

文章编号:1000-8055(2008)11-2043-06

辐射与对流耦合加热下正十二烷液滴的蒸发特性

孙凤贤, 王银燕

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 分别采用表面吸收与内部均匀吸收两种辐射模型结合液滴内部有限导热系数模型,数值研究了辐射-对流热环境中正十二烷液滴的蒸发特性.考虑了液滴与周围气流热物性以及液滴/气流相对速度的瞬态变化,获得了不同对流换热条件与辐射源温度下,液滴半径、温度及蒸发率的变化规律.比较了两种辐射吸收模型的预测结果差别,分析了热辐射对液滴蒸发的影响.结果表明,两种辐射吸收模型对液滴寿命预测结果的差别较小,但内部吸收模型能反映液滴表面的能量供给特点.当辐射源温度与对流气流温度相同时,热辐射对液滴蒸发的影响较小;当辐射源温度比对流气流温度高得多时,热辐射的影响很大.

关 键 词: 液滴蒸发; 正十二烷; 热辐射; 对流换热; 有限导热

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Evaporation characteristics of a single dodecane droplet heated by coupled thermal radiation and convection

SUN Feng-xian, WANG Yin-yan

(College of Power and Energy Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: For a single dodecane droplet in the thermal environment of combined convection and radiation, the evaporation characteristics were investigated numerically. The internal absorption model of thermal radiation and the surface absorption one was separately combined with the limited conductivity model of droplet. The transient dependence of thermal properties on temperature and components was taken into account along with the transient relative velocity of gas flow to the droplet. The evolutions of droplet radius, temperature and evaporating rate under various convective conditions and various temperatures of thermal radiation were presented. The differences between the predicted results by the two thermal radiation models were compared, and the effect of thermal radiation on droplet evaporation was analyzed. The results show that, the predicted values of droplet lifetime by the two thermal radiation models are relatively less different. But the internal absorption model can reveal the characteristics of energy supply to droplet surface. The effect of thermal radiation on the droplet evaporation is small when the temperature of thermal radiation equals to that of the gas flow, but it becomes very significant at a temperature higher than that of gas flow.

收稿日期: 2008-01-13; **修订日期:** 2008-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(50776026)

作者简介: 孙凤贤(1964-),女,辽宁辽阳人,副教授,博士生,主要从事液体燃料燃烧与传热研究.

E-mail: fengxiansun@hrbeu.edu.cn

Key words: droplet evaporation; dodecane; thermal radiation; convective heat transfer; limited conduction

液体燃料的雾化与蒸发对热力发动机中的燃烧与能量转化有重要影响,长期以来,吸引了许多学者对燃料液滴的蒸发特性进行研究.已往的研究,主要集中于液滴内部温度均匀假设下的对流热环境蒸发问题^[1-4].近年来,对燃料液滴蒸发模型的研究表明,蒸发过程中,液滴内部存在明显的温度梯度,并提出了有限导热系数模型^[1,5]、简化的非等温液滴模型等^[1,6].同时,热辐射加热对液滴蒸发的作用逐渐引起重视,Dombrows 与 Sazhin, Abramzon 等对液滴加热与蒸发过程中的热辐射吸收模型进行了研究,提出了柴油等燃料的热辐射吸收计算模型^[7-9].

对燃料液滴热辐射吸收研究表明,液滴是半透明介质,存在复杂的内部热辐射吸收^[8-10],液滴蒸发特性计算中难以直接考虑吸收分布.一些研究中,将液滴视为不透明灰球体,采用灰体表面模型来计算液滴对热辐射的吸收^[11-12].Sazhin 等人研究认为,按容积均匀吸收考虑液滴的半透明性是一种比较好的研究方法.这些研究的目的是改进 CFD 软件中的液滴蒸发计算模型,侧重于模型的分析比较.对高温辐射-对流环境中燃料液滴的蒸发特性的研究还比较缺乏.

本文以正十二烷液滴为例,分别采用灰体表面吸收模型与内部均匀吸收模型来计算燃料液滴的热辐射吸收,结合液滴内非等温的有限导热系数模型,对辐射-对流热环境中的燃料液滴蒸发特性进行分析.同时,通过比较,分析两种辐射吸收模型预测结果的差别.模拟计算中,考虑了液滴和周围气流热物性随温度、组分的瞬态变化以及液滴/气流相对速度的瞬态变化.

1 物理模型与控制方程

考虑半径为 r_0 的单组分球形燃料液滴,以初始温度 T_0 喷入温度为 T_∞ ($T_\infty > T_0$) 的单组分非氧化性气流中,液滴/气流的初始相对速度为 $u_{rel,0}$.由于液滴周围高温热源的辐射,液滴受到等效黑体温度为 T_{ext} 的热辐射加热.假设蒸发过程中的液滴形状不变,对流与辐射加热呈球对称均匀分布;气相准稳态,满足 Clausius-Clapeyron 方程;环境压力不很高,可忽略气体在液相中的可溶性;忽略重力对液滴/气流相对速度的影响.考虑液滴与周围气体热物性随温度、组分的瞬态变

化以及液滴的热膨胀效应.

分别采用两种模型来考虑液滴对热辐射的吸收作用,在模型 I 中,假设液滴是不透明灰体,热辐射被液滴表面吸收;在模型 II 中,认为液滴半透明,热辐射被液滴内部均匀吸收.根据上述模型与假设,可容易导出辐射与对流耦合加热下,液滴蒸发过程的质量守恒方程、表面热平衡方程以及液滴内导热-辐射吸收能量守恒方程

$$4\pi r_s^2 \rho \frac{dr_s}{d\tau} + \frac{4}{3}\pi r_s^3 \frac{d\rho}{d\tau} + G = 0, \quad (1)$$

$$4\pi r_s^2 \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s} + GL = 2\pi r_s \lambda_m (T_\infty - T_s) Nu_d + Q_s^R, \quad (2)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_v^R, \quad r \in (0, r_s), \quad (3)$$

式中 r_s , T , G 分别是液滴半径、温度、质量蒸发率, r 是由液滴中心指向表面的径向坐标, τ 是时间变量; ρ , c , λ 分别是密度、比定压热容与导热率,下标 l, s, m, ∞ 分别代表液相、液滴表面、气体混合物及环境; L 为汽化潜热; Nu_d 是以液滴直径为特征长度的表面对流换热努谢尔数; Q_s^R 是液滴表面的辐射热源项,采用内部吸收模型 II 时, $Q_s^R = 0$; Q_v^R 是液滴内部的辐射热源项,采用表面吸收模型 I 时, $Q_v^R = 0$.

液滴表面蒸气压随表面温度的变化、气流对液滴的相对速度分别遵循 Clausius-Clapeyron 方程与气体/颗粒运动方程^[9]

$$\frac{d \ln(p_{v,s})}{d(1/T_s)} = - \frac{L \cdot M_v}{R}, \quad (4)$$

$$\frac{du_{rel}}{d\tau} = - \frac{3C_d}{8r_s} \frac{\rho_m}{\rho} u_{rel}^2. \quad (5)$$

式中 $p_{v,s}$, u_{rel} 分别是液滴表面蒸汽压、液滴/气流相对速度; M , R 分别是燃料汽的分子量与通用气体常数; C_d 是由雷诺数确定的系数, $C_d = (24 + 4Re_d^{2/3})/Re_d$.

采用全波长平均有效吸收因子 $\bar{E}_a$ 描述燃料液滴的热辐射吸收能力.辐射吸收模型 I 中的 Q_s^R 与辐射吸收模型 II 中的 Q_v^R 分别为^[7-9]

$$Q_s^R = 4\pi r_s^2 \sigma T_{ext}^4 \cdot \bar{E}_a, \quad (6)$$

$$Q_v^R = 3\sigma T_{ext}^4 \cdot \bar{E}_a / r_s, \quad (7)$$

式中 σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, T_{ext} 是辐射源温度,全波长平均有效吸收因子 $\bar{E}_a$ 是液滴半径与

辐射加热温度的函数。

2 液滴与气流间的传热传质计算

通常采用特征数关联式计算气流与液滴表面之间的对流传热传质。这要求气体分子的平均自由行程远小于液滴直径,即克努森数 Kn 应小于 0.01,否则,需要采用动力学模拟^[1]。为保证对流传热传质特征数关联式的适用性,采取当蒸发液滴半径足够小时停止计算的处理方法^[6-9]。研究表明,在通常不太低的环境压力下,在液滴半径不小于 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 时,液滴周围的气体可按连续介质处理^[1]。基于折算薄膜近似,液滴表面的对流传热传质计算关联式为^[3]

$$Nu_d = (2 + 0.6 Re_d^{0.5} Pr_d^{1/3}) \ln(1 + B) / B \quad (8)$$

$$G = 2\pi r_s \rho D_v (2 + 0.5 Re_d^{0.5} Sc_d^{1/3}) \ln(1 + B) \quad (9)$$

式中 Re_d , Pr_d , Sc_d 分别是以液滴直径为特征长度的雷诺数、普朗特数与施密特数; D_v 是质扩散率; $B = m_{v,s} / (1 - m_{v,s})$ 为质量传递数, m 是蒸汽质量百分数。根据(4)式,由液滴表面温度 T_s 可确定蒸汽分压力 $p_{v,s}$,并按下式计算液滴表面的蒸汽质量百分数

$$m_{v,s} = \frac{p_{v,s}}{p_\infty} \frac{M_v}{\bar{M}} \quad (10)$$

式中 p_∞ 为环境压力, $\bar{M}$ 为液滴周围混合气体的平均相对分子质量,按文献[3]中的公式计算。

分别根据 Sutherland 动力模型理论、多原子气体的 Eucken 关联式及 Wassiljewa 混合规则计算液滴周围由蒸汽与环境体组成的二元混合气体的粘度 μ_m 与导热系数 λ_m ;根据 FSG 方程计算质扩散率 D_v ,定性温度按 $T_r = (2 T_s + T_\infty) / 3$ 计算^[13]。分别采用修正的 Rackett 法、对比状态法的 Bondi 方程计算不同温度下的液相密度 ρ 与比热容 $c_p^{[13]}$,并采用对比状态法计算汽化潜热 L 。

根据文献[7-8],柴油及碳氢比接近的燃料液滴的全波长平均有效吸收因子 $\bar{E}_a$ 可近似为

$$\bar{E}_a = a(T_{\text{ext}}) \cdot r_s^{b(T_{\text{ext}})} \quad (11)$$

式中 $a(T_{\text{ext}})$, $b(T_{\text{ext}})$ 是根据实验测量结果拟合的多项式函数^[7-8],随 T_{ext} 的不同具有不同表达式。

3 数值求解与验证

控制方程式(1)、式(5)离散形式简单,式(2)、式(4)和式(6)~式(11)及其它的热物性计算式均按当前时刻参数计算,不需要离散。考虑到液滴

蒸发过程中的热膨胀及液滴半径随时间的变化,液滴内能量方程式(3)的离散求解较复杂。首先通过空间坐标无量纲化,将计算域 $r \in (0, r_s)$ 变换为 $r \in (0, 1)$,将方程(3)转换为以 r 为径向坐标的形式

$$\rho_a \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r_s^2 r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \rho_a \frac{r}{r_s} \frac{dr_s}{d\tau} \frac{\partial T}{\partial r} + Q_v^R \quad (12)$$

然后,采用控制容积法进行离散,将计算域 $r \in (0, 1)$ 离散为 N 个控制容积。其中 $i = 1$ 代表液滴中心控制容积, $i = N + 1$ 代表控制容积为零的液滴表面。可得到如下统一形式的隐式离散方程

$$a_i^p T_i^k = a_i^E T_{i+1}^k + a_i^W T_{i-1}^k + a_i^0 T_i^{k-1} + b_i^k \quad (13)$$

式中 $a_i^p = a_i^E + a_i^W + a_i^0$, $i \in [1, N + 1]$;系数 a_i^E , a_i^W , a_i^0 与源项 b_i^k 的表达式随节点的位置及辐射吸收模型不同而变化,形式复杂,这里不再给出。

在每一时间层内,对离散方程(13)与方程(1)、式(5)的离散式以及式(3)~式(4)和式(6)~式(11)式进行耦合迭代求解,采用当前时刻温度值计算热物性。为保证传热传质关联式的适用性,当液滴半径 $r_s \leq 5 \mu\text{m}$ 时停止计算。

基于上述模型与数值方法,采用 FORTRAN 编制了计算辐射-对流耦合加热下单个燃料液滴的蒸发特性计算程序。通过数值结果的网格无关性检验,确定合适的网格数目与时间步长分别为 $N = 50$, $\Delta \tau = 0.01 \text{ ms}$ 。为了验证本文模型与计算的可靠性,将采用热辐射内部均匀吸收模型获得的柴油液滴蒸发预测结果与文献[9]的计算结果进行了比较,如图 1 所示,计算参数为 $r_0 = 50 \mu\text{m}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $T_\infty = 750 \text{ K}$, $p_\infty = 3.0 \text{ MPa}$, $u_{\text{rel},0} = 15 \text{ m/s}$ 。

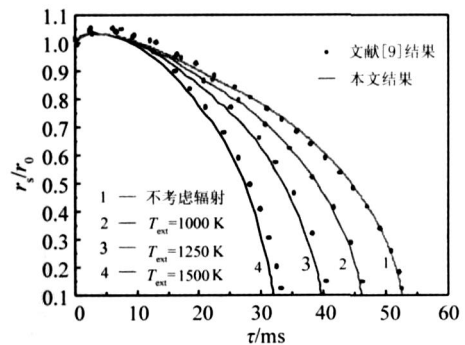


图 1 本文计算结果与文献[9]的比较

Fig. 1 Comparison with results in reference [9]

由图 1 可看出,本文结果与文献[9]整体符合较好,在蒸发初期,热膨胀较强与辐射温度较高时,二者偏差稍大,但不超过 5%。分析偏差的主

要原因是液滴平均密度随温度变化的处理方法有所不同,本文是通过液滴内各点温度下的密度进行容积平均,而文献[9]基于液滴总体热平衡计算平均温度,再根据平均温度确定液滴平均密度.

4 辐射吸收模型比较与蒸发特性分析

对正十二烷在对流-辐射耦合加热下的蒸发过程,比较两种模型预测结果的差别. 图 2 给出了液滴/气流初始相对速度中等大小时,不同辐射加热温度下,两种模型预测的蒸发液滴半径变化及液滴内的温度分布. 计算参数为: $r_0 = 50 \mu\text{m}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $T_\infty = 750 \text{ K}$, $p_\infty = 3.0 \text{ MPa}$, $u_{\text{rel},0} = 15 \text{ m/s}$.

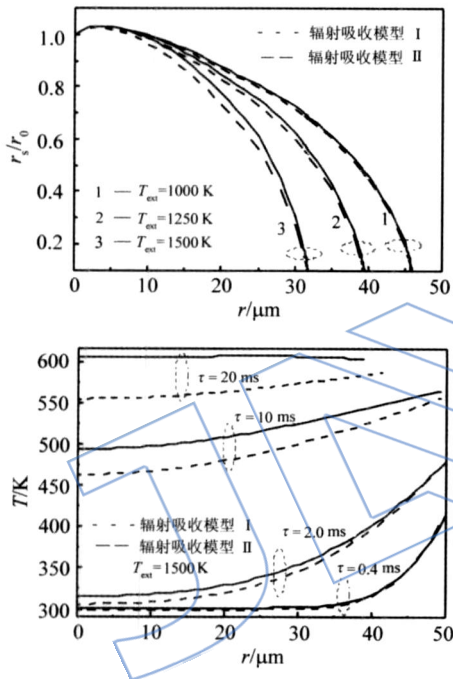


图 2 两种辐射吸收模型预测的液滴蒸发过程比较
Fig. 2 Comparison of droplet evaporating results predicted by the two radiative absorption models

可以看出,在不同的辐射加热温度下,两种吸收模型对蒸发液滴寿命的预测结果差别很小,但液滴半径的变化历程有明显差别. 这是由于两种吸收模型对液滴吸收热辐射能的总量计算相同,仅是对热辐射能在液滴各处的分配不同. 由于液滴的辐射吸收能力与半径成正比,在蒸发初期和前期,液滴吸收的热辐射能量较大,采用表面吸收模型得出的蒸发初期和中期的液滴半径变化更快,而采用内部吸收模型得出的液滴内温度更高、温度梯度较小. 在蒸发中后期,液滴吸收的热辐射能量较小,蒸发前期液滴内部吸收的热量储存效应逐渐表现出来,使液滴温度明显高于表面吸收

情况,甚至形成内部温度高、表面温度低的现象(见图中 $\tau \geq 20 \text{ ms}$ 的温度分布),从内部向表面供能,使蒸发加速.

这说明,在液滴吸收热辐射的全波长平均有效吸收因子相同的情况下,虽然两种辐射吸收模型对蒸发液滴寿命的预测结果差别较小,但内部吸收模型能更确切地反映液滴蒸发过程中的供能机制,在某些特殊情况下,如液滴初始半径较大、对流加热很弱等,采用表面吸收模型将产生明显误差. 另一方面,采用两种辐射吸收模型的计算效率相差很小. 因此,在液滴蒸发特性研究中,采用内部均匀吸收模型是一种较好的选择. 下文计算中,均采用辐射吸收模型 II.

从图 1、图 2 还可看出,在 $T_\infty = 750 \text{ K}$, $u_{\text{rel},0} = 15 \text{ m/s}$ 的对流条件下,当辐射温度 T_{ext} 由 1000 K 增加到 1500 K 时,液滴寿命缩短了 30% ,表明辐射吸收对碳氢燃料液滴蒸发的影响很明显.

为了解不同对流条件下,热辐射对液滴蒸发的影响,以 $r_0 = 50 \mu\text{m}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $p_\infty = 1.0 \text{ MPa}$ 的情况为例,考虑低温弱对流 ($T_\infty = 600 \text{ K}$, $u_{\text{rel},0} = 0.1 \text{ m/s}$)、高温强对流 ($T_\infty = 1200 \text{ K}$, $u_{\text{rel},0} = 10 \text{ m/s}$) 两种对流换热条件,计算了三种辐射加热温度时的液滴蒸发过程,如图 3 所示. 辐射加热温度: ① $T_{\text{ext}} = T_\infty$; ② $T_{\text{ext}} = 1.5 T_\infty$; ③ $T_{\text{ext}} = 2.0 T_\infty$.

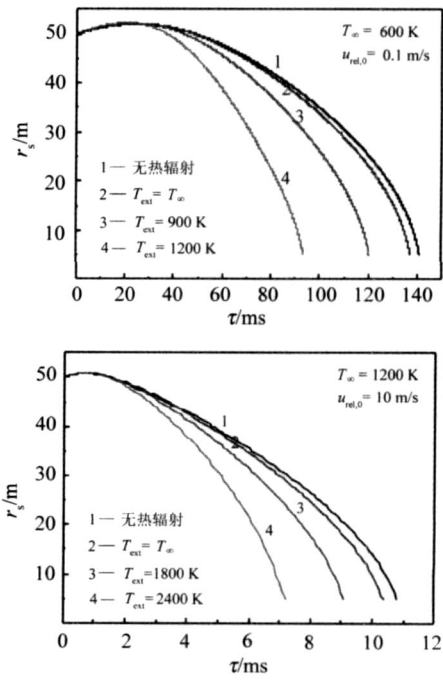


图 3 不同对流条件下热辐射对液滴蒸发的影响
Fig. 3 Effects of thermal radiation on droplet evaporation under various convective conditions

由图 3 可以看出,由于蒸发初期的热辐射吸收主要加热液滴内部,无论对流换热强弱、在辐射加热温度不超过 2 倍气流温度的情况下,热辐射吸收对蒸发初期的半径变化影响很小.但在蒸发中后期,热辐射对液滴蒸发的作用逐渐增强. $T_{\text{ext}} = T_{\infty}$ 时,两种对流换热条件下的热辐射加热影响都较小,不超过 5%; $T_{\text{ext}} = 1.5 T_{\infty}$ 时,热辐射加热可使液滴寿命缩短 15% 左右; $T_{\text{ext}} = 2.0 T_{\infty}$ 时,热辐射加热使液滴寿命缩短 30% 以上.这说明,当液滴稍远处存在火焰等高温辐射源时,即使液滴/气流初始相对速度较大(10 m/s 以上),辐射加热对液滴蒸发的影响也很大.

不同辐射加热温度下,液滴表面与内部温度变化历程、液滴热量供给、以及蒸发率的瞬态变化更深入细致地反映了热辐射对液滴蒸发的影响.如图 4、图 5 所示,是高温强对流条件下,不同辐射加热温度下的液滴表面温度变化与内部温度分布.计算参数: $r_0 = 50 \mu\text{m}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $p_{\infty} = 1.0 \text{ MPa}$, $T_{\infty} = 1200 \text{ K}$, $u_{\text{rel},0} = 15 \text{ m/s}$.图 5 中曲线 1~曲线 4 对应的辐射加热温度与图 4 相同.

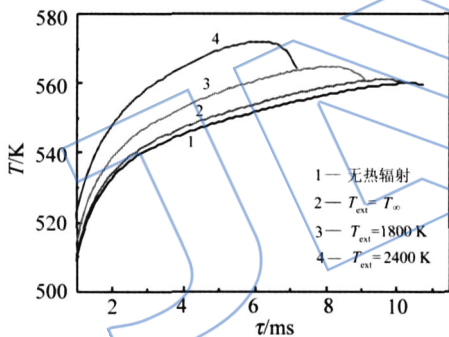


图 4 不同热辐射温度下液滴表面的温度响应
Fig. 4 Temperature response of droplet surface under various thermal radiation temperatures

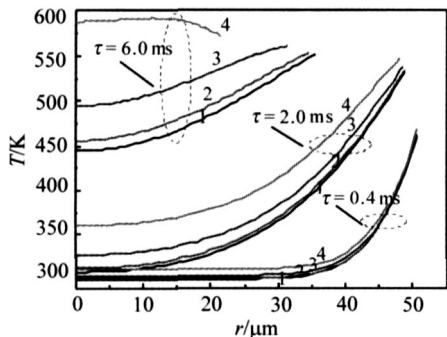


图 5 不同热辐射温度下液滴内的瞬态温度分布
Fig. 5 Transient temperature distributions in droplet under various thermal radiation temperatures

由图 4、图 5 可以看出,与纯对流加热情况相

比,热辐射吸收增强了液滴从周围环境获得热量的能力,使蒸发过程中液滴的表面温度与内部温度都明显提高.辐射加热使蒸发后期的液滴表面温度随时间下降,与纯对流加热下液滴表面温度趋于稳定的单调变化截然不同.辐射加热温度越高,此现象越明显,而且表面温度由升高转变为下降的拐点越早,见图 4.当辐射加热温度足够高时,蒸发后期的液滴内部温度已比较均匀并明显高于表面温度,如图 5 所示;从而在液滴表面内侧产生较大的温度梯度,形成从液滴内部向表面的导热热流.液滴表面的这种能量供给方式是辐射-对流耦合加热下液滴蒸发与纯对流加热下液滴蒸发的重要区别.

引入蒸发过程中由于辐射与对流耦合加热而通过表面进入液滴的净热流密度 q_{net}

$$q_{\text{net}} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s} + \frac{1}{r_s^2} \int_{r_s}^r r^2 Q^R dr \quad (14)$$

通过该物理量的变化,可以看出蒸发过程中液滴的热量供给特性.图 6 给出了不同辐射加热温度下,蒸发过程中的 q_{net} 变化特性,计算参数与图 4 相同.可以看出,在蒸发前期和中期,随着辐射加热温度的提高,进入液滴的净热流密度明显增大;在蒸发后期,辐射-对流耦合加热条件下进入液滴的净热流密度迅速减小到低于纯对流加热的情况;在热辐射温度 T_{ext} 较高的情况下,蒸发末期进入液滴的净热流密度甚至变为负值.这说明,在蒸发中前期,热辐射加热主要是加热液滴内部,形成热量积累、提高温度;蒸发末期,不仅对流加热全部用于蒸发,而且液滴内部向表面的热量供给速率已超过了辐射对液滴的辐射加热速率,必然导致末期的液滴表面内温度降低,这与图 4、图 5 中的液滴温度演变特性相对应.

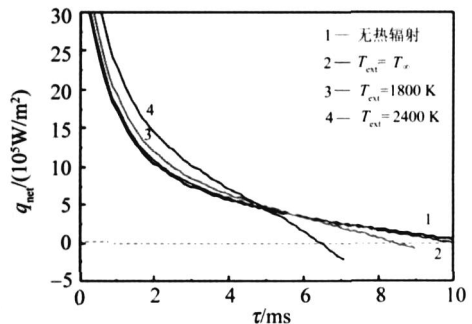


图 6 不同热辐射温度下进入液滴的净热流密度
Fig. 6 Net heat flux penetrating into the droplet under various thermal radiation temperatures

图 7 给出了热辐射对液滴瞬态蒸发率的影响

响. 计算参数与图 4 相同. 图中, 纵坐标 $G^* = G/m_0$, G , m_0 分别是蒸发率与液滴初始质量. 可以看出, 与纯对流加热情况类似, 在辐射-对流耦合加热下, 随着蒸发进程蒸发率先增大、后减小, 在蒸发中期前达到最大值. 辐射加热明显提高了最大蒸发速率, 并使中后期的蒸发速率加速降低.

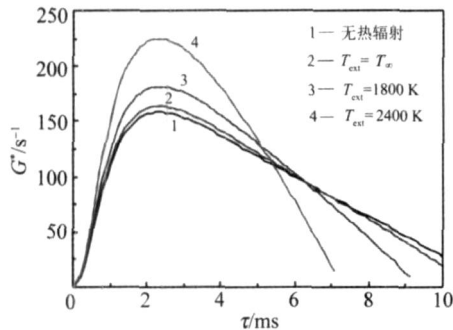


图 7 不同热辐射温度下液滴蒸发率的瞬态变化

Fig. 7 Transient evaporating rate of the droplet under various thermal radiation temperatures

5 结 论

本文分别采用两种热辐射吸收模型结合液滴内部有限导热系数模型, 在验证本文计算方法可靠性的基础上, 比较了两种辐射吸收模型的差别, 分析了耦合加热下正十二烷液滴的蒸发特性. 通过分析, 得出如下结论:

1) 在本文计算范围内, 两种辐射吸收模型对液滴寿命的预测结果差别很小, 但内部均匀吸收模型能更确切地反映液滴蒸发的过程特性, 计算效率与表面吸收模型相当.

2) 对正十二烷液滴的蒸发, 液滴周围气流自身热辐射的影响较小, 不超过 5%; 液滴远处存在高温热辐射源时, 辐射加热影响很大, 可使液滴寿命缩短 30% 以上.

3) 辐射与对流耦合加热下, 蒸发后期的液滴表面温度呈现随时间下降的特点, 与纯对流加热情况不同. 但使后期的蒸发率迅速降低.

4) 辐射-对流耦合加热下液滴蒸发的能量供应机制与纯对流加热情况差别很大. 在蒸发中前期, 热辐射加热液滴内部形成热量积累, 并抑制液滴表面向内导热, 使对流加热更多地供给蒸发, 明显提高了中前期蒸发率与最大蒸发率; 蒸发末期,

液滴内部热积累释放而向液滴表面导热, 对液滴表面形成双向供能.

参考文献:

[1] Sazhin S S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32:162-214.

[2] Zhang H T, Gogos G. Numerical research on a vaporizing fuel droplet in a forced convective environment [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2004, 30:181-198.

[3] Kim H S, Sung N W. The effect of ambient pressure on the evaporation of a single droplet and a spray [J]. Combustion and Flame, 2003, 135:261-270.

[4] 丁继贤, 孙凤贤, 姜任秋. 对流条件下环境压力对液滴蒸发的影响研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28:1104-1108.

DING Jixian, SUN Fengxian, JIANG Renqiu. Effects of ambient pressure on fuel droplet evaporation in a convective environments [J]. J. Harbin Engineering University, 2007, 28:1104-1108. (in Chinese)

[5] Bertoli C, Migliaccio M. A finite conductivity model for diesel spray evaporation computations [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1999, 20:552-561.

[6] Dombrovsky L A, Sazhin S S. A simplified non-isothermal model for droplet heating and evaporation [J]. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 2003, 30:787-796.

[7] Dombrovsky L A, Sazhin S S, Sazhina E M, et al. Heating and evaporation of semi-transparent diesel fuel droplets in the presence of thermal radiation [J]. Fuel, 2001, 80:1535-1544.

[8] Sazhin S S, Abdelgha W A, Sazhina E M, et al. Radiative heating of semi-transparent diesel fuel droplets [J]. ASME J. Heat Transfer, 2004, 126:105-109.

[9] Abramzon B, Sazhin S S. Droplet vaporization model in the presence of thermal radiation [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2005, 48:1868-1873.

[10] XIA Xinlin, HUANG Yong, TAN Heping. Thermal emission and absorption of a graded index semitransparent medium layer with specular surface and diffuse substrate-wall [J]. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2002, 74:235-248.

[11] Marchese A J, Dryer F L. The effect of non-luminous thermal radiation in microgravity droplet combustion [J]. Combustion Science and Technology, 1997, 124:371-402.

[12] Sazhin S S, Sazhina E M, Heikal M R. Modelling of the gas to fuel droplets radiative exchange [J]. Fuel, 2000, 79:1843-1852.

[13] 童景山. 流体的热物理性质 [M]. 北京:中国石化出版社, 1996.