

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220790-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220790

面向燃油结冰试验的饱和燃油制备数值模拟

彭 炬¹, 谷云凤¹, 李 杰², 刘林盛², 夹福年¹, 杨锦昌¹, 王 彬²

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621703;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为研究燃油结冰试验中饱和燃油含水量的影响规律, 以达到适航标准要求的油水均匀度, 提出对配水循环系统进行数值模拟。运用欧拉-拉格朗日法分别表示连续项与离散项, 用离散相模型 (discrete phase model, DPM) 模拟水粒子的碰撞、融合和破碎。对液滴喷射与水-燃油两相流循环进行仿真计算, 研究注水位置、循环泵后压力及液流进出排布对燃油含水量的影响规律。基于循环系统内不同区域离散项质量浓度的取样统计, 分析适航标准规定时间内水与燃油混合情况。利用燃油配水装置进行了泵压式循环注水试验, 实测不通过油水分离器循环的泵后燃油含水量。结果表明: 测量结果与数值模拟基本吻合, 液流进出口设于油箱同侧且在泵后管路注水时循环掺混效果好。0.2 MPa 泵后压力时油水混合均匀, 且含水量可保持在适航标准规定的 $90 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$ 范围内。

关 键 词: 燃油结冰; 含水量; 离散项; 管路布局; 泵后压力

中图分类号: V233.2

文献标志码: A

Numerical simulation of saturated fuel preparation for fuel icing tests

PENG Ju¹, GU Yunfeng¹, LI Jie², LIU Linsheng², JIA Funian¹,

YANG Jinchang¹, WANG Bin²

(1. Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621703, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the influence rules of water content in saturated fuel for fuel icing tests, and find the way to meet airworthiness requirement on fuel-water homogeneity, numerical simulation of water injection and circulation system was proposed. Euler-Lagrange algorithm represented continuous and discrete terms respectively, and discrete phase model (DPM) simulated the collision, fusion and fragmentation of water particles. Water droplet spray and water-fuel two-phase flow cycle was simulated, to examine effects of injection position, pressure of the pump outlet and in/out arrangement of fluid on the water content in the fuel. Based on statistical sampling on the mass concentration of the discrete terms for different regions in the cycle system, water-fuel mixing within the prescribed time by the airworthiness standard was analyzed. Water injection experiment for the fuel cycle was conducted by using water distribution apparatus, and the water content in the cycle fuel without passing through the fuel-water separator was measured. The results showed that, the measured results were in good agreement with the

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 中国航发四川燃气涡轮研究院稳定支持项目 (GJCZ-2021-0043)

作者简介: 彭炬 (1984—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事航空发动机高空模拟试验技术研究。

通信作者: 王彬 (1978—), 男, 副教授, 博士, 研究领域为航空燃油系统及执行机构技术。E-mail: binwang@nuaa.edu.cn

引用格式: 彭炬, 谷云凤, 李杰, 等. 面向燃油结冰试验的饱和燃油制备数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220790. PENG Ju, GU Yunfeng, LI Jie, et al. Numerical simulation of saturated fuel preparation for fuel icing tests [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220790.

numerical simulation. The circulating mixing exhibited excellent effect when the inlet and the outlet of the liquid flow were on the same side of the tank or water was injected into the downstream pipe of the pump. Moreover, fuel-water mixing was uniform at 0.2 MPa pump outlet pressure, and stable water content was kept within the range of 90×10^{-6} to 130×10^{-6} specified by the airworthiness standard.

Keywords: fuel icing; water content; discrete items; piping layout; pump-outlet pressure

飞机在低温条件下长时间飞行, 发动机燃油系统中水分易析出并低温结冰从而造成管道堵塞或部件故障, 使燃油系统失效而无法给发动机正常供油并危及飞行安全^[1-2]。因此在发动机研制过程中需对燃油系统进行结冰试验, 模拟燃油中水分的结冰过程, 试验系统所用的燃油需进行特殊调制使得在试验条件下达到结冰的效果^[3-4]。

含水量是饱和燃油与过饱和燃油制备的关键所在, 含水量会影响后续结冰试验结果的可靠性。众多学者围绕油水两相流展开了相关研究, 给出了影响油水混合的众多因素。章涛^[5]通过 S-C-H 模型对油水两相流中液滴的运移和融合过程进行了模拟, 发现液滴位置、尺度及排布方式等对融合过程的影响。刘志权等^[6]利用 VOF 模型及压力速度耦合方式研究了倾斜管中燃油含水率与压降的关系, 发现了压降随含水率的变化规律。张亚辉等^[7]依据 Trallero 流型对水平圆管中不同入口流速及管径的油水两相流进行了数值模拟, 得到入口速度与管径大小对油水两相流流型的影响规律。目前有关仿真循环系统全流域油水掺混及含水量的研究鲜见, 为了得到循环系统全域内油水掺混特性, 对注水过程与两相流循环混合进行仿真计算。使饱和燃油含水量能准确控制在适航标准^[8-9]要求范围内、油水混合均匀。

鉴于改进燃油配水装置、实测最优循环工况所需成本高、周期长, 本文根据适航标准规定, 采用 DPM 离散项模型进行数值仿真^[10-11], 研究注水位置、含水燃油进出排布与泵后压力^[12]对油水掺混的影响规律, 为获得发动机燃油结冰试验饱和燃油制备油水均匀性调控方法提供参考, 相关结果可用于指导燃油配水装置的改进及试验流程的优化。

1 饱和燃油制备系统

综合国内外民航与军用适航标准, 饱和燃油制备系统一般由饱和油箱、注水装置、循环泵、油水分离器和水测量仪等组成^[13], 燃油循环系统及区域编号如图 1 所示。按照适航标准要求制

备流程, 将燃油通往循环系统, 注水点可选择在底部进油端、油箱顶部或内循环管道出口处, 待燃油流量稳定且达到规定温度时, 通过注水装置按比例添加游离水, 进出口同侧布局时将循环管路分为 I、II 和 III 段, 异侧布局时编号为①、②、③和④段, 设置压力跃变条件模拟泵组的增压作用, 维持一定的泵后压力经 I、II 和 III 至油箱。循环 30 min 以确保完全混合, 根据循环管路进出口位置将油箱分为 A、B 半区, 下文计算分析依据该分区。

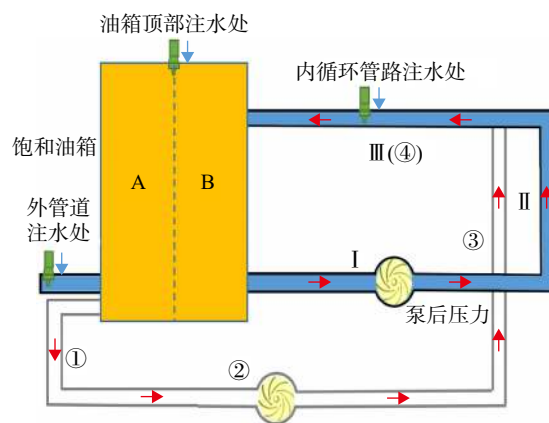


图 1 燃油循环系统及划分

Fig. 1 Fuel cycle system and division

制备成的饱和燃油其含水量规定范围为 $90 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$ 。图 2 为掺混后油水混合状态示意图, 其中彩色粒子为喷射到燃油中的水粒子, 需对均匀区域进行采样测量。因循环系统存在拐角等低流速区域, 如存在过多混合不均区域, 需继续循环至充分混合。

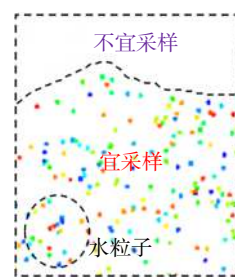


图 2 含水燃油宜采样区域

Fig. 2 Sampling area of water-bearing fuel

2 燃油制备数值模拟

2.1 数学方程

2.1.1 DPM 模型

循环系统内燃油流动稳定后,需按每升燃油添加 1 mL 水的比例注入游离水,注水完成后继续循环约 30 min 以保证混合均匀。设置双向耦合,喷射后的水粒子为离散项。考虑粒子变形、碰撞和融合以及液滴喷射和雾化,引用 DPM 对油水两相流循环掺混进行数值模拟,加入附属物理计算模型,保证仿真的合理性和精度^[14-15]。

当曳力作用于粒子时,存在的动量交换会改变流体的流动,并对连续相产生影响,由牛顿第二定律,喷射后的颗粒在燃油中受曳力作用^[16],若忽略重力等影响,则有:

$$\frac{du_p}{dt} = F_d \quad (1)$$

其中 F_d 是单位质量水颗粒所受的曳力, u_p 是水粒子速度, t 是时间。曳力计算式为:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_f A_f (u - u_p)^2 \quad (2)$$

其中 C_d 为曳力系数, ρ_f 为燃油密度, A_f 为参考面积, u 为燃油流速。

2.1.2 湍流模型

注水喷射时,液滴对燃油流动产生剧烈扰动,喷嘴的高压喷射及水对燃油的冲击使液体所受惯性力较黏性力更剧烈^[17],因此在循环和注水过程中均存在湍流现象。

k - ε 模型针对较复杂的湍流计算有更好的适应性^[18]。其中, RNG 模型通过试验数据建立,可信度高、适用范围宽,除可满足旋流计算的需求,其对壁面流动的高计算精度可保证本文近壁面区域油水掺混仿真结果的可靠性。

RNG k - ε 模型如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4)$$

其中 $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, 对于流动方向与重力方向相同的流动, $C_{3\varepsilon} = 1$, 对于流动方向与重力方向垂直的流动, $C_{3\varepsilon} = 0$ 。 G_k 表示含水燃油平均速

度梯度引起的湍流动能; G_b 表示含水燃油中浮力产生的湍流动能; Y_m 表示可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献; α_k 和 α_ε 分别是模型参数 k 和 ε 有效普朗特数的倒数; S_k 和 S_ε 是定义的源项; μ_{eff} 表示有效湍流黏度, R_ε 表示对于不同雷诺数情况下的修正项。

2.1.3 欧拉—拉格朗日模型

拉格朗日法可将含水燃油的流动看作无数质点运动的总和。研究流体单个质点的运动,流体质点位移计算的向量方程为^[19]:

$$\frac{dx}{dt} = v_a(x, t) + v_b(x, t) \quad (5)$$

其中 v_a 表示含水燃油的平流速度; v_b 表示含水燃油的湍流扩散速度。

欧拉法可将含水燃油的运动看作各个空间点上不同流体质点运动情况的总和,其轨迹方程为

$$x^{i+1} = x^i + v_a(x^i, t^i) \cdot \Delta t + v_b(x^i, t^i) \cdot \Delta t \quad (6)$$

其中 Δt 表示积分步长, i 表示时间指数, $t^i = i\Delta t$, 在欧拉—拉格朗日法中运用欧拉法表示连续相,拉格朗日法表示离散相。

2.1.4 含水燃油质量守恒方程

计算时为实现油水两相流求解方程的封闭,假设液体不可压缩,由质量守恒定律,含水燃油质量守恒方程如下^[20]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \text{div}(\rho_m \mathbf{v}_m) = S_m \quad (7)$$

$$\rho_m = \sum_{i=1}^2 \varphi_i \rho_i \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_m = \sum_{i=1}^2 \frac{\varphi_i \rho_i \mathbf{v}_i}{\rho_m} \quad (9)$$

其中 ρ_m 为含水燃油的平均密度; ρ_i 是第 i 相物质的密度; $\mathbf{v}_m$ 是含水燃油的平均速度矢量; $\mathbf{v}_i$ 是第 i 相物质的速度矢量; φ_i 是第 i 相物质的体积分; S_m 表示含水燃油总质量的源项。

2.1.5 注水喷嘴数学模型

注射到燃油中的水粒子半径 r 表示为^[21]:

$$r = B_c \lambda \quad (10)$$

其中 B_c 表示喷嘴模型常数, λ 表示液滴离散过程产生的波长。

喷射过程中水粒子半径的变化率为:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r-l}{\tau}$$

(11)

其中 l 表示雾化过程中水粒子的半径。
在水相喷射过程中水粒子的破碎时间 τ 为：

$$\tau = \frac{3.7B_d}{\lambda\Omega}l$$

(12)

其中 B_d 表示水粒子破碎的时间常数, Ω 表示波长增长率。

2.2 燃油配水模型及网格无关性验证

本文对饱和燃油循环系统仿真计算时, 需在不同位置设置注水点, 因喷嘴孔与燃油管径尺度差异大, 网格划分时对喷嘴附近进行了布局加密。改变循环管路的进口位置(出口不变), 在靠近循环管道进口处设置循环压力边界条件。各条件设置完成后, 计算得到水相浓度及分布情况。

计算结果除受流动模型的影响, 网格尺寸也至关重要。离散项质量浓度统计方法与网格划分的数量相关。计算过程中对循环的水粒子跟踪取样, 统计划定区间内的离散项质量浓度, 通过计算区域内的含水量进行网格无关性验证, 验证网格数量对计算结果的影响规律。如表 1 与图 3。

表 1 油箱横向分区离散项质量浓度
Table 1 Mass concentration of discrete term in lateral region of fuel tank

横向 分区/mm	统计数量		离散项质量浓度/(kg/m ³)	
	网格尺寸 为 4 mm	网格尺寸 为 2 mm	网格尺寸为 4 mm	网格尺寸为 2 mm
0~13	85	370	0.986	4.366
13~16	66	360	0.911	5.292
26~39	78	429	0.998	5.663
39~52	98	354	1.205	4.567
52~65	102	449	1.091	5.164

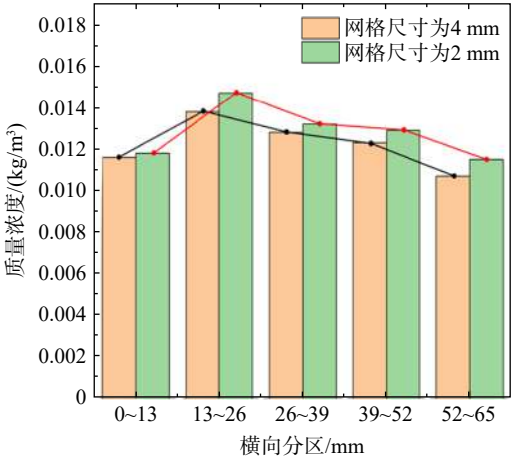


图 3 划定区域内的质量浓度
Fig. 3 Mass concentration in delimited area

比较两种网格尺寸计算得到的区域含水量, 在 13~26 mm 区域内含水量相差最大, 相对误差为 6.5%。综合考虑结果可靠性与计算效率, 油箱部分采用 4 mm 的网格尺寸进行计算。

2.3 喷嘴位置对燃油含水量的影响

为研究注水位置对循环系统内油水混合的影响, 分别在进油端、油箱顶部和循环管道设置注水点(见图 2), 比较不同注水方案的优劣。

循环管路注水初始时刻(0.5 min)与循环 20 min 后的水粒子分布状态如图 4 所示。在连续介质燃油中, 将作为离散体系的水粒子群单独表示, 以描述油水混合状态, 水分由注水装置注入时开始计时。底部循环管道进口段的高压使燃油向管道流动, 油箱与管道交界处流动区域突减使燃油流速增大, 高速燃油通过循环管道出口再次流入油箱, 导致靠近循环管道进出口附近区域流速较大而中心区域流速较小。壁面处流体受黏性剪切力作用导致速度减小甚至趋于零, 拐角处因转角效应使边界层分离并形成涡流。流速较低及涡流区

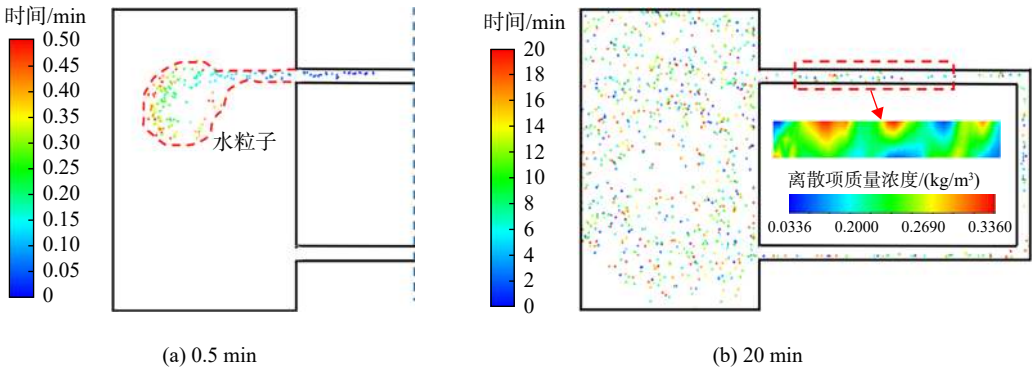


图 4 循环管路注水水粒子跟踪
Fig. 4 Water particle tracking in cycle pipeline

域内水粒子流通性较差, 导致油箱拐角及中心区域水粒子稀疏。底部进油端注水时油箱内离散项质量浓度如图 5 所示, 水从底部注入系统, 直接进入循环管道, 仅在油箱底部进行扩散, 循环 30 min 后水粒子分布不均, 油箱中心、近壁面及拐角处存在较多水粒子稀疏区域, 油水混合效果较差, 得到的含水燃油不适合进行结冰试验。油箱顶部注水时离散项质量浓度如图 6 所示, 因水粒子流动路径发生改变, 从注入油箱至进入底部循环管道中在油箱左侧区域扩散, 油箱顶部注水时油水掺混状态明显优于底部进油端注水, 油箱近壁面及中心处水粒子分布较底部进油端注水均匀, 但仍存在部分不均匀区域。图 7 所示为循环管路出口处注水时离散项质量浓度云图, 此方案水粒子从注入至进入底部循环管道的扩散区域最大, 注水 10 min 时油水掺混效果与进油端注水 30 min 时相近, 注水 20 min 时油水掺混效果与油箱顶部注水 30 min 时相近, 除油箱拐角近壁面存在较小面积的稀疏区域外, 其他区域燃油含水量基本符合标准要求, 水注入燃油后经过规定时间循环均匀分布于系统各处。

综上所述, 比较 3 种注水方案, 循环管路处注

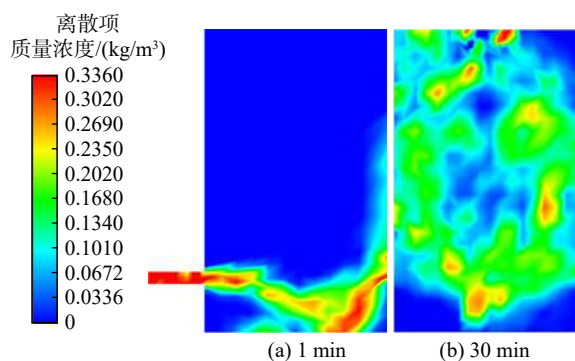


图 5 进油端注水 DPM 浓度

Fig. 5 DPM concentration of water injection in fuel inlet section

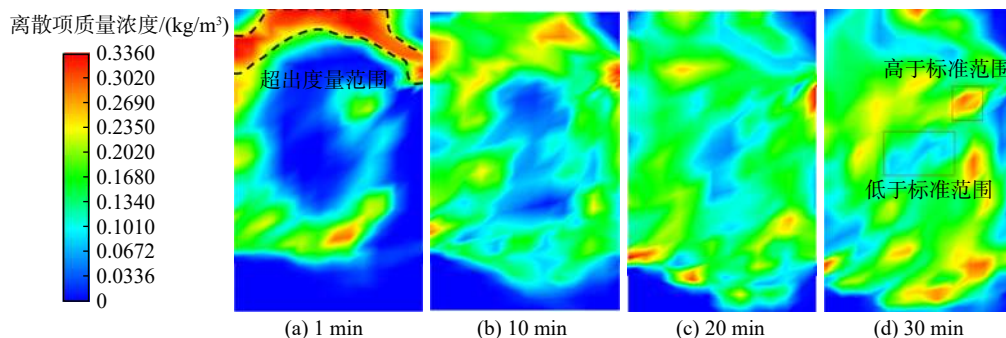


图 7 循环管路注水 DPM 浓度

Fig. 7 DPM concentration of water injection in cycle line

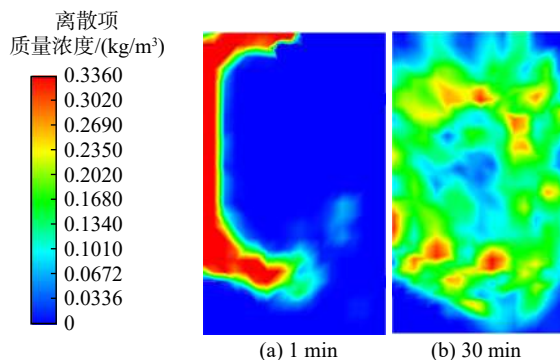


图 6 饱和油箱顶部注水 DPM 浓度

Fig. 6 DPM concentration for water injection to top of saturated fuel tank

水效果最优。

2.4 管路布局对燃油含水量的影响

对循环管道进出口同侧方案(管路布局如图 2 所示)进行水粒子采样, 统计循环系统不同区域内 20 min 至 30 min 的离散项质量浓度并计算含水量。循环系统各区域含水量如图 8 所示, 含水燃油循环 30 min 后, 饱和油箱右侧含水量较左侧高, 但两区域含水量均维持在标准范围内。因注水点设置于管道 II, 注水时含水量较高, 随循环进行含水量保持在标准范围之内, 且各管道的含水量趋于稳定。

考虑到循环流路布局会改变油箱内流体流向, 对进出口位于油箱两侧方案进行建模仿真。对油箱及管道处水粒子同时采样并计算含水量, 如图 9 所示。

相较于进出口同侧布局, 进出口异侧时, 循环 30 min 后油箱与管道含水量相差较大, 油箱左侧含水量远超标准范围, 各管道内含水量差异相较于进出口同侧布局较明显。两种方案均显示靠近循环管路进口处燃油含水量较高。

由此得出, 在燃油配水过程中采取循环管道

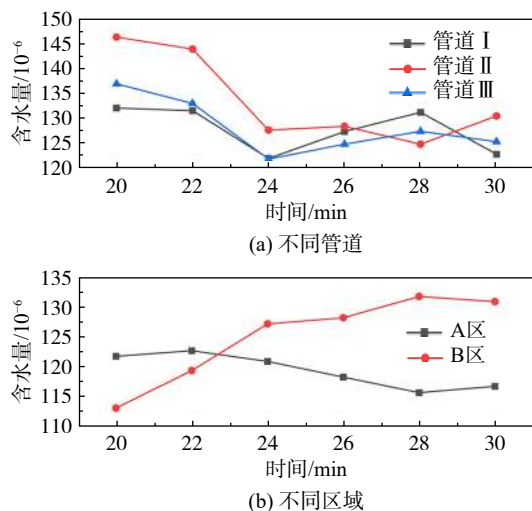


图 8 循环系统燃油含水量(进出口同侧)
Fig. 8 Water content in fuel of cycle system
(for one-side in/out port)

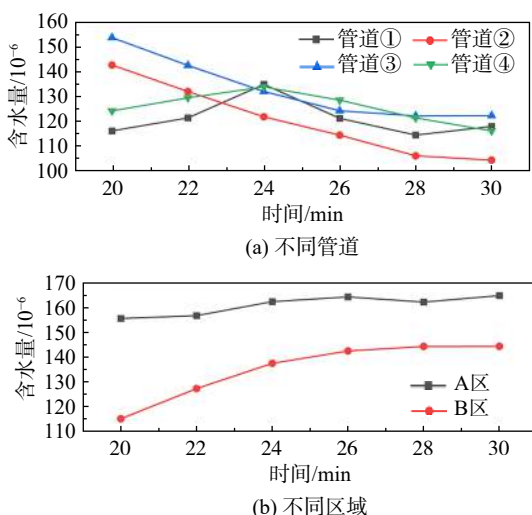


图 9 循环系统燃油含水量(进出口异侧)
Fig. 9 Water content in fuel of cycle system
(for two-side in/out port)

进出口位于油箱同侧的布局更易得到水分均匀的饱和燃油。

2.5 泵后压力对燃油含水量的影响

饱和燃油制备系统中循环泵起增压作用,使液体循环流通。在管道 I 处设置增压边界条件,研究循环速度对油水混合的影响规律,计算得到低(0.1 MPa)、中(0.2 MPa)和高(0.3 MPa)3 种泵后压力(其中 0.2 MPa 为前文计算时的泵后压力)时的水相分布,比较到达标准规定时间时油水混合状态。

由图 10、图 11 及图 7 可看出,泵后压力较高时,短小时内(1 min)水分子在油箱内扩散更快,循

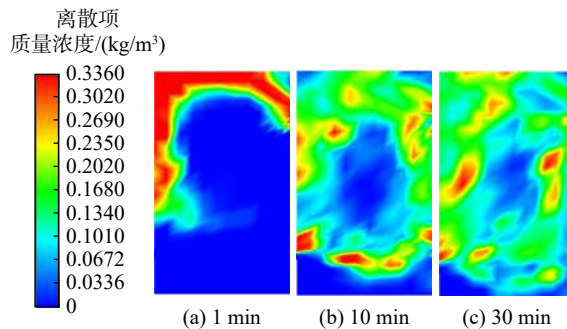


图 10 泵后压力为 0.1 MPa 油箱的 DPM 浓度
Fig. 10 DPM concentration of tank for 0.1 MPa
pump-outlet pressure

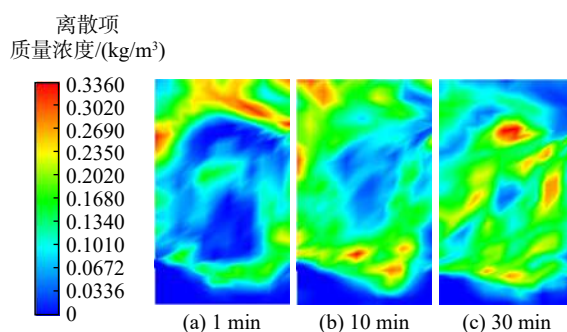


图 11 泵后压力为 0.3 MPa 油箱的 DPM 浓度
Fig. 11 DPM concentration of tank for 0.3 MPa
pump-outlet pressure

环 10 min 时水粒子分布更均匀,但在较大的泵后压力下,水粒子在油箱拐角及边界处流通性最差,导致循环趋于稳定后(30 min)油箱拐角边界附近存在较多水分过稀区域,中心附近水粒子过浓区域增多;泵后压力较小时油水掺混较慢,循环 30 min 后同样存在较多混合不均匀区域且掺混过程未稳定。泵后压力 0.2 MPa 时,在规定时间内油水掺混达到稳定状态,壁面及拐角处水分稀疏区域明显减少,得到水分子分布更为均匀的饱和燃油。因此在燃油配水过程中循环速度不宜过大或过小,在适当的泵后压力情况下燃油与水的混合效果最优。

3 燃油含水量测量试验

为验证数值模拟方法的可靠性,开展燃油配水试验,系统主要包括饱和油箱、注水装置、油水分离器、热交换器、离心泵和控制系统。试验系统各装置如图 12 所示。

图 13 所示为一套自主研制的针对饱和燃油制备的泵压式燃油配水系统,其注水装置设置于循环管道处。配置饱和燃油时,喷水完成后 3 s

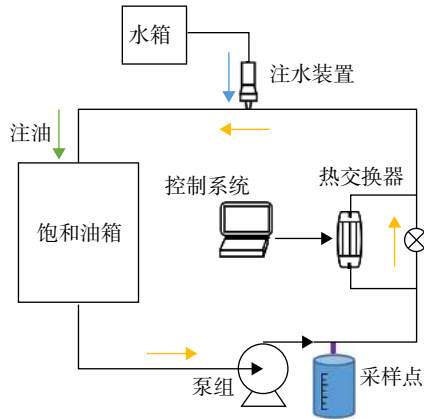


图 12 试验装置原理图

Fig. 12 Schematic diagram of experiment setup

内立刻切换管路不经过油水分离器,继续循环。通过微量水分测量仪测得泵后管道内燃油含水量,如表 2 所示,与仿真结果进行对比。

间隔 1 min 对泵后截面水粒子采样,计算得到含水量。试验注水完成后,测量泵后压力为 0.24 MPa,将压力降到 0.2 MPa 左右,测得泵后含水量逐渐趋近仿真结果,解释了循环前 7 min 两者误差较大的现象。循环至 9 min 时,试验测得的泵后含水量与仿真结果相差较小,均达到 90×10^{-6} (最低标准)。考虑燃油配水为长时间过程,

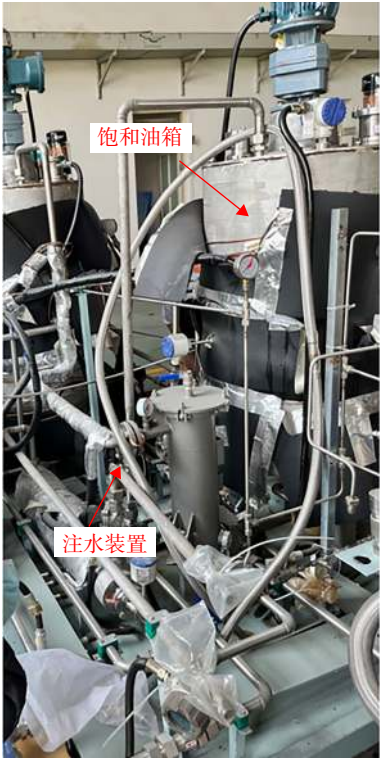


图 13 饱和燃油制备试验装置

Fig. 13 Experiment setup for saturated fuel preparation

循环 20 min 后,间隔 2 min 对泵后管道内含水燃油取样测量,模型计算结果与试验情况基本接近。

表 2 泵后某截面燃油含水量

Table 2 Water content in fuel at a pump outlet section

时间/min	试验含水量	仿真含水量	误差/%	时间/min	试验含水量	仿真含水量	误差/%
5	73.85	66.71	9.67	20	127.36	132.08	3.71
6	78.21	70.49	9.87	22	128.57	131.55	2.32
7	84.61	80.15	5.27	24	126.43	121.99	3.51
8	90.15	88.30	2.05	26	131.69	127.36	3.33
9	95.76	93.01	2.87	28	128.81	131.21	1.86
10	98.33	95.59	2.79	30	127.94	122.84	3.99

4 结 论

本文通过对发动机燃油结冰试验适航标准的归纳,分析饱和燃油的制备流程,针对饱和燃油制备系统建模,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型获得循环流场、DPM 模型模拟注水装置,通过数值仿真进行取样计算,模拟结果与试验结果吻合度较好,表明数值模型能够有效模拟油水循环混合过程。得到了注水位置、液流进出排布及泵后压力对油水混合及含水量范围的影响规律,具体如下:

1) 循环管路内注水时,到达规定时间时水分分布均匀,除拐角处存在较小面积的水分稀疏区

域,其余区域油水混合良好。

2) 靠近循环进口处的燃油含水量较高,液体进出同侧时系统内油水混合均匀,含水量稳定在 $100 \times 10^{-6} \sim 130 \times 10^{-6}$ 范围内。

3) 泵后压力维持在 0.2 MPa 左右时,系统内燃油与水掺混均匀,制备完成的饱和燃油可用于后续试验。

参考文献:

[1] 韩斌, 张志强. 飞机燃油结冰试验用油的制备技术[J]. 中国科技信息, 2017(22): 94-95.
HAN Bin, ZHANG Zhiqiang. Preparation technology of aircraft fu-

- el icing test oil[J]. *China Science and Technology Information*, 2017(22): 94-95. (in Chinese)
- [2] LAM J K W, WOODS R D. Ice accretion and release in fuel systems[J]. *The Aeronautical Journal*, 2018, 122(1253): 1051-1082.
- [3] LEONARD R S. Above and beyond: fire and ice[J]. *Air and Space*, 2010(5): 25.
- [4] 李洁, 马文孝. 民用飞机辅助动力装置燃油结冰验证方法研究[J]. *科技视界*, 2017(7): 24-25.
- LI Jie, MA Wenxiao. Research on auxiliary power unit fuel system icing qualification method on civil aircraft[J]. *Science & Technology Vision*, 2017(7): 24-25. (in Chinese)
- [5] 章涛. 油水两相流中液滴运动的直接数值模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- ZHANG Tao. Study on the direct numerical simulation of droplet motion in oil-water two phase flow[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016. (in Chinese)
- [6] 刘志权, 荣峰, 佟仕忠. 倾斜管内高黏油水两相流的数值模拟[J]. *石油化工*, 2020, 49(3): 269-278.
- LIU Zhiqian, RONG Feng, TONG Shizhong. Numerical simulation of high-viscosity oil-water two-phase flow in inclined pipe[J]. *Petrochemical Technology*, 2020, 49(3): 269-278. (in Chinese)
- [7] 张亚辉, 米智楠, 吴仁智, 等. 管径大小对水平圆管油水两相流的影响[J]. *流体传动与控制*, 2017(2): 18-21.
- ZHANG Yahui, MI Zhinan, WU Renzhi, et al. Oil-water two-phase flows in horizontal pipes of different diameters[J]. *Fluid Power Transmission & Control*, 2017(2): 18-21. (in Chinese)
- [8] 中国民用航空局. 飞机燃油系统和部件结冰试验: MH/T 9004—2013[S]. 北京: 中国民航出版社, 2013.
- [9] AE-5A Aerospace Fuel, Inerting and Lubrication Sys Committee. Aircraft fuel system and component icing test: ARP1401B-2012[S]. Warrendale, US: SAE International, 2012: 5-9.
- [10] 罗天培, 刘瑞敏, 李茂, 等. 基于 DPM 的试验台导流槽喷水冷却数值研究[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(2): 497-507.
- LUO Tianpei, LIU Ruimin, LI Mao, et al. Numerical investigations of water-spray cooling effect on test stand's deflector based on DPM[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(2): 497-507. (in Chinese)
- [11] LIU Jie, KE Peng. Modelling and analysis of initial icing roughness with fixed-grid enthalpy method based on DPM-VOF algorithm[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(7): 168-178.
- [12] YIN Pengbo, LI Tingting, CAO Xuewen, et al. Condensation properties of water vapor under different back pressures in nozzle[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 31: 101783.
- [13] 吕美茜, 任伟. 燃油结冰试验用油的配制方法研究[J]. *工程与试验*, 2010, 50(2): 29-32.
- LV Meiqian, REN Wei. Study on the method for setting specific fuel used in fuel system icing test[J]. *Engineering & Test*, 2010, 50(2): 29-32. (in Chinese)
- [14] 吕宇玲, 何利民, 程浩, 等. 油水两相分散流液滴粒径预测模型[J]. *化工学报*, 2012, 63(7): 2059-2063.
- LÜ Yuling, HE Limin, CHENG Hao, et al. Drop size model in oil-water dispersed flows[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(7): 2059-2063. (in Chinese)
- [15] HADI NAJAFABADI H, KESHAVARZ MORAVEJI M. CFD investigation of local properties of Al_2O_3 /water nanofluid in a converging microchannel under imposed pressure difference[J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(3): 763-774.
- [16] 李浩, 程嘉辉, 孙春亚, 等. 基于 CFD-DPM 的大规模颗粒-流体系统数值仿真与分析[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(22): 450-461.
- LI Hao, CHENG Jiahui, SUN Chunya, et al. Numerical simulation and analysis of large-scale particle fluid system based on CFD-DPM method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(22): 450-461. (in Chinese)
- [17] SOMWANGTHANAROJ S, FUKUDA S. CFD modeling of biomass grate combustion using a steady-state discrete particle model (DPM) approach[J]. *Renewable Energy*, 2020, 148: 363-373.
- [18] PETIT H A, PAULO C I, CABRERA O A, et al. Modelling and optimization of an inclined plane classifier using CFD-DPM and the Taguchi method[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 77: 617-634.
- [19] 龙绍桥, 娄安刚, 谭海涛, 等. 海上溢油粒子追踪预测模型中的两种数值方法比较[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(增刊 1): 157-162.
- LONG Shaoqiao, LOU Angang, TAN Haitao, et al. Comparison of two numerical methods for solving the model for oil spill particle trajectory on the sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(Suppl. 1): 157-162. (in Chinese)
- [20] 张江华, 史琼艳. 考虑汽化的喷嘴高温气流注水两相流动规律[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(7): 1545-1553.
- ZHANG Jianghua, SHI Qiongyan. Regularity of two-phase flow with vaporization produced by injecting water to the high temperature airflow for nozzle[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(7): 1545-1553. (in Chinese)
- [21] 张淑荣, 尹洪超. 空气雾化燃油喷嘴的喷雾数值模拟[J]. *能源技术*, 2007, 28(1): 14-16.
- ZHANG Shurong, YIN Hongchao. Spray numerical simulation of air blast fuel-oil atomizer[J]. *Energy Technology*, 2007, 28(1): 14-16. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)