

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.09.002

# 抛物面碟式太阳能接收器与高温反应器的联合传热特性分析

串 禾<sup>1a</sup>, 吴海峰<sup>1b</sup>, 谢更新<sup>1b,2</sup>, 郑 浩<sup>1b,2</sup>, 段 洋<sup>1b</sup>, 杜超军<sup>1b</sup>, 王 羲<sup>1b</sup>

(1.重庆大学 a 电气工程学院; b 城市建设与环境工程学院, 重庆 400044;

2. 教育部深空探测联合研究中心, 重庆 400044)

**摘要:** 太阳能接收器和反应器的几何结构直接影响其传热特性及化学反应过程, 利用光学特性产生高强度辐射通量是营造高温的常用方法。构造了一种基于抛物面碟式太阳能接收器的高温反应器, 分为预热区和多孔反应区, 通过 COMSOL Metaphysics 软件建立其三维数值模型, 计算焦平面热通量分布规律, 在典型运行条件下 ( $DNI=800 \text{ W/m}^2$ ,  $u_{in}=0.1 \text{ m/s}$ ), 分析反应器的速度和温度分布规律, 以及 DNI 和反应流体入口速度对反应器传热特性的影响。

**关键词:** 抛物面碟式接收器; 高温反应器; 传热特性; 多物理场

中图分类号: TK02

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)09-011-08

## Analysis of coupled heat transfer characteristics of parabolic dish solar receiver and high temperature reactor

CHUAN He<sup>1a</sup>, WU Haifeng<sup>1b</sup>, XIE Gengxin<sup>1b,2</sup>, ZHENG Jie<sup>1b,2</sup>,

DUAN Yang<sup>1b</sup>, DU Chaojun<sup>1b</sup>, WANG Yi<sup>1b</sup>

(1.a.School of Electrical Engineering; b.Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University 400044, Chongqing, P.R.China; 2.Center of Space Exploration, Ministry of Education 400044, Chongqing, P.R.China)

**Abstract:** The geometrical structure of solar receiver and reactor directly influences the heat transfer characteristics and chemical reaction process. The use of optical characteristics to produce high intensity radiation flux is a common method of building high temperature. In this research, a high temperature reactor based on parabolic dish solar receiver is constructed, which is divided into preheating zone and porous reaction zone. A three-dimensional numerical model of parabolic dish solar receiver and reactor is built by COMSOL Metaphysics software to analyze the distribution law of heat flux in coke plane, the velocity and temperature distribution of reactor under typical operating conditions ( $DNI=800 \text{ W/m}^2$ ), and the influence of reaction fluid inlet velocity and DNI on heat transfer characteristics of reactor. The results will help to explore the efficient use of solar energy and high temperature chemical reactions.

**Keywords:** parabolic dish solar receiver; high temperature reactor; transfer characteristics; metaphysics

收稿日期: 2018-3-19

基金项目: 科技部国家级重点(十三五)科研基金项目(2016YFC0700705)。

Supported by the Ministry of Science and Technology National key (13th Five-Year) Research Foundation Project(2016YFC0700705).

作者简介: 串禾(1959—), 男, 工程师, 主要从事机电一体化研究, (E-mail)1024329310@qq.com。

谢更新(联系人), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)xiegengxin@vip.sina.com。

太阳能是一种可再生和清洁能源,太阳光辐射产生的大量能量能够被转换成高温热能<sup>[1]</sup>。集中太阳能技术包括抛物线槽、抛物线碟式和中心接收器<sup>[2]</sup>。为了满足某些化学吸热反应的高温要求<sup>[3]</sup>,例如:B4C 和 Al 在 625~690 °C 温度区间反应生成 Al3BC 和 AlB2<sup>[4]</sup>,基于抛物面碟式反应器是最佳选择<sup>[5]</sup>。

太阳能反应器传热特征的研究大多数都把吸收表面上的太阳辐射热通量假设为均匀值作为边界条件<sup>[6-7]</sup>。实际上,由于光学特征和接受器几何特征的影响,吸收表面的热通量并不是恒定值,而是按照一定规律分布,这对反应器的热传递过程很重要。太阳能反应器热传递性能对化学反应过程的影响也至关重要。国外研究者 K.s.redd 建立了基于太阳能抛物面接收器的腔体反应器的二维仿真模型,结合自然对流与表面辐射热损失原理,深入研究流体入口温度、表面发射率、定位对反应器的总热损失的影响<sup>[8]</sup>。随着计算机技术的飞速发展,数值模拟得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>,对反应器的研究,大多数文献使用的是一维和二维模型<sup>[10]</sup>。

然而,在非均匀热流分布边界热源下,关于抛物面碟式太阳能接收器高温反应器的传热特性研究很少。在研究中,采用射线追踪法计算接收器表面的太阳能热通量分布。为了全面研究反应器内的传热特性,建立了基于抛物面碟式太阳能接收器的高温反应器的三维数值模型<sup>[11]</sup>。在典型运行条件下,研究反应器的传热特性,以及太阳辐射强度和反应流体入口速度对反应流体温度变化的影响。

## 1 几何结构

基于抛物面碟式太阳能接收器的高温反应器几何结构如图 1 所示,在实际应用中,它还包括一些支撑结构,自动跟踪系统和附件。模型中,高温反应器主要包括 2 个区域:反应物预热区和多孔反应区。反应器的工作原理为:诸多平行太阳光线被抛物面碟式接收器汇集,通过反射镜反射至反应器的热源焦平面上,转换成热能,持续不断地提供给反应器热源。反应器中,反应物从入口 I 流入预热区,通过预热区持续加热至化学反应所需求的温度,再从入口 II 流入多孔反应区,反应物在多孔反应区完成反应,反应产物从出口流出。反应器的最底端采用透明玻璃覆盖,形成真空区,防止辐射热量损失,其它外表面采用玻璃棉进行隔热。

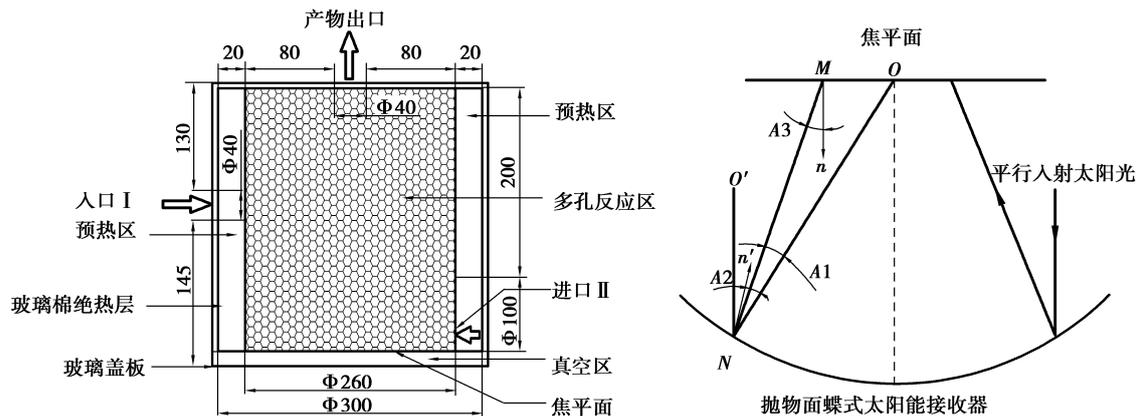


图 1 抛物面碟式太阳能接收器的高温反应器的几何结构

Fig.1 Geometric structure of a high temperature reactor for a parabolic dish solar receiver

## 2 三维数值模型

通过 COMSOL Metaphysics 软件建立高温反应器的三维数值模型,耦合光学射线追踪、流体力学和传热模块研究其传热特性。数值计算过程中假设:

- 1) 反应器底端接受焦平面吸收率为 0.95,可通过选择性涂层以减少其辐射热损失。
- 2) 焦平面与玻璃盖板之间的真空区用 N2 填充,在该区域只计算辐射传热,忽略对流和热传导损失。
- 3) 太阳平行光垂直入射至抛物面碟式接收器,反射率为 100%,忽略反应器本身造成的阴影影响。
- 4) 模型中的流体和其它材料物性特性不随温度变化,保持常量。

### 2.1 射线热源

高温反应器焦平面上的热通量分布是反应器的热源。抛物面碟式接收器的光学特性和反应器的几何结构共同决定焦平面的热通量分布。结合几何光学和固体传热模块来计算光线在吸收介质中传播时产生的热源分布——焦平面上的热通量分布。射线传播可通过耦合一阶方程进行模拟计算,射线轨迹如图 2 所示,几乎每个射线都被焦平面拦截,仅有极少数的射线溢出。

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial q_0} \frac{dq_0}{dt} = -\frac{\partial \omega}{\partial k}, \tag{1}$$

其中,  $\omega = \frac{c |k|}{n(q_0)}$

$$\frac{dq_{RHS}}{dt} = -\sum_{i=1}^N \frac{\partial q_i}{\partial t} \delta(r - q_i). \tag{2}$$

数值计算过程中,每个射线被假设成 1 个无限小的热源,可通过公式(2)计算。图 3 表示高温反应器焦平面上的热通量分布。可以看出,焦平面上的热通量分布极其不均匀,由中心向外扩展逐渐减少,在焦平面边缘热通量几乎为零,但是,在各个轴线上热通量是对称分布的。假设太阳入射强度  $I = 800 \text{ W/m}^2$  时,焦平面上的最大热通量值高达  $1.18\text{e}6 \text{ W/m}^2$ ,平均值也约大于  $4.5\text{e}5 \text{ W/m}^2$ 。



图 2 抛物面碟式接收器射线追踪

Fig.2 Ray tracing of parabolic dish receivers

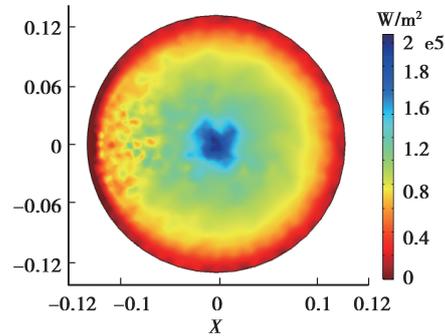


图 3 反应器焦平面热通量分布

Fig.3 Heat flux distributions of reactor focal plane

### 2.2 热传递结构

高温反应器热传导过程涵盖了 3 种传热方式:导热、对流和辐射传热,其热阻网络结构如图 4 所示。反应器的壳体(涵盖玻璃盖板)是固体传热即导热传热,在反应流体与反应器壁面之间的传热为强制对流传热。假设绝热玻璃棉层的导热系数很小,不考虑保温表面对环境的对流和辐射热损失。反应器底端玻璃盖板对红外辐射不透明,因此,在玻璃盖板外表面,计算其对流和辐射热损失,忽略从表面到环境的反射热损失。

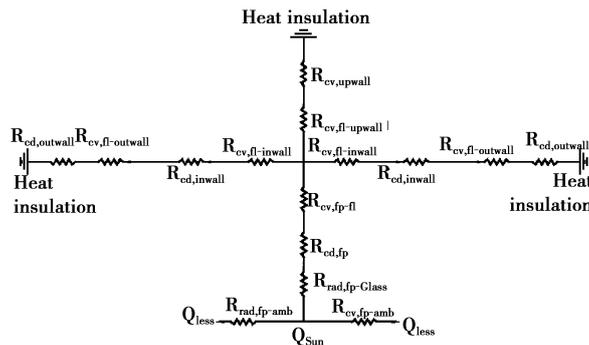


图 4 反应器传热网络结构

Fig.4 Reactor heat transfer network structure

### 2.3 控制方程

高温反应器包括自由流区(反应物预热区)和多孔反应区,假定在稳态条件下反应器内的流体为层流,所有控制方程表示如下:

连续性方程:(自由区)

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0$$

连续性方程:(多孔反应区)

$$\nabla \cdot (\rho u) = Q_{br}$$

动量方程:(自由区)

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \tau] + F$$

动量方程:(多孔反应区)

$$\frac{1}{\epsilon_p} \rho(u \cdot \nabla)u \frac{1}{\epsilon_p} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu \frac{1}{\epsilon_p} (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] - \left( \mu K^{-1} + \beta_F |u| + \frac{Q_{br}}{\epsilon_p} \right) u + F,$$

能量方程:(自由区)

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla)T \right) = -(\nabla \cdot q) + Q$$

能量方程:(多孔反应区)

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla)T \right) = -(\nabla \cdot (-k_{eff} \nabla T)) + Q$$

其中,有效传热系数  $k_{eff}$  采用体积平均数计算:

$$k_{eff} = \theta_p k_p + (1 - \theta_p)k + k_{disp}.$$

边界条件表达如下:

1) 进出口边界条件:(入口)  $u_{in} = 0.1 \text{ m/s}$ ;  $P = P_{ref}$ ,  $T_{in} = 254 \text{ K}$ ; (出口)抑制压力回流:  $[-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)]n = -p_0 n p_0 \leq p_0 p_0 = 0 \text{ Pa} - n \cdot q = 0$ 。

2) 其余壁面边界条件:绝热表面设置为  $-n \cdot q = 0$ , 预热区和多孔反应床内外壁速度设置为  $u_x = u_y = u_z = 0$ 。

## 3 模拟结果和分析

太阳直射辐射强度、反应物入口速度直接影响高温反应器的传热性能,文中重点对这 2 个影响因素进行数值分析。

### 3.1 反应器的温度场分布

针对典型运行条件,分析反应器的传热特性,典型运行条件可描述如下:太阳直射辐射强度(DNI)为  $800 \text{ W/m}^2$ ,反应流体入口速度为  $0.1 \text{ m/s}$ ,入口温度为  $254 \text{ K}$ ,多孔反应区孔隙率为  $0.5$ ,反应流体以乙醇蒸汽为例计算。高温反应器的温度场分布直接影响化学反应速率和反应器的传热效率,其中,温度场分布又直接受速度场的影响。图 5 表示典型运行条件下高温反应器的速度分布。可以观察到,反应流体在预热区紧贴墙壁,与壁面进行充分接触后,再流入多孔反应区。除在入口1附近的流体产生一定的涡流外,预热区的速度总体分布均匀,是由较高的入口速度和狭窄的预热区造成的。由于多孔反应区特有的阻力特性,其速度分布均匀同向,平均值仅为  $0.01 \text{ m/s}$ 。反应器中入口2和出口的速度分别为  $0.056 \text{ m/s}$  和  $0.231 \text{ m/s}$ 。

图 6 表示反应器预热区的温度场分布,预热区的温度分布直接决定反应流体进入多孔反应床的入口温度。图 6(a)和图 6(b)分别是预热区的等温面和截面  $z = 0.05 \text{ m}$  温度场分布。很明显,入口1侧的温度远低于入口2侧的温度,入口2侧的平均温度高达  $880 \text{ K}$ 。图 7 表示多孔反应区的温度场分布,图 7(a)和图 7(b)分别是等温面和截面  $z = 0.05 \text{ m}$  的温度场分布。同样,入口1侧的温度远低于入口2侧的温度,这是由于预热区较低的温度引起的。从图 7(a)中可看出,在  $Z$  轴方向上温度是逐渐降低的;从图 7(b)中可明显看到,温度在  $x$  轴方向上的分界线,在多孔反应区产物出口的平均温度达  $810 \text{ K}$ 。高温反应器接受表面-焦平面的温度是最高的,如图 8(a)所示,类似  $N$  个等温值圈组成,与该表面的热通量分布很相似(如图 3 所示)。其最大温

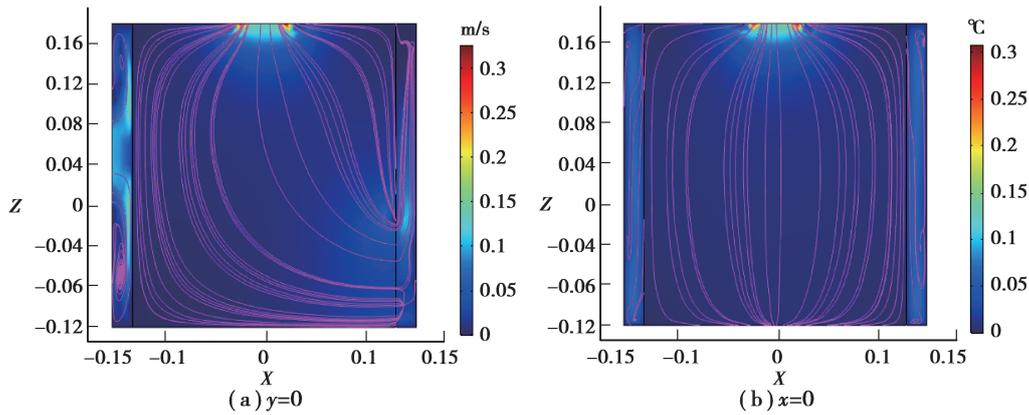


图 5 高温反应器速度场

Fig.5 The velocity field in the high temperature reactor

度为 945 K,最小值仅仅比其低 40 K。反应器其它壁面由于受低温反应流体换热影响,温度差值高达 600 K,将产生周向机械应力,导致预热区外壁变形的危险。图 8(b)表示玻璃盖板的温度场分布,平均温度值仅为 400 K,远低于焦平面的温度,外表面的辐射值也仅为 451 W/m<sup>2</sup>,大大降低了高温反应器的辐射热损失。

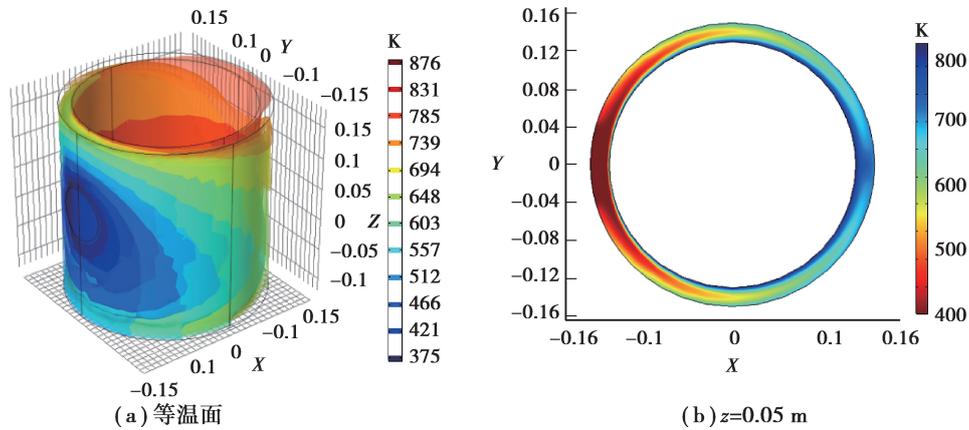


图 6 预热区温度分布

Fig.6 Temperature distributions of the preheating zone

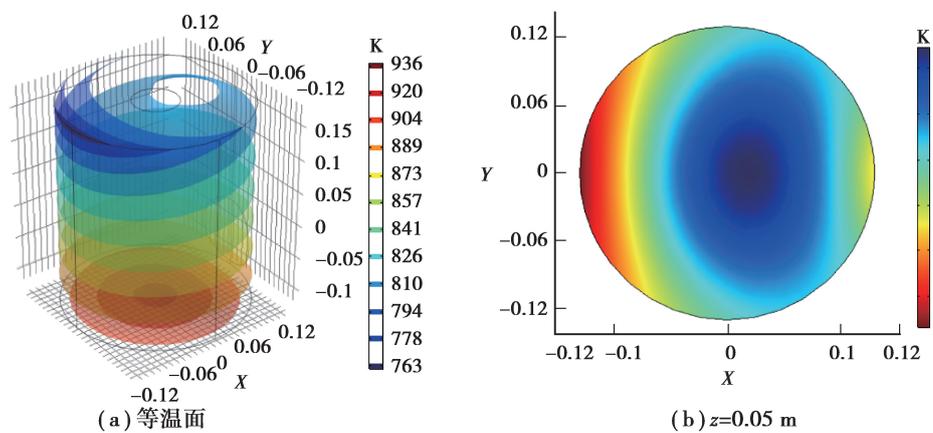


图 7 多孔反应区温度分布

Fig.7 Temperature distributions of the porous reaction zone

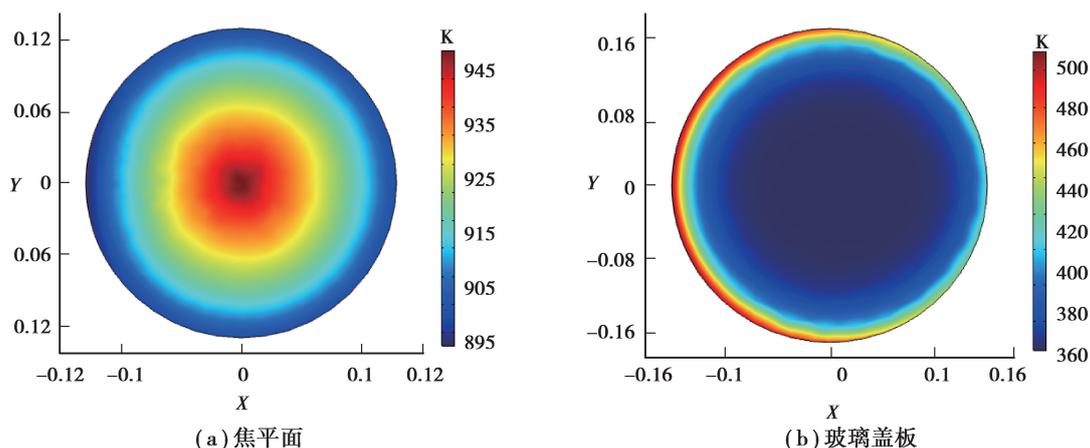


图 8 焦平面和玻璃盖板温度分布

Fig.8 Temperature distributions of the focal plane and glass cover

### 3.2 太阳入射强度/入口速度对传热特性影响

在实际应用中太阳辐射强度不是恒定值,是随着地域、季节、时间变化的;反应流体入口速度易调节,有利于调节反应过程滞留时间,提高反应器的传热效率,前者是自然因素,后者是人为因素,共同影响反应器热学性能。

为了更深入地研究太阳辐射强度和入口速度对反应器热学性能的影响,选择不同的辐射强度和入口速度分别对反应器进行数值模拟计算。例如:太阳辐射强度分别为 400、600、800、1 000  $\text{W}/\text{m}^2$ ,入口速度分别为 0.05、0.1、0.5  $\text{m}/\text{s}$ 。图 9 表示不同太阳辐射强度下,反应流体入口 2 和出口的变化规律。从模拟结果可以看出,随着太阳辐射量的增加,反应流体出口的温度逐渐升高。例如:当入口速度固定为 0.1  $\text{m}/\text{s}$ ,太阳辐射强度为 400、600、800、1 000  $\text{W}/\text{m}^2$  时,反应流体出口温度分别为 581、692、810、922 K,且不同辐射强度之间,反应流体出口温度与太阳辐射强度近似成正比关系,整体上入口 2 和出口的温度变化规律非常相似,区别仅在于入口 2 的温度略高于出口温度,有利于提高高温化学反应的速度(反应流体在进入多孔反应区时,温度已达到反应所需温度,可直接进行反应)。入口速度大小直接影响反应器内部流场,进而影响整个传热过程。如图 10 所示,反应流体入口 2 和出口温度均随着入口速度的增加而降低,最主要的原因是反应流体速度的增加直接减少了反应器加热流体的时间,增加了被加热反应流体的质量流量。当入口速度小于 0.1  $\text{m}/\text{s}$  时,入口速度的变化对出口温度和入口 2 的温度影响很大,仅仅 0.05  $\text{m}/\text{s}$  的速度差,导致出口温差达 225 K;当入口速度大于 0.1  $\text{m}/\text{s}$  时,入口速度的变化对出口温度的影响比较小,0.4  $\text{m}/\text{s}$  的速度差,导致出口温差仅为 24 K。

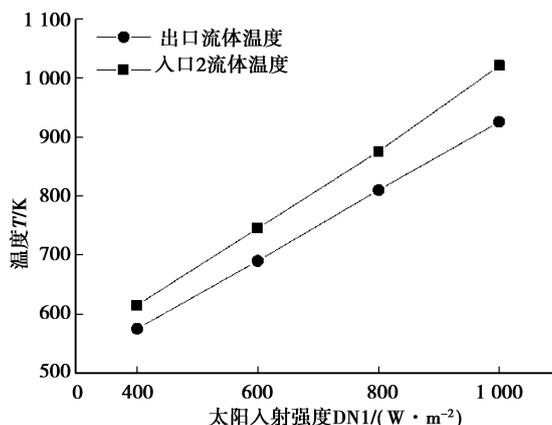


图 9 不同辐射强度条件入口 2 和出口的温度变化

Fig.9 Variation of inlet 2 and outlet temperature with the radiation intensity

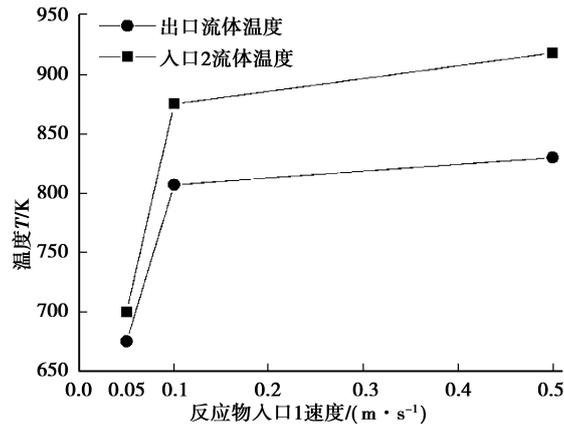


图 10 不同入口速度条件入口 2 和出口的温度变化

Fig.10 Variation of inlet 2 and outlet temperature with the inlet speed

高温反应器能够满足常规高温化学反应的温度条件,可依据太阳辐射强度的大小调节入口速度,满足高温吸热化学反应的需求。

## 4 结 论

基于抛物面碟式太阳能接收器的高温反应器主要面向某些高温化学反应。构建了一种带有预热功能的高温反应器,建立三维数学模型研究其热传递特性。

1)高温反应器焦平面上热通量分布不均匀,由中心向外扩展逐渐减少,在太阳辐射强度为  $800 \text{ W/m}^2$  时,最大热通量值高达  $1.18\text{e}6 \text{ W/m}^2$ ,平均值约大于  $4.5\text{e}5 \text{ W/m}^2$ 。

2)在典型运行条件下,高温反应器入口 2 的温度高达  $880 \text{ K}$ ,略高于反应器出口温度  $810 \text{ K}$ 。整个反应器壁面温差较大,易造成高温变形。

3)反应流体出口温度随着辐射强度的增加而增加,随着入口速度的增加而减少。入口 2 和出口的反应流体温度随时间的变化规律非常相似,区别仅在于入口 2 的温度略高于出口温度。

### 参考文献:

- [ 1 ] 罗运俊,何梓年,王长贵.太阳能利用技术[M].北京:化学工业出版社,2011.  
LUO Yunjun, HE Zinian, WANG Changgui. Solar energy utilization technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [ 2 ] Jeter S M. The distribution of concentrated solar radiation in parabola ideal collectors[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1986, 108: 219-225.
- [ 3 ] Stephane A, Gilles F. Solar hydrogen production from the thermal splitting of methane in a high temperature solar chemical reactor[J]. Solar Energy, 2006, 80(10): 1321-1332.
- [ 4 ] 彭可武,吴文远,徐玉,等. B<sub>4</sub>C 和 Al 在高温条件下的化学反应[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(1): 16-19.  
PENG Kewu, WU Wenyuan, XU yu, et al. Chemical reactions of B<sub>4</sub>C and Al under high temperature conditions[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36 (1): 16-19. (in Chinese)
- [ 5 ] Sendhil K N, Reddy K S, Kumar N, et al. Comparison of receivers for solar dish collector system[J]. Energy Convers Manage, 2008, 49: 812-819.
- [ 6 ] Xiao X, Zhang P, Shao D D, et al. Experimental and numerical heat transfer analysis of a V-cavity absorber for linear parabolic trough solar collector[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 49-59.
- [ 7 ] Odeh S D, Morrison G L, Behnia M. Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors[J]. Solar

- Energy, 1998,62:395-406.
- [ 8 ] Reddy K S, Sendhil N. Combined laminar natural convection and surface radiation heat transfer in a modified cavity receiver of solar parabolic dish[J].International Journal of Thermal Sciences,2008,47(12):1647-1657.
- [ 9 ] Heinzel V, Kungle H, Simon M. Simulation of a parabolic trough collector[J]. ISES Solar World Congress, Harare, Zimbabwe, 1-10,1995.
- [10] Samareh B, Yagoubi M. Two dimensional numerical simulation of the turbulent wind flow around a large parabolic solar collector[M]. Korea: Proceedings of Apewevi, 151, 2005.
- [11] Cheng Z D, He Y L, Xiao J, et al. There-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer ,2010,37:782-787.

## 附 录

|                       |                                    |
|-----------------------|------------------------------------|
| $\omega$ 角频率, rad/s   | $\tau$ 黏性应力张量, Pa                  |
| $t$ 时间, s             | $F$ 体积力向量, $N/m^3$                 |
| $q_0$ 射线位置矢量, m       | $C_p$ 在定压比热, $J/(kg \cdot K)$      |
| $c$ 真空中光速, m/s        | $T$ 绝对温度, K                        |
| $n$ 无量纲折射率            | $q$ 热通量矢量, $W/m^2$                 |
| $i$ 射线数(1,2,3...N)    | $\epsilon_p$ 无量纲孔隙率, (0~1)         |
| $k$ 射线波矢量, rad/m      | $K$ 渗透率                            |
| $Q$ 热量, W             | $\beta_F$ Forchheimer 系数, $kg/m^4$ |
| RSH 射线热源              | $T$ 绝对温度, K                        |
| $\rho$ 乙醇密度, $Kg/m^3$ | $q$ 热通量矢量, $w/m^2$                 |
| $u$ 速度矢量, m/s         | $Q_{br}$ 质量源项                      |

(编辑 陈移峰)