激波管中煤油高压状态点火延时特性研究

梁金虎 胡弘浩 王苏 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 100190）

摘要 在预加热到 135℃的高温高密度激波管中，进行了高压状态煤油的点火延时实验。实验温度范围为 820K－1620K、当量比为 1.0、压力为 12atm。实验结果为建立煤油燃烧反应动力学模型，验证煤油燃烧反应机理提供了数据依据。

关键词 煤油；点火延时；激波管

引 言

碳氢燃料的点火延时是验证燃烧反应简化机理和化学动力学模型的重要依据[1]，碳氢燃料的点火延时特性一直是国内外研究的热点。Stanford 大学 Hanson 研究小组测定了一系列单一组份碳氢燃料的点火延时特性[2-9]；国内王苏等对煤油的点火延时进行了测量[10]；徐胜利等测量了雾化煤油的点火延时[11]，国内与碳氢燃料点火延时测量相关的实验研究开展还不多。

碳氢燃料点火特性研究通常是在常压下进行的，而与之相对应的燃烧反应机理和动力学模型的验证和简化都是在常压数据的基础上进行的。Huang 和 Hill 等人[12]测量了高压下（16–40atm）甲烷的点火延时，实验结果发现甲烷在高压下的点火延时实验结果与常压下所建模型计算结果存在较大差异。Hanson 等人[13]通过测量正十二烷的高压点火延时也发现了类似的结果。因此，有必要对燃料高压下点火延时特性进行进一步研究。

煤油是航空航天发动机中常用碳氢燃料，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。在超燃冲压发动机中，燃烧室中气流的高速流动导致燃料的驻留时间很短，因此研究煤油的点火延时对超燃冲压和脉冲爆轰发动机燃烧室的设计和优化具有重要意义。

煤油属于高碳数碳氢燃料，其室温下蒸汽压较低，在激波管中存在严重吸附[14]，两相雾化煤油也存在着较为严重的吸附和凝结问题，这样就会造成煤油浓度测定的不确定性，影响实验结果的准确性和可靠性。王苏[10]等人采用了预加热激波管到 70℃，在一定程度上提高了煤油的蒸汽压和提升了煤油的实验浓度，同时也减轻了激波管壁对煤油的吸附。

在燃烧室中燃料的燃烧行为同时受到燃料的雾化、混合、流动等物理和力学以及化学动力学因素的耦合影响，比较复杂。由于激波管是单一的一维均匀流动，将实验气体预混进入激波管后，可以实现对燃料燃烧过程中化学动力学行为的单独研究，因此激波管是目前国内外进行碳氢燃料点火延时的首选实验设备。

1 实 验

实验在中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室自行研制的高温高密度激波管系统上进行，该激波管建于 2010 年，由于原有的小尺寸化学激波管总长度较短、管径较小，以及低压段初始温度 T_1(70℃)较低，导致激波管 5 区实验时间较短，管壁对高碳数碳氢燃料吸附严重，燃料饱和蒸气压低，激波管 5 区总压低等后果，只能进行较低压力(1–5atm)下点火延时实验。而工程上超燃发动机的工作压力为 5–10atm 甚至更高，学术研究本身也需要进一步对更高点火压力下的燃料点火延时特性进行深入研究。为了进行碳氢燃料高压点火延时实验，实验室新建成了高温高密度激波管，该激波管高压段长 6.0m，低压段长 4.0m，双膜段长 0.2m，

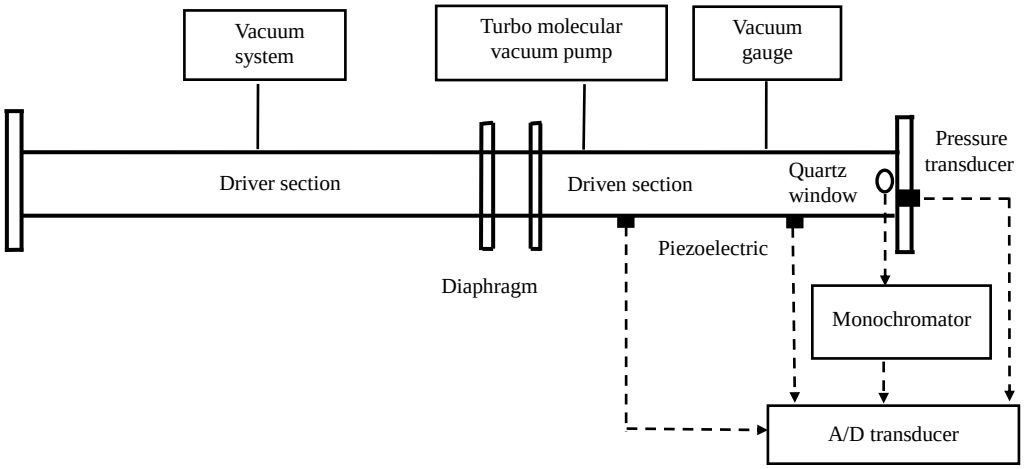

图 1　实验激波管装置图

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，将激波管外壁加热到135℃，通过增加激波管长度，获得了更长的实验时间，同时通过增加激波管的内径和提高低压段初始温度，大大减弱了高碳数碳氢燃料在激波管内壁的吸附，将实验状态扩展到了高压区和低温区。本实验所用新建激波管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（$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi_i$）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。

实验时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，先将激波管以及配气灌（内装入氧气以及稀释气体氩气）加热到135℃，然后将高压段、双膜段以及低压段分别抽成真空，高压段和双膜段充入相同组分的驱动气体。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灌中混合好的 O_2/Ar 混合气体，混合十分钟后进行破膜。

点火延时是表征燃料燃烧特性的重要参数，它是燃料达到物理燃烧条件到形成持续的燃烧所需要的时间。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，P_5 线代表反射激波产生和 5 区压力变化，I_{OH} 为 OH

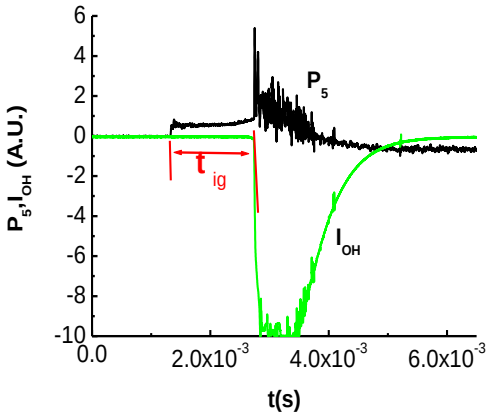

图 2　典型的 P_5 和 OH 自由基发射光谱记录图

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 N_2）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。

2 实验结果

实验测定了当量比 1.0 时，温度在 820K–1620K 范围内煤油在 12atm 状态下的点火延时数据。点火延时与温度的关系如图 3 所示。

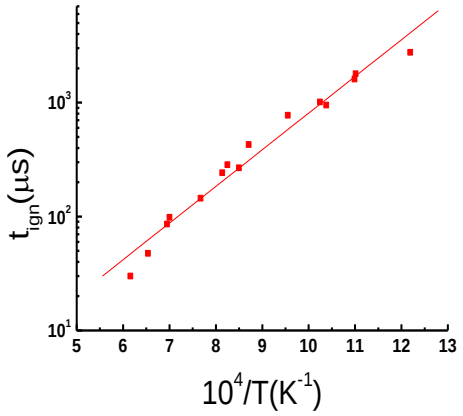

图 3 12atm 下煤油点火延时数据图

3 结 论

本文利用 OH 自由基特征发射光谱测定了激波管预热到 135℃下煤油的点火延时，点火温度为 820K–1620K，当量比为 1.0，点火压力为 12atm。本研究结果为完善煤油点火延时数据，建立我国自己的燃料点火延时数据库，同时也为建立煤油燃烧反应动力学模型，验证煤油燃烧反应机理提供了实验数据依据。

参考文献

1 Dagaut P. Phys. Chem. Chem. Phys. 2002, 4(11):2079.
2 Vasu S S, Davidson D F, Hanson R K. Combustion and Flame.2008, 152:125-143.
3 Gauthier B M, Davidson D F, Hanson R K. Combustion and Flame.2004, 139:300-311.
4 Davidson D F, Haylett D R, Hanson R K. Combustion and Flame.2008, 155:108-117.
5 Vasu S S, Davidson D F, Hanson R K,et al. Proceedings of the Combustion Institute. 2009, 32:173-180.
6 Horning D C, Davidson D F, Hanson R K. Journal of Propulsion and power.2002, 18(2):363.
7 Pang G A, Davidson D F, Hanson R K. Proceedings of the Combustion Institute. 2009, 32:181-188.
8 Lam K Y, Davidson D F, Hanson R K, et al. Proceedings of the Combustion Institute. 2011, 33:251-258.
9 Davidson D F, Ranganath S C, Hanson R K,et al. Journal of Propulsion and power.2010, 26(2):280.
10 Wang, S , Fan B C , He Y Z and Cui J P .Shock tube study of kerosene ignition delay, Shock Waves, Part IX, Pages 775-780, 2009
11 Liao Qin, Xu Sheng-Li. Journal of experiment in fluid Mechanics（实验流体力学）.2009, 23(3):70.
12 Huang J, Hill P G, Bushe W K, and Munshi S R. Combustion and Flame, 2004, 136:25-42.
13 Vasu S S, Davidson D F, Hanson R K. Proceedings of the Combustion Institute. 2009, 32:173-180.
14 Gou Hua-Jie, Wang Su, FAN Bing-Cheng, et al. Journal of experiment in fluid Mechanics（实验流体力学）.2006, 20(4):69-72

Measurement of Ignition Delay Characteristics of High Pressure Kerosene in Shock tube

Liang Jinhu, Hu Honghao, Wang Su, Fan Bingcheng, Cui Jiping

（State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China）

Abstract Ignition delay times of high pressure kerosene/O_2 mixture were measured behind reflected shock waves in a shock tube, which was pre-heated to 135℃. The ignition delay times of the kerosene/O_2 were obtained at 12atm, in the temperature range from 820K–1620K and in the equivalence ratio of 1.0. The results are important for developing the kinetic model of combustion reaction and will provide an experimental criterion for validating the combustion reaction mechanism of kerosene.

Key Words kerosene; ignition delay; shock tube