# 高温高压环境下RP-3航空煤油 单液滴的加热与蒸发特性研究



印晶<sup>1</sup>,梁勇<sup>2</sup>,张龙飞<sup>2</sup>,薛书勤<sup>1</sup>,刘兵<sup>2</sup>,周致富<sup>1</sup> 1.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室,陕西西安 710049 2.西安航天动力测控技术研究所,陕西西安 710025

摘 要:RP-3航空煤油是当前国内最常用的商用喷气燃料,煤油液滴在航空发动机燃烧室中的蒸发直接影响燃料的雾化效 果、空燃混合气的形成和燃烧质量。本文以单个RP-3航空煤油液滴为研究对象,选取正十二烷、2,5-二甲基已烷、甲苯作为 替代燃料,提出了一个考虑自然对流效应的高温高压环境下多组分液滴蒸发模型。利用自主搭建的试验装置得到了环境压 力为1MPa、环境温度为473~673K下RP-3煤油单液滴在蒸发过程中的液滴直径变化。模型预测结果与试验结果的对比验 证了模型的准确性。通过模型预测了不同环境参数下三组分替代物液滴直径、内部温度分布、各组分质量分数分布和液滴 寿命等参数的瞬态变化,定量分析了不同高温条件下环境压力对单液滴蒸发特性的影响。结果表明,液相内部的传热传质 会影响多组分液滴的蒸发速率,且液相扩散阻力造成了液相内部组分质量分数与温度空间分布的不均匀性。环境压力对 RP-3煤油液滴蒸发寿命的影响随环境温度的变化而变化。当环境温度低于正十二烷的临界温度(658.25K)时,液滴寿命与 环境压力的关系不是单调的,液滴寿命随环境压力的增加先增后减;而当环境温度超过658.25K时,液滴寿命随环境压力的 升高而单调减小。这是因为在高温高压环境中,环境压力的升高能显著增大自然对流传热传质强度,而自然对流超过一定 强度时,能明显促进液滴蒸发。上述研究有利于认识液滴内部组分扩散过程,从源头上为未来高性能低污染发动机的优化 设计提供依据与参考。

关键词:单液滴蒸发; 航空发动机; 自然对流; RP-3 航空煤油; 三组分替代

#### 中图分类号:V312+.1

#### 文献标识码:A

航空发动机是飞行器的核心,对其性能起着决定性的 作用。在发动机燃烧室内,航空煤油液滴蒸发是液态燃料 燃烧的基本过程,直接影响燃油喷雾的雾化效果、空燃混合 气的形成以及燃烧质量<sup>[1]</sup>,尤其是在喷雾的稀薄区域<sup>[2]</sup>。考 虑到研究喷雾液滴群在真实燃烧系统中蒸发试验的困难 性,深入研究单个航空煤油的加热和蒸发特性具有重要意 义。这不仅有助于加深对液体喷雾燃烧现象的理解,还能 改善燃油喷雾的燃烧性能,确保燃料在极端恶劣环境中成 功点火并完全燃烧,维持发动机的优良性能。此外,在双碳 战略目标下,航空煤油单液滴蒸发特性研究也为降低碳烟 和污染物的排放,提高燃油经济性,实现可持续和绿色航空 提供了理论支持<sup>[3-4]</sup>。因此,开展单个航空煤油的加热和蒸

#### DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.03.007

发特性研究对提升燃油喷雾和燃烧过程的效率和可靠性具有直接的指导意义和实际应用价值。

单液滴蒸发的研究由来已久,并取得了许多有意义的 进展。在试验研究方面,许多研究人员利用液滴悬挂法研 究了各种燃料的单液滴蒸发特性,包括烷烃<sup>[5-7]</sup>、煤油<sup>[8-9]</sup>、化 石柴油<sup>[10]</sup>、生物柴油<sup>[11-18]</sup>、乳化燃料<sup>[19-21]</sup>和纳米流体燃 料<sup>[22-26]</sup>。然而,上述研究均未涉及燃料在高压和高温下的 详细蒸发行为。为进一步探索实际燃烧系统中的喷雾燃 烧,日本大学<sup>[27-28]</sup>和韩国科学技术研究院<sup>[29-32]</sup>搭建了高温 高压密闭环境单液滴蒸发试验装置。然而,高温高压单液 滴蒸发研究中使用的悬丝均为石英纤维,无法测量液滴内 部温度,因此高温高压环境下液滴蒸发热特性尚不清楚。

收稿日期:2023-08-07;退修日期:2023-12-04;录用日期:2024-01-05 基金项目:国家自然科学基金(52176163);航空科学基金(2019ZB070002)

引用格式: Yin Jing, Liang Yong, Zhang Longfei, et al. Investigation on heating and vaporization characteristics of single RP-3 aviation kerosene droplet at elevated temperature and pressure[J].Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(03):55-69. 印晶,梁勇, 张龙飞,等.高温高压环境下RP-3航空煤油单液滴的加热与蒸发特性研究[J].航空科学技术, 2024, 35(03):55-69.

除了上述的试验观察,针对液滴蒸发的理论研究也层 出不穷。相比于试验,理论研究方法能够更好地描述蒸发 过程中液滴内部温度、组分浓度等参数的变化情况,从而全 面、细致地揭示液滴蒸发的关键特性。液滴蒸发数值研究 的主要目的是确定液滴的蒸发速率。气相模型被用来量化 气相和液滴表面之间的传热传质。已有研究表明,蒸发率 在很大程度上由气相模型决定。Ranz等<sup>[33]</sup>最先提出了球形 液滴对流传热和传质的经典关系式,但是此模型没有考虑 由液滴表面蒸发物质迁移引起的吹风效应对传热传质的影 响。之后,许多研究者考虑吹风效应对模型进行了改进,如 R-M模型、A-S模型、N-G模型、H-N-R模型等<sup>[34-37]</sup>。周致 富等[38]对各个气相模型进行了对比研究,研究结果表明,各 个模型的预测结果存在差异,且这种差异随着蒸发率的增 大而越发突出。在此基础上,综合考虑吹风和对流效应, N-G-R-M气相模型被提出。该气相模型能够准确预测液 滴在不同蒸发率下的蒸发率。然而,在上述气相模型中没 有考虑高压静止环境下自然对流的影响。研究证明,高压 环境中的小尺寸液滴,自然对流效应对正常重力下蒸发液 滴和周围气相之间的传热和传质有重要影响[27]。

液滴蒸发过程中,液相和气相的过程密切相关。液相模型用于研究液滴内部传热传质与流动。按照模型复杂度可以分为5类<sup>[34,39]</sup>:无限导热(ITC)模型、有限导热(CL)模型、有效导热(ETC)模型、涡动力(vortex)模型和直接数值模拟(DNS)。 ITC模型不考虑液滴内部温度梯度,温度仅随时间改变。其余液相模型通过求解液滴的热传导或内循环方程,可以获得液相流动特性或温度分布的细节,但在实际应用中所需计算量过大且低效。因此,综合以上几种液相模型的优缺点,一些研究者建立了准集总参数模型,包括抛物线温度模型(二阶模型)<sup>[40]</sup>和三阶多项式温度分布(三阶)液相模型<sup>[41]</sup>。

虽然单组分液滴蒸发理论研究已经发展得比较完善, 但是由于涉及多组分汽化、液相内部传质及气液相耦合,多 组分模型发展得还不太成熟。对于液滴内部组分扩散,密 歇根大学Talley<sup>[42]</sup>参考ETC模型,提出了描述液相内部传 质的有效扩散(ED)模型。Sazhin团队利用ETC/ED模型对 丙酮/乙醇溶液<sup>[43]</sup>、正癸烷/3-戊酮溶液<sup>[44]</sup>、异辛烷/3-甲基戊 烷溶液<sup>[45]</sup>以及几种生物柴油<sup>[46]</sup>开展了多组分液滴的蒸发特 性研究,结果表明预测值与试验值的吻合度较高。由于缺 乏高压条件下的相关试验验证数据,对高压环境中多组分 液滴蒸发的理论研究涉及不多。

本文对于高温高压条件下 RP-3 航空煤油液滴的蒸发 过程,选取 54.3%(初始摩尔分数,下同)的正十二烷、32.1% 的2,5-二甲基己烷、13.6%的甲苯三组分混合物作为RP-3 煤油的替代模拟燃料。建立了考虑自然对流效应和吹风效 应的气相模型、考虑液相内部热质扩散和流动的液相模型、 基于UNIFAC方法的气液相耦合模型,进而形成了高温高 压复杂环境下多组分燃油液滴蒸发模型,并对其进行了验 证。利用该模型预测了自然对流环境下三组分替代物液滴 的加热和蒸发特性,包括液滴直径、内部温度分布、各组分 质量分数分布和液滴寿命等参数随时间的变化,并定量分 析了不同高温条件下环境压力对单液滴蒸发特性的影响。 这一研究有利于认识液滴内部组分扩散过程,对优化燃烧 效果具有重要指导意义。

# 1 自然对流下多组分液滴蒸发模型

#### 1.1 假设

自然对流环境下多组分单液滴蒸发模型的示意图如图 1所示。图1中,环境压力为p。、环境温度为T。的热环境介 质中的单个三组分液滴的初始温度为T<sub>0</sub>,液相表面各组分 的初始蒸气质量分数分别为Y<sub>vel</sub>、Y<sub>vel</sub>、<sub>Y<sub>vel</sub>、<sub>J</sub>远离液滴表面无</sub> 穷远处各组分的蒸气质量分数为Y<sub>val</sub>、Y<sub>val</sub>、Y<sub>val</sub>、r<sub>s</sub>为液滴 瞬时半径,r为距离液滴球心的距离。由于气液相之间的温 度差和蒸气质量分数梯度,液滴与周围环境之间存在能质 输运过程,气液相之间总传质速度为 m。液滴在热环境介 质中被加热,热环境与液相间的对流换热为q。,由于相变而 带走的热量为q<sub>m</sub>。额外的对流换热热量qi会传递给液滴内 部,用于提升液滴整体温度。由于多组分液滴蒸发过程错 综复杂,因此需要对液滴蒸发的数值研究进行假设:(1)环 境气体和液滴处于恒定均匀的压力场中;(2)蒸发过程中液 滴始终保持球对称形状;(3)液滴的液/气界面处于热力学 平衡状态;(4)不考虑环境气体向液滴中的扩散;(5)液滴内 部温度和组分分布只沿半径方向变化;(6)液滴为无色透明 球体,忽略辐射换热。

#### 1.2 气相模型

气相模型用于研究蒸发过程中液滴表面与周围环境之间的传热传质过程。为了简化多组分液滴蒸发模拟,将多 组分蒸气作为单组分处理,并引入平均扩散系数<sup>[47]</sup>。可以 得到单液滴的总蒸发率如下

 $\dot{m} = 2\pi r_s \bar{\rho}_s \bar{\rho}_s ShB_M$  (1) 式中, $r_s$ 为液滴瞬时半径; $\bar{\rho}_s$ 为液相表面附近混合气体的平 均密度; $\bar{D}_s$ 为混合液滴蒸气的平均气体扩散率。

多组分液滴蒸发的舍伍德数 Sh 和斯伯丁传质数 B<sub>M</sub>的 定义如下<sup>[48]</sup>





Fig.1 Schematic of multi-component droplet evaporation model in natural convection environment

$$B_{\rm M} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (Y_{\rm v,si} - Y_{\rm v,\infty i})}{1 - \sum_{i=1}^{N} Y_{\rm v,si}}$$
(2)

式中, Y<sub>vai</sub>为远离液滴表面无穷远处组分*i*的蒸气质量分数,可 近似为0; Y<sub>vai</sub>为液滴表面组分*i*的蒸气质量分数,由式(3)计算

$$Y_{v,si} = \frac{p_{v,si}M_i}{\left(p_g - \sum_{i=1}^{N} p_{v,si}\right)M_g + \sum_{i=1}^{N} \left(p_{v,si}M_i\right)}$$
(3)

式中, *p*<sub>vsi</sub>为液滴表面组分*i*的饱和蒸气压; *p*g为环境气体压力; *M*<sub>i</sub>为组分*i*的摩尔质量; *M*g为环境气体的摩尔质量。

多组分液滴蒸发理论建模的关键在于确定不同组分的 无量纲蒸发率,进而可以推算不同组分的蒸发率

$$\dot{m}_i = \varepsilon_i \dot{m} \tag{4}$$

式中,量纲一蒸发率 $\varepsilon_i$ 为总蒸发率中组分i所占的比例。

假设液滴表面与环境气体之间的单位面积对流换热*q*。 分别用于提供液滴蒸发的汽化潜热和提高液滴内部温度, 液滴表面的能量方程可以表示为

$$4\pi r_{s}^{2}h(T_{g} - T_{s}) = \dot{q}_{i} + \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_{i}L_{vi}$$
(5)

式中,*q*,为用于提升液滴内部温度的热量;*T*<sub>g</sub>和*T*<sub>s</sub>分别为环境气体温度和液滴表面温度;*L*<sub>s</sub>为组分*i*的汽化潜热。

h为对流换热系数,可通过式(6)计算

$$h = \frac{Nu\bar{\lambda}_{g}}{2r_{s}} \tag{6}$$

式中, $\bar{\lambda}_{g}$ 为液滴表面附近混合气体的平均导热系数;Nu为 努塞尔数。

在静止的正常重力环境中,因重力作用所致的自然对

流效应可以促进气液相之间的传热传质。本文通过引入格 拉晓夫数 Gr来表征自然对流对传热传质的影响。气相模 型结合了 Narasimhan 和 Gauvin 提出的f修正系数<sup>[49]</sup>以及 Ranz<sup>[33]</sup>和 Kreith<sup>[50]</sup>的试验结果中的 Sh<sub>0</sub>和 Nu<sub>0</sub>,故修正后的 Sh和 Nu 的计算表达式如下

$$Sh = f_{\rm M}Sh_0 = (1 + B_{\rm M})^{-2/3} (2.0 + 0.6Gr^{1/4}Sc_{\rm g}^{1/3})$$
(7)

$$Nu = f_{\rm T} Nu_0 = (1 + B_{\rm T})^{-2/3} (2.0 + 0.6 G r^{1/4} P r_{\rm g}^{1/3})$$
(8)

式中, *Pr*<sub>g</sub>和 *Sc*<sub>g</sub>为气相的普朗特数和施密特数。这里的下标0表示没有考虑 Stefan 流的影响(对于非蒸发液滴)。

多组分液滴蒸发的斯伯丁传热数B<sub>T</sub>为<sup>[48]</sup>

$$B_{\rm T} = (1 + B_{\rm M})^{\varphi} - 1$$
(9)  
 $\rho$  的表达式为<sup>[44]</sup>

$$\rho = \left(\frac{\bar{c}_{\rm pv}}{\bar{c}_{\rm pg}}\right) \frac{1}{Le} \tag{10}$$

式中,  $\bar{c}_{pv}$ 为不含空气时液滴表面混合燃油蒸气的比定压热容, 其值与  $T_s$ 有关;  $\bar{c}_{ps}$ 为包括空气时边界层中混合气体的定压比热容, 该值与  $T_r$ 有关<sup>[51]</sup>; Le 为气体的刘易斯数, 表示热扩散率与质量扩散率之比。

Gr可以视为流体浮力与黏性力的比值,是研究自然对流现象时的重要参数,其表达式为<sup>[52]</sup>

$$Gr = \frac{8g\bar{\rho}_{\rm g}^{2}(T_{\rm g} - T_{\rm s})r_{\rm s}^{3}}{T_{\rm g}\bar{\mu}_{\rm g}^{2}}$$
(11)

式中, $\bar{\mu}_{g}$ 为液滴表面附近混合气体的平均动力黏度;g为重力加速度; $T_{r}$ 为气体参考温度。

对于多组分液滴,液滴表面气相边界层内混合气体的 平均物性参数使用组分*i*的参考蒸气质量分数*Y<sub>vsi</sub>和气体参* 考温度*T*,估算,由1/3理论得到。

#### 1.3 液相模型

液相模型用于研究液滴内部热质扩散和流动,包含液 滴内部组分、温度分布的描述。液滴内部因自然对流效应 而存在环流。对于液相传热,在CL模型<sup>[42]</sup>的基础上,ETC 模型通过引入有效导热修正因子<sub>Xr</sub>来描述内部环流对液相 内部热量扩散的影响。液滴内部温度控制方程为

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \frac{\lambda_{\mathrm{eff}}}{\bar{\rho}_{\mathrm{l}}\bar{\mathcal{C}}_{\mathrm{pl}}} \left( \frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}r^2} + \frac{2}{r} \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r} \right) \tag{12}$$

初始条件、液滴表面和中心处边界条件为

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}\Big|_{r=r_{\rm s}} = \frac{1}{\lambda_{\rm eff}} \Big[ \bar{\rho}_1 \bar{L}_{\rm v} \dot{r}_{\rm s} + h \Big( T_{\rm g} - T_{\rm s} \Big) \Big] \tag{13}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r}\Big|_{r=0} = 0 \tag{14}$$

$$T(t=0,r) = T_{10}$$
(15)

式中,T10为液滴初始温度。

有效热导率λeff的表达式如下

 $\lambda_{\rm eff} = \chi_{\rm T} \bar{\lambda}_{\rm I} \tag{16}$ 

式中, $\bar{\lambda}_1$ 为混合物的液相平均导热系数;修正系数 $\chi_{\rm T}$ 在1.00~2.72内变动,其大小取决于液相佩克莱数 $Pe^{[48]}$ 。

$$\chi_{\rm T} = 1.86 + 0.86 \tanh \left[ 2.225 \log_{10} \left( P e_1 / 30 \right) \right]$$
(17)

$$Pe_1 = Gr^{1/2}Pr_1 \tag{18}$$

对于液相传质,根据ED模型,液滴内部组分i的质量分 数分布由传质扩散方程描述,可以采用以下形式表示<sup>[42-43]</sup>

$$\frac{dY_{li}}{dt} = D_{li} \left( \frac{d^2 Y_{li}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dY_{li}}{dr} \right)$$
(19)

式中,*Y*<sub>u</sub>为液相组分质量分数;*D*<sub>u</sub>为组分*i*在混合物中的液 相质量扩散率。考虑内部环流对液相传质的影响,*D*<sub>u</sub>由有 效扩散率*D*<sub>u ef</sub>代替

$$D_{\rm li,eff} = \chi_{\rm vi} D_{\rm u} \tag{20}$$

$$\chi_{Y_i} = 1.86 + 0.86 \tanh \left[ 2.225 \log_{10} \left( Gr^{1/2} Sc_{1i} / 30 \right) \right]$$
(21)

初始条件和边界条件为

$$\frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{li}}}{\mathrm{d}r}\Big|_{r=0} = 0 \tag{22}$$

$$\alpha \left( \varepsilon_{i} - Y_{l,si} \right) = -D_{li,eff} \frac{\mathrm{d}Y_{li}}{\mathrm{d}r} \Big|_{r=r_{s}}$$
(23)

$$Y_{li}(t=0,r) = Y_{li0}$$
(24)

#### 1.4 气液相耦合模型

气液相耦合模型是气相模型和液相模型的纽带。根据 气相模型,各组分的无量纲蒸发率由液滴表面该组分的蒸 气质量分数决定。由于混合物中离子间的相互作用,各组 分的浓度不能代表其有效浓度。因此,多组分液滴活度系 数的计算是气液相耦合的重点。考虑各组分的分子结构的 差异,引入活度系数对气液相平衡方程进行修正

$$p_{\mathbf{v},\mathbf{s}i} = \boldsymbol{\gamma}_i \boldsymbol{X}_{\mathbf{l},\mathbf{s}\,i} \boldsymbol{p}_{\mathbf{v}i}^* \tag{25}$$

式中,γ<sub>i</sub>为液相混合物中组分*i*的活度系数。根据UNIFAC法, 活度系数的对数是组合活度系数和基团剩余活度系数的和

# 2 多组分液滴蒸发模型的验证

### 2.1 试验系统

为验证本文模型的准确性,采用液滴悬挂法进行相关 试验,将试验数据与预测结果进行对比。试验系统如图2

所示,该装置主要由4个子系统组成,即压力控制系统、加 热系统、液滴生成和传输系统以及数据采集系统[53]。压力 容器的内部空间可以划分为常温区和高温区。压力控制系 统用于产生和维持从大气压力变化到2MPa的高压环境。 加热炉内可达到的最高温度为900K,温度控制精度为±1K。 在试验前,用加压干燥氮气吹扫试验腔体内部以更新环境 气体。当高温区的压力和温度达到并保持在预定值后,借 助液滴产生和传输系统将液滴悬挂在直径为50um的悬丝 上,进而转移到加热炉内。当液滴到达试验指定位置,高速 摄像机被触发采集并记录试验图像。为保证试验结果的准 确性,每种测试条件下的试验应至少重复5次。选择初始 尺寸在0.9~1.1mm范围内的液滴,以尽量减少液滴初始直 径对液滴蒸发的影响。液滴初始直径约为悬丝直径的20 倍,故悬丝对液滴蒸发的影响可以忽略不计[54-55]。基于切 片积分法和等效体积法,使用开发的图像处理代码从捕获 的图像中提取液滴直径的时间变化,为后续的试验研究奠 定了基础。

#### 2.2 航空煤油替代物的选取

目前,我国航空器最重要的动力来源为我国自行研发 生产的 RP-3 航空煤油<sup>[56-58]</sup>。RP-3 煤油为无色透明液体, 密度适宜,蒸发和燃烧性能好,热值高,结晶点低,低温流动 性好,洁净度高,对发动机零部件无腐蚀性,因此用途最为 广泛<sup>[59]</sup>。其临界压力介于 2.2~2.4MPa之间,临界温度在 640K左右<sup>[60]</sup>。RP-3 煤油属于多分子的碳氢混合燃油,其 成分构成可达 100 多种,碳数分布集中在 C7~C16,大致包 括 53.0% 的烷烃、37.7% 的环烷烃、4.6% 的芳烃、2.7% 的醇 类和 2% 的烯烃(体积分数)<sup>[61-62]</sup>,且其具体成分会随年份、 产地、厂家、批次等因素而有所变化。RP-3 煤油的物理性 质见表 1。

在理论研究方面, RP-3煤油组分极为复杂, 直接造成 了构建 RP-3煤油蒸发模型比较困难。当前行之有效、循序 渐进的方法是选取一种或几种具有代表性的、与 RP-3煤油 有相近理化性质的替代燃料来模拟真实情况。对于航空煤 油替代燃料模型, 国内外学者已开展一定尝试<sup>[63]</sup>。单一组 分的正癸烷或正十二烷是最为简单常用的替代物, 但难以 使用单一物质来模拟真实情况。其后, 鉴于航空煤油成分 的复杂性, 学者们发现构建双组分、三组分及以上的替代燃 料模型可以更好地满足数值模拟的要求<sup>[64]</sup>。根据 RP-3煤 油的成分和物化特性, 选取初始摩尔分数 54.3%的正十二 烷、32.1%的 2,5-二甲基己烷、13.6% 的甲苯三组分混合物 作为替代物<sup>[65]</sup>, 替代物的热物性见表 2。



图2 高温高压密闭环境单液滴蒸发试验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental equipment for single-droplet evaporation at elevated temperature and pressure

#### 表1 RP-3 航空煤油的热物性[56,66-67]

Table 1 Thermophysical properties of RP-3 aviation kerosene<sup>[56, 66-67]</sup>

物质	RP-3航空煤油	
分子式	$C_{10.57}H_{21.99}$	
平均分子量/(g/mol)	148.83	
氢碳比	2.04	
293K下的密度/(kg/m <sup>3</sup> )	778	
293K下的黏度/(mm²/s)	2.07	
十六烷值/(MJ/kg)	41.5	
0.1MPa下的沸点/K	458	

#### 表2 RP-3 航空煤油替代物的热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of surrogate fuel of RP-3 aviation kerosene

物质	正十二烷	2,5-二甲基己烷	甲苯
分子式	$C_{12}H_{26}$	$C_8 H_{18}$	$C_7H_8$
分子量/(g/mol)	170.334	114.228	92.1384
标准沸点/K	489.47	382.27	383.78
临界温度/K	658.25	550.06	591.79
临界压力/MPa	1.82	2.49	4.11
初始摩尔分数/%	54.3	32.1	13.6

#### 2.3 模型的有效性验证

试验条件见表3,图3为环境压力1MPa条件下高速摄像机记录的不同环境温度下RP-3煤油单液滴蒸发图像随

时间动态变化情况。图3中不同试验工况条件下首张图像 是在液滴首次到达观察焦点时记录的图像,最后一张是液 滴完全蒸发时的图像。图像下方数字为归一化时间*t/d*<sub>0</sub><sup>2</sup>。

为了验证所提出的模型的准确性,图4给出了试验和 模型预测所得 RP-3 煤油液滴的归一化直径平方(d²/d₀²)的 比较。为了减小液滴初始直径对蒸发特性的影响,使用液 滴初始直径对液滴直径和时间进行了归一化处理。

如图4所示,从整体上看,模型预测的归一化直径平方和试验数据之间取得了良好的一致性。根据液滴直径变化,RP-3煤油单液滴蒸发可以划分为两个过程,即瞬态加热阶段和平衡蒸发阶段。在瞬态加热阶段,d<sup>2</sup>/d<sub>0</sub><sup>2</sup>缓慢升高至最大值后再降到初始值1。在平衡蒸发阶段,d<sup>2</sup>/d<sub>0</sub><sup>2</sup>曲线急剧下降,几乎随归一化时间成比例减小。结合图3所示的液滴图像分析可知,当液滴处于瞬态加热阶段,液滴的形态和体积几乎保持不变,仔细观察时有小幅度的膨胀;在平衡蒸发阶段,液滴体积随着时间的推移平缓减小,直至蒸发完毕。综上,提出的考虑自然对流和高压效应的液滴蒸发模型能够准确预测高压环境下RP-3煤油液滴蒸发特性。

# 3 液滴蒸发结果与讨论

#### 3.1 液滴内部导热和组分扩散分析

利用验证后的液滴蒸发模型研究三组分混合物液滴的

# 表3 高温高压 RP-3 航空煤油单液滴蒸发试验条件 Table 3 Experimental conditions for single RP-3 kerosene droplet at elevated temperature and pressure

环境压力P <sub>g</sub> /MPa	环境温度 T <sub>g</sub> /K	液滴初始	液滴初始
		直径 $d_0$ /mm	温度 T <sub>10</sub> /K
1	473	0.977	318.850
	573	1.067	321.722
	673	0.988	327.340



(a) 1MPa,473K



(b) 1MPa,573K



(c) 1MPa,673K

- 图3 环境压力为1MPa条件下RP-3航空煤油单液滴的 蒸发历程形态变化
- Fig.3 The sequential images of the droplet evaporation process for RP-3 kerosene at 1MPa

蒸发特性。针对多组分液滴蒸发情况,其模拟比单组分液 滴更为复杂。因此,首先选择1MPa、473K环境条件,研究 典型工况下蒸发过程中液滴的内部导热和组分扩散。图5 描绘了提出的蒸发模型预测的液滴内部温度的发展变化。 液滴中心温度*T*<sub>mid</sub>、平均温度*T*<sub>a</sub>、表面温度*T*<sub>s</sub>的变化趋势一 致,蒸发初期液滴内部温度的不均匀性极为显著,模型预测



图4 试验和模型预测所得 RP-3 煤油液滴的归一化直径 平方对比







的液相内部温度随距液滴中心的径向距离呈单调变化关 系,最高温度位于液滴表面;蒸发后期液滴温度曲线基本重 合。这是由于内部阻尼的存在阻碍了液相传热,液滴吸收 来自高温环境的热量不能瞬间传递到液滴内部,液滴表面 温度 T<sub>s</sub>迅速上升。随时间推移,液滴温度达到了动态平衡, 此后液相内部温度空间分布渐渐趋于一致。平衡点对应的 是周围环境传递给液滴的热量等于液滴蒸发散失的热量的 时刻。

图6给出了蒸发模型预测的液滴内部各组分质量分数 随时间的变化规律。模型中,组分1为正十二烷,组分2为 2,5-二甲基己烷,组分3为甲苯。由图6可知,液相中各组 分的中心质量分数 *Y*<sub>1,mid</sub>,平均质量分数 *Y*<sub>1,ai</sub>和表面质量分数 *Y*<sub>1,si</sub>的变化趋势一致, *Y*<sub>1,a2</sub>和 *Y*<sub>1,a3</sub>不断减小, *Y*<sub>1,a1</sub>则是逐渐增 大。随着时间的推移,液滴内部各组分质量分数梯度逐渐 减少。这是因为三组分混合物中低沸点组分即2,5-二甲基 己烷和甲苯优先蒸发。各组分蒸发速率的差异引起液相内 部传质过程,故各组分液相质量分数的空间分布发生变化。 由于液滴内部扩散阻尼的存在,低沸点组分不能迅速扩散 到液滴表面,其内部质量分数从中心到表面呈现单调递减 分布。



图6 蒸发模型预测的液滴内部各组分质量分数与时间 的关系图

Fig.6 Temporal variations of the mass fraction of each component inside the droplet predicted by the new-proposed model

为了验证上述观点,图7给出了蒸发模型预测的各组 分瞬时蒸发率随时间的变化规律。液滴内不同组分以不同 的速率蒸发,其中一种组分的蒸发率受其他组分蒸发率的 影响。三种组分的蒸发率均是先单调增大,依次达到最大 值后再单调减小。组分2和组分3的蒸发速率的峰值出现 比较早,这是因为模型预测的液滴表面温度T。不断上升,各 组分的饱和蒸气压和气相扩散系数增大,其瞬时蒸发速率 不断上升。由于组分2和组分3的沸点远低于组分1,在蒸 发初期以易挥发组分的蒸发为主。由于Y1s2和Y1s3不断下 降,液滴表面该组分的蒸气质量分数 Y<sub>vs2</sub>、Y<sub>vs3</sub>随之减小,故 组分2和组分3的蒸发速率达到最大值后开始呈递减趋势。 由于 Y1s2 和 Y1s3 趋近于 0, 蒸发后期主要以高沸点组分的蒸 发为主,总蒸发速率等同于组分1的蒸发速率。自然对流 会增强液滴蒸发,而随着时间的推进,液滴直径的减小会削 弱这种作用。而且热质扩散的边界层因 Stefan 流渐渐增 厚,修正后的Nu和Sh变小意味着边界层对环境与液滴表 面间传热传质的抑制作用增强,直接阻碍了液滴的蒸发。 故组分1的蒸发速率开始逐渐下降。



Fig.7 Temporal variations of the instantaneous evaporation

rate of each component predicted by the new-proposed model

#### 3.2 环境压力对液滴蒸发的影响

由于三组分混合物中组分1(正十二烷)的临界压力为 1.82MPa,本文选择了 0.1MPa、0.5MPa、1.0MPa 和 1.5MPa 共4种环境压力来评估环境压力p。对液滴蒸发特性的影 响。图8给出了环境温度为473K、573K和673K时,不同环 境压力下RP-3煤油替代物液滴直径随时间变化的比较。 其中,液滴初始直径和温度分别为100μm和300K。对于所 研究的所有环境温度下,相比常压条件,高环境压力会削弱 液滴蒸发,但不同环境温度下,环境压力的升高对液滴蒸发 的影响不同。在低环境温度(473K)下,液滴蒸发速率随环 境压力的升高先减后增。而在673K条件下,液滴蒸发速率 随环境压力的升高而单调递减。这是因为环境压力对液滴 蒸发传质特性的影响主要表现为:一方面,提高环境压力, 液滴表面参考气体密度和自然对流强度增加,从而加强了 热环境与液相之间换热的驱动力,液滴表面温度大幅提高, 加快气液相之间的传质;另一方面,环境压力的升高增高了 RP-3煤油各组分的沸点,气液平衡时液滴表面各组分蒸气 的质量分数 Y<sub>vs</sub>和气相扩散系数 D<sub>vi</sub>均减小,阻碍了液相汽 化。环境压力对液滴蒸发特性的影响由上述竞争效应的净 结果决定。

图9为环境温度为473K、573K和673K条件下,不同环 境压力下 RP-3煤油替代物单液滴平均温度 T<sub>a</sub>的对比分析 图。相比常压条件,环境压力升高会引起液滴温升速率的 增加,这是由于提高p<sub>g</sub>可以增强环境介质向液相的热量传 递。所有液滴平均温度曲线都显示出相同的变化趋势,T<sub>a</sub> 不断升高,且其斜率随着时间的推移放缓,直到上升到最高 温度后不再变化。这是因为液滴温度不仅与气相和液滴之





ambient temperatures (473~673K)

间的对流热有关,还与蒸发速率有关。最初,来自气相的对流换热足以提供蒸发所需的汽化潜热,剩余的对流换热用于提高液滴内部温度。液滴温度曲线的斜率变化取决于渗入液滴内部热量的变化。在所研究的环境温度条件下,*T*a曲线存在一个平衡蒸发温度*T*equ。一旦达到该温度,则所有传递到液滴中的热量将用于使液体汽化。



图9 473~673K高温、不同高压环境下RP-3煤油替代物 单液滴平均温度与时间关系图

Fig.9 Temporal variations of the droplet average temperature of RP-3 kerosene under different ambient pressure at elevated ambient temperatures (473~673K)

为了更直观、更具体地了解环境压力对液滴蒸发的影响,接下来给出了不同环境压力下影响蒸发的参数随时间的 演变。高温、不同高压环境下 RP-3 煤油替代物蒸气的二元 扩散系数 D<sub>v</sub>随时间的变化情况如图 10 所示。从总体上看, D<sub>v</sub>与环境压力成反比,并且随着环境压力的增加,D<sub>v</sub>的这种 差异逐渐减弱。不同工况下 D<sub>v</sub>的变化趋势一致,均是先增 后减,直到达到最低值后不再变化。这是因为D<sub>v</sub>由混合物 中各组分的气相扩散系数和Y<sub>vs</sub>决定。由于蒸发初期,随着 T<sub>s</sub>的上升,参考气体温度T<sub>r</sub>持续升高,各组分的气相扩散系数 不断升高。而甲苯和2,5二甲基己烷的气相扩散系数大于正 十二烷,D<sub>v</sub>因Y<sub>vs2</sub>和Y<sub>vs3</sub>的降低而不断下降。当D<sub>v</sub>到达最低 值时,低沸点组分蒸发殆尽,此后为单一组分的蒸发过程,D<sub>v</sub> 等于正十二烷蒸气的二元扩散系数,仅与T<sub>r</sub>成正比。



图10 高温、不同高压环境下RP-3煤油替代物蒸气的二元 扩散系数D<sub>v</sub>与时间关系图

Fig.10 Temporal variations of binary diffusion coefficient of RP-3 kerosene surrogate fuel vapor in air  $D_v$  under different ambient pressure at the same ambient temperature

图11绘制了蒸发过程中液滴表面附近不同组分蒸气 质量分数 Y<sub>v,si</sub>的时间变化。从总体上看,Y<sub>v,si</sub>与环境压力成 反比。Y<sub>v,si</sub>对应蒸发过程组分*i*的传质驱动力。Y<sub>v,si</sub>由饱和 蒸气压和液相中各组分的表面质量分数 Y<sub>1,si</sub>决定。由于蒸 发初期液滴表面温度不断上升,三组分的 Y<sub>v,si</sub>均呈上升趋 势。而由于低沸点组分的优先蒸发,Y<sub>1,s2</sub>和 Y<sub>1,s3</sub>不断下降,故 Y<sub>v,s2</sub>和 Y<sub>v,s3</sub>开始下降。而 Y<sub>v,s1</sub>的变化趋势与液滴温度的趋势 完全一致。 图 12 给出了高温、不同高压环境下 RP-3 煤油替代物 Gr 的演变。从整体上看,初始的自然对流强度 Gr 与环境 压力成正比。Gr 变化曲线呈现出一定的双峰特征。这是





图 11 高温、不同高压环境下 RP-3 煤油替代物液滴表面 各组分蒸气质量分数 Y<sub>vs</sub>与时间关系图

Fig.11 Temporal variations of the RP–3 kerosene surrogate fuel vapor mass fraction near the droplet surface  $Y_{v,si}$ under different ambient pressure at the same ambient temperature

因为*Gr*的变化趋势主要由液滴表面附近参考气体密度、*T*<sub>s</sub>和液滴直径决定。*Gr*与*T*<sub>s</sub>成反比,与混合气体密度和液滴 直径成正比。在环境温度保持不变时,随着环境压力的增 大,参考气体密度显著增大,故自然对流强度显著增大。 蒸发初期,*T*<sub>s</sub>的上升对*Gr*的影响大于液滴直径增加对*Gr* 的影响,导致*Gr*有所下降。对于多组分混合物,由于*Y*<sub>vs</sub> 的不断变化,*Gr*因参考气体密度的增加开始上升并随之 达到第一个峰值。参考气体密度因*Y*<sub>1,s</sub>的增加有一定上 升,*Gr*从而达到第二个峰值。蒸发后期,对于正十二烷单 组分液滴的蒸发,液滴直径的减小导致*Gr*显著减弱。

为了全面探究不同高温条件下环境压力对单液滴蒸 发特性的影响,本文对所有工况条件下 RP-3 煤油替代物 单液滴所需蒸发时间即液滴寿命进行分析。在本文中以 液滴直径等于0.1μm 为界限,认为此时液滴已经蒸发完 全。不同工况条件下初始直径为50μm的 RP-3 煤油替代 物液滴的液滴寿命如图13 所示。由图13 可知,三组分替



图 12 高温、不同高压环境下 RP-3 煤油替代物 Gr 数与 时间关系图

Fig.12 Temporal variations of Grashof number *Gr* of RP–3 kerosene surrogate fuel under different ambient pressure at the same ambient temperature

代物液滴寿命受到环境温度和压力的综合影响。这些环境因素对液滴蒸发的影响不是独立的。无论是常压还是高压环境,环境温度的升高均能显著加速RP-3煤油替代物液滴的蒸发。

环境压力对 RP-3 煤油液滴蒸发寿命的影响强烈依赖 环境温度。一般来说,当环境温度低于或接近多组分液滴 内部组分的临界温度时,随着环境压力的升高,液滴蒸发 速率降低,液滴寿命增加;而当环境温度完全高于各组分 的临界温度时,环境压力的增加会缩短液滴寿命<sup>[29,68]</sup>。不 同于上述规律,对于本文所研究的自然对流环境,当环境 温度低于正十二烷的临界温度(658.25K)时,在同一环境 温度下,液滴寿命与环境压力的关系不是单调的,即液滴 寿命随环境压力的增加先增后减。当环境温度超过 658.25K时,液滴寿命随环境压力的升高而单调减少。这 是因为环境压力对自然对流环境下液滴蒸发传质特性的 影响主要由自然对流强度(*Gr*)、参考气体密度、蒸气的质 量分数(Y<sub>vs</sub>)和气相扩散系数(D<sub>v</sub>)决定。分析上述参数的 变化可知,在高温高压环境中,环境压力的升高能显著增 加自然对流传热传质强度。当自然对流超过一定强度时, 能明显促进液滴的传质,所以提高环境压力对液滴蒸发由 减缓转为促进。



Fig.13 Summary of droplet lifetime of RP-3 kerosene surrogate fuel under different experimental conditions

# 4 结论

本文选取正十二烷、2,5-二甲基己烷、甲苯作为RP-3 航空煤油的三组分替代物,建立了高温高压环境下多组分 燃油液滴蒸发模型,并验证了其有效性。通过所构建的模 型预测了自然对流环境下三组分替代物单液滴的蒸发过程 及环境压力和温度对其加热和蒸发特性的影响。可以得到 以下结论:

(1)整个RP-3煤油蒸发历程呈双阶段特征。在整个蒸 发历程中,液滴始终处于升温阶段,且温升速率随时间的推 移逐渐变缓。通过与RP-3液滴蒸发试验数据对比验证了 所提出模型的有效性。

(2)内部扩散阻力不利于液相内部热质扩散,造成了蒸 发初期液滴内部组分质量分数与温度空间分布的不均匀 性。随着时间的推移,液滴内部温度梯度和各组分质量分 数梯度逐渐减少。

(3)不同高温下,环境压力对液滴蒸发能质输运特性的 影响较为复杂。提高环境压力对液滴蒸发过程的影响主要 表现为参考气体密度和自然对流强度的上升对液滴蒸发的 促进作用以及气相扩散系数和液滴表面蒸气的组分浓度的 降低对液滴蒸发的抑制作用。当环境温度低于 658.25K 时,液滴寿命随环境压力的增加先增后减;而当环境温度超过 658.25K时,液滴寿命随环境压力的升高而单调减少。 这是在正常重力环境下,当自然对流超过一定强度时,能明显促进液滴蒸发。

综上所述,以上研究有助于深入理解多组分燃油在高 温高压环境下的蒸发行为,为我国航空发动机燃烧装置的 优化设计提供了理论依据。目前使用的多组分液滴蒸发理 论模型只考虑了高压条件下气液相平衡,忽略了环境气体 的溶解性。因此,在未来我们仍需开展大量的工作进行更 为深入的研究。

#### 参考文献

- [1] Cheng Yuzhou, Jin Tai, Luo Kun, et al. Large eddy simulations of spray combustion instability in an aero-engine combustor at elevated temperature and pressure[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 108: 106329.
- [2] 冼锦宇,陈钱,蔡树峰. 超声速气流中液体喷雾流动数值模拟 研究[J]. 航空科学技术,2023,34(1): 12-20.
   Xian Jinyu, Chen Qian, Cai Shufeng. Numerical simulation of liquid spray flow in supersonic airflow[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(1): 12-20.(in Chinese)
- [3] 纪宇晗,孙侠生,俞笑,等.双碳战略下的新能源航空发展展 望[J]. 航空科学技术,2022,33(12): 1-11.
  Ji Yuhan, Sun Xiasheng, Yu Xiao, et al. Development prospect of new energy aviation under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 1-11.(in Chinese)
- [4] 杨晓军,柳笑寒,常嘉文. 航空发动机非挥发性颗粒物排放适 航标准与审定[J]. 航空科学技术,2021,32(2): 32-37.
  Yang Xiaojun, Liu Xiaohan, Chang Jiawen. Airworthiness standards and certification procedures for non-volatile particulate matter emissions from aircraft engines[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2): 32-37. (in Chinese)
- [5] Zhang Yu, Huang Ronghua, Huang Yuhan, et al. Effect of ambient temperature on the puffing characteristics of single butanol-hexadecane droplet[J]. Energy, 2018, 145: 430-441.
- [6] Chauveau C, Birouk M, Gökalp I. An analysis of the d2-law departure during droplet evaporation in microgravity[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(3): 252-259.

- [7] Chauveau C, Birouk M, Halter F, et al. An analysis of the droplet support fiber effect on the evaporation process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 885-891.
- [8] Wang Fang, Liu Rui, Li Min, et al. Kerosene evaporation rate in high temperature air stationary and convective environment [J]. Fuel, 2018, 211: 582-590.
- [9] Wang Fang, Yao Jie, Yang Shaofeng, et al. A new stationary droplet evaporation model and its validation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1407-1416.
- [10] Manjunath M, Raghavan V, Mehta P S. Vaporization characteristics of suspended droplets of biodiesel fuels of Indian origin and their diesel blends: An experimental study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 88: 28-41.
- [11] Xue Wenhua, Wang Xiaorong, Sun Wenqiang, et al. Experimental study on the evaporation characteristics of Jatropha curcas oil methyl ester (JME)-ethanol blended droplets [J]. Fuel, 2023, 333: 126081.
- [12] Wang Lintao, Wang Jigang, Qiao Xinqi, et al. Effect of ambient temperature on the micro-explosion characteristics of soybean oil droplet: The phenomenon of evaporation induced vapor cloud[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 736-746.
- [13] Wang Jigang, Qiao Xinqi, Ju Dehao, et al. Bubble nucleation, micro-explosion and residue formation in superheated jatropha oil droplet: The phenomena of vapor plume and vapor cloud[J]. Fuel, 2020, 261: 116431.
- [14] Huang Xiaoyu, Wang Jigang, Wang Yuxin, et al. Experimental study on evaporation and micro-explosion characteristics of biodiesel/n-propanol blended droplet[J]. Energy, 2020, 205: 118031.
- [15] Zhang Yu, Huang Ronghua, Wang Zhaowen, et al. Experimental study on puffing characteristics of biodieselbutanol droplet[J]. Fuel, 2017, 191: 454-462.
- [16] Zhang Yu, Huang Ronghua, Xu Shijie, et al. The effect of different n-butanol-fatty acid methyl esters (FAME) blends on puffing characteristics[J]. Fuel, 2017, 208: 30-40.
- [17] Han Kai, Pang Bo, Zhao Changlu, et al. An experimental study of the puffing and evaporation characteristics of acetonebutanol-ethanol (ABE) and diesel blend droplets[J]. Energy,

2019, 183: 331-340.

- [18] Wang Jigang, Wang Xiaorong, Chen Hao, et al. Experimental study on puffing and evaporation characteristics of jatropha straight vegetable oil (SVO) droplets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 119: 392-399.
- [19] Wang Zhaowen, Yuan Bo, Cao Junhui, et al. A new shift mechanism for micro-explosion of water-diesel emulsion droplets at different ambient temperatures[J]. Applied Energy, 2022, 323: 119448.
- [20] Chen Xiaoyu, Xi Xi, Xiao Ge, et al. Effect of ambient temperature and water content on emulsified heavy fuel oil droplets evaporation: Evaporation enhancement by droplet puffing and micro-explosion[J]. Fuel, 2023, 334: 126614.
- [21] Chen Xiaoyu, Xi Xi, Zhang Lenan, et al. Experimental study on nucleation and micro-explosion characteristics of emulsified heavy fuel oil droplets at elevated temperatures during evaporation[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224: 120114.
- [22] Mei Deqing, Fang Yu, Zhang Dengpan, et al. Evaporation and micro-explosion performances of nano-fuel droplets[J]. Fuel, 2023, 334: 126623.
- [23] Wang Xiaorong, Dai Minglu, Wang Jigang, et al. Effect of ceria concentration on the evaporation characteristics of diesel fuel droplets[J]. Fuel, 2019, 236: 1577-1585.
- [24] Wang Jigang, Qiao Xinqi, Ju Dehao, et al. Experimental study on the evaporation and micro-explosion characteristics of nanofuel droplet at dilute concentrations[J]. Energy, 2019, 183: 149-159.
- [25] Dai Minglu, Wang Jigang, Wei Ning, et al. Experimental study on evaporation characteristics of diesel/cerium oxide nanofluid fuel droplets[J]. Fuel, 2019, 254: 115633.
- [26] Wang Xiaorong, Wei Ning, Gao Ji, et al. Evaporation characteristics of ethanol diesel droplets containing nanoparticles[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2021, 26(2): 201-209.
- [27] Nomura H, Ujiie Y, Rath H J, et al. Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity conditions[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(1): 1267-1273.
- [28] Nomura H, Murakoshi T, Suganuma Y, et al. Microgravity

experiments of fuel droplet evaporation in sub- and supercritical environments[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2425-2432.

- [29] Ghassemi H, Baek S, Khan Q. Experimental study on binary droplet evaporation at elevated pressures and temperatures[J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178: 1031-1053.
- [30] Ghassemi H, Baek S, Khan Q. Experimental study on evaporation of kerosene droplets at elevated pressures and temperatures[J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178: 1669-1684.
- [31] Javed I, Baek S W, Waheed K, et al. Evaporation characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of ligand-protected aluminum nanoparticles at elevated temperatures[J]. Combustion and Flame, 2013, 160(12): 2955-2963.
- [32] 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.
- [33] Ranz W E, Marshall W R. Evaporation from drops: Part 1[J]. Chemical Engineering and Process, 1952, 48(3): 141-146.
- [34] Sazhin S S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32: 162-214.
- [35] Sazhin S S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems[J]. Fuel, 2017, 196: 69-101.
- [36] Abderrahmane A, Mohamed A, Abdelkader N, et al. Ranz and Marshall correlations limits on heat flow between a sphere and its surrounding gas at high temperature[J]. Thermal Science, 2015, 15(9): 1521-1528.
- [37] Clift R, Grace J, Weber M. Bubbles, drops, and particles[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [38] Zhou Zhifu, Wang Guoxiang, Chen Bin, et al. Evaluation of evaporation models for single moving droplet with a high evaporation rate[J]. Powder Technology, 2013,240:95-120.
- [39] Sazhin S S, Kristyadi T, Abdelghaffar W A, et al. Models for fuel droplet heating and evaporation: Comparative analysis[J].
   Fuel, 2006, 85(12): 1613-1630.

- [40] Dombrousky L A, Sazhin S S. A parabolic temperature profile model for heating of droplets[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 2003, 125(3): 535-537.
- [41] Zhou Zhifu, Li Weiyu, Chen Bin, et al. A 3rd-order polynomial temperature profile model for the heating and evaporation of moving droplets[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 162-170.
- [42] Talley D G, Yao S C. A semi-empirical approach to thermal and composition transients inside vaporizing fuel droplets[J]. Symposium (International) on Combustion, 1988, 21(1): 609-616.
- [43] Sazhin S S, Elwardany A, Krutitskii P A, et al. A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(21): 4495-4505.
- [44] Sazhin S S, Elwardany A E, Krutitskii P A, et al. Multicomponent droplet heating and evaporation: Numerical simulation versus experimental data[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(7): 1164-1180.
- [45] Sazhin S S, Rybdylova O, Crua C. A mathematical model for heating and evaporation of a multi-component liquid film[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117: 252-260.
- [46] Sazhin S S, Al Qubeissi M, Kolodnytska R, et al. Modelling of biodiesel fuel droplet heating and evaporation[J]. Fuel, 2014, 115: 559-572.
- [47] Liu Lu, Liu Yan, Mi Menglong, et al. Evaporation of a bicomponent droplet during depressurization[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 615-626.
- [48] Abramzon B, Sirignano W A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1989, 32(9): 1605-1618.
- [49] Narasimhan C, Gauvin W H. Heat and mass transfer to spheres in high-temperature surroundings[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1967, 45(4): 181-188.
- [50] Kreith F. Principles of heat transfer[M]. Scranton: International Textbook Company, 1965.
- [51] 付耿. 叠氮复合柴油液滴蒸发特性及影响机理研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
  - Fu Geng. Research on the evaporation characteristics of diesel-

azides blend droplets and influence mechanism[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.(in Chinese)

- [52] 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.
- [53] Yin Jing, Chen Shuyan, Zhu Dongqing, et al. Experimental investigation on evaporation characteristics of RP-3 aviation kerosene droplet above the critical temperature under various pressure conditions[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 140: 108463.
- [54] Rehman H L, Weiss J, Seers P. Effect of heat conduction on droplet life time and evaporation rate under forced convection at low temperatures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 72: 59-66.
- [55] Wang Jigang, Huang Xiaoyu, Qiao Xinqi, et al. Experimental study on effect of support fiber on fuel droplet vaporization at high temperatures[J]. Fuel, 2020, 268: 117407.
- [56] Liu Jing, Hu Erjiang, Zeng Wen, et al. A new surrogate fuel for emulating the physical and chemical properties of RP-3 kerosene[J]. Fuel, 2020, 259: 116210.
- [57] Yan Yingwen, Liu Yuchen, Fang Wen, et al. A simplified chemical reaction mechanism for two-component RP-3 kerosene surrogate fuel and its verification[J]. Fuel, 2018, 227: 127-134.
- [58] Xu Jiaqi, Guo Junjiang, Liu Aike, et al. Construction of autoignition mechanisms for the combustion of RP-3 surrogate fuel and kinetics simulation[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2015, 31(4): 643-652.
- [59] 罗睿. 国产 RP-3 航空煤油模拟替代燃料燃烧特性的试验研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2019.
  Luo Rui. Experimental study on combustion characteristics of a surrogate fuel of RP-3 kerosene[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019.(in Chinese)
- [60] Zhong Fengquan, Fan Xuejun, Yu Gong, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23: 543-550.
- [61] 范学军,俞刚.大庆RP-3航空煤油热物性分析[J]. 推进技术, 2006,27(2): 187-192.

Fan Xuejun, Yu Gang. Analysis of thermophysical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 187-192.(in Chinese)

- [62] 靳乐. RP-3 航空煤油的超临界喷射、蒸发和爆震燃烧特性研究[D]. 西安:西北工业大学,2016.
  Jin Le. Investigations on the supercritical injection, evaporation, and detonation characteristics of the RP-3 aviation kerosene[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [63] 顾玲燕,陈泰然,王国玉,等. RP-3 航空燃油非定常空化流动 特性研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(11): 52-60.
  Gu Lingyan, Chen Tairan, Wang Guoyu, et al. Study on unsteady cavitating flow characteristics of RP-3 aviation-fuel [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(11): 52-60. (in Chinese)
- [64] 马洪安,付淑青,吴宗霖,等. RP-3 航空煤油燃烧特性及其反应机理构建综述[J]. 航空发动机,2021,47(1): 25-31.
  Ma Hong'an, Fu Shuqing, Wu Zonglin, et al. Review of combustion characteristics and reaction mechanism construction of RP-3 aviation kerosene[J]. Aeroengine, 2021, 47(1): 25-31. (in Chinese)
- [65] Yu Jin, Tang Gangzi, Yu Jiajia. Detailed combustion chemical mechanism for surrogates of representative jet fuels[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(6): 2421-2434.
- [66] Yu Zhiqing, Wei Shengli, Wu Chengcheng, et al. Development and verification of RP-3 aviation kerosene surrogate fuel models using a genetic algorithm[J]. Fuel, 2022, 312: 122853.
- [67] 郑东,于维铭,钟北京. RP-3 航空煤油替代燃料及其化学反应动力学模型[J]. 物理化学学报,2015,31(4): 636-642.
  Zheng Dong, Yu Weiming, Zhong Beijing. RP-3 aviation kerosene surrogate fuel and the chemical reaction kinetic model [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2015, 31(4): 636-642. (in Chinese)
- [68] Ni Zhaojing, Han Kai, Zhao Changlu, et al. Numerical simulation of droplet evaporation characteristics of multicomponent acetone-butanol-ethanol and diesel blends under different environments[J]. Fuel, 2018, 230: 27-36.

# Investigation on Heating and Vaporization Characteristics of Single RP–3 Aviation Kerosene Droplet at Elevated Temperature and Pressure

Yin Jing<sup>1</sup>, Liang Yong<sup>2</sup>, Zhang Longfei<sup>2</sup>, Xue Shuqin<sup>1</sup>, Liu Bing<sup>2</sup>, Zhou Zhifu<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Xi' an Research Institute of Aerospace Power Measurement and Control Technology, Xi' an 710025, China

Abstract: RP-3 aviation kerosene is a commercial jet fuel commonly employed in China. The evaporation of aviation kerosene droplets in the aeroengine combustion chamber directly affects the fuel atomization performance, the formation of air-fuel mixture, and combustion guality. To accurately predict the heating and vaporization characteristics of single RP-3 kerosene droplet, the blend of n-dodecane, 2, 5-dimethylhexane and toluene was selected as the surrogate fuel. And a multi-component droplet evaporation model considering the natural convection effect at elevated temperature and pressure was proposed in the present study. Based on the self-developed experimental apparatus, the temporal variations of the RP-3 kerosene droplet diameter were obtained for an ambient pressure of 1MPa at ambient temperatures of 473K to 673K. The accuracy of the model was validated by the comparison between the simulation results and experimental results. The predictions of the parameters including diameter, internal temperature distribution, component mass fraction distribution and lifetime of three-component surrogate fuel by the new-proposed model were used to quantitatively analyze the effect of ambient pressure on the evaporation characteristics of individual droplet under various ambient temperatures. The results indicated that the heat and mass transfer inside the liquid phase can affect the evaporation rate of multi-component droplets, and the liquid diffusion resistance leads to the heterogeneity of the distribution of internal temperature and component mass fraction inside the liquid phase. The impact of environmental pressure on the RP-3 kerosene droplet lifetime strongly depends on environmental temperature. When the ambient temperature is below the critical temperature of ndodecane (658.25K), the relationship between droplet lifetime and ambient pressure is not monotonic, but first increases and then decreases with the increase of ambient pressure. When the ambient temperature exceeds 658.25K, the droplet lifetime monotonically decreases as ambient pressure increases. This can be attributed to the fact that in high temperature and pressure environment, the increase of ambient pressure can significantly increase the heat and mass transfer intensity of natural convection. When natural convection exceeds a certain intensity, it can obviously promote droplet evaporation. The study above is conducive to underseand the diffusion process of the internal for the optimized design of future high-performance low-pollution engines from the source.

**Key Words:** single droplet evaporation; aero-engine; natural convection; RP-3 aviation kerosene; three-component representative

**OReceived:** 2023-08-07; **Revised:** 2023-12-04; **Accepted:** 2024-01-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52176163); Aeronautical Science Foundation of China (2019ZB070002)