

H₂O/CO₂污染对RP-3航空煤油着火特性的影响*

梁金虎^{1,2}, 王 苏², 张 灿^{1,2}, 张胜涛¹, 岳连捷², 范秉诚², 张新宇², 崔季平²

(1. 重庆大学 化学化工学院, 四川 重庆 400044;

2. 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: 超燃研究地面实验中通过燃烧加热方式获得的高焓气体中通常含有H₂O和CO₂等污染组分, 污染组分可能造成地面实验与实际飞行中燃料着火特性不一致。为了正确评估这两种污染组分对碳氢燃料着火特性的影响, 在预加热激波管中研究了H₂O和CO₂对RP-3航空煤油着火特性的影响效应。根据超燃研究的实际应用需求, 以压力为0.05, 0.1, 0.2MPa和化学当量比为0.5, 1条件下RP-3航空煤油在纯净气体中着火特性为基础, 分别进行了单独加入4%和25%的H₂O, 单独加入3%和10%的CO₂, 以及同时加入15%H₂O+10%CO₂条件下, 污染组分对RP-3航空煤油着火特性影响的对比实验研究。结果表明: 0.1MPa时, H₂O和CO₂单独以及同时存在时对煤油着火基本都没有影响。在0.05和0.2MPa时, H₂O对煤油着火具有明显促进作用, CO₂对煤油着火产生阻滞作用; 当H₂O和CO₂同时存在且压力为0.05和0.2MPa时, 污染组分15%H₂O+10%CO₂在较大温度范围内表现出对煤油着火的促进作用。从燃烧反应机理和热物理性质的角度对实验结果进行了初步分析。

关键词: 污染效应; 着火延时; 煤油; H₂O; CO₂; 激波管

中图分类号: V312⁺.1; O362 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2015) 03-0336-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.03.003

Effects of H₂O and CO₂ on Ignition Characteristics of RP-3 Aviation Kerosene

LIANG Jin-hu^{1,2}, WANG Su², ZHANG Can^{1,2}, ZHANG Sheng-tao¹, YUE Lian-jie², FAN Bing-cheng²,
ZHANG Xin-yu², CUI Ji-ping²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In ground tests of hypersonic scramjet, the high-enthalpy airstream produced by burning hydrocarbon fuels often contains contaminants H₂O and CO₂. The contaminants may cause the ignition characteristics of fuels to become discrepant between ground tests and real flights. In order to properly assess the influence of the contaminants on ignition characteristics of hydrocarbon fuels, the effects of H₂O and CO₂ on ignition characteristics of RP-3 aviation kerosene were investigated in a preheated shock tube. To meet the needs of scramjet ground tests based on the ignition delay times of RP-3 aviation kerosene in clean gas, comparative experiments were conducted with clean and vitiated gases. At pressure of 0.05, 0.1 and 0.2MPa, and equivalence ratios of 0.5 and 1, respectively, ignition delay times of kerosene were measured for four cases: (1) clean gas, (2) gas vitiated with 4% and 25% H₂O by mole, (3) gas vitiated with 3% and 10% CO₂ by mole, and (4) gas vitiated with 15% H₂O and 10% CO₂ by mole fraction. The experimental results show that water vapor or/and carbon dioxide have almost no effect at pressure of 0.1 MPa. However, at pressure of 0.05MPa and 0.2MPa, respectively, wa-

* 收稿日期: 2014-02-26; 修订日期: 2014-04-02。

基金项目: 国家自然科学基金 (90916017)。

作者简介: 梁金虎 (1987—), 男, 博士生, 研究领域为高超声速燃烧技术。E-mail: liangjinhu19870325@126.com

ter vapor appears to accelerate the ignition process, whereas carbon dioxide produces an inhibiting effect. At pressure of 0.05MPa and 0.2MPa, an obvious promoting effect appears over a wide temperature range when water vapor and carbon dioxide exist together. The results were also discussed preliminarily by considering both the combustion reaction mechanism and the thermophysical properties of the test mixtures.

Key words: Vitiation effect; Ignition delay time; Kerosene; Water; Carbon dioxide; Shock tube

1 引言

超燃冲压式发动机在进行实际飞行以前要进行充分的地面实验,目前地面实验中的高焓气体大多采用燃烧加热的方式获得。与实际飞行中的气体相比,这种燃烧加热方式获得的高焓气体中含有H₂O和CO₂等污染组分。在燃烧加热时使用H₂作为燃烧气体,主要污染成分为H₂O;使用甲烷和酒精等碳氢燃料时,主要污染成分是H₂O和CO₂。由于污染组分H₂O和CO₂具有不同于空气组分的热力学和输运性质,并且在燃料燃烧过程中可以直接参与燃烧基元化学反应或以第三体效应方式改变燃烧基元反应速率^[1]。因此,污染组分H₂O和CO₂的存在可能改变实验来流状态和影响燃料着火和燃烧特性。发动机燃烧室工作过程包括燃料和来流空气混合、液体燃料雾化和蒸发、燃料着火和燃烧释热等。已有研究指出,污染组分对燃料与来流混合过程影响较小^[1]。燃料着火过程与着火环境的温度、压力、组分等密切相关。H₂O和CO₂的存在可明显改变燃料着火环境的热力学和组分性质,从而可能影响燃料着火特性。

高超声速飞行时,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着火延时时间是燃烧室工作状态非常重要的参数。由于污染组分的影响,发动机在地面实验与实际飞行中燃料着火特性可能出现差异,因此正确评估污染组分对碳氢燃料着火特性的影响将为“天地换算”提供基础数据支撑。

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^[2]。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。国内外关于污染组分H₂O和CO₂对燃料着火特性影响的研究主要集中在H₂和CH₄等小分子燃料上。Jachimowski和Houghton^[3]利用激波管实验观察到H₂O促进H₂点火,而CO₂没有明显的影响。Goynes等^[4]发现污染组分H₂O和CO₂导致氢燃料超燃发动机燃烧室压力分布下降。Gurentsov等^[5]采用激波管实验观察到H₂O使甲烷着火延时缩短2~3

倍。Le Cong等^[6,7]利用射流搅拌反应器(Jet-stirred reactor)进行实验并结合数值模拟研究了CO₂对CH₄燃烧性能的阻滞作用以及H₂O和CO₂对乙烯和丙烯燃烧性能的影响。Liu等^[8]通过数值模拟指出CO₂通过直接参与燃烧化学反应明显降低了H₂和CH₄预混火焰的燃烧速度。Chinitz和Erdos^[9,10]通过数值模拟考察了风洞中污染组分NO和H₂O对碳氢燃料着火延时的影响,研究的燃料包括低碳数碳氢燃料如甲烷、乙炔、乙烯等以及高碳数碳氢燃料Norpar-12,结果显示H₂O对Norpar-12等燃料的低温着火存在明显的阻滞作用。国内,刘陵等^[11]对H₂O影响H₂燃烧特性的数值模拟分析显示,在高温低压条件下H₂O对H₂的着火促进效果更明显。刘伟雄等^[12,13]通过地面风洞实验和动力学数值模拟考察了H₂O和CO₂对乙烯和H₂燃烧性能的影响,结果显示H₂O和CO₂对乙烯燃烧分别具有促进和阻滞作用,H₂O和CO₂同时存在对H₂着火具有明显的阻滞作用。侯凌云等^[14,15]通过数值模拟研究了燃烧乙醇加热空气后的污染组分H₂O和CO₂等对甲烷和煤油超声速燃烧性能的影响,发现H₂O和CO₂都对甲烷的超燃性能起消极作用,来流空气中存在H₂O和CO₂使煤油超燃室中的燃烧效率和内推力均下降。宋文艳等^[16,17]采用数值模拟的方法分别考察了H₂O和CO₂等污染物对H₂和煤油超声速燃烧性能的影响,结果显示污染的存在降低了煤油燃料超声速燃烧室性能。邢建文和肖保国^[18]采用数值模拟分析指出H₂O污染对发动机燃烧室燃烧效率影响明显。本文作者^[19]近期利用激波管实验研究了H₂O和CO₂对乙烯着火特性的影响,结果显示在0.2MPa条件下当量比 $\Phi = 0.5$ 时两种污染组分都对乙烯的着火特性没有明显影响,在 $\Phi = 1$ 时H₂O和CO₂都对乙烯的着火起阻滞作用。

与低碳数碳氢燃料相比,关于H₂O和CO₂对煤油着火和燃烧特性影响的实验研究还不是太多。目前国内外的相关研究多数是考察污染组分对燃料燃烧性能的影响。实际上由于燃料着火对环境组分更加敏感,从污染组分对燃料着火特性的影响来讨论污染效应是比较有效的途径。本文以预加热到135℃的激波管为研究设备,以无污染纯净气氛中煤油着

火特性为基础,通过对比实验考察污染物 H_2O 和 CO_2 对煤油着火特性的影响效应。在超燃风洞 $Ma=4\sim 7$ 的实验条件下,采用常规燃料(H_2 、甲烷、乙醇、煤油)燃烧加热所形成的高焓来流中 H_2O 含量约为 $5\sim 25\%$ (mole), CO_2 含量约为 $3\sim 10\%$ (mole)。本文考虑实际工程来流中污染物组分含量,在空气氧气含量的低稀释度条件下,通过激波管方法考察污染组分 H_2O 和 CO_2 在常压条件下对 RP-3 航空煤油着火特性的影响。

2 实验

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^[20]。激波管高压段长 3.0m, 低压段长 4.1m, 双膜段长 0.2m, 内径均为 0.1m, 采用双膜结构, 实验装置如图 1 所示。激波管低压室外壁用加热带和保温材料缠绕, 以使管壁温度维持在 $135^\circ C$, 低压室最大漏率维持在 $1 Pa/min$ 以下。入射激波速度由低压室侧壁和端盖处的三个分别距离为 0.5m 的压电传感器进行测量, 反射激波后 5 区压力由端盖处的压电传感器进行记录。通过 3 个压力传感器记录的激波速度, 利用一维正激波关系获得反射激波后 5 区温度及压力条件。靠近低压室端盖处开有一内径为 8mm 的石英光学窗口, 实验时单色仪通过此石英窗口测定 OH 自由基在波长 306.5nm 处发射光谱强度的变化作为判定着火发生的依据。OH 自由基是碳氢燃料燃烧反应过程中重要的中间产物, 实验中选取 OH 自由基在 306.5nm 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着火发生的时间。反射激波后 5 区压力平台形成表示实验气体已处于一定的温度压力环境中, 从 5 区压力平台开始形成到着火发生, 这段时间就被定义为着火延时。图 2 是典型的激波管着

火实验记录图, 图中 p_5 表示低压室端盖处的压电传感器测量的反射激波后 5 区压力信号, I_{OH} 对应着火过程中 OH 自由基发射光谱信号。图中显示了 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着火发生后 5 区压力和 OH 自由基发射谱强度同时发生急剧变化。

煤油是一种包含多种碳氢化合物的混合物, 其详尽的组分比较复杂, 目前尚没有统一的分子式, 科学研究中一般都采用替代物模型来表示煤油。本研究中所用煤油为大庆产 RP-3 航空煤油, 使用范学军等^[21]提出的由 49% (摩尔比) 正十烷, 44% 1,3,5-三甲基环己烷以及 7% 正丙基苯组成的替代物模型, 平均分子式为 $C_{9.49}H_{19.54}$, 平均分子量确定为 133.4。

本文采用对比实验的方法, 首先进行了无污染条件下煤油/ O_2 /Ar 混合实验气体的着火实验, 在此基础上用污染物 H_2O 和 CO_2 取代实验样品混合气中部分稀释气体 Ar, 通过实验分别获得单独加入 H_2O 和 CO_2 、以及同时加入这两种污染组分条件下煤油着火延时时间变化情况, 考察这两种污染组分对 RP-3 煤油着火特性的影响效应。

由于煤油和 H_2O 在激波管内壁存在一定的吸附, 实验前首先在激波管中进行了 RP-3 航空煤油和 H_2O 的吸附特性测定。分别考察了煤油和 H_2O 在恒温加热到 $135^\circ C$ 的激波管低压室中的吸附曲线, 结果如图 3 所示。图 3(a) 显示, 注入激波管 6min 后, 煤油蒸气压力趋于稳定, 说明已达到吸附平衡, 此时的气相压力即为平衡气相压力。在进行煤油着火实验时, 真空计记录注入低压室 6min 时的煤油压力作为实验时混合气体中煤油的分压, 以确定实验时煤油的气相浓度。图 3(b) 显示, 当 H_2O 加入量增加时吸附程度更加明显。在本实验加入量范围内, 将 H_2O 注入激波管内 10min 后 H_2O 蒸气压力基本趋于稳定, 此时的气

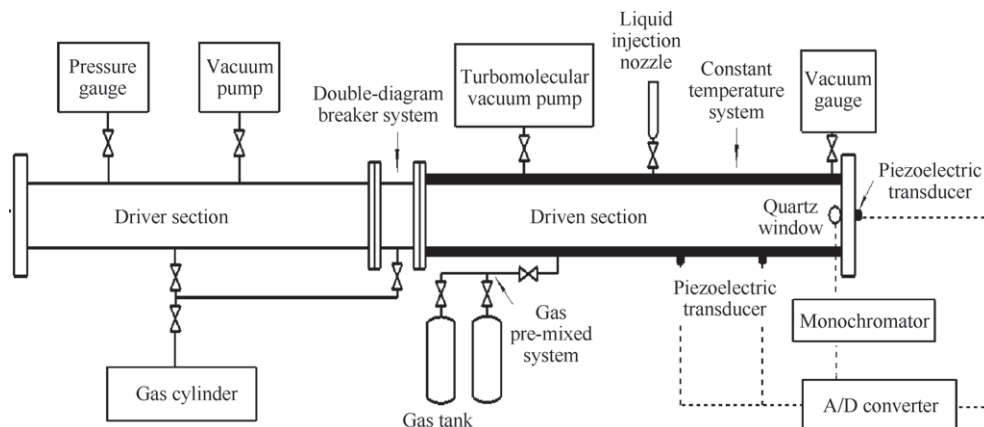


Fig. 1 Schematic diagram of the shock tube

相压力即为平衡气相压力。因此,在进行加 H₂O 实验时,直接测定 H₂O 加入后吸附平衡时的蒸气压力作为混合气体中 H₂O 的分压。本实验中激波管低压段被加热恒定在 135℃,提高管壁温度一方面减小了煤油和 H₂O 在管壁的吸附程度,同时也提高了煤油和 H₂O 的饱和蒸汽压,扩展了实验时添加 H₂O 的浓度范围。

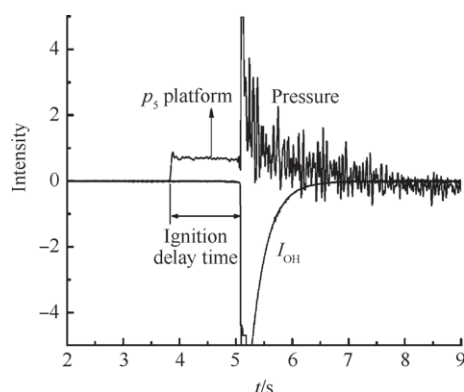
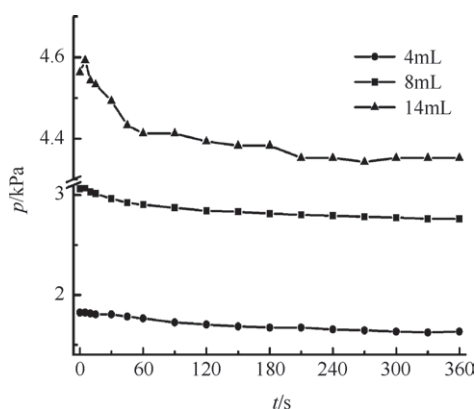
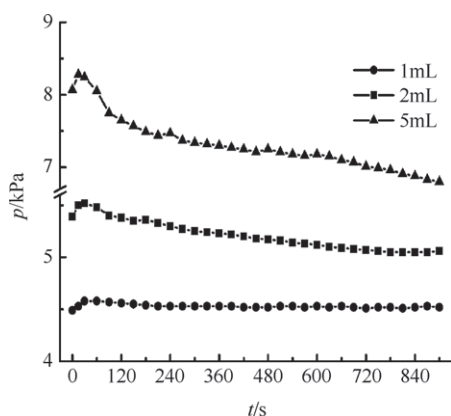


Fig. 2 Typical experimental record



(a) Kerosene



(b) Water

Fig. 3 Adsorption curves of kerosene and water in the shock tube at 135℃

考虑到煤油和 H₂O 在激波管内壁存在一定的吸附,本文实验没有采用预混煤油/O₂/Ar 样品气体的激

波管实验传统进样方式,而是通过针阀向极限真空条件下的低压室加入一定量的液体煤油,当液体煤油充分气化压力读数稳定后加入 O₂/Ar 混合气体,混合 10min 后破膜进行实验。添加污染物 H₂O 和 CO₂ 的对比实验过程与基础实验基本相同,只是在实验混合气体中用污染组分替代部分惰性稀释气体 Ar。在进行 H₂O 存在下的着火实验时,首先将 H₂O 注入激波管低压室,利用真空计测定其平衡分压后,再加入煤油测定其平衡压力,最后充入 O₂/Ar 混合气体,混合 10min 后破膜进行实验。实验中着火延时时间超过 2ms 时,采用接触面缝合运行,在缝合运行条件下实验时间可以扩展到 6~8ms。由测量的激波速度依据激波关系式计算出 5 区的温度和压力条件。

实验结果的不确定性主要是由气体的非理想性和测量过程中的误差造成。Tang 和 Brezinsky^[22]在长 5.6m、内径 50.8mm 的激波管中专门考察了这种不确定性,发现在压力 2.5MPa 和温度 1270K 的条件下,由于气体运行的非理想性引起反射激波后 5 区压力变化导致温度增加了 55K。通过数值计算发现,当 5 区压力的变化低于 15% 时,传统的将 5 区作为恒定温度和压力的数据处理方法是适用于化学动力学研究的。本文实验中,着火发生前 5 区压力的变化基本上在 10% 之内。在本实验中,激波速度测量带来的误差约为 0.5%,这给反射激波后 5 区温度和压力分别带来 1% 和 2% 的误差,这将导致实验中测量的着火延时结果大约有 10%~15% 的误差。这一误差基本上与目前国外测量结果误差处于同一水平^[23]。

3 结果与讨论

本实验选定煤油的着火压力为 0.05, 0.1 和 0.2MPa。考虑到超燃冲压式发动机地面实验中采用“烧氢补氧”方式所获得的高焓气体中污染物 H₂O 和 CO₂ 的实际含量,实验选定了 H₂O 单独加入量分别为 4% 和 25% (mole), CO₂ 单独加入量分别为 3% 和 10% (mole),以及两种污染组分同时加入量为 15% (mole) H₂O + 10% (mole) CO₂。根据超燃研究地面实验实际需求,化学当量比为 $\Phi=0.5$ 和 $\Phi=1$,不同实验条件下的低压室气体组分如表 1、表 2 所示,不同着火条件下的实验结果如图 4~6 所示。由于着火延时与温度符合 Arrhenius 关系,图中纵坐标表示着火延时时间,且纵坐标使用对数坐标。

3.1 H₂O 对煤油着火特性的影响

在 $\Phi=0.5$ 和 1, $p=0.05, 0.1$ 和 0.2MPa 条件下, H₂O 对 RP-3 航空煤油着火特性的影响结果如图 4 所示。

Table 1 Composition of the test mixtures at $\Phi=0.5$ (mole fraction)

Experimental components	Kerosene/%	O ₂ /%	H ₂ O/%	CO ₂ /%	Ar/%
Basic experiment	0.6	19.88	0.0	0.0	79.52
4%H ₂ O	0.6	19.88	4.0	0.0	75.52
25%H ₂ O	0.6	19.88	25.0	0.0	54.52
3%CO ₂	0.6	19.88	0.0	3.0	76.52
10%CO ₂	0.6	19.88	0.0	10.0	69.52
15%H ₂ O + 10%CO ₂	0.6	19.88	15.0	10.0	54.52

Table 2 Composition of the test mixtures at $\Phi=1$ (mole fraction)

Experimental components	Kerosene/%	O ₂ /%	H ₂ O/%	CO ₂ /%	Ar/%
Basic experiment	1.2	19.76	0.0	0.0	79.04
4%H ₂ O	1.2	19.76	4.0	0.0	75.04
25%H ₂ O	1.2	19.76	25.0	0.0	54.04
3%CO ₂	1.2	19.76	0.0	3.0	76.04
10%CO ₂	1.2	19.76	0.0	10.0	69.04
15%H ₂ O + 10%CO ₂	1.2	19.76	15.0	10.0	54.04

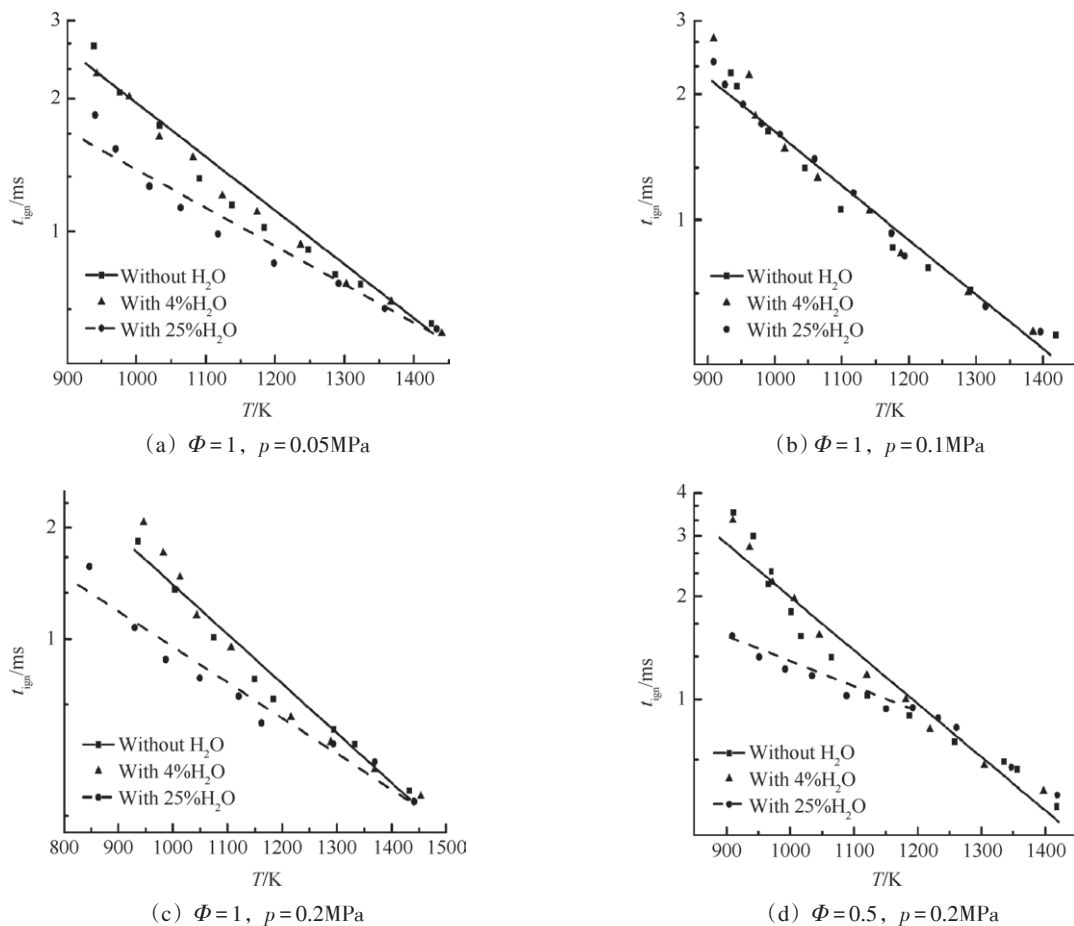


Fig. 4 Effects of water vapor on the ignition delay time of RP-3 kerosene

图4(b)显示,当 $\Phi=1, p=0.1\text{MPa}$ 时H₂O对煤油着火基本没有影响。图4(a),4(c)显示,当 $\Phi=1, p=0.05$ 和 0.2MPa 时,在实验温度范围900~1450K,加入4%的H₂O对煤油着火也基本没有影响,加入25%的H₂O对煤油着火具有明显的促进作用,而且这种促进作用随温度降低更加明显。图4(a)显示,在 $\Phi=1, p=0.05\text{MPa}$ 条件下,加入25%的H₂O,在1200K时使煤油着火延时从1.0ms降到0.79ms,降幅21%;在950K时从2.36ms缩短到1.62ms,降幅达31%。图4(c)显示,在 $\Phi=1, p=0.2\text{MPa}$ 条件下,加入25%的H₂O,1200K时使煤油着火延时从0.70ms降到0.58ms,降幅17%;950K时从1.69ms降到1.05ms,降幅达38%。图4(d)显示,当 $\Phi=0.5, p=0.2\text{MPa}$ 时,加入4%的H₂O对煤油着火延时基本依旧没有影响;加入25%的H₂O对煤油的着火影响存在一个临界温度约为1200K,高于此临界温度H₂O对煤油着火基本没有影响,低于此临界温度时H₂O对煤油着火表现出促进作用,而且随温度降低这种促进作用更明显。加入25%的H₂O,1100K时使煤油着火延时从1.27ms降到1.02ms,降幅达20%;950K时使煤油着火延时从2.49ms减少到1.38ms,降幅达32%。

3.2 CO₂对煤油着火特性的影响

图5总结了CO₂对煤油着火特性的影响结果。图5(a)显示, $\Phi=1, p=0.1\text{MPa}$ 时,污染组分CO₂对煤油着火基本没有影响;图5(b)显示, $\Phi=0.5, p=0.2\text{MPa}$ 时,CO₂对煤油着火产生阻滞作用,随CO₂加入量的增加阻滞作用更加明显,这种阻滞作用在CO₂加入量固定时随温度降低更明显。图5(b)显示,1000K时,加入3%和10%CO₂使煤油着火延时时间从1.93ms分别增加到3.16ms和4.07ms,分别增加了63%和108%。

3.3 H₂O和CO₂对煤油着火特性的协同影响

污染组分H₂O和CO₂同时存在对煤油着火特性的协同影响如图6所示,实验条件为 $\Phi=0.5$ 和 $1, p=0.05, 0.1$ 和 0.2MPa 。考虑到超燃地面实验中“烧氢补氧”方式获得来流中H₂O和CO₂的含量,本文考察了15% H₂O+10% CO₂的协同影响情况。从图6(b)可以看出, $\Phi=1, p=0.1\text{MPa}$ 时,H₂O和CO₂同时存在对煤油着火特性基本没有影响。需要说明的是,图4(b)和5(a)显示,分别单独加入H₂O和CO₂时, $\Phi=1, p=0.1\text{MPa}$ 条件下煤油着火延时也未发生变化。图6(a),6(c)显示,当 $\Phi=1, p=0.05$ 和 0.2MPa 时,在实验温度范围950~1430K,15% H₂O+10% CO₂同时存在对煤油着火起促进作用,随温度降低促进作用更加明显。从图6(a)看到,在 $\Phi=1, p=0.05\text{MPa}$ 条件下,1200K时煤油着火延时从1.0ms减小到0.86ms,降低了14%;1000K时则从1.92ms降低到1.47ms,降低了23%。从图6(c)看到,在 $\Phi=1, p=0.2\text{MPa}$ 条件下,1200K时煤油着火延时时间从0.70ms减小到0.61ms,降低了13%;1000K时则从1.38ms降低到1.05ms,降低了24%。图6(a),6(c)还显示,温度升高到1450K时,两种实验条件下仍然可以观测到污染组分的促进作用。图6(d)显示,在 $\Phi=0.5, p=0.2\text{MPa}$ 条件下,当温度高于1200K时,污染组分对煤油的着火未产生明显影响;当温度低于1200K时,15% H₂O+10% CO₂同时存在对煤油着火起促进作用,而且随着温度降低促进作用更加明显。温度为1100K时,15% H₂O+10% CO₂使煤油着火延时时间从1.27ms减少到1.04ms,减少了18%;1000K时,则从1.93ms减少到1.37ms,减少了29%。

3.4 污染效应原因的初步分析

污染组分对碳氢燃料着火特性的影响基本有两

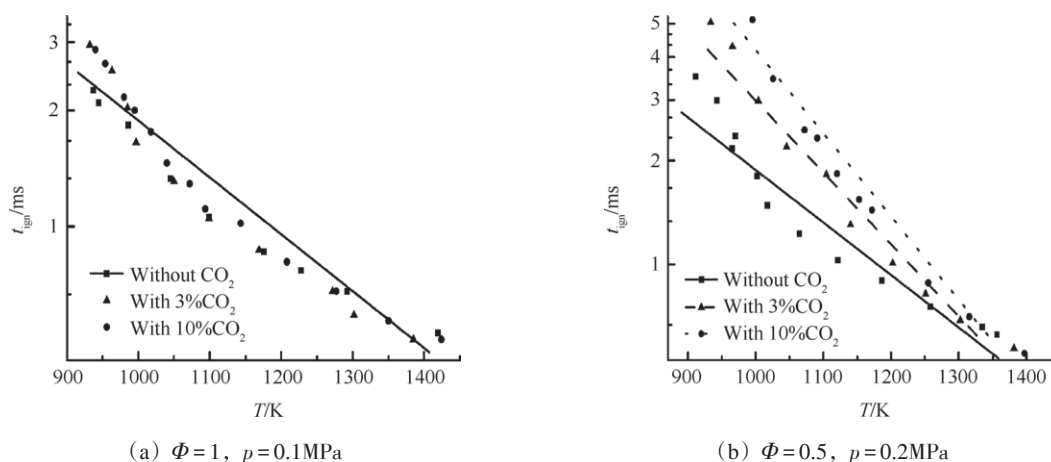


Fig. 5 Effects of carbon dioxide on the ignition delay time of RP-3 kerosene

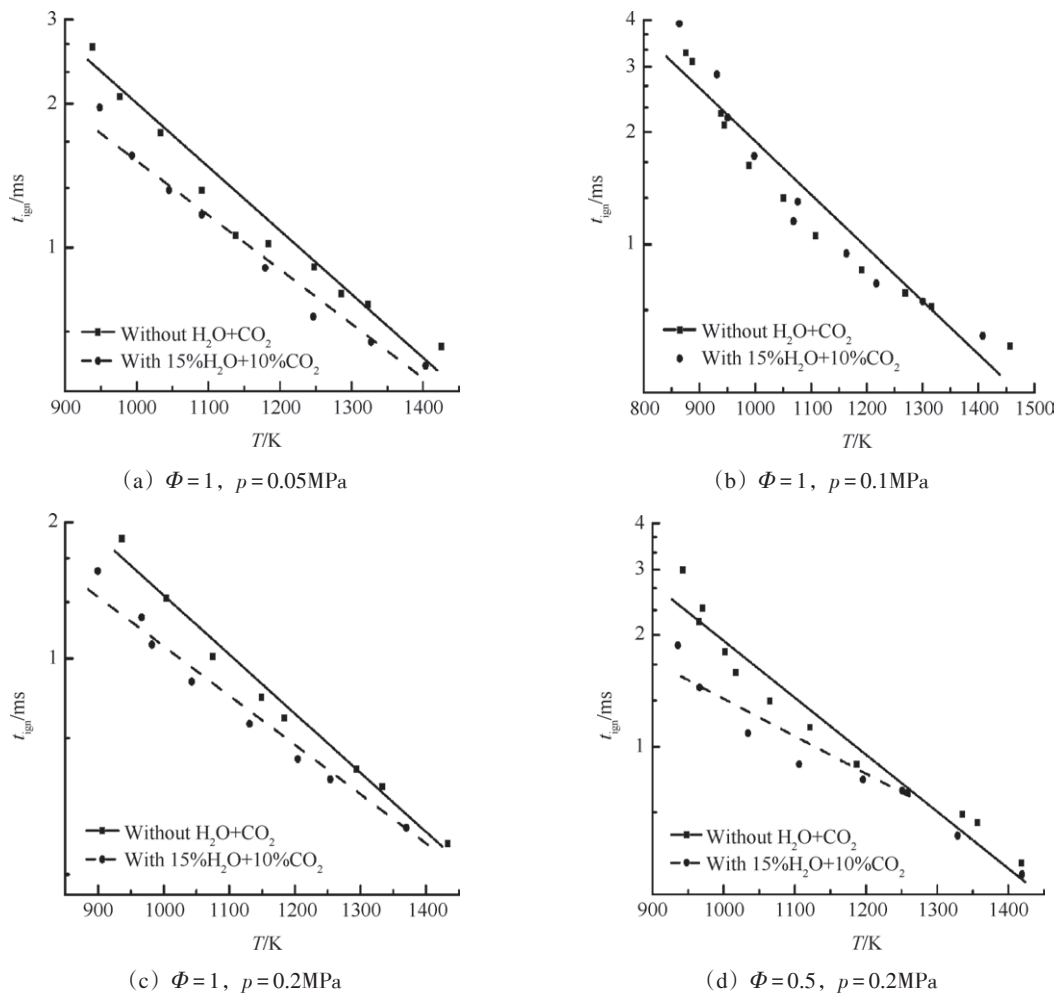


Fig. 6 Effects of water vapor and carbon dioxide on the ignition delay time of RP-3 kerosene

方面的原因,一方面是 H_2O 和 CO_2 可以直接参与诱发着火的化学反应,另一方面 H_2O 和 CO_2 的加入改变了燃料混合物着火环境的热物理特性。

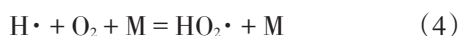
在煤油着火过程中,自由基 $\text{H}\cdot$ 、 $\text{O}\cdot$ 、 $\text{OH}\cdot$ 的生成速率是决定燃料着火特性的关键。其中链反应是最为关键的两个步骤。



从 H_2O 直接参与着火诱导期的化学反应考虑,当燃料混合物中有 H_2O 存在时,其对自由基的生成有两种相反的效应。一方面, H_2O 直接参与反应式(3)促进 $\text{OH}\cdot$ 生成



这一反应是有利于着火发生的;另一方面,由于 H_2O 比 Ar 、 N_2 具有更大的三体系数, H_2O 作为第三体(M)身份将参与H自由基的主要生成和消耗反应



Le Cong等^[7]认为 H_2O 参与这两个反应的总效果

是降低了 $\text{H}\cdot$ 的生成速率,而 $\text{H}\cdot$ 生成速率的降低进一步通过反应式(1)和式(2)降低 $\text{O}\cdot$ 和 $\text{OH}\cdot$ 的产生速率,这将不利于着火的发生。

从加入 H_2O 后改变混合物的热物理特性考虑, H_2O 作为煤油着火过程中的环境气体,加入 H_2O 后混合物的热容将增加。Würmel^[24]等通过动力学模拟证明,当着火环境的热容增加时,在诱导着火的化学反应放热过程中高热容使体系温度升高速率减慢,不利于后续链反应的加速发生,导致着火延迟时间增加。

因此,加入 H_2O 后热物理特性的改变和 H_2O 的三体效应影响使煤油着火延时增长,参与化学反应式(3)将使着火延时缩短。两种作用的综合效果在宏观上表现为:当加 H_2O 量较低时(4%),两种效果基本都很弱,表现为煤油的着火延时时间并未发生明显变化。当加 H_2O 量较高(25%)且着火温度较高时(临界温度以上),两种作用相互抵消,表现为煤油着火延时没有明显变化。着火温度较低时(临界温度以下),参与化学反应式(3)占主导作用,宏观上表现为

煤油着火延时时间的缩短,对着火起促进作用。

CO₂存在时,一方面通过反应式(6)直接影响OH·的生成速率,对着火起促进作用



由于多原子的CO₂也具有较大的三体系数,当燃料混合物中有CO₂存在时,CO₂同样通过反应式(4)和式(5)降低H·的生成速率,从而通过反应式(1)和式(2)降低OH·的生成速率,对着火起阻滞作用。从改变混合物的热物理性质的角度考虑,与H₂O相同,CO₂作为着火过程中的环境气体将使混合物的热容增加,同样导致煤油着火延迟时间增加。

CO₂的三体效应以及对热物理特性的改变增加了煤油的着火延时时间,而参与化学反应式(6)将使着火延时缩短。这两种相反作用同时存在,其综合效果也会因实验条件的改变而变化。

当H₂O和CO₂同时存在时,两种作用的累积效应也同样会因实验条件的改变而变化,其中大部分实验条件下这两种污染组分同时存在时对煤油着火具有明显促进作用。

以上定性分析了污染组分对煤油着火影响的原因,没有对压力和当量比等影响结果进行详细的分析。更详细准确地分析讨论应当进行着火过程的动力学模拟和敏感度分析,以定量判断其各种因素的影响和贡献,这也是我们今后将要开展的工作。

4 结 论

本文以压力为0.05,0.1和0.2MPa、化学当量比为0.5和1条件下煤油着火特性激波管实验为基础,进行了空气污染组分H₂O和CO₂对煤油着火特性影响的对比实验研究,主要结果如下:

(1)当量比 $\Phi = 1$ 条件下, $p=0.1\text{MPa}$ 时,污染组分H₂O对煤油的着火基本没有影响; $p=0.05,0.2\text{MPa}$ 时,4%的H₂O对煤油着火也基本没有影响,25%的H₂O对煤油着火产生明显促进作用。在 $\Phi = 0.5$ 贫油条件下, $p=0.2\text{MPa}$ 时,4%的H₂O对煤油的着火基本没有影响,25%的H₂O对煤油的着火具有明显促进作用。

(2)当量比 $\Phi = 1$ 条件下, $p=0.1\text{MPa}$ 时,污染组分CO₂对煤油的着火基本没有影响; $\Phi = 0.5$ 贫油条件下, $p=0.2\text{MPa}$ 时,CO₂对煤油的着火具有明显阻滞作用。

(3)H₂O和CO₂同时存在, $\Phi = 1, p=0.1\text{MPa}$ 时,这两种污染组分对煤油着火基本没有影响;当 $\Phi = 1, p=0.05$ 和 0.2MPa 以及 $\Phi = 0.5, p=0.2\text{MPa}$ 时,15%H₂O+

10%CO₂对煤油着火具有明显促进作用。

参考文献:

- [1] Pellett G L, Bruno C, Chinitz W. Review of Air Viti-ation Effects on Scramjet Ignition and Flam Holding Com-bustion Processes[R]. AIAA 2002-3880.
- [2] 张新宇. 高超声速吸气式发动机的研究进展与发展趋势[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 478-480.
- [3] Jachimowski C J, Houghton W M. Effect of Carbon Di-oxide and Water Vapor on the Induction Period of the Hydrogen- Oxygen Reaction [R]. NASA TND- 4685, 1968.
- [4] Goynes C P, McDaniel J C, Krauss R H. Test Gas Viti-ation Effects in a Dual- Mode Scramjet Combustor [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23 (3): 559-565.
- [5] Gurentsov E V, Divakov O G, Eremin A V. Ignition of Multicomponent Hydrocarbon/Air Mixtures Behind Shock Waves [J]. High Temperature, 2002, 40 (3): 379-386.
- [6] Le Cong T, Dagaut P. Experimental and Detailed Kinet-ic Modeling of the Oxidation of Methane and Methane/ Syngas Mixtures and Effect of Carbon Dioxide Addition [J]. Combustion Science and Technology, 2008, 180 (10-11): 2046-2091.
- [7] Le Cong T, Emma B, Dagaut P. Oxidation of Ethylene and Propane in the Presence of CO₂ and H₂O: Experimen-tal and Detailed Kinetic Modeling Study [J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182 (4-6): 333-349.
- [8] Liu F, Guo H, Smallwood G J. The Chemical Effect of CO₂ Replacement of N₂ in Air on the Burning Velocity of CH₄ and H₂ Premixed Flames [J]. Combustion and Flame, 2003, 133(4): 495-497.
- [9] Chinitz W, Erdos J I. Test Facility Contaminant and At-mospheric Ozone Effects on Hydrocarbon Flames and Nozzle Expansions[R]. AIAA 96-2917.
- [10] Chinitz W, Erdos J I. Test Facility Chemistry Effects on Hydrogen Flames and Detonations[R]. AIAA 95-2467.
- [11] 刘 陵, 张 榛, 刘敬华. 污染对氢-空气燃烧影响的化学动力学分析[J]. 推进技术, 1991, 12(3): 1-9. (LIU Ling, ZHANG Zhen, LIU Jing-hua, et al. Chemical Kinetics Analysis of the Effect of Vitiated Air on Combustion of H₂ [J]. Journal of Propulsion Technology, 1991, 12(3): 1-9.)
- [12] 刘伟雄, 杨 阳, 邵菊香, 等. 空气污染组分H₂O和

- CO₂对乙烯燃烧性能的影响[J]. 物理化学学报, 2009, 25(8): 1618-1622.
- [13] 刘伟雄, 贺 伟, 李宏斌, 等. 污染组分对氢燃料发动机燃烧动力学的影响[J]. 科学通报, 2008, 53(18): 2257-2260.
- [14] 侯凌云, 杨 缙, 马雪松, 等. 空气污染各组分对甲烷超声速燃烧性能的影响[J]. 物理化学学报, 2010, 26(12): 3150-3156.
- [15] 侯凌云, 杨 缙, 马雪松, 等. 乙醇燃烧加热空气污染物对煤油超燃的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 1921-1927.
- [16] 郭帅帆, 宋文艳, 李建平, 等. 燃烧加热污染空气对超燃冲压发动机性能影响研究[J]. 推进技术, 2013, 34(4): 493-498. (GUO Shuai-fan, SONG Wen-yan, LI Jian-ping, et al. Numerical Investigation of Effect of Vitiated Air on Scramjet Performance [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(4): 493-498.)
- [17] 李建平, 宋文艳, 罗飞腾, 等. H₂O/CO₂污染对煤油燃料超声速燃烧影响数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(4): 562-571. (LI Jian-ping, SONG Wen-yan, LUO Fei-teng, et al. Numerical Investigation of Effect of Vitiated Air on Scramjet Performance [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(4): 562-571.)
- [18] 邢建文, 肖保国. H₂O 污染对煤油燃料超燃冲压发动机燃烧室性能影响的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2012, 17(11): 2408-2413.
- [19] 梁金虎, 胡弘浩, 王 苏, 等. 空气污染组分 H₂O 和 CO₂对乙烯着火特性的影响[J]. 推进技术, 2014, 35(2): 220-226. (LIANG Jin-hu, HU Hong-hao, WANG Su, et al. Effect of H₂O and CO₂ in Vitiated Air on Ignition Characteristic of Ethylene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(2): 220-226.)
- [20] Liang J H, Wang S, Hu H H, et al. Shock Tube Study of Kerosene Ignition Delay at High Pressures [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, 55(6): 947-954.
- [21] 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): 188 - 192. (FAN Xue-jun, YU Gang. Analysis of Thermophysical Properties of Daqing RP-3 Aviation Kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(2): 188 - 192.)
- [22] Tang W T, Brezinsky K. Chemical Kinetic Simulations Behind Reflected Shock Waves [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2006, 38(2): 75-97.
- [23] Shen H P, Vanderover J, Oehlschlaeger M A. A Shock Tube Study of Iso-Octane Ignition at Elevated Pressures: The Influence of Diluent Gases [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 155(4): 739-755.
- [24] Würmel J, Silke E L, Curran H J. The Effect of Diluent Gases on Ignition Delay Times in the Shock Tube and in the Rapid Compression Machine [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 151(1-2): 289-302.

(编辑:史亚红)