

随机分布介尺度油滴群的燃烧特性

孙婷¹, 周力行², 李科¹

(1. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 清华大学 航天航空学院 工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 对液雾燃烧中随机分布油滴群的蒸发/燃烧特性进行了数值模拟研究,详细考虑了油滴尺寸、坐标分布、数密度等相关参数的随机性。采用一步总包反应机理对其进行大涡模拟,在不同的来流速度、环境温度下,剖析了不同数密度油滴群的阻力特性及蒸发率,并结合油滴群燃烧模态分析油滴间的相互作用规律。研究表明,油滴群燃烧模态同时包含单油滴三种油滴燃烧火焰模态;各油滴表面燃料蒸气的浓度分布呈现非对称性,反应核心区发生角度偏转;在强对流环境下,蒸发/燃烧油滴群的平均表面蒸发率与阻力系数的变化与蒸发/燃烧单油滴相似,油滴间的强烈相互作用加速了油滴群蒸发/燃烧的传热传质。

关键词: 随机油滴群; 蒸发/燃烧; Stefan 流; 表面蒸发率; 阻力系数

中图分类号: V434. +14; TF051

文献标志码: A

Combustion characteristics of randomly distributed mesoscale droplets

SUN Ting¹, ZHOU Lixing², LI Ke¹

(1. Insitute of Energy and Environment,
Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Nemenggu 014010, China;
2. Department of Engineering Mechanics,
School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The evaporation/combustion characteristics of randomly distributed droplets in spray combustion were studied numerically, the randomness of the droplet size, coordinate distribution and number density was considered in detail. The large eddy simulation was carried out by the one step general package reaction mechanism, while the resistance characteristics and evaporation rate of droplets with different number density at different inflow rates and ambient temperatures were analyzed, and the interaction between droplets was analyzed in combination with the combustion modes. The results show that the combustion modes of the droplets include three flame modes (fully-enveloped flame, partially-enveloped flame and wake flame) of a single droplet at the same time. The concentration of ethanol vapor on the surface of each droplet presents asymmetrical distribution, and the core region of the reaction deflects at an angle. In the strongly convective environment, the variation of average surface evaporation rate and resistance coefficient of evaporation/combustion droplets is similar to that of a single evaporation/combustion droplet, the strong interaction between droplets

收稿日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51266008)

作者简介: 孙婷(1992—),女,硕士生,主要从事多相湍流流动及燃烧。

通讯作者: 李科(1981—),男,教授,博士,主要从事多相湍流流动及燃烧。E-mail:kelitsinghua@hotmail.com

引用格式: 孙婷,周力行,李科. 随机分布介尺度油滴群的燃烧特性[J]. 航空动力学报,2019,34(3):576-583. SUN Ting,ZHOU Lixing,LI Ke. Combustion characteristics of randomly distributed mesoscale droplets[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(3):576-583.

could accelerates the heat and mass transfer of evaporation/combustion of droplets.

Key words: random droplets; evaporation/combustion; stefan flow;
surface evaporation rate; resistance coefficient

液雾燃烧普遍存在于内燃机、航空发动机、液体火箭发动机等推进系统中。液雾作为燃烧行为源和蒸发吸热(冷油滴)的热汇,其中的油滴通常是以群的形式主导蒸发/燃烧,而不是单独存在于气相空间中。由于多相湍流燃烧综合了湍流、多相流、相变传热传质、化学反应及其相互耦合等因素,湍流与燃烧的相互作用机制^[1-7]十分复杂。液雾中油滴蒸发和燃烧的实验与理论研究源于20世纪中叶,至今仍未能建立准确描述各种条件下液雾湍流燃烧的理论模型。Castanet等^[8]利用平面激光诱导荧光(PLIF)技术表征了正庚烷油滴平均温度随时间的变化和油滴周围的燃料蒸气分布,并基于简化的传热传质模型进行数值模拟,结合实验分析油滴直径和间距对燃料蒸气浓度场的影响。Chiu^[9]总结了单油滴燃烧的不同模态与来流速度、环境温度之间的定量关系,并预测了油滴群燃烧和单油滴燃烧可能存在的差别。Bilger^[10]从混合分数的角度验证了蒸发/燃烧过程中孤立惯性液滴的经典理论,通过考虑气相组成和温度波动等将传统的欧拉/拉式模型进一步细化,完善了液滴蒸发过程的气相非预混燃烧理论模型。Chen等^[14]采用水动力模型模拟了孤立液氢(LH)油滴蒸发/燃烧的准稳态 Stefan 流动状态,指出一个辐射热等于传导热的临界半径(AC-RD)的存在,分别研究了 LH 油滴在冷环境($T_{\infty}=300\text{ K}$)与热环境($T_{\infty}=3\,800\text{ K}$)中燃烧时的火焰特点。Zhou等^[12-15]基于强迫对流下的燃烧油滴三种模态(全包火焰、半包火焰和尾部火焰),将不同油滴燃烧模型的大涡模拟结果与 Zhou^[16]的早期理论进行对比验证。Sanya^[17]采用“单元胞体”方法建立液雾燃烧中油滴的物理模型,分别基于油滴级和团簇级模型来分析对流、高压和多组分成分对油滴蒸发/燃烧特性影响。Segawa等^[18]在微重力条件下研究了49个单分散油滴在高温空气中的自燃和早期火焰行为,总结出初始油滴直径和间距对高温空气中单个油滴火焰与团簇火焰的转变规律。上述研究大多是对液雾燃烧中单油滴及油滴群进行模型简化处理,并且对油滴群燃烧的定量研究尚鲜见报道。

本文利用 Matlab 随机生成不同尺寸、位置信

息的油滴群介尺度模型,采用一步总包反应机理对其进行大涡模拟,对比不同来流速度、环境温度、不同油滴数密度的油滴群阻力特性及蒸发率,并结合油滴群燃烧模态分析油滴间的相互作用规律。油滴群蒸发/燃烧介尺度模型为完善液雾燃烧各子模型和液雾湍流燃烧机制提供了重要依据。

1 数学模型

1.1 控制方程

油滴群蒸发/燃烧过程的气相(连续相)质量、动量、能量和组份守恒方程为

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

2) 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ij} \right] - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \\ \sum_k \frac{\rho_k}{\tau_{rk}} (u_{ki} - u_i) \end{aligned} \quad (2)$$

3) 能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{h} \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \cdot \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \right) - \\ \frac{\partial q_{jsgs}}{\partial x_j} + \bar{q}_r \end{aligned} \quad (3)$$

4) 组分方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \bar{Y}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \bar{Y}_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} \cdot \frac{\partial \bar{Y}_s}{\partial x_j} \right) - \\ w_s - w_{sgs} - \frac{\partial q_{jsgs}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 ρ 为密度, t 为时间, u 为速度分量, p 为压力, h 为焓, Y_s 为组分 s 的质量分数, T 为温度, Pr 为 Prandtl 数, Sc 为 Schmidt 数, w_s 为反应率。

本文采用 Germano 等提出的 Dynamic Smagorinsky Model。动态模型是基于两个不同的亚网格尺度应力张量分别对两个不同的过滤尺寸进行计算,两种尺度的滤波所产生的亚网格应力 τ_{ij}^{sgs} 和 T_{ij} 之间的关系为

$$T_{ij} - \tau_{ij}^{sgs} = \widehat{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \widehat{\bar{u}_i} \widehat{\bar{u}_j} = L_{ij} \quad (5)$$

其中 2 阶张量 L_{ij} 是介于主过滤尺度 $\bar{\Delta}$ 和二次过滤

尺度 $\hat{\Delta}$ 之间湍流涡团运动产生的应力。在 Smagorinsky 模型,这两个尺度上的亚网格应力分别为

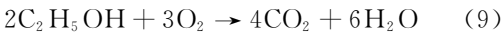
$$\tau_{ij}^{\text{sgs}} = 2\rho C_s \hat{\Delta}^2 |\bar{\mathbf{S}}| \bar{\mathbf{S}}_{ij} \quad (6)$$

$$T_{ij} = 2\rho C_s \hat{\Delta}^2 |\bar{\mathbf{S}}| \hat{\mathbf{S}}_{ij} \quad (7)$$

由式(5)、式(6)、式(7)可得: $\mathbf{L}_{ij} = 2\rho C_s \hat{\Delta}^2 |\bar{\mathbf{S}}| \hat{\mathbf{S}}_{ij} - 2\rho C_s \hat{\Delta}^2 |\bar{\mathbf{S}}| \bar{\mathbf{S}}_{ij} = C_s \mathbf{M}_{ij}$, $|\bar{\mathbf{S}}|$ 为应力张量的模数, $|\bar{\mathbf{S}}| = \sqrt{2\bar{\mathbf{S}}_{ij}\bar{\mathbf{S}}_{ij}}$ 。动态系数 C_s 可确定为

$$C_s = \frac{\mathbf{L}_{ij}\mathbf{M}_{ij}}{\langle \mathbf{M}_{ij}\mathbf{M}_{ij} \rangle} \quad (8)$$

文中采用分解法对气相燃烧速率进行间接计算, $w_{\text{sgs}} = \overline{w(\phi)} - w(\bar{\phi})$, $\bar{\phi}$ 代表过滤后的反应物浓度值、温度值等标量,采用亚网格燃烧模型进行直接计算。乙醇-氧气燃烧反应取一步总包反应机理



采用 Arrhenius 公式计算平均反应速率 w_A

$$w_A = 8.345 \times 10^9 \rho^2 Y_{\text{fu}} Y_{\text{ox}} \exp\left(-1.26 \times \frac{10^8}{RT}\right) \quad (10)$$

对辐射传热采用基于球形谐波法的 P-1 模型: $-\bar{q}_r = aG - 4a\sigma T^4$ 。其中 σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, a 是吸收系数, G 是入射辐射。

1.2 油滴蒸发、燃烧的边界条件

油滴表面燃料蒸气法向速度为 Stefan 流速度(忽略切向速度),即: $v_n = v_w$, 在过程中迭代求解 v_w 。油滴表面能量方程边界条件^[19]

$$\lambda_w \left(\frac{dT}{dr} \right)_w = \rho_w v_w q_e = \frac{G}{4\pi r_w^2} q_e \quad (11)$$

式中 λ_w 气液界面处气体导热系数, $(dT/dr)_w$ 为气液界面处气体温度梯度, ρ_w 燃料蒸气密度, v_w 为 Stefan 流法向速度, q_e 为蒸发潜热, r_w 为油滴半径, G 表示油滴总的蒸发率。油滴表面处燃料蒸气浓度为饱和状态(近似为沸点温度)下的浓度。气液界面处的组分方程边界条件^[19]

$$-D_w \rho_w \left(\frac{dY}{dr} \right)_w + Y_s \rho_w v_w = \alpha \rho_w v_w \quad (12)$$

$$\sum Y_s = \sum Y_f + \sum Y_{\text{ox}} + \sum Y_{\text{pr}} + \sum Y_{\text{in}} = 1 \quad (13)$$

式中下标 $s=f$ (fuel)时, $\alpha=1$; $s=\text{ox}$ (oxygen)、 pr (production)、 in (inert)时, $\alpha=0$ 。 T_w 为油滴表面温度,在燃烧状态下,当火焰温度非常高时(大于 1000°C),油滴表面温度近似于油滴燃料的沸点温度。油滴表面区域乙醇蒸气的分压力采用 Antoine 方程计算。其中 Antoine 方程为

$$\ln p = A - \frac{B}{T+C} \quad (14)$$

$$\Phi = KA\Delta t \quad (15)$$

式中 p 是蒸气压,单位为 10^5 Pa 。 T 为绝对温度,单位为 K。 A 、 B 和 C 为 Antoine 常数,可由不同温度下的蒸气压数据回归求得。

2 几何模型与边界条件

本文研究的是油滴群准定常燃烧行为,图 1 为油滴群模型及网格分布。油滴尺寸、分布、位置信息如图 1(a)所示,油滴几何尺寸见表 1,油滴燃料为乙醇。基于液雾实验中油滴尺寸及数密度等统计参数,取边长为 $1200 \mu\text{m}$ 的正方体计算域,所含油滴个数分别取 5、7、12,在本文中将其规定为模型 1、模型 2、模型 3。网格数约为 1400000,网格类型为四面体网格,对油滴进行网格细化,如图 1(b)所示。入口边界为速度入口,进口处施加随机扰动,湍流度为 10%。出口条件按充分发展边界条件处理,即 $\partial\phi/\partial z=0$ 。将包含 Stefan 流、气相组分浓度、温度等信息的 UDF (user defined function) 应用到边界条件。步长取 10^{-7} s 。求解压力-速度耦合用 PISO (pressure implicit with splitting of operator) 算法,时间项采用 2 阶精度的全隐差分格式,对流项采用 2 阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式。其详细计算参数见表 2。

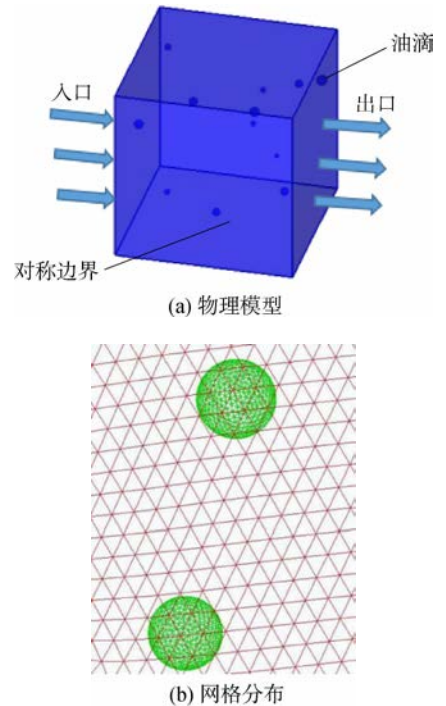


图 1 油滴群模型及网格分布

Fig. 1 Droplets model and grid distribution

表 1 油滴的随机参数

Table 1 Random parameters of droplets

编号	半径	空间坐标		
	$r/\mu\text{m}$	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$
D1	34.3	301.5	-433.7	515.1
D2	21.5	-293.9	-420.8	-180.0
D3	27.3	7.1	-291.0	-364.1
D4	17.1	238.9	408.9	-298.7
D5	29.2	469.1	-294.9	-139.3
D6	36.4	551.1	377.1	334.1
D7	23	-507.9	451.4	394.6
D8	27.9	496.1	-17.5	520.8
D9	20.3	158.8	360.3	214.5
D10	32.8	-483.0	-429.7	309.3
D11	19.4	56.3	498.9	-129.3
D12	30.6	-257.0	137.0	195.5

表 2 计算参数

Table 2 Computational parameters

计算域长	来流速度	环境温度	环境压力
$l/\mu\text{m}$	$u_0/(\text{m/s})$	T_0/K	$p_0/10^5\text{ Pa}$
1 200	1.0,4.0,10.0	800,1000,1 200	1.01

3 结果与讨论

3.1 瞬态结果分析

早在 20 世纪 60 年代就已发现油滴燃烧的三种模态,即全包火焰、半包火焰和尾部火焰。图 2 为其对于单油滴燃烧进行数值模拟得到的瞬时温度云图。图 3 为本文对于模拟油滴群模型 3 蒸发燃烧的瞬时温度云图,来流速度(即相对速度)为 4 m/s,环境温度为 1 200 K,油滴群的燃烧模态可定性地总结为包含单油滴三种火焰模态。

在强迫对流作用下,单油滴表面的乙醇蒸气的浓度等值线沿来流方向呈现对称性分布。而在油滴群的燃烧状态下,如图 4 所示的各油滴表面乙醇蒸气的浓度 c_{ethanol} 等值线分布呈现非对称性。图 5 所示 H_2O 的浓度表征油滴群的燃烧主要集中在后端尾流区,Stefan 流作用下的边界层将化学反应区束缚在内,反应核心区由于油滴间的相互作用发生角度偏转,进而提高了传热过程。

图 6 为该工况下燃烧油滴群周围的速度矢量

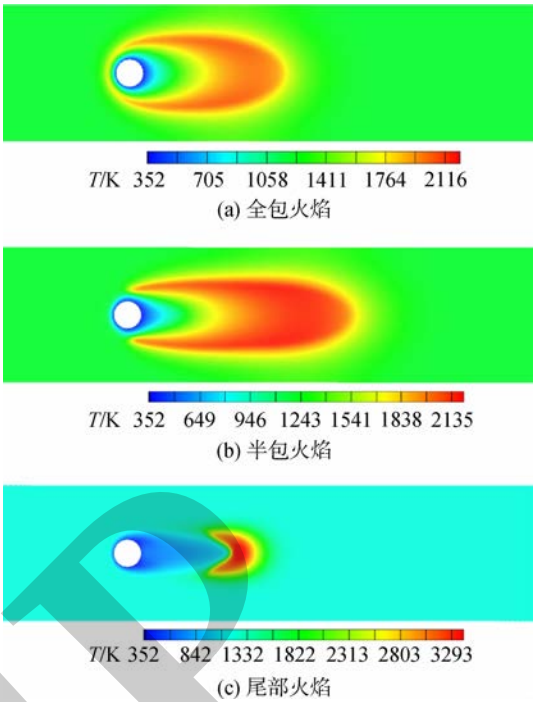
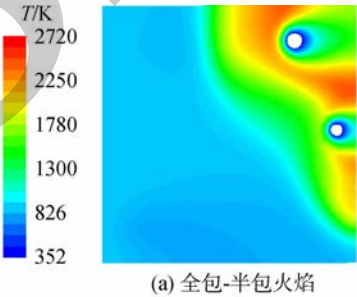
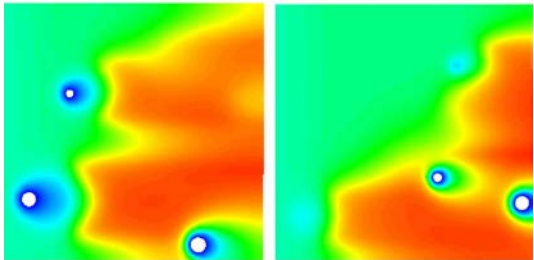


图 2 单油滴燃烧的三种模态^[16]

Fig. 2 Combustion regimes of a droplet^[16]



(a) 全包-半包火焰



(b) 尾部-尾部-全包火焰

(c) 全包-全包火焰

图 3 油滴群燃烧的模式

Fig. 3 Combustion regimes of droplets

场,可看出各油滴在气液界面上的速度 v 值分布不均匀,油滴的前驻点较大,后驻点较小,当油滴之间间距较小时,后方油滴较前方油滴的前驻点小。由此说明离散油滴间的相互作用改变了总的流场分布。图 7 所示的涡量场,随着流向距离的增加,油滴群中某油滴后方的旋涡脱落的势差弱于单油滴,油滴群内部强烈相互作用加剧了湍流场的涡旋强度。

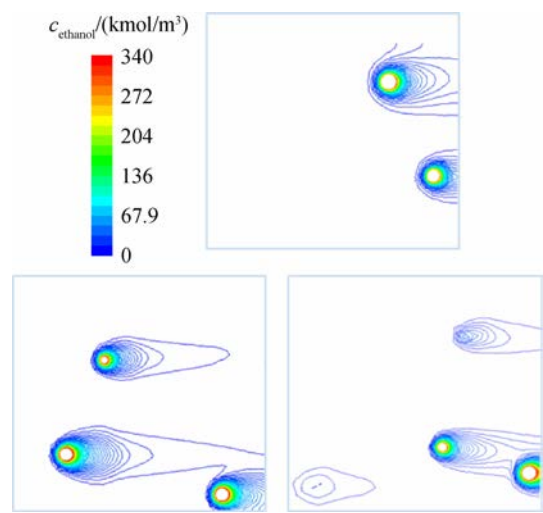


图 4 乙醇蒸气浓度
Fig. 4 Concentration of ethanol vapor

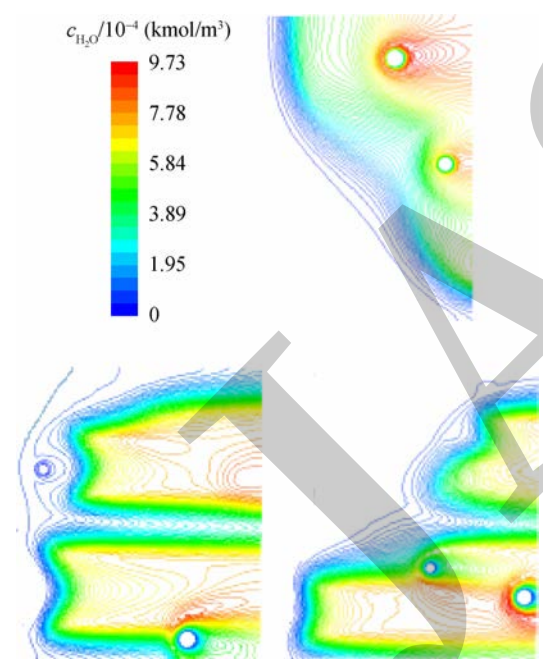


图 5 生成物(H₂O)浓度
Fig. 5 Concentration of product (H₂O)

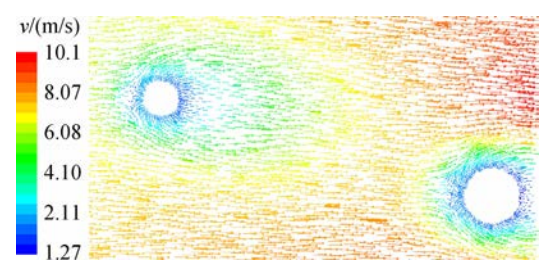


图 6 燃烧油滴群周围的速度矢量场
Fig. 6 Velocity vector field around combustng droplets

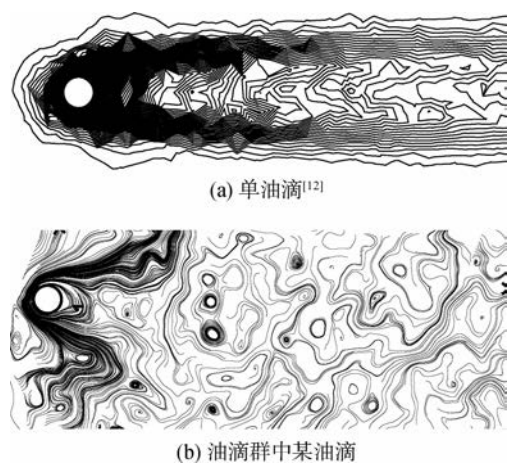


图 7 燃烧油滴周围涡量示意图
Fig. 7 Vorticity maps around the combustng droplet

3.2 统计稳定结果分析

3.2.1 油滴表面蒸发率

在强迫对流作用下,油滴群的平均表面蒸发率的变化与单油滴相似,与环境温度、来流速度等因素紧密相关,具体变化见表 3、表 4,表中 $\bar{D}$ 表示平均半径的油滴编号。随着环境温度的增大,油滴群中各油滴表面的蒸发率均增加,此外,随着来流速度的增大,油滴群各油滴表面的蒸发率呈增加趋势。比较不同油滴表面的蒸发率,还与油滴的半径($r_4 < r_2 < r_3 < r_5 < r_1$)和空间位置相关,油滴表面蒸发率与油滴半径成反比关系。液雾中油滴的瞬时空间分布兼有密集与稀薄区域,这对油滴蒸发过程的影响很大,对比不同模型(数密度不同)中各油滴表面蒸发率变化情况,由图 8 可知,随着油滴群数密度的增大,各油滴的表面蒸发率均增大,且模型 2 与模型 3 中油滴群的平均

表 3 模型 1 中各油滴表面蒸发率随来流速度的变化
Table 3 Variation of evaporation rate of droplet surface with inflow velocity in model 1

油滴 编号	半径 $r/\mu\text{m}$	蒸发率/(kg/(s·m ²))		
		$T_0=1000\text{ K}$	$T_0=1000\text{ K}$	$T_0=1000\text{ K}$
		$u_0=1\text{ m/s}$	$u_0=4\text{ m/s}$	$u_0=10\text{ m/s}$
D1	34.3	0.4936	0.6810	0.9314
D2	21.5	0.8884	1.0702	1.2931
D3	27.3	0.6656	0.8643	1.0858
D4	17.1	1.0892	1.3020	1.5218
D5	29.2	0.6039	0.8058	1.0048
$\bar{D}$	25.88	0.7481	0.9447	1.1674

表 4 模型 1 中各油滴表面蒸发率随环境温度的变化

Table 4 Variation of evaporation rate of droplet surface with ambient temperature in model 1

油滴 编号	半径 $r/\mu\text{m}$	蒸发率/($\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$)		
		$u_0=10\text{ m/s}$	$u_0=10\text{ m/s}$	$u_0=10\text{ m/s}$
		$T_0=800\text{ K}$	$T_0=1\,000\text{ K}$	$T_0=1\,200\text{ K}$
D1	34.3	0.7513	0.9314	1.0603
D2	21.5	1.0095	1.2931	1.5269
D3	27.3	0.8420	1.0858	1.2671
D4	17.1	1.1773	1.5218	1.7780
D5	29.2	0.7908	1.0048	1.2050
$\bar{D}$	25.88	0.9142	1.1674	1.3675

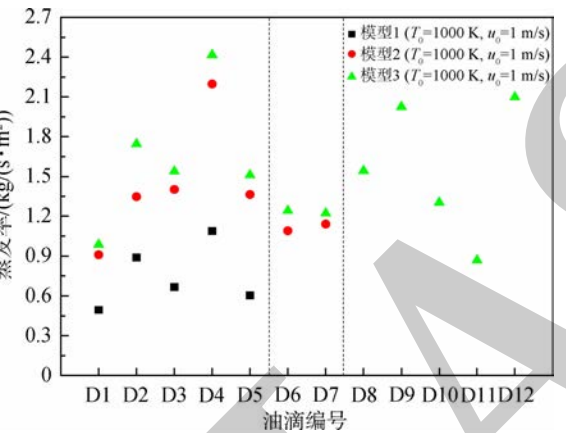


图 8 不同模型中各油滴表面蒸发率变化情况
Fig.8 Variation of evaporation rate of droplet surface in different models

表面蒸发率较模型 1 分别提高 0.8 倍和 1 倍。对不同模型中尺寸、位置信息相同的油滴而言,各油滴(编号 D1~D5)表面蒸发率的差距受其空间位置与油滴间距的综合影响。油滴间距大致在 $d\leq 500\mu\text{m}$ 时,偏后方油滴的表面蒸发率的敏感度较大。油滴间的相互作用使气相湍流度加剧,破坏了流动边界层,进一步使油滴群蒸发燃烧的传热传质速率提高。

3.2.2 油滴阻力系数

油滴阻力系数的计算一般采用 Wallis-Klichko 经验公式,目前,在液雾燃烧中油滴阻力的计算都基于此模型(欧拉-拉氏)方程,然而在热态场情况下,考虑 Stefan 流及油滴间相互作用的影响,液雾燃烧行为中油滴群的阻力系数显然不能简单套用 Wallis-Klichko 经验公式^[19],冷态球形油滴阻力系数的 Wallis-Klichko 公式为

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}(1 + Re_p^{2/3}/6) & Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p \geq 1000 \end{cases}$$

(16)

$$Re_p = \frac{\rho_i d_p |U_i - U_p|}{\mu_i}$$

(17)

定义阻力系数为 $C_d = \frac{8F_d}{\rho u_{inlet}^2 \pi d_p^2}$,阻力 $F_d =$

$\int_A p e \cdot ndA$, p 为压力, u_{inlet} 为相对速度, d_p 为油滴直径, ρ 为气相气体密度。

由图 9 可知,油滴的阻力系数随来流速度的增加而增大,此外,温度越高使蒸发速率越快,热流场中 Stefan 流的影响,使油滴在热态情况下所受阻力要比相同工况条件下冷态油滴的小。液雾中油滴密集与稀薄区域的空间流场分布差异较大,其阻力特性表现各异。不同模型(数密度不同)中各油滴阻力系数变化情况如图 10 所示,随着油滴群数密度的增大,阻力系数随之增大,且模型 2 与模型 3 中油滴群的平均阻力系数较模型 1 分别提高约 6 倍与 9 倍。对于模型 1 中各油滴的分布相对稀疏,流场特性变化较小,仅以模型 1 中分布较孤立的 D4 油滴进行分析,当增加 D6、D7 离散油滴(模型 2)时,此时模型 2 中 D4 油滴周围流场主要受到附近 D7 油滴的影响,其阻力系数增幅达 547%,随离散油滴数量增多至模型 3 时,其中 D7、D9、D12 油滴对 D4 油滴周围流场影响最大,D9 与 D12 油滴的空间分布及流向偏向角相比于 D7 油滴对 D4 油滴的影响较小,因此模型

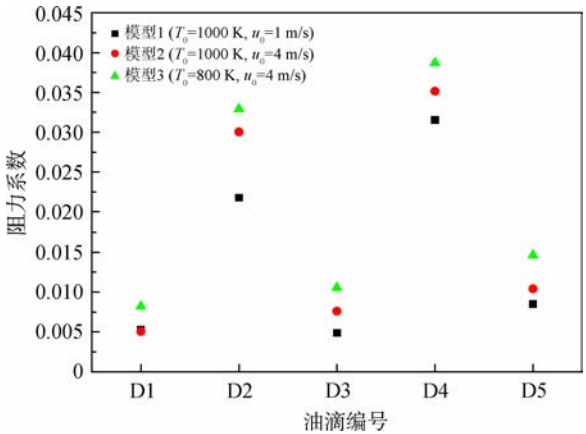


图 9 模型 1 中各油滴的阻力系数随来流速度及环境温度的变化情况
Fig.9 Variation of drag coefficient of droplets with inflow velocity and ambient temperature in model 1

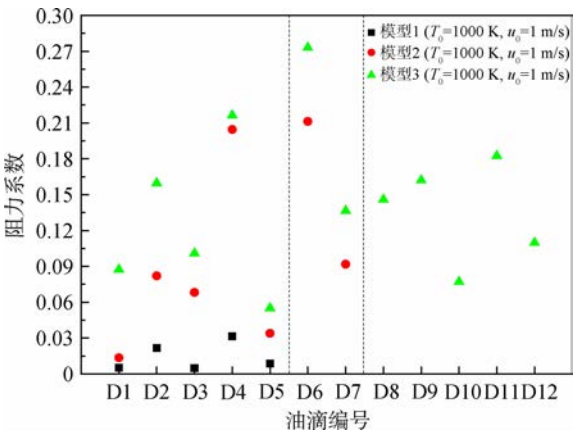


图 10 不同模型中各油滴阻力系数变化情况
Fig. 10 Variation of drag coefficient of droplets in different models

3 中 D4 的阻力系数较模型 2 的增幅仅为 5.8%。各油滴的自身尺寸、空间位置与油滴间距不同,导致油滴群周围的流场特性发生变化,油滴群周围的速度场、浓度场、温度场的不平衡势随之加剧。

4 结 论

本文基于液雾燃烧中的油滴群的蒸发/燃烧及流场特性进行大涡模拟,详细考虑了油滴尺寸、坐标分布、数密度等相关参数的随机性。对比了在不同来流速度、环境温度下,不同数密度油滴群的阻力特性及蒸发率,并结合油滴群燃烧模态分析油滴间的相互作用规律。得出以下结论:

1) 基于早期 Zhou^[16]发现的油滴燃烧的三种模态。可定性地将油滴群的燃烧模态总结为包含单油滴三种火焰模态(全包火焰、半包火焰和尾部火焰)。

2) 各油滴表面的乙醇蒸气浓度沿来流方向呈现非对称性分布,反应核心区发生角度偏转。各油滴在气液界面上的速度值分布不均匀,离散油滴间的相互作用改变了总体的流场分布。

3) 强迫对流环境下,油滴群平均表面蒸发率的变化与单油滴相似,与环境温度、来流速度紧密相关。此外,还受到油滴半径及空间位置的影响。各油滴的阻力系数随来流速度的增加而增大,在热态情况下油滴所受阻力要比相同工况条件下冷态油滴小。

4) 由于液雾中油滴密集与稀薄区域的流场特性不同,同一油滴在不同数密度下的表面蒸发率及阻力系数的波动较大。油滴之间存在的相互作用使气相湍流度加剧,进一步使油滴群蒸发/燃烧的传热传质速率提高。

参考文献:

[1] SADIKI A,CHRIGUI M,JANICKA J,et al. Modeling and simulation of effects of turbulence on vaporization,mixing and combustion of liquid-fuel sprays[J]. Flow,Turbulence & Combustion,2005,75(1/2/3/4):105-130.

[2] KUO K K,ACHARYA R. Applications of turbulent and multiphase combustion[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Incorporation,2012.

[3] PETERS N. Multiscale combustion and turbulence[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2009,32(1):1-25.

[4] PARISI V,GIACONAZZI E,BRUNO C. Analysis of small scale turbulence-combustion interaction for LES modeling[R]. AIAA 2005-1283,2005.

[5] SHINJO J,UMEMURA A. Droplet/turbulence interaction and early flame kernel development in an autoigniting realistic dense spray[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2013,34(2):1553-1560.

[6] KOURMATZIS A,PHAM P X,MASRI A R. Characterization of atomization and combustion in moderately dense turbulent spray flames[J]. Combustion & Flame,2015,162(4):978-996.

[7] SABELNIKOV V,FUREBY C. LES combustion modeling for high Re flames using a multi-phase analogy[J]. Combustion & Flame,2013,160(1):83-96.

[8] CASTANET G,MAQUA C,ORAIN M,et al. Investigation of heat and mass transfer between the two phases of an evaporating droplet stream using laser-induced fluorescence techniques; comparison with modeling[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer,2007,50(17):3670-3683.

[9] CHIU H H. Advances and challenges in droplet and spray combustion: I toward a unified theory of droplet aerothermochemistry[J]. Progress in Energy & Combustion Science,2000,26(4):381-416.

[10] BILGER R W. A mixture fraction framework for the theory and modeling of droplets and sprays[J]. Combustion & Flame,2011,158(2):191-202.

[11] CHEN W,GAO R,SUN J,et al. Modeling of an isolated liquid hydrogen droplet evaporation and combustion[J]. Cryogenics,2018,96:151-158.

[12] ZHOU L X,LI K. Analytical and numerical studies on a single-droplet evaporation and combustion under forced convection[J]. Acta Mechanica Sinica,2015,31(4):523-530.

[13] 李科. 液雾-空气两相湍流燃烧的多尺度模拟[D]. 北京:清华大学,2011.

LI Ke. Multi-scale simulation of two-phase turbulent spray combustion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)

[14] 周力行. 两相燃烧的大模拟[J]. 中国科学(技术科学),2014,44(1):41-49.

ZHOU Lixing. Large-eddy simulation of two-phase combustion[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(1): 41-49. (in Chinese)

[15] ZENG Z X, ZHOU L X, QI H Y. Large eddy simulation of particle wake effect and RANS simulation of turbulence modulation in gas-particle flows[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 15(1): 12-16.

[16] ZHOU L X. Studies on evaporation and combustion of single droplet and spray combustion[D]. Saint Petersburg, Russia: Saint Petersburg State Polytechnic University, 1961.

[17] SANYAL A M D. Modeling of evaporation and combustion of droplets in a spray using the unit cell approach: a review[J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(4/5): 375-386.

[18] SEGAWA D, YOSHIDA M, NAKAYA S, et al. Autoignition and early flame behavior of a spherical cluster of 49 monodispersed droplets[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2149-2156.

[19] 周力行. 燃烧理论和化学流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

(编辑: 李岩梅)