

超临界二氧化碳太阳能腔式吸热器光热特性研究

熊烈¹, 杨凯¹, 张燕平², 李黎¹

(1. 武汉新能源研究院, 湖北 武汉 430070; 2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:针对太阳能碟式聚光器,设计了一种工质为超临界二氧化碳($s\text{CO}_2$)的圆台形腔式吸热器,建立了吸热器的光热模型。采用蒙特卡洛光线追踪法分析了腔式吸热器的光学特性,并基于腔式吸热器的相关理论将热边界条件导入 Ansys Fluent 软件中,对吸热器的流动传热特性进行了计算流体力学(CFD)仿真模拟。研究了工质进口温度为 150 °C、太阳光辐射强度为 800 W/m²时,吸热器不同采光口直径、倾斜角和辐射发射率对其光热特性影响的规律。研究表明:吸热器采光口直径对其光热效率的影响较大,采光口直径增加会降低吸热器光学效率,采光口直径过大或过小都会降低吸热器的热效率;随着吸热器倾斜角的增大,采光口内部热空气和外部冷空气之间的自然对流传热明显增加;辐射发射率对吸热器热效率的影响较小。

关键词:太阳能;腔式吸热器;超临界二氧化碳;数值模拟

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.04.016

[引用本文格式]熊烈,杨凯,张燕平,等.超临界二氧化碳太阳能腔式吸热器光热特性研究[J].热能动力工程,2024,39(4):131-139. XIONG Lie, YANG Kai, ZHANG Yan-ping, et al. Investigation of optic-thermal characteristics of supercritical carbon dioxide solar cavity heat receiver[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(4): 131-139.

Investigation of Optic-thermal Characteristics of Supercritical Carbon Dioxide Solar Cavity Heat Receiver

XIONG Lie¹, YANG Kai¹, ZHANG Yan-ping², LI Li¹

(1. Institute of New Energy, Wuhan Co., Ltd. (INEW), Wuhan, China, Post Code: 430070;

2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430070)

Abstract: For the solar energy disk concentrator, a type of supercritical carbon dioxide ($s\text{CO}_2$) truncated cone cavity heat receiver was designed and developed, and the optic-thermal model of the heat receiver was established. The Monte Carlo ray tracing method was used to analyze the optical characteristics of the cavity heat receiver. Based on the related theory of the cavity heat receiver, the thermal boundary conditions were introduced into the Ansys Fluent software, and the flow and heat transfer characteristics of the cavity heat receiver were simulated by computational fluid dynamics (CFD). When the inlet temperature of the working fluid was 150 °C and the solar radiation intensity was 800 W/m², the effects of different diameters of the aperture, tilt angles and radiation emissivity on its optic-thermal characteristics were studied. The results show that the diameter of the aperture has a great influence on the thermal efficiency of the receiver. The increase of the diameter of the aperture will reduce the optical efficiency of the receiver. If the diameter of the aperture is too large or too small, the thermal efficiency of the receiver will be reduced; with the increase of the tilt angle of the receiver, the natural convection heat transfer be-

收稿日期:2023-07-31; 修订日期:2023-09-21

基金项目:湖北省技术创新专项(重大专项)资助项目(2019AAA17)

Fund-supported Project: Major Technological Innovation Special Project of Hubei Province (2019AAA17)

作者简介:熊烈(1985-),男,武汉新能源研究院高级工程师。

tween the hot air in the aperture and the external cold air increases obviously; the radiation emissivity has little effect on the thermal efficiency of the receiver.

Key words: solar energy, cavity heat receiver, supercritical carbon dioxide ($s\text{CO}_2$), numerical simulation

引 言

太阳能光热发电亦称聚光太阳能热发电 (Concentrating Solar Power, CSP)。太阳能吸热器是太阳能光热发电的核心部件,其作用是将太阳光转化为热能并传递给吸热器内的换热工质,吸热器光热效率直接影响整个太阳能光热发电系统的总体热效率。

近年来,针对太阳能吸热器光热特性的研究较多。浙江大学针对腔体管式空气吸热器的光热特性进行了仿真模拟和实验研究,结果表明,仿真模拟和实验研究的吻合性较好^[1]。华中科技大学搭建了一款锥形高温空气腔体盘管吸热器,基于 Fluent 软件对吸热器锥角、盘管数、保温层厚度等几何参数进行了数值模拟研究,优化设计后吸热器的热效率达 70.52%^[2];利用光线追踪法和计算流体力学方法分别对采用超临界二氧化碳(以下简称 $s\text{CO}_2$)和压缩空气作为换热工质吸热器的传热特性进行了对比,结果表明,当采用 $s\text{CO}_2$ 作为换热工质时,吸热器的热效率和光热转换效率更高^[3]。西安交通大学提出一种综合利用蒙特卡洛法和流动传热及流场计算的方法,估算出吸热器内的太阳能热流密度分布以及管道的壁温和热损失^[4],并采用改进蒙特卡罗法、有限容积法对腔式吸热器热特性进行研究,发现,石英玻璃的厚度和内侧空气温度对吸热器内部温度场有较大影响,而表面传热系数对吸热器内部温度场影响较小^[5]。华南理工大学对球形腔体式吸热器不同开口比的结构进行了 CFD 仿真模拟,结果表明,球形腔式吸热器系统的光热转化效率为 81.9%~84.4%,球形腔式吸热器的最佳开口比范围为 $1 < D/d < 1.5$ ^[6]。华北电力大学对 3 种不同压力下 $s\text{CO}_2$ 的热物性进行了总结归纳,并对 $s\text{CO}_2$ 在水平管、竖直管以及螺旋管中的流动及传热特性进行了实验研究和数值研究,结果表明,与传统工质相比, $s\text{CO}_2$ 能有效提高太阳能热发电效率^[7]。西安工程大学利用 TracePro 光学软件探索了太阳能腔体式吸热器发射率、螺旋盘管外径和螺距对其光学特性的

影响,并对比了 4 种不同形状吸热器的光学特性,结果表明,圆台-圆柱形吸热器具有最好的光学性能,其光学效率可达 85.42%^[8]。Daabo 等人^[9]采用光线追踪法和计算流体力学方法(CFD)对圆柱形、锥形和球形 3 种腔体吸热器的光热特性进行研究,发现,锥形吸热器热效率最高,能达到 77.05%,并通过实验验证了模拟的准确性。Tan 等人^[10]通过实验研究了半球形腔式吸热器在不同倾斜角和不同采光口直径下的各项热损失。Wu 等人^[11]对圆柱体腔体式吸热器流场温度进行了三维数值模拟,结果表明,吸热器的倾斜角和采光口直径对自然对流传热影响很大。

$s\text{CO}_2$ 的密度接近于液体,黏度接近于气体,扩散系数约为液体的 100 倍,因此是太阳能高温吸热器的理想传热介质。目前,针对太阳能腔吸热器的研究主要集中在空气、导热油、熔盐等传统传热工质,而针对 $s\text{CO}_2$ 吸热器设计和传热方面的研究还相对较少,本文设计出一款以 $s\text{CO}_2$ 为换热工质的太阳能腔体式吸热器,对其采光热特性进行了数值模拟研究,详细分析了采光口直径、收热器倾斜角、辐射发射率对吸热器光热特性的影响。

1 物理模型和数值模型

1.1 吸热器几何模型

腔式吸热器结构如图 1 所示。吸热器侧面和背面均由保温材料包裹,正面开有采光口,内部螺旋盘管紧贴吸热器内表面,螺旋盘管内传热工质为 $s\text{CO}_2$ 。碟式聚光器的碟形镜面随太阳光移动,吸热器固定在碟式聚光器的安装臂上随着聚光器镜面的移动而移动,通过调节碟式聚光器的焦距,使焦距始终处于吸热器采光口处。吸热器保温材料为 SiC,螺旋盘管的材料为 S310 不锈钢,工质从盘管下端进口流入吸热器,在吸收了吸热器内的太阳辐射热后由盘管上端出口流出。吸热器圆台最大直径为 618 mm,高度为 705 mm,锥度为 5°;螺旋盘管内径为 10 mm,外径为 18 mm,盘管总长约为 18 000 mm。

为了分析吸热器的光热特性建立了吸热器三维

几何模型。为了兼顾后续数值计算的准确性和计算效率,对该模型作以下假设或简化:(1)金属外壳材料非常薄,导热材料为 S310 不锈钢,相对于保温层而言其热阻非常小,故建模时忽略金属外壳;(2)忽略不同构件之间的接触热阻;(3)忽略风速和风向对吸热器传热特性的影响。

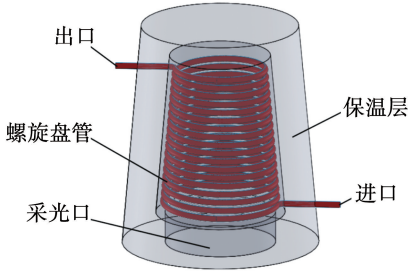


图1 腔式吸热器结构
Fig.1 Cavity heat receiver structure

1.2 吸热器光学模型

图2为腔式吸热器光学模型。由图2可知,在蝶式聚光器上方设置圆形光源,光线由光源发出后经过聚光器进入吸热器内部。将蝶式聚光器表面简化为理想的二次曲面,其实际反光面积为 22.8 m^2 ,焦距为 3.2 m 。

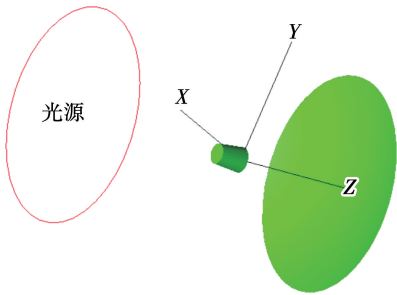


图2 腔式吸热器光学模型
Fig.2 Optical model of cavity heat receiver

1.3 流体传热机理模型

通过联立求解质量守恒、动量守恒和能量守恒方程对腔体式吸热器的流动传热特性进行的数值模拟研究^[12]。

连续性方程:

$$\Delta \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\mathbf{V} \cdot \nabla (\rho \mathbf{V}) = \rho \mathbf{X} - \nabla p + \nabla^2 (\mu \mathbf{V}) \quad (2)$$

能量方程:

$$\mathbf{V} \cdot \nabla (\rho c_p T) = \nabla^2 (k T) \quad (3)$$

式中: ρ —流体的密度, kg/m^3 ; $\mathbf{V}$ —流体的速度矢量, m/s ; $\mathbf{X}$ —重量力矢量, N/kg ; p —压力, Pa ; μ —流体动力黏度, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$; c_p —比定压热容, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$; k —流体的热导率, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$; T —温度, K 。

表征腔体式吸热器内部空气自然对流传热强度的瑞利数 Ra 公式如下^[13]:

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3 \rho}{\mu \alpha} \quad (4)$$

式中: g —重力加速度, m/s^2 ; β —流体热膨胀系数; ΔT —温差, K ; L —几何体特征长度, m ; α —流体热扩散率, m^2/s 。

腔式吸热器的辐射换热采用 S2S 模型^[12],即:

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j \quad (5)$$

式中: J_i — i 面的有效辐射, W/m^2 ; ε_i — i 面的辐射发射率; σ —斯忒藩 - 玻尔兹曼常量, $\text{W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$; J_j — j 面的有效辐射, W/m^2 ; T_i — i 面的表面温度, K ; F_{ij} — i 面和 j 面之间的视角因子。

1.4 光热特性模型

吸热器的光学效率 η_{opt} 为^[14]:

$$\eta_{\text{opt}} = q_{\text{abs}} / q_{\text{inc}} \quad (6)$$

式中: q_{abs} —腔式吸热器所吸收的太阳光辐射能量, W ; q_{inc} —入射到碟式聚光器的总辐射能量, W 。

吸热器的热效率 η 为^[15]:

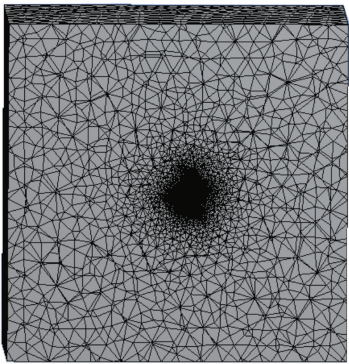
$$\eta = q_{\text{use}} / q_{\text{in}} \quad (7)$$

式中: q_{use} —吸热器吸收的热量, W ; q_{in} —进入吸热器采光口的热量(太阳光辐射能), W 。

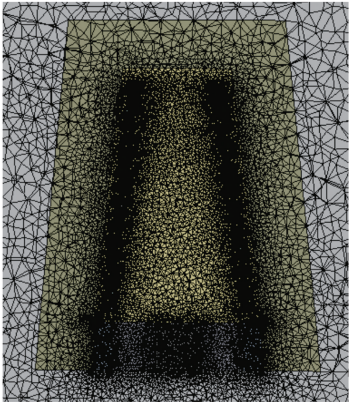
2 数值模拟方法及验证

2.1 网格划分

为了准确模拟出吸热器内、外流场和温度场并排除计算域对模拟结果的影响,在腔式吸热器周围延伸出外计算区域($8\,500 \text{ mm} \times 8\,500 \text{ mm} \times 8\,500 \text{ mm}$)。腔式吸热器内螺旋盘管内、外的传热工质流动传热最为复杂和关键,网格密度最高,外流域中从吸热器盘管到空气域边界处网格由密到疏。这样既可以保证模拟的准确性又可以减少网格数量,以减少计算时间从而提高计算效率。整体网格数量为 455 万,网格正交质量在 0.2 以上。腔室吸热器计算模型整体网格和局部网格如图 3 所示。



(a) 整体网格



(b) 局部网格

图 3 模型整体网格和局部网格

Fig. 3 Global mesh and local mesh of model

2.2 边界条件

太阳光由采光口进入腔式吸热器后非均匀分布在吸热器内表面和螺旋盘管上。盘管结构复杂,不同位置处光线分布的不均匀性非常大。为了准确得到螺旋盘管不同位置处的热流密度,将螺旋盘管分割成 19 段,每段再分割成迎光面和背光面。在 TracePro 软件中采用蒙特卡洛光线追踪法,得到太阳光辐射强度下腔式吸热器内每个面上的热流密度,再将其作为壁面边界条件加载到 Fluent 软件中。在光学软件 TracePro 中设定太阳光辐射强度为 800 W/m^2 。

腔式吸热器的流体进口边界条件设置为质量流量进口,质量流量取 0.03 kg/s ,流体进口温度取 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。流体出口边界条件设置为压力出口,压力取 20 MPa 。

外部空气域的边界条件设定为压力出口,压力为 $1.01 \times 10^5\text{ Pa}$,温度为 300 K 。

2.3 计算方法

在吸热器数值模拟过程中,Fluent 设置如下:

(1) 基于稳态算法,采用双精度求解器;

(2) 采用 Realisable $k-\varepsilon$ 湍流模型;

(3) 基于压力算法,压力速度的耦合采用 Simple 算法,压力离散采用标准形式;

(4) 动量方程、湍动能方程和湍流离散率方程均采用二阶迎风格式;

(5) 连续性方程残差标准为 10^{-4} ,湍流方程残差收敛标准为 10^{-6} ;

(6) 采用不可压缩理想气体模型模拟空气的自然对流传热;

(7) 辐射换热模型采用 S2S 模型;

(8) 在 NIST 数据库中提取 20 MPa 下 sCO_2 的物性参数,然后拟合成曲线,最后将曲线拟合公式作为边界条件加载到 Fluent 软件中。

2.4 方法验证

为了验证模型网格划分的适宜性和各种参数设置的正确性,选取文献[16]中的实验模型作为验证对象。该实验模型与本文模型在结构材料和几何尺寸上很接近,其主要材料及几何参数为:保温材料为 SiC;螺旋盘管共 8 圈,材料为 S310 不锈钢,螺旋盘管内径为 42 mm ,外径为 46 mm 。吸热器高度为 560 mm ,直径为 600 mm ,采光口直径为 250 mm 。文献[16]通过实验研究了不同太阳辐射强度、空气进口温度和空气流量下吸热器的传热特性。

2.4.1 CFD 策略验证

为了对比数值模拟结果与实验结果以验证数值模拟的准确性,选择 1 组实验工况为验证对象,所选实验工况为:空气质量流量分别为 $0.05, 0.07, 0.09$ 和 0.11 kg/s ,太阳光辐射强度为 402 W/m^2 ,空气进口温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。4 个不同工况下数值模拟结果和实验结果如图 4 所示。从图 4 中可看出,不同工况下吸热器热效率的模拟结果均略高于实验结果,通过计算得出最少高出 6.1% ,最多高出 8.7% 。且模拟结果和实验结果变化趋势一致,即吸热器的热效率随着空气质量流量的增加而增加,说明数值模拟和实验研究的结果吻合性较好、数值模拟方法可信度较高。

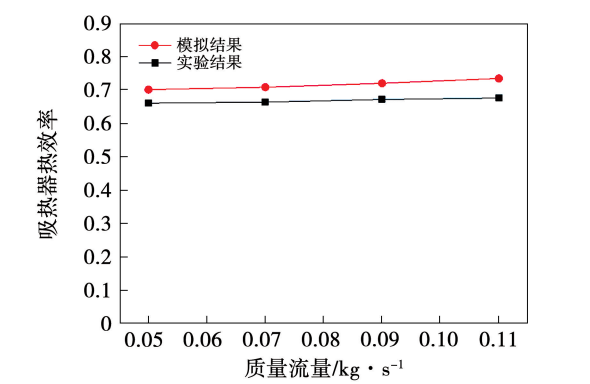


图 4 腔式吸热器热效率的模拟结果与实验结果对比

Fig.4 Comparison of experimental and simulation results of thermal efficiency of cavity heat receiver

2.4.2 网格无关性验证

保持腔式吸热器太阳光辐射强度 800 W/m²和工质进口温度 150 ℃ 不变,吸热器采光口直径为 244 mm,网格数量从 416 万逐渐增至 706 万,以验证模拟结果的稳定性。网格无关性分析的结果如表 1 所示。由表 1 可看出,CFD 仿真模拟显示不同网格数下吸热器工质出口温度的绝对偏差和相对偏差都很小。因此可认为,当网格数约为 455 万时模拟结果已基本稳定,此时模拟结果已呈现出网格无关性,表明 455 万网格数是适宜的。

表 1 网格无关性分析
Tab.1 Grid independence analysis

网格数/万	出口温度/℃	出口温度相对偏差/%
416	506.86	0
455	507.03	0.034
535	507.01	0.029
706	507.00	0.021

3 计算结果及分析

3.1 采光口直径对光效率影响分析

采光口直径是腔体式吸热器的主要结构参数,其大小会直接影响太阳光线的入射、反射、折射和散射。为了研究吸热器采光口直径对其光学效率的影响,在商业软件 TracePro 中对不同采光口直径的吸热器进行光学性能仿真模拟。图 5 为太阳光路径示踪。

在 TracePro 软件中设置光源类型为 Lambertian,太阳半角为 4.65 mrad^[17],根据光线数量无关性验证的结果(如表 2 所示)并参考文献[18]确定太阳光光线数为 100 万,镜面反射率为 0.9,吸热器内壁及螺旋盘管表面吸收率为 0.85。计算得到不同采光口直径的腔式吸热器光学效率,具体数值见表 3。

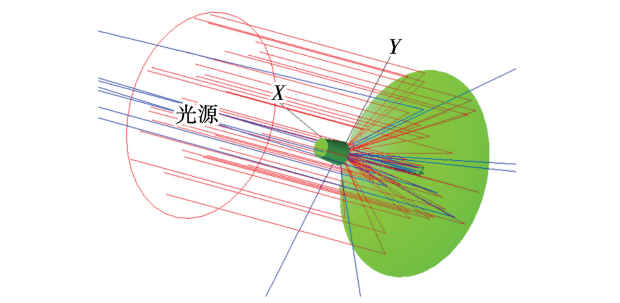


图 5 太阳光路径示踪
Fig.5 Sunlight pathway tracing

表 2 光线数量无关性分析
Tab.2 Number of light rays independence analysis

光线数/万	光学效率	光学效率相对偏差/%
10	0.861 4	0.023
50	0.861 2	0
100	0.861 2	0
120	0.861 1	0.012
150	0.861 4	0.023

表 3 吸热器光学效率分析
Tab.3 Cavity heat receiver optical efficiency analysis

吸热器采光口直径/mm	光源辐射强度/W	吸热器吸收的光能/W	吸热器光学效率/%
182.9	17 508	15 192	86.8
243.8	17 508	15 077	86.1
304.8	17 508	15 004	85.7
347.0	17 508	14 934	85.3
406.4	17 508	14 765	84.3

从表 3 中可看出,随着吸热器采光口直径的增大,吸热器的光学效率逐渐降低。原因可能是,当吸热器采光口直径增大时,吸热器内光线更容易被反射出采光口,导致吸热器光学效率下降。

3.2 采光口直径对热效率影响分析

采光口直径不仅会影响吸热器的整体光学效

率,还会影响吸热器内部光线分布,导致温度分布发生变化,进而影响吸热器内工质的流动传热特性,最终影响吸热器的热效率。为了深入分析采光口直径对吸热器热效率的影响,选取 5 个采光口直径不同的吸热器作为数值模拟对象。在研究采光口直径影响的过程中除采光口直径外,吸热器其他参数均不变化。5 个吸热器的采光口直径分别为 183,244,305,347 和 406 mm。吸热器采光口直径对其热效率的影响如图 6 所示。从图中可看出,当吸热器采光口直径从 183 mm 增大到 244 mm 时吸热器的热效率增加,而当吸热器采光口直径继续增大至 406 mm 时吸热器的热效率逐渐减小。

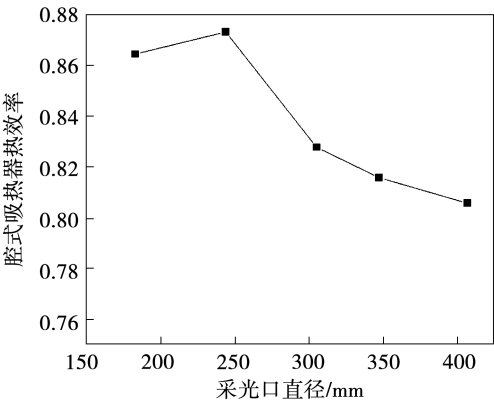


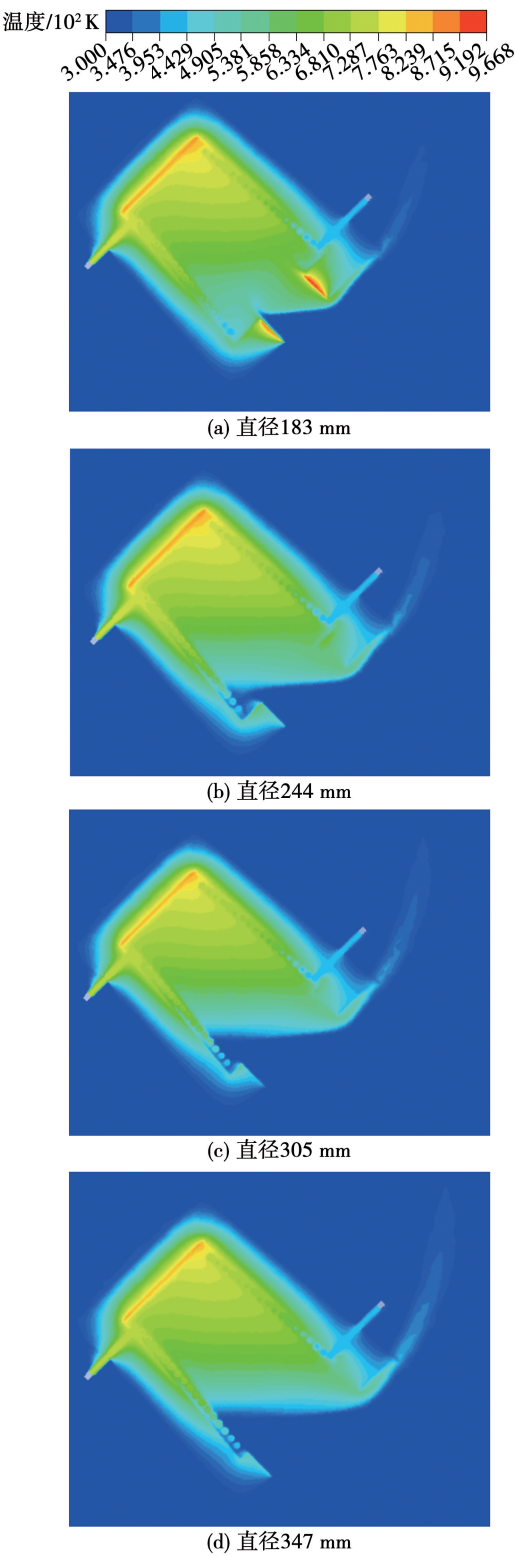
图 6 不同采光口直径下腔式吸热器热效率

Fig. 6 Thermal efficiency of cavity heat receiver under different aperture diameters

从图 6 中还可以看出,虽然模拟结果显示采光口直径在 244 mm 时吸热器热效率最高,但与采光口直径 183 mm 相比其热效率并未高出很多。原因是:采光口直径为 183 mm 时,有一部太阳光线未完全进入腔式吸热器内部,因此其内部温度相对较低,吸热器内外温差小,自然对流传热相对较小;而且采光口直径小,角系数相对较小,从采光口散失的辐射换热量也小,故其热效率并未下降很多。而当吸热器采光口直径继续增大至 406 mm 时,吸热器的热效率逐渐减小,且下降幅度明显,这也符合传热学原理。这是因为,太阳光线全部入射到吸热器内部,但采光口直径增加会增加自然对流传热区域的特征长度,使自然对流传热增强,而且吸热器内部不同换热面相对采光口的角系数增加,导致辐射换热量也增

加。从采光口损失的自然对流传热和辐射换热量都增加,造成了吸热器热效率下降明显。

为了分析其中的原因,提取采光口直径不同的吸热器相同截面处的温度云图进行对比,如图 7 所示。



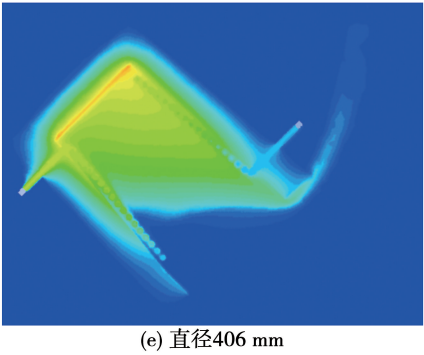


图 7 不同采光口直径下腔式吸热器温度分布云图
Fig.7 Temperature contours of cavity heat receiver under different aperture diameters

从图 7 中可看出,不同采光口直径下腔式吸热器温度场明显有差异。图 7(a) 中采光口颈部温度明显很高,说明当采光口直径为 183 mm 时,有一部分太阳光线未完全进入腔式吸热器内部,而是直接入射到吸热器采光口颈部,而且其尾流明显很小,说明吸热器自然对流传热相对较小。从图 7(b) ~ 图 7(e) 可看出,采光口颈部温度明显降低,说明光线已全部入射到吸热器内部。

3.3 倾斜角对吸热器热效率的影响分析

在实际运行中,太阳高度随着时间变化,为了最大限度捕获太阳能,蝶式聚光器上的跟踪系统时刻追踪太阳轨迹,不断调整自身倾斜角以确保太阳光线被最大程度地反射到吸热器内。因此,固定在蝶式聚光器上吸热器的倾斜角也在不断变化。为了研究倾斜角对吸热器热特性的影响,吸热器其他参数均不变化,选取 0°,22.5°,45°,67.5°和 90° 5 个倾斜角进行研究。

吸热器倾斜角对其热效率的影响如图 8 所示。从图 8 中可看出,当吸热器倾斜角从 0°增加到 90°时,吸热器的热效率逐渐减小。而且从热效率变化曲线不同位置处的斜率可看出,随着吸热器倾斜角的增大,其热效率减小的幅度越来越大。

为了分析其中原因,提取不同倾斜角吸热器相同截面处的温度云图进行对比,如图 9 所示。从图 9 中通过吸热器的尾流大小可以判断出自然对流传热的强度。从图中可看出,倾斜角为 0°时,几乎没有尾流,自然对流传热几乎为 0;当倾斜角增加到 22.5°时,出现小幅尾流,自然对流传热开始出现;当倾斜角再增加到 45°直至 90°时,吸热器的尾流明显逐渐增大,自然对流传热的增幅非常明显。所以随着吸热器的倾斜角的增加,其热效率逐渐下降。倾

斜角增加导致自然对流传热增加的原因是:随着倾斜角的增加,吸热器内流体滞止区^[19-20]逐渐缩小,对流区逐渐扩大,使自然对流特征长度增加,采光口与外界有效换热面积增加,而且采光口内、外空气温差变大,故采光口自然对流传热强度变大,所以吸热器热效率降低。

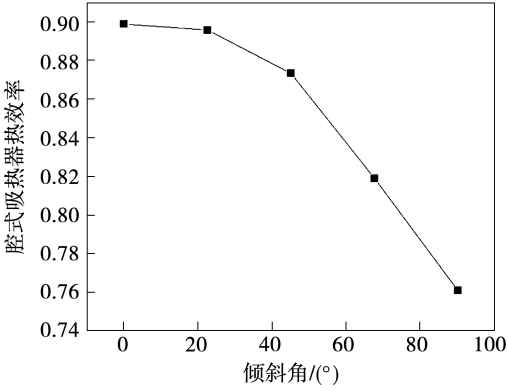
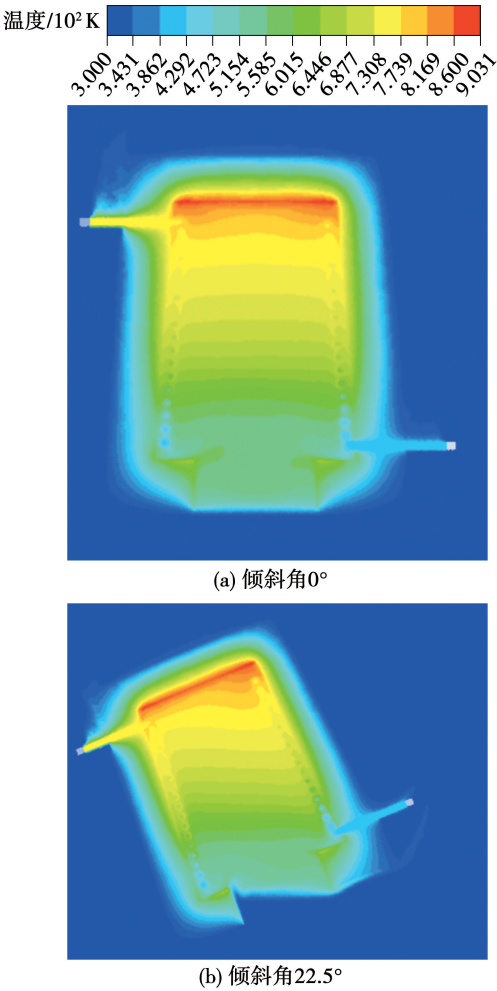
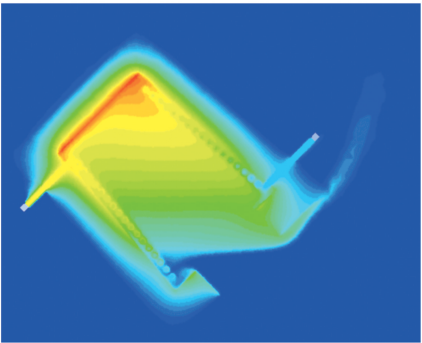
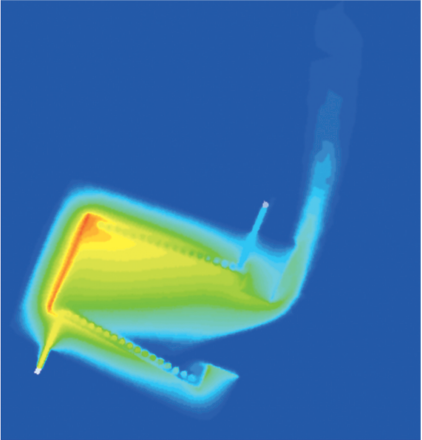


图 8 不同倾斜角下腔式吸热器热效率
Fig. 8 Thermal efficiency of cavity heat receiver under different inclination angles

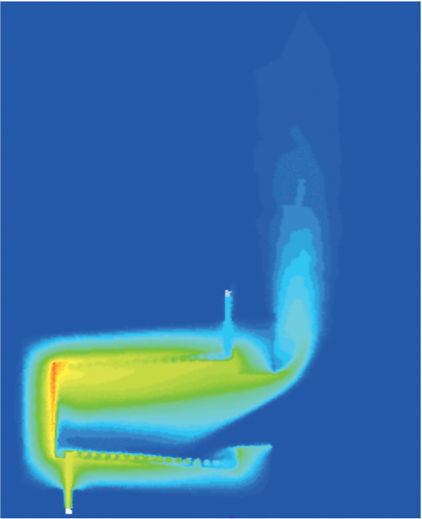




(c) 倾斜角45°



(d) 倾斜角67.5°



(e) 直倾斜角90°

图 9 不同倾斜角下腔式吸热器温度云图
Fig.9 Temperature contours of cavity heat receiver under different inclination angles

3.4 辐射发射率对吸热器热效率的影响分析

吸热器辐射发射率受其表面温度和状况的影响。在不同的太阳光辐射强度和工质进口温度条件下,吸热器内壁面温差较大,造成其辐射发射率发生变化。而当吸热器长时间在高温条件下运行时,其高温区域的金属表面很容易氧化,导致其辐射发射

率变化。为了研究吸热器表面辐射发射率对其传热特性的影响,保持吸热器其他参数均不变化,选取 0.45,0.55,0.65,0.75 和 0.85 5 个不同的发射率进行计算,模拟结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,随着辐射发射率的增加吸热器热效率略有增加。分析原因:辐射发射率对吸热器散热损失的影响主要体现在保温层外部散热量和采光口辐射热损失,吸热器外保温层很厚,造成吸热器外表面温度很低,虽然吸热器的辐射发射率增加,但通过保温层的辐射热损失量很小。另外,整个吸热器的体积很小、表面积和采光口直径都很小,吸热器内部高温区通过采光口向外辐射的角系数非常小,故从吸热器采光口损失的辐射热也很少。因此,吸热器辐射发射率对所研究的腔式吸热器热效率的影响非常小。吸热器热效率略有增加的原因是:腔式吸热器热效率发射率变化,造成吸热量改变,使吸热器内部温度变化。虽然吸热器辐射发射率增加,但盘管吸热器量减少,其内部温度会略微降低,导致吸热器保温层的导热损失和采光口的辐射热损失减小,进而会造成吸热器热效率略有提升。

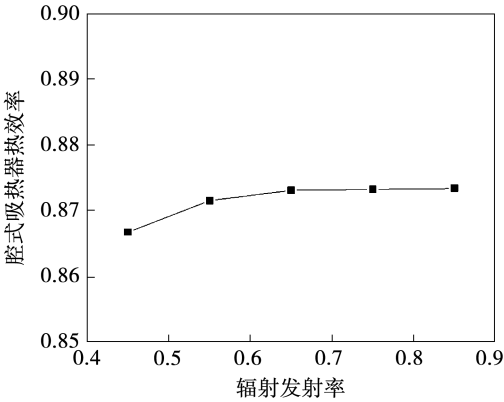


图 10 不同辐射发射率下腔式吸热器热效率变化
Fig.10 Thermal efficiency variation of cavity heat receiver under different radiation emissivity

4 结 论

- (1) 吸热器采光口直径对吸热器光学效率影响较大。采光口直径增大会导致吸热器内部光线易从采光口反射逃逸出,造成吸热器光学效率降低。
- (2) 吸热器采光口直径对吸热器热效率影响较大。当采光口直径过小时,会阻挡一部分由蝶式聚光器反射到吸热器内部的光线,光线会落在采光口颈部,并未直接落到吸热器盘管上,从而造成吸热器热效率下降。当采光口直径过大时,吸热器内部光

线易于从采光口逃逸出,造成自然对流传热损失和辐射换热损失更大,吸热器效率下降。采光口直径过大或过小都会降低吸热器的热效率,故吸热器存在最佳采光口直径为 244 mm。

(3) 吸热器的倾斜角对吸热器热效率的影响非常大,随着倾斜角的增大,采光口内热空气和外部冷空气之间的自然对流传热明显增加。

(4) 吸热器的不同辐射发射率对吸热器热效率的影响较小。

参考文献:

[1] 许家鸣. 太阳能腔体管式吸热器光热耦合模拟与试验验证 [D]. 杭州:浙江大学,2022.
XU Jia-ming. Simulation and experimental verification on optico-thermal process of solar cavity tubular receiver [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

[2] 肖虎. 锥形腔式太阳能高温吸热器设计与换热特性研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2020.
XIAO Hu. Study on design and heat transfer characteristics of a solar conical cavity receiver [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[3] 王鼎,陈宇轩,肖虎,等. 采用不同传热工质的锥形腔式吸热器传热特性对比分析 [J]. 发电技术, 2021, 42 (6): 682 – 689.
WANG Ding, CHEN Yu-xuan, XIAO Hu, et al. Comparative analysis of heat transfer characteristics of conical cavity receivers with different heat transfer fluids [J]. Power Generation Technology, 2021, 42 (6): 682 – 689.

[4] 方嘉宾,魏进家,董训伟,等. 腔式太阳能吸热器热性能的模拟计算 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30 (3): 428 – 432.
FANG Jia-bin, WEI Jin-jia, DONG Xun-wei, et al. Performance simulation of solar cavity receiver [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30 (3): 428 – 432.

[5] 封永亮,喻志强,李增耀,等. 太阳能吸热器玻璃窗辐射与导热计算 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32 (10): 1737 – 1740.
FENG Yong-liang, YU Zhi-qiang, LI Zeng-yao, et al. Radiative and conductive heat transfer simulation of window for solar receiver [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32 (10): 1737 – 1740.

[6] 毛青松,龙新峰. 球形腔式太阳能吸热器性能的数值研究 [J]. 可再生能源, 2012, 30 (5): 1 – 4.
MAO Qing-song, LONG Xin-feng. Numerical study on the performance of spherical cavity solar receiver [J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30 (5): 1 – 4.

[7] 刘赞,董月,张传智. 塔式太阳能吸热器中超临界 CO₂ 流动换热研究进展 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2003, 50 (5): 105 – 115, 126.
LIU Yun, DONG Yue, ZHANG Chuan-zhi. Research advances in supercritical CO₂ flow and heat transfer in tower solar receivers [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural

Science Edition), 2003, 50 (5): 105 – 115, 126.

[8] 王晓文,屠楠,方嘉宾,等. 布置螺旋管的太阳能腔式吸热器光学性能模拟 [J]. 发电技术, 2023, 44 (2): 221 – 228.
WANG Xiao-wen, TU Nan, FANG Jia-bin, et al. Simulation of optical performance for a solar cavity receiver arranged with spiral tubes [J]. Power Generation Technology, 2023, 44 (2): 221 – 228.

[9] DAABO A M, MAHMOUD S, AL-DADAH R K, et al. The optical efficiency of three different geometries of a small scale cavity receiver for concentrated solar applications [J]. Applied Energy, 2016, 179: 1081 – 1096.

[10] TAN Y, ZHAO L, BAO J, et al. Experimental investigation on heat loss of semi-spherical cavity receiver [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 576 – 583.

[11] WU Shuang-ying, GUO Feng-hua, XIAO Lan. Numerical investigation on combined natural convection and radiation heat losses in one side open cylindrical cavity with constant heat flux [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 71: 573 – 584.

[12] ZOU Chong-zhe, ZHANG Yan-ping, FENG Hua-yi, et al. Effects of geometric parameters on thermal performance for a cylindrical solar receiver using a 3D numerical model [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 149: 293 – 302.

[13] ANSYS C. ANSYS fluent theory guide [M]. Canonsburg: ANSYS Inc., 2011.

[14] SEDIGHI M, PADILLA R V, LAKE M, et al. Design of high-temperature atmospheric and pressurised gas-phase solar receivers: A comprehensive review on numerical modelling and performance parameters [J]. Solar Energy, 2020, 201: 701 – 723.

[15] ZOU C, ZHANG Y, FALCOZ Q, et al. Design and optimization of a high-temperature cavity receiver for a solar energy cascade utilization system [J]. Renewable Energy, 2017, 103: 478 – 489.

[16] 邹崇哲. 太阳能热发电系统中腔体盘管吸热器设计及其传热特性研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2018.
ZOU Chong-zhe. Study on heat-transfer characteristic of a helical cavity receiver for CSP system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[17] 肖兰,何松,吴双应. 内置螺旋管直径对接收器光热转换特性的影响 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42 (3): 752 – 757.
XIAO Lan, HE Song, WU Shuang-ying. Impact of built-in coiled tube diameter on the optical-thermal conversion characteristics of receiver [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42 (3): 752 – 757.

[18] XIAO Hu, ZHANG Yan-ping, YOU Cong, et al. Effects of critical geometric parameters on the optical performance of a conical cavity receiver [J]. Frontiers in Energy, 2019, 13 (4): 673 – 683.

[19] CLAUSING A M. An analysis of convective losses from cavity solar central receivers [J]. Solar Energy, 1981, 27 (4): 295 – 300.

[20] FLESCHE R, STADLER H, UHLIG R, et al. On the influence of wind on cavity receivers for solar power towers: An experimental analysis [J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2015, 87: 724 – 735.