

镜面积尘对线性菲涅尔镜场反射比及系统集热性能的影响

闫素英^{1,2}, 魏泽辉¹, 马 靖¹, 王 峰^{1,2}, 田 瑞^{1,2}, 刘海波³

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 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, 呼和浩特 010051;
3. 山东德州皇明太阳能股份有限公司, 德州 253000)

摘 要: 针对线性菲涅尔镜场镜面积尘所导致的聚光损失问题, 建立镜场积尘数学模型, 通过理论分析和试验测试, 分析平面镜积尘遮挡机理及积尘前后相对反射比变化规律, 实验测试积尘对不同波长太阳辐射的反射规律, 以及积尘时间对系统反射比及热性能影响进行分析。结果表明: 随着太阳入射角的增大, 相对反射比呈递减趋势; 随着积尘密度的增加, 相对反射比降低; 积尘密度为 1 mg/cm^2 时, 相对反射比由 0.63 降至 0.24; 在无降雨自然积尘 10 d 后, 镜元相对反射比降低, 系统瞬时集热效率降低 29.37%; 降雨使镜元积尘密度减小, 但同时会使积尘形态发生变化, 相对反射比降低, 瞬时集热效率减小。

关键词: 太阳能聚光器; 反射比; 热性能; 积尘; 线性菲涅尔聚光系统

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

0 引 言

在实际应用中空气中灰尘的沉降会造成聚光器镜面遮挡、镜面反射比下降, 导致太阳能聚光集热系统的聚光效率下降, 国内外学者对灰尘的沉降进行了相关研究。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)曾对火星表面和月球表面灰尘颗粒物的沉降及对电池板的影响进行研究^[1]。Ahmad^[2]推导出了透射率与电池板表面灰尘数量的关联式; 李 剑等^[3]研究了灰尘对真空集热器性能的影响; Hegazy^[4]建议中度灰尘地区应每周清理 1 次平板集热器; 李念平等^[5]模拟积尘量对平板型集热器热性能的影响; 刘 刚等^[6]通过实验研究了平板集热器表面积灰后, 系统日有用得热量降低 3.95%; 刁荣丹等^[7]得出积尘量每增加 1 g, 集热器单位采光面积的相对日有用得热量平均减小 0.013; 闫素英等^[8]研究了槽式聚光镜积尘, 结果表明积尘改变了反射光线方向和能流密度分布规律。

积尘导致集热器透射率下降^[9,10], 目前关于积尘对聚光型集热器的影响研究较少, 内蒙古是中国沙尘暴的多发区, 直接导致该地区降尘严重^[11]。本文针对线性菲涅尔镜场积尘问题, 研究呼和浩特地区镜面积尘下线性菲涅尔聚光集热试验系统性能, 为该系统的后续积尘清洁方式及规律研究提供理论和试验依据。

1 平面镜表面灰尘重叠的数学模型

1.1 灰尘重叠模型推导

NASA 曾采用重叠模型计算积尘对光伏板表面入射太阳光线透射率的影响^[1,12], 提出光伏板在积尘与洁净时二者透射率的比值即为: 光伏板积尘覆盖面积与总面积的比值。基于该模型的思想及等效原则, 本文提出镜面积尘影响平面镜反射比的计算模型, 认为灰尘覆盖面积与线性菲涅尔集热镜元总面积的比值即为灰尘覆盖的镜元表面反射比与洁净镜元表面反射比之比。

积尘覆盖面积计算需考虑灰尘粒径分布、形状

收稿日期: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51766012); 内蒙古科技计划(2016); 内蒙古自然科学基金(2016MS0537)

通信作者: 王 峰(1981—), 女, 博士、副教授, 主要从事太阳能利用方面的研究。wangfeng@imut.edu.cn

特征、灰尘密度以及反射比等因素。假设反射镜镜元的面积为 A , 单个灰尘的面积为 α , 未被积尘覆盖的面积所占比例为 $1 - \alpha/A$; 若镜元表面有 N 个灰尘, 且考虑灰尘有一定的透明度 γ (即灰尘的平均透射率, 可通过测量单层灰尘的透光率得到), 考虑灰尘颗粒的重叠效应^[12], 此时未被积尘覆盖的面积所占比例为 $(1 - \alpha/A)^N$, 则:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(1 - \frac{\gamma\alpha}{A}\right)^N \rho_0 \quad (1)$$

式中, ρ_1 、 ρ_2 ——积尘前、后平面镜镜元的反射比;
 ρ_2/ρ_1 ——相对反射比; γ ——灰尘的平均透射率;
 ρ_0 ——反射镜镜元理论反射比。

由于实验过程中灰尘的数量 N 不易得到, 而灰尘的总质量 M 易得, 故进一步将对式(1)进行推导, 假设灰尘为球形, 则有灰尘的数量 N 为:

$$N = \frac{M}{\rho V} = \frac{3Mj\gamma}{4\rho RA} \quad (2)$$

式中, M ——灰尘的总质量, g; ρ ——灰尘的平均密度, g/mm³; V ——灰尘的总体积, mm³; j ——变量, 定义为 $j = A/\gamma\alpha$; R ——灰尘的平均半径, mm。

镜元表面反射作用, 可抵挡大部分灰尘散射, 可忽略灰尘的散射, 当质量 M 的积尘在镜元表面时, 根据文献[12]的方法, 得到相对反射比为:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \exp\left(\frac{-3Mj\gamma}{4\rho RA}\right) \rho_0 \quad (3)$$

式(3)是灰尘重叠的数学模型, 已知灰尘的质量、透明度、密度、尺寸及镜元面积, 可直接利用该公式。

1.2 考虑入射角的灰尘反射比计算模型

积尘对镜元反射比的影响取决于颗粒物形状分布、颗粒大小分布、太阳辐射入射角和镜元倾角 4 个重要因素。该重叠模型未考虑光线入射角、镜元倾斜角的影响, 在实际线性菲涅尔集热系统工程应用中, 如果跟踪精度不高, 光线入射角不会为 0°, 所以有必要考虑建立光线入射角 i 的灰尘计算模型。通过文献[12]的总结和分析, 依据重叠模型的原理, 研究 i 对灰尘颗粒在平面聚光镜微元面投影的影响, 推导出基于太阳入射角 i 的镜面积尘反射比的计算模型。

以球形灰尘颗粒为例, 假设光线入射角为 i , 此时单个颗粒在表面的投影为椭圆, 则有:

$$\frac{\rho_2(i)}{\rho_1(i)} = \exp\left(\frac{-3Mj\gamma}{4\rho RA \cos i}\right) \rho_0 \quad (4)$$

式(4)即为入射角模型的一般形式, 入射角 i 的取值范围为 0°~90°。

2 试验研究

2.1 聚光镜场

试验系统主要由一次镜场、玻璃-金属真空集热管和 CPC 二次反射镜、一维跟踪系统、循环管路等组成。采用固定宽度的反射镜面, 如图 1 所示为镜场实物图。表 1 为实验装置镜场参数。镜元材料为超白玻璃镀膜, 集热管外管为高硼硅玻璃, 内管外壁涂层为钨氧化铝, 接收器中心与镜元水平轴线垂直距离 $H=3.5$ m。系统长期置于户外, 反射镜场会累积一定量的灰尘, 导致镜元反射比降低, 积尘形态各异, 呼和浩特地区空气湿度较低, 自然积尘主要为粉尘状松散分布。



图1 线性菲涅尔镜场

Fig.1 Linear Fresnel mirror field

表1 系统参数

Table 1 System parameters

名称	数值
镜元($L \times W$)长×宽/mm×mm	1820×300
镜元反射比/%	91
CPC 反射比/%	91
CPC 距反射镜高度/m	2.5~4.5 可调
CPC 开口宽度/mm	400
玻璃外管直径, 厚度/mm	100, 2
金属吸热管直径, 厚度/mm	40, 1.5
真空集热管长/mm	2000±10

2.2 试验测试系统

图 2 为线性菲涅尔聚光集热试验测试系统运行示意图。系统数据采集部分由触摸屏和可编程控制器组成,通过置于真空集热管进出口端的温度传感器测试工质进出口温度,采样频率为 3 s;通过涡轮流量计测试工质流速,量程为 0.1~1.0 m³/h,采样频率为 3 s;采用 UV-3600 分光光度计测试镜面相对反射比;积尘时间引起积尘密度发生变化,利用 FA2104N 电子天平测试积尘重量。

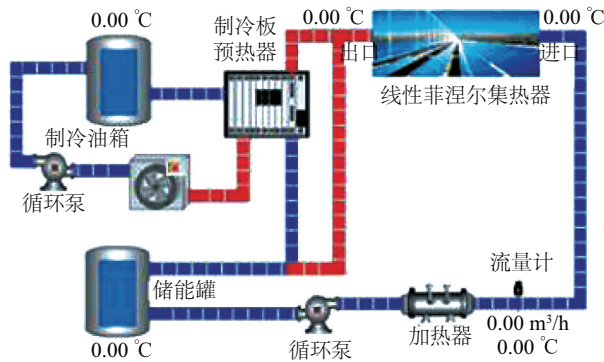


图2 线性菲涅尔系统运行示意图

Fig. 2 Schematic diagram of linear Fresnel system

3 结果讨论

3.1 相对反射比

3.1.1 理论计算

线性菲涅尔一次镜场中,太阳入射角时刻变化,根据式(4)可得不同入射角时灰尘相对反射比变化规律。如图 3,当积尘密度相同时,随着太阳入射角的增大,相对反射比呈递减趋势;当太阳入射角由 15°增至 75°,积尘密度为 0.02 mg/cm²时,相对反射比由 0.90 降至 0.88;积尘密度为 1 mg/cm²时,相对反射比由 0.63 降至 0.24,由此可知,积尘密度越大,随着太阳入射角的增大,相对反射比降低趋势越显著。实际运行过程中,采用半自动跟踪系统,即在开始运行时调节好初始镜场角度,通过控制器发出脉冲控制镜场同步转动即可实现镜场对太阳位置的追踪,以满足跟踪精度要求,达到太阳光线在一次反射镜垂直入射,减小入射角,如果跟踪偏离,则会造成入射角增大,积尘后镜面反射比下降明显。

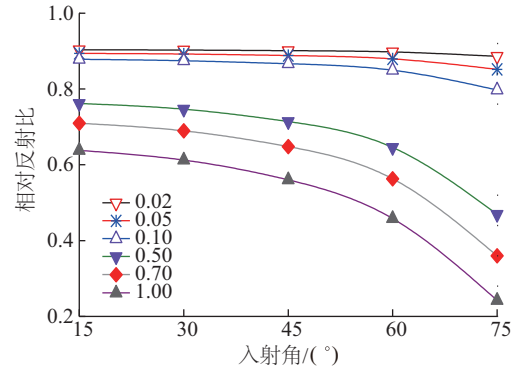


图3 相对反射比随入射角变化规律

Fig. 3 Variation of relative reflectance with incident angle

3.1.2 自然积尘相对反射比试验

无降雨天气,镜元积尘形态为粉尘状,默认清洁镜面反射比为 1,积尘后所测的反射比即为相对反射比。本次试验旨在测试无降雨自然积尘工况下随着积尘时间的变化,镜面反射比变化。实验时间为 3~4 月份,地点为市内楼顶。在平面镜元表面测点放置采集积尘的玻璃样品,记录测试时间内天气变化;由于试验在室外进行,受季节、气候、天气状况的限制,期间多次下雨影响自然积尘,无法获得长期自然积尘数据,故取春季 10 d 的自然积尘无降雨数据进行分析。

图 4 为积尘前后镜元相对反射比,在 300~800 nm 波段内,清洁镜面(定义为 0 d)反射比为 1;相对反射比随波长的增加呈递增趋势,随着自然积尘时间的增加,相对反射比减小,积尘 10 d 后,相对反射比较清洁镜面最大降低了 0.12,与积尘 4 d 相差 0.07,由此可见积尘时间对镜元反射比减小的影响较大。

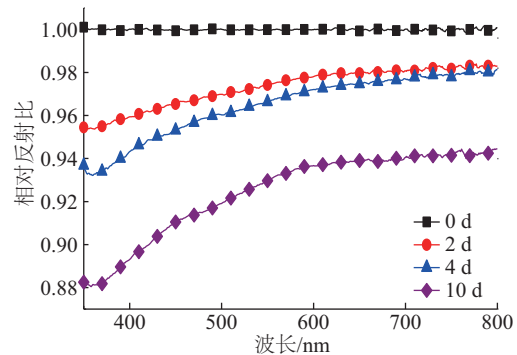


图4 镜元相对反射比

Fig. 4 Relative reflectance of mirror element

图 5 为积尘前后镜元相对反射比的实验和理论对比,镜面清洁时,相对反射比均为 1,自然积尘 10 d

后的镜面相对反射比减小约 0.024, 由于理论模型计算时积尘工况稳定, 未考虑实际积尘过程中湿度、刮风等气候环境对积尘特性的影响, 实验测试值低于理论计算值, 但由于该地区空气干燥, 对无降雨积尘影响较小, 所以实验与理论值符合较好。

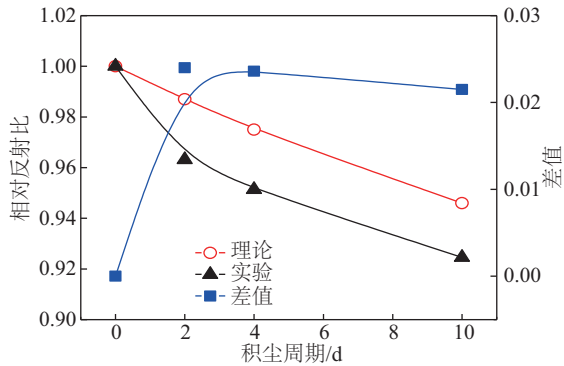


图5 实验与仿真对比

Fig. 5 Comparison between experiment and simulation

3.2 工质进出口温差

图 6 为测试期间太阳直射辐照度, 在实验过程中 DNI 值尽量接近, 且均高于 800 W/m^2 , 系统流量相同^[13], 在聚光焦斑完全覆盖接收器时间段进行实验选取具有代表性的 4 d 数据, 分别为镜面清洁和积尘 2、4、10 d 的试验工况。图 7 为积尘时间不同, 工质进出口温差对比, 随着积尘时间的增加, 工质进出口温差减小, 一次镜场从清洁到积尘 10 d, 工质进出口温差分别为 8、6、3、1.5 $^{\circ}\text{C}$, 积尘 10 d 与镜面清洁时温差相差约 6.5 $^{\circ}\text{C}$, 由此可知, 积尘时间的增加会导致镜面积尘密度的增加, 相对反射比减小, 吸热管管壁能流密度减小, 工质温度降低。

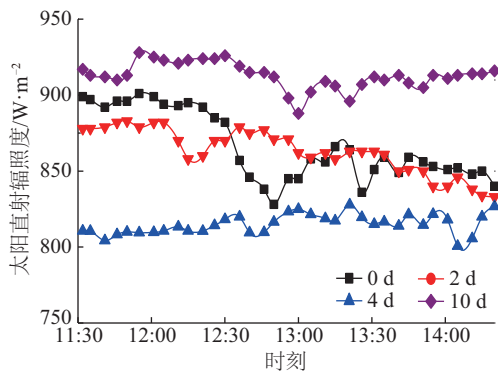


图6 太阳直射辐照度

Fig. 6 Direct solar irradiance

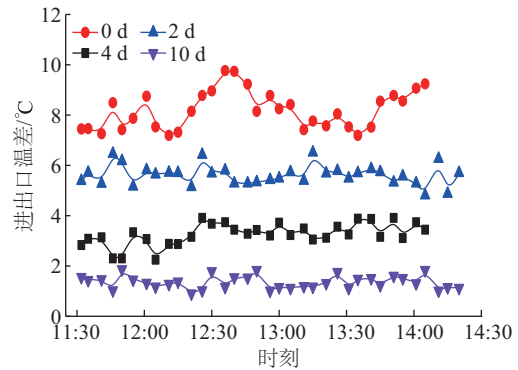


图7 工质进出口温差对比

Fig. 7 Comparison of temperature between import and export of working material

3.3 瞬时集热效率

3.3.1 自然积尘

试验旨在验证自然积尘时间对集热器效率的影响, 为避免太阳直射辐照、太阳入射角以及降雨积尘对所测集热效率的影响, 选取测试期间太阳直射辐照相近、测试时间段相同, 保证太阳光线入射角相同, 积尘过程中无降雨天气, 故积尘形态未发生变化。图 8 为积尘 2、10 d 系统瞬时集热效率及 DNI 对比。由图 8 可知, 积尘 2 d 的 DNI_1 与积尘 10 d 的 DNI_2 相近, 其差值小于 50 W/m^2 , 对应 2 d 工况下的瞬时集热效率 η_1 、 η_2 分别为 36.08%、6.71%, 二者相差 29.37%, 随这积尘时间的增加, 工质进出口温升降低, 导致瞬时集热效率减小。

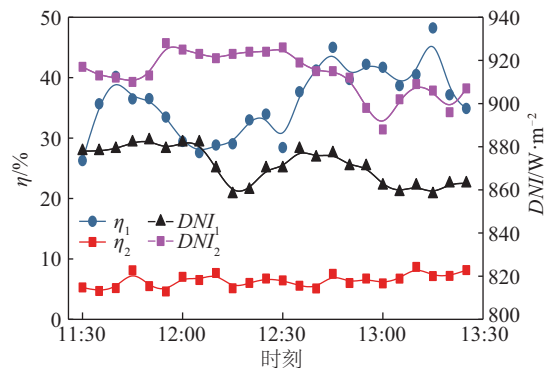


图8 瞬时集热效率对比

Fig. 8 Comparison of instantaneous heat efficiency

3.3.2 降雨积尘

图 9 为测试时间 16 d 内积尘密度、相对反射比、系统瞬时集热效率变化。期间有 4 次降雨, 镜面清洁为积尘第 0 天。降雨减小了积尘密度, 系统瞬时集热效率由清洁时的 56% 降低到积尘第 16

天的 42%, 降雨 4 次, 一次镜场经降雨清洗, 与清洁时相比瞬时集热效率下降约 14%。系统瞬时集热效率并未随积尘密度的减小而增加, 而是呈递减趋势, 降雨使镜元积尘密度减小, 也会使积尘形态发生变化, 降雨前镜元为自然积尘形态, 灰尘分布较为松散, 分布均匀, 降雨后镜元周边积尘聚集, 中部灰尘分布松散, 四周密集, 相对反射比降低, 瞬时集热效率减小, 积尘形态对系统热性能影响较大。

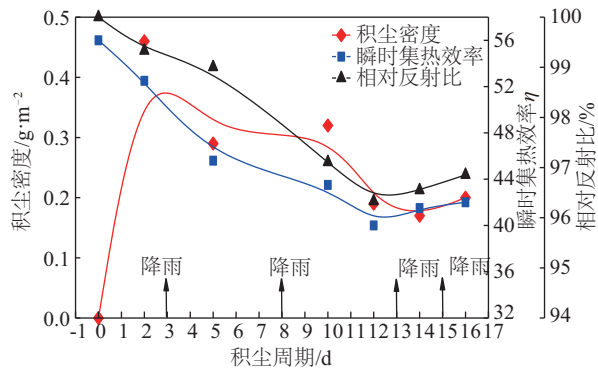


图9 降雨积尘

Fig. 9 Effect of rainfall dust deposition

4 结 论

本文以平面镜积尘遮挡机理为研究基础, 建立平面镜表面灰尘重叠的数学模型, 分析不同积尘密度对相对反射比影响, 同时进行实验测试, 主要结论如下:

1) 考虑入射角 i 对灰尘颗粒在平面聚光镜微元面投影的影响, 得到不同入射角时灰尘相对反射比变化规律。随着太阳入射角的增大, 相对反射比呈递减趋势, 随着积尘密度的增加, 相对反射比减小明显; 实际运行过程中, 如果满足跟踪精度要求, 太阳光线在一次反射镜垂直入射, 否则会使人射角增大, 积尘后导致镜面反射比下降明显。

2) 自然积尘 10 d 后, 相对反射比随积尘时间的增加而降低, 相对反射比的最大值较清洁镜面降低 7%, 与实验测试值相比, 二者相对反射比相差约为 0.024, 实验与理论值符合较好。

3) 对比积尘 2 d 和 10 d 后的瞬时集热效率, 瞬时集热效率相差 29.37%, 随着积尘时间的增加, 工质进出口温升降低, 导致瞬时集热效率减小。

4) 降雨减小了积尘密度, 使积尘形态发生变化, 使得瞬时集热效率并未随积尘密度的减小而增

加, 相对反射比减小, 瞬时集热效率减小, 积尘形态对系统热性能影响较大。

[参考文献]

- [1] Katzan C M, Edwards J L. Lunar dust transport and potential interactions with power system components [R]. NASA CR-4404, 1991.
- [2] Al-Hasan A Y. A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface [J]. Solar Energy, 1998, 63 (5): 323—333.
- [3] 李 剑, 张文基, 孙 清, 等. 灰尘对全玻璃真空太阳集热管热性能的影响 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (3): 228—231.
- [3] Li Jian, Zhang Wenji, Sun Qing, et al. Influence of dust on the thermal performance of all-glass evacuated solar collector tube [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 228—231.
- [4] Hegazy A A. Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors [J]. Renewable Energy, 2001, 22(4): 525—540.
- [5] 李念平, 马 俊, 刘 刚, 等. 平板型太阳集热器表面积尘对其热性能影响的分析 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1197—1201.
- [5] Li Nianping, Ma Jun, Liu Gang, et al. Analysis of the effect of dust accumulation on thermal properties of flat plate solar collectors [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(7): 1197—1201.
- [6] 刘 刚. 平板型太阳集热器表面积灰对系统热性能影响的分析 [A]. 中国建筑学会暖通空调分会、中国制冷学会空调热泵专业委员会. 全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集 [C], 中国建筑学会暖通空调分会、中国制冷学会空调热泵专业委员会: 中国制冷学会, 2008.
- [6] Liu Gang. Analysis of the Influence of Surface Area Ash of Flat Solar Collector on Thermal Performance of the System [A]. HVAC Branch of China Architecture Society, Air Conditioning Heat Pump Committee of China Refrigeration Society. Proceedings of National Annual Conference of HVAC Refrigeration in 2008 [C], China Architecture Society HVAC Branch, China Refrigeration Society Air Conditioning Heat Pump Professional Committee: China Refrigeration Society, 2008.
- [7] 刁荣丹, 李金平, 马思聪, 等. 紧凑式全玻璃真空管热水系统热性能影响因素研究 [J]. 太阳能学报,

- 2016, 37(1): 110—115.
- [7] Diao Rongdan, Li Jinping, Ma Sicong, et al. Thermal performance influential factors of compact all-glass vacuum tube solar water heating system [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2016, 37(1): 110—115.
- [8] 闫素英, 常征, 王峰, 等. 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[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 231—238.
- [8] Yan Suying, Chang Zheng, Wang Feng, et al. Effect of dust accumulation on focal energy flux density distribution of trough solar concentrator and concentration optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 231—238.
- [9] El-Nashar Ali M. The effect of dust accumulation on the performance of evacuated tube collectors [J]. *Solar Energy*, 1994, 53(1): 105—115.
- [10] Hamdy K. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(18): 3192—3203.
- [11] 杨艳, 王杰, 田明中, 等. 中国沙尘暴分布规律及研究方法分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 465—472.
- [11] Yang Yan, Wang Jie, Tian Mingzhong, et al. Distribution characteristics and research method of sandstorms in China [J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(2): 465—472.
- [12] 臧建彬, 王亚伟, 王晓东. 灰尘沉积影响光伏发电的理论和试验研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(4): 624—629.
- [12] Zang Jianbin, Wang Yawei, Wang Xiaodong. Computation model and experiment of dust deposition affecting transmittance of photovoltaic module [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2014, 35(4): 624—629.
- [13] 闫素英, 李彦洁, 田瑞, 等. 菲涅尔聚光PV/T系统热电输出特性分析[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(6): 1552—1558.
- [13] Yan Suying, Li Yanjie, Tian Rui, et al. Analysis of thermoelectric output characteristics Fresnel concentrating PV/T system [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39(6): 1552—1558.

EFFECTIONS OF DUST ACCUMULATION ON REFLECTANCE AND HEAT PROPERTIES OF LINEAR FRESNEL CONCENTRATOR SYSTEM

Yan Suying^{1,2}, Wei Zehui¹, Ma Jing¹, Wang Feng^{1,2}, Tian Rui^{1,2}, Liu Haibo³

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

2. Inner Mongolia Renewable Energy Key Laboratories, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

3. Himin Solar Co., Ltd., Dezhou 253000, China)

Abstract: A mathematical model of the dust accumulation on the mirror field was established in order to study the dust accumulation mechanism and the spot light loss of the linear Fresnel plane mirror with dust accumulation. The change of the thermal properties and the relative reflectance of mirror field were studied in the linear Fresnel system with dust accumulation. Meanwhile, the change of solar radiation at different wavelengths was measured with dust accumulation. The results showed that the relative reflectance was decreased with the increasing of solar incident angle when the dust density was constant. While the relative reflectance displayed a decreasing tendency when the dust density was increased and this phenomenon was obvious when the solar incident angle became bigger. Specifically, the relative reflectance was reduced from 0.63 to 0.24 when the dust density was 1 mg/cm². The relative reflectance was decreased after 10 days of natural dust deposition without rainfall, and the instantaneous heat efficiency of the system was decreased by 29.37% compared with clean mirror filed. The dust accumulation form was changed due to rainfall when the dust accumulation density decreased, while the instantaneous heat efficiency was decreased with the relative reflectance decreasing.

Keywords: solar concentrators; reflectance; thermal properties; dust accumulation; linear Fresnel concentrator system