

利用激波管实验装置研究丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期

张英佳¹, 黄佐华¹, 王金华¹, 徐胜利²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国科学技术大学近代力学系, 230026, 合肥)

摘要: 利用双膜化学激波管实验装置反射激波方法测量了丙烯/氧气/氮气混合气在温度范围为 1 650~1 900 K、压力为 0.1 MPa 下的着火滞燃期. 通过对理想激波管内流动状态分析, 给出了合适的着火滞燃期定义. 实验结果表明: 随着初始温度的增加, 丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期缩短, 着火滞燃期的对数与温度的倒数成正比, 入射激波强度与着火滞燃期的对数成反比; 高温条件下, 混合气的着火滞燃期随着初始压力的增加而增加, 随浓度的增加而缩短; 利用多元线性回归方法拟合了 C_3H_6 着火滞燃期的 Arrhenius 型关系式, 计算结果与文献中的实验数据具有很好的吻合性.

关键词: 化学激波管; 着火滞燃期; 丙烯

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0009-04

Study on the Ignition Delay Times of Propene/Oxygen/Nitrogen Mixtures by Using Shock Tube

ZHANG Yingjia¹, HUANG Zuohua¹, WANG Jinhua¹, XU Shengli²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Ignition delay times were measured for propene/oxygen/nitrogen mixtures behind reflected shock waves in a double diaphragm chemical shock tube in the range of 1 650-1 900 K and at 0.1 MPa. An appropriate definition of ignition delay time was proposed based on an analysis of the flow condition in an ideal shock tube. The experiment results show that the ignition delay times of the mixtures decreased with the increase in initial temperature. The logarithmic value of the ignition delay times was proportional to the reciprocal of temperature and inversely proportional to incident shock intensity. Under high temperature conditions, the ignition delay times increased with the increase in initial pressure and decreased with the increase in the concentration of propene in the mixtures. An Arrhenius-type correlation equation for the ignition delay time of propene/oxygen/nitrogen mixtures was developed, and its calculation results agree well with the data in literature.

Keywords: chemical shock tube; ignition delay time; propene

燃料化学反应机理对于设计高效低污染燃烧设备尤为重要, 而这些替代燃料尤其是复杂的碳氢燃料, 其化学反应机理尚不清楚, 着火滞燃期是验证燃料化学反应机理的重要实验数据之一. 化学激波管

能够实现对实验混合物快速均匀加热加压, 保证在有效实验时间内准确测量着火滞燃期.

Qin 等人^[1]利用激波管反射激波方法对丙烯着火滞燃期进行了研究, 归纳出浓度相关的着火滞燃

期 Arrhenius 型关系式,并开展了相关动力学分析. Gauthier 等人^[2]利用激波管对庚烷、汽油以及替代燃料在均质压燃发动机运行工况下的自着火特性进行研究. Fleweger 等人^[3]利用激波管实验装置研究异辛烷、甲醇以及异辛烷/正庚烷等混合物在发动机运行条件下的着火滞燃期. Lamoureux 等人^[4]利用反射激波对低碳碳氢燃料如甲烷、乙烷、丙烷的着火滞燃期进行了实验研究. 王苏等人^[5]利用激波管缝合运行条件开展了 JP10 和煤油壁面吸附效应以及气相浓度对着火滞燃期的影响研究. 王高峰^[6]等人利用激波管和平面激光诱导荧光(PLIF)技术对高浓度甲烷的着火特性进行了可视化研究,通过燃烧中间基 OH^{*} 的分布揭示了着火过程中反应区的特性.

目前,对低温燃烧自着火过程尤其是丙烯在低浓度下的稀薄着火研究以及相关的化学反应动力学分析报道很少. 就其工程意义而言,可燃气体稀薄燃烧机理的研究对于理解和拓展气体燃料发动机、均质压燃发动机以及低温直喷燃烧发动机在当量比条件下燃烧过程中 NO_x 的形成机理十分重要,对降低 NO_x 排放有着重要的指导意义. 本文利用双膜激波管实验装置开展了高温常压下低浓度丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期的实验研究,利用现有的实验数据拟合出了丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期的 Arrhenius 型关系式,并与文献进行了比较.

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

本研究在激波管实验装置上进行,由横截面为 130 mm×110 mm 的矩形不锈钢管组成. 实验装置组成见图 1. He 作为驱动气,25 μm 厚的 PVC 膜作为双膜机构的破膜材料. 低压段安装了 4 个压力传感器(一个 PCB 113B03 和 3 个 PCB 113B26),前者

用于测量混合气压力,后者用于测量入射激波速度,并通过多点线性拟合外推出低压段端面的人射激波马赫数.

实验前,真空泵对激波管抽真空至 1.33×10^{-1} Pa,漏气率小于 5×10^{-1} Pa/min. 实验样品的体积分数丙烯为 99.995%,氧气为 99.999%,氮气为 99.999%,按照 0.1 : 0.45 : 99.45 的体积分数用分压法在预混罐中事先配制并静止混合 12 h 以上. 采用较高的稀释浓度是为了减少化学反应过程中温度、压力的变化对测量结果的影响.

利用安装在激波管侧壁的配有高压电源的光电倍增管(PMT)、狭缝以及滤波片(中心波长 306 nm,半带宽 5 nm)测量 OH^{*} 自发光信号作为着火开始的判断依据.

1.2 激波管内的流动

从图 2 可以看出,通过不同的波型以及接触面将管内的流动分成 5 个区域. 如果实验在低温下进行,通常选择缝合运行条件制止反射激波的二次反射和拓展高压段管长二者并行来延长有效实验时间,满足较长的着火滞燃期要求. 由于本实验是在高温(1 650~1 900 K)下完成的,现有的有效实验时间 2 ms 可以满足对高温下丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期的测量要求,因此不需要采用缝合运行条件以及拓展高压段管长.

1.3 着火滞燃期

对着火滞燃期的定义不同,得出的测量结果也不尽相同. Qin 等人^[1]仅用压力信号定义丙烯的着火滞燃期;Davidson 等人^[7]利用压力信号和 CH^{*} 自发光信号确定低饱和蒸汽压燃料的着火滞燃期. 本文利用压力信号来确定反射激波到达测量位置的时刻,将由 307 nm OH^{*} 自发光信号曲线最大斜率处线性反推至该曲线基线位置的时刻作为着火开始

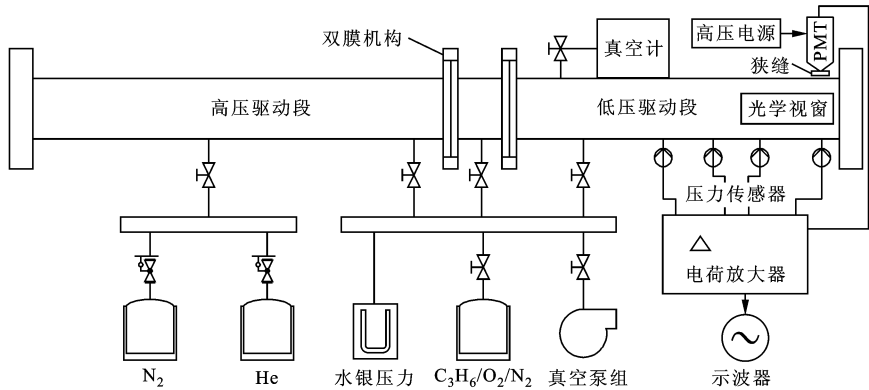
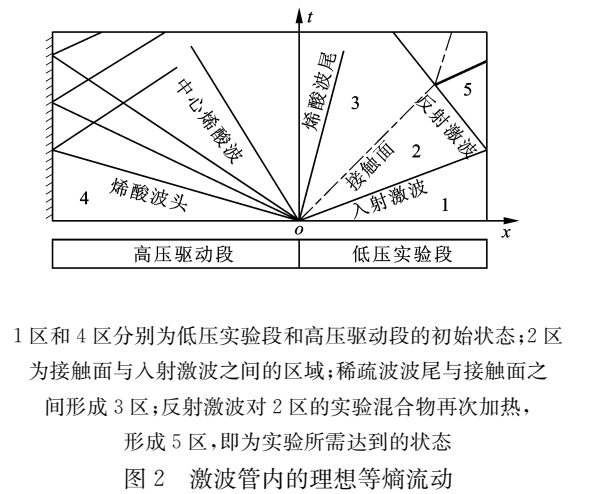


图 1 激波管实验装置



1 区和 4 区分别为低压实验段和高压驱动段的初始状态;2 区为接触面与入射激波之间的区域;稀疏波波尾与接触面之间形成 3 区;反射激波对 2 区的实验混合物再次加热,形成 5 区,即为实验所需达到的状态

图 2 激波管内的理想等熵流动

(着火滞燃期终点)的标志,二者的时间间隔即为丙烯/氧气/氮气的着火滞燃期.图 3 所示为典型的由 OH⁺ 自发光信号定义的着火滞燃期.

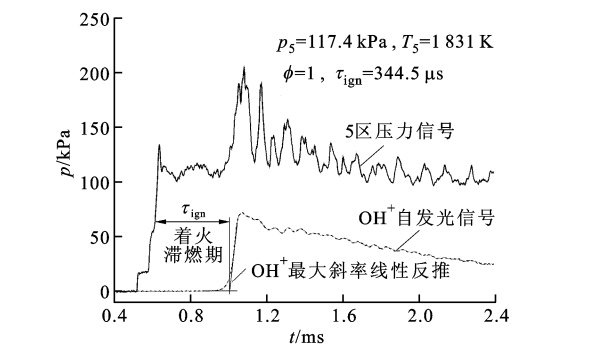


图 3 丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期定义

2 实验结果及讨论

2.1 丙烯/氧气/氮气混合气的着火滞燃期

对当量比 $\phi=1.0$ 的丙烯/氧气/氮气混合气在温度为 1 650~1 900 K、压力为 0.1 MPa 的条件下进行着火滞燃期的测量,结果如图 4 所示.可以看出,在所研究的温度范围内,丙烯/氧气/氮气混合气的着火滞燃期满足 Arrhenius 关系式,即与温度的倒数呈线性关系,着火滞燃期随着温度的增加而缩短.根据一维理想激波关系式,入射激波马赫数 M_s ($M_s=W/a$, W 为激波相对于波前气体的传播速度, a 为当地声速)直接影响实验段 5 区的温度,二者满足关系 $f=TM_s^2$,即随着入射激波马赫数 M_s 的增加,5 区的温度也随之增加.因此,入射激波马赫数对丙烯混合气着火滞燃期的影响反映出温度的影响(见图 5).

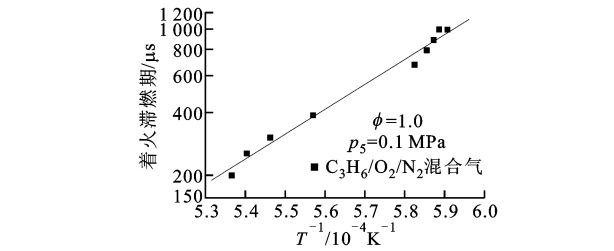


图 4 丙烯/氧气/氮气混合气的着火滞燃期

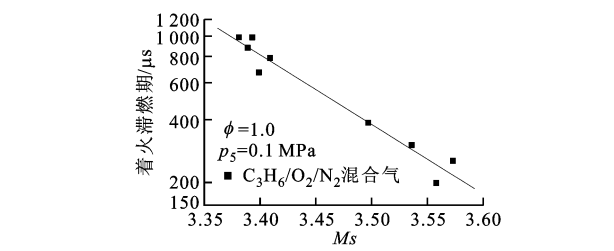


图 5 M_s 对丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期的影响

2.2 压力对丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期的影响

图 6 和图 7 给出了本文与 Qin 等人^[1]的实验结果比较.从图 6 中可以看出,随着压力的增加,丙烯混合气的着火滞燃期缩短.在所研究的温度范围内,不同压力下丙烯混合气的着火滞燃期的变化规律是一致的,根据 Arrhenius 关系式可知,在高温情况下,混合气总活化能对压力的变化是不敏感的.本研究的实验结果与 Qin 等人的结果相差近一个数量

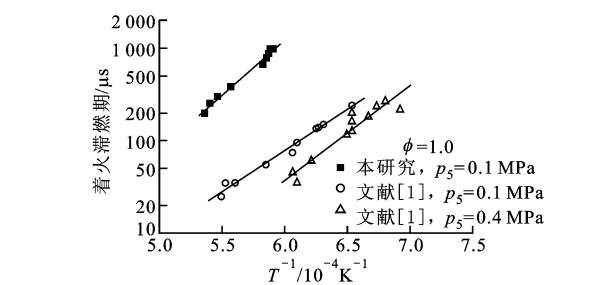


图 6 压力对丙烯/氧气/氮气着火滞燃期的影响

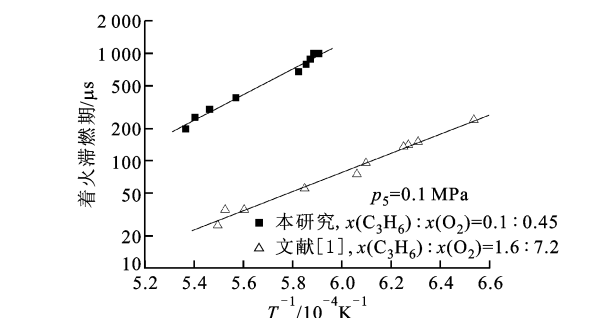


图 7 丙烯/氧气/氮气混合气的浓度对其着火滞燃期的影响

级,如图7所示.原因是本研究的丙烯混合气浓度较低, $x(\text{C}_3\text{H}_6):x(\text{O}_2)=0.1:0.45$,而Qin等人的丙烯混合气的浓度较高, $x(\text{C}_3\text{H}_6):x(\text{O}_2)=1.6:7.2$.高浓度的混合物有利于化学反应过程中反应 $\text{H}+\text{O}_2\leftrightarrow\text{O}+\text{OH}$ 和反应 $\text{H}+\text{O}_2(+\text{M})\Rightarrow\text{HO}_2(+\text{M})$ 的进行(M为 H_2O 或稀释气),而着火滞燃期对这两个反应最为敏感.

2.3 丙炔/氧气/氮气混合气着火滞燃期的 Arrhenius 型关系式

Davidson 等人^[8]详细描述了碳氢燃料着火滞燃期的 Arrhenius 关系式的推导过程

$$\tau_{\text{ign}} = A \exp(E/RT) p^a \phi^b [x(\text{C}_3\text{H}_6)]^c$$

式中: A 是常数; E 是总活化能; R 是理想气体常数; T 是5区温度; p 是5区压力; ϕ 是当量比; $x(\text{C}_3\text{H}_6)$ 是丙烯的摩尔分数; a 、 b 、 c 是对应的指数.根据Qin等人的实验数据,利用多元线性回归方法拟合了丙烯混合气着火滞燃期的 Arrhenius 型关系式

$$\tau_{\text{ign}} = 7.41 \times 10^{-5} p^{-0.591} \phi^{1.136} [x(\text{C}_3\text{H}_6)]^{-0.828} \cdot \exp\left(\frac{23\,862.4}{T}\right) \quad (1)$$

图8给出了丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期实验值与拟合公式计算值的比较.可以看出,本研究 and Qin 等人实验结果均与 Arrhenius 拟合公式计算结果吻合得很好.这进一步说明,高温条件下,混合气的总活化能对浓度的变化不敏感.

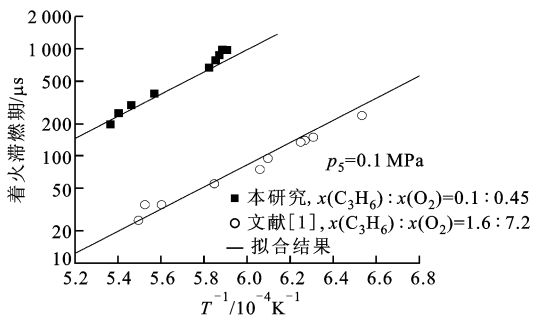


图8 Arrhenius 拟合公式计算结果与实验值的比较

3 结 论

本文在激波管实验平台上利用反射激波方法,通过燃烧中间基 OH^* 自发光信号以及安装在实验段带加速补偿的压力传感器测量的压力信号,对混合气的着火滞燃期进行了准确的定义,并开展了在高温 $1\,600\sim 1\,900\text{ K}$ 、环形压力下低浓度丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期的研究,获得的主要结论如下.

(1)随着初始温度的增加,丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期缩短,着火滞燃期的对数与温度的倒数成正比.入射激波马赫数即入射激波强度与着火滞燃期的对数成反比.

(2)高温条件下,随着压力的增加,着火滞燃期缩短.高温下丙烯/氧气/氮气混合气着火滞燃期在不同压力下的变化规律是一致的,反映出混合气总活化能对压力的变化是不敏感的.随着混合气浓度的增加,着火滞燃期缩短,高浓度的混合物有利于着火过程中最为敏感的两个化学反应 $\text{H}+\text{O}_2\leftrightarrow\text{O}+\text{OH}$ 和 $\text{H}+\text{O}_2(+\text{M})\Rightarrow\text{HO}_2(+\text{M})$ 的正向进行.

(3)在低压力为 0.1 MPa 、化学当量为 1.0 比的条件下,利用多元线性回归方法对实验结果进行了拟合,进一步说明在低浓度时,总活化能对浓度的变化是不敏感的.无论是本实验还是Qin等人的实验结果,均与拟合的 Arrhenius 型着火滞燃期关系式计算结果吻合得很好,表明拟合的关系式能用于预测丙烯/氧气/氮气混合气的着火滞燃期.

参考文献:

- [1] QIN Z W, YANG H X, WILLIAM C, et al. Measurement and modeling of a shock tube ignition delay for propene [J]. Combustion and Flame, 2001, 124 (1/2):246-254.
- [2] GAUTHIER B M, DAVIDSON D F, HANSON R K. Shock tube determination of ignition delay times in full blend and surrogate fuel mixtures [J]. Combustion and Flame, 2004, 139(4):300-311.
- [3] FLEWEGER K, BLUMENTHAL R, ADOMEIT G. Self ignition of S I engine model fuels: shock tube investigation at high pressure [J]. Combustion and Flame, 1997, 109(4):599-619.
- [4] LAMOUREUX N, PAILLARD C E, VASLIER V. Low hydrocarbon mixtures ignition delay times investigation behind reflected shock waves [J]. Shock Waves, 2002, 11(4):309-322.
- [5] 王苏,范秉诚,何宇中,等. 硅烷对JP10和煤油点火特性影响的激波管研究[J]. 力学学报, 2007, 39(4):254-257.
WANG Su, FAN Bingcheng, HE Yuzhong, et al. Effect of silane on ignition characteristics of JP 10 and kerosene as shown in shock tube study[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(4):254-257.
- [6] 王高峰,马成飏,王宝源,等. 激波诱导甲烷点火化学反应区的可视化实验研究[J]. 科学通报, 2008, 53

(19):2371-2378.
WANG Gaofeng, MA Chengbiao, WANG Baoyuan, et al. Direct observations of reaction zone structure in shock-induced ignition of methane air mixture[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(19):2317-2378.

[7] DAVIDSON D F, HAYLETT D R, HANSON R K. Development of an aerosol shock tube for kinetic studies of low-vapor-pressure fuels [J]. Combustion and Flame, 2008, 155(1/2):108-117.

[8] DAVIDSON D F, OEHLSCHLAEGER M A, HERBON J T, et al. Shock tube measurements of iso-octane ignition times and OH concentration time histories [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2002, 29: 1295-1301.

(编辑 王焕雪)