

基于射流搅拌燃烧反应器加压条件下的 航空煤油燃烧 NO_x 排放

张 弛, 田 野, 薛 鑫, 林宇震, 许全宏

(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级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为了研究碳氢燃料燃烧产物 NO_x 的排放, 构建了射流搅拌燃烧反应器(JSCR)试验系统, 并经过了初步验证. 随后利用该试验系统对航空煤油 RP-3 的燃烧 NO_x 排放进行了测试, 射流搅拌燃烧反应器内压力为 2×10^5 Pa 和 3×10^5 Pa, 进口温度为 650 K, 当量比范围为 0.5~1.2. 研究表明: 在当量比为 0.5~1.2 范围内, 航空煤油燃烧 NO_x 排放先随当量比的增大而增多, 在当量比为 0.95 附近达到最大值, 随后减少; NO_x 排放随压力的增大而增多. 同时, 验证了该射流搅拌燃烧反应器可作为研究碳氢燃料燃烧产物的基础试验平台.

关 键 词: 航空发动机; 射流搅拌燃烧反应器; 航空煤油; 燃烧; NO_x 排放

中图分类号: V23

文献标志码: A

NO_x emissions of kerosene combustion at elevated pressure jet stirred combustion reactor

ZHANG Chi, TIAN Ye, XUE Xin, LIN Yu-zhen, XU Quan-hong

(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: In order to study the combustion product NO_x emissions of hydrocarbon fuel, a jet stirred combustion reactor (JSCR) experimental system was built and validated preliminarily. Then, kerosene RP-3 combustion NO_x emission was tested using the experimental system under the conditions of pressures in jet stirred combustion reactor of 2×10^5 Pa and 3×10^5 Pa, inlet temperature of 650 K, and equivalence ratios of 0.5 to 1.2. The study results show that when equivalence ratio of 0.5 to 1.2, the amount of kerosene combustion NO_x emission firstly increases with the growing equivalence ratio and reaches the maximum value in the vicinity of the equivalent ratio of 0.95, and decreases subsequently; the amount of kerosene combustion NO_x emission increases with the pressure rise. The jet stirred combustion reactor can be used as a verification test rig for combustion products of hydrocarbon fuels.

Key words: aero-engine; jet stirred combustion reactor; kerosene;
combustion; NO_x emission

随着人们对气候变化和空气质量重视程度的不断加强, 航空动力装置产生的燃烧污染排放受

到极大的关注, 排放物受到了越来越严格的限制^[1]. 航空业所使用的燃料是液态碳氢燃料, 这种

收稿日期: 2013-05-28

基金项目: 北京航空航天大学“唯实”人才培养基金(青年教师人才培养)(YWF-11-03-Q-023)

作者简介: 张弛(1979—), 男, 四川成都人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机燃烧及传热传质研究.

选择是因为其能量密度高、燃烧释热强,所以在航空业应用广泛^[2]。液态碳氢燃料以航空煤油为主,其主要的污染排放物有 CO, UHC(未燃碳氢化合物), NO_x 以及冒烟。其中 NO_x 是影响较大的一类污染物,是同温层中破坏臭氧的主要因素,也是光化学烟雾产生的重要原因。

为解决航空业所带来的环境污染问题,需要从航空燃料的基础燃烧排放性质入手。目前国内对外对航空煤油的研究主要集中在反应机理上,提出了几种可行的代理燃料(surrogates)^[3-5],发展了详细和简化的反应机理,并从层流火焰传播速度、点火延迟时间、燃烧污染物排放等各方面进行了验证,对航空煤油的燃烧化学反应过程有了更深刻的认识。

射流搅拌燃烧反应器可构成理想的燃烧环境,用来研究航空煤油的基础燃烧特性,试验数据可用于验证和完善化学动力学模型^[6-7]。国外在利用射流搅拌燃烧反应器方面起步较早。美国最早的射流搅拌燃烧反应器是 20 世纪 50 年代由 Longwell 和 Weiss 采用射流增强掺混模拟完全搅拌的射流搅拌燃烧反应器^[8],在后来的研究中利用该射流搅拌燃烧反应器研究了燃烧过程中 OH 和 NO_x 的排放。美国 Dayton 大学的团队利用高压搅拌燃烧反应器进行多种碳氢燃料的燃烧产物研究^[9]。美国 Washington 大学的团队利用射流搅拌燃烧反应器对碳氢燃料的贫油预混燃烧进行研究,关注了燃烧产物中 NO_x 的排放^[10-11]。法国的研究者在完全搅拌燃烧反应器方面的研究更多关注化学动力学^[12],对碳氢燃料裂解产物等做了相当广泛的试验^[13]和数值模拟。目前国内在利用射流搅拌燃烧反应器方面的研究较少,主要集中在利用 CHEMKIN 软件的搅拌燃烧反应器(PSR)模块进行计算。刘建文等人^[14]选择了正癸烷、正丙基环己烷和正丙基苯作为航空煤油代理燃料,对其详细反应机理进行简化,通过 PSR 和点火延迟的数据证明了简化机理的准确性。王慧汝等人^[15]基于充分搅拌燃烧反应器模型,改进了相关性分析方法和主成分分析方法的应用方式,对航空煤油代理燃料的详细反应机理进行了简化。

通过上文可知,航空煤油代理燃料的构建大部分仅依据单一试验数据或假想的真实燃料的计算数据,缺少系统完整的基于射流搅拌燃烧反应器的试验数据。本研究选用射流搅拌燃烧反应器作为试验核心部件的一大原因在于,利用射流搅拌燃烧反应器研究燃烧性质时,可以达到湍流混

合无限快,以至于在采样位置处的质量分数场和温度场是均匀的。并且射流搅拌燃烧反应器利用预混预蒸发反应物来消除液滴对燃烧的影响^[16];利用反应物的高速流入并不断搅拌来达到高的紊流水平^[17];利用高绝热性的腔壁材料来减少反应器中的热损失^[18]。射流搅拌燃烧反应器相关的影响因素有进口温度、驻留时间、压力、热损失等^[19]。

本研究利用射流搅拌燃烧反应器系统构成理想的燃烧环境,对航空煤油的 NO_x 排放进行试验研究,该系统在国内尚不多见。成果可以为相关研究者提供参考,对于建立不同碳氢燃料的反应机理数据库具有重要意义。

1 航空煤油组分分析

航空煤油的成分非常复杂,包括链烷烃、环烷烃以及芳香烃,而不同产地、不同批次的航空煤油在组分上存在差异^[20],差异组分将对其燃烧污染物排放造成影响。因此首先对本次试验所用的航空煤油 RP-3 进行组分分析,如图 1 所示为试验用航空煤油的烃类组成,图中所示的百分比为质量分数。其主要成分为链烷烃,占 60.85%,其次为环烷烃,占 32.35%,芳香烃占 4.62%。

采用色谱法对航空煤油进行了碳数分布分析,图 2 所示为航空煤油中烃类的碳数分布。从图

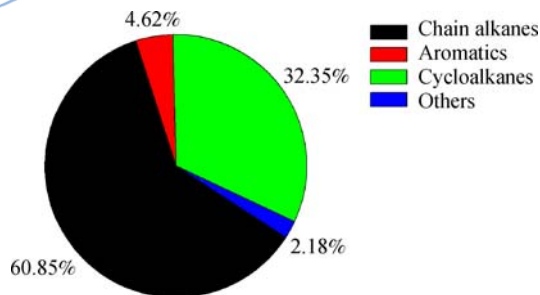


图 1 试验用航空煤油烃类组成

Fig. 1 Hydrocarbon composition of kerosene for experiment

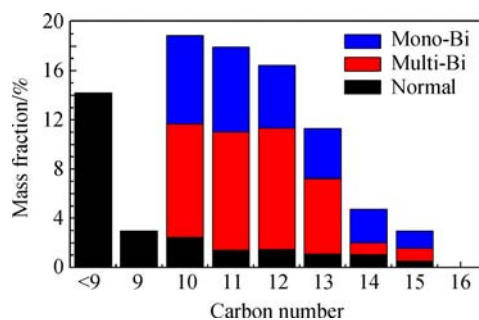


图 2 航空煤油中烃类的碳数分布

Fig. 2 Carbon number distribution of kerosene hydrocarbons

中可以看出,航空煤油的质量分布集中在碳数为 9~15 的烃类中,占总质量的 75% 以上. 其中最多的为 C₁₀, 占总质量的 18.85%; 碳数为 10~13 的烃类超过 10%, 占总质量的 64.54%. 碳数为 10~13 的烃类中,所占比例最大的是多甲基(multi-Bi)异构烃,其次为单甲基(mono-Bi)异构烃,正构烃(normal)最少;碳数为 14~15 的烃类中,所占比例最大的是单甲基异构烃. 在测试中存在一些误差:质量较大的分子被击碎成小分子,导致质量大的分子偏少,而质量小的分子偏多. 但是依然认为该图给出了航空煤油各组分的大致分布情况.

本文所使用的航空煤油的平均分子量为 145.59, 平均分子式为 C_{10.35} H_{20.83}, 碳氢摩尔比约为 0.5.

2 射流搅拌燃烧反应器试验系统

本研究使用的射流搅拌燃烧反应器结构如图 3 所示, 可实现燃料与空气均匀混合形成预混气, 并保证预混气在一定压力、温度、当量比、驻留时间的条件下稳定燃烧. 设计方案参考了美国 Washington 大学团队的设计方案^[21], 因为这种射流搅拌燃烧反应器最为接近航空发动机燃烧室主燃区的情况, 试验结果有助于对燃烧室污染排放的分析.

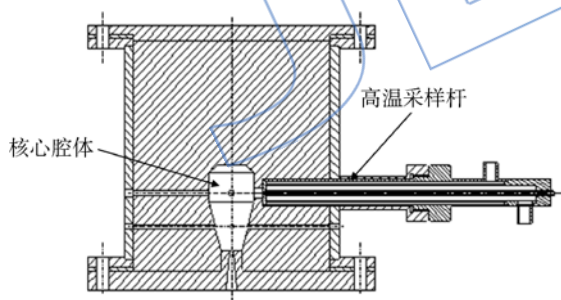


图 3 射流搅拌燃烧反应器结构图

Fig. 3 Structure diagram of jet stirred combustion reactor

选用耐高温、绝热的材料氧化铝作为射流搅拌燃烧反应器核心腔体浇注料, 最外层采用不锈钢制成壳体固定住氧化铝浇注体, 中间空心处即为核心腔体.

射流搅拌燃烧反应器核心腔体的工作原理如图 4 所示, 空气和燃料的预混气从射流搅拌燃烧反应器的下部中心以高速射流状态竖直向上进入核内, 射流冲击到上部顶端壁后沿径向回卷, 在平直段与射流之间形成周向均匀的回流区.

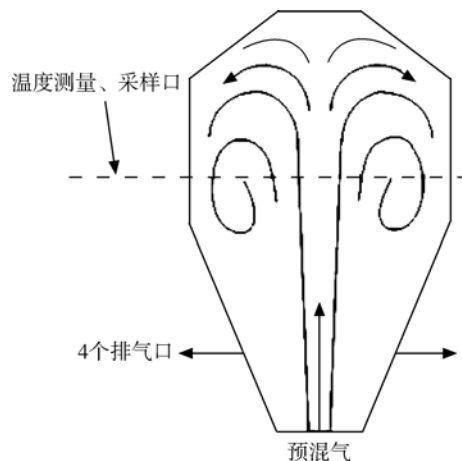


图 4 射流搅拌燃烧反应器的核心腔体工作原理

Fig. 4 Working principle of jet stirred combustion reactor's core cavity

核心腔体上部约 1/3 处周向均布 4 个孔, 用来点火、温度测量及安装高温采样探针. 该高度与射流搅拌燃烧反应器内部回流区中心高度一致, 燃烧场数值模拟结果表明, 在回流区中心位置的燃烧温度基本一致, 另外采样探针距离射流搅拌燃烧反应器核心腔体壁面有 3 mm, 从而对燃烧和产物排放造成的影响最小. 核心腔体下部约 1/3 处周向均布 4 个排气口. 表 1 为射流搅拌燃烧反应器的设计参数, 表 2 为射流搅拌燃烧反应器的结构参数.

表 1 射流搅拌燃烧反应器的设计参数

Table 1 Design parameters of jet stirred combustion reactor

进口温度/ K	腔内压力/ 10 ⁵ Pa	驻留时间/ ms	当量 比
300~800	1~5	0.5~10	0.4~1.2

表 2 射流搅拌燃烧反应器的结构参数

Table 2 Structure parameters of jet stirred combustion reactor

最大直径/ mm	腔体高度/ mm	氧化铝浇注体 直径/mm	体积/ mL
25	45	110	16

试验系统如图 5 所示, 试验所需空气通过限流孔控制流量, 精度为 ±3%. 在空气路通过加热器对空气加热, 使航空煤油蒸发与空气混合. 使用双柱塞流量泵平稳连续地向射流搅拌燃烧反应器提供航空煤油, 流量测量精度为 ±1.5%. 根据误差传递, 进入射流搅拌燃烧反应器的混合气当量

比精度为 $\pm 3.3\%$ 。饱和蒸汽压表征了液态燃料在一定温度下的蒸发或者凝结能力,本试验航空煤油当量比最大为1.2,最高压力为 3×10^5 Pa,根据其质量分数算得的分压值远小于温度为650 K时的航空煤油饱和蒸汽压,说明此时航空煤油完全蒸发是可能的。同时,为使液态航空煤油迅速雾化,并与热空气混合蒸发,设计了主要由毛细管喷嘴构成的煤油蒸发装置。最后通过采样探针将燃气导入燃气分析仪中,采样探针配以冷却水以保证迅速终止反应,并且保温使燃气中主要成分维持气态。

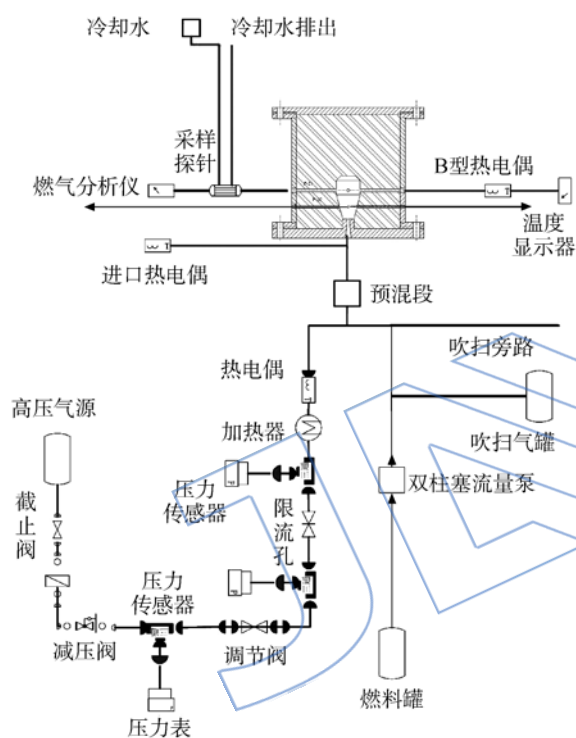


图5 射流搅拌燃烧反应器试验系统

Fig. 5 Experiment system of jet stirred combustion reactor

3 试验系统验证

为了验证本研究所使用的射流搅拌燃烧反应器的合理性,需要对其进行验证。验证用的燃料选择了甲烷,它是已知的最简单的气体碳氢燃料,国内外对其开展了深入的研究,试验数据比较全面。

Washington大学^[21]采用射流搅拌燃烧反应器对甲烷的燃烧产物 NO_x 开展了研究,驻留时间为1~4 ms,进口温度 T_{in} 为300~573 K,反应器内压力 p 为 $1 \times 10^5 \sim 6.5 \times 10^5$ Pa,反应器内燃烧温度为1800~1950 K,测量了 NO_x 的变化规律。得出 NO_x 在不同压力下当量比 φ 为0.68~0.72时随驻留时间的变化规律。如图6所示为本研究构

建的射流搅拌燃烧反应器试验系统在 3×10^5 Pa压力下甲烷燃烧 NO_x 排放结果与Rutar试验结果^[21]的对比。可见,随驻留时间的增大, NO_x 也增多,而文献^[21]只给出了驻留时间最大为3.5 ms的数据,此时本研究得到的 NO_x 排放数据在该文献的误差范围内。而本研究的射流搅拌燃烧反应器在长驻留时间下的 NO_x 排放也符合其发展趋势。

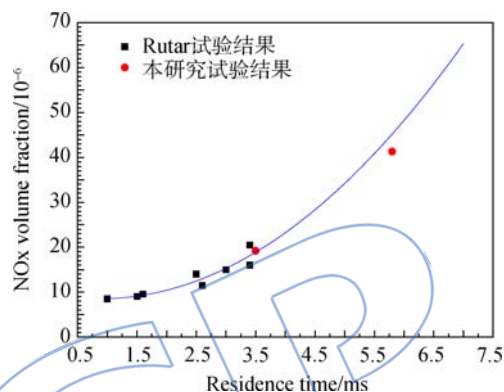


图6 甲烷燃烧 NO_x 排放验证

($T_{\text{in}} = 573$ K, $\varphi = 0.71$, $p = 3 \times 10^5$ Pa)

Fig. 6 Methane combustion verification for NO_x emission

($T_{\text{in}} = 573$ K, $\varphi = 0.71$, $p = 3 \times 10^5$ Pa)

除了进行射流搅拌燃烧反应器燃烧产物的验证外,还进行了碳平衡验证和径向温度分布验证。射流搅拌燃烧反应器碳平衡验证通过比较进口空气、燃料中碳的总量与燃气分析结果中碳的总量进行比较,试验结果与计算结果偏差小于5%,对于射流搅拌燃烧反应器而言,碳平衡偏差小于5%是可以接受的^[22]。射流搅拌燃烧反应器内温度沿径向分布比较均匀,如图7所示(τ 为驻留时

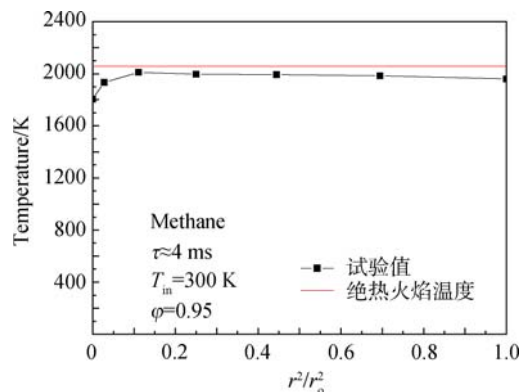


图7 射流搅拌燃烧反应器径向温度分布验证结果

Fig. 7 Validation results of radial temperature distribution in jet stirred combustion reactor

间, r_0 为外径, r 为径向环面距离). 射流搅拌燃烧反应器内温度沿径向分布以无量纲径向环面距离 (r^2/r_0^2) 作为横坐标. 在横坐标小于 0.1 时, 由于射流作用温度稍低; 在横坐标大于 0.1 直至壁面的范围内, 温度下降了 70 K 左右, 温度沿径向分布较均匀, 所以温度不均匀性对燃烧产物的影响较小. 而试验测量得到的温度小于绝热火焰温度, 主要是由于燃气与壁面的对流和辐射作用, 热电偶本身也有辐射热损失.

通过以上 3 个方面的试验测试, 验证了整个试验系统, 其产物受径向温度分布影响较小.

4 航空煤油试验结果及分析

基于射流搅拌燃烧反应器试验系统进行的航空煤油燃烧 NOx 排放的试验选取状态如下: 预混气总流量 $\dot{m}$ 为 1.3×10^{-3} kg/s, 驻留时间为 4.4 ~ 12 ms, 进口温度控制在 650 K, 当量比为 0.5 ~ 1.2, 搅拌器内压力分别为 3×10^5 Pa 和 2×10^5 Pa. 如图 8 所示为煤油燃烧 NOx 排放的试验结果.

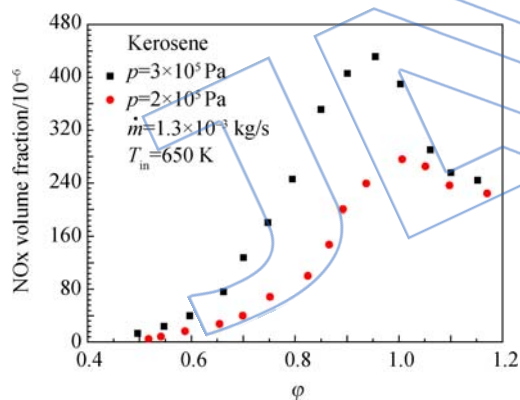


图 8 压力对基于射流搅拌燃烧反应器的航空煤油燃烧 NOx 排放的影响

Fig. 8 Influence of pressure on NOx emission generated from kerosene combustion in jet stirred combustion reactor

在相同进口温度、相同反应器内压力下, NOx 排在当量比为 0.95 ~ 1.0 达到最大; 在当量比大于 1.0 的范围内, NOx 排放随着当量比增加而减少, 减少幅度相对较小; 在当量比小于 0.95 的范围内, NOx 排放随着当量比的减少而减少, 减少幅度相对较大. 相同进口温度下, 比较 3×10^5 Pa 和 2×10^5 Pa 两种压力状态下 NOx 的排放情况. NOx 随压力增大而增大, 峰值都出现在当量比为 0.95 ~ 1.0 范围内. 随着压力从 $2 \times$

10^5 Pa 到 3×10^5 Pa, 当量比在 0.5 ~ 1.0 范围内, NOx 排放增加 2 ~ 3 倍; 当量比为 1.0 ~ 1.2 时, NOx 排放增大较少.

目前已知在燃烧中 NOx 的排放机理主要有热机理、瞬时机理和燃料型机理等^[23]. 其中热机理指的是空气中的 N_2 在高温下氧化成 NOx, 这是高温时产生 NOx 最主要的途径. 本试验驻留时间超过 4 ms, 文献[9]指出在 2 ms 以上时 NOx 的排放主要受热力 NOx 主导. 对于压力的影响, 由于压力增高, 燃烧效率相应增高, 燃烧的温度增高; 另一方面压力增大, 相同流量下, 驻留时间增大, 提供燃烧反应的时间增长, 所以压力升高 NOx 排放随之增大. 对于当量比的影响, 理论上当量比为 1.0 时, 绝热火焰温度最高, 无论当量比增加或者减少, 都会导致绝热火焰温度降低.

5 结论与展望

本研究利用经过验证的射流搅拌燃烧反应器试验系统对航空煤油 RP-3 燃烧的 NOx 排放进行试验研究, 工况为预混气总流量为 1.3×10^{-3} kg/s, 进口温度为 650 K, 当量比为 0.5 ~ 1.2, 得出以下主要结论:

- 1) 相同驻留时间和进口温度, 航空煤油燃烧的 NOx 排放随着压力的增大而增多.
- 2) 相同驻留时间和进口温度, 航空煤油燃烧的 NOx 排在当量比为 0.95 ~ 1.0 时达到最大值.
- 3) 在当量比为 0.5 ~ 0.95 (贫油) 的范围内, NOx 排放随着当量比的增大而增多; 在当量比为 1.0 ~ 1.2 (富油) 的范围内, NOx 随着当量比的增大而减少.

下一步将利用射流搅拌燃烧反应器研究不同压力、不同进口温度和驻留时间情况下的航空煤油燃烧 NOx 和 CO 等污染物排放, 并对煤基合成和生物燃料等航空替代燃料的污染排放进行研究, 构建并验证其反应机理.

致谢:

感谢天津大学化工学院提供了航空煤油试验用油及其组分分析数据.

参考文献:

- [1] International Civil Aviation Organization. International standards and recommended practices, environmental protection: Volume II aircraft engine emissions[M]. Montreal: International Civil Aviation, 1993.
- [2] Law C K. Dryden lecture: fuel options for next generation

- chemical propulsion[J]. AIAA Journal, 2012, 50(1): 19-36.
- [3] Honnet S, Seshadri K, Niemann U, et al. A surrogate fuel for kerosene[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 485-492.
- [4] Montgomery C J, Cannon S M, Mawid M A, et al. Reduced chemical kinetic mechanisms for JP-8 combustion[R]. Reno: 40th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2002.
- [5] Dagaut P. On the kinetics of hydrocarbons oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2002, 4(4): 2079-2094.
- [6] Dagaut P, Luche J, Cathonnet M. Reduction of NO by n-butane in a JSR: experiments and kinetic modeling[J]. Energy & Fuels, 2000, 14(3): 712-719.
- [7] Dagaut P, Luche J, Cathonnet M. Experimental and kinetic modeling of the reduction of NO by propene at 1 atm[J]. Combustion and Flame, 2000, 121(4): 651-661.
- [8] Longwell J P, Weiss M A. High temperature reaction rates in hydrocarbon combustion[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1955, 47(8): 1634-1643.
- [9] Blust J W, Ballal D R, Sturgess G J. Emissions characteristics of liquid hydrocarbons in a well stirred reactor[R]. Seattle: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1997.
- [10] Lee J C Y, Benjamin M A, Malte P C. Low NOx combustion for liquid fuels atmospheric pressure experiments using a staged prevaporized-premixer[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(4): 861-871.
- [11] Rutar T, Malte P C. NOx formation in high-pressure jet-stirred reactors with significance to lean-premixed combustion turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(4): 776-783.
- [12] Cong T L, Bedjanian E, Dagaut P. Oxidation of ethylene and propene in the presence of CO₂ and H₂O: experimental and detailed kinetic modeling study[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182(4/5/6): 333-349.
- [13] Zelina J, Ballal D R. Combustion and emissions studies using a well stirred reactor[R]. AIAA 94-2903, 1994.
- [14] 刘建文, 熊生伟, 马雪松, 等. 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, et al. 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)
- [15] 王慧汝, 金捷. 基于充分搅拌反应器模型简化详细反应机理[J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1497-1505.
- WANG Huiru, JIN Jie. Reduction of detailed reaction mechanism using methods based on simulations of perfectly stirred reactor[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1497-1505. (in Chinese)
- [16] 黄勇, 林宇震, 李锋, 等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [17] Kuo K K. Principles of combustion[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1986.
- [18] Stouffer S D, Striebig R C, Frayne C W, et al. Combustion particulates mitigation investigation using a well-stirred reactor[R]. AIAA-2002-3723, 2002.
- [19] Zelina J, Ballal D R. Combustor stability and emissions research using a well-stirred reactor[J]. Journal of Engineering for Gas turbines and Power, 1997, 119(1): 70-75.
- [20] Dayma G, Togbe C, Dagaut P. Detailed kinetic mechanism for the oxidation of vegetable oil methyl esters: new evidence from methyl heptanoate[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(9): 4254-4268.
- [21] Rutar T, Malte P C, Kramlich J C. Investigation of NOx and CO formation in lean-premixed, methane/air, high-intensity, confined flames at elevated pressures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(2): 2435-2441.
- [22] Steele R C. NOx and N₂O formation in lean premixed jet-stirred reactors operated from 1 to 7 atm[D]. Washington: University of Washington, 1995.
- [23] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.