

太阳能集热器种类与集热性能提升技术研究进展

李国柱^{1,2}, 王帅¹, 黄凯良¹, 李慧星¹, 冯国会¹, 王清勤², 孙子轩¹, 崔美华¹

1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 沈阳 110168

2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013

摘要 太阳能集热器是太阳能热利用技术的核心部件,其集热性能、集热效率决定了太阳能热利用技术的成熟化发展及适用性推广。本文总结了太阳能热利用的典型方式和应用领域,归纳了集热器的集热原理和类型结构,以提高太阳能集热器集热性能为目标,系统分析了太阳能集热器结构优化、新型集热器吸收材料、太阳能集热器集成相变储能技术和聚光(聚焦)集热技术等方面的最新研究进展及技术动向,进一步指出现阶段太阳能集热器技术研究上的不足,并对下一步的研究提出展望。

关键词 可再生能源;太阳能热利用;太阳能集热器;相变储能;选择性吸收涂层

碳达峰、碳中和背景下,太阳能作为一种新型可再生能源,因其储量丰富、稳定长久、清洁廉价等众多优势,成为各国为实现碳中和目标的重要选择,也被公认为是世界未来的主力能源之一^[1]。近年来,随着研究者对太阳能的转换、收集、储存等方面的不断探索,太阳能相关利用技术得到了迅猛发展,集中表现为太阳能热利用技术、太阳能光伏发电技术以及太阳能光化学反应等几种形式^[2]。其中,太阳能热利用技术是实现太阳能直接利用的最简单高效的方式,其核心技术在于将低品位的太阳辐射能转换为高品位的热能、并加以利用,太阳能集热器是实现这一能量转换过程中的核心部件。

伴随太阳能热利用技术的日趋成熟,太阳能集热器的相关研究也将不断深入。

太阳能资源拥有其他能源不可比拟的优势,但在利用上也存在着短板,例如太阳能资源具有分散性,各地区太阳能资源分布差异明显;具有间歇性与不稳定性,太阳能资源受昼夜、季度、地理和气候等多种因素限制,存在着时空不连续的状况;此外,常规太阳能利用装置的转换效率偏低^[3-4]。综上,系统掌握太阳能集热器的技术研究现状和性能提升技术方法,利用技术手段提升太阳能热利用效率克服上述不足,对于充分利用太阳能资源至关重要。本文介绍了太阳能热利用技术的发展现状,对

收稿日期:2022-01-17;修回日期:2022-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52008386)

作者简介:李国柱,副研究员,研究方向为建筑节能、可再生能源利用,电子信箱:liguozhu50@163.com

引用格式:李国柱,王帅,黄凯良,等.太阳能集热器种类与集热性能提升技术研究进展[J].科技导报,2022,40(24):50-63;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.24.006

太阳能集热器的工作原理及类型构造进行阐述,归纳整理了近年来太阳能集热器的相关研究进展,以及可以提升集热器性能的技术途径及其发展动向,为后续更好地研究太阳能集热技术,提高太阳能热利用效率提供支撑与指导。

1 太阳能热利用技术及应用领域

太阳能热利用技术主要指通过太阳能集热器

把太阳辐射能收集起来,再利用与物质间的相互作用将太阳能转换成热能的技术,可应用于采暖、烘干、制冷、热水供应等各个领域,并可实现太阳能热发电、海水淡化、热解制氢等能量转换过程。表1^[3, 5-12]为太阳能热利用技术的主要应用领域,目前此项技术的涉及范围已较为广泛,各领域技术趋于成熟,且以中高温领域居多。太阳能集热器作为太阳能热利用技术的核心部件,在光热转换过程中发挥了重要作用。

表1 太阳能热利用技术的主要应用领域

利用方式	应用领域	光热转换实现部件	集热温度范围
光转热直接利用	热水供应	太阳能热水器	低温
	换热制冷	太阳能液体集热器	中高温
	供暖	太阳能集热器	低温
	烘干	太阳能空气集热器	中高温
	蒸馏(海水淡化)	太阳能集热系统	中高温

太阳能热利用技术在国内外的应用实例已不胜枚举(表2)。在“光—热”转换利用技术领域,太阳能热水器已是现今世界范围内技术和经济性最为良好的大规模行业^[4]。国外用太阳能热水器主要用来供暖,其次是供热水,而中国主要是供热水^[13]。

中国的人均热水器安装率虽远不及塞浦路斯、奥地利、以色列等国家,但中国热水器产量为全世界之最;且中国是使用屋顶热水器全球最多的国家,占到全球总用量的60%^[4]。

表2 国内外太阳能热利用技术典型应用案例

地区	应用案例	应用领域
国内	甘肃省临夏回族自治州 ^[3] 被动式太阳能住宅小区	供暖、制冷、热水供应
	河北省张家口市 ^[11] 跨季节水体储热塔式太阳能供热示范系统	供暖
	云南省西双版纳傣族自治州 ^[8] 乳胶绿色加工关键技术及生产示范项目	烘干
国外	德国巴登-符腾堡州 ^[4] 克赖尔斯海姆示范项目	供暖
	西班牙加泰罗尼亚自治区 ^[15] 集中-分散型供水系统住宅项目	热水供应
	摩洛哥马拉喀什 ^[16] 太阳能海水淡化项目	海水淡化

2 太阳能集热器的种类

目前太阳能集热器的分类方式多样,且不同的分类方式下有着不同的集热器类型。本文主要是从集热器的传热方式以及传热介质不同的角度出发,将太阳能集热器整体划分为间接式集热器及直吸式集热器两种类型。

2.1 间接式太阳能集热器

间接式太阳能集热器(即传统太阳能集热器)

是人们生产生活当中最为常见的集热器类型,基本结构如图1(a)所示。该类型集热器工作时,太阳辐射能首先被吸收涂层吸收并转换为热能,随后通过导热以及对流换热方式将这部分热能传递给流动工质。在此传热过程中,太阳能选择性吸收涂层是实现太阳能光热转换过程的关键性因素,也是传统太阳能集热器的核心材料。光谱选择性吸收概念最早由以色列科学家Tabor于1954年提出^[17],其作用机理是实现涂层基体对0.3~2.5 μm波段(即可

见光区和近红外光区)太阳能的高吸收率(α),以及对 $2.5\sim 50\ \mu\text{m}$ 波段(即远红外光区)太阳能的低热发射率(ε),从而提高吸热体对太阳辐射能的吸收能力,同时降低吸热体对环境散射热量的能力^[18]。目前应用在间接式集热器中的太阳选择性吸收涂层多以金属陶瓷复合型及多层光干涉型涂层为主^[18-19],其结构如图1(b)所示。

间接式太阳能集热器按其内部是否有真空空间,可划分为平板型集热器和真空管型集热器两种类型,这也是传统集热器最为常见的分类方式^[20]。其中平板型太阳能集热器是太阳能低温利用的基本器件,主要由透明盖板(单层或双层)、吸热体(表面涂有选择性吸收涂层)、隔热层和外壳等部件组成,其传热工质可为液体(以水最常见)或空气。而以液体为传热工质的平板型集热器,如图2(a)所示。在其吸热体内部设有流道(通常为平行流道

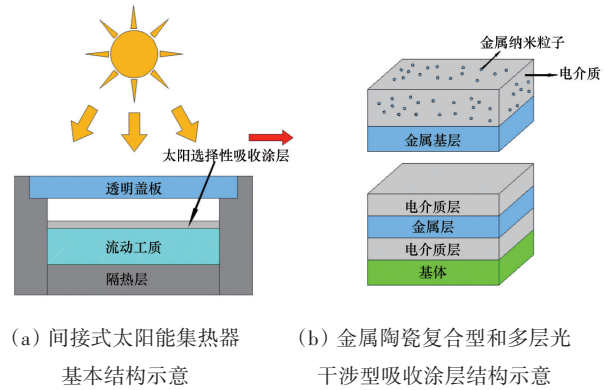


图1 间接式太阳能集热器结构示意图

式、蛇形管式两种^[21],如图2(b)所示。液体工质在此流道内流动得以与吸热体充分换热;而以空气为传热工质的平板型集热器,如图2(c)所示。设有进风侧和出风侧,空气可在吸热体的上下流动而与其换热。

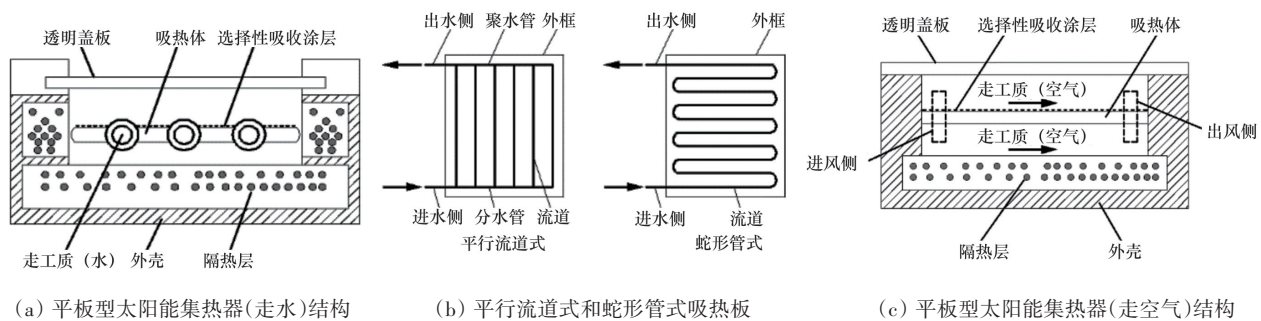


图2 平板型太阳能集热器结构示意图

真空管型集热器是在平板型集热器的基础上发展起来的新型集热装置。太阳能真空集热管是这种集热器的核心部件,它的整体构造如同一条被拉长的暖瓶胆,主要由内外玻璃管、太阳选择性吸收涂层、真空夹层、支撑件(弹簧支架)、吸气剂等部分组成,其中太阳选择性吸收涂层主要是通过真空蒸镀、磁控溅射等制备工艺涂覆在内玻璃管的表面上,用来最大限度地吸收太阳辐射能。太阳能真空集热管按其内部是否有金属材料可划分为全玻璃真空管和玻璃-金属真空管两种^[20],其中由多支全玻璃真空管(传热工质为水)按照一定规则排成阵列并连接于水箱的集热器类型即为太阳能热水器

(图3);由多支全玻璃真空管(传热工质为空气)按照一定规则排成阵列并连接于风箱的集热器类型即为太阳能空气集热器(图4)。玻璃-金属真空集热管通常又分有U型管式和热管式两种形式,如图5(a)、(b)所示,分别构成了U型管式真空管集热器和热管式真空管集热器^[20]。

出于构造的不同,平板型和真空管型太阳能集热器各有优缺点(表3)^[20,22],没有一种占有绝对的优势,用户应根据不同的适用条件来选择。据统计,2020年中国生产太阳能集热器类型中,真空管型占到74.3%,而平板型占25.7%^[23],真空管型太阳能集热器目前占据市场主导地位。

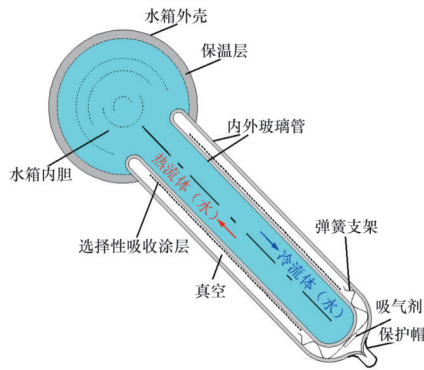


图3 全玻璃真空管太阳能热水器剖面图

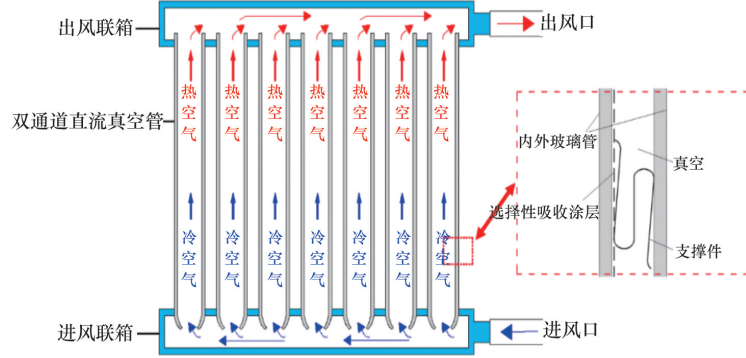
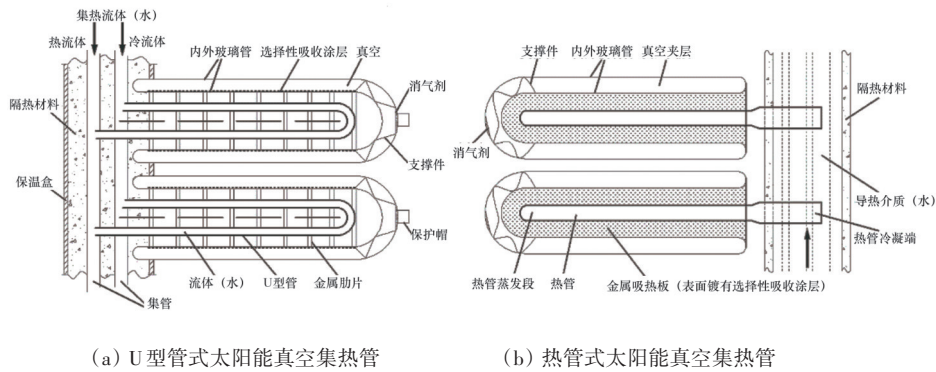


图4 全玻璃真空管太阳能空气集热器结构图



(a) U型管式太阳能真空集热管

(b) 热管式太阳能真空集热管

图5 玻璃-金属真空集热管结构

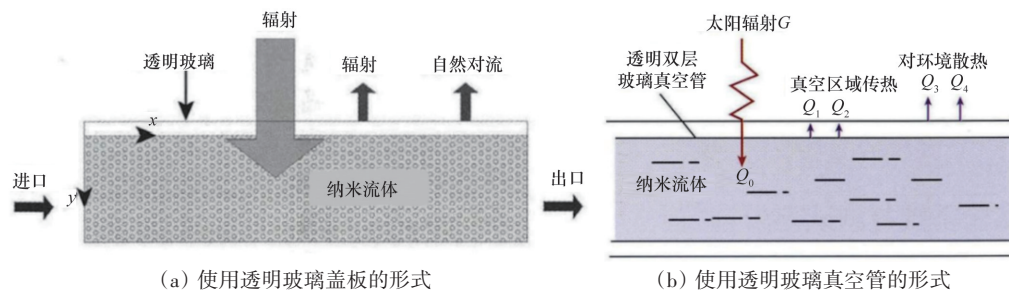
表3 平板型集热器和真空管型集热器的性能比较

集热器类型	热性能	承压性	与建筑结合性	热损失	耐用性	防结垢	抗冻性
平板型集热器	低温	好	较好	偏高	强度高,耐用	不易结垢	不抗冻
真空管型集热器	中、高温	不承压	较差	几乎为零	易破裂,易炸管	易结垢	抗冻

2.2 直吸式太阳能集热器

直吸式太阳能集热器是一种以纳米流体作为直接传热介质而无需使用吸收涂层的集热器类型,基本结构如图6所示^[24-25],其中的纳米流体既是太

阳光的吸收材料又是太阳能集热器的传热工质^[19]。1995年,美国 Argonne 国家实验室首次提出纳米流体的概念^[26],即以一定的方式和比例在液体中添加纳米级金属或金属氧化物微粒,产生一种新型的高



(a) 使用透明玻璃盖板的形式

(b) 使用透明玻璃真空管的形式

图6 直吸式太阳能集热器的基本结构、传热过程示意

效传热工质。当直吸式集热器被阳光照射时,纳米流体中的纳米颗粒会对光谱辐射进行直接吸收。由于纳米粒子的存在,光在流体内部发生散射现象,使光程增加,进而提高流体对光的吸收率^[27],原理如图7^[28]所示。相比于传统的集热工质,纳米流体的光热转换性能存在明显的优势,但在稳定性方面却处于劣势^[29]。

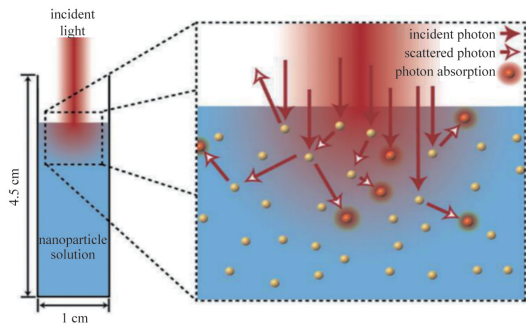


图7 纳米流体内光线的散射和吸收原理

3 太阳能集热器集热性能提升技术研究现状

为更好地发挥太阳能热利用的效果,太阳能集热器的相关研究工作始终围绕如何使集热器集热性能及集热效率尽可能地得到提升而展开,主要表现为几种能够有效提升太阳能集热器热性能的策略与途径:太阳能集热器自身的结构优化改造;新型吸收材料的研制及应用;在上述典型太阳能集热器的基础上结合相变蓄热、聚光(聚焦)技术,进而形成蓄热型、聚光型太阳能集热器等(图8)。本节将分别对这几种集热器性能优化的有效方法进行论述,并总结出近几年国内外研究人员在该技术领域下的相关研究成果及进展。

3.1 太阳能集热器的结构优化

对太阳能集热器的结构优化是达到集热器性能提升效果的常见方法之一,有利于提高集热器的

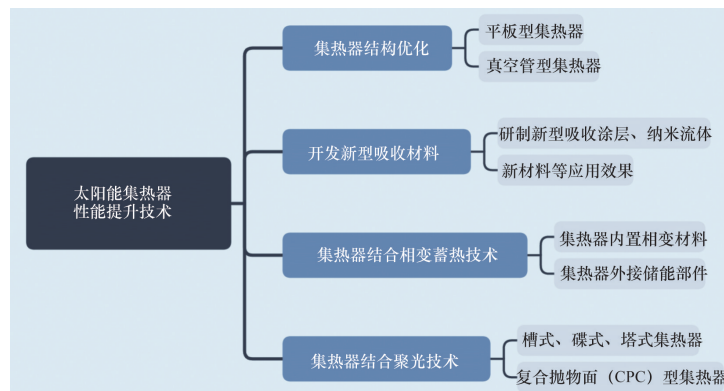


图8 太阳能集热器性能提升技术研究方向逻辑图

集热效率和热稳定性。目前对于太阳能集热器的结构优化多以间接式太阳能集热器为主,所表现为对平板型和真空管型两种太阳能集热器进行改造。而这两种集热器又因其类型构造的不同有着各自的改造方式和侧重部位。

平板型太阳能集热器一般以对吸热面板和玻璃盖板的优化改造为主。范满等^[30]提出了一种V型多通道平板太阳能集热器(图9),采取了模拟计算与实验测试对比的方法分析了集热器的热性能,并得出该型集热器在V型槽顶角角度、吸热体长度

等结构参数变大时,集热效率会呈现先升后降的趋势性结论。Kuczynski等^[31]探讨了平板型液体太阳能集热器的几何特征与热效率的关系,结果表明:改变集热器吸热板的厚度、工作管的数量和间距,将分别影响全范围和初始范围内热效率曲线相对于水平轴的倾斜程度。Jiang等^[32]将可移动盖板应用于V型波纹管平板太阳能集热器,对其建立动态传热模型并进行了对比实验,研究表明,具有高吸收率、低发射率的可移动盖板可有效减少该集热器的热损失,在正常的冬季集热条件下,可将总热损

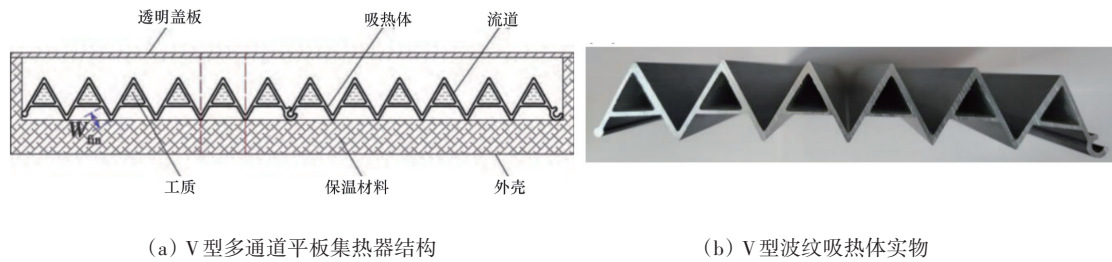


图9 V型多通道平板太阳能集热器结构示意图

失降低到62.8%。

在真空管型集热器方面,研究者重点针对U型管式集热器和热管式集热器展开一系列研究。王云峰等^[33]在传统直通真空管空气集热器基础上对联箱结构进行了改进,并搭建试验平台对该种改进型空气集热器的热性能进行测试,结果表明:在质量、流量不改变的条件下,改进后的空气集热器在集热效率与出口温度控制上均优于原有的直通型空气集热器。Cholipour等^[34]对含有3种不同类型(螺线型、折返型、U型)吸收管的太阳能集热器热性能进行测试,结果表明:螺线型和折返型吸收管的集热效率明显高于U型吸收管,且螺线型吸收管具有最佳的集热性能。Znaczo等^[35]针对热管式太阳能集热器在运行过程中的不正常现象开展了诊断性测试,研究发现,热管的功能在很大程度上取决于其几何结构和工作介质的数量,任何不规范的生产流程都会导致太阳能集热器的热效率下降。Aref等^[36]将一种新型的双直径闭环脉动热管引入平板型太阳能集热器并分析其传热特性,研究表明:相比于单直径配置,该双直径结构的热管式集热器性能存在明显优势,集热效率可达72.4%。

目前太阳能集热器结构优化的技术特点多体现为对集热器吸热体、内部工质流道及金属翼片等换热部位的形状架构进行改造,旨在提升集热器热效率,减少其热损失。有关数据表明,与常规式集热器相比,经优化后的新型集热器集热效率可提升约10%^[37],其单位时间、单位集热面积下的有用能量收益可增至70%以上^[30, 36]。此外,集热器在结构优化方面,也表现出其他技术动向,例如张振兴等^[38]提出的微流道中空腔式太阳能集热器,使得集

热装置与屋顶形成有机结合,成为屋顶构造的一部分;马进伟等^[39]提出的利用太阳能加热水/空气的双效集热装置,有效解决了空气、水单一集热模块季节性适用问题。综上所述,太阳能集热器的结构优化向着进一步提升集热器热性能,更易于实现集热器与建筑一体化以及更好地进行太阳能综合利用等技术方向发展。

3.2 新型吸收材料的开发及应用

目前,对于新型吸收材料开发与制备方面的研究正如火如荼地进行,其相关研究成果层出不穷,主要表现为新型太阳选择性吸收涂层以及新型纳米流体的成功研制。Valletti等^[40]采用阴极电弧物理气相沉积技术制备了 $\text{Cr}-(\text{CrN}/\text{TiAlN})_m-\text{AlSiN}-\text{AlSiO}$ 多吸收层光谱选择性吸收涂层,试验表明:该涂层表现出良好的光学性能(吸收率:0.95~0.96;发射率:0.09~0.11),热稳定性可达500℃。He等^[41]设计和优化了一种基于高熵氮化合金的光谱选择性吸收涂层,最终沉积得出的涂层吸收率达到0.965,发射率为0.086(82℃),热稳定性结果表明:在600℃下退火10 h后,该涂层仍保持高吸收率(0.925)和低发射率(0.070)。宗美林等^[42]通过两步法制备了水基碳纳米管纳米流体,并利用浓度控制对其光热转换特性进行了实验研究,结果显示:纳米流体光热转换效率随着碳纳米管质量分数的增加而降低,最高值为37.31%。Sattar等^[43]研究了氧化石墨烯(GO)、氧化锌(ZnO)、氧化铜(CuO)的水基纳米流体以及它们的混合物在自然条件下的光热性能,研究发现:0.0012%颗粒浓度的水基氧化石墨烯纳米流体的光热效率要比其他纳米流体高46.6%。

此外,新型吸热材料(换热工质)可有效提高对太阳辐射的吸收率,从而提升太阳能集热器的集热性能。Nazari 等^[44]对吸热板表面分别涂有 CuO 纳米结构、黑漆及普通涂层的 3 种平板式太阳能热水器进行了性能对比实验,结果表明:与采用黑漆和普通吸热板的热水器相比,涂有 CuO 纳米结构的热水器性能明显改善,其效率分别提高了 18.8% 和 35.8%。高甲东等^[45]利用一种基于粒子散射的太阳能高温集热涂层设计方法,设计出一种双层结构的金属陶瓷吸收涂层(图 10)^[18],并通过 2 层金属颗粒种类及大小的匹配,得到了期望的太阳能吸收率 (>95%)。Alawi 等^[46]研究分析了以悬浮在 4 种不同基液中的石墨烯(f-GNPs)等纳米粒子为纳米流体力工质时的平板太阳能集热器特性,结果表明:在所有测试条件下,使用 f-GNPs 纳米流体比使用基础流体增强了集热器的性能,基于 GNPs 的基液在传热应用中可以作为一种良好的、可替代性的常规工作流体。Lee 等^[47]研究了水和 MWCNT/Fe₃O₄ 二元纳米流体作为工作流体在平板和真空管太阳能集热器中的性能特点,结果表明:当以 MWCNT/Fe₃O₄ 二元纳米流体作为工作流体时,平板和真空管太阳能集热器的热效率相比于水有明显提高,且将 MWCNT/Fe₃O₄ 二元纳米流体应用于真空管太阳能集热器时的热效率提升要远远高于平板太阳能集热器。Saleh 等^[48]通过实验评估了多壁碳纳米管+Fe₃O₄ 混合纳米流体在太阳能平板集热器中流动时的传热、摩擦因数和集热器效率,研究证实:相比于水,使用该混合纳米流体作为传热工质可以明显提高集热器的传热和热效率。

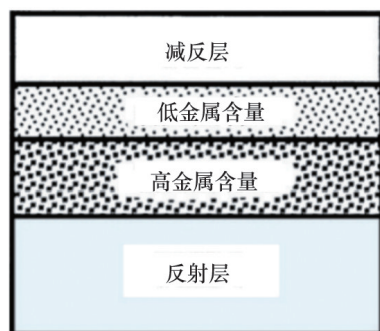


图 10 双层金属陶瓷吸收涂层结构示意图

目前太阳能吸收材料在其新材料开发、制备方法以及热物性探讨等方面皆取得一定进展,同时也存在着亟待解决的挑战性问题。其中太阳选择性吸收涂层结构由单一材料型向双层复合型、多层渐变型等涂层发展;制备方法由传统的涂料法、电镀法向气相沉积法、溶胶凝胶法等过渡,并广泛应用于中低温领域,但随着中高温光热转化技术的发展,当前所研制出的吸收涂层需要能在 500℃ 以上的高温下工作,这对涂层的耐热性提出了更高的要求,开发新型涂层、合理改性材料或使用减反层等方法可有效改进此问题^[49]。

纳米流体则是以磁性纳米流体及复合纳米流体为主要研究动向,通过外加磁场或修饰纳米复合材料等方式增强工质传热。目前该部分研究仍面临流体热导率模型准确性不高、分散稳定性较弱等技术问题。因此,建立起各物性参数间的对应关系,维持好工质长期稳定运行将成为该领域未来的发展方向^[50]。

3.3 太阳能集热器结合相变蓄热技术

太阳能热利用一直以来都受到太阳光照的间接性和季节性等影响因素的制约,为了可以高效持续地完成太阳能采暖、烘干等工作,就必须在太阳能充足时把盈余热量储存起来,并在太阳能不充足时放出热量来弥补能量的缺失,显然相变蓄热技术能够很好地解决这一关键性问题。相变蓄热技术的核心是相变蓄热材料(phase change material, PCM),其工作原理是依靠物质本身的相变过程,吸收或放出大量相变潜热,进而起到存储和释放能量的效果。将太阳能集热器与相变蓄热材料相结合并研究其传热特性成为近年来的研究趋势。

太阳能集热器在充装相变材料后增强了集热器的蓄热能力,延长了工作时间。Dutkowski 等^[51]研究了微胶囊相变材料对平板液体太阳能集热器热参数的影响,研究表明:微胶囊相变材料在工作液体中的比例越大,液体离开太阳能集热器时的温度就越低。Ramirez 等^[52]对比分析了有、无相变材料的间接太阳能干燥器的热性能,经确定,相变材料的使用提高了干燥器的夜间热性能,并延长了系统的操作时间。同时,相变型集热器具有良好的换

热状态及储能效果。薛花^[53]提出一种全新的相变储能型太阳能真空集热管(图 11^[53]),并综合了数值模拟与实验研究对集热管内的相变传热过程的分析结果,即在石蜡的相变蓄热时间段内,顶层石蜡与底层石蜡之间的最大温差达 90 K,而石蜡充分溶化后,温升加快,自然对流促进了石蜡的换热过

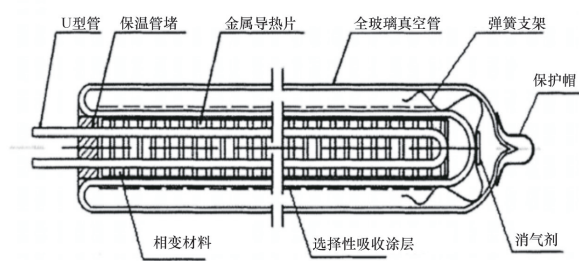


图 11 相变储能型 U 型管式太阳能真空集热管轴向截面

此外,太阳能集热器又通常与相变蓄热水箱、相变维护结构等储能部件外接,构成了蓄热式太阳能供暖系统中的核心部分,具有很高的节能价值。徐侃等^[56]提出 1 种太阳能集热器-内嵌管式相变顶板系统,并利用 TRANSYS 软件模拟分析了该系统在武汉地区供暖季的传热特性及节能效果,结果表明:太阳能集热器-内嵌管式相变顶板房间的供暖能耗相比普通房间供暖能耗降低了 58.4%。冯国会等^[57]设计了 1 种模块化电磁能耦合相变蓄能水箱辅助太阳能供暖系统,采用模拟手段建立其仿真模型,并探究最佳运行性能,结果显示,系统在最优值条件下能效相比设计值提升约 27.7%。刘晓燕等^[58]对严寒地区农村某单体建筑太阳能-相变墙系统进行了蓄热特性研究,经研究发现,该系统具有良好的热稳定性,平均节能率达 31.8%。

太阳能集热器与相变蓄热技术的联用方式多样,联结效果显著。有关数据显示,与常规太阳能集热器相比,蓄热型集热器的平均集热效率可提高约 35.4%,供热时间可延长约 3 h^[59]。此外,相变蓄热技术自身发展与相变材料的研制及应用息息相关,例如邱庆龄^[60]制备了纳米 TiO₂改性复合相变微胶囊以提高其导热系数及热稳定性,Ma 等^[61]提出

程。夏曼等^[54]提出了一种蓄能型内插热管式太阳能集热器(图 12^[55]),模拟计算结果表明,浮升力对相变材料的熔化过程影响较大,液化时间缩短了 24%,且真空管内顶部升温明显快于底部,而对凝固过程影响可忽略不计。

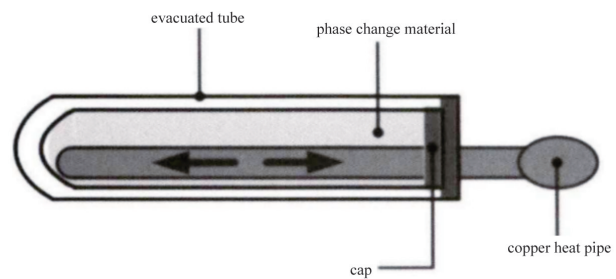


图 12 填充 PCM 的热管式太阳能真空集热管结构示意图

将相变浆体应用于直吸式太阳能集热器以提高其光热转换效率。由此可见,改进和提升相变式集热器的联用方法及性能,开发新型可用的相变材料将成为该技术领域的发展方向。

3.4 太阳能集热器结合聚光技术

太阳能在低温领域(60~80℃)已得到广泛应用,例如较常见的太阳能热水器等,一般通过常规太阳能集热器即可实现。而在太阳能光热发电等高温应用领域(250~600℃),通常是利用聚光(聚焦)技术与太阳能集热器相结合,形成聚光型太阳能集热器进而达到较高的集热温度。而聚光型太阳能集热器的基本原理是利用太阳能聚光器将太阳辐射聚焦到吸热体上,有效提高了聚光比和聚光面积。表 4^[62]是按光线的走向不同列出的太阳能聚光器及其对应的集热器类型。

基于不同类型聚光器的聚光型太阳能集热器各具优缺点,相比菲涅尔式太阳能集热器(图 13(d)^[63]),槽式、碟式和塔式太阳能集热器(图 13(a)、(b)、(c))因允许使用跟踪装置使组件成本大幅降低,在近几年的发展较为迅速。Bellos 等^[64]系统地研究了抛物线槽式太阳能集热器热效率的不同表达式,通过建立数学模型对集热器在不同工作温度

表4 不同类型的太阳能聚光器性质及对应的聚光型集热器

主要类型	常用设备	跟踪性	成像性	对应的常见聚光型集热器
反射式太阳能聚光器	抛物型反射镜 (抛物反射镜式聚光器)	单轴跟踪或 免跟踪	非成像	槽式太阳能集热器、碟式太阳能集热器、塔式太阳能集热器、复合抛物面(CPC)型太阳能集热器
折射式太阳能聚光器	菲涅尔透镜	非跟踪	非成像	菲涅尔式太阳能集热器

及太阳照度条件下进行检验,最终得到可用于描述槽式太阳能集热器热效率的最佳拟合方程。Zaboli等^[65]对一种带有内螺旋轴向翅片的抛物面槽式太阳能集热器进行了数值分析,结果表明:使用该新型抛物面槽太阳能集热器,相比于简单集热器,可以改善23.1%热性能。Malali^[66]提出一种碟式/斯特林系统集热器,以性能图表的形式呈现不同的环日比、镜面光学误差、边缘角、无量纲辐射通量和无量

纲对流损失参数对该系统集热器最大集热效率的影响。Yan^[67]提出了一种优化的碟式太阳能集热器(OPSDC)系统,采用光线跟踪法对该系统建立光学模型并开发相应的光线跟踪程序,研究表明:相比于传统碟式太阳能集热器(COSDC)系统,优化后的碟式太阳能集热器(OPSDC)系统具有更优良的光学性能,为两种系统在制造、安装和运行中的误差控制提供参考。

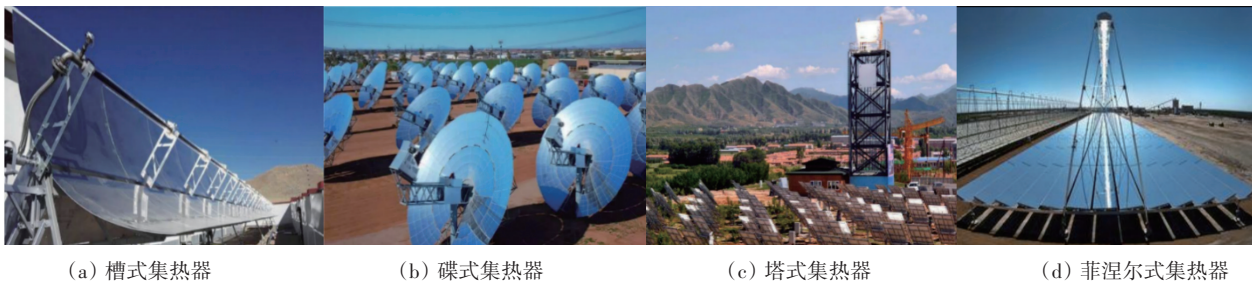


图13 几种常见的聚光型集热器实物

复合抛物面(CPC)型太阳能集热器(图14)^[68]是利用边缘光线原理设计成的一种非成像、低聚焦度的聚光型集热器,该类型集热器是由Winston^[69]最早在1974年提出。它可将入射光线多次反射后聚集到接收器上,对太阳光线的有效吸收几乎可以达到理论值。相比于其他几种常见的聚光型集热器,CPC型集热器因其价格低廉、结构简单以及便于安装的特点,受到广泛的青睐,正因如此,CPC型集热器的研究在近几十年里一直是各国的研究热点。徐海洋等^[70]利用Matlab模拟分析了安装角度对CPC集热器接受太阳辐射的影响,结果表明:CPC集热器的聚光比与入射半角呈正相关,而入射半角的大小会间接性地影响能量的接收。Riaz等^[71]采用基于模型的瞬态模拟方法,分别对具有固定聚光比和可变聚光比的CPC集热器进行了光学

及热学分析,结果显示:相比于固定聚光比,可变聚光比的CPC集热器光学效率提高了7%,峰值温度提升约15℃。王雪勃等^[72]提出了一种以平行流微通道为吸热器的CPC集热器,开发设计了微通道管内温度测试模块,并通过搭建实验系统对CPC微通道太阳能集热单元动态特性进行测试,实验结果表明微通道吸热器的11个进、出口截面温度温差较小(<2℃),即验证了微流道平行流扁管对非均匀热流密度的均化性较好。Xu等^[73]使用蒙特卡罗射线跟踪法模拟太阳能辐射射线的传播过程,分析了CPC变形对浓度特性的影响,包括反射面的旋转和平移、渐开线起点的截断和吸热器的位置偏移,为加工CPC反射面提供了指导意义。

相关研究表明,太阳能集热器与聚光技术的结合可显著提升集热器的性能,例如抛物面槽式太阳

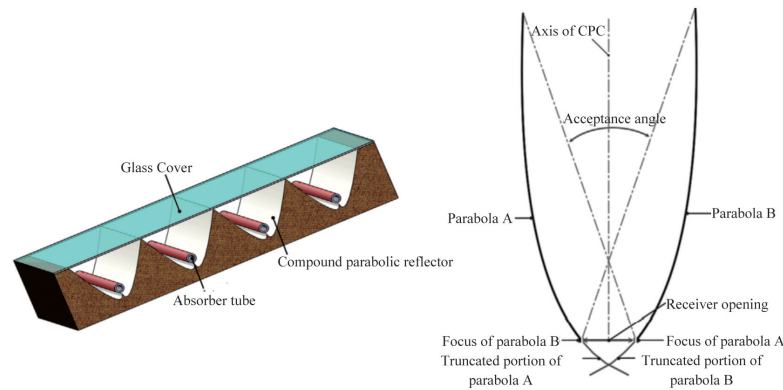


图14 CPC型聚光器原理

能集热器在控制光线追踪误差及镜面形状误差条件下,光学效率可维持在较高水平($>82.6\%$)^[74],其集热管出口温度可达 400°C 以上^[75];CPC集热器在对集热器和聚光器进行优化改造后,具有良好的聚光效果(直射几何光学效率恒 $>84\%$,散射几何光学效率约为 87%),其平均集热效率可达 81% ^[76]。在后续的研究中,聚光型集热器除了对聚光器结构、光线追踪精度方面进行优化,还可围绕聚光方法(例如二次反射^[77]、多级聚光^[78]等)以及聚光器、接收器的材料等方面进行研究^[79]。

4 结论

总结了太阳能集热器的类型结构和工作原理,归纳了国内外在提升太阳能集热器集热性能及运行效果方面开展的技术工作与研究成果,包括太阳能集热器结构优化、新型集热器吸收材料应用,将相变储能技术和太阳能聚光技术与太阳能集热器结合等技术方法。现阶段,太阳能集热器的相关研究工作已取得一定进展,集热器的集热性能、集热效率都得到有效的提升与改善,然而在太阳能集热器的各技术研究上仍存在一些不足。

1) 对于集热器的结构优化而言,平板型太阳能集热器的透明盖板和外壳容易散热,仅在低温区域有较好的效率特性;真空管型集热器表面长时间使用易结垢,并且选择性吸收涂层长期暴露于室外空间,难免出现积尘、腐蚀等现象,影响太阳光的透射率,进而降低真空管集热器整体集热效率^[80-81];此

外,现有的集热器多表现为单一黑色,难以与现代建筑物在外观上实现一体化。因此,合理利用结构优化技术,提升平板集热器保温性能,开发颜色可调且具有清洁功能的太阳能集热器显得十分必要。

2) 集热器吸收材料方面的评价体系并不完善,其中,选择性吸收涂层主要有光学性能和耐热性能两种性能指标,纳米流体则侧重在光热吸收效率方面的性能评价,在实际应用过程中,仅满足上述性能指标无法达到集热器的实际运行工况要求^[19];此外,纳米流体相比于常规换热工质成本较高,且纳米粒子在高温下容易发生沉降团聚的现象,使其适用范围大大受限。因此,新型吸收材料的开发需要进一步考察纳米流体的经济性、稳定性^[29],以及选择性吸收涂层的入射光角度不敏感性、循环稳定性、耐湿热性、耐老化性、耐酸碱性和耐盐雾性等性能^[19]。

3) 在太阳能集热器结合相变蓄热技术过程中,相变材料发挥了关键的蓄、放热作用,起到了良好的节能效果,但相变材料的导热系数整体偏低。因此,为了相变蓄热式集热器在实际应用中起到更好的蓄放热效果,相变材料方面的研究不妨以高导热性材料作为基质的复合新材料研制为主,如硅基载体复合相变蓄热材料、有机-无机复合相变材料、纳米有机复合材料等,对于研究改进相变蓄热材料的微胶囊化,还需重点考虑其机械强度、密闭性等性能指标^[82]。

4) 对于聚光型太阳能集热器而言,当前研究多集中于对聚光器的结构、跟踪器的跟踪精准度等

方面的优化,其研究思路仍有待开拓创新;此外,在研究过程中,一些模型会过度重视热性能的改善,忽略了集热器在聚光作用下几何光学性能的重要性。因此,该部分研究除了上述的侧重点外,还可在聚光方法及聚光器、接收器的材料上给予创新^[79],例如将两种或多种类型的聚光器结合成多级聚光器,通过对入射光线的二次或多次反射,实现对太阳光线的高效吸收。

5) 目前太阳能集热器多以单一技术研究为主,吸收不同技术的优势,根据应用场景开发可以兼容相变储能技术、聚光技术、自动跟踪技术等多种技术的太阳能集热器,将会更好地促进太阳能的热利用效率;此外,太阳能供热、制冷及供生活热水技术是有效利用太阳能的途径,开发太阳能供热、制冷和供热水联合的一能多用型太阳能利用技术及其太阳能集热器,同时满足夏季制冷、冬季供暖和四季供热水的需求,具有良好的应用前景和发展潜力。

参考文献(References)

- [1] 杨博文. 能源转型中未来主力能源发展方向探析[J]. 能源与节能, 2020(6): 49-50, 91.
- [2] 蔡世杰. 太阳能利用技术研究现状及发展前景[J]. 中国高新科技, 2018(21): 50-52.
- [3] 闫云飞, 张智恩, 张力, 等. 太阳能利用技术及其应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(Suppl 1): 47-56.
- [4] 覃彪, 刘杨, 马程枫. 太阳能利用技术发展现状及前景分析[J]. 化工管理, 2017(8): 178-180.
- [5] 陈晓明, 罗清海, 张锦, 等. 太阳能热水器与居住建筑热水节能[J]. 煤气与热力, 2010, 30(2): 17-21.
- [6] Almasri R A, Abu-Hamdeh N H, Esmail K K, et al. Thermal solar sorption cooling systems—A review of principle, technology, and applications[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(1): 367-402.
- [7] 邹雪梅, 曲云霞, 贾北平, 等. 太阳能供暖现状及分析[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(3): 134-135.
- [8] 唐泽. 太阳能干燥技术及其应用探究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [9] Liu M, Wang S, Li K. Study of the solar energy drying device and its application in traditional Chinese medicine in drying[J]. International Journal of Clinical Medicine, 2015, 6(4): 271.
- [10] Shoeibi S, Kargarsharifabad H, Rahbar N, et al. An integrated solar desalination with evacuated tube heat pipe solar collector and new wind ventilator external condenser[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 50: 101857.
- [11] 孙峰, 毕文剑, 周楷, 等. 太阳能热利用技术分析 with 前景展望[J]. 太阳能, 2021(7): 23-36.
- [12] Kumar L, Hasanuzzaman M, Rahim N A. Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 885-908.
- [13] 张欣军. 太阳能与地暖的联动供暖技术[J]. 中国电子商务, 2013, 10(19): 90.
- [14] Bauer D, Marx R, Nußbicker-Lux J, et al. German central solar heating plants with seasonal heat storage[J]. Solar Energy, 2010, 84(4): 612-623.
- [15] 国内外太阳能热水系统应用比较[J]. 给水排水, 2008 (1): 67-72.
- [16] 许威. 摩洛哥首个太阳能海水淡化项目启动[J]. 水处理技术, 2016, 42(2): 112.
- [17] Granqvist C G. Solar energy materials[J]. Advanced Materials, 2003, 15(21): 1789-1803.
- [18] 熊德华, 陈炜, 李宏. 太阳能光热转化选择性吸收涂层研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(9): 50-58.
- [19] 曹宁宁, 卢松涛, 姚锐, 等. 太阳光谱选择性吸收涂层[J]. 化学进展, 2019, 31(4): 597-612.
- [20] 袁静珍. 太阳能集热器的分类及特点分析[J]. 硅谷, 2013, 6(7): 178-179.
- [21] 姚亮, 马俊贵, 吕全贵, 等. 太阳能集热器集热的研究现状及展望[J]. 农业工程, 2014, 4(5): 39-43.
- [22] 朱冬生, 徐婷, 蒋翔, 等. 太阳能集热器研究进展[J]. 电源技术, 2012, 36(10): 1582-1584.
- [23] 太阳界智库. 2020中国太阳能热利用行业运行状况报告[R]. 邢台: 中国农村能源行业协会太阳能热利用专委会, 中国节能协会太阳能专委会, 2020.
- [24] 马非, 张鹏. 基于相变浆体的直接吸收式太阳能集热器研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(8): 1852-1856.
- [25] 徐国英, 陈伟, 张小松, 等. 纳米流体直接吸收式太阳能中温集热与热损分析[J]. 工程热物理学报, 2015, 36 (5): 960-964.
- [26] Choi S U S, Singer D A, Wang H P. Developments and applications of non-Newtonian flows[J]. Journal of Fluid Machinery, 1995, 66: 99-105.

- [27] Kelly K L, Coronado E, Zhao L L, et al. The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2003, 107(3): 668–677.
- [28] Hogan N J, Urban A S, Ayala-Orozco C, et al. Nanoparticles heat through light localization[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(8): 4640–4645.
- [29] 李小东, 王成, 康前, 等. 纳米流体在直接吸收式太阳能集热器上的应用研究[J]. *工业加热*, 2018, 47(3): 5–7.
- [30] 范满, 由世俊, 张欢, 等. V型多通道平板太阳能集热器的热性能研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 478–483.
- [31] Kuczynski W, Kaminski K, Znaczo P, et al. On the correlation between the geometrical features and thermal efficiency of flat-plate solar collectors[J]. *Energies*, 2021, 14(2): 261.
- [32] Jiang Y, Zhang H, You S, et al. Dynamic performance modeling and operation strategies for a v-corrugated flat-plate solar collector with movable cover plate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 197: 117374.
- [33] 王云峰, 常伟, 李明, 等. 直通式真空管空气集热器热性能实验及干燥应用[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(1): 21–28.
- [34] Gholipour S, Afrand M, Kalbasi R. Introducing two scenarios to enhance the vacuum U-tube solar collector efficiency by considering economic criterion[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 124: 228–237.
- [35] Znaczo P, Szczepanski E, Kaminski K, et al. Experimental diagnosis of the heat pipe solar collector malfunction: A case study[J]. *Energies*, 2021, 14(11): 3050.
- [36] Aref L, Fallahzadeh R, Shabani S R, et al. A novel dual-diameter closed-loop pulsating heat pipe for a flat plate solar collector[J]. *Energy*, 2021, 230: 120751.
- [37] Fan M, You S, Gao X, et al. A comparative study on the performance of liquid flat-plate solar collector with a new V-corrugated absorber[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 184: 235–248.
- [38] 张振兴, 孙金栋, 刘彦佐, 等. 微流道中空腔式太阳能集热器的集热性能研究[J]. *建筑科学*, 2022, 38(4): 152–157.
- [39] 马进伟, 李葱, 方浩, 等. 太阳能集热器空气/水双循环换热特性模拟研究[J]. *安徽建筑大学学报*, 2022, 30(1): 40–45.
- [40] Valletti K, Rao S G, Miryalkar P, et al. Cr-(CrN/TiAlN)-AlSiN-AlSiO open-air stable solar selective coating for concentrated solar thermal power applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 215: 110634.
- [41] He C Y, Qiu X L, Yu D M, et al. Greatly enhanced solar absorption via high entropy ceramic AlCrTaTiZrN based solar selective absorber coatings[J]. *Journal of Materials*, 2021, 7(3): 460–469.
- [42] 宗美林, 叶晓江, 常怀钟, 等. 水基碳纳米管纳米流体在室外自然条件下的光热性能研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(5): 48–53.
- [43] Sattar A, Farooq M, Amjad M, et al. Performance evaluation of a direct absorption collector for solar thermal energy conversion[J]. *Energies*, 2020, 13(18): 4956.
- [44] Nazari M, Jafarmadar S, Khalilarya S. Exergy and thermoeconomic analyses of serpentine tube flat-plate solar water heaters coated with CuO nanostructures[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 35: 102072.
- [45] 高甲东, 赵长颖, 叶强. 基于粒子散射的太阳光谱选择性吸收涂层[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(4): 921–927.
- [46] Alawi O A, Kamar H M, Mallah A R, et al. Graphene nanoplatelets suspended in different basefluids based solar collector: An experimental and analytical study[J]. *Processes*, 2021, 9(2): 302.
- [47] Lee M, Shin Y, Cho H. Performance evaluation of flat plate and vacuum tube solar collectors by applying a MWCNT/Fe₃O₄ binary nanofluid[J]. *Energies*, 2020, 13(7): 1715.
- [48] Saleh B, Sundar L S. Thermal efficiency, heat transfer, and friction factor analyses of MWCNT+Fe₃O₄/water hybrid nanofluids in a solar flat plate collector under thermosiphon condition[J]. *Processes*, 2021, 9(1): 180.
- [49] 陈宇飞, 兰亚鹏, 古龙, 等. 太阳能选择性吸收涂层的研究进展与应用前景[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(4): 8–14.
- [50] 王亚辉, 罗延旭, 刘耀, 等. 纳米流体研究进展[J]. *能源工程*, 2022, 42(2): 7–16.
- [51] Dutkowski K, Kruzel M, Bohdal T. Experimental studies of the influence of microencapsulated phase change material on thermal parameters of a flat liquid solar collector[J]. *Energies*, 2021, 14(16): 5135.
- [52] Ramirez C, Palacio M, Carmona M. Reduced model and comparative analysis of the thermal performance of indirect solar dryer with and without PCM[J]. *Energies*, 2020, 13(20): 5508.
- [53] 薛花. 相变储能型太阳能真空集热管内相变传热研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.

- [54] 夏曼, 王晓宇, 吴薇, 等. 内插热管式太阳能集热器内相变材料的蓄热/释热特性研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2020, 20(3): 1-8.
- [55] Papadimitratos A, Sobhansarbandi S, Pozdin V, et al. Evacuated tube solar collectors integrated with phase change materials[J]. Solar Energy, 2016, 129: 10-19.
- [56] 徐侃, 徐新华, 严天. 太阳能集热器-内嵌管式相变顶板房间能效模拟分析[J]. 建筑科学, 2022, 38(2): 187-194.
- [57] 冯国会, 王刚, 李奇岩. 模块化电磁能耦合相变蓄能水箱辅助太阳能供暖系统分析[J]. 暖通空调, 2021, 51(Suppl 1): 6-10.
- [58] 刘晓燕, 孙睿忆, 赵海谦, 等. 严寒地区单体建筑太阳能-相变墙系统蓄热特性研究[J]. 热科学与技术, 2020, 19(5): 436-443.
- [59] 刘迟, 李保国, 罗权权, 等. 蓄能型空气式太阳能集热器的实验研究与分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(5): 64-68, 73.
- [60] 邱庆龄. 纳米 TiO₂ 改性复合相变微胶囊的制备及热性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(10): 10216-10220.
- [61] Ma F, Zhang P. Performance investigation of the direct absorption solar collector based on phase change slurry[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114244.
- [62] 吕园园. 新型太阳能集热器性能分析与研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [63] 张晓晖. CPC脉动热管太阳能集热器设计与运行特性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [64] Bellos E, Tzivanidis C. Polynomial expressions for the thermal efficiency of the parabolic trough solar collector[J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 6901.
- [65] Zaboli M, Ajarostaghi S S M, Saedodin S, et al. Thermal performance enhancement using absorber tube with inner helical axial fins in a parabolic trough solar collector[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7423.
- [66] Malali P D, Chaturvedi S K, Agarwala R. Effects of circumsolar radiation on the optimal performance of a Stirling heat engine coupled with a parabolic dish solar collector[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113961.
- [67] Yan J, Peng Y D, Wang H. Assessing the impact of non-ideal optical factors on optimized solar dish collector system with mirror rearrangement[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(11): 8799-8822.
- [68] Suman S, Khan M K, Pathak M. Performance enhancement of solar collectors—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 192-210.
- [69] Winston R. Principles of solar concentrators of a novel design[J]. Solar Energy, 1974, 16(2): 89-95.
- [70] 徐海洋, 季旭, 王六玲, 等. 安装角度对复合抛物面聚光集热器接收太阳辐射影响的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 170-176.
- [71] Riaz H, Ali M, Akhtar J, et al. Comparative optical and thermal analysis of compound parabolic solar collector with fixed and variable concentration ratio[J]. Engineering Proceedings, 2022, 12(1): 85.
- [72] 王雪勃, 徐荣吉, 王岸, 等. CPC微通道太阳能集热器运行特性实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(9): 66-70.
- [73] Xu R, Ma Y, Yan M, et al. Effects of deformation of cylindrical compound parabolic concentrator (CPC) on concentration characteristics[J]. Solar Energy, 2018, 176: 73-86.
- [74] 邹斌. 抛物面槽式太阳能集热器聚光传热机理及热性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [75] 郭彪. 抛物面槽式太阳能集热器热性能分析与预测技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [76] 林仲祺. 聚光型太阳能空气集热器的性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [77] Subramaniyan C, Subramani J, Kalidasan B, et al. Investigation on the optical design and performance of a single-axis-tracking solar parabolic trough collector with a secondary reflector[J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9918.
- [78] 罗玉浩, 吴国栋, 唐奕凡, 等. 内冷蒸发腔式太阳能集热器的设计与实验分析[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 715-726.
- [79] 林仲祺, 谢嘉豪, 龙碧莹, 等. 聚光型太阳能空气集热器的发展及展望[J]. 绿色科技, 2020(10): 217-218, 223.
- [80] Maraj A, Londo A, Firat C, et al. Comparison of the energy performance between flat-plate and heat pipe evacuated tube collectors for solar water heating systems under mediterranean climate conditions[J]. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2019, 7(1): 87-100.
- [81] 满学鹏, 顾炜莉, 易小芳, 等. 热管真空管太阳能集热器研究进展及应用[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(4): 318-325.
- [82] 朱传辉, 李保国. 相变蓄热材料应用于太阳能采暖的研究现状[J]. 中国材料进展, 2017, 36(3): 236-240.

Research status of solar collector types and their thermal performance enhancement technologies

LI Guozhu^{1,2}, WANG Shuai¹, HUANG Kailiang¹, LI Huixing¹, FENG Guohui¹, WANG Qingqin², SUN Zixuan¹, CUI Meihua¹

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China

Abstract Solar collectors are the core of solar heat utilization technologies, and the thermal performance and heat collecting efficiency determines the development and popularization of solar utilization technologies. In this paper, the typical methods and application areas of solar thermal utilization are summarized, the heat collecting principles and type structures of solar collectors are described and analyzed. To improve the thermal performance of solar collectors, the latest research progress and technology trends of some specific aspect are systematically summarized, including solar collector structure optimization, new collector absorption materials, phase change energy storage technology integrated into solar collector, and solar thermal concentrating technology. Furthermore, the shortages of the current research are also pointed out and the prospects for the future research are provided.

Keywords renewable energy; solar thermal utilization; solar collector; phase change energy storage; selective absorption coating ●



(责任编辑 卫夏雯)