

布置螺旋管的太阳能腔式吸热器光学性能模拟

王晓文¹, 屠楠¹, 方嘉宾^{2*}, 刘晓群¹, 王驰宇¹, 刘家琛¹

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西省 西安市 710600;

2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 陕西省 西安市 710049)

Simulation of Optical Performance for a Solar Cavity Receiver Arranged With Spiral Tubes

WANG Xiaowen¹, TU Nan¹, FANG Jiabin^{2*}, LIU Xiaoqun¹, WANG Chiyu¹, LIU Jiachen¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, Shaanxi Province, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

摘要: 利用 TracePro 光学软件模拟了是否考虑布置螺旋管的太阳能腔式吸热器光学性能的差异, 探讨了腔体内壁面的反射率及内置螺旋管的外径、螺距对吸热器光学性能的影响, 并对比了4种不同形状吸热器的光学性能。结果表明: 由于不能真实反映螺旋管所吸收光通量的大小, 将吸热器内壁面近似为螺旋管外壁面的处理方法是不可取的; 在螺距不变的情况下, 腔体内壁面的反射率与内置螺旋管外表面吸收光通量的大小以及系统的光学效率成正比; 当反射率小于0.8时, 螺距的增加可以提高吸热器的光学性能, 而当反射率超过0.8时情况则相反。对比4种不同形状的吸热器可以发现, 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%。研究结果可为吸热器的设计和优化提供理论指导, 并为吸热器传热性能的研究奠定基础。

关键词: 太阳能; 腔式吸热器; 螺旋管; 反射率; 光学性能

ABSTRACT: Using TracePro optical software, the differences in optical performance of solar cavity receivers with or without spiral tubes were simulated, and the effects of the reflectivity of inner wall of cavity and the outer diameter and pitch of the spiral tubes on the optical performance of receivers were investigated. Besides, the optical performance of four different receiver shapes were also compared. The

results show that it is not proper to approximate the inner wall of the receivers as the outer surface of the spiral tubes, because this approximation cannot truly reflect the heat flux absorbed by the spiral tubes. When the pitch is constant, the reflectivity of the inner wall of the cavity is proportional to the amount of heat flux absorbed by the outer surface of the spiral tubes and the optical efficiency of the system. As the reflectivity is less than 0.8, the increase of the pitch can improve the optical performance of the receiver, while the opposite is true when the reflectivity exceeds 0.8. In addition, the truncated-cylindrical receiver has the best optical performance among the four different shapes of receivers, and its optical efficiency can reach as high as 85.42%. This research can provide theoretical guidance for the design and optimization of receivers, and lay a foundation for the analysis of heat transfer performance of receivers.

KEY WORDS: solar energy; cavity receiver; spiral tubes; reflectivity; optical performance

0 引言

太阳能热发电技术作为一种集光热转换发电、大规模储热和电网同步特性于一身的可再生能源发电方式, 凭借其高安全性、高电力品质、可双向连接电网等优势, 在“碳达峰、碳中和”战略中占据了不可替代的地位, 并且将在构建以新能源为主体的新型电力系统中发挥中坚作用^[1-6]。在不同的光热转换系统中, 碟式太阳能光热发电系统因其布局灵活、可模块化且具有最高的热机效率等特点, 受到诸多学者的关注^[7-10]。

太阳能吸热器作为光热转换的核心部件与重

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-179); 西安市现代智能纺织装备重点实验室建设项目(2019220614SYS021CG043)。

Project Supported by Shaanxi Province Qin Chuangyuan “Scientist+Engineer” Team(2022KXJ-179); Xi'an Modern Intelligent Textile Equipment Key Laboratory Construction Project (2019220614SYS021CG043).

要纽带,其光学性能对整个系统的工作效率有着重要影响^[11]。各国学者也针对该部件开展了大量光学性能的研究。Daabo 等人^[12]利用 OptisWorks 软件探索了壁面吸收率变化时,球形、圆柱形、圆锥形 3 种吸热器的光学性能变化,研究发现,吸收率的减小会提高热流密度分布的均匀性,但也会降低光学效率;圆锥形吸热器能吸收更多的入射能量,光学效率最大,且内壁面的能流密度分布最均匀。Shuai 等人^[13-14]采用蒙特卡洛模拟方法,针对碟式聚光集热系统光学性能进行研究,并得到了不同吸热器壁面吸收的太阳热流密度分布。Xiao 等人^[15]利用商业软件 TracePro 研究了圆锥腔吸热器的锥角、螺旋管的环路数、聚光镜焦点与吸热器孔径之间的距离等因素对吸热器光学性能的影响。李紫卫等人^[16]使用 TracePro 软件研究了吸热器腔体顶部的反射锥以及石英玻璃板厚度对吸热器的光学效率的影响,得到了最佳的反射锥尺寸,并发现后者的影响很小。严亮等人^[17]采用蒙特卡洛法获得了圆柱形盘管式空气吸热器不同结构参数下腔体内部的能流分布。

虽然学者们已经研究了多种形状吸热器的光学特性,考虑的影响因素也较为全面,但是,在以往的研究中,一般用腔体的内壁面近似替代内置螺旋管的外壁面来进行分析。这种简化未考虑内置螺旋管对光线的遮挡、反射等,导致最终获得的热流分布与实际具有一定的偏差。同时,由于该简化往往将腔体内壁面的光学参数假设为与螺旋管外壁面相同,即腔体内壁面具有较高的吸收率,这同样与实际情况不符。为了探讨内置螺旋管腔式吸热器的光学性能及腔体内壁反射率对系统光学效率的影响,本文利用 TracePro 软件在真实结构下,对内置螺旋管吸热器腔体内壁面的反射率以及螺旋管外径、螺距等光学性能,即系统的光学效率和螺旋管外表面吸收光通量的影响进行了数值研究。

1 物理模型

在 UG 软件中建立碟式聚光镜和腔式吸热器的几何模型,导入到 TracePro 软件中,建立碟式太阳能集热系统的光学模型,如图 1 所示,包括

光源、聚光镜和吸热器。光源选用圆形格点光源,其直径与聚光镜相同,位于聚光镜正上方 3 m 处,发出大量的随机光线。吸热器按照实际工作情况,位于聚光镜和光源之间,遮挡了部分光线。聚光镜是旋转抛物面,焦距 $f=1\ 000\text{ mm}$,开口半径 $R_1=1\ 154\text{ mm}$,边缘角为 60° 。本文采用的吸热器为圆柱形腔式吸热器,其开口半径 $r=120\text{ mm}$,腔体深度 $h=160\text{ mm}$,内置螺旋盘管的外径和螺距作为变量进行分析。

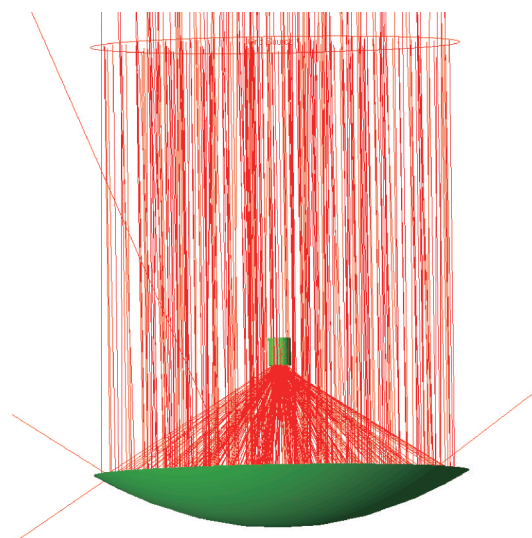


图1 碟式太阳能聚光集热系统光学模型

Fig. 1 Optical model of dish solar concentrating heat collecting system

2 计算方法

2.1 蒙特卡洛光线追迹法

本文利用 TracePro 软件进行模拟。该软件是一款功能强大的光学模拟软件,已被学者们广泛应用于太阳能光热发电系统的光学性能分析^[18]。在模拟中,TracePro 会追迹光源发出的大量随机光线,并且采用蒙特卡洛法来模拟光线的传播过程,直到光线所携带的能量减少到可以忽略或者逸出系统,最后利用统计学原理统计接受面上的光线数目。

2.2 计算模型

TracePro 在进行模拟时,入射到吸热器腔体内的每条光线都携带相同的能量 E_0 ,其计算公式为

$$E_0 = \frac{\pi R^2 I \tau}{N} \quad (1)$$

式中: R 为光源半径, m ; I 为太阳辐照度, W/m^2 ; τ 为聚光镜的反射率; N 为光源发射出的随

机光线的数量。

经过 n 次反射后光线携带的能量 E_n 为

$$E_n = E_0(1 - \alpha)^n \tag{2}$$

式中 α 为接受面的吸收率。

对于接受面的光通量，统计到达该区域的反射光线，则接受面 x 吸收的能量 Q_x 为

$$Q_x = \alpha \sum_{n=0}^m E_n N_{n,x} \tag{3}$$

式中： m 为光线在腔体内部反射的次数； $N_{n,x}$ 为到达接受面 x 的第 n 次反射光线的数量。

热流密度 E 即为一定面积接受的能量。平均热流密度的大小代表了单位时间内表面吸收的能量多少。接受面 x 的热流密度 E_x 表示为

$$E_x = \frac{Q_x}{S_x} \tag{4}$$

式中 S_x 为接受面 x 的面积， m^2 。

定义系统的光学效率 η_{opt} 为

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{Q_{\text{ab}}}{Q_{\text{solar}}} \tag{5}$$

式中： Q_{ab} 为内置螺旋管表面吸收光通量， W ； Q_{solar} 为光源射出的总太阳能， W 。

3 条件设定及模拟过程

3.1 条件设定

在光学模拟软件 TracePro 中，采用圆形格点光源作为太阳光，光源类型为 Lambertian，太阳半角为 4.65 mrad ，太阳辐照度为 $1\,000 \text{ W/m}^2$ ，光线数为 $10^{[19]}$ 。聚光镜的反射率为 0.9，螺旋管表面的吸收率为 0.9，腔体内壁面无特别说明的情况下默认与螺旋管外表面一致。将光通量阈值设为 0.05，即当光线到达物体表面时，会发生反射、吸收和散射等，进而产生新的光线，当这些光线携带的能量小于初始光线能量的 5% 时，停止对其追踪。

3.2 模拟工况

表 1 为本文模拟涉及到的工况。首先，圆柱形腔体不变，对是否装置螺旋管 2 种情况下的吸热器进行对比模拟。其次，保持内置螺旋管螺距 2 mm 不变，其外径从 8 mm 变化到 18 mm；接着保持其外径 12 mm 不变，螺距从 0 mm 变化到 4 mm。再次，螺旋管螺距分别选取 1、2、3 mm，

腔体内壁面反射率从 0 变化到 1；选取腔体内壁面反射率为 0.9 和 0.1，腔体底部选取无反射锥、圆锥形反射锥和半球形反射锥。最后，选取圆柱、复合圆台、圆柱-圆台和圆台圆柱 4 种外形的腔体进行模拟。

表 1 模拟工况

Table.1 Simulation conditions

固定量	变量	数量/组
圆柱形腔体	有无螺旋管	2
2 mm 螺距	螺旋管外径 8~18 mm	21
12 mm 螺旋管外径	螺距 0~4 mm	33
1、2、3 mm 螺距	腔体内壁面反射率 0~1	33
0.9、0.1 的腔体内壁面反射率	腔体底部无反射锥、圆锥形反射锥和球形反射锥	6
开口大小和螺旋管圈数	4 种形状的腔式吸热器	4

3.3 模型验证

为了验证本文算法和模型的可靠性，建立了与文献[20]相同的聚光镜尺寸和模拟光源，并比较二者的热流密度分布情况。图 2 对比了本文模拟的焦平面上的通量分布与文献[20]的理论计算结果，由图 2 可以发现，本文的模拟结果与理论计算结果吻合较好，最大误差仅为 4.1%。另外，本文建立了与文献[19]相同的物理模型(带有螺旋管的吸热器、聚光镜和光源)，设置相同的参数，对不同管径下管外壁吸收太阳辐射能量及光学效率进行了模拟验证，结果如表 2 所示。模拟所得不同管径 d 下管外壁吸收太阳辐射能量(direct normal irradiance, DNI)、光学效率和文献[19]吻合，以此说明了本文算法和模型的可靠性。

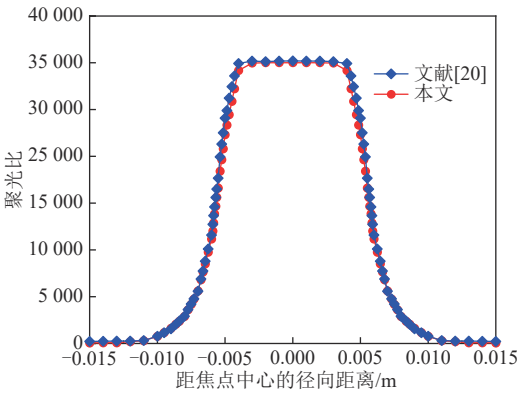


图 2 焦平面热流分布图

Fig. 2 Heat flux distribution in the focal plane

表2 不同管径下管外壁吸收太阳辐射能量及光学效率

Tab.2 Absorbed energy and optical efficiency of the cavity for different tube diameters

方法	DNI/ (W·m ⁻²)	d=8 mm		d=12 mm		d=18 mm	
		Q_{ab}/W	$\eta_{opt}/\%$	Q_{ab}/W	$\eta_{opt}/\%$	Q_{ab}/W	$\eta_{opt}/\%$
文献[19]	650	2 232.12	82.081	2 229.60	81.988	2 221.71	81.698
	1 000	3 434.02	82.081	3 430.15	81.988	3 418.17	81.698
本文	650	2 219.41	81.596	2 216.63	81.494	2 198.53	80.828
	1 000	3 413.98	81.596	3 409.70	81.494	3 381.86	80.828

4 计算结果与分析

4.1 有无螺旋管情况下吸热器光学性能的比较

针对以往研究中，近似用腔体内壁的光通量来代替实际情况内置螺旋管外壁光通量的做法，本文对比分析了有无内置螺旋管下吸热器的光学性能，结果如表3所示。无螺旋管时采用以往研究中以腔体内壁面代替实际螺旋管外壁面的做法来读取数据，有螺旋管的情况下直接读取所建螺旋管模型外壁面吸收的光通量。可以看出，对于同一腔体，复杂的螺旋管对光线的遮挡和反射等作用使得直接照射到腔体底面的光线减少，由此得到的系统光学效率比以往研究中以简化方法所得的高出近3%。

表3 有无螺旋管的腔式吸热器光学性能对比

Tab.3 Comparison of optical performance of cavity receivers with and without spiral tubes

是否有螺旋管	腔内侧面光通量/W	底面光通量/W	系统光学效率/%
无螺旋管	3 195.3	548.93	76.86
有螺旋管	3 302.1	295.72	79.43

另外，考虑到对于同一腔式吸热器，内置螺旋管的规格也会有所不同。图3显示了在2 mm螺距不变的情况下，螺旋管外径大小对外壁吸收的光通量和系统光学效率的影响。可以看出，随着内置螺旋管外径的增大，其外壁面吸收的光通量和系统的光学效率总体呈现增大的趋势。这是由于在腔体大小保持不变的情况下，更大外径的螺旋管将占据更大的腔内空间，进入腔体的光线将更多地被螺旋管拦截，而不再通过螺旋管间隙入射到腔体内壁上，从而使螺旋管表面吸收的光通量随着螺旋管外径的增大而增加。从图3中还可以发现，几处下降的情况则是由于腔体深度不变，螺旋管外径增大，使得螺旋管圈数减少，从而导

致螺旋管外表面积减少。

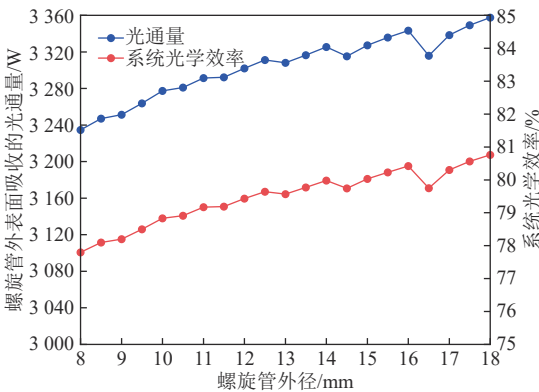


图3 螺旋管外径对吸热器光学性能的影响

Fig. 3 Effect of outer diameters of spiral tubes on optical performances of cavity receiver

图4展示了当螺旋管外径为12 mm时，不同螺距下螺旋管外表面吸收的光通量及系统的光学效率。可以看出，曲线中有3处光学性能突然减小的位置，其原因与前文一致，螺距的不断加使得螺旋管圈数减少。这3处突变将曲线分为了4段，分别对应不同圈数的螺旋管。前2段曲线，即螺距增加到1.25 mm时，螺旋管外壁面吸收的光通量和系统的光学效率都有小幅增长；而后2

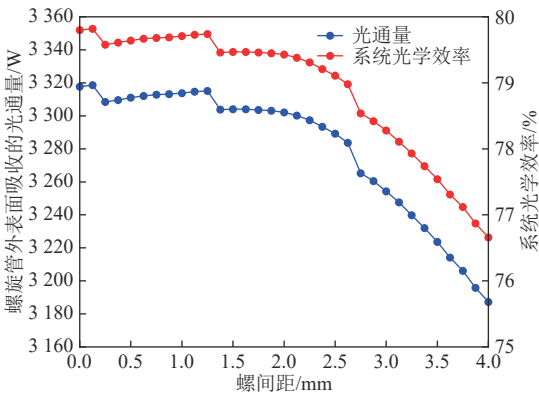


图4 螺距对吸热器光学性能的影响

Fig. 4 Effect of pitches on optical performance of cavity receiver

段曲线,即螺距为1.25~4 mm时,其光学性能均呈现较大幅度的降低。前2段曲线略微升高的原因是:随着螺距的增大,更多光线在相邻盘管间隙中的反射次数增多,从而导致之前的部分一次反射光线被重新吸收,增加了螺旋管外壁面吸收的光通量。对于后2段曲线,则是由于螺距增大到一定程度,更多的光线不再是在螺旋管间隙中多次反射,被螺旋管外壁面吸收,而是通过缝隙直接达到腔体的内壁面被其吸收。所以当螺距超过1.25 mm时,螺距越大,螺旋管外表面吸收的光通量和系统的光学效率会持续降低。

通过上述分析可知,对于同一吸热器,考虑内置螺旋管后得到的系统光学效率比未考虑内置螺旋管时高2.57%。而且,其光学效率与实际内部安装的螺旋管的规格有很大的关系,如本文中不同螺距下的螺旋管得到的系统光学效率最大差值为1.26%,不同螺旋管外径下的最大差值则为2.96%,所以很多研究中简单将腔体内壁面近似为螺旋管外壁面的处理方法并不合适。

4.2 腔体内壁面反射率对吸热器光学性能的影响

在之前的模拟中发现,以往在研究吸收率对整体光学效率的影响时,以腔体内壁面代替实际螺旋管外壁面的做法还存在一个问题,往往将腔体内壁面的光学参数设置为和螺旋管壁面相同的参数,都有着较高的吸收率。但在实际情况下,对于内置螺旋管的腔式吸热器,倘若内壁面也具有较高的吸收率,则通过螺旋管的间隙入射到腔体内壁上这部分能量将被壁面所吸收,而不会再次被反射回螺旋管,这与实际情况不符。

本文探究了不同螺距下,内置螺旋管吸热器腔体内壁面的反射率对其光学性能的影响。分别选取1、2、3 mm这3种螺距来对比分析,如图5所示,随着其内壁面反射率从0增大到1,1 mm螺距的螺旋管外壁面吸收的光通量和系统的光学效率分别增长了250.9 W和6.03%,2 mm和3 mm螺距的螺旋管也分别增长了260.9 W、6.28%和315.3 W、7.95%,这说明腔体内壁面反射率的提高使得光线在腔体内壁面和螺旋管外表面多次反射,增加了对这部分光线的利用率,对提高吸热器的光学效率有所帮助。当内壁面反射率小于0.8

时,随着螺距的增加,螺旋管外壁面吸收的光通量和系统的光学效率随之减小,这与4.1节的结论一致。当反射率超过0.8时则相反,螺距大的吸热器的光通量和系统的光学效率更高。这是因为越大的螺距会使得越多的光线通过相邻螺旋管的间隙到达腔体内壁面,但是这些光线不再被内壁面吸收,而是被具有较高反射率的腔体内壁面反射,重新回到螺旋管外壁面得以利用,并且该部分能量弥补了由于螺距增加造成的螺旋管圈数减少而带来的损失,使得整体的光学性能有所提高。但是这部分光线是有限的,所以这种增长也不会因为螺距的增加一直保持。

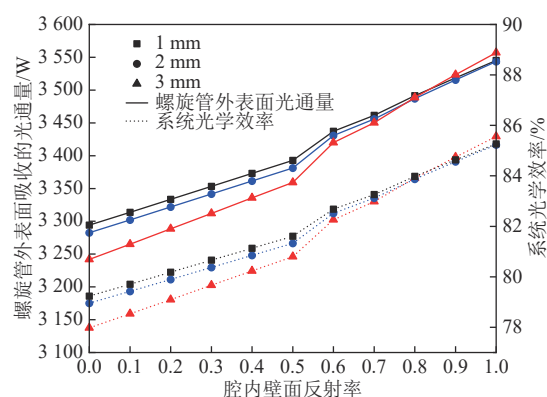


图5 不同螺距下内壁反射率对吸热器光学性能的影响

Fig. 5 Effect of inner wall reflectivity on optical performance of cavity receiver under different pitches

图6为不同反射率下吸热器内置螺旋管外壁面的能流密度分布情况。可以看出,随着吸热器腔体内壁面反射率的不断增大,内置螺旋管外表

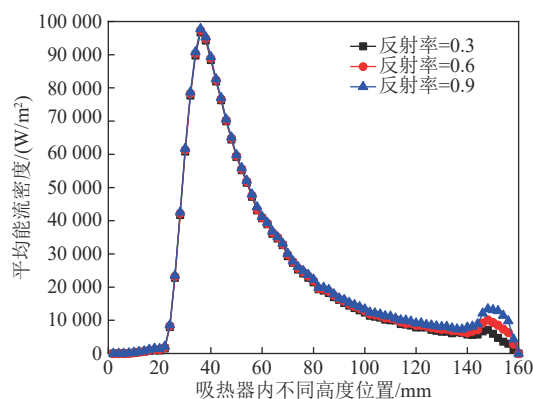


图6 不同反射率下内置螺旋管表面太阳辐射热流密度分布情况

Fig. 6 Distribution of solar radiation heat flux on built-in spiral tubes under different reflectivities

面的能流密度分布情况基本不变,只有靠近底部的螺旋管表面能流密度随之不断增大。这是由于腔体底面反射率的增大使得入射到底面的光线被反射到螺旋管外壁面的数量增多所造成的。

4.3 装置反射锥对光学性能的影响

对于实际设计的腔式吸热器,内置的螺旋盘管在内部盘旋时,不可能将腔体底部覆盖。这会导致在实际应用过程中,入射到该区域的光线无法有效利用。在以往的研究中,解决这个问题常用的手段是在腔体底部放置一个反射锥^[21]。本文对比分析了提高腔体内壁面反射率和在腔体底部放置圆锥形、半球形反射锥对吸热器光学性能提高的效果。如图7所示,可以看出,对于内置螺旋管的腔式吸热器,在原本腔体内壁面的反射率较低的前提下,加装反射锥和仅增加内壁面的反射率都可以大幅提高系统的光学效率和螺旋管表面吸收的光通量,采用同时加装反射锥和提高内壁面反射率的方法可以使系统的光学效率高达85.81%。

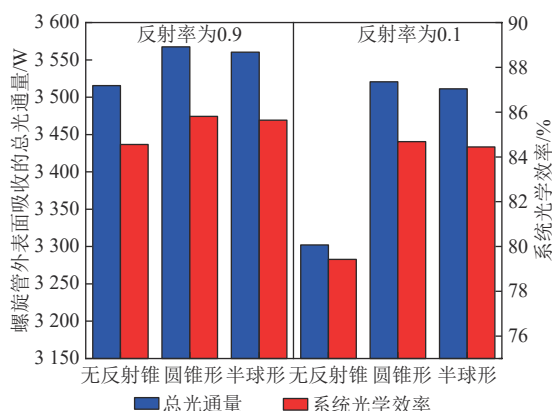


图7 不同措施对吸热器光学性能的影响

Fig. 7 Effect of different measures on optical performance of cavity receiver

图8显示了3种措施下腔式吸热器内部能流密度的分布情况,可以看出,这3种措施下螺旋管各圈上吸收光通量的大小相差不大。由此可以说明,增加腔体内壁面反射率的方法完全可以代替以往在腔体底部安装反射锥的手段来有效地利用入射到腔体底面的太阳光,且与后者相比,在实际工程中前者的实现更加容易。因此,无须针对不同的吸热器定制不同的反射锥进行安装,只需

提高腔体内壁反射率即可。

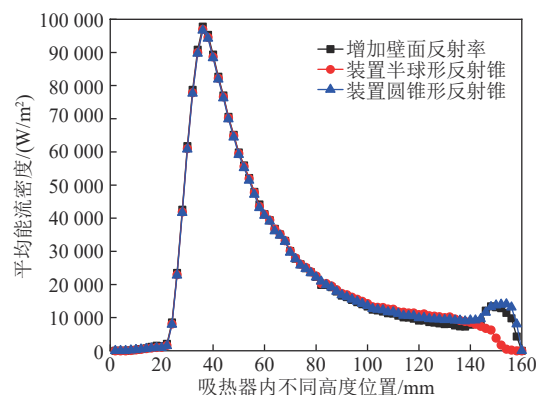


图8 3种措施下螺旋管外表面太阳辐射热流密度的分布情况

Fig. 8 Distribution of solar radiation heat flux on the outer surface of the spiral tubes under three measures

4.4 不同形状的吸热器光学性能分析

本文还对比分析了如图9所示的不同形状腔式吸热器的光学性能。需要说明的是,为了保证进入腔体的光线数目和布置的螺旋管圈数相同,4种吸热器腔体的开口大小及内壁旋转面母线长度相同。

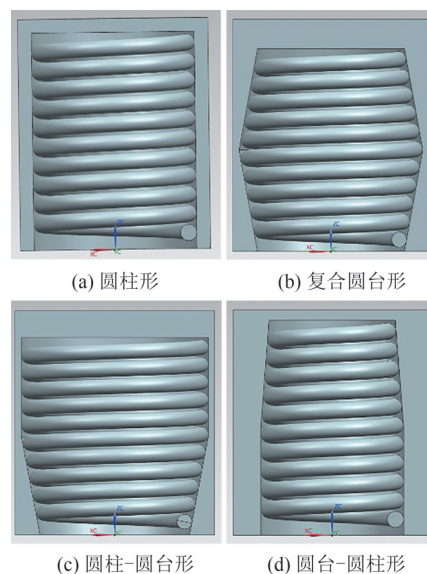


图9 不同形状的腔式吸热器

Fig. 9 Cavity receivers with different shapes

图10为4种形状的吸热器内置螺旋管外表面吸收的光通量和系统光学效率的对比图,可以看出,4种吸热器中,圆台-圆柱形吸热器的螺旋管外表面吸收的光通量和光学效率最高,分别为3551.349 W和85.42%。圆柱-圆台形吸热器的光学性能最低,其光学效率仅为83.99%。圆柱形和

复合圆台形吸热器的光学性能较为接近,其光学效率分别为84.56%和84.41%。总之,在同一太阳辐照度下,具有相同开口大小和螺旋管圈数的4种吸热器中,圆台-圆柱形吸热器具有最佳的光学性能。

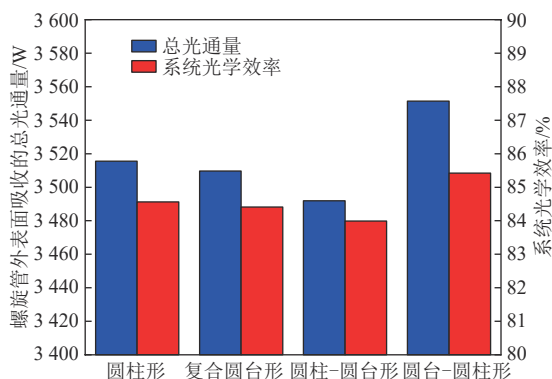


图10 不同形状吸热器的光学性能

Fig. 10 Optical performance of cavity receivers with different shapes

5 结论

针对内置螺旋管的腔式吸热器,利用TracePro软件对腔体内壁面的反射率及内置螺旋盘管的外径、螺距进行了一系列光学模拟,分析了有无螺旋管下模拟结果的差别和腔体内壁面反射率等对吸热器光学效率的影响,最后比较了4种不同形状的吸热器的光学性能,得出以下结论:

1) 对于同一吸热器腔体,考虑内置螺旋管后得到的光学性能比不考虑螺旋管的光学性能要好,而且其光学效率与实际内部安装的螺旋管的规格(即螺距和管外径的大小)有很大关系,简单地将其内壁面近似为螺旋管外壁面来处理会造成模拟结果偏离实际情况,参考性较低。

2) 螺距不变的情况下,随着腔体内壁面反射率的增大,螺旋管外壁面吸收的光通量和系统的光学效率增大。在内壁面反射率小于0.8时,随着螺距的增加,螺旋管外壁面吸收的光通量和系统的光学效率减小;当反射率超过0.8时情况则相反。

3) 安装反射锥和仅增加内壁面的反射率都可以大幅提高系统的光学性能,同时加装反射锥和提高内壁面反射率可以使系统的光学效率高达85.81%。

4) 在所研究的4种不同形状的吸热器中,圆

台-圆柱形吸热器具有较好的光学性能,光学效率可达85.42%;而圆柱-圆台形吸热器的光学性能最低,其光学效率仅为83.99%

参考文献

- [1] 王志峰,何雅玲,康重庆,等.明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J].华电技术,2021,43(11): 1-4.
WANG J F, HE Y L, KANG C Q, et al. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress[J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 1-4.
- [2] 张泽栋,王维,叶季蕾,等.储热型太阳能光热发电稳态功率模型[J].发电技术,2022,43(5): 731-739.
ZHANG Z D, WANG W, YE J L, et al. Study on steady state power model of concentrated solar power with heat storage system[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 731-739.
- [3] 杨国清,薛雨,姚李孝,等.光热电站并网对新能源电网运行特性的影响研究[J].电网与清洁能源,2021,37(5): 134-139.
YANG G Q, XUE Y, YAO L X, et al. A study on the influence of the connected photo-thermal power station on the operation characteristics of the new energy grid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 134-139.
- [4] 林达,顾丹青,周宇昊,等.太阳能有机朗肯循环系统技术经济性分析[J].浙江电力,2022,41(4): 14-19.
LIN D, GU D Q, ZHOU Y H, et al. Thermo-economic analysis of solar organic rankine cycle system [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(4): 14-19.
- [5] 谢昱卓,李刚,倪杭飞.基于特征算法的塔式光热电站镜场云识别技术研究[J].智慧电力,2021,49(11): 38-44.
XIE Y Z, LI G, NI H F. Cloud recognition in heliostat field of tower concentrating solar power station based on feature algorithm[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 38-44.
- [6] 傅旭,杨欣,汪莹,等.光热电站容量效益评估及影响因素研究[J].电力工程技术,2021,40(3): 186-192.
FU X, YANG X, WANG Y, et al. The capacity benefit evaluation of CSP power station and its influencing factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 186-192.
- [7] KARIMI R, GHEINANI T T, AVARGANI V M. A detailed mathematical model for thermal performance

- analysis of a cylindrical cavity receiver in a solar parabolic dish collector system[J]. *Renewable Energy*, 2018, 125(9): 768-782.
- [8] SLOOTWEG M, CRAIG K J, MEYER J P. A computational approach to simulate the optical and thermal performance of a novel complex geometry solar tower molten salt cavity receiver[J]. *Solar Energy*, 2019, 187(7): 13-29.
- [9] UZAIR M, ANDERSON T, NATES R. Effect of insertion of the dish on the behaviour of the convective heat loss[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45(2): 989-1000.
- [10] 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): 1-19.
- [11] 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 C Z. Study on heat-transfer characteristic of a helical cavity receiver for CSP system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [12] DAABO A M, MAHMOUD S, AL-DADAH R K. The effect of receiver geometry on the optical performance of a small-scale solar cavity receiver for parabolic dish applications[J]. *Energy*, 2016, 114: 513-525.
- [13] SHUAI Y, XIA X, TAN H. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(1): 13-21.
- [14] SHUAI Y, WANG F Q, XIA X L, et al. Radiative properties of a solar cavity receiver/reactor with quartz window[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(19): 12148-12158.
- [15] XIAO H, Y ZHANG, YOU C, et al. Effects of critical geometric parameters on the optical performance of a conical cavity receiver[J]. *Frontiers in Energy*, 2019, 13(4).
- [16] 李紫卫, 阴继翔. 结构参数对复合圆台形吸热器光学性能影响的研究[J]. *太原理工大学学报*, 2018, 49(5): 793-798.
- LI Z W, YIN J X. Research on influence of structural parameters on optical properties of compound truncated cone heat absorber[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2018, 49(5): 793-798.
- [17] 严亮, 肖刚, 王诚, 等. 太阳能盘管腔式高温集热特性模拟与优化[J]. *能源工程*, 2015(2): 39-44.
- YAN L, XIAO G, WANG C, et al. Performance simulation and optimization of a solar tube-cavity high temperature receiver[J]. *Energy Engineering*, 2015(2): 39-44.
- [18] 刘亚君. 槽式太阳能集热器集热管能流密度分布特性与传热流动特性研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2019.
- LIU Y J. Study on flow density distribution characteristics and heat transfer flow characteristics of collecting tubes in trough solar collectors[D]. Hengyang: University of South China, 2019.
- [19] LAN X, SONG H B, SYWA B, et al. Optical-thermal conversion characteristics of cylindrical receiver with built-in helically coiled tubes[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 37: 1126-1132.
- [20] JETER S M. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1986, 108(3): 219-225.
- [21] 余佳焕, 彭佑多, 颜健, 等. 吸热器二次反射锥对太阳能斯特林热机吸热性能的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(1): 134-139.
- YU J H, PENG Y D, YAN J, et al. Influence of the secondary reflector cone of the heat absorber on the heat absorption performance of the solar stirling heat engine[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2017, 38(1): 134-139.

收稿日期: 2022-06-16。

作者简介:



王晓文

王晓文(1996), 男, 硕士研究生, 主要从事太阳能吸热器光热特性数值模拟, 980415686@qq.com;



屠楠

屠楠(1987), 女, 博士, 副教授, 主要从事太阳能热发电技术研究, tu.nan@qq.com;



方嘉宾

方嘉宾(1983), 男, 博士, 副教授, 主要从事热能工程的研究工作, 本文通信作者, jiabinfang@foxmail.com。

(责任编辑 辛培裕)