

热辐射加热液滴能量传递过程的研究

袁洋¹, 张丹¹, 贾金睿², 郑巨淦¹, 王一笑¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中国核能动力研究设计院, 610213, 成都)

摘要: 为了提高热辐射对液滴群的加热效率, 针对单个液滴接收平行热辐射后的反射、吸收、透射等能量传递过程开展研究, 采用区域法建立了能量传递过程的计算模型, 在液滴吸收系数为 $1 \sim 1\,000\text{ m}^{-1}$ 、液滴粒径为 $0.1 \sim 10\text{ mm}$ 、液滴折射率为 $1.1 \sim 2.0$ 范围内, 计算分析了液滴温度场的演化与液滴吸收率、液滴反射辐射、透射辐射的数量和空间分布。结果指出: 在反射环节, 液滴的反射率仅取决于液滴的折射率; 随着折射率的增大, 液滴反射率增大, 反射辐射的空间分布也由顺投射方向占优逐渐转变为逆投射方向占优, 现有研究范围内反射率不超过 14% ; 在吸收环节, 提高液滴吸收系数、折射率的同时减小液滴粒径是使液滴获得快速、均匀温升的有效途径; 粒径的减小会导致液滴吸收率降低, 使大量热辐射以透射的形式离开液滴; 这部分透射辐射与反射辐射可被再次利用, 统称为二次辐射; 在透射环节, 透射辐射总量随吸收系数、折射率或液滴粒径的减小均会增大; 透射辐射的分布以顺投射方向占优。根据上述结果, 给出了液滴吸收率、透射辐射定向辐射强度的经验关联式, 该经验式与定义式计算结果主体偏差分别小于 10% 和 15% ; 据此绘制了二次辐射数量与构成的分布图, 显示随着液滴吸收系数、粒径或折射率的减小, 二次辐射逐渐由反射占优变为透射占优。研究结果可为热辐射加热液滴群的应用中热辐射波段的选择和液滴群的布局等问题提供参考。

关键词: 热辐射; 反射辐射; 吸收率; 透射辐射; 二次辐射

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202302014 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0131-10

Study on Energy Transfer of Droplet Heating by Thermal Radiation

YUAN Yang¹, ZHANG Dan¹, JIA Jinrui², ZHENG Jugan¹, WANG Yixiao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of droplet heating by thermal radiation, this paper focuses on the energy transfer processes such as reflection, absorption, and transmission after parallel thermal radiation is projected on a single droplet. A calculation model of transfer process is established using zone method. With this model, the evolution of droplet temperature field, and the quantity and spatial distribution of droplets that absorb, reflect, and transmit radiation are calculated with droplet absorption coefficient between 1 and $1\,000\text{ m}^{-1}$, droplet diameter between 0.1 and 10 mm , and droplet refractivity between 1.1 and 2.0 . Results suggest that, during

收稿日期: 2022-07-07。 作者简介: 袁洋(2000—),男,硕士生;张丹(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976162)。

网络出版时间: 2022-09-27

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220926.1759.002.html>

reflection, the droplet reflectivity only depends on the droplet refractivity. As the refractivity increases, the reflectivity increases too, and the dominance of projection direction gradually shifts to the reverse projection direction in terms of spatial distribution of the reflected radiation. The reflectivity within the current range of study is no more than 14%. During absorption, improving the droplet absorption coefficient and refractivity while reducing the droplet size is an effective way to obtain rapid and uniform temperature rise of droplet. However, the decrease in particle size leads to decrease of droplet absorption rate, and a large amount of thermal radiation energy leaves the droplet by transmission. These transmitted and reflected radiations can be reused and are collectively defined as the secondary radiation. During transmission, the total amount of transmitted radiation increases with the decrease of absorption coefficient, refractivity or particle size of droplet, while the distribution of transmitted radiation is dominated by the projection direction. The empirical correlations about the droplet absorptivity and the directional radiation intensity of transmitted radiation are fitted based on the conclusions above. The relative error between these empirical correlations and their definition falls within 10% and 15% respectively. On these grounds, the quantity and composition distribution of secondary radiation is plotted and the plot shows that the secondary radiation gradually turns from reflection-dominant to transmission-dominant with the decrease of droplet size, absorption coefficient or refractivity. The result of this study provides a reference for the selection of thermal radiation source and the layout of droplets in the application of droplet heating by thermal radiation.

Keywords: thermal radiation; reflected radiation; absorptivity; transmitted radiation; secondary radiation

雾化蒸发广泛应用于海水淡化^[1]、干燥浓缩^[2]、喷雾热分解^[3-4]、喷雾造粒^[5]等工业生产中。将液相雾化可迅速增加比表面积,强化传热传质。液滴蒸发需要吸收热量,现有工艺主要通过加热面以导热的形式提供^[6]或以热空气等为介质以对流方式予以提供^[7-9]。这不仅容易造成加热面的腐蚀、结垢,还使得液滴蒸发产生的水蒸气与空气混合,两者的分离以及能量的回收也使得工艺环节复杂,运行成本高。然而,采用热辐射加热液滴不仅能克服上述缺陷,还易与太阳能结合,实现绿色生产。

单液滴是雾化蒸发的基本单元,其对热辐射的吸收过程近年来受到了各国学者的关注。Dombrovsky 和 Sazhin^[10-14]研究了球形液滴吸收热辐射的过程,将热辐射投射后液滴温度的演变分为了受热过程和蒸发过程,建立了相应的理论模型,据此研究了柴油液滴对热辐射吸收。结果发现,液滴中心处会吸收大量热辐射,而在气液界面处所吸收热辐射最小。周致富等^[15-17]以制冷剂为工质,就激光照射下单个制冷剂液滴蒸发过程开展了实验研究,建立了液滴平衡蒸发阶段的计算模型。赵鹏^[18]实验研究了不同温度热源辐射加热下柴油液滴的受热和蒸发过程,结果表明,当热辐射源温度较低时,

液滴会先经历初始受热阶段,随后快速蒸发,且蒸发速率随温度升高迅速加快。Tanvir 等^[19]实验研究了含有石墨纳米颗粒的乙醇液滴在红外辐射下的蒸发特性,发现乙醇液滴蒸发速率随纳米颗粒浓度的增加而增加。贾卓杭等^[20-21]实验研究了不同波长激光照射下,纯水液滴的升温 and 蒸发过程,并利用 Monte Carlo 法研究了液滴尺寸、激光波长对液滴整体吸收率及内部吸收分布特性的影响,结果发现,液滴吸收系数较大时,液滴主要由迎光侧吸收热辐射。Jin 等^[22]建立了非球形液滴蒸发和吸收的计算模型,研究发现,当液滴的光学厚度较小时,液滴形状决定了光谱吸收率,但当光学厚度较大时,吸收率由迎光面的光谱反射率决定。

可以看出,现有研究主要以燃油、制冷剂等有机溶剂为工质,重点关注了单液滴对热辐射的吸收及其自身的升温 and 蒸发特性。为了实现利用热辐射对雾化后液滴群的高效加热,有必要以水为工质,对热辐射投射至单个液滴后,液滴温度场的演变、反射和透射辐射的空间分布开展系统地研究。研究的目标是解决两个核心问题:①液滴在何种辐射条件下可获得均匀、快速的温升;②未被液滴吸收的热辐射在空间中是如何分布的。针对问题①的研究将为入射

热辐射的波段选择或光谱调制指明方向,而问题②的回答则能为雾场中液滴群的布局提供参考。

因此,本文以单波长平行热辐射加热球形液滴为例,采用区域法建立热辐射在液滴中的能量传递模型。由于水对不同波段热辐射的吸收系数差别很大^[23-24],所以通过调整投入辐射的波段可间接改变液滴的吸收系数。此外,吸收系数、折射率还可通过在液滴中溶入微量纳米颗粒等方法予以调整^[19]。因此,简便起见,本文以不同吸收系数、折射率、液滴粒径为输入条件,以液滴表面获得的投入辐射为起点,对热辐射的反射、吸收和透射过程开展系统地研究。

1 计算模型的建立

液滴网格划分与辐射计算如图 1 所示,室温空气环境下,平行热辐射加热球形液滴的能量传递过程经历了 3 个环节:①平行辐射投射到液滴表面后,部分热辐射未进入液滴即被反射;②进入液滴的热辐射部分被吸收,导致液滴升温;③液滴内部未被吸收的热辐射与液滴自身发出的热辐射在到达液滴边界后,一部分被反射回液滴内部,另一部分穿过边界沿一定的方向透射到外部空间。

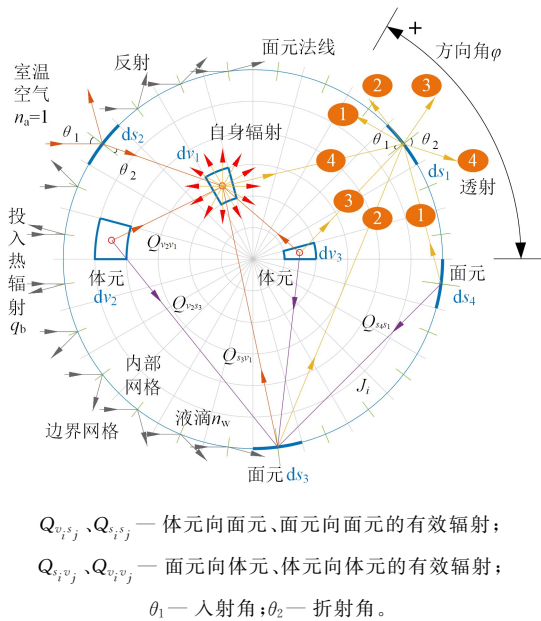


图 1 液滴网格划分与辐射计算

Fig. 1 Droplet mesh and radiation calculation

本文采用区域法^[25]建立热辐射能量传递模型。考虑到液滴内部与边界能量传递过程的不同(如图 1 所示),对液滴边界和内部采用两套网格离散:液滴内部由极坐标网格离散为 n_v 个体元(dv);液滴边界采用与体元极角相同的网格离散为 n_s 个面元

(ds)。面元与体元合称单元。

热辐射能量传递模型以液滴表面的投入辐射为输入,以液滴温度场的演化、液滴的反射、透射辐射的数量与空间分布为输出。为简化计算,模型假设:①仅考虑液滴的受热阶段,忽略蒸发,因此液滴始终保持圆形,粒径不变;②忽略液滴内部的对流,且液滴表面绝热,以便考查液滴的极限升温情况;③液滴边界向液滴内部的辐射为漫反射,且遵守 Lambert 定律;④空气折射率 n_a 恒为 1,环境温度为不变,环境压力保持 0.1 MPa 不变,因此本模型液滴温度的计算上限为 100 °C。

1.1 液滴的投入、反射辐射

如图 1 所示,液滴迎光侧任意面元 ds_2 的外法线与水平方向的夹角,即入射角 θ_1 ,该面元得到的投入辐射可表示为

$$dq_{sh} = q_b (\cos \theta_1) \frac{D}{2} d\theta_1 \quad (1)$$

式中: dq_{sh} 为微元面上获得的有效辐射; D 为液滴粒径。投入辐射在该面元处发生折射、反射。反射方向与入射方向关于法线对称,折射方向与入射方向满足折射定律

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (2)$$

式中 n_1 、 n_2 分别为介质 1、2 的折射率, θ_2 为折射角。微元面反射能量(dq_{ref})与折射能量(dq_{trs})的计算式为

$$dq_{ref} = \rho(\theta_1, n_1, n_2) q_b (\cos \theta_1) \frac{D}{2} d\theta_1 \quad (3)$$

$$dq_{trs} = [1 - \rho(\theta_1, n_1, n_2)] q_b (\cos \theta_1) \frac{D}{2} d\theta_1 \quad (4)$$

式中: ρ 为边界微元面上的反射率,即热辐射由介质 1 入射到介质 2 时,反射回介质 1 的能量份额,计算式^[26]为

$$\rho(\theta_1, n_1, n_2) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right], & 0 < \theta_1 < \frac{\pi}{2} \\ \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2, & \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

此时,热辐射由空气进入液滴, n_1 取空气折射率($n_a=1$), n_2 取液滴折射率 n_w 。

液滴迎光侧将投入辐射反射至空间不同方向,因此采用极坐标描述液滴反射辐射的空间分布。定义方向角 φ 以水平向右为 0°,逆时针为正。由图 1 易知,液滴迎光侧入射角 θ_1 与反射方向角 φ 满足

$$\varphi = 180^\circ - 2\theta_1 \quad (6)$$

因此,反射辐射定向辐射强度可表示为

$$I_{\text{ref}}(\varphi) = \frac{dq_{\text{ref}}}{Dd\varphi} = \frac{q_b}{4}\rho\left(90^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(90^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (7)$$

由于平行辐射仅能投射到液滴迎光侧,液滴表面的总投入辐射(q_{sh})与总反射辐射(q_{ref})可分别表示为

$$q_{\text{sh}} = 2\int_0^{\frac{\pi}{2}} dq_{\text{sh}} = q_b D \quad (8)$$

$$q_{\text{ref}} = 2\int_0^{\frac{\pi}{2}} dq_{\text{ref}} = q_b D \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho(\theta_1, n_w) \cos\theta_1 d\theta_1 \quad (9)$$

1.2 液滴温度场演化模型

液滴中每个体元的温度演化满足热传导方程

$$\rho_w c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \Delta T + S \quad (10)$$

式中: T 为体元温度; ρ_w 、 c_p 、 k 分别为液滴的密度、比定压热容和导热系数;源项 S 为该体元(如图1中 dv_1)对热辐射的净吸收量,等于所有面元、体元向该体元发射的辐射与自身向外辐射能量之差,可表示为

$$S = -\pi\kappa E_{bi} + \sum_{i=1}^{n_v} Q_{v_i v_j} + \sum_{i=1}^{n_s} Q_{s_i v_j} \quad (11)$$

其中, κ 为液滴吸收系数, E_{bi} 为体元温度下的黑体辐射力, $Q_{s_i v_j}$ 、 $Q_{v_i v_j}$ 计算式^[25]为

$$Q_{s_i v_j} = J_i \frac{\cos\theta_i}{2l_{i,j}} \kappa \exp(-\kappa l_{i,j}) dV_j dA_i \quad (12)$$

$$Q_{v_i v_j} = E_{bi} \frac{1}{2l_{i,j}} \kappa^2 \exp(-\kappa l_{i,j}) dV_i dV_j \quad (13)$$

其中, $l_{i,j}$ 为各单元间的距离, θ_i 为面元 i 内法线与单元连线夹角, dA 为面元面积, dV 为体元体积, J_i 为任意面元向液滴内部发出的有效辐射,为单位面积上投入辐射透过该面元进入液滴的能量(dq_{trs})与该面元接收其他面元、体元发出的辐射后反射回液滴内部的部分之和(如图1中 ds_3)

$$J_i = \frac{1}{dA_i} \left[dq_{\text{trs}} + \sum_{i=1}^{n_v} Q_{v_i s_j} \rho_{n,i} + \sum_{i=1}^{n_s} Q_{s_i s_j} \rho_{n,i} \right] \quad (14)$$

其中, $\rho_{n,i}$ 为面元对每个体元或面元投入辐射的反射率, $Q_{v_i s_j}$ 、 $Q_{s_i s_j}$ 计算式^[25]为

$$Q_{v_i s_j} = E_{bi} \frac{\cos\theta_i}{2l_{i,j}} \kappa \exp(-\kappa l_{i,j}) dA_j dV_i \quad (15)$$

$$Q_{s_i s_j} = J_i \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{2l_{i,j}} \exp(-\kappa l_{i,j}) dA_j dA_i \quad (16)$$

其中 θ_j 为面元 j 内法线与单元连线夹角。联立式(10)~(15),可计算任意体元源项 S 。在现有极坐标网格下,采用Crank-Nicolson格式离散求解式(10)即可得出液滴内部温度场随时间的演变。

1.3 透射辐射的计算

热辐射透射出液滴是辐射从光密介质向光疏介质传输的过程。取图1中任意面元 ds_1 ,其他任一面元、体元发出的热辐射投射至 ds_1 有确定的人射角。当入射角大于临界角时,投射至 ds_1 的辐射会被全部反射回液滴(如图1中面元 ds_4 发出的热辐射1);当入射角小于临界角时,投射至 ds_1 的辐射会有部分透射出液滴边界。透射辐射的方向依然满足折射定律式(2)。但此时,辐射由液滴进入空气, n_1 应取液滴折射率 n_w , n_2 取空气折射率 $n_a=1$ 。任意体元 dv_j 经给定面元 ds_i 向外透射的能量可表示为

$$q(ds_i, dv_j) = Q_{v_{ds_i}, ds_j} (1 - \rho_{ds_i, dv_j}) \quad (17)$$

同理,任意面元 ds_j 经给定面元 ds_i 向外透射的能量可表示为

$$q(ds_i, ds_j) = Q_{v_{ds_i}, ds_j} (1 - \rho_{ds_i, ds_j}) \quad (18)$$

式中: ρ_{ds_i, dv_j} 为体元 dv_j 投射至面元 ds_i 的热辐射的反射率; ρ_{ds_i, ds_j} 为面元 ds_j 投射至面元 ds_i 的热辐射的反射率。

由此可知,每个面元、体元经由任意面元透射出的辐射在数量 and 方向上有很大的差别(如图1中的辐射2~4)。为了从总体上研究液滴透射辐射的空间分布,在完成经所有面元透射辐射方向和数量计算后,将液滴环侧按方向角分为若干角度区间,如图2所示。

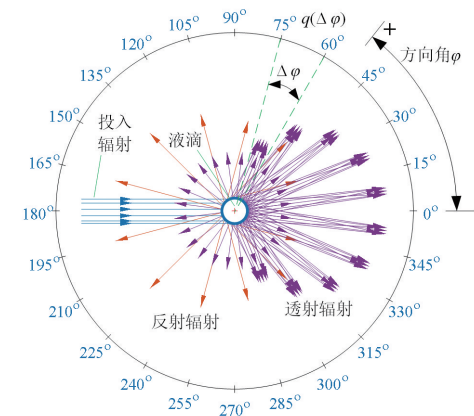


图2 反射与透射辐射的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of reflected and transmitted radiation

之后,统计位每个区间内透射辐射的总量($q(\Delta\varphi)$),并估算该角度区间内透射辐射的定向辐射强度

$$I(\varphi) = \frac{q(\Delta\varphi)}{D\Delta\varphi} \quad (19)$$

1.4 模型的验证

文献[20]围绕红外激光加热液滴的过程开展

了实验研究,测量了不同波段、不同功率激光器照射下液滴温度的升高过程。本文选取了该文献中波长为 1 313 nm,功率为 0.60、1.05 W 的激光器加热液滴过程的 3 组实验数据。两个激光器光斑直径为 3 mm,据此计算得到单位面积上平均投入辐射功率为分别为 84.9、148.5 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。该波段下水的吸收系数为 179.8 m^{-1} [23-24]。图 3 对比了液滴升温阶段的实验数据与本文模型计算的液滴平均温度。可以看出:在液滴升温起始阶段(0~3 s),计算值与实验值基本吻合;随着温度的升高,液滴表面蒸发作用逐渐增强,导致液滴温度实验值升高速度低于计算值。

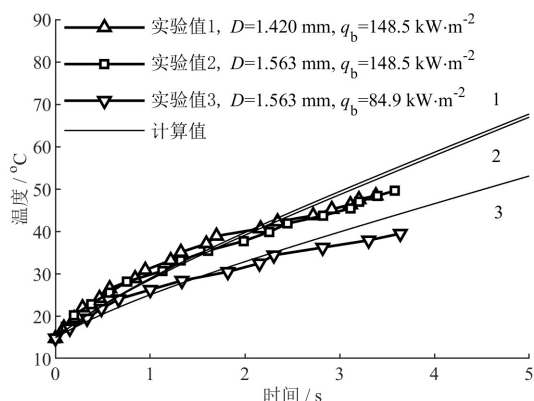


图3 液滴平均温度计算值与文献 [20] 实验值对比
Fig. 3 Comparison of droplet temperature between calculation models of this paper and Ref. [20]

图 4 是液滴温度计算值与文献 [20] 实验值的相对误差。可以看出,在 0~4 s 内,计算值与实验值的相对误差主体位于 10% 以内,本文模型描述液滴升温过程的可靠性得到了验证。

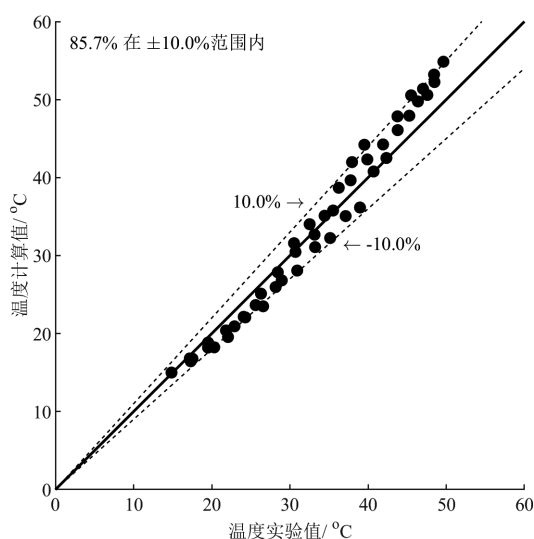


图4 液滴温度计算值与文献 [20] 实验值相对误差
Fig. 4 Relative errors of droplet temperature between models of this paper and Ref. [20]

2 结果与讨论

根据本文模型,在表 1 所示的参数范围内对热辐射加热液滴的能量传递过程开展研究。针对界面的反射、液滴内部的吸收、穿过界面的透射 3 个环节,分别展开讨论。

表 1 本文研究的参数范围

Table 1 The ranges of parameters in this study

参数	取值
液滴粒径 D/mm	0.1~10.0
液滴折射率 n_w	1.1~2.0
空气折射率 n	1.0
吸收系数 κ/m^{-1}	1~1 000
热辐射功率密度 $q_r/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	50
液滴温度 $t/^\circ\text{C}$	30~100
环境温度 $t_m/^\circ\text{C}$	30
环境压力 p/MPa	0.1

2.1 反射辐射

由式(7)可知,反射辐射定向辐射强度与液滴粒径无关,仅取决于液滴折射率。图 5 对比了不同折射率下反射辐射的空间分布。可以看出:① 0° 方向角反射辐射强度为 0;随着方向角的增大,反射辐射强度有峰值存在。② 当折射率较小(小于 1.5)时,反射辐射的能量主要分布在与投射方向夹角为 $\pm 90^\circ$ 的区域内,即反射辐射分布以顺投射方向占优;随着折射率的增大,反射辐射分布逐渐转变为逆投射方向占优。③ 从数量上看,反射辐射的总量随折射率的增大迅速增大,说明提高折射率限制了进入液滴的辐射总能量。

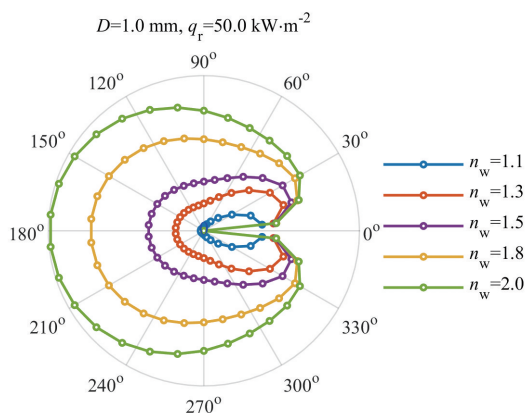


图5 反射辐射定向辐射强度的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of directional radiation intensity of reflected radiation

为了衡量反射辐射占液滴表面投入辐射的比重,定义液滴反射率

$$\rho_{\text{drp}} = \frac{q_{\text{ref}}}{q_{\text{sh}}} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho(\theta_1, n_w) (\cos \theta_1) d\theta_1 \quad (20)$$

考虑到投入辐射中未被反射部分是液滴可吸收的热辐射能量的理论上限,于是定义液滴的极限吸收率为

$$\alpha_{\text{drp,max}} = 1 - \frac{q_{\text{ref}}}{q_{\text{sh}}} = 1 - \rho_{\text{drp}} \quad (21)$$

可以看出,液滴反射率与极限吸收率仅取决于液滴折射率,与液滴粒径、吸收系数无关。图 6 是液滴的反射率与极限吸收率随折射率的变化。可以看出:在本文研究范围内,液滴反射率不超过 14%;液滴的极限吸收率随折射率的增大迅速降低。

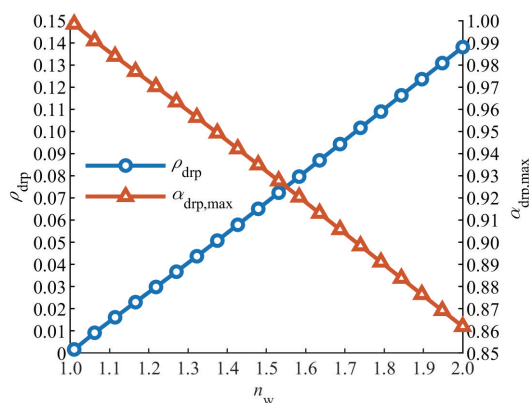


图 6 液滴的反射率与极限吸收率随折射率的变化

Fig. 6 Variation of reflection rate and the maximum absorption rate of droplet versus refractivity

2.2 液滴对辐射的吸收

开展液滴对辐射吸收效果的研究,其目标是探寻实现液滴均匀、快速升温的辐射条件。图 7 对比了液滴直径为 5 mm、折射率为 1.3 时不同吸收系数下液滴温度场的演化。吸收系数的增大使得液滴对辐射的吸收距离减小,导致液滴的升温方式由容积式均匀加热转变为迎光侧的边界加热,这与文献[20]中的实验结果相同。说明单纯提高吸收系数虽强化了吸收、提高了液滴内部的最高温度,却降低了液滴温度场的均匀性。

图 8 对比了液滴直径为 2 mm、吸收系数为 100 m^{-1} 时不同折射率下液滴温度场的演化。在液滴内部:未被吸收的辐射到达液滴边界后会发生反射、折射,其中折射辐射穿过边界离开液滴;反射辐射会被液滴再次吸收。折射率的提高增大了热辐射在液滴内壁面全反射的几率,沿长了吸收距离,使得液滴升温显著、温度场更加均匀。

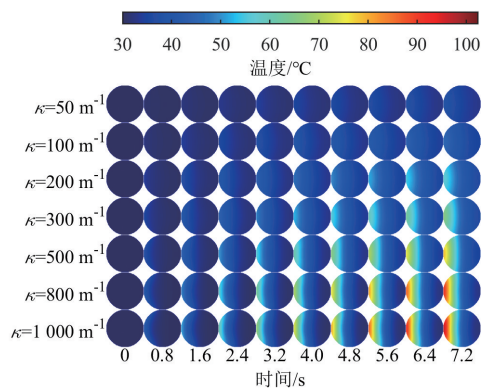


图 7 不同吸收系数下液滴温度场的演化

Fig. 7 Evolution of droplet temperature field under different absorption coefficients

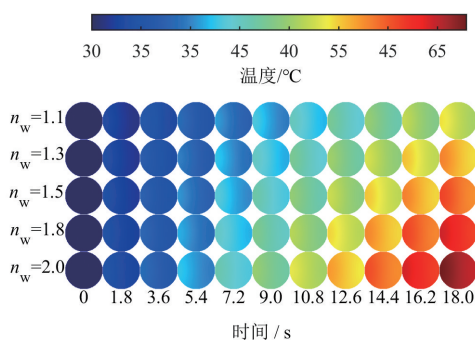


图 8 不同折射率下液滴温度场的演化

Fig. 8 Temperature evolution under different refractivities

图 9 对比了吸收系数为 500 m^{-1} 、折射率为 1.3 时不同粒径液滴在相同热辐射加热下温度场的演化。缩小液滴粒径一方面减小了液滴迎光面面积;另一方面使得液滴体积及单位温升所需显热降幅更大,导致液滴的温升随粒径的减小不降反升,且温度场愈加均匀。

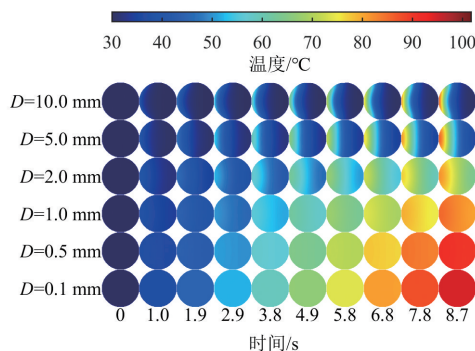


图 9 不同粒径液滴的温度场演化

Fig. 9 Temperature evolution under different droplet sizes.

液滴升温后显热的增加量反映了对辐射的净吸收效能。因此,可定义液滴吸收率为

$$\alpha_{\text{drp}} = \frac{\rho_w c_p \int_V \Delta T dV}{q_{\text{sh}}} = \frac{\rho_w c_p \int_V \Delta T dV}{q_b D \Delta \tau} \quad (22)$$

式中 ΔT 为时段 $\Delta \tau$ 内每个体元的温升。图 10 对比了不同粒径下液滴吸收率随吸收系数的变化。可以看出,液滴吸收率随吸收系数的增大而升高,而随粒径的减小迅速降低。结合图 9 可知,液滴粒径较大时,吸收率虽高,但液滴升温慢,温度场不均匀;与此相反,液滴粒径较小时,液滴升温又快又均匀,但总体吸收率远低于极限吸收率。该结论说明:①将液相雾化成一定粒径的小液滴是实现热辐射对液体快速、均匀加热的有效途径;②小粒径液滴吸收率低意味着大量热辐射以透射的形式离开液滴。这部分透射辐射与前述反射辐射可被二次利用,因此后文将对透射辐射的空间分布开展研究。

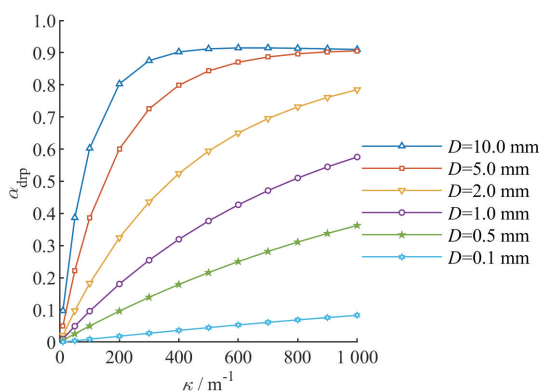


图 10 不同粒径下液滴吸收率随吸收系数的变化

Fig. 10 Variation of droplet absorptivity with absorption coefficient at different droplet sizes

根据上述规律,提出液滴吸收率的半经验计算式为

$$\alpha_{\text{drp, cal}} = \frac{1 - \exp(-C_\tau \kappa D)}{1 - \rho_{w, a} \exp(-C_\tau \kappa D)} \alpha_{\text{drp, max}} \quad (23)$$

式中: $C_\tau = 0.670 \ln n_w - 0.0024$; $\rho_{w, a} = \frac{2}{\pi}$.

$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho(n_w, n_a, \theta_1) d\theta_1$ 是热辐射由水进入空气的平均反射率。图 11 是液滴吸收率式(23)计算值与定义式(22)计算值的相对误差。可以看出,在本文研究范围内,二者的相对误差主体小于 10%。

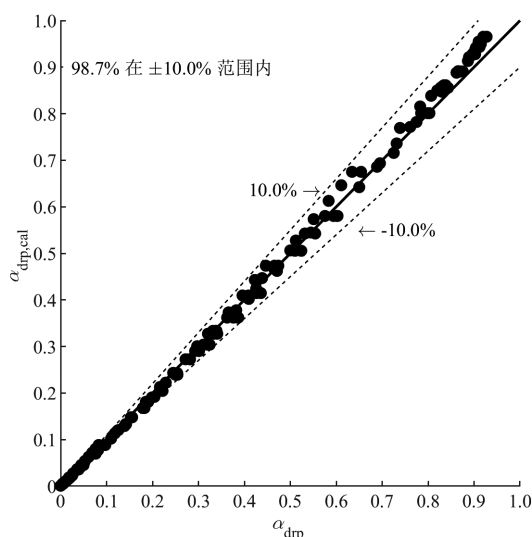


图 11 液滴吸收率式(23)计算值与定义式计算值的相对误差

Fig. 11 Relative error of droplet absorptivity between semi-empirical Eq. (23) and definition of Eq. (22)

2.3 透射辐射

严格地讲,透射辐射包含了未被吸收的投入辐射和液滴自发辐射中透射出液滴表面的部分,两部分辐射均可被二次利用,所以本文对两者不严格区分,将其统称为透射辐射。

图 12~14 分别对比了透射辐射定向辐射强度随吸收系数、折射率和液滴粒径的变化。从数量上看:透射辐射随吸收系数、折射率的降低或液滴粒径的减小均会增大。从方向上看:透射辐射的空间分布形状相似;定向辐射强度关于 0° 方向对称;随着方向角的增大,透射辐射强度先增大后减小;现有研究范围内,透射辐射分布在顺投射方向占优;随着折射率的增大,逆投射方向略有增加。

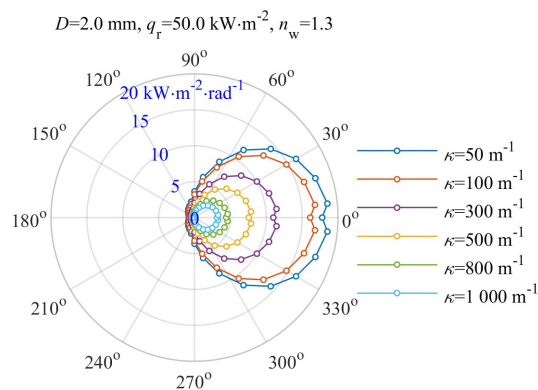


图 12 不同吸收系数下透射辐射的空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of transmitted radiation under different absorption coefficients

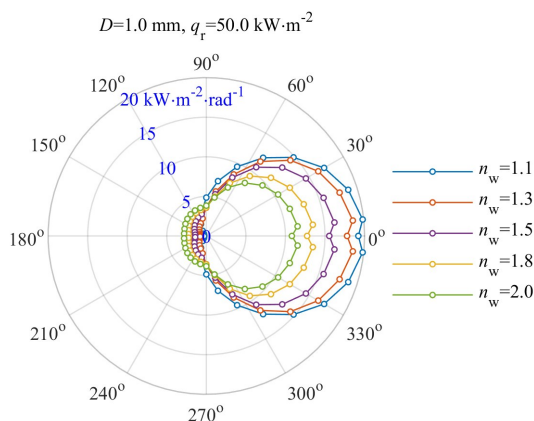


图 13 不同折射率下透射辐射的空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of transmitted radiation under different refractivities

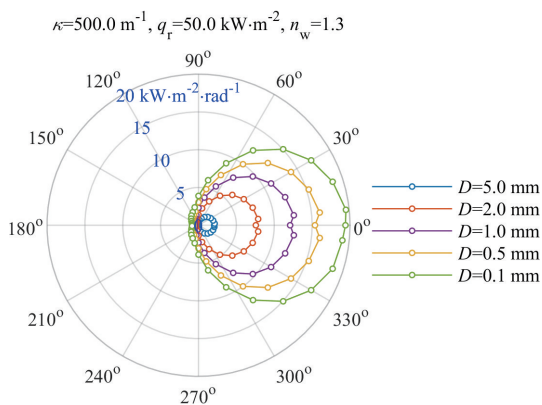


图 14 不同液滴粒径下透射辐射的空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of transmitted radiation under different droplet sizes

液滴的总体透射率可根据反射率和吸收率估算

$$\tau_{\text{drp}} = 1 - \alpha_{\text{drp}} - \rho_{\text{drp}} \quad (24)$$

据此,建立方向角 φ 在 $0 \sim 180^\circ$ 范围内液滴透射辐射定向辐射强度的经验关联式

$$I_{\text{trs}}(\varphi) = (a - b)\cos\varphi + \sqrt{(a - b)^2 \cos^2\varphi + 2b(a - b)} \quad (25)$$

式中: $a = C \frac{q_b}{4} \tau_{\text{drp}}$; $b = (1 - C) \frac{q_b}{4} \tau_{\text{drp}}$; $C = -0.232n_w^2 + 0.588n_w + 0.515$ 。图 15 是透射定向辐射强度半经验关联式(25)与定义式(19)的相对误差。可以看出,二者的相对误差主体小于 15%。方向角 φ 在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的透射定向辐射强度可根据对称性得到。

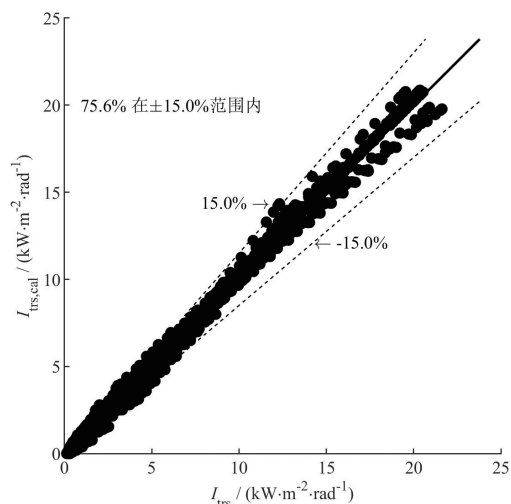


图 15 透射定向辐射强度半经验关联式与定义式的相对误差

Fig. 15 Relative error of directional transmitted radiation intensity between Eq. (25) and definition of Eq. (19)

2.4 二次辐射

热辐射投射至液滴后的反射辐射和透射辐射均可被再次利用,统称为液滴的二次辐射。二次辐射的空间分布可通过叠加反射辐射与透射辐射的定向辐射强度得到。为了衡量二次辐射中透射与反射的相对强弱,定义二次辐射透射占比 β 为

$$\beta = \frac{\tau_{\text{drp}}}{1 - \alpha_{\text{drp}}} = \frac{1 - \alpha_{\text{drp}} - \rho_{\text{drp}}}{1 - \alpha_{\text{drp}}} \quad (26)$$

式(26)表明,透射占比同时依赖于液滴反射率和吸收率。为了展示三者之间的规律,图 16 绘制了液滴吸收率、二次辐射透射占比 β 在本文研究范围内的分布图。考虑到热辐射穿过液滴的衰减程度总体上与液滴吸收系数 κ 和粒径 D 正相关,取两者乘积(κD)为液滴对热辐射的特征衰减因子。

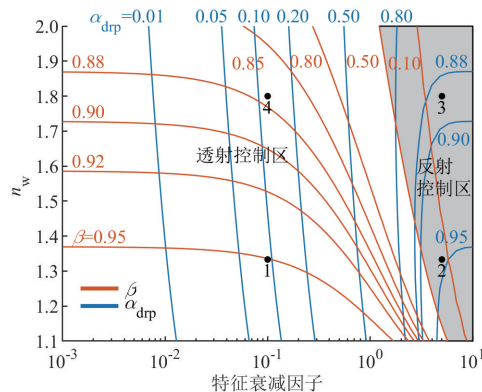


图 16 液滴吸收率与二次辐射构成的分布

Fig. 16 Distribution diagram of droplet absorptivity and secondary radiation composition

从图 16 中等吸收率线的分布可看出:衰减因子 κD 小时,折射率的增大可略微提高液滴吸收率;当衰减因子较大时,折射率的增大反而使吸收率降低。从图中等 β 线分布可知,减小折射率或衰减因子可使二次辐射中透射占比增加。图中 $\beta=0.5$ 线将现有二次辐射分成了反射控制区和透射控制区。利用图 16 可方便地获知二次辐射的数量和构成,为利用二次辐射提供参考。

例如,当液滴粒径为 1 mm、吸收系数为 100 m^{-1} 、折射率为 1.33 时,其辐射工况位于图 16 点 1。由等吸收率线可知,液滴吸收率仅约 10%,即投入辐射中 90% 转化为可被再次利用的二次辐射。同时,该点位于透射控制区,根据等 β 线可知二次辐射中透射占比为 95%,因此二次辐射的空间分布可近似按透射辐射定向辐射强度式(25)估算。

与此相反,当液滴粒径为 10 mm、吸收系数为 500 m^{-1} 、折射率仍为 1.33 时,其辐射工况位于点 2。此时等吸收率线指出液滴吸收率可达 95%,即二次辐射仅占投入辐射的 5%。同时,该点位于反射控制区,根据等 β 线可知二次辐射中透射占比为 10%,即反射占比为 $1-10\%=90\%$ 。因此,二次辐射空间分布可近似按反射辐射定向辐射强度式(7)计算。

3 结 论

本文针对平行辐射加热液滴过程中的反射、吸收和透射过程建立了完整的能量传递模型,在表 1 所示的范围内开展了系统的研究,结果表明如下。

(1)反射环节中:液滴反射率取决于液体折射率,与液滴粒径、吸收系数无关;随着折射率的增大,反射率升高,同时反射辐射的空间分布从顺投射方向占优逐渐转变为逆投射方向占优;给出了液滴反射率与反射辐射定向辐射强度的计算式,现有研究范围内液滴反射率不超过 14%。

(2)吸收环节中:在提高液滴吸收系数、折射率的同时减小液滴粒径是使液滴获得快速、均匀温升的有效途径;但是,随粒径的减小,液滴吸收率显著降低,说明有可观的热辐射能量以透射的形式离开液滴,透射辐射与反射辐射可被再次利用,统称为二次辐射。

(3)透射环节中:透射辐射总量随吸收系数、折射率或液滴粒径的减小均会增大;透射辐射分布以顺投射方向占优;逆投射方向透射辐射强度随着折射率的增大略有增加。

(4)给出了液滴吸收率、透射辐射定向辐射强度的经验关联式,该经验式与定义式计算结果主体偏差分别小于 10% 和 15%。据此绘制了二次辐射数量与构成的分布图,该图表明,随着液滴特征衰减因子或折射率的减小,二次辐射逐渐由反射占优转变为透射占优。

(5)本文研究结果可为热辐射加热液滴群的应用提供技术支撑。其中:液滴温度场的计算方法有助于对投入热辐射波段的选择;液滴吸收率、二次辐射的数量与空间分布可用于描述液滴群之间热辐射的传递过程,从而为液滴群的队形、粒径分布等布局设置提供参考。

参考文献:

- [1] BASSANI A, CARULLO D, ROSSI F, et al. Modeling of a spray-drying process for the encapsulation of high-added value extracts from food by-products [J]. Computers & Chemical Engineering, 2022, 161: 107772.
- [2] MARINOPOULOU A, KARAGEORGIOU V, PAPAS-TERGIADIS E, et al. Production of spray-dried starch molecular inclusion complexes on an industrial scale [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 116: 186-195.
- [3] HAO Zhenhua, CHEN Yuhui, ZHANG Qinglei, et al. Fabrication of spherical Ti-6Al-4V powder by RF plasma spheroidization combined with mechanical alloying and spray granulation [J]. Advanced Powder Technology, 2022, 33(1): 103379.
- [4] 玄铁民, 孙中成, 李文豪, 等. 甲醇/正辛醇/加氢催化生物柴油单液滴蒸发与微爆特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(1): 22-30, 119. XUAN Tiemin, SUN Zhongcheng, LI Wenhao, et al. Experimental study on evaporation and micro-explosion characteristics of ternary blended droplets of methanol, HCB and n-octanol [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(1): 22-30, 119.
- [5] EUN WANG S, PARK J S, JI KIM M, et al. One-pot spray pyrolysis for core-shell structured Sn@SiOC anode nanocomposites that yield stable cycling in lithium-ion batteries [J]. Applied Surface Science, 2022, 589: 152952.
- [6] HSIEH C C, YAO S C. Evaporative heat transfer characteristics of a water spray on micro-structured silicon surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(5/6): 962-974.
- [7] 张志荣. 火电厂湿法烟气脱硫废水喷雾蒸发处理方法关键问题研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [8] 阮一逍, 薛绒, 赖欢, 等. 单液氮液滴在气流中的蒸

- 发运动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6): 147-152.
- RUAN Yixiao, XUE Rong, LAI Huan, et al. Evaporation and movement characteristics of single liquid nitrogen droplet in high-speed gas flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 147-152.
- [9] 孙慧娟, 张海滨, 白博峰. 高温燃气中单个液滴的蒸发特性 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 833-837.
- SUN Huijuan, ZHANG Haibin, BAI Bofeng. Evaporation investigation of single droplet in high temperature fuel gas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 833-837.
- [10] DOMBROVSKY L A. Thermal radiation from nonisothermal spherical particles of a semitransparent material [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(9): 1661-1672.
- [11] DOMBROVSKY L A. Spectral model of absorption and scattering of thermal radiation by diesel fuel droplets [J]. High Temperature, 2002, 40(2): 242-248.
- [12] DOMBROVSKY L, SAZHIN S. Absorption of thermal radiation in a semi-transparent spherical droplet: a simplified model [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(6): 919-927.
- [13] DOMBROVSKY L A, SAZHIN S S, MIKHALOVSKY S V, et al. Spectral properties of diesel fuel droplets [J]. Fuel, 2003, 82(1): 15-22.
- [14] SAZHIN S S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(2): 162-214.
- [15] 周致富, 辛慧, 陈斌, 等. 激光手术喷雾冷却中单个液滴蒸发特性 [J]. 中国激光, 2008, 35(6): 952-956.
- ZHOU Zhifu, XIN Hui, CHEN Bin, et al. Evaporation characteristics of a single droplet in laser treatment of port wine stain in conjunction with cryogen spray cooling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 952-956.
- [16] 辛慧, 周致富, 陈斌, 等. 激光手术喷雾冷却中单液滴蒸发理论模型的比较 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(4): 653-656.
- XIN Hui, ZHOU Zhifu, CHEN Bin, et al. Comparative analysis of single droplet evaporation models in cryogen spray cooling [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(4): 653-656.
- [17] 辛慧, 周致富, 王国祥, 等. 激光手术喷雾冷却中 R404a 液滴的蒸发特性 [J]. 中国激光, 2009, 36(10): 2691-2695.
- XIN Hui, ZHOU Zhifu, WANG Guoxiang, et al. Evaporation characteristics of single R404a droplet in laser treatment of PWS in conjunction with cryogen spray cooling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(10): 2691-2695.
- [18] 赵鹏. 燃油液滴蒸发过程传热传质机理的数值模拟与实验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [19] TANVIR S, BISWAS S, QIAO LI. Evaporation characteristics of ethanol droplets containing graphite nanoparticles under infrared radiation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 541-549.
- [20] 贾卓杭. 红外激光加热下球形液滴蒸发特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [21] 孙创, 贾卓杭, 孙凤贤. 1 985 nm 激光加热下水滴蒸发实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(2): 400-403.
- SUN Chuang, JIA Zhuohang, SUN Fengxian. Experimental study on water droplet evaporation under the incident laser of 1 985 nm [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(2): 400-403.
- [22] JIN Zicheng, SUN Fengxian, XIA Xinlin, et al. Numerical investigation of evaporation and radiation absorption of a non-spherical water droplet under asymmetrically radiative heating [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 66-79.
- [23] 邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等. 分离悬浮质影响的光学波段(400~900 nm)水吸收系数测量 [J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 174-191.
- DENG Ruru, HE Yingqing, QIN Yan, et al. Pure water absorption coefficient measurement after eliminating the impact of suspended substance in spectrum from 400 nm to 900 nm [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(1): 174-191.
- [24] 邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等. 近红外波段(900~2 500 nm)水吸收系数测量 [J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 192-206.
- DENG Ruru, HE Yingqing, QIN Yan, et al. Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900—2 500 nm) [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(1): 192-206.
- [25] 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.
- [26] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.

(编辑 陶晴 杜秀杰)