

欧洲太阳能区域供热典型案例分析

□ 国际铜业协会北京代表处 黄俊鹏☆

□ 同济大学机械与能源工程学院 徐尤锦△

摘要

笔者在对丹麦、瑞典、德国、奥地利等欧洲国家太阳能区域供热项目进行实地考察的基础上,系统地梳理了欧洲常见的太阳能区域供热技术的系统形式,并重点分析了欧盟和丹麦政府共建的太阳能区域供热示范项目SUNSTORE1—4期,总结出欧洲各国发展太阳能供热技术的特征,以及在中国发展太阳能区域供热技术的重要性和迫切性。

关键词

太阳能区域供热;太阳能热站;跨季节储热;多能互补;被动式建筑;隔音墙

Case Studies on European Solar District Heating Projects

□ Junpeng Huang☆ and Youjin Xu△

Abstract: Based on the on-site investigation to some demo solar district heating projects in Denmark, Sweden, Austria and Germany, this paper systematically reviews the common system forms of European solar district heating technology, and focuses on the solar district heating demonstration projects SUNSTORE1—4 which were co-built by European Union and the Government of Denmark. This paper sums up the different features of solar district heating technology in EU countries, and the importance and urgency of the development of solar district heating technology in China.

Key words: Solar District Heating, solar Heating Plant, Seasonal Heat Storage, Combined Energy System, Passive Building, Soundproof wall

1、太阳能区域供热的概念

太阳能区域供热是指采用太阳能多能互补系统通过区域热管网为热用户进行供热的采暖系统。其他热源主要为热电厂余热、工业废热、可再生能源(生物质、地热能等)。太阳能区域供热系统设计必须因地制宜评估供热系统形式、集热场规模以及城市规划设计中太阳能集热系统的纳入。典型的太阳能区域供热系统见图1:

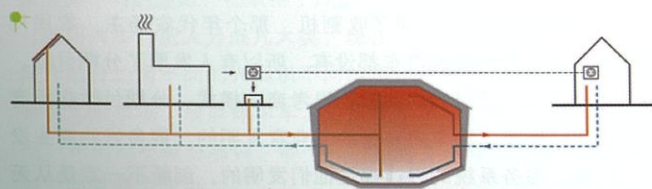


图1 太阳能区域供热系统[1](来源: Solites)

小规模尺度上可用于社区、农村、大型公共建筑供热。Jan-Olof Dalenbäck通过对瑞典、奥地利、丹麦太阳能区域供热项目考察,认为未来城市太阳能区域供热主要应采用屋顶安装太阳能集热器,乡村则应大力发展地面安装大型平板太阳能集热器[2]。见图2:



图2 太阳能区域供热系统运用

2、常见的太阳能热站系统形式

太阳能区域供热系统在大规模尺度上可运用于城市供热,在

DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2017.02.001

太阳能能流密度低、不稳定，冬夏负荷不平衡，阻碍了太阳能的广泛运用。为保证供热稳定性，需增设辅助热源。在太阳能区域供热系统的设计和实际运营中，辅助热源的选择与系统整合是整个太阳能区域供热系统能否正常运营、高效稳定供热的关键环节。故本文将辅助热源的不同类型对笔者所考察过的太阳能热站进行分类和分析，意图更加清晰地向读者展示太阳能区域供热系统得以成功运行的全部因素。

理论上太阳能可以结合所有燃料进行采暖，但受制于技术经济和环保要求，太阳能热站（Solar heating plant）最终采用何种辅助热源需要根据当地的资源状况和环境法规综合确定。国外的研究机构对区域供热系统中多种能源的耦合，尤其是太阳能集热系统与现有区域供热系统的耦合进行了多方面的研究，研究表明在现有的供热网络增加太阳能供热，不仅会提高系统的经济型和稳定性，也会提高整个系统的运行效率。

Dario Buoro, Piero Pinamonti, Mauro Reini介绍了普通市政区域热网、跨季节储热太阳能集热管网与热电联产相结合，并配备锅炉和压缩机的复合系统，对多热源供热模式进行了优化，以达到最佳经济性和节能性[8]。Roman Marx, Dan Bauer, Harald Drucek比较了有热泵驱动的太阳能区域供热采暖系统和单纯的太阳能区域供热采暖系统的能源利用效率和节能性，最终发现，以太阳能区域供热储热水池作为供暖低温热源，采用热泵驱动的系统效率更高，太阳能保证率更高[9]。Mehmet Elcia, Axel Oliva, Sebastian Herkel, Konstantin Klein, Alexander Ripka比较了传统热电联产区域供热和加入分布式太阳能区域供热热电联产，对传统热电联产交互性使用性能进行研究，由于风电上网和冬夏供热不平衡对热电联产供热具有很大干扰，提出太阳能热电联产区域供热更有利，并以负荷匹配系数来对两个系统进行对比，系统运行系数分别为1.03和1.10，表明太阳能热电联产区域供热交互性更强[10]。

Bruce Sibbitt, Doug McClenahan, Reda Djebbar, Jeff Thornton, Bill Wong, Jarrett Carriere, John Kokko通过对加拿大为52户家庭提供采暖及生活热水服务的太阳能区域供热系统进行了为期五年的实际测试，以对比所多能互补设计方案的可靠性。该项目设计集热器面积为2293m²，采用钻井储热，打井144口，储水量为34,000m³，辅助热源为燃气锅炉。采用TRNSYS软件进行模拟并优化设计方案，2007年投入使用并进行测试，连续测试5年。设计时，模拟计算假设五年内集热器效率由32%降到25%，储热效率由90%降到40%，太阳能保证率由68%升到89%。实测数据显示：集热器效率稳定在33%，储热效率为55%左右，太阳能保证率逐年递增，最终达到97%。实测结果好于模拟结果，确立了跨季节储热太阳能区域供热在加拿大地区（严寒）的适用性[11]。

目前欧洲常用太阳能复合能源系统形式有：太阳能复合一次能源热电联供、太阳能复合生物质热电联供、太阳能复合生物质锅炉供热，以及太阳能复合垃圾焚烧热（工业余热）供热。

2.1. 太阳能复合一次能源热电联供系统

这里的一次能源主要指的是天然气，天然气热电联产电厂的优点是快速启停（尤其是发动机）。如果风力发电的比例上升，就需要调节其他电力来源，或对终端用户进行调节。在丹麦，天然气热电联产电厂就是用来调节这样的供需矛盾的。当风力发电不足时，天然气热电联产电厂运行，所发电量并网收费，余热并入热网，取得售电和售热的双重收益。当风力发电充足时，天然气热电联产电厂停运。在此期间，用热需求通常由运行费用昂贵的燃气锅炉来满足，此时，太阳能集热系统的优势就体现出来了：廉价得近乎免费的热量。因此，在丹麦，很多区域热站都装有天然气热电联产电厂和太阳能集热系统。

2.1.1. 直接并网的太阳能热站：奥地利Graz-Süd太阳能热站

奥地利Graz-Süd太阳能热站于2006年开始建设，到目前为止总计集热器面积达到7,750平米，是奥地利最大的太阳能区域供热系统。2006年至2008年，项目一期工程在Abfall Entsorgungs Verwertungs GmbH (AEVG) 公司屋顶安装5,000平米集热器。2014年至2016年项目二期在一期附近空地增加安装2,750平米集热器。项目总共采购了5家集热器制造商6种高温平板型集热器，整个系统没有设置储热装置，太阳能集热系统直接与区域热网连接供热，日最大供热负荷1.9MWth，年最大供热负荷1,300MWh。Graz-Süd太阳能热站全景图及换热站见图3、图4：



图3 Graz-Süd太阳能热站全景



图4 换热站与热站内景

2.1.2. 设有大型跨季节储热装置的太阳能热站：丹麦Vojens太阳能区域供热站

Vojens太阳能热站地处丹麦沃延斯市（Vojens），2012年一期工程安装集热器面积17,500m²，建成储热水池容积3,000m³，2014年二期扩建，新安装集热器面积52,500m²。集

热场在地面安装平板型太阳能集热器，总计采用5,439块集热器，集热器面积70,000m²；太阳能跨季节储热水池容积达20,3000m³；年太阳能保证率达45%；日最大供热量为49MWth，年供热量为28,000MWh。储热水池与区域热网没有直接相连，采用热交换器进行换热，辅助热源为一个10MW电锅炉、一个吸收式热泵和一个燃气锅炉。



图5 Vojens太阳能热站全景图（右上侧为坑式储热水池）

热站控制系统可以清楚地看到储热水池的温度分层 热站机房内景



图6 太阳能热站机房及控制系统

2.2 太阳能复合生物质热电联供

2.2.1. 直接并网的太阳能热站：德国弗莱堡Vunban（伍邦）社区

Vunban社区位于德国南部弗莱堡市郊区，1998年开始建设，2001年首批2000居入住。社区所有建筑都是按照低能耗标准进行建设（65KWh/m².年）。

弗莱堡能源解决方案主要为采用生物质锅炉热电联供，同时集成太阳能集热系统和太阳能光伏系统。该社区50%的电力由热电联产提供，目前已建有14个大型热电厂和90个小型热电厂。锅炉主要燃料为木屑和天然气。出于当地人民对核电的抵制，弗莱堡大规模发展可再生能源供热和供电，主要发展太阳能、风能、水电和生物质能。居民生活热水主要由太阳能加热提供，集热器面积达16,000m²。

Vunban社区为打造清洁型社区主要规定：所有新建建筑设计达到节能标准（65KWh/m².年），被动房建设标准必须达到15KWh/m².年以下。采用以木屑锅炉为热源的热电联供，锅炉产热直接并入区域热网；建筑装饰采用太阳能集热器（450~2,

000m²）和太阳能光伏板（1,200~2,000m²）；每年节能量达到28GJ；二氧化碳减排达2,100吨，二氧化硫减排4吨，年常规能源节省1,600吨。实景图见图7：



图7 德国弗莱堡伍邦社区Solar Ship项目外景及社区内部

2.2.2. 设有大型跨季节储热装置的太阳能热站：丹麦Marstal太阳能热站

丹麦Marstal太阳能热站是一个典型的太阳能复合生物质热电联供区域供热系统，并建有容积达85,000m³的大型跨季节储热水池。该项目为欧盟与丹麦政府合建的实验性质的示范项目，系统复杂，对中国建设类似的混合能源系统，具有很强的借鉴意义，本文在后面的章节将详述该项目的系统原理、发展历程和经济性。

2.3 太阳能复合生物质锅炉太阳能区域供热系统

太阳能复合生物质锅炉太阳能区域供热系统在欧洲运用较多，技术相对较成熟，同时太阳能和生物质均属可再生能源，极大迎合欧洲发展可再生能源政策，能够获取更多政策支持和财政补贴。

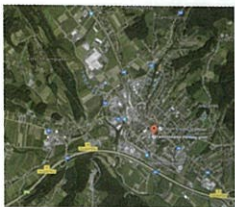
2.3.1. 奥地利Gleisdorf太阳能区域热站

奥地利Gleisdorf太阳能集中供热系统位于Gleisdorf Stadtwerke，早期区域热网热源为天然气锅炉，区域热网官网长度2,300m，承担1.5MW供热需求，燃气锅炉完全可以满足峰值供热需求。2012年，市政部门采用两个850kw木屑锅炉替换原有燃气锅炉作为区域供热热源，太阳能作为辅助热源，新铺设1,220m区域供热管网，建设500m³储热水池，生物质燃料输送采用传送带输送。

为满足夏季生活热水需求和减少管网散热损失，新建集热面积为300m²太阳能集热系统，集热器与锅炉房屋顶集成安装。2013年，二期太阳能工程又在供热中心居住建筑屋顶安装285m²集热器，太阳能集热管网直接与区域热网连接，用于减少区域热网热损失和生产生活热水。城市集中供热站采用太阳能辅助生物质锅炉供热，总计集热器面积585m²。太阳能集热系统及生物质锅炉产热直接并入区域供热管网。区域供热站全景图见图24，实景图见图8：



Gleisdorf供热站，左下为新热站，右中为老热站



供热站在整个小镇中位置示意图

图8 Gleisdorf太阳能热站的位置示意图



已废弃的天然气锅炉热站 新的太阳能热站

图9 Gleisdorf新老热站对比图



热站机房内景

风力发电机

图10 Gleisdorf太阳能供热站机房内景以及机房外的风力发电机

Gleisdorf超过100户居民生活热水采用太阳能加热；城市还有两个比较大的太阳能区域供热项目：230m²集热器太阳能低能耗建筑‘Sundays’，100m²集热器GleisdorfWaves游泳池。该区域主要采用太阳能集热系统及生物质锅炉产热直接并入区域供热管网的形式。Gleisdorf近年来新建8个大型太阳能区域供热系统和111个小型太阳能集热系统，总计集热器面积2,860平方米。122户私人住宅安装小型生物质锅炉系统，总计供热功率为1,956KW，太阳能集热系统辅助生物质锅炉用于住宅采暖，太阳能集热系统直接连接区域热网。

2.4.太阳能复合垃圾焚烧热（工业废热）太阳能区域供热系统

垃圾焚烧热、工业废热可以以很便宜的价格并入区域供热系统，作为太阳能区域供热系统的补充。但如果垃圾焚烧热和工业废热能满足整个夏季负荷，太阳能供热效率会大大降低，太阳能供热在价格上失去竞争优势。

2.4.1.瑞典Kungalv太阳能区域供热系统

Kungalv区域供热系统为太阳能复合生物质锅炉、垃圾焚烧热供热，可再生能源供热保证率26%。年热需求为100GWh。Kungalv太阳能区域供热系统于2000年建设竣工，采用800组集热器，每组集热器面积12.5m²，集热器面积总计10,000m²，采用

地面安装和屋顶安装平板型太阳能集热器，通过普通换热器与区域热网进行换热供热。日最大供热量7MW，太阳能集热场年均供热量为3.9GWh，区域供热系统还设有生物质锅炉作为辅助热源。



图11 瑞典Kungalv太阳能热站集热场全景

3、丹麦Marstal太阳能热站

3.1.系统概述

丹麦Marstal太阳能热站位于丹麦南部艾尔岛上马斯塔耳地区，太阳能热站始建于1994年，集热器运用地面安装单片面积为12.5m²的平板型太阳能集热器，集热器面积总计33,300m²，建有太阳能跨季节储热水池，储热容积总计达85,000m³（Sunstore 2期工程10,000m³储热水池，Sunstore 4期工程75,000m³储热水池），日最大供热量23.3MWth，年最大供热量18,000MWh。供热温度70-72℃（夏季），76℃（冬季），回水温度40℃（夏季），33℃（冬季）。集热场铺设地理位置与太阳能区域供热小镇见图12，集热器平面布局见图13：



Marstal位于丹麦南部艾尔岛的东侧 Marstal集热场与所供热的小镇位置关系

图12 Marstal太阳能热站位置示意图

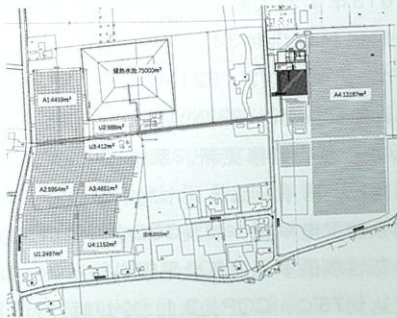


图13 Marstal太阳能热站集热场布局



图 14 Marstal太阳能热站全景

3.2. 运行原理

夏季，系统主要将太阳能热量储存于坑式储热水池中，同时也提供Marstal地区日常生活用水所需的热量。从九月底开始，储存的热量开始通过木屑锅炉或热泵来供热。锅炉运行的热输出为3.25MW，同时结合在一起的有机朗肯循环装置可以生产电力750kW，发电效率19.5%。当电价低的时候热泵开始运行，在冷却储热的同时将回水温度加热至75℃。冬季，最冷的几天，需要运动几个小时的锅炉，即便电价较高，有时还需要运行热泵。到来年的二月份，太阳能系统又会开始集热，储热和供热。木屑锅炉也会开始全天运行，一直到四月。系统原理图见图15：

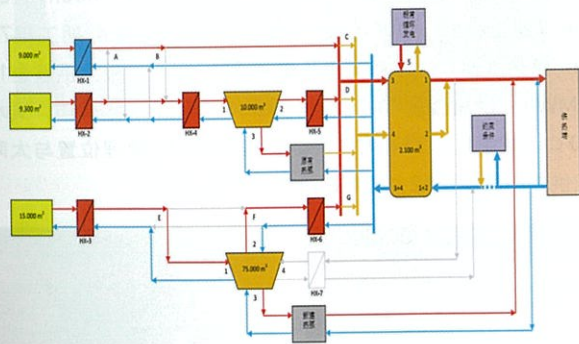


图 15 丹麦Marstal 太阳能区域供热系统原理图（来源:SUNSTORE4）

该系统夏季太阳能保证率100%，设计全年太阳能保证率36.4%，2013年实测太阳能保证率为34%。2013年，系统向1,550户居民稳定供热33,300MWh，其中集热器产热14,326MWh，热泵提热2,921MWh，生物质锅炉产热14,453MWh，总计热损失为2,833MWh。区域供热管道系统已经使用了30年，但是一直在维修更新。系统100%采用可再生能源，集成了太阳能集热、跨季节储热、木屑锅炉供热、ORC（有机朗肯循环）低温余热发电系统，以及CO₂空气源热泵系统等，是一个带实验和示范性质的多能源复合采暖供热系统。其中，CO₂热泵提升温度可达到78℃，COP为3.1，冷却能力为0.962MW。木屑锅炉的功率为4.15MW，总效率可以达到109%。系统在低谷电

价时用热泵提温回水，在高电价时，运行ORC机组，所发的电力并网销售，年发电量2,600MWh。系统设计和实测能流图见图16，供回水温度见图17，CO₂热泵机组见图18：

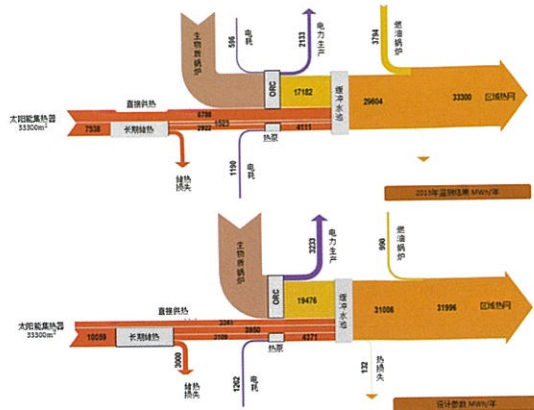


图16 丹麦Marstal太阳能区域供热系统能流图[12]（2013年监测值-设计值，来源：Solites）

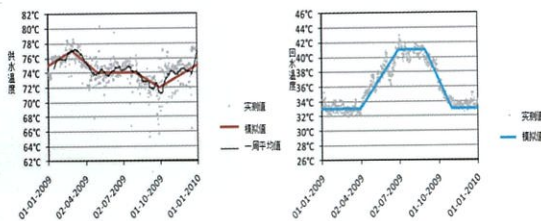


图 17

2009年Marstal太阳能区域热网供回水温度（来源:SUNSTORE4）

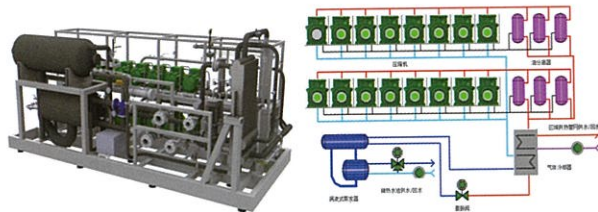


图18 系统采用的 CO₂热泵机组（来源:SUNSTORE4）

3.3. 经济性

本项目热价50-60欧元/MWh（折合人民币0.374-0.449元/KWh），相对于欧洲常规燃油热价70欧元/MWh（折合人民币0.524元/KWh），具备良好的经济效益，为社区居民节省了采暖费开支。

3.4. 发展历程

丹麦全年太阳辐照总量是其每年所消耗能源的总量（供热、电力、运输等）的200倍。丹麦政府和民间都在思考如何使用这种具有巨大潜力的可再生能源。在1994年，丹麦已经有2座使用太阳能的大型区域供热厂。丹麦政府也提出经济增长与碳脱钩的主张，并开始征收高额的能源税，该政策激发了全社会探索用生物燃料，或太阳能来替代石油的积极性。Marstal太阳能区域供热

目前主要有三期工程，一期工程由丹麦政府与丹麦太阳能企业共同出资建设，简称SUNSTORE 1。二期工程和三期工程由丹麦政府与欧盟共同出资建设，简称为SUNSTORE 2和SUNSTORE 4。SUNSTORE 3为欧盟与丹麦共同出资建设丹麦Dronninglund太阳能区域供热厂。

SUNSTORE 1

1994年初，丹麦Marstal Fjernvarme 区域供热集团公司拨款10,000丹麦克朗在市游泳池设计一个75 的太阳能集热器工厂，同时拨款20,000丹麦克朗设计一个与区域供热厂相连的大型太阳能供热厂。1994年7月，太阳能集热器厂开始实施。这个工厂的建设标准和未来的大型工厂的建设相同。经过一年半的运行后，结果非常的良好，因此项目方决定另建一个8,000 的工厂。该8,000 的集热场，所需的储热罐体积为1,500m³-2,000m³，可以满足13%-15%的热需求，在夏季的三四个月份则可100%满足热需求。辅助热源采用3台燃油锅炉，供热功率为18.3MW。由于锅炉运行后期腐蚀严重，区域供热公司于2006年采用生物质锅炉替换燃油锅炉。

SUNSTORE 2

2001年8月，项目方开始讨论增加更多的集热器，以提高太阳能保证率。项目铺设集热器面积9,322m²，建设10,000m³坑式储热水池用于跨季节储热。二期工程建成后年太阳能保证率达30%，夏季太阳能全覆盖。

SUNSTORE 2有5个不同太阳能厂的产品组成：

- 1) 由ARCON生产的8,019m²的平板太阳能集热器。新集热器的效率相比1996年提高了18%。
- 2) 由GJ-teknik生产的881m²的平板太阳能集热器。GJ-teknik是当地的公司，该公司同时也为在Rise的工厂生产了集热器。后来GJ-teknik开始在越南以SUNMARK的名字进行生产。
- 3) 由美国IST生产的211m²的聚焦型集热器。
- 4) 由英国Thermomax生产的108m²的真空管太阳能集热器。
- 5) 由德国Wagner生产的103m²的屋顶集成太阳能集热器。

ARCON和SUNMARK的集热器在2003年开始运行，因为此时储热系统还没建成，为了解决集热器的过热问题，运营公司将集热器进行了覆盖，直到2003年11月，储热系统建成，才开始储热，而控制系统则直到2004年6月才完成。Sunstore2区域供热能源分布见图19：

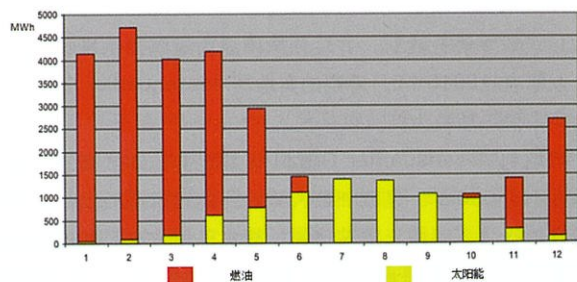


图19 SUNSTORE 2工程太阳能保证率[13]

SUNSTORE 4

SUNSTORE 4增加了热电联产技术的应用，新增了4.15MW低排放木屑锅炉和750kW有机朗肯循环低温余热发电机组组成的热电联产系统，新铺设15,000m²太阳能集热器，建设75,000m³坑式储热水池用于跨季节储热。同时新增了一台以CO₂为工质，功率为1.5MW的热泵，为二期工程进行补热。

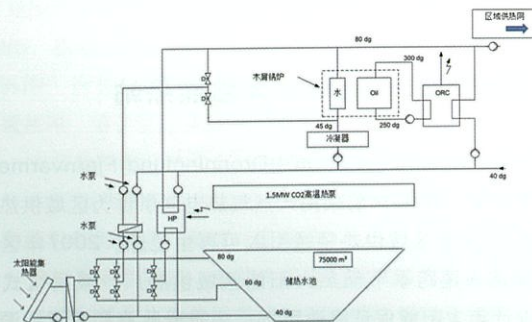


图20 丹麦马斯达尔SUNSTORE 4太阳能热站系统原理图

(来源:SUNSTORE4)

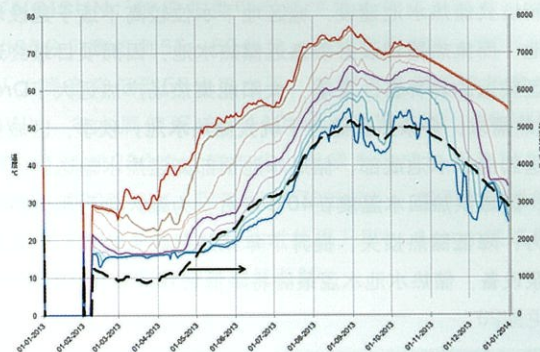


图21 丹麦马斯达尔SUNSTORE 4太阳能区域供热储热水池温度及储热量

(来源:SUNSTORE4)

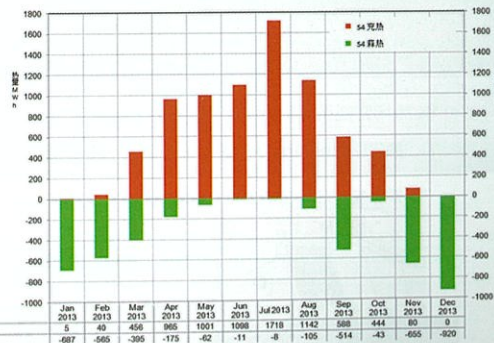


图22 2013年SUNSTORE 4跨季节坑式储热水池充热/释热

(来源:SUNSTORE4)

SUNSTORE 4 太阳能集热系统的目标是达到ESTTP(European Solar Thermal Technology Platform)成本预期，成本效益达到3-6欧分/KWh（人民币0.2245-0.4491元/KWh），跨季节储热水池的成本为33欧元/m³（人民币247元/m³），实现高度集成的100%使用可再生能源的区域供热系统。

SUNSTORE 4的建成使马斯塔尔太阳能热站的太阳能保证率理论上可达55%，剩余45%的能源需求采用生物质锅炉提供。

生物质热电联供系统几乎覆盖区域供热系统夏天全部用热负荷，但如果全年采用生物质热电联供势必造成大量生物质资源消耗，同时增加碳排放。采用太阳能复合生物质热电联供系统，会导致初投资增加，但后期运维费用降低，同时减少生物质的使用，节省燃料费，也会缩短投资回收期。

4、丹麦Dronninglund太阳能热站

Dronninglund 区域供热由Dronninglund Fjernvarme区域供热公司运营，2005年前采用天然气热电联供作为区域供热热源，2005年开始在区域供热领域引入可再生能源。2007年区域供热公司决定兴建跨季节储热太阳能区域供热厂，采用坑式储热水池，设计年太阳能保证率达50%。由丹麦政府和欧盟能源技术部EUDP共同出资建设，简称SUNSTORE 3。

SUNSTORE 3太阳能区域供热厂设计难点在于太阳能集热器铺设和坑式储热水池建设，城区地下水位较高不适于建设坑式储热水池，而集热器铺设必须靠近储热水池，因而项目最终选址距离市区较远的森林区。夏季，太阳能集热场产热远大于Dronninglund热需求，多余热量储存于坑式储热水池；秋季，区域供热回水输送到储热水池底部，储热水池顶部高温热水输送到区域热网供热。区域供热回水温度在40℃左右，为最大化利用储热水池储热能力，降低储热损失，提升下年集热器集热效率，系统通常加载热泵设备，储热水池水温最终将降低到10℃。SUNSTORE 3系统图见图23。



Dronninglund集热场俯视图 Dronninglund集热场与所供热的小镇位置关系图

图23 Dronninglund太阳能热站位置示意图



(1 太阳能集热场 2 坑式储热水池 3 设备间(管网、水泵、热交换器)
4 区域供热管网 5 吸收式热泵)

图24 Dronninglund太阳能热站布局

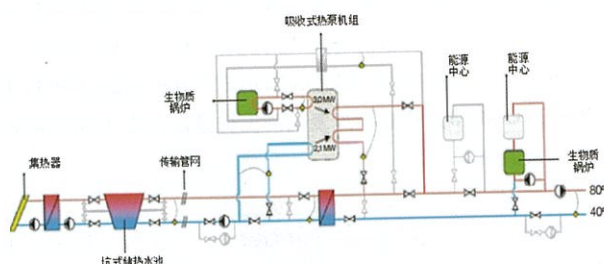


图25 Dronninglund太阳能区域供热系统图[13]

Dronninglund太阳能区域供热厂采用2, 982组Arcon太阳能集热器，集热器面积总计37, 573m²，集热器日最大输出功率为26MW，冬季最冷时日最大输出功率为12MW。坑式储热水池最大储热容积为60, 000m³，建设周期为2003年3月~2013年11月。储热水池底部采用2.5mm的焊接聚乙烯板覆盖，顶部采用1.5mm焊接聚乙烯板覆盖保温。水温不超过90℃时，设计使用寿命为20年。预计每年集热场输送到储热水池的热量为17, 453MWh。集热场及供热区域见图26。

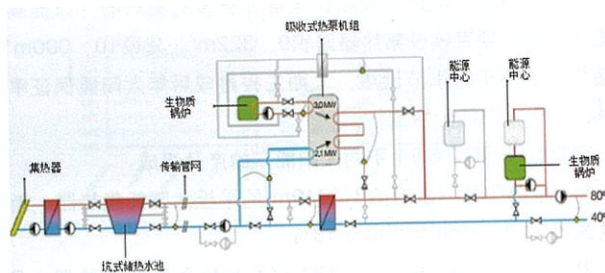


图26 太阳能区域供热厂产热分配

热站采用木屑或秸秆的边际产热价格2-3欧元/KWh(人民币0.15-0.22元/KWh)。市场对生物质需求的增加、运输成本的增加，以及用途的增加，都会导致生物质价格的上涨和生物质燃料的短缺。太阳能供热可以满足整个夏季的用热需求，可以让生物质锅炉关闭很长一段时间，从而节省费用。

5、太阳能采暖与被动式建筑

太阳能采暖主要运用于低温热水采暖，与被动式建筑结合将能发挥太阳能采暖极大优势，目前德国、奥地利新建建筑多为低能耗建筑或零能耗建筑，并运用太阳能为建筑提供采暖及生活热水。以笔者在2016年6月考察的奥地利Messequartier Graz小区太阳能集中供热项目为例。

奥地利Messequartier Graz小区建筑为被动式建筑，建筑面积总计21, 000m²，是欧洲最大零能耗建筑示范项目，整栋建筑保温性能极强，采用三层玻璃窗。建筑采用市政区域热网供热，屋顶安装700m²集热器进行采暖和生活热水提供，集热器倾角60°，从而在春秋季节能够获得更多太阳辐照，整个集热器场划

分为6组集热器阵列，每组集热器面积117m²，单块集热器面积17.6m²。

外围护结构为隔热砖墙，屋顶和地下室天花板为钢筋混凝土，窗户为三层玻璃窗户。围护结构传热系数：墙：0.18 W/m².k；窗口：0.8 W/m².k；屋顶/楼板：0.11 W/m².k；地下室屋顶：0.11 W/m².k。同时建筑室内通风采用机械通风系统，采用热泵预热进入室内冷空气，安装热回收装置，能够回收75%的热量。每年采暖、生活热水、通风总耗能为30.1KWh/m²，52%由可再生能源提供，超过当前奥地利43%可再生能源比例规定。建筑顶层还设有居民公共活动空间和游泳池，居民满意度极高。该项目建筑总造价为5,700万欧元（人民币4.2亿元），单位面积造价为2,700欧元（人民币2.02万元/m²）。



图27 Messequartier Graz太阳能区域供热实景

并入区域热网的换热器 太阳能储热罐



图28 Messequartier Graz太阳能区域供热设备机房

6、太阳能防噪墙

太阳能集热器不仅可铺设于地面或屋顶作为采暖及生活热水热源，还可铺设于公路、铁路两侧作为隔音墙，不仅用于供热，还可改善铁路、公路沿线居民环境状况，降低噪音污染。例如瑞典lerum市利用太阳能集热器作为铁路噪音屏蔽墙的欧盟示范项目。

噪声污染是瑞典Lerum市主要环境问题，噪声不像其他环境问题一样对人的生命构成直接威胁，但却严重影响人们健康和生活质量，数百万欧盟居民生活在噪声超过可接受水平的环境，瑞典接近两百万居民需要忍受超过55分贝的交通噪声。

Lerum市为在2025年建成绿色示范城市制定了“NOISUN”计划。计划运用节能技术和可再生能源技术治理噪声同时减少温

室气体排放。具体解决方案为在400m长市区铁路沿线两侧铺设集热器，防噪同时利用太阳能集热器集热并网区域热网用于居民采暖及生活热水。

Lerum市政府，市政机构Lerum Fjärrvärme AB，瑞典交通管理机构，瑞典SP技术研究所合作完成太阳能防噪墙的建设。LERUM太阳能铁路隔音墙长450m，建筑墙体高度3m，安装68块平板型太阳能集热器，总计集热器面积856m²。年供热量240MWh，提供70℃热水，与区域热网通过换热器直接换热。

“NOISUN”计划主要解决噪音污染，并将太阳能集热器集热输入到区域热网。该计划涉及技术主要有：

- 1) 太阳能防噪墙优化设计以适应公路和铁路环境；
- 2) 太阳能集热系统与区域热网并网解决方案，能源供应系统中太阳能与其他能源的集成（兼容性）；
- 3) 测试和验证铁路、公路太阳能防噪墙技术解决方案；
- 4) 监测和优化太阳能防噪墙对区域供热系统的贡献；
- 5) 基于防噪功能和太阳能对区域供热系统贡献率评估社会经济性。

“NOISUN”取得非常可观经济效益和环保效益：噪声由原先的65分贝降低到55~60分贝；调研发现60%~90%的当地居民认为噪音降低到55分贝水平；年可再生能源产热量400,000KWh；年木屑使用减少440m³；年节省20,000KWh电力；年CO₂减排200吨。每年减少因噪声造成的经济损失70,000~105,000欧元（人民币52万-78万元）；基于太阳能集热器防噪功能，太阳能集热系统整体性能提升5%。Lerum铁路集热器铺设见图29；设备机房实景图见图30：



图29 平板太阳能集热器隔音墙



集热场换热站 系统运行参数展示窗口（可查看太阳能保证率）

图30 设备机房实景图

7、总结

太阳能区域供热技术的应用需因地制宜,其实施取决于项目所在地域的太阳能资源、自然资源、气候条件、地理条件、经济发展水平和政府政策引导。丹麦形成太阳能复合生物质燃料热电联供模式,并辅以跨季节储热的太阳能区域供热模式;奥地利主要发展发展短期储热的太阳能复合生物质锅炉供热模式,并运用基于合同能源管理的能源服务公司(ESCO)保障系统的建设和运营;瑞典通过太阳能区域供热子站,实现小规模太阳能集热系统与区域供热管网直接并网;南部国家西班牙、意大利则主要发展太阳能区域供热制冷。不同地区发展模式有很大差异,太阳能区域供热能够实现商业化的国家目前只有丹麦,很多国家太阳能区域供热依靠于本国政府和欧盟的资金支持。

通过实地调研中国数十个太阳能采暖项目,结合中国供热现状(热源选择、管网建设和管理水平),笔者认为国内发展太阳能区域供热应以多能互补为主,且应大量建设太阳能热站,以弥补管网的热损失,提高锅炉供水温度,甚至实现直接并网,减少燃煤消耗,对于部分已经实现“煤改气”的省份,比如新疆和北京,建设大规模的太阳能热站,可极大的减少燃煤消耗,减少雾霾,减少热站的运营成本。

中国政府正面临着燃煤造成的严重的雾霾污染问题,以及由此引发的全民健康隐患。加快北方地区采暖方式和热源的清洁化转变,已变得刻不容缓。从欧洲多个国家的实践来看,太阳能区域供热技术在理论和实践上均已成熟。但由于传统化石能源的价格近几年不断下滑,使太阳能热站的投资回收期变长,在经济上失去了优势。要应对这样的挑战,政府和产业界须加强与金融机构的合作,借助绿色金融的创新,推动太阳能区域供热技术这种清洁环保、面向未来的可持续供热技术在中国的快速发展。^[C]

参考文献:

[1] Solites, SOLAR-KWK Entwicklung multifunktionaler Systeme zur solar unterstützten Kraft-Wärme-Kopplung solare Fernwärme und saisonale Wärmespeicher für die Energiewende, v1, 2015

[2] Jan-Olof Dalenbäck. Large-Scale Solar Heating and Cooling Systems in Europe. Springer Berlin Heidelberg, 2008:799-803

[3] Roman Marx, Dan Bauer, Harald Drueck. Energy Efficient Integration of Heat Pumps into Solar District Heating Systems with Seasonal Thermal Energy Storage. Energy Procedia. 57 (2014) 2706-2715

[4] Vaclovas Kveselis, Aurimas Lisauskas, Eugenija Farida Dzenajavi et al. Investigating possibilities to integrate solar heat into district heating systems of Lithuanian towns. The 9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING" 22-23 May 2014, Vilnius, Lithuania.

[5] Simon Furbo, Jianhua Fan, Bengt Perersa, Weiqiang Konga, Daniel Trier, Niels From, Testing, development and demonstration of large scale solar district heating systems, Energy Procedia 70 (2015) 568-573

[6] www.solar-district-heating.eu

[7] Franz Mauthner, Werner Weiss, Monika Spörk-Dürr, Solar Heat Worldwide Markets and Contribution to the Energy Supply 2014, 2016 Edition

[8] Dario Buoro, Piero Pinamonti, Mauro Reini, Optimization of a Distributed Cogeneration System with solar district heating, Applied Energy 124 (2014) 298-308

[9] Roman Marx, Dan Bauer, Harald Drueck, Energy Efficient Integration of Heat Pumps into Solar District Heating Systems with Seasonal Thermal Energy Storage, Energy Procedia 57 (2014) 2706-2715

[10] Mehmet Elcia, Axel Oliva, Sebastian Herkel, Konstantin Klein, Alexander Ripka, Grid-interactivity of a solar combined heat and power district heating system, Energy Procedia 70 (2015) 560-567

[11] Bruce Sibbitt, Doug McClenahan, Reda Djebbar, Jeff Thornton, Bill Wong, Jarrett Carrierec, John Kokkod, The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system five years of operation, Energy Procedia 30 (2012) 856-865

[12] www.solites.de

[13] http://sunstore4.eu/

☆黄俊鹏, 硕士, 丹麦科技大学博士研究生, 美国国际铜业协会北京代表处。

△徐允锦, 硕士研究生, 同济大学机械与能源工程学院。