

一种新的 RP-3 航空煤油模拟替代燃料

曾 文, 刘 靖, 张 治博, 马洪安, 张 静, 刘爱骥
(沈阳航空航天大学 航空航天工程学院, 沈阳 110136)

摘 要: 为了遴选出符合 RP-3 航空煤油物理与化学特性的模拟替代燃料, 综合分析了 RP-3 航空煤油的物理与化学特性。针对其物理与化学特性, 确定了 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的遴选指标(包括摩尔质量、氢碳比、十六烷值与低热值)。针对遴选指标, 提出了由正癸烷、正十二烷、异十六烷、甲基环己烷及甲苯等五种组分组成的 RP-3 航空煤油模拟替代燃料, 并对该模拟替代燃料中各组分的摩尔分数进行了优化。同时, 对比分析了不同温度下该模拟替代燃料与 RP-3 航空煤油的密度与运动黏度。结果表明, 当该模拟替代燃料中正癸烷、正十二烷、异十六烷、甲基环己烷及甲苯的摩尔分数分别为 14%、10%、30%、36% 与 10% 时, 该模拟替代燃料的摩尔质量、氢碳比、十六烷值与低热值与 RP-3 航空煤油的相应数据非常吻合。同时, 不同温度下该模拟替代燃料的密度与运动黏度变化趋势与 RP-3 航空煤油吻合较好。

关 键 词: RP-3 航空煤油; 模拟替代燃料; 遴选指标; 密度; 运动黏度

中图分类号: V231; TK401 **文献标志码:** A

A new surrogate fuel of RP-3 kerosene

ZENG Wen, LIU Jing, ZHANG Zhibo, MA Hongan, ZHANG Jing, LIU Aiguo
(College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to select the surrogate fuel with the same physical and chemical properties as RP-3 kerosene, the physical and chemical properties of RP-3 kerosene were analyzed. According to the physical and chemical properties of RP-3 kerosene, the selection criteria of the RP-3 kerosene surrogate fuel (including the molecular mass, hydrogen-carbon ratio, cetane number and lower heating value) were determined. Based on the selection criteria, a five-component RP-3 kerosene surrogate fuel comprising *n*-decane, *n*-dodecane, iso-cetane, methylcyclohexane and toluene was presented, and the mole fractions of these five components were optimized. Furthermore, the densities and kinematic viscosities of the surrogate fuel and RP-3 kerosene were contrastively analyzed at different temperatures. The results show that the molecular mass, hydrogen-carbon ratio, cetane number and lower heating value of the surrogate fuel, which comprise 14% *n*-decane/10% *n*-dodecane/30% iso-cetane/36% methylcyclohexane/10% toluene (mole fraction), agree well with the corresponding criteria of RP-3 kerosene. At the same time, the variation trends of the densities and kinematic viscosities of the surrogate fuel agree well with the corresponding experimental data of RP-3 kerosene at different temperatures.

Key words: RP-3 kerosene; surrogate fuel; selection criterion; density; kinematic viscosity

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(51376133, 51506132); 预研基金(XXQTX)

作者简介: 曾文(1977—), 男, 教授, 博士后, 主要从事航空发动机燃烧过程与排放物生成的数值研究。

引用格式: 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. ZENG Wen, LIU Jing, ZHANG Zhibo, et al. A new surrogate fuel of RP-3 kerosene[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2314-2320.

航空燃料在航空发动机燃烧室内的混合、点火与燃烧过程是一个复杂的湍流混合和湍流化学反应过程,而航空发动机的燃烧效率与推力、燃烧室火焰结构与火焰稳定性、燃烧污染物的形成则与该湍流化学反应过程有着密切关系^[1-4]。要研究该湍流化学反应过程,获得燃烧室中的燃烧细节,阐明湍流流场特性与反应动力学特性的相互影响机制,航空燃料的燃烧反应机理是关键。

然而,航空煤油的成分非常复杂。研究表明,国产 RP-3 航空煤油主要由平均碳原子个数为 10~16,包含烷烃、异构烷烃、环烷烃及芳香烃等成百上千种碳氢化合物构成^[5-6]。因此,目前还无法直接构建组成成分如此复杂的碳氢化合物的燃烧反应机理。一种有效的方法就是从复杂的 RP-3 航空煤油组成成分中选取几种具有代表性的成分,并按一定的比例混合,作为该航空煤油的模拟替代燃料。该模拟替代燃料应具有与 RP-3 航空煤油相似的物理和化学特性,物理特性如密度、比热容、声速、黏度和导热系数等,可以用来模拟燃料的储存、加热及流动等物理过程;化学特性如着火延迟、火焰温度、层流火焰速度和化学反应速率等,可以用来模拟燃料的点火、燃烧以及裂解与结碳等化学反应过程^[7]。

近年来,国外学者对 JP-8、JP-10 及 Jet-A 航空燃料的组成成分、物理与化学特性进行了详细分析,提出了上述航空煤油模拟替代燃料的多种

遴选指标;根据遴选指标,遴选出了多种模拟替代燃料,并构建了多种模拟替代燃料的燃烧反应机理^[8-10]。但是,针对国产航空发动机广泛使用的 RP-3 航空煤油,对其多组分模拟替代燃料及燃烧反应机理的相关研究还比较少。

本文综合分析了 RP-3 航空煤油的组成成分、物理与化学特性,制定了 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的遴选指标;根据遴选指标,遴选出了一种由正癸烷、正十二烷、异十六烷、甲基环己烷(MCH)及甲苯等五组分组成的模拟替代燃料,并对其摩尔质量、氢碳比、十六烷值、低热值、密度与运动黏度进行了分析。

1 RP-3 航空煤油的组成成分及主要物理特性

由于原油产地、加工工艺及添加剂不同,各国、各型号、甚至各批次的航空煤油的组分也不尽相同。Violi 等人^[11]对 JP-8 航空煤油的组成成分进行了分析,发现 JP-8 航空煤油主要由芳香烃、环烷烃、链烷烃及烯烃组成,其中链烷烃的体积分数达到 60%。Dooley 等人^[5]对 Jet-A 航空煤油的组成成分进行了分析,发现该航空煤油主要由芳香烃、环烷烃、链烷烃及异构烷烃组成。范学军等人^[12]、郑东等人^[13]及徐佳琪等人^[14]对 RP-3 航空煤油的组成成分进行了详细分析,各型号航空煤油的组成成分如表 1 所示。

表 1 不同型号航空煤油的主要组成成分
Table 1 Main compositions of different type kerosenes

航空煤油型号	参数	烷烃 (正构烷烃/异构烷烃)	环烷烃	芳香烃	烯烃	乙醇
JP-8 ^[11]	体积分数/%	60.0	20.0	18.0	2.0	
Jet-A ^[5]	体积分数/%	68.2	6.30	25.5		
RP-3 ^[13]	体积分数/%	53.0	37.7	4.60	2.0	2.7
RP-3 ^[12]	质量分数/%	52.2	39.9	7.90		
RP-3 ^[14]	质量分数/%	72.0	13.7	11.3		3.0

由表 1 可见,国内外不同型号航空煤油的烃类构成比例存在较大差异,国外 JP-8 与 Jet-A 航空煤油中烷烃(包括正构烷烃、异构烷烃及环烷烃)体积分数为 70%~80%,芳香烃含量较高;不同产地与批次的 RP-3 航空煤油的烃类构成比例也有较大差异,但是烷烃(包括正构烷烃、异构烷烃及环烷烃)体积分数大约为 90%,芳香烃含量低于国外航空煤油。

对 RP-3 航空煤油的主要物理特性进行了实验分析,并与国内相关研究结果进行了对比^[13-16],如表 2 所示。从表可知,不同产地与批次的 RP-3 航空煤油的摩尔质量与氢碳比虽然存在差异,但差异较小(除 Jiang 等人^[16]测得的摩尔质量较大),摩尔质量在 148~150 g/mol 之间,氢碳比在 2.0~2.1 之间。同时,据 RP-3 航空煤油的国家标准,该燃料的密度(20 ℃)大致在 0.775~0.83 g/cm³ 之

间,运动黏度(20℃)不小于1.25 mm²/s。从表 2 可知,各产地与批次的 RP-3 航空煤油的密度较为接

近,但运动黏度(20℃)存在差异,不过都符合 RP-3 航空煤油的国家标准。

表 2 RP-3 航空煤油的主要物理特性
Table 2 Main physical properties of RP-3 kerosene

数据来源	平均摩尔质量/ (g/mol)	氢碳比	分子式	密度/ (g/cm ³)(20℃)	运动黏度/ (mm ² /s)(20℃)
试验值	149.05	2.04	C _{10.62} H _{21.66}	0.778	2.07
文献[13]	148.83	2.08	C _{10.57} H _{21.99}	0.785	1.48
文献[14]	150.00	2.05	C _{10.68} H _{21.89}		
文献[15]	148.33	2.10	C _{10.50} H _{22.0}	0.791	1.46
文献[16]	166.34	2.01	C _{11.85} H _{23.82}		

2 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的
遴选指标

如前所述,RP-3 航空煤油的模拟替代燃料应具有与 RP-3 航空煤油相似的物理和化学特性,如密度、运度黏度、十六烷值(n_c)、低热值(e_{lh})、烟点(I_t)、表面张力等。在先前的研究中,国外学者针对航空煤油 JP-8 与 Jet-A 的物理与化学特性,提出了模拟替代燃料的多种遴选指标^[17-18](摩尔质量(M)、氢碳比、密度、运动黏度、十六烷值、低热度、烟点等)。郑东等人^[13]也提出了 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的遴选指标(摩尔质量、氢碳比、密度与运动黏度)。如果模拟替代燃料的遴选指标过多,将较难遴选出符合所有遴选指标的模拟替代燃料;但是如果遴选指标过少,将难以全面反映出实际燃料的物理与化学特性。因此,在确定模拟替代燃料的遴选指标时,应选择能反映实际燃料的主要物理与化学特性的指标参数,同时指标参数不宜过多。

由于气相燃料的扩散特性取决于其分子量,为了能够再现实际航空煤油在气相燃烧中的扩散特性,模拟替代燃料的摩尔质量应接近实际燃料的摩尔质量。氢碳比反映了燃烧生成物中 CO₂ 和 H₂O 的比例,决定了燃料反应生成焓以及绝热火焰温度;而绝热火焰温度与燃烧速率以及其他燃烧现象密切相关,换言之,氢碳比是反映燃料燃烧速率以及其他燃烧现象的重要特性参数。十六烷值反映气相燃料的点火特性,即点火延迟特性,体现了大分子碳氢燃料裂解为小分子碳氢燃料及活性中间组分生成等化学反应过程的特点。燃料的低热值则反映了燃料在低温氧化过程中能释放的总热量。综合考虑国内外文献中所提出的模拟替代燃料的遴选指标^[17],并根据 RP-3 航空

煤油的物理与化学特性,本文初步确定了摩尔质量、氢碳比、十六烷值、低热值四个参数作为 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的遴选指标,同时,综合考虑模拟替代燃料的密度与运动黏度等参数。

3 RP-3 航空煤油的模拟替代燃料

针对已确定的 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的遴选指标,选取 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的主要组成成分。选取原则是所选取的组分须在 RP-3 航空煤油中含量较高,或能综合反映出 RP-3 航空煤油中这种烃类所有组分的平均特性;同时,所选取组分的遴选指标应与 RP-3 航空煤油接近,或通过与其他选取组分调配后得到的混合燃料的遴选指标与 RP-3 航空煤油接近。通过对 RP-3 航空煤油的组成成分分析,同时综合分析国内外学者提出的多种模拟替代燃料组分,最终选择正癸烷(n -decane)、正十二烷(n -dodecane)、异十六烷(iso-cetane)、MCH 及甲苯(toluene)作为 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的主要组成成分。RP-3 航空煤油、正癸烷、正十二烷、异十六烷、MCH 及甲苯的各项指标参数如表 3 所示。

确定了 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的主要组成成分后,需进一步确定五种组分的比例。根据 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的遴选指标,通过优化模拟替代燃料中各组分的比例,使之组成的混合燃料的各项遴选指标参数与 RP-3 航空煤油的相应参数之间的误差达到最小。优化过程中混合燃料的各遴选指标参数的计算式^[17]为

混合燃料的摩尔质量

$$M_{\text{mix}} = \sum_i x_i M_i \tag{1}$$

混合燃料的十六烷值

$$n_{\text{cmix}} = \sum_i \varphi_i n_{ci} \tag{2}$$

表 3 RP-3 航空煤油模拟替代燃料中主要组分的遴选指标^[17]

Table 3 Main selection criterions of the main species in the surrogate fuel of RP-3 kerosene

组分		氢碳比	平均摩尔质量/(g/mol)	十六烷值	低热值
RP-3 航空煤油		2.04	149.05	41.5	42.8
正构烷烃	正十二烷(C ₁₂ H ₂₆)	2.167	170.33	82.5	44.11
	正癸烷(C ₁₀ H ₂₂)	2.20	142.28	76.7	44.24
异构烷烃	异十六烷(C ₁₆ H ₃₄)	2.125	226.44	15.0	44.85
环烷烃	MCH(C ₇ H ₁₄)	2.0	98.19	20.8	43.36
芳香烃	甲苯(C ₇ H ₈)	1.143	92.14	7.4	40.53

混合燃料的低热值

$$e_{\text{lh,mix}} = \sum_i w_i e_{\text{lh}i} \tag{3}$$

$$E = \left[\frac{\sum_i^{N_{\text{target}}} \left(\frac{E_{i,\text{sur}} - E_{i,\text{RP-3}}}{E_{i,\text{RP-3}}} \right)^2}{N_{\text{target}}} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

混合燃料的密度

$$\rho(T)_{\text{mix}} = \sum_i \varphi_i \rho(T)_i \tag{4}$$

混合燃料的运动黏度

$$\ln \nu(T)_{\text{mix}} = \sum_i x_i \ln[\nu(T)_i] \tag{5}$$

式中 φ 为体积分数, x 为摩尔分数, w 为质量分数, M 为摩尔质量, ρ 为密度, ν 为运动黏度, T 为温度。

在对五种组分摩尔分数的优化过程中,采用的优化目标函数如式(6)所示,其中, N_{target} 为遴选指标数量, $E_{i,\text{sur}}$ 为混合燃料某遴选指标值, $E_{i,\text{RP-3}}$ 为 RP-3 航空煤油某遴选指标值。

表 4 显示了优化过程中模拟替代燃料中五种组分摩尔分数的部分优化结果。从表可以看出,在优化过程中,当模拟替代燃料中正癸烷、正十二烷、异十六烷、MCH 及甲苯的摩尔分数分别为 14%、10%、30%、36%、10% 时,四项遴选指标综合误差(Total err)为最小。同时,在该模拟替代燃料中,链烷烃(正癸烷、正十二烷、异十六烷)体积分数为 71.7%,环烷烃(MCH)体积分数为 22.8%,芳香烃(甲苯)体积分数为 5.5%,与郑东等人^[13]的研究结果相比,烷烃与芳香烃的体积占比较为吻合。

表 4 模拟替代燃料中各主要组分摩尔分数的优化结果

Table 4 Optimized results of the mole fractions of the main components in the surrogate fuel

序号	摩尔分数					氢碳比	平均摩尔质量/(g/mol)	十六烷值	低热值/(MJ/kg)	总误差
	正十二烷	正癸烷	异十六烷	MCH	甲苯					
1	0.20	0.08	0.28	0.30	0.14	2.026	151.2	45.99	43.98	0.05635
2	0.16	0.12	0.30	0.34	0.08	2.063	153.0	45.63	44.12	0.05401
3	0.16	0.12	0.30	0.36	0.06	2.074	153.1	45.76	44.15	0.05605
4	0.16	0.08	0.38	0.10	0.28	1.962	160.3	41.41	43.89	0.04425
5	0.16	0.08	0.38	0.12	0.26	1.972	160.4	41.56	43.93	0.04366
6	0.16	0.12	0.32	0.12	0.28	1.957	154.4	44.24	43.82	0.04435
7	0.16	0.12	0.32	0.14	0.26	1.967	154.5	44.38	43.85	0.04478
8	0.24	0.02	0.28	0.16	0.30	1.933	150.5	44.35	43.69	0.04468
9	0.24	0.02	0.28	0.18	0.28	1.944	150.6	44.49	43.72	0.04464
10	0.16	0.10	0.32	0.12	0.30	1.942	153.4	42.71	43.77	0.03360
11	0.16	0.10	0.32	0.14	0.28	1.953	153.5	42.85	43.80	0.03292
12	0.1	0.10	0.32	0.46	0.02	2.086	150.7	39.23	44.21	0.03435
13	0.12	0.14	0.28	0.14	0.32	1.920	147.0	41.71	43.66	0.03187
14	0.14	0.06	0.32	0.32	0.16	2.007	151.0	39.01	43.97	0.03454

续表										
序号	摩尔分数					氢碳比	平均摩尔质量/ (g/mol)	十六烷值	低热值/ (MJ/kg)	总误差
	正十二烷	正癸烷	异十六烷	MCH	甲苯					
15	0.16	0.04	0.34	0.30	0.16	2.011	154.1	39.45	44.00	0.033 90
16	0.16	0.04	0.34	0.32	0.14	2.022	154.3	39.61	44.03	0.032 43
17	0.18	0.04	0.30	0.16	0.32	1.918	149.5	40.13	43.67	0.035 70
18	0.18	0.04	0.30	0.18	0.30	1.929	149.6	40.28	43.70	0.032 68
19	0.18	0.04	0.32	0.16	0.30	1.934	152.2	40.27	43.74	0.033 54
20	0.20	0.02	0.30	0.16	0.32	1.918	150.0	40.57	43.67	0.033 62
21	0.10	0.14	0.34	0.28	0.14	2.029	154.3	41.20	44.06	0.023 51
22	0.10	0.14	0.32	0.24	0.20	1.993	151.4	40.74	43.93	0.021 34
23	0.12	0.12	0.32	0.38	0.06	2.070	152.8	42.24	44.16	0.023 39
24	0.12	0.14	0.28	0.28	0.18	2.000	147.8	42.76	43.90	0.022 58
25	0.14	0.10	0.30	0.38	0.08	2.056	150.7	42.52	44.10	0.020 63
26	0.16	0.04	0.32	0.42	0.06	2.063	152.2	40.25	44.13	0.024 70
27	0.16	0.06	0.30	0.46	0.02	2.086	150.7	41.99	44.18	0.021 34
28	0.18	0.04	0.30	0.26	0.22	1.974	150.1	40.91	43.84	0.021 75
29	0.18	0.06	0.30	0.26	0.20	1.989	151.1	42.47	43.89	0.022 41
30	0.12	0.12	0.28	0.34	0.14	2.019	147.2	41.65	43.96	0.015 87
31	0.12	0.12	0.28	0.36	0.12	2.031	147.3	41.81	43.99	0.015 73
32	0.12	0.12	0.30	0.32	0.14	2.023	149.8	41.65	43.99	0.014 90
33	0.12	0.12	0.30	0.34	0.12	2.034	149.9	41.80	44.03	0.015 14
34	0.12	0.12	0.30	0.36	0.10	2.045	150.0	41.95	44.06	0.016 09
35	0.14	0.10	0.30	0.30	0.16	2.011	150.2	41.92	43.96	0.016 56
36	0.14	0.10	0.30	0.32	0.14	2.022	150.3	42.07	43.99	0.016 70
37	0.18	0.04	0.30	0.34	0.14	2.019	150.6	41.52	43.98	0.015 56
38	0.18	0.04	0.30	0.36	0.12	2.030	150.7	41.67	44.01	0.015 50
39	0.10	0.14	0.30	0.36	0.10	2.045	149.4	41.52	44.06	0.014 58
40	0.04	0.22	0.30	0.30	0.14	2.027	148.4	41.35	44.02	0.014 86
41	0.04	0.22	0.30	0.32	0.12	2.038	148.5	41.50	44.05	0.014 73
42	0.18	0.04	0.28	0.38	0.12	2.027	148.1	41.67	43.98	0.014 61
43	0.10	0.14	0.30	0.34	0.12	2.034	149.3	41.37	44.03	0.014 90

表 5 显示了该模拟替代燃料各遴选指标与 RP-3 航空煤油相应指标的对比。从表中可知,本文提出的 RP-3 航空煤油五种组分模拟替代燃料

的摩尔质量、氢碳比、十六烷值及低热值与实际 RP-3 航空煤油相应参数之间的误差非常小。

表 5 模拟替代燃料与 RP-3 航空煤油的各遴选指标值
Table 5 Selection criterion values of the surrogate fuel and RP-3 kerosene

燃料	平均摩尔质量/ (g/mol)	误差/%	氢碳比	误差/%	十六烷值	误差/%	低热值/ (MJ/kg)	误差/%
RP-3 航空煤油	149.05		2.04		41.5		42.8	
模拟替代燃料	149.40	0.23	2.045	0.25	41.52	0.05	44.06	2.9

4 模拟替代燃料的密度与运动黏度

在航空发动机燃烧室内,航空煤油从喷入、破碎、蒸发到点火燃烧,是一个两相流燃烧过程,密度与运动黏度对于航空煤油的雾化与蒸发过程有较大影响。为了能够描述实际航空煤油在两相流燃烧过程中航空煤油的雾化与蒸发过程,模拟替代燃料的密度与运动黏度应该与实际航空煤油相匹配。

图 1 显示了 RP-3 航空煤油及模拟替代燃料中五种组分在不同温度下的密度与运动黏度^[17]。从图可以看出,本文测得的不同温度下 RP-3 航空煤油的密度值与范学军等^[12]的测试值吻合较好;同时,该模拟替代燃料中各组分在不同温度下的密度与运动黏度均与 RP-3 航空煤油的密度与运动黏度存在差异。

图 2 显示了不同温度下该模拟替代燃料的密度与运动黏度与 RP-3 航空煤油相应值的对比分析。从图可知,不同温度下该模拟替代燃料的密度与 RP-3 航空煤油的密度非常吻合;不同温度下该模拟替代燃料的运动黏度略低于 RP-3 航空煤油的运动黏度,但两者之间的差异较小。

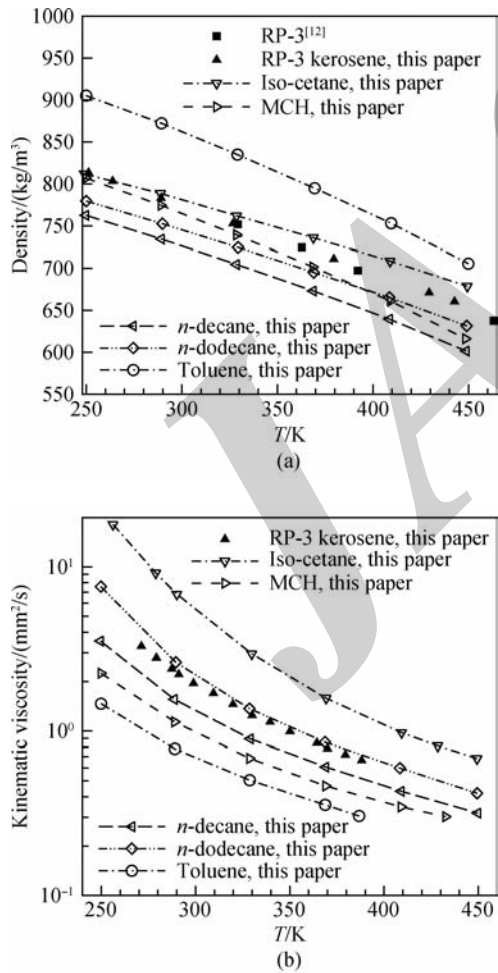


图 1 不同温度下 RP-3 航空煤油与模拟替代燃料中主要组分的密度与运动黏度
Fig. 1 Densities and kinematic viscosities of RP-3 kerosene and main components in the surrogate fuel at different temperatures

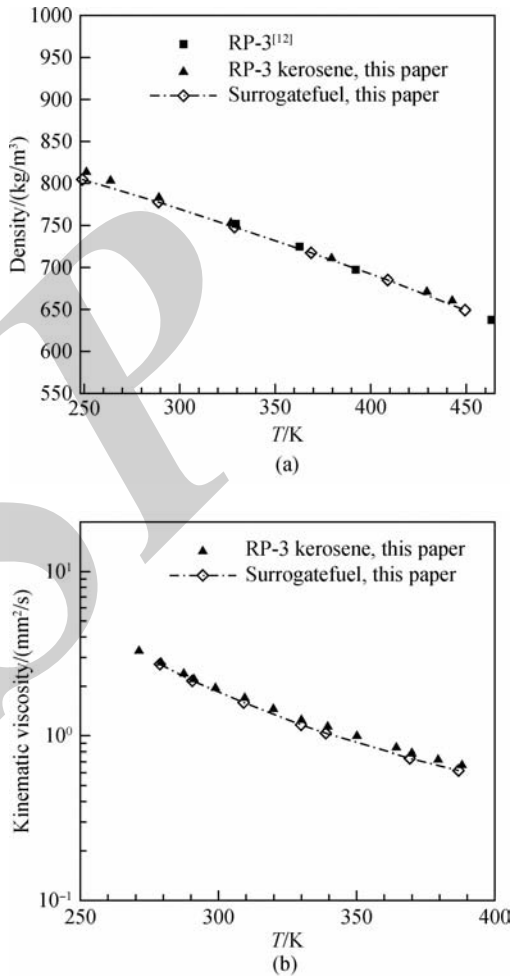


图 2 不同温度下 RP-3 航空煤油与模拟替代燃料的密度与运动黏度
Fig. 2 Densities and kinematic viscosities of RP-3 kerosene and surrogate fuel at different temperatures

5 结 论

本文综合分析了 RP-3 航空煤油的物理与化学特性,确定了 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的遴选指标。针对遴选指标,提出了由正癸烷、正十二烷、异十六烷、MCH 及甲苯等五种组分组成的 RP-3 航空煤油模拟替代燃料,并对该模拟替代燃料中各组分的摩尔分数进行了优化。同时,对比分析了不同温度下该模拟替代燃料与 RP-3 航空

煤油的密度与运动黏度的变化趋势。得到如下结论:

1) 通过对 RP-3 航空煤油的物理与化学特性分析,确定了摩尔质量、氢碳比、十六烷值与低热值作为 RP-3 航空煤油的遴选指标。

2) 选用正癸烷、正十二烷、异十六烷、MCH 及甲苯作为 RP-3 航空煤油模拟替代燃料的主要组分。根据遴选指标,优化了各组分的摩尔分数,上述各组分的摩尔分数分别为 14%、10%、30%、36%、10%。

3) 该模拟替代燃料的摩尔质量、氢碳比、十六烷值与低热值与 RP-3 航空煤油的相应数据非常吻合。

4) 不同温度下该模拟替代燃料的密度与运动黏度变化趋势与 RP-3 航空煤油相应数据吻合较好。

参考文献:

- [1] RIESMEIR E, HONNET S, PETERS N. Flamelet modeling of pollutant formation in a gas turbine combustion chamber using detailed chemistry for a kerosene model fuel[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004, 126(4): 899-905.
- [2] 马洪安, 解茂昭, 曾文, 等. 航空发动机燃烧室燃烧过程与排放物生成的反应动力学数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(2): 297-306.
MA Hongan, XIE Maozhao, ZENG Wen, et al. Reaction kinetic simulation of combustion process and emission formation in aero-engine combustor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(2): 297-306. (in Chinese)
- [3] MASIOL M, HARRISON R M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: a review[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95(1): 409-455.
- [4] SMOOKE M D. The computation of laminar flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 65-98.
- [5] DOOLEY S, WON S H, HEYNE J, et al. The experimental evaluation of a methodology for surrogate fuel formulation to emulate gas phase combustion kinetic phenomena[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1444-1466.
- [6] MENSCH A, SANTORO R J, LITZINGER T A, et al. Sooting characteristics of surrogates for jet fuels[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(3): 1097-1105.
- [7] DUBOIS T G, NIEH S. Selection and performance comparison of jet fuel surrogates for autothermal reforming[J]. *Fuel*, 2011, 90(4): 1439-1448.
- [8] PATTERSON P M, KYNE A G, POURKHASHANIAN M, et al. Combustion of kerosene in counter-flow diffusion flames[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(3): 453-460.
- [9] WEN Z, YUN S, THOMSON M J, et al. Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 135(3): 323-340.
- [10] WANG T S. Thermophysics characterization of kerosene combustion[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2001, 15(2): 140-146.
- [11] VIOLI A, YAN S, EDDINGS E G, et al. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixture[J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174(11/12): 399-417.
- [12] 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)
- [13] 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)
- [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.
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. (in Chinese)
- [15] 朱玉红, 余彩香, 李子木, 等. 航空燃料超临界热裂解过程中焦炭的形成[J]. *石油化工*, 2006, 35(12): 1151-1155.
ZHU Yuhong, YU Caixiang, LI Zimu, et al. Formation of coke in thermal cracking of jet fuel under super critical conditions[J]. *Petrochemical Technology*, 2006, 35(12): 1151-1155. (in Chinese)
- [16] JIANG R P, LIU G Z, ZHANG X W, et al. Thermal cracking of hydrocarbon aviation fuels in regenerative cooling microchannels[J]. *Energy and Fuels*, 2013, 27(5): 2563-2577.
- [17] KIM D, MARTZ J, VIOLI A. A surrogate for emulating the physical and chemical properties of conventional jet fuel[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(6): 1489-1498.
- [18] DOOLEY S, WON S H, CHAO M, et al. A jet fuel surrogate formulated by real fuel properties[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(12): 2333-2339.

(编辑: 陈 越)