塔式太阳能熔盐腔体吸热器一体化光热耦合模拟研究

王坤, 何雅玲*, 邱羽, 程泽东

西安交通大学能源与动力工程学院, 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

2016-01-22 收稿, 2016-02-12 修回, 2016-02-16 接受, 2016-04-07 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(51436007)资助

摘要 首先采用蒙特卡罗光线追迹与杰勃哈特方法结合的混合光学模拟方法对塔式聚光集热系统中太阳辐射传播的全过程进行了完整描述, 准确获得了全镜场条件下吸热表面非均匀的能流分布. 在此基础上对熔盐腔体吸热器进行了一体化光热耦合模拟, 重点分析了非均匀能流分布条件下熔盐流动布置方式对吸热性能的影响, 同时考察了不同时刻条件下的吸热性能, 结果表明: 腔体吸热器吸热表面的能流分布表现出强烈的非均匀性, 在这种非均匀的能流分布条件下, 熔盐的流动布置方式会对吸热器性能产生显著的影响. 当熔盐从能量密度高的区域流入, 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, 且会在熔盐出口处会出现熔盐加热吸热管的“吸热恶化”现象; 当熔盐从能量密度低的区域流入, 温度缓慢升高, 整个吸热面处于相对较低的温度水平, 热损失较小, 能够获得更多的高温熔盐. 另外, 反射损失随时间变化显著, 热损失随时间变化不显著.

关键词 塔式太阳能, 腔体吸热器, 光热耦合, 全镜场, 流动布置

吸热器是太阳能热发电系统中实现光热转换的关键环节, 同时也是整个电站中最具技术难度和挑战的关键部件之一. 应用在太阳能热发电系统中的吸热器有多种形式, 由于腔体吸热器具有热损小的优点而得到了广泛应用^[1,2]. 目前针对腔体吸热器吸热性能的研究也已经得到了广泛的开展. 例如, Li等人^[3]发展了腔体吸热器稳态模型, 能够方便地预测吸热器的吸热性能; Hinojosa等人^[4]专门数值研究了腔体吸热器内的对流损失以及热辐射损失; Shuai等人^[1]采用蒙特卡罗光线追迹方法模拟获得了腔体吸热器内的非均匀的辐射能流分布, 这种非均匀的能流分布对吸热器的性能有重要影响; 随后, Fang等人^[5]在给定腔体吸热器进光口能流分布的情况下采用蒙特卡罗方法计算得到吸热表面非均匀的太阳能流分布, 然后对水/水蒸气腔体吸热器的热性能进行了模拟, 分析了吸热器吸热效率. Tu等人^[6]进一步改

进完善了Fang等人^[5]提出的模拟方法, 并对吸热器内部表面的吸收涂层的布置进行了优化; Yu等人^[7]同时模拟了太阳辐射在定日镜场的传播过程, 获得了腔体吸热表面的能流分布, 并进一步模拟了以水/水蒸气作为传热工质的腔体吸热器内的耦合换热过程, 对腔体吸热器的吸热性能进行了分析. 也有一些学者专门针对熔盐腔体吸热器开展了一些研究工作. 例如, Montes等人^[8]对熔盐腔体吸热器的光热耦合过程进行了模拟, 并根据腔体内部非均匀的能流分布对吸热器进行了优化; Chang等人^[9]在获得太阳能流分布后对腔体吸热器内的耦合换热过程进行了较为全面的研究, 但吸热表面能流分布是在给定进光口入射能流为高斯分布的假设基础上获得的, 并未考虑太阳辐射在定日镜场的传播过程.

可见目前大多研究是在光-热解偶的条件下进行的, 并未真正实现吸热器的一体化光热耦合模拟. 本

引用格式: 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

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, doi: 10.1360/N972016-00103

文将在全镜场条件下模拟太阳辐射能传播的整个完整过程,准确获得腔体吸热面上的能流分布,在此基础上对熔盐腔体吸热器进行一体化光热耦合模拟,着重分析非均匀能流分布条件下熔盐流动布置方式对腔体吸热器吸热性能的影响.

1 研究对象与模拟方法

1.1 研究对象

本文以DAHAN电站中的定日镜场^[7](图1)以及某一典型的熔盐腔体吸热器(图2)组成的塔式聚光集热系统作为研究对象.腔体吸热器由3个吸热面以及若干辅助面构成,吸热面上布置有吸热板,吸热板由一定数量的吸热管组成,表1给出了吸热器具体结构参数.采用二元盐(60 wt%NaNO₃-40 wt%KNO₃)作为吸热器内的传热工质,高温熔盐分两路对称布置,在吸热器内“蛇形流动”.熔盐进口温度为290℃,出口温度为565℃^[10].本文研究如图3所示的两种流动布置方式下腔体吸热器的吸热性能.

塔式聚光集热系统中的光热转换过程主要包括:(1) 太阳辐射能经定日镜反射聚焦进入腔体吸热器,(2) 太阳辐射能在腔体内经过多次反射后,最终被腔体内表面吸收,形成不均匀的能流分布,一部分能量通过(3) 吸热管壁导热以及(4) 高温熔盐与管壁的对流换热加热熔盐;另一部分能量则通过(5) 吸热腔体内表面间的辐射进行换热,或者通过(6) 与外界空气的对流换热以及(7) 腔体内高温壁面与进光口的辐射换热散失到环境中.本文将对上述全部过程进行完整模拟.

图1 (网络版彩色)定日镜场示意图^[7]
Figure 1 (Color online) Layout of the heliostat field^[7]

图2 腔体吸热器示意图
Figure 2 Diagram of typical cavity receiver

图3 (网络版彩色)吸热器内熔盐两种流动布置.(a) 布置-1; (b) 布置-2
Figure 3 (Color online) Flow layout of molten salt in the cavity receiver. (a) Flow layout-1; (b) flow layout-2

1.2 模拟方法

(i) 光学模拟. 吸热表面的能流分布对吸热器的吸热性能具有重要影响,实现塔式聚光集热系统

表1 腔体吸热器参数

Table 1 Geometric parameters of the cavity receiver

项目	取值
进光口宽度 W_a	5.0 m
进光口高度 L_a	5.0 m
吸热器宽度1 W_{r1}	6.0 m
吸热器宽度2 W_{r2}	2.3 m
吸热器高度 L_r	6.0 m
吸热器深度1 D_1	0.8 m
吸热器深度2 D_2	3.7 m
吸热管外径 d_o	0.019 m
吸热管内径 d_i	0.0165 m
吸热板数目 N_p	56
每块吸热板的吸热管数目 N_t	10
吸热面可见光发射率 $\varepsilon_{sol,act}$	0.85
吸热面热辐射发射率 $\varepsilon_{the,act}$	0.1
辅助面可见光发射率 $\varepsilon_{sol,pas}$	0.1
辅助面热辐射发射率 $\varepsilon_{the,pas}$	0.1

中光学传播过程的完整模拟,准确获得吸热表面的能流分布是实现光热耦合模拟的关键.塔式系统中的光学传播过程包括太阳辐射能在定日镜场的传播过程以及在腔体内的传播过程.虽然针对塔式聚光系统中的光学传播过程已经开展了很多研究^[7,11-18],但大多研究并未实现整个光学传播过程的完整模拟,因而很难准确获得腔体吸热器表面能流分布的时空分布规律.最近,Wang等人^[19]提出采用将蒙特卡罗光线追迹(MCRT)^[7,13-17,20]与杰勃哈特(Gebhart)方法^[21,22]结合的混合光学模拟方法对塔式系统中太阳辐射传播的全过程进行完整描述,能够准确地获得吸热表面实时的能流分布规律,并对该模拟方法进行了详细的模型验证.本文将采用Wang等人^[19]提出的光学模拟方法,具体来说,太阳辐射在定日镜场中的传播过程采用MCRT方法进行模拟,对腔体内部的光学传播过程采用Gebhart方法进行计算.为了得到太阳能流在吸热器腔体内部表面的分布,将腔体内表面划分为 N_e 个吸热单元.整个光学模拟过程如图4所示.为避免重复这里只着重介绍应用Gebhart方法模拟太阳辐射能在吸热器腔体内部传播的过程^[19,21,22].

首先引入辐射传递因子 $B_{i,j}$,其定义为单元 i 发出的辐射能中最终被单元 j 吸收的分数,太阳辐射传递因子计算如下:

$$B_{i,j} = \varepsilon_{sol} [j] X_{i,j} + \sum_{m=1}^{N_e} B_{m,j} X_{i,m} (1 - \varepsilon_{sol} [m])$$

$$1 \leq i \leq N_e, 1 \leq j \leq N_e + 1, \quad (1)$$

其中, ε_{sol} 为对太阳辐射的表面发射率:对于吸热面, $\varepsilon_{sol}[j] = \varepsilon_{sol,act}$,对于辅助面, $\varepsilon_{sol}[j] = \varepsilon_{sol,pas}$,特别地,将进光口当作第 N_e+1 个单元, $\varepsilon_{sol}[N_e+1]=1$; $X_{i,j}$ 为单元 i 对单元 j 的角系数,角系数通过蒙特卡罗方法计算得到.运用高斯-塞德尔迭代法求解线性方程组得到 $B_{i,j}$.

吸热腔体各单元吸收的太阳能则可表示为

$$Q_{abs} [j] = Q_{pro} [j] \cdot \varepsilon_{sol} [j] + \sum_{i=1}^{N_e} B_{i,j} Q_{pro} [i] (1 - \varepsilon_{sol} [i])$$

$$1 \leq j \leq N_e, \quad (2)$$

另有一部分太阳辐射能在腔体内多次反射过程中通过进光口逃逸,造成反射损失:

$$Q_{ref} = \sum_{i=1}^{N_e} B_{i,(N_e+1)} Q_{pro} [i] (1 - \varepsilon_{sol} [i]). \quad (3)$$

(ii) 耦合换热模拟. 投射到吸热面上的太阳能一部分用来加热熔盐,使其温度升高,另外一部分能量通过辐射、对流和导热方式散失,能量平衡方程为

$$Q_{abs} [i] = Q_{salt} [i] + Q_{radi} [i] + Q_{conv} [i] + Q_{cond} [i]. \quad (4)$$

而投射到辅助面上的太阳能则全部通过导热、对流和辐射的方式散失到周围环境,能量平衡方程为

$$Q_{abs} [i] = Q_{radi} [i] + Q_{conv} [i] + Q_{cond} [i], \quad (5)$$

假设吸热器保温良好,忽略导热损失.

熔盐吸热量计算如下:

$$Q_{salt} [i] = Q_m / N_t (T_s [i] - T_s [i-1]), \quad (6)$$

其中 Q_m 为熔盐质量流量.

熔盐吸热管内的对流换热过程可描述为

$$Q_{salt} [i] = h_s [i] \cdot S_{in} [i] \cdot (T_{win} [i] - T_s [i]), \quad (7)$$

熔盐侧对流换热系数 h_s 通过Dittus-Boelter公式计算.

吸热管壁的径向导热过程可描述为

$$Q_{salt} [i] = \frac{2\pi \lambda \Delta L (T_{wou} [i] - T_{win} [i])}{\ln(d_o/d_i)}, \quad (8)$$

ΔL 为每个吸热单元的高度.

强制对流损失为

$$Q_{conv,f} [i] = h_{wind} [i] \cdot (T_{wou} [i] - T_a) \cdot A_{ape} \cdot \frac{S_{in} [i]}{\sum S_{in} [i]}, \quad (9)$$

其中强制对流换热系数通过以下关联式计算得到^[23]

图4 (网络版彩色)全镜场光学模拟流程图^[19]

Figure 4 (Color online) Flow chart of the optical simulation method^[19]

$$Nu_{wind}[i] = 0.0287 \cdot Re[i]^{0.8} Pr[i]^{1/3} \quad (10)$$

自然对流损失为

$$Q_{conv,n}[i] = h_{air}[i] \cdot (T_{wou}[i] - T_a) \cdot S_{in}[i], \quad (11)$$

其中自然对流换热系数通过以下关联式进行计算^[23]:

$$h_{air}[i] = 0.81 \cdot (T_{wou}[i] - T_a)^{0.426} \quad (12)$$

腔体吸热器总的对流热损失为

$$Q_{conv} = \sum_{i=1}^{N_e} (Q_{conv,n}[i] + Q_{conv,f}[i]). \quad (13)$$

腔体内部高温管壁间的热辐射换热同样通过Gebhart方法进行计算, 热辐射传递因子计算如下:

$$B_{i,j} = \varepsilon_{the}[j] X_{i,j} + \sum_{m=1}^n B_{m,j} X_{i,m} (1 - \varepsilon_{the}[m]), \quad (14)$$

$$1 \leq i \leq N_e, 1 \leq j \leq N_e + 1,$$

同样, ε_{the} 为吸表面热辐射发射率: 对于吸热面, $\varepsilon_{the}[j]$

为 $\varepsilon_{the,act}$, 对于辅助面, $\varepsilon_{sol}[j]$ 为 $\varepsilon_{the,pas}$, 对于进光口, $\varepsilon_{the}[N_e+1]=1$. 则吸热器腔体各单元的净辐射热流量为

$$Q_{radi}[j] = \varepsilon_{the}[j] \sigma T_{wou}^4[j] S_{ou}[j] - \sum_{i=1}^n B_{i,j} \varepsilon_{the}[i] \sigma T_{wou}^4[i] S_{ou}[i]. \quad (15)$$

吸热器通过进光口的辐射热损失为

$$Q_{radi} = \sum_{i=1}^{N_e} B_{i,(N_e+1)} \varepsilon_{the}[i] \cdot \sigma \cdot T_{wou}^4[i] \cdot S_{ou}[i]. \quad (16)$$

2 结果与分析

2.1 吸热面能流分布与反射损失

图5给出了春分正午时刻吸热面上太阳能流分布情况. 可以看出, 吸热面上的能流分布表现出强烈的非均匀性, 总体上成“中心能量高、两边能量低”的趋

图5 (网络版彩色)吸热面上的太阳能流分布(春分正午)

Figure 5 (Color online) Solar flux distribution on interior surfaces (Spring equinox, noon)

势, 分布在吸热面-2上的太阳辐射能明显多于吸热面-1和吸热面-3. 吸热面上的峰值热流为 421 kW m^{-2} , 出现在吸热面中心位置, 此刻腔体吸热器的反射光学损失为 453 kW .

2.2 吸热面温度分布与热损失

将2.1节计算得到的太阳能流分布作为能量输入, 对腔体吸热器内的耦合换热进行模拟, 图6给出了两种流动布置方式下吸热面的温度分布云图, 图7给出了两种流动布置方式下熔盐、管壁沿流动方向的温度分布(每个吸热板选取一根吸热管). 从图中可以看出, 在布置-1方式下, 熔盐从能量密度高的区域进入, 熔盐吸收能量, 温度迅速升高, 之后温度变化变缓. 吸热管壁温度与熔盐温度变化趋势一致. 特别地, 在熔盐出口附近, 温度反而有所下降, 且出现了吸热管壁面温度略低于熔盐温度的“吸热恶化”现象. 这是由于此区域的壁面温度高, 热损失较大, 而太阳能输入少, 导致了熔盐不但没有吸收热量, 反而向外散热. 在布置-2的情况下, 熔盐从能量密度低的区域进入, 熔盐吸收能量, 温度缓慢升高, 随着沿程能量密度的升高, 熔盐温度升高幅度加大. 吸热管壁温度也大体上与熔盐温度变化趋势一致.

表2列出了两种流动布置方式下吸热性能对比, 可以看出, 布置-1能够在一定程度上降低吸热管壁的最高温度, 这是由于布置-1方式下低温熔盐从能量密度高的区域进入, 避免该区域峰值温度的出现, 一定程度上提高吸热器的安全性能. 然而, 与布置-2相比, 布置-1情况下的热损失(热辐射损失、对流损失)显著增大, 相应地, 能够加热的熔盐质量流量也明显减小. 这是由于吸热器热损失很大程度上取决

图6 (网络版彩色)两种布置方式下吸热面温度分布. (a) 布置-1; (b) 布置-2

Figure 6 (Color online) Temperature distribution of the absorber wall. (a) Under flow layout-1; (b) under flow layout-2

图7 (网络版彩色)两种布置方式下熔盐和壁面温度沿流动方向分布

Figure 7 (Color online) Temperature evolutions of the molten salt and absorber wall

于吸热管壁面温度, 在布置-1方式下熔盐从能量密度高的区域流入, 熔盐温度迅速得到提高, 管壁温度也随之升高, 大部分吸热面处于较高温度水平, 而在布置-2方式下, 熔盐从能量低的区域流入, 熔盐温度与管壁温度都缓慢升高, 大部分吸热面处于相对较低的温度水平. 从图7可以明显看出布置-1方式下吸

热管壁面温度整体高于布置-2, 表2也显示布置-1平均管壁温度明显高于布置方式2. 由此导致了布置-1方式下的吸热器热损失明显大于布置-2.

2.3 不同时刻的影响

太阳辐射强度与太阳位置随时间变化而变化, 这对吸热器的性能同样会产生较大影响. 本节对不同时刻条件下(从8:00到16:00)腔体吸热器的光热转换过程进行了模拟计算. 图8选取给出了8:00, 10:00, 14:00, 16:00等不同时刻吸热表面的能流分布. 结合图5给出的正午时刻能流分布情况, 可以看出, 任意时刻太阳辐射能均表现出了强烈的非均匀性, 吸热面-2上分布多, 吸热面-1和吸热面-3相对较少, 且太阳辐射能在吸热面上总体上随时间从吸热面-3向吸热面-1移动, 在正午时刻基本程对称分布.

图9给出了不同时刻沿流动方向熔盐与吸热管壁

的温度分布. 可以看出, 与吸热面上能流密度分布随时间显著变化不同, 吸热管壁的沿程温度分布总体上保持了相同的变化趋势, 各处的温度随时间变化不明显, 这是因为各时刻吸热器熔盐的进出口温度保持不变, 即使吸热面上的太阳能总量以及分布形状在不同时刻有显著变化, 对吸热管壁的温度分布也不会有明显影响; 另外, 还可以看出, 吸热面上太阳辐射能越少, 布置-1方式下熔盐加热管壁的“吸热恶化”区域越明显.

图10给出了两种布置方式下吸热管壁最高温度与平均温度随时间的变化, 图11给出了两种布置方式下吸热器损失(热损失和反射损失)及加热熔盐量随时间的变化情况. 从图中可以看出, 壁面最高温度与平均温度随时间变化不明显, 与正午时刻类似, 各时刻下布置-1的壁面最高温度略低于布置-2, 但平均温度明显高于布置-2. 由于吸热管壁温度高低直接

表2 两种流动布置方式吸热器性能对比

Table 2 Comparison of receiver thermal performances with different flow layouts

方式	入口 T_s (°C)	出口 T_s (°C)	熔盐 Q_m (kg s ⁻¹)	辐射损失 (kW)	对流损失 (kW)	最高 T_{wou} (°C)	平均 T_{wou} (°C)
布置-1	290	565	13.6	571	822	575.5	501.0
布置-2	290	565	14.9	254	585	586.7	385.7

图8 (网络版彩色)不同时刻吸热面太阳能流分布. (a) 8:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 16:00

Figure 8 (Color online) Solar flux distributions on interior surfaces at different times. (a) 8:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 16:00

图9 (网络版彩色)不同时刻熔盐和壁面温度沿流动方向的分布。(a) 8:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 16:00

Figure 9 (Color online) Temperature evolutions of the molten salt and absorber wall at different times. (a) 8:00; (b) 10:00; (c) 14:00; (d) 16:00

图10 (网络版彩色)不同时刻两种流动布置方式吸热管壁温度对比
Figure 10 (Color online) Comparison of absorber temperature with different flow layout at different times

决定了热损失的大小, 因此辐射热损失与对流损失随时间变化也不显著, 且布置-1明显大于布置-2. 与热损失不同, 反射损失随时间变化显著, 呈现出先增大后减小的趋势, 这是因为反射损失受吸热面的阳辐射能总量和分布形状影响较大. 由于布置-1方式

图11 (网络版彩色)不同时刻两种流动布置方式吸热性能对比

Figure 11 (Color online) Comparison of the receiver thermal performance with different flow layout at different times

下吸热器热损失明显大于布置-2, 因此布置-1方式下能够加热的熔盐量也相应地小于布置-2.

3 结论

本文针对塔式太阳能熔盐腔体吸热器进行了一体化光热耦合模拟研究. 首先采用将MCRT与Gebhart

方法结合的混合光学模拟方法对塔式聚光集热系统中太阳辐射传播的完整过程进行了准确描述, 获得了全镜场条件下吸热表面能流分布随时空的变化规律; 在此基础上对吸热器内的对流-辐射-导热耦合换热过程进行了模拟, 重点分析了非均匀能流分布条件下不同流动布置对腔体吸热器吸热性能的影响, 并讨论了吸热性能随时间的变化规律, 得到的主要结论如下:

(1) 腔体吸热器吸热表面能分布表现出强烈的非均匀性; 非均匀的能流分布条件下, 熔盐的流动布置方式对吸热器的吸热性能具有显著影响。

(2) 熔盐从能量密度高的区域流入, 从能量密度低的区域流出(布置-1), 熔盐和吸热管壁面温度迅速

升高, 整个吸热面处于较高的温度水平, 热损失较大; 熔盐从能量密度低的区域流入, 从能量密度高的区域流出(布置-2), 熔盐温度和吸热管壁面温度缓慢升高, 整个吸热面处于相对较低的温度水平, 热损失较小; 相应地, 布置-2能获得更多的高温熔盐。

(3) 虽然布置-1可在一定程度上降低吸热管壁面的峰值温度, 但会导致在熔盐出口处会出现熔盐加热吸热管的“吸热恶化”现象, 且在太阳辐射强度越小的时刻, 恶化现象越明显。

(4) 腔体吸热器反射损失随时间变化显著, 随时间先增大后减小; 热辐射损失与对流损失随时间变化不明显。

参考文献

- Shuai Y, Xia X L, Tan H P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *Sol Energy*, 2008, 82: 13–21
- Ho C K, Iverson B D. Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renew Sust Energ Rev*, 2014, 29: 835–846
- Li X, Kong W, Wang Z F, et al. Thermal model and thermodynamic performance of molten salt cavity receiver. *Renew Energy*, 2010, 35: 981–988
- Hinojosa J F, Estrada C A, Cabanillas R E, et al. Numerical study of transient and steady-state natural convection and surface thermal radiation in a horizontal square open cavity. *Numer Heat TR A-Appl*, 2005, 48: 179–196
- 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: 126–138
- 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
- Yu Q, Wang Z F, Xu E, et al. Modeling and simulation of 1MWe solar tower plant's solar flux distribution on the central cavity receiver. *Simul Model Pract Th*, 2012, 29: 123–136
- 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
- Chang Z S, Li X, Xu C, et al. Numerical simulation on the thermal performance of a solar molten salt cavity receiver. *Renew Energy*, 2014, 69: 324–335
- Zavoico A B. Solar Power Tower Design Basis Document. Report. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2001. SAND2001-2100
- 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
- Schwarzbözl P, Pitz-Paal R, Schmitz M. Visual HFLCAL-A software tool for layout and optimization of heliostat fields. In: *Proceedings of 15th International SolarPACES Symposium*. Berlin, 2009. 15–18
- 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
- Cui F Q, He Y L, Cheng Z D, et al. Numerical simulations of the solar transmission process for a pressurized volumetric receiver. *Energy*, 2012, 46: 618–628
- 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
- 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 Therm Eng*, 2013, 61: 583–595
- 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

- 18 Besarati S M, Goswami D Y, Stefanakos E K. Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant. *Energy Convers Manage*, 2014, 84: 234–243
- 19 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
- 20 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 Energy*, 2011, 36: 976–985
- 21 Jia L, Fang Z H. *Advanced Heat Transfer* (in Chinese). 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008 [贾力, 方肇洪. 高等传热学. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2008]
- 22 Gebhart B. *Unified Treatment for Thermal Radiation Transfer Processes*. Report. Livermore: Sandia National Laboratories, 1957
- 23 Siebers D L, Kraabel J S. *Estimating Convective Energy Losses from Solar Central Receivers*. Report. Livermore: Sandia National Laboratories, 1984. SAND-84-8717

Integrated numerical study on the coupled photon-thermal conversion process in the central solar molten salt cavity receiver

WANG Kun, HE YaLing, QIU Yu & CHENG ZeDong

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 a solar power tower system, the concentrating and collecting subsystem, including the heliostat field and the receiver, contains some of the most costly and technically challenging components. Many types of solar receivers make up the solar power tower system. Among them, the cavity molten salt receiver has been widely applied due to its lower heat loss. The accurate simulation of the coupled heat transfer process in the cavity receiver and the prediction of receiver performance are of great importance for the receiver design and safe operation. The solar flux distribution on cavity interior surfaces is extremely non-uniform, which has great effect on the receiver thermal performance. Taking the non-uniform solar flux distribution into consideration, the photon-thermal conversion process is simulated integrally in this paper. A hybrid simulation approach, which couples Monte Carlo ray tracing and Gebhart methods, is applied to investigate the complete solar radiation transfer process in the solar power tower system with a cavity receiver and obtain the non-uniform solar flux distribution. On this basis, the coupled photon-thermal conversion process in the molten salt cavity receiver is simulated. The effects of the fluid flow layout on the receiver performance under the non-uniform solar flux distribution are particularly revealed. Also, the variation of the receiver performance with time is analyzed in detail. The results show that the solar flux distribution on the interior surfaces of the cavity receiver is extremely non-uniform, under which the molten salt flow layout has great effects on the receiver performance. In the case of flow layout that the cold molten salt flows into the receiver in the high-flux area, the temperatures of both the absorber wall and the molten salt increase rapidly along the flow path. The temperature of the whole absorber wall is relatively high, which leads to greater heat loss and less amount of hot molten salt, and even seriously, "heat transfer deterioration" near the outlet of the receiver. When the cold molten salt flows into the receiver in the low-flux area, the temperature of both the absorber wall and the molten salt increase slowly along the flow path. The temperatures of the whole absorber wall is relatively low, which results in less heat loss and larger amount of hot molten salt. Although the shape of the solar flux distribution on the interior surfaces varied greatly with time, the evolutions of the molten salt (absorber wall) temperature at different time display similar variation tendency along the flow path. Moreover, the reflective loss varies with time greatly, while the heat loss varies with time slightly.

solar power tower, cavity receiver, coupled photon-thermal conversion, heliostats field, flow layout

doi: 10.1360/N972016-00103