



2014年12月29日

西安交通大学 能源与动力工程学院

太阳能光电技术课程书面报告

——槽式太阳能热发电系统研究现状

姓名：梁奇
班级：硕 4016
学号：3114016024
任课老师：刘立军教授

槽式太阳能热发电系统研究现状

1 研究背景

能源是人类赖以生存和发展的关键物质基础之一，也是影响当今国际政治经济格局、决定国家能否顺利快速发展的关键因素^[1]。经过以蒸汽机为标志的第一次工业革命和以电气化、信息化为标志的第二次工业革命，社会经济不断发展，世界人口飞速膨胀，资源消耗日益加剧。一方面，曾经推动并支撑了世界工业化大发展的传统化石燃料正面临枯竭；另一方面，化石燃料的大量使用造成了严重的环境问题，例如温室效应、酸雨、赤潮以及严重的雾霾天气等^[2]。能源的短缺和环境燃料燃烧引起的环境问题已成为限制全球经济和人类社会发展的重大瓶颈，直接影响人类未来的生存与发展。

中国作为世界上最大的发展中国家，是人口大国，更是能源消费大国。中国统计年鉴最新数据显示^[3]，我国 2011 年一次能源消费总量达 34.8 亿吨标准煤，占世界总量的 20%，位居世界第二位。我国国土面积辽阔，有着丰富的能源资源蕴藏。建国以来多次能源资源勘查结果表明，我国能源资源总量较为丰富，但人均较低，具有“富煤、贫油、少气”的能源资源结构特点；且蕴藏分布广泛、地域不均衡，开发难度大。

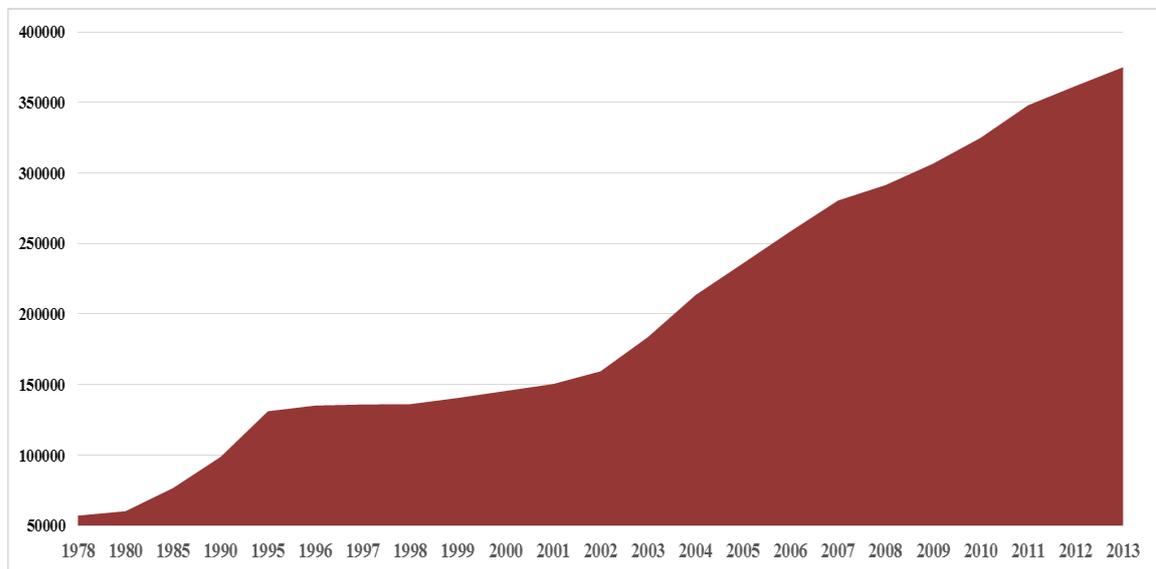


图 1 1978-2013 年我国能源消费情况（万吨标准煤）^[3]

我国“富煤、贫油、少气”的能源资源特点直接决定了我国目前“以煤为主、石油为辅”的相对单一的能源消费结构。日益枯竭的化石能源迫使中国加大对外能源的依存度，2009 年我国首次由煤炭出口国转变为煤炭净进口国，2012 年我国石油对外依存度为 57%，天然气对外依存度为 28.9%。同时，目前我国人均能源

消费水平依然较低，年均消费能源仅达世界人均平均水平，随着我国经济的高速发展，能源消费总量必将随之增加。由此可见，能源问题已成为制约我国经济社会稳定发展的瓶颈问题。

解决能源危机的根本途径在于开发新兴能源。太阳能作为可再生能源中的一种，因其存在广泛、资源丰富、较易获取利用，所以受到了各国政府以及研究机构的关注。我国具有十分丰富的太阳能资源，全国大部分地区的年太阳辐射能量总量超过 $5 \times 10^6 \text{ kJ m}^{-2}$ ，年日照总时长大于2000小时，所有陆地表面接收的年均太阳辐射能量总量相当于1700亿吨标准煤燃烧所释放的总能量^[4]，各地的资源等级详见表1。面对着严峻的能源形势，我国政府高度重视太阳能的发展，相继出台了一系列的政策法规：国务院2006年颁布实施的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》和2013年颁布的《能源发展“十二五”规划》都将太阳能列入未来的发展规划，并指出当前需要将太阳能技术作为一项重点研究任务。太阳能技术作为一种重要的可再生能源形式，未来将得到国家的大力发展。

表 1 中国太阳能资源等级分类^[5]

资源等级	年日照时数 /小时	年总辐射量 /MJ·m ⁻²	地区
1	3200-3300	6680-8400	宁夏北部、甘肃北部、新疆南部、青海西部、西藏西部
2	3000-3200	5852-6680	西藏东南部、新疆南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、河北西北部、内蒙古南部、山西北部
3	2200-3000	5016-5852	吉林、辽宁、河北东南部、山西南部、山东、河南、甘肃东南部、陕西北部、新疆南部、江苏北部、安徽北部、广东南部、福建南部、云南、台湾西南部
4	1400-2200	4190-5016	黑龙江、江苏南部、安徽南部、湖南、湖北、陕西南部、浙江、福建北部、广东北部、广西、江西、台湾东北部
5	1000-1400	3344-4190	四川、贵州

2 太阳能光电技术

太阳能的利用形式主要可以分为光热、光电、光化学和采光照明显等^[6, 7]，具体如图 2 所示。目前太阳能光电利用是太阳能规模化、低成本应用的主要形式，根据发电原理主要可分为光伏发电和热电技术。

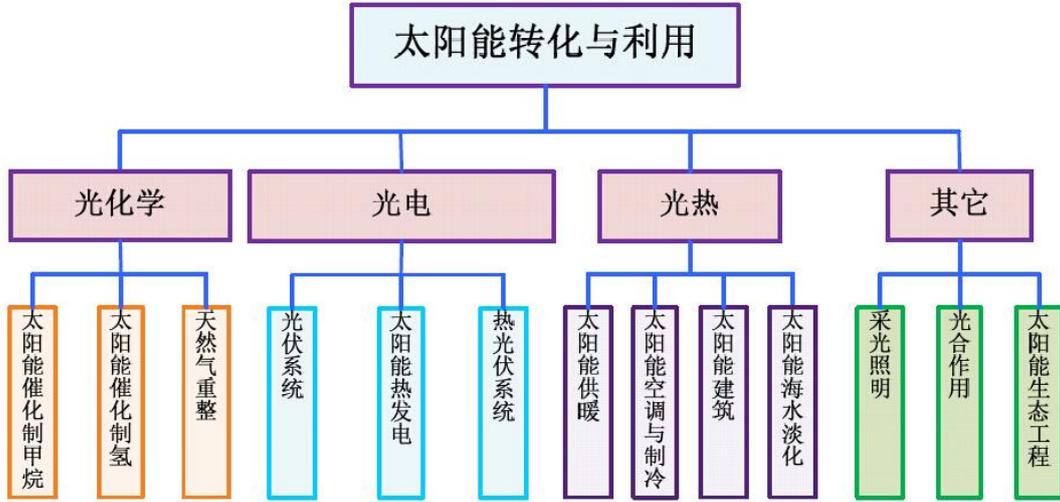


图2 太阳能主要利用方式

太阳能光伏发电技术起源于 1839 年法国物理学家 Becqueral AE 发现的光生伏打效应^[5]。1954 年美国贝尔实验室研制成功世界上第一片光伏转换效率达到 6% 的实用单晶硅太阳能电池，由此开创了人类利用太阳能光伏发电技术的历史^[8]。1986 年，美国建成当时世界最大的 6.5MW 太阳能光伏电站，20 世纪 90 年代，德国和美国相继提出“2000 光伏屋顶计划”和“百万太阳能屋顶计划”，后续西班牙、日本、澳大利亚等国都陆续建成示范性太阳能光伏电站。但是由于太阳辐射能自身热流密度低、时空不连续性的特点，造成了太阳光伏发电系统效率低、成本高和发电周期不稳定的技术瓶颈，限制和阻碍了太阳能光伏发电技术的大规模应用^[9]。

太阳能热电技术包括槽式、碟式、塔式及线聚焦菲涅尔式 4 种聚光类太阳能发电技术，以及太阳池和太阳烟囱两种聚热类太阳能发电技术^[6]。其中聚光类太阳能热发电技术不仅可以通过规模化应用达到更大的发电功率和更低的发电成本，还可以使用蓄热装置或化石能源辅燃装置实现电站的昼夜持续运行和供电，因而被认为是太阳能大规模、低成本开发利用的最有效途径之一^[10]。当前发展较为成熟的聚光类太阳能热发电系统主要有槽式、碟式和塔式 3 种形式^[11]，如图 3 所示。槽式电站（参见图 3a）采用槽式抛物反射镜面将太阳光聚焦到位于焦线的真空集热管上，加热管内的换热工质至一定温度，然后经热交换器产生蒸汽驱动汽轮发电机组发电^[12]。碟式电站（参见图 3b）是利用旋转抛物面反射镜将入射阳光聚集到放置在焦点处的吸热器，加热吸热器腔内盘管中的换热工质，然后经热交换器产生蒸汽驱动发电机组发电，或在焦点处直接放置太阳能斯特林发电装置，利用与环境温度形成的温差推动斯特林发电机来发电^[13]。塔式系统（参见图 3c）

是利用由众多独立跟踪太阳的定日镜组成的定日镜场将太阳光聚集到一个固定在集热塔顶部的吸热器上,用以产生高温加热工质产生过热蒸汽或高温气体驱动发电机组发电^[12]。自20世纪70年代以来,国内外对太阳能热发电技术进行了深入的探索和研究,技术日趋成熟,目前已建立和在建多座示范性电站,其中部分已成功实现商业化并网发电^[14]。

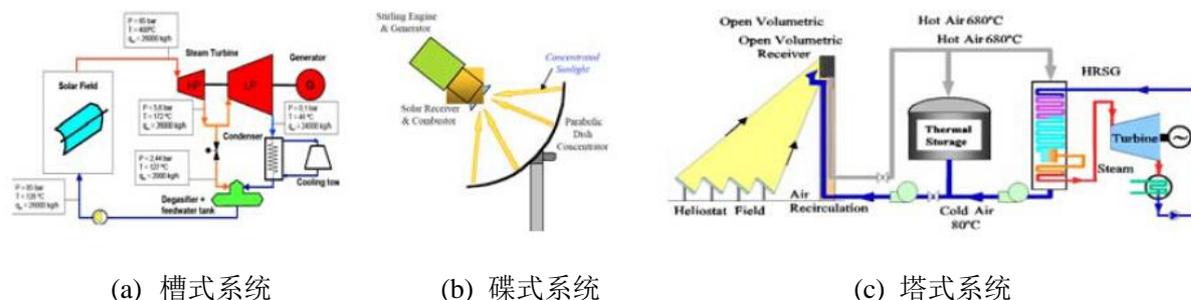


图3 三种常见太阳能热发电系统示意图

3 槽式太阳能热发电系统研究现状

槽式太阳能热发电是目前技术发展最为成熟、装机容量最大,也是最早实现商业化运行的太阳能热发电形式。槽式太阳能电站的设计建造始于1980年美国和以色列联合成立的LUZ公司,在1985~1991年间,LUZ公司在美国加利福尼亚州相继建成了9座槽式太阳能示范电站^[15,16],总占地面积超过7km²,总装机容量为354MW,年发电量8×10⁸ kW h,是当时世界上规模最大、成效最高的太阳能热发电工程。槽式太阳能热发电系统由聚光集热子系统、储热子系统、发电模块子系统构成,其中聚光集热子系统和储热子系统是目前的研究热点。

3.1 光学过程模拟

太阳能抛物槽式系统光热转换过程可以描述如下:太阳辐射被反射抛物槽反射并聚集到集热管的玻璃管上,然后透过玻璃管汇集到集热管的外表面并被选择性吸收涂层所吸收,转化成为热能;由太阳辐射能转化而来的热能通过导热使整体集热管温度升高,然后这部分热量通过集热管内表面和传热工质的对流作用,传递给传热工质并使得传热工质温度上升^[17]。整个光热转换过程是一个在复杂几何条件下的辐射、导热和对流耦合的热传导问题。

从20世纪70年代开始,一些学者开始尝试用数值积分的方法来积分得出聚光系统中太阳辐射热流密度分布情况。Evans^[18]和Harris等人^[19]均开发了各自的数值积分方法,来估计用于椭圆抛物吸热器的平板式吸收器上的热流密度分布情况。在Harris等人的研究中,用一种“光锥”近似(“cone optics” approach)的方法,来

考虑太阳光不平行夹角对计算结果的影响,以期得到更为符合实际反射光辐射热流密度分布的计算结果^[19]。20世纪80年代后期, Jeter^[20,21]建立了抛物槽式系统集热管上热辐射热流密度的初积分方法,并分析了不同抛物槽式吸热器的聚光特性。但是运用这类数值积分方法来进行聚光性质分析具有一定的局限:它们要求特殊的积分例程,其过程复杂并且不具有普遍性;“光锥”近似的方法由于不能考虑到所有光线的反射情况,造成积分过程的准确性不高;同时,在积分过程中,吸热器的光学性质和几何参数也不能方便的变化,以至于模拟结果很难反映聚光器和集热管的光学特性^[21]。

而蒙特卡罗光线追踪法(Monte Carlo Ray-Trace Method, MCRT)是一种理论模型简单,实施过程方便灵活,能够很好地反映聚光系统的光学特性的统计方法;并随着计算机性能的提高,通过增加模拟采用的光束数目,可以得到较为精确的模拟结果^[22]。20世纪80年代后期, Riveros 等人运用光线追踪的方法来模拟太阳辐射的反射过程,来确定吸热器的开口宽度和位置^[23]。但由于计算量过于庞大,蒙特卡罗方法在当时并没有得到广泛应用。直到21世纪初,随着计算机的迅猛发展,微型计算机运算能力得到很大提高,才有了运用MCRT方法模拟聚光过程的尝试。例如:帅永等人^[24]运用MCRT方法模拟碟式吸热器并给出最佳吸热腔形式, Kraupl 等人^[25]运用MCRT方法模拟太阳辐射在太阳能化学反应器中的传播过程。

作者利用Soltrace软件对槽式太阳能热电系统的光学过程进行了模拟计算。以Jeter^[20]的理想模型作为验证模型进行计算,得到的光路图如图4所示,计算得到的集热管表面热流分布对比如图5所示,可以看出用Soltrace软件获得的结果与Jeter^[20]的计算结果误差很小。因而利用Soltrace软件来模拟槽式太阳能发电系统的光学过程,获得集热管表面的热流分布是可行的。

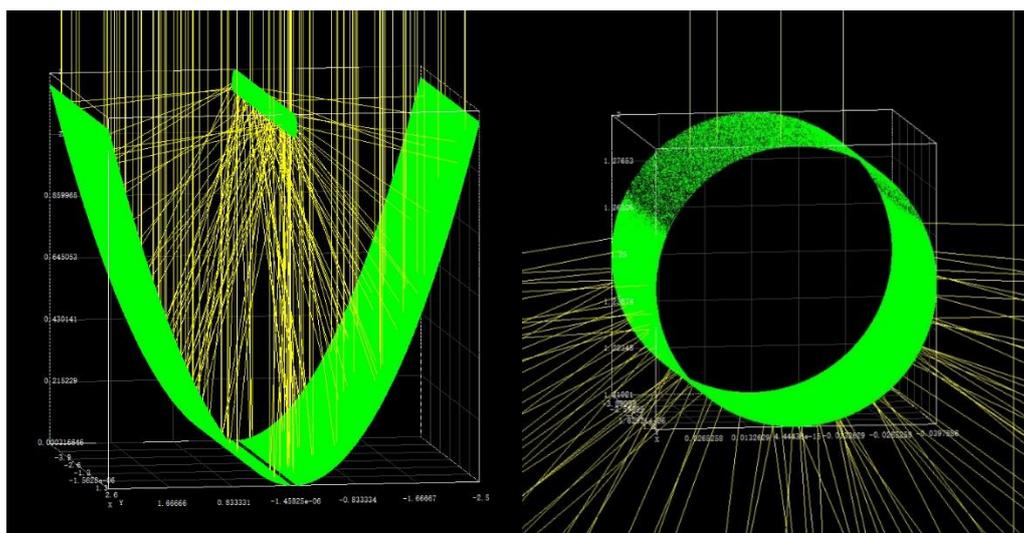


图4 Soltrace软件获得的验证模型的光路图

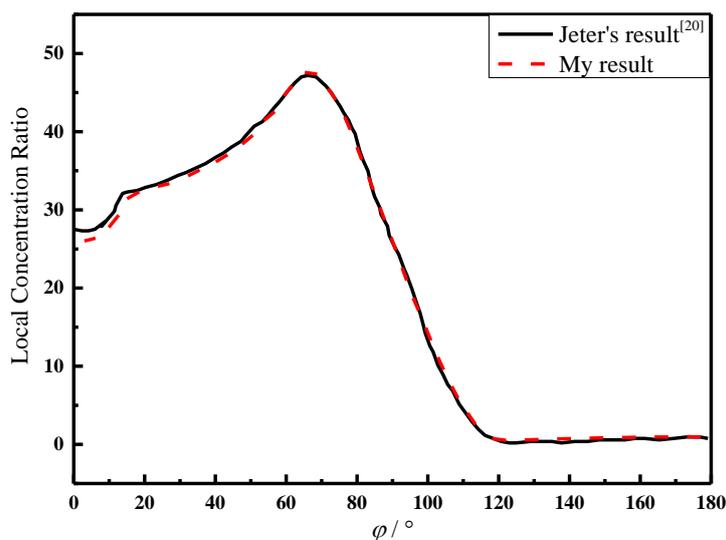


图5 Soltrace软件计算得到的热流分布与文献结果的对比图

3.2 集热管强化传热

由于集热管壁导热系数和集热管内传热流体对流换热系数的限制,集热管表面不均匀的热流分布势必造成吸热器(尤其是集热管)不均匀的温度分布。局部温度过高,温度梯度过大给槽式吸热器的安全高效运行带来很大挑战。主要体现在以下几方面:(1)集热管壁周向温度梯度大,集热管容易弯曲变形,偏离抛物面聚光器的焦线位置,增大光学损失,如果轴向变形过大,高温集热管将触碰玻璃套管,造成玻璃套管破裂^[26,27],真空失效;(2)局部温度过高,集热管表面的选择性吸收涂层容易发生降解脱落,限制了集热管的最高使用温度;(3)局部温度过高,导热油容易发生热降解释放出氢气,并渗透到环形空间中^[28],另外在高温环境下,吸气剂的工作性能也会减退,造成集热管真空度下降。而选择性吸收涂层的性能和环形空间的真空度对集热管的热性能有着重要影响^[29]。

目前,解决上述问题的主要措施是在传热流体侧采取强化换热技术,提高集热管内对流换热系数。国内外学者对此进行了大量研究,Aldali 等人^[30]与 Munoz 等人^[31]提出在集热管内布置翅片,强化传热流体与集热管壁的对流换热,降低集热管壁面温度梯度和最高温度。Massidda 等人^[32]提出采用增加集热管内壁面粗糙度和在集热管内布置螺旋涡发生器两种方式强化集热管内的对流换热,降低集热管壁面温度梯度和最高温度。Reddy 等人^[33]与 Mwesigye 等人^[34]通过在集热管内插入多空介质强化换热,Wang 等人^[35]则在考虑吸热表面非均匀热流分布的影响对多孔介质的填充区域进行了优化分析。Aggrey 等人^[36]对内插扭带对集热管内强化换热效果进行了分析。Sokhansefat 等人^[37]则采用通过在传热流体内添加 Al_2O_3 纳米颗粒来强化集热管内的对流换热。Cheng 等人^[38]根据集热管表面太阳热流的分布特点提出在聚集太阳能一侧的集热管内布置纵向涡发生器,能够

高效低阻地强化集热管内的对流换热，降低集热管壁面的温度梯度和最高温度，如图 6 所示。Song 等人^[39]和 Ghadirijafarbeigloo 等人^[40]研究了内插纽带对集热管内流动换热的强化效果，如图 7 所示。

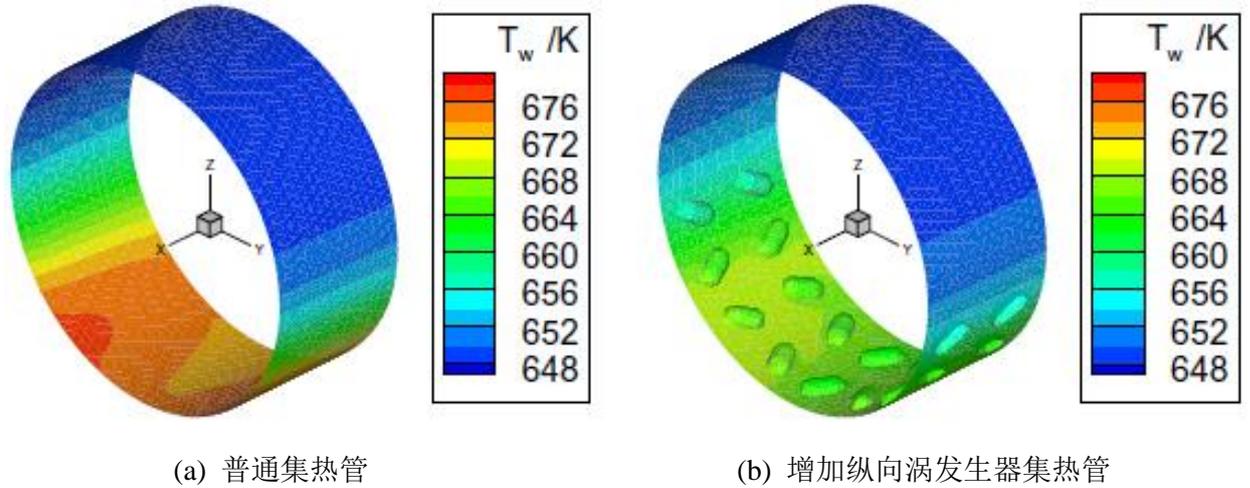


图 6 增加纵向涡发生器前后集热管壁温度分布对比^[38]

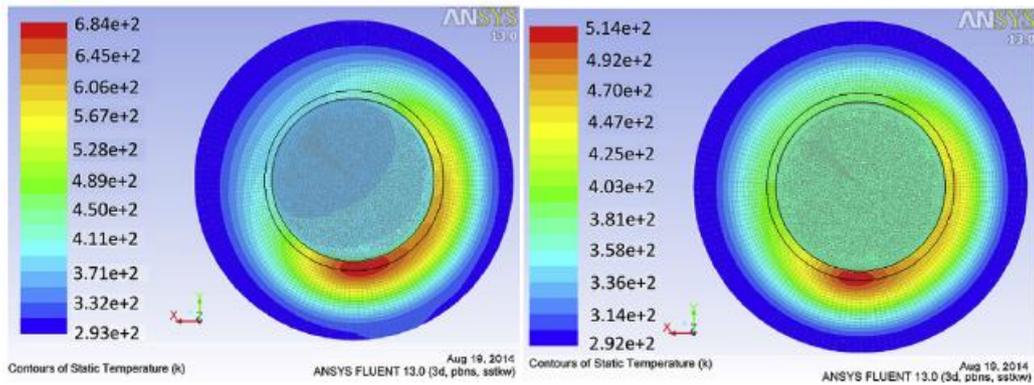


图 7 增加纵向涡发生器前后集热管壁温度分布对比^[39]

3.3 太阳能储热技术

由于太阳能时空分布不均，为了使槽式太阳能热发电系统能够连续不间断运行，需要配有储热子系统。目前的储热技术主要有：显热储热、潜热储热和热化学储热^[41]，热化学储热虽然蓄热密度大，但不安全且蓄热过程不可控，严重影响其推广应用。显热储热是目前应用最广的一种储热方式，然而它的储热密度小。相比之下，相变储热的储热密度是显热储热的 5~10 倍甚至更高^[42]。由于具有温度恒定和蓄热密度大的优点，相变蓄热技术得到了广泛的研究，尤其适用于热量供给不连续或供给与需求不协调的工况下。

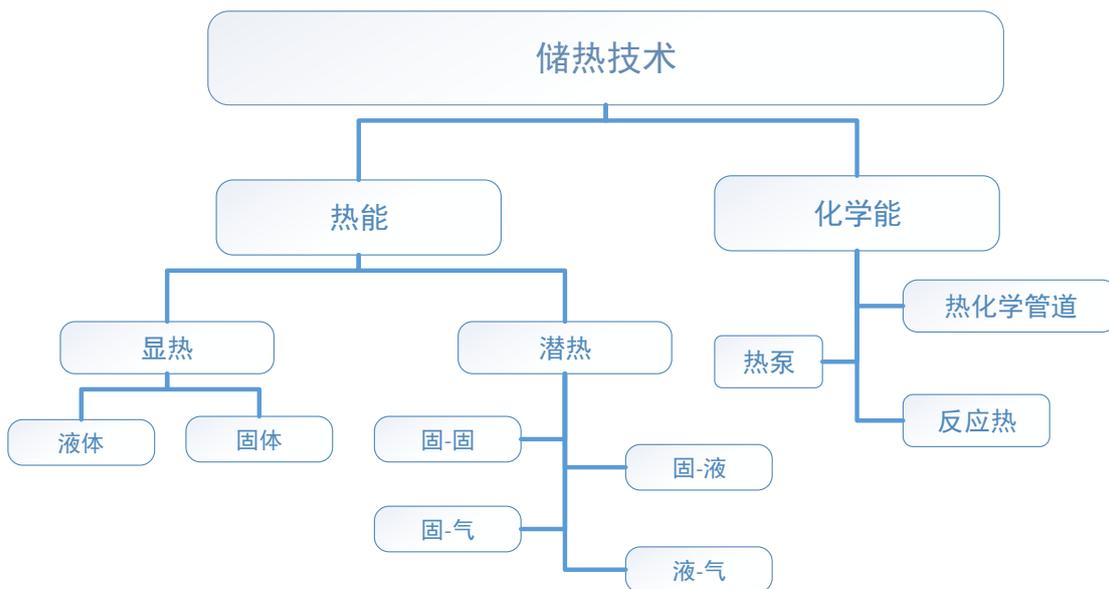


图7 储热技术分类

相变材料主要可以分为：有机类、无机类和混合类，具体如图8所示。由于相变材料（PCM, phase change material）的导热系数偏低，导致相变材料与传热流体之间的换热效果较差，进而影响了装置的蓄热、放热速度。为了解决这一问题，国内外的学者从提高PCM材料的导热系数、增大换热面积、使用中间传热介质、热管和热虹吸管等方面进行了研究。

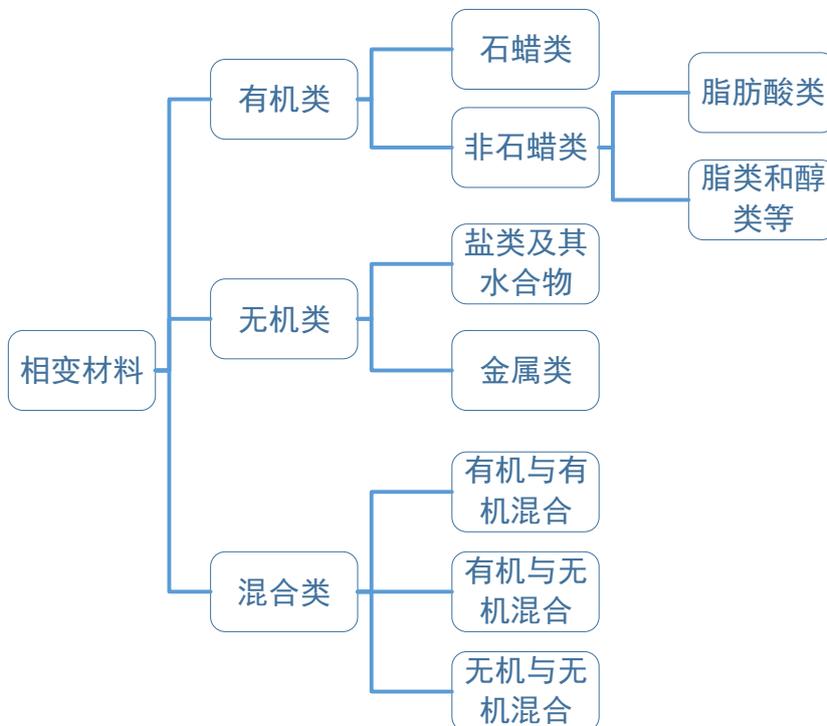


图8 相变材料分类

目前，提高 PCM 材料的导热系数常用的方法是将 PCM 加入多孔材料基体。可用作基体的多孔材料包括：陶瓷、膨胀石墨和金属泡沫等。陶瓷的孔隙较小，

PCM 可在毛细力和表面张力的作用下固定在陶瓷材料的微孔中。石墨具有热导率高、密度低、耐高温、耐腐蚀等性质，又因为膨胀石墨孔隙率高，对 PCM 具有较高的吸收性，是非常有前景的基底材料。随着石墨质量比的增加，复合材料的导热系数增加，但是材料的成本和单位体积比热容减小，所以石墨质量比并不是越大越好^[43]。金属泡沫的透气性高，孔隙比表面积大，单位质量的比热容小，具有一定的强度和刚度，并且金属支架具有较高的导热系数，可在短时间内完成热量的传递，较好地解决 PCM 导热系数过低的问题^[44]。将 PCM 加入到多孔材料基体中，利用多孔材料的高导热性可有效地提高 PCM 的导热能力，但是多孔材料对 PCM 的自然对流是有抑制作用的，对 PCM 的相变过程有一定的不利影响，所以关于如何强化多孔材料中 PCM 自然对流，以进一步提高其传热能力需要进行更深入的研究。

增大换热面积的方法主要有加入金属肋片、封装 PCM 等。通过加入金属肋片改善 PCM 与传热流体间的换热效果的研究已经非常多见，由于其具备简单、高效、易加工等特点，目前已得到广泛的应用。通过封装 PCM 可以增加换热面积，并且减小 PCM 与外界之间的反应，封装分为两种情形，一种是宏观上的封装（macro-capsulation），即将 PCM 封装在一个较大的密闭容器，通过传热流体流经容器表面完成热量的存储与释放，常用于填充床式蓄热系统；另一种是微观上的封装（micro-capsulation），即相变微胶囊。

4 总结与展望

全球变暖、能源短缺和化石燃料排放引起的环境问题已成为制约全球社会经济发展的重大瓶颈问题之一，直接威胁到人类未来的生存与发展。太阳能热发电技术作为解决能源、资源和环境等问题的一种有效途径，加快其发展已成为现阶段世界各国科研工作者所面临的一项重要研究任务。

槽式太阳能聚光集热子系统中所进行的光捕获与转换过程是一个既有能量传递与转换、又有物质运输的物理过程，内容涉及光学、传热学、流体力学和结构力学等，具有其复杂性与特殊性。因此研究和揭示这一过程中光能聚集、光热转换及复杂耦合流动换热的机理和规律将对于认识和掌握系统设计运行原理、优化和创新系统关键技术指标、提高系统换热效率与运行安全性和稳定性、降低太阳能发电成本都有着重要的指导作用。而储热子系统是保障太阳能热发电站持续稳定运行的关键，因此储热技术的研究对于槽式太阳能热电系统的大规模广泛应用具有十分重要的意义。因而，本人的后续工作将主要从文中的3个方向展开进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈学俊, 袁旦庆. 能源工程[M]: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] 王庆一. 中国的能源与环境:问题与对策[J]. 能源与环境, 2005, 3: 4-11.
- [3] 中国统计年鉴2012[M]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2013.
- [4] 邓长生. 太阳能原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [5] 刘鉴民. 太阳能利用: 原理、技术、工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [6] 罗运俊, 何梓年, 王长贵. 太阳能利用技术[M]. 背景: 化学工业出版社, 2005.
- [7] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓璞, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 杨德仁. 太阳能电池材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [9] 赵晶, 赵争鸣, 周德佳. 太阳能光伏发电技术现状及其发展[J]. 电气应用, 2007, 29 (10): 6-10.
- [10] 赵军, 李新国, 陈雁. 太阳能热发电技术及其在我国的应用前景[J]. 太阳能, 2005, (4): 36-37.
- [11] 张耀明, 王军, 张文进, 等. 太阳能热发电系列文章(1)聚光类太阳能热发电概述[J]. 太阳能, 2006, (1): 39-41.
- [12] 张耀明, 王军, 张文进, 等. 太阳能热发电系列文章(2)塔式与槽式太阳能热发电[J]. 太阳能, 2006, (2): 29-32.
- [13] 王军, 刘德有, 张文进, 等. 太阳能热发电系列文章(3)碟式太阳能热发电[J]. 太阳能, 2006, (3): 31-32.
- [14] 陈静, 刘建忠, 沈望俊, 等. 太阳能热发电系统的研究现状综述[J]. 热力发电, 2012, 41 (4): 17-22.
- [15] Price H, Lupfert E, Kearney D, et al. Advances in parabolic trough solar power technology[J].Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124: 109-125.
- [16] Fernandez-Garcia A, Zarza E, Valenzuela L, et al. Parabolic-trough solar collectors and their applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 1695-1721.
- [17] Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30 (3): 231-295.
- [18] Evens DL. On the performance of cylindrical parabolic solar concentrators with flat absorbers[J]. Solar Energy, 1977, 19: 379-385.
- [19] James A. Harris WSD. Focal Plane Flux Distribution Produced by Solar Concentrating Reflectors[J]. Solar Energy, 1981, 27 (5): 403-411.
- [20] Jeter, M S. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation[J]. Solar Energy, 1986, 37 (5): 335-345.
- [21] Jeter, M S. Analytical determination of the optical performance of practical parabolic trough collectors from design data[J]. Solar Energy, 1987, 39 (1): 11-21.
- [22] Modest MF. Radiative Heat Transfer[M]. New York: Academic Press, 2003.
- [23] Riveros HG, Olova AI. Graphical Analysis of Sun Concentrating Collectors[J]. Solar Energy, 1986, 36 (4): 313-322.
- [24] Shuai Y, Xia X-L, Tan H-P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems[J]. Solar Energy, 2008, 82 (1): 13-21.

- [25] Kraupl S, Steinfeld A. Monte Carlo Radiative Transfer Modeling of a Solar Chemical Reactor for The Co-Production of Zinc and Syngas[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(1): 102-108.
- [26] Almanza R, Lentz A, Jimenez G. Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs. *Solar Energy*, 1997, 61: 275-278.
- [27] Price H, Hale M J, Mahoney R, et al. Developments in high temperature parabolic trough receiver technology. *Proceeding of the 2004 International Solar Energy Conference*, July 11–14, 2004, Portland, Oregon, USA.
- [28] Moens L, Blake D M. Mechanism of hydrogen formation in solar parabolic trough receivers. *National Renewable Energy Laboratory*, 2008.
- [29] Xiong Y X, Wu Y T, Ma C F, et al. Numerical investigation of thermal performance of heat loss of parabolic trough receiver. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53(2): 444–452.
- [30] Aldali Y, Muneer T, Henderson D. Solar absorber tube analysis: thermal simulation using CFD. *Int J Low Carbon Tech*, 2013, 8(1): 14–19
- [31] Muñoz J, Abánades A. Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools[J]. *Applied energy*, 2011, 88(11): 4139-4149.
- [32] Massidda L, Varone A. A numerical analysis of a high temperature solar collecting tube using gas as a heat transfer fluid. *2008 Solarpaces*, March 3, 2008, Las Vegas, Nevada, USA.
- [33] Ravi Kumar K, Reddy K. Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver. *Appl Energy*. 2009;86:1804-12.
- [34] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer JP. Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts. *Appl Energy*. 2014;136:989-1003.
- [35] Wang P, Liu D Y, Xu C. Numerical study of heat transfer enhancement in the receiver tube of direct steam generation with parabolic trough by inserting metal foams. *Appl Energ*, 2013, 102: 449–460.
- [36] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer J P. Heat Transfer Enhancement in a Parabolic Trough Receiver Using Wall Detached Twisted Tape Inserts[C]//ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V06BT07A031-V06BT07A031.
- [37] T.Sokhansefat a, A.B.Kasaeian a,n, F.Kowsary. Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using synthetic oil nanofluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, 33:636-644.
- [38] Cheng Z D, He Y L, Cui F Q. Numerical study of heat transfer enhancement by unilateral longitudinal vortex generators inside parabolic trough solar receivers. *Int J heat mass Tran*, 2012, 55: 5631–5641.
- [39] Song X, Dong G, Gao F, et al. A numerical study of parabolic trough receiver with nonuniform heat flux and helical screw-tape inserts[J]. *Energy*, 2014, 77: 771-782.
- [40] Ghadirijafarbigloo S, Zamzamian A H, Yaghoubi M. 3-D Numerical Simulation of Heat Transfer and Turbulent Flow in a Receiver Tube of Solar Parabolic Trough Concentrator with Louvered Twisted-tape Inserts[J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 373-380.
- [41] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change

- materials and applications[J]. Renewable and Sustainable energy reviews, 2009, 13(2): 318-345.
- [42] Garg HP, Mullick SC, Bhargava AK. Solar thermal energy storage. D. Reidel Publishing Co; 1985.
- [43] Steinmann W D, Tamme R. Latent heat storage for solar steam systems[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130 (1) : 011004.
- [44] Zhao C Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55 (13-14) : 3618-3632.