

大庆 RP-3航空煤油热物性分析*

范学军, 俞 刚

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 针对广泛应用于超燃冲压发动机的吸热碳氢燃料, 简要介绍了用于模拟燃料热物理特性的替代燃料方法和广义对应状态法则。以大庆 RP-3航空煤油为例, 选择了一个由 49% (摩尔比) 正十烷, 44% 1, 3, 5-三甲基环己烷以及 7% 正丙基苯组成的替代煤油用来模拟 RP-3航空煤油进行热物理特性研究, 并采用广义对应状态法则对替代煤油热力学和输运特性进行了数值研究。在此基础上, 提出了预测超临界态流体通过音速喷管流量的新方法并得到了实验验证。

关键词: 航空煤油; 替代燃料⁺; 广义对应状态法则⁺; 超临界态⁺; 音速喷管流量计⁺

中图分类号: V511⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 02-0187-06

Analysis of thermophysical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene

FAN Xue-jun, YU Gang

(Inst. of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract To investigate the thermophysical properties of endothermic hydrocarbon fuels, the method of fuel surrogate and principle of the extended corresponding states (ECS) were reviewed briefly. A three-species surrogate consisting in mole of 49% n-decane, 44% 1, 3, 5-trimethylcyclohexane, and 7% n-propylbenzene was selected to simulate the thermophysical and transport properties of Daqing RP-3 aviation kerosene. A new method has been proposed to predict the mass flow rates of a supercritical fluid through a sonic nozzle. Agreement was obtained when comparing the calculated flow rates with measurements.

Key words Aviation kerosene; Surrogate fuel⁺; Extended corresponding states⁺; Supercritical state⁺; Sonic nozzle flowmeter⁺

1 引 言

在超燃冲压发动机的实际运行过程中, 吸热碳氢燃料通常被当作冷却剂去吸收气动加热和燃烧施于机体的热量, 其温度和状态随着飞行马赫数的不同而发生变化。与液态燃料相比, 在加热条件下, 燃料的热物理特性及其喷注、混合和燃烧等过程有很大的不同, 例如, 临界点附近燃料的热力学和输运特性存在非常规的特异变化; 超临界态的燃料可以不经相变直接过渡到气态, 在喷入燃烧室后没有气化和雾化过程, 与空气的混合过程得到加强等等。

碳氢燃料热物理性质的研究有相当难度, 主要是因为碳氢燃料的成份非常复杂。以航空煤油为例, 它

由上千种成份组成, 包括 C7-C16等多种链烃、环烷以及芳香族化合物, 其具体成份随产地、厂家和年份等而有所变化。为了保持研究对象的一致性和结果的可重复性, 研究中提出了碳氢燃料的替代混合物的概念, 即采用由少数典型的高纯度碳氢化合物组成的混合物去模拟真实的碳氢燃料的热物理特性及其喷射、混合和燃烧等一系列物理化学过程。这类混合物通常称作为替代燃料 (Surrogate fuel)^[1]。

由于燃料加热后的真实气体效应非常显著, 对温度、压力的变化非常敏感, 传统的针对液体与气态分别采用单一状态方程来处理的方法将不再适用, 需要采用对应状态法则^[2]。该法则基于不同流体的状态曲线存在一定的相似性这一实验事实, 通过采用临界

* 收稿日期: 2005-04-26 修订日期: 2005-08-29。

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (10232060)。

作者简介: 范学军 (1967-), 男, 博士, 副研究员, 研究领域为超声速燃烧, 气体动力学, 流动稳定性和流动控制等。

Email: xfan@imech.ac.cn

参数无量纲化状态变量,进而经过相似变换,从一种已知流体的状态求得未知流体的状态。但由于大部分流体并不严格遵循这一法则,因此发展了各种理论对该法则进行修正,统称为广义对应状态法则。目前,针对广义对应状态法则已开发出相当多的软件库,但有关对应状态法则的修正方法都不太一样,并且还在进一步的发展之中。本文的研究基础是美国国家技术与标准局(NIST)开发的 Supertrapp 的软件^[3],该软件包括了广义对应状态的一些主要子程序和—些常见碳氢化合物的数据库,用户可以根据自身的需求灵活调用或修改。

以大庆 RP-3 航空煤油为例,讨论替代煤油的选择,采用广义的对应状态法则计算替代燃料的热力学和输运特性。在此基础上,特别针对超临界态煤油,提出了测量超临界煤油流量的一种新方法,为吸热碳氢燃料的应用研究打开了方便之门。

2 替代燃料的选择

替代燃料成份的选择取决于所要模拟的燃料特性,—般分为物理替代和化学替代两种。物理替代燃料具有和真实燃料相似的密度、比热、声速、粘性和热传导系数等物理特性,可以用来模拟燃料的储存、加热及流动等物理过程;化学替代燃料具有和真实燃料相似的化学组成及相似的点火延迟、绝热火焰温度、层流火焰速度和化学反应速率等化学特性,可以用来模拟燃料的点火、燃烧以及裂解和结碳等化学过程。替代燃料的有效性和准确性的验证可以针对特定问题的特定过程来进行,—般可以通过几个有限的关键参数的模拟来达到,不需要面面俱到。以物理替代为例,由于只关心替代物的密度、比热和输运特性等,因此只需要匹配替代燃料和真实燃料的临界参数、蒸馏曲线以及挥发性(闪点)等标志性的物理参数。

有关替代燃料的研究,目前在国外已有一定的尝试。比如 Daniau 等直接采用正十二烷代替美国 JP-7 航空煤油进行裂解和热传导的研究^[4];比较典型的有法国科学院 Dagaut 针对法国 TRO 航空煤油的三组份替代模型^[5]和意大利 Viol 等针对美国 JP-8 航空

煤油的六组份替代模型^[6]开展的研究。目前认为比较好的模型是 Dagaut 的三组份模型,其成份见表 1。

Table 1 Dagaut three-component fuel surrogate

| Compound | N-decane | Propylcyclohexane | Propylbenzene |
|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Formula | C ₁₀ H ₂₂ | C ₉ H ₁₈ | C ₉ H ₁₂ |
| Mole fraction/% | 74 | 11 | 15 |

国产大庆 RP-3 航空煤油的色谱分析数据见表 2。从体积组成上看,大致包括 92.5% 饱和碳氢化合物、0.5% 不饱和碳氢化合物和 7% 左右的芳香族化合物。代表性的成份主要有饱和直链烃、饱和环烷烃和芳烃等三类。由于大庆 RP-3 航空煤油在密度和构成等方面的性质更接近法国煤油,本文参照法国 Dagaut 三组份模型,通过对 RP-3 煤油成份的分析,选择了一个由 49% (摩尔比) 正十烷, 44% 1,3,5-三甲苯环己烷以及 7% 正丙基苯组成的替代煤油来模拟 RP-3 航空煤油进行热物理特性研究。数值模拟的结果主要通过临界参数、低温时的密度以及高温时的流量等参数去验证。

3 广义对应状态法则

碳氢燃料在超燃冲压发动机中的工况涵盖液态、气态和超临界态等各种状态,对其状态的描述相当复杂。对于单组分流体,不同状态下的热力学特性可以通过一个单一的 BWR 状态方程^[7]来描述

$$p_r(T_r, \rho_r) = \sum_{n=1}^9 a_n(T_r) \rho_r^n + \sum_{n=10}^{15} a_n(T_r) \rho_r^{3n-17} e^{-a \rho_r^2} \quad (1)$$

这里 a 为常数,而系数 $a_n(T_0)$ 与温度有关,需要通过大量的实验结果去确定。对于碳氢燃料这样的组份数目巨大且不确定的混合物,实验标定的工作量相当巨大。相当一部分流体的行为表现出—定的相似性,当状态变量用临界参数(压强 P^c , 温度 T^c 和密度 ρ) 无量纲化以后,各种流体的状态曲线非常接近,可以通过—定的相似变换来处理。这样的方法即对应状态法则^[2]。

Table 2 Composition (mass basis) of China No 3 aviation kerosene

| Saturated hydrocarbons | | | | | Aromatic hydrocarbons | | | | Total | |
|------------------------|------------|----------|-----------|-------|-----------------------|------------------|-------------|-------------------------|-------|-----|
| Alkanes | Naphthenes | | | Total | Alkyl benzenes | Indan & Tetralin | Naphthalene | Naphthalene derivatives | Total | |
| | Monocyclic | Bicyclic | Tricyclic | | | | | | | |
| 52.2 | 33.8 | 6.0 | 0.1 | 92.1 | 5.1 | 1.3 | 0.6 | 0.9 | 7.9 | 100 |

采用对应状态法则, 可以从一个已知流体的物性出发, 通过一定的相似变换来得到一个未知流体的物性, 所需要的仅仅是确定参考流体的 BWR 方程中的相关系数。如果两种流体之间的相似性严格成立, 则变换关系为

$$\rho_r = h_x \rho T_r = T f_x \quad (2)$$

式中下标 r 表示参考流体的参数, 而

$$h_x = \rho_r / \rho; f_x = T^c / T_r^c \quad (3)$$

未知流体的状态可以通过相等两种流体的压缩因子得到

$$Z_x(T, \rho) = Z_r(T_r, \rho_r) \quad (4)$$

$$Z = p / \rho RT \quad (5)$$

式 (5) 中参考流体的压力可以通过方程 (1) 得到。但是, 只有很少一部分流体严格遵循对应状态法则, 其中主要是由一些球形粒子组成的流体。一般情况下, 分子的形状变化以及由此带来的偶极矩是对应状态法则中误差的主要来源, 因此变换系数 (3) 应作相应的修正。为此, 广义对应状态法则引入一个另外的参数, 称之为“偏心因子”(acentric factor)^[2]

$$\omega = -\log\left(\frac{P^s}{P^c}\right) - 1.0 \quad (6)$$

式中 P^s 是 $T/T_c = 0.7$ 时的蒸汽压。对于球形粒子, $\omega = 0$ 。一般情况下, 相应的变换系数 (3) 可以改进为

$$h_x = (\rho_r / \rho) \varphi(T/T_c, \rho/\rho_c, \omega) \\ f_x = (T^c / T_r^c) \theta(T/T_c, \rho/\rho_c, \omega) \quad (7)$$

式中 θ 和 φ 称为形状因子。如果假设形状因子与压强无关, 则一定温度下的形状因子可以通过该温度下两种流体的饱和液体密度与饱和蒸汽压的关系来求解^[8]

$$p_r^o(T f_x) = h_x p^o(T) f_x \\ \rho_r^o(T f_x) = h_x \rho^o(T) \quad (8)$$

两者组合得

$$p^o(T f_x) = [\rho^o(T f_x) / \rho^o(T)] p^o(T) f_x \quad (9)$$

其中, 两种流体在给定温度下的饱和液体密度与饱和

蒸汽压仍需要通过实验去确定。式 (7) ~ (9) 需要经过叠代求解, 得到不同温度下的形状因子 θ 和 φ 以及相应的变换系数 f_x, h_x 。

对于多组分混合物, 可以用一个假想的纯流体来近似, 其物性可以通过一定的混合法则从相应组分的对应法则求得^[9-10]。针对大庆 RP-3 航空煤油的三组份替代煤油, 本文采用丙烷作为参考流体, 通过叠代求解给定温度和压力下替代煤油的密度。图 1 给出了各种压力下利用广义对应状态法则得到的煤油密度随着温度的变化曲线。计算得到的临界温度与临界压力分别是 613K 与 0.24MPa 而通常煤油的临界值约为 630K 与 0.22MPa。图 1 中也标出了三个不同压力下大庆 RP-3 航空煤油的密度测量值。高温高压下, 煤油的密度通过测量一定体积内煤油的质量得到。冷煤油首先被置于一定体积的容器内, 容器上装有膨胀阀以保持一个恒定的压力。加热过程中煤油迅速膨胀, 在设定压力下, 多余的煤油通过膨胀阀排出容器外, 平衡后煤油的密度通过容器中剩余煤油的质量得到。表 3 给出了一定温度压力下密度测量值和计算值的比较, 可以看出两者吻合得较好。但实验发现对于临界区附近的煤油, 其密度对温度和压力的变化非常敏感, 而一般膨胀阀的压力设定误差较大, 上述方法有待进一步改进。

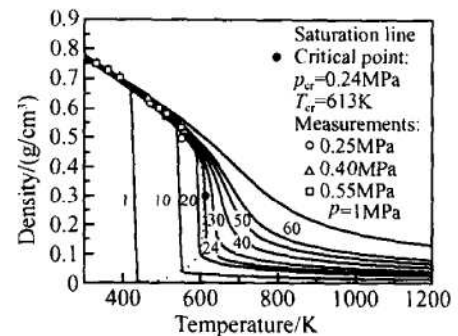


Fig 1 Density-temperature isobars of the three-species kerosene surrogate

Table 3 Comparison of density measurements and calculations g/cm³

| 0.25 MPa | | | 0.40 MPa | | | 0.55 MPa | | |
|----------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| T /K | Measurement | Calculation | T /K | Measurement | Calculation | T /K | Measurement | Calculation |
| 333 | 0.75 | 0.743 | 333 | 0.75 | 0.745 | 333 | 0.75 | 0.747 |
| 363 | 0.73 | 0.718 | 363 | 0.73 | 0.719 | 363 | 0.73 | 0.721 |
| 393 | 0.70 | 0.692 | 393 | 0.70 | 0.694 | 393 | 0.70 | 0.696 |
| 471 | 0.62 | 0.617 | 467 | 0.63 | 0.626 | 494 | 0.60 | 0.603 |
| 512 | 0.57 | 0.574 | 514 | 0.57 | 0.577 | 514 | 0.58 | 0.583 |
| 553 | 0.50 | 0.520 | 560 | 0.52 | 0.521 | 551 | 0.53 | 0.540 |

根据图 1, 利用临界压力等压线、临界温度等温线以及标志相变开始与结束的饱和曲线, 煤油的状态可以大致分成 4 个区, 即液态、气态、两相区和超临界态, 见图 2。通常情况下, 从液态过渡到气态需要经过相变, 即穿过图中的相变区, 但当温度和压力分别超过其临界温度和临界压力时, 相变曲线 (饱和曲线) 消失, 液体和气体之间的区别将不再存在。随着压力的不同超临界流体的密度可以整个涵盖液体和气体的密度, 但这一区域有别于一般的液态和气态而单独称之为超临界态。超临界区内不存在液态和气态的区别, 流体从超临界态过渡到与其相邻的液态和气态也不须经过任何相变。对于液体, 根据其压力是否大于临界压力而分成两类: 处于饱和曲线与临界等压线之间的为正常液体, 该区液体的压缩性很小, 在图 2 中难以清楚标识; 处于临界等压线以上的液体为过压液体, 占据液态区大部分区域。在等压加热过程中, 压力低于临界压力的正常液体不可避免地经历相变过程, 而过压液体则可以不经相变穿过超临界区直接进入气态区。类似地, 气体也可以根据其温度是否超过临界温度而分为正常气体与过热气体两类。从计算结果来看, 根据马赫数和煤油压力的不同, 在超燃冲压发动机的运行过程中, 煤油的实际状态处于气态、超临界态或更高的温度 (裂解) 区域内。

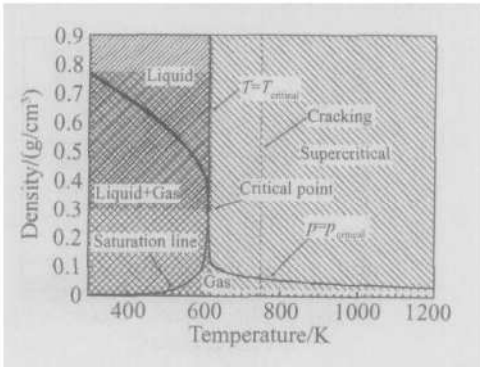


Fig 2 Phase diagram for kerosene surrogate

4 热力学特性

真实流体的热力学特性, 比如焓、熵等, 通常可以分成两部分, 一部分对应于相应温度下理想气体的理论值, 另一部分代表真实流体效应。从热力学关系可以得到焓值的关系式

$$h = h^{id} + h^{res} \quad (10)$$

$$h^{id} = \int_p^{id} dT \quad (11)$$

$$h^{res} = \int T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \, dV + RT(Z - 1) \quad (12)$$

混合物残留焓值 h^{res} 表达式中的 T, ρ 通过 ECS 法则 (7) 转化成参考流体的对应状态 T_r, ρ_r 并采用 BWR 状态方程 (1) 求解。类似地, 可以求得熵, 比热和声速等其它一系列热力学函数。图 3 给出了各种压力下煤油比热随着温度变化的计算曲线。由于比热和 γ^{-1} 成反比, 比热比 γ 和所选择的分子结构密切相关, 结构不同引起的比热比的变化导致比热计算上的很大误差。图 3 中, 在常压下 350K 时计算得到的比热约为 $1.5 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 和通常航空煤油相应的比热约 $2.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 相比有较大的误差, 说明替代煤油的选择还有很大的改进余地。

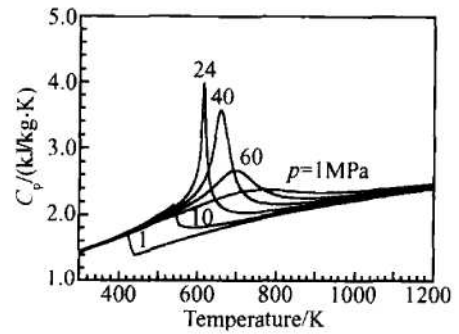


Fig 3 Specific heats of kerosene surrogate

5 输运特性

根据 ECS 理论, 纯物质或者混合物的输运系数可以通过假想单组分流体的相关系数来近似^[11, 12]。以粘性系数为例, 其对应法则根据粘性系数的定义可以表示为

$$\eta_f(\rho, T) = F_\mu \eta_f(\rho_r, T_r) \quad (13)$$

$$F_\mu = \left[\frac{M_x}{M_r} \right]^{1/2} \int_x^{1/2} h_x^{-2/3} \quad (14)$$

式中 M 是相应流体的分子量。单流体模型在处理输运系数时存在天生不足, 因为输运性质包含了混合物的一些特有性质, 比如二元扩散系数等, 因此, 单流体模型是无法计算这些性质的。与混合物输运系数对应的分子量 M_x 必须通过特殊的混合法则来计算^[11]。对于参考流体, 其粘性系数可分成下列三部分并通过实验数据去确定

$$\eta_f(\rho_r, T_r) = \eta_f^{id}(T_r) + \eta_f^{exc}(T_r) \rho_r + \Delta \eta_f^{crit}(\rho_r, T_r) \quad (15)$$

式中 η_f^{id} 表示理想气体的粘性系数, 只是温度的函数, 与密度无关。第二项 η_f^{exc} 代表不包括临界效应的一阶密度修正。第三项代表临界增益, 只有在临界点附近才变得重要, 可以根据 Enskog 理论^[11] 来计算。图

4 给出了替代煤油的粘性系数的计算曲线。从图 4 可以看出,随着温度的增加,煤油的粘性迅速下降到气态的水平,而超临界流体具有类似气体的输运特性。尽管该模型可以较好地预测粘性系数随着温度和压力的变化趋势,但由于单流体模型本身的局限性,对于煤油这样的混合物,计算将产生较大的误差,例如在大气压力和 293K 温度下,粘性系数的计算值约为 $7.8 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 而同样条件下,大庆 RP-3 航空煤油的粘性系数的约为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (从密度测量值和文献 [13] 中 3 号喷气燃料的运动学粘性系数的国家标准估计得到)。

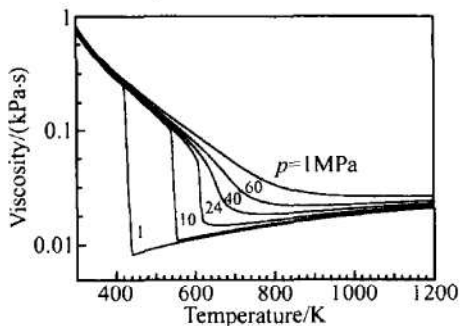


Fig 4 Viscosities of kerosene surrogate

6 超临界态燃料的流量

对于接近临界点或者超临界的流体,由于物性随温度和压力的急剧变化,目前还没有一个比较简单可靠的方法可以提供流量计算的理论依据。考虑到超临界流体与气体一样,只要温度足够高,均可以加速到声速而不发生凝结,因此超临界态的煤油流量也可以通过声速流量计来测量。尽管在超临界状态下,流体的状态已经不能用类似理想气体那样的简单状态方程来描述,也得不到一个计算音速喷管流量的解析式,但是,利用广义的对应状态法则求得各种状态下的热物性参数以后发现,音速喷管的流量可以通过一个数值等熵加速方法来得到。

与焓的计算方法类似,真实流体的熵等也可以分成两部分,一部分对应于相应温度下理想气体的理论值,另一部分代表真实流体效应

$$s = s^{il} + s^{res} \quad (16)$$

$$s^{il} = \int_p^p \frac{c_p}{T} dT - R \ln p \quad (17)$$

$$s^{res} = \int \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - \frac{1}{V} J dV + R \ln Z \quad (18)$$

给定超临界煤油的总温 T_0 和总压 P_0 , 通过 (10) ~ (12)、(16) ~ (18) 以及对应状态法则可以求得该状

态下煤油的焓值 h_0 和熵值 S_0 ; 保持该熵值不变,降低温度至 T_1 , 并再次使用广义对应状态法则,求得对应温度 T_1 和熵值 S_0 的新状态下的焓值 h_1 和声速 a_1 , 利用两个状态的焓值变化

$$\Delta h = h_0 - h_1 = \frac{1}{2} u_1^2 \quad (19)$$

求得流体的流动速度 u_1 和马赫数 $Ma_1 = u_1 / a_1$, 如果马赫数不等于 1, 则继续降低温度, 直至达到声速 $Ma = 1$ 。在音速状态下, 可以求得替代煤油的密度 ρ 、速度 u^* 和通过单位面积声速喷管的流量 ρu^* 。对于不同温度和压力, 重复上述过程, 并把计算得到的替代煤油通过声速喷管的流量制成标定曲线。在实际测量时, 只需测量声速喷管流量计前煤油的总温和总压, 便可以通过标定曲线求得煤油通过单位喷管喉道面积的流量, 乘上面积可得总流量。在数值加速过程中, 必须保证流体的状态不进入两相区而产生凝结, 否则在给定的总温和总压下, 煤油达不到声速, 声速喷管不能使用。这就要求超临界流体的初始状态和两相区边界要有一定的距离 (见图 2)。针对大庆 RP-3 航空煤油, 图 5 给出了相应替代煤油加速到声速所要求的临界压力和总压之比。图 6 是相应的临界温度和总温之比。从图 6 可知, 由于煤油分子的自由度很大导致在等熵流动中煤油的温度变化很小。图 7 给出了声速流量计单位面积质量流量的计算曲线。在 0.3MPa、0.38MPa 和 0.46MPa 等 3 个压力以及各种温度下对声速喷管流量进行了测量^[14], 结果见图 7。可以看出, 在约 750K 温度以下的计算结果与实验值吻合的非常好, 但靠近临界区的误差较大。进一步的计算发现, 该误差仍然和替代煤油主要成份的选择有关, 不同的组分不仅导致混合物临界参数变化较大, 而且其在临界区内的变化趋势也有较大区别。在离临界点较远的区域内, 除去一个可以修正的常数外, 不同组分带来的影响很小, 进一步的改进工作正在开展。在 750K 以上, 煤油开始裂解, 流量的计算需要考虑到裂解产物的影响。如果结合煤油裂解机理的研究, 在求得裂解混合物各组份及其浓度后, 本文的方法仍然可以使用。

7 结 论

本文针对广泛应用于超燃冲压发动机的吸热碳氢燃料, 介绍了用于模拟燃料热物理特性的替代燃料方法和广义对应状态法则。以大庆 RP-3 航空煤油为例, 基于目前被认为是最好的 Dagaut 三组份替代模

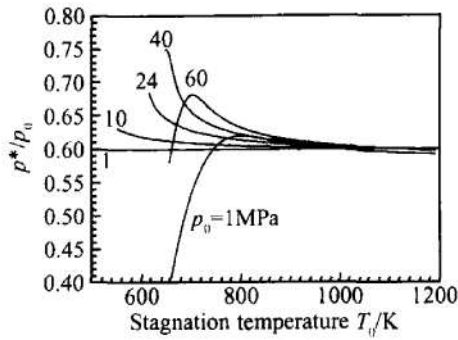


Fig 5 Sonic to stagnation pressure ratios for flows of kerosene surrogate

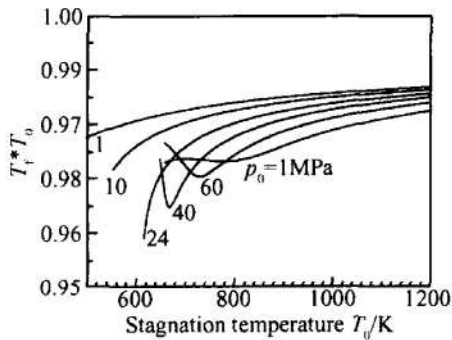


Fig 6 Sonic to stagnation temperature ratios for flows of kerosene surrogate

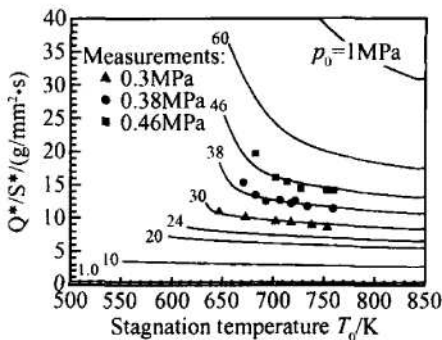


Fig 7 Mass flow rates per unit throat area of kerosene surrogate

型,选择了由 49% (摩尔比)正十烷, 44% 三甲基环己烷和 7% 丙基苯组成的替代煤油,并采用广义的对应状态法则对其热力学和输运系数等物性进行了数值模拟。计算结果表明,采用的三组份替代煤油可以较好地描绘出煤油在各种状态下物性的变化趋势,也可以相当精确地模拟大庆 RP-3 航空煤油的密度和流动等参数。最后,本文采用数值等熵加速法,提出了测量超临界态流体流量的新方法。与实验的比较表明,该方法可以很好的预测超临界态煤油通过声速喷管流量计的流量,但在靠近临界点附近,仍存在较大误差。进一步的改进有望通过替代煤油的优化而获得。

参考文献:

- [1] Edwards T, Maurice L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17: 461~ 466
- [2] Leach JW, Chappellear P S, Leland T W. Use of molecular shape factors in vapor-liquid equilibrium calculations with the corresponding states principle[J]. *AIChE J*, 1968, 14: 568~ 576
- [3] Ely J F, Huber M L. NIST standard reference database 4- NIST thermophysical properties of hydrocarbon mixtures [M]. *National Inst of standards Gaithersburg, MD*, 1990
- [4] Daniau E, Bouchez M, Bounaceur R, et al Contribution to scram jet active cooling analysis using N-Dodecane decomposition model as a generic endothermic fuel[R]. *AIAA* 2003-6920
- [5] Dagaut P. On the kinetics of hydrocarbon oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel[J]. *Phys Chem. Chem. Phys* 2002, 4: 2079~ 2094
- [6] Viola 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: 399~ 417.
- [7] Jacobsen R T, Stewart R B. Thermodynamic properties of nitrogen including liquid and vapor phases from 63K to 2000 K with pressures to 10 000 bar[J]. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 2: 757-922, 1973
- [8] Cullick A S, Ely J F. Densities of vinyl chloride from 5 to 65°C and saturation pressure to 4.2 MPa[J]. *J. Chem. Eng. Data*, 27, 276-281, 1982
- [9] Leland T W, Rowlinson J S, Sather G A. Statistical thermodynamics of mixture of molecules of different sizes[J]. *Trans Faraday Soc*, 1969, 64: 1447~ 1460.
- [10] Nishiumi H, Arai T. Generalization of the binary interaction parameter of the peng-robinson equation of state[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1988, 42: 43~ 62
- [11] Ely J F, Hanley J M. Prediction of transport properties 1. Viscosity of fluids and mixtures [J]. *Ind. Eng. Chem. Fund.*, 1981, 20: 323~ 332
- [12] Ely J F, Hanley J M. Prediction of transport properties 2. Thermal conductivity of fluids and mixtures[J]. *Ind. Eng. Chem. Fund.*, 1983, 22: 90~ 97.
- [13] 周养群. 中国油品及石油精细化学品手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003

(编辑: 张雅凤)