

积尘对槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的影响及聚光优化

闫素英^{1,2}, 常 征¹, 王 峰^{1*}, 田 瑞^{1,2}

¹内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

²风能太阳能利用技术省部共建教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要 为研究灰尘对槽式太阳能聚光器光学效率和金属管能流分布的影响,从理论上分析了积尘对聚光器光学效率的影响,对槽式太阳能聚光镜积尘工况进行了模拟,应用蒙特卡罗光线追迹法和有限元体积对抛物槽式集热系统传热进行了分析,得到了金属管周向温差(CTD)和能流密度分布。结果表明,积尘对反射光线方向和金属管壁面能流影响较大,由积尘改变壁面能流密度的分布对 CTD 有一定影响。针对 CTD 对抛物槽式集热系统的影响,提出了在常规抛物槽式集热器基础上添加一个二次均光反射镜的方法,二次反射镜的添加使金属管周向能流分布趋于均匀,并使金属管的 CTD 显著降低,减小了积尘工况对聚光集热系统的影响,这一方法为抛物槽式太阳能聚光系统的优化提供了参考。

关键词 光学设计; 积尘; 聚光特性; 二次均光反射镜; 槽式聚光; 能流密度分布

中图分类号 TK513.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0722002

Effect of Dust Accumulation on Focal Energy Flux Density Distribution of Trough Solar Concentrator and Concentration Optimization

Yan Suying^{1,2}, Chang Zheng¹, Wang Feng¹, Tian Rui^{1,2}

¹ College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

² Key Laboratory of Wind and Solar Power Energy Utilization Technology Ministry of Education and Inner Mongolia Construction, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China

Abstract In order to study the effect of dust on the optical efficiency of solar concentrator and the distribution of energy flow in metal tube, the influence of dust on the optical efficiency of the condenser is analyzed theoretically and the dusting conditions of the trough solar concentrator are simulated. Moreover, by analyzing the heat transfer of the parabolic trough collector system using the Monte Carlo ray tracing method and the finite element volume method, the energy flux density and circumferential temperature distribution (CTD) are generated. The results show that the accumulated dust has significant effect on the direction of reflected light and the energy flux density of the metal tube wall surface, and the distribution of the flow density of the wall by the dust has certain influence on CTD. According to the influence of CTD on the parabolic trough collector system, a new method is put forward that a secondary homogeneous reflector is added based on traditional parabolic trough collector system. The addition of the secondary reflector makes the energy flux distribution of the metal tube tend to be uniform and CTD of the metal tube of the new parabolic trough collector system reduce significantly, thus reducing the dust accumulated effect on the spot solar collector system. This method provides some reference for the optimization of parabolic trough solar concentrating systems.

收稿日期: 2017-02-27; 收到修改稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51464011)、内蒙古自然科学基金(2015MS0542)、2016 内蒙古科技计划

作者简介: 闫素英(1972—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事太阳能光伏光热利用技术方面的研究。

E-mail: yan_su_ying@aliyun.com

* 通信联系人。E-mail: wangfeng@imut.edu.cn

Key words optical design; dust accumulation; concentration characteristics; secondary homogeneous reflector; trough concentration; energy flux density distribution

OCIS codes 220.4298; 350.6050; 080.2740; 260.2160

1 引 言

太阳能光热利用过程是一个非常繁琐的光线聚焦、热量传递、耦合换热的过程。抛物槽式太阳能集热器是槽式聚光集热系统的关键部件,由于槽式集热器长期放置在户外,空气中的灰尘很容易沉降到聚光镜面上,为分析积尘对太阳能集热性能的影响,刘继者^[1]在平板太阳能集热器表面沉积了一定量灰尘后,通过实验测试了热管平板式热水器的效率,积尘后集热器效率由原来的 37.3% 下降为 31.9%。刘刚等^[2]通过实验研究了平板太阳能集热器表面积灰对系统热性能的影响,得出在相同条件下,太阳能热水系统日有用得热量降低 3.95%,升温性能降低 3.19%~5.31%,系统日集热效率降低 4.05%。冯志康等^[3]对太阳能槽式系统接收器光学效率的特性进行了研究,结果显示聚光反射镜面偏转误差对接收器光学效率的影响较大。同时,Lei 等^[4-5]对抛物槽式集热系统的全玻璃真空金属管进行了研究,结果表明,金属管的周向温差(CTD)过大可能导致金属管发生偏转,使其偏离抛物槽式聚焦线位置,从而增大了光学损失,过高的 CTD 甚至造成玻璃管破裂、金属管表面选择性涂层趋于劣化,对槽式聚光集热性能带来巨大的影响。太阳能聚光系统接收面能流密度的均匀性对系统的性能及转换效率有着重要影响^[6],Aldali 等^[7-8]提出在金属管内插螺旋翅片,以增强金属管壁面与传热流体之间的对流换热,获得金属管壁面均匀化热流分布。Massidda 等^[9]提出增加金属管壁面粗糙度的方法,降低金属管最大壁温和温度梯度。Wang 等^[10]研究了在金属管内插入增强热传递的金属泡沫,金属管的 CTD 得到降低。Flores 等^[11]研究了以铜-钢合金金属吸收管替代传统金属吸收管,铜的高导热特性减少了由 CTD 引起的金属管挠曲度。许成木等^[12]提出了计算槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的一种新方法,该计算方法函数关系简单明确,可为槽式太阳能聚光系统的优化设计提供参考。颜健等^[13]基于槽式太阳能聚光集热系统的几何对称特性,提出一种运动累加方法来计算吸热器的能流密度分布,该模型可以将光线跟踪过程转换为旋转运动或平移运动,避免了大量求解光线与吸热器曲面的联立方程组。会聚太阳光使得集热器能流分布不均,导致局部受热过高,在浪费太阳能能量的同时也降低了太阳能光热/光电的转换效率,而均匀分布的能流密度可提高转换效率^[14-16]。

上述学者研究了积尘对太阳能聚光集热系统性能的影响,并在一定程度上降低了非均匀能流密度对槽式太阳能聚光集热性能的影响。本文在前人研究的基础上,应用基于蒙特卡罗原理的 TracePro 软件,从积尘厚度角度研究聚光器在不同积尘厚度下金属管表面的能流分布,同时提出在常规槽式太阳能集热器基础上添加一个二次均光反射镜,为减小积尘引起的光学损失和降低金属管壁面周向温差提供参考。

2 积尘对聚光器能流分布的影响

2.1 聚光器积尘

针对积尘对槽式太阳能聚光器效率和能流分布的影响,主要研究了灰尘粒径对金属管壁能流分布的影响,并引入灰尘粒径分散度,它是指灰尘颗粒大小的分散程度,又可称为粒径分布,一般用百分比表示。显微镜下灰尘的排布情况如图 1 所示,灰尘微粒大小通常以粒径表示,粒径就是颗粒的直径。通常来说,直径是描述一个几何体大小最简单的量,于是引入等效粒径的概念,等效粒径是指当一个颗粒某一物理特性与同质球形颗粒相同或相近时,可用该球形颗粒的直径来代表此时颗粒的直径。

灰尘粒径主要考虑到积尘引起的遮挡效果,采用等效投影面积径较为合适。模拟实际问题可适当作出简化,即假设积尘均匀分布。图 2(a)为聚光镜实际积尘分布图,可看到自然积尘分布情况,为下面积尘状况下聚光镜光学模拟提供一定的理论依据。图 2(b)为灰尘平面布置图,假设等效粒径灰尘的等效投影面积半径分别为 a 和 b ($a < b$),则两种情况下间隙面积分别为 $0.86a^2$ 、 $0.86b^2$ 。积尘均匀排布时,大粒径灰尘对聚光镜面的遮挡相对于小粒径灰尘来说要小,聚光镜面上灰尘粒径分布对太阳光线反射、透射率存在影响。

依据积尘对槽式太阳能聚光器光学性能影响的理论研究,将灰尘颗粒简化为六面体,其物性为 SiO_2 ,灰尘等效粒径为 1 mm。在 Solidworks 软件中建立积尘状况下抛物槽式聚光镜的三维模型,将该三维模型导

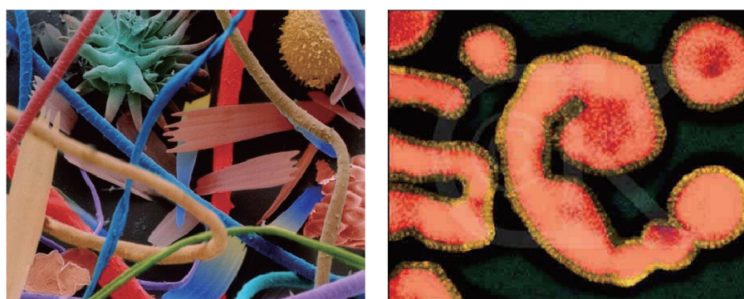


图 1 显微镜下灰尘的形态

Fig. 1 Dust under the microscope

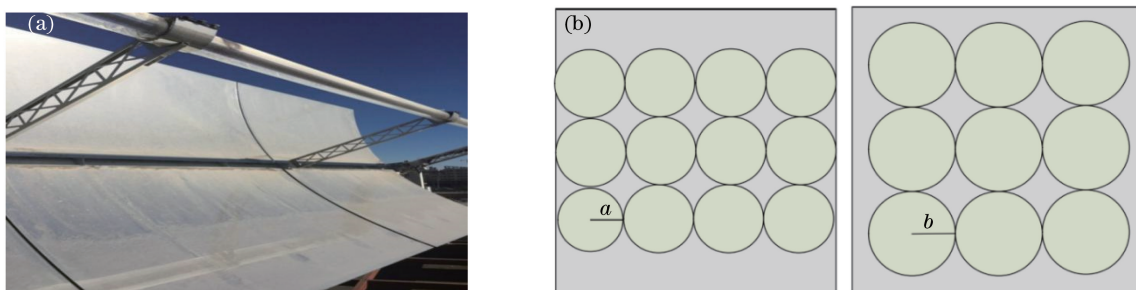


图 2 积尘平面布置图。(a)实际积尘分布;(b)模拟积尘分布

Fig. 2 Plane layout photograph of dust accumulation. (a) Actual dust accumulation distribution;
(b) simulated dust accumulation distribution

入 TracePro 软件中进行模拟,几何模型主要参数如表 1 所示。由于入射太阳光具有 4.65 mrad 的张角,将光束的角密度分布设置为日照分布。光源模型采用格点光源,格点定向为方向向量原点,法线向量设置为垂直聚光器入射方向,辐射能流密度为 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,以聚光器正前方 2000 mm 处设定一个虚拟发射面作为光源,该光源特点为:矩形、发射均匀足够多光线、光源发射面和聚光器大小相同。光线追迹设置为栅格化光线追迹模式,利用蒙特卡罗法追迹所有被聚光镜反射和金属管吸收的光线,直到光线溢出聚光系统或被完全吸收,然后再跟踪下一束光线,通过光线筛选功能,将总光线数设置为 1×10^5 条。

表 1 槽式聚光系统模型的主要参数

Table 1 Main parameters of the model of trough concentrating system

Condenser parameter	Value	Absorber parameter	Value	Optical property	Value
Aperture width / m	5.000	Glass tube outside / m	0.115	Reflectivity	0.930
Focal length / m	1.840	Metal tube outside / m	0.110	Transmissivity of glass	0.950
Length / m	7.800	Metal tube inside / m	0.070	Absorptivity of metal tube	0.960

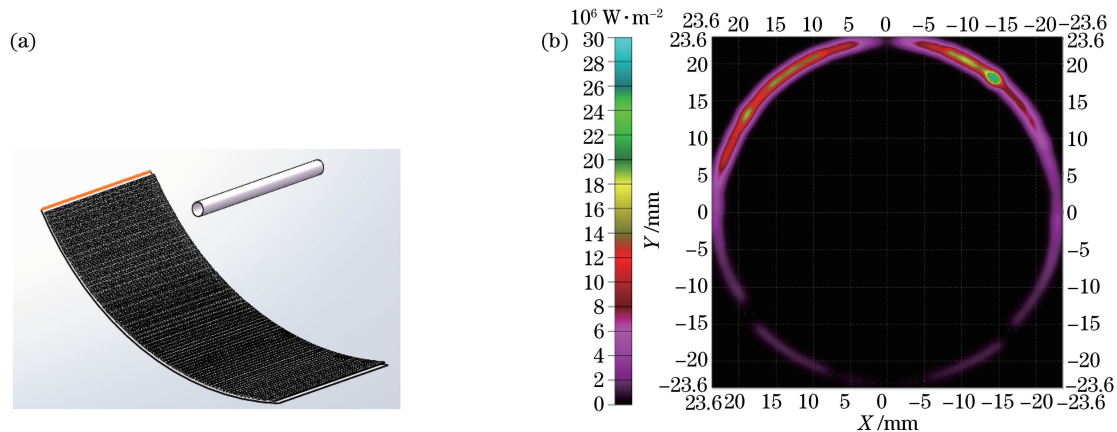


图 3 (a)聚光器三维模型;(b)金属管周向能流分布

Fig. 3 (a) Three-dimensional model of the concentrator; (b) circumferential energy flux distribution of the metal tube

图 3(a)为建立的槽式太阳能聚光镜积尘状况下的三维模型,图 3(b)为聚光镜积尘工况下,金属管壁面沿周向热流分布情况,其中出现的峰值是由于灰尘之间的重叠作用引起光线的点聚集。为便于观察积尘对金属管壁面能流密度的影响,将聚光镜沿中线切分为半积尘状态,一侧布尘,另外一侧清洁。图 4(a)为聚光镜半侧积尘时金属管接收反射光线追迹图,图 4(b)为聚光镜全部积尘时金属管接收反射光线追迹图。从图 4 中可看出积尘侧的反射光线较未积尘侧损失大,为有效减少积尘带来的不利影响,可对常规槽式聚光集热系统作出形状优化设计。

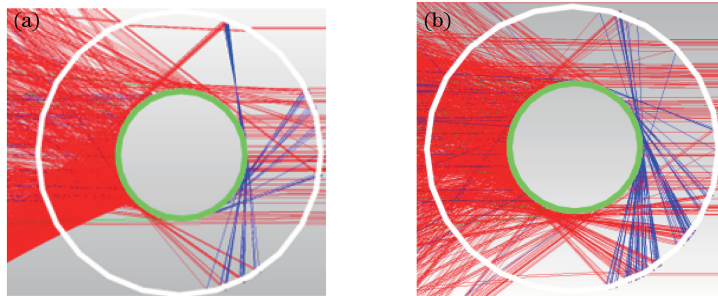


图 4 金属管光路图。(a)半积尘光路;(b)全积尘光路

Fig. 4 Optical path of the metal tube. (a) Half dust accumulation optical path; (b) full dust accumulation optical path

图 5 为聚光镜全积尘、半侧积尘及未积尘三种工况下,金属管壁面沿圆周方向能流值,对比半侧积尘和全积尘能流密度变化规律可知,积尘对其峰值影响较为显著,在未积尘工况时其峰值约为 $50000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而在全积尘工况时其峰值约为 $12000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,其原因是灰尘自身吸收一部分入射光线及其改变了反射光线的路径引起的。同时,在半侧积尘和全积尘工况下,由积尘引起的能流值变化规律基本一致,呈先升高后降低的趋势。对比三种工况下金属管壁面能流密度大小及变化,可知积尘对其大小及分布的影响。

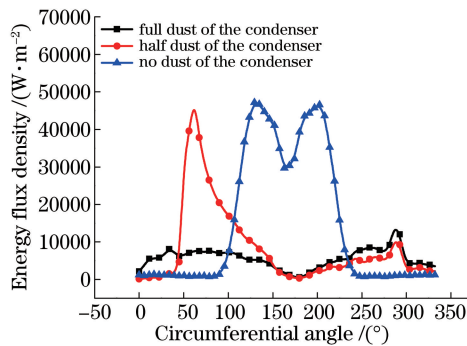


图 5 金属管壁面圆周方向能流分布

Fig. 5 Circumferential energy flux distribution of the metal tube wall

2.2 积尘厚度对金属管能流密度的影响

为研究积尘厚度对金属管能流密度分布的影响,对积尘厚度分别为 3, 2, 1 mm 的三种积尘工况下的金属管能流分布进行了分析,结果如图 6 所示,图中 h 表示积尘厚度。从图中可看出积尘厚度为 2 mm 和 3 mm 时,能流密度分布趋势及大小基本相同,在积尘厚度为 1 mm 时,由于灰尘越稀薄对反射光线路径影响的程度越大,因此引起能流密度值波动较大。

3 聚光器优化

3.1 聚光优化设计

通过上述在非均匀能流密度下对常规槽式太阳能聚光器的性能分析,接下来将一个二次均光反射镜应用在槽式聚光系统中,使金属管壁面能流密度趋于均匀,同时添加二次均光反射镜能在一定程度上减少由积尘引起的光学损失。该二次均光反射镜的主要参数如表 2 所示。

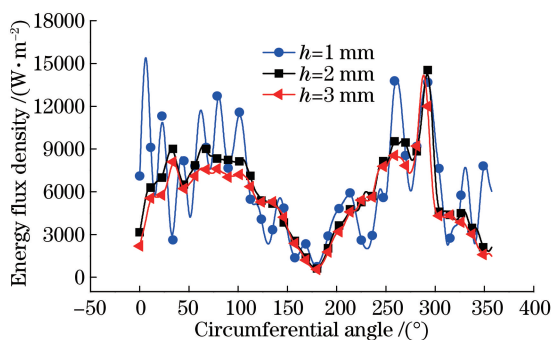


图 6 不同积尘厚度下金属管壁面周向能流分布

Fig. 6 Energy flux distribution of the circumferential metal tube with different dust accumulation thicknesses

表 2 二次反射镜的主要参数

Table 2 Main parameters of the secondary reflector

Secondary reflector parameter	Value	Optical property	Value
Aperture width /m	0.400	Reflectivity	0.960
Focal length /m	0.130	Transmissivity	0.001
Length /m	7.800	Absorptivity	0.003

为使金属管壁面能流密度分布趋于均匀,对槽式太阳能集热器作出以下形状优化设计:1)集热器与抛物槽聚光镜一起向下偏移,移至偏离原聚光器焦线的某一位置处;2)在此基础上添加一均光抛物面反射镜,开口相对,如图 7 所示。在优化后的抛物槽式聚光系统中,一部分光线可以直接反射至集热器底部焦面区域,另一部分光线则先反射到二次均光反射镜,然后再由该反射镜反射至集热器顶部区域,可使太阳光通量近似均匀地分布在集热器壁面,在优化设计过程中,确定吸收器的偏移量至关重要。基于抛物槽聚光镜截面的焦点建立坐标系, C_1 、 C_2 点关于抛物面聚光反射镜的对称轴对称,抛物面主反射镜上的边缘点分别为 E 和 F ; 其中 C_1C_2 部分的反射光线直接被金属管底部吸收, EC_1 和 FC_2 部分的反射光线则到达二次均光反射镜,经再次反射后到达金属管顶部;在直角坐标系下,抛物面主反射镜在 XY 平面内的曲线方程为

$$y = \frac{x^2}{4f_1} - f_1, \tag{1}$$

式中 f_1 为主反射镜焦距,经过 C_1 点(X_{C_1}, Y_{C_1})的反射太阳光线 C_1O 可以表示为

$$Y_{C_1}x - X_{C_1}y = 0. \tag{2}$$

假设金属管的圆心坐标为 $(0, a)$,则金属管在 XY 截面可以表示为

$$x^2 + (y - a)^2 = R^2, \tag{3}$$

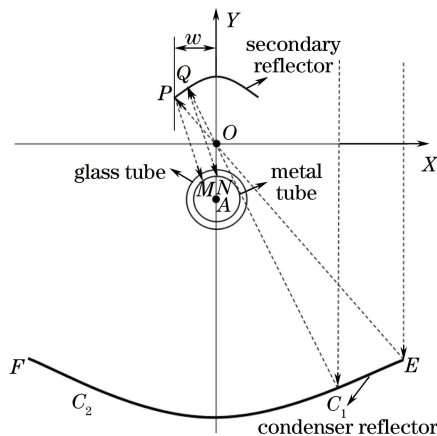


图 7 光线路径设计图

Fig. 7 Design diagram of ray path

式中 R 为金属管半径,若要满足聚光镜上 C_1C_2 部分的反射光线直接被金属管吸收, EC_1 和 FC_2 部分的反射光线到达均光反射镜后再次反射打到金属管顶部,为满足反射光线 C_1O 与(3)式表示的圆相切,则有:

$$\frac{|-X_{c_1} \cdot a|}{\sqrt{X_{c_1}^2 + Y_{c_1}^2}} = R, \quad (4)$$

由此可得到金属管圆心坐标,确定金属管的安装位置。

二次均光反射镜的曲线方程可表示为

$$y = -\frac{x^2}{4f_2} + (f_2 + a), \quad (5)$$

式中 f_2 为二次均光反射镜焦距,需要注意二次均光反射镜的宽度不应小于 $|2p|$,以确保经过 EC_1 部分的所有反射太阳光线均可到达二次反射镜表面,其中 p 是反射光线 EO 与二次均光反射镜交点的横坐标。另外,为降低二次均光反射镜造成的光学遮蔽,其宽度应尽可能小。因此,二次反射镜理想宽度为 $|2p|$ 。

3.2 结果分析

3.2.1 金属管壁面能流密度分析

光学模拟条件如下:入射角为 0° ,太阳直射辐照度(DNI)为 $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,边缘角为 90° ,光线追踪数量为 1×10^5 条,在 SolTrace 中建立优化后抛物槽式聚光系统模型。图 8(a)为添加二次反射镜后金属管壁面接收光线图,该图直观地反映出金属管壁面的能流密度分布情况。图 8(b)为优化后金属管壁的截面展开云图,颜色差异直接反映能流密度的大小。

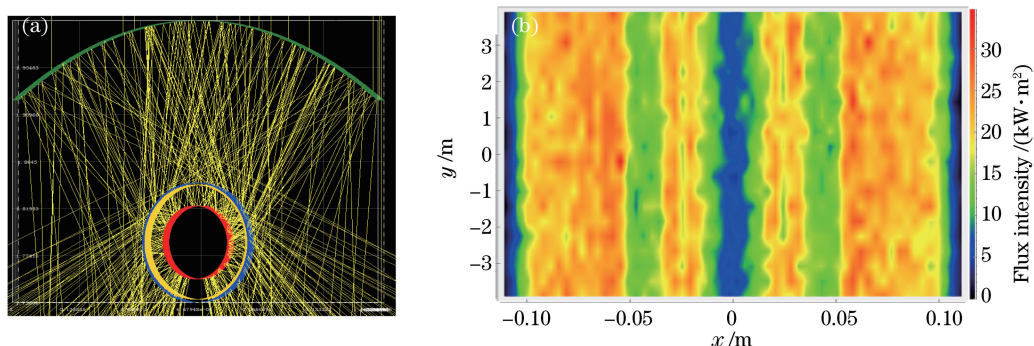


图 8 金属管模拟结果。(a)壁面接收光线;(b)截面展开能流分布

Fig. 8 Simulation results of the metal tube. (a) Wall received rays; (b) energy flux distribution the section

图 9 为优化前后未积尘及全积尘时金属管壁面能流密度分布情况。与优化前未积尘对比,优化后的未积尘槽式太阳能聚光器结构的金属管壁面能流密度在 $13000 \sim 25000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的范围内,金属管边缘处光学损失降低,与优化前全积尘对比,优化后的全积尘槽式太阳能聚光器结构在一定程度上降低了由聚光镜积尘引起的光学损失。

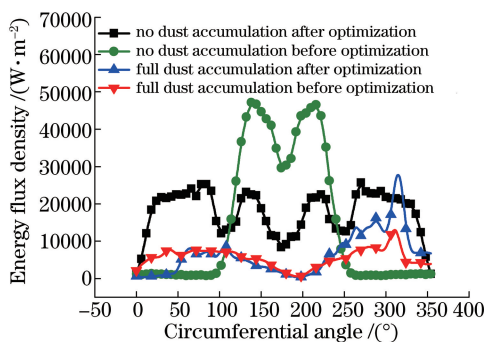


图 9 金属管壁面能流分布

Fig. 9 Energy flux distribution of the metal tube wall

3.2.2 金属管环形温差分析

在计算过程中,由于传热流体的特性,其雷诺数小于流体临界雷诺数,采用标准层流模型,近壁面流动选用标准壁面函数处理。入口边界设置为速度进口,出口边界设置为自由出口。需要指出的是,在模拟过程中简化了来自周围环境的辐射影响,分为定义环境温度(298.15 K)和有效天空温度(290.15 K)^[17]。

金属管壁温度分布如图 10 所示,可以看出金属管底部传热流体温度高于顶部流体温度,金属管周向温差变化较大。当传热流体入口速度为 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,在金属管壁横截面 $Z=2 \text{ m}$ 处优化前后金属管的 CTD 从 9.9 K 减小到 2.3 K。金属管壁面温度分布均匀性提高,同时添加一个二次均光反射镜后,将会产生一定程度的遮挡,使系统光学损失增大。

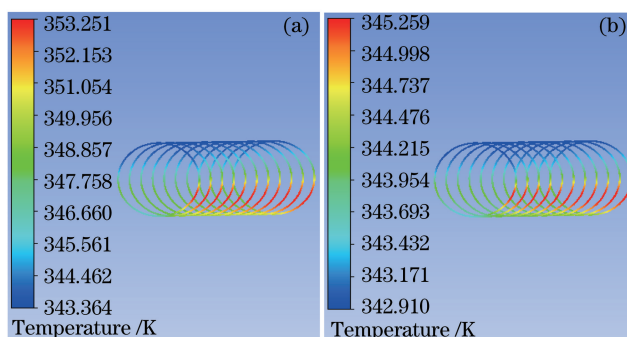


图 10 金属管壁温度分布。(a)聚光器优化前;(b)聚光器优化后

Fig. 10 Temperature distribution of the metal tube wall. (a) Before optimization of a concentrator;
(b) after optimization of a concentrator

4 结 论

首先分析了积尘对集热器能流密度分布的影响,对厚度分别为 1,2,3 mm 三种积尘工况进行了模拟,得到三种工况下金属管壁面能流分布;然后对槽式太阳能金属管集热性能进行了数值模拟,研究传热工质入口流速对金属管周向温差的影响,得到金属管与玻璃外管的温度分布类似。在常规抛物槽式集热系统的基础上添加一个二次均光反射镜,以减少温度梯度引起的损坏和镜面积尘引起的光学损失,并提出相应的设计方法。当传热工质入口速度为 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,结构优化前后在金属管壁横截面 $Z=2 \text{ m}$ 处金属管壁的 CTD 从 9.9 K 减小到 2.3 K。减轻了由能流分布不均造成的周向温度梯度较大而引起的金属管封接损坏、真空损失及选择性涂层材料降解,有利于槽式聚光集热系统的安全可靠运行。最后,优化后槽式聚光集热系统中金属管壁面能流分布趋于均匀及一定程度上减少积尘引起的光学损耗,但添加二次均光反射镜也增加了光学损失,后续可定量分析由积尘引起聚光效率的变化,同时研究添加二次均光反射镜后,金属管环形温差的减小并分析二者对系统集热效率的影响。

参 考 文 献

- [1] Liu Jizhe. Research on heat pipe flat plate solar collector and solar hot water system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 31-43.
刘继者. 热管平板式太阳能集热器和太阳能热水系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 31-43.
- [2] Liu Gang, Fu Xiangzhao, Tian Zhihua. Analysis of the effect of surface area ash on the thermal performance of flat plate solar collector[C]. Beijing: Proceedings of National Conference on HVAC Refrigeration in 2008, 2008.
刘 刚, 付祥钊, 田智华. 平板型太阳能集热器表面积灰对系统热性能影响的分析[C]. 北京: 全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集, 2008.
- [3] Feng Zhikang, Li Ming, Wang Yunfeng, *et al.* Study on optical efficiency characteristics of receivers in a solar parabolic trough concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0122002.
冯志康, 李 明, 王云峰, 等. 太阳能槽式系统接收器光学效率的特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0122002.
- [4] Lei D Q, Wang Z F, Li J. The calculation and analysis of glass-to-metal sealing stress in solar absorber tube[J]. Renewable Energy, 2010, 35(2): 405-411.

- [5] Lei D Q, Wang Z F, Li J, *et al.* Experimental study of glass to metal seals for parabolic trough receivers [J]. *Renewable Energy*, 2012, 48: 85-91.
- [6] Ma Hongcai, Jin Guang, Zhong Xing, *et al.* Arrangement and shape optimization of solar concentrating receivers using Monte Carlo method [J]. *Acta Optic a Sinica*, 2013, 33(3): 0308001.
马宏财, 金 光, 钟 兴, 等. 基于蒙特卡罗法的太阳能聚光接收器布局及形状优化设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0308001.
- [7] Aldali Y, Muneer T, Henderson D. Solar absorber tube analysis: thermal simulation using CFD [J]. *International Journal of Low Carbon Technology*, 2013, 8(1): 14-19.
- [8] Muñoz J, Abánades A. Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11): 4139-4149.
- [9] Massidda L, Varone A. A numerical analysis of a high temperature solar collecting tube using gas as a heat transfer fluid [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2007, 99(6): 1322-1329.
- [10] Wang P, Liu D Y, Xu C. Numerical study of heat transfer enhancement in the receiver tube of direct steam generation with parabolic trough by inserting metal foams [J]. *Applied Energy*, 2013, 102(2): 449-460.
- [11] Flores V, Almanza R. Behavior of the compound wall copper-steel receiver with stratified two-phase flow regimen in transient states when solar irradiance is arriving on one side of receiver [J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1-3): 195-198.
- [12] Xu Chengmu, Li Ming, Ji Xu, *et al.* Frequency statistics analysis for energy flux density distribution on focal plane of parabolic trough solar concentrators [J]. *Acta Optic a Sinica*, 2013, 33(4): 0408001.
许成木, 李 明, 季 旭, 等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析 [J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0408001.
- [13] Yan Jian, Peng Youduo, Cheng Ziran, *et al.* Moving accumulative computation method for flux distribution of heat absorber in symmetry concentrating solar collector system [J]. *Acta Optic a Sinica*, 2016, 36(5): 0508001.
颜 健, 彭佑多, 程自然, 等. 对称型太阳能聚光集热系统吸热器能流分布的运动累加计算方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0508001.
- [14] Wang Wenbo, Li Ming, Ji Xu, *et al.* Investigation of the output characteristics of GaAs solar cell based on Fresnel concentrating system [J]. *Acta Optic a Sinica*, 2012, 32(7): 0716003.
王文博, 李 明, 季 旭, 等. 菲涅耳聚光系统下砷化镓电池输出特性研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0716003.
- [15] Cassarly W J. *Nonimaging optics: concentration and illumination* [M]. New York: Mcgraw Hill, 2010: 71-109.
- [16] Gao Yue, Zhang Guoyu, Zheng Ru, *et al.* Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator [J]. *Acta Optic a Sinica*, 2012, 32(6): 0623003.
高 越, 张国玉, 郑 茹, 等. 光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0623003.
- [17] Forristall R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver [R]. US: National Renewable Energy Lab., Golden, CO., 2003.