

RP-3 航空煤油点火特性研究¹⁾

梁金虎^{*,†} 王 苏^{†,2)} 张 灿^{*,†} 张胜涛^{*} 范秉诚[†] 崔季平[†]

^{*}(重庆大学化学化工学院, 重庆 400044)

[†](中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 在预加热到 135°C 的激波管反射激波后 5 区, 以点火过程中 OH 自由基在 306.5 nm 处特征发射光谱强度的急剧变化作为点火发生的标志, 进行了 RP-3 航空煤油点火特性的实验研究. 实验温度范围为 800~1450 K, 当量比为 0.5, 1, 1.5, 压力为 0.05, 0.1, 0.2 MPa, O₂ 的摩尔浓度为空气含量 20%. 实验获得了低压条件下 (0.05, 0.1, 0.2 MPa) RP-3 航空煤油点火延时与点火温度、压力、当量比以及煤油和氧气浓度的依赖关系. 将低压实验结果与高压 (0.55, 1.1, 2.2 MPa) 条件下煤油点火特性进行了对比. 结果显示, 当量比对煤油点火特性的影响存在一个临界温度. 在临界温度以上的高温区, 煤油点火延时随当量比增加而增长; 在临界温度以下的低温区, 煤油点火延时随当量比增加而缩短; 这一临界温度随点火压力的降低而升高. 采用 3 种煤油燃烧反应动力学机理对煤油点火过程进行了动力学数值模拟, 并与实验结果进行了对比. 结果显示, Honnet 等提出的煤油反应机理在高压 (2.2 MPa) 下与实验结果吻合得很好, 而在低压下有一些差异. 对不同压力条件下的点火过程进行敏感度分析表明, 三体反应 $H+O_2+M=HO_2+M$ 在高压时对煤油点火起轻微抑制作用, 而在低压时对煤油点火起促进作用.

关键词 点火延时, 煤油, 激波管, 动力学模拟, 敏感度分析

中图分类号: O362 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-13-305

引言

碳氢燃料点火延时是表征燃料燃烧特性的重要基础数据, 同时也是验证燃烧反应化学动力学模型及其模型简化的重要依据^[1-2]. 实际工程应用中, 燃料点火延时也是超燃冲压发动机和脉冲爆轰发动机燃烧室设计时必须考虑的一个重要参数^[3-4]. 尤其是在超燃冲压发动机中, 气体的高速流动状态导致其在燃烧室内的驻留时间通常只有几个毫秒, 与驻留时间可比的碳氢燃料点火延时时间成为燃烧室工作状态非常重要的参数, 碳氢燃料的点火特性是超燃发动机研究中关注的重要问题.

乙煤油是典型的碳氢燃料, 具有较为稳定的热力学特性和较高的体积能量密度, 是超燃冲压发动机和脉冲爆轰发动机的首选预期燃料^[4]. 本文的研究燃料 RP-3 航空煤油是我国超燃冲压式发动机研究中的主要燃料. 目前, 国内外研究人员进行了大量关于碳氢燃料点火延时测量的研究工作, 但是研究燃料主要集中在单组份燃料, 而针对煤油这种

高碳数大分子混合物燃料的研究相对较少. 早期对于煤油点火特性的研究主要在流动反应装置上进行. 这一时期最具代表性的工作是 Mullins^[5] 完成的, 他利用类似于流动反应管的装置进行了煤油点火特性的实验研究, 但实验来流为有“污染”的空气. Dagaut 等^[6] 通过测定煤油燃烧产物组成, 在流动搅拌反应器中进行了法国航空煤油燃烧特性的研究, 并建立了模拟法国航空煤油燃烧反应的详细动力学模型. Dean 等^[7] 在加热型激波管中测量了 Jet-A 在空气中的点火延时, 实验条件为 $\phi = 0.5, 1.0, 2.0$, 压力 (0.85 ± 0.1) MPa、温度范围 1000~1700 K. Vasu 等^[8] 利用激波管考察了 Jet-A 和 JP-8 的点火特性, 实验压力范围 1.7~5.1 MPa, 温度范围 715~1229 K, 氧气含量分别为 10% 和 21%. 在 Jet-A 含量为 9×10^{-4} 的高稀释度条件下, Steil 等^[9] 测量了 Jet-A 在温度为 1250~1700 K 内的点火延时, 实验压力范围为 0.29~0.59 MPa. Kumar 和 Sung^[10] 在预热的重活塞压缩反应器 (RCM) 中考察了 Jet-A 和 JP-8 在压力分别为 0.7, 1.5, 3.0 MPa, 温度为 650 K~1100 K 条件

2013-09-18 收到第 1 稿, 2013-11-12 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (90916017).

2) 王苏, 副研究员, 主要研究方向: 高温气体特性的激波管实验. E-mail: suwang@imech.ac.cn

下的点火特性. 在国内, 王苏等^[11]利用激波管测量了高氩气稀释度(93%~98%)条件下气相煤油在0.16~0.5 MPa范围内的点火延时. 廖钦等^[12]利用雾化激波管对雾化煤油在0.1~0.6 MPa范围内的非均相点火进行了相关研究. 张英佳等^[13]利用激波管考察了雾化煤油在高温常压(1 445~1 650 K, 0.1 MPa)条件下的点火特性. 近期, 本文作者利用加热激波管考察了煤油在高压(0.55, 1.1, 2.2 MPa)条件下的点火特性, 获得了高压条件下煤油点火延时与点火温度、压力、化学当量比以及煤油和氧气浓度的依赖关系^[14]. 以上研究中, 国外研究所用的煤油大部分是Jet-A和JP-8, 国内研究所用的燃料是RP-3航空煤油. 然而, 这几种煤油在化学组成上的差异是否会导致点火和燃烧特性的改变还需要进一步确定. 此外, 已有实验和动力学模拟研究表明燃料在低压和高压下由于燃烧反应机理的变化呈现出不同的点火特性^[15-17].

本文在预加热到135°C的激波管中进行了RP-3航空煤油点火特性研究, 实验温度范围为800~1 450 K、当量比为0.5, 1, 1.5, 压力为0.05, 0.1, 0.2 MPa. 将本文结果与本课题组已获得的高压(0.55, 1.1, 2.2 MPa)条件下煤油点火特性^[14]进行对比, 特别关注煤油在高压和低压条件下点火特性的差异. 同时, 采用现有的3种煤油燃烧反应动力学模型对煤油点火过程进行了数值模拟, 并将模拟结果与实验结果进行了对比.

1 实验方法

实验在中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室高温高密度激波管系统上进行. 该激波管高压段长3.0 m, 低压段长4.1 m, 双膜段长0.2 m, 内径均为0.1 m, 采用双膜结构, 实验装置如图1所示.

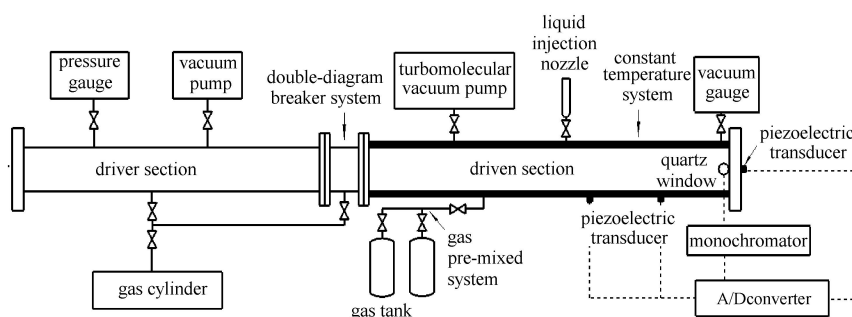


图1 激波管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the shock tube

激波管的外壁用加热带和保温材料缠绕, 使得管壁温度维持在135°C. 低压室最大漏率维持在1 Pa/min以下. 由位于低压室侧壁和端盖处分别相距0.5 m的3个压电传感器测量入射激波速度, 反射激波后5区压力由端盖处的压电传感器记录. 靠近低压室端盖处开有一内径为8 mm的石英光学窗口, 实验时单色仪通过此石英窗口测定燃料点火过程中OH自由基发射光谱强度的时间历史作为判定点火发生的依据. 压力传感器和单色仪记录的信号通过A/D转换连接电脑.

通过3个压力传感器测量入射激波速度, 利用一维激波关系确定反射激波后5区温度和压力作为燃料点火的初始状态, 本文采用Gaseq软件^[18]计算5区状态. 实验中当测定的点火延时时间超过3 ms时, 采用缝合接触面运行, 激波管实验时间可以扩

展到6~8 ms.

对点火发生的判定可以采用多种方式: (1) 点火后压力的突然升高; (2) 表征燃烧过程的自由基OH, CH或稳定中间产物(如C₂H₄)浓度变化率最大点; (3) OH等这些组元浓度或压力达到最大峰值的时刻; (4) OH等组元浓度或压力最大变化率处斜率外推到其信号基线相交点. 相对于传统的压力测量, 监测OH, CH自由基浓度变化的光谱方法具有更高的灵敏度. 在低稀释度条件下(稀释气体含量小于90%), 不同点火定义获得的点火延时时间相差在2%以内. 在高稀释度条件下(稀释气体含量大于90%), 由于燃料点火后释热量较小, 点火造成的压力突升不明显, 采用更为敏感的OH, CH发射谱强度变化来作为点火发生的标志将更为准确^[1]. OH自由基是碳氢燃料点火燃烧反应过程中重要的中间产物, 本实验选取

OH 自由基在 306.5 nm 处 ($A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Pi_i$) 的特征发射光谱强度突越的起始点作为点火发生的时间。

反射激波后 5 区平台形成表示实验气体已处于一定的温度压力环境中, 从平台形成到点火发生的这段时间被定义为点火延时时间. 图 2 是典型的激波管点火实验记录图, 图中 Pressure 为低压室端盖处的压电传感器记录的 5 区压力信号, I_{OH} 为 OH 自由基发射光谱信号. 图中显示了反射激波后 5 区压力和 OH 自由基发射谱强度的时间历史, 从图中可以清楚地看到点火发生后 5 区压力和 OH 自由基强度同时发生的急剧变化。

Ar 是目前激波管实验中常用的稀释气体. 实际工程中超燃发动机来流为空气, 似乎 N_2 更适合作为稀释气体. 燃料点火延时激波管实验大部分都使用 Ar 而不是 N_2 作为稀释气体, 主要有 2 个原因: (1) 在反射激波后双原子气体 N_2 的振动弛豫等非平衡过程将引起 5 区温度和压力的变化, 给测量带来误差. 采用单原子 Ar 作为稀释气体, 避免了振动弛豫的影响. (2) 使用单原子 Ar 作为稀释气体, 可以消除或者减弱反射激波在激波管低压段端盖处的激波分叉现象对 5 区状态的影响。

煤油是多种高碳数碳氢燃料的混合物, 常温下饱和蒸气压较低, 在激波管内壁存在一定的吸附. 为了考察管壁吸附对煤油气相浓度确定的影响, 在激波管中考察了 RP-3 航空煤油吸附特性, 测定了煤油在恒温加热到实验初始温度 135 °C 的激波管低压室中的吸附曲线. 由测量的煤油吸附曲线得知, 当煤油注入激波管内 6 min 后, 煤油蒸气压力趋于稳定, 说明吸附已经达到平衡. 本文没有采用传统的预先将燃料、氧化剂以及稀释气体混合成样品气体, 在实验时再将预混样品气体注入激波管低压室的进样方式. 本文实验时, 将一定量的液体煤油直接注入已达极限真空状态的激波管低压室中, 用真空压力计测量注入 6 min 后达到吸附平衡的煤油蒸气压力, 再加入 O_2/Ar 混合气体, 混合 10 min 后进行破膜. 将达到吸附平衡的煤油气相分压作为实验样品中煤油的气相浓度, 在很大程度上避免了壁面吸附导致的煤油浓度不确定性对实验结果的影响. 本实验中激波管低压段被加热恒定在 135 °C, 提高管壁温度一方面减小了煤油在管壁的吸附程度, 同时也提高了煤油的饱和蒸气压, 进一步扩展了实验时煤油的浓度范围。

实验结果的不确定性主要由气体的非理想性和

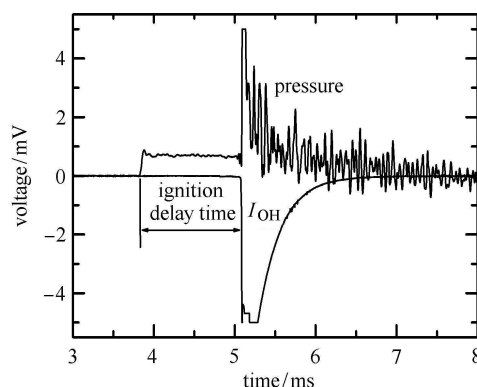


图 2 典型实验信号记录

Fig. 2 Typical signal records

测量过程中的误差造成. 在本实验中, 激波速度的测量带来的误差约为 0.5%, 这给反射激波后 5 区的温度和压力分别带来 1% 和 2% 的计算误差, 这将导致实验中测量的点火延时结果大约有 10%~15% 的误差. 这一误差基本上与国外测量结果误差处于同一水平^[19].

2 实验结果与讨论

在激波管反射激波后 5 区, 测量了 RP-3 航空煤油的点火延时, 实验温度范围为 800~1450 K, $\phi = 0.5, 1, 1.5$, 压力分别为 0.05, 0.1, 0.2 MPa. 获得了此条件下煤油点火延时与点火温度、压力、当量比以及煤油和氧气浓度的拟合关系式. 将拟合结果与本课题组已获得的高压 (0.55, 1.1, 2.2 MPa) 条件下煤油点火特性^[14]进行了对比, 发现煤油在低压和高压条件下的点火延时与这些拟合参数的依赖关系是不同的。

低压条件下, 压力为 0.05, 0.1, 0.2 MPa 时, 拟合结果

$$t_{\text{ign}} = 1.64 \times 10^{-6} [\text{Kerosene}]^{-0.33} [\text{O}_2]^{0.19} \exp[34491/(RT)] \quad (1)$$

$$t_{\text{ign}} = 3.96 \times 10^{-5} P^{-0.14} \phi^{-0.33} \exp[33197/(RT)] \quad (2)$$

高压条件下, 压力为 0.55, 1.1, 2.2 MPa 时, 拟合结果^[14]

$$t_{\text{ign}} = 3.20 \times 10^{-11} [\text{Kerosene}]^{0.22} [\text{O}_2]^{-1.09} \exp[69941/(RT)] \quad (3)$$

$$t_{\text{ign}} = 3.58 \times 10^{-6} P^{-0.88} \phi^{0.23} \exp[62092/(RT)] \quad (4)$$

其中, t_{ign} 表示点火延时时间, 单位为 s; ϕ 表示燃料化学当量比; [Kerosene] 和 $[\text{O}_2]$ 分别代表煤油和氧气浓度, 单位为 mol/cm^3 ; P 为点火压力, 单位为 MPa; T 为点火温度, 单位为 K; R 为普适气体常数, 点火活化能单位为 J/mol . 式 (1) 和式 (2) 的拟合回归系数 $R^2 = 0.96$, 式 (3) 和式 (4) 的拟合回归系数 $R^2 = 0.92$.

点火延时与当量比依赖关系的拟合结果 (2) 和 (4) 显示, 在实验温度范围内, 当量比对煤油点火延时的影响指数在高压和低压条件下是相反的. 高压

条件下, 当量比的影响指数 0.23 为正值, 煤油点火延时随着当量比的增加而增长; 低压条件下, 当量比的影响指数 -0.33 为负值, 煤油点火延时随当量比的增加而缩短.

由于点火延时与温度符合 Arrhenius 关系, 通常将点火延时时间的对数 $\lg t_{\text{ign}}$ 与温度的倒数 T^{-1} 作图, 纵坐标取对数坐标, 横坐标以 1000 乘以温度的倒数, 即 $1000 T^{-1}$. 图 3 显示了在不同压力下当量比对煤油点火特性的影响.

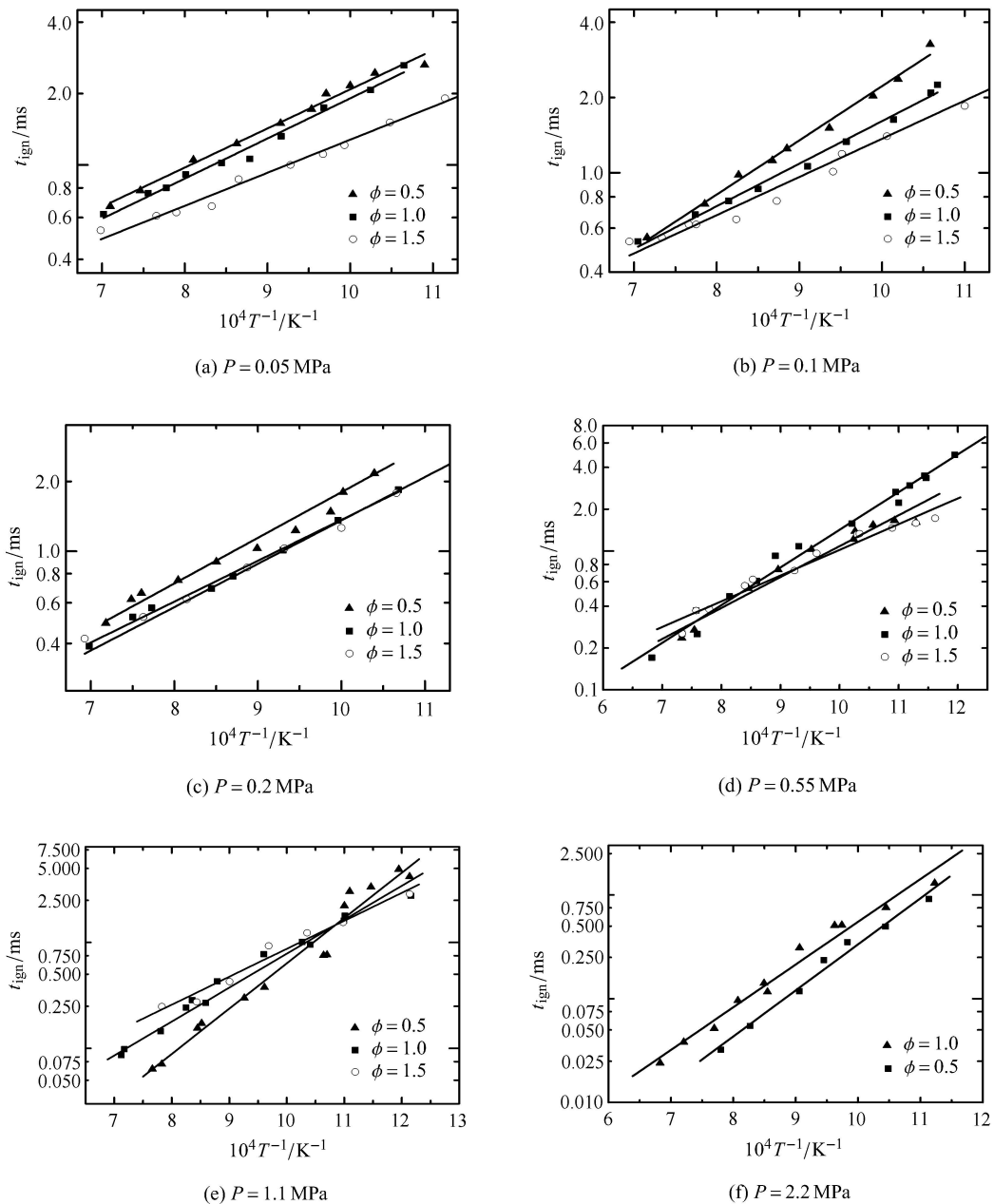


图 3 不同压力下当量比对煤油点火延时的影响

Fig. 3 Effect of equivalence ratio on the ignition delay of kerosene at different pressures

图 3(a) ~ 图 3(c) 显示, 低压条件下 (0.05, 0.1, 0.2 MPa) 煤油的点火延时随着当量比的增加而缩短, 这与当量比对其他低碳数碳氢燃料点火特性的影响刚好相反. 对于大多数低碳数碳氢燃料而言, 点火延时随当量比的增加而增长. 高压条件下 (0.55, 1.1 MPa) 当量比对煤油点火延时影响的图 3(d) 和图 3(e) 显示, 在实验温度范围内, 不同当量比的点火延时曲线大约相交于一个临界温度, 在此临界温度当量比影响指数的正、负号发生转变. 在临界温度以上的高温区, 当量比影响指数为正值, 煤油点火延时随当量比增加而增长; 在临界温度以下的低温区, 当量比影响指数为负值, 煤油点火延时随当量比增加而缩短.

图 3 显示, 这一临界温度随压力降低将向高温区移动. 在压力 2.2 MPa, 临界温度低于实验温度范围的最低温度 890 K; 当压力降到 1.1 MPa 时, 临界温度约为 910 K; 当压力进一步降到 0.55 MPa 时, 临界温度升高到约 1180 K. 当压力降到 0.2 MPa 以及更低的 0.1 MPa 和 0.05 MPa 时, 临界温度高出了实验温度范围的最高温度 1450 K. 这表明, 低压 (0.05, 0.1, 0.2 MPa) 条件下的整个实验温度范围都低于其临界温度, 所以低压条件的全部实验温度都处于当量比影响指数为负数的区域, 煤油点火延时随当量比增加而缩短. 与此相反, 高压 2.2 MPa 的整个实验温度范围都高于其临界温度, 因此全部实验温度都处于当量比影响指数为正数的区域, 煤油点火延时随当量比增加而增长. 在中等压力 0.55 MPa 和 1.1 MPa 时, 整个实验温度范围内将出现当量比影响指数的正、负号发生转变的情况.

压力变化导致煤油点火特性中当量比影响指数转变的这一现象表明, 煤油燃烧化学反应机理中,

与压力有关的基元反应在点火过程中起着重要的作用. 在激波管实验基础上, 本文进一步通过 Chemkin 程序 [20] 中的 Senkin 模块 [21] 对煤油点火过程进行了化学动力学数值模拟. 模拟过程中我们假设反射激波后 5 区为定容绝热体系, 将点火发生时间定义为 OH 自由基浓度发生突越的起始点, 这与实验过程中点火发生时间的定义是一致的.

本研究模拟过程中采用以下 3 种煤油替代物燃烧反应机理模型:

(1) Dagaut 和 Cathonnet^[6] 提出的模拟法国航空煤油的三组分替代物煤油燃烧反应机理, 该机理包含 209 个物种和 1673 步基元反应. 三组分替代物为摩尔比 74% 正庚烷、15% 正丙基苯和 11% 正丙基环己烷.

(2) Honnet 等^[22] 提出的两组分替代物煤油燃烧反应机理, 该机理包含 122 个物种和 900 步基元反应. 替代物为摩尔比 77.17% 正庚烷和 22.83% 1, 2, 4-三甲基苯.

(3) 李象远等^[23] 提出的三组分替代物煤油燃烧反应机理, 该机理包含 232 个物种和 1189 步基元反应. 三组分替代物为摩尔比 74.24% 正庚烷、14.11% 1, 3, 5-三甲基环己烷和 11.65% 正丙基苯.

采用上述 3 种煤油替代物燃烧反应机理, 对 $\phi = 1$ 、压力分别为 0.05, 0.1, 0.2, 0.55, 1.1, 2.2 MPa 下煤油点火过程进行了数值模拟, 并将模拟结果与实验结果进行了对比, 结果如图 4 所示. 在图 4(f) 中将高压 2.2 MPa 下的实验结果与 Dean 等^[7] 及 Vasu 等^[8] 的实验结果进行了对比. 由于 Dean 等^[7] 及 Vasu 等^[8] 的实验压力与 2.2 MPa 稍有差别, 为了便于在相同压力条件下进行对比, 利用拟合式 (4) 将他们的实验数据归一化到 2.2 MPa.

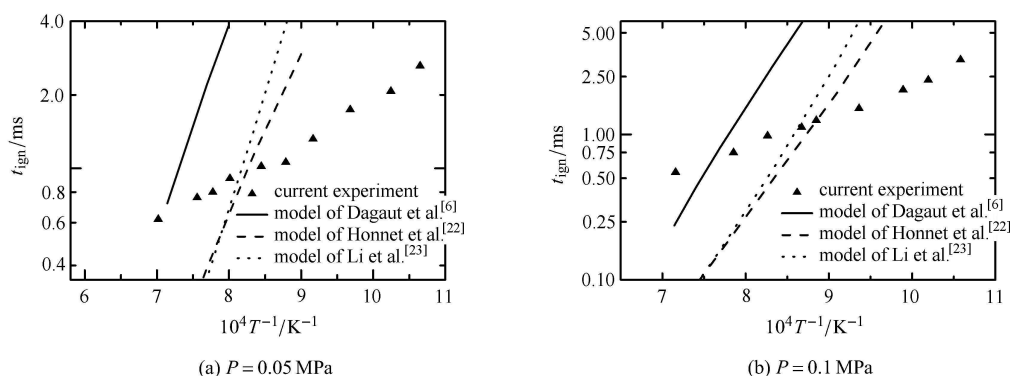


图 4 不同压力时化学当量比条件下 ($\phi = 1$) 煤油点火延时实验结果与 3 种机理模型模拟结果的比较

Fig. 4 Comparison of kerosene ignition delay times at stoichiometric conditions ($\phi = 1$) with the kinetic simulation based on 3 models for different pressures

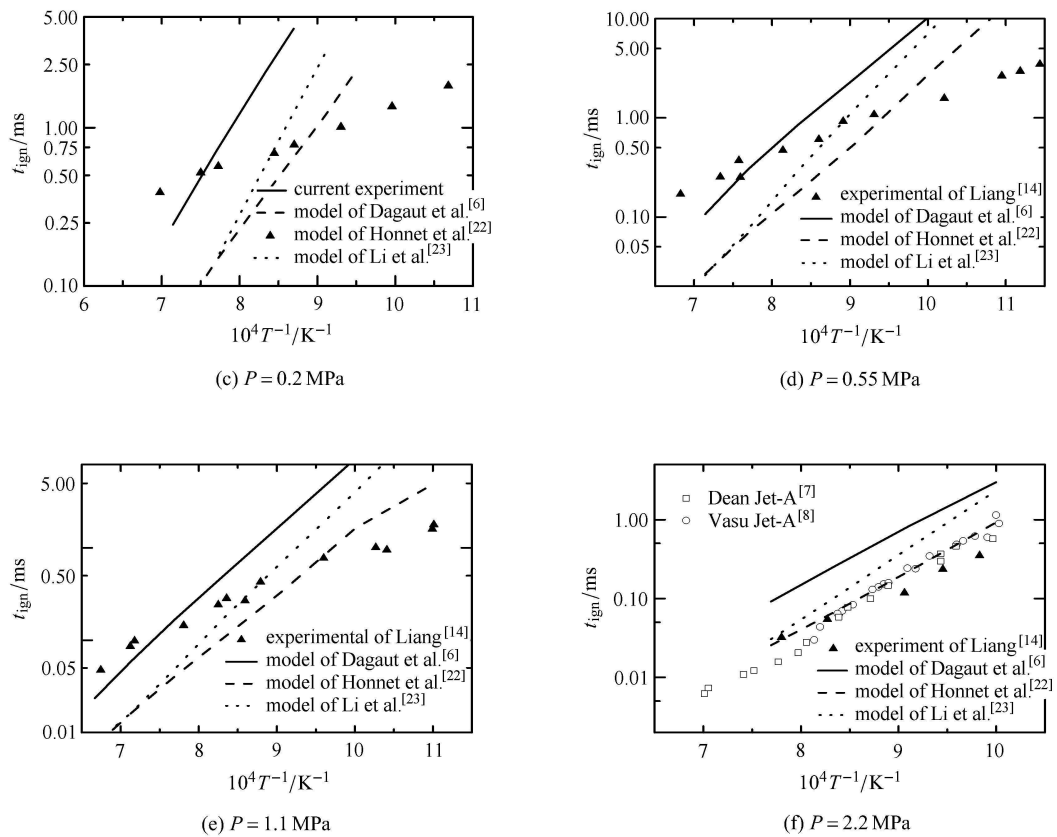


图 4 不同压力时化学当量比条件下 ($\phi = 1$) 煤油点火延时实验结果与 3 种机理模型模拟结果的比较 (续)
 Fig. 4 Comparison of kerosene ignition delay times at stoichiometric conditions ($\phi = 1$) with the kinetic simulation based on 3 models for different pressures (continued)

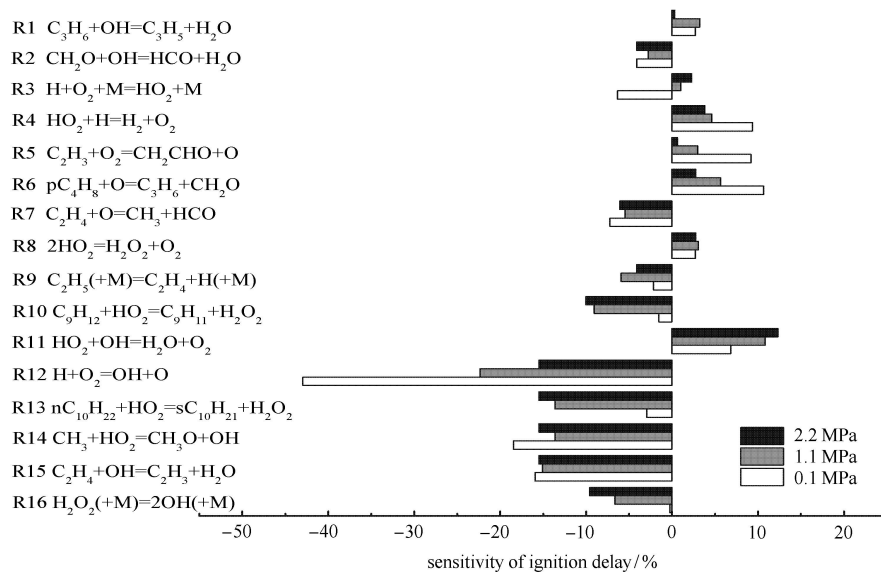


图 5 1200 K 和 $\phi = 1$ 时不同压力条件下煤油点火延时敏感度分析
 Fig.5 Sensitivity analysis of ignition delay time at different pressures for $T = 1200\text{ K}$ and $\phi = 1$

图 4(f) 显示压力 2.2 MPa 时, RP-3 航空煤油的点火延时测量结果与相同实验条件下 Dean 等^[7] 以及 Vasu 等^[8] 测量获得的 Jet-A 点火延时基本吻合. 实验结果与数值模拟结果对比显示, 3 种煤油燃烧反应机理中, 压力 2.2 MPa 时实验结果与采用 Honnet 等^[22] 燃烧反应机理的模拟结果基本吻合. 此压力下, 采用 Li 等^[23] 燃烧机理的模拟结果在高温下与实验结果较为符合, 但在低温下有较大的偏差, 该机理在低温下高估了煤油点火延时时间. 在 2.2 MPa 时整个实验温度范围内, Dagaut 等^[6] 的机理高估了煤油点火延时时间. 图 4(f) 同时显示, 采用 Dagaut 等^[6] 的机理模拟得到的点火活化能与实验结果相近, 而采用 Li 等^[23] 机理的模拟结果高估了煤油点火活化能. 随着实验压力的降低, 3 种煤油反应机理模拟结果与实验值的差异逐渐增大, 而且都是在低温区差异更大, 表现为 3 种反应机理模拟得出的点火活化能都大于实验值. 其原因可能是这 3 种机理都没有给出与压力有关的基元反应速率常数对压力依赖合适的权重, 因此需要评估反应机理中与压力有关的基元反应速率常数与压力的依赖关系, 使其在低压下的模拟结果也能与实验结果较好吻合.

为了考查煤油燃烧中对点火起关键作用的基元反应, 本文采用 Honnet 等^[22] 的反应机理对煤油进行点火延时敏感度分析. 敏感度系数定义为

$$Sensitivity = \frac{t_{ign}(2k_i) - t_{ign}(k_i)}{t_{ign}(k_i)} \times 100\% \quad (5)$$

其中, k_i 是基元反应 i 的反应速率常数, $t_{ign}(k_i)$ 是反应速率常数为 k_i 时的点火延时时间, $t_{ign}(2k_i)$ 是基元反应 i 速率常数加倍后点火延时时间. 反应的敏感度系数为正, 说明此反应对点火起抑制作用, 如果敏感度系数为负, 则反应对点火起促进作用. 图 5 给出了当量比 $\phi = 1$ 和温度 $T = 1200\text{ K}$ 条件下, 压力分别为 0.1, 1.1, 2.2 MPa 时点火延时敏感度分析结果.

由图 5 可知, H, O, OH 自由基的生成和消耗在煤油点火过程中起关键作用. 反应 R2, R7, R9, R10, R12, R13, R14, R15, R16 均对点火起促进作用, 其中链反应 R12($\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$) 具有最高的敏感度, 对煤油点火的促进作用最大; R1, R4, R5, R6, R8, R11 对点火具有抑制作用, 其中 R11($\text{HO}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$) 对点火的抑制作用最大. 特别需要指出, 三体反应 R3($\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}$) 在高压 2.2, 1.1 MPa 时表现出对煤油点火的微弱抑制作用, 而在低压 0.1 MPa 时对煤油点火起促进作用. R4, R5, R6 对煤油点火的抑制

作用随着压力降低而增强. 由图 5 还可知, 活性小分子或自由基反应对煤油点火的影响很大, 而起始阶段的大分子裂解及其与自由基之间的反应对煤油点火的影响较小, 只有 R10, R13 能观察到明显的影响.

3 结 论

在预加热到 135 °C 的激波管中, 采用燃料点火过程中 OH 自由基特征发射光谱强度变化作为点火发生的判据, 测定了 RP-3 航空煤油的点火延时, 点火温度为 800~1450 K, $\phi = 0.5, 1, 1.5$, 压力分别为 0.05, 0.1, 0.2 MPa. 实验获得了 RP-3 航空煤油点火延时与点火温度、压力、当量比及煤油和氧气浓度的依赖关系式. 结合已有的高压条件下 RP-3 航空煤油点火特性, 获得了当量比对煤油点火特性影响随压力变化而发生改变的规律. 当量比对煤油点火特性的影响存在一个临界温度, 在临界温度以上的高温区, 煤油点火延时随当量比增加而增长; 在临界温度以下的低温区, 煤油点火延时随当量比增加而缩短. 这一临界温度随点火压力降低而升高.

采用 3 种煤油燃烧反应动力学模型进行数值模拟得到的煤油点火延时与相同条件下的实验结果进行对比. Honnet 等^[22] 提出的煤油燃烧反应机理的模拟结果在高压 2.2 MPa 时与实验结果很好地吻合, 在其余较低压力下高估了煤油点火活化能. Dagaut 等^[6] 的模型模拟获得的点火活化能在高压 2.2 MPa 时与实验基本相同, 但高估了点火延时时间. 在高压 2.2 MPa 时, 李象远等^[23] 的机理模拟结果在高温下与实验结果较为符合, 但在低温下有较大的偏差. 随着压力降低, 3 种煤油反应机理模拟结果与实验值的差异逐渐增大, 在低温区差异更大.

灵敏度分析结果表明, 对煤油点火起最大促进作用的反应为 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$; 对煤油点火起最大抑制作用的反应为 $\text{HO}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$; 三体反应 $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}$ 在高压时对煤油点火起轻微抑制作用, 而在低压时对煤油点火起促进作用.

参 考 文 献

- 1 Davidson DF, Hanson RK. Interpreting shock tube ignition data. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2004, 36(9): 510-523
- 2 Held TJ, Marchese AJ, Dryer FL. A semi-empirical reaction mechanism for n-heptane oxidation and pyrolysis. *Combustion Science and Technology*, 1997, 123: 107
- 3 Tishkoff JM, Drummond JP, Edwards T, et al. Future direction of supersonic combustion research: Air Force/NASA workshop on supersonic combustion. AIAA Paper, AIAA-1997-1017, 1997

- 4 张新宇. 高超声速吸气式发动机的研究进展与发展趋势. 力学进展, 2001, 31(3): 478-480 (Zhang Xinyu. The research and development trend of hypersonic aspirated engine. *Advances in mechanics*, 2001, 31(3): 478-480 (in Chinese))
- 5 Mullins BP. Studies on the spontaneous ignition of fuels injected into a hot air-stream part 2: Effect of physical factors upon the ignition delay of kerosene-air mixtures. *Fuel*, 1953, 32(2): 234-241
- 6 Dagaut P, Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, 32(1): 48-92
- 7 Dean AJ, Penyazkov OG, Sevruk KL, et al. Autoignition of surrogate fuels at elevated temperatures and pressures. *Proceedings of Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2481-2488
- 8 Vasu SS, Davidson DF, Hanson RK. Jet fuel ignition delay times: Shock tube experiments over wide conditions and surrogate model predictions. *Combustion and Flame*, 2008, 152(1-2): 125-143
- 9 Steil U, Braun UM, Aigner M, et al. An experimental and modeling study on the auto ignition of kerosene and surrogate fuel mixture. AIAA Paper, 2008, AIAA-2008-973
- 10 Kumar K, Sung CJ. An experimental study of the autoignition characteristics of conventional jet fuel/oxidizer mixtures: Jet-A and JP-8. *Combustion and Flame*, 2010, 157(4): 676-685
- 11 Wang S, Fan BC, He YZ, et al. Shock tube study of kerosene ignition delay. *Shock Waves*, 2009, 16(1): 775-780
- 12 Liao Q, Xu SL. The ignition delay measurement of atomized kerosene air mixture in an aerosol shock tube. *Journal of Experimental Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 70-74
- 13 Zhang YJ, Huang ZH., Wang JH, et al. Shock tube study on auto-ignition characteristics of kerosene/air mixtures. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 85-93
- 14 Liang JH, Wang S, Hu HH, et al. Shock tube study of kerosene ignition delay at high pressures. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, 55(6): 947-954
- 15 Petersen EL, Röhrig M, Davidson DF, et al. High-pressure methane oxidation behind reflected shock waves. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1996, 26(1): 799-806
- 16 Petersen EL, Davidson DF, Hanson RK. Kinetics modeling of shock-induced ignition in low-dilution CH₄/O₂ mixtures at high pressures & Intermediate Temperatures. *Combustion and Flame*, 1999, 117(1-2): 272-290
- 17 Zhukov VP, Sechenov VA, Starikovskii AY. Autoignition of n-decane at high pressure. *Combustion and Flame*, 2008, 153(1-2): 130-136
- 18 Gaseq Chemical Equilibrium Program. Version 0.79, New York (Columbia University): Computerized Educational Systems, 2005.01
- 19 Shen HP, Vanderover J, Oehlschlaeger MA. A shock tube study of iso-octane ignition at elevated pressures: The influence of diluent gases. *Combustion and Flame*, 2008, 155(4): 739-755
- 20 Kee RJ, Rupley FM, Miller JA. CHEMKIN II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics. *Sandia National Laboratory Report*, 1989, SAND-89-8009
- 21 Lutz AE, Kee RJ, Miller JA. Senkin: A fortran program for predicting homogeneous gas phase chemical kinetics with sensitivity analysis. Sandia National Laboratories Report, 1987, SAND-87-8248
- 22 Honnet S, Seshadri K, Niemann U, et al. A surrogate fuel for kerosene. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 485-492
- 23 Li XY, 2013, available at: <http://ccg.scu.edu.cn/RP3-detailedmech.inp.txt>

(责任编辑: 周冬冬)

STUDIES ON THE AUTOIGNITION CHARACTERISTICS OF RP-3 AVIATION KEROSENE¹⁾

Liang Jinhua^{*,†} Wang Su^{†,2)} Zhang Can^{*,†} Zhang Shengtao^{*} Fan Bingcheng[†] Cui Jiping[†]

^{*}(College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[†](State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In a shock tube preheated at a constant temperature of 135°C, the ignition delay characteristics of RP-3 aviation kerosene were studied behind reflected shock waves by monitoring the steepest rise of the characteristic emission of OH radical at 306.5 nm. Experimental conditions covered a wider temperature range of 800~1 450 K, at pressures of 0.05, 0.1 and 0.2 MPa, equivalence ratios of 0.5, 1 and 1.5, and oxygen concentration of 20% (mol). Under low-pressure conditions, the experimental results of ignition delay time were correlated with the temperature, pressure, stoichiometry, and the concentrations of kerosene and oxygen. The comparison between current data and the previous high-pressure results shows that a critical temperature exists about the effect of equivalence ratio on the ignition behavior of RP-3 kerosene. For the higher temperature range above the critical temperature, ignition delay time increases with increasing equivalence ratio, but decreases with increasing equivalence ratio for the lower temperature range below the critical temperature. This critical temperature also rises with decreasing the pressure. Meanwhile, the ignition process of kerosene was simulated by using three kinds of kerosene combustion kinetic models, and the comparison was made between the experimental and calculated results. The results show good agreement between experimental data and the prediction based on the model of Honnet et al. at high pressure of 2.2 MPa, but some differences at lower pressures. The sensitivity analyses for different pressures indicate that the three-body reaction ($H+O_2+M=HO_2+M$) shows a slight inhibitory effect on kerosene ignition at high pressures, but a promoting effect at low pressures.

Key words ignition delay, kerosene, shock tube, kinetic simulation, sensitivity analysis

Received 18 September 2013, revised 12 November 2013.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (90916017).

2) Wang Su, associate professor, research interests: shock tube study of high-temperature gas characteristics. E-mail: suwang@imech.ac.cn