

静止颗粒群热辐射吸收性能的蒙特卡罗法 二维数值研究

涂茂萍¹, 张丹¹, 袁洋¹, 杜佳蔚², 郝家成¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安, 710049;

2. 华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京, 102208)

摘要: 在粒子式太阳能接收器中吸热效率与出口温度难以兼顾,而颗粒群热辐射吸收性能决定其热效率及升温上限,基于蒙特卡罗法建立了外部平行辐射投射下的静止颗粒群辐射传递模型,探究颗粒群几何构型、颗粒粒径、颗粒辐射物性、辐照条件等因素对热辐射传输的影响。结果表明:颗粒群吸热时间与粒径、空间构型无关;但与体积分数成正比,且随外部辐射强度或颗粒表面吸收率的增大而缩短。对给定颗粒群,平衡温度主要依赖于外部辐射强度;总体吸收率主要取决于颗粒表面吸收率。给定空间构型下,二者均与颗粒粒径正相关,且随体积分数的增大具有相似的变化规律。不同空间构型下,颗粒体积分数的增大均在强化吸收外部辐射的同时增大了自发辐射的逸出。现有构型中,棋盘交错型、扇型与随机型下的总体吸收率随体积分数的增大有峰值存在。扇型与随机型达到最高平衡温度和效率所需的颗粒浓度最小。根据计算结果提出了颗粒群总体吸收率经验关联式,其中有82.9%的计算结果与定义式计算值相对误差小于15%。该研究结果可为运动颗粒群辐射传递的计算、粒子式太阳能吸收器的设计提供参考。

关键词: 热辐射;颗粒辐射物性;几何构型;吸热时间;吸收率;平衡温度

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202405016 **文章编号:** 0253-987X(2024)05-0167-12

Thermal Radiation Absorption Properties of Two-Dimensional Stationary Particle Groups Based on the Monte-Carlo Method

TU Maoping¹, ZHANG Dan¹, YUAN Yang¹, DU Jiawei², HAO Jiacheng¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, North China Electric Power University, Beijing 102208, China)

Abstract: It is difficult to balance the high heat absorption efficiency and high outlet temperature in the particle solar receiver, and the thermal radiation absorption performance of particles determines its thermal efficiency and the upper limit of temperature rise. Therefore, based on the Monte-Carlo method, a radiative transfer model of stationary particle groups under external parallel radiation projection is established to investigate the effects of the geometry structure of particle groups, particle sizes, particle radiative properties, irradiation conditions and other factors on the transmission of thermal radiation. The results show that the particle groups' absorption duration is independent of the particle size and geometry structure, but is in direct proportion to the volume fraction, and shortens with the increase of the external radiation

收稿日期: 2023-09-24。 作者简介: 涂茂萍(1999—),女,硕士生;张丹(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976162,52130607)。

网络出版时间: 2023-12-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231205.1107.002>

intensity or the absorptivity on the particle surface. For a certain particle group, the equilibrium temperature depends mainly on external radiation intensity, and the overall absorption rate relies mainly on the absorptivity of particle surface. For a given geometry structure of the particle group, both are positively correlated with the particle size, and have similar variation behavior as the volume fraction increases. In different geometry structures, increasing the volume fraction of particles enhances the external radiation absorption while increasing the escape of self-generated radiation. Among the existing structures, the overall absorptivity under the tessellated staggered structure and the sector structure have peaks with the increase of volume fraction. Of these, the sector structure requires the smallest particle concentration to reach the highest equilibrium temperature and efficiency. According to the calculation results, an empirical correlation formula for the overall absorptivity of the particle population is proposed, whose relative error subject to the definition formula calculation value is less than 15%. The results of this paper can provide a reference for the computation of radiation transfer of moving particle populations, as well as the design and regulation of particle solar receivers.

Keywords: thermal radiation; particle radiative property; geometry structure; absorption duration; absorptivity; equilibrium temperature

太阳能光热利用是新能源开发的核心领域之一^[1]。光热利用的基本步骤为聚光、储热和利用。其中,储热介质的吸收性能是光热利用的关键。现有储热介质主要有水^[2]、导热油^[3]、熔融盐^[4]等,因存在高温腐蚀、分解等问题其储热温度均低于 600 ℃。近年来,以固体颗粒为吸热介质的粒子式太阳能吸收器以其储热温度可达 1 000 ℃,受到了广泛关注^[5-7]。

粒子式吸收器中固体颗粒吸收太阳辐射升温后将热量向气体传递,为了强化辐射吸收,各国学者围绕颗粒选型与气固两相流场的设计开展了研究。

针对颗粒选型,综合考虑颗粒热稳定性^[8]、辐射物性^[9-10]及经济性^[11],颗粒应满足导热系数小、比定压热容大、吸收率高、热稳定性好等要求^[12],常用固体颗粒及其热物性见表 1^[8-18]。

围绕粒子式吸收器的流动与传热的研究主要有两方面:一是采用计算流体力学(CFD)方法对整个粒子吸热器流动和换热进行研究,关注颗粒、气体运行参数变化对流动、传热过程的影响;二是利用蒙特卡罗法进行射线追踪,聚焦于颗粒间的辐射传输过程的研究和优化。王天键等^[17]基于 CFD 方法模拟

单个固体颗粒下落过程中的辐射传热。颗粒温度先升高后降低,并趋于平衡;减小颗粒直径可提高平衡温度与吸收效率。张生春、王方舟等^[18-19]采用 CFD 方法对石英玻璃管内流态化颗粒换热进行仿真。入口空气质量流速增大使得颗粒以及空气出口温度均降低。石凯^[20]基于 CFD 方法模拟幕帘式粒子吸收器内的对流传热过程,提出在入射窗口处增加空气窗能够减少颗粒与环境间的对流损失;提高颗粒初温会造成吸热器效率和颗粒出口温升的下降。江凯军、聂辅亮等^[21-23]采用 CFD 方法研究石英管束式固体颗粒吸热器的流动特性,不含内插件时截面含固率沿高度方向呈现波浪形分布,填充内插件可使管内颗粒分布更均匀、流动更稳定。苏亚琴等^[24-25]利用 CFD 方法对内循环流化床太阳能粒子吸热器内流动与传热过程展开数值研究,适当增加颗粒的体积分数或气体再循环率能够提升吸热器效率及气体出口温度。

蒙特卡罗法将不透明固体颗粒的热辐射传输过程中的发射、吸收、反射和散射分别以随机的独立子过程处理,并通过光线追踪和统计得到辐射能量在

表 1 常用固体颗粒及热物性参数
Table 1 Solid particles for solar absorption and their thermal properties

名称	熔点/℃	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	定压比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	吸收率
氧化铝	2 072	3 960	0.12~0.65	0.92~1.28	0.25~0.85
碳化硅	1 800	3 210	0.10~0.67	0.30~1.60	0.84~0.88
石英砂	1 750	2 630	4.95~5.62	0.60~1.80	0.25~0.35

颗粒间的分配关系^[26],即辐射传递矩阵。Wang等^[27]利用蒙特卡罗法研究了颗粒群自由下落与辐射传热的耦合过程。发现适当地增大颗粒体积分数或投入辐射强度可提高吸热器效率;而降低颗粒粒径则有利于提高颗粒群平均温升。González-Portillo等^[28]采用蒙特卡罗法研究了下落颗粒群对投入辐射吸收的效果,发现增大颗粒群厚度或减小颗粒粒径能提高对入射辐射的整体吸收率。Johnson等^[29]指出颗粒群中颗粒数量的庞大与其相对位置的不断变化造成颗粒间辐射传递的定量计算十分困难,于是利用蒙特卡罗法计算并整理了辐射因子表格来提高计算效率。

现有研究指出粒子式太阳能吸收器内气体介质的升温效果主要取决于颗粒群对辐射的吸收性能。该性能主要依赖于外部投入辐射、颗粒群几何结构以及颗粒辐射物性。粒子式吸收器中颗粒群的传热是从辐射吸收到对流传出的多步过程。现有研究考查了二者的耦合换热,而对辐射侧的吸收性能上限及影响因素缺乏单独、系统的研究。吸热器运行中颗粒相对位置随时间不断变化,考虑到辐射传热远远快于颗粒宏观运动、对流及导热传热,为了逐步深入研究该过程,本文以动态颗粒群某瞬时,即静态颗粒群,为研究对象,建立辐射传递模型研究其传输规律,为后续基于深度学习的动态颗粒群辐射传输模型建立样本数据库。

1 计算模型的建立

本文基于蒙特卡罗法,围绕静态颗粒群间的辐射传递与温度场演化建立计算模型。该模型以外部辐射,颗粒群的粒径、体积分数、空间构型等几何参数,颗粒表面吸收率等辐射物性为自变量,进行颗粒群的温度演化求解和吸收性能评价。

为简化计算,该模型假设:①颗粒为二维,粒径相同,颗粒群静止;②颗粒热物性一致,吸热升温过程中每个颗粒自身温度均一,颗粒辐射物性相同,表面为灰体表面,吸收率等于发射率;③忽略颗粒表面与环境的对流、导热,颗粒与外部的热交换仅以辐射的方式进行。

1.1 计算区域与颗粒群几何特征

计算区域与外部投射窗口如图1所示,本文选取 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的正方形计算区域。在该区域左边界上沿水平对称轴开设长度为 5 mm 的入射窗口。外部平行热辐射由此窗口投射至颗粒群。计算区域边界为透明边界。

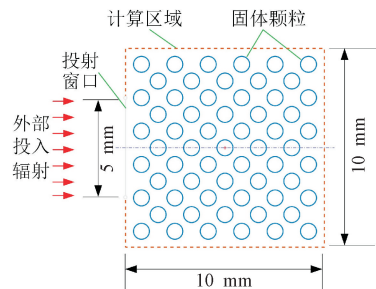


图1 计算区域与外部投射窗口

Fig. 1 Calculation domain and external irradiating window

本文选用的颗粒群构型如图2所示,计算区域内可布置不同几何形式的颗粒群。颗粒群的几何特征包括粒径 D 、空间构型、体积分数 f_v 。考虑到目前粒子式吸收器的颗粒粒径多介于 $0.1 \sim 1.0\text{ mm}$ 之间^[8-18],因此本文在该粒径范围内开展研究;空间构型采用均匀分布的棋盘型、棋盘交错型、扇型和随机型4种。

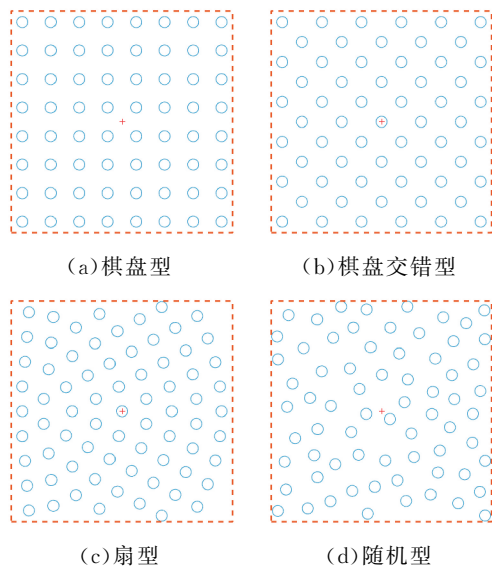


图2 本文选用的颗粒群构型

Fig. 2 Geometry structure of solid particle groups

定义颗粒群体积分数 f_v 为颗粒群总面积与计算区域面积之比。同一构型下, f_v 可通过调整颗粒间距改变

$$\begin{cases} f_v = \frac{nS_p}{S_{cd}} \\ S_p = \frac{1}{4}\pi D^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_p 为颗粒面积; D 为颗粒粒径; S_{cd} 为计算区域面积; n 为计算区域内的颗粒数。

1.2 辐射传递矩阵

图1中每个颗粒接收到的热辐射包含外部辐射

的直接投射和其他颗粒的自发辐射两部分。两个过程中辐射能量的分配比例是颗粒群辐射传热的基本参数。因此,定义 $b_v(i)$ 表示外部投入辐射中到达颗粒 i 的能量占比,则计算区域内每个颗粒获得的外部投射份额可用下式列向量表示

$$\mathbf{b}_v = [b_v(i)]_{n \times 1} \quad (2)$$

定义 $v_v(i, j)$ 为颗粒 j 发出的辐射中到达颗粒 i 的能量占比,则该颗粒群中颗粒之间的辐射能量的分配可用下式表示

$$\mathbf{v}_v = [v_v(i, j)]_{n \times n} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{b}_v$ 与 $\mathbf{v}_v$ 合称辐射传递矩阵。在给定颗粒群空间构型、粒径和表面吸收率 α 后,该传递矩阵可采用蒙特卡罗法计算获得。其中 $\mathbf{b}_v$ 的计算步骤^[30]为:

①生成发射点。在投射窗口内随机选择发射点,从该发射点发射水平向右的光线。②追踪光线。根据颗粒坐标及半径判断该光线是否逸出颗粒群。若逸出,停止追踪;若投射至颗粒 i ,则生成 $[0, 1]$ 内的均匀随机数 R_a 。若 $R_a < \alpha$,该光束被吸收,停止追踪;若 $R_a > \alpha$,则以该投射点为发射点,在发射点的切线外随机生成发射方向,继续按照步骤②追踪光线。按上述方法在投射窗口随机发射 N_b 束光线,追踪并统计每个颗粒吸收的光线数 $N_{bv}(i)$,则 $b_v(i)$ 可表示为

$$b_v(i) = \frac{N_{bv}(i)}{N_b} \quad (4)$$

与此类似,计算 $\mathbf{v}_v$ 的步骤是:①在颗粒 j 表面随机选择发射点,在该发射点切线外随机选择发射方向。②按照上述 $\mathbf{b}_v$ 计算追踪光线。③从颗粒 j 表面发射 N_v 束光线,追踪并统计到达颗粒 i 的光线数 $N_{vv}(i, j)$,则 $v_v(i, j)$ 可表示为下式

$$v_v(i, j) = \frac{N_{vv}(i, j)}{N_v} \quad (5)$$

对每个颗粒重复上述步骤,即可获得辐射传递矩阵。

1.3 颗粒群温度场

颗粒群中任意颗粒 i 的能量守恒可表示为

$$\rho S_p \frac{dT_p(i)}{dt} = J_b A_b b_v(i) +$$

$$\alpha A_p \sum_{j=1}^n v_v(i, j) E_b(j) - \alpha A_p E_b(i) \quad (6)$$

式中: $A_p = \pi D$; $T_p(i)$ 为颗粒 i 温度; A_b 为外部平行辐射的发出面积; $E_b(i)$ 为黑体温度与颗粒 i 温度同时向外发出辐射的强度。

式(6)中等号左侧为颗粒 i 显热的增加量,右侧依次为颗粒 i 接收到的外部辐射功率、其他颗粒辐射功率和颗粒 i 向外辐射出的功率。由于式(6)包

含了颗粒间的辐射传递,颗粒群温度场演化可用矩阵表示为

$$\rho_p S_p \frac{dT_p}{dt} = J_b A_b \mathbf{b}_v + \alpha A_p (\mathbf{v}_v - \mathbf{I}) \sigma \mathbf{T}_p^4 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{T}_p$ 为所有颗粒温度组成的列向量, $\mathbf{T}_p = [T_p(i)]_{n \times 1}$; $\mathbf{I}$ 为对角线元素均为 1 的单位方阵。采用 Crank-Nicolson 格式离散式(7),可得所有颗粒温度随时间演化的迭代计算式

$$\mathbf{T}_p^{k+1} - \mathbf{T}_p^k = \frac{\Delta t J_b A_b}{\rho_p S_p} \mathbf{b}_v +$$

$$\frac{\Delta t \alpha A_p}{\rho_p S_p} (\mathbf{v}_v - \mathbf{I}) \times \frac{\sigma}{2} ((\mathbf{T}_p^{k+1})^4 + (\mathbf{T}_p^k)^4) \quad (8)$$

1.4 模型的验证

本文计算模型的可靠性可通过与文献[27]对比来验证。文献[27]研究了图3所示由16个颗粒组成的随机构型颗粒群对外部平行辐射的吸收,其中,外部辐射强度为 $920 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,颗粒是直径为 0.6 mm 的氧化铝颗粒。依据本文模型,该颗粒群温度场的演化如图4所示。图5与文献[27]进一步对比了每个颗粒温度的变化,可以看出,所有颗粒温度变化趋势一致。图6表明本文计算结果与文献[27]结果的相对误差小于 $\pm 10\%$,验证了本文模型的可靠性。

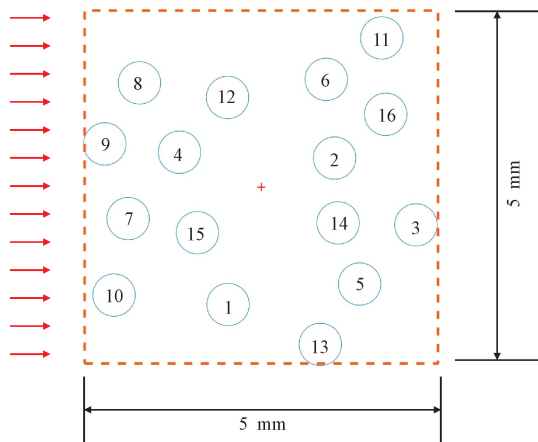


图3 验证所用颗粒群结构^[27]

Fig. 3 Particles group structure for model validation^[27]

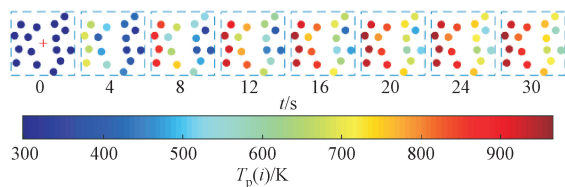


图4 本文模型计算的图3中颗粒群温度场的演化

Fig. 4 Particles temperature evolution of Fig. 3 computed by this model

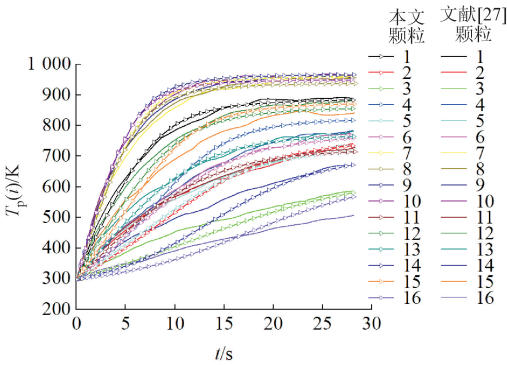


图 5 本文模型与文献[27]模型的颗粒温度计算结果对比
Fig. 5 Comparison of particle temperature calculations between the model in this paper and the model in Ref. [27]

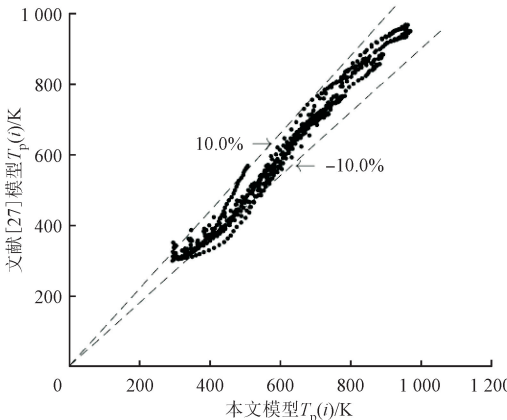


图 6 本文模型与文献[27]模型的颗粒温度计算结果相对误差
Fig. 6 Relative error of particle temperature calculations between the model in this paper and the model in Ref. [27]

1.5 快速吸收段与吸收性能评价

图 7 对比了外部投入辐射 J_b 为 50 kW/m^{-2} 、颗粒粒径 D 为 0.5 mm 、颗粒表面吸收率 α 为 1 时不同构型颗粒群温度场的演化。可以看出,位于入射窗口的颗粒迅速升温,并以自发辐射的形式加热背光侧颗粒,使外部辐射能量逐渐传递至颗粒群内部,但不同构型、不同位置处的颗粒升温过程不同。因此,本文采用颗粒群平均温度 T_{pm} 来描述其总体升温过程,表达式如下

$$T_{\text{pm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_p(i) \tag{9}$$

选用图 7 中的棋盘交错型颗粒群及其所有计算条件,得到 T_{pm} 随时间的变化如图 8 所示。随时间的增加, T_{pm} 先陡增后缓增,并逐渐趋于定值。该定值为颗粒群平均温度的理论平衡值 T_{pt} ,是颗粒群吸热温度的理论上限。

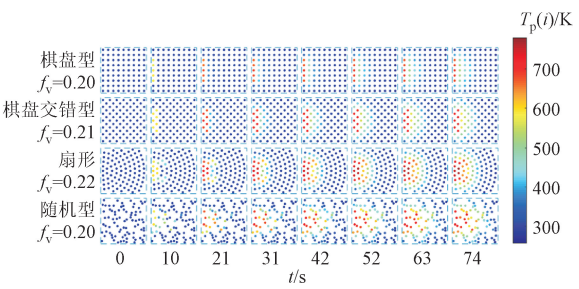


图 7 不同构型下颗粒群温度场的演化
Fig. 7 Particle temperature evolution under different structures of particles

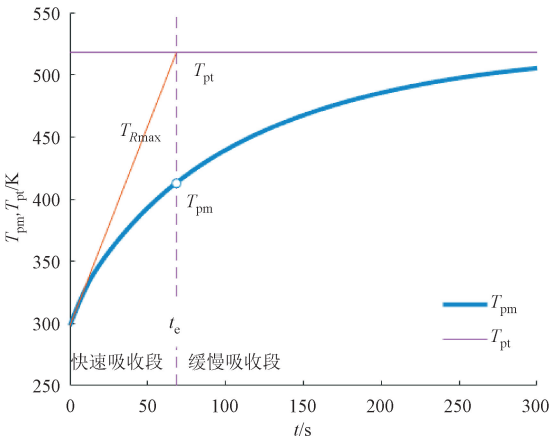


图 8 颗粒群平均温度演化及相关概念
Fig. 8 Average temperature of particle groups and corresponding definitions

当颗粒群温度稳定时,式(7)右端为 0,即满足

$$J_b A_b \mathbf{b}_v + \alpha A_p (\mathbf{v}_v - \mathbf{I}) \sigma T_p^4 = 0 \tag{10}$$

由此解得每个颗粒稳态温度,则 T_{pt} 可表示为

$$T_{\text{pt}} = \left(\frac{J_b A_b}{\alpha A_p} (\mathbf{I} - \mathbf{v}_v)^{-1} \mathbf{b}_v \right)^{1/4}_{n \times 1} \tag{11}$$

$$T_{\text{pt}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{pt}}(i) \tag{12}$$

式(11)(12)指出 T_{pt} 依赖于外部辐射、颗粒群几何参数及辐射物性,而与颗粒密度、比热容等热物性无关。

由图 8 可以看出,根据 T_{pm} 升高速率的快慢将颗粒群对热辐射的吸收过程分为快速吸收段和缓慢吸收段。两个阶段的界点定义如下:计算每个时刻颗粒群平均温度 T_{pm} 升高速率 T_R ,并找出最大值 $T_{R\text{max}}$ 。作 $T_{R\text{max}}$ 对应时刻的切线,该切线与理论平衡温度 T_{pt} 点所对应的时刻即为界点 t_e , T_R 表达式为

$$T_R = \frac{dT_{\text{pm}}}{dt} \tag{13}$$

以快速吸收段为研究对象,通过定义颗粒群吸热时间 Δt 、颗粒群实际平衡温度 T_{pr} 、理论平衡温度 T_{pt} 3 组指标衡量颗粒群对外部辐射的吸收性能。

颗粒群吸热时间 Δt 衡量了吸热的快慢

$$\Delta t = t_e \tag{14}$$

颗粒群实际平衡温度 T_{pr} 表征了颗粒群在快速吸热段内的实际储热品位

$$T_{pr} = T_{pm}(t_e) \tag{15}$$

此外,式(12)定义的理论平衡温度 T_{pt} 表征了颗粒群最大储热潜力。

颗粒群实际平衡温度 T_{pr} 为快速吸收段内颗粒群显热的增量与外部投入辐射能量之比,表达式如下

$$\alpha_{pas} = \frac{\sum_{i=1}^N m_{pa} c_p \Delta T_p(i)}{J_b A_b \Delta t} \tag{16}$$

式中: α_{pas} 衡量了快速吸收段内颗粒群对外部辐射的利用率。结合式(1)~(9), α_{pas} 亦可表示为

$$\alpha_{pas} = \frac{\rho S_{cd} f_v (T_r - T_0)}{J_b A_b \Delta t} \tag{17}$$

若将颗粒群视为整体,以平均温度 T_{pm} 表征其显热,则其能量守恒可表示为

$$\rho S_{cd} f_v \frac{dT_{pm}}{dt} = J_b A_b r_{bv} - \sum_{j=1}^n ((A_p \alpha E_b(j)) (1 - \sum_{i=1}^n v_v(i,j))) \tag{18}$$

式中: r_{bv} 为颗粒群对外部辐射的受辐比,即表示外部辐射能量中被颗粒群表面吸收的比例, $r_{bv} = \sum_{i=1}^n b_v(i)$ 。 r_{bv} 仅依赖于颗粒群几何构型,与外部辐射和时间无关。在此基础上,定义颗粒群自发辐射散逸率 r_{es} ,表达式如下

$$r_{es}(t) = \frac{\alpha A_p \sum_{j=1}^n (E_b(j) (1 - \sum_{i=1}^n v_v(i,j)))}{J_b A_b \sum_{i=1}^n b_v(i)} \tag{19}$$

式中: r_{es} 衡量了颗粒群散失到外部空间的自发辐射与其所能吸收的外部辐射之比。显然,在给定外部辐射与颗粒群几何参数下, r_{es} 还依赖于每个颗粒的温度,即 r_{es} 亦是时间 t 的函数。

将式(19)代入式(18),可得 T_{pm} 的控制方程为

$$\frac{dT_{pm}}{dt} = \frac{J_b A_b r_{bv}}{\rho S_{cd} f_v} (1 - r_{es}(t)) \tag{20}$$

在快速吸收段 $[0, t_e]$ 内积分式(20),则实际平

衡温度 T_{pr} 可表示为

$$T_{pr} = T_0 + \frac{J_b A_b r_{bv}}{\rho S_{cd} f_v} \Delta t (1 - r_{es,m}) \tag{21}$$

式中: $r_{es,m}$ 是在快速吸收段内颗粒群自发辐射的平均散逸率, $r_{es,m} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{t_e} r_{es}(t) dt$ 。将式(21)代入式(17), α_{pas} 可表示为

$$\alpha_{pas} = r_{bv} (1 - r_{es,m}) \tag{22}$$

再将式(22)代入式(21), T_{pr} 亦可用 α_{pas} 表示为

$$T_{pr} = T_0 + \frac{J_b A_b}{\rho S_{cd} f_v} \frac{\Delta t}{\alpha_{pas}} \tag{23}$$

在后续讨论 α_{pas} 与 T_{pr} 变化规律时更为方便。

2 结果与讨论

本文的主要参数取值范围见表 2,根据上述模型,对平行热辐射投射下颗粒群温度场的演化与吸收性能开展计算和分析。

表 2 本文主要参数取值范围

Table 2 The ranges of parameters in this study

参数	取值范围
投射辐射功率 $J_b/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	20~150
颗粒粒径 D/mm	0.1~1.0
体积分数 f_v	0~1.0
颗粒密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3 000
颗粒比热容 $c/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.0
颗粒表面吸收率 α	0.1~1.0
颗粒温度 $T_p(i)/\text{K}$	200~1 000
环境温度 T/K	297

2.1 外部辐射强度与表面吸收率的影响

外部辐射强度由平行投入热辐射的热流密度 J_b 表征,单颗粒对外部辐射的吸收能力可由颗粒表面吸收率 α 衡量。图 9 是颗粒粒径 D 为 0.8 mm、表面吸收率 α 为 0.9、体积分数 f_v 为 0.39 时棋盘交错型

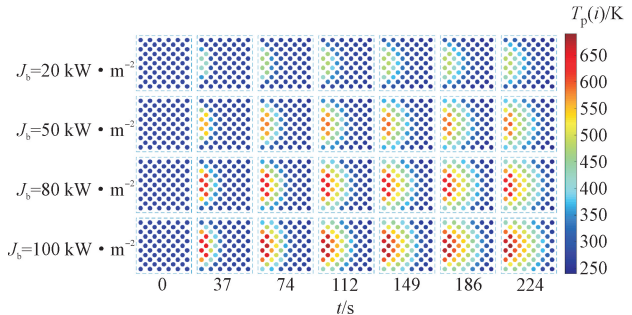


图 9 不同外部辐射强度下颗粒群温度场的演化
Fig. 9 Particles temperature evolution under different external irradiation fluxes

颗粒群在不同外部投入辐射 J_b 下的温度场演化;图 10 是颗粒粒径 D 为 0.5 mm 、外部投入辐射 J_b 为 50 kW/m^2 、体积分数 f_v 为 0.22 时扇型颗粒群在不同表面吸收率 α 下的温度场演化。可以看出:暴露在投射窗口的颗粒最先升温,随着时间的推移,升温颗粒数增多,范围逐渐向背光侧拓展。相同时刻下, J_b 或 α 的增大均可使颗粒群升温显著,且升温颗粒范围扩大。

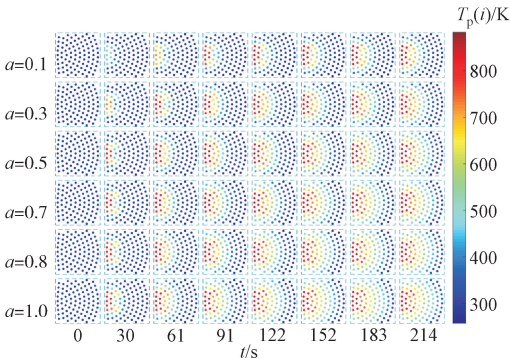


图 10 不同表面吸收率下颗粒群温度场的演化
Fig. 10 Particles temperature evolution under different surface absorptivities

图 11~图 14 中以颗粒粒径 D 为 0.8 mm 、体积分数 f_v 为 0.39 的棋盘交错型颗粒群为讨论对象。图 11 ~ 图 13 分别对比了不同 J_b 下,颗粒群吸收性能随颗粒表面吸收率 α 的变化。由图 11 可以看出,给定 J_b ,随着 α 的增大理论平衡温度 T_{pt} 增大;当 α 一定时,使得 T_{pt} 随 J_b 的增大而增大,但增幅逐渐减小。由图 12 可以看出,随着 α 或 J_b 的增大,吸热时间 Δt 均减小,但降幅逐渐缩小。因此,提高颗粒表面吸收率或外部辐射功率均可增大颗粒群储热潜力,加快吸收速率。

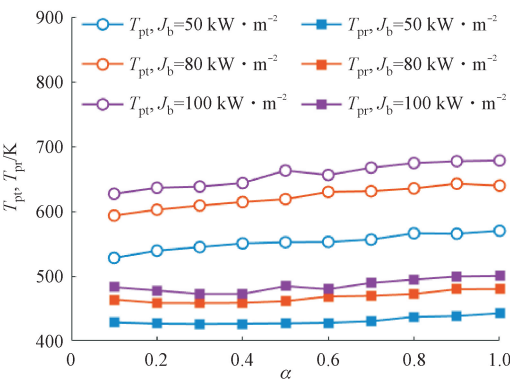


图 11 不同外部辐射强度下颗粒群理论与实际平衡温度随颗粒表面吸收率的变化
Fig. 11 Theoretical and actual equilibrium temperature versus surface absorptivity under different external irradiation fluxes

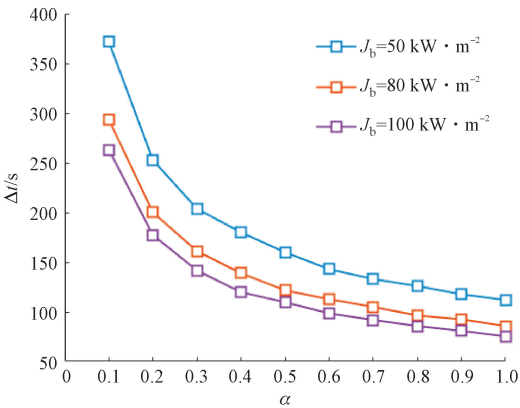


图 12 不同外部辐射强度下吸热时间随颗粒表面吸收率的变化
Fig. 12 Duration of absorption versus surface absorptivity under different external irradiation fluxes

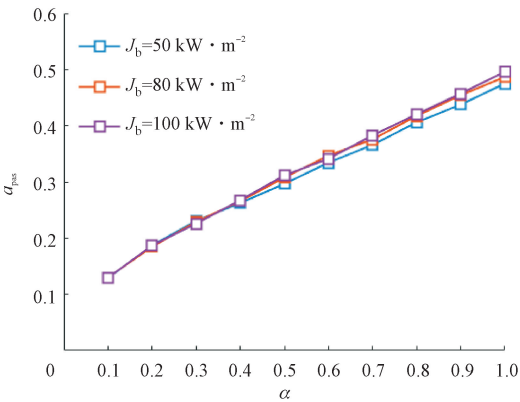


图 13 不同外部辐射强度下颗粒群总体吸收率随表面吸收率的变化
Fig. 13 Overall absorptivity of particle groups versus surface absorptivity under different external irradiation fluxes

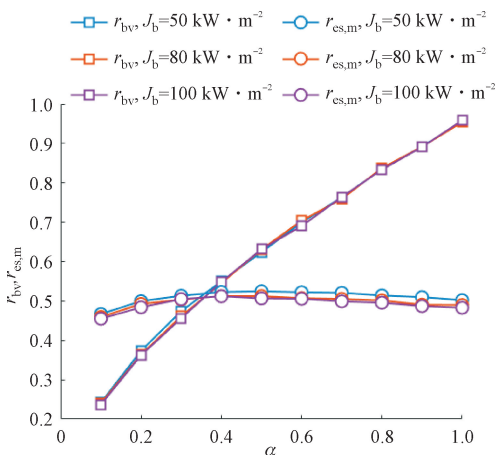


图 14 不同外部辐射强度下颗粒群对外部辐射受辐比与自发辐射散逸率随颗粒表面吸收率的变化
Fig. 14 Acceptance rate and dissipative rate versus surface absorptivity under different external irradiation fluxes

图 13 中颗粒群总体吸收率 α_{pas} 随 α 近似直线增大,而随 J_b 无明显变化。该结果可结合图 14 所示的颗粒群对外部辐射受辐比 r_{bv} 与自发辐射平均散逸率 $r_{\text{es,m}}$ 解释:在给定颗粒群几何参数下提高 α ,增大了到达颗粒表面的外部光线被吸收的概率,使得 r_{bv} 增大;颗粒表面吸收率 α 等于发射率,提高 α 意味着自发辐射功率也同步增大,使得 $r_{\text{es,m}}$ 随 α 变化不大。由式(22)可知,该变化规律使得 α_{pas} 随 α 增大。在棋盘交错构型下,增大颗粒表面吸收率主要是通过提高受辐比实现了对总体吸收率的改善。由 r_{bv} 的计算及图 14 均可以看出, r_{bv} 与外部辐射功率 J_b 无关。相同 α 下,随着 J_b 的增大颗粒群升温显著,其自发辐射功率亦相应增大。由式(19)可知 $r_{\text{es,m}}$ 与 J_b^{-1} 相关,这使得 $r_{\text{es,m}}$ 随 J_b 无明显变化。根据上述规律, r_{bv} 、 $r_{\text{es,m}}$ 与 J_b 无关,结合式(22), α_{pas} 是 r_{bv} 与 $r_{\text{es,m}}$ 的函数,因此 α_{pas} 与 J_b 无关。

由图 11 可知,颗粒群实际平衡温度 T_{pr} 随 α 变化不大,但随 J_b 的增大升高。式(23)与前述规律表明,给定 J_b ,随着 α 的增大, α_{pas} 增大的同时吸热时间 Δt 迅速减小,两者对 T_{pr} 的影响基本抵消,导致 T_{pr} 随 α 变化不大;相同 α 时, J_b 增大的同时 α_{pas} 不变, Δt 迅速减小并趋于稳定,使得 T_{pr} 逐渐增大。因此,给定几何参数下,颗粒群实际储热品位主要依赖于外部辐射热流密度,而对外部辐射的利用率主要取决于颗粒表面吸收率。

2.2 粒径与体积分数的影响

图 15 为颗粒粒径 D 为 0.5 mm、表面吸收率 α 为 0.8、外部投入辐射 J_b 为 50 kW/m² 时棋盘交错型颗粒群在不同体积分数 f_v 下的温度场演化;图 16 为外部投入辐射 J_b 为 50 kW/m²、表面吸收率 α 为

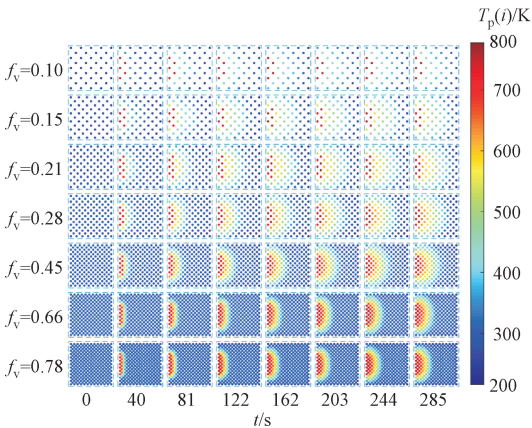


图 15 不同体积分数下颗粒群温度场的演化

Fig. 15 Particle temperature evolution under different volume fraction

0.8 时棋盘交错型颗粒群在不同颗粒粒径 D 和体积分数 f_v 下的温度场演化。其中温度场随时间的变化规律与前述一致。相同吸热时间下:随着 f_v 增大或 D 减小,升温颗粒的范围迅速减小。这说明增大颗粒浓度或减小粒径均可抑制外部辐射向颗粒群内部传输。

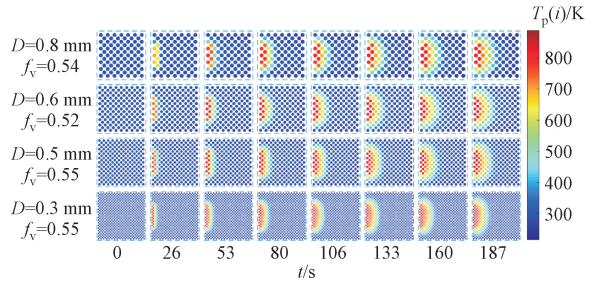


图 16 不同粒径下颗粒群温度场的演化

Fig. 16 Particles temperature evolution under different diameters

图 17~图 20 以受到外部投入辐射 J_b 为 50 kW/m²、颗粒表面吸收率 α 为 0.8 的棋盘交错型颗粒群为讨论对象。图 17~图 19 对比了不同粒径下颗粒群吸收性能随体积分数 f_v 的变化。由图 17 可以看出,相同粒径下,颗粒群理论平衡温度 T_{pt} 随 f_v 的增大先迅速增大,而后逐渐稳定。 f_v 一定时, T_{pt} 随粒径的增大略有升高。图 18 指出颗粒群吸热时间 Δt 与 f_v 成正比,与粒径无关。这说明在给定构型下,颗粒群的储热潜力与吸热速率均无法通过改变颗粒粒径调节。

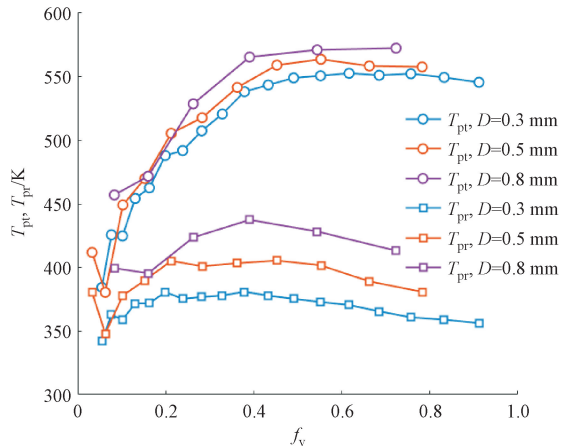


图 17 不同粒径下颗粒群理论与实际平衡温度随体积分数的变化

Fig. 17 Theoretical and actual equilibrium temperature of particle groups versus volume fraction under different particle diameters

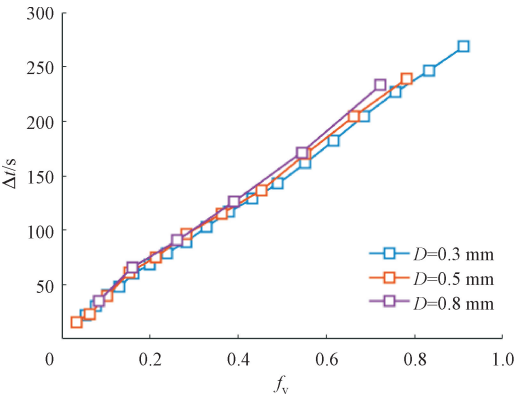


图 18 不同粒径下吸热时间随体积分数的变化
Fig. 18 Duration of absorption versus volume fraction under different particle diameters

图 19 指出颗粒群总体吸收率 α_{pas} 随粒径的增大而增大,而随 f_v 的增大有峰值存在。该结果可由图 20 所示的 r_{bv} 与 $r_{\text{es,m}}$ 的变化规律解释:棋盘交错构型下,无论颗粒粒径大小, f_v 的增大都会导致入射窗口逐渐被全部遮挡,即入射光线均可到达颗粒表面,这使得 r_{bv} 随 f_v 的增大迅速升高并趋于定值,且该变化规律与粒径无关。颗粒群自发辐射的多少与其总表面积正相关,该总表面积可由 f_v 的定义式(1)变形整理为

$$\sum A_{\text{pas}} = \frac{4f_v A_{\text{cd}}}{D} \tag{24}$$

式(24)说明 f_v 的增大可使颗粒群总表面积直线增大,意味着增大了颗粒群自发辐射的散逸几率,导致 $r_{\text{es,m}}$ 随之升高。结合式(22), r_{bv} 与 $r_{\text{es,m}}$ 的上述变化规律使 α_{pas} 随 f_v 增大有峰值存在。相同 f_v 下,由图 20 可以看出, r_{bv} 与粒径无关;而式(24)表明颗粒群的总表面积随粒径的增大而减小,从而抑制了自发辐射的逸出,使得图 20 中 $r_{\text{es,m}}$ 随粒径的增大而减小,二者的变化规律使得图 19 中 α_{pas} 随粒径增大

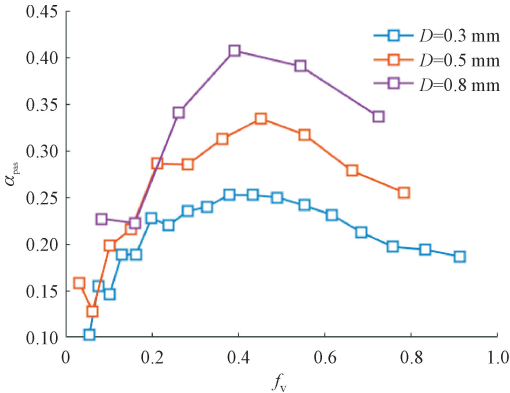


图 19 不同粒径下总体吸收率随体积分数的变化
Fig. 19 Overall absorptivity versus volume fraction under different particle diameters

而升高。这说明增大粒径是通过抑制自发辐射散逸来提高颗粒群总体吸收效率的。

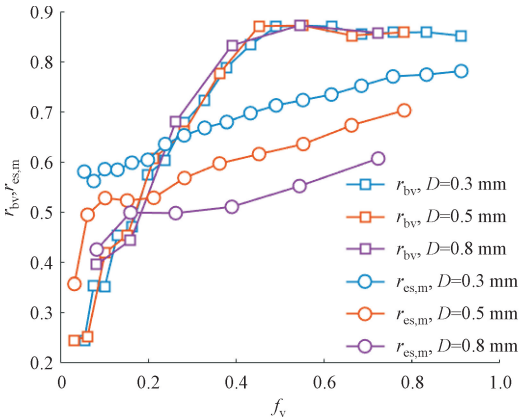


图 20 不同粒径下颗粒群所受投射率与自发辐射散逸率随体积分数的变化
Fig. 20 Acceptance rate and dissipative rate versus surface absorptivity under different particles diameters

图 17 指出颗粒群实际平衡温度 T_{pr} 亦随粒径的增大而增大,而随 f_v 的增大有峰值存在。前述讨论指出 Δt 与 f_v 成正比,由式(23)可知两者对 T_{pr} 的影响可约去,使得 T_{pr} 与 α_{pas} 随 f_v 和粒径的变化规律相似。上述结果说明:增大颗粒粒径有助于提高颗粒群实际储热的品位和吸收效率;对于棋盘交错构型,一味地提高 f_v 并不能改善颗粒群的吸收性能。

2.3 空间构型的影响

图 21~图 24 以受到外部投入辐射 J_b 为 50 kW/m^2 、颗粒粒径 D 为 0.5 mm 、表面吸收率 α 为 0.8 的 4 种构型的颗粒群为讨论对象。不同构型下颗粒群温度场的演化已在图 7 中展示。相同时刻下,扇型与随机型下升温最显著、升温颗粒范围最大;棋盘型则最小。图 21~图 24 对比了不同构型下颗粒群吸收性能随体积分数 f_v 的变化。图 21 表明颗粒群吸热时间 Δt 与空间构型无关,而与 f_v 近似呈正比。

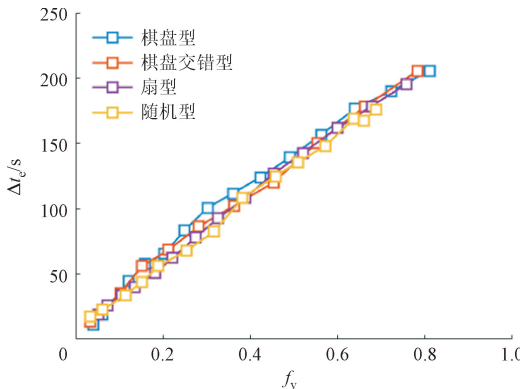


图 21 不同构型下吸热时间随体积分数的变化
Fig. 21 Duration of absorption versus volume fraction under different structures of particles

图 22 表明, 棋盘型下颗粒群总体吸收率 α_{pas} 随 f_v 的增大单调增大, 而其他构型下 α_{pas} 随 f_v 的增大均有峰值存在; 相同 f_v 下, 扇型与随机型下的 α_{pas} 最高, 棋盘型下 α_{pas} 最低。该结果可由图 23 所示的 r_{bv} 与 $r_{\text{es,m}}$ 的变化规律解释: 不同构型的 r_{bv} 取决于该构型对入射通路的遮挡程度。随着 f_v 的增大, 棋盘构型下入射通路始终存在缝隙, 即外部辐射总能透射出计算区域, 而其他构型下入射窗口均逐渐被全部遮挡。该结构特征导致图 23 中相同 f_v 下, 扇型与随机型 r_{bv} 最高, 棋盘型最低。随 f_v 的增大, 棋盘型下 r_{bv} 单调升高, 而其他构型下 r_{bv} 均迅速升高并达到稳定值。图 23 指出不同构型下 $r_{\text{es,m}}$ 随 f_v 的增大略有升高; 而相同 f_v 下, 扇型与随机型的 $r_{\text{es,m}}$ 最小, 棋盘型最大。采用扇型或随机构型有利于抑制颗粒群自发辐射的逸出。结合式(22), r_{bv} 与 $r_{\text{es,m}}$ 的上述变化规律使得棋盘型下 α_{pas} 随 f_v 增大单调增大, 而其他构型下 α_{pas} 均有峰值存在。此外, 图 23 亦可以看出, f_v 的增大均在强化对外部辐射吸收的同时不可避免地增大了自发辐射的逸出。空间构型的差别体现在改变颗粒浓度对吸收和逸出影响的相对强弱不同。随机构型具有较高吸收率的结论也降低了粒子式吸收器中对颗粒布局的要求。

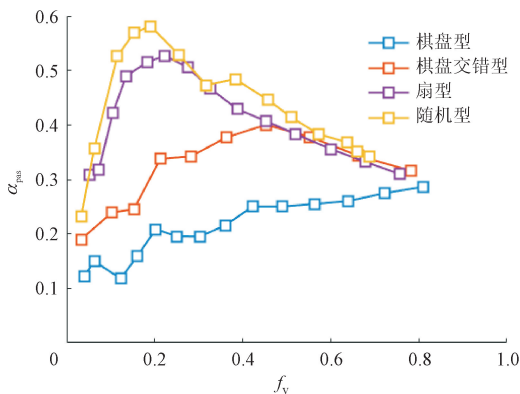


图 22 不同构型下总体吸收率随体积分数的变化

Fig. 22 Overall absorptivity versus volume fraction under different structures of particles

根据式(23)及前述 Δt 与 f_v 近似呈正比的结论可知, 不同构型下颗粒群的实际平衡温度 T_{pr} 与 α_{pas} 的变化规律相似, 如图 24 所示。

上述结果说明颗粒群空间构型可显著影响储热品质与吸热效率, 现有构型中, 扇型与随机型下最高 T_{pr} 与 α_{pas} 对应的 f_v 最小, 说明这两种构型下用较小颗粒浓度即可实现对入射辐射的高效、高品质吸收, 是实际应用中理想的构型选择。

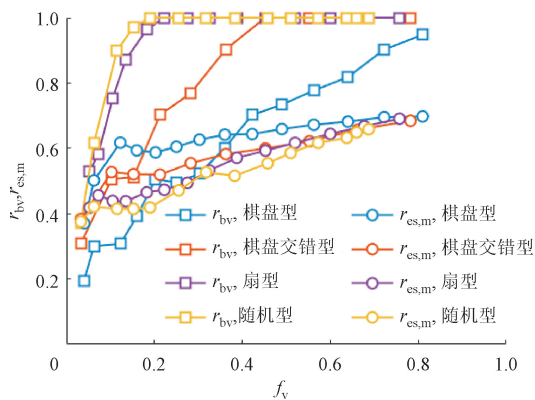


图 23 不同构型下颗粒群所受投射率与自发辐射散逸率随体积分数的变化

Fig. 23 Acceptance rate and dissipative rate versus surface absorptivity under different structures of particles

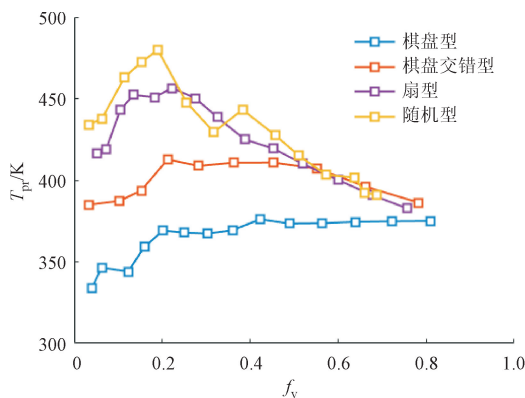


图 24 不同构型下颗粒群实际平衡温度随体积分数的变化

Fig. 24 Actual equilibrium temperature of particle groups versus volume fraction under different particles structures

2.4 总体吸收率的经验关联式

根据计算结果及上述规律, 针对颗粒群对外部投射的受辐比与自发辐射散逸率提出经验关联式, 如下式

$$r_{\text{bv,cal}} = (0.817\alpha + 0.211)\exp(1 - C_1 f_v) \quad (25)$$

$$r_{\text{es,m,cal}} = C_2 f_v^{0.195} \left(\frac{l_{\text{cd}}}{2D} \right)^{C_3} \quad (26)$$

其中不同构型下式(25)(26)中的系数见表 3。据此, 颗粒群总体吸收率亦可由下式估算

$$\alpha_{\text{pas,cal}} = r_{\text{bv,cal}}(1 - r_{\text{es,m,cal}}) \quad (27)$$

图 25 指出, 本文研究范围内式(27)与定义式(16)计算值的相对误差主体位于 $\pm 15\%$, 验证了该组关联式(25)、(26)的可靠性。由关联式(25)、(26)可知, 颗粒群总体吸收率不仅是颗粒粒径与体积分数的函数, 还依赖于颗粒群的空间构型。实际运行中,

可根据粒子式吸收器的类型和运行方式调控颗粒群空间构型,如调节颗粒入口通道、填充导流装置等。因此,在实际运行中,通过改变颗粒构型进行变工况时可参考式(25)~(27)调节颗粒粒径和体积分数以获得颗粒群辐射吸收能力最大化。

表 3 不同构型下式(25)和(26)中的系数
Table 3 Coefficients in Eq. (25) and (26) under different particle structures

构型	C_1	C_2	C_3
棋盘型	-2.51	0.476	-0.228
棋盘交错型	-5.93	0.365	-0.283
扇型	-14.71	0.305	-0.351

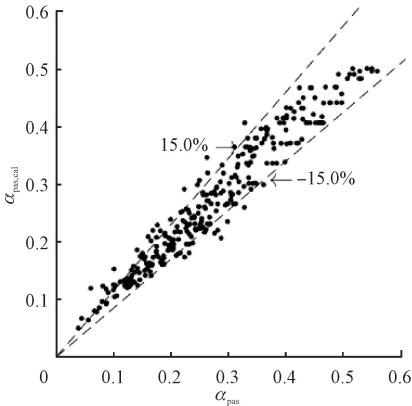


图 25 总体吸收率经验关联式(27)与定义式(16)计算值的相对误差
Fig. 25 Relative error of overall absorptivity between Eq. (27) and definition equation of Eq. (16)

3 结 论

本文基于蒙特卡罗法,在表 2 所示的范围内研究了平行热辐射投射下静止颗粒群的温度场演化与吸收性能,主要结论如下。

- (1) 根据颗粒群平均温度的演化将吸收分为快速与缓慢吸收段,并定义快速吸收段为吸热时间 Δt 。 Δt 与体积分数 f_v 成正比;随外部辐射强度 J_b 或颗粒表面吸收率 α 的增大而缩短,但与粒径、空间构型无关。
- (2) 颗粒群实际平衡温度 T_{pr} 和总体吸收率 α_{pas} 分别衡量了其储热品质与对外部辐射的利用率。对给定颗粒群, T_{pr} 主要依赖于 J_b ; α_{pas} 主要取决于 α 。给定颗粒群空间构型下, T_{pr} 与 α_{pas} 均与颗粒粒径正相关,且随 f_v 的增大变化规律相似。
- (3) 不同空间构型下, f_v 的增大均在强化对外

部辐射吸收的同时不可避免地增大了自发辐射的逸出。不同构型的差异体现在对吸收、逸出强化程度的不同。现有构型中,棋盘交错型、扇型与随机型下的 α_{pas} 均随 f_v 的增大有峰值存在。其中,扇型与随机型下达到最高 T_{pr} 与 α_{pas} 所需的颗粒浓度最小,这两种构型能够降低颗粒投入。

- (4) 根据计算结果,针对颗粒群对外部辐射的受辐比 r_{bv} 、自发辐射的平均散逸率 $r_{es,m}$ 以及总体吸收率 α_{pas} 提出了经验关联式(25)(26),其中 α_{pas} 计算值与其定义式(16) 计算值相对误差小于 15%。
- 本文的研究结论可为粒子式太阳能吸收器的设计和运行提供参考。研究过程中静态颗粒群辐射传递矩阵的计算结果可作为机器学习的训练样本,为动态颗粒群辐射传递的快速计算提供解决方案。

参考文献:

[1] JING Jiaxuan, ZHOU Yong, WANG Lingyu, et al. The spatial distribution of China's solar energy resources and the optimum tilt angle and power generation potential of PV systems [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 283: 116912.

[2] 吴毅,王佳莹,王明坤,等. 基于超临界 CO₂ 布雷顿循环的塔式太阳能集热发电系统 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5):108-113.

WU Yi, WANG Jiaying, WANG Mingkun, et al. A towered solar thermal power plant based on supercritical CO₂, Brayton cycle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5):108-113.

[3] 沈向阳,彭强,杨建平,等. 聚光式太阳能热发电中传热工质的研究现状 [J]. 广东化工, 2011, 38(8): 84-85.

SHEN Xiangyang, PENG Qiang, YANG Jianping, et al. Current status of heat transfer fluid researched for concentrating solar power [J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(8): 84-85.

[4] 马朝,何雅玲,袁帆,等. 高温套管式熔融盐相变蓄热器蓄热性能实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5):1-8.

MA Zhao, HE Yaling, YUAN Fan, et al. Experimental study on the thermal performance of high-temperature shell-and-tube molten salt phase change thermal energy storage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5):108-113.

[5] TAN Taide, CHEN Y. Review of study on solid particle solar receivers [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 265-276.

[6] JIANG Kaijun, DU Xiaoze, ZHANG Qiang, et al. Review on gas-solid fluidized bed particle solar receiver

- ers applied in concentrated solar applications: materials, configurations and methodologies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111479.
- [7] KANG Q, FLAMANT G, DEWIL R, et al. Particles in a circulation loop for solar energy capture and storage [J]. *Particuology*, 2019, 43: 149-156.
- [8] DIAGO M, INIESTA A C, 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.
- [9] BAUMANN T, ZUNFT S. Properties of granular materials as heat transfer and storage medium in CSP application [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 143: 38-47.
- [10] SIEGEL N P, GROSS M D, COURY R. The development of direct absorption and storage media for falling particle solar central receivers [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2015, 137(4): 041003.
- [11] 高妍. 太阳能粒子吸热器传热介质性能研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [12] 刘建峰, 桑丽霞, 王凯音, 等. 超临界二氧化碳太阳能热发电系统中集热蓄热颗粒及其性质研究现状 [J]. *热力发电*, 2020, 49(10): 38-47.
- LIU Jianfeng, SANG Lixia, WANG Kaiyin, et al. Research status of properties of particles as thermal energy storage medium in supercritical carbon dioxide cycle for concentrated solar power [J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(10): 38-47.
- [13] 范有明, 宁练, 时章明, 等. 热线法快速测量微粒导热系数的研究 [J]. *工业计量*, 2006, 16(6): 1-3.
- FAN Youming, NING Lian, SHI Zhangming, et al. Study on quick measurement of thermal conductivity of solid particles with hot wire method [J]. *Industrial Measurement*, 2006, 16(6): 1-3.
- [14] ZHANG Huili, BAEYENS J, CÁCERES G, et al. Thermal energy storage: recent developments and practical aspects [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 53: 1-40.
- [15] 马腾飞. 应用于太阳能光热发电的储热颗粒换热特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [16] 江凯军. 气固逆流式太阳能粒子吸热器流动传热机理与结构优化设计研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [17] 王天健, 白凤武, 杨贝. 太阳能高倍聚光加热条件下单个固体颗粒下落过程传热特性 [J]. *科学通报*, 2016, 61(28): 3172-3180.
- WANG Tianjian, BAI Fengwu, YANG Bei. Heat performance of single falling solid particle under high concentrated solar irradiation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(28): 3172-3180.
- [18] 张生春. 颗粒用于塔式太阳能热发电吸热器研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [19] 王方舟. 塔式太阳能热发电用固体颗粒空气吸热器传热机理研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [20] 石凯. 聚光太阳能颗粒式吸热器性能研究及优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [21] JIANG Kaijun, KONG Yanqiang, XU Chao, et al. Experimental performance of gas-solid countercurrent fluidized bed particle solar receiver with high-density suspension [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118661.
- [22] JIANG Kaijun, TIAN Ziqian, CHEN Sheng, et al. Numerical simulation on gas-solid flow characteristics in a high-density countercurrent fluidized bed particle solar receiver [J]. *Solar Energy*, 2023, 249: 387-400.
- [23] 聂辅亮. 石英玻璃管束式固体颗粒吸热器流动与传热机理研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [24] 苏亚琴, 马韬, 王文婷, 等. 流化床太阳能粒子吸热器内流动传热数值模拟 [J]. *能源化工*, 2022, 43(6): 1-7.
- SU Yaqin, MA Tao, WANG Wenting, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer in a fluidized bed solar particle absorber [J]. *Energy Chemical Industry*, 2022, 43(6): 1-7.
- [25] 苏亚琴. 太阳能流化床粒子吸热器内流动与传热特性研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [26] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [27] WANG Wei, SHUAI Yong, LOUGOU B G, et al. Thermal performance analysis of free-falling solar particle receiver and heat transfer modelling of multiple particles [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 187: 116567.
- [28] GONZÁLEZ-PORTILLO L F, ABBAS R, ALBRECHT K, et al. Analysis of optical properties in particle curtains [J]. *Solar Energy*, 2021, 213: 211-224.
- [29] JOHNSON E F, TARI I, BAKER D. Radiative heat transfer in the discrete element method using distance based approximations [J]. *Powder Technology*, 2021, 380: 164-182.

(编辑 武红江)