# RP-3 航空煤油物理替代燃料模型及应用研究\*

姚长鑫1,禹进2

(1. 重庆建筑工程职业学院 城市轨道交通与机电工程系,重庆 400072;2. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院,重庆 400074)

摘 要:针对现有物理替代燃料构建方法需要大量实验数据来完成多目标优化计算,导致替代燃料 构建成本过高的问题,提出了基于分子结构相似来构建物理替代燃料的方法。基于直接匹配分子结构和 官能基团的思路,构建了一个能描述 RP-3 航空煤油主要物理性质的三元替代燃料模型。以正十二烷、 2,5-二甲基己烷和甲苯为基础燃料,用以匹配目标燃料的四种官能基团:CH<sub>3</sub>,CH<sub>2</sub>,CH和苯基。在不同 压力、温度条件下测试了替代燃料模型计算密度、黏度、比热容和导热系数等物性参数的精确性,结果 表明该替代燃料模型能很好地反映 RP-3 航空煤油在亚临界到超临界状态下的主要物理性质。最后将得 到的替代燃料模型应用于管道对流换热数值模拟中,用以模拟航空煤油再生冷却过程。模拟值与实验值 吻合良好,证明了本文替代燃料构建方法的有效性和实用性。

关键词: RP-3航空煤油; 替代燃料; 官能团; 物理性质; 再生冷却 中图分类号: TK123 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 04-0934-08 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190203

## A Physical Surrogate Fuel Model for RP-3 Aviation Kerosene and Applications

YAO Chang-xin<sup>1</sup>, YU Jin<sup>2</sup>

Department of Urban Rail Transit and Electromechanical Engineering, Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China;
 School of Mechatronics & Automobile Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that spend too much time and work to measure experimental data and calculate optimal functions in traditional surrogate fuel methods, a three-component surrogate for emulating the physical characteristics of RP-3 aviation kerosene has been developed by the methodology of directly matching the molecular structure and functional groups. The components of *n*-dodecane, 2,5-dimethylhexane and toluene were chosen to provide comparable molecular sizes and the representative functional groups,  $CH_3$ ,  $CH_2$ , CH and phenyl of the target fuels. Several important physical properties including density, specific heat capacity, viscosity and thermal-conductivity of present surrogate fuel were validated under different temperature and pressures covering sub- and supercritical conditions. The present surrogate fuel model was also used in the numerical simulations of a tube flow, which mimic the process of regenerative cooling. The effectiveness and practicability of the present surrogate fuel were also validated by the comparisons between the simulation and experiment results.

\* 收稿日期: 2019-04-03; 修订日期: 2019-06-25。

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800735)。

作者简介:姚长鑫,硕士,讲师,研究领域为动力设备内流动及传热特性研究。E-mail: YCX1623@163.com

通讯作者: 禹 进, 博士, 讲师, 研究领域为替代燃料。E-mail: yjin123@yeah.net

引用格式:姚长鑫,禹 进. RP-3航空煤油物理替代燃料模型及应用研究[J]. 推进技术, 2020, 41(4):934-941. (YAO Chang-xin, YU Jin. A Physical Surrogate Fuel Model for RP-3 Aviation Kerosene and Applications [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(4):934-941.)

Key words: RP-3 aviation kerosene; Surrogate fuel model; Functional group; Physical properties; Regenerative cooling technology

## 1 引 言

超燃冲压发动机是实现高超声速飞行的首要关 键技术,是现在世界各国竞相发展的热点领域之 一<sup>[1]</sup>。超燃冲压发动机常常长时间工作在3000°C以 上的高温环境,超过现有材料的承受能力,为此需要 发展先进的热防护技术来保证超燃冲压发动机安全 稳定的工作。而采用吸热型碳氢燃料作为冷却剂的 主动再生冷却技术是目前最有效的热防护手段之 一<sup>[2]</sup>。随着超燃冲压发动机再生冷却技术的发展,关 于超临界碳氢燃料物性参数分析以及流动传热研究 受到重视。然而,航空煤油由上千种碳氢化合物组 成,成分非常复杂,在实际研究中,不可能对每种组 分都进行研究分析。为了解决这个问题,采用基于 几种典型的基础组分的混合物来代表真实燃料的物 理化学性质的"替代燃料"方法被提出并已得到广泛 应用<sup>[3]</sup>。

用少数几种简单燃料去替代复杂燃料,用以物 理特性的预测及研究,这被称为"物理替代"。在超 燃冲压发动机中的再生冷却系统中,物理替代主要 用来反映航空煤油的物理性质,并应用于燃料的传 热和流动等过程的数值模拟中。国外在常见的航空 煤油替代燃料方面已进行了大量的研究工作,并取 得了较丰富的研究成果。Huber等<sup>[4]</sup>相比以前的替代 燃料,多考虑了流体的挥发性,采用七元组分的S-8 航空煤油的替代燃料来模拟航空煤油的热物理性 质。Bruno等<sup>[5]</sup>提出了包含正十二烷、正十四烷、1,2, 4-三甲基苯的三组分替代燃料模型,以反映Jet-A航 空煤油的密度、黏度、声速以及蒸馏曲线等性质。 Slavinskaya等<sup>[6]</sup>选择蒸发特性等物理参数为匹配目 标,为Jet-A航空煤油构建了物理替代燃料。

RP-3航空煤油是国内广泛使用的航空燃料,国内的学者也对 RP-3航空煤油替代燃料做了大量研究。由于再生冷却系统的燃料常常工作在超临界状态,因而构建能模拟 RP-3航空煤油超临界状态下的物理替代模型成为学界研究的热点。在早期,范学军和俞刚<sup>[7]</sup>选择正十烷、1,3,5-三甲基环己烷和正丙基苯为基础燃料,构建了 RP-3航空煤油物理替代燃料模型,用以模拟航空煤油的物理性质。随后,Zhong等<sup>[8]</sup>提出的包含十种组分的 RP-3航空煤油物理替代燃料模型被广泛应用于再生冷却系统的数值模拟研

究中。然而十种组分的替代燃料模型仍然过于复杂,近年来,裴鑫岩等<sup>[9]</sup>、程泽源等<sup>[10]</sup>和曾文等<sup>[11]</sup>也提出了各自关于 RP-3 航空煤油较为简单的物理替代燃料模型。

目前,上述物理替代燃料构建方法中,主要是通 过直接匹配燃料物理性质来确定基础燃料的配比。 然而,由于需要匹配的物理性质参数较多,该方法往 往需要大量实验数据来完成多目标优化计算,使得 基于该方法的替代燃料构建的难度和成本大大增 加。这限制了超燃冲压发动机再生冷却的数值模拟 研究。

针对当前替代燃料构建中所面临的以上问题, 本文在以前工作的基础上<sup>[12]</sup>,提出采用匹配官能团 的方法,为 RP-3 航空煤油构建更为简便有效的物理 替代燃料模型,并验证该方法的"物理替代"能力。 最后将该替代燃料应用到 CFD 模拟中,进一步验证 替代燃料的有效性。

## 2 模型构建

替代燃料模型构建的目的就是为了使替代燃料 与真实燃料的物理特性相似,而燃料的物理性质本 质上是由燃料的分子结构所决定的。所以如果能使 替代燃料与目标燃料的分子结构组成相似,就能保 证它们的物理性质也相似<sup>[12-13]</sup>。因此,本文提出用官 能团的数量来作为量化分子结构的参数,通过匹配 燃料官能团的数量,使得替代燃料和目标燃料的分 子结构匹配,从而获得反映真实燃料物理特性的替 代燃料模型。

#### 2.1 选择匹配目标

在传统的替代燃料构建方法中,常常选取燃料 的物理参数作为匹配目标,如摩尔质量、密度、黏度 和比热容等。匹配的参数越多,能使替代燃料更全 面地反映目标燃料的性质。然而,随着需要匹配的 参数增加,替代燃料将不可避免地变得复杂,使得替 代燃料构建的难度和成本大大增加。为了减少匹配 参数的计算量,本文不直接匹配物性参数,而是匹配 燃料的官能团。燃料的官能团的匹配就能使燃料的 物性自动的匹配<sup>[12]</sup>。

RP-3航空煤油的主要成分的信息在文献[14]中 给出,基于该航空煤油的分子结构,将该航空煤油的 分子结构拆分成四种官能基团:CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, CH 和苯 基。选取这四种官能基团来构建替代燃料模型的依据是:在"官能基团贡献法<sup>[15]</sup>"中,这四种结构是最常见的官能基团,并且,[CH<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>]×[CH<sub>2</sub>+CH<sub>3</sub>]是一个能反映燃料低温反应活性的指标<sup>[16]</sup>。这四种官能基团在航空煤油中的含量如表1所示。

 Table 1
 Contents of the aviation kerosene and its surrogate fuels

| 14015              |                 |        |      |        |  |
|--------------------|-----------------|--------|------|--------|--|
| Fuel               | CH <sub>3</sub> | $CH_2$ | СН   | Phenyl |  |
| <i>n</i> -dodecane | 2               | 10     | 0    | 0      |  |
| 2,5 dimethylhexane | 4               | 2      | 2    | 0      |  |
| Toluene            | 1               | 0      | 0    | 1      |  |
| RP-3               | 2.45            | 6.49   | 0.64 | 0.14   |  |

#### 2.2 基础燃料的选择

基础燃料的选取的基本思路是以一种典型的基础燃料去代表实际燃料的某类烷烃族。除此之外,为了确保替代燃料与目标燃料的分子结构相似,基础燃料需要能为替代燃料提供足够的官能基团。因此,本文选取了三种基础燃料:正十二烷、2,5-二甲基己烷和甲苯。

正十二烷能够反映脂肪烃的物性特征,并常被 作为航空煤油等燃料的替代燃料反映长直链烷烃的 物理性质。因此,选取正十二烷来反映直链烷烃的 物理特性,并提供甲基和亚甲基基团。尽管在以前 的研究中,异辛烷常被用作替代燃料的一种基础燃 料,用以分析航空煤油的支链烷烃的物理特性,然而 由于异辛烷的CH基团的含量偏少,所以本文选取2, 5-二甲基己烷来代表支链烷烃族。最后,由于航空 煤油中含有芳香烃,因此,甲苯也被选取作为基础燃 料来提供苯基官能团。

#### 2.3 官能基团匹配结果

将正十二烷、2,5-二甲基己烷和甲苯的四种官 能团与真实的 RP-3 航空煤油的官能团进行匹配,从 而得到三种基础燃料的各自的比例。通过不断调整 各个匹配项的误差精度,根据各匹配项的误差计算 总的匹配误差,得到了匹配误差最小的基础燃料比 例组成,如表2所示。可以看出,虽然采用的官能基 团匹配法没有将 H/C 比和摩尔质量作为匹配目标,但 是官能团的匹配能使替代燃料的 H/C 比和摩尔质量 自动地与目标航空煤油匹配。

## 3 物理替代性能验证

本文主要针对 RP-3 航空煤油再生冷却过程所 涉及的密度和黏度等主要热物性参数进行分析。由

 Table 2
 Matching results of the surrogate fuels (Mole

| percent)           |                    |      |        |  |  |
|--------------------|--------------------|------|--------|--|--|
| Туре               | Surrogate fuel     | RP-3 |        |  |  |
|                    | <i>n</i> -dodecane | 54.3 |        |  |  |
| Component/(mol%)   | 2,5 dimethylhexane | 32.1 | /      |  |  |
|                    | Toluene            | 13.6 |        |  |  |
| H/C ratio          | 2.09               |      | 2.08   |  |  |
| Molar mass/(g/mol) | 144.66             |      | 148.83 |  |  |

于在超燃冲压航空发动机再生冷却过程中的温度变 化幅度很大,特别是在临界点附近(RP-3航空煤油临 界压力和温度分别是2.3MPa和646K<sup>[17]</sup>)燃料的热力 学和输运特性存在奇异变化,为了完整地分析整个 冷却过程中燃料的流动和传热特性,需要研究不同 压力下主要物性参数随温度的变化特性。本文对替 代燃料在亚临界到超临界条件下的物性参数进行了 验证。替代燃料模型物性参数的计算采用Supertrapp 软件<sup>[18]</sup>完成。

燃料的密度是一个非常重要的热物理参数,对 燃料的流动和传热过程都起着非常重要的作用。因 此,本文首先将所构建的航空煤油替代燃料在不同 压力下的密度的计算值与文献[19]报道的实验结 果进行了对比,如图1所示。在图1中,当压力为 2.32MPa时,替代燃料预测的临界温度大约为640K, 这与实验测得的临界温度较为一致。当环境压力超 过临界压力时,如在3.0MPa和4.0MPa时,燃料不再 具有明显的相变过程,这在替代燃料中也较好地表 现了出来。

RP-3航空煤油替代燃料在不同压力下的黏度和 文献[20]的实验结果的对比如图2所示。可以看出 本文的替代燃料对燃料黏度的预测精度较高,在低 温段,预测值与实验值的吻合程度较高,在高温段 时,预测精度有所下降。在整个压力和温度区间的 预测中,预测的最大误差小于10%。

图 3 是 RP-3 航空煤油替代燃料在不同压力条件 下的比热容的计算值与文献[21] 报道的实验结果的 对比,可以看出本文的替代燃料能反映出比热容随 压力和温度的变化趋势。在低温段,预测值与实验 值的吻合程度较高,比定压热容计算曲线的差异随 着温度的升高而增大,在临界点时,预测的误差达到 最大。裴鑫岩等<sup>[9]</sup>和程泽源等<sup>[10]</sup>分析了出现该现象 的原因,都认是由于在实验过程中 RP-3 航空煤油在 高温区域已经开始发生轻微的热裂解反应,由于裂 解反应,引起组分和能量的变化,从而使得替代燃料 与实验数据的吻合性有所下降。



Fig. 1 Comparison of calculated (line) and experiment (dot) data of density for RP-3 aviation kerosene



Fig. 2 Comparison of calculated (line) and experiment (dot) data of viscosity for RP-3 aviation kerosene

导热系数对压力变化不敏感,不同压力下的导 热系数非常接近。因此本文只比较了5 MPa 压力条 件下,航空煤油替代模型在不同温度下的导热系数 和文献[22]报道的实验结果的对比,如图4所示。从 图中可见,随着温度的增加,导热系数呈变小的趋 势,并且,模拟的导热系数与实验值吻合相对较好。 本文的替代燃料能较好地反映出导热系数随温度的 变化趋势,预测的平均误差小于10%。

## 4 替代燃料在数值模拟中的验证

替代燃料的最终目标是为了实现燃料的精确数 值模拟。因此,本文将所构建的RP-3航空煤油替代 燃料应用于超燃冲压发动机再生冷却系统的数值模 拟中,以进一步验证所构建的替代燃料在数值模拟



Fig. 3 Comparison of calculated (line) and experiment (dot) data of specific heat for RP-3 aviation kerosene



Fig. 4 Comparison of calculated (line) and experiment (dot) data of thermal conductivity for RP-3 aviation kerosene

计算中的有效性。本节采用Fluent软件,在计算时耦合所构建的航空煤油替代燃料模型,对亚临界到超临界状态下替代燃料在管内的流动和传热特性进行了数值模拟研究。

## 4.1 物理模型

为了模拟 RP-3 航空煤油在再生冷却系统中的 流动换热情况,本文的计算模型采用的是内径为 1.8mm,长度等于300mm的竖直圆管,圆管的物理模 型及其网格划分如图5(a)所示。为了保证管内流动 的充分发展,避免进出口效应对最终计算结果的影 响,在管道的人口和出口处各保留了一段长度为 60mm的绝热段。加热段中施加均匀的热负荷。



#### 4.2 控制方程

本文的数值模拟计算中所采用的质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程等一系列的控制方程,如下所示:

质量守恒方程

$$\nabla(\rho \boldsymbol{u}) = 0 \tag{1}$$

动量守恒

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \tag{2}$$

能量守恒

$$\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} C_p T) = \nabla \cdot (k_e \nabla T) - \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{u})$$
(3)  
湍动能方程

 $\nabla \cdot (\rho u k) = \nabla \cdot (a_k \mu_e \nabla k) + G_k + G_b - \rho \varepsilon$ (4) 湍动能消耗率方程

$$\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{\varepsilon}) = \nabla \cdot (a_{s}\boldsymbol{\mu}_{e}\nabla\boldsymbol{\varepsilon}) + C_{1s}G_{k}\frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{k} + C_{3s}G_{b}\frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{k} - C_{2s}\rho\frac{\boldsymbol{\varepsilon}^{2}}{k} - R_{s}$$

$$(5)$$

式中 $\mu_e$ 为有效黏度, $k_e$ 为有效导热系数, $G_k$ 为由 层流速度梯度导致的湍动能产生项, $G_b$ 为由浮升力导 致的湍动能产生项, $a_k$ 和 $a_e$ 为湍流普朗特数, $C_{1e}$ = 1.42, $C_{2e}$ =1.68, $C_{3e}$ =0.0845。

#### 4.3 数值计算方法

采用结构化网格划分,并对近璧面区域的网格 进行加密,保证无量纲距离y<sup>\*</sup> ≤ 1。控制方程采用有 限容积法进行离散,其中对流项和扩散项的离散分 别采用了二阶迎风差分格式和二阶中心差分格式。 选用了 SIMPLEC 算法处理压力和速度的耦合,隐式 的 Gauss-Seidel 方法对控制方程进行迭代,求解器选 用双精度分离求解器。在计算之前,首先对网格进 行了网格无关性验证,确保计算的结果与网格划分 无关。

#### 4.4 计算验证

在固液边壁附近采用非均匀网格可以较好地求 解 RP-3航空煤油边界层,如图 5(b)所示。为了验证网 格无关性,采用 4 组 网格对气温度 473K,压力 5 MPa, 质量流量 3g/s,热流密度为 300kW/m<sup>2</sup>,400kW/m<sup>2</sup>和 500kW/m<sup>2</sup>情况下 RP-3航空煤油的圆管对流传热进 行了数值模拟,模型结果如表 3 所示。对比发现,计 算得到的流体平均流速和平均温度的最大相对误差 仅为 0.24%,因此,综合考虑计算速度和计算准确度 后选取网格数为 12600 的网格进行计算。

Table 3 Mesh dependence test

| Grid number | Average<br>temperature/K | Average<br>velocity/(m/s) | Maximum<br>error/% |
|-------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|
| 8600        | 535.642                  | 2.080                     | 0.24               |
| 12600       | 535.651                  | 2.085                     | -                  |
| 151200      | 535.650                  | 2.082                     | 0.14               |
| 181440      | 535.648                  | 2.087                     | 0.10               |

为了验证所构建的替代燃料在 CFD 计算中的有效性和实用性,本文首先模拟了进气温度 473K,压力 5MPa,质量流量 3g/s,热流密度为 300kW/m<sup>2</sup>下的圆管 流动传热。数值模拟中 RP-3 航空煤油的物性参数 的云图如图 6 所示。可以看出,沿着管道流动方向, 流体逐渐加热,温度升高,导致密度、黏度下降,比热

容升高。由于管道的中部为加热段,导致流体在加 热段流动时的物性参数出现了较大的变化,最后在 绝热段物性参数又趋近于一致。采用本文所构建的 替代燃料能较好地反映出航空煤油在管道中的物性 参数的变化情况。

然后,计算了进气温度473K,压力5MPa,质量流量3g/s,热流密度为300kW/m<sup>2</sup>,400kW/m<sup>2</sup>和500kW/m<sup>2</sup>下,航空煤油垂直流下和上升流动时,圆管外壁温度分布曲线并与文献[23]的实验结果进行了对比,结果如图7所示。图7横坐标为沿x方向的距离与总长







Fig. 7 Distribution of outer wall temperature under different heat flux conditions

度L的比值。从图中可以看出,采用本文方法所构建 的物理替代燃料,在热流密度为300kW/m<sup>2</sup>的时候,模 拟值与实验值能较好地吻合。随着温度的升高,模 拟值与实验值的拟合精度有所下降。造成误差的原 因是由于替代燃料在该温度区域的匹配精度不高所 致。当热流密度为500kW/m<sup>2</sup>时,模拟值与实验值的 最大相对误差为6%。本文的模拟结果与实验值的趋 势基本一致,吻合程度较高。

## 5 结 论

基于官能基团和分子结构相似的替代燃料构建 方法,提出了摩尔分数分别为54.3%正十二烷、32.1% 的2,5-二甲基己烷和13.6%甲苯的基础燃料构成, 为RP-3航空煤油构建了能反映其物理性质的替代 燃料模型。该方法只需要匹配燃料的官能团含量, 从而使得替代燃料的构建的成本大大降低。

对所构建的替代燃料模型在亚临界到超临界条件下的物性参数进行了验证。结果表明本文的替代 燃料能较好地表征燃料的密度、黏度、比热容和导热 系数的变化趋势,但在预测燃料比热容上误差偏高, 仍需进一步的改进。

最后,将构建的 RP-3 航空煤油替代燃料应用于 数值模拟中。本文的模拟结果与实验值的趋势基本 一致,吻合程度较高,模拟值与实验值的最大相对误 差为6%。模拟值与实验值的良好吻合证明了所构建 的替代燃料在数值模拟的有效性和实用性,为进一 步研究燃料再生冷却过程传热性能奠定基础。

**致** 谢:感谢重庆市教委科学技术研究项目资助。

## 参考文献

- [1] 胡冬冬,刘晓明,张绍芳,等.2016年国外高超声速 飞行器技术发展综述[J].战术导弹技术,2017,(1): 28-33.
- [2] 章思龙,秦 江,周伟星,等.高超声速推进再生冷却研究综述[J].推进技术,2018,39(10):23-36.
  (ZHANG Si-long, QIN Jiang, ZHOU Wei-xing, et al. Review on Regenerative Cooling Technology of Hypersonic Propulsion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018,39(10):23-36.)
- [3] Pitz W J, Mueller C J. Recent Progress in the Development of Diesel Surrogate Fuels [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(3): 330-350.
- [4] Huber M, Smith B, Ott L, et al. Surrogate Mixture Model for the Thermophysical Properties of Synthetic Aviation

Fuel S-8: Explicit Application of the Advanced Distillation Curve [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(2): 1104-1114.

- [5] Bruno T J, Huber M L. Evaluation of the Physicochemical Authenticity of Aviation Kerosene Surrogate Mixtures.
   Part 2: Analysis and Prediction of Thermophysical Properties
   [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(8): 4277-4284.
- [6] Slavinskaya N A, Zizin A, Aigner M. On Model Design of a Surrogate Fuel Formulation [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(11).
- [7] 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 Xue-jun, YU Gang. Analysis of Thermophysical Properties of Daqing RP-3 Aviation Kerosene [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 187-192.)
- [8] Zhong F, Fan X, Yu G, et al. Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3): 543-550.
- [9] 裴鑫岩,侯凌云,莫崇康,等.航空煤油替代燃料模型热物性[J].航空动力学报,2015,30(9):2122-2128.
- [10] 程泽源,朱剑琴,金 钊.吸热型碳氢燃料 RP-3 替代 模型研究[J]. 航空动力学报,2016,31(2):391-398.
- [11] 曾 文,刘 靖,张治博,等.一种新的 RP-3 航空煤 油模拟替代燃料[J]. 航空动力学报,2017,32(10): 2314-2320.
- Yu J, Wang Z, Zhuo X, et al. Surrogate Definition and Chemical Kinetic Modeling for Two Different Jet Aviation Fuels[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(2): 1375-1382.
- Yu J, Ju Y, Gou X. Surrogate Fuel Formulation for Oxygenated and Hydrocarbon Fuels by Using the Molecular Structures and Functional Groups[J]. Fuel, 2016, 166 (2): 211-218.
- [14] 徐佳琪,郭俊江,刘爱科,等. RP-3 替代燃料自点火燃烧机理构建及动力学模拟[J].物理化学学报, 2015,31(4):643-652.
- [15] Benson S W, Buss J H. Additivity Rules for the Estimation of Molecular Properties. Thermodynamic Properties
  [J]. The Journal of Chemical Physics, 1958, 29(3): 546-572.
- [16] Won S H, Dooley S, Veloo P S, et al. The Combustion Properties of 2, 6, 10-Trimethyl Dodecane and a Chemical Functional Group Analysis [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(3): 826-834.
- [17] Wang N, Zhou J, Pan Y, et al. Determination of Critical Properties of Endothermic Hydrocarbon Fuel RP-3 Based

on Flow Visualization [J]. International Journal of Thermophysics, 2014, 35(1): 13-18.

- [18] Huber M L. NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database[DB]. USA: US Department of Commerce, 2007.
- [19] Deng H, Zhang C, Xu G, et al. Density Measurements of Endothermic Hydrocarbon Fuel at Sub-and Supercritical Conditions [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 56(6): 2980-2986.
- [20] Deng H, Zhang C, Xu G, et al. Viscosity Measurements of Endothermic Hydrocarbon Fuel from (298 to 788) K under Supercritical Pressure Conditions [J]. Journal of

Chemical & Engineering Data, 2012, 57(2): 358-365.

- [21] Deng H, Zhu K, Xu G, et al. Isobaric Specific Heat Capacity Measurement for Kerosene RP-3 in the Near-Critical and Supercritical Regions [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 57(2): 263-268.
- [22] Xu G, Jia Z, Wen J, et al. Thermal-Conductivity Measurements of Aviation Kerosene RP-3 from (285 to 513)
  K at Sub-and Supercritical Pressures [J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(4): 620-632.
- [23] Ren Y Z, Zhu J Q, Deng H W. Numerical Study of Heat Transfer of RP-3 at Supercritical Pressure [J]. Advanced Materials Research, 2013, 663(2): 470-476.

(编辑:梅 瑛)