

煤油在 H_2O 和 CO_2 存在下 点火特性的激波管研究

梁金虎, 王苏, 胡弘浩, 范秉诚, 崔季平

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

摘要 在超燃冲压式发动机的地面实验中, 高焓气体一般通过燃烧加热的方式获得, 来流中含有燃烧产物 H_2O 和 CO_2 等污染组分。本文利用预加热到 $135^\circ C$ 的高温高密度激波管作为研究设备, 在污染组分 H_2O 和 CO_2 存在条件下, 研究了国产 3 号航空煤油的点火特性, 考察了污染物 H_2O 和 CO_2 对煤油点火特性的影响。实验结果为超燃冲压式发动机的“天地换算”提供基础数据支撑。

关键词 点火延时; 煤油; 水蒸气; 二氧化碳; 激波管

引言

在超燃冲压式发动机中, 为了实现燃料的高效燃烧, 必须在极短的时间内要求燃料实现快速点火和充分燃烧。超燃冲压式发动机用空气作为燃烧氧化剂从而推动飞行器前进。在高超声速飞行时, 空气在燃烧室内的停留时间通常只有几毫秒, 在这样短的时间内空气要完成压缩、增压, 并与燃料在超声速流动状态快速高效地掺混、点火并燃烧是十分困难的^[1]。因此, 燃料的点火特性成为超燃研究中需要重视的问题之一。

超燃冲压式发动机在进行飞行实验以前要进行充分的地面实验, 同时地面实验数据也为“天地换算”数值模拟结果的验证提供支撑。目前地面实验中的高焓实验气体通常是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含有 H_2O 和 CO_2 等污染组分, 一般情况下, 使用 H_2 作为燃烧气体时, 其主要污染成分为 H_2O , 使用碳氢燃料时, 主要污染成分将会是 H_2O 和 CO_2 。碳氢燃料的点火特性以及污染组分对其点火特性的影响一直是超燃发动机研究的重要问题。由于污染组分对碳氢燃料点火的影响, 发动机在地面实验与天空飞行中的点火特性可能出现差异, 因此正确评估污染组分 H_2O 和 CO_2 对碳氢燃料点火的影响具有重要意义。

煤油是航空航天发动机中重要的碳氢燃料, 有相对稳定的热力学特性和较高的体积能

量密度, 同时也是未来超燃冲压和脉冲爆轰发动机的首选燃料。本文主要考察污染组分 H_2O 和 CO_2 对国产 3 号航空煤油点火特性的影响。目前, 国内外关于污染组分 H_2O 和 CO_2 对燃料点火特性影响的研究主要集中在 H_2 和 C_2H_4 几种燃料^[2-4]。Jacbimowski 等人^[2]利用激波管考察了温度区间为 $1000-1500K$ 时 H_2O 和 CO_2 对 H_2 点火延时的影响, 同时还对相关动力学过程进行了分析。Hitch 等人^[3]在 $1000K$ 左右的 H_2 自点火温度下测量了 H_2O 和 CO_2 存在下 H_2 的点火延时, 考察了温度为 $1100K$ 时, 污染组分对 H_2 的点火延时特性的影响。国内刘伟雄等人^[4]通过地面实验和动力学模拟计算考察了 H_2O 和 CO_2 对乙烯点火特性的影响。到目前为止, 关于 H_2O 和 CO_2 对煤油点火延时影响的相关研究还较少。

本文利用预加热到 $135^\circ C$ 的高温高密度激波管作为研究设备, 在煤油点火延时测量的基础上, 分别考察了污染物 H_2O 和 CO_2 对煤油点火延时的影响。在 $Ma=4-7$ 的实验条件下, 在采用常规燃料 (H_2 、甲烷、乙醇、煤油) 加热气体后所形成的高焓来流中 H_2O 含量在 $5-25\%$ 之间, CO_2 含量在 $3-10\%$ 之间。结合以上来流中两种污染物的组分含量, 实验首先测量了不加污染物时化学当量比 $\Phi=1$ 的煤油在点火压力为 $3atm$ 时, 点火温度为 $810-1350K$ 内的点火延时数据, 随后测量了加入污染物 H_2O 的含量(体积比)为 10% 和 20% 以及 CO_2 的量(体积比)为 10% 的情况下煤油点火延时的变化情

况。考察了污染组分 H₂O 和 CO₂ 对乙烯点火延时的影响情况。

1 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的高温高密度激波管系统上进行^[5]。该激波管高压段长 6.0m，低压段长 4.1m，双膜段长 0.2m，内径均为 10.0cm，内径均为 10.0cm，同时在激波管外壁上缠绕加热带以及保温材料，将激波管壁加热到 135℃。低压室采用涡轮分子泵使系统的极限真空达到 5×10^{-4} Pa，系统漏率小于 2×10^{-2} Pa/min。低压室侧壁装有两个测量激波速度的压电传感器，在尾盖上装有一个测量反射激波后 5 区压力变化的压电传感器，此传感器信号经电荷放大器放大后接入数据采集卡。在低压段尾部紧靠后端盖的侧壁上开有内径为 8mm 的石英光学观察窗口，点火发生时发射的 OH 自由基光谱信号经透镜聚焦于单色仪的入射狭缝上，单色仪的测定波长选在 OH 自由基在 306.5nm ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi_r$) 的特征发射光谱处，单色仪分光后经光电倍增管转换为电信号接入数据采

集卡，数据采集卡与电脑连接。实验装置如图 1 所示。

OH 自由基是碳氢燃料燃烧反应过程中重要的中间产物，点火过程中可以将 OH 自由基的大量产生作为点火发生的标志。本实验通过测定 OH 自由基的瞬态特征发射光谱来确定点火过程中 OH 自由基的产生过程，从而判断煤油是否发生点火。由于光谱法本身的高灵敏度的特点，这种方法较之传统的压力判定法具有更高的准确性和可靠性。

由于煤油和 H₂O 在激波管内壁存在一定的吸附，实验时首先在激波管中进行了国产 3 号航空煤油和 H₂O 吸附特性的测定。分别考察了煤油和 H₂O 在恒温加热到 135℃ 的激波管低压室中的吸附曲线和加入不同量 H₂O 后理论压力与吸附平衡压力的对比情况。通过分析煤油在激波管内壁的吸附情况发现当将煤油注入激波管内 6 min 后，煤油蒸汽压力趋于稳定，说明此时吸附已经达到了平衡。此时的气相压力 P_{6min} 即为平衡气相压力。在进行煤油点火实验时，使用真空计测量 6min 时注入低压室内的煤油分压，此分压即为实验时混合气体中煤油的压力，由此可以确定实验时煤油的气相浓度。

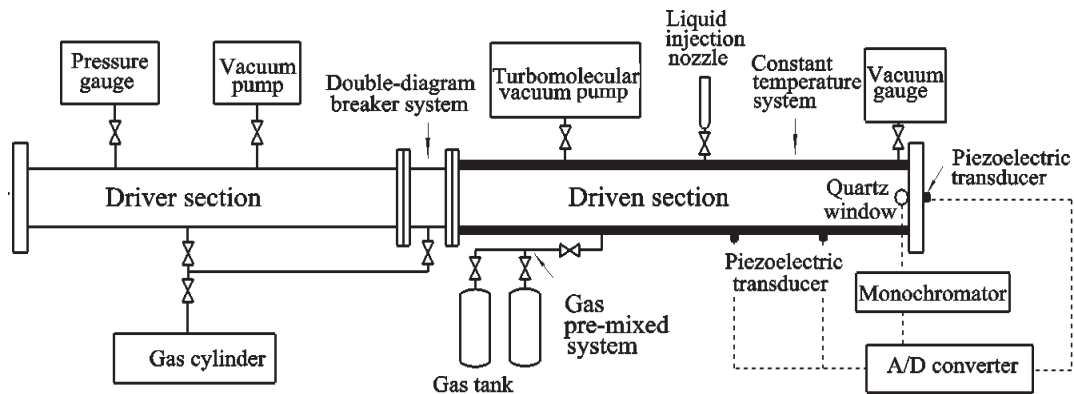


图 1 实验激波管装置图

为了减少煤油在激波管内壁的吸附并提高气相中煤油的含量，将激波管以及配气罐（内装入氧气以及稀释气体氩气）加热到 135℃。低压段先通过针阀加入一定量的煤油，当压力读

数稳定后加入预先在配气罐中混合好的 O₂/Ar 混合气体，混合 10 分钟后进行破膜。

在进行加水实验时，通过计算得出预期状态下低压室中需要加入的各组分含量，然后根据预先测量获得的 H₂O 加入量与其在激波管内

的平衡压力关系首先加入 H₂O，等到压力稳定后再加入煤油到指定的压力，6min 后充入预先配制好的 O₂/Ar 混合物至预先计算好的指定压力，待低压室中的混合物混合 10min 后进行破膜实验。

进行加 CO₂ 实验时，实验过程与加 H₂O 基本相同，只是由于 CO₂ 在激波管内几乎不发生吸附，在实验前往低压室进样时先加入煤油，然后依次加入 CO₂ 和 O₂/Ar 混合物到预先计算好的指定压力，待低压室中的混合物混合 10min 后进行破膜实验。

点火延时一般定义为低压段端盖处压电传感器测到反射激波产生为时间零点，单色仪测定 OH 自由基发射光谱信号上升最大斜率处作切线与信号基线的交点处对应的时间为点火发生时间，两者时间差即为相应条件下的点火延时。典型的实验记录图如图 2 所示，P₅ 线代表反射激波产生和 5 区压力变化，I_{OH} 为 OH 自由基在 306.5nm 处发射强度的变化。

激波速度由破膜后入射激波经过低压段上的两个压电传感器的时间差计算得到。再利用一维正激波关系式计算反射激波后 5 区的温度和压力，这就是点火发生时的温度和压力。实验过程中通过调节低压段中反应物的浓度和初始压力，以及调节高压段中驱动气体(He 和 N₂) 的种类及比例，进而改变入射激波的速度，从而获得点火发生时所需要的温度和压力。

2 实验结果

在已获得了点火压力 3atm、化学当量比 1.0 的国产 3 号航空煤油的点火延时的基础上，分

别进行了加入污染组分 10%和 20%H₂O 以及 10%CO₂ 条件下国产 3 号航空煤油的激波管点火实验。实验中以 H₂O 和 CO₂ 取代部分稀释气体 Ar，其余状态参数不变的情况下考察煤油点火延时的变化情况。各种污染条件下煤油点火延时实验中各组分初始含量如下表 1 所示。

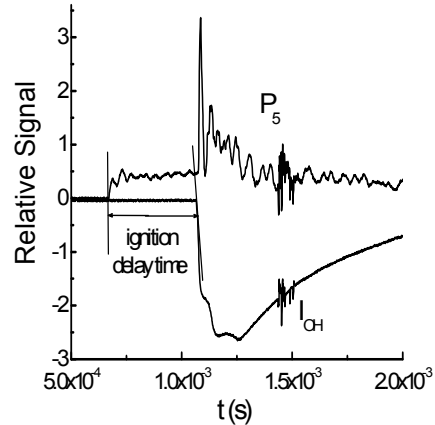


图 2 典型的 P₅ 和 OH 自由基发射光谱记录图

2.1 H₂O 对煤油点火延时的影响

在压力 3atm，化学当量比 $\Phi=1.0$ ，分别考察了实验气体中加 H₂O 为 10%和 20%时煤油点火延时的变化情况，结果如图下 3 所示。

从图 3 加水实验结果可以发现，在此实验条件下，加入 H₂O 对煤油点火延时的影响存在一个 960K 的临界温度，当温度高于此临界温度时，H₂O 对煤油的点火延时没有影响，当低于此临界温度时，H₂O 对煤油点火有明显促进作用，而且随着温度降低促进效果越明显。

表 1 污染物点火特性实验中实验气体各组分比例 ($\Phi=1$)

实验状态	Kerosene%	O ₂ %	H ₂ O%	CO ₂ %	Ar%
无污染物	1.20	19.88	0.0	0.0	78.92
10%H ₂ O	1.20	19.88	10.0	0.0	68.92
20%H ₂ O	1.20	19.88	20.0	0.0	58.92
10%CO ₂	1.20	19.88	0.0	10.0	68.92

从图 3 中还可以看出，在临界点火温度以下，随着加 H₂O 量的增加，其对煤油点火延时的影响作用越明显的影响作用越明显。在临界点火温度以下，加 H₂O 量为 20%比加 H₂O 量为

10%时的点火延时时间更短，说明 H₂O 对煤油点火的促进作用随着加 H₂O 的增加而增强。与不加 H₂O 时测量得到的煤油点火延时相比，当加 H₂O 量为 10%时，在 900K 时，煤油点火延

时由 2.22ms 缩短为 1.78ms, 减小了 19.8%。在 830K 时, 点火延时则由 3.46ms 缩短为 2.5ms, 减小了 27.7%; 当加 H₂O 量为 20% 时, 在 900K 时, 煤油点火延时由 2.22ms 缩短为 1.51ms, 减小了 32.0%。在 830K 时, 点火延时则由 3.46ms 缩短为 1.71ms, 减小了 50.6%。

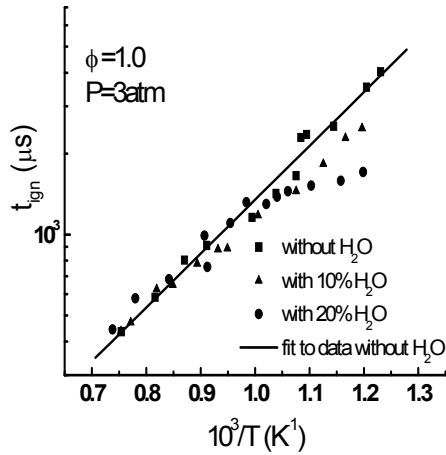


图 3 $\Phi=1$ 时 H₂O 对煤油点火延时的影响

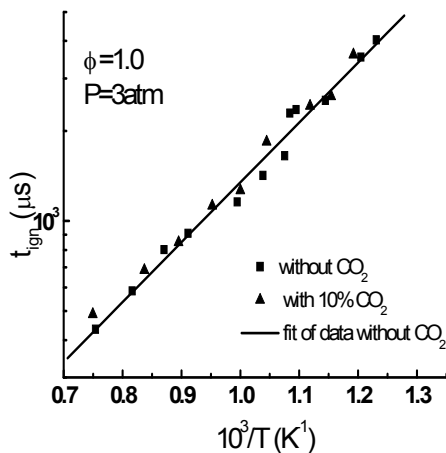


图 4 $\Phi=1$ 时 CO₂ 对煤油点火延时的影响

本实验结果与刘伟雄等人^[4]在考察 H₂O 对乙烯燃烧性能影响的实验中所得到的结果完全相似, 他们通过利用直连式电阻加热设备获得高焓来流的方法研究了 H₂O 污染对乙烯燃烧性能的影响, 发现 H₂O 对乙烯燃烧具有一定的促进作用。

Jachimowski 等人^[2]在 1968 年利用激波管考察了 H₂O 和 CO₂ 对 H₂/O₂ 点火延时的影响, 结

果发现 H₂O 对 H₂/O₂ 的点火起促进作用, 这一结果与本实验结果完全类似。

一般认为燃料在有 H₂O 污染存在时点火特性的改变, 一方面可能是加 H₂O 后改变了混合物的热力学和输运特性所致; 另一方面, H₂O 可能直接参与燃烧化学反应, 对燃料点火特性产生较大的影响。本实验中所出现的 H₂O 对煤油点火的促进作用很可能就是这两个原因共同作用的结果, 详细的原因分析以及验证工作将于今后的工作中作进一步的研究

2.2 CO₂ 对煤油点火延时的影响

在 3atm, 化学当量比 Φ 为 1.0, 温度范围为 810—1350K, 已测定的煤油/O₂/Ar 点火特性基础上, 考察了加入 10%CO₂ 后煤油点火延时的变化情况, 实验结果如下图 4 所示。

从图 4 可以发现, 加入 10%的 CO₂ 情况下, 相同点火条件下的煤油点火延时并未发生变化, 这就说明在本实验条件下, 当 CO₂ 加入量在 10%以内时, 煤油的点火过程不受 CO₂ 的影响。

这一结果与 Jachimowski 等人^[2]在 1968 年利用激波管考察了 H₂O 和 CO₂ 对 H₂/O₂ 点火延时的影响实验中得到的 CO₂ 对 H₂/O₂ 点火延时影响结果一致。

3 结论

本文利用预加热到 135℃ 的高温高密度激波管, 在压力为 3atm, 化学当量比 $\Phi=1.0$, 温度范围为 810—1350K, 煤油/O₂/Ar 点火特性基础上, 考察了污染组分 H₂O 和 CO₂ 对国产 3 号航空煤油的点火延时特性的影响。结果发现在此实验条件下, 加入 10%CO₂ 对煤油的点火延时时间没有影响; 分别加入 10%和 20%H₂O 后, H₂O 对煤油点火延时时间的影响存在一个 960K 的温度临界点, 在临界点以上的温度范围内, 煤油的点火延时时间不受 H₂O 的影响, 而在临界温度以下, H₂O 对煤油的点火起促进作用, 表现为煤油点火延时时间的缩短, 而且这种促进作用随着点火温度的降低而更加明显。同时发现, 这种促进作用随着 H₂O 加入量的增加, 促进效果越来越好。本实验结果将为超燃冲压式发动机的“天地换算”提供基础数据支撑。

参考文献

1. Liu W X, Yang Y, Le J L, et al. Influence of H₂O and CO₂ in Air on the Combustion of Ethylene (II)—Reaction Mechanism and Kinetics Simulation. *Acta Phys-Chem Sin.* 2010, 26 (2):270–276.
2. Jacbimowski C J and Houghton W M. Effect of Carbon Dioxide and Water Vapor on the Induction Period of the Hydrogen-Oxygen Reaction. *NASA TN D-4685*, 1968, 15-31.
3. Hitch B D and Senger D W. Reduced H₂-O₂ Mechanisms for Use in Reacting Flow Simulation. *AIAA Paper*, 1988.88-732.
4. Liu W X, Yang Y, Shao J X, et al. Influence of H₂O and CO₂ Contamination in Air on the Combustion Properties of Ethylene. *Acta Phys-Chem Sin.* 2009, 25 (8):1618–1622.
5. Liang J H, Wang S, Hu H H, et al. Shock tube study of kerosene ignition delay at high pressures. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55(6):947-954.

SHOCK TUBE STUDY OF IGNITION CHARACTERISTICS OF KEROSENE IN THE PRESENCE OF WATER VAPOR AND CARBON DIOXIDE

LIANG Jinhu, HU Honghao, WANG Su, FAN Bingcheng, CUI Jiping

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Abstract In the ground tests of hypersonic scramjet, the high-enthalpy flow produced by burning hydrocarbon fuels often contains contaminants H₂O and CO₂. In this paper, the effect of water vapor and carbon dioxide on the ignition delay time of China No. 3 aviation kerosene was measured using a shock tube preheated at 135K, on the basis of the base data of the ignition delay time of kerosene. The current results provide an important base data for extrapolating from vitiated ground testing to the real flight tests in actual engineering studies.

Key Words ignition delay time, kerosene, water vapor, carbon dioxide, shock tube