

CeO₂ 纳米燃油单液滴蒸发数值模拟研究

梅德清^{1†}, 祁佳炜¹, 郭冬梅², 俞玥¹, 章传方¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 山东建筑大学理学院, 山东 济南 250101)

摘要:基于单液滴蒸发可视化试验,应用 ANSYS FLUENT 计算流体力学模拟软件,建立纳米燃油单液滴蒸发模型,探究纳米粒子质量浓度和粒径对燃油液滴蒸发过程中温度和燃油蒸气质量浓度的影响.结果表明,纳米燃油液滴中的纳米粒子质量浓度越高、粒径越小,燃油液滴的蒸发平衡温度越高,相同时间内的燃油蒸气气相体积分数越高.在环境温度 573 K 下,纳米燃油液滴从外界环境吸收热量使自身温度不断升高,在计算域内沿液滴表面向外延伸形成质量浓度边界层和温度边界层,促进液相向气相的转化.在蒸发初始阶段,蒸发速率较低,燃油蒸气气相体积分数较小;随着蒸发过程持续进行,由于纳米粒子增强传热传质的作用,液相组分蒸发汽化加快,液滴蒸发速率加快.

关键词:纳米粒子;蒸发;纳米燃油;液滴;数值分析

中图分类号:TQ026.4 **文献标志码:**A

Study on Numerical Simulation of Single Droplet Evaporation of CeO₂ Nano-fuel

MEI Deqing^{1†}, QI Jiawei¹, GUO Dongmei², YU Yue¹, ZHANG Chuanfang¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Science, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: A model of the single droplet evaporation of nano-fuel was conducted based on ANSYS FLUENT software with reference to the visualized evaporation experiments. The effects of nanoparticle mass concentration and size on the temperature distribution and fuel-vapor mass concentration during droplet evaporation were discussed. It was revealed by the simulation results that the evaporation equilibrium temperature of droplets tended to rise up with the increasing nanoparticle mass concentration or the size of the diminishing nanoparticle, and the vapor volume fraction was higher during the same evaporation period. At the ambient temperature of 573 K, the temperature inside the nano-fuel droplet was raised by absorbing heat from the external environment. And within the computational domain, the temperature boundary layer and mass concentration boundary layer were formed along the outward droplet surface, which promoted the conversion of liquid to gas. At the initial evaporation of nano-fuel droplet, the vapor volume fraction, as well as the evaporation rate was relatively low, while during the proceeding of evaporation, with the assistance of nanoparticles in enhancing heat and mass transfer, the liquids were evaporated to vapors with increasing rate.

Key words: nanoparticles; evaporation; nano-fuel; droplets; numerical analysis

* 收稿日期:2021-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51876082), National Natural Science Foundation of China(51876082)

作者简介:梅德清(1974—),男,江苏仪征人,江苏大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: meideqing@ujs.edu.cn

改善燃油品质是强化发动机燃烧、提升热效率和降低污染物排放的重要措施。由于纳米粒子具有良好的导热性、高比表面效应以及悬浮稳定性等特性,将纳米粒子加入燃油中,使得基液燃油的导热系数、动力黏度等基础理化参数发生改变,可以显著提升燃油品质,进而改善燃烧和排放性能,具有广泛的应用前景^[1-4]。燃油进入缸内燃烧前,会经历雾化蒸发阶段。然而,由于纳米粒子改变了基液分子间的相互作用,使相间传热的机理更加复杂,因此,纳米燃油液滴蒸发特性成为燃烧领域的重要基础研究内容^[5-6]。

目前,已有学者开展了纳米流体蒸发特性的试验研究。Javed等^[7]利用挂滴法探究了在 673~1 073 K 中高温环境下,Al-煤油静止单液滴的蒸发过程,发现其蒸发过程可大致分为 3 个阶段,并探究了纳米粒子质量浓度对液滴蒸发速率的影响,发现含较高质量浓度纳米粒子燃油液滴会出现明显的微爆现象。王琪^[8]采用挂滴法研究了在 623~923 K 范围内 Al-碳氢基纳米流体燃料单液滴蒸发和着火燃烧过程,探究不同纳米铝粒子质量浓度、粒径和表面活性剂与纳米铝粉质量比对液滴蒸发特性的影响。Chen 等^[9]探究了在不同环境温度下煤油液滴的蒸发特性,发现在强制对流环境中,随着雷诺数和舍伍德数增加,对流速度对蒸发速率的影响越来越显著。

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术在传热传质分析和流场预测等方面具有稳定性和准确性,是从微观上分析液滴蒸发行为的有力工具^[10]。Zigelman 等^[11]通过数值模拟方法探究了纳米粒子在不同扩散速度下的粒子分布随时间的变化规律,研究发现纳米粒子质量浓度分布是由液滴内部的粒子转移(对流和扩散传质)和粒子沉积速率竞争决定的。郭亚丽^[12]基于格子 Boltzmann 方法,采用多组分多相模型对纳米流体液滴在加热表面的蒸发过程进行了模拟,考察了平板表面温度和纳米粒子尺寸等对蒸发的影响。金铭等^[13]建立了纳米流体液滴蒸发的二维瞬态模型,探究了纳米粒子的输运行为以及液滴内部流动的影响。

当前研究的焦点主要集中于纳米流体液滴蒸发试验上,而油基纳米流体单液滴蒸发特性的模拟研究相对缺乏。此外,关于纳米粒子如何影响纳米燃油液滴蒸发特性的结论尚不一致,数值模型也不够完善。因此,本文以纳米燃油单液滴蒸发试验为基础,应用计算流体力学软件 ANSYS FLUENT 中的 EULER 多相流模型,研究 CeO₂ 纳米粒子的质量浓度

和粒径对正十四烷(以下简称 C14)燃油液滴蒸发特性的影响。

1 模型建立

1.1 物理模型

CeO₂ 纳米燃油液滴蒸发物理模型如图 1 所示。假设液滴在蒸发过程中始终保持均匀的球状,初始条件设置如下:液滴初始温度设为 300 K,环境温度为 573 K,液滴初始直径为 1 mm。为了保证流场计算的准确性,选择合适的计算域尺寸和边界条件十分重要,计算域过小会导致模拟结果不精确,而计算域过大,则会大大延长计算时间,浪费计算资源。经过对比,本文将计算域大小设置为 20 mm×20 mm。

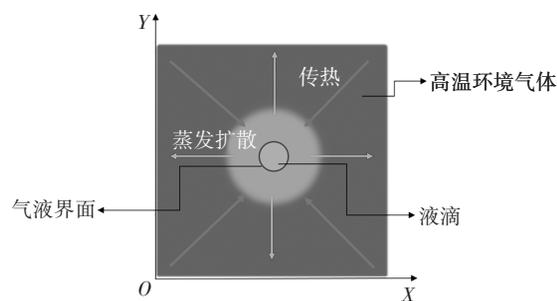


图 1 液滴蒸发物理模型

Fig.1 The physical model of droplet evaporation

纳米燃油液滴的蒸发过程涉及十分复杂的影响因素,为了降低模拟的难度,需要对纳米燃油液滴的计算模型进行简化和假设。在本模型中,忽略液滴内部温度差异,认为液滴内部温度分布均匀,并作出如下假设^[14-16]:

- 1) 忽略重力的影响,假设液滴在蒸发过程中始终保持均匀的球状。
- 2) 燃油蒸气与环境气体均视为理想气体。
- 3) 不考虑液滴在周围气体中的溶解及自身分解。
- 4) 忽略温度差引起传质的 Soret 效应和浓度差引起传热的 Dufour 效应。
- 5) 忽略辐射传热的影响。

1.2 数学模型

1.2.1 欧拉-欧拉多相流模型

液滴的蒸发模型采用 FLUENT 中的 Lee 模型,它是基于物理基础的力学模型,气-液传质由气相输运方程控制,如式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \bar{V}_v) = \dot{m}_{bv} \quad (1)$$

式中: α_v 为气相体积分数; v 为气相; ρ_v 为气相密度; \bar{V} 为气相速度; \dot{m}_{lv} 为蒸发的传质速率,其具体表达式为:

$$\dot{m}_{lv} = \text{coeff} \frac{\alpha_b \rho_b (T_b - T_{\text{sat}})}{T_{\text{sat}}} \quad (2)$$

式中: T_{sat} 为饱和温度;coeff为控制相变强度的因子; α_b 、 ρ_b 和 T_b 分别为液相的体积分数、密度及温度; b 为液相.

1.2.2 控制方程

在欧拉-欧拉方法中,不同的相被处理成互相贯穿的连续介质.由于一种相所占的体积无法再被其他相占有,故此引入相体积分数的概念.体积率是时间和空间的连续函数,各相的体积分数之和等于1.

纳米燃油液滴的局部蒸发流量、总蒸发速率、气-液界面换热量的计算公式分别为^[13]:

$$j_L = \frac{M(D\nabla c)}{\rho} \quad (3)$$

$$j_V = \int_S j_L dS \quad (4)$$

$$q = -\bar{m}h_i \quad (5)$$

式中: j_L 为纳米燃油液滴的局部蒸发流量; M 为燃油蒸气的摩尔分数; c 为蒸气浓度; D 为气相区域内的蒸气扩散系数; ρ 为燃油蒸气的密度; j_V 为纳米燃油液滴的蒸发速率,即单位时间内纳米燃油液滴蒸发的体积; S 为燃油蒸气的截面积; q 为单位时间内气-液界面换热量; \bar{m} 为液滴蒸发时蒸气的质量流量; h_i 为汽化潜热.

2 模型验证

2.1 网格无关性验证

网格划分对模拟计算的准确度具有很大的影响^[17],合理的网格划分方法可以在保证计算精度的基础上有效减小计算量,因此,有必要对网格无关性进行验证来确定最合适的尺寸条件.

以C14液滴作为先验研究对象,环境温度为573 K,液滴初始温度为300 K,液滴直径为1 mm.如表1所示,设置了4种不同的网格划分方案,其中液滴所占网格数量分别为69、316、7 860和31 401,液滴的面积也略有差别.按时间步长为 1×10^{-6} ,单步最大迭代次数为30次,迭代相同次数,以计算域中温度的变化情况作为网格无关性检验的指标.以网格数量最多的试验方案4为参照组,分别计算方案1、方案2、方案3与方案4之间的计算结果误差.

表1 网格独立性设计方案及结果比较

Tab.1 Grid independence design and comparison of simulation results

方案	网格数量	网格尺寸/(mm×mm)	液滴表面积/mm ²
1	38 416	0.05×0.05	0.690
2	160 000	0.01×0.01	0.790
3	4 000 000	0.005×0.005	0.786
4	10 000 960	0.001×0.001	0.785

网格的大小对计算结果的精度有明显的影响,图2为4种不同设计方案的网格独立性验证.从图2中可以看出,方案1和方案4的计算结果相差最大;方案3和方案4的计算结果趋同.这说明当网格尺寸逐步减小,计算结果受网格尺寸的影响会迅速降低.网格数量增加到一定程度时,网格尺寸对计算精度的影响可忽略不计.虽然网格数量越多,计算结果相对越精确,但过小的网格尺寸会使得计算时间成倍增长,与方案3相比,方案4的计算时间大大延长.由于本模型的几何结构相对简单,结合计算的经济性和准确性,综合考虑后,选用方案3的网格划分尺寸进行下一步模拟研究.

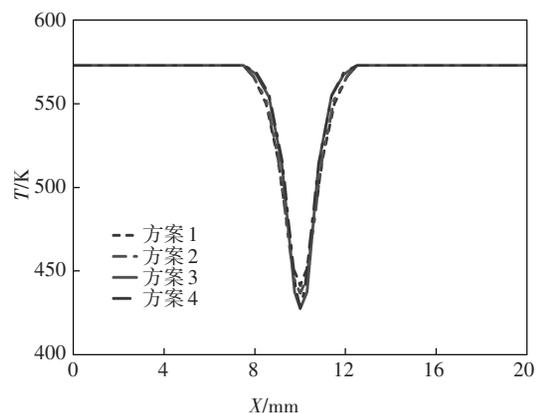


图2 网格独立性验证

Fig.2 Verification of grid independence

2.2 单液滴蒸发试验模型验证

为验证蒸发模型的准确性,选用以C14为基液燃油、以粒径分别为20 nm和50 nm的 CeO_2 为纳米粒子的纳米燃油,开展纳米燃油单液滴蒸发试验.基于两步法^[18],配制分别得到50 mg/L、100 mg/L和150 mg/L的纳米燃油油样.为方便表述,分别以上、下标指代粒子质量浓度和粒径,如 Ce_{20}^{50} 表示质量浓度为50 mg/L、粒子粒径为20 nm的 CeO_2 纳米燃油.

纳米燃油单液滴蒸发试验装置主要包括蒸发圆

筒、温度控制器、丝杠、挂滴、背光灯、高速摄像机和电脑等组件,示意图如图3所示.其中,温度控制器主要由电阻丝和热电偶组成,通过电阻丝加热来提高圆筒内温度以达到试验条件.液滴输送装置主要由滚珠丝杠、石英丝和步进电机构成.在滚珠丝杠底端将两根石英丝固定,呈十字交叉状,其中心交叉部位用于承载和悬挂液滴.液滴由微量进样器产生,液滴体积约为0.5 μL.图4为在573 K下Ce₂₀纳米燃油液滴蒸发过程中的形态变化.

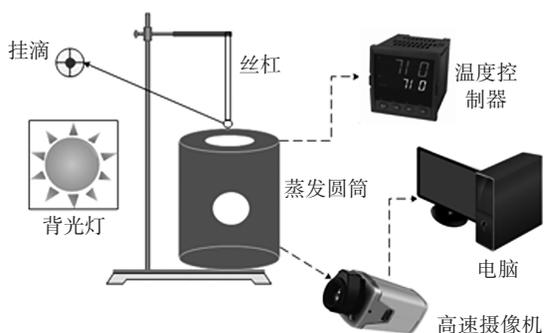


图3 单液滴蒸发装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of single droplet evaporation device

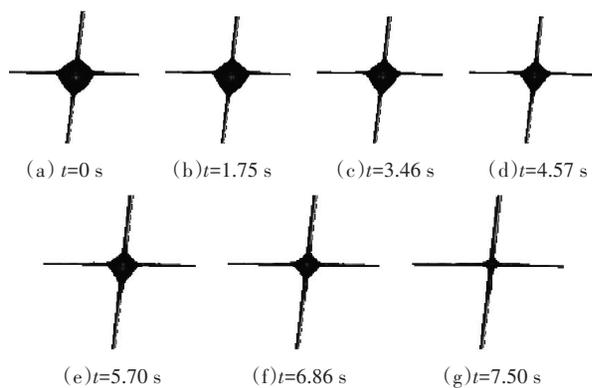


图4 在573 K下Ce₂₀纳米燃油液滴蒸发过程中的形态变化

Fig.4 Morphology change of Ce₂₀ nano-fuel droplet during evaporation at 573 K

基于上文所确定的网格尺寸,开展Ce₂₀纳米燃油液滴蒸发过程数值模拟,并以模拟得到的随时间变化的液滴直径 d 与试验数据进行对比,如图5所示. Ce₂₀纳米燃油液滴初始条件设置如下:液滴初始温度为300 K,环境温度为573 K,液滴初始直径 d_0 为1 mm. 由图5可知,在设定的时间范围内,模拟结果和试验结果存在一定的差异,模拟结果的液滴直径的变化始终快于试验值.这是由于在试验过程中误差难以完全消除,且一定程度上存在着热量损耗.两者趋势呈现较好的一致性,说明所建立的模

型是合理的.

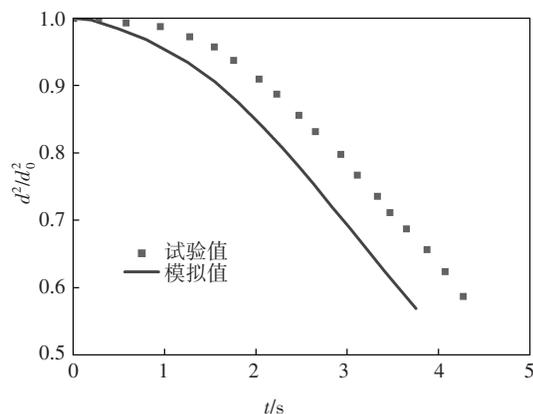


图5 Ce₂₀纳米燃油蒸发过程中液滴直径随时间变化的试验值与模拟值对比

Fig.5 Comparison of measured droplet diameters with simulated results varying with time during the evaporation of Ce₂₀ nano-fuel

3 模拟结果与分析

3.1 液滴蒸发过程温度变化

液滴温度场的变化可以在一定程度上反映液相传热的能力.图6为573 K环境温度下,Ce₂₀纳米燃油液滴蒸发过程的温度场变化.由图6可见,高温环境与Ce₂₀纳米燃油液滴之间存在温度差,液滴和高温环境通过自然对流和热传导进行换热.在对流换热中,当流体流经与其温度不同的流体或固体表面时,由于温度不同,在两者接触面的法线方向上的流体的温度会发生显著的变化,产生温度梯度.

以蒸发平衡温度来衡量液滴温度的变化情况^[19].在高温环境下蒸发时,在温度差的驱动下,热量不断地从高温环境传向低温液滴,一部分用来使液滴温度迅速升高,另一部分则会提供给液体分子作为蒸发时消耗的热量.因此,液滴温度不会升至和外界环境相同的温度,而是逐渐升至某一个温度而后基本保持不变,即为液滴的蒸发平衡温度,液滴吸热升温的阶段即为瞬时加热阶段.

图7为在573 K温度条件下,不同质量浓度Ce₂₀纳米燃油液滴蒸发平衡温度.由图7可知,在573 K时,Ce₂₀、Ce₁₀₀和Ce₁₅₀纳米燃油液滴的蒸发平衡温度随纳米粒子质量浓度的增大而升高,分别为469.8 K、472.8 K和474.6 K,相较于C14分别提高了1.5%、2.3%和2.7%.图8为在573 K温度条件下,不同质量浓度Ce₂₀纳米燃油液滴的瞬时加热阶段. Ce₂₀纳米燃油液滴的瞬时加热阶段持续了1.58 s,占蒸发总时

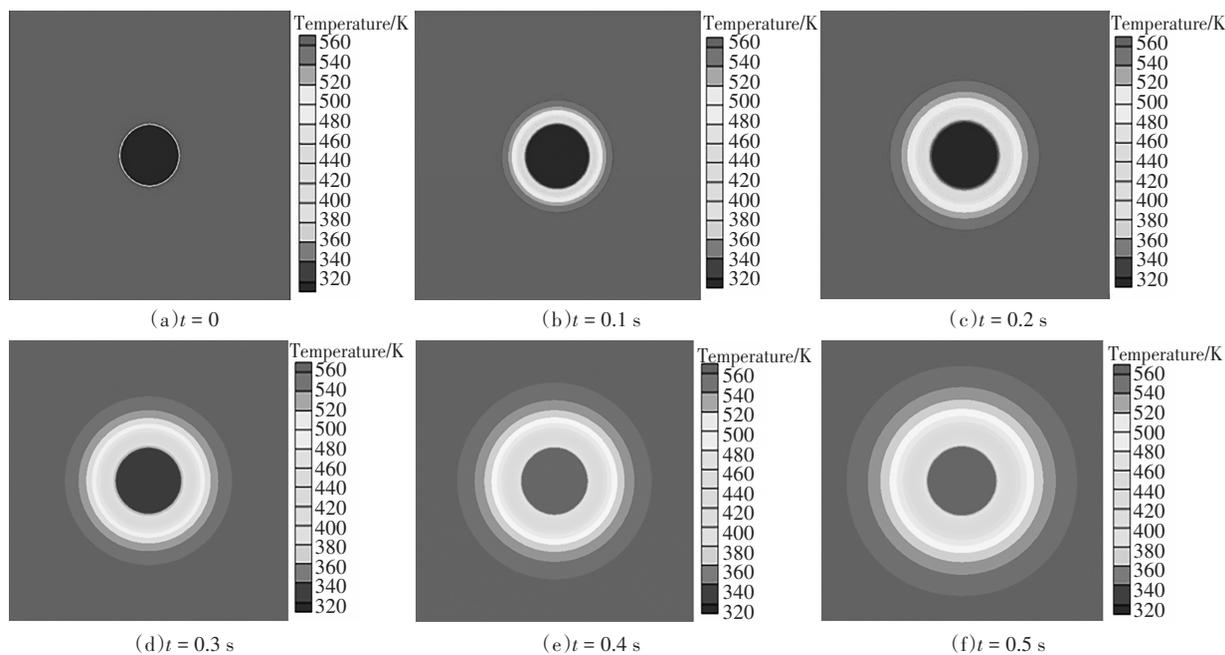


图6 573 K环境温度下Ce₂₀纳米燃油液滴蒸发过程的温度场变化

Fig.6 The temperature field of Ce₂₀ nano-fuel droplet during evaporation at 573 K

长的22.9%；而Ce₂₀¹⁵⁰纳米燃油液滴的瞬时加热阶段为1.41 s，占蒸发总时长的21.4%。随着粒子质量浓度的增加，纳米燃油液滴的瞬时加热阶段占总蒸发阶段的比例也越小，有利于促进蒸发。这是由于纳米粒子的加入使得基液燃油的导热系数大大增加，在相同时间内，能从外界吸收更多的热量。同时纳米粒子作为固体，相对于基液，其比热容较小，温度升高更快，一定程度上也会提高液滴的平衡温度。因此，粒子质量浓度越高，纳米燃油液滴的蒸发平衡温度越高；同时，液滴的瞬态阶段越短，液滴能快速进入稳定蒸发阶段，加快燃油液滴的蒸发进程，有利于液滴的蒸发。

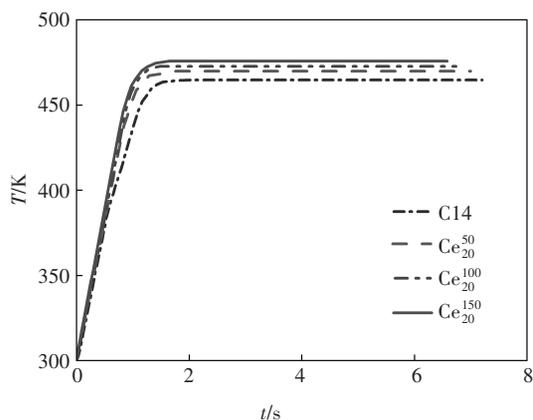


图7 不同质量浓度Ce₂₀纳米燃油液滴蒸发平衡温度
Fig.7 Evaporation equilibrium temperatures of Ce₂₀ nano-fuel droplet with various mass concentrations

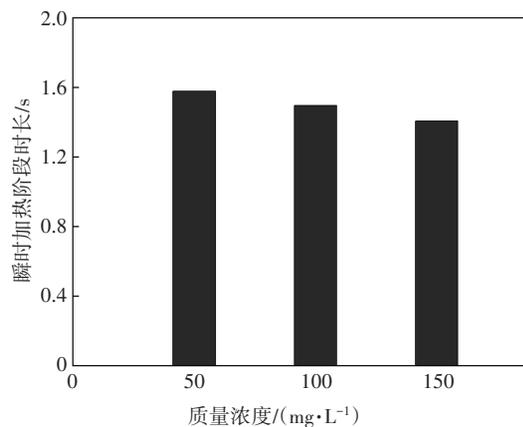


图8 不同质量浓度Ce₂₀纳米燃油液滴的瞬时加热阶段
Fig.8 Instantaneous heating stage of Ce₂₀ nano-fuel droplet with various mass concentrations

基液燃油中所含纳米粒子的粒径不同，蒸发平衡温度也不同。图9为573 K温度下，不同粒径Ce₂₀⁵⁰和Ce₂₀⁵⁰纳米燃油液滴蒸发平衡温度。由图9可知，Ce₂₀⁵⁰纳米燃油液滴的蒸发平衡温度为469.8 K，而Ce₂₀⁵⁰纳米燃油液滴的蒸发平衡温度为467.3 K，可见含有大粒径纳米粒子的燃油液滴的蒸发平衡温度较低。图10为不同粒径Ce₂₀⁵⁰和Ce₂₀⁵⁰纳米燃油液滴的瞬时加热阶段。由图10可见，Ce₂₀⁵⁰和Ce₂₀⁵⁰纳米燃油液滴的瞬时加热阶段时长分别为1.58 s和1.61 s，占各自蒸发总时长的22.9%和23.1%。这是由于在相同质量分数下，大粒径粒子的数量相对较少，粒-液之间传

热的界面也相对较少,换热的能力相对较弱,造成了液滴升温速度相对较慢,液滴的蒸发平衡温度也相对较低.

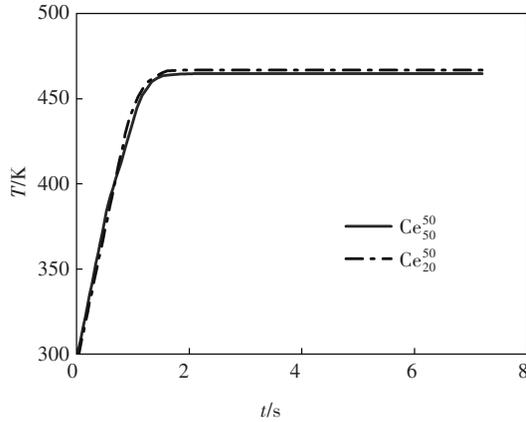


图9 不同粒径Ce₂₀和Ce₅₀纳米燃油液滴蒸发平衡温度
Fig.9 Evaporation equilibrium temperatures of Ce₂₀ and Ce₅₀ nano-fuels droplets with different particle sizes

减小,产生质量浓度梯度.与温度边界层类似,当流体与相界面存在浓度差时,在分子扩散和对流传质的共同作用下,液滴在蒸发过程中会发生质量的转移,随着蒸发过程的持续进行,液相体积分数也在不断减小.

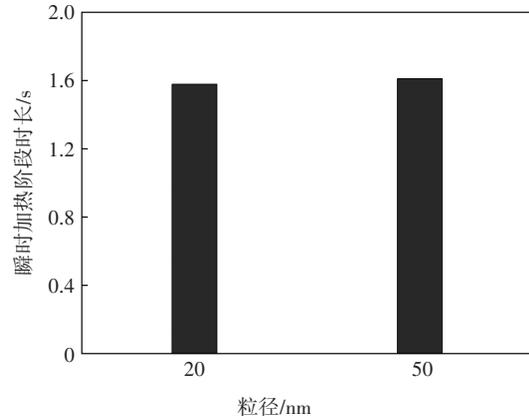


图10 不同粒径Ce₂₀和Ce₅₀纳米燃油液滴的瞬时加热阶段

3.2 液滴蒸发过程质量浓度变化

图 11 为在 573 K 环境温度下 Ce₂₀ 纳米燃油液滴蒸发过程质量浓度场变化. 由图 11 可知,随着蒸发过程的持续推进,燃油蒸气逐渐在液滴表面进行聚集,在巨大质量浓度差的驱使下不断向周围环境扩散,产生燃油蒸气的对流传导. 扩散后的燃油蒸气在计算域内呈轴对称分布,沿液滴中心向外浓度逐渐

Fig.10 Instantaneous heating stage of Ce₂₀ and Ce₅₀ nano-fuels droplets with different particle sizes

图 12 为不同质量浓度的 Ce₂₀ 纳米燃油液滴蒸发过程的气相体积分数的变化情况. 由图 12 可知,在蒸发起点,气相体积分数为 0,随着蒸发过程的进行,燃油蒸气逐渐积累,燃油蒸气体积分数逐渐增加. 燃油蒸气体积分数随时间的变化可大致分为两个阶

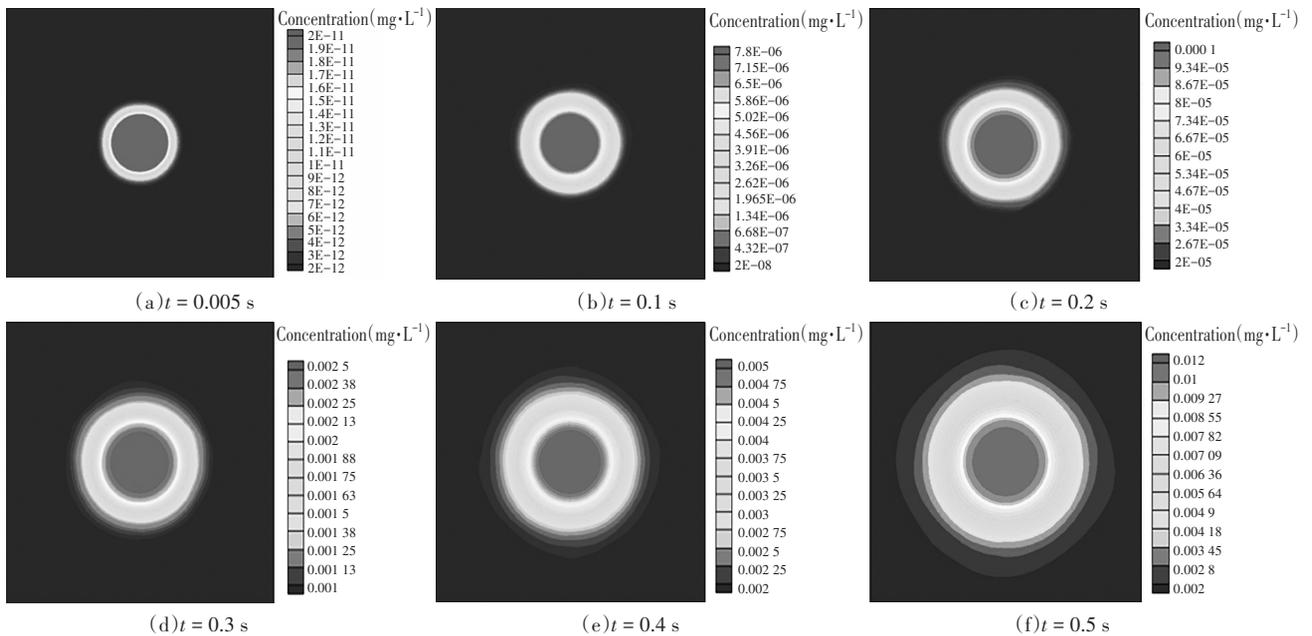


图 11 在 573 K 环境温度下 Ce₂₀ 纳米燃油液滴蒸发过程质量浓度场变化

Fig.11 The change in concentration field of Ce₂₀ nano-fuel droplet during evaporation

段:在初始阶段,气相体积分数随时间的变化率较小,而后气相体积分数随时间快速增加.为下文方便表述,将划分两个阶段的时间点定义为 t_0 .不同质量浓度的纳米燃油的气相体积分数变化存在差异.其中, Ce_{20}^{150} 纳米燃油液滴的燃油蒸气气相体积分数随时间的变化率最快, Ce_{20}^{50} 纳米燃油液滴的气相体积分数随时间变化率相对较慢. Ce_{20}^{50} 和 Ce_{20}^{150} 纳米燃油划分两阶段的时间定义点分别为 t_{01} 、 t_{02} ,在 t_0 时刻时, Ce_{20}^{50} 纳米燃油液滴的气相体积分数为0.116, Ce_{20}^{150} 纳米燃油液滴的气相体积分数为0.121,提高了4.3%.说明在该温度条件下,纳米粒子质量浓度越高,越有利于促进液相向气相转化.这是由于基液中所含纳米粒子质量浓度越高,液滴的蒸发平衡温度越高,液相分子所获能量越多,因此,气-液相变的速率越快.

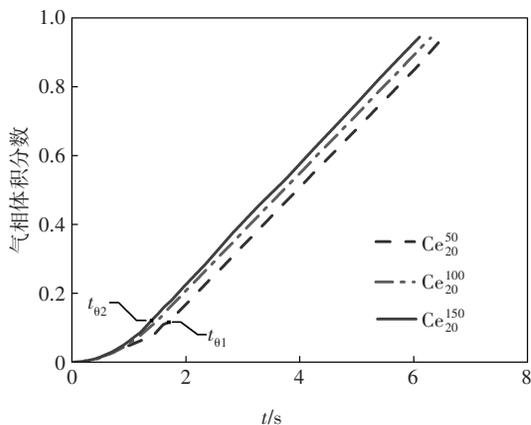


图12 不同质量浓度的 Ce_{20} 纳米燃油液滴蒸发过程的气相体积分数

Fig.12 Vapor volume fraction of Ce_{20} nano-fuel droplet with different mass concentrations during evaporation

图13为不同粒径的 Ce_{50} 纳米燃油液滴蒸发过程的气相体积分数的变化情况.由图13可知,纳米粒子的粒径也会影响燃油蒸气的气相体积分数变化率. Ce_{20}^{50} 纳米燃油液滴的气相体积分数变化率要快于 Ce_{50}^{50} 纳米燃油液滴. Ce_{20}^{50} 和 Ce_{50}^{50} 纳米燃油划分两阶段的时间定义点分别为 t_{03} 、 t_{04} ,在 t_0 时刻时, Ce_{50}^{50} 纳米燃油液滴的气相体积分数为0.104,相较于 Ce_{20}^{50} 纳米燃油液滴,降低了10.3%.这是由于大粒径纳米粒子与基液之间传热的效率较慢,提升液滴内部温度的能力相对较弱,因此其相对较小粒径的纳米粒子,促进液滴蒸发的效果也较弱,液相分子蒸发为燃油蒸气的速率较慢.

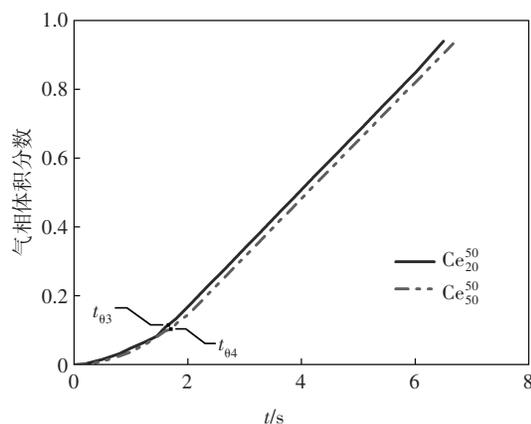


图13 不同粒径的 Ce_{50} 纳米燃油液滴蒸发过程的气相体积分数

Fig.13 Vapor volume fraction of Ce_{50} nano-fuel droplet with different particle sizes during evaporation

4 结论

1)以液滴蒸发试验数据为参照,基于EULER多相流模型构建了纳米燃油单液滴蒸发模型,经验证其计算精度满足需求,进而分析了 CeO_2 纳米粒子质量浓度和粒径对燃油液滴蒸发特性的影响.

2)在蒸发初期,由于液滴温度较低,液相向气相转化的速率较慢,气相体积分数较小.随着气-液间热量传递不断进行,纳米燃油液滴的温度逐渐升高,液体分子获得了足够的能量,不断蒸发为燃油蒸气,气相体积分数随时间快速增加.粒子质量浓度越高,粒子粒径越小,气相体积分数随时间的变化越快,越有利于促进液相气化.

3)在环境温度573 K下,各纳米燃油的蒸发平衡温度均高于C14,且纳米粒子质量浓度越高、粒子粒径越小,液滴的蒸发平衡温度越高,液体分子获得的能量越大,越有利于促进蒸发.

参考文献

- [1] CHEN A F, ADZMI M A, ADAM A, *et al.* Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 461-477.
- [2] JIANG L, XIE X L, WANG L W, *et al.* Investigation on an innovative sorption system to reduce nitrogen oxides of diesel engine by using carbon nanoparticle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 134: 29-38.
- [3] FAYYAZBAKSH A, PIROUZFAR V. Investigating the influence

- of additives-fuel on diesel engine performance and emissions: analytical modeling and experimental validation[J]. *Fuel*, 2016, 171: 167-177.
- [4] TIWARI H P, BANERJEE P K, SAXENA V K. A novel technique for assessing the coking potential of coals/coal blends for non-recovery coke making process[J]. *Fuel*, 2013, 107: 615-622.
- [5] BAKTHAVATCHALAM B, HABIB K, SAIDUR R, *et al.* Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement; a review on current and future perspective[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 305: 112787.
- [6] YAN X, XU J L, MENG Z J, *et al.* A comprehensive comparison between substrate heating and light heating induced nanofluid droplet evaporations [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115389.
- [7] JAVED I, BAEK S W, WAHEED K. Effects of dense concentrations of aluminum nanoparticles on the evaporation behavior of kerosene droplet at elevated temperatures: the phenomenon of microexplosion[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 56: 33-44.
- [8] 王琪. 铝/乙醇基纳米流体燃料液滴蒸发和燃烧特性研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2018: 44-52.
WANG Q. Study on evaporation and combustion characteristics of aluminum/ethanol-based nanofluid fuel droplets [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018: 44-52. (In Chinese)
- [9] CHEN L F, LI G Z, FANG B. Droplet evaporation characteristics of aviation kerosene surrogate fuel and butanol blends under forced convection [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 114: 229-239.
- [10] BEHROYAN I, VANAKI S M, GANESAN P, *et al.* A comprehensive comparison of various CFD models for convective heat transfer of Al₂O₃ nanofluid inside a heated tube[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 70: 27-37.
- [11] ZIGELMAN A, MANOR O. The deposition of colloidal particles from a sessile drop of a volatile suspension subject to particle adsorption and coagulation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 509: 195-208.
- [12] 郭亚丽. 纳米流体固着液滴蒸发等流动与传热问题的LBM分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 64-78.
GUO Y L. Study of flow and heat transfer in the process such as evaporation of nanofluid sessile droplet with LBM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009: 64-78. (In Chinese)
- [13] 金铭, 胡定华, 李强, 等. Al₂O₃纳米流体液滴蒸发特性的数值模拟研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(11): 4199-4206.
JIN M, HU D H, LI Q, *et al.* Simulation of sessile nanofluid droplet evaporation character [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(11): 4199-4206. (In Chinese)
- [14] PINHEIRO A P, VEDOVOTO J M. Evaluation of droplet evaporation models and the incorporation of natural convection effects[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2019, 102(3): 537-558.
- [15] ZHANG L, KONG S C. Modeling of multi-component fuel vaporization and combustion for gasoline and diesel spray [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64(16): 3688-3696.
- [16] TAMIM J, HALLETT W L H. A continuous thermodynamics model for multicomponent droplet vaporization[J]. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(18): 2933-2942.
- [17] SHENG Y, WANG M Y, ZHANG L, *et al.* Analysis of filtration process of 3-D mesh spacer filter by using CFD-DEM simulation [J]. *Powder Technology*, 2022, 396: 785-793.
- [18] BAKHTIARI R, KAMKARI B, AFRAND M, *et al.* Preparation of stable TiO₂-graphene/water hybrid nanofluids and development of a new correlation for thermal conductivity [J]. *Powder Technology*, 2021, 385: 466-477.
- [19] WU M R, WANG M, ZHANG Y Y, *et al.* Efficient and clean preparation of rare prosaikogenin D by enzymatic hydrolysis of saikosaponin B₂ and response surface methodology optimization [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2020, 142: 109690.