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

王天健, 白凤武*, 杨贝

中国科学院电工研究所, 中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室, 北京 100190

* 联系人, E-mail: baifw@mail.iee.ac.cn

2015-11-09 收稿, 2015-11-23 修回, 2015-11-25 接受, 2016-04-27 网络版发表

国家自然科学基金(51376176)资助

摘要 下落式固体颗粒吸热器是指固体颗粒在吸热器中下落, 同时被太阳光辐射加热, 以得到高温固体颗粒. 本文建立了单个固体颗粒下落的模型, 模拟不同直径的固体颗粒在相同条件下自由下落过程, 发现固体颗粒直径较大时, 对流损失和辐射损失更小, 下落高度能够达到的最大温度更高, 所需受热的距离更长. 空气流速对固体颗粒的最终温度没有影响, 但会缩短固体颗粒在达到最终温度时的下落距离. 改变热流密度的大小, 发现固体颗粒所能达到的最终温度升高, 达到最终温度所需的下落距离缩短. 这些结果对下落式固体颗粒吸热器的实验和实际运行具有指导作用.

关键词 太阳能热发电, 下落式固体颗粒吸热器, 单个固体颗粒下落, 数值计算, 温度变化

纵观太阳能利用的发展历史, 人们对太阳能热发电的构想已经有了上百年, 而对太阳能热发电的研究从20世纪50年代开始也已经走过了60年, 一直呈现上升趋势, 强力表现出了其内在的生命力. 太阳能热发电技术拥有其独特的立足点, 具有电能输出稳定和连续、成本低的优点, 技术经济优势明显^[1]. 吸热器是塔式太阳能热发电光热转换的关键部件, 吸热器的效率高低直接决定着塔式太阳能热发电系统发电效率, 进而影响发电成本.

根据吸热过程传热流体的不同, 吸热器通常分为气体吸热器、液体吸热器和固体颗粒吸热器3种^[2]. 对于空气吸热器, 由于气体不能吸收辐射能量, 且单位体积气体的吸热量较小, 这种吸热器可能会由于过热而导致局部失效, 也会因为与温度相关的空气的性质(如黏性、密度等)的不同而导致不稳定性的出现^[3,4]. 多孔介质吸热器也是气体吸热器的一种, 是

在吸热器内部加入固态多孔介质, 增强空气的吸热性能, 但是由于吸热器运行的过程中吸热体不动, 因此不可避免的造成局部过热和空气流动热稳定性差的问题. 液体吸热器所能达到的出口温度较低且工作效率较低, 吸热器对于传热流体的依赖性较强, 一般采用硝酸盐作为传热流体, 工作温度一般低于600℃, 否则会造成硝酸盐的分解^[5,6]. 固体颗粒吸热器最初于20世纪80年代被提出, 由于其具有固体颗粒的优点, 出口温度颗粒达到1000℃以上. 砂状的陶瓷颗粒从腔体吸热器顶端下落, 并被聚光的太阳辐射直接加热. 被加热后的固体颗粒被存储于腔体中作为储热材料, 或者用固体颗粒二次加热工质(如蒸汽、二氧化碳、水等)用作热能循环^[7]. 与其他吸热器相比, 固体颗粒吸热器具有以下优点^[8]: 能够获得更高的温度; 固体颗粒材料便于获取, 价格便宜; 固体颗粒可以作为简单的热量存储系统进行储热; 不用

引用格式: 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. 科学通报, 2016, 61: 3172-3180

Wang T J, Bai F W, Yang B. Heat performance of single falling solid particle under high concentrated solar irradiation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3172-3180, doi: 10.1360/N972015-01254

考虑由于使用熔融盐凝结造成的管道堵塞问题,也不用考虑由于使用空气和蒸汽造成的热量转化效率低的问题;直接加热固体颗粒,而不是管道、空腔,因此不会达到系统无法承担的温度,也不会造成局部过热.本文针对下落式固体颗粒吸热器中的单个固体颗粒自由下落过程中的传热特性进行计算模拟研究,考虑不同直径、不同空气流速和不同热流密度条件下的单个固体颗粒自由下落情形下温度的变化规律,其主要意义在于对下落式固体颗粒吸热器的实验设计和运行提供指导意见.

1 单个固体颗粒下落模型的建立

现假设一固体颗粒自由下落,空气自下向上流动,并接受太阳辐射,如图1所示.

为了便于计算,对该模型做如下假设:(1) 固体颗粒为理想球体,在下落的过程中不考虑空气浮升力对固体颗粒形状的影响;(2) 空气为不可压缩的均匀定常流;(3) 在固体颗粒下落的过程中,假设固体颗粒始终与环境温度的空气进行对流换热,即与固体颗粒接触的空气温度始终不变;(4) 在下落过程中,假设固体颗粒的物性参数不变.

对固体颗粒进行受力分析,受到垂直向下的重力和垂直向上的空气阻力,则该固体颗粒受到的空气阻力计算公式为

$$F = \frac{1}{2} C_d S v_{\text{ref}}^2, \quad (1)$$

其中, F 为空气的摩擦阻力; C_d 为粒子受到空气的阻力系数,球体的阻力系数取为0.5; S 为颗粒在受力方向上的投影面积; $v_{\text{ref}} = v_0 + v_{\text{particle}}$ 为空气与粒子的相对运动速度,其中 v_0 为空气流速, v_{particle} 为颗粒瞬时速度.

则粒子所受到的加速度可以用以下方程表示:

图1 (网络版彩色)单个固体颗粒下落模型示意图

Figure 1 (Color online) Picture of single falling particle model

$$a = g - \frac{C_d S v_{\text{ref}}}{2m}, \quad (2)$$

其中,可以由迭代法求出下落一定高度时所需要的时间 t . 假设该固体颗粒在下落过程中一直吸热,若不考虑该粒子的对外辐射及与空气的对流换热,则单个颗粒在下落0.5 m时所能获得的最大能量为

$$Q = qSt, \quad (3)$$

其中, Q 为粒子所能获得的能量, q 为能流密度.

对于空气的各项参数,采用以下经验公式^[9]:

$$\rho = 3.018 \times e^{-0.00574T} + 0.80763 \times e^{-0.00083817T}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{1.458 \times 10^{-6} T^{\frac{3}{2}}}{T + 110.4}, \quad (5)$$

$$C_p = 1.968 \times 10^{-10} T^4 - 8.332 \times 10^{-7} T^3 + 0.001187 T^2 - 0.4685 T + 1062, \quad (6)$$

$$k = 9.354 \times 10^{-12} T^3 - 4.103 \times 10^{-8} T^2 + 9.986 \times 10^{-5} T + 0.0005786, \quad (7)$$

其中, ρ 为空气密度, η 为空气的黏度, C_p 为空气的定压比热容, k 为空气的热导率.

考虑固体颗粒与空气的对流问题,粒子为理想球体,则采用流体外掠球体的实验结果关联式(8)来确定对流换热过程中的努赛尔特数^[10]:

$$Nu = 2 + \left(0.4 Re^{\frac{1}{2}} + 0.06 Re^{\frac{2}{3}} \right) Pr^{0.4} \left(\frac{\eta_{\infty}}{\eta_w} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (8)$$

其中, Re 为粒子的雷诺数,由公式 $Re = \frac{v_{\text{ref}} D}{\nu}$, ν 为空气的动力黏度, η_{∞} 表示无穷远处空气的黏度, η_w 为贴近粒子处空气的黏度,二者之间的关系可用萨特兰公式表示:

$$\frac{\eta_w}{\eta_{\infty}} = \left(\frac{T}{300} \right)^{1.5} \frac{300 + B}{T + B}. \quad (9)$$

对于空气, B 的取值为110.4 K^[11].

Pr 为空气的普朗特数,对于空气的普朗特数,计算公式为

$$Pr = \frac{\eta C_p}{k}. \quad (10)$$

根据式(8)由计算得到的努赛尔特数计算对流换热系数:

$$h_{\text{con}} = Nu \frac{k}{D}. \quad (11)$$

对于一般的下落式固体颗粒吸热器中所使用的固体颗粒,一般所采用的固体颗粒的直径较小,可以将固体颗粒看成温度均一的整体,由此可以计算得到对流造成的热量损失为

$$Q_{\text{loss1}} = \int_0^t h_{\text{con}} A (T_p - T_w) dt, \quad (12)$$

其中, A 为固体颗粒对流换热的面积, 取为半个球面; T_p 为粒子温度, T_w 为贴近颗粒处空气温度.

考虑固体颗粒与外界的辐射换热的问题, 假设所选取的固体颗粒的发射率 ε 为 0.85, 计算辐射换热系数为

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_p^2 + T_\infty^2) (T_p + T_\infty), \quad (13)$$

计算得到辐射造成的热损失为

$$Q_{\text{loss2}} = \int_0^t h_{\text{rad}} A' (T_p - T_\infty) dt, \quad (14)$$

其中, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$, A' 为颗粒的表面积, T_∞ 为环境温度.

对于单个固体颗粒, 计算其温度变化, 根据定比热容吸热公式:

$$Q - Q_{\text{loss1}} - Q_{\text{loss2}} = C'_p m (T_p - T_0), \quad (15)$$

整理可得

$$\begin{aligned} qSt - \int_0^t hA(T_p - T_w)dt - \int_0^t \varepsilon \sigma A'(T_p^4 - T_\infty^4)dt \\ = C'_p m (T_p - T_0), \end{aligned} \quad (16)$$

其中, C'_p 为固体颗粒的比热容, $m = \rho V$ 为颗粒质量, ρ 为

固体颗粒密度, T_0 为固体颗粒的初始温度.

为了保险起见, 若将固体颗粒看成均一的整体, 考虑内部热阻和外部热阻的关系, 需要计算固体颗粒的毕渥数. 计算颗粒在下落过程中的毕渥数定义:

$$Bi = \frac{(h_{\text{con}} + h_{\text{rad}})L}{\lambda_p}, \quad (17)$$

其中, λ_p 为固体颗粒的导热系数, L 为固体颗粒的特征长度, 这里取固体颗粒的直径.

在以下的计算过程中, 固体颗粒的毕渥数均小于 0.1, 符合集总热容法的使用条件, 可以将固体看成温度均一的整体^[12].

2 文献对比结果

将单个固体颗粒下落温度的计算值与文献[13]中的数据进行对比, Grena^[13]所采用直径为 0.8 和 0.4 mm 的固体颗粒, 固体颗粒所接受的太阳辐射为 $920 \text{ kW}/\text{m}^2$, 在固体颗粒的初始温度为 300 K, 外界环境温度为 273.15 K, 与固体颗粒直接换热处的空气温度为 573.15 K. 固体颗粒的密度为 $3900 \text{ kg}/\text{m}^3$, 导热系数为 $6.67 \text{ W}/(\text{m K})$, 发射率为 0.8, 固体颗粒的比热容为 $1285 \text{ J}/(\text{kg K})$. 文献[13]中没有直观的数据呈现, 本文中所采用的数据来源于该文献中的图表. 计算对比的结果如图2所示.

从图2中可以看出, 计算得到的直径为 0.8 和 0.4 mm 的固体颗粒在下落过程中不同高度处的温度

图2 直径为 0.4 和 0.8 mm 的固体颗粒在下落的不同高度处温度与文献[13]比较

Figure 2 The temperature of different heights with the diameters of 0.4 and 0.8 mm in comparison with ref. [13]

与文献[13]中所展现的固体颗粒的温度均较为吻合,温度差距在5%以内,因此,可以验证模型的正确性。

3 固体颗粒的温度随颗粒直径的变化

对于目前小型太阳能吸热器的设计,一般的设计高度为0.5 m,在这里以0.5 m为例,假定不同直径的固体颗粒自上而下下落0.5 m高度,空气自下而上以1 m/s的速度流动,接受能流密度为600 kW/m²的能量,空气、粒子的入口温度、贴近粒子处空气温度以及环境温度均为300 K,选取固体颗粒为碳化硅颗粒,固体颗粒的密度为2300 kg/m³,导热系数为5.0 W/(m K),发射率为0.85^[14],固体颗粒的比热容满足:

$$C_p' = -7.309 \times 10^{-4} T^2 + 1.608T + 372.4. \quad (18)$$

由以上条件计算得到不同直径的固体颗粒在下落0.5 m的过程中能够达到的最终温度以及固体颗粒的对流损失、辐射损失和吸收能量百分比如图3所示。

从图3中可以看到,在同样下落0.5 m高度的前提下,由于固体颗粒的直径减小时,颗粒的下落时间增长,受到的辐射时间增长,会得到较高的温度;但当固体颗粒直径较小时,固体颗粒的对流损失将会大大增加,将严重影响固体颗粒所能吸收的能量的占比。随着固体颗粒直径的减小,由于对流换热系数增大,造成了颗粒的对流损失增大;而由于粒子直径减小时粒子质量减小,因此当固体颗粒直径减小时粒子温度有上升的趋势;而当粒子温度上升的同时,也会造成粒子对流和辐射损失的增加。从能量利用的角度来说,我们希望粒子吸收的能量越多越好,要求颗粒直径越大越好;而如果颗粒直径过大,粒子在下落相同高度所能达到的最终温度较低,不能满足在实际应用中要获得较高的粒子温度的条件。因此在实际的下落式固体颗粒吸热器的实验和实际运行时,选择合适直径的固体颗粒是十分必要的。

图3 不同直径的单个粒子在下落0.5 m过程中的能量和温度变化
Figure 3 Energy and temperature variation of single particle in different diameters when falling 0.5 m

假定固体颗粒在下落的过程中下落距离为无限大,选取直径为1, 0.5, 0.3, 0.2和0.1 mm的固体颗粒,若空气自下而上以1 m/s的速度流动,接受能流密度为600 kW/m²的能量,空气、粒子的入口温度、贴近粒子处空气温度以及环境温度均为300 K,固体颗粒的物性参数不变。计算得到不同直径的固体颗粒在下落过程中所能达到的温度最大值、速度最大值和速度稳定值,以及在达到这些数值时固体颗粒下落的距离如表1所示。

从表1中可以看出,对于固体颗粒的下落,不是受热时间越久、下落时间越长粒子能够得到温度越高。当固体颗粒直径较小时,固体颗粒从开始下落到一定阶段,固体颗粒随着下落时间的增加温度在不断升高;当固体颗粒继续下落时,由于固体颗粒受到的空气阻力小于重力,此时固体颗粒的速度增加,固体颗粒所受到的对流损失会增大,此后固体颗粒温度降低。以直径为0.1 mm的固体颗粒为例,当固体颗粒自上而下下落的过程中,在前0.12 m的下落过程中,固体颗粒受热温度上升,最高温度可以达到

表1 不同直径下固体颗粒所能达到温度的最大值、速度的最大值和温度的稳定值

Table 1 The maxium temperature, maxium velocity and stable temperature of single particle in different diameters

直径D (mm)	温度最大值 (K)	达到温度最大值时下落 距离(m)	速度最大值 (m/s)	达到速度最大值时下落 距离(m)	温度稳定值 (K)	达到温度稳定值时下落 距离(m)
1	949.4	79.52	6.75	17.86	949.4	79.52
0.5	823.5	19.67	4.48	8.27	823.5	19.67
0.3	733.3	3.68	3.25	4.57	722.2	6.54
0.2	647.5	0.92	2.47	2.80	645.4	3.30
0.1	538.1	0.12	1.45	1.53	533.0	1.76

538.1 K; 此后, 随着固体颗粒速度的增大, 固体颗粒所受到的对流损失增大, 固体颗粒的温度逐渐降低. 当固体颗粒下落至0.5 m时, 固体颗粒达到的温度为533.8 K. 因此在实际的下落式固体颗粒吸热器的实验和实际运行过程中, 对于特定直径的固体颗粒, 选择合适长度的下落距离不仅可以降低成本, 还可以得到更高的出口温度.

从表1中同样可以发现, 在固体颗粒下落的过程中, 若假定固体颗粒下落的距离为无限长, 同时在下落过程中不断受热, 固体颗粒的温度可以达到稳定值. 随着固体颗粒直径的减小, 固体颗粒所能达到的温度的最大值也在减小, 达到温度最大值所需的下落距离也在减小, 并且减小的幅度非常大. 在下落过程中, 当固体颗粒直径较大时, 固体颗粒的速度先达到最大值, 随后固体颗粒的温度达到最大值; 当固体颗粒直径较小时, 固体颗粒的温度先达到最大值, 随后固体颗粒的速度达到最大值. 若在下落过程中, 固体颗粒速度先达到最大值, 那么在继续下落过程中固体颗粒的对流损失和辐射损失仅与固体颗粒的温度有关, 固体颗粒的温度在达到稳定值之前一直处于上升的趋势, 如图4所示; 若在下落过程中, 若固体颗粒温度先达到最大值, 那么在继续下落的过程中随着固体颗粒速度的增大, 固体颗粒的对流损失会增大, 温度随后会下降而达到一个稳定值, 因此固体颗粒的温度会有一个先上升后下降的趋势, 如图5所示.

对于上述计算过程, 对固体颗粒的 Bi 进行核算, 计算得到下落至不同高度不同直径的固体颗粒的 Bi 数值如表2所示.

从表2中可以看到, 在其他条件相同时, 固体颗粒越大, 下落高度越高, 固体颗粒的 Bi 越大. 在之前的计算中, 直径为3 mm的固体颗粒在下落至0.5 m处时固体颗粒的 Bi 最大, 最大值达到0.088.

4 固体颗粒温度随空气流速的变化

假定固体颗粒在下落的过程中, 接受能流密度为600 kW/m²的能量, 空气、粒子的入口温度、贴近粒子处空气温度以及环境温度均为300 K, 固体颗粒的物性参数不变, 现选取固体颗粒直径为1和0.2 mm为例, 计算得到该颗粒在空气流速分别为1, 1.5和2 m/s条件下下落的时间和温度的变化如表3所示. 在计算过程中, 固体颗粒的 Bi 均小于0.1, 直径为1 mm的固体颗粒在下落至79.57 m时毕渥数最大, 此时 Bi

为0.080.

从表3中可以得到结论, 当空气流速增大时, 在下落同为0.5 m的情况下, 固体颗粒在下落过程中的对流损失和辐射损失增加, 但由于固体颗粒的下落时间增长, 因此对于直径为1和0.2 mm的固体颗粒, 下落0.5 m时所能得到的固体颗粒的温度升高.

空气流速的大小并不影响固体颗粒所能达到的最终稳定温度, 但是当固体颗粒较小时, 在下落过程中先达到温度最大值后达到速度最大值的情况, 温度的最大值会受空气流速的影响而减小. 由固体在自由下落过程中的动力学分析式(2)可知, 当固体颗粒速度达到稳定值的时候, 固体颗粒和空气的相对速度是一个恒定的值, 固体颗粒与外界的对流换热和辐射换热相同, 因此固体颗粒能达到的最终温度

图4 直径为1 mm的固体颗粒温度和速度随下落高度距离变化
Figure 4 The variation of temperature and velocity of 1 mm solid particle with the change of the drop height

图5 直径为0.1 mm的固体颗粒温度和速度随下落高度距离变化
Figure 5 The variation of temperature and velocity of 0.1 mm solid particle with the change of the drop height

表 2 不同直径的固体颗粒在下落不同高度时 Bi 大小

Table 2 The Biot number of single particle of different diameters in different heights

下落高度 (m)	颗粒直径 (mm)						
	3	2	1	0.5	0.3	0.2	0.1
0	0.049	0.041	0.031	0.025	0.021	0.019	0.017
0.5	0.088	0.072	0.053	0.042	0.037	0.033	0.025
1	—	—	0.058	0.046	0.039	0.034	0.025
1.5	—	—	0.062	0.048	0.040	0.034	0.025
2	—	—	0.064	0.050	0.041	0.034	0.025
2.5	—	—	0.066	0.051	0.041	0.034	0.025
3	—	—	0.067	0.052	0.041	0.034	0.025
10	—	—	0.077	0.053	0.041	0.034	0.025
20	—	—	0.080	0.053	0.041	0.034	0.025
50	—	—	0.080	0.053	0.041	0.034	0.025

表 3 直径为 1, 0.2 mm 的固体颗粒在不同空气流速下下落能量和温度变化

Table 3 The energy and temperature variation of single particle with a diameter of 1 and 0.2 mm at different air velocities

固体颗粒下落0.5 m							固体颗粒自由下落不计高度								
颗粒直径 (mm)	空气流速 (m/s)	下落时间 (s)	粒子最终温度 (K)	对流损失百分比 (%)	辐射损失百分比 (%)	粒子吸收能量百分比 (%)	温度最大值(K)	达到温度最大值时下落距离 (m)	速度最大值 (m/s)	达到速度最大值时下落距离 (m)	温度稳定值 (K)	达到温度稳定值时下落距离 (m)	温度达到最大值时对流损失百分比 (%)	温度达到最大值时辐射损失百分比 (%)	温度达到最大值时粒子吸收能量百分比 (%)
1	1	0.322	452.1	5.897	0.449	93.654	949.4	79.57	6.75	17.86	949.4	79.57	67.134	22.060	10.806
	1.5	0.328	454.1	6.328	0.459	93.213	949.4	73.77	6.25	16.29	949.4	73.77	67.152	22.049	10.798
	2	0.347	457.4	6.800	0.474	92.726	949.4	67.99	5.75	14.74	949.4	76.66	67.168	22.040	10.792
0.2	1	0.391	642.3	61.176	3.116	35.708	647.5	0.92	2.47	2.80	645.4	3.30	71.744	3.842	24.414
	1.5	0.441	642.9	64.989	3.283	31.738	646.4	0.89	1.97	2.14	645.4	2.53	74.338	3.939	21.723
	2	0.526	644.2	69.746	3.545	26.709	645.8	0.81	1.47	1.51	645.4	1.79	76.913	4.059	19.028

相同.

当空气流速增大的时候, 虽然固体颗粒所能达到的最终温度不受影响, 但固体颗粒在下落过程时达到最终温度下落所需的高度减小, 在温度达到稳定值之前下落相同高度的情况下所能达到的最终温度会更高. 因此在下落式固体颗粒吸热器的实验和实际运行过程中, 应考虑适当增大空气的流速, 以使固体颗粒的温度更快达到稳定值, 如此可以减小吸热器的高度, 并降低吸热器的成本.

从表3中还可以看到, 随着空气流速的增加, 由于颗粒对流换热增强, 当温度达到最大值时颗粒吸收能量的百分比减少. 对于直径为1 mm的固体颗粒

较直径为0.2 mm的固体颗粒在达到温度最大值时所吸收的能量百分比要更少, 但是其温度要更高, 这是因为直径为1 mm的固体颗粒的温度稳定值即为温度的最大值, 在温度达到这个最大值的过程中, 固体颗粒吸收的热量逐渐减小, 对外的辐射和对流换热逐渐增强, 最终达到温度平衡时需要一个较长的过程, 因此固体颗粒吸收的热量百分比较少.

5 固体颗粒温度随热流密度的变化

假定固体颗粒在下落的过程中, 空气流速为1 m/s, 空气、粒子的入口温度、贴近粒子处空气温度以及环境温度均为300 K, 固体颗粒的物性参数不变, 现选

取固体颗粒直径为1和0.2 mm为例, 计算得到该颗粒在空气流速分别为600, 900和1200 kW/m²条件下下落的时间和温度的变化如表3所示. 在满足上述条件的计算过程中, 固体颗粒的 Bi 均小于0.1, 当固体颗粒在1200 kW/m²的辐照条件下下落至49.49 m时 Bi 最大, 毕渥数的最大值为0.097.

从表4中可以得到结论, 当辐射能量的热流密度增大的时候, 在下落同样为0.5 m的情况下, 固体颗粒的对流损失和辐射损失百分比均有增加, 但由于热流密度增大, 导致接收到的辐射能量增大, 因此对于直径为1和0.2 mm的固体颗粒, 最终的温度也在上升.

当辐射能量的热流密度增大的时候, 温度所能达到的最大值和稳定值也会随之增大, 而温度达到稳定值和最大值时下落所需的距离缩短. 因此设计此类型的吸热器时, 如果在该吸热器的使用地区光照辐射强度较大时, 为了达到固定温度的固体颗粒, 可以适当减小吸热器的吸热高度以节约成本.

从表4中可以看到, 当辐射的热流密度增加时, 固体颗粒的温度会增大, 因此固体颗粒在达到最大温度时的辐射损失占比也会增大; 但是由于在达到最大温度时所需要的下落距离更短, 因此固体颗粒在达到最大温度时对流损失占比减小; 综合以上两点的作用, 当固体颗粒所受的辐射热流密度增大时, 固体颗粒的吸收能量的百分比也会增大.

6 结论

在对计算结果的分析中, 得到了如下结论.

(1) 在固体颗粒下落0.5 m的过程中, 固体颗粒

直径越大, 固体颗粒所能吸收的能量百分比越高, 但固体颗粒直径变小时, 固体颗粒的温度会有一个上升趋势.

(2) 对于固体颗粒的下落, 不是受热时间越久、下落时间越长粒子能够得到温度越高, 对于直径较小的固体颗粒, 在下落过程中温度会有一个先升高后降低的过程.

(3) 在固体颗粒下落的过程中, 若假定固体颗粒的下落距离为无限长, 同时在下落过程中持续加热, 固体颗粒的温度可以达到一个能量平衡的稳定值.

(4) 若固体颗粒在下落时速度先达到稳定值, 固体颗粒最终达到温度稳定值时即达到温度的最高值; 若固体颗粒在下落时温度先达到最大值, 则固体颗粒在继续下落过程中温度会先升高后降低达到温度稳定值.

(5) 空气流速的变化不会影响固体颗粒在受热过程中所能达到的温度稳定值, 但可以影响固体颗粒在达到温度稳定值时所需的下落距离, 空气流速越大, 固体颗粒达到温度稳定值时所需到的下落距离越短.

(6) 热流密度的变化不会影响固体颗粒在下落过程中所需的时间, 但可以影响固体颗粒所能达到的温度稳定值和达到温度稳定值时所需的下落距离, 热流密度越大, 固体颗粒所能达到的温度稳定值越高, 达到该温度稳定值时所需的下落距离越短.

(7) 从目前的算例出发, 对于高度为0.5 m的固体颗粒吸热器, 如若希望在实验中达到更好的固体颗粒出口温度, 应选择直径为0.3 mm的固体颗粒, 选定空气流速为2 m/s.

表4 直径为1, 0.2 mm的固体颗粒在不同热流密度时下落能量和温度变化

Table 4 The energy and temperature variation of single particle with a diameter of 1 and 0.2 mm at different heat flux

颗粒直径 (mm)	热流密度 (kW/m ²)	固体颗粒下落0.5 m					固体颗粒自由下落不计高度						
		下落时间 (s)	粒子最终温度 (K)	对流损失百分比 (%)	辐射损失百分比 (%)	粒子吸收能量百分比 (%)	温度最大值 (K)	达到温度最大值时下落距离 (m)	温度稳定值 (K)	达到温度稳定值时下落距离 (m)	温度达到最大值时对流损失百分比 (%)	温度达到最大值时辐射损失百分比 (%)	温度达到最大值时粒子吸收能量百分比 (%)
1	600	0.322	452.1	5.897	0.449	93.654	949.4	79.57	949.4	79.57	67.134	22.060	10.806
	900	0.322	527.8	5.928	0.459	93.501	1135.0	61.28	1135.0	61.28	58.200	29.930	11.870
	1200	0.322	603.1	5.975	0.474	93.307	1277.4	49.49	1277.4	49.49	51.395	35.866	12.739
0.2	600	0.391	642.3	61.176	3.116	35.708	647.5	0.92	645.4	3.30	71.744	3.842	24.414
	900	0.391	773.7	62.493	4.563	32.943	776.7	0.76	773.1	3.27	69.393	5.277	25.330
	1200	0.391	888.0	63.174	6.157	30.669	889.4	0.66	884.4	3.24	67.294	6.738	25.967

参考文献

- 1 Wang Z F. Solar Thermal Power Station Design (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2014 [王志峰. 太阳能热发电站设计. 北京: 化学工业出版社, 2014]
- 2 Ho C K, Iverson B D. Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renew Sust Energ Rev*, 2012, 29: 835–846
- 3 Kribus A, Hies R, Spirkel W. Inherent limitations of volumetric solar receivers. *J Sol Energ-T ASME*, 1996, 118: 151–155
- 4 Pitz-Paal R, Hoffschmidt B, Bohmer M, et al. Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation. *Sol Energy*, 1997, 60: 135–150
- 5 Kalogirou S A. Solar thermal collectors and applications. *Prog Energy Combust*, 2003, 30: 231–295
- 6 Wang F Q, Shuai Y, Tan H P. Thermal analysis of cavity solar collector (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2011, 5: 843–846 [王富强, 帅永, 谈和平. 腔式太阳能吸热器的热分析. 工程热物理学报, 2011, 5: 843–846]
- 7 Tan T, Chen Y, Chen Z, et al. Wind effect on the performance of solid particle solar receivers with and without the protection of an aerowindow. *Sol Energy*, 2009, 83: 1815–1827
- 8 Wu W, Amsbeck L, Buck R, et al. Proof of concept test of a centrifugal particle receiver. *Energy Procedia*, 2014, 49: 560–568
- 9 Roldán M I, Smirnova O, Fend T, et al. Thermal analysis and design of a volumetric solar absorber depending on the porosity. *Renew Energy*, 2014, 62: 116–128
- 10 Whitaker S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AIChE J*, 1972, 18: 361–371
- 11 Qian J J. Aerodynamics (in Chinese). Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004 [钱翼稷. 空气动力学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004]
- 12 Yang S M, Tao W Q. Heat Transfer (in Chinese). 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006 [杨世铭, 陶文铨. 传热学. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006]
- 13 Grena R. Thermal simulation of a single particle in a falling-particle solar receiver. *Sol Energy*, 2009, 83: 1186–1199
- 14 Xiao L, Wu S Y, Li Y R. Numerical study on combined free-forced convection heat loss of solar cavity receiver under wind environments. *Int J Therm Sci*, 2012, 60: 182–194

Heat performance of single falling solid particle under high concentrated solar irradiation

WANG TianJian, BAI FengWu & YANG Bei

Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Concentrated solar power tower plants are one of attractive renewable energy systems capable of not only generating electricity, but also driving chemical processes that require high temperature (>1000 K) heat input. Solid particle receivers have been proposed as an approach for efficiently achieving higher temperatures. In a falling particle receiver nearly black particles are dropped inside a cavity to directly absorb the concentrated solar irradiation. Particles are lifted up to a tower receiver for solar heating and then back down to a hot storage on the ground. In this paper, a model of a single falling particle from the top is established, the Energy-Balance equation of the single particle is used to simulate this process. The main variable properties of the heat transfer process are the particle diameter, falling distance, air velocity, and the concentrated solar flux. On the basis of the simulation results, following valuable conclusions are obtained. It is concluded that convection and radiation losses decreases with the increase of particle diameter increases. Bigger particles are able to absorb more concentrated solar irradiation and get higher final temperature with longer heating distance. While for falling the same distance such as 0.5 m, smaller diameter of the particle leads to a higher particle temperature. For bigger particles whose diameter is 0.5 or 1 mm, the particle temperature increases with the falling distance and tend to a stable value. However, smaller particles with the diameter of 0.3, 0.2 or 0.1 mm there exist the peak particle temperature in the falling process and then drop to a stable value. For the calculated particle diameter range, the final temperature of the particle approaches to a stable value. Air velocity has no influence on the final temperature of the particle, but take effects on the distance at which the particle get to the final temperature. The final falling distance to get the stable temperature decreases with the increase of air velocity. The concentrated solar irradiation directly determine the final temperature of the falling particle and the distance to get stable temperature. When increasing the concentrated solar irradiation, the final temperature of the solid particle increases, and the distance to get to the final temperature is shortened. The above conclusions have a strong guidance to the large scale falling particle receiver design. Under the basic design conditions mentioned in this paper, in order to get higher particle temperature, it is recommended that the falling distance of the particle is 0.5 m, the diameter of the particle is 0.3 mm, and the velocity of the air is 2 m/s.

solar energy, falling particle receiver, single particle, numerical calculation, temperature variation

doi: 10.1360/N972015-01254