

DOI: 10.19666/j.rlfed.202503071

沙尘对塔式光热发电接收器吸热管 温度的影响研究

万振杰¹, 苏继康¹, 范博尧¹, 魏进家², 方嘉宾², 刘洋¹, 吴学红³

(1. 郑州轻工业大学建筑环境工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 陕西 西安 710049;

3. 郑州轻工业大学能源与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

[摘要] 国内外适宜发展光热发电的位置主要处于沙漠地区, 环境中沙尘颗粒会沉积在接收器的吸热管道上, 导致管道及涂层疲劳失效。为此, 研究了沙尘颗粒对吸热管壁面温度的影响。采用数值模拟的方法, 建立了沙尘-吸热管的耦合传热分析模型, 模拟研究了沙尘粒径、沙尘与壁面接触大小、聚焦阳光能流密度强度对吸热管温度的影响。结论表明: 吸热管上沙尘颗粒对温度的影响局限在很小范围内, 但会造成吸热管局部高温热点; 聚焦阳光能流密度越强、沙尘颗粒直径越大、沙尘颗粒与吸热管的接触越小, 沙尘颗粒及吸热管高温热点的温度越高; 沙尘颗粒温度可超过其熔点, 形成钙镁铝硅酸盐 (CMAS) 沉积物, 接收器面临 CMAS 腐蚀的风险; 同时, 吸热管高温热点将影响局部热应力分布, 加剧接收器破坏, 实际运行中应定期检查吸热管壁面清洁状况, 避免大颗粒沙尘的积聚。该研究结果可为接收器的运行维护提供技术指导。

[关键词] 光热发电; 塔式; 接收器; 沙尘颗粒; 温度分布

[引用本文格式] 万振杰, 苏继康, 范博尧, 等. 沙尘对塔式光热发电接收器吸热管温度的影响研究[J]. 热力发电, 2025, 54(11): 83-90. WAN Zhenjie, SU Jikang, FAN Boyao, et al. Study on effects of dust on wall temperature of the receiver in solar power tower system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(11): 83-90.

Study on effects of dust on wall temperature of the receiver in solar power tower system

WAN Zhenjie¹, SU Jikang¹, FAN Boyao¹, WEI Jinjia², FANG Jiabin², LIU Yang¹, WU Xuehong³

(1. College of Building Environment Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

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

3. College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: At home and abroad, the locations suitable for developing concentrated solar power are mainly in desert areas. Dust in these environments may accumulate on the heat absorbing surfaces of the receiver in the solar power tower system, resulting in failure of the wall and coating of the pipe. To protect the heat absorbing walls, a coupled heat transfer model is developed for the sand-pipe, and the effects of several parameters on the wall temperature are investigated, such as the dust particle diameter, the contact areas between the dust and tube wall, and the concentrated solar energy flux density. The results show that, the influence of dust particles on the temperature of the heat-absorbing pipes is limited to a small area, but it will cause local high-temperature hot spots on the pipes. With a high concentrated solar energy flux density, a large dust particle diameter and a small contract area between the dust particles and the heat-absorbing pipes, both the temperature of the dust particle and the hot spot at the pipes will increase greatly. The temperature of the dust particles could exceed their melting point, forming calcium-

收稿日期: 2025-03-01

基金项目: 河南省重点研发专项 (231111320900); 河南省高等学校重点科研项目计划 (24A480010); 河南省学科建设研究中心开放课题 (2024-2-05)

Supported by: Key Scientific and Technological Research Project in Henan Province (231111320900); Key Research Project Plan for Higher Education Institutions in Henan Province (24A480010); Open Project of Henan Discipline Construction Research Center (2024-2-05)

第一作者简介: 万振杰 (1989), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为太阳能热发电技术及熔融盐储热等, zhenjiewan@zzuli.edu.cn.

magnesium-aluminum-silicate (CMAS) deposits, which means the receiver is at risk of CMAS corrosion. Meanwhile, the high-temperature hot spots on the heat-absorbing pipes will affect the local thermal stress distribution, exacerbating the damage to the receiver. Therefore, during actual operation, the cleanliness of the heat-absorbing pipe walls should be regularly inspected to avoid the accumulation of large-sized dust particles. The research results can provide technical guidance for the operation and maintenance of the receiver in the concentrated solar power system.

Key words: concentrated solar power; tower type; receiver; dust particle; temperature distribution

以陶瓷、高温熔融盐、颗粒等为工质的新一代高温/超高温光热发电技术 (concentrating solar power, CSP) 工作温度高于 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 效率将高于 50%, 成为国内外研究热点^[1-2]。接收器是 CSP 实现光热转换的核心设备, 但由于工作条件恶劣, 失效问题严重^[3-5]。新一代高温/超高温光热发电技术需要新一代接收器, 其工作温度将高于 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但由于传热温差, 接收器表面温度将更高^[6], 可高达 $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。适宜发展光热发电的位置主要处于沙漠或沿海地区^[7-8], 沙粒、灰尘、潮湿、盐雾等环境条件恶劣。相关研究表明, 环境沙尘颗粒容易与高温壁面接触, 沉积在高温壁面上, 造成壁面热腐蚀^[9-11]。热应力是接收器破坏的主要原因^[12-13], 沙尘颗粒在接收器的高温吸热管上沉积, 还会造成吸热管的高温、热变形及热应力分布不均, 导致管道及吸热涂层失效^[14], 威胁接收器的高效安全运行。

大气环境中的气溶胶、沙粒、盐雾、 SO_2 、 NO_x 等污染物沉积在涂层、玻璃、微结构等表面, 容易造成接收器污染、堵塞等问题^[15-17]。Schmücker 等人^[15]实验研究了多孔吸热器的积尘情况, 发现接收器的积尘很严重, 工作温度高于 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时将导致孔隙堵塞, 同时, 沉积物可导致陶瓷接收器效率降低约 10%。沙尘颗粒在接收器玻璃盖板上沉积, 将降低热性能, 并可能产生盖板失效, 增大运营成本^[18]。Upadhyay 等人^[16]采用欧拉和拉格朗日方法研究了开放容积式多孔接收器的沙尘粒子传输。文献^[19]研究表明沙尘中钙含量较高时, 高温下沙尘容易团聚, 可能造成吸热管道局部高温热点。文献^[7,20]研究表明, 气溶胶和沙尘等环境污染物含有 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 等成分, 高温下可形成钙镁铝硅酸盐 ($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, CMAS) 沉积物, 破坏吸热涂层, 缩短高温壁面寿命。

沙尘颗粒的导热系数、弹性模量等物性参数与吸热管不同, 在吸热管上沉积团聚, 可能造成吸热管道局部高温热点, 约束管道变形, 导致局部热应力过高。CMAS 熔融物可浸入吸热涂层的孔隙, 破坏涂层。同时, 沙尘颗粒的化学成分差异较大, 沙尘吸收大气中的盐雾、 SO_2 、 NO_x 等化学成分, 在聚

光高温下与吸热管道发生 (电) 化学反应, 导致吸热管发生点蚀和缝隙腐蚀。本文建立了沙尘-吸热管的耦合传热分析模型, 通过数值模拟研究了沙尘颗粒对吸热管壁面温度的影响, 并分析了不同因素对温度的影响规律。

1 建立物理模型

外置式吸热器结构简单、接收聚焦阳光能流密度范围广, 在目前商业塔式光热发电系统应用广泛。但是外置式接收器工作温度高, 高温吸热面直接暴露在环境中, 在风力、沙尘暴等气象因素影响下, 沙尘颗粒可在吸热管壁面及管间缝隙沉积团聚, 导致局部高温热点。因此, 本文选取外置式吸热器作为基础物理模型, 其高度及直径较大。外置式吸热器通常由数块吸热板组合构成, 每块吸热板由若干互相独立的吸热管并联组成, 单根吸热管长度与接收器高度相同。但沙漠地区沙尘的粒径较小, 通常在 $4.0\ \mu\text{m}\sim 2.0\ \text{mm}$ 内^[21]。

沙尘直径远小于吸热器尺寸, 直接建立吸热管和沙尘的计算模型存在计算量过大、计算效率低的问题。为了简化计算, 本文在接收器上选取一段吸热管, 建立吸热管的光热转化物理计算模型, 得到吸热管的对流传热、辐射传热等边界条件。然后, 在该吸热管截取部分微元体, 施加传热边界, 获得沙尘及其对吸热管温度分布的影响。吸热管及微元体物理模型如图 1 所示。吸热器工作流体为太阳盐, 吸热管及沙尘的材料参数见表 1。

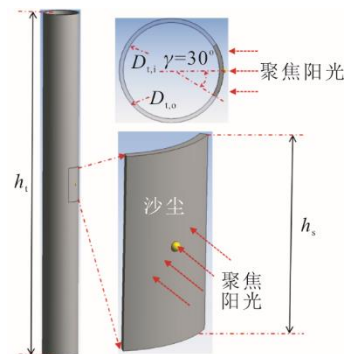


图 1 吸热管及微元体物理模型

Fig.1 Physical model of the heat-absorbing pipe and microelement

表 1 计算模型材料参数
Tab.1 Material parameters of the computational model

项目	数值
传热流体	熔融盐
吸热器直径 D_r/m	8.5
吸热管长度 h/m	10.5
吸热管涂层吸收率 α_t	0.930 ^[22]
吸热管涂层热发射率 ε_t	0.870 ^[22]
吸热管外径 $D_{t,o}/m$	0.042 2
吸热管内径 $D_{t,i}/m$	0.038 9
截取微元体角度 $\gamma/(\circ)$	60.0
截取微元体高度 h_s/m	0.042 2
沙尘颗粒直径 D_s	20.0 μm ~3.0 mm ^[21]
沙尘吸收率 α_s	0.643 ^[19]
沙尘导热系数 $(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	0.50 ^[23]
沙尘颗粒热发射率 ε_s	0.700 ^[19]
地表热发射率 ε_g	0.955 ^[22]
天空热发射率 ε_{sky}	0.895 ^[22]
熔融盐污垢热阻 $R_{fouling}/(\times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1})$	8.808 ^[22]
误差精度 e	0.01

2 沙尘-吸热管耦合传热分析模型

为了研究沙尘颗粒对吸热管温度分布的影响, 需要知道沙尘颗粒与吸热管微元体的传热边界条件, 关键是获得吸热管内熔融盐与壁面的真实对流传热系数和熔融盐平均温度。为此, 需要建立吸热管的光热转化耦合传热模型。

吸热管的光热转化包括: 聚焦阳光的吸收及反射、管外热辐射、管外与环境对流传热、管内与熔融盐的对流传热以及管道的热传导。聚焦阳光的吸收及反射计算时, 不考虑阳光在吸热管之间的多次反射吸收。吸热管涂有高温吸热涂层, 涂层存在凸起等微结构, 可能造成接触热阻, 但接收器垂直安装, 沙尘颗粒受重力、静电力、高温变形、熔融等因素影响, 颗粒与吸热面需有很强吸附。因此, 本研究中假设沙尘与管道接触良好, 不考虑沙尘与管道间的接触热阻。

2.1 吸热管和沙尘颗粒的辐射热损失

吸热管外壁面上, 沿圆周方向上接收的聚焦阳光能流密度不同。 $\gamma=0^\circ$ 时, 聚焦阳光能流密度最大, 本文选取此区域进行分析。同时, 相邻两管的壁面温度相差不大^[24], 因此, 忽略管道间的辐射传热, 仅考虑吸热管与大气及天空之间的辐射传热, 由公

式(1)计算, 其中天空温度由公式(3)计算^[25]。

$$q_r = \pi \sigma \varepsilon_t F \cdot A \cdot (T_{t,w}^4 - T_e^4) \quad (1)$$

$$T_e^4 = \frac{\varepsilon_{sky} T_{sky}^4 + \varepsilon_g T_a^4}{\varepsilon_{sky} + \varepsilon_g} \quad (2)$$

$$T_{sky} = (0.727 + 0.006 T_{dp})^{0.25} \cdot (T_a - 273.15) \quad (3)$$

式中: q_r 为辐射热损失, W; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$; F 为辐射角系数; A 为辐射换热面积, m^2 ; $T_{t,w}$ 为吸热管外壁面温度, K; T_e 为环境温度, K; T_{sky} 为天空温度, K; T_a 为空气温度, K; T_{dp} 为露点温度, $^\circ\text{C}$ 。

2.2 吸热管和沙尘颗粒的对流热损失

吸热器放置在塔顶, 其与环境之间的对流换热有自然对流和风力作用下的强迫对流。接收器的对流传热非常复杂, 本文采用 Siebers 和 Kraabel^[26]提出的接收器混和对流传热关联式计算吸热管和沙尘颗粒与环境之间的对流热损失, 如公式(4)所示。

$$q_{conv} = h_{mix} \cdot A \cdot (T_{t,w} - T_a) \quad (4)$$

$$h_{mix} = (h_{nat}^a + h_{forc}^a)^{1/a} \quad (5)$$

式中: q_{conv} 为对流热损失, W; h_{mix} 为混合对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; h_{nat} 为自然对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; h_{forc} 为强迫对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; a 为常数, 本文取 3.2。

自然对流传热系数为:

$$h_{nat} = \frac{Nu_{nat} \cdot \lambda_a}{h_t} \quad (6)$$

$$Nu_{nat} = 0.098 Gr^{1/3} \left(\frac{T_{t,w}}{T_a} \right)^{-0.14} \quad (7)$$

$$Gr = \frac{g \beta (T_{t,w} - T_a) h_t^3}{\nu^2} \quad (8)$$

式中: Nu_{nat} 为努塞特数; λ_a 为空气导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ν 为运动黏度, m^2/s ; h_t 为吸热管长度, m; Gr 为格拉斯霍夫数。

吸热管外强制对流传热系数与风速、接收器的粗糙度等因素有关。本文采用接收器粗糙度为 248×10^{-5} , 根据 Siebers 和 Kraabel^[26]研究结果, 强制对流传热系数由公式(9)计算。

$$h_{forc} = \frac{Nu_{forc} \cdot \lambda_a}{D_r} \quad (9)$$

$$\begin{cases} Nu_{forc} = 0.3 + 0.488 Re^{0.5} (1.0 + (Re / 282\ 000)^{0.625})^{0.8}, & Re \leq 1.61 \times 10^5 \\ Nu_{forc} = 1.371 \times 10^{-5} Re^{0.98} + 0.010\ 4 Re^{0.89}, & 1.61 \times 10^5 < Re < 1.69 \times 10^7 \\ Nu_{forc} = 0.045\ 5 Re^{0.81}, & Re \geq 1.69 \times 10^7 \end{cases} \quad (10)$$

式中： Nu_{forc} 为风力作用下强制对流努塞特数； Re 为风力作用下雷诺数； D_r 为吸热器直径，m。

2.3 管内与熔融盐的对流传热

吸热管内熔融盐与管道的对流传热系数由 Gnielinski 公式计算：

$$Nu_{salt} = \frac{(f/8)(Re_{salt} - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (11)$$

$$f = (1.82 \lg(Re_{salt}) - 1.64)^{-2} \quad (12)$$

式中： f 为 Darcy 阻力系数； Pr 为熔融盐的普朗特数； Re_{salt} 为熔融盐的雷诺数。

2.4 吸热管的热传导

吸热管的热传导按单层薄壁圆管导热公式计算，管道材料为 Incoloy Alloy 800H，导热系数随着温度变化，由式(13)计算。同时，本文考虑吸热管内壁面存在的熔融盐污垢层^[22]。

$$\lambda_t = 11.467 + 0.0329T_w - 0.00005T_w^2 + 4 \times 10^{-8}T_w^3 \quad (13)$$

式中： λ_t 为吸热管导热系数，W/(m·K)； T_w 为吸热管内外壁面的平均温度，℃。

2.5 耦合传热模型的边界条件及求解

聚焦阳光的吸收及反射、管外热辐射、管外与环境对流传热、管内与熔融盐的对流传热以及管道的热传导等传热过程互相耦合。采用图 2 所示迭代方法求解吸热管和沙尘颗粒的耦合传热过程，最终获取沙尘颗粒对吸热管道温度的影响。选取一段吸热管，通过耦合传热模型获取吸热管内熔融盐与壁面的真实对流传热系数和熔融盐平均温度。耦合传热模型的边界条件：管段的入口熔融盐温度和流速 ($T_{salt,in}$ 和 v_{salt})、吸热管外聚焦阳光能流密度 (q_{con})、吸热管外空气温度 (T_{air})、吸热管外风速 (v_{wind})、环境温度 (T_e)。

1) 首先，给定环境条件 (风速、空气温度、露点温度等)、聚焦阳光能流密度 (q_{con})、熔融盐流动条件 (流动速度、入口温度)、管道和沙尘颗粒的几何结构参数等数据，然后计算空气物性参数。假定吸热管的外壁面温度，进而计算吸热管的辐射热损失、对流热损失、管道吸热量 (Q_{ab})、吸热管内壁面温度 ($T_{t,w,in}$) 等参数。假定熔融盐出口温度，进而计算熔融盐的密度、导热系数、比热容等热物性参数。

2) 由管道吸热量计算熔融盐的出口温度，校核出口温度是否在误差范围之内，若超出误差范围，则改变熔融盐出口温度的假设值，重新计算。由计算得到的熔融盐出口温度，计算熔融盐的进出口平均温度，并计算吸热管内的对流传热系数、熔融盐

吸热量等。对比熔融盐吸热量和管道吸热量，若误差过大，则改变假定的吸热管外壁面温度，重新计算，直至吸热量误差在合理范围之内。

3) 最后，将微元体接收到的聚光能流密度 q_{con} 作为内部热源边界，将熔融盐对流传热系数 h_{salt} 、熔融盐在微元体进出口的平均温度作为管内对流传热边界，将空气混合对流传热系数 h_{mix} 、空气温度 T_{air} 作为管外对流传热边界，将环境温度 T_e 作为管外辐射温度边界，建立如图 1 所示的沙尘颗粒和微元体的传热计算模型，在 Fluent 软件设置传热边界条件，计算吸热管和沙尘的耦合传热过程，获取沙尘颗粒影响下，吸热管壁面的温度分布。

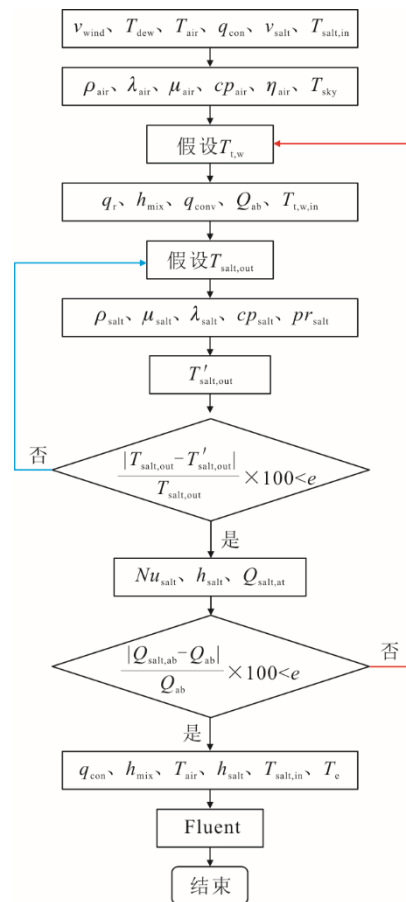


图 2 耦合传热模型计算流程

Fig.2 Solution flowchart of the coupled heat transfer model

2.6 计算网格及耦合传热模型的验证

本文通过 Fluent 软件计算沙尘颗粒与吸热管微元体之间的耦合传热。采用 Ansys Workbench Meshing 软件划分网格，对沙尘与吸热管接触面进行加密处理。图 3 为网格无关性及模型验证结果。采用沙尘颗粒最高温度进行网格无关性验证，网格划分及无关性验证如图 3a) 所示，网格数量需在 80 万以上，本文计算时网格数量为 84 万。

Rodríguez-Sánchez 等人^[22]分析了外置式接收器沿流动方向上吸热管道的温度分布。为了验证本文建立的耦合传热模型的准确性，在风速为 0 m/s 时，对比了 Rodríguez-Sánchez 和本文模型计算得到的吸热管内、外壁面温度，结果如图 3b)所示。由图 3b)可见，外壁面温度计算误差始终小于 3.03%。受入口流动边界条件、聚光能流密度、部分模型数据参数的影响，流动路径较小时，内壁温与文献数据存在明显差异。但随着流动路径的增大，越靠近吸热器出口，误差越小，路径大于 47.3 m 后，误差小于 5.0%，且越来越小，可知本文建立的模型具有较好的求解精度。

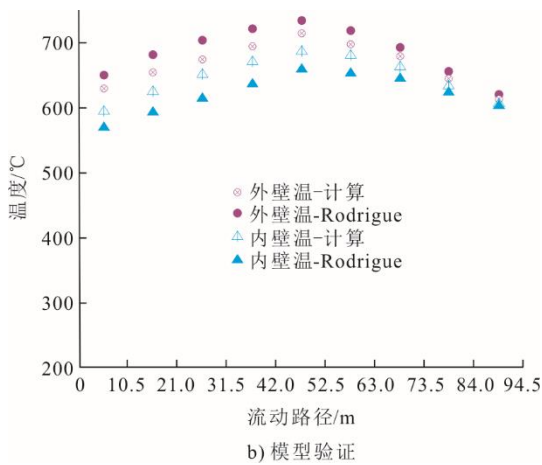
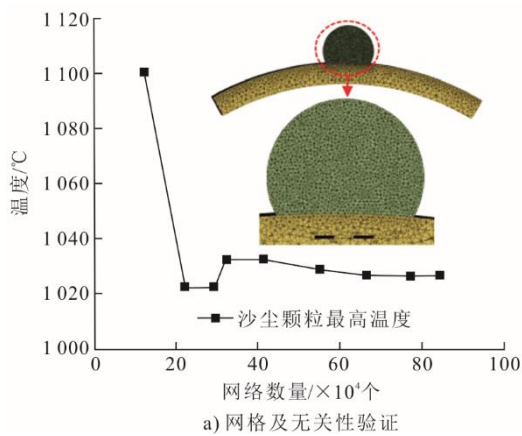


图 3 网格无关性及模型验证结果

Fig.3 The results of grid independence and model validation

3 模拟结果分析

3.1 沙尘颗粒粒径对吸热管温度的影响

将沙尘颗粒假定为特定直径的小球，保持沙尘颗粒的球心在吸热管的外壁面上（沙尘和吸热管道充分接触），通过改变颗粒粒径，研究沙尘颗粒大小对吸热管温度的影响。图 4 为吸热管内熔融盐温度为 550 °C、聚光能流密度为 300 kW/m² 时，沙尘和

吸热管温度随颗粒粒径的变化规律。由图 4 可见，颗粒粒径小于 500 μm 时，沙尘最高温度与吸热管温度相差小于 10.0 °C，吸热管高温热点温度与吸热管温度小于 1.0 °C。随着粒径的增大，沙尘颗粒的最高温度线性升高；沙尘颗粒与吸热管之间存在较大温度差，这主要是由于沙尘颗粒的导热系数较小，颗粒吸收的热量不能很好地传递出去，导致沙尘颗粒最高温度很高；沙尘颗粒粒径为 3 000 μm 时，其最高温度为 899.5 °C，该温度低于沙尘颗粒的熔点，但已超过 CMAS 熔融物的玻璃化转化温度（500~800 °C）^[27]。

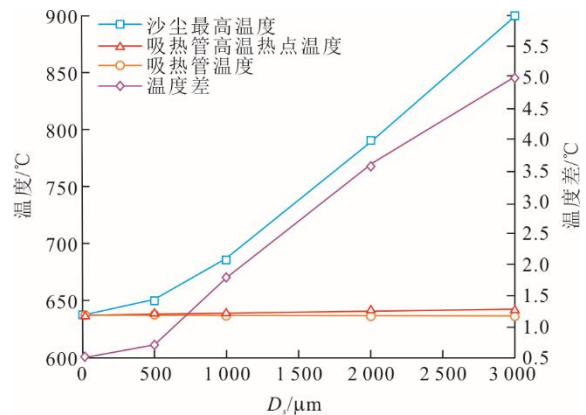
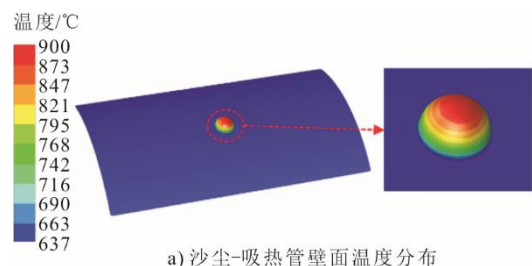


图 4 沙尘颗粒直径对吸热管温度的影响

Fig.4 Effects of dust particle diameter on temperature of the heat absorbing tube

充分接触时，颗粒粒径 D_s 对管道壁面温度的影响较小，影响范围局限在颗粒接触的局部区域（ $\sim 1.5D_s$ ）。随着粒径的增大，吸热管最高温度逐渐升高，但幅度不大。颗粒粒径为 3 000 μm 时，吸热管温度与吸热管的最高温度相差约 5.0 °C。图 5 为颗粒粒径 3 000 μm 时吸热管温度分布。由图 5 可知，吸热管最高温度（局部高温热点）出现在颗粒与管道接触的边缘位置。由于颗粒遮挡了聚焦阳光，同时沙尘导热系数较低，尺寸较大时，吸热管道最低温度出现在颗粒与吸热管接触面的中心位置。颗粒直径为 3 000 μm 时，管道最低温度与吸热管温度相差约 2.9 °C。



a) 沙尘-吸热管壁面温度分布

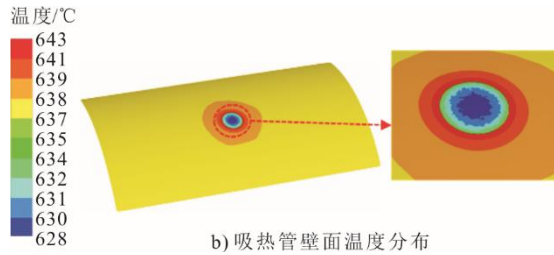


图5 沙尘颗粒粒径影响下吸热管温度分布 ($D_s=3\ 000\ \mu\text{m}$)
Fig.5 Effects of dust particle diameter on temperature distribution of the heat absorbing tube ($D_s=3\ 000\ \mu\text{m}$)

3.2 聚焦阳光能流密度对沙尘和吸热管接触温度的影响

沙尘颗粒导热系数较低,聚焦阳光能流密度较高会影响沙尘颗粒及高温热点的温度。假定沙尘粒径为 $2\ 000\ \mu\text{m}$,颗粒与吸热管道充分接触,熔融盐温度为 $350\ ^\circ\text{C}$,聚焦阳光能流密度的影响结果如图6所示。随着聚焦阳光能流密度的增大,沙尘最高温度线性升高。能流密度为 $200\ \text{kW}/\text{m}^2$ 时,沙尘最高温度为 $536.9\ ^\circ\text{C}$;当能流密度增加到 $1\ 000\ \text{kW}/\text{m}^2$ 时,沙尘最高温度约 $1\ 241.9\ ^\circ\text{C}$,该温度已接近沙尘颗粒的熔点^[10],沙尘颗粒会融化形成CMAS沉积物,腐蚀吸热管涂层。以陶瓷、高温熔融盐、液体金属等为工质的新一代高温/超高温光热发电技术,较高聚焦阳光能流密度下沙尘颗粒的沉积、熔融将形成CMAS沉积物,可能影响接收器的高效安全运行^[15]。

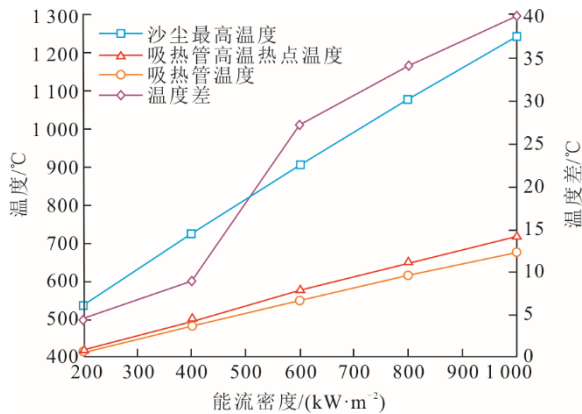


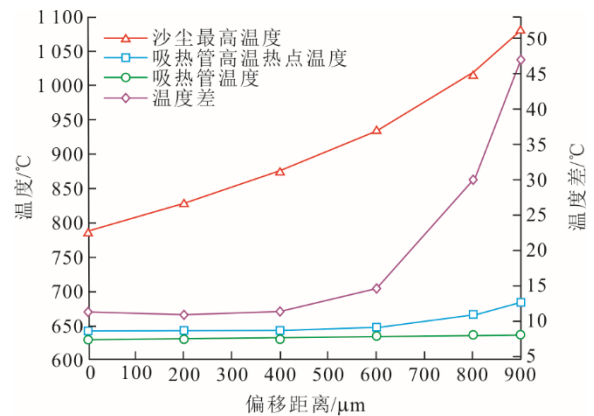
图6 聚焦阳光能流密度对沙尘和吸热管温度的影响
Fig.6 Effects of concentrated solar energy flux density on temperature of the heat absorbing tube

聚焦阳光能流密度对吸热管温度的影响也较为明显,吸热管温度及高温热点温度随聚光能流密度的增大也线性升高。受沙尘颗粒影响,吸热管高温热点温度上升幅度更大,高能流密度时更为显著。能流密度为 $200\ \text{kW}/\text{m}^2$ 时,吸热管高温热点温度约为 $420.9\ ^\circ\text{C}$,吸热管温度约为 $416.4\ ^\circ\text{C}$,两者

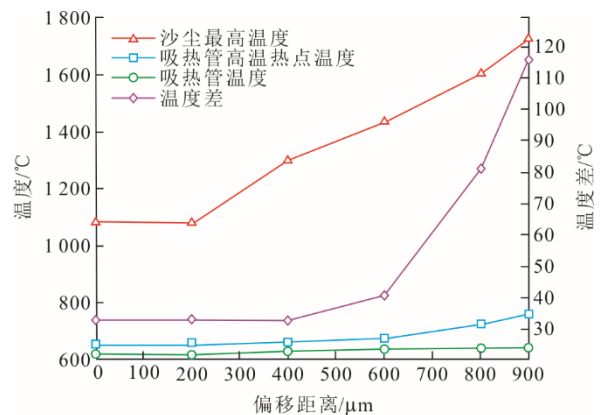
相差约 $4.5\ ^\circ\text{C}$;能流密度为 $1\ 000\ \text{kW}/\text{m}^2$ 时,吸热管高温热点温度为 $717.4\ ^\circ\text{C}$,吸热管温度为 $677.5\ ^\circ\text{C}$,温度差约 $40\ ^\circ\text{C}$,将导致吸热管局部热应力,破坏吸热管及涂层材料。

3.3 沙尘颗粒与吸热管接触面积对吸热管温度影响

沙尘颗粒形状不规则,颗粒与吸热管接触状态复杂,为了研究接触大小对温度影响,假定沙尘粒径为 $2\ 000\ \mu\text{m}$,通过改变沙尘颗粒中心偏离吸热管道外壁面的距离,研究接触面积对吸热管温度的影响。根据接收器的实际工作特性,选取熔融盐流动路径上2个典型位置(300 、 $800\ \text{kW}/\text{m}^2$)开展研究,结果如图7所示。可知,随着沙尘颗粒中心偏移距离的增大,即沙尘颗粒与吸热管道接触面积的减小,沙尘的最高温度急剧升高。能流密度为 $300\ \text{kW}/\text{m}^2$,偏移距离为 $900\ \mu\text{m}$ 时,沙尘最高温度达到 $1\ 082.6\ ^\circ\text{C}$;能流密度为 $800\ \text{kW}/\text{m}^2$,偏移距离为 $400\ \mu\text{m}$,沙尘颗粒温度已超过 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$,面临CMAS熔融沉积物的风险。



a) $300\ \text{kW}/\text{m}^2$, $T_{\text{盐}}$ 为 $550\ ^\circ\text{C}$



b) $800\ \text{kW}/\text{m}^2$, $T_{\text{盐}}$ 为 $350\ ^\circ\text{C}$

图7 接触面积对吸热管温度的影响
Fig.7 Effects of contact areas on temperature of the heat absorbing tube

与吸热管道相比, 沙尘颗粒表面积很小, 沙尘颗粒接触面积对吸热管道温度基本没有影响。偏移距离较小时 ($<600\ \mu\text{m}$), 接触面积变化对高温热点温度的影响不大。相同接触面积时, 聚焦阳光能流密度越高, 吸热管高温热点温度越高。聚焦阳光能流密度 $300\ \text{kW}/\text{m}^2$ 时, 吸热管高温热点温度约 $640\ ^\circ\text{C}$; 聚焦阳光能流密度 $800\ \text{kW}/\text{m}^2$ 时, 吸热管高温热点温度约 $650\ ^\circ\text{C}$ 。沙尘颗粒中心偏移距离大于 $600\ \mu\text{m}$ 时, 吸热管高温热点温度急剧升高; 偏移距离为 $900\ \mu\text{m}$ 时, 聚焦阳光能流密度 300 、

$800\ \text{kW}/\text{m}^2$ 下吸热管高温热点温度与吸热管道温度之差值分别为 47.0 、 $116.1\ ^\circ\text{C}$, 吸热管局部热应力将升高。

图 8 为不同情况下, 沙尘颗粒对吸热管局部温度分布的影响。随着沙尘颗粒中心偏移距离的增大, 吸热管高温热点温度升高, 但其影响区域减小。可见, 随着沙尘颗粒与吸热管接触面积的减小, 吸热管发生局部点蚀的风险增大。同时, 随着沙尘颗粒中心偏移距离的增大, 沙尘颗粒遮挡吸热管越少, 颗粒与吸热面接触面的温度逐渐升高。

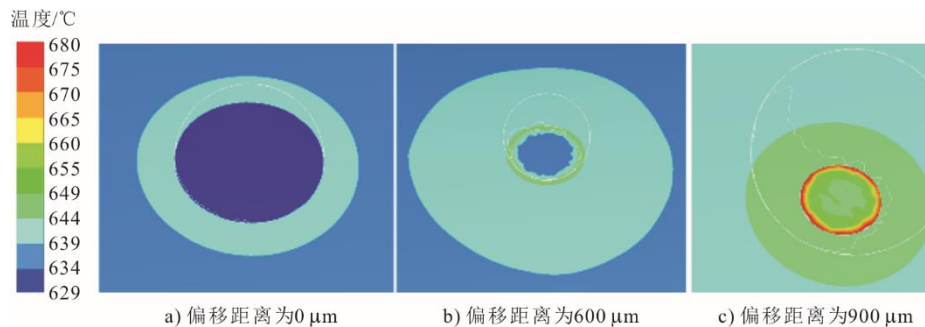


图 8 $300\ \text{kW}/\text{m}^2$ 时接触面积对吸热管温度分布的影响

Fig.8 Effects of contact areas on temperature distribution of the heat absorbing tube at $300\ \text{kW}/\text{m}^2$

4 结 论

在考虑吸热管复杂光热转化过程的基础上, 提出了沙尘-吸热管耦合传热数值计算模型, 分析了沙尘颗粒尺寸、沙尘颗粒与吸热管接触面积、聚焦阳光能流密度对吸热管温度的影响, 得出以下结论。

1) 颗粒粒径小于 $500\ \mu\text{m}$ 时, 沙尘对吸热管温度影响不大。接收器实际运行过程中应定期检查吸热面积积尘情况, 避免小颗粒沙尘在温度、湿度以及其他杂质综合作用下团聚。

2) 沙尘颗粒对吸热管道温度影响主要在接触区域, 沙尘的沉积会导致吸热管道出现局部高温热点, 其温度与颗粒尺寸、聚焦阳光能流密度强度、沙尘颗粒与吸热管接触面积有关。

3) 由于沙尘颗粒的导热系数较小, 沙尘颗粒与吸热管存在较大温差。在高能流密度、较小接触面积、较大颗粒直径时, 沙尘颗粒温度可超过 $1200\ ^\circ\text{C}$, 吸热管将面临 CMAS 沉积物腐蚀的风险。

4) 沙尘颗粒粒径越大, 沙尘颗粒与吸热管接触面积越少, 聚焦阳光能流密度强度越高, 高温热点温度越大。吸热管局部温差可大于 $40\ ^\circ\text{C}$, 将影响管道局部热应力分布。

受垂直加热面、高能流密度、高温、颗粒物成分等因素影响, 沙尘颗粒与壁面间作用较为复杂。拟通过实验, 进一步获取颗粒沉积及吸热管温度的实验数据。

[参 考 文 献]

- [1] HE L, WANG W, JIANG R, et al. Liquid-based high-temperature receiver technologies for next-generation concentrating solar power: a review of challenges and potential solutions[J]. *Frontiers in Energy*, 2023, 17(1): 16-42.
- [2] 宫啸宇, 范刚, 张嘉耕, 等. 光伏-塔式光热 SCO_2 混合发电系统优化配置[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(8): 80-91.
GONG Xiaoyu, FAN Gang, ZHANG Jiageng, et al. Optimal configuration of photovoltaic-tower SCO_2 hybrid power generation system[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(8): 80-91.
- [3] 许继刚, 肖刚, 徐志强. 太阳能吸热器性能分析与防护措施研究[J]. *电力勘测设计*, 2023(12): 1-5.
XU Jigang, XIAO Gang, XU Zhiqiang. Study on performance analysis and protective method for solar power receiver[J]. *Electric Power Survey & Design*, 2023(12): 1-5.
- [4] 太阳能光热联盟. 高效塔式光热聚光场技术[EB/OL]. (2023-05-25) [2025-03-01]. <http://www.cnste.org/news/detail/11456.html>.
Solar Thermal Alliance. High efficient field technology for solar power tower system[EB/OL]. (2023-05-25) [2025-03-01]. <http://www.cnste.org/news/detail/11456.html>.

- [5] WAN J, FANG B, TU N, et al. Numerical study on thermal stress and cold startup induced thermal fatigue of a water/steam cavity receiver in concentrated solar power (CSP) plants[J]. *Solar Energy*, 2018, 170: 430-441.
- [6] 刘舒婷. 吸热器管屏材料常温腐蚀环境下抗腐蚀能力研究[J]. *上海电气技术*, 2022, 15(3): 18-21.
LIU Shuting. Study on the material corrosion resistance of the heat absorber tube screen in the corrosion environment at normal temperature[J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2022, 15(3): 18-21.
- [7] PESCHEUX A, RACCURT O, BOURDON D, et al. Accelerated aging tests and characterizations of innovated anti-soiling coatings for solar receiver glasses[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 256: 123646.
- [8] O'SULLIVAN M. Global potential of concentrating solar power[C/OL]//SolarPACES 2009. https://www.academia.edu/142926253/Global_potential_of_concentrating_solar_power.
- [9] 赵高乐, 齐红宇, 李少林, 等. 热端部件低温热腐蚀疲劳损伤机理、寿命模型和抗腐蚀设计方法[J]. *力学进展*, 2022, 52(4): 809-851.
ZHAO Gaole, QI Hongyu, LI Shaolin, et al. Low-temperature hot corrosion fatigue damage mechanism, life model, and corrosion resistance design method of hot section components[J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(4): 809-851.
- [10] 高栋, 刘焱栋, 张国栋, 等. 热障涂层 CMAS 腐蚀失效机制研究进展[J]. *装备环境工程*, 2024, 21(5): 88-102.
GAO Dong, LIU Yidong, ZHANG Guodong, et al. Research progress of corrosion mechanism of thermal barrier coatings attacked by CMAS[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, 21(5): 88-102.
- [11] HE L, WANG K, QIU Y, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: non-uniform features, challenges, and solutions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 149: 448-474.
- [12] CONROY T, COLLINS M, GRIMES R. A review of steady-state thermal and mechanical modelling on tubular solar receivers[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119: 109591-109591.
- [13] FANG B, ZHANG H, TU N, et al. Thermal characteristics and thermal stress analysis of a superheated water/steam solar cavity receiver under non-uniform concentrated solar irradiation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 183: 116234.
- [14] HOSSEINI S, TORRES F, TAHERI, et al. Long-term thermal stability and failure mechanisms of Pyromark 2500 for high-temperature solar thermal receivers[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 246: 111898.
- [15] SCHMÜCKER M. Einfluss von mineralstäuben auf keramische solarabsorber[EB/OL]. (2012-06-12)[2025-03-01]. <https://elib.dlr.de/79122/>,2025-08-16.
- [16] UPADHYAY K, SINGH G, CHANDRA L, et al. On the dust deposition and its effects on heat transfer in absorber pores of an open volumetric air receiver[J]. *Solar Energy*, 2020, 211: 1206-1213.
- [17] ZEREG K, GAMA A, AKSAS M, et al. Dust impact on concentrated solar power: a review[J]. *Environmental Engineering Research*, 2022, 27(6): 345.
- [18] RAFIQUE M, REHMAN S, ALHEMS L. Recent advancements in high-temperature solar particle receivers for industrial decarbonization[J]. *Sustainability*, 2023, 16(1): 103.
- [19] DIAGO M, INIESTA A, SOUM-GLAUDE A, et al. Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology[J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 402-413.
- [20] 邹兰欣, 常辉, 高明浩, 等. 地面重型燃气轮机及其热障涂层的研究进展与发展趋势[J]. *中国表面工程*, 2024, 37(1): 18-40.
ZOU Lanxin, CHANG Hui, GAO Minghao, et al. Research progress and development trend of ground heavy duty gas turbine and its thermal barrier coatings[J]. *China Surface Engineering*, 2024, 37(1): 18-40.
- [21] 吴杨, 郭星晔, 贺定勇. 航空发动机热障涂层的 CMAS 腐蚀与防护研究进展[J]. *中国表面工程*, 2023, 36(5): 1-13.
WU Yang, GUO Xingye, HE Dingyong. Research progress of CMAS corrosion and protection method for thermal barrier coatings in aero-engines[J]. *China Surface Engineering*, 2023, 36(5): 1-13.
- [22] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ R, SORIA-VERDUGO A, ALMENDROS-IBÁÑEZ A, et al. Thermal design guidelines of solar power towers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63(1): 428-438.
- [23] JEFFREY M, GREGORY N, MARK A. The heat transfer coefficient associated with a moving packed bed of silica particles flowing through parallel plates[J]. *Solar Energy*, 2022, 234: 294-303.
- [24] CAGNOLI M, DE A, PYE J, et al. A CFD-supported dynamic system-level model of a sodium-cooled billboard-type receiver for central tower CSP applications[J]. *Solar Energy*, 2019, 177(1): 576-594.
- [25] BERDAHL P, FROMBERG R. The thermal radiance of clear skies[J]. *Solar Energy*, 1982, 29(4): 299-314.
- [26] SIEBERS L, KRAABEL S. Estimating convective energy losses from solar central receivers[R]. Sandia National Laboratories, Albuquerque. SAND848717, 1984: 39-55.
- [27] YANG S, SONG B, DINGWELL D, et al. Surface roughness affects metastable non-wetting behavior of silicate melts on thermal barrier coatings[J]. *Rare Metals*, 2022, 41(2): 469-481.

(责任编辑 杨嘉蕾)