

高等学校“专业综合改革试点”项目

太阳能热利用技术丛书

太阳能采暖 设计技术

卫江红 梁宏伟 赵岩 袁家普 主编

清华大学出版社

太阳能热利用技术丛书

太阳能采暖 设计技术

卫江红 梁宏伟 赵岩 袁家普 主编

清华大学出版社

内 容 简 介

本书基于理论联系实际的思想,涉及太阳能采暖设计的主要方面,既简明扼要,又不失严密性和系统性。内容涵盖了太阳能采暖系统类型和设计计算、采暖末端和辅助供热设备,同时精心选择了常见太阳能采暖系统作为案例介绍。

本书可作为高等院校能源与动力工程专业教学用书和参考书,方便初学者快速掌握太阳能采暖系统技术,也可作为太阳能热利用工程技术人员在进行太阳能采暖系统设计时的参考书,且能应用于实践。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

太阳能采暖设计技术/卫江红等主编.--北京:清华大学出版社,2014

(太阳能热利用技术丛书)

ISBN 978-7-302-34500-8

I. ①太… II. ①卫… III. ①太阳能采暖 IV. ①TU832.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第274264号

责任编辑:杨倩 洪英

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦A座 邮 编: 100084

社总机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市李旗庄少明印装厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 170mm×230mm 印 张: 13.25

字 数: 266千字

版 次: 2014年2月第1版

印 次: 2014年2月第1次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 28.00元

太阳能热利用技术丛书

编委会

顾 问：贾铁鹰

主 任：程洪智 袁家普

委 员（按姓氏拼音排序）：

李彩霞	孙如军	王宝泉	王冬梅	王 会
卫江红	魏希德	姚俊红	赵 岩	赵玉磊

丛 书 序 言

能源是人类社会赖以生存和发展的物质基础。纵观人类社会发展的历史,人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替,能源的开发利用极大地推进了世界经济和人类社会的发展。进入 21 世纪后,全球经济快速发展和人口不断增长,使得一次能源消费量不断增加。人们在物质生活和精神生活不断提高的同时,也越来越感受到大规模使用化石能源带来的严重后果:资源日益枯竭,生态环境不断受到威胁,还诱发了不少国与国之间、地区之间的政治经济纠纷,甚至冲突和战争。因此,人类必须寻求清洁、安全、可靠的新能源和可再生能源。

太阳能是开发和利用新能源与可再生能源的重要内容。太阳能具有资源丰富,取之不尽、用之不竭,处处均可开发利用,无须开采和运输,无污染等特点。因此,太阳能的开发利用有着巨大的市场前景。我国是太阳能资源十分丰富的国家之一,2/3 的地区年辐射总量大于 $5020\text{MJ}/\text{m}^2$,年日照时数在 2200 小时以上。尤其是大西北,太阳能的开发利用有巨大的潜力。

太阳能光热利用是太阳能热利用的一种基本方式。太阳能低温热利用产生的是热水,象征产品是太阳能热水器、商用的太阳能热水系统和工业用的太阳能热水系统;太阳能中温热利用产生的是热能,是太阳能热利用未来 10~20 年内主要的发展方向;太阳能高温热利用产生的是热电,主要作用于“政府”公共工程以及商业领域,是未来太阳能热利用的最高阶段,也将成为替代常规能源的主要途径。

清华大学出版社和德州学院顺应时代需要,组织联系一批学者和太阳能光热企业技术人员,出版了这套“太阳能热利用技术丛书”。本套丛书共七本,从太阳能热利用概述到热水系统设计、施工管理,再到

专业英文文献,体系完整。每本书在编写时,思路清晰,内容丰富充实,不仅有理论介绍,更有大量翔实的案例,既具有很强的实用价值,又具有较高的学术价值。本套丛书不仅可以作为能源类太阳能相关领域的专业图书和教材,还可以作为太阳能相关企业工程技术人员的专业培训用书和参考书。

我们期待本套丛书的出版发行,并希望它能在太阳能光热的研究开发与应用进程中作出应有的贡献。

是为序。

贾铁鹰

2013年7月

前言

太阳能作为清洁的可再生能源,它的开发和利用无疑是解决现代社会发展进程中能源短缺的有效方案之一。由于太阳能分布广泛,而且是免费获取的,在能源的价格和环境污染方面都具有较大优势。太阳能的热利用是最直接的方案,而且应用的历史悠久,因此太阳能热利用技术的发展也最为迅速。目前,太阳能热水器已经广泛应用在民用建筑上,解决了人们日常生活用水的加热问题。但是在民用建筑中,采暖用热所消耗的能源占全部能源消耗的一半以上,提高太阳能的利用率和在民用能源消耗中的占比,将会较大幅度地降低建筑的能源消耗。

太阳能的应用可以分为高温应用、中温应用和低温应用。高温应用一般在 250°C 以上,主要用于高温发电;中温应用一般在 $80\sim 250^{\circ}\text{C}$,主要用于中温热发电、太阳能空调、工业干燥等;低温应用一般在 80°C 以下,主要用于生活热水、泳池、工业用热水以及采暖等。其中低温应用的设备投入及运行费用较低,且效率高,综合效益较好,因此发展和扩大太阳能低温应用范围仍是太阳能应用技术的主要方向。

由于太阳能能量稀疏,四季分布不均,且太阳能系统运行的较佳温度在 60°C 以下,太阳能作为建筑采暖的供热设备,显然需要采暖末端的温度不宜过高,因此本书结合太阳能的上述特点,介绍太阳能系统采暖设计计算基础、常用太阳能采暖系统方案、辅助供热设备以及太阳能采暖末端、低温地板辐射采暖使用和案例、风机盘管的选型计算等,方便初学者快速掌握太阳能采暖系统技术,且能应用于实践,也可以作为太阳能热利用工程技术人员在进行太阳能采暖系统设计时的参考书。

本书在编写过程中参考了国内外的许多文献资料,在此表示感谢。由于编者水平有限,本书中难免有不足或疏漏之处,敬请读者批评指正,并提出宝贵意见。

编 者

2013 年 12 月

目 录

第 1 章 太阳能采暖概述	1
1.1 采暖热源及采暖系统分类	1
1.1.1 采暖供热的能源	1
1.1.2 采暖系统分类及特点	1
1.2 太阳能供热采暖技术现状	3
1.2.1 中国太阳能供热采暖技术现状	3
1.2.2 国际太阳能供热采暖技术现状	5
1.3 中国太阳能供热采暖条件分析	7
1.3.1 中国冬季采暖基本情况	7
1.3.2 太阳能热源采暖的技术条件	8
第 2 章 太阳能利用基本理论	10
2.1 太阳在空间的位置	10
2.1.1 太阳角度定义	10
2.1.2 太阳角度的有关公式	11
2.2 太阳辐射	14
2.2.1 太阳常数与太阳辐射的电磁波	14
2.2.2 大气层对太阳辐射的吸收	16
2.2.3 太阳辐射相关术语	17
2.3 倾斜面上太阳能辐照量	18
2.4 传热学基础	19
2.4.1 导热	19

2.4.2 对流传热	23
第3章 太阳能集热器	28
3.1 平板太阳能集热器	29
3.1.1 吸热体	30
3.1.2 透明盖板	31
3.1.3 隔热层	32
3.1.4 外壳	32
3.2 真空管太阳能集热器	32
3.2.1 全玻璃真空管集热器	33
3.2.2 玻璃-金属封接真空管集热器	37
3.2.3 聚光型真空管集热器	40
3.3 采暖用集热器的选择	40
3.4 太阳能集热器的三类面积定义和计算方法	41
3.5 太阳能集热器的技术要求	43
3.5.1 太阳能集热器的集热效率方程和效率曲线	43
3.5.2 集热器进、出口的压降、温差和流量的关系	44
第4章 常用的太阳能采暖系统形式	48
4.1 单户采暖太阳能采暖系统	48
4.2 太阳能集中蓄热供暖系统	52
4.2.1 太阳能短期蓄热集中供热系统	52
4.2.2 太阳能季节蓄能集中供热系统	54
第5章 太阳能采暖系统设计相关计算	62
5.1 热水负荷计算	62
5.2 采暖负荷计算	63
5.3 太阳能集热面积计算	63
5.4 管道阻力计算	64
5.5 膨胀罐选型计算	66
5.6 辅助加热的需求计算	67
5.7 水泵选取	68
5.8 水箱容积的确定	69

第 6 章 太阳能采暖系统的设计及选型	70
6.1 太阳能采暖系统的分类	70
6.1.1 空气集热器太阳能采暖系统	71
6.1.2 液体集热器太阳能采暖系统	72
6.2 太阳能采暖系统设计要素	74
6.3 太阳能集热器系统的设计	77
6.3.1 太阳能集热器集热系统设计	78
6.3.2 夏季过热问题的解决方法	82
6.3.3 冬季防冻问题的解决方法	84
6.4 储热水箱的设计	85
6.5 控制系统的设计	87
6.6 辅助热源的设计	89
6.7 太阳能采暖系统设计、选型案例	89
第 7 章 辅助供热设备及选型	113
7.1 燃气壁挂炉	113
7.2 热泵	117
7.3 板式换热器的选型计算	122
7.3.1 板式换热器简介	122
7.3.2 选型计算	124
第 8 章 太阳能蓄热技术	127
8.1 概述	127
8.2 太阳能蓄热类型	127
8.2.1 显热储热	127
8.2.2 相变储存	130
8.2.3 化学反应储存	132
第 9 章 低温地板辐射采暖技术	133
9.1 低温地板辐射供暖简介	133
9.2 系统组成	140
9.3 低温辐射地板采暖的设计程序	140
9.4 设计案例	146
9.4.1 某别墅地板采暖设计简介	146

9.4.2 地暖系统设计主要参数·····	149
第10章 风机盘管 ·····	151
10.1 风机盘管介绍 ·····	151
10.2 风机盘管气流组织 ·····	156
10.3 风机盘管水系统设计 ·····	158
10.3.1 水系统材料选择 ·····	158
10.3.2 水系统热惯性和水容量 ·····	159
10.3.3 水管系统的布置及防冻 ·····	161
附录A 地板向房间的有效散热量表 ·····	163
附录B 压力损失表 ·····	167
附录C 全国主要城市采暖期耗热量指标和采暖设计热负荷指标 ·····	172
附录D 低温热水地面辐射供暖技术规程 ·····	173
参考文献 ·····	198

太阳能采暖概述

1.1 采暖热源及采暖系统分类

1.1.1 采暖供热的能源

采暖供热需要的热量是从某一种能源的能量转换而得到的。目前所使用的能源从性质上可分为三大类：矿物燃料、核能和可再生能源。

(1) 矿物燃料：主要是开采地下的矿产燃料资源，通过矿物质的燃烧释放出热量，是不可再生的能源，如煤炭、石油、天然气等。

(2) 核能：通过原子核的裂变或聚变反应而释放出来的能量，目前多用于核发电。

(3) 可再生能源：通常是指太阳能、风能、生物能（木材、秸秆等）、潮汐能、地热、波浪能、海洋温差等，是不消耗地球上固有资源或消耗之后还可以重新获得的能源。

目前，供热采暖仍是以消耗矿物燃料为主。但随着可再生能源的技术进步，开发利用可再生能源已经逐步形成产业化，应用范围也在不断地扩大。例如，利用太阳能提供家用生活热水，太阳能热水器已经得到了广泛的推广和应用，但太阳能能量密度稀疏且日照时间有限，冬夏能量分配反差，因此在太阳能供热应用上还需要配套技术的研究，来提高太阳能的利用率。

1.1.2 采暖系统分类及特点

1. 采暖系统分类

采暖系统可根据不同的方法进行分类。

1) 按系统热源的不同和系统规模的大小分类

(1) 城市热网采暖系统（热源为天然气锅炉、燃煤锅炉、燃煤或天然气热电联产）；

(2) 小区锅炉房采暖系统(热源为天然气锅炉、燃煤锅炉、燃油锅炉、电热锅炉或地源热泵);

(3) 独立采暖系统(热源为壁挂炉、电源热泵)。

城市热网采暖系统和小区锅炉房采暖系统都比较适合普通住宅(城市内大多数住宅小区)。其优点是技术比较成熟,安全、可靠,使用方便,价格便宜,每天 24h 供暖。但不足的是供暖的时间和温度不能自己控制,供暖期前后无热源,散热片取暖,一般出水温度在 70°C 以上,但温度达到 80°C 时就会产生灰尘团,使暖气上方的墙面布满灰尘。

独立采暖系统比较适用别墅类建筑等低密度住宅。其优点是占地面积小、安装简单、操作便利,采暖的同时也能提供生活热水、舒适性高。采暖时间自由设定,可随时开启,每个房间温度能在一定范围内随意调节。不足之处是,前期投入较大,运行费用较高,需要用户自己维护和更新。

2) 按采暖末端分类

(1) 电热膜采暖:以电力为能源,是将特制的导电油墨印刷在两层聚酯薄膜之间制成的纯电阻式发热体,配以独立的温控装置。以低温辐射电热膜为发热体,大多数为天花板式,也有少部分铺设在墙壁中甚至地板下。具有恒温可调、经济舒适、绿色环保、寿命长、免维护等特点。

(2) 低温辐射地板采暖:通过埋设于地板下的加热管——铝塑复合管或导电线管,把地板加热到表面温度 $18\sim 28^{\circ}\text{C}$,均匀地向室内辐射热量而达到采暖效果。同时它可以由分户式燃气采暖炉、市政热力管网、小区锅炉房等各种不同方式提供热源。地面温度均匀,室温自下而上逐渐递减,舒适度高,有较好的空气洁净度。与其他采暖方式相比,节能幅度为 $10\%\sim 20\%$,有利于屋内装修,增加 $2\%\sim 3\%$ 的室内使用面积,有利于隔声和降低楼板撞击声等特点。

(3) 风机盘管采暖:采用市政电或天然气,通过出风口提供热源供暖。有档次高、外形好、舒适度高、温度与时间可预调、适合面积较大的低密度住宅和别墅等特点。

(4) 燃气红外辐射采暖:利用天然气、液化石油气等可燃气体,在特殊的燃烧装置——辐射管(板)内燃烧而辐射出各种波长的红外线进行供暖。适合高大的工业厂房和某些大空间的公共建筑,具有热能消耗少、舒适、采暖热效率高等特点。

2. 太阳能采暖系统特点

太阳能采暖系统与常规能源采暖系统的主要区别,在于它是以太阳能集热器作为热源,替代或部分替代以煤、石油、天然气、电力等作为常规能源的锅炉。太阳能集热器获取太阳辐射能而转换的热量,通过散热系统送至室内进行采暖;过剩热量储存在储热水箱内;当太阳集热器收集的热量小于采暖负荷时,由储存的热量来补充;当储存的热量不足时,由备用的辅助热源提供。

太阳能采暖系统与常规能源采暖系统相比,有如下特点。

(1) 系统运行温度低。由于太阳能集热器的效率随运行温度升高而降低,因此尽可能降低集热器的运行温度,也尽可能降低采暖系统的热水温度。若采用地板辐射采暖,则集热器的运行温度在 $30\sim 38^{\circ}\text{C}$ 之间就可以了;若采用普通散热器采暖系统,则集热器的运行温度必须达到 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ 以上。

(2) 有储存热量的设备。由于辐射到地面的太阳辐射能受气候和时间的支配,不仅有季节之差,即便一天之内的太阳辐照度也是不同的,因此太阳能不能成为连续、稳定的能源。要满足连续采暖的需求,系统中必须有储存热量的设备。

(3) 与辅助热源配套使用。由于太阳能不能满足采暖需要的全部热量,或者在气候变化大而储存热量又很有限时,特别在阴雨雪天和夜晚几乎没有日照,因此太阳能不能成为独立的能源。要满足各种气候条件下采暖的需求,辅助热源是不可缺少的。太阳能采暖系统的辅助热源可采用电力、燃气、燃油和生物质能等。

(4) 适合在节能建筑中应用。由于地面上单位面积能够接收的太阳辐射能有限,因此要满足建筑物采暖的需求,且达到一定的太阳能保证率,就必须安装足够多的太阳能集热器。如果建筑围护结构的保温水平低,门窗的气密性差,那么在有限的建筑围护结构面积上不足以安装所需的太阳能集热器面积。

1.2 太阳能供热采暖技术现状

1.2.1 中国太阳能供热采暖技术现状

随着国民经济的发展,能源需求量日益增加,能源利用情况紧张,而常规能源的大量使用必将对环境造成不利影响。在建筑能耗中,生活热水、供暖能耗占了相当的比例,利用太阳能来满足生活热水、供暖这些低品位能耗的要求具有巨大的节能效益。太阳能作为可再生能源的一种,取之不尽,用之不竭,同时又不会增加环境负荷,而我国又属太阳能资源丰富的国家之一,年辐射总量为 $3300\sim 8300\text{MJ}/\text{m}^2$,全国 $2/3$ 以上面积地区年日照小时数大于 2000h ,具有太阳能利用的良好条件。因此,太阳能采暖技术越来越受到人们的重视。

太阳能采暖是指以太阳能作为采暖系统的热源,利用太阳能集热器将太阳能转换成热能,供给建筑物冬季采暖。太阳能采暖可分为主动式和被动式两种方式。被动式太阳能采暖是通过建筑的朝向、周围环境的合理布置、内部空间和外部形体的合理设计、建筑蓄热材料的运用,使建筑物在冬季能充分收集、存储和分配太阳辐射热,从而提高室内的温度,达到采暖目的。主动式太阳能采暖主要由太阳能集热系统、蓄热系统、末端供热采暖系统、自动控制系统和其他能源辅助加热、换热设备组合构成,通过动力系统将收集的太阳能转化成热量直接用于冬季的建筑采暖或进行热量储存

用于冬季的采暖。

1. 被动式太阳能采暖

与单纯的太阳能热水供应相比,我国用于冬季供暖的太阳能供热、采暖技术和工程应用的技术水平较低。由于经济发展相对落后,从国情出发,采取的政策是优先发展被动太阳能采暖。我国的第一栋被动式采暖太阳房于1977年在甘肃省民勤县建成。经过三十多年的发展,以及引进、消化、吸收国外太阳能建筑技术,我国已形成了具有中国特色的包括理论、设计、施工、试验及评价方法在内的整套被动式太阳能采暖技术,建成了几百万平米建筑面积的被动式采暖太阳房。

现今我国的太阳房建筑,主要是被动式太阳房。被动式太阳房的类型很多,目前从利用太阳能的方式来区分有以下三种。

1) 直接受益式

房屋的南向立面有较大面积的玻璃窗,阳光透过玻璃窗进入房间后,直接照射到房间的地面、墙壁和家具等表面上,使其吸收大部分热量而温度升高。被这些围护结构内表面吸收的太阳能,一部分以辐射和对流的方式在室内空间传递,加热室内空气,一部分传导入围护结构内部,然后逐渐放出热量,使房间在晚上和阴天也能保持一定的温度。窗扇的密封性要好,并且配有保温窗帘或窗扇(板),以防止夜间从窗户向外的热损失。此外,要求外围护结构有良好的保温性能和蓄热性能。目前应用最普遍的蓄热建筑材料包括砖石、混凝土和土坯等。在炎热的夏季,有良好保温性能的热惰性的围护结构也能在白天阻止热量传到室内,并通过合理的组织通风,使夜间的室外冷空气流进室内,冷却围护结构内表面,延缓室内温度的上升。

由于直接受益式太阳房热效率较高,但室温波动较大,因此,适用于白天要求升温快的房间或只是白天使用的房间,如教室、办公室、住宅的起居室等。如果窗户有较好的保温措施,也可以用于住宅的卧室等房间。

2) 集热蓄热墙式

集热蓄热墙式太阳房是间接式太阳能采暖系统。阳光首先照射到置于太阳与房屋之间的一道玻璃外罩内的深色储热墙体上,然后向室内供热。

采用集热蓄热墙式太阳房室内温度波动小,居住舒适,但热效率较低,常常和其他形式配合使用。如和直接受益式及附加阳光间式组成各种不同用途的房间供暖形式,可以调整集热蓄热墙的面积,满足各种房间对蓄热要求的不同,这种组合可以适用于各种房间的要求。但玻璃夹层中间容易积灰,不好清理,影响集热效果,且立面涂黑不太美观,推广有一定的局限性。

3) 附加阳光间式

在房间南侧附建一个阳光间(或称日光温室),阳光间的围护结构全部或部分由玻璃等透光材料做成,可以将屋顶、南墙和两面侧墙都用透光材料,也可以屋顶不透光或屋顶、侧墙都不透光。阳光间的透光面宜加设保温窗帘、板。阳光间与房间之间

的公共墙上开有门、窗等空洞。阳光间得到阳光照射被加热后,热空气可通过门、窗进入室内,夜间阳光间温度高于外部环境温度,可以减少房间向外的热损失。

针对不同地区和需要,可采用不同型式的被动式太阳房。在实际应用中,以上几种类型往往是结合起来使用,称之组合式或复合式。通过各地实践和测试资料表明:与同类普通房屋相比,被动式太阳能采暖建筑的节能率在60%以上。由于被动式采暖的经济性和实用性,在中国的中西部地区村镇得到广泛的应用,如西藏、甘肃、内蒙古等地区。

2. 主动式太阳能供热采暖

主动式太阳能供暖系统在我国的发展一直比较缓慢,太阳能供热、采暖工程应用仍处于起步阶段,主要是由于经济条件、太阳能能量冬夏的不均衡和配套的蓄能技术还不成熟等原因。因此,国内已有的太阳能供热采暖工程均是示范性质的。国内近几年建筑供暖能耗不断下降,太阳能热利用产品性能日益提高,太阳能供热采暖逐渐受到人们的重视,建成的太阳能供热、采暖工程如北京清华阳光能源开发有限责任公司办公室试点工程、北京平谷新农村建设项目的将军关、玻璃台等乡村的农民住宅、拉萨火车站、中国建筑科学研究院通州研发基地(建研科技园)太阳能供热采暖试点和皇明太阳能集团日月坛微排大厦工程等都具有代表性。但太阳能区域供热、采暖(小区热力站)工程则还没有应用实践。这种太阳能供热采暖系统的推广障碍并不是集热、采暖技术本身,而是投资费用高以及夏季热量过剩,必须有配套的跨季节蓄热技术并实现全年的综合利用,同时要与电、燃气等常规能源与以及地源热泵、生物质能等其他可再生能源辅助来解决。

2006年5月启动的财政部、建设部“可再生能源建筑应用示范推广项目”中包括了较多的太阳能供热、采暖工程,在2006—2007年申报通过的212个项目中,太阳能+热泵综合的项目占25%,待该项目实施完成后,将极大带动我国太阳能供热采暖技术的发展和提高。

1.2.2 国际太阳能供热采暖技术现状

现代化社会中,人们对舒适的建筑热环境的追求越来越高,导致建筑采暖和空调的能耗日益增长。在发达国家,建筑用能已占全国总能耗的30%~40%,对经济发展形成了一定的制约作用。北美、欧洲对太阳能供热(热水、采暖)系统的工程应用已有几十年历史,过去主要用于单体建筑内的小型系统,近十余年来,包括区域供热在内的大型太阳能供热采暖综合系统的工程应用有较快发展。

美国是世界上能量消耗最大的国家,国会先后通过了“太阳能供暖降温房屋的建筑条例”和“节约能源房屋建筑法规”等鼓励新能源利用的法律文件。在经济上也采取有效措施,不仅在太阳能利用研究方面投入大量经费,而且由国会通过一项对太阳能系统买主减税的优惠办法。因此,美国太阳能建筑的发展极为迅速,无论是对太阳