

文章编号:1006-9941(2020)05-0391-07

# 航空煤油裂解气的高温自点火延迟特性

郑祖骏<sup>1</sup>, 万中军<sup>1</sup>, 李萍<sup>1,2</sup>, 张昌华<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065; 2. 四川大学空天动力燃烧与冷却教育部工程研究中心, 四川 成都 610065)

**摘要:** 航空煤油是一种典型的吸热性碳氢燃料, 燃料在进入燃烧室之前通过热裂解产生裂解产物而吸热, 可在高速飞行器的热防护中起着重要作用。航空煤油及其裂解气的自点火延迟特性是冲压发动机设计的主要参数之一, 也是验证燃烧反应机理的重要数据。本研究在化学激波管中, 利用反射激波对航空煤油及其裂解气进行自点火, 获得了点火温度在 900~1820 K, 压力为  $1.01 \times 10^5$  Pa, 当量比为 1.0 条件下 RP-3 航空煤油、裂解气及主要裂解成分氢气、甲烷、乙烯和乙烷的自点火延迟时间。点火延迟时间定义为反射激波到达测量点时引起的压力信号起跳到  $\text{CH}^*$  自由基信号大量出现时的时间间隔。实验结果表明, 点火延迟时间随温度的升高明显缩短; 在相同工况下, 甲烷点火延迟时间最长, 氢气最短, 裂解气的点火延迟时间比航空煤油略长; 裂解气活化能接近于航空煤油的活化能, 都在  $180 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  左右, 单组分中的氢气点火活化能最低, 为  $127.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。实验结果与相应的燃烧动力学机理模拟结果进行了对比, 机理能很好预测温度对点火延迟时间的影响规律。对机理进行了敏感度分析, 得到了影响燃料点火的主要基元反应。

**关键词:** 航空煤油; 裂解气; 点火延迟时间; 激波管; 燃烧机理

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019328

## 1 引言

航空煤油是典型的吸热性碳氢燃料, 是超燃冲压发动机的主要燃料, 具有能量密度较高, 成本低和高热沉等优点<sup>[1]</sup>。因此, 被广泛用作民用和军用飞行器的燃料。超燃冲压发动机在工作时, 喷入的燃料在燃烧室中的驻留时间极短, 处于微秒和毫秒量级, 这与燃料的点火延迟时间大致在同一数量级<sup>[2]</sup>。燃料在燃烧反应期, 反应物的化学键断裂到形成大量的自由基之间有迟滞时间, 该迟滞时间称为点火延迟时间<sup>[3]</sup>。燃料的点火延迟时间直接影响到燃料的燃烧效率和发动机推力, 是冲压发动机设计的主要参数之一。同时, 航空煤油的点火延迟时间是验证煤油动力学机理合理性的重要实验参数, 也是判断燃料燃烧化学反应难易的主要依据之一。

在高速飞行器发动机主动冷却技术中, 煤油既是推进剂又是冷却剂, 煤油先进入冷却管道, 吸收燃烧室壁面的热量, 发生热裂解反应使燃烧室得以冷却, 最后是裂解反应产生的煤油裂解产物进入燃烧室燃烧为飞行器提供动力。煤油裂解产物由气相小分子产物(氢气、甲烷、乙烷和乙烯等)和液态的大分子产物(正十二烷和甲苯等)组成<sup>[4]</sup>。在设计超压发动机的燃烧室时, 除了碳氢燃料本身的点火延迟时间外, 还必须考虑碳氢燃料裂解产物的点火延迟时间。因此, 研究煤油与煤油裂解产物的点火延迟时间对主动冷却技术具有十分重要的意义。

国内外研究者通常使用快速压缩机、激波管、流动反应器和定容弹等设备测量燃料的点火延迟时间。激波管结构、操作简单, 反射激波可以提供宽范围的工作温度和压力对介质进行均匀、非等熵、绝热压缩, 是较为理想的研究燃烧动力学的实验装置。斯坦福大学 Hanson 教授课题组<sup>[5]</sup>通过激波管实验测量了多种碳氢燃料在高温下的点火延迟时间, 从小分子氢气、甲烷到大分子碳氢燃料及实用燃料 Jet-A 等, 建立了碳氢燃料点火延迟时间数据库; 爱尔兰国立大学 Curran 教授课题组<sup>[6]</sup>利用快速压缩机测量了碳氢燃料和生物燃料

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-02-19

网络出版日期: 2020-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(91841301)

作者简介: 郑祖骏(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事燃烧反应动力学研究。e-mail: 191212803@qq.com

通信联系人: 张昌华(1982-), 男, 副教授, 主要从事燃烧光谱和燃烧反应动力学研究。e-mail: zhangchanghua@scu.edu.cn

引用本文: 郑祖骏, 万中军, 李萍, 等. 航空煤油裂解气的高温自点火延迟特性[J]. 含能材料, 2020, 28(5):391-397.

ZHENG Zu-jun, WANG Zhong-jun, LI Ping, et al. High Temperature Auto-ignition Delay Characteristics of Pyrolysis Gas of Aviation Kerosene[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(5):391-397.

的点火延迟时间,为建立和验证燃料燃烧反应动力学模型提供基础;伊利诺伊大学芝加哥分校Brezinsky教授课题组<sup>[7]</sup>利用加热激波管开展了单组份碳氢燃料和Jet-A等高温气相反应的研究。在国内,中国科学技术大学<sup>[8]</sup>、中科院力学所<sup>[9]</sup>、西安交通大学<sup>[10]</sup>、上海交通大学<sup>[11]</sup>、沈阳航空航天大学<sup>[12]</sup>和四川大学<sup>[13]</sup>等单位都开展了较好的碳氢燃料自点火延迟研究工作。尽管迄今为止国内外在碳氢燃料自点火方面有大量的研究,但研究对象主要集中在单组分碳氢燃料和实际碳氢燃料如航空煤油,对碳氢燃料裂解产物的点火特性研究很少。航空煤油裂解产物气相部分主要由氢气、甲烷、乙烯和乙烷等C4以下小分子气体物质组成,Puri等<sup>[14]</sup>实验研究JP-7燃料的两种不同成分裂解气的点火延迟时间,发现C3物种的增加会降低点火延迟时间。Colket等<sup>[15]</sup>实验对比了氢气、乙烯、正庚烷、JP-10燃料及裂解产物替代组份(30%CH<sub>4</sub>/60%C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/10%n-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>)在高温下的点火延迟时间,发现点火延迟时间顺序为:甲烷>JP-10≈正庚烷>裂解产物>乙烯>氢气,并推断燃料裂解可以提高点火性能。Pei等<sup>[16]</sup>实验研究了正癸烷裂解产物(正癸烷和气相产物替代组份)在高温下的点火延迟特性,发现裂解会降低燃料点火性能,延长燃料的点火延迟时间。文献调研发现,迄今为止仍然缺乏国产航空煤油及其裂解气自点火延迟特性的系统研究。煤油的裂解气相产物对燃料的点火起到重要作用,大量动力学分析表明C2以下小分子涉及的对燃料点火尤为关键。

为此,本研究在激波管中利用反射激波点火,采用压力和光学测量方法,测量了常压下航空煤油、裂解气及主要裂解单组份氢气、甲烷、乙烯和乙烷的自点火延迟时间,点火温度为900~1820 K,当量比为1.0。讨论了点火延迟时间与温度的变化规律,给出了燃料的点火活化能。对比研究了煤油、煤油裂解气以及主要裂解成分氢气、甲烷、乙烯和乙烷点火延迟特性,将实验结果用于燃烧动力学机理的验证。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与仪器

实验使用的单组份气体(氦气、氧气、氮气、氢气、甲烷、乙烯和乙烷)购自四川润泰特种气体有限公司。裂解气是RP-3航空煤油在650℃下超临界裂解气相产物,裂解产物通过冷凝器后到达气液分离器,气相色谱在线表征显示其组成为氢气(6%)、甲烷(13%)、乙

烯(18%)、乙烷(13%)、丙烯(23%)、丙烷(9%)、丁烯(15%)、戊烷(1%)和戊烯(2%)。

实验所用的化学激波管内径10 cm,由2 m长的高压段、5 cm长的夹膜段以及5 m长的低压段三个部分组成。激波管低压段的外壁用加热圈缠绕,采用六组电加热控制系统对整个低压段加热,以使得管壁温度维持在恒定温度。采用管外预混的方式制备燃料与空气的混合物,混气罐体积40 L,可加热并保持在150℃。图1所示为实验使用的化学激波管示意图。高压段用氦气作为驱动气体,用压力表监测驱动气体的压力。通过控制高压段驱动气体和低压段实验气体的压力、气体参数等可获得预期的入射激波速度、反射激波温度和压力,本实验所用激波管的工作时间约为2 ms<sup>[17-18]</sup>。

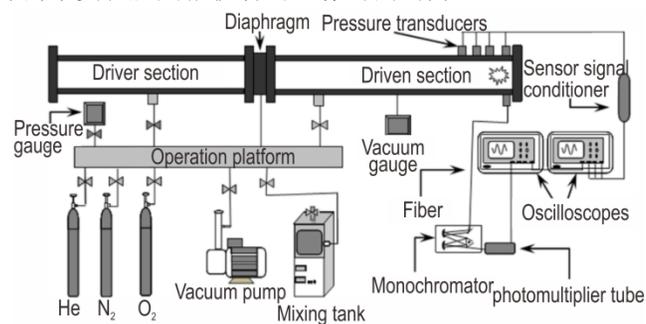


图1 激波管实验装置

Fig.1 Shock tube experimental setup

### 2.2 实验过程

实验前,先将燃料和空气( $V_{O_2}:V_{N_2}=21:79$ )加入混气罐中预混至少3 h,以保证混合均匀。配气时将混气罐加热到150℃,以保证煤油的完全气化。实验时,在低压段充入一定量的燃料/空气混合物,由电容薄膜真空计检测加入的量,所有燃料及气体的摩尔分数见表1。再在高压段和夹膜段加入纯净氦气做驱动气体,利用高压段和夹膜段的压差破膜产生入射冲击波。在激波管的靠近尾端处的壁面上安装了4个间距约为19 cm的压力传感器(PCB 113B24),最后一个传感器距端面1.5 cm。压力传感器的响应时间小于1 μs,用来记录入射冲击波经过时的压力信号。压力信号经信号适调仪后接入四通道示波器(Tektronix DPO5054),进行读数处理。根据激波到达不同传感器的时刻,采用外推法得到入射激波在端面的速度 $v_s$ 。根据一维正激波关系,基于低压段初始压力 $p_1$ 、初始温度 $T_1$ 、入射激波速度 $v_s$ 以及反应混合物的热力学参数计算反射激波温度和压力。综合考虑各种类型的烃在煤油中的比例、煤油的平均相对分子量和碳氢摩尔比等,本研究采用质量分数为73.0%的正十二烷,14.7%

的1,3,5-三甲基环己烷和12.3%的正丙基苯作为RP-3航空煤油的替代模型,采用Chemikin Pro软件<sup>[19]</sup>中的反射激波模型中计算得到反射激波温度 $T$ 和反射激波压力 $p$ ,其中航空煤油的热力学性质采用其三组分替代模型的热力学参数<sup>[20]</sup>。

表1 混合气中各组分摩尔分数

Table 1 Molar fraction of various components of mixture gas

species	fuel	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
methane	0.095	0.190	0.715
pyrolysis gas	0.051	0.199	0.750
RP-3 kerosene	0.013	0.207	0.780
ethane	0.057	0.198	0.745
ethylene	0.066	0.196	0.738
hydrogen	0.296	0.148	0.556

在反射激波作用下,燃料开始发生化学反应,点火延迟时间定义为反射激波经过最后一个压力传感器时的压力信号起跳时刻到大量自由基开始出现的时间间隔。OH\*和CH\*是自点火燃烧的主要中间产物,实验在靠近尾端1.5 cm处安装了石英光纤进行燃烧光信号采集,将光信号导入单色仪和光电倍增管组成的光学测量系统中,单色仪出口波长设置到431 nm处,以得到燃烧的CH\*自由基在431 nm的光辐射信号,光信号经光电倍增管转换成电信号后由示波器(Tektronix DPO5054)记录。典型的点火延迟时间定义如图2所示,图2中显示了反应区压力和CH\*自由基强度的剧烈变化,得到其点火延迟时间。

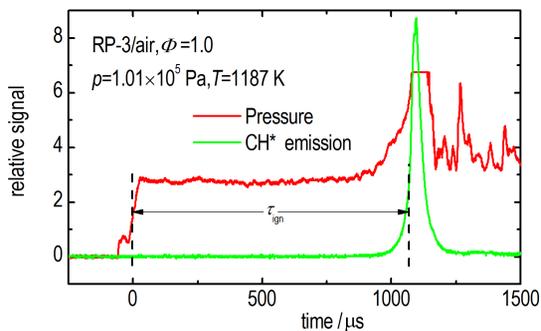


图2 典型的点火延迟时间定义图

Fig.2 Typical ignition delay time determination

在本研究中,点火延迟测量的实验误差预计小于20%,其误差来源于入射激波测量误差、配比气体的误差、点火延迟读数的误差以及边缘层效应和非理想一维激波等引起的误差。为了进一步验证实验的可靠性和重复性,将实验测量的RP-3点火延迟时间与文献报道Chen等<sup>[21]</sup>的进行了对比,结果见图3。图3展示了

在点火条件为 $1.01 \times 10^5$  Pa,当量比为1.0下的本研究结果与Chen等<sup>[21]</sup>的实验结果吻合得较好。

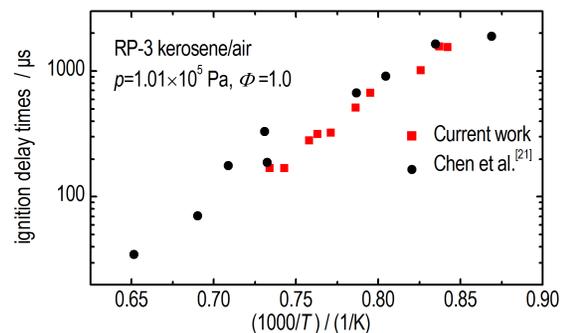


图3 RP-3煤油点火延迟时间与文献[21]结果对比

Fig.3 Comparison of ignition delay time of RP-3 kerosene with the results of literature [21]

### 3 结果与讨论

#### 3.1 燃料的自点火特性

在当量比为1.0、压力为 $1.01 \times 10^5$  Pa、温度900~1820 K条件下,测量了煤油、裂解气以及主要裂解单组份氢气、甲烷、乙烯和乙烷的点火延迟时间,结果见图4,横坐标是温度的倒数,纵坐标是点火延迟时间的对数。由图4可以看到,随着温度的增加,所有燃料的点火延迟时间明显缩短。在相同点火条件下,不同燃料之间的点火延迟时间差异明显,航空煤油的点火延迟时间略小于裂解气,与乙烷的点火延迟时间接近。单组份燃料中,氢气的点火延迟时间明显短于其它燃料,甲烷的点火延迟时间最长。点火规律可归结为:甲烷>裂解气>乙烷≈RP-3煤油>乙烯>氢气。

Pei等<sup>[16]</sup>测量了正癸烷及其裂解气的点火延迟时间,发现在常压下正癸烷裂解气的点火延迟时间长于正癸烷,本研究结论与之一致。Colket等<sup>[15]</sup>对不同燃料的点火延迟时间进行了测量,发现甲烷>JP-10≈正庚烷>裂解产物(30%CH<sub>4</sub>/60%C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/10%n-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>)>乙烯>氢气,这与我们的实验规律相大致相同,不同点在于Colket报道的裂解产物点火延迟时间比JP-10短,而我们的裂解气点火延迟时间比煤油长。主要原因是Colket报道的裂解产物中乙烯成分高达60%,由于乙烯点火快,导致裂解产物的点火延迟时间短,而本研究的煤油裂解后的气体产物主要为低碳数的烷烃和烯烃,裂解气中乙烯含量仅18%,燃料裂解产生了大量的烷烃,降低了点火性能。

图4所示的燃料点火延迟时间对数与温度的倒数呈较好的线性关系。因此,可以用Arrhenius公式

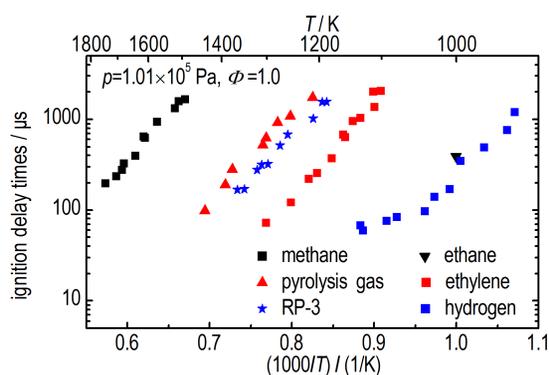


图4 燃料在压力为  $1.01 \times 10^5$  Pa 下, 当量比为 1.0 的点火延迟时间

Fig.4 Ignition delay times of fuels at pressure of  $1.01 \times 10^5$  Pa and equivalence ratio of 1.0

$\tau = A \cdot \exp(E_a/RT)$  拟合得到燃料的点火延迟时间与温度的定量关系, 其中  $A$  为指前因子;  $E_a$  为活化能,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $\tau$  为点火延迟时间,  $\mu\text{s}$ ;  $R$  为普适气体常数,  $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$  为点火温度,  $\text{K}$ 。通过对煤油以及其裂解气的点火延迟实验结果进行 Arrhenius 型公式拟合, 得到的结果见表 2。单组份气体的活化能差别较大, 氢气活化能只有  $127.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 而最高的乙烯高达  $206.9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。裂解气和航空煤油的活化能很接近, 都在  $180 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  左右。Pei 等<sup>[16]</sup>得到的正癸烷裂解产物的活化能为  $180.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 本研究结果与 Pei 等<sup>[16]</sup>得到的结果吻合得很好, 而 Puri 等<sup>[14]</sup>实验得到的 JP-7 裂解气的活化能相对偏低, 为  $163.9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

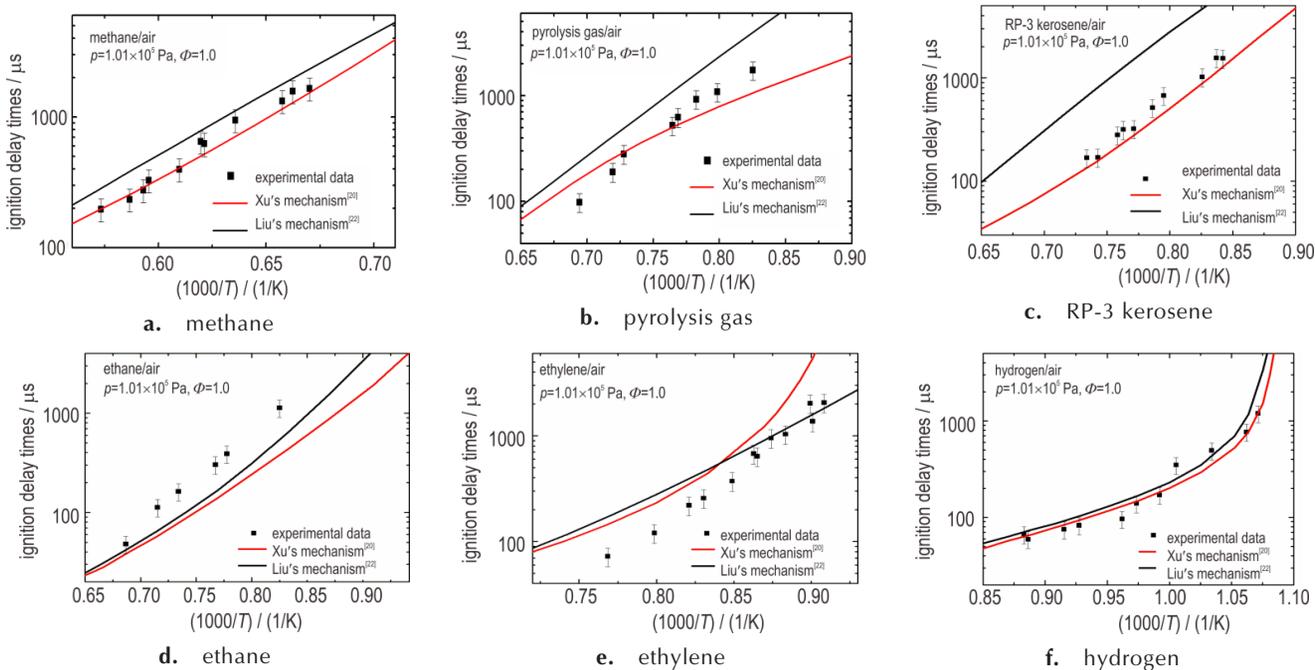


图5 燃料点火延迟实验结果与机理<sup>[20,22]</sup>模拟结果对比

Fig.5 Comparison of experimental ignition delay results with mechanism predictions<sup>[20,22]</sup> of fuels

表2 点火延迟时间的 Arrhenius 拟合参数

Table 2 Arrhenius-type fitting parameters of ignition delay time

species	A	$E_a / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$r^2$
methane	0.436	196.2	0.983
pyrolysis gas	$2.88 \times 10^{-5}$	181.9	0.981
RP-3 kerosene	$2.54 \times 10^{-5}$	177.3	0.987
ethane	$1.35 \times 10^{-5}$	183.8	0.994
ethylene	$2.98 \times 10^{-7}$	206.9	0.983
hydrogen	$5.82 \times 10^{-5}$	127.8	0.911

### 3.2 机理模拟及分析

燃料的自点火延迟时间能验证机理的可靠性。尽管 RP-3 是国内广泛使用的一种航空煤油, 其化学反应动力学机理的研究却很少。徐佳琪等<sup>[20]</sup>在对煤油的成分分析的基础上建立了航空煤油高温燃烧的三组分替代模型, 使用自主研发的高碳烃燃烧反应的机理生成程序 ReaxGen, 建立了燃料的高温燃烧机理。Liu 等<sup>[22]</sup>用同样的三组分替代模型构建了航空燃料的详细机理。本研究采用徐佳琪和 Liu 等的两个独立机理来模拟燃料的点火过程。点火延迟模拟在 Chemkin Pro 中的封闭均向模型<sup>[19]</sup>中进行。为了保证计算结果与实验结果良好对比, 计算中定义 CH 自由基摩尔分数曲线最大值处为点火标志, 对应的时间为机理模拟的点火延迟时间。图 5 给出了常压下, RP-3 煤油、裂解气、氢气、甲烷、乙烯、乙烷在空气中的点火延迟实验与

机理模拟的结果,数据点为实验结果,实线为机理模拟结果。结果表明:定性上,两个机理能很好预测温度对点火延迟时间的影响规律;定量上,徐佳琪等的机理能够很好的预测 RP-3 煤油、裂解气、氢气、甲烷在高温下点火延迟特性,但对于乙烯/空气点火延迟,机理预测结果高于实验结果,对于乙烷/空气的点火,机理预测值反而偏低;Liu 等的机理预测结果相对较差,模拟的 RP-3 煤油和裂解气点火延迟时间明显偏长。

为了进一步分析机理中各基元反应对燃料点火的影响,采用徐佳琪等<sup>[20]</sup>的机理对燃料的点火延迟时间进行了敏感度分析。采用 Kumar 等<sup>[22]</sup>提出的方法,将某反应的动力学参数增大为原来 2 倍所得到的点火延

迟时间与原来的点火延迟时间相对差值定义为敏感度系数

$$\text{Sensitivity} = [\tau_{\text{ign}}(2k_i) - \tau_{\text{ign}}(k_i)] / \tau_{\text{ign}}(k_i) \times 100\%$$

敏感度系数为正,则说明增大速率常数,相应的点火时间变长,说明该基元反应抑制点火;敏感度系数为负,则说明增大速率常数会导致点火时间变短,该基元反应促进点火。图 6 给出了常压下,温度为 1200 K、当量比为 1.0 时所有燃料的敏感度分析结果。由图 6 可以看出,对于氢气、RP-3 航空煤油、煤油裂解气、乙烯和乙烷的点火,链反应  $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$  对点火促进效果明显。OH 自由基是碳氢燃料在高温下燃烧的主要物种,OH 自由基的存在会加速后续反应。氢气的

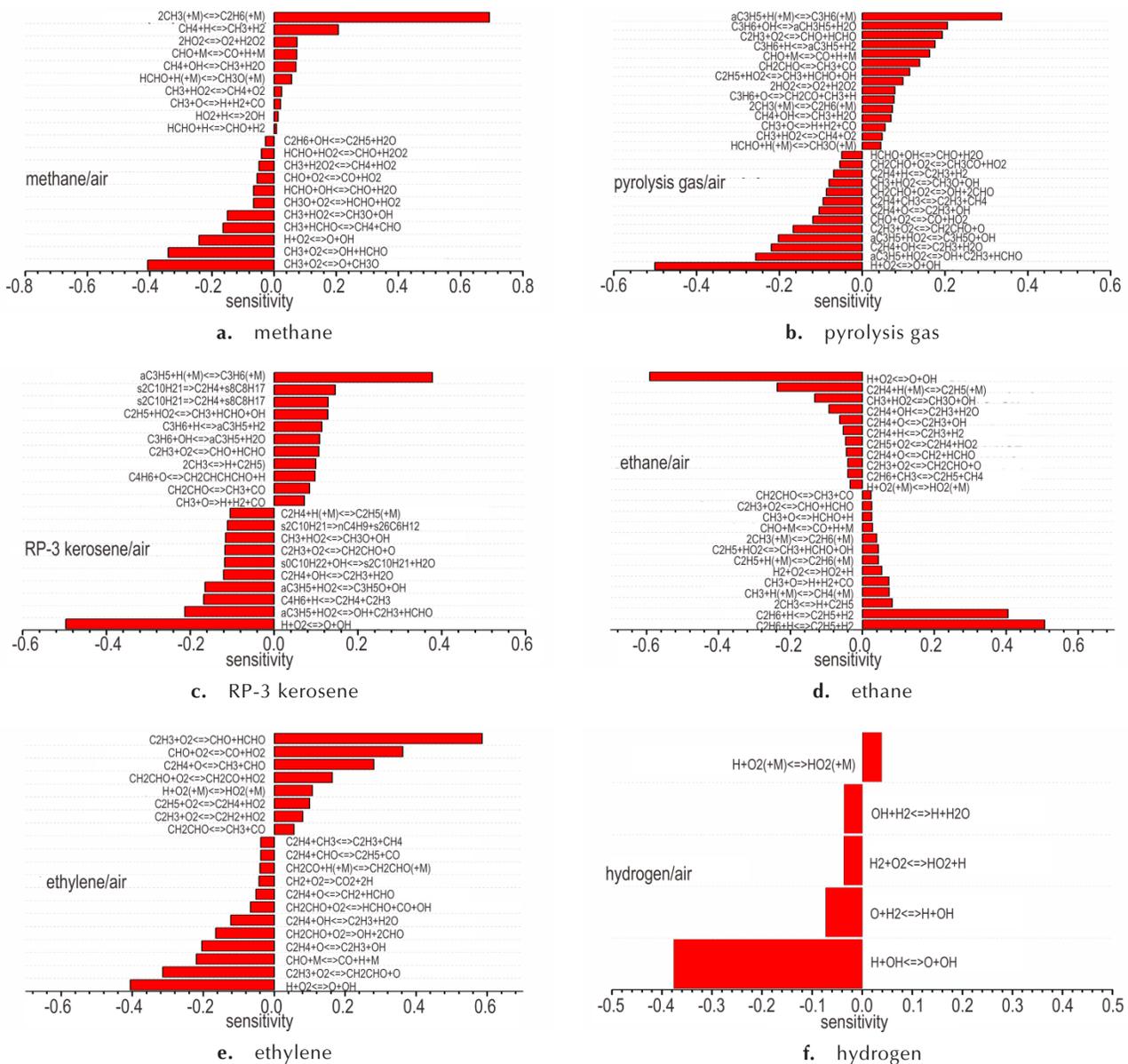


图 6 燃料点火延迟时间的敏感度分析结果

Fig.6 Sensitivity analysis results on the ignition delay time of fuels

H—H键断裂与O<sub>2</sub>反应促使生成大量的OH自由基。对于甲烷的点火, 反应 $\text{CH}_3 + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{HCHO}$ 、 $\text{CH}_3 + \text{O}_2 = \text{O} + \text{CH}_3\text{O}$ 促进点火, 反应 $2\text{CH}_3 (+\text{M}) = \text{C}_2\text{H}_6 (+\text{M})$ 抑制点火。可以通过控制上述关键反应, 达到控制燃料点火的作用。

## 4 结论

在化学激波管中利用反射激波点火, 测量了航空煤油、裂解气及主要裂解单组份氢气、甲烷、乙烯和乙烷在点火温度为900~1820 K, 压力为 $1.01 \times 10^5$  Pa, 当量比为1.0条件下的自点火延迟时间, 获得了如下结论:

(1) 在高温下燃料点火延迟时间的对数与温度的倒数呈较好的线性关系, 拟合得到了燃料点火延迟时间随温度变化的定量规律。

(2) 对比发现甲烷点火延迟时间最长, 氢气最短; 由于航空煤油裂解气中包含大量的烷烃, 降低了燃料的点火性能, 导致裂解气的点火延迟比航空煤油略长。

(3) 实验结果验证了相应的动力学机理, 敏感度分析表明链反应 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ 是促进航空煤油、煤油裂解气及主要裂解成分氢气、乙烯和乙烷点火的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 姚峰, 刘建忠, 周禹男, 等. 激波管低压下RP-3煤油点火延迟时间研究[C]//中国航天第三专业信息网第三十九届技术交流会暨第三届空天动力联合会—S08含能材料及推进剂技术, 洛阳, 2018.  
YAO Feng, LIU Jian-zhong, ZHOU Yu-nan, et al. Study on ignition delay time of RP-3 kerosene under shock tube at low pressure[C]//The 39th technical exchange meeting of the third China aerospace information network and the third federation of space power—S08 energy-containing materials and propellant technology, Luoyang, 2018.
- [2] 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]. 大连: 大连理工大学, 2016.  
MA Hong-an. Experimental and numerical investigation on ignition and combustion characteristics of chinese RP-3 kerosene [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [3] Davidson D F, Hanson R K. Interpreting shock tube ignition data[J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2004, 36(9): 510–523.
- [4] 刘明夏, 谈宁馨, 王静波. 航空煤油裂解产物燃烧机理构建与动力学模拟[J]. *化学研究与应用*, 2019, 31(2): 778–282.  
LIU Ming-xia, TAN Ning-xin, WANG Jing-bo. Mechanism construction and kinetic simulation for the combustion of cracked kerosene [J]. *Chemical Research and Application*, 2019, 31(2): 778–282.
- [5] Hanson R K, Davidson D F. Recent advances in laser absorption and shock tube methods for studies of combustion chemistry [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2014, 44: 103–114.
- [6] Goldsborough S S, Hochgreb S, Vanhove G, et al. Advances in rapid compression machine studies of low- and intermediate-temperature autoignition phenomena [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 63: 1–78.
- [7] 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.
- [8] 廖钦, 徐胜利. 雾化激波管研制和煤油点火延迟时间测量[J]. *实验流体力学*, 2009, 23(3): 70–79.  
LIAO Qin, XU Sheng-li. The ignition delay measurement of atomized kerosene air mixture in an aerosol shock tube [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 70–79.
- [9] 梁金虎, 王苏, 张灿, 等. RP-3航空煤油点火特性研究[J]. *力学学报*, 2014, 46(3): 352–360.  
LIANG Jin-hu, WANG Su, ZHANG Can, et al. Studies on the autoignition characteristics of RP-3 aviation kerosene [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(3): 352–360.
- [10] 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(01): 85–93.  
ZHANG Ying-jia, HUANG Zuo-hua, WANG Jin-hua, et al. Shock tube study on auto-ignition characteristics of kerosene/air mixtures [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(01): 85–93.
- [11] 南北, 刘文佳, 李振华, 等. 利用激波管测量丁醇着火延迟时间的实验[J]. *上海交通大学学报*, 2013, 46(03): 493–497.  
NAN Bei, LIU Wen-jia, LI Zhen-hua, et al. Experimental study on ignition delay of butanol using shock tube [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Science)*, 2012, 46(03): 493–497.
- [12] 曾文, 李海霞, 马洪安, 等. RP-3航空煤油着火特性的实验[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(3): 481–488.  
ZENG Wen, LI Hai-xia, MA Hong-an, et al. Experiment of ignition characteristics of RP-3 kerosene [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(3): 481–488.
- [13] 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(04): 787–791.  
TANG Hong-chang, ZHANG Chang-hua, LI Ping, et al. Experimental study of autoignition characteristics of kerosene [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(04): 787–791.
- [14] Puri P, Ma F, Choi J-Y, et al. Ignition characteristics of cracked JP-7 fuel [J]. *Combustion and Flame*, 2005, 142(4): 454–457.
- [15] Colket M B, Spadaccini L J. Scramjet fuels autoignition study [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(2): 315–323.
- [16] Pei S, Wang H, Zhang X, et al. Experimental measurement of ignition delay times of thermally cracked n-decane in a shock tube [J]. *Energy Fuels*, 2017, 31(3): 3262–3269.
- [17] 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.
- [18] Zhang D, Wang Y, Zhang C, et al. Experimental and numerical investigation of vitiation effects on the auto-ignition of n-heptane at high temperatures [J]. *Energy*, 2019, 174:

- 922-931.
- [19] ANSYS chemkin 17.0 (15151), ANSYS Reaction Design. 2016. San Diego.
- [20] 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 Jia-qi, GUO Jun-jiang, LIU Ai-ke, 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.
- [21] Chen B, Liu J, Yao F, et al. Ignition delay characteristics of RP-3 under ultra-low pressure (0.01-0.1 MPa) [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 210: 126-133.
- [22] Liu Y, Richter S, Naumann C, et al. Combustion study of a surrogate jet fuel [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 202: 252-261.
- [23] Kumar K, Mittal G, Sung C, et al. An experimental investigation of ethylene/O<sub>2</sub>/diluent mixtures: laminar flame speeds with preheat and ignition delays at high pressures[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 153(3): 343-354.

## High Temperature Auto-ignition Delay Characteristics of Pyrolysis Gas of Aviation Kerosene

ZHENG Zu-jun<sup>1</sup>, WANG Zhong-jun<sup>1</sup>, LI Ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Chang-hua<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Engineering Research Center of Combustion and Cooling for Aerospace Power, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Aviation kerosene is a typical endothermic hydrocarbon fuel, and its pyrolysis gas absorbs heat before entering combustion chamber, which plays an important role in the heat protection of high-speed aircraft. Auto-ignition delay time of hydrocarbon fuel and its pyrolysis gas is one of main parameters for ramjet design, and is important data to validate the combustion reaction mechanism. In this work, the reflected shock wave was used to ignite fuels. Aviation kerosene and its pyrolysis gas in a chemical shock wave tube was studied. Ignition delay time was defined as the time interval between the arrival of reflected wave indicated by the jump of pressure signal and the onset of CH\* emission signal. Auto-ignition delay times of RP-3 kerosene, pyrolysis gas, hydrogen, methane, ethylene and ethane were measured in the temperature range of 900-1820 K, at pressure of  $1.01 \times 10^5$  Pa and equivalence ratio of 1.0. Experimental results demonstrate that ignition delay time decreases with the increase of temperature. In the same condition, ignition delay time of methane is the longest and that of hydrogen is the shortest, and the ignition delay of pyrolysis gas is slightly longer than that of aviation kerosene. The activation energy of pyrolysis gas is very close to that of aviation kerosene, around  $180 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . The lowest ignition activation energy of all single component is hydrogen, which is  $127.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . The experimental results were compared with the simulation results of combustion kinetic mechanism, which can predict the influence of temperature on ignition delay time. Furthermore, sensitivity analysis of the mechanism was carried out, and the main elementary reactions affecting fuel ignition were obtained.

**Key words:** aviation kerosene; pyrolysis gas; ignition delay time; shock tube; combustion mechanism

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019328

(责编:姜梅)