

吸热型碳氢燃料 RP-3 替代模型研究

程泽源, 朱剑琴, 金 钊

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 利用广义对应态法则对吸热型碳氢燃料 RP-3 的 5 种替代模型的密度、黏度、导热系数和比定压热容进行了数值计算. 计算温度变化范围为 300~800 K, 压力变化范围为 3~6 MPa. 结果表明: 不同替代模型均能定性重现 RP-3 在拟临界温度附近的物性急剧变化; 由 53% 正十一烷, 18% 正丁基环己烷, 29% 1,3,5-三甲基苯组成的 3 组分替代模型在预测 RP-3 物性上表现最优, 相对于实验数据, 300~700 K 内密度相对误差均小于 0.08; 替代模型的相对分子质量越大, 预测的拟临界温度越高, 对拟临界温度下物性值的影响无显著规律.

关 键 词: 航空煤油 RP-3; 替代模型; 广义对应态法则; 物性; 拟临界温度

中图分类号: V511⁺.1 **文献标志码:** A

Study on surrogate model of endothermic hydrocarbon fuel RP-3

CHENG Ze-yuan, ZHU Jian-qin, JIN Zhao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Numerical computations of density, viscosity, thermal conductivity and specific heat of five kinds of surrogate models for endothermic hydrocarbon fuel RP-3 by extended corresponding state law were conducted. In the computation, the temperature and pressure ranged from 300 K to 800 K and from 3 MPa to 6 MPa, respectively. Results indicated that all surrogate models could qualitatively reproduce sharp variation of physical property of RP-3 in the vicinity of pseudo-critical temperature; a three-species surrogate model consisting of mole of 53% *n*-undecane, 18% *n*-butylcyclohexane, 29% 1, 3, 5-trimethyl-benzene performed best among five physical surrogate models in predicting physical property of RP-3. The relative errors of this surrogate model for density were less than 0.08 at the temperature from 300 K to 700 K. Pseudo-critical temperature increased with growing relative molecular mass of surrogate models, showing that there was no obvious relationship between thermal properties under pseudo-critical temperature and relative molecular mass of surrogate models.

Key words: aviation kerosene RP-3; surrogate models;
extended-corresponding-state law;
physical property; pseudo-critical temperature

超燃冲压发动机技术是发展高超声速飞行器的关键, 自 20 世纪 50 年代中期提出后就成为各

国的研究热点^[1]. 气动加热使超燃冲压发动机面临着严峻的热管理问题, 需发展先进的冷却技术

对其进行热防护. 随着研究的深入,以吸热型碳氢燃料为冷却剂的再生冷却技术逐渐在航空航天领域得到重视^[2]. 在再生冷却过程中,吸热型碳氢燃料在超临界压力下不经过相变可直接由液态转变为超临界态,在拟临界温度附近伴随着巨大的物性变化,传统的单一状态方程无法准确描述其物性变化,必须获得其实际的 p - V - T 关系. 大量实验表明,当接近各自的临界点时,所有流体都表现相似的性质,那么可用相对于临界参数的对比值导出普遍适用的实际气体状态方程^[3],这给复杂碳氢燃料的物性研究带来很大方便.

碳氢燃料的成分极为复杂,由成百上千种组分组成,包括链烷烃、环烷烃、烯烃以及芳香烃等,在实际研究中,不可能对每种组分都进行研究分析,为研究方便,提出了替代燃料^[4]的概念,即采用少数典型碳氢化合物组成混合物来代替真实燃料模拟其性质.

国内外学者对替代燃料做出了大量的研究, Schulz^[5]提出了航空煤油 JP-8 的 12 组分替代燃料, Violi 等^[6]针对 JP-8 提出 6 组分的替代燃料, Dagaut^[7]提出了法国航空煤油的 3 组分替代模型. 范学军等^[8]针对国产航空煤油 RP-3 提出过两种替代燃料,分别为 3 组分替代燃料和 10 组分替代燃料^[9],采用对应态法则计算了替代燃料的热物性如密度、黏度、导热系数和比定压热容,并以 Supertrapp 软件^[10]的计算结果作为对比数据,认为提出的 3 组分替代模型和 10 组分替代燃料均能够较好地预测真实燃料的物性变化,其中 10 组分替代模型在预测比定压热容特性上更准确.

国内外对 RP-3 的替代模型的选择和对比研究较少,大多数是采用范学军提出的 10 组分替代燃料^[9]. 本文利用广义对应态法则开发计算热力学特性和输运特性的数值模拟方法,以典型航空煤油 RP-3 的热物性实验数据为对比数据,对各类替代模型进行热物性数值计算,评估各替代模型的预测性能. 在此基础上,提出利用平均相对分子质量快速评价替代模型预测拟临界温度性能的方法.

1 物性计算方法

1.1 广义对应态法则

对应态原理可表述为:对所有物质来说,其性质经过恰当的无量纲化后,都对无量纲变量(即对比参数)遵从普遍的变化规律. 最早的对对应态原理

(CSP)由文献[11]中 van der Waals 提出,其数学形式为

$$f(p_r, T_r, u_r) = 0 \tag{1}$$

式中只适应于简单弱极性分子,此时不同物质的临界压缩因子近似相等. 通常已知参考物质的状态方程即 p - V - T 关系,则可根据上式求出待求物质的状态方程. 碳氢燃料组分复杂,不同种类的分子结构有很大差别,传统的两参数 CSP 无法描述与参考物质的对应关系. 考虑到复杂分子存在的强极性和缔合性对性质的影响,3 参数 CSP 或多参数 CSP 在传统的两参数 CSP 基础上增加了 1 个或多个参数,如偏心因子、临界压缩因子等. 数学上,多参数 CSP^[12]可表示为

$$T_r = T_m / f_m \tag{2}$$

$$p_r = p_m h_m / f_m \tag{3}$$

$$\rho_r = \rho_m h_m \tag{4}$$

式中下标 r 代表参考物质,下标 m 代表待求物质. 变化系数可表示为

$$f_i = f(T_i^c, T_m, T_r^c, w_i, w_r) \tag{5}$$

$$h_i = h(T_i^c, T_m, \rho_i^c, \rho_r^c, Z_i^c, Z_r^c, \omega_i, \omega_r) \tag{6}$$

式中下标 i 代表碳氢燃料的各组分,下标 m 代表碳氢燃料,上标 c 代表临界值. Z 为压缩因子, ω 为偏心因子,代表实际流体的实验蒸汽压力-温度函数与将其作为简单流体(球形对称小分子物质)的偏差.

1.2 密 度

广义对应态法则要求待求物质与参考物质是热力学上相似的,参考物质的物性准确度在一定程度上决定着待求物质物性的准确度. 这就要求参考物质的热物性数据经过长期的检验是可靠的,其状态方程在原理上是明确统一的. 丙烷作为一种简单碳氢化合物,前人对其性质进行了长期的研究获得可靠的数据,并提出了不同的状态方程描述其 p - V - T 关系. 本文选用丙烷 32 参数 MBWR(modified Benedict-Webb-Rubin)状态方程^[13]作为如下所示:

$$p_0 = \sum_{n=1}^9 a_n(T_0) \rho_0^n + \sum_{n=10}^{15} a_n(T_0) \rho_0^{2n-17} e^{-\gamma \rho_0^2} \tag{7}$$

根据式(1)~式(7)即可求出待求物质的密度,具体算法见参考文献[14].

1.3 黏度和导热系数

采用 TRAPP(transport properties predic-

tion)方法^[15]来计算纯流体和混合物的黏度和导热系数,它最初由 Ely 和 Hanely 提出,采用甲烷作为参考物质估算低压区的导热系数和黏度,而后由学者将其扩展至其他参考物质,并应用到极性物质。

在 TRAPP 方法中,低压混合物的剩余黏度与参考物质丙烷的剩余黏度联系起来,并对无相互作用的硬球模型假设进行修正

$$\eta_m - \eta_m^0 = F_{\eta_m} [\eta^r - \eta^{r_0}] + \Delta\eta^{\text{ensskog}}$$

(8)

所谓剩余黏度,就是指一定温度压力下的黏度与该温度下的低压黏度之差. 式中 r 代表参考物质为丙烷,上标 0 代表低压, η_m 是混合物的真实黏度. F_{η_m} 为高压条件下参考物质和混合物的剩余黏度的相似关系,待求混合物的低压黏度可用低压下混合物黏度求解对应态方法 Lucas 法^[16]来求解. $\Delta\eta^{\text{ensskog}}$ 为基于硬球模型假设的修正因子.

类似于式(8)的形式,待求物质和参考物质(丙烷)的过量导热系数的关系^[17]为

$$\lambda - \lambda_0 = F_{\lambda} X_{\lambda} (\lambda^r - \lambda^{r_0})$$

(9)

式中 $F_{\lambda} X_{\lambda}$ 代表待求物质和参考物质的过量导热系数的相似关系.

1.4 比定压热容

某状态下的实际物质的热力学函数可表示为偏差函数与相同温度、参考压力 p_0 下理想气体所对应的热力学函数之和

$$B(T,V) = B^0(T,V^0) + \phi_B(T,V)$$

(10)

式中 B 代表某状态下实际气体的某热力学函数, B^0 代表在 T, p^0, V^0 下的理想气体所对应的热力学函数.

根据亥姆霍兹函数的偏离函数与 p - V - T 状态参数的关系以及基本的热力学关系,比定容热容的偏差函数^[18]为

$$\phi_{c_V}(T,V) = T \int_{\infty}^V \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_V dV$$

(11)

式中 $\phi_{c_V}(T,V)$ 为 c_V 的偏差函数(J/(kg · K)); T 是绝对温度(K); p 为压力(Pa); V 为比体积(m³/kg).

式(11)中导数的处理方法是对式(7)求导,利用理想气体比定压热容公式可求出实际物质的比定容热容,再通过比定压热容和比定容热容的转换关系获得比定压热容.

2 替代模型

2.1 RP-3 的具体组分

本文所研究的吸热型碳氢燃料为煤油型 RP-3 喷气燃料,采用质谱色谱联用仪对其分析,结果表明 RP-3 的成分超过 300 种,其中链烷烃占 52.44%,烯烃占 7.64%,苯类化合物占 18.53%,环烷烃占 15.54%,萘类化合物占 4.39%,还有其他化合物约占 1.46%,具体成分见参考文献[19].

2.2 RP-3 替代模型的选择

替代模型的选择是一个繁杂的过程,文献[20]提出了采用类相对分子质量法来选择替代模型,其主要分为 3 步:归类、相对分子质量平均和挑选. 按族类特性整合得到 RP-3 的主要成分有 45 种,将这 45 种主要成分按照类别分子结构归类,得到结果如表 1 所示.

表 1 RP-3 主要成分
Table 1 Main components of RP-3

名称	摩尔分数/%	相对分子质量
链烷烃	50.52	161.12
环烷烃	15.65	146.72
芳香烃	27.03	125.44
烯烃	5.32	140.35
其他	1.47	

从表 1 可见,构成 RP-3 的最主要组分是总量到达 90% 以上的链烷烃、环烷烃以及芳香烃,从这 3 类中分别挑选出一种碳氢化合物使其具有相对分子质量代表性,即挑选的化合物的相对分子质量和此类组分的平均相对分子质量相同,最终得到 3 组分替代模型,如表 2 所示.

表 2 RP-3 替代燃料
Table 2 Surrogate fuel of RP-3

组分名称	摩尔分数/%
正十一烷	53
正丁基环己烷	18
1,3,5-三甲基苯	29

鉴于作者能力,选取了所有作者获得的国内外学者提出的多组分型替代模型进行对比研究分析,并添加上述方法获得的 3 组分替代模型,将这些替代模型汇总如表 3 所示.

表 3 航空煤油的 5 种典型简化替代模型
Table 3 Five kinds of surrogate models for aviation kerosene

组分数	种类及含量	平均相对分子质量
3 组分 ^[20] (THC1)	53% 正十一烷, 18% 正丁基环己烷, 29% 1,3,5-三甲苯	143.165 8
3 组分 ^[8] (THC2)	49% 正十烷, 44% 1,3,5-三甲基环己烷, 7% 正丙基苯	133.679 7
4 组分 ^[21] (FC)	19.1% 正十烷, 36.5% 正十二烷, 14.5% 甲基环己烷, 29.9% 正丁基苯	143.719 1
6 组分 ^[6] (SC)	30% 正十二烷, 20% 正十四烷, 10% 标准异辛烷, 20% 甲基环己烷, 15% 间二甲苯, 5% 四氢化萘	144.375 8
10 组分 ^[9] (TEC)	6% 正辛烷, 10% 正十烷, 20% 正十二烷, 8% 正十三烷, 10% 正十四烷, 10% 正十六烷, 20% 甲基环己烷, 8% 反 1,3-二甲基环戊烷, 5% 丙基苯, 3% 1-甲基萘	150.151 3

3 结果与讨论

热物性测量实验在北京航空航天大学超临界压力碳氢燃料多功能流动与换热实验台上进行,具体实验系统介绍见参考文献[22].

热物性测量实验包括比定压热容测量、密度测量和黏度测量,具体测量方法和实验数据分别见参考文献[23-25].

3.1 密 度

计算得到的航空煤油替代模型在不同压力下的密度和实验结果(Exp.)的对比如图 1 所示. 图中 THC1,THC2,FC,SC,TEC 分别代表表 3 中的 5 种替代模型,本文以后的分析中都采用这样的简称. 从图 1 中可以看出,不同替代模型均能预测 RP-3 的密度随着温度和压力变化的大致趋势.

不同模型在低温区下对密度的预测表现的很好而且很一致,主要差别体现在对拟临界温度的预测上. 在 $p=3\text{ MPa}$ 下,THC1,FC 和 SC 对实验密度值的拟临界温度位置预测较准,THC2 和 TEC 的计算值和实验值偏差较大,分别过早和过晚预测了拟临界温度位置. 不同模型对拟临界温

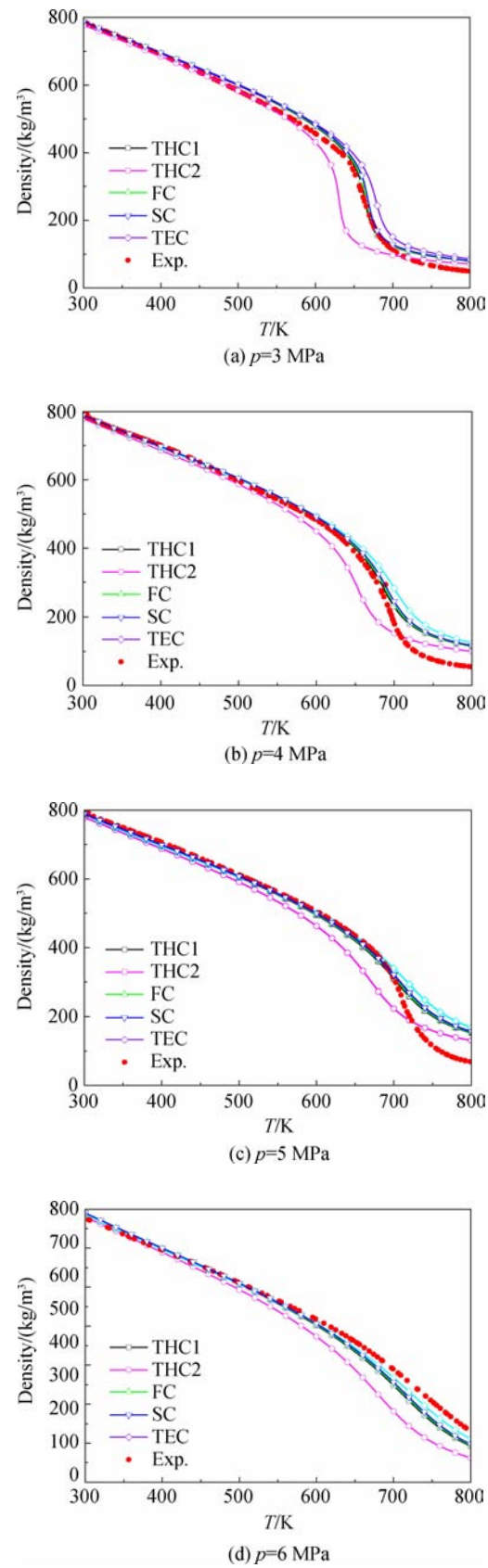


图 1 航空煤油替代模型密度计算值与实验值对比
Fig. 1 Comparison of calculation data and experiment data of density for aviation kerosene surrogate models

度以上的高温区的预测均不能得到较好的结果,均高估了高温区的密度,这种偏差随着压力的升高有所降低,这可能是由于实验中 RP-3 在高温下发生裂解反应,由大分子物质生成很多小分子,从而导致密度值计算偏高;对比各个压力下的曲线,可认为 THC1 在预测密度上表现最优。

表 3 显示,不同替代模型的平均相对分子质量均有所区别,其中 THC1,FC 和 SC 替代模型的平均相对分子质量在 143 左右,而 THC2 的平均相对分子质量在 133 左右,TEC 的平均相对分子质量在 150 左右,通过对参考文献[18]中 RP-3 成分分析得到其平均相对分子质量约为 145.5,替代模型中 THC1,FC 和 SC 与 RP-3 的分析平均相对分子质量最接近,THC2 和 TEC 的平均相对分子质量与分析值有一定差距,结合不同替代模型对密度的预测准确度可以认为:平均相对分子质量影响着替代模型对密度的预测准确度.相对分子质量对物性预测的影响不仅仅体现在密度上,后面的分析中会体现在其他物性参数上。

计算未考虑高温区的裂解反应,图 2 给出 300~700 K 内不同压力下 THC1 模型计算结果与实验结果的偏差(V_{density} ,此量已进行无量纲化)随温度的变化曲线.可以看出,在 300~700 K 温度范围内,不同压力下的密度计算误差基本在 8% 以内,具有较高的吻合度。

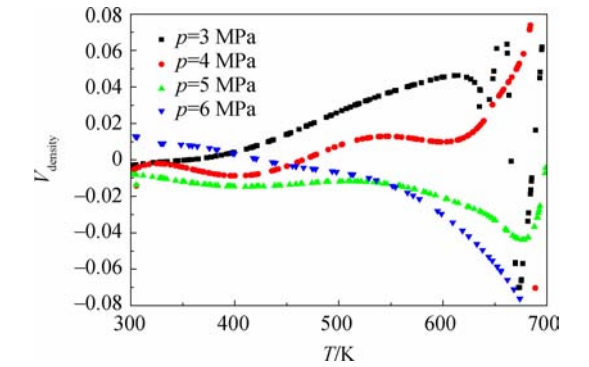


图 2 不同压力下密度计算偏差随温度的变化
Fig. 2 Deviation of density variation with temperature under different pressures

3.2 黏 度

图 3 是计算得到的航空煤油替代模型在不同压力下的黏度和实验结果的对比.从图 3 中看出,不论压力多大,不同替代模型对于低温区的黏度预测不如拟临界区的预测精度高;随着压力的升高,不同替代模型对于拟临界区的预测能力逐渐

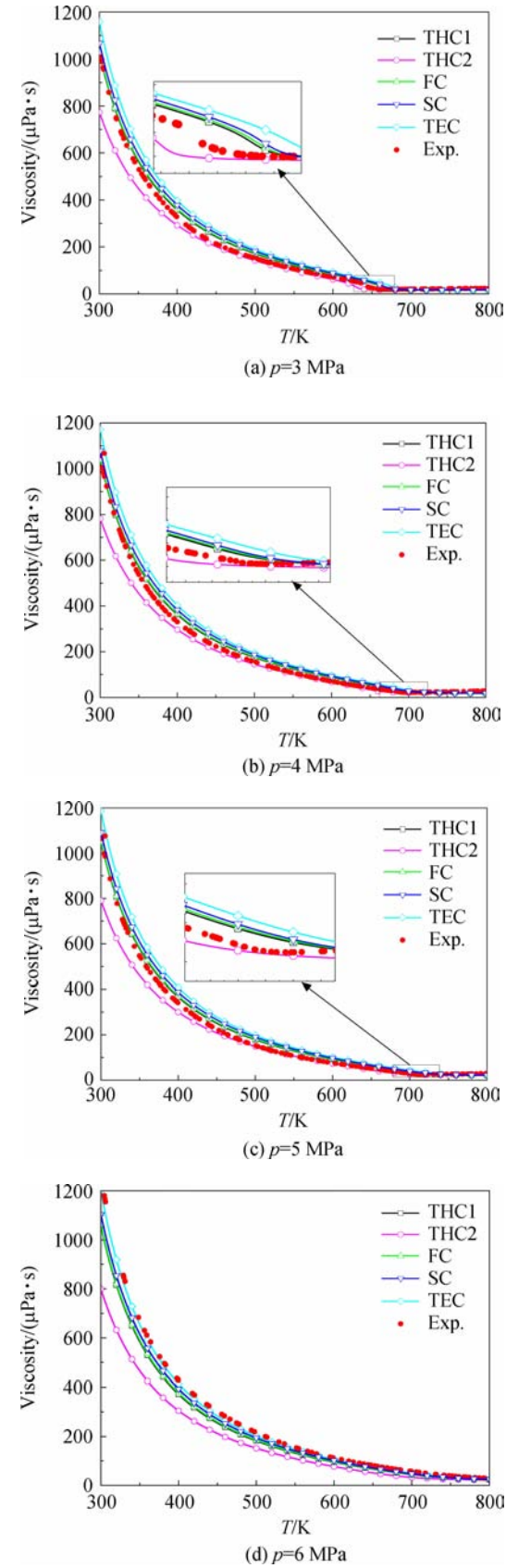


图 3 航空煤油替代模型黏度计算值与实验值对比
Fig. 3 Comparison of calculation data and experiment data of viscosity for aviation kerosene surrogate models

增强,而对于低温区的预测精度则没什么变化.

THC1,FC,SC 和 TEC 替代模型对拟临界温度位置预测过晚,而 THC2 替代模型对拟临界温度的位置预测过早,这可以采用平均相对分子质量来解释,THC1,FC,SC 和 TEC 替代模型的平均相对分子质量均大于 THC2 替代模型的平均相对分子质量,使这两大类模型对 RP-3 的拟临界温度位置的预测方向产生相反的结果,这给下一步算法改进提供了一个方向,即寻找平均相对分子质量介于 THC2 和 THC1 之间的替代模型.

在拟临界温度以下的区域,THC2 和 TEC 模型的黏度计算结果和实验结果差别较大,相比之下,THC1,FC 和 SC 替代模型的计算差异比较小.对不同航空煤油替代模型对黏度的预测均满足工程需要,但比较来言,THC1 替代模型对黏度的预测最准确.

3.3 比定压热容

图 4 显示的是不同压力下航空煤油替代模型比定压热容的计算值与实验值对比情况.从图 4 中可以看出,不同替代模型的计算结果均能预测出 RP-3 的比定压热容随着温度的变化规律;不同替代模型的预测能力随着压力的变化而各有变化,各类替代模型均低估了比定压热容的大小.

在 $p=3\text{ MPa}$ 时,不同替代模型的比定压热容计算曲线的差异随着温度的升高而增大,当温度升高至拟临界温度附近时,这种差异变得最明显;THC2 模型过早地预测了拟临界温度的位置,随着替代模型平均相对分子质量的增加,替代模型对拟临界温度的预测提前度逐渐减小,各类替代模型中 TEC 替代模型对拟临界温度位置的把握最准确,这和 ZHONG Fengquan 等^[9]得到的结论是一致的;随着替代模型平均相对分子质量的增加,拟临界温度下的比定压热容计算值逐渐减小,没有替代模型能同时对拟临界温度位置和拟临界温度下的比定压热容大小预测做到最优;拟临界温度之后的高温区内 RP-3 的比定压热容随温度的变化斜率有再次增大的趋势,没有替代模型能捕捉到这种趋势,这可能是因为实验中 RP-3 发生裂解反应,引起组分和能量的变化.

当 $p=4\text{ MPa}$ 时,替代模型计算得到的“圆弧形”峰值和 RP-3 实验结果的“尖点”不同;不同替代模型预测得到的拟临界温度的差异变小,并且拟临界温度下的比定压热容大小差异基本消失.

当 $p=5\text{ MPa}$ 时,RP-3 实验结果得到的比定

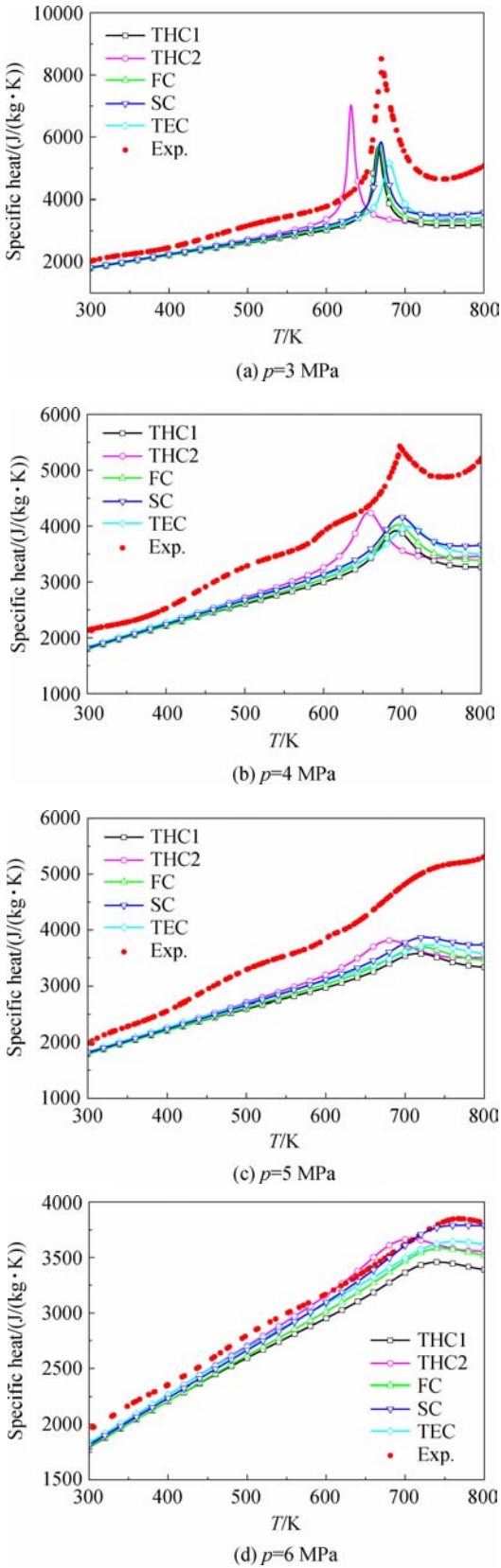


图 4 航空煤油替代模型比定压热容计算值与实验值对比
Fig. 4 Comparison of calculation data and experiment data of specific heat for aviation kerosene surrogate models

压热容变化峰值现象基本消失,但是替代模型的计算结果仍表现出一定程度上的峰值现象。

压力升至 6 MPa 时,整个温度范围内替代模型对比定压热容的预测准确度大大提高;替代模型对拟临界温度位置的预测情况符合类平均相对分子质量理论,但对拟临界温度下的比定压热容大小预测能力与平均相对分子质量的关系变的不明显,此时 SC 替代模型对拟临界温度下的比定压热容大小预测能力最强。

相对于密度、黏度,替代模型对比定压热容的预测能力明显减弱,这主要表现在 3 个方面:对拟临界温度位置的预测不准确;对拟临界温度对应的比定压热容预测不准确;对整个温度范围内的比定压热容大小程度预测不准确,说明偏差函数法对计算混合物的比定压热容上仍需要进一步改进,使其能同时满足对低压和高压混合物比定压热容计算的要求。

3.4 导热系数

由于缺乏实验数据,图 5 给出了 3 MPa 航空煤油不同替代模型导热系数计算值的对比情况。从图 5 中明显的看出,不同替代模型在表现导热系数和温度的变化关系上得到相似的结果:在拟临界温度之前导热系数迅速下降,直到温度达到拟临界温度,导热系数达到最小值;当温度超过拟临界温度之后,导热系数开始回升。

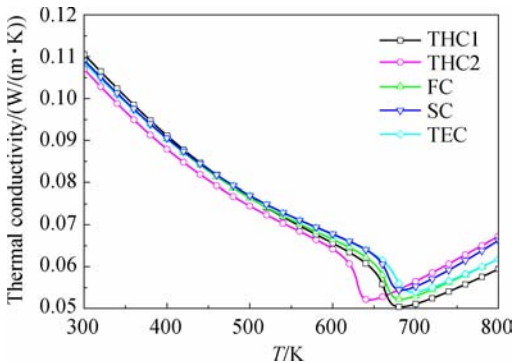


图 5 航空煤油替代模型导热系数计算值对比
($p=3\text{ MPa}$)

Fig. 5 Comparison of calculation data of thermal conductivity for aviation kerosene ($p=3\text{ MPa}$)

拟临界温度之前的低温区内不同替代模型对导热系数的预测差别很小,而拟临界温度之后的温度范围内不同替代模型的预测能力差距较大,尤其是对拟临界温度位置的预测上. 替代模型计算得到的拟临界温度和替代模型的平均相对分子

质量成正相关,即相对分子质量越大,则拟临界温度越高。

4 结 论

本文采用广义对应态法则对不同替代模型的热物性进行了数值模拟,并根据 RP-3 热物性实验数据评估不同替代模型的预测性能,确定可应用于数值计算的 RP-3 最优替代模型. 主要的结论如下所示:

1) 广义对应态法则应用于不同替代模型均能预测出热物性如密度、黏度、导热系数和比定压热容的变化趋势。

2) 相对于比定压热容的预测效果,不同替代模型对密度和黏性的预测效果更加准确;偏差函数法在预测高压混合物的比定压热容上仍需进一步的改进。

3) 相比于 THC2, FC, SC 和 TEC 模型, THC1 模型在预测 RP-3 密度和黏度上表现最优。

4) 在预测密度、黏度和比定压热容上,平均相对分子质量影响着拟临界温度的大小,平均相对分子质量越大,计算所得的拟临界温度越高,而拟临界温度下对应的物性值和平均相对分子质量无明确关系. 下一步从平均相对分子质量入手,寻找 RP-3 的更合适的替代模型。

参考文献:

[1] Curran E T. Scramjet engines: the first forty years[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(6): 1138-1148.

[2] Huang H, Spadaccini L J, Sobel D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 284-293.

[3] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[4] Edwards T, Maurice L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(2): 461-466.

[5] Schulz W D. Oxidation products of a surrogate JP-8 fuel [J]. Preprints-American Chemical Society: Division of Petroleum Chemistry, 1992, 37(2): 383-392.

[6] Violi A, Yan S, Eddings E G, et al. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 2002, 174(11/12): 399-417.

[7] Dagaut P. On the kinetics of hydrocarbons oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2002, 4(11): 2079-2094.

[8] 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 RP23 aviation kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 187-192. (in Chinese)

[9] ZHONG Fengquan, FAN Xuejun, YU Gang, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3): 543-550.

[10] Huber M L. Thermophysical properties of hydrocarbon mixtures database; version 3. 1[R]. Gaithersburg, US: National Institute of Standards and Technology, 2003.

[11] Leland T W, Chappellear P S. The corresponding states principle; a review of current theory and practice[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1968, 60(7): 15-43.

[12] Poling B E, Prausnitz J M, John Paul O C, et al. The properties of gases and liquids[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.

[13] Younglove B A, Ely J F. Thermophysical properties of fluids; II methane, ethane, propane, isobutane, and normal butane[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1987, 16(4): 577-798.

[14] 任雨舟. 超临界压力下碳氢燃料流动不稳定性的数值研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
REN Yuzhou. A numerical study of flow instabilities in hydrocarbon fuels at supercritical pressure[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[15] Ely J F, Hanley H J M. Prediction of transport properties; I viscosity of fluids and mixtures[J]. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 1981, 20(4): 323-332.

[16] Lucas K. Phase equilibria and fluid properties in the chemical industry[M]. Frankfurt: Dechema, 1980.

[17] Ely J F, Hanley H J M. Prediction of transport properties; II thermal conductivity of pure fluids and mixtures[J]. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 1983, 22(1): 90-97.

[18] 王跃武, 陈建新, 胡芃, 等. HFC-227ea 的焓、熵、比热容计算[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(1): 89-93.
WANG Yuewu, CHEN Jianxin, HU Fan, et al. Calculation of enthalpy, entropy and specific heat capacity of HFC-227ea[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(1): 89-93. (in Chinese)

[19] 张春本. 超临界压力下碳氢燃料的流动与换热特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
ZHANG Chunben. Investigation of flow and heat transfer characteristics of hydrocarbon fuel at supercritical pressures[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

[20] 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: 470-476.

[21] Dagaut P, Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene; a review of experimental and kinetic modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(1): 48-92.

[22] 张春本, 邓宏武, 徐国强, 等. 超临界压力下航空煤油 RP-3 焓值的测量及换热研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 331-335.
ZHANG Chunben, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Enthalpy measurement and heat transfer investigation of RP-3 kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 331-335. (in Chinese)

[23] Deng H W, Zhu K, Xu G Q, et al. Isobaric specific heat capacity measurement for kerosene RP-3 in the near-critical and supercritical regions[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56(2): 263-268.

[24] Deng H W, Zhang C B, Xu G Q, et al. Density measurements of endothermic hydrocarbon fuel at sub-and supercritical conditions[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56(6): 2980-2986.

[25] Deng H W, Zhang C B, Xu G Q, et al. Viscosity measurements of endothermic hydrocarbon fuel from 298 to 788 K under supercritical pressure conditions [J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2012, 57(2): 358-365.

(编辑: 王碧琚)