

# RP-3 航空煤油燃烧特性及其反应机理构建综述

马洪安,付淑青,吴宗霖,刘宇,曾文  
(沈阳航空航天大学航空发动机学院,沈阳 110136)

**摘要:**目前耦合航空煤油多步燃烧反应机理的数值模拟计算已引起学者们的重视,燃烧反应机理的构建已成为研究热点。详细介绍了国内外关于航空煤油模拟替代燃料的选取、化学反应动力学模型构建和简化、着火延迟时间和层流燃烧速度等的实验规律。依据国外研究进展,指出了中国在国产 RP-3 航空煤油燃烧反应机理研究方面应从基础研究做起,全方位、多维、立体地合作开展相关研究,主要包括:国产 RP-3 航空煤油化学动力学模型的建立、低温高压工况条件下航空煤油与模拟替代燃料的基础实验研究与模型燃烧室研究,以期丰富相关研究成果,推进航空发动机的高质量发展。

**关键词:** RP-3 航空煤油;模拟替代燃料;化学反应动力学机理;着火延迟时间;层流燃烧速度;航空发动机

**中图分类号:** V231.2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.01.005

## Review of Combustion Characteristics and Reaction Mechanism Construction of RP-3 Aviation Kerosene

MA Hong-an, FU Shu-qing, WU Zong-lin, LIU Yu, ZENG Wen  
(School of Aeroengine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** At present, the numerical simulation calculation of the multi-step combustion reaction mechanism of coupled aviation kerosene had attracted the attention of scholars, and the construction of the combustion reaction mechanism had become a research focus. The experimental rules on the selection of aviation kerosene surrogate fuel, the construction and simplification of chemical reaction kinetic model, the ignition delay time and laminar burning velocity were introduced in detail. According to the research progress abroad, it was pointed out that the study of the combustion mechanism of domestic RP-3 aviation kerosene should start from the basic research and the related research should be carried out in a comprehensive, multi-dimensional and stereoscopic way in China in order to enrich the relevant research results and promote the high quality development of aeroengine. These research mainly included the establishment of the chemical kinetics model of domestic RP-3 aviation kerosene, the basic experimental studies and the study of model combustor of aviation kerosene and simulated alternative fuels under the conditions of low temperature and high pressure.

**Key words:** RP-3 aviation kerosene; alternative fuel; chemical reaction kinetic mechanism; ignition delay time; laminar burning velocity; aeroengine

## 0 引言

航空发动机作为飞机的心脏,直接影响飞机的推进性能、可靠性和经济性等,是一个国家科技、工业和国防实力的重要体现。作为航空发动机的主要燃料,航空煤油的成分十分复杂,无法对其所有成分的性质进行直接研究,因此国内外很多研究人员通过寻找模拟替代燃料来表征航空煤油的物理和化学特性,航空煤油模拟替代燃料组成的确定及其化学反应动力学

模型的建立,决定了燃烧室内燃料燃烧数值模拟的精度和可靠性。国内外很多学者通过测量实际航空煤油的物理和化学性质,确定模拟替代燃料的组分;通过建立模拟替代燃料的化学反应动力学模型,对其进行不同工况下的数值模拟;通过计算结果与实验结果比较,修订相应基元反应的系数,从而很好地表征其燃烧特性。

国内外常用的航空煤油主要有 Jet A、Jet A-1、

收稿日期:2019-11-16 基金项目:国家自然科学基金(5150613、51376133、51606129、1008103)资助

作者简介:马洪安(1980),男,博士,副教授,研究方向为航空发动机燃烧过程与排放物生成的实验与数值模拟;E-mail:mahongan\_sy@163.com。

引用格式:马洪安,付淑青,吴宗霖,等.RP-3 航空煤油燃烧特性及其反应机理构建综述[J].航空发动机,2021,47(1):25-31.MA Hongan, FU Shuqing, WU Zonglin, et al. Review of combustion characteristics and reaction mechanism construction of RP-3 aviation kerosene[J]. Aeroengine, 2021, 47(1): 25-31.

JP-7、JP-8 等<sup>[1-10]</sup>,其成分主要包括链烷烃、环烷烃和芳香烃等。为模拟计算航空煤油的着火与燃烧特性,依据对不同燃料的成份测定<sup>[12-9]</sup>,学者们选取 2 组分、3 组分及以上的模拟替代燃料<sup>[11-19]</sup>,其中,链烷烃常采用正癸烷和正十二烷等,环烷烃与芳香烃分别选用甲基环己烷、甲苯等化学物质进行替代,或者更大 C 数的物质。在此基础上,航空煤油的详细燃烧反应机理得以构建<sup>[14-29]</sup>并简化<sup>[21-25]</sup>,以模拟在高压温度工况下的物理和化学特性。为使航空煤油燃烧反应机理得以验证,学者们先后采用激波管、快速压缩机和定容弹等多种实验装置或设备<sup>[27-43]</sup>,开展了航空煤油在多个压力温度工况下的着火延迟特性、燃烧特性实验研究,以更好地推动燃料燃烧技术快速发展与应用。

本文总结了近年来国内外不同型号航空煤油的多类模拟替代燃料、详细机理的简化方法、模拟替代燃料与实际燃料的燃烧特性结果对比,针对 RP-3 航空煤油模拟计算研究中可能存在的问题提出了处理方法。

## 1 RP-3 航空煤油的模拟替代燃料

西方国家常用的航空煤油有 Jet A、Jet A-1、JP-7、JP-8 等,而中国应用最广泛的航空煤油为 RP-3。不同国家航空煤油的具体成分有很大差异,其主要的碳氢燃料成分见表 1。国产 RP-3 航空煤油是一种多分子的碳氢混合燃料,主要是 C10~C16 的烷烃类,包括链烷烃、环烷烃、芳香烃和烯烃等,其中链烷烃占比最大,达到总量的 64%左右,其次是芳香烃和环烷烃,还包括少量的烯烃和萘,不同批次的具体成分也有所不同,不同研究者针对 RP-3 航空煤油得到的具体组分见表 2。

表 1 不同航空煤油的主要组成成分 wt %

型号	烷烃	环烷烃	芳香烃	烯烃	其他
Jet-A <sup>[1]</sup>	68.2	6.3	25.5		
Jet-A <sup>[2]</sup>	39.1	23.2	37.4		0.3
JP-7 <sup>[3]</sup>	37.9	59.8	2.3		
JP-8 <sup>[4]</sup>	60.0	20.0	18.0	2.0	
RP-1 <sup>[5]</sup>	29.0	62.4	8.4		0.2
RP-3 <sup>[6]</sup>	53.0	37.7	4.6	2.0	2.7

Widgren 等<sup>[10]</sup>使用气相色谱-质谱法(Gas Chromatography - Mass Spectrometry, GC-MS)测得 Jet-A 航空煤油的成分由 68.2%的烷烃、25.5%的芳香烃、

表 2 RP-3 航空煤油的具体组成成分 wt %

研究者	烷烃	环烷烃	芳香烃	烯烃	其他
郑东 <sup>[5]</sup>	53.000	37.700	4.600	2.000	2.700
范学军 <sup>[6]</sup>	52.200	39.900	7.900		
徐佳琪 <sup>[7]</sup>	72.000	13.700	11.300		3.000
周舟 <sup>[8]</sup>	42.330	21.348	32.229		4.093
程泽源 <sup>[9]</sup>	50.520	5.650	27.030	5.320	1.470

3.0%的萘、3.3%的环烷烃等组成;Zheng 等<sup>[5]</sup>也使用 GC-MS 测得 RP-3 航空煤油由 53.0%的烷烃、37.7%的环烷烃、芳香烃和少量烯烃组成。由于航空煤油包括成百上千种成分,建立包含所有成分的燃烧反应机理是不切实际的,通常采用替代燃料模型取代实际煤油作为对象开展燃烧性质的研究。前人在研究中提出碳氢燃料替代物的概念,即采用由少数典型碳氢化合物组成的混合物去模拟真实的碳氢燃料,模拟替代燃料成分的选择取决于所要模拟的燃料特性,物理替代燃料具有与真实燃料相似的密度、比热、黏度、热传导系数等物理特性,用来模拟燃料的储存、加热、流动等过程;化学替代燃料具有与真实燃料相似的化学组成、点火延迟、层流燃烧速度、化学反应速率等化学特性,用来模拟燃料的点火、燃烧、积碳等化学过程。

国内外很多科研人员针对不同煤油型号提出不同的替代模型。在选择航空煤油替代燃料时,通过采用纯净燃料组分来替代煤油中的具体组分,见表 3。Lindstedt 等<sup>[11]</sup>采用摩尔分数为 89%的正癸烷和 11%的苯(或者甲苯、乙苯)的混合物作为煤油的模拟替代燃料,可以准确地预测芳香烃摩尔浓度趋势,并且通过与 Doute 等<sup>[12]</sup>的试验结果比较,认为苯不能代表煤油

表 3 煤油替代燃料统计

研究者	替代燃料
Lindstedt <sup>[11]</sup>	正癸烷、苯
Patterson <sup>[13]</sup>	正癸烷、甲苯
Huber <sup>[15]</sup>	R- 甲基十氢化萘、正十二烷、5- 甲基壬烷、庚基环己烷 (RP-1)
Huber <sup>[15]</sup>	R- 甲基十氢化萘、正十二烷、5- 甲基壬烷、2,4- 二甲基壬烷、庚基环己烷(RP-2)
Huber <sup>[16]</sup>	正壬烷、2,6- 二甲基辛烷、3- 甲基癸烷、正十三烷、正十四烷、正十五烷、正十六烷(S-8)
裴鑫岩 <sup>[17]</sup>	正癸烷、正十一烷、1- 甲基 2- 戊基环己烷、1, 3, 5 三甲基苯(RP-3)
曾文 <sup>[18]</sup>	正癸烷、甲苯、丙基环己烷(RP-3)

中的芳香烃,需要包括碳数更高的芳香烃;Patterson<sup>[13]</sup>采用摩尔分数为 89%的正癸烷和 11%的甲苯作为煤油的表征模型,并分别针对 Doute<sup>[12]</sup>和Dagaut<sup>[14]</sup>的试验,得到与试验结果相符合的计算结果;Huber 等<sup>[15]</sup>提出 4 组分模拟替代燃料来表征 RP-1 航空煤油的物理和热力学特性,还对 JP-A 航空煤油的模拟替代燃料进行热物性分析,发展了 7 组分的模拟替代燃料模型,并在试验验证中得到与真实燃料较为吻合的结果<sup>[16]</sup>;裴鑫岩<sup>[17]</sup>在前人基础上建立 4 组分物性模拟替代燃料模型,并与试验测得的热物性结果进行对比验证,很好地预测了燃料的热物性,特别是对于拟临界温度的预测;曾文<sup>[18]</sup>参照 Dagaut<sup>[14]</sup>的 3 组分模型,通过对 RP-3 航空煤油成分的分析,选择了一种 3 组分模型模拟替代燃料,同时建立的反应机理能够很好地反映出该模拟替代燃料的着火特性。由于不同产地、不同批次的 RP-3 航空煤油组分比例存在差别,要建立 1 个通用的化学反应动力学模型来描述不同航空煤油的燃烧反应特性仍然存在困难,因此建立符合中国 RP-3 航空煤油的化学反应动力学模型是开展中国航空发动机燃烧室燃烧特性数值研究的 1 个必要条件。

## 2 燃烧反应机理

### 2.1 反应机理的构建

在 RP-3 航空煤油初期的研究中,一般用单组分  $C_{12}H_{23}$  作为其模拟替代燃料,构建的化学反应机理一般为简单多步化学简化机理。为了有效地开展航空发动机燃烧室数值模拟,提高航空煤油燃烧计算结果的精度,需要在简单几步的基础上对航空煤油的反应机理进行多步化学反应的研究,构建化学反应动力学模型,以达到航空发动机燃烧室数值模拟的要求。RP-3 航空煤油的主要成分为烷烃,其特点主要是高温燃烧反应以自由基的链反应为主,由于高温燃烧反应的种类有限,了解每个基元反应的顺序及反应路径,在根本上理解反应过程,对控制整个化学反应过程具有重要意义。

数值模拟首先需建立化学反应动力学模型。在航空煤油替代燃料的初步研究阶段,研究人员提出将正癸烷或者正十二烷作为替代燃料。Nehse 等<sup>[19]</sup>提出详细的正癸烷和正庚烷的动力学反应机制,模拟数值在很宽的温度、压力、当量比范围内与试验的点火延迟数据非常吻合;Dagaut 等<sup>[14]</sup>建立 4 种模拟替代燃料模

型,并建立 209 种组分、1673 步反应的详细动力学模型,结果表明,3 组分模型最适合用于模拟搅拌反应器(Jet Stirred Reactor,JSR)实验,同时成功模拟了煤油/氧气/氮气预混合富燃时的火焰结构;于维铭<sup>[20]</sup>建立 4 组分模拟替代燃料模型,并发展了包含 168 种组分、1089 步基元反应的详细机理,通过计算结果与试验结果进行对比发现,此四组分混合机理具有良好的模拟计算性能。目前详细机理主要来自劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory,LLNL)、美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology,NIST)、四川大学等,研究人员通过简化单一组分机理、组合多个组分机理进行模拟仿真,构建最终的替代燃料反应机理。

### 2.2 反应机理的简化

目前的计算机技术水平很难实现详细化学动力学模型的直接模拟,因此航空煤油燃烧反应动力学模型的简化是现阶段航空发动机燃烧室燃烧数值模拟研究中的重要问题之一,简化模型可以提高 CFD 数值模拟的计算效率,采用现阶段的技术能计算更加复杂的流场,开展更准确的数值模拟。用于简化详细机制的方法可以分为 2 种:第 1 种称为骨骼机制,即删掉不重要的组分和反应方程,只保留关键组分和反应方程,例如:敏感分析(Sensitivity Analysis,SA)法、直接关系图(Directed Relation Graph,DRG)法,得到的机理称为骨架机理,在 DRG 法的基础上,Manikantachari<sup>[21]</sup>提出反应路径流量分析(Path Flux Analysis,PFA)法,并对比正十二烷的半详细机理简化结果发现,PFA 法能够有效地减少详细机理的物种数目,同时保留主要的反应路径;第 2 种是简化机理,即根据组分的特征反应时间区分稳态组分,采用数学方法对详细机理进行简化,例如:采用准稳态假设(Quasi-Steady State-Analysis,QSSA)法、计算奇异摄动(Computational Singular Perturbation,CSP)法、本征低维流形(Intrinsic Low-Dimensional Manifolds,ILDM)法,得到的机理称为简化机理。在传统的 CSP 算法基础上,吴作柱<sup>[22]</sup>对准稳态物质进行积分,提出积分 CSP 算法(Integral Computational Singular Perturbation,ICSP)生成简化机理。

国内外研究者采用多种方法进行机理的简化,见表 4。Montgomery<sup>[23]</sup>提出 4 组分模拟替代燃料详细化学反应动力学模型机理,并根据不同工况进行简化,

表 4 煤油替代燃料机理简化

研究者	替代燃料名称	简化前		简化后	
		组分数	反应数	组分数	反应数
Montgomery <sup>[23]</sup>	正癸烷、正十二烷、 丁苯、甲基环己烷	164	1162	25/30	34
肖保国 <sup>[24]</sup>	正癸烷	109	946	22	18 步总包
刘建文 <sup>[28]</sup>	正癸烷、正丙基 环己烷、正丙基苯	209	1673	24	20
陈登炳 <sup>[29]</sup>	正十二烷、1, 3, 5- 三甲基环己烷、 正丙基苯	257	874	59	158

均显示出良好的模拟结果;肖保国等<sup>[24]</sup>参考张若凌<sup>[25]</sup>提出的 RP-3 型煤油替代模型进行研究,构建了 1 个包含 109 种组分、946 步基元反应的正癸烷单一组分煤油燃烧详细化学反应动力学模型,并采用准稳态假设方法对其进行简化,得到包含 22 种组分、18 步总包反应的简化反应模型,能够准确反映出 RP-3 航空煤油的点火特性,可对煤油燃烧问题进行准确的数值模拟,此外,对点火特性和组分分布进行了验证,用于比对 Freeman<sup>[26]</sup>和 Mullins<sup>[27]</sup>针对 JP-8 的着火延迟试验结果;刘建文等<sup>[28]</sup>针对法国 Dagaut<sup>[14]</sup>课题组提出的 3 组分模拟替代燃料机理,采用直接关系图法和稳态假设法得到 84 种组分骨架机理和 24 种组分、20 步反应的简化反应机理,在较宽的参数范围内得到的结果与采用详细机理得到的一致;陈登炳等<sup>[29]</sup>对 RP-3 煤油 3 组分模拟替代燃料详细机理进行简化,得到 59 种组分、158 步反应的简化机理,其数值计算结果与试验数据比较吻合。

此外,Wang<sup>[30]</sup>对生物柴油燃料的雾化和燃烧进行模拟时,提出解耦物理化学替代(Decoupling Physical-Chemical Surrogate, DPCS)的方法,先引入生物柴油的替代燃料来表征实际生物柴油主要成分物理特性,同时构建的替代燃料机理很好地再现了实际生物柴油的化学特征。

### 2.3 反应机理的验证

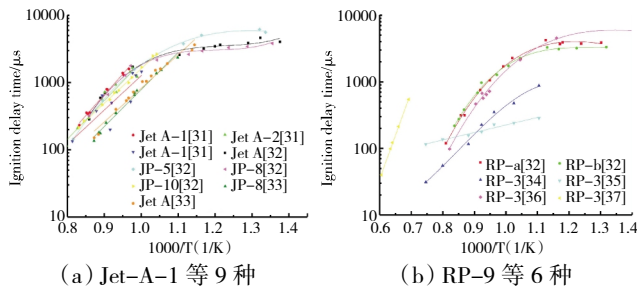
建立化学反应动力学模型之后,模拟结果需要与实验结果进行对比,验证反应动力学机理的准确性,并进行适当的优化,因此实验也是机理研究的重要组成部分。在验证机理时,大多数研究人员采用与实际燃烧结果对比的方法,比如对于燃料的着火延迟时间和燃烧速度,只有少数研究者测量了其中间产物和燃

烧产物。将模拟结果与实际燃烧结果进行比较,在替代燃料的选择时具有指导意义;将模拟结果与实际中间产物进行比较,在构建和简化机理时具有指导意义;将模拟结果与最后燃烧产物进行比较,对于航空发动机的整体设计和改进具有指导意义。研究燃烧过程中的中间产物,如自由基、原子、离子对燃料的燃烧效率、污染物的形成有重要的影响,为加强对燃烧过程的认识和控制,发展出能够精确模拟航空煤油的替代燃料的反应动力学模型,并将其应用于航空发动机燃烧室燃烧过程的数值模拟计算中,对替代燃料的燃烧反应机理进行了研究。目前对于替代燃料在 Chemkin 中模拟结果的研究分为 3 方面:着火延迟时间、组分质量分数、层流燃烧速度。迄今为止,中国对于替代燃料的研究仅停留在数值模拟结果与实际燃料对比验证方面。在对实际燃料进行化学特性研究时,对于着火延迟时间和层流燃烧速度研究得较多,而对其组分质量分数的研究相对较少,应加大采用 JSR 等设备对燃料中间产物进行研究的力度,这对于化学反应动力学模型的建立具有指导意义。

### 3 RP-3 航空煤油着火延迟特性

着火延迟时间是表征未燃混合气体着火特性的主要特征参数,也是判定和验证模拟替代燃料选择是否合理的基础。为了验证和提高化学反应动力学模型的准确性和适用性,国内外开展了大量关于航空煤油着火延迟的试验,研究各种煤油在多种工况下的着火延迟时间,以及混合气压力  $P$ 、温度  $T$ 、当量比  $\Phi$ (无量纲)等因素对着火延迟的影响。

早期关于煤油的点火数据很少,国外近 30 年才开始利用激波管等设备对煤油燃料燃烧进行研究,不同型号煤油的着火延迟时间如图 1 所示。Davidson 等<sup>[27-28]</sup>用激波管研究了 JP-5、JP-8、JP-10、Jet-A 等燃料在一定条件下的点火延迟时间;Vasu 等<sup>[33]</sup>在激波管中测量了 Jet-A 航空煤油的着火延迟时间,并对混合气当量比的影响以及负温度系数特性进行了归一法分析。在中国,主要研究对象是 RP-3 航空煤油;Liang 等<sup>[34]</sup>利用加热激波管研究了煤油在高压条件下的点火特性,获得了高压条件下煤油点火延迟时间与点火温度、压力、化学当量比、煤油和氧气质量分数的依赖关系;唐洪昌等<sup>[35]</sup>通过在加热激波管中反射激波,测量了气相煤油和空气混合物的着火延迟时间;Zhang 等<sup>[36]</sup>

图 1 不同型号煤油着火延迟时间<sup>[31-32]</sup>

提出了正癸烷和 1,2,4- 三甲基苯的 RP-3 航空煤油替代燃料,并计算了温度为 650~1500 K,压力为 0.1~2.0 MPa,当量比为 0.2、1.0、2.0 条件下的着火延迟时间,与实际 RP-3 航空煤油以及 Jet-A 航空煤油实验数据吻合较好;张英佳等<sup>[37]</sup>测量了航空煤油的着火滞燃期,并对新的 3 组分煤油替代品进行数值模拟,在整个模拟范围内有很好的吻合性。通过比较大量试验研究结果可知,在不同压力和当量比下,在 1000 K 以上高温下,RP-3 航空煤油着火延迟时间的对数与着火温度的倒数成线性关系;而在 1000 K 以下时,碳氢燃料会出现随温度上升着火延迟时间呈指数减小的负温度系数 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 效应。

#### 4 RP-3 航空煤油燃烧特性

层流火焰理论是湍流火焰理论模型建立的基础,也是多种预混与湍流燃烧模型研究的基础。通过试验分析可获取燃料燃烧速率、马赫斯坦长度、火焰稳定性等预混层流燃烧特性参数;通过建立基于燃烧反应动力学机理的理论模型对层流燃烧进行模拟计算;通过与实际燃料的层流燃烧速度进行对比,判定和验证模型的准确性与适用性。

国内外开展了大量层流燃烧特性试验,如图 2 所示。Kumar 等<sup>[38]</sup>研究了 Jet-A 和 S-8 的层流燃烧速度和熄灭拉伸率,表明尽管二者的火焰传播特性相似,但其熄灭极限明显不同;Singh 等<sup>[39]</sup>采用预混球形燃烧器对正癸烷和 Jet-A 航空煤油的层流燃烧速度和马赫斯坦长度进行了试验测量;Vukadinovic<sup>[40]</sup>采用定容反应器对 Jet-A-1 航空煤油的层流

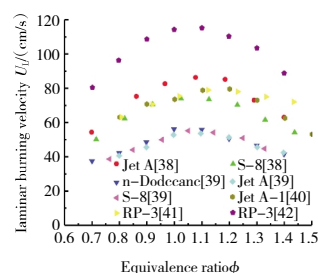


图 2 不同型号煤油层流燃烧速度

燃烧速度和马赫斯坦长度进行了试验测量,同时分析了初始压力、初始温度、当量比对层流燃烧速度的影响;曾文等<sup>[41]</sup>利用定容燃烧反应器试验装置对 RP-3 航空煤油的层流燃烧速度和燃烧稳定性进行了测量,并分析了初始压力、温度、当量比对 RP-3 航空煤油层流燃烧速度的影响;马洪安<sup>[42]</sup>完成了国产 RP-3 航空煤油燃烧特性试验,分析得到了燃料的层流燃烧速率、马赫斯坦长度等重要的预混层流燃烧特性参数;方文等<sup>[43]</sup>以 RP-3 航空煤油预混预蒸发灯燃烧火焰为对象验证其简化机理,表明此机理在保证计算精度的条件下可用于 RP-3 航空煤油实际工程燃烧问题的数值模拟。大量的试验研究表明:在不同工况下,层流燃烧速度最大值出现在当量比为 1.0~1.2 时。

#### 5 结束语

本文介绍了 RP-3 航空煤油替代燃料的研究进展;阐述了 RP-3 航空煤油替代燃料详细反应机理的构建及其简化;对简化机理的着火延迟时间以及层流燃烧速度进行了计算,并将计算结果与实际航空煤油的实验数据进行比较,验证了替代燃料选取的合理性。

综上所述,提出以下建议:

(1) 针对 RP-3 航空煤油的替代燃料化学反应的低温和中温研究相对较少,在寻找模拟替代燃料时,应满足在宽工况范围的试验条件下与着火燃烧试验吻合;

(2) 针对模拟替代燃料的着火与燃烧特性验证的研究很少,也缺乏其在射流搅拌反应器等设备中生成物试验数据,应加强此方面投入和研究;

(3) RP-3 航空煤油的模拟替代燃料反应机理由成百上千个中间组分和基元反应组成,直接应用于 CFD 计算难以实现,在简化机理时可以采用解耦法等方法进行简化。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Mzé-Ahmed A, Hadj-Ali K, Diévar P, et al. Kinetics of oxidation of a reformulated jet fuel (1-Hexanol/Jet A-1) in a jet-stirred reactor: experimental and modeling study [J]. Combustion Science and Technology, 2012, 184 (7-8): 1039-1050.

- [3] Chickos J S, Zhao H. Measurement of the vaporization enthalpy of complex mixtures by correlation-gas chromatography. The vaporization enthalpy of RP-1, JP-7, and JP-8 rocket and jet fuels at  $T=298.15$  K[J]. *Energy and Fuels*, 2005, 19 (5): 2064-2073.
- [4] Wang B Y, Liu Y X, Weng J J, et al. An experimental and modeling study on the low temperature oxidation of surrogate for JP-8 part II: comparison between neat 1,3,5-trimethylbenzene and its mixture with n-decane[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 192: 517-529.
- [5] 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)
- [6] 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 thermo-physical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27 (2): 187-192. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 周舟, 范玮, 靳乐, 等. 单个 RP-3 航空煤油液滴的超临界蒸发实验研究[J]. *推进技术*, 2016, 37(8): 1422-1430.  
ZHOU Zhou, FAN Wei, JIN Le, et al. Experimental investigation on supercritical evaporation of RP-3 aviation kerosene droplet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37 (8): 1422-1430. (in Chinese)
- [9] 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.  
CHENG Zeyuan, ZHU Jianqin, JIN Zhao. Study on surrogate model of endothermic hydrocarbon fuel RP-3 [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31 (2): 391-398. (in Chinese)
- [10] Widegren J A, Bruno T J. Thermal decomposition kinetics of the aviation turbine fuel Jet-A [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, 47 (13): 4342-4348.
- [11] Lindstedt R P, Maurice L Q. Detailed chemical kinetic model for aviation fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16 (2): 187-195.
- [12] Douté C, Delfau J L, Akrich R, et al. Chemical structure of atmospheric pressure premixed n-decane and kerosene flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1995, 106(4-6): 327-344.
- [13] Patterson P M, Kyne A G, Pourkashanian M, et al. Combustion of kerosene in counterflow diffusion flames [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(2): 453-460.
- [14] Dagaut P, Bakali A E, Ristori A. The combustion of kerosene: experimental results and kinetic modelling using 1- to 3- component surrogate model fuels [J]. *Fuel*, 2006, 85 (7): 944-956.
- [15] Huber M L, Lemmon E W, Ott L S, et al. Preliminary surrogate mixture models for the thermophysical properties of rocket propellants RP-1 and RP-2 [J]. *Energy and Fuels*, 2009, 23 (6): 3083-3088.
- [16] Huber M L, Smith B L, Ott L S, et al. Surrogate mixture model for the thermophysical properties of synthetic aviation fuel S-8: explicit application of the advanced distillation curve [J]. *Energy and Fuels*, 2008, 22 (2): 1104-1114.
- [17] 裴鑫岩, 侯凌云. 不同组分对航空煤油物性替代模型的影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(7): 774-779.  
PEI Xinyan, HOU Lingyun. Effect of different species on physical properties for the surrogate of aviation fuel [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57 (7): 774-779. (in Chinese)
- [18] 曾文, 李海霞, 马洪安, 等. RP-3 航空煤油模拟替代燃料的化学反应详细机理[J]. *航空动力学报*, 2014, 29 (12): 2810-2816.  
ZENG Wen, LI Haixia, MA Hongan, et al. Detailed chemical reaction mechanism of surrogate fuel for RP-3 kerosene [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29 (12): 2810-2816. (in Chinese)
- [19] Nehse M, Warnat J, Chevalier C. Kinetic modeling of the oxidation of large aliphatic hydrocarbons [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, 26 (1): 773-780.
- [20] 于维铭. 航空煤油替代燃料火焰传播速度与反应动力学机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.  
YU Weiming. Study on flame speed and chemical reaction mechanism for alternative fuels of aviation kerosene [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [21] Manikantachari K R V, Vesely L, Martin S, et al. Reduced chemical kinetic mechanisms for Oxy/Methane supercritical CO<sub>2</sub> combustor simulations [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140 (9): 092202.
- [22] 吴作柱. 内燃机燃料燃烧详细化学反应动力学机理简化研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
WU Zuozhu. Study on mechanism reduction for detailed chemical kinetic of IC engine fuel [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [23] Montgomery C J, Cannon S M, Mawid M A, et al. Reduced chemical kinetic mechanisms for JP-8 combustion [R]. AIAA-2002-0336.
- [24] 肖保国, 杨顺华, 赵慧勇, 等. RP-3 航空煤油燃烧的详细和简化化学动力学模型[J]. *航空动力学报*, 2010, 25 (9): 1948-1955.  
XIAO Baoguo, YANG Shunhua, ZHAO Huiyong, et al. Detailed and reduced chemical kinetic mechanisms for RP-3 aviation kerosene combustion [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25 (9): 1948-1955. (in Chinese)
- [25] Zhang R L, Jiang J, Le J L. The simulation of endothermic fuel flow in cooling channels of scramjet [C]//International Conference on Methods of Aerophysical Research. Gottingen: ICMAR, 2008: section VI: 1-7.
- [26] Freeman G, Lefebvre A. Spontaneous ignition characteristics of gaseous hydrocarbon-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 1984, 58 (2):

- 153-162.
- [27] Mullins B P. Studies on the spontaneous ignition of fuels injected into a hot air stream, part 2: the effect of physical factors upon the ignition delay of kerosene-air mixtures[J]. *Fuel*, 1953, 32(2): 234-252.
- [28] 刘建文, 熊生伟, 马雪松. 基于 DRG 和 QSSA 方法的煤油详细燃烧机理简化[J]. *推进技术*, 2011, 32(4): 525-529, 549.  
LIU Jianwen, XIONG Shengwei, MA Xuesong. Reduction of kerosene detailed combustion reaction mechanism based on DRG and QSSA[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(4): 525-529, 549. (in Chinese)
- [29] 陈登炳, 刘云鹏, 方文, 等. 一种 RP-3 航空煤油的三组分替代燃料简化机理构建与验证[J]. *推进技术*, 2019, 40(3): 691-698.  
CHEN Dengbing, LIU Yunpeng, FANG Wen, et al. A simplified mechanism model of three component surrogate fuels for RP-3 aviation kerosene and its verification[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(3): 691-698. (in Chinese)
- [30] Wang P, Jia M, Zhang Y, et al. Development of a decoupling physical-chemical surrogate (DPCS) model for simulation of the spray and combustion of multi-component biodiesel fuels [J]. *Fuel*, 2019, 240: 16-30.
- [31] Davidson D F, Zhu Y, Shao J, et al. Ignition delay time correlations for distillate fuels [J]. *Fuel*, 2017, 187: 26-32.
- [32] Davidson D F, Shao J, Parise T, et al. Shock tube measurements of jet and rocket fuel ignition delay times[R]. AIAA-2017-1798.
- [33] Vasu S S, Davidson D F, Hanson R K. Jet fuel ignition delay times: shock tube experiments over wide conditions and surrogate model predictions[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 152(1): 125-143.
- [34] Liang J, Wang S, Hu H, et al. Shock tube study of kerosene ignition delay at high pressures[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(6): 947-954.
- [35] 唐洪昌, 张昌华, 李萍, 等. 煤油自点火特性的实验研究[J]. *物理化学学报*, 2012, 28(4): 787-791.  
TANG Hongchang, ZHANG Changhua, LI Ping, et al. Experimental study of autoignition characteristics of kerosene [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(4): 787-791. (in Chinese)
- [36] Zhang C, Li B, Rao F, et al. A shock tube study of the autoignition characteristics of RP-3 jet fuel [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3151-3158.
- [37] 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): 88-96.  
ZHANG Yingjia, HUANG Zuohua, WANG Jinhua, et al. Shock tube study on auto-ignition characteristics of kerosene/air mixtures[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 88-96. (in Chinese)
- [38] Kumar K, Sung C J, Hui X. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative jet fuels [J]. *Fuel*, 2011, 90(3): 1004-1011.
- [39] Singh D, Nishiie T, Qiao L. Laminar burning speeds and Markstein lengths of n-Decane/air, n-Decane/O<sub>2</sub>/He, Jet-A/air and S-8/air flames [R]. AIAA-2010-954.
- [40] Vukadinovic V, Habisreuther P, Zanzalis N. Influence of pressure and temperature on laminar burning velocity and Markstein number of kerosene Jet A-1: experimental and numerical study [J]. *Fuel*, 2013, 111: 401-410.
- [41] 曾文, 陈欣, 马洪安, 等. RP-3 航空煤油层流燃烧特性的实验[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(12): 2888-2896.  
ZENG Wen, CHEN Xin, MA Hongan, et al. Experiment on laminar combustion characteristics of RP-3 kerosene [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(12): 2888-2896. (in Chinese)
- [42] 马洪安. 国产 RP-3 航空煤油着火与燃烧特性的实验与数值研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2016.  
MA Hongan. Experimental and numerical investigation on ignition and combustion characteristics of chinese RP-3 kerosene [D]. Liaoning Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [43] 方文, 颜应文, 刘云鹏, 等. RP-3 航空煤油三组分替代燃料简化机理验证[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(9): 2101-2111.  
FANG Wen, YAN Yingwen, LIU Yunpeng, et al. Simplified mechanism verification of three component surrogate fuels for RP-3 aviation kerosene[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(9): 2101-2111. (in Chinese)

(编辑: 刘静)