联方式运行,从地下埋管换热器来的水先流经空调系统用热泵机组,其冷却出水作为热源水再流经热水热泵机组,以保证热泵机组运行效率。在冬季,空调系统热泵机组和热水热泵机组则采用并联运行方式,以提高热泵机组运行效率。室内空调水系统和热水系统同常规方式。

太阳能热水系统与生活热水供水水箱链接,在非峰值负荷时(晚上 7~10 点以外的时间),供水水箱通过太阳能贮热水箱补水,利用太阳能热水系统热量,当受天气、季节影响,或是用水量大,太阳能热水水温无法满足该热水需求时,启动地源热泵热水机组,在非峰值时刻,只保证供水水箱(6 t)内为恒定供水温度。在热水峰值负荷到来时,太阳能贮热水箱和供水水箱为串联,可提供稳定生活热水。



图 2 地源热泵系统机房设备

2 系统设计原理

该复合热水技术原理及主要设备配置情况如图 3 所示。在夏季空调供冷时刻,关闭阀门 1,开启调节阀 2。从埋管



图 3 屋顶太阳能集热器及其恒温水箱

换热器出来的水一部分先流经热水热泵机组,放热后再与另一部分地下换热器回水混合,再流经空调系统热泵(制冷)机组,以降低空调系统热泵(制冷)机组的冷却水进水温度,保证整个冷热源系统高效运行。在冬季,开启阀门 1,关闭调节阀 2,空调系统热泵机组和热水热泵机组则采用并联运行方式,以避免相互降低运行效率。室内空调水系统和热水系统与常规方式相同。

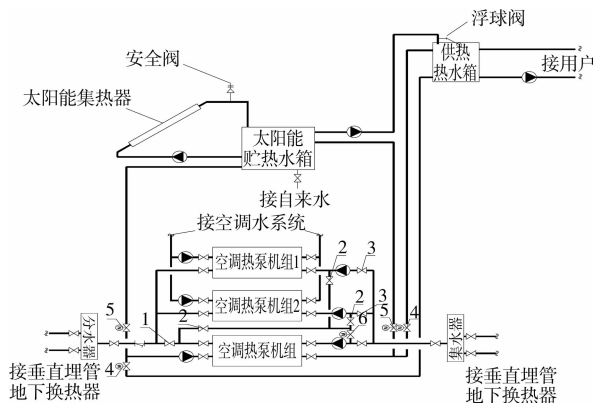


图 4 地源热泵与太阳能复合系统原理及主要设备配置情况

考虑到太阳能集热器的设置应该选择在没有遮挡物、采光充分、采光板能面向太阳、不影响建筑的正常功能和使用、方便检查维修、尽量减少影响建筑外观等条件,本工程的太阳能热水集热系统设置在该建筑的 5 楼屋顶。同时由于重庆地区太阳能资源全年分布不均,部分季节相对匮乏的特点,太阳能集热器与贮热水箱内水流持续循环,为提高了太阳能利用率,太阳能集热系统配备了 10 m^3 贮热水箱,贮热水箱内的水经过太阳能集热器的加热,温度逐渐升高。

为了保证系统的稳定和节能运行,根据计算结果,卫生热水系统还配备了 6 m^3 供水箱,也使整个系统的蓄热功能进一步增强。

由于该建筑以宾馆住宿类功能为主,根据该类型建筑生

活热水的用水特点,依据《建筑给排水设计规范》上的推荐值,热水小时变化系数达到 3.84,即建筑最大小时用水负荷是全天平均用水负荷的 3.84 倍,且用水集中于晚上 7 点~10 点 3 个小时。故在非高峰负荷时段,设计的 6 m^3 的供水水箱可以满足为大楼提供稳定的热水。所以, 6 m^3 的供水水箱全天 24 小时保持 60°C 的供水温度,保证了整个大楼全天的用水质量。温度低于 60°C 时,地源热泵热水机组自动投入运行对其进行加热。此时电动阀门组 4 打开,5 关闭。当供水水箱内的水减少时,通过浮球阀控制,由太阳能贮热水箱为其补水。补得水已经经过太阳能集热系统预热,充分利用了太阳能。

当进入生活热水用水高峰时段时晚上(7~10 点), 10 t 的太阳能贮热水箱也转换为生活热水的供水水箱,并将温度保持在 60°C 。由于贮热水箱已经通过太阳能集热系统加热,如果温度低于 60°C 供水温度时,由地源热泵热水机组为其加热。此时电动阀门组 4 关闭,阀门组 5 打开。经过了 3 个小时的高峰用水后,自动切换回仅由 6 m^3 水箱供热的平时状态。

通过以上的设计,可以实现生活热水系统最大限度的利用太阳能所集取的热量,将地源热泵热水机组的使用时间降低到最短,并保证了整个建筑生活用水的质量和安全性。

3 系统计算分析

3.1 地埋管换热器设计

现场地下换热器换热性能测试由重庆大学完成,于 2008 年 8 月 16 日进行。经地质勘探和热响应测试及理论计算结果(地下换热器的换能力由重庆大学开发的设计辅助软件 GSHPS 1.0 计算),该工程地质条件下,采用管径为 DN32 的双 U 形地下换热器,竖直埋管深度 100 m,夏季共需要钻孔总长度为 10 506 m,冬季共需要钻孔总长度为 12 471 m,折算单位钻孔长度换热量为:冬季供暖季单位钻孔长度换热量为 43.646 W/m ,夏季空调季平均单位钻孔长度换热量为 66.922 W/m 。该计算值与实测值相差不大。

结合重庆大学现场地下换热实验的测试数据,本工程冬季的单位井深换热量取 43 W/m ,夏季的换热量取 65 W/m ,这个值是一个既充分反映该地区地质换热性能优良,又考虑工程安全余量的一个值。

结合场区以换热性能良好的砂岩、砂质泥岩为主,本工程地源热泵系统地下换热器采用垂直双 U 形埋管,管径取 DN32,井深 100 m,孔径 130 mm,孔间距 6 m,并尽量分散布置埋管。

考虑该项目的冬季采暖和生活热水负荷之和大于夏季空调负荷,室外埋管换热器的设计根据冬季采暖和生活热水负荷之和进行计算。

该空调系统全年设计热负荷为 447.076 kW 。经计算,空调最大取热量 = 340.32 kW ,生活热水最大取热量 = 177.71 kW 。故地埋管换热器系统冬季设计最大的提取热量为二者之和, 518.03 kW 。

根据冬季单位埋管长度的换热量为 43 W/m 计算,共需要钻井 121 口,井口径 130 mm,每口埋深 100 m,换热器采用双 U、DN32PE 管。

考虑到生活热水系统中增加了太阳能集热系统,以及生活热水峰值负荷和空调系统热负荷峰值不同期的情况,实际设计埋管换热器 120 组,埋深 100 m,采用双 U、DN32PE 管。

对夏季埋管换热系统性能进行校核。120 组地下换热器在夏季承担的最大负荷为: $120 \times 65 \times 100 = 780 \text{ kW}$,可以满足夏季空调的排热负荷。因此地下换热器设计确定为 120 组。

3.2 太阳能热水系统设计

太阳能热水系统将和地源热泵生活热水系统共同为该建筑提供生活卫生热水。通过床位可计算得出本建筑的合计卫生热水用量为 34 080 升/天,考虑到建筑屋面可利用布置太阳能集热器面积,以及重庆地区太阳能资源的实际情况,太阳能热水系统的设计日供水水量为 17 040 升/天。在太阳能最丰富的时段,这个指标下的太阳能热水器面积正好可以满足全楼卫生热水的需求。根据规范,可计算得出集热器采光面积为 320.2 m^2 。

在系统运行中,太阳能集热系统优先运行,即使太阳能热水系统无法满足整个热水需求,太阳能对生活热水也有预热的作用。系统根据热水箱内的温度进行控制,热泵热水系统根据需要自动投入使用。

3.3 地源热泵吸热量与放热量平衡分析

1) 空调系统

地源热泵系统的释热量与建筑设计冷负荷相对应。包括:各空调分区的水源热泵机组释放到循环水中的热量、循环水在输送过程中得到的热量、水泵释放到循环水中的热量。将上述 3 个热量相加就可得到供冷状况下释放到循环水的总热量。即:

$$\begin{aligned} \text{释热量} &= \sum [\text{空调分区冷负荷} \times (1 + \frac{1}{\text{COP}})] + \sum \text{输送过程得热量} + \sum \text{水泵释放热量} \\ &= 623.69 \text{ MWh} \times (1 + 1/4.99) \\ &= 748.6 \text{ MWh} \end{aligned}$$

地源热泵系统的吸热量与建筑设计热负荷相对应。包括:各空调分区的水源热泵机组循环水中吸收的热量、循环水在输送过程中失去的热量、水泵释放到循环水中的热量。将上述前两项热量相加并扣除水泵释放到循环水中的热量就可得到供热状况下循环水的总吸热量。即:

$$\begin{aligned} \text{提取热量} &= \sum [\text{空调分区热负荷} \times (1 - \frac{1}{\text{COP}})] + \sum \text{输送过程失热量} - \sum \text{水泵释放热量} \\ &= 314.05 \text{ MWh} \times (1 - 1/4.19) \\ &= 239.2 \text{ MWh} \end{aligned}$$

2) 卫生热水系统

根据大楼的卫生热水系统的使用特点和系统设计情况,之前可通过全年热水负荷计算得出该建筑全年生产生活热水需要耗热量共计为 677.31 MWh。

此外,由于设置储热水箱,储热水箱的设计热损失系数将控制小于等于 0.2,考虑热损失系数随季节的影响而变化,综合考虑热水系统在全年增加了 10% 的输送过程热损失。

$$\text{热水系统地下吸热量} = \sum [\text{热水系统全年热水负荷} \times (1 - \frac{1}{\text{COP}})] + \sum \text{输送过程失热量} - \sum \text{水泵释放热量}$$

$$\begin{aligned} &= 677.31 \text{ MWh} \times (1 - 1/4) + 677.31 \text{ MWh} \times 0.1 \\ &= 575.7 \text{ MWh} \end{aligned}$$

从地下吸热量为 575.7 MWh。

生活热水由地源热泵系统和太阳能卫生热水系统共同承担。根据中国气象局气象信息中心气象资料室发布的中国建筑热环境分析专用气象数据集中,重庆市沙坪坝区典型气象(设计典型)年逐时参数报表中全年太阳能日总辐射数据,对该太阳能热水系统的运行状况进行分析计算,可以得到如下结果(表 1)。

表 1 太阳能热水系统运行情况计算统计

日总辐射值	分布天数/D	产热量/t	总计/t
0~3 MJ/m ²	109	3	327
3~6 MJ/m ²	66	7	462
6~9 MJ/m ²	44	11	484
9~12 MJ/m ²	35	15	525
12~15 MJ/m ²	27	20	540
15~18 MJ/m ²	46	24	1 104
18~21 MJ/m ²	19	28	532
21~24 MJ/m ²	14	32	448
大于 24 MJ/m ²	5	36	180
总计	365		4 602

每年有超过半个月时段,太阳能热水系统可以满足整个大楼的热水供应,40% 的时段可以满足该项目一半以上的卫生热水需求。

通过以上计算可以得出结论,全年太阳能热水系统可为该建筑提供的热水量为 4 602 吨,总热水需求量为 12 439.2 吨($34.08 \text{ 吨} \times 365 \text{ 天} = 12 439.2 \text{ 吨}$),太阳能热水器可为项目提供的热水占用水总量的 36.9%,即 63.1% 的卫生热水需要地源热泵系统来承担。部分时段,太阳能可以提供全楼用水负荷,热泵热水机组无需开启。

此时,卫生热水系统向地下提取放热量为: $575.7 \text{ MWh} \times 63.1\% = 363.4 \text{ MWh}$ 。

3) 埋管系统全年换热平衡分析

因空调末端耗电功率较小,忽略其放热量,则地源热泵系统全年总放、吸热差为: $\text{空调向地下排热量} - (\text{空调从地下取热量} + \text{热水系统从地下取热量}) = 748.6 - (239.2 + 363.4) = 146.0 \text{ MWh}$

即全年地源热泵系统总体从地下排出热量为 146.0 MWh。

此时整个热泵系统夏季向地下排入热量与采暖和生产生活热水从地下提取的总热量之比为:

$$\frac{\text{排入岩土热量}}{\text{从岩土提取热量}} = \frac{748.6}{239.2 + 363.4} = 1 : 0.81$$

由此可见,该复合技术系统全年向地下排出和提取的热量依然可以基本保持平衡。

4 结语

从该建筑实际运行情况看,该复合热水技术系统各项指

(下转第 23 页)

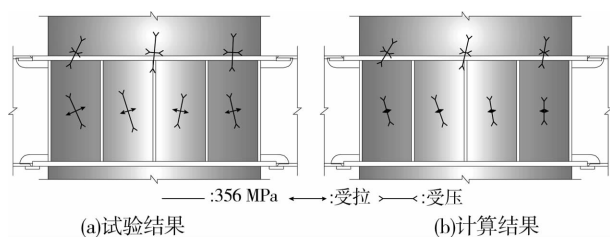


图 27 非对称加载节点核心区域主应力

5 结论

通过试件静力荷载试验和有限元分析,研究了平面典型节点在对称加载和非对称加载情况下的力学性能,得到了如下主要结论:

1) 平面典型节点模型试验测出的 Von Mises 等效应力、加载全过程位移、极限承载力大小与计算结果基本吻合。平面典型节点模型试验两个试件最终均没破坏。以上结论也说明,运用有限元方法分析钢节点的结果是真实可信、能应用于实际工程的。

2) 加载至 7 000 kN 时,节点核心区塑性发展还有很大空间,节点的延性较好,安全储备较高,使用该节点具有一定的可靠性和实用性。

3) 该节点满足设计要求。当加载至 7 000 kN 时,平面典型节点柱端大面积屈服,而节点核心区基本处于弹性阶段,满足设计承载力的要求,也可以达到“强节点弱杆件”的抗震设计目的。

参考文献:

- [1] 郭伟亮,滕军. 高层建筑斜交网格筒力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(2): 174-179.
- [2] Moon K S, Jerome J. Diagrid structure systems for tall buildings characteristics and methodology for preliminary design[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2007, 16(2): 205-230.
- [3] Moon K S. Sustainable structural engineering strategies for tall buildings [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2008, 17: 895-914.
- [4] 方小丹,韩小雷,韦宏,等. 广州西塔巨型斜交网格平面相贯节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 56-62.
- [5] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 102-114.
- [6] Hibbitt, Karlson, Sorenson. ABAQUS Version 6. 8; Theory manual. users' manual. verification manual and example problems manual[M]. Hibbitt, Karlson and Sorenson Inc, 2008.

(编辑 王维朗)

(上接第 8 页)

标运作正常。整个建筑第一年实际运行的节能率实测为 79.11%, 已超过之前设计模拟得出的节能率 75.4%, 节能效益十分显著, 并获得 2013 年全国绿色建筑创新奖一等奖。而屋顶太阳能与地源热泵复合热水技术既充分保障了建筑的使用功能需求, 又实现可再生能源的利用, 对该建筑实现的节能减排起到了突出的作用^[9]。

(本文作者均为绿色建筑示范楼项目主要参研和完成人员)

参考文献:

- [1] 夏海山. 城市建筑的生态转型与整体设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006.
- [2] 江亿. 超低能耗建筑技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 陈云昊. 地埋管地源热泵-太阳能系统用于夏热冬冷地区居住

建筑的若干思考[J]. 暖通空调, 2008(6).

- [4] 李炳田. 复合补地热热泵在北方地区的应用效果分析[J]. 建筑科学, 2012(10).
- [5] 梅奎. 地源热泵技术系统设计及经济性分析[J]. 制冷与空调, 2009(8).
- [6] 杨卫波. 太阳能-土壤源热泵系统联合运行模式的研究[J]. 流体机械, 2004(2).
- [7] 王成勇. 太阳能-土壤源热泵耦合系统及其地埋管系统[J]. 太阳能学报, 2011(1).
- [8] 沈小东. 重庆某绿色建筑模拟能耗计算分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(6).
- [9] 王雁生. 太阳能+地源热泵并联热水系统冬季运行特性研究[J]. 暖通空调, 2009(9).

(编辑 彭建国)