Development of Energy Science
Volume 6, 2018, PP. 1-8

Study on Optical Performance of Solar Air Compressor

Wang Lu, Zhongxian Yuan †

Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China

†Email: zxyuan@bjut.edu.cn

Abstract

The optical performance of the solar thermal power device has an important influence on its total working efficiency. In this paper, the Monte Carlo ray trace method is used to simulate the optical performance of the designed solar air compressor system. In order to analyze the energy density distribution on the receiver and the optical efficiency of the solar air compressor, the geometrical model of the main optical components including the point-focusing Fresnel lens, quartz glass window, and heating pipe have been built using Tracepro software. The results show that the energy density distribution on the interior surfaces of the heating pipe is extremely non-uniform. What's more, when the length of the heat absorption tube is increased, the diameter of the light hole is reduced, and the absorption rate of the heat pipe inner surface is increased, the optical efficiency of the system and the light-to-heat conversion performance will be improved.

Keywords: Optical Performance; Monte Carlo; Air Compressor; Heating Pipe

太阳能空气压缩机的光学性能研究*

王璐，苑中显

北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室，北京 100124

摘 要：太阳能热动力装置的光学性能对其整体工作效率有重要影响。采用蒙特卡洛光线追迹方法对所设计的太阳能空气压缩机系统的光学性能展开了模拟研究，利用 Tracepro 软件对点聚焦菲涅尔透镜、石英玻璃窗和吸热管等主要光学部件进行建模，以分析吸热表面的能量密度和太阳能空气压缩机的光学效率。模拟结果表明，吸热管内表面的能量分布是极不均匀的，且吸热管越长、通光孔直径越小、吸热管的内表面吸收率越高，系统的光学效率就越高，光热转化性能越好。

关键词：光学性能；蒙特卡洛；空气压缩机；吸热管

引言

作为世界上最丰富的可再生能源，太阳能已被广泛应用于发电、制冷、烹饪、海水淡化等领域[1-4]。在太阳能热利用过程中，其聚光系统的光学性能表征着将太阳辐射能转化为热能的能力，因此对太阳能热利用的效率起着至关重要的作用，主要体现在系统的光学效率与接收器内表面能量密度分布这两个方面[5]。蒙特卡洛光线追踪方法广泛应用于太阳能领域来研究太阳光线的吸收过程及光能密度，Shuai 等人[6]利用蒙特卡洛光线追踪方法预测了碟形太阳聚光器腔体接收系统的辐射性能，基于等效辐射通量的概念，针对焦点通量方向属性，提出了一种倒置梨形腔接收器。Villafán-Vidales 等人[7]利用蒙特卡洛光线追踪方法模拟了太阳能热化学反应器中的辐射传热，用于进行氧化铈的热还原。Riveros-Rosas 等人[8]基于光线追踪模拟技术，设计了一种新的高辐射通量的太阳能炉，聚光峰值可达到 10000 suns。Lin 等人[9]利用蒙特卡洛光线追踪方法预测了菲涅耳透镜集热器的光学特性，从而得到了集热器内表面辐射分布以及入射角对光学性能的影响，发现

*基金资助：国家 973 项目（No. 2015CB251303）

三角腔接收器具有 81.2%的最高光学效率。

本文针对已经建立的太阳能空气压缩机实验系统，采用蒙特卡洛光线追踪方法，利用 Tracpro 光学模拟软件对太阳能空压机中光热转换的核心部件—吸热管展开模拟研究，以进一步优化系统的光学性能，提升压缩机的工作效率。

1 太阳能空气压缩机实验系统

图 1 为太阳能空气压缩机实验系统示意图，该装置主要包括菲涅尔透镜、石英玻璃窗、吸热管、冷却盘管、冷却水箱和循环水泵。菲涅尔透镜的材质为聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA），由于它体积小、质量轻，有良好的光学性能，因此以它作为本系统的太阳能接收装置。

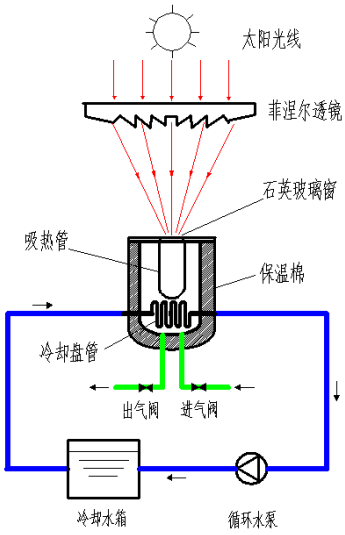
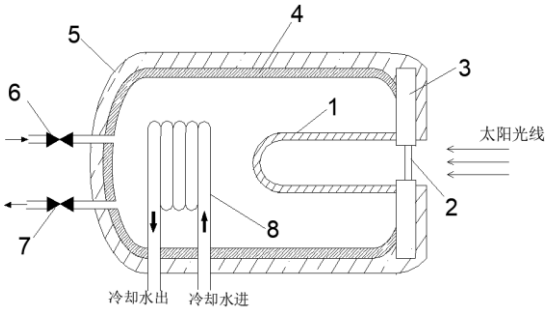


图 1 太阳能空气压缩机实验系统示意图



1-吸热管；2-石英玻璃窗；3-法兰；4-压力容器壁；5-保温棉；6-进气阀门；7 出气阀门；8-冷却盘管

图 2 压缩空气罐结构示意图

压缩空气罐的结构如图 2 所示，太阳光线经过菲涅尔透镜聚焦后，穿过入光窗口到达吸热管内壁面，在吸热管内多次反射和吸收转化为热能，使吸热管温度持续升高。吸热管右端开口，左端封闭，底部为凸球体形，这样能更好的接收太阳辐射。入光窗口为耐高温的石英玻璃，石英玻璃不但在可见光波长下有很高的透射率，而且能有效减少吸热管与环境间的对流换热损失[10]。空气在密闭压力容器内与吸热管进行对流换热，压力和温度升高到设定值后，打开放气阀门放出高温高压空气，当容器内空气压力下降到当地大气压力时关闭放气阀门，然后打开循环水泵开关，冷却盘管内通入冷却水对残留空气进行冷却。当罐内空气冷却至一定负压后，打开进气阀门，装置吸入环境空气，直至罐内空气压力上升到环境压力时关闭进气阀门，开始下一

轮加热。如此反复操作，制取所需要的压缩空气。

2 光学模拟与结果分析

对于所有太阳能热动力装置，其光学性能直接影响着系统的热力学性能，进而影响着系统的热机效率。太阳能空气压缩机的光学模拟利用 Tracepro 软件完成，该软件采用蒙特卡洛方法对光线进行追踪[11]。蒙特卡罗方法通过取样大量随机路径的光线来模拟太阳光及其与吸热管发生的反射、吸收等相互作用。一般认为进入菲涅尔透镜的太阳光线由大量平行的光束组成，每条光线携带的能量和发射方向为确定的，某一光束与系统内表面的吸收、反射或折射是随机的，若光束被漫反射表面反射其反射方向亦随机。在计算中，跟踪记录每一束光的行为，直到它被吸收或者逸出系统，然后再跟踪下一束光线，跟踪大量的光束，统计接收面上各区域光线数目，得到接收面上辐射能量密度的分布。

利用 Tracepro 软件可以建立实验系统实体模型，设定物体的材料属性或表面性能等。图 3 为使用 Tracepro 建立的太阳能空压机聚光系统的模型，主要包括点聚焦菲涅尔透镜，石英玻璃窗，圆柱腔体型吸热管。菲涅尔透镜面积为 0.81 ㎡，焦距 890mm，环距为 0.5mm，实测焦斑直径 42mm。吸热管材质为碳钢，直径为 80mm。为保证较好的光线吸收率，通光孔直径一般小于吸热管直径。

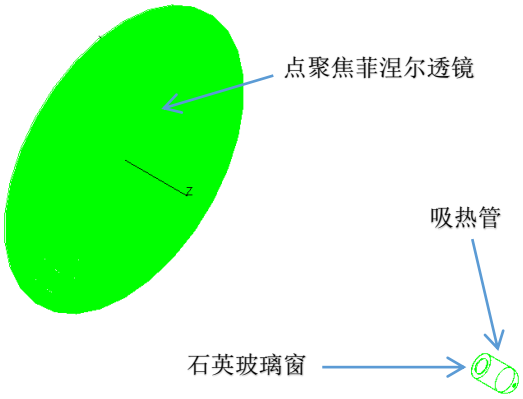
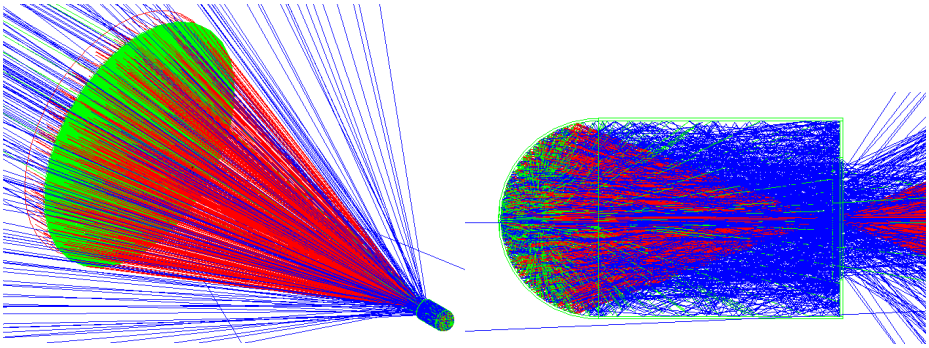


图 3 菲涅尔透镜与吸热管的相对位置图



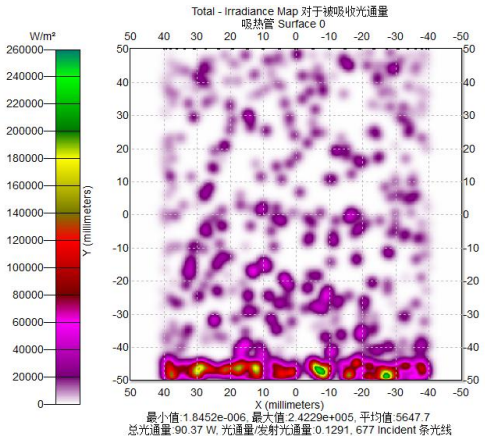
（a）透镜到吸热管之间的光线分布　　（b） 吸热管内部光线分布

图 4 太阳能空压机聚光系统光线追迹图

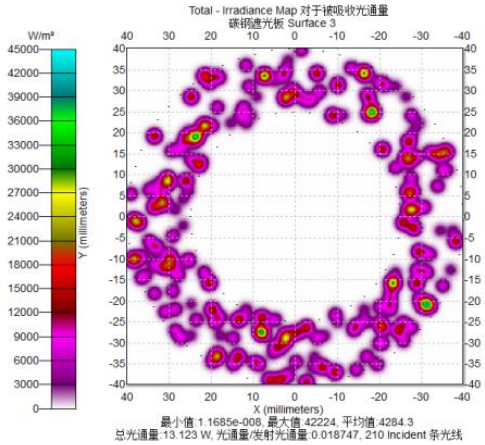
在光线追迹过程中，我们假定菲涅尔透镜的参数不变，其透射率为 0.9，石英玻璃透光率为 0.9，不考虑跟踪误差。太阳辐照度为 860W/㎡，追迹的光线数目为 700 条，当吸热管长度为 100mm，内壁面吸收率为 0.5，通光孔直径为 50mm 时，太阳能空压机系统的光线追迹图如图 4 所示。图中红色代表入射光线，绿色和蓝色表示反射光线。从图 4 中可以看出，太阳光线经菲涅尔透镜聚焦后，穿过石英玻璃，在吸热管内不断反

射和吸收，最后部分未被吸收的光线穿过石英玻璃返回到外界。

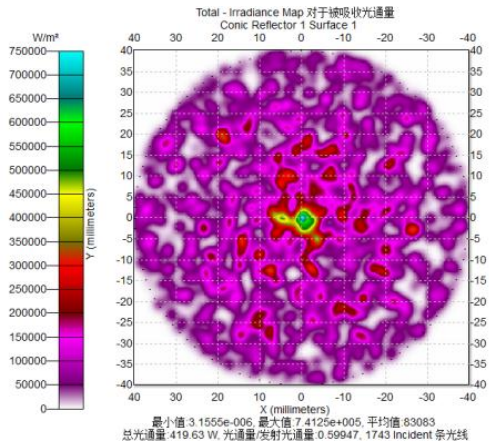
接下来，我们分析了不同长度的吸热管内表面辐射能量密度，由于 Tracepro 只能展示模型的平面能量分布，我们将吸热管的能量分布划分为圆柱内表面、凸球体内表面及法兰内表面三个部分，具体见图 5~7。



（a）圆柱内表面能量分布

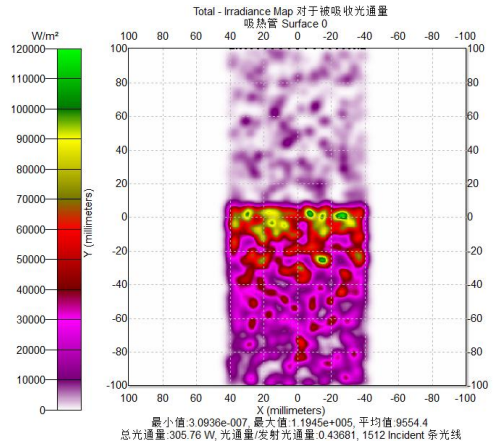


(b)凸球体内表面能量分布

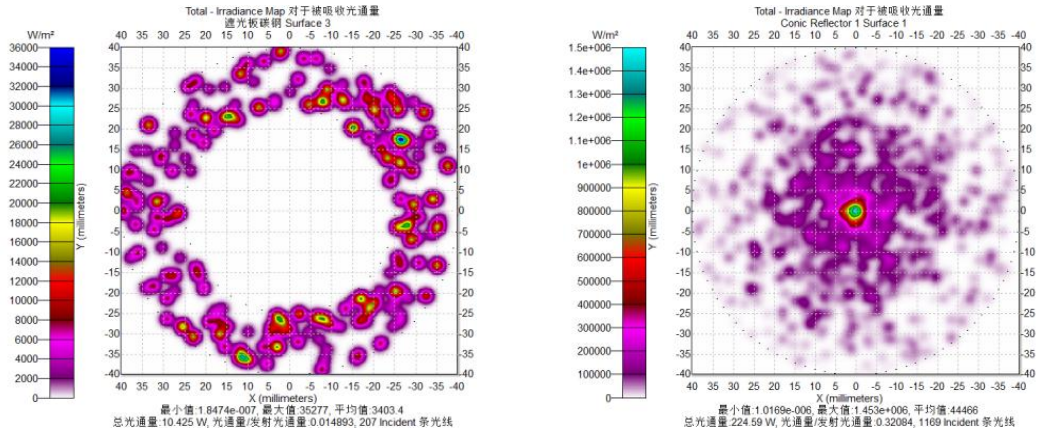


(c)法兰内表面能量分布

图 5 吸热管长为 100mm 时各部分能量分布图

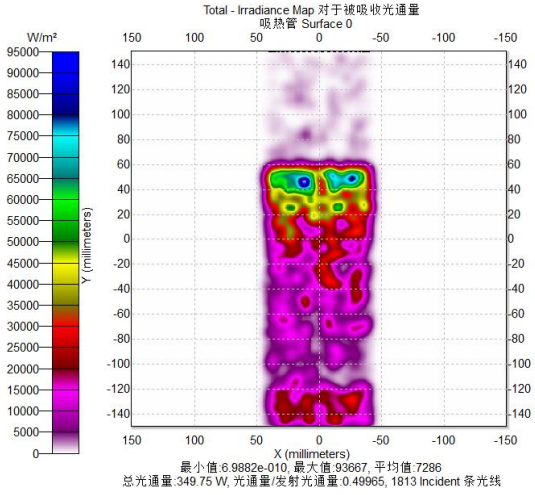


（a）圆柱内表面能量分布

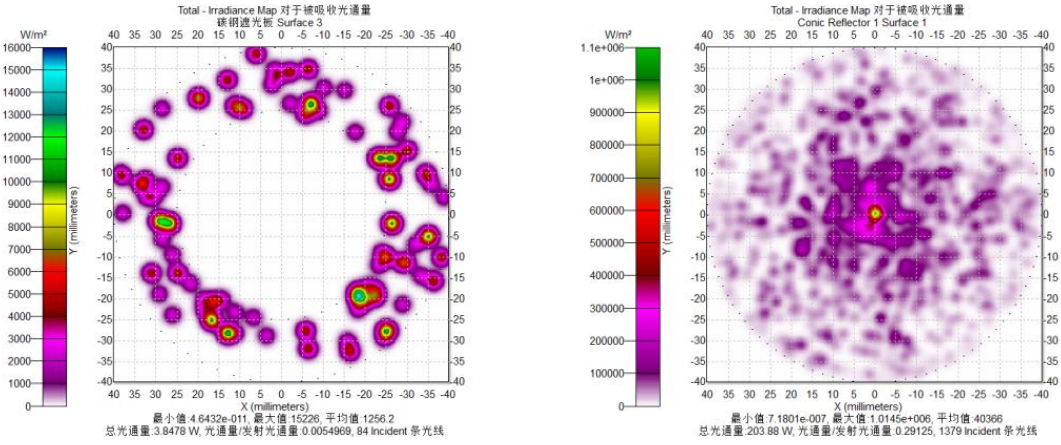


(b) 凸球体内表面能量分布　　(c) 法兰内表面能量分布

图 6 吸热管长为 200mm 时各部分能量分布图



（a）圆柱内表面能量分布



(b) 凸球体内表面能量分布　　(c) 法兰内表面能量分布

图 7 吸热管长为 300mm 时各部分能量分布图

从图 5~图 7 中我们可以看出，吸热管内表面的能量分布是极不均匀的。图 5 中，当吸热管长度为 100mm 时，高能量密度区域集中在吸热管底部，即-45mm 至-50mm 处绿色和黄色分布较多，热流密度最高为 93kW/

㎡。但是，当吸热管加长之后，吸热管距离通光孔 100mm 左右处的能量密度最高，而小于 100mm 以内的吸热管接收的辐射能极少，如图 6 和图 7 中所示。这是由于太阳光线经菲涅尔透镜聚焦后，进入吸热管时有一定的入射角造成的。局部热流密度过高会产生“热点”问题，降低吸热管的使用寿命，因此以后需对吸热管结构进行优化以使内表面辐射能量分布更加均匀。此外，光线进入吸热管内不断反射，最后汇聚于热管底部中心点，因此凸球体的中心处能量密度最高，而且热管顶部法兰内表面越靠近内圈的能流密度越高。

Tracepro 软件在进行光线追迹时，可自动计算各吸收表面上的光通量，为评价系统的光学性能，我们定义压缩机聚光系统的光学效率为：

$$\eta_0 = \frac{Q_{ab}}{\eta_1 \eta_2 I_b A_f} \tag{1}$$

上式中 Q_{ab} 为吸热管内表面吸收的辐射能，W；η_1 为菲涅尔透镜透光率；η_2 为石英玻璃透光率；I_b 为太阳直射辐射强度，W/㎡；A_f 为菲涅尔透镜面积，㎡。表 1 为不同吸热管长度下的系统吸收的总辐射能与光学效率。从表中我们可以看出，较长的吸热管有较高的辐射吸收量和较高的光学效率。这是因为吸热管越长，光线在管内反射的次数越多，也就有更多的太阳辐射能被吸收转化为热能。

表 1 不同吸热管长度下太阳能空气压缩机的光学性能

吸热管长度 / 光学性能	100mm	200mm	300mm
辐射吸收量	523.15W	540.62W	557.48W
光学效率	60.83%	62.86%	64.82%

通光孔直径对系统的光学效率有一定影响，当吸热管内表面吸收率为 0.5 时，系统的光学效率随通光孔直径变化见图 8。从图中可以看出，随通光孔直径的增大，光学效率逐渐下降，并且吸热管越短，光学效率下降幅度越大。这是因为通光孔面积越大，从吸热管内反射出去的光线越多。但是，通光孔面积相对于双轴跟踪系统的精度有一定要求，一般不能太小。

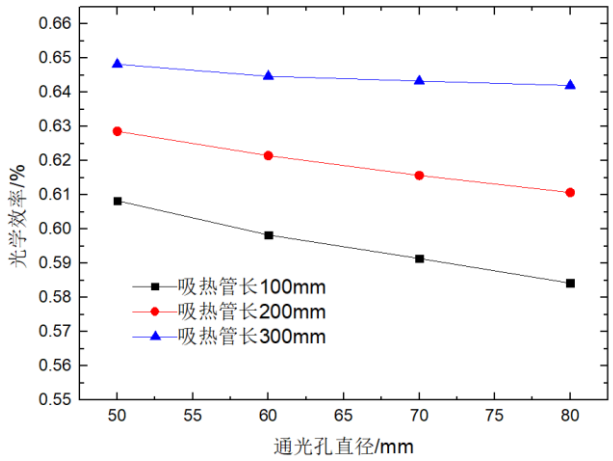


图 8 不同通光孔直径下系统的光学效率

此外，吸热管内壁面的吸收率对系统的光学效率有重要影响。如图 9 所示，随着吸热管内表面吸收率的提升，系统的光学效率也显著升高，但上升幅度逐渐减小。例如，当吸热管长为 200mm，内表面吸收率为 0.5 时，系统光学效率为 62.86%，而当吸热管的内表面吸收率为 0.9 时，系统光学效率可达到 67.70%。因此，

我们有必要在吸热管内表面喷涂选择性吸收涂层，以提升系统的光热转化性能，使其将更多的太阳能转化为热能。

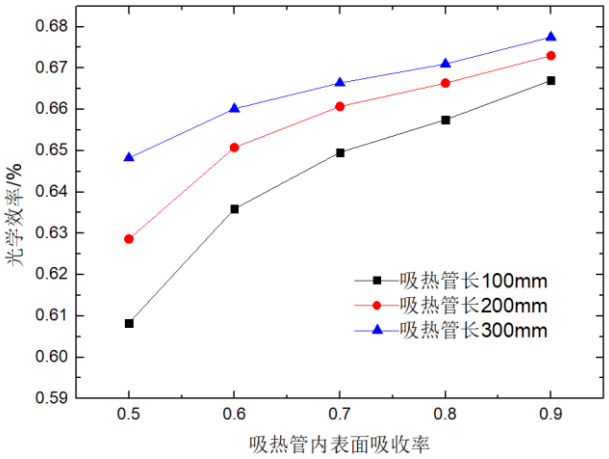


图 9. 不同吸热管内表面吸收率对系统光学效率的影响

3 结论

利用 Tracepro 软件对太阳能空气压缩机系统的光学性能展开了模拟研究，可得出以下结论：在吸热管进行光热转换的过程中，其内表面的能量分布是极不均匀的，由于经聚焦的太阳光线穿过通光孔时有一定的入射角，因此离通光孔 100mm 处的能量密度最大；吸热管越长，太阳光线在内表面反射次数越多，因而吸收的辐射能越多，光学效率越高；通光孔直径越小，系统光学效率越高，不过小孔径入光窗口对跟踪系统的精度有一定要求；吸热管内表面的吸收率对系统光学效率有显著影响，在以后的研究中，有必要在吸热管内表面喷涂选择性吸收涂层以提升系统的光热转化效率。

REFERENCES

[1] Wu S Y, Xiao L, Cao Y, et al. A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation[J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 452-462.

[2] Du S W, Li X H, Yuan Z X, et al. Performance of solar adsorption refrigeration in system of SAPO-34 and ZSM-5 zeolite[J]. Solar Energy, 2016, 138: 98-104.

[3] Lecuona A, Nogueira J I, Ventas R, et al. Solar cooker of the portable parabolic type incorporating heat storage based on PCM[J]. Applied energy, 2013, 111: 1136-1146.

[4] Al-harahsheh M, Abu-Arabi M, Mousa H, et al. Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 1030-1040.

[5] Wang H J, Liu S, Kang L, et al. Simulation Study on Optical Performance of Cavity Receiver in Solar Power Tower System[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2017.

[6] Shuai Y, Xia X L, Tan H P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems[J]. Solar Energy, 2008, 82(1): 13-21.

[7] Villafán-Vidales H I, Arancibia-Bulnes C A, Dehesa-Carrasco U, et al. Monte Carlo radiative transfer simulation of a cavity solar reactor for the reduction of cerium oxide[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(1): 115-124.

[8] Riveros-Rosas D, Herrera-Vázquez J, Pérez-Rábago C A, et al. Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico[J]. Solar Energy, 2010, 84(5): 792-800.

[9] Lin M, Sumathy K, Dai Y J, et al. Performance investigation on a linear Fresnel lens solar collector using cavity receiver[J]. Solar Energy, 2014, 107: 50-62.

[10] Buck R, Brauning T, Denk T, et al. Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems (REFOS)[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(1): 2-9.

[11] TracePro 5.0. Users' manual 5.0; 2009.

【作者简介】



[1] 王璐（1993-），男，汉族，硕士研究生，主要从事太阳能热应用的研究。Email: 925719875@qq.com。

[2] 苑中显（1962-），男，汉族，博士，教授，主要从事强化传热理论及其应用，CFD 与计算传热学，太阳能热利用技术等。Email: zxyuan@bjut.edu.cn。