聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展

何雅玲*, 王坤, 杜保存, 邱羽, 郑章靖, 梁奇

西安交通大学, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

2016-05-15 收稿, 2016-06-12 修回, 2016-06-12 接受, 2016-08-31 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(51436007)和国家自然科学基金重大项目(51590902)资助

摘要 分别对槽式、线性菲涅尔式、塔式、碟式4种聚光型太阳能热发电技术中的聚光集热系统内非均匀辐射能流分布特性及由此带来的问题和挑战进行了总结, 重点回顾了针对非均匀辐射能流特性带来的问题所提出的解决方法的研究进展, 包括作者团队近年来在该方面的相关研究. 分析看出, 吸热器内的太阳能辐射能流分布表现出强烈的非均匀性, 不均匀的辐射能流分布必然造成吸热表面/吸热体内不均匀的温度分布, 即出现过高的局部温度、过大的温度梯度. 局部温度过高容易造成局部热斑烧毁、吸热涂层性能减退、传热流体变性劣化; 温度梯度过大导致出现热应力热变形, 容易造成吸热器关键部件的结构失稳破坏. 接着指出, 非均匀的能流分布之所以给聚光集热系统带来诸多挑战, 其根源在于吸热器内均匀的吸热能力与吸热表面/吸热体内非均匀的能流分布之间不能相互匹配, 进而导致吸热表面/吸热体出现不均匀的温度分布. 据此, 作者将现有的解决方法总结分类为两种途径: (1) 优化吸热器的“吸热”能力, 使之与非均匀分布的太阳能流相匹配; (2) 均化“聚光”系统内吸热表面/吸热体内的太阳能流分布, 使之吸热器内均匀的吸热能力相匹配. 最后, 本文提出了解决聚光集热系统内非均匀能流特性问题的思路: 需要从“聚光”与“吸热”不匹配的矛盾入手, 以“光热匹配”为原则对聚光集热系统进行优化, 提高“聚光”过程与“吸热”过程的协同性.

关键词 聚光型太阳能热发电, 非均匀能流分布, 聚光集热, 光热匹配

能源短缺以及化石燃料使用引起的环境问题已经成为制约全球经济和社会发展的长期、重大瓶颈. 为了解决这一问题, 开发和利用可再生能源将是能源发展的必然选择^[1]. 太阳能是可再生能源的一种重要形式, 也是人类最早使用的能源之一. 聚光型太阳能热发电技术(concentrating solar power, CSP)是一种将太阳光聚集并转化传热流体的热能, 然后通过热力循环的方式带动发电机发电的技术^[2]. CSP技术清洁、安全、可靠, 是一种具有广阔应用前景的绿色可再生能源技术, 加速推进其规模化发展已成为国际

共识^[3,4].

聚光型太阳能热发电技术按照聚光方式可以分为槽式、线性菲涅尔式、塔式、碟式4种形式^[5]. CSP系统主要由聚光集热子系统、换热子系统、蓄热子系统、热动力发电子系统组成. 聚光集热子系统实现太阳光的捕获、聚集、接收和转换, 为整个CSP系统提供能量输入, 是整个系统中的核心部件. 聚光集热子系统的非均匀聚光特性直接影响系统的集热性能并对CSP系统的安全、高效运行有着重要影响. 因此, 针对聚光集热系统的非均匀辐射能流特性的研究得

引用格式: 何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展. 科学通报, 2016, 61: 3208–3237

He Y L, Wang K, Du B C, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: A review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3208–3237, doi: 10.1360/N972016-00604

到了越来越多的关注,近年来众多学者在相关领域开展了研究,并针对非均匀的辐射能流特性带来的挑战提出了一些解决方法。

本文分别针对槽式、线性菲涅尔式、塔式、碟式4种CSP技术中的非均匀辐射能流特性及与之对应的解决方法进行讨论。首先针对4种CSP技术的聚光集热系统的构成、光学过程进行介绍;然后对4种聚光集热系统聚光特性的研究进展进行了总结,着重分析了吸热器表面非均匀的辐射能流分布特性;接着指出了聚光集热系统中非均匀能流分布带来的挑战,着重回顾总结了应对辐射能流非均匀性带来挑战的解决方法和研究进展,包括介绍了作者团队近年来的一些研究结果;最后对CSP聚光集热系统中的辐射特性、非均匀能流分布提出的挑战及解决方法进行了总结。

1 槽式系统(Parabolic Trough System)

1.1 聚光集热系统

槽式电站中的聚光集热系统称为集热器,主要由聚光器和吸热器组成,如图1所示。聚光器是具有高反射率的抛物面反射镜。而吸热器通常采用直通式玻璃-金属真空集热管。直通式真空集热管主要包括覆盖有选择性吸收涂层的吸热管以及同轴布置的玻璃套管,吸热管与玻璃套管通过金属波纹管连接形成真空环形空间,使用真空泵或在环形空间放置吸气剂以更好地维持环形空间真空状态($P < 0.013$ Pa),真空环形空间能够减小对吸收涂层的破坏同时减小对流换热损失。除直通式真空集热管外,也有学者提出在槽式系统中采用热管式集热管、空腔集热管

图1 (网络版彩色)槽式太阳能集热器

Figure 1 (Color online) Parabolic trough solar collector

作为吸热器^[6,7]。本文主要以目前应用广泛的直通式玻璃-金属真空集热管作为讨论对象。表1^[8~12]列出了目前典型的槽式真空管集热器及其主要参数。

太阳辐射能经抛物面聚光器反射后,聚焦到安装在聚光器焦线位置上的吸热管表面,吸热管接收太阳能并将其转换热能被传热流体吸收,如图2所示。应用在槽式集热器内的传热流体主要是导热油和水/水蒸气。例如LUZ公司建立的9座槽式太阳能电站中SEGS I~SEGS VIII(Solar Electricity Generating System, SEGS)采用了导热油作为传热工质,工作温度最高可达390℃,SEGS IX直接采用水/水蒸气作为传热工质,工作温度增加到402℃^[8]。此外也有部分学者开展了在槽式集热器内应用二氧化碳、氦气、空气、熔盐等作为传热流体的研究^[13~18]。

1.2 聚光特性

太阳辐射能经抛物面聚光器反射后,聚焦到吸热管表面,太阳辐射能主要分布在吸热管底部,吸热

表1 典型槽式集热器的主要参数^[8~12]

Table 1 Parameters of the typical parabolic trough collector^[8~12]

集热器类型	LS-1	LS-2	LS-3	Euro-Trough	DS-1
聚光器开口宽度 (m)	2.55	5	5.76	5.76	5
聚光器单元长度 (m)	6.3	8	12	12	8
聚光器焦距 (m)	0.94	1.49	1.71	1.71	1.49
吸热管外径 (m)	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07
几何聚光比	61	71	82	82	71
聚光器反射率	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95
吸收涂层吸收率	0.94	0.94	0.96	0.96	0.96
吸收涂层发射率	0.30	0.24	0.10	0.10	0.10
玻璃套管透射率	0.95	0.95	0.965	0.965	0.965
峰值光学效率	0.734	0.737	0.772	0.80	0.80

图2 (网络版彩色)槽式集热器工作原理示意图。(a) 槽式集热器;(b) 真空吸热管

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of parabolic trough collector. (a) Parabolic trough collector; (b) vacuum receiver

管表面的太阳能流密度分布极为不均. 目前已经有诸多学者就槽式集热器的聚光性能开展了研究工作.

在实验研究方面, Riffelmann, Lupfert, Schiricke等人^[19~22]提出了PARASCAN(PARAbolic Trough Flux SCANner)和CTM(Camera-Target-Method)两种测量槽式吸热管表面能流分布的方法. PARASCAN系列方法通过使用高分辨率的传感器记录吸热管圆周的能流分布, PARASCAN-1方法采用二极管作为光传感器, 后来在PARASCAN-2方法中, 采用图像控制器(Charge-coupled Device, CCD)为光传感器. CTM方法则将一个漫反射兰贝特目标体与吸热管垂直地放置在焦线位置处, 通过校准相机拍摄目标体的光线分布从而得到能流分布. 图3给出了Riffelmann等人^[19]通过CTM方法测量Eurotrough集热器中吸热管表面的能流分布情况.

在模拟计算方面, 目前用于计算聚光集热系统吸热表面/吸热体内能流分布的计算方法大致可分为3种: 锥体光学法(cone optics method, 也称为卷积法)、半有限积分法(semifinite integration formulation)、以及光线追踪法(ray tracing). 已有众多学者通过上述方法描述了槽式集热器内吸热管表面能流分布的不均匀性. 例如, Jeter^[23,24]建立了槽式吸热管表面的能流分布的数值积分方法, 分析了不同结构下集热器的聚光特性, 得到了吸热管表面非均匀的能流分

图3 CTM方法测量得到的吸热管周向非均匀的能流分布^[19]

Figure 3 Non-uniform solar flux distribution along the circumference direction tested by CTM method^[19]

布规律. Daly^[25]采用反向光线追踪的方法, 计算了槽式集热器中吸热管表面的能流分布. Grena^[26]运用光线追踪方法模拟了吸热管表面的能流分布, 并讨论了跟踪误差、聚光器形面误差等对能流分布情况的影响. Wirz等人^[27]也通过蒙特卡洛光线追迹方法(Monte Carlo ray trace, MCRT)计算太阳能流在集热器的分布. Khanna等人^[28]与Christian等人^[29]分别运用理论分析与光线追踪的方法专门对弯曲情况下吸热管表面的能流分布进行了分析. 本课题组也较早地发展了基于MCRT的槽式太阳能集热器吸热管表面太阳辐射能流密度分布的计算模型, 揭示了吸热管表面热流密度分布的不均匀特性^[30~36], 图4给出了采用MCRT方法模拟得到的LS-2型聚光集热器^[10]吸热管表面的能流密度分布: 可以将槽式吸热管表面的能流分布沿周向分为遮蔽效应区、能流递增区、能流递减区、以及阳光直射区4个区域. 在遮蔽效应区由于吸热管对阳光的遮挡, 此处的能流密度突然降低; 在能流递增区, 随着周向角度的增大, 能流密度越来越大; 在能流递减区, 随着周向角度的增大, 能流密度逐渐减小; 而在阳光直射区, 只有直射到吸热管表面的太阳能. 另外, Khanna等人^[28]的模拟结果显示吸热管在弯曲的情况下吸热表面的能流分布不但在周向上不均匀, 而且轴向上的不均匀性也变得明显, 如图5所示.

总之, 在槽式聚光集热系统中, 大部分太阳辐射能集中在了吸热管底部, 吸热管表面的能流分布极为不均匀.

图4 (网络版彩色)LS-2吸热管表面太阳辐射能流分布^[31,34]. (a) 周向分布; (b) 分布云图

Figure 4 (Color online) Solar flux distribution on LS-2 solar receiver tube wall^[31,34]. (a) Circumferential distribution; (b) 3-D distribution

图5 弯曲吸热管吸热表面能流分布^[28]

Figure 5 Solar flux distribution on a bent solar receiver tube wall^[28]

1.3 非均匀辐射能流特性的挑战及解决方法

由于吸热管壁导热能力和吸热管内对流换热能力有限, 吸热管表面不均匀的能流分布必然造成集

热器(尤其是吸热管)不均匀的温度分布. 本课题组在应用MCRT方法获得吸热管表面太阳能流分布的基础上, 较早地提出了MCRT方法和有限容积法(finite volume method, FVM)的耦合计算模型, 将非均匀的能流分布作为边界条件与槽式集热器内辐射-导热-对流的耦合换热过程相耦合开展了数值模拟研究, 分析研究了集热器的集热性能^[17,30,31,33,34], 特别地, 得到了吸热管表面的温度分布, 如图6所示. 从图6可以看出, 吸热管表面的温度分布极为不均, 尤其是周向方向温度分布存在较大的温度梯度. 特别是当传热流体为水蒸气、二氧化碳、空气等工质时, 由于传热流体的比热容较小, 传热性能差, 不均匀的能流分布导致的壁面温度分布的不均匀性会更为显著^[13,14,37]. 总之, 不均匀的能流分布会导致吸热壁面不均匀的温度分布: 局部温度过高, 温度梯度尤其是周向温差过大.

局部温度过高, 温度梯度过大给槽式集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) 吸热管壁周向温度梯度大, 吸热管容易弯曲

图6 (网络版彩色)LS-2吸热管壁面温度分布^[33,34]. (a) 周向分布; (b) 分布云图

Figure 6 (Color online) Temperature distribution on LS-2 solar receiver tube wall^[33,34]. (a) Circumferential distribution; (b) 3-D distribution

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, 高温吸热管将触碰玻璃套管, 造成玻璃套管破裂^[14,37-40], 真空失效; (2) 局部温度过高, 吸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^[41], 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^[42].

不均匀的能流分布导致了吸热壁面不均匀的温度分布, 局部温度过高, 温度梯度过大, 影响了槽式集热器的安全性以及吸热器的高效性. 因此, 想法缓解槽式集热器中吸热管表面温度分布严重的非均匀

性十分重要. 不均匀温度分布的形成原因以及相应的解决方法参见图7.

一是, 在传热流体侧采取强化换热技术, 通过提高吸热管内对流换热系数来缓解不均匀能流分布带来的弊端. 国内外学者已经提出了很多强化对流换热的技术和方法^[43]. 其中一些强化换热技术和方法可应用在太阳能吸热器中, 用以增强传热流体的吸热能力. Aldali等人^[39]与Muñoz等人^[40]提出在吸热管内布置翅片, 强化传热流体与吸热管壁的对流换热, 降低吸热管壁面温度梯度和最高温度. Massidda等人^[14]提出采用增加吸热管内壁面粗糙度和在吸热管内布置螺旋涡发生器两种方式来强化吸热管内的对流换热, 降低吸热管壁面温度梯度和最高温度. De-lussu^[9]提出了两种强化换热方式来获得吸热管壁面

图7 (网络版彩色)槽式集热器中不均匀温度成因以及解决方法

Figure 7 (Color online) Causes of the non-uniform temperature distribution in parabolic trough collector and corresponding solutions

较均匀的温度分布: 增大吸热管内壁面粗糙度、在吸热管内布置翅片. Mwesigye等人^[44]对内插纽带对吸热管内强化换热效果进行了分析. Sokhansefat等人^[45]则采用在传热流体内添加 Al_2O_3 纳米颗粒来强化吸热管内的对流换热. Reddy等人^[46-49]与Mwesigye等人^[50]对在吸热管内插入多孔介质的强化换热效果进行了研究, Wang等人^[51]在考虑吸热表面非均匀能流分布的条件下进一步对多孔介质的填充区域的高度进行了参数优化分析. 目前有关吸热管内多孔填充层的构型优化均是基于“参数分析”的试凑方法得到的. 鉴于此, 本课题组提出了一种基于计算流体动力学(CFD)与遗传优化算法(GA)相结合的多孔介质构型优化方法^[52], 该方法可以对太阳能吸热器多孔介质填充结构进行智能优化. 纵向涡发生器作为一种高效的强化换热技术得到了广泛的应用^[53], 本课题组根据吸热管表面太阳能流的分布特点有针对性地提出在聚集太阳能一侧的吸热管内布置纵向涡发生器^[54,55], 能够高效低阻地强化吸热管内的对流换热, 进而降低吸热管壁面的温度梯度和最高温度, 图8为增加纵向涡前后的吸热管壁面温度分布对比^[55].

二是, 提高吸热管壁导热系数缓解不均匀能流分布带来的一系列问题. Almanza等人^[37]实验发现将不锈钢吸热管替换为铜制吸热管时, 由于铜的导热系数较大, 吸热管周向温度梯度减小. Flores等人^[56]进而提出采用铜-钢复合吸热管, 综合利用铜较高的导热系数与钢较好的机械强度的优良性能来缓解直接蒸汽技术(Direct Steam Generation, DSG)中吸热管弯曲变形的现象. Aldali等人^[39]的模拟结果也显示当采用导热系数相对较大的铝作为吸热管材料时, 吸热管的周向温度梯度明显减小. Delussu^[13]也尝试通过提高吸热管壁的导热系数(如采用铜管)来均化壁面

温度.

三是, 除提高吸热管内对流换热系数和吸热管壁导热系数外, 还可以通过提高吸热管表面的太阳能流密度分布的均匀性, 从根源上避免不均匀能流分布所带来的一系列的弊端. Tsai等人^[57]为了提高吸热管表面辐射能流的均匀性, 提出了一种各处焦距随入射光线的位置变化的“变焦距”抛物面槽式聚光器(variable focus parabolic trough, VFPT), 入射光线经过聚光器反射后能够均匀地分布在吸热管的整个圆周方向. 将这种“变焦距”聚光器与传统抛物面槽式聚光器(standard parabolic trough, SPT)以及圆柱槽式聚光器(cylindrical trough, CT)的聚光性能进行了对比, 发现“变焦距”聚光器能够使吸热管表面的能流分布的均匀性得到显著提高, 如图S1所示. Gee等人^[58]提出在槽式集热管环形空间的顶部放置二次反射镜, 通过这种方式能够提高吸热管表面的能流分布的均匀性, 如图S2所示. 本课题组则以获得均匀的能流分布为目的, 提出在传统的槽式太阳能集热器中将吸热管连同整个集热管偏离抛物面聚光器焦点处朝着聚光器移动到适当位置, 并增设二次反射镜作为均光装置与主反射镜开口相对布置, 如图9所示, 同时进一步给出了一种针对带有均光反射镜的槽式太阳能集热器的设计方法^[34,59], 运用蒙特卡罗光线追踪法模拟了设计得到的集热器的聚光集热性能, 获得了吸热管表面的太阳能流密度分布, 并将其作为FVM模拟所需的边界条件, 数值研究了集热管内的三维耦合换热过程, 获得吸热管壁面温度, 如图10所示. 研究结果表明改进后吸热器表面的太阳能流分布的均匀性明显得到改善, 吸热管壁温度分布也因此变得均匀, 壁面最高温度以及周向温差都显著降低: 壁面最高温度由667 K降低至661 K, 周向温差由25 K降低至3 K.

图8 (网络版彩色)增加纵向涡发生器前后吸热管壁面温度分布对比^[55]. (a) 增加前; (b) 增加后

Figure 8 (Color online) Comparison of temperature distributions on the absorber tube wall^[55]. (a) With unilateral longitudinal vortex generators; (b) without unilateral longitudinal vortex generators

2 线性菲涅尔系统(Linear Fresnel Reflector System)

2.1 聚光集热系统

线性菲涅尔反射式太阳能系统(Linear Fresnel Reflector, LFR)主要由主反射镜场、跟踪装置、吸热器等组成, 如图11所示^[60]. 主反射镜场由平面或略微弯曲的条状反射镜组成, 反射镜的长轴即为跟踪轴. 吸热器一般是单管或多管的腔式吸热器, 如图12

图 9 (网络版彩色)带有均光反射镜的槽式集热器^[34]. (a) 结构示意图; (b) 光路示意图

Figure 9 (Color online) Parabolic trough collector with homogenizing reflector^[34]. (a) Structural schematic diagram; (b) ray path schematic diagram

所示. 在单管吸热器中, 为了提高辐射热流均匀性、提高聚光比、增大接收角, 一般还使用二级反射镜^[60].

在系统运行时, 跟踪装置驱使每面主反射镜单独跟随太阳转动, 从而将阳光汇聚到吸热器上. 在使用多管吸热器的系统中, 汇聚的阳光直接投射到吸热管上. 而在使用单管吸热器的系统中, 汇聚的阳光一部分直接投射到吸热管上, 另一部分则经二级反射镜反射后再投射到吸热管上, 最后投射到吸热管上的阳光被吸收涂层吸收并传递给吸热管中的传热工质.

线性菲涅尔系统一般以水/水蒸气作为传热流体并采用DSG的方式工作, 系统出口蒸汽压力在5~11 MPa左右, 温度在270~450℃左右. 与槽式系统相比, 线性菲涅尔系统有3个主要优点: 一是线性菲涅尔系统使用小型长条形主反射镜, 避免了使用大型镜面支撑装置; 二是线性菲涅尔系统使用固定吸热器, 避免了使用高温移动部件和高温转动接头; 三是线性菲涅尔系统一般采用DSG的工作方式, 可以减少大

图 10 (网络版彩色)传统聚光器与带有均光反射镜聚光集热器吸热管表面能流分布和温度分布对比^[34]. (a) 能流分布; (b) 温度分布

Figure 10 (Color online) Comparison between conventional parabolic trough collector and parabolic trough collector with homogenizing reflector^[34]. (a) Solar flux distribution; (b) temperature distribution

图 11 (网络版彩色)线性菲涅尔太阳能系统^[60]

Figure 11 (Color online) Schematic diagram of LFR^[60]

型换热器的使用. 正是基于以上几个优势, 近年来, 线性菲涅尔太阳能技术得到了快速发展, 多座示范电站和商业电站相继投入运行, 如表2所示^[60~65].

图 12 (网络版彩色)线性菲涅尔系统中的典型吸热器. (a) 单管腔式吸热器; (b) 多管腔式吸热器

Figure 12 (Color online) Typical receivers in LFR system. (a) Single-tube cavity receiver; (b) multiple-tube cavity receiver

2.2 聚光特性

聚光特性直接影响整个系统的效率, 对系统聚光特性的研究可以实现对系统光学性能的预测与优化, 因此国内外学者对线性菲涅尔系统的聚光特性开展了实验与模拟研究. 20世纪90年代, Goswami, Mathur与Sootha等人^[66~68]采用光线追迹和分析方法对管状、三角形、平板吸热器的光学性能进行了研究, 揭示了吸热器热流分布的非均匀特性. Feuermann等人^[69]设计了多种复合抛物面二级反射镜(CPC), 并对一个220 kW的系统进行了实验研究, 结果表明CPC可以提高系统效率. 在早期探索的基础上, 进入21世纪后, 线性菲涅尔技术得到了快速的发展, 有关聚光特性的研究进入到了一个新的阶段. Häberle等人^[70]研究了世界上第一个LFR示范电站Solarmundo的光学性能, 得到了垂直入射时吸热管上的辐射热流分布和典型工况的光学效率. 图13(a)为Solarmundo系统的单管CPC腔式吸热器及其内部的光线传播过程

示意图. 由图13(a)可见, 通过CPC的二次反射, 一部分能量被汇聚到了吸热管上半部分. 图13(b)为吸热管上的相对辐射强度分布图, 可见, 虽然有了CPC对辐射能流的均化作用, 但是吸热管表面的辐射热流仍然存在很大的非均匀性, 大部分能量仍集中在吸热管的下半部分. Mills等人^[71]提出了一种紧凑型线性菲涅尔式系统(CLFR)并采用光线追迹法对其进行了性能评价, 同时提出了在该系统上使用二级反射器的方案. 结果表明, 紧凑型系统可在一定程度上减小占地面积和镜面之间的相互遮蔽, 而吸热器上的热流分布同样存在很大的非均匀性. Abbas等人^[72,73]将多管腔吸热器简化为吸热平板并研究了板上的光斑分布情况. 图S3给出了平板上的能流密度分布结果, 可见吸热器辐射能量分布存在很大的非均匀性, 大部分辐射能量集中在平板中心位置.

本课题组也发展了基于MCRT的线性菲涅尔系统三维实时光学性能计算模型, 分别揭示了单管与多管吸热器吸热表面辐射能流密度分布的不均匀特性^[72,73]. 图14和15给出了采用MCRT方法计算得到的典型单管与多管吸热器吸热表面的能流密度分布. 由图14^[74]可见, 单管吸热器的非均匀辐射能量分布可以分为两个区域: 一是汇集了大部分能量的直接聚光区(即图中 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的范围), 可见该区域内的辐射能量处在较高水平, 且可能出现局部高能流; 二是由于二级反射镜的二次汇聚作用而形成的二次聚光区, 该区域能流将随着远离直接聚光区而逐渐减小. 由图15可见, 在多管吸热器中, 由于管束的密集排

表 2 世界主要已建成线性菲涅尔电站^[60~65]

Table 2 Summary of the LFR plants built in the world^[60~65]

项目名称	国家	容量(MW)	工作参数	传热流体	吸热器类型	投运时间
Solarmundo	比利时	—	—	水	单管腔式	2001
Liddell电站 I 期	澳大利亚	1.0	6.9 MPa, 285℃	水	多管腔式	2004
FRESEMO	西班牙	0.8	11 MPa, 450℃	水	单管腔式	2007
Kimberlina示范电站	美国	5.0	4 MPa, 300℃	水	多管腔式	2008
Puerto Errado 1	西班牙	1.4	5.5 MPa, 270℃	水	单管腔式	2009
Puerto Errado 2	西班牙	30	5.5 MPa, 270℃	水	单管腔式	2012
Liddell电站 II 期	澳大利亚	9.0	5.5 MPa, 270℃	水	多管腔式	2012
华能南山电厂	中国	1.5	3.5 MPa, >400℃	水	单管腔式	2012
Augustin Fresnel 1	法国	0.25	10 MPa, 300℃	水	单管腔式	2012
Dhursar	印度	125	—	水	—	2014
Rende-CSP	意大利	1.0	280℃	导热油	—	2015

图 13 (网络版彩色)线性菲涅尔系统单管腔式吸热器光路示意图及吸热管辐射能流分布。(a) 光路示意图; (b) 吸热管表面辐射能流分布
Figure 13 (Color online) Ray path and solar flux distribution in single-tube cavity receiver in LFR. (a) Sketch of ray path; (b) solar flux distribution on receiver tube surface

图 14 (网络版彩色)线性菲涅尔单管腔式吸热器能流分布^[74]
Figure 14 (Color online) Solar flux distribution on the absorber tube surface in the single-tube cavity receiver of LFR^[74]

布, 辐射能量几乎全部集中在吸热管的下半部分, 从而在每根管子的周向形成了非常不均匀的能流分布, 同时, 各管间的能量分布也存在非均匀分布特性。

综上所述, 在线性菲涅尔系统中由于汇聚的阳光从下方投射到吸热器上, 因此大部分辐射能量都

图 15 (网络版彩色)多管腔体吸热器吸热面能流分布^[75]

Figure 15 (Color online) Solar flux distribution on the absorbing surface in the multiple-tube cavity receiver of the LFR^[75]

集中在吸热管下半部分, 从而在吸热管上形成非均匀的辐射热流分布。

2.3 非均匀辐射能流特性的挑战及解决方法

与槽式集热器一样, 线性菲涅尔系统中的非均匀辐射能流同样会导致吸热器非均匀的温度分布。本课题组采用所提出的MCRT方法和FVM的耦合计算模型, 研究了非均匀能流分布边界条件下LFR吸热器内的辐射-导热-对流的耦合换热过程, 分析了LFR系统的光热转换性能, 并获得了吸热管表面的非均匀温度分布^[75,76]。图16为一种单管吸热器外壁温度分布图。由图16可见, 吸热管外壁温度分布在圆周方向和长度方向均存在较大的梯度。非均匀的温度分布给线性菲涅尔系统的安全高效运行带来的不利影响主要体现在局部温度过高导致吸收涂层性能的加速退化、温度梯度过大产生热应力热变形导致结构破坏两方面。首先, 在现有工艺条件下, 只有极少数的氧化物与碳化物涂层能在400℃以上的高温条件下保持稳定^[60]。由于线性菲涅尔系统的吸热管直接暴露在空气中, 因此其吸热管选择性吸收涂层很容易发生氧化退化, 而局部过热状态则会加速涂层的退化^[77,78]。Häberle等人^[60]对Solarmundo系统吸热管涂层的实验研究表明, 在500℃下保温48 h后涂层吸收率降低了3%。而Eck等人^[78]的研究表明, 由于非均匀能流分布的影响, 在系统过热蒸汽段局部最高温度将达到569℃, 这将远远超过涂层的最高使用温度。其次, 非均匀能流分布造成的非均匀温度会在吸热管关键连接部位造成较大的热应力, 并有可能造成吸热管的热变形, 从而对系统安全运行造成不利影响^[77]。

对于线性菲涅尔系统, 目前缓解吸热器温度分

图 16 (网络版彩色)线性菲涅尔单管吸热器吸热管壁温度分布^[76]

Figure 16 (Color online) Temperature distribution on the absorber tube wall in the single-tube receiver of LFR^[76]

布非均匀性的解决方法主要是通过优化聚光系统来提高能流分布的均匀性, 以此降低温度梯度、减小局部高温. 具体解决方案包括系统跟踪方式优化、主反射镜场和二级反射镜结构设计. Eck等人^[78]指出可以通过逐次偏移主反射镜的方式来减小非均匀性, 但这会在一定程度上降低系统效率. Grena等人^[79]提出了一种具有翅状二级反射镜的吸热器, 参见图17. 图18为吸热管上的相对能流分布图, 分析表明有37%的能量分布在吸热管上半部分, 说明该二级反射镜能在一定程度上提高吸热管热流的均匀性.

为提高吸热表面能流分布的均匀性, 同时提高光学效率、降低系统成本, 本课题组分别针对单管腔体吸热器LFR系统和多管腔体吸热器LFR系统进行了优化, 具体阐述如下.

针对单管腔式吸热器, 建立了线性菲涅尔系统三维MCRT光学计算模型, 通过对比筛选反射镜型

图 17 (网络版彩色)吸热管与二级反射镜示意图^[79]

Figure 17 (Color online) Schematic diagram of absorber tube and secondary reflector^[79]

图 18 (网络版彩色)吸热管相对辐射能量分布^[79]

Figure 18 (Color online) Relative solar flux distribution on the absorber tube^[79]

式、优化反射镜几何结构与光学参数、合理设计反射镜跟踪与瞄准方式等方法开展了具有单管腔式吸热器系统(图19)的光学性能优化研究^[74]. 对主反射镜参数进行了优化, 对比研究了平面镜、圆柱面镜、抛物面镜等3种典型反射镜的性能, 并研究了主反射镜瞄准线、型面误差和跟踪误差等对光学性能的影响. 研究结果表明经过优化的圆柱面镜可以达到与抛物面镜几乎一样的光学性能, 以致二者在吸热管上的辐射分布曲线几乎重合, 且瞬时光学效率($\eta_{i,opt}$)相差小于0.1%并均远大于平面镜, 参见图S4. 该结论可为在LFR系统中用相对廉价的圆柱面镜替代抛物面镜提供有力依据, 有望降低系统成本. 图20为针对50面主反射镜的5种分散瞄准线跟踪方案(参见表3, 其中, 瞄准线方程为 $Y_g=y_{aim}$, $Z_g=9.805$)下的辐射能流计算结果对比, 其中, 镜场东西对称布置, 东西对称位置

图 19 (网络版彩色)具有单管腔式吸热器和 50 面反射镜的 LFR 系统

Figure 19 (Color online) Sketch of a LFR with single-tube cavity receiver and 50 reflectors

图 20 (网络版彩色)5 种方案吸热管周向热流分布对比图^[74]

Figure 20 (Color online) Comparison of circumferential solar flux distributions on the absorber tube wall using 5 optimized aiming line design schemes^[74]

的反射镜的瞄准线也关于镜场中线对称,并将东侧反射镜由西至东依次编号为M1~M25.可见,通过合理分散瞄准线可以在牺牲少量光学效率的基础上提高吸热管能流均匀性(如方案4).同时,研究结果表明吸热管热流均匀性随反射镜形面误差 σ_{se} 的增大而提高,选用具有一定 σ_{se} 的反射镜既可提高热流均匀性又可降低制造成本(参见图S5),而跟踪误差会减小效率,并可能造成局部高能流(参见图S6),应尽量避免.

在传统单管腔体吸热器系统研究的基础上,针对太阳能的间歇性特性和波动性,我们还提出了一种使用高温集热管并以熔盐为传热工质的新型线性菲涅尔系统^[76],以及在LFR系统中进行热能存储的方法.图21是集热管与复合抛物面聚光器(Compound Parabolic Concentrator, CPC)结构示意图.为分析该系统吸热管表面的能流分布均匀性的改善效果及光热耦合转换性能,我们采用MCRT和FVM耦合方法对其进行了综合分析研究.光学性能研究表明,在兼

顾系统效率与能流均匀性的基础上,二级反射镜及相应的几何光学优化可使吸热管外壁上的能流分布得到均化,参见图22.同时在典型研究工况下系统光热转换效率可达46.0%以上,参见图S7.

针对多管腔体吸热器的线性菲涅尔系统,采用MCRT方法通过分散反射镜瞄准线对吸热管排的能流分布进行了分析和优化.优化后结果参见图15^[75],可见各吸热管排上的能流分布达到了比较均匀的状态,使所有的吸热管都得到了利用且没有出现极端热流.吸热管温度特性研究表明,吸热管外壁温度分布存在非均匀特性,且吸热管周向温差可达50℃以上,参见图23,同时在典型研究工况下系统光热转换效率可达48.0%以上,参见图S8.

3 塔式系统(Solar Power Tower)

3.1 聚光集热系统

塔式聚光集热系统主要由定日镜场、吸热塔和安装在塔顶的吸热器组成^[80],如图24所示.太阳辐射经成百上千面定日镜反射至吸热器形成较高的能流密度,最终被吸热器内传热流体吸收.定日镜是一种由镜面、镜架、跟踪传动机构及其控制系统等组成的聚光装置(图25),用于跟踪并聚集反射太阳光线到达位于中心接收塔顶部的太阳能吸热器.大型塔式太阳能电站的定日镜面多选用钢化玻璃和镀铝或镀银背面镜^[81,82],镜面尺寸多在20~150 m²范围内^[83,84].塔式吸热器可以根据传热流体类型、结构形式和是否承压等进行分类.按照传热流体类型来分,目前国际上广泛采用的吸热器主要有熔融盐吸热器、空气吸热器和饱和水蒸气吸热器3种形式;按照结构形式来分,吸热器分为管式吸热器^[85,86](图26)、容积式吸热器(图27)、复合吸热器等.其中,管式吸热器又分为外

表 3 五种反射镜瞄准线($Y_g=Y_{aim}$, $Z_g=9.805$)的优化设计方案^[74]

Table 3 Five optimized design schemes for the aiming line^[74]

方案	各反射镜(M)的瞄准线在地面坐标系 $X_gY_gZ_g$ 中的y坐标值 y_{aim} (m)				
	M1~M5	M6~M10	M11~M15	M16~M20	M21~M25
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
3	0.006~-0.15	0.006~-0.15	0.006~-0.15	0.006~-0.15	0.006~-0.15
4	0.15	0.10	-0.20	0.10	-0.15
5	0.11~0.15	0.11~0.15	0.09~0.05	-0.01~-0.05	0.00

图 21 (网络版彩色)集热管与CPC结构示意图^[76]

Figure 21 (Color online) Sketch of evacuated tube and CPC^[76]

图 22 (网络版彩色)吸热管外壁LCR分布^[76]

Figure 22 (Color online) LCR distribution on the absorber tube wall^[76]

图 23 (网络版彩色)多管腔体吸热器吸热管壁温度分布^[75]

Figure 23 (Color online) Temperature distribution on absorber tube wall in multiple-tube cavity receiver^[75]

露管式吸热器和腔体管式吸热器。容积式吸热器可分为开式容积吸热器(如Phoebus型^[87]、SOLAIR型^[88])和闭式容积吸热器(REFOS型^[84]与DIAPR型^[89])。表4为目前主要的塔式电站吸热器形式、传热流体类型以及运行参数。

图 24 (网络版彩色)塔式聚光集热系统

Figure 24 (Color online) Schematic diagram of heliostat field and central receiver in solar power tower plant

图 25 (网络版彩色)定日镜^[82]

Figure 25 (Color online) Heliostat^[82]

图 26 (网络版彩色)管式吸热器^[85,86]. (a) 腔体吸热器; (b) 外露吸热器

Figure 26 (Color online) Tubular solar receiver^[85,86]. (a) Cavity receiver; (b) external receiver

3.2 聚光特性

在塔式系统中太阳辐射经定日镜场反射聚集到吸热表面或吸热体后,同样会形成不均匀的能流密度分布.针对塔式吸热器能流密度分布的实验测量

图 27 (网络版彩色)容积式吸热器^[84]
Figure 27 (Color online) Volumetric receiver^[84]

与模拟计算, 目前也开展了大量研究, 结果均显示吸热表面和吸热体内能流密度的不均匀性极为显著.

在实验测量方面, Ho 等人^[90]提出 PHLUX (Photographic Flux) 成像方法, 运用图像控制器 (Charge-coupled Device, CCD) 精确地测量到吸热器或者目标面的能流分布, 图 28 为运用 PHLUX 成像方法得到的管式腔体吸热器吸热表面的能流密度分布. 美国 Solar One 电站、Solar Two 电站^[91,92]、西班牙 TSA 电站^[93]等多个塔式电站的运行报告也均对吸热器内非均匀的能流分布进行了实验测量, 图 S9 为测量得到的 TSA 电站中 REFOS 吸热器进光口能流密度分布.

在模拟计算方面, 已经提出了多个用于计算塔式系统中太阳辐射传播过程的计算软件, 例如 MIRVAL,

SOLTRACE, HFLCAL, MUEEN, UNIZAR, HFLD 等^[94~101]. Garcia 等人^[94]对以上软件进行了总结和对比. 这些软件均可用于计算吸热器内的能流分布情况. Besarati 等人^[102]采用 HFLCAL 方法计算了腔体吸热器进光口处的能流分布情况, 结果显示光口处的太阳能能流峰值密度高达 5 MW m^{-2} , 且表现出强烈的非均匀性, 近似成高斯分布, 如图 29 所示. Baker 等人^[101]则采用 MIRVAL 方法得到了腔体吸热器内部吸热表面的非均匀的能流分布, 如图 S10 所示. Yu 等人^[103]运用 MCRT 方法对塔式系统中的太阳辐射传播进行了模拟, 给出了腔体吸热器内部吸热表面的能流分布的实时变化规律, 结果表明腔体内部吸热面的能流分布不但表现出强烈非均匀分布特性, 而且随时间变化明显. 本课题组分别针对带有腔体吸热器和容积式吸热器的塔式聚光集热系统的聚光特性进行了研究, 揭示了腔体吸热器内部吸热面与容积式吸热器吸热体内辐射能流分布的非均匀^[84,104~107]. 针对带有腔体吸热器的聚光集热系统, 提出了一种 MCRT 与杰勃哈特 (Gebhart) 方法结合的光学模拟方法, 该方法可以对太阳辐射在定日镜场的传播过程以及腔体内部的传播过程 (腔体效应) 进行完整描述, 通过对以上光学传播过程的完整模拟, 能够准确获得了腔体吸热表面太阳能流的时空变化规律^[106]. 图 30 给出了不同时刻 (8:00, 10:00, 14:00, 16:00) 吸热表面非均匀的能流分布规律: 太阳辐射能主要分布

表 4 主要塔式太阳能吸热器

Table 4 Summary of solar receiver in solar power tower plants built in the world

吸热器类型	电站/吸热器名称	国家	吸热管/体材料	传热流体	工质出口温度(℃)	是否承压
外露式	Solar Two	美国	316H	熔融盐	565	否
	Solar Tres	西班牙	316H	熔融盐	565	否
	德令哈	中国	—	熔融盐	—	否
管式	Solar One	美国	316H	水蒸气	—	是
	MSEE	美国	—	熔融盐	566	否
	DAHAN	中国	316H	水蒸气	400	是
	PS10	西班牙	—	水蒸气	230	是
	PS20	西班牙	—	水蒸气	230	是
	SSPS	西班牙	—	液态钠	530	是
	THEMIS	法国	—	熔融盐	450	否
容积式	TSA/Phoebus	西班牙	金属丝网	空气	950	否
	SOLAIR	西班牙	陶瓷	空气	815	否
	CESA-1/REFOS	西班牙	陶瓷	空气	900	是
	Consolar/DIAPR	以色列	金属丝网	空气	1200	是

图 28 (网络版彩色)管式腔体吸热器表面能流分布^[90]

Figure 28 (Color online) Solar flux distribution on the absorbing surfaces in tubular cavity receiver^[90]

图 29 (网络版彩色)腔体吸热器进光口辐射能流分布^[102]

Figure 29 (Color online) Solar flux distribution on the aperture of cavity receiver^[102]

图 30 (网络版彩色)腔体吸热器内部吸热面不同时刻太阳能流分布^[106]

Figure 30 (Color online) Solar flux distributions on the inner surfaces of cavity receiver at different times^[106]

在中心吸热面, 两侧的吸热面分布的太阳能则相对较少, 且吸热面上太阳辐射能的分布形状随时间发生偏移. 针对应用容积式吸热器的塔式聚光集热系统开展了基于MCRT方法的从定日镜场到吸热体内部太阳辐射传播与吸收的计算模型, 获得了多孔介质吸热体内的太阳辐射能流的分布情况^[84,104,105,107]. 参见图31所示, 可以看到吸热体内的能流分布表现出了强烈的非均匀性: 在吸热体底部能流密度最高, 吸热体两侧面能流密度较小.

总之, 在塔式聚光集热系统中, 不论是管式吸热器还是在容积式吸热器, 吸热面或吸热体内的太阳辐射能流分布都表现出强烈的非均匀性, 大部分太阳辐射能集中在吸热表面与吸热体的中心位置附近. 另外, 对于管式吸热器中的单根吸热管来说还存在着单侧受热的问题.

3.3 非均匀辐射能流特性的挑战及解决方法

塔式吸热器内吸热表面/吸热体内非均匀能流分

图 31 (网络版彩色)容积式吸热器吸热体辐射能流密度分布(夏至日正午)^[84]

Figure 31 (Color online) Solar flux distribution in the porous absorber of volumetric receiver (summer solstice, noon)^[84]

布同样会导致吸热表面/吸热体内温度分布不均。Fang等人^[108]与Tu等人^[109]在给定腔体吸热器进光口入射能流分布的基础上,采用MCRT方法计算腔体内部的辐射换热,并耦合了传热工质(水/工质)的流动沸腾换热及周围环境的换热,提出了一种评价吸热器性能的方法,并给出了吸热管壁非均匀的温度分布,如图32所示。本课题组将FVM与MCRT耦合模拟方法应用到容积式吸热器内的复杂换热过程,研究了非均匀能流边界条件下容积式吸热器内的吸热性能,也指出在多孔介质吸热体内温度分布存在强烈的非均匀性^[110,111]。

非均匀的温度分布严重影响塔式系统的安全性

图 32 (网络版彩色)水工质腔体吸热器沸腾管板吸热面非均匀的温度分布^[108]

Figure 32 (Color online) Non-uniform temperature distribution of the boiling tubes panels of water/steam cavity receiver^[108]

能与使用寿命,同样也主要体现在局部过热导致关键组件烧毁与传热工质分解劣化、热应力热变形导致结构失稳等方面。相比槽式系统和线性菲涅尔系统,塔式系统运行在更高的能流密度、更高的温度条件下,非均匀的温度分布所带来的挑战显得更加严峻。具体来说,对熔盐吸热器而言,在运行过程中常常需要经受高达 1.0 MW m^{-2} 以上的非均匀、高能流密度照射,使得吸热管管壁产生较高的温度,从而导致吸热器产生局部温度过高以及温度梯度过大。局部温度过高会造成熔盐管壁腐蚀^[92,112,113]、熔盐工质分解劣化、吸热管壁蠕变;温度梯度过大会导致过高的热应力,进而产生塑性变形。本课题组理论分析了非均匀能流分布条件下熔盐吸热管的温度分布与应力分布^[114],结果表明管外壁热应力最大,极易产生塑性变形,导致管壁损伤。针对有压容积式高温空气吸热器而言,不均匀的温度分布则主要会造成二级聚光器反射膜、石英玻璃窗和SiC多孔介质吸热体等关键组件的烧毁^[84,115]。此外,吸热器的昼夜起停,以及云层遮挡带来的热流密度时空变化等不利因素^[116],使得吸热管在较高的交变热应力作用下产生高温低周疲劳失效,也会严重影响吸热器结构的稳定性。在吸热器高温、变载荷的工作环境中,蠕变效应与疲劳现象二者会同时产生且相互影响,加剧非均匀温度分布对吸热器的不利影响。美国Solar Two电站在运行过程中曾报道发生吸热器结构破坏的现象^[91,92]。

基于塔式系统非均匀温度分布带来的挑战,诸多学者提出了一些解决方法,与1.3节类似,我们将这些解决方法分为以下3类:(1) 强化或优化传热流体侧传热性能;(2) 改善吸热器材料;(3) 优化聚光集热系统,包括优化定日镜场聚焦方式和改进吸热器结构。具体阐述如下。

一是,在传热流体侧采用强化换热技术或优化流路布置,通过提高传热流体的吸热能力来缓解非均匀能流带来的挑战。Karni等人^[117]提出了一种针肋状空气容积式吸热器,通过在吸热器内增加针肋提高吸热器内部的对流/辐射换热能力,防止吸热器局部过热。本课题组则针对管式吸热器提出通过在吸热管内插入多孔介质,强化传热流体侧的换热能力,并考虑到吸热管单侧受热的情况进一步提出通过调整多孔介质填充方式,使换热能力与非均匀的能流分布相适应,在提高吸热效率的同时能够更有效地减小吸热管的最高温度和温度梯度^[85]。图33给出了

图 33 (网络版彩色)多种多孔介质填充吸热管与光管吸热管壁温度分布对比^[85]

Figure 33 (Color online) Comparison of temperature distributions of absorber tube wall with and without porous insert^[85]

光管、全填充多孔介质、部分填充多孔介质条件下(图34)吸热管表面温度分布对比。结果表明,填充多孔介质能够有效地提高吸热管的吸热能力,同时可以减小避免的最高温度;且部分填充多孔介质的综合强化效果要优于全填充方式,可以更有效地减小吸热管壁的温度梯度和最高温度^[85]。针对特定的非均匀热流,合理设计多孔介质的填充方式和填充率等参数,可以更好地降低非均匀能流造成的不利影响。针对管式吸热器整个吸热面上太阳辐射能流分布的非均匀性,本课题组还通过对腔体吸热器进行光热耦合模拟,分析了在这种非均匀能流边界条件下传热流体不同的流动布置方式(图35)对吸热表面温度分布的影响^[118]。图36给出了两种流动布置方式下吸热面的温度分布云图。当熔盐从能量密度高的区域流入(布置(a)),温度迅速升高,整个吸热面处于较高的温度水平,热损失较大;当熔盐从能量密度低的区域流入(布置(b)),温度缓慢升高,整个吸热面处于相对较低的温度水平,热损失相对较小,能够获得更多的高温熔盐。可见,在吸热表面非均匀能流的分布条件下,吸热器内传热流体的流动布置方式对吸热器的吸热性能有着很大影响。Montes等人^[119]则根据吸热表面不均匀的能流分布对腔体式吸热器进行了更加详细的流路布置优化:根据对称的能流分布形式将吸热表面分为4个区域;根据能流分布的变化梯度调整吸热单元的宽度;通过调整吸热管径或吸热管

图 34 (网络版彩色)吸热管管内多孔介质填充方式^[85]

Figure 34 (Color online) Porous configurations inserted in the absorber tube^[85]

数目来调整传热流体的流速。这种流路布置方式能够使吸热器内传热流体的换热性能与吸热表面的能流分布形式相适应,减小热损失,提高吸热效率。Montes等人给出的流路布置优化方案参见图37。

二是,通过改善吸热器材料来提高吸热表面的能流分布的均匀性或降低关键部件温度。Fang等人^[120]、Tu等人^[109]提出通过优化吸热表面的太阳光谱吸收率分布提高腔体吸热器内表面太阳辐射能流分布的均匀性。图38为腔体吸热器表面光谱吸收率优化前后能流分布对比,可以看到,通过优化吸热表面的光谱吸收率,吸热表面的能流分布更加均匀。Röger等人^[121]提出在有压腔体容积式吸热器的石英玻璃窗口内表面添加红外反射涂层材料,以降低石英玻璃窗温度,模拟结果表明添加红外反射涂层后的石英玻璃窗平均温度降低了65 K。

三是,优化聚光集热系统,包括优化定日镜场聚焦方式和改进吸热器结构。在塔式系统中,为了提高吸热器的截断效率,减小光学损失,定日镜场往往采用单目标点聚焦方式,然而单目标聚焦会造成吸热器内辐射能流分布强烈的非均匀性。在尽可能减小光学损失的前提下,采用多目标点的聚焦方式可以有效降低吸热器内的峰值能流,提高能流分布的均匀性。Besarati等人^[102]为了降低腔体吸热器表面峰值能流密度,采用多目标点聚焦方式,并采用遗传算法对定日镜的聚焦目标点位置进行了优化,优化后的峰值能流密度(图39)与优化前的峰值能流(图29)相比降低了约10倍。Yu等人^[82]以1 MWe “DAHAN”塔式热发电站为基础,也提出了针对腔式吸热器的多目标点的定日镜聚焦模型,并基于TABU meta-heuristic方法对吸热器表面的能流密度分布进行了优化计算,结果表明相较于单目标聚焦方式而言,多目标点聚焦方式模拟得到的腔体吸热器内部表面能流密度分

图 35 (网络版彩色)腔体吸热器内两种典型的流动布置示意图^[118]
 Figure 35 (Color online) Two typical fluid flow layouts in the cavity receiver^[118]

布更加均匀,如图40所示. Sánchez-González等人^[122]通过采用多目标点聚焦方式对外露式柱体吸热器表

图 36 (网络版彩色)两种布置方式下吸热面温度分布云图^[118]
 Figure 36 (Color online) Comparison of temperature on the absorber surfaces between two fluid flow layouts^[118]

面能流分布进行了均化研究,图41给出了单目标点与多目标点聚焦方式下吸热表面能流分布的对比,可见峰值能流密度大大降低. 总之,定日镜场采用多目标点的聚焦方式能够有效地降低吸热表面/吸热体内的峰值能流,提高能流分布的均匀性. 除了采用多目标点的聚焦方式外,优化吸热器结构也可在一定

图 37 (网络版彩色)腔体式流路布置优化示意图^[119]
 Figure 37 Optimized fluid flow layout for cavity receiver^[119]

图 38 (网络版彩色)腔体吸热器表面光谱吸收率优化前后辐射能流分布对比. (a) 未优化; (b) 优化后^[109]

Figure 38 (Color online) Comparison of solar flux distribution on the inner surfaces in cavity receivers with (a) non-optimized solar absorptivity and (b) optimized solar absorptivity^[109]

图 39 (网络版彩色)采用多目标聚焦优化后腔体吸热器进光口入射能流分布^[102]

Figure 39 (Color online) Optimal solar flux distribution on the cavity aperture using multiple aiming points^[102]

图 40 (网络版彩色)单目标点与多目标点聚焦方式腔体吸热器吸热表面能流分布对比^[82]. (a) 1 个目标点; (b) 21 个目标点

Figure 40 (Color online) Comparison of solar flux distributions on inner surfaces of cavity receiver between (a) single aiming point and (b) 21 aiming points^[82]

图 41 (网络版彩色)柱式吸热器表面辐射能流分布对比^[122]. (a) 单目标聚焦; (b) 多目标点聚焦

Figure 41 (Color online) Comparison of solar flux distributions on external receiver surfaces between (a) single aiming point and (b) multiple aiming points^[122]

程度上提高能流分布的均匀性. Tu等人^[123]专门研究了腔体吸热器的几何结构对腔体内部辐射能流分布

均匀性的影响,通过调节腔体深度来提高吸热面的太阳辐射能流分布的均匀性,如图42所示,可以看到,随着腔体深度的增加,吸热表面能流分布越来越均匀.此外还有些学者提出了一些改进形式的吸热器结构以缓解非均匀的能流分布/温度分布所带来的挑战. RÅkger等人^[115]提出在容积式吸热器内增加射流冷却装置,通过射流冷却降低石英玻璃窗口温度,防止石英玻璃窗因过热而产生结晶、退化剥落而影响吸热器运行的安全性. Buck等人^[124]提出了一种将容积式空气吸热器和管式水/蒸汽吸热器两种吸热结构形式结合在一起的新型复合吸热器,在提高吸热效率的同时,可避免吸热器出现局部热斑的出现.

4 碟式系统(Solar Dish System)

4.1 聚光集热系统

碟式聚光集热系统主要包括旋转抛物面聚光器、吸热器(加热器)和双轴太阳跟踪装置^[125,126],如图43所示.吸热器放置在旋转抛物面聚光器的焦点处,入射太阳光经聚光器的反射和聚焦后被吸热器吸收,吸收的太阳能进一步转换为传热流体的热能^[127].

与其他几种聚光太阳能系统相比,碟式系统更加紧凑,一般将发电系统与吸热器进行耦合.目前的碟式太阳能热发电系统主要有两种:微型燃气轮机碟式太阳能热发电系统和斯特林发动机碟式太阳能热发电系统.不同的碟式太阳能热发电系统对应的吸热器型式也不同,微型燃气轮机碟式太阳能热发

图 42 (网络版彩色)不同腔体深度的腔体吸热器吸热表面能流分布对比(Δd 为深度的增加量)^[123]

Figure 42 (Color online) Comparison of solar flux distributions on the absorbing surfaces between cavity receivers with different depths (Δd is the increase of depth)^[123]

电系统一般使用的是容积式吸热器,其基本原理及性能与塔式太阳能热发电系统中的容积式吸热器类似;斯特林发动机碟式太阳能热发电系统对应的吸热器型式主要有外露式吸热器和腔体式吸热器,如图44所示.腔体式吸热器的吸热面在聚焦面之后,因而吸热面上的热流密度相对聚焦面上的要小,从而减小了吸热面表面的热应力;另外,形成的空腔可以减少热量损失.而外露式吸热器的聚焦面即是吸热面,因而吸热面表面的能流密度更高、热应力较大,由于没有遮挡,其辐射热损失和对流热损失较大.所以,腔体式吸热器一般用于中高温系统,而表面吸热器一般用于低温系统.

4.2 聚光特性

与前面的槽式、线性菲涅尔式、塔式3种聚光系统相类似,太阳光经过碟式聚光器旋转抛物面的反射后最终投射到位于旋转抛物面焦点处的吸热器表

图 43 (网络版彩色)碟式聚光集热系统光学示意图^[127]

Figure 43 (Color online) Schematic diagram of solar dish system^[127]

图 44 (网络版彩色)碟式太阳能热发电系统典型吸热器型式. (a) 外露式吸热器; (b) 腔体式吸热器

Figure 44 (Color online) Schematic diagram of two typical solar receivers. (a) External receiver; (b) cavity receiver

面. 由于聚光特性的存在, 碟式吸热器表面的热流分布也是极其不均匀的. 为了深入探究非均匀热流特性对碟式吸热器性能的影响, 至今为止已开展了大量的碟式聚光特性研究工作.

在实验方面, 大量的实验也证实了碟式吸热器入口热流分布的不均匀性^[128~131]. Johnston等人^[130]设计并搭建了基于CCD相机的热流测绘系统, 利用该系统绘制出了20 m²碟式聚光集热器焦点处的辐射流分布图. Jaramillo等人^[131]实验研究了吸热面的能流分布和温度分布情况, 不均匀的能流分布相应地导致了不均匀的温度分布. 更多的研究工作则集中在理论和模拟预测方面, 早期, Steinfeld等人^[132]采用高斯分布来近似描述吸热器入射太阳能流分布. 而随着计算机技术的发展, 越来越多的学者将光线分析方法应用到碟式聚光系统的研究中^[133], 其中MCRT方法是当前计算碟式太阳能系统聚光性能的主要方法. 例如Dai等人^[134]针对带有三维聚光器的碟式聚光器的聚光特性采用MCRT方法进行了数值模拟研究; Xia等人^[128]采用MCRT对分块镜的碟式聚光过程进行了数值模拟研究, 研究结果显示碟式吸热器的入射能流近似服从高斯分布. Shuai等人^[129]采用MCRT对单碟聚光器的聚光特性进行了数值模拟, 模拟得到的不同形状的腔体式吸热器吸热面的热流分布如图45所示, 可见, 对于不同形状的腔体式吸热器, 它们的吸热表面热流分布都呈现出显著的不均匀性. 本课题组在碟式太阳能热发电系统的聚光特

性研究方面也开展了大量的研究工作^[135,136], 并开发了一种基于MCRT方法的多阶多表面复杂太阳能聚焦集热系统设计方法^[137]. 基于该设计方法, 可以很方便地对不同碟式吸热器表面的辐射能流进行预测. 图46显示的是基于该设计方法预测的腔体式碟式吸热器内表面的能流分布, 可以看出能流分布是极不均匀, 中间高度区域的能流密度最高, 能流密度最高处出现在 $\theta=60^\circ$ 附近, 大约是最低处能流密度值的9倍.

4.3 非均匀辐射能流特性的挑战及解决方法

为了探究非均匀辐射能流特性对碟式吸热器性能的影响, 本课题组将提出的MCRT和FVM耦合模拟方法应用于碟式腔体吸热器内的光热耦合研究, 分析了非均匀能流对温度分布的影响^[138]. 研究结果显示, 在非均匀辐射能流边界条件下, 吸热器内壁面的温度分布极其不均匀, 参见图47所示^[139], 最低温度为1295.6 K, 而最高温度达到了1374.8 K. Wang等人^[140,141]采MCRT和FVM耦合的方法对碟式聚光系统多孔吸热器的热性能进行数值模拟, 研究了非均匀能流边界对多孔吸热器温度分布的影响, 参见图48, 可以看出, 非均匀能流边界导致了吸热器内的温度分布也表现出明显的不均匀性. 非均匀温度分布同样会给碟式系统的安全高效运行带来挑战也主要体现在温度梯度大导致严重的热应力热变形、局部温度过高导致传热流体变性两个方面. 由于碟式系统中的聚光比

图45 (网络版彩色)碟式系统几种形状腔体式吸热器能流分布^[129]

Figure 45 (Color online) Solar flux distribution on absorbing surfaces for several solar receivers in solar dish system^[129]

图 46 (网络版彩色)碟式系统腔体吸热器表面辐射能流分布^[136]. (a) 分布云图; (b) 局部分布曲线

Figure 46 (Color online) Solar flux distribution on cavity receiver surfaces in solar dish system^[136]. (a) Distribution map; (b) local solar flux distribution

更大、运行温度更高,因而这种挑战相对更加突出. Wang等人^[142]指出均匀的吸热器温度和高的光热效率是改善太阳能碟式系统可靠性和经济性的关键因素.

针对非均匀能流分布提出的挑战,在碟式系统中也开展了一些相关研究并提出了一些解决方法.例如将热管技术^[143]和相变蓄热技术^[144]应用到碟式吸热器上,由于这两种技术的相变过程可以保持恒温,因此可以起到很好的均温作用,从而减小热应

力,延长吸热器的使用寿命.本课题组基于MCRT方法和FVM的耦合计算模型,针对新型相变储热碟式吸热器进行了数值模拟研究,研究发现,提升相变材料的导热系数可以有效降低非均匀热流造成的不利影响^[144].而从光学角度设计出更加合理的吸热器结构也是解决途径之一,例如Shuai等人^[145]以辐射能均匀分布为设计目标,设计了一种“梨形”碟式吸热器,如图49所示.图50显示了新型梨形吸热器和常规球形吸热器的表面辐射能流对比情况,可以看出采用梨形吸热器使得吸热表面的能流分布更加均匀.此外,对于半球形碟式吸热器,Shuai等人^[146]进一步提出通过在进光口添加平凸透镜,同样可以达到提高辐射能流分布均匀性的目的,如图51所示.图52对比了添加平凸透镜的吸热器和无玻璃吸热器以及添加平面玻璃的三种吸热器表面辐射能流分布情况,可见在进光口添加平凸透镜,能够对入射光线起到在分配的目的,能够有效改善吸热器表面能流分布的均匀性.

5 总结与展望

本文对槽式、线性菲涅耳式、塔式、碟式4种聚

图 47 (网络版彩色)碟式系统中腔体吸热器内的温度分布^[139]. (a) 结构示意图; (b) 非均匀温度分布云图

Figure 47 (Color online) Temperature distribution on the solar dish cavity receiver surfaces^[139]. (a) Schematic diagram of cavity receiver; (b) non-uniform temperature distribution map

图 48 (网络版彩色)碟式系统中多孔介质吸热器内的温度分布^[141]. (a) 流体温度; (b) 固体温度

Figure 48 (Color online) Temperature distribution of porous absorber in solar dish system^[141]. (a) Fluid temperature distribution; (b) solid temperature distribution

图 49 “梨形”碟式吸热器示意图^[145]

Figure 49 Schematic diagram of pear-like receiver for solar dish system^[145]

图 50 球形和梨形吸热器表面能流对比^[145]

Figure 50 Comparison of solar flux distribution on receiver surfaces between spherical receiver and pear-like receiver^[145]

图 51 (网络版彩色)添加平凸透镜的半球形碟式吸热器示意图^[146]

Figure 51 (Color online) Schematic diagram of hemisphere receiver with plano-convex window in solar dish system^[146]

光型太阳能热发电技术中的聚光集热系统的非均匀能流特性及由此带来的问题和挑战进行了全面的总结,重点回顾了针对聚光集热系统非均匀能流特性带来问题所提出的解决方法的研究进展,同时介绍了本课题组在相关领域的研究成果。

图 52 (网络版彩色)几种半球形碟式吸热器能流分布对比^[146]

Figure 52 (Color online) Comparison of solar flux distribution in several hemisphere receivers in solar dish system^[146]

无论是对于塔式、碟式点聚焦聚光集热系统,还是对于槽式、线性菲涅尔式线聚焦聚光集热系统,也无论采用管式吸热器还是容积式吸热器,吸热表面/吸热体内的太阳能辐射能流分布都极为不均。不均匀的辐射能流分布必然造成吸热表面/吸热体内不均匀的温度分布,即吸热表面/吸热体内存在较大的温度梯度和过高的局部温度。这给聚光集热系统的安全高效运行带来很大的挑战,主要体现在以下方面: (1) 局部温度过高容易造成吸收涂层性能降低甚至破坏、传热流体的变性失效等,最终造成系统集热效率的降低; (2) 温度梯度大导致吸热器结构出现热应力热变形,容易造成吸热器关键部件的结构失稳破坏。

针对非均匀能流分布带来的问题和挑战,相关研究已经提出了一些解决方法。虽然根据槽式、线性菲涅尔式、塔式、碟式4种不同形式的聚光集热系统,提出的具体解决技术方案千差万别,但已有的解决措施大致都从以下3方面着手。(1) 优化传热流体侧的换热:例如在槽式集热管内采用布置纵向涡发生器、多孔介质、螺旋涡发生器、翅片等强化传热技术,对塔式管式吸热器采用合理的流路布置,在碟式吸热器内采用热管技术; (2) 改善吸热材料性质,一方面包括改善吸热材料、选择性涂层的物性,提高耐高温、抵抗热应力热变形的能力,更重要的是通过改善材料性质,提高吸热表面/吸热体内温度分布的均匀性,例如槽式集热器内通过提高吸热管的导热系数减小周向温度梯度改善吸热管弯曲变形的问题,合理布置腔体式吸热器内吸热表面的发射率提高吸热表面辐射能流分布的均匀性等; (3) 优化聚光系统、吸

热器结构,例如在槽式系统内合理布置吸热管位置并增设二次反射镜、采用“变焦距”聚光器等方式来均化吸热管表面的能流分布,在线性非涅尔系统内通过采用合理的聚焦策略来提高吸热器表面的能流分布均匀性,在塔式系统中通过采用多点聚焦的策略来提高吸热表面能流分布的均匀性、调整腔体吸热器几何结构参数、增设射流冷却装置等,在碟式系统内通过优化吸热器结构或者增设光学元件(透镜)等措施来均化吸热表面的能流分布。

非均匀的能流分布之所以给聚光集热系统带来诸多挑战,其根源在于吸热器内均匀的吸热能力与吸热表面/吸热体内非均匀的能流分布之间不能相互匹配,进而导致吸热表面/吸热体不均匀的温度分布。进一步对已有研究方法总结,我们可以发现,上述解

决方法可归纳总结为两大类(表5):

第一类是提高吸热器的“吸热”能力:通过采用强化换热技术、对流路进行合理布置、提高吸热管导热系数等方式,优化吸热器的“吸热”能力,使之与非均匀的能流分布相匹配。

第二类是提高“聚光”性能的均匀性:通过合理的聚焦方式、优化聚光器和吸热器结构等方式提高“聚光”性能的均匀性,使之与均匀的吸热能力相匹配。

因此要解决聚光集热系统内非均匀辐射特性所带来的挑战,就必须解决好“聚光”与“吸热”不匹配的矛盾。这也是以后相关研究所要努力的方向,即:以“光热匹配”为原则,对聚光集热系统进行优化,解决“聚光”与“吸热”不匹配的矛盾,提高“聚光”过程与“集热”过程的协同性。

表 5 缓解非均匀能流分布带来问题的方法总结与分类

Table 5 Summary and classification of the methods proposed to tackle the problems caused by non-uniform solar flux distribution in CSP system

系统形式	解决方案	方法分类
槽式	优化聚光器结构,如采用“变焦距”聚光器 ^[57] ,均化吸热管表面能流分布	改善聚光性能
	环形空间增设二次反射装置,均化吸热管表面能流分布 ^[58]	改善聚光性能
	调整吸热管位置,增设二次反射装置,均化吸热管表面能流分布 ^[34,59]	改善聚光性能
	采取内置翅片、多孔介质、纵向涡发生器、添加纳米流体等强化换热技术,提高对流换热性能 ^[13,14,39,40,45-52,54,55]	改善吸热性能
	采用导热系数大的吸热材料代替不锈钢 ^[13,37,39,56]	改善吸热性能
线性非涅尔式	优化跟踪聚焦方式,均化吸热表面能流分布 ^[74,75,78]	改善聚光性能
	优化主反射镜场,均化吸热表面能流分布 ^[74,78]	改善聚光性能
	优化二次反射镜结构,均化吸热表面能流分布 ^[76,79]	改善聚光性能
塔式	优化聚焦方式,均化吸热表面能流分布 ^[82,102,122]	改善聚光性能
	优化光学结构,如通过优化吸热材料太阳光谱吸收率分布 ^[109,120] ,增设红外反射涂层材料 ^[121] ,提高辐射能流分布的均匀性	改善聚光性能
	优化腔体几何结构,充分利用腔体效应,提高辐射能流分布的均匀性 ^[123]	改善聚光性能
	改进吸热器结构,如增加冷却结构、采取冷却措施 ^[115] ,采用针肋状吸热体结构等提高换热性能 ^[117] ,采用管式与容积式复合吸热器 ^[124]	改善吸热性能
	优化布置吸热器管路,调节传热流体流动 ^[119]	改善吸热性能
	吸热管内采取强化换热措施,如插入多孔介质 ^[85]	改善吸热性能
碟式	优化吸热器几何结构,如采用“梨形”吸热器 ^[145]	改善聚光性能
	增设光学元件,如在腔体吸热器进光口增设平凸透镜 ^[146]	改善聚光性能
	应用热管技术 ^[143] 、相变蓄热技术 ^[144]	改善吸热性能

参考文献

1 International Energy Agency. World energy outlook 2015. Paris, 2014

2 Lovegrove K, Stein W. Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications. Cambridge (UK): Woodhead Publishing Limited, 2012

3 Armaroli N, Balzani V. Energy for a Sustainable World. Weinheim: Wiley-VCH, 2011

- 4 Margolis R, Coggeshall C, Zuboy J. Sunshot Vision Study. Washington: US Department of Energy, 2012
- 5 Zhang H L, Baeyens J, Degrevè J, et al. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renew Sust Energ Rev*, 2013, 22: 466–481
- 6 Gui X H, Yuan X G, Song X E, et al. Modelling and simulation of solar dynamic system cell heat pipe receiver (in Chinese). *Power Syst Technol*, 26: 103–107 [桂晓宏, 袁修干, 宋香娥, 等. 太阳能热动力系统单元热管吸热器建模与仿真. *中国电机工程学报*, 2006, 26: 103–107]
- 7 Xiao X, Zhang P, Shao D D, et al. Experimental and numerical heat transfer analysis of a V-cavity absorber for linear parabolic trough solar collector. *Energ Convers Manage*, 2014, 86: 49–59
- 8 Luz International Limited (LIL). Solar electric generating system IX project description: LIL documentation. Technical Report. Los Angeles, 1990
- 9 Winter C J, Sizman R L, VantHull L L. *Solar Power Plants-Fundamentals, Technology, System, Economics*. Berlin: Springer, 2012
- 10 Dudley V, Kolb G, Sloan M, et al. SEGS LS2 solar collector—Test results. Technical Report. Albuquerque: Sandia National Labs, 1994. SANDIA94-1884
- 11 Price H, Lufpert E, Kearney D, et al. Advances in parabolic trough solar power technology. *J Sol Energ-T ASME*, 2002, 124: 109–125
- 12 Reddy V S, Kaushik S C, Ranjan K R, et al. State of the art of solar thermal power plants—A review. *Renew Sust Energ Rev*, 2013, 27: 258–273
- 13 Delussu G. A qualitative thermo-fluid-dynamic analysis of a CO₂ solar pipe receiver. *Sol Energy*, 2012, 86: 926–934
- 14 Massidda L, Varone A. A numerical analysis of a high temperature solar collecting tube using gas as a heat transfer fluid. Technical Report. Pula: Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia (CRS4), 2007
- 15 Kearney D, Herrmann U, Nava P, et al. Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field. *J Sol Energ-T ASME*, 2006, 125: 170–175
- 16 Ruegamer T, Kamp H, Kuckelkorn T, et al. Molten salt for parabolic trough applications: System simulation and scale effects. *Energy Procedia*, 2014, 49: 1523–1532
- 17 Cheng Z D, He Y L, Cui F Q, et al. Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method. *Sol Energy*, 2012, 86: 1770–1784
- 18 Wang Y, Liu Q, Lei J, et al. A three-dimensional simulation of a parabolic trough solar collector system using molten salt as heat transfer fluid. *Appl Therm Eng*, 2014, 70: 462–476
- 19 Riffelmann K, Neumann A, Ulmer S. Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region. *Sol Energy*, 2006, 80: 1303–1313
- 20 Lufpert E, Pottler K, Ulmer S, et al. Parabolic trough optical performance analysis techniques. *J Sol Energ-T ASME*, 2007, 129: 147–152
- 21 Schiricke B, Pitz-Paal R, Lufpert E, et al. Validation of optical modeling of parabolic trough collectors by flux measurement. In: *Proceedings of ASME 2007 Energy Sustainability Conference*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2007. 1071–1076
- 22 Schiricke B, Pitz-Paal R, Lufpert E, et al. Experimental verification of optical modeling of parabolic trough collectors by flux measurement. *J Sol Energ-T ASME*, 2009, 131: 011004
- 23 Jeter S M. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation. *Sol Energy*, 1986, 37: 335–345
- 24 Jeter S M. Analytical determination of the optical performance of practical parabolic trough collectors from design data. *Sol Energy*, 1987, 39: 11–21
- 25 Daly J C. Solar concentrator flux distributions using backward ray tracing. *Appl Opt*, 1979, 18: 2696–2699
- 26 Grena R. Optical simulation of a parabolic solar trough collector. *Int J Sustainable Energy*, 2010, 29: 19–36
- 27 Wirz M, Roesle M, Steinfeld A. Three-dimensional optical and thermal numerical model of solar tubular receivers. *J Sol Energ-T ASME*, 2012, 134: 363–373
- 28 Khanna S, Kedare S, Singh S. Analytical expression for circumferential and axial distribution of absorbed flux on a bent absorber tube of solar parabolic trough concentrator. *Sol Energy*, 2013, 92: 26–40
- 29 Christian J M, Ho C K, Christian J M, et al. Finite element modeling and ray tracing of parabolic trough collectors for evaluation of optical intercept factors with gravity loading. In: *Proceedings of ASME 2011 Energy Sustainability Conference*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2011. 577–585
- 30 Xiao J, He Y L, Cheng Z D, et al. Performance analysis of parabolic trough solar collector (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2009, 30: 729–733 [肖杰, 何雅玲, 程泽东, 等. 槽式太阳能集热器集热性能分析. *工程热物理学报*, 2009 30: 729–733]
- 31 He Y L, Xiao J, Cheng Z D, et al. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector. *Renew Energ*, 2011, 36: 976–985
- 32 Cheng Z D, He Y L, Cui F Q. Studies on concentrating solar collectors with a new modelling method and unified MCRT code (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2127–2136 [程泽东, 何雅玲, 崔福庆. 聚光集热系统—MCRT 建模与聚光特性. *科学通报*, 2012, 57: 2127–2136]

- 33 Cheng Z D, He Y L, Xiao J, et al. Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector. *Int Commun Heat Mass*, 2010, 37: 782–787
- 34 Wang K, He Y L, Cheng Z D. A design method and numerical study for a new type parabolic trough solar collector with uniform solar flux distribution. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 531–540
- 35 Cheng Z D, He Y L, Cui F Q. A new modelling method and unified code with MCRT for concentrating solar collectors and its applications. *Appl Energy*, 2013, 101: 686–698
- 36 Cheng Z D, He Y L, Wang K, et al. A detailed parameter study on the comprehensive characteristics and performance of a parabolic trough solar collector system. *Appl Therm Eng*, 2014, 63: 278–289
- 37 Almanza R, Lentz A, Jimenez G. Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs. *Sol Energy*, 1997, 61: 275–278
- 38 Kearney D, Kelly B, Herrmann U, et al. Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field. *Energy*, 2004, 29: 861–870
- 39 Aldali Y, Muneer T, Henderson D. Solar absorber tube analysis: Thermal simulation using CFD. *Int J Low Carbon Tech*, 2013, 8: 14–19
- 40 Muñoz J, Abánades A. Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools. *Appl Energy*, 2011, 88: 4139–4149
- 41 Moens L, Blake D M. Mechanism of hydrogen formation in solar parabolic trough receivers. *J Sol Energ-T ASME*, 2010, 132: 031006
- 42 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: 444–452
- 43 He Y L, Tao W Q. Convective heat transfer enhancement: Mechanism, techniques and performance evaluation. *Adv Heat Transfer*, 2014, 46: 87–186
- 44 Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer J P. Heat transfer enhancement in a parabolic trough receiver using wall detached twisted tape inserts. In: *Proceedings of 7th International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2013. V06BT7A031–V06BT07A
- 45 Sokhansefat T, Kasaeian A B, Kowsary F. Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al_2O_3 /synthetic oil nanofluid. *Renew Sust Energy Rev*, 2014, 33: 636–644
- 46 Reddy K, Satyanarayana G. Numerical study of porous finned receiver for solar parabolic trough concentrator. *Eng Appl Comp Fluid*, 2008, 2: 172–184
- 47 Reddy K, Kumar K R, Satyanarayana G. Numerical investigation of energy-efficient receiver for solar parabolic trough concentrator. *Heat Transfer Eng*, 2008, 29: 961–972
- 48 Ravi Kumar K, Reddy K. Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver. *Appl Energy*, 2009, 86: 1804–1812
- 49 Ravi K K, Reddy K. Effect of porous disc receiver configurations on performance of solar parabolic trough concentrator. *Heat Mass Transfer*, 2012, 48: 555–571
- 50 Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer J P. Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts. *Appl Energy*, 2014, 136: 989–1003
- 51 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 Energy*, 2013, 102: 449–460
- 52 Zheng Z J, Li M J, He Y L. Optimization of porous insert configurations for heat transfer enhancement in tubes based on genetic algorithm and CFD. *Int J Heat Mass Tran*, 2015, 87: 376–379
- 53 He Y L, Zhang Y W. Advances and outlooks of heat transfer enhancement by longitudinal vortex generators. *Adv Heat Transfer*, 2012, 44: 119–185
- 54 He Y L, Cheng Z D, Tao W Q, et al. A novel parabolic trough solar receiver with unilateral longitudinal vortex generators (in Chinese). PRC Patent, ZL200810231652.0, 2010-06-02 [何雅玲, 程泽东, 陶文铨, 等. 一种单侧多纵向涡强化换热的聚焦槽式太阳能吸热器. 中国专利, ZL200810231652.0, 2010-06-02]
- 55 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
- 56 Flores V, Almanza R. Behavior of the compound wall copper-steel receiver with stratified two-phase flow regimen in transient states when solar irradiance is arriving on one side of receiver. *Sol Energy*, 2004, 76: 195–198
- 57 Tsai C Y, Lin P D. Optimized variable-focus-parabolic-trough reflector for solar thermal concentrator system. *Sol Energy*, 2012, 86: 1164–1172
- 58 Gee R, Winston R. A Non-Imaging Secondary Reflector for Parabolic Trough Concentrators. Technical Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2001
- 59 He Y L, Wang K, Li M J, et al. A new parabolic trough solar collector and its design method (in Chinese). PRC Patent, ZL201310162862.X, 2015-08-05 [何雅玲, 王坤, 李明佳, 等. 一种太阳能聚光集热器及其设计方法. 中国专利, ZL201310162862.X, 2015-08-05]
- 60 Häberle A, Zahler C, de Lalaing J, et al. The Solarmundo Project: Advanced technology for solar thermal power generation. In: *Proceedings*

- of Solar World Congress. Freiburg: ISES, 2001
- 61 Mills D R, Le Lièvre P, Morrison G. Solar Preheating of the Liddell Coal-fired Power plant. In: Proceedings of Australian and New Zealand Solar Energy Society (ANZSES) Annual Conference. Melbourne, 2003
 - 62 Bernhard R, Laabs H G, de Lalaing J, et al. Linear Fresnel Collector Demonstration on the PSA. Part I—Design; Construction and Quality Control. In: Proceedings of 14th International Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES) Symposium. Las Vegas, 2008
 - 63 Nixon J D, Davies P A. Cost-exergy optimisation of linear Fresnel reflectors. *Sol Energy*, 2012, 86: 147–156
 - 64 Rodríguez R M. Nuevos sistemas de potencia para generación termosolar con generación directa de vapor: Caso de éxito de Puerto Errado2. *Dyna*, 2012, 87: 514–517
 - 65 Liu G J, Zuo J, Zheng J T, et al. Performance study of linear Fresnel solar thermal system (in Chinese). *Therm Power Genera*, 2014, (1): 66–68 [刘冠杰, 左钧, 郑建涛, 等. 菲涅尔式太阳能集热系统性能研究. *热力发电*, 2014, (1): 66–68]
 - 66 Goswami R P, Negi B S, Sehgal H K, et al. Optical designs and concentration characteristics of a linear Fresnel reflector solar concentrator with a triangular absorber. *Sol Energy Mat*, 1990, 21: 237–251
 - 67 Mathur S S, Neci B S, Kandpal T C. Geometrical designs and performance analysis of a linear Fresnel reflector solar concentrator with a flat horizontal absorber. *Int J Energ Res*, 1990, 14: 107–124
 - 68 Sootha G D, Negi B S. A comparative study of optical designs and solar flux concentrating characteristics of a linear Fresnel reflector solar concentrator with tubular absorber. *Sol Energ Mat Sol C*, 1994, 32: 169–186
 - 69 Feuermann D, Gordon J M. Analysis of a two-stage linear Fresnel reflector solar concentrator. *J Sol Energ-T ASME*, 1991, 113: 272–279
 - 70 Häberle A, Zahler C, Lerchenmüller H, et al. The solarmundo line focussing Fresnel collector: Optical and thermal performance and cost calculations. In: Proceedings of 11th International Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES) Symposium. Zürich, 2002
 - 71 Mills D R, Morrison G L. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants. *Sol Energy*, 2000, 68: 263–283
 - 72 Abbas R, Montes M J, Piera M, et al. Solar radiation concentration features in Linear Fresnel Reflector arrays. *Energ Convers Manage*, 2012, 54: 133–144
 - 73 Abbas R, Montes M J, Rovira A, et al. Parabolic trough collector or linear Fresnel collector: A comparison of optical features including thermal quality based on commercial solutions. *Sol Energy*, 2016, 124: 198–215
 - 74 Qiu Y, He Y L, Cheng Z D. Optical performance investigation and optimization of a linear Fresnel reflector solar collector (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2015, 12: 2551–2556 [邱羽, 何雅玲, 程泽东. 线性菲涅尔太阳能系统光学性能研究与优化. *工程热物理学报*, 2015, 12: 2551–2556]
 - 75 Qiu Y, He Y L, Wu M, et al. A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver. *Renew Energy*, 2016, 97: 129–144
 - 76 Qiu Y, He Y L, Cheng Z D, et al. Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods. *Appl Energy*, 2015, 146: 162–173
 - 77 Dey C J. Heat transfer aspects of an elevated linear absorber. *Sol Energy*, 2004, 76: 243–249
 - 78 Eck M, Uhlig R, Mertins M, et al. Thermal load of direct steam-generating absorber tubes with large diameter in horizontal linear Fresnel collectors. *Heat Transfer Eng*, 2007, 28: 42–48
 - 79 Grena R, Tarquini P. Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid. *Energy*, 2011, 36: 1048–1056
 - 80 Behar O, Khellaf A, Mohammedi K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renew Sust Energ Rev*, 2013, 23: 12–39
 - 81 Griffith D T, Moya A C, Ho C K, et al. Structural dynamics testing and analysis for design evaluation and monitoring of heliostats. In: Proceedings of 5th International Conference on Energy Sustainability. American Society of Mechanical Engineers, 2011. 567–576
 - 82 Yu Q, Wang Z F, Xu E. Analysis and improvement of solar flux distribution inside a cavity receiver based on multi-focal points of heliostat field. *Appl Energy*, 2014, 136: 417–430
 - 83 Wu Z Y, Gong B, Wang Z F, et al. An experimental and numerical study of the gap effect on wind load on heliostat. *Renew Energ*, 2010, 35: 797–806
 - 84 He Y L, Cui F Q, Cheng Z D, et al. Numerical simulation of solar radiation transmission process for the solar tower power plant: From the heliostat field to the pressurized volumetric receiver. *Appl Thermal Eng*, 2013, 61: 583–595
 - 85 Zheng Z J, Li M J, He Y L. Thermal analysis of solar central receiver tube with porous inserts and non-uniform heat flux. *Appl Energy*, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.11.039
 - 86 Li X, Kong W Q, Wang Z F, et al. Thermal model and thermodynamic performance of molten salt cavity receiver. *Renew Energy*, 2010, 35: 981–988
 - 87 Cordes S, Haeger M, Meinecke W, et al. Phoebus technology program solar air receiver (TSA), operational experience and test evaluation of the 25 MW volumetric air receiver test facility at the plataforma solar de Almeria. In: Proceedings of 7th International Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES) Symposium. Moskau, 1994

- 88 Ávila-Marín A L. Volumetric receivers in solar thermal power plants with central receiver system technology: A review. *Sol Energy*, 2011, 85: 891–910
- 89 Kribus A, Doron P, Rubin R, et al. Performance of the directly-irradiated annular pressurized receiver (DIAPR) operating at 20 Bar and 1200°C. *J Sol Energy Eng-T ASME*, 2001, 123: 10
- 90 Ho C K, Khalsa S S, Gill D, et al. Evaluation of a new tool for heliostat field flux mapping. In: *Proceedings of 17th International Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES) Symposium*. Granada, 2011
- 91 Reilly H E, Kolb G J. An Evaluation of Molten-salt Power Towers Including Results of the Solar Two Project. Technical Report. Albuquerque, Livermore: Sandia National Labs, 2001. SAND2001-3674
- 92 Litwin R Z. Receiver System: Lessons Learned From Solar Two. Technical Report. Canoga Park: Sandia National Labs, 2002. SAND2002-0084
- 93 Bräuning T, Denk T, Pfänder M, et al. Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems (REFOS). *J Sol Energy Eng-T ASME*, 2002, 124: 2–9
- 94 Garcia P, Ferriere A, Bezier J J. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review. *Sol Energy*, 2008, 82: 189–197
- 95 Schwarzbözl P, Pitz-Paál R, Schmitz M. Visual HFLCAL—A software tool for layout and optimization of heliostat fields. In: *15th International Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES) Symposium*. Berlin, 2009
- 96 Collado F, Gomez A, Turégano J. An analytic function for the flux density due to sunlight reflected from a heliostat. *Sol Energy*, 1986, 37: 215–234
- 97 Siala F, Elayeb M. Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout. *Renew Energy*, 2001, 23: 77–92
- 98 Wei X D, Lu Z, Wang Z F, et al. A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant. *Renew Energy*, 2010, 35: 1970–1975
- 99 Leary P, Hankins J. User's guide for MIRVAL: A Computer Code for Comparing Designs of Heliostat-receiver Optics for Central Receiver Solar Power Plants. Technical Report. Livermore: Sandia National Labs, 1979. SAND-77-8280
- 100 Wendelin T. SolTRACE: A new optical modeling tool for concentrating solar optics. In: *Proceedings of ASME 2003 International Solar Energy Conference*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2003. 253–260
- 101 Baker A F, Faas S E, Radosevich L G, et al. US-Spain Evaluation of the Solar One and CESA-I Receiver and Storage Systems. Technical Report. Livermore: Sandia National Labs, 1989. SAND-88-8262
- 102 Besarati S M, Yogi G D, Stefanakos E K. Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant. *Energ Convers Manage*, 2014, 84: 234–243
- 103 Yu Q, Wang Z F, Xu E, et al. Modeling and simulation of 1 MWe solar tower plant's solar flux distribution on the central cavity receiver. *Simul Model Pract Th*, 2012, 29: 123–136
- 104 Cui F Q, He Y L, Cheng Z D, et al. Radiation transmission simulation for volumetric solar receiver by Monte Carlo method (in Chinese). *CIESC J*, 2011, 62: 60–65 [崔福庆, 何雅玲, 程泽东, 等. 有压腔式吸热器内辐射传播过程的 Monte Carlo 模拟. *化工学报*, 2011, 62: 60–65]
- 105 Cui F Q, He Y L, Li D, et al. Parameter analysis of radiation transmission in volumetric receiver (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2011, 32: 1375–1378 [崔福庆, 何雅玲, 李东, 等. 塔式吸热器中辐射传播过程的参数分析. *工程热物理学报*, 2011, 32: 1375–1378]
- 106 Wang K, He Y L, Qiu Y, et al. A novel integrated simulation approach couples MCRT and Gebhart methods to simulate solar radiation transfer in a solar power tower system with a cavity receiver. *Renew Energy*, 2016, 89: 93–107
- 107 He Y L, Cui F Q, Xiao J. A calculation program with Monte Carlo ray tracing method for multiple types of solar collectors (in Chinese). China Software Copyright, Registration number: 2009SR058621, Registration date: 2009.12.17 [何雅玲, 崔福庆, 肖杰. 多种聚光器的蒙特卡罗光线追迹计算软件. 获软件著作权, 登记号: 2009SR058621, 登记日期: 2009.12.17]
- 108 Fang J B, Wei J J, Dong X W, et al. Thermal performance simulation of a solar cavity receiver under windy conditions. *Sol Energy*, 2011, 85: 126–38
- 109 Tu N, Wei J J, Fang J B. Numerical investigation on uniformity of heat flux for semi-gray surfaces inside a solar cavity receiver. *Sol Energy*, 2015, 112: 128–143
- 110 Cheng Z D, He Y L, Cui F Q. Numerical investigations on coupled heat transfer and synthetical performance of a pressurized volumetric receiver with MCRT–FVM method. *Appl Therm Eng*, 2013, 50: 1044–1054
- 111 He Y L, Cheng Z D, Cui F Q, et al. Numerical investigations on a pressurized volumetric receiver: Solar concentrating and collecting modelling. *Renew Energy*, 2012, 44: 368–379
- 112 Prairie M R, Pacheco J E, Gilbert R L, et al. Performance of the solar two central receiver power plant. *Office Scient Tech Inform*, 1998, 9: 181–187
- 113 Wang J N, Li X, Chang C. Analysis of the influence factors on the overheat of molten salt receiver in solar tower power plants (in Chinese).

- Proc CSEE, 2010, 30: 107–114 [王建楠, 李鑫, 常春. 太阳能塔式热电站熔融盐吸热器过热故障的影响因素分析. 中国电机工程学报, 2010, 30: 107–114]
- 114 Du B C, He Y L, Zheng Z J, et al. Analysis of thermal stress and fatigue fracture for the solar tower molten salt receiver. *Appl Therm Eng*, 2016, 99: 741–750
 - 115 RÄkger M, PfÄnder M, Buck R. Multiple air-jet window cooling for high-temperature pressurized volumetric receivers: Testing, evaluation, and modeling. *J Sol Energy Eng-T ASME*, 2006, 128: 265–274
 - 116 Augsburg G, Favrat D. Modelling of the receiver transient flux distribution due to cloud passages on a solar tower thermal power plant. *Sol Energy*, 2013, 87: 42–52
 - 117 Karni J, Kribus A, Rubin R, et al. The “Porcupine”: A novel high-flux absorber for volumetric solar receivers. *J Sol Energy Eng-T ASME*, 1998, 120: 85–95
 - 118 Wang K, He Y L, Qiu Y, et al. Integrated numerical study on the coupled photon-thermal conversion process in the central solar molten salt cavity receiver (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1640–1649 [王坤, 何雅玲, 邱羽, 等. 塔式太阳能熔盐腔体吸热器一体化光热耦合模拟研究. 科学通报, 2016, 61: 1640–1649]
 - 119 Montes M J, Rovira A, Martínez-Val J M, et al. Proposal of a fluid flow layout to improve the heat transfer in the active absorber surface of solar central cavity receivers. *Appl Therm Eng*, 2012, 35: 220–232
 - 120 Fang J B, Tu N, Wei J J. Effects of absorber emissivity on thermal performance of a solar cavity receiver. *Adv Cond Matter Phys*, 2014, 2014: 1–10
 - 121 Röger M, Rickers C, Uhlig R, et al. Infrared-reflective coating on fused silica for a solar high-temperature receiver. *J Sol Energy Eng-T ASME*, 2009, 131: 945–955
 - 122 Sánchez-González A, Santana D. Solar flux distribution on central receivers: A projection method from analytic function. *Renew Energy*, 2015, 74: 576–587
 - 123 Tu N, Wei J J, Fang J B. Numerical study on thermal performance of a solar cavity receiver with different depths. *Appl Therm Eng*, 2014, 72: 20–28
 - 124 Buck R, Barth C, Eck M, et al. Dual-receiver concept for solar towers. *Sol Energy*, 2006, 80: 1249–1254
 - 125 Kongtragool B, Wongwises S. A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renew Sust Energy Rev*, 2003, 7: 131–154
 - 126 Li Y Q, He Y L, Wang W W. Optimization of solar-powered Stirling heat engine with finite-time thermodynamics. *Renew Energy*, 2011, 36: 421–427
 - 127 Tlili I, Timoumi Y, Nasrallah S B. Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application. *Renew Energy*, 2008, 33: 1911–1921
 - 128 Xia X L, Dai G L, Shuai Y. Experimental and numerical investigation on solar concentrating characteristics of a sixteen-dish concentrator. *Int J Hydrogen Energy*, 2012, 37: 18694–18703
 - 129 Shuai Y, Xia X L, Tan H L. Numerical simulation and experiment research of radiation performance in a dish solar collector system. *Front Energy Power Eng China*, 2010, 4: 488–495
 - 130 Johnston G. Focal region measurements of the 20 m² tiled dish at the Australian National University. *Sol Energy*, 1998, 63: 117–124
 - 131 Jaramillo O A, Pérez-Rábago C A, Arancibia-Bulnes C A, et al. A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation. *Renew Energy*, 2008, 33: 2322–2328
 - 132 Steinfeld A, Schubnell M. Optimum aperture size and operating temperature of a solar cavity-receiver. *Sol Energy*, 1993, 50: 19–25
 - 133 Li H R, Huang W D, Huang F R, et al. Optical analysis and optimization of parabolic dish solar concentrator with a cavity receiver. *Sol Energy*, 2013, 92: 288–297
 - 134 Dai G L, Xia X L, Sun C, et al. Numerical investigation of the solar concentrating characteristics of 3D CPC and CPC-DC. *Sol Energy*, 2011, 85: 2833–2842
 - 135 Cui F Q, He Y L, Cheng Z D, et al. Study on combined heat loss of a dish receiver with quartz glass cover. *Appl Energy*, 2013, 112: 690–696
 - 136 Cui F Q, He Y L, Cheng Z D, et al. Modeling of the dish receiver with the effect of inhomogeneous radiation flux distribution. *Heat Transfer Eng*, 2014, 35: 780–790
 - 137 He Y L, Cheng Z D, Cui F Q, et al. A design method for complex solar collectors with multiple surfaces expressed by a number equations with different orders (in Chinese). PRC Patent, ZL201110096876.7, 2013-07-17 [何雅玲, 程泽东, 崔福庆, 等. 一种多阶多表面复杂太阳能聚焦集热系统设计方法. 中国专利, ZL201110096876.7, 2013-07-17]
 - 138 Cui F Q. Investigation and optimization on solar radiation capture and conversion characteristics for concentrating solar collector sub-systems (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013 [崔福庆, 太阳能聚焦集热系统光捕获与转换过程的光热特性及性能优化研究. 博士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2013]

- 139 Li Z G, Tang D W, Du J L, et al. Study on the radiation flux and temperature distributions of the concentrator-receiver system in a solar dish/Stirling power facility. *Appl Therm Eng*, 2011, 31: 1780–1789
- 140 Cui F Q, He Y L, Cheng Z D. Numerical simulation of the combined heat loss of a dish receiver under non-homogeneous radiation flux distribution. In: *Proceedings of 2011 International Workshop on Heat Transfer Advances for ENERGY conservation and Pollution Control (IWHT2011)*. Xi'an, 2011
- 141 Wang F Q, Shuai Y, Tan H P, et al. Thermal performance analysis of porous media receiver with concentrated solar irradiation. *Int J Heat Mass Tran*, 2013, 62: 247–254
- 142 Wang F Q, Shuai Y, Tan H P, et al. Heat transfer analyses of porous media receiver with multi-dish collector by coupling MCRT and FVM method. *Sol Energy*, 2013, 93: 158–168
- 143 Adkins D R, Andraka C E, Moss T A. Development of a 75-kW heat-pipe receiver for solar heat-engines. In: *Proceedings of 9th International Heat Pipe Conference*. Albuquerque, 1995
- 144 Tao Y B, He Y L, Cui F Q, et al. Numerical study on coupling phase change heat transfer performance of solar dish collector. *Sol Energy*, 2013, 90: 84–93
- 145 Shuai Y, Xia X L, Tan H P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *Sol Energy*, 2008, 82: 13–21
- 146 Shuai Y, Wang F Q, Xia X L, et al. Radiative properties of a solar cavity receiver/reactor with quartz window. *Int J Hydrogen Energy*, 2011, 36: 12148–12158

补充材料

- 图 S1 VFPT 聚光器及能流分布
- 图 S2 槽式系统吸热器环形空间放置二次反射镜的光路图
- 图 S3 LFR 中多管腔式吸热器吸热面辐射能流分布图
- 图 S4 LFR 中 3 种反射镜系统吸热管能流分布图
- 图 S5 LFR 型面误差 σ_e 对辐射能流分布的影响
- 图 S6 LFR 中跟踪误差 σ_e 对效率和辐射分布的影响
- 图 S7 不同太阳直接辐射强度(DNI)下的 LFR 系统光热转换效率随传热工质入口温度的变化规律
- 图 S8 不同太阳直接辐射强度(DNI)下的 LFR 系统光热转换效率随蒸汽平均温度的变化规律
- 图 S9 REPOS 吸热器进光口能流密度分布
- 图 S10 腔体吸热器内部吸热面辐射能流分布

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: A review

HE YaLing, WANG Kun, DU BaoCun, QIU Yu, ZHENG ZhangJing & LIANG Qi

Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

In this paper, the non-uniform characteristics of solar flux distribution and the consequent challenges in concentrating solar power (CSP) systems including parabolic trough system, linear Fresnel reflector system, solar power tower, and solar dish system are summarized. The corresponding solutions proposed to tackle the challenges caused by non-uniform solar flux distributions are particularly reviewed. Meanwhile, the authors' previous work is also introduced. It can be seen that the solar flux distributions in both tubular receiver and volumetric receiver are extremely non-uniform for the 4 types of CSP systems. The non-uniform solar flux leads to the non-uniform temperature distributions in the absorber. There exist high local temperature and large temperature gradient, which can cause great challenges for the safety and high-efficiency operation of CSP systems. The selective coating and the heat transfer fluid tend to degrade in high temperature environment; and the absorber also could be burned out in the hot-spot area. Thermal stress and thermal deformation resulted from large temperature gradient can cause damage of the key components of solar receivers. Then the authors pointed out the reason that the non-uniform solar flux distribution could cause the above challenges is attributed to the mismatching between the non-uniform solar flux distribution in the absorber and the uniform heat absorption capacity of the heat transfer fluid, which leads to the non-uniform temperature distribution. Accordingly, the existing solutions for tackling the challenges caused by non-uniform solar flux distribution can be classified into 2 groups: (1) Optimizing the heat absorption capacity to match the non-uniform solar flux distribution; (2) Homogenizing the solar flux distribution in absorber/receiver to match the uniform heat absorption capacity. Finally, the guiding principle of matching between the collecting process and the absorbing process is proposed for solving the problems caused by the non-uniform characteristics of solar flux distribution. The solar collectors and solar receivers in CSP systems should be optimized under the guidance of this principle to improve the safety and efficiency of CSP systems.

concentrating solar power, non-uniform solar flux distribution, solar collector and solar receiver, matching between collecting and absorbing

doi: 10.1360/N972016-00604