

## RP-3航空煤油模拟替代燃料的化学反应简化机理\*

曾文, 李海霞, 马洪安, 梁双, 陈保东

(沈阳航空航天大学 航空航天工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 为了建立能适用航空发动机燃烧过程反应动力学计算的国产RP-3航空煤油的化学反应机理, 在化学激波管中对国产RP-3航空煤油的着火特性进行了实验测量, 获得了多工况下该航空煤油的着火延迟时间。根据RP-3航空煤油的化学组成及物理特性, 提出了由正癸烷、甲苯与丙基环己烷(体积百分比为0.65/0.1/0.25)三种组份组成的模拟替代燃料, 并形成了该替代燃料的化学反应详细机理。采用敏感性分析方法, 对该详细反应机理进行了简化, 形成了该替代燃料的简化反应机理。采用该简化机理对该替代燃料多工况下的着火特性进行了数值模拟, 并与实验数据以及详细机理的计算结果进行了对比分析。结果表明, 在不同压力与当量比下, RP-3航空煤油着火延迟时间的对数与着火温度的倒数呈直线关系, 并且随着着火温度、着火压力的升高以及当量比的降低, RP-3航空煤油着火延迟时间逐渐缩短; 同时, 在各工况下采用该简化机理计算得到的该替代燃料的着火延迟与详细反应机理的计算结果以及RP-3航空煤油着火延迟的实验值吻合良好。

**关键词:** 点火特性; RP-3航空煤油; 化学反应详细机理; 化学反应简化机理; 数值计算

**中图分类号:** TK401      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-4055 (2014) 08-1139-07

**DOI:** 10.13675/j. cnki. tjjs. 2014. 08. 018

## Reduced Chemical Reaction Mechanism of Surrogate Fuel for RP-3 Kerosene

ZENG Wen, LI Hai-xia, MA Hong-an, LIANG Shuang, CHEN Bao-dong

(School of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In order to build the reaction mechanism of RP-3 kerosene which can be applied to kinetic simulate the combustion process in the aero-engine, the ignition characteristics of RP-3 kerosene were measured in a chemical shock tube and the ignition delay time of this kerosene at various conditions were gained. According to the chemical compositions and physical properties of RP-3 kerosene, a surrogate fuel includes n-decane, toluene and propyl cyclohexane (volume fraction is 0.65/0.1/0.25) was provided, and a detailed reaction mechanism for this surrogate was developed. Through sensitivity analysis, this detailed reaction mechanism was reduced and a reduced reaction mechanism was presented. The ignition characteristics of this surrogate fuel at various conditions were simulated using the reduced reaction mechanism, and the simulation results were compared with the experimental data and the calculated results by the detailed reaction mechanism. The results show that the correlation for the logarithm of the ignition delay time of RP-3 kerosene and the reciprocal ignition temperature is linear under different pressure and equivalence ratios, and with the ignition temperature and pressure in-

\* 收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-12-03。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376133); 辽宁省自然科学基金(2013024009); 沈阳市科技攻关项目(F13024200)。

作者简介: 曾文(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机燃烧过程与排放物生产的数值计算与实验研究。

E-mail: zengwen928@sohu.com

creasing and the equivalence ratio decreasing, the ignition delay time of the mixture is shortening. At the same time, the ignition delays of this surrogate fuel computed by the reduced reaction mechanism under different conditions are agreed well with the calculated results by the detailed reaction mechanism and the experimental data of RP-3 kerosene.

**Key words:** Ignition characteristics; RP-3 kerosene; Detailed chemical reaction mechanism; Reduced chemical reaction mechanism; Numerical simulation

## 1 引言

在航空发动机燃烧室内,航空煤油的着火与燃烧是一个强烈受控于化学反应动力学的湍流燃烧过程<sup>[1,2]</sup>。因此,为了准确了解航空发动机燃烧室中的燃烧细节,在对航空发动机燃烧室燃烧过程进行数值计算时有必要采用航空燃料的化学反应动力学模型<sup>[3]</sup>。

国产 RP-3 航空煤油属于高碳数碳氢混合物燃料,由几十种甚至上百种组份组成,包含 C7~C16 等多种链烃、环烷以及芳香族化合物<sup>[4]</sup>。因此,直接建立 RP-3 航空煤油的化学反应动力学模型将十分困难。并且,即使能建立其化学反应动力学模型,该模型也将涉及几百种组分、上千个基元化学反应。要想通过综合考虑如此复杂的反应动力学模型与复杂流场对航空发动机燃烧室内的燃烧过程进行完整、准确的数值计算极为困难。一种有效的方法就是发展一种具有与该航空煤油相似的物理和化学特性的模拟替代燃料,并形成该替代燃料的简化反应机理并保持其化学反应动力学特性。

近年来,国外学者对国外航空煤油(如 JP-8, JP-10, Jet A, Jet A-1 等)的着火与燃烧特性进行了大量的实验研究,并基于实验数据,提出了多种单组份或多组份模拟替代燃料及多种复杂的化学反应机理。Cathonnet 等<sup>[5]</sup>采用正癸烷作为航空煤油 Jet A-1 的模拟替代燃料,提出了一种较为简单的化学反应机理(78 种组分、603 个反应),对其在喷射搅拌反应器(JSR)中的燃烧过程进行了数值计算。Patterson 等<sup>[6]</sup>采用摩尔分数分别为 89% 的正癸烷与 11% 的甲苯作为 Jet A-1 的替代燃料,建立了一种半详细的化学反应机理(84 种组分、440 个反应),并采用该机理对该替代燃料的燃烧特性进行了数值模拟。Montgomery 等<sup>[7]</sup>采用摩尔分数分别为 32.6% 的正癸烷、34.7% 的正十二烷、16.7% 的甲基环己烷与 16% 的丁苯作为航空煤油 JP-8 的替代燃料,建立了一种非常详细的化学反应机理(164 种组分、1162 个反应),并对该替代

燃料的着火特性进行了数值模拟。国内学者近些年来也开展了相关研究。张英佳<sup>[8]</sup>等对煤油/空气混合气在压力为 0.1MPa、当量比为 1.0 时的着火特性进行了实验研究,提出了一种三组份模拟替代燃料,并对比分析了替代燃料与煤油的着火特性;王慧汝等<sup>[9]</sup>则构建了正癸烷的燃烧机理,并采用该机理对正癸烷的着火特性进行了数值计算;曾文等<sup>[10]</sup>提出了航空煤油 Jet A-1 的三种模拟替代燃料,并形成了这三种替代燃料着火与燃烧的详细化学反应机理。

本文对国产 RP-3 航空煤油在温度范围为 1100~1600K、压力范围为 0.1~0.3MPa、当量比(油气当量比)范围为 0.5~1.5 的条件下的着火特性进行了实验测量,同时,根据 RP-3 航空煤油的化学组成及物理特性,提出了由正癸烷、甲苯与丙基环己烷三种组份组成的模拟替代燃料,并形成了该替代燃料的详细化学反应机理。采用敏感性分析方法,对该详细机理进行了简化。采用该简化机理对该替代燃料在激波管中多工况下的着火特性进行了数值计算,并与实验数据及化学反应详细机理的计算结果进行了对比分析。

## 2 RP-3 航空煤油的着火延迟特性

利用化学激波管实验装置对 RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气在温度为 1100~1600K,压力为 0.1 与 0.2MPa,当量比为 0.5, 1.0 与 1.5 的条件下的着火特性进行了测量。实验在横截面为 130mm×80mm、壁厚为 10mm 的化学激波管实验装置上开展,实验装置如图 1 所示<sup>[8]</sup>。管体由矩形不锈钢钢管对接而成,一个双膜破膜机构将其分成长 4m 的高压驱动段和长 5.3m 的低压被驱动段两部分。选择不同厚度的 PET 膜片作为破膜材料,通过改变膜片的厚度来实现不同实验压力的需求。选择 Ar(氩气)为稀释气体,He(氦气)与 N<sub>2</sub>(氮气)的混合气为高压驱动气。

图 2 显示了压力分别为 0.1MPa 与 0.2MPa、当量比分别为 0.5, 1.0 与 1.5 时 RP-3 航空煤油的着火延迟时间。图 3 显示了当量比分别为 0.5, 1.0 与 1.5, 压力

分别为0.1, 0.2与0.3MPa时RP-3航空煤油的着火延迟时间。图中纵坐标为着火延迟时间,横坐标为 $\frac{1}{T}$ ,  $T$ 为着火温度。从图可知,在不同着火压力与当量比下,RP-3航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间的对数与着火时温度的倒数( $\ln \tau_{\text{ign}} \sim 1/T$ )呈直线型关系。同时,随着着火温度、着火压力的升高与当量比的降低,着火延迟时间逐渐缩短。

### 3 化学反应详细机理

#### 3.1 RP-3航空煤油的模拟替代燃料

国产RP-3航空煤油色谱分析数据如表1所示<sup>[4]</sup>。RP-3航空煤油包括饱和碳氢化合物(体积百分比为92.5%)、不饱和碳氢化合物(体积百分比为0.5%)以及芳香族化合物(体积百分比为7%左右)。由于RP-3航空煤油的物理特性比较接近Jet-A航空煤油,因

此,本文参照Dagaut三组份模型<sup>[11]</sup>,确定了一种由65%(体积比)正癸烷、10%甲苯、25%丙基环己烷组成的混合燃料作为RP-3航空煤油的模拟替代燃料。

#### 3.2 模拟替代燃料的化学反应详细机理

通过修正正癸烷燃料的化学反应详细机理<sup>[12,13]</sup>,并在此基础上添加了甲苯热裂解与氧化反应机理<sup>[14]</sup>、苯生成的反应机理、甲基环己烷的高温燃烧机理<sup>[15]</sup>以及丙基环己烷的高温裂解与氧化反应机理,最终形成了正癸烷、甲苯以及丙基环己烷三组份混合燃料的化学反应详细机理,包括150种组分,591个基元反应。

### 4 化学反应简化机理

敏感性分析方法在燃料着火化学分析中一直得到广泛应用,其能清晰地反映出燃料着火过程中关键

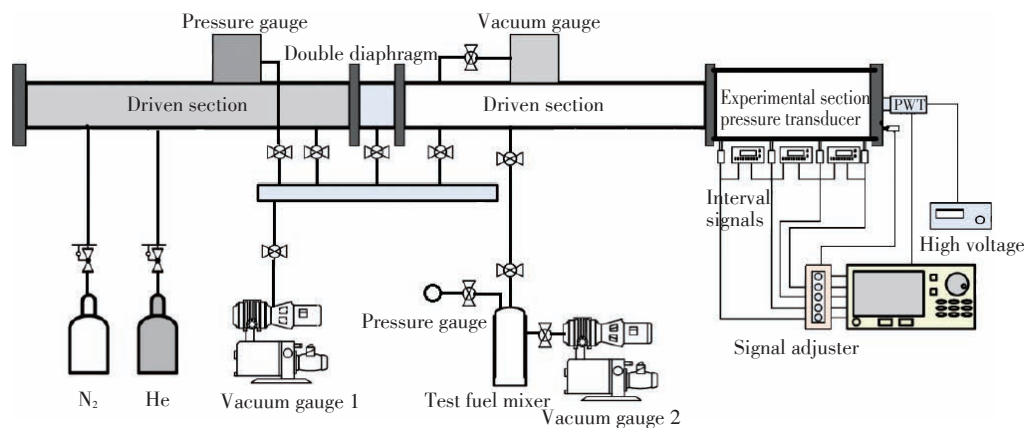


Fig. 1 Experimental setup of the chemical shock tube

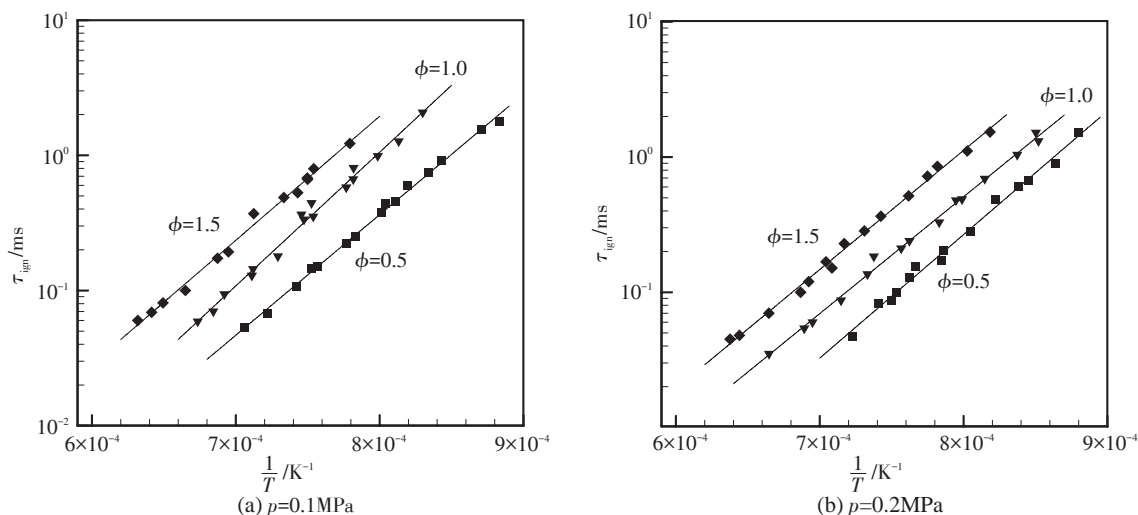


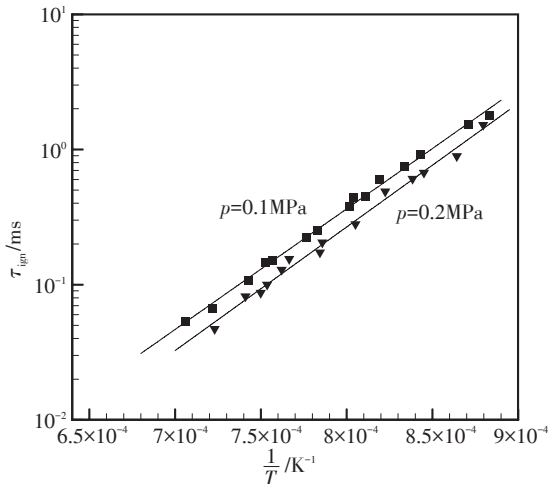
Fig. 2 Ignition delay time of RP-3 kerosene at different pressure

反应步对燃料着火的促进或抑制作用,对于理解燃料的着火机理十分重要;同时,敏感性分析方法也是建立燃料的化学反应简化机理的一种非常重要的手段。

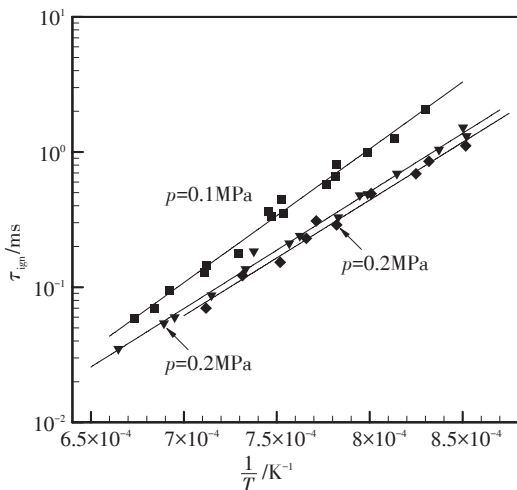
敏感性分析是用来分析一种模型的解与出现在这个模型中的各种参数之间的定量关系的一种有效与系统的方法<sup>[16]</sup>。假设一个变量,其可以表示为

$$\frac{dZ}{dt} = F(Z, t, a) \quad (1)$$

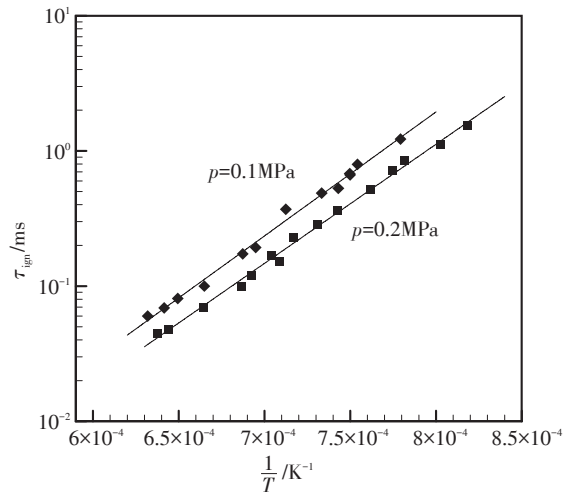
在本文中,  $Z = (T, Y_1, Y_2, \dots, Y_i)^t$ ,  $T$  为反应温度,  $a = (A_1, A_2, \dots, A_k)$  为各反应步的指前因子,  $Y_i$  为各组分的质量分数。



(a)  $\phi = 0.5$



(b)  $\phi = 1.0$



(c)  $\phi = 1.5$

Fig. 3 Ignition time of mixture at different equivalence ratios

当某个反应步  $a$  值发生变化时,势必会引起反应温度与某种组分浓度的变化。敏感性分析就是改变每一个反应步中的  $a$  值,分析反应温度与各组分浓度随  $a$  改变的程度。反应温度与组分浓度变化越大,说明其受此反应步的影响就越大。其一阶敏感性系数矩阵可由下式计算

$$w_{l,i} = \frac{\partial Z_l}{\partial a_i} \quad (2)$$

对式(2)进行求导可得

$$\frac{dw_{l,i}}{dt} = \frac{\partial F_l}{\partial Z} \cdot w_{l,i} + \frac{\partial F_l}{\partial a_i} \quad (3)$$

式中  $Z_l$  为第  $l$  种变量,  $a_i$  为第  $i$  个反应的指前因子。

在本文中,主要分析反应温度对各反应步的敏感性。反应温度对各反应步的敏感性分析的目的是要保证采用简化后的反应机理计算得到的燃料着火延迟时间的正确性。在该部分敏感性分析中,对初始压力为 0.1MPa、当量比为 1.0 时,初始温度分别为 1100K, 1200K, 1300K, 1400K, 1500K 与 1600K 时的温度敏感性系数进行了分析。

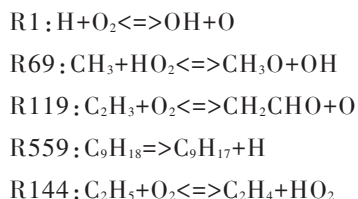
图 4、图 5 显示了当量比为 1.0, 初始压力为 0.1MPa, 初始温度为 1100K 时,对该模拟替代燃料着

Table 1 Major species of RP-3 kerosene

	Saturated hydrocarbons/%			Aromatic hydrocarbons /%				
	Monocyclic naphthenes	Bicyclic naphthenes	Tricyclic naphthenes	Alkyl benzenes	Indan tetralin	Naphthalene	Naphthalene derivatives	
Alkanes	52.2	33.8	6.0	0.1	5.1	1.3	0.6	0.9

火延迟时间影响最大的关键反应步。

从图可以看出,在该工况下促进RP-3航空煤油替代燃料着火的主要反应步为



对RP-3航空煤油替代燃料着火起抑制作用的主要反应步为

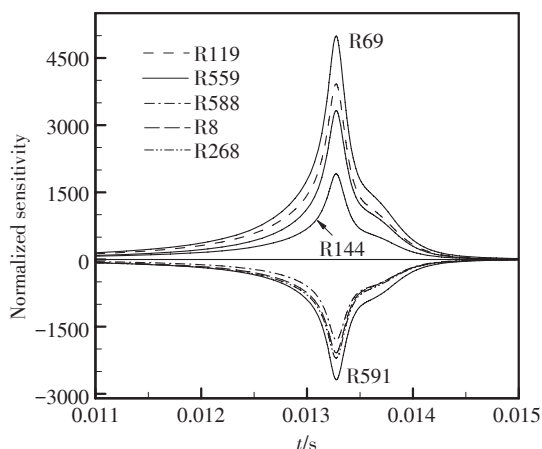
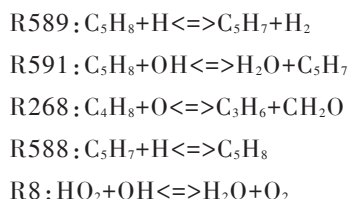


Fig. 4 Key reactions affect the ignition delay time of surrogate fuel

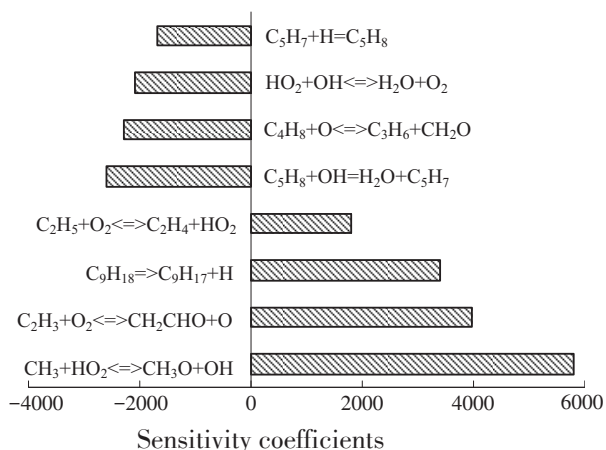


Fig. 5 Main reactions affect the ignition characteristics of surrogate fuel ( $T=1100K$ )

众所周知,R1 是几乎所有燃料燃烧过程中最为重要的链分支反应,因此,在所有反应步中,反应R1的敏感性系数最高(在图中没有显示)。反应R69, R119, R559, R144 则生成OH, H, O, HO<sub>2</sub>等自由基,而这些自由基在化学反应过程中活性极强,是促进燃料着火与燃烧非常重要的自由基,因此,这些反应步的敏感性系数相对较高。R589(在图中没有显示)、R591, R268, R588, R8 等反应步在反应过程中消耗了自由基O, OH, H,是碳氢燃料燃烧过程中非常重要的链终止反应,这些反应将抑制替代燃料的着火。

图6显示了当量比为1.0,初始压力为0.1MPa,初始温度为1600K时,对该模拟替代燃料着火延迟时间影响最大的关键反应步。

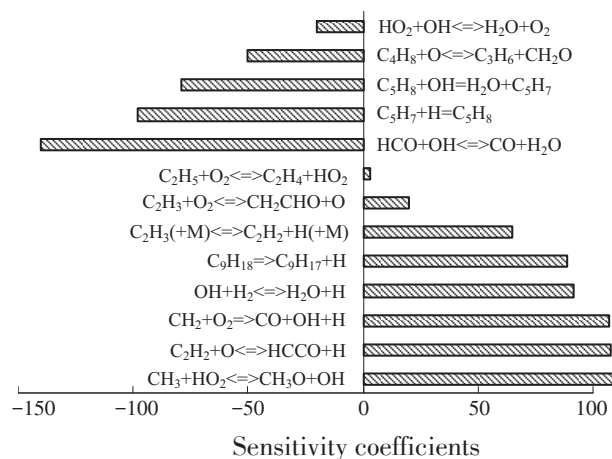
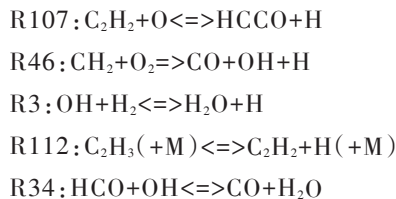


Fig. 6 Main reactions affect the ignition characteristics of surrogate fuel ( $T=1600K$ )

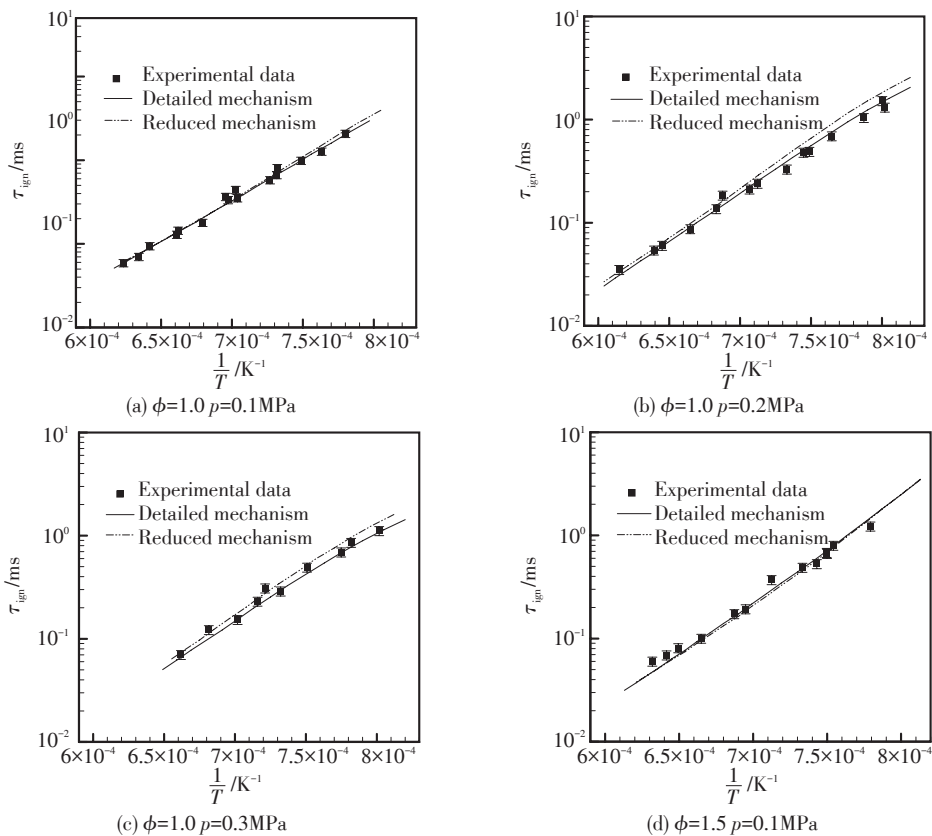
当初始温度升高至1600K时,从图可以看出,上述各反应步的敏感性系数均大幅降低。同时,另外一些反应步在替代燃料的着火过程中所起的作用将变得明显。



综合各初始温度下(1100K, 1200K, 1300K, 1400K, 1500K与1600K)的敏感性分析结果,取各初始温度下敏感性系数大于5.0的反应步,最终形成了该替代燃料的化学反应简化机理,包括88种组分,281个反应。部分反应步如表2所示。

**Table 2** Reduced reaction mechanism of surrogate fuel for RP-3 kerosene

No	Reaction	No.	Reaction	No.	Reaction
1	$H+O_2 \rightleftharpoons OH+O$	101	$C_3H_5+H \rightleftharpoons C_3H_4+H_2$	201	$C_{10}H_{22}+O \rightleftharpoons C_{10}H_{21}+OH$
2	$O+H_2 \rightleftharpoons OH+H$	102	$C_3H_5+O_2 \rightleftharpoons C_3H_4+HO_2$	202	$C_{10}H_{22}+O \rightleftharpoons C_{10}H_{21}+OH$
3	$OH+H_2 \rightleftharpoons H_2O+H$	103	$C_3H_6 \rightleftharpoons C_2H_3+CH_3$	203	$1-C_{10}H_{21} \rightleftharpoons C_{10}H_{21}$
4	$2OH \rightleftharpoons H_2O+O$	104	$C_3H_6+H \rightleftharpoons C_3H_5+H_2$	204	$2-C_{10}H_{21} \rightleftharpoons C_{10}H_{21}$
5	$H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$	105	$C_3H_6+OH \rightleftharpoons C_3H_5+H_2O$	205	$1-C_{10}H_{21}+O_2 \rightleftharpoons C_{10}H_{23}$
6	$HO_2+H \rightleftharpoons 2OH$	106	$C_3H_6+CH_3 \rightleftharpoons C_3H_5+CH_4$	206	$2-C_{10}H_{21}+O_2 \rightleftharpoons C_{10}H_{23}$
7	$HO_2+H \rightleftharpoons H_2+O_2$	107	$C_3H_6+O \rightleftharpoons C_2H_4+CH_2O$	.....	.....
8	$HO_2+H \rightleftharpoons H_2O+O$	108	$C_3H_6+O \rightleftharpoons C_2H_5+HCO$	271	$C_9H_{18}+H \rightleftharpoons C_9H_{17}+H_2$
9	$HO_2+H \rightleftharpoons H_2O+O$	109	$C_3H_6+OH \rightleftharpoons C_2H_5+CH_2O$	272	$C_9H_{18}+CH_3 \rightleftharpoons C_9H_{17}+CH_4$
10	$2HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2+O_2$	110	$C_3H_7 \rightleftharpoons CH_3+C_2H_4$	273	$C_9H_{18}+C_2H_5 \rightleftharpoons C_9H_{17}+C_2H_6$
.....	.....	.....	.....	274	$C_9H_{18}+O \rightleftharpoons C_9H_{17}+OH$
51	$CH_3OH+OH \rightleftharpoons CH_2OH+H_2O$	151	$C_3H_5+CH_3 \rightleftharpoons C_4H_8$	275	$C_9H_{18}+OH \rightleftharpoons C_9H_{17}+H_2O$
52	$CH_3OH+CH_3 \rightleftharpoons CH_4+CH_2OH$	152	$C_4H_8 \rightleftharpoons H+C_4H_7$	276	$C_9H_{18}+HO_2 \rightleftharpoons C_9H_{17}+H_2O_2$
53	$C_2H+O_2 \rightleftharpoons HCCO+O$	153	$C_4H_8+H \rightleftharpoons C_4H_7+H_2$	277	$C_9H_{18}+H \rightleftharpoons C_9H_{17}+H_2$
54	$HCCO+H \rightleftharpoons CH_2+CO$	154	$C_4H_8+O \rightleftharpoons CH_3CHO+C_2H_4$	278	$C_9H_{18}+C_2H_5 \rightleftharpoons C_9H_{17}+C_2H_6$
55	$HCCO+O \rightleftharpoons 2CO+H$	155	$C_4H_8+O \rightleftharpoons CH_3+C_2H_5+CO$	279	$C_9H_{18}+O \rightleftharpoons C_9H_{17}+OH$
56	$HCCO+O_2 \rightleftharpoons HCO+CO_2$	156	$C_4H_8+O \rightleftharpoons C_3H_6+CH_2O$	280	$C_9H_{18}+OH \rightleftharpoons C_9H_{17}+H_2O$
57	$HCCO+O_2 \rightleftharpoons 2CO+OH$	157	$C_4H_8+O \rightleftharpoons C_4H_7+OH$	281	$C_9H_{18}+HO_2 \rightleftharpoons C_9H_{17}+H_2O_2$
58	$C_2H_2+O_2 \rightleftharpoons HCCO+OH$	158	$C_4H_8+OH \rightleftharpoons C_4H_7+H_2O$		
59	$C_2H_2+OH \rightleftharpoons C_2H+H_2O$	159	$C_4H_8+CH_3 \rightleftharpoons C_4H_7+CH_4$		
60	$C_2H_2+O \rightleftharpoons CH_2+CO$	160	$C_4H_8+O_2 \rightleftharpoons C_4H_7+HO_2$		
.....	.....	.....	.....		



**Fig. 7** Ignition delay time of the surrogate fuel for RP-3 kerosene

## 5 简化机理的验证

图7显示了不同压力与当量比下采用已建立的化学反应详细机理与简化机理计算得到的正癸烷、甲苯与丙基环己烷三组份混合燃料的着火延迟时间,并与相应工况下的实验数据进行了对比,图中在各实验数据上添加了 $\pm 10\%$ 的误差带。从图可以看出,在各工况下采用详细反应机理与简化机理计算得到的正癸烷、甲苯与丙基环己烷三组份混合燃料着火延迟时间的对数与着火温度的倒数同样呈直线关系。当采用简化机理时,除了压力为0.2 MPa,当量比为1.0这种工况下计算得到的替代燃料的着火延迟时间与实验数据在低温段存在偏差(大于 $\pm 10\%$ ),其他工况下则吻合较好。

## 6 结论

(1)在不同压力与当量比下,RP-3航空煤油着火延迟时间的对数与着火温度的倒数呈直线关系,同时,随着着火温度、着火压力的升高与当量比的降低,RP-3航空煤油的着火延迟时间逐渐缩短。

(2)正癸烷、甲苯与丙基环己烷三组份混合燃料的化学反应详细机理包括150种组分、591个基元反应。

(3)该替代燃料的化学反应简化机理包括88种组分、281个反应,机理的适用范围为压力0.1~0.3 MPa、温度1100~1600 K、当量比0.5~1.5。

(4)在各工况下采用化学反应简化机理计算得到的该替代燃料着火延迟时间的对数与着火温度的倒数呈直线关系,计算值与RP-3航空煤油着火延迟时间的实验值吻合良好。

### 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(2): 461-466.
- [ 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.
- [ 3 ] Agosta A, Cernansky N P, Miller D L, et al. Reference Components of Jet Fuels: Kinetic Modeling and Experimental Results [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(7): 701-708.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Cathonnet M, Bales G C, Chakir A, et al. On the Use of Detailed Chemical Kinetics to Model Aeronautical Combustors Performances [C]. *Paris: Proceedings of the Third European Propulsion Forum*, 1992, 313-331.
- [ 6 ] Patterson P M, Kyne A G, Pourkashanian M, et al. Combustion of Kerosene in Counter-Flow Diffusion Flames [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(3): 453-460.
- [ 7 ] Montgomery C J, Cannon S M, Mawid M A, et al. Reduced Chemical Kinetic Mechanisms for JP-8 Combustion [R]. *AIAA 2002-0336*.
- [ 8 ] 张英佳,黄佐华,王金华,等. 激波管研究煤油/空气混合气的自着火特性[J]. *科学通报*, 2011, 56(1): 85-93.
- [ 9 ] 王慧汝,金捷,王静波,等. 正癸烷燃烧机理及航空煤油点火延迟动力学模拟[J]. *高等学校化学学报*, 2012, 33(2): 341-345.
- [ 10 ] 曾文,陈潇潇,刘静忱,等. 航空煤油替代燃料的着火与燃烧特性[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(8): 1688-1695.
- [ 11 ] Dagaut P. On the Kinetics of Hydrocarbon Oxidation from Natural Gas to Kerosene and Diesel fuel [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2002, 4(1): 2079-2094.
- [ 12 ] Bikas G, Peters N. Kinetic Modelling of *n*-Decane Combustion and Autoignition [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 126(1-2): 1456-1475.
- [ 13 ] Honnet S, Seshadri K, Niemann U, et al. A Surrogate Fuel for Kerosene [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 485-492.
- [ 14 ] Kyne A G, Patterson P M, Pourkashanian M, et al. Prediction of Premixed Laminar Flame Structure and Burning Velocity of Aviation Fuel-Air Mixtures [R]. *ASME 2001-GT-0055*.
- [ 15 ] 谈宁馨,王静波,华晓晓,等. 甲基环己烷的高温燃烧机理及动力学模拟[J]. *高等学校化学学报*, 2011, 32(8): 1832-1837.
- [ 16 ] Rasmussen C L, Rasmussen A E, Glarborg P. Sensitizing Effects of NO<sub>x</sub> on CH<sub>4</sub> Oxidation at High Pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 153(4): 529-545.

(编辑:史亚红)