

## 线性菲涅尔式聚光集热系统研究进展

王锐东<sup>1,2,3</sup>, 马 军<sup>1,2</sup>, 王成龙<sup>1,2\*</sup>, 俞天智<sup>3</sup>

1. 兰州交通大学 聚光太阳热能产业关键技术与装备省部共建协同创新中心, 甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学 国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070;
3. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 相比槽式聚光集热系统, 线性菲涅尔式聚光集热系统光学效率较低, 但具有成本优势。为了提高其光学性能和热性能, 减少热损失, 国内外学者进行了广泛研究。在总结线性菲涅尔式聚光集热系统主反射镜、二次反射接收器和镜场的优化设计, 以及系统热性能等国内外已有研究成果的基础上, 重点阐述了由阴影与遮挡、末端损失、跟踪误差、积尘、主反射镜镜场几何结构引起的光学损失及改进措施最新研究进展, 对主流的几种二次反射接收器进行了对比分析, 表明复合抛物面二次反射接收器 (Composite Parabolic Concentrator, CPC) 最实用。同时对吸热管和工作介质之间的强化传热、采用 CPC 的线性菲涅尔式聚光器热损失进行了归纳总结, 分析了存在的问题及解决方法, 指出了线性菲涅尔式聚光集热系统的未来发展方向和改进措施。

**关键词:** 太阳能; 线性菲涅尔式聚光器; 二次反射接收器; 光学性能; 热性能

**中图分类号:** TK519      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210452

## Progress of linear Fresnel concentrator heat collection system

Wang Ruidong<sup>1,2,3</sup>, Ma Jun<sup>1,2</sup>, Wang Chenglong<sup>1,2\*</sup>, Yu Tianzhi<sup>3</sup>

1. Collaborative Innovation Center for Technology and Equipment of Concentrated Solar Power, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. National Engineering Research Center for Technology and Equipment of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Compared with the trough concentrator heat collection system, the linear Fresnel concentrator heat collection system has lower optical efficiency, but it has a cost advantage. In order to improve its optical and thermal properties and reduce heat loss, scholars have conducted numerous research. Based on the summary of the optimization design of the main reflector, the secondary reflector and the mirror field of the linear Fresnel concentrator and heat collection system, as well as the thermal performance of the system and other existing research results at home and abroad, the focus was on the shading and blocking, end loss, tracking error, dust accumulation, optical loss caused by the geometric structure of the main mirror field and improvement measures. A comparative analysis of several mainstream secondary reflection receivers shows that CPC-type secondary

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-08-05

基金项目: 国家自然科学基金 (52066010); 甘肃省科技计划 (20YF8GA039); 甘肃省高等学校创新基金 (2021B-094); 兰州交通大学青年科学基金 (N2017036)

作者简介: 王锐东, 男, 讲师, 博士生, 主要从事聚光太阳能利用技术方面的研究。

导师简介: 俞天智, 男, 教授, 博士, 主要从事光电功能材料的设计、合成及性质方面的研究。

通讯作者: 王成龙, 男, 教授, 博士, 主要从事新能源利用技术等方面的研究。

reflection receiver is the most practical. At the same time, the enhanced heat transfer between the heat absorption tube and the working medium, and the heat loss of the linear Fresnel condenser using CPC were summarized, the existing problems and solutions were analyzed, the future development direction and improvement measures of LFR system were point out.

**Key words:** solar energy; linear Fresnel reflector; secondary reflection receiver; optical performance; thermal performance

## 0 引言

当前人类社会面临着严重的能源危机。化石能源日益枯竭,与其相关的碳排放问题所导致的温室效应使环境问题日趋严重。全世界各国都在积极探索和开展可再生清洁能源的开发利用。太阳能是一种清洁无污染的可再生能源,储量巨大,配备储热技术可以替代传统的化石能源,是解决未来能源短缺和环境问题的重要手段<sup>[1-2]</sup>。现阶段太阳能发电技术的研究主要集中在光伏发电和光热发电两大领域<sup>[3]</sup>。通过若干年的研究,光伏发电技术日趋成熟,得到了广泛的应用,存在对太阳光的高度依赖、电能难以储存、晶体硅存在污染报废后难以回收等问题。聚光太阳能发电技术 (Concentrating Solar Power, CSP) 起源于 20 世纪 80 年代,被称作“三高”产业<sup>[4]</sup>,相比光伏发电具有明显的优势:制造过程能耗低,使用过程清洁无污染,通过储热技术可将间歇性的太阳能转变成可调度的连续优质基础能源,近年来得到了学者们的高度关注。

目前国际上流行的 CSP 技术主要有线性菲涅尔式、塔式、槽式和碟式。其中线性菲涅尔聚光技术具有结构简单,主反射镜近地面安装抗风能力强、用地效率高,二次反射接收器在一定的高度固定安装可以解决旋转接头高温动密封的技术难题,系统运行安全可靠等优点<sup>[5]</sup>,被广泛应用于中低温及高温系统中。

线性菲涅尔反射式太阳能系统 (Linear Fresnel Reflector, LFR) 主要由主反射、接收器、支架和跟踪驱动装置等组成<sup>[6]</sup>,主要研究内容分为 LFR 聚光器的光学性能和热性能。光学性能研究主要集中在聚光器的光学建模和仿真分析、主反射镜的优化、二次反射接收器的优化、镜场结构的优化、吸热器表面的能流分布等。通过光学分析软件和光学分析方法对聚光器进行模拟仿真,对其性能进行优化,提高光学效

率。热性能研究主要集中在二次反射接收器中各部件的辐射、对流、传导热损失、工作介质和吸热管之间的强化传热、高性能的工作介质等。通过对聚光器几何参数、光学参数、结构参数优化设计,可以降低成本,减少热损失和提高光热转化效率。

## 1 线性菲涅尔式聚光器研究进展

线性菲涅尔聚光集热技术是由法国伟大的物理学家奥古斯汀·菲涅尔名字命名而来。1957 年, Baum 等人<sup>[7]</sup>首先提出了将大型抛物线槽型集热器分解为离散的小型集热器的概念,小型的集热器由平板玻璃构成,平板玻璃带跟踪系统可以将太阳光线反射汇聚到固定的接收器上。Francia<sup>[8]</sup>将该理论应用于线性菲涅尔式聚光集热系统,实现了 LFR 系统的开创性工作,为 LFR 大规模的应用奠定了基础。20 世纪 70 年代,为了提高 LFR 效率进行了大量的优化研究,最初设计的 LFR 接收器不带二次反射镜,接收器一般由管状接收器<sup>[9-10]</sup>或平板接收器构成<sup>[11-12]</sup>,参考文献 [12] 对管状接收器和平板接收器的性能进行了对比,发现前者优于后者,无论是管状还是平板接收器对来自主反射镜光线的拦截系数不高, Gordon 等人<sup>[13]</sup>提出了二次反射接收器的概念,在接收器上加装二次反射镜构成二次反射接收器,提高了光学效率,减少了热损失。复合抛物面二次反射接收器 (Composite Parabolic Concentrator, CPC) 的出现<sup>[6]</sup>,使得线性菲涅尔式聚光集热技术得到了快速的发展。

### 1.1 主反射镜优化研究

主反射镜是 LFR 系统中非常重要的组成部分之一,近几十年来,国内外学者对主反射镜的形状、数量、间距和宽度、阴影遮挡、追日系统等进行优化研究,提高了其光学效率。

线性菲涅尔式聚光器是槽式聚光器的几何近似,相对槽式聚光器光学效率较低,为了提高 LFR 的光

学效率, 杜春旭、吴玉庭等<sup>[14-16]</sup>利用矢量分析、坐标变换以及射线追踪法分析了接收器高度、反射镜间距、反射镜宽度对阴影与遮挡效率的影响, 给出了线性菲涅尔式聚光镜场的阴影与遮挡效率计算模型, 提出了减少阴影与遮挡的主反射镜的镜场布置方法, 提高了光学效率。Mills 等<sup>[17]</sup>提出了紧凑型线性菲涅尔式聚光集热系统 (Compact Linear Fresnel Reflector, CLFR), 减少阴影与遮挡损失。Vashi 等<sup>[18]</sup>对 CLFR 系统的阴影与遮挡进行了分析, 结果表明, 合理布置主反射镜, 增加接收器高度, 可以减少阴影与遮挡损失, 但整个聚光系统需要更加精确的跟踪控制系统。Abbas 等<sup>[19]</sup>对 LFR 和 CLFR 进行了比较研究, 结果表明, 虽然 CLFR 光学效率低于 LFR, 但是可以减少阴影与遮挡, 同时土地利用率比较高。宋景慧等<sup>[20-21]</sup>研究了一种半圆腔体吸收器的 LFR 聚光集热系统, 结果表明, 余弦损失和阴影与遮挡损失对聚光器的光学效率影响很大, 余弦损失始终存在, 但阴影与遮挡损失可以避免。Abbas 等<sup>[22]</sup>提出了四种主反射镜的布置方式: 等宽等间隙、等宽变间隙、变宽定间隙、变宽变间隙。对等宽等间隙、等宽变间隙、变宽定间隙进行了比较分析, 结果表明, 定宽变间隙、变宽定间隙设计减少了阴影与遮挡损失, 变宽主反射镜给生产和制造带来了不便, 定宽变间隙使得镜场设计变得较为复杂, 变宽变间隙设计需要未来进一步研究。主反射镜的几何形状主要分为平面镜、抛物线镜和圆柱面镜。Zhu 等<sup>[23]</sup>提出了一种主反射镜为半抛物型线性菲

涅尔式聚光器 (Semi-Parabolic Linear Fresnel Reflector, SPLFR), 如图 1 所示。与传统的 LFR 相比, SPLFR 减少了阴影与遮挡损失, 具有较高的土地利用率。但要获得更大的聚光比, 两侧主反射镜会越来越高, 增加了系统的安装运维难度和成本。

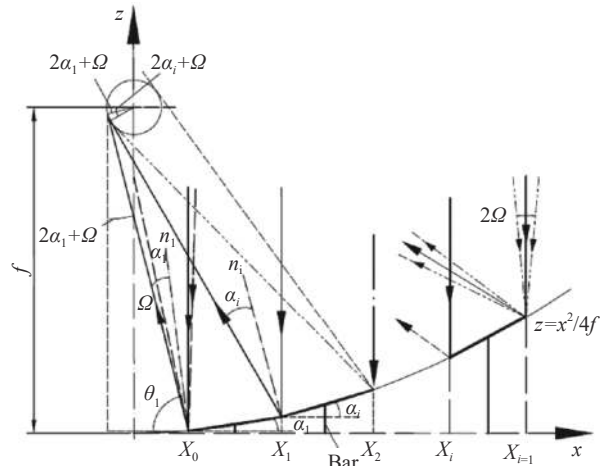


图 1 SPLFR 聚光器示意图<sup>[23]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of SPLFR concentrators<sup>[23]</sup>

Momeni 等<sup>[24]</sup>研究了一种主反射镜为大抛物面的线性菲涅尔式聚光器, 如图 2 所示。结果表明, 相比平面反射镜, 大抛物面主反射镜具有较好的聚光效果, 所需吸热管的直径更小, 主反射镜更宽, 反射镜的数量更少, 跟踪控制系统较简单, 但不同的主反射镜需采用不同的曲率, 给生产和制造带来了不便。

邱羽、何雅玲等<sup>[25-26]</sup>对比分析了抛物面镜、圆柱

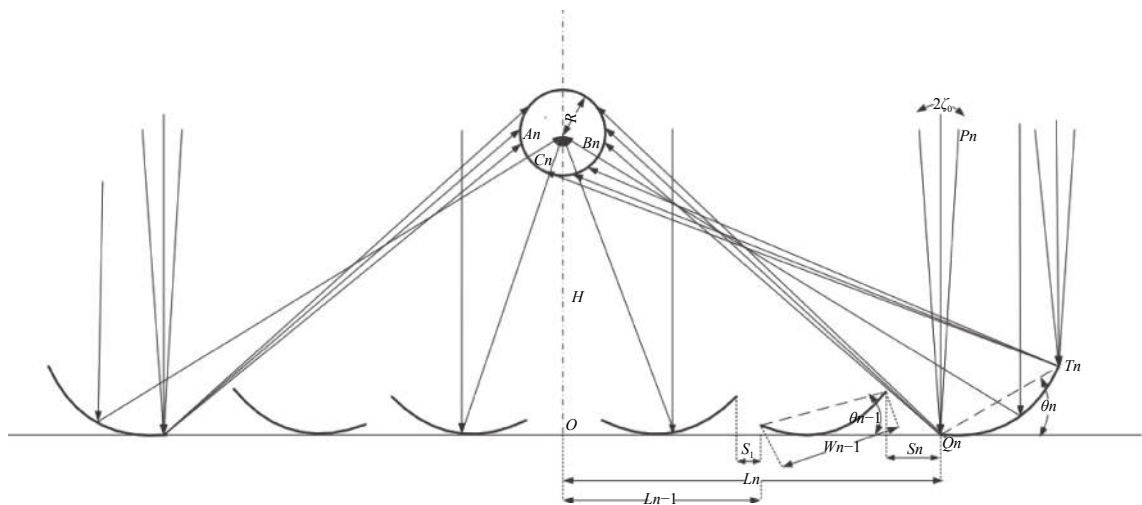


图 2 抛物面型 LFR 聚光器示意图<sup>[24]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of LFR with parabolic reflectors<sup>[24]</sup>

面镜、平面镜构成的 LFR 系统光学性能, 研究表明, 由抛物面镜、圆柱面镜构成的 LFR 光学效率均大于由平面镜构成的 LFR 聚光器, 通过优化圆柱面镜可以达到与抛物面镜相差不大的光学性能, 为圆柱面镜成为主发射镜提供了依据。同时分析了形面误差和跟踪误差对光学性能的影响, 结果表明, 随着形面误差和跟踪误差的增加, 光学效率在降低。对于循环回路较短的 LFR 系统, 末端损失很重要, 浦绍选等<sup>[27]</sup>对 LFR 的末端损失进行了分析。研究表明, 末端损失与地理位置、太阳赤纬角、时角以及主反射镜单元在镜场中的位置等有关, 离接收器最远的主反射镜是造成末端损失的主要原因。Bellos 等<sup>[28]</sup>采用增加接收器的长度和移动接收器的方式减少了末端损失, 提高了光学效率, 如图 3、图 4 和图 5 所示。Yang 等<sup>[29]</sup>提出了一种双轴跟踪系统, 如图 6 所示。主反射镜不仅可以东西方向跟踪太阳, 而且可以南北方向沿着 V 型的轨道移动, 减少了末端损失, 提高了系统的光学效率。

Diego 等<sup>[30]</sup>将主反射镜和吸热管倾斜布置, 如图 7 所示, 对系统的光学性能显著改善。同时对主反射镜、吸热器的长度、吸热器高度等参数进行了优化研究, 提升了月平均光学效率, 但这种倾斜镜场的优

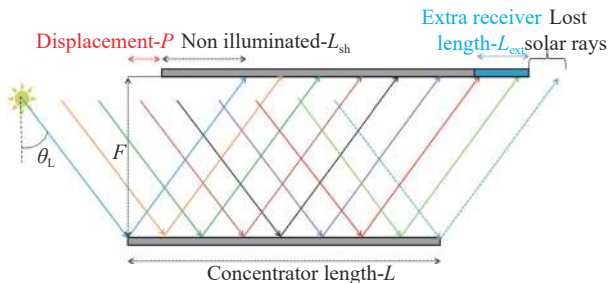


图 5 移动接收器和增加接收器的长度减少末端损失<sup>[28]</sup>

Fig.5 Enhancing the optical efficiency by increasing the length of the receiver and moving the receiver<sup>[28]</sup>

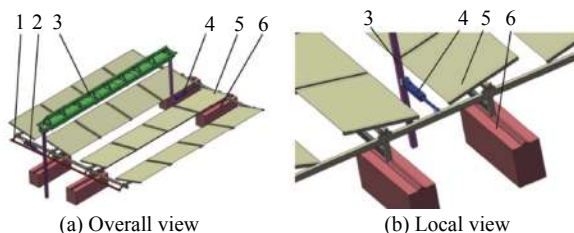


图 6 双轴跟踪式线性菲涅尔式原理图 (1: 曲柄连杆机构; 2: 推杆机构; 3: 接收器及其支架; 4: 推杆机构; 5: 反射镜和支架; 6: 滑轨和基座)<sup>[29]</sup>

Fig.6 Schematic of the proposed two-axis tracking LFR (1: Crank-rod mechanism; 2: Linear actuator; 3: Receiver and its supporter; 4: Linear actuator; 5: Reflector and its supporter; 6: Slide rails and pedestals)<sup>[29]</sup>

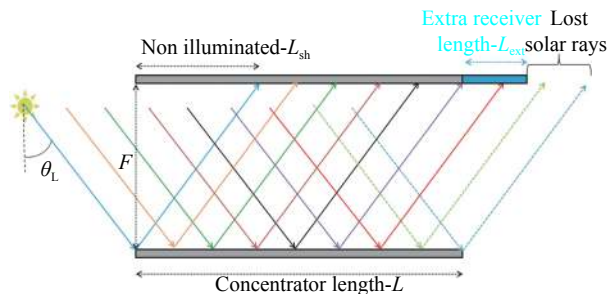


图 3 通过增加接收器的长度减少末端损失<sup>[28]</sup>

Fig.3 Enhancing the optical efficiency by increasing the length of the receiver<sup>[28]</sup>

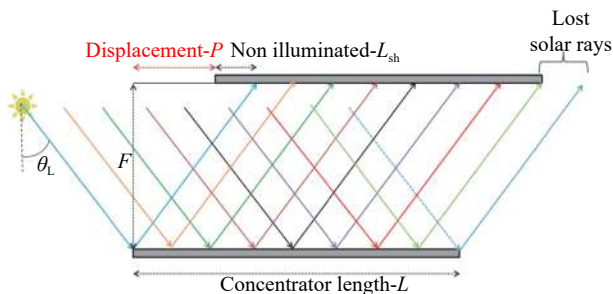


图 4 移动接收器的位置减少末端损失<sup>[28]</sup>

Fig.4 Enhancing the optical efficiency by moving the receiver<sup>[28]</sup>

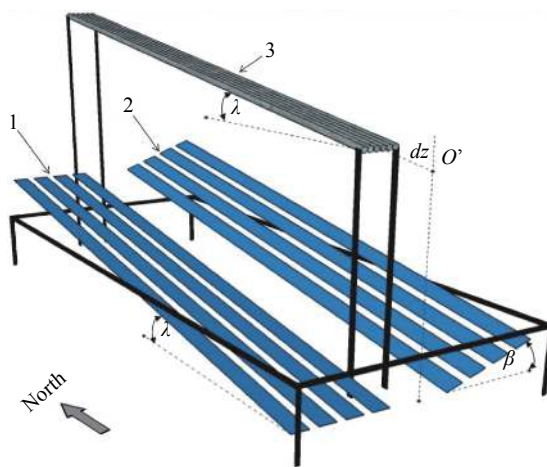


图 7 LFR 系统优化的总体方案 (1: 西端反射镜; 2: 东端反射镜; 3: 接收器;  $\lambda$ : 主反射镜和接收器的倾角;  $\beta$ : 东西方向的旋转角;  $dz$ : 接收器的取代角)<sup>[30]</sup>

Fig.7 General scheme of the optimized LFR (1: West reflector surface; 2: East reflector surface; 3: Receiver;  $\lambda$ : Tilt angle of the reflectors and receiver;  $\beta$ : Angle of the east-west rotation;  $dz$ : Displacement angle of the receiver)<sup>[30]</sup>

化方法只适用于循环回路较短的镜场系统。

LFR 的跟踪控制系统类似槽式聚光集热系统, 主要分为单轴跟踪系统和双轴跟踪系统<sup>[5, 31]</sup>, 如图 8 所示。单轴跟踪方式又分为水平和倾斜布置主反射镜, 水平布置方式主反射镜距离地面的相对高度较低, 抗风能力强, 成本低<sup>[32]</sup>。门静婧等人<sup>[33]</sup>针对不同地理纬度, 对水平布置方式的单轴跟踪系统进行了研究, 结果表明, 在低纬度地区, 南北跟踪模式的系统光学性能优于东西跟踪模式; 在高纬度地区, 东西跟踪模式和南北跟踪方式系统光学效率差别不大, 在全纬度的范围内采用东西跟踪模式的 LFR 适用性更好。Qu 等<sup>[34]</sup>提出了一种双轴跟踪系统, 通过跟踪方位角提高光学性能, 适用于小规模 LFR 系统。对于大规模应用考虑到成本和机械的复杂性, 选择合适的倾斜角度安装主反射镜比较实用。单轴跟踪系统机械结构简单, 只跟踪了太阳方位角, 太阳入射角由太阳方位角和高度角共同决定。双轴跟踪系统不仅跟踪了太阳方位角, 同时跟踪太阳高度角, 提高了跟踪精度, 但机械结构复杂, 占地面积大且成本高。Barbon 等<sup>[35]</sup>对跟踪误差引起的光学损失进行了研究, 结果表明跟踪误差小于  $0.09^\circ$  时光学损失较少, 大于  $0.36^\circ$  时跟踪误差造成的光学损失应当避免。邱羽等<sup>[25, 36]</sup>研究了主反射镜的形面误差和跟踪误差对系统的光学性能的影响, 结果表明, 随着形面误差和跟踪误差的增加, 系统光学效率在下降, 一定的形面误差有利于吸热器表面的能流分布; 跟踪误差会造成吸热器表面局部温度过高, 应当避免。

闫素英等<sup>[37]</sup>研究了由于镜面积尘造成的光学损失, 结果表明, 随着积尘的增加, 系统光学效率下降。

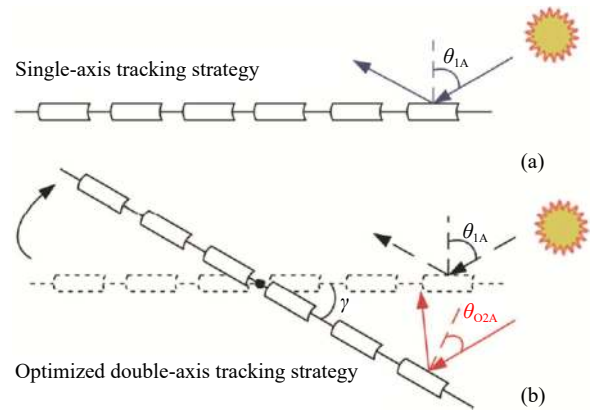
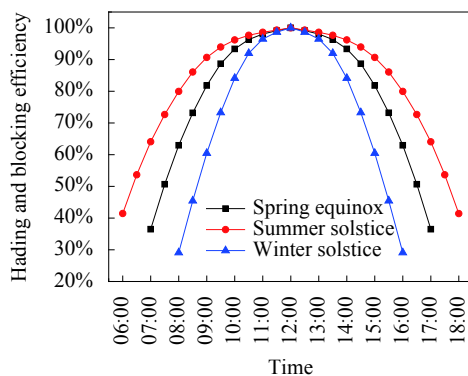


图 8 单轴和双轴跟踪系统原理图<sup>[5]</sup>

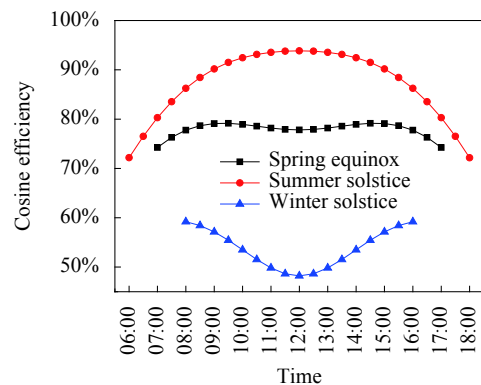
Fig. 8 Schematics of single-axis and double-axis tracking systems<sup>[5]</sup>

Zhao<sup>[38]</sup>提出了三种积尘处理的方法: 方法一在聚光器上加装积尘屏蔽层或在主反射镜上镀制防污涂层; 方法二针对不同的积尘构成采取不同的积尘退化技术或研制具有积尘自洁净的主反射镜; 方法三设计适合于 LFR 的积尘清洗设备。

笔者课题组对线性菲涅尔式聚光集热系统的主反射镜进行了优化布置<sup>[39-41]</sup>, 通过几何分析法对等宽和变宽的线性菲涅尔式聚光集热系统镜场阴影遮挡效率进行了理论分析。在一定的入射角范围内减少了阴影遮挡光学损失, 提高了土地的利用率, 并对余弦效率、末端损失效率、大气衰减效率、系统的光学效率进行了分析。主反射镜等宽的线性菲涅尔式太阳能聚光系统主要性能指标在典型日的变化如图 9 所示<sup>[41]</sup>, 在正午前后基本无阴影与遮挡光学损失, 早晨和下午影响较为严重; 余弦效率严重制约线性菲涅尔式太阳能聚光系统光学效率, 夏至日最大, 正午可达 93.85%, 而冬至日较小; 末端损失效率和大气衰减效率的变化范围较小, 分别在 98.53%~99.99%



(a) 阴影与遮挡效率  
(a) Shading and blocking efficiency



(b) 余弦效率  
(b) Cosine efficiency

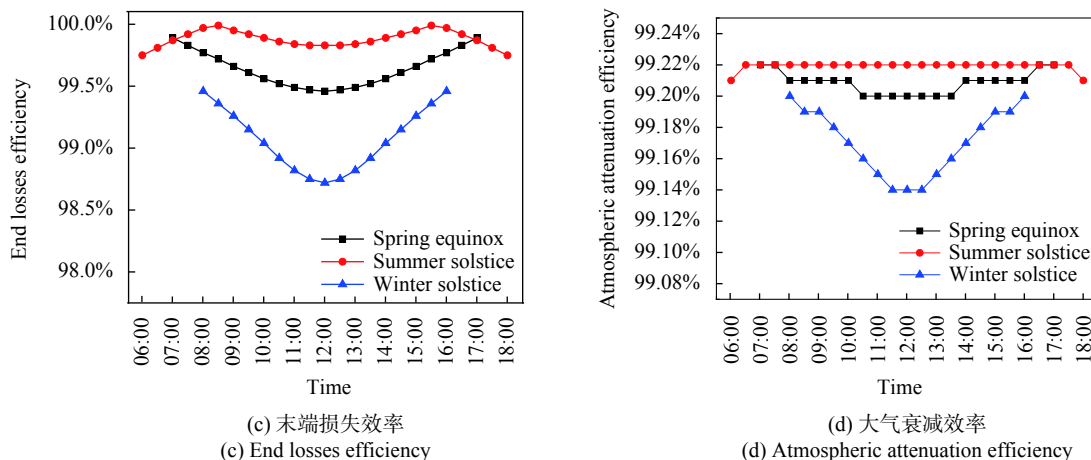


图 9 主反射镜等宽的 LFR 聚光系统主要性能<sup>[41]</sup>

Fig.9 Main performance of LFR concentrator with the same width of the primary reflector<sup>[41]</sup>

和 99.14%~99.22% 之间。系统光学效率在早晨到中午逐渐增大,在中午到下午逐渐减小。主反射镜等宽的线性菲涅尔式聚光系统光学效率变化曲线如图 10 所示<sup>[41]</sup>。

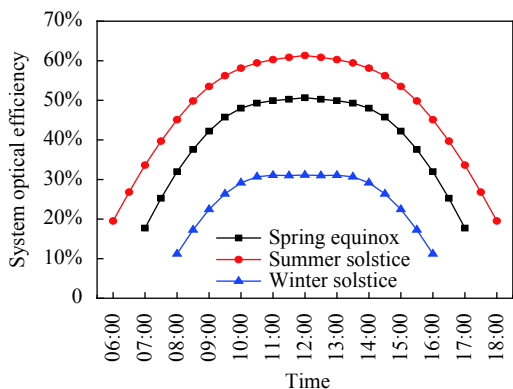


图 10 主反射镜等宽的 LFR 聚光器光学效率<sup>[41]</sup>

Fig.10 Optical efficiency of LFR concentrator with the same width of the primary reflector<sup>[41]</sup>

综上所述, LFR 是 PTC 的几何近似, 光学效率较低, 但具有成本优势。由于主反射镜镜场几何参数引起的光学损失中余弦损失不可避免, 阴影与遮挡损失可以通过镜场结构的优化将其降低到最低。主反射镜采用圆柱形反射镜可以提高光学效率, 相比抛物面型反射镜具有较低的成本。对于循环回路较短的 LFR 系统, 为了减少末端损失, 可采用增加接收器长度和主反射镜面积, 倾斜布置主反射镜和接收器的方法。通过研制积尘退化涂层的反射镜, 利用积尘清理设备可以降低镜面积尘对系统光学效率的影响。

## 1.2 二次反射接收器的优化设计研究

用于 LFR 聚光器的接收器种类繁多, 从接收器中吸热管的数量来看, 主要分为单管接收器和多管接收器<sup>[2]</sup>; 按照其结构构成来看, 主要分为腔体接收器和吸热管耦合二次反射镜构成的二次反射接收器<sup>[6]</sup>。由吸热管和二次反射镜构成的二次反射接收器不仅可以提高光学效率, 同时可以减少热损失, 是目前研究最为广泛的接收器。二次反射接收器是 LFR 聚光器最关键的部件, 其性能直接影响到整个系统的效率, 决定着整个系统能量的输出, 对系统的设计和性能优化以及安全运行具有重要的意义。二次反射接收器的优化设计主要集中在二次反射镜的线性优化和吸热管表面能流分布研究。

### 1.2.1 二次反射镜的线型优化

在过去的几十年里, 国内外学者对 LFR 接收器的二次反射镜进行了大量优化研究, 提出了不同线形的二次反射镜。1974 年, Winston<sup>[42]</sup> 提出了 CPC 的概念, 由两片抛物线型反射面构成, 可以将其接收角范围内的光线汇聚到吸热器。Gordon 等<sup>[43]</sup> 设计了 CPC, 优化了其结构, 提高了系统光学效率, 结果表明 LFR 的光学效率受 CPC 开口宽度、高度、接收半角影响, 认为 CPC 为最实用的二次反射镜解决方案。Balaji 等<sup>[44]</sup> 使用蒙特卡洛光线追迹法对抛物线型和渐开线型二次反射接收器进行优化和对比分析, 结果表明抛物线型二次反射接收器光学效率达到 83.3%, 渐近线型二次反射接收器光学效率达 78.33%。这种聚光器虽然结构简单, 但平均光学效率比 CPC 光学

效率低。Zhu 等<sup>[45]</sup>采用自适应研究方法对二次反射镜进行了设计 (Adaptive Design Concentrator, ADC), 二次反射接收器的光学效率超过 90%。Chaitanya Prasad 等<sup>[46]</sup>结合可变瞄准线的概念设计了一种分段抛物面二次反射接收器 (Segmented Parabolic Secondary Concentrator, SPSC), 二次反射接收器的光学效率达 76.4%, 提高了聚光器表面的能流分布, 但是二次反射接收器的光学效率相比 ADC 和 CPC 有所下降。此外, Grena 等<sup>[47]</sup>提出了双抛物线二次反射接收器; Canavarro 等<sup>[48-49]</sup>提出了马蹄形二次反射接收器和不对称 CEC 型二次反射接收器; Tsekouras 等<sup>[50]</sup>设计了一种梯形聚光器, 但未给出其光学效率。

笔者课题组设计了一种由单个真空集热管和 CPC 构成的二次反射接收器<sup>[51-52]</sup>, 认为二次反射接收器的优化主要从最大接收半角和截取比两方面考虑。结果表明, CPC 的渐开线部分由金属内管的直径决定, CPC 的开口宽度随最大接受半角的增大而减小, CPC 截取比对二次反射接收器的光学性能影响不大, 但可以降低二次反射接收器的成本, 二次反射接收器的光学损失主要由于 CPC 和真空集热管之间的间隙造成。此外, 对减少间隙损失的方法进行了总结, 认为渐开线起始点前移可以减少间隙损失且后期易于加工, 但真空吸热管中金属管和玻璃套管之间真空夹层造成的损失无法避免, 设计基于单个金属吸热管的二次反射接收器可以避免由于真空夹层造成的间隙损失。

综上所述, 二次反射接收器的优化设计方法众多, 新的优化设计方法还需要进一步探索。目前, 由吸热管和二次反射镜构成的二次反射接收器研究最为广泛, 不仅可以提高光学效率, 而且可以减少热损失。Hack 等<sup>[53]</sup>对 ADC、CPC、梯形聚光器和双抛物面聚光器进行了对比分析, 发现光线垂直入射时 ADC 光学效率最高, 其次为 CPC, 另外两种聚光器设计简单, 成本低, 但是性能不佳。同时分析了随着入射角增加, ADC 的方法光学效率在提高, 主要原因是 ADC 的方法考虑了太阳入射是锥形入射, 但所设计的二次反射接收器在实际工程中应用较少, 其综合性能需要在未来的实际工程中进一步验证。Abbas 等<sup>[22]</sup>对 CPC、ADC 和 SPSC 进行了对比, 发现 SPSC 效率最低, ADC 效率最高, 其次为 CPC, 但 CPC 型聚光器

吸热器表面具有更加均匀的能流分布。笔者课题组对二次反射接收器的最新研究进展进行了综述, 认为 CPC 型二次反射接收器是最佳选择, 渐开线起始点前移可以减少间隙损失且后期易于加工, 接收半角的选择应综合考虑 CPC 光学性能和开口宽度。间隙损失是 CPC 型二次反射接收器的主要光学损失, 构建由吸热管、二次反射镜和具有高透过率、低热辐射玻璃盖板组成的新型二次反射接收器, 可以降低成本、提高光学效率、减小热损失。

### 1.2.2 吸热管表面能流分布研究

在 LFR 系统中, 太阳能辐射通过主反射镜和二次反射镜到达吸热管, 导致吸收器表面上的太阳通量高度集中。吸热管上半部分的能量分布一般比下半部分低。这种不均匀的通量分布会导致吸热管周向温差和管结构变形。在极端的情况下, 如果变形的吸收器接触到外层的玻璃套管就会破裂, 从而导致真空完全失效。

Mill 等<sup>[17]</sup>对紧凑型线性菲涅尔反射器的吸热管上的能流分布进行研究, 结果表明吸热管表面的能流分布存在较大的非均匀性。Häberle 等人<sup>[54]</sup>通过 3D 光线追迹法和流体动力学的方法对单管 CPC 腔体接收器的能流特性进行了研究, 结果表明聚光器能流集中在吸热管下部且均匀性较差。Eck 等<sup>[55]</sup>使用有限元的方法研究了吸热管表面的能流分布, 发现吸热管直接聚光区的能流分布最高, 其次是侧面, 顶部的分布最少。赵金龙等<sup>[56]</sup>用 Matlab 建立了 LFR 聚光器的三维光学几何模型, 给出其光斑能流密度分布的计算式, 结果表明吸热管表面的能流分布依然表现出非均匀性。邱羽等<sup>[57]</sup>采用蒙特卡洛光线追踪法 (Monte Carlo Ray Tracing, MCRT) 结合遗传算法研究单管和多管梯形接收器表面的能流分布, 如图 11~图 12 所示。结果表明, 单管吸热器表面的能流分布不均匀, 能流分布主要集中在吸热管下侧。多管梯形接收器中, 能流主要分布在接收器中间的吸热管上。

Craig 等<sup>[58-59]</sup>采用有限体积法研究了多管腔体接收器中每个吸热器上的通量分布, 结果表明各管上的通量沿周向分布不均匀, 绝大部分通量分布在吸热管的下部。

笔者课题组<sup>[41, 51, 60]</sup>基于蒙特卡洛光线追迹法对由单个真空集热管和 CPC 构成接收器的光学性能进

行了分析,结果表明吸热管表面辐射能流分布不均匀的特性,如图 13 所示。

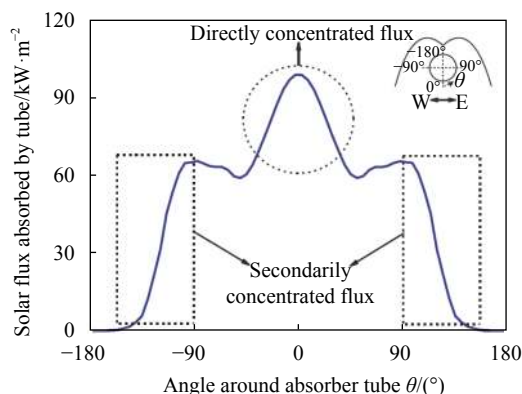


图 11 由单根吸热管和二次反射镜构成的接收器中吸热管表面能流分布<sup>[57]</sup>

Fig.11 Flux distribution on the absorber tube surface in the single-tube receiver with a secondary collector<sup>[57]</sup>

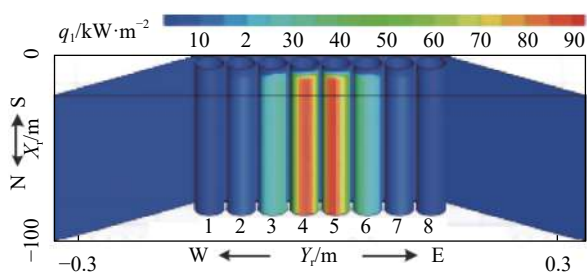


图 12 多管梯形腔体接收器中每根吸热管上的能流分布<sup>[57]</sup>

Fig.12 Flux distribution on each absorber tube in the multi-tube cavity receiver<sup>[57]</sup>

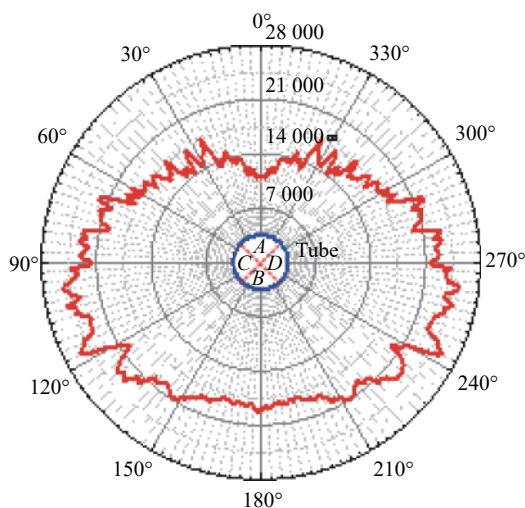


图 13 吸热管表面能流分布极坐标图<sup>[41]</sup>

Fig.13 Polar coordinate diagram of flux distribution on the surface of heat absorption tube<sup>[41]</sup>

吸热管表面不均匀的能流分布造成吸热管外壁不均匀的温度分布,给系统安全、高效运行带了系列问题。目前主要通过优化跟踪控制系统、主反射镜和二次反射镜的结构设计来提高能流分布的均匀性,来降低温度梯度、减小局部高温<sup>[61]</sup>。邱羽等<sup>[25]</sup>通过优化设计反射镜瞄准线、选用一定的形面误差的主反射镜提高了吸热器表面能流分布的均匀性。他们<sup>[58]</sup>还提出了一种将蒙特卡罗射线追踪法与遗传算法相结合的多目标优化方法,结果表明可以在能流不均匀性和光效率之间达成折中。Vouros等<sup>[62]</sup>采用光线跟踪优化法优化设计了新型二次反射镜,结果表明新型二次聚光的设计在一定程度上可以提高吸热管表面能流分布均匀性,但光学效率牺牲较大。Bellos等<sup>[63]</sup>利用贝塞尔多项式参数化方法对 CPC 进行了优化设计,且得到的热流密度分布更为均匀。Chaitanya Prasad等<sup>[46]</sup>开发了一种新的分段抛物线二次反射器(SPC),同时引入了一次反射镜的可变瞄准线,该方法对能流非均匀性有显著的改善,但同时系统的光学效率下降明显。Eck等<sup>[55]</sup>指出,如果系统最高工作温度超过吸热管的最高使用温度,可以偏移适当数量的主反射镜,但未给出具体方案。

综上所述,LFR 聚光器吸热器表面的能流分布具有不均匀的特性,绝大部分能流集中在吸热管的直接聚光区,也就是吸热管的下半部分。何雅玲等<sup>[64]</sup>对吸热管表面不均匀的能流分布成因及解决措施进行了全面的总结,提高吸热器表面能流分布均匀性的方法主要包括优化设计聚光系统、提高管壁导热系数、增强吸热管和工作介质之间的换热系数等。与国家首批太阳能光热发电示范项目中主流的塔式技术(聚光倍数:200~1000倍)相比,线性菲涅尔式聚光器具有较低的聚光倍数(聚光倍数:30~80倍),所以线性菲涅尔式聚光器吸热管表面能流的不均匀性并不会对正常工作的系统造成破坏,笔者课题组参与设计的敦煌大成熔盐线性菲涅尔式 50 MW 光热发电示范项目实际运行情况也证明了以上结论。所以,尽可能提高系统光热转换效率成为线性菲涅尔技术研究亘古不变的追求目标。此外,通过强化传热等手段也可以有效解决集热管表面能流不均匀的问题。

### 1.3 线性菲涅尔式聚光器镜场的优化研究

线性菲涅尔式聚光器镜场设计主要有两种方式:一种是通过二次反射接收器的几何参数确定主反射



镜的几何参数;另一种是通过主反射的几何参数确定二次反射接收器的几何参数。Sirimanna 等<sup>[65]</sup>在 FRESDEMO 原型进行了光学性能和聚光比分析,旨在获得最佳镜场几何参数。结果表明,镜元之间的间距保持不变,随着反射镜数量(3~41)的增加,聚光比增加,而系统光学效率缓慢下降,15~20 列反射镜之间存在最佳的光学效率和聚光比;随着接收器宽度的增加,聚光比减小,而光学效率起初迅速增加,后面缓慢增加,接收器的宽度增加到 0.6~0.7 m 之间获得了最佳的聚光比和光学效率;接收器的高度在 12 m 处获得了最佳和光学效率。Zhu 等<sup>[45]</sup>采用自适应的研究方法,通过主反射镜和吸热管的几何参数对二次反射镜进行了设计,该方法从一个预先指定的边缘点开始,以能够最大程度地将太阳光线反射至吸热管为目标迭代构建二次反射镜。在二次反射镜线型构建的过程中考虑到了太阳的形状和光学误差,主反射镜的几何参数、吸热管的尺寸和位置确定最优的二次反射镜的线型。Canavarro 等<sup>[48]</sup>以提高 LFR 聚光器的能量输出为目标,通过主反射镜的几何参数设计了马蹄型二次反射接收器,该设计提高了聚光比和工作温度,减少了热损失。但二次反射接收器的加工难度大、成本高。Santos 等<sup>[66]</sup>通过设计变量间隙角对主反射镜镜场进行了优化设计,该方法布置的镜场更加紧凑,土地利用率高,相比等宽的镜场布置,该方法使得镜场面积增加了 21%,能够增加 14% 的能量输出,但那种镜场存在安装和维护不方便的问题。笔者课题组<sup>[39,67]</sup>对 CPC 型线性菲涅尔式聚光器结构进行了优化研究,提出了利用最大接受半角设计镜场高宽比,实现镜场无阴影布置的方法,并利用射线追踪法和几何方法推导了无阴影聚光镜场的接收器高度、镜场面积和主反射镜间距等参数之间的关系。结果表明,接收半角为 50°,截取比 0.4 的 CPC,系统的光学效率达 84.52%,土地利用率达 73.08%,平均阴影遮挡效率达 97.56%。

综上所述,目前 LFR 镜场设计方法主要有两种,一种是通过二次反射接收器的几何参数确定主反射镜的几何参数;另一种是通过主反射的几何参数确定二次反射接收器的几何参数。自适应的方法能够根据不同的镜场配置设计二次反射镜,不受主反射镜几何参数的限制,能够将光线最大限度的定向到吸热

管。利用 CPC 的最大接受半角设计镜场高宽比,可以实现镜场无阴影布置的方法,不同的接收半角具有不同的镜场布置方案。

## 2 线性菲涅尔式聚光集热系统热性能研究现状

目前对线性菲涅尔式聚光集热系统的热性能研究主要集中在三个方面:新型工作介质的研究、吸热管和工作介质之间的强化传热研究、二次反射接收器的热损失研究。

### 2.1 吸热管内工作介质的研究

为了提高 LFR 的效率,不同类型的工作介质应用到 LFR 聚光集热系统中,实际工程中应用较多的主要有水、合成油、混合盐。Montes 等<sup>[68]</sup>和 Peterseim 等<sup>[69]</sup>以合成油为工作介质进行了研究,认为合成油是优良的传热介质,但其最高工作温度不能超过 400 °C,超过 400 °C 容易分解,同时会对环境造成污染,泄漏后对系统的安全运行有影响。Feldhoff 等<sup>[70]</sup>和 Modi 等<sup>[71]</sup>以水作为工作介质进行了研究。结果表明,以水作为工作介质,工作温度没有限制,不需要额外的热交换器,成本低,环境友好。但存在气液两相流,不好控制出口温度和压力,且在运行过程中压力很大,要求管道具有较强的耐压能力。邱羽等<sup>[36]</sup>和 Bachelier 等<sup>[72]</sup>以混合盐作为工作介质进行了研究,结果表明,混合盐的工作温度为 550~600 °C,可以提高系统的热效率,但工作温度有下限,低温容易凝固,需要增加伴热系统,相对成本较高,同时对金属吸热管有腐蚀作用。Bellos 等<sup>[73]</sup>以液态钠作为工作介质进行了研究,工作温度可以达到 900 °C,相比熔盐具有更高的传热性能,但是成本高,且在高温情况下容易与空气发生反应,热容量相对较低,不适合于储热材料。Pacio 等<sup>[74]</sup>对液态金属钠(Na)、液态铅-铋合金(Pb-Bi)、液态锡(Sn)的传热性能进行了比较研究,从工作温度范围角度来看,Na 优于 Pb-Bi 合金, Pb-Bi 合金优于 Sn;从安全角度来看,Sn 优于 Na, Pb-Bi 更好。邱羽等<sup>[75]</sup>以超临界二氧化碳作为工作介质进行了研究,结果表明工作温度达到 1000 °C,吸热管中的压力达到 200 Pa,超临界二氧化碳的使用提高了工作温度,但使得管内压强增加且传热系数较低。Ramon<sup>[76]</sup>对氢气、氦气、氩气作为传热介质进行了研究,发现氢气作为

传热介质的热性能最好,但未指明工作温度。Pérez-Lvarez<sup>[77]</sup>对合成油、熔盐、液态金属传热介质进行了比较研究,结果表明,在 650 K 时,三种介质的工作效率达到最佳值,液态钠的热效率最好,其次是熔盐和导热油。但液态钠成本较高,同时在运行维护过程中存在潜在的风险,容易与空气和水发生反应。Khandelwal<sup>[78]</sup>对水、合成油、混合盐、液态金属进行了比较研究,分析了 DNI、质量流量对不同介质传热性能的影响。结果表明,混合盐是用于太阳能热发电系统最佳的工作介质。相比水、合成油、混合盐可以获得更大的质量流量和更高的热效率,但混合盐工作温度有下限,这就需要一个高效的伴热系统,增加了系统的成本。此外,液态金属虽然具有较高的操作温度和传热系数,与熔盐相比成本较高以及其对吸热管的腐蚀性限制了其在 LFR 系统中的使用<sup>[79]</sup>。

综上所述,采用何种传热介质学术界还没有达到统一,目前低温应用最多的是合成油,高温发电主要使用熔盐作为传热介质。传热介质的选择要考虑实际应用中工作温度的范围、传热介质的粘度、密度、导热系数、成本、稳定性、对吸热管腐蚀性和环境的影响等众多因素。目前已经建成的光热电站中主要使用导热油、熔盐、水作为工质,其他工质的试验电站正在验证中,合成油在 400 °C 以上的分解问题限制了热力学循环效率的进一步提高,熔盐可将操作温度提高到 550~600 °C,但 240 °C 以下的熔盐凝固问题还没有得到很好的解决,目前主要通过伴热系统解决,成本相对较高,未来的实际工程中可以尝试采用主反射镜聚集太阳光线作为伴热系统。DSG 技术成本优势显著,可以直接输送高温蒸汽,是未来热利用的一种发展趋势。

## 2.2 吸热管内流体的强化传热研究

吸热管内流体的强化传热是提高 LFR 聚光集热系统热效率的一种方式。其基本原理是提高吸热管和工作介质之间的传热系数和管壁的导热系数。

Wang<sup>[80]</sup>通过在吸热管内插入泡沫金属提高了吸热管壁和传热介质之间的传热系数,降低了吸热管周向温差。Han<sup>[81]</sup>通过在吸热管内插入波纹结构的材料提高了传热系数。Bellos<sup>[82]</sup>提出在集热管内布置翅片,增大传热流体的换热面积,提高了热效率。Jaramillo 等<sup>[83]</sup>在集热管内插入扭带,通过增加扰动使壁面热量尽快被传热流体带走,实现强化传热。Yan 等<sup>[84]</sup>发现

在集热管内加肋管能显著提高传热性能,降低管壁温度,实现强化传热。Geng<sup>[85]</sup>通过在吸热管内插入转子提高了吸热管壁和传热介质之间的传热系数,实现了强化传热。Massidda<sup>[86]</sup>和 Delussu 等<sup>[87]</sup>提出增加集热管内壁面粗糙度和在管内布置涡产生器来实现强化传热。何雅玲等<sup>[88]</sup>根据集热管表面热量分布特点,在能流密度高的一侧布置纵向涡产生器,使热量快速传到管中心,实现了高效低阻的强化传热。Yang 等<sup>[89]</sup>通过在集热管内热流密度强的区域插入多孔介质来实现强化传热。Subramani 等<sup>[90]</sup>在水基液中添加一定浓度的 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子实现了强化传热。Bellos<sup>[91]</sup>对纳米流体(导热油中参杂 6% 的 CuO)、布置翅片、纳米流体和吸热管内布置翅片相结合的方法进行了比较分析,三种方法均可提高热效率,降低了吸热管周向的温度差。当工作温度较高时,使用纳米流体和吸热管内布置翅片相结合的方法有效性进一步增强,工作温度 400 K 时,最佳的纳米颗粒浓度约为 4%,因为较高的浓度并不会显著提高热效率,会增加泵运送功耗。Almanza<sup>[92]</sup>和 Delussu 等<sup>[87]</sup>用铜制吸热管替换不锈钢吸热管,提高了热效率。Ghodbane 等<sup>[93-94]</sup>提出采用铜-钢复合集热管,综合利用铜较高的导热系数和钢较好的机械强度,热量及时被流体带走的同时保持了较好的机械性能,缓解集热管弯曲变形造成的爆管现象。Aldali 等<sup>[95-96]</sup>采用导热系数相对较大的铝作为集热管材料,热量被及时传递到管内壁的同时周向温度梯度也明显减小。

综上所述,通过在吸热管内部布置翅片、泡沫金属、波纹材料、多孔介质、肋管、转子、涡产生器等方法来提高工作介质和吸热管之间的传热系数,增强了吸热器内工作介质的湍流流动,实现了强化传热<sup>[81-89]</sup>。吸热管壁材料的改进和工作介质中掺杂一定比例的纳米颗粒提高了导热系数,实现了强化传热。强化传热能提高其热效率,但增加了泵的运送功耗,在众多强化传热技术中,LVGs 强化传热具有明显的优越性<sup>[88]</sup>,其在传热能力显著提高的同时压降略有增加,在某些情况下甚至有所下降。但参考文献 [88] 的结果表明,LVGs 的换热增强率最高为 8%。参考文献 [90] 的结果表明,水基液中参杂体积浓度为 0.2% 的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒与水基液相比,传热效率提高幅度最大为 8.66%。参考文献 [91] 的结果表明,在入口温度 400 K,使用浓度为 4% 的纳米颗粒和内置翅片相

结合的方法, 传热效率分别提高了 0.28%、0.61%、0.82%。

### 2.3 线性菲涅尔式聚光集热系统热损失研究

在线性菲涅尔式聚光集热系统中, 太阳光线经过主反射、二次反射镜到达吸热管, 吸热管吸收的能量一部分用于加热工作介质, 一部分以辐射换热、对流换热、热传导的方式传递到周围环境中, 传递到周围环境中的部分即为系统的热损失。

Montes<sup>[97]</sup>对真空管和非真空管的热性能进行了比较, 结果表明, 真空管的热性能优于非真空集热管, 风速、管壁温度和环境温度之间的温差是热损失的主要因素。随着工作温度升高, 热损失增加。Burkholder 等<sup>[98]</sup>对真空吸热管的热损失进行了研究, 结果表明, 真空集热管能够减少对流传热损失, 但不能减少辐射热损失。太阳能真空集热管局部剖面及其传热途径如图 14 所示。

真空集热管是二次反射接收器的主要部件之一, 由镀有选择性吸收膜的金属吸热管、真空夹层、玻璃套管构成。金属吸热管表面的选择性吸收膜对提高 LFR 聚光器的光热转换效率和减少热损失具有重要意义, 它能够将太阳光谱范围内的能量尽可能多的吸收并转换成热能, 同时最大程度抑制热能向外辐射(热损), 其性能指标主要由发射率和吸收率组成。自 20 世纪 50 年代, 国内外学者对太阳光谱选择性吸收涂层的材料选择以及制备工艺开展了广泛而深入的研究。Schön 等<sup>[99]</sup>采用射频磁控溅射技术制得 Pt-

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 太阳能选择吸收膜, 吸收率达 0.95, 发射率为 0.10, 认为 Pt-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜系是最为理想的高温光谱选择性吸收涂层, 但因为 Pt 价格昂贵, 至今仍难以获得商业化应用。为降低成本, Sathiaraj 等<sup>[100]</sup>开发了在镀 Ni 和镀 Mo 不锈钢基板上沉积 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜及 SiO<sub>2</sub> 减反射层, 吸收率达 0.94, 发射率为 0.07。Eva Céspedes 等<sup>[101]</sup>在 321 不锈钢基板上以直流溅射沉积 Ag 为红外反射层、吸收层为 Mo-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 金属陶瓷复合吸收层、减反射层为 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 经过优化, 膜系吸收率达 0.926, 发射率为 0.017。史月艳等<sup>[102]</sup>研究了 (Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub>-AlN)-Al/Al 膜系光谱选择性吸收涂层, 吸收率达 0.98, 发射率为 0.12。丁大伟等<sup>[103]</sup>采用 CODE 软件对 Mo-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层进行了计算机模拟研究, 优化后的涂层吸收率达 0.94, 发射率低于 0.04。目前成熟产品所能达到的指标吸收率已达 96% 以上<sup>[104-105]</sup>, 接近 100%, 但随着工作温度的升高发射率逐渐升高, 造成吸热管的热损失较高。车德勇等<sup>[106]</sup>对吸热管和玻璃套管之间的空间压力对热损失的影响进行了研究, 结果表明, 吸热管和玻璃套管之间的空间压力越大, 集热器热损失就越大, 压力下降到 1 Pa 时, 热损失基本不再受吸热管和玻璃套管之间空间压力的影响。JA 等<sup>[107]</sup>研究了玻璃套管透过率对热损失的影响, 结果表明, 高透过率的玻璃套管可以减少热损失。邱羽等<sup>[108]</sup>采用 MCRT 和 FVM 方法数值分析了梯形腔体接收器的传热特性, 结果表明辐射损失占主导, 约 81%~87%。Reddy 等<sup>[109]</sup>和 Lin 等<sup>[110]</sup>认为聚光器的热损失取决于吸热器表面的温度, 温度升高, 辐射热损失大幅增加, 选择性吸收膜层的优化可以减少辐射热损失。Guadamud 等<sup>[111]</sup>利用计算流体力学、光线跟踪的方法、热阻模型 (thermal resistance model, TRM) 分析了两种腔体接收器二次反射镜表面的温度分布, 如图 15 所示。结果表明, 二次反射镜的温度对二次反射接收器的热损失有显著影响。Beltagy 等<sup>[8]</sup>和 Parikh 等<sup>[112]</sup>对接收器中各部件的温度分布进行了研究, 如图 16 所示。结果表明, 在吸热管表面温度达到 200 °C 时, 辐射损失和对流损失具有相同的数量级。超过 200 °C 时, 辐射损失占主导。

Hofer 等<sup>[113]</sup>建立了一个热阻模型 (TRM), 用于预测三种不同 LFC 接收器的热损失, 三种不同的聚光器如图 17(a)~(c) 所示。分析了风速、环境温度和直

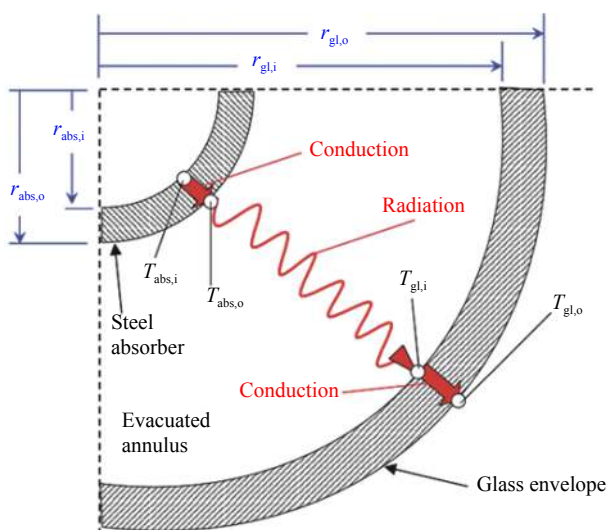


图 14 太阳能真空集热管局部剖面传热途径示意图<sup>[98]</sup>

Fig.14 Schematic diagram of heat transfer path in local section of solar vacuum collector pipe<sup>[98]</sup>

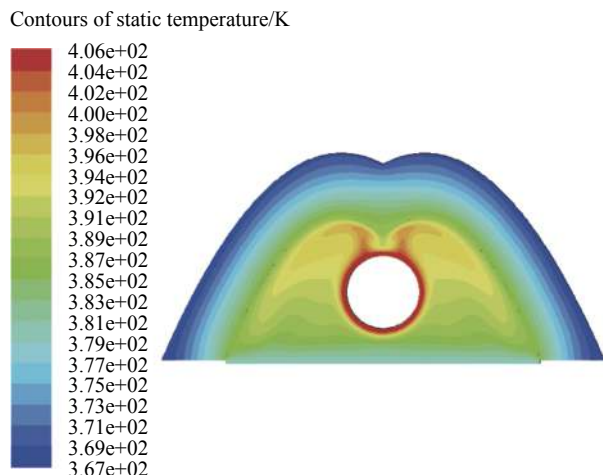


图 15 绝缘层和吸热管周向的温度分布<sup>[8]</sup>

Fig.15 Temperature field in the insulating material and around absorber tube<sup>[8]</sup>

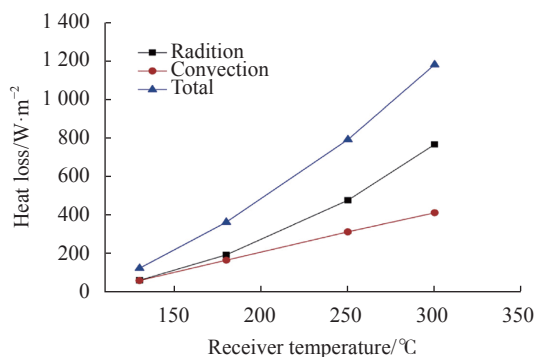


图 16 热损失随着温度增加变化折线图<sup>[8]</sup>

Fig.16 Line graph of heat loss as temperature increases<sup>[8]</sup>

接法向辐照度 (DNI) 对三种不同结构聚光器热损失的影响, 如图 18、图 19 和图 20 所示。结果表明, 真空管型二次反射接收器的热损失最小, 玻璃盖板型二次反射式接收器的热损失最大。风速、环境温度、DNI 对真空管型二次反射接收器的热损失影响最小; 风速对非真空集热管型二次反射接收器的热损失影响最大。随着 DNI 的变化, 玻璃盖板型结构热损失下降, 环境温度对玻璃盖板型聚光的热损失影响最大。

Lai<sup>[14]</sup> 对带有 CPC 的线性菲涅尔式聚光集热系统的热损失进行了分析, 如图 21 所示, 结果表明, 热损失主要由玻璃盖板向周围环境的辐射传热决定。玻璃盖板的透过率、CPC 的反射率和发射率是影响该聚光器热性能的关键因素。

Mohan<sup>[15]</sup> 对梯形结构的热损失进行了分析, 结果表明聚光器的开口处布置玻璃盖板可以减少对流

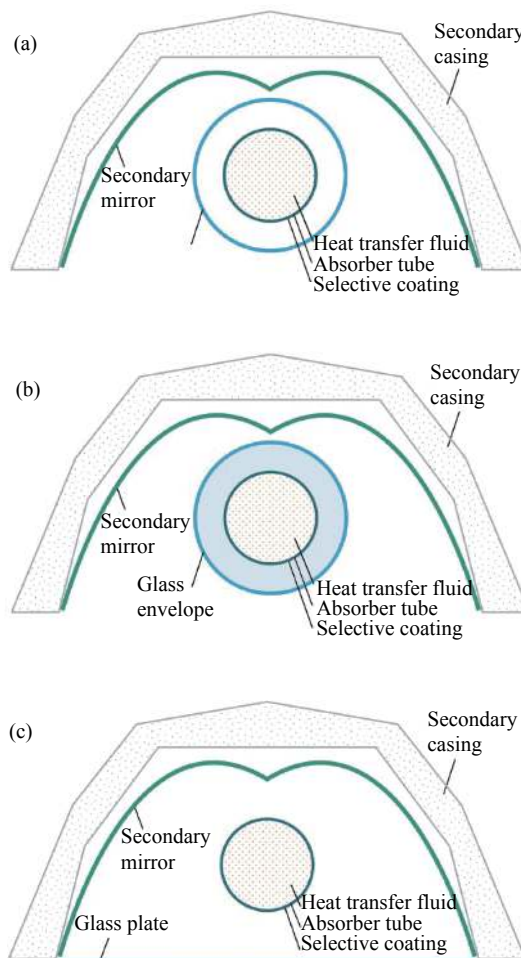


图 17 三种不同的接收器参数分析示意图。(a) 非真空集热管型接收器; (b) 真空集热管型接收器; (c) 带有玻璃盖板型接收器<sup>[113]</sup>

Fig.17 Sketch of the different LFC receiver configurations analyzed.

(a) An receiver with non-evacuated glass envelope; (b) An evacuated tube receiver; (c) An receiver with a flat glass receiver cover<sup>[113]</sup>

热损失。Ardekani 等<sup>[116]</sup> 通过优化绝缘层的几何结构降低了成本, 减少了热损失。

综上所述, 随着工作温度的升高, 二次反射接收器各部件之间温差加大, 造成其各部件之间能量的相互传递, 系统的热损失增加。影响热损失的因素有环境温度、风速、DNI 等。对二次反射接收器的光学和几何结构参数的优化是减少热损失的有效措施, 如: 使用真空集热管、高透过率的玻璃套管、聚光器的结构优化、优化绝缘层、使用小直径的吸热管、缩短循环回路的长度。

辐射热损失在整个热损失中是最主要的。虽然降低吸热管壁面选择性吸收膜的辐射系数是最佳选

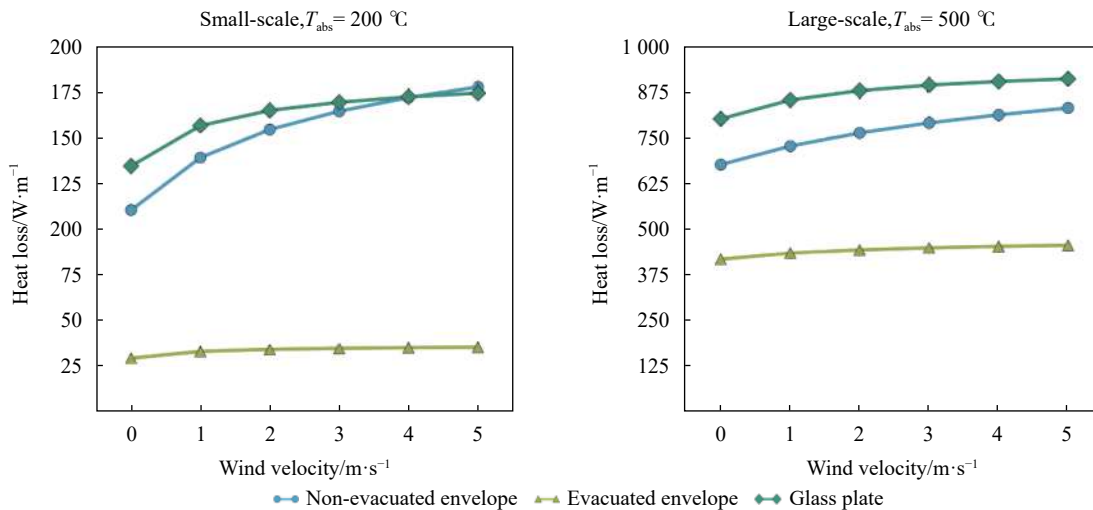


图 18 风速对三种线性菲涅尔式聚光器接收器热损失的影响<sup>[113]</sup>

Fig.18 Influence of wind velocity on the heat loss of three different LFC-receivers<sup>[113]</sup>

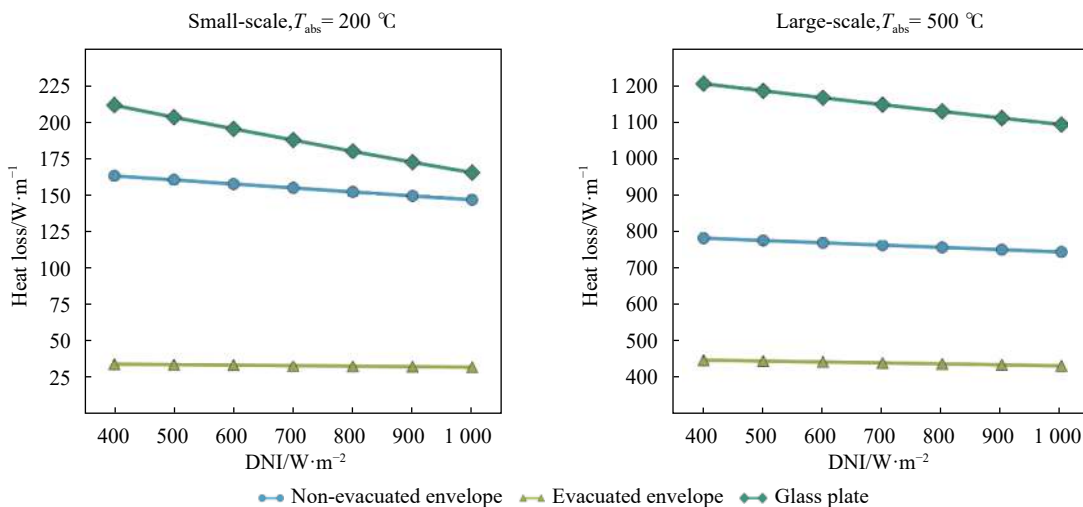


图 19 DNI 对三种线性菲涅尔式聚光器接收器热损失的影响<sup>[113]</sup>

Fig.19 Influence of Direct Normal Irradiation on the heat loss of three different LFC-receivers<sup>[113]</sup>

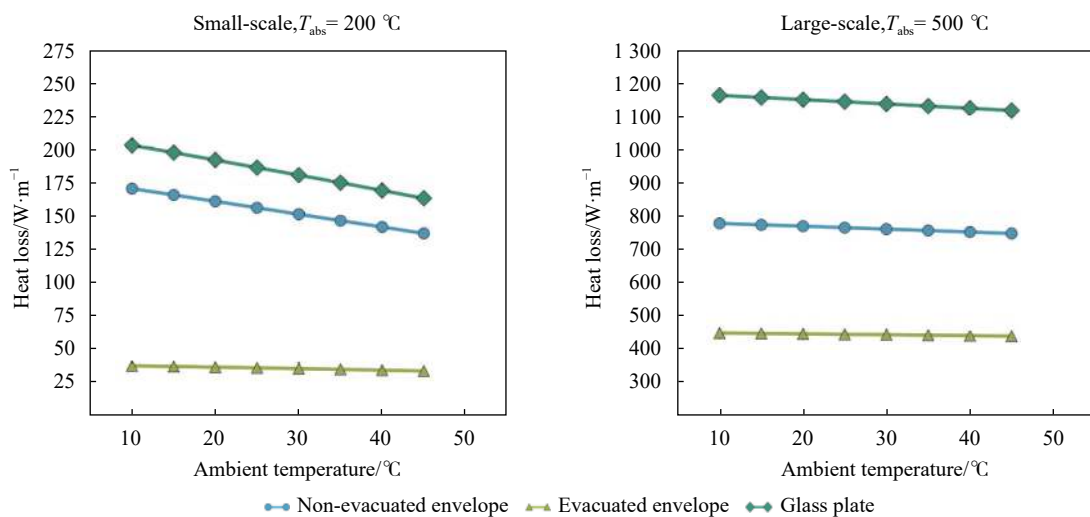


图 20 环境温度对三种线性菲涅尔式聚光器接收器热损失的影响<sup>[113]</sup>

Fig.20 Influence of ambient temperature on the heat loss of three different LFC-receiver<sup>[113]</sup>

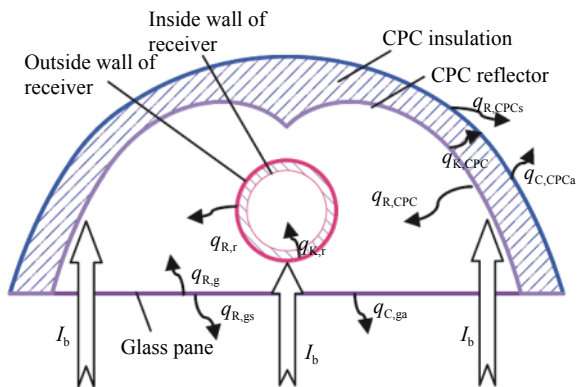


图 21 CPC 型二次反射接收器的传热模型<sup>[14]</sup>

Fig.21 Heat transfer model of LFR with CPC absorber<sup>[14]</sup>

择,但难度大,即便是实现了低辐射系数,在长期运行过程中该特性不易保持。只有通过一定手段有效抑制辐射热损失才能显著提高聚光器热效率,由单根金属管和二次反射镜构成的接收器有效降低了间隙损失,具有较高的光学效率和成本优势,但是热损失较大。研制对可见光具有高透过率和红外高反射率膜层的玻璃盖板,并加装到二次反射镜的开口位置,可以有效降低非真空集热管型二次反射式接收器的热损失。低于 200 °C 的应用中,在聚光器结构设计时应着重考虑对流热损失;高于 200 °C 的应用中,应着重考虑辐射热损失。目前工程中所使用的吸热管规格主要有  $\phi 90$  mm 和  $\phi 70$  mm 两种,未来可以尝试使用更小直径的吸热管,不仅可以提高系统的聚光倍数,而且可以减少热损失。

### 3 总结与展望

LFR 聚光集热技术是一种具应用前景和发展潜力的中高温太阳能热利用技术。文中对线性菲涅尔式聚光集热系统主反射镜、二次反射接收器和镜场的优化设计以及系统热性能等研究进展进行了综述,结论如下:

LFR 聚光器的光学损失主要是由于 LFR 是简化的 PTC 造成的。由于主反射镜镜场几何参数引起的光学损失中余弦损失不可避免。阴影与遮挡损失可以通过镜场结构的优化将其降低到最低。主反射镜采用圆柱形反射镜不仅可以提高光学效率,而且相比抛物面型反射镜具有较低的成本。对于循环回路较短的 LFR 系统,为了减少末端损失,可采用增加接收器长度和主反射镜面积、倾斜布置主反射镜和接收器

的方法。通过研制积尘退化涂层的反射镜,利用积尘清理设备可以降低面积尘对系统光学效率的影响。

用于 LFR 聚光集热系统的二次反射接收器, CPC 型二次反射接收器在实际工程中应用最为广泛。构建由吸热管、二次反射镜和具有高透过率、低热辐射玻璃盖板组成的新型二次反射接收器,可以降低成本、提高光学效率、减小热损失。ADC 二次反射接收器的光学效率最高,其实用性还需进一步验证,其他类型二次反射接收器的实际工程应用尚未见报道。

目前,提高吸热器表面能流分布均匀性的方法主要包括优化设计聚光系统、提高管壁导热系数、增强吸热管和工作介质之间的换热系数等。笔者课题组认为:在实际运行系统中可通过优化主反射镜场的调度策略解决吸热器表面能流分布不均匀的问题。

提高传热介质工作温度是提高其系统热效率的主要手段,但随着工作温度的升高,热损失增加。影响热损失的因素众多,其中环境温度、风速、DNI 的影响不可避免,对二次反射接收器的光学和几何结构参数的优化是减少热损失的有效措施。目前文献大多仅分析单因素引起的热损失,多参数影响下的热损失还需要进一步研究。强化传热可提高热性能,降低热损失,但幅度不大且增加了泵的压降。降低吸热管表面选择性吸收膜的辐射系数同样可降低热损失,但难度大,且在长期运行过程中该特性不易保持。

随着 LFR 聚光集热系统研究方法的不断进步和整个系统的不断优化,新型 LFR 聚光器的出现将提供更佳的工作温度和效率,更容易操作和控制,使得 LFR 聚光集热技术成为最有前途的太阳能利用技术。未来在构建新型 LFR 聚光集热系统时,不仅要考虑光学性能,而且要考虑具有较小的热损失,通过新的研究方法寻找两者之间折中的最佳方案。

### 参考文献:

[1] Kabir E, Kumar P, Kumar S, et al. Solar energy: Potential and future prospects [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 894-900.

[2] Bellos E. Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors-A critical review [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2019, 10: 112-137.

[3] Ge T S, Wang R Z, Xu Z Y, et al. Solar heating and cooling: Present and future development [J]. *Renewable Energy*, 2017,

- 126(10): 1126-1140.
- [4] Gu Yujiong, Geng Zhi, Zhang Chen, et al. Review on key technologies of concentrating solar thermal power generation systems [J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(6): 6-13. (in Chinese)
- [5] Sun J, Zhang Z, Wang L, et al. Comprehensive Review of line-focus concentrating solar thermal technologies: Parabolic Trough Collector (PTC) vs Linear Fresnel Reflector (LFR) [J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(5): 1097-1124.
- [6] Ma Jun, Wang Chonglong, Xia Yangjun. Research progress on secondary concentrator for linear Fresnel reflector [J]. *Sci Sin Tech*, 2020, 50(8): 997-1008. (in Chinese)
- [7] Baum V A, Aparasi R R. High-power solar installations [J]. *Solar Energy*, 1957, 1(1): 6-12.
- [8] Beltagy H, Semmar D, Lehaut C, et al. Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type solar concentrator [J]. *Renewable Energy*, 2017, 101: 782-793.
- [9] Choudhury C, Sehgal H K. A fresnel strip reflector-concentrator for tubular solar-energy collectors [J]. *Applied Energy*, 1986, 23(2): 143-154.
- [10] Negi B S, Kandpal T C, Mathur S S. Optical and thermal performance evaluation of a linear Fresnel reflector solar concentrator [J]. *Solar & Wind Technology*, 1989, 6: 589-593.
- [11] Negi B S, Kandpal T C, Mathur S S. Designs and performance characteristics of a linear fresnel reflector solar concentrator with a flat vertical absorber [J]. *Solar & Wind Technology*, 1990, 7: 379-392.
- [12] Mathur S S, Kandpal T C, Negi B S. Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators—II. Mirror elements of equal width [J]. *Energy Conversion & Management*, 1991, 31: 221-232.
- [13] Feuermann D, Gordon J M. Analysis of a two-stage linear Fresnel reflector solar concentrator [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1991, 113(4): 272-279.
- [14] Du Chunxu, Wang Pu, Ma Chongfang, et al. Optical geometric method for LFR mirror field arrangement without shading and blocking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3276-3282. (in Chinese)
- [15] Du Chunxu, Wang Pu, Ma Chongfang, et al. Vector analysis of the geometric relationship of LFR[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2011, 32(10): 1466-1469. (in Chinese)
- [16] Du Chunxu, Wang Pu, Wu Yuting, et al. Performance analysis of shading and blocking of linear Fresnel reflector mirror field [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2013, 34(11): 1868-1876. (in Chinese)
- [17] Mills D R, Morrison G L. Compact Linear Fresnel Reflector solar thermal powerplants [J]. *Solar Energy*, 2000, 68(3): 263-283.
- [18] Sharma V, Khanna S, Nayak J K, et al. Effects of shading and blocking in linear Fresnel reflector field [J]. *Energy*, 2016, 94: 633-653.
- [19] Montes M J, Rubbia C, Abbas R, et al. A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power [J]. *Energy*, 2014, 73: 192-203.
- [20] Song Jinghui, Ma Jishuai, Zhan Zhigang. Optical analysis and of of linear Fresnel collector [J]. *Journal of Chinese Society Power Engineering*, 2016, 36(7): 563-568. (in Chinese)
- [21] Song Jinghui, Ma Jishuai, Dai Yanjun. Design theory and optical analysis of the linear Fresnel collector's mirror field[J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(1): 1-8. (in Chinese)
- [22] Abbs R, Sebastlan A, Montes M J, et al. Optical features of linear Fresnel collectors with different secondary reflector technologies [J]. *Applied Energy*, 2018, 232(C): 386-397.
- [23] Zhu J, Huang H. Design and thermal performances of semi-parabolic linear Fresnel reflector solar concentration collector [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 77: 733-737.
- [24] Momeni S, Menbari A, Alemrajabi A A, et al. Theoretical performance analysis of new class of Fresnel concentrated solar thermal collector based on parabolic reflectors [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, 31(4): 25-33.
- [25] Qiu Yu, He Yaling, Cheng Zedong. Optical performance investigation and optimization of a linear Fresnel reflector solar collector[J]. *J Eng Thermophys*, 2015, 36(12): 2551-2556. (in Chinese)
- [26] Pulido-Iparraguirre D, Valenzuela L, Fernández-Reche J, et al. Design, manufacturing and characterization of linear Fresnel reflector's facets [J]. *Energies*, 2019, 12(14): 2795.
- [27] Pu Shaoxuan, Xia Chaofeng. End-loss and compensation of linear Fresnel collectors [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27: 282-285. (in Chinese)
- [28] Bellos E, Tzivanidis C, Moghimi M A. Reducing the optical end losses of a linear Fresnel reflector using novel techniques [J]. *Solar Energy*, 2019, 186(7): 247-256.
- [29] Yang M, Zhu Y, Taylor R A. End losses minimization of linear Fresnel reflectors with a simple, two-axis mechanical tracking system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 161: 284-293.
- [30] Diego Pulido-Iparraguirre, Loreto Valenzuela, Juan-José Serrano-Aguilera, et al. Optimized design of a linear Fresnel reflector for solar process heat applications [J]. *Renewable*

- Energy*, 2019, 131(2): 1089-1106.
- [31] Jie S, Wang R, Hui H, et al. An optimized tracking strategy for small-scale double-axis parabolic trough collector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1408-1420.
- [32] Cheng Z D, Zhao X R, He Y L. Novel optical efficiency formulas for parabolic trough solar collectors: Computing method and applications [J]. *Applied Energy*, 2018, 224(15): 682-697.
- [33] Men Jingjing, Zhao Xueru, Leng Yakun, et al. Study on multi-objective optimization of optical comprehensive performance of linear Fresnel reflector collectors [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(7): 1706-1711. (in Chinese)
- [34] Qu W, Wang R, Hong H, et al. Test of a solar parabolic trough collector with rotatable axis tracking [J]. *Applied Energy*, 2017, 207(1): 7-17.
- [35] Barbon A, Bayon-Cueli C, Bayon L, et al. Influence of solar tracking error on the performance of a small-scale linear Fresnel reflector [J]. *Renewable Energy*, 2020, 162(C): 43-54.
- [36] 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 [J]. *Applied Energy*, 2015, 146(15): 162-173.
- [37] Yan Suying, Wei Zehui, Ma Jing, et al. Effects of dust accumulation on reflectance and heat properties of linear Fresnel concentrator system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(3): 766-771. (in Chinese)
- [38] Zhao X, Chen Z, Yan S, et al. Influence of dust accumulation on the solar reflectivity of a linear Fresnel reflector [J]. *Journal of Thermal Science*, 2021, 30: 1526-1540.
- [39] Wang Chenglong, Ma Jun, Fan Duowang. Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel reflector system [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 78-82. (in Chinese)
- [40] Ma Jun, Wang Ruidong, Wang Chonglong, et al. An optimal arrangement method for shading and blocking analysis of linear Fresnel concentrator, CN: ZL201710653340.8 [P]. 2019-11-05. (in Chinese)
- [41] Ma Jun. Optimization design and performance research of linear Fresnel solar concentrating system[D]. *Lanzhou Jiaotong University*, 2020. (in Chinese)
- [42] Winston R. Principles of solar concentrators of a novel design [J]. *Sol Energy*, 1974, 16: 89-95.
- [43] Gordon J M, Ries H. Tailored edge-ray concentrators as ideal second stages for Fresnel reflectors [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(13): 2243-2251.
- [44] Balaji S, Reddy K S, Sundararajan T. Optical modelling and performance analysis of a solar LFR receiver system with parabolic and involute secondary reflectors [J]. *Appl Energy*, 2016, 179: 1138-1151.
- [45] Zhu G D. New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors [J]. *Sol Energy*, 2017, 144: 117-126.
- [46] Chaitanya Prasad G S, Reddy K S, Sundararajan T. Optimization of solar linear Fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube [J]. *Sol Energy*, 2017, 150: 1-12.
- [47] Grena R, Tarquini P. Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid [J]. *Energy*, 2011, 36: 1048-1056.
- [48] Canavaro D, Chaves J, Collares-Pereira M. Simultaneous multiple Surface method for Linear Fresnel concentrators with tubular receiver [J]. *Sol Energy*, 2014, 110: 105-116.
- [49] Canavaro D, Chaves J, Collares-Pereira M. New dual asymmetric CEC linear Fresnel concentrator for evacuated tubular receivers[C]//AIP Conference Proceedings, 2017, 1850: 040001.
- [50] Tsekouras P, Tzivanidis C, Antonopoulos K. Optical and thermal investigation of a linear Fresnel collector with trapezoidal cavity receiver [J]. *Appl Thermal Eng*, 2018, 135: 379-388.
- [51] Wang Chenglong, Ma Jun, Fan Duowang. Design and analysis of a CPC with single vacuum tube for linear Fresnel reflector system [J]. *Sci Sin Tech*, 2014, 44(6): 597-602. (in Chinese)
- [52] Ma Jun, Xia Rongbin. Analysis on shading and blocking of a linear Fresnel reflector based on ray tracing method[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University* 2019, 38(4): 120-124. (in Chinese)
- [53] Hack M, Zhu G, Wendelin T. Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs [J]. *Appl Energy*, 2017, 208: 1441-1451.
- [54] Hberle A, Zahler C, Lerchenmüller H, et al. The solarmundo line focussing Fresnel collector: Optical and thermal performance and cost calculations [C]//Proceedings of 11th International Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES) Symposium, 2002.
- [55] Eck M, Uhlig R, Mertins M, et al. Thermal load of direct steam-generating absorber tubes with large diameter in horizontal linear fresnel collectors [J]. *Heat Transfer*



- Engineering*, 2007, 28(1): 42-48.
- [56] Zhao Jinlong, Li Lin, Cui Zhengjun, et al. Calculation of flux density distribution on focal plane in linear Fresnel reflector [J]. *Acta Optical Sinica*, 2012(12): 1208001. (in Chinese)
- [57] Qiu Y, Li M J, Wang K, et al. Aiming strategy optimization for uniform flux distribution in the receiver of a linear Fresnel solar reflector using a multi-objective genetic algorithm [J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 1394-1407.
- [58] Craig K J, Moghimi M A, Rungasamy A E, et al. Finite-volume ray tracing using computational fluid dynamics in linear focus CSP applications [J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 241-256.
- [59] Moghimi M A, Craig K J, Meyer J P. A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of linear Fresnel collectors using the finite volume method [J]. *Solar Energy*, 2015, 116: 407-427.
- [60] Ma Jun, Wang Chenglong, Xia Yangjun. Compound parabolic collector for linear Fresnel reflector system [J]. *Opt Precis Eng*, 2019, 27(12): 2542-2548. (in Chinese)
- [61] He Yaling, Wang Kun, Du Baocun, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: A review [J]. *Chin Sci Bull*, 2016, 61(30): 3208-3237. (in Chinese)
- [62] Vouros A, Mathioulakis E, Papanicolaou E, et al. On the optimal shape of secondary reflectors for linear Fresnel collectors [J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 1454-1464.
- [63] Bellos E, Tzivanidis C, Papadopoulos A. Optical and thermal analysis of a linear Fresnel reflector operating with thermal oil, molten salt and liquid sodium [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 70-80.
- [64] He Y L, Wang K, Qiu Y, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 448-474.
- [65] Sirimanna G, Nixon J D. Effects of Mirror Geometry on the Optical Efficiency of a Linear Fresnel Reflector (LFR) [M]//Sayigh A. *Renewable Energy and Sustainable Buildings*. Brighton: Innovative Renewable Energy, 2020: 337-347.
- [66] Santos A V, Canavarro D, Collares-Pereira M. The gap angle as a design criterion to determine the position of linear Fresnel primary mirrors [J]. *Renewable Energy*, 2021, 163: 1397-1407.
- [67] Ma J, Wang C L, Zhou Y, et al. Optimized design of a linear Fresnel collector with a compound parabolic secondary reflector [J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 141-148.
- [68] Montes M J, Abanades A, Martinez-Val J M, et al. Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(12): 2165-2176.
- [69] Peterseim J H, White S, Tadros A, et al. Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation? [J]. *Renewable Energy*, 2013, 57: 520-532.
- [70] Feldhoff J F, Benitez D, Eck M, et al. Economic potential of solar thermal power plants with direct steam generation compared with HTF plants [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2010, 132(11): 1001-1009.
- [71] Modi A, Haglin D F. Performance analysis of a Kalina cycle for a central receiver solar thermal power plant with direct steam generation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 65(1-2): 201-208.
- [72] Bachelier C, Stieglitz R. Design and optimisation of linear Fresnel power plants based on the direct molten salt concept [J]. *Solar Energy*, 2017, 152: 171-192.
- [73] Bellos E, Tzivanidis C, Antonopoulos K A. A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 374-386.
- [74] Pacio J, Wetzel T. Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems [J]. *Solar Energy*, 2013, 93: 11-22.
- [75] Qiu Y, Li M J, He Y L, et al. Thermal performance analysis of a parabolic trough solar collector using supercritical CO<sub>2</sub> as heat transfer fluid under non-uniform solar flux [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 115: 1255-1265.
- [76] Ramon F G. Preliminary design study for a lunar solar power station using local resources [J]. *Solar Energy*, 2012, 86: 2871-2892.
- [77] Pérez-Lvarez R, Acosta-Iborra A, Santana D. Thermal and mechanical stresses in bayonet tubes of solar central receivers working with molten salt and liquid sodium [J]. *Engineering*, 2020, 5: 100073.
- [78] Khandelwal N, Sharma M, Singh O, et al. Comparative analysis of the linear Fresnel reflector assisted solar cycle on the basis of heat transfer fluids [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 38(1).
- [79] Okafor I F, Dirker J, Meyer J P. Influence of circumferential solar heat flux distribution on the heat transfer coefficients of linear Fresnel collector absorber tubes [J]. *Solar Energy*, 2014, 107: 381-397.
- [80] 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 [J]. *Applied*

- Energy*, 2013, 102: 449-60.
- [81] Zhu Xiaowei, Fu Yunhan, Zhao Jingquan, et al. A novel wavy-tape insert configuration for pipe heat transfer augmentation [J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 127: 140-148.
- [82] Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers [J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 514-531.
- [83] Jaramillo O A, Borunda M, Velazquez-Lucho K M, et al. Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: an analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts [J]. *Renew Energy*, 2016, 93: 125-141.
- [84] Yan Weiwei, Ge Shifu, Li Yang. Numerical simulation on heat transfer enhancement in parabolic trough solar collector of DSG systems [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2013, 33(7): 550-554. (in Chinese)
- [85] Geng Z, Gao J, Liu H, et al. Heat transfer enhancement and field synergy analysis of vacuum collector tube with inserted rotor [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(4): 045224.
- [86] Massidda L, Varone A. A numerical analysis of a high temperature solar collecting tube using gas as a heat transfer fluid[R]. Pula: Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia (CRS4), 2007.
- [87] Delussu G. A qualitative thermo-fluid-dynamic analysis of a CO<sub>2</sub> solar pipe receiver [J]. *Solar Energy*, 2012, 86: 926-934.
- [88] He Y L, Zhang Y W. Advances and outlooks of heat transfer enhancement by longitudinal vortex generators [J]. *Adv Heat Transfer*, 2012, 44: 119-185.
- [89] Yang C, Zhang Y, Yan F, et al. The numerical simulation of enhanced heat transfer on a Linear Fresnel molten salt-type receiver tube filled with porous media [C]//E3 S Web of Conferences, 2019, 118(5): 01041.
- [90] Subramani J, Nagarajan P K, Mahian O, et al. Efficiency and heat transfer improvements in a parabolic trough solar collector using TiO<sub>2</sub> nanofluids under turbulent flow regime [J]. *Renewable Energy*, 2018, 119: 19-31.
- [91] Bellos E, Tzivanidis C, Papadopoulos A. Enhancing the performance of a linear Fresnel reflector using nanofluids and internal finned absorber [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018(1): 237-255.
- [92] Almanza R, Lentz A, Jimenez G. Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs [J]. *Solar Energy*, 1997, 61: 275-278.
- [93] Ghodbane M, Bellos E, Said Z, et al. Evaluating energy efficiency and economic effect of heat transfer in copper tube for small solar linear Fresnel reflector [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 143(6): 4197-4215.
- [94] Aldali Y, Muneer T, Henderson D. Solar absorber tube analysis: Thermal simulation using CFD [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2013, 8: 14-19.
- [95] Ebrahimpour Z, Sheikholeslami M, Farshad S A. Radiation and convection treatment of nanomaterial within a linear Fresnel reflector unit [J]. *European Physical Journal Plus*, 2021, 136(2): 01141.
- [96] Rajendran D R, Sundaram E G, Jawahar P, et al. Review on influencing parameters in the performance of concentrated solar power collector based on materials, heat transfer fluids and design [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 140(1): 33-51.
- [97] María José Montes, Ruben Abbas, Muñoz M, et al. Advances in the linear Fresnel single-tube receivers: Hybrid loops with non-evacuated and evacuated receivers [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 149: 318-333.
- [98] Burkholder F, Kutscher C. Heat loss testing of Schott's 2008 PTR70 parabolic trough receiver [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [99] Schön J H, Binder G, Bucher E. Performance and stability of some new high-temperature selective absorber systems based on metal/dielectric multilayers [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1994, 33(4): 403-416.
- [100] Sathiaraj T S, Thangaraj R, Sharbaty A, et al. Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> selective cermet coatings for photothermal conversion up to 500 [J]. *Thin Solid Films*, 1990, 190: 241-254.
- [101] Eva C, Men W, Sánchez-García J A, et al. Novel Mo-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> based selective coating for high temperature concentrating solar power applications [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 122: 217-225.
- [102] Shen Y, Shi Y Y, Wang F C. High-temperature optical properties and stability of Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub>-AlN<sub>x</sub>-Al solar selective absorbing surface prepared by DC magnetron reactive sputtering [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003, 77: 393-403.
- [103] Ding Dawei, Cai Weimin. Computer simulation of high-temperature solar selective absorption [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, 26(11): 1353-1358. (in Chinese)
- [104] Lin M, Sumathy K, Dai Y J, et al. Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51: 963-972.
- [105] Esposito S, Antonaia A, Addonizio M L, et al. Fabrication and optimization of highly efficient cermet-based spectrally

- selective coatings for high operating temperature [J]. *Thin Solid Film*, 2009, 517: 6000-6006.
- [106] Yang H, Wang Q, Huang X, et al. Performance study and comparative analysis of traditional and double-selective-coated parabolic trough receivers [J]. *Energy*, 2018, 145: 206-216.
- [107] Che Deyong, Ding Hu, Gao Long, et al. Modeling of CPC concentrating collector vacuum layer heat transfer [J]. *Renewable Energy Resources*, 2016, 34(11): 1674-1679. (in Chinese)
- [108] López-Alvarez L A, Larraneta M, Silva-Pérez M A, et al. Impact of the variation of the receiver glass envelop transmittance as a function of the incidence angle in the performance of a linear Fresnel collector [J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 607-615.
- [109] 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 [J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 129-144.
- [110] Reddy K S, Balaji S, Sundararajan T, et al. Estimation of heat losses due to wind effects from linear parabolic secondary reflector -receiver of solar LFR module [J]. *Energy*, 2018, 150: 410-433.
- [111] Guadamud E, Oliva A, Lehmkuhl O, et al. Thermal analysis of a receiver for linear Fresnel reflectors [J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 405-414.
- [112] Parikh A, Martinek J, Mungas G, et al. Investigation of temperature distribution on a new linear Fresnel receiver assembly under high solar flux [J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(9): 4051-4061.
- [113] Hofer A, Cuevas F, Heimsath A, et al. Extended heat loss and temperature analysis of three linear Fresnel receiver designs [J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 424-433.
- [114] Lai Yanhua, Song Gu, Lu Mingxin, et al. Thermal performance analysis of linear fresnel reflector concentrator with a compound parabolic cavity absorber [C]//International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment, 2011.
- [115] Mohan S, Saxena A, Singh S. Heat loss analysis from a trapezoidal cavity receiver in LFR system using conduction-radiation model [J]. *Solar Energy*, 2018, 159: 37-43.
- [116] Ardekani M M, Craig K J, Meyer J P. Optimization of insulation of a linear Fresnel collector [C]//AIP Conference Proceedings, 2017, 1850(1): 040005.