

RP-3 航空煤油着火特性的实验

曾 文, 李海霞, 马洪安, 陈保东

(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部, 沈阳 110136)

摘 要: 在化学激波管中利用反射激波着火, 采用壁面压力与 OH 自发光作为着火指示信号, 测量了着火温度范围为 1100~1600 K, 压力为 0.1, 0.2, 0.3 MPa, 当量比为 0.5, 1.0, 1.5 时 RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间, 分析了着火温度、压力以及当量比对混合气着火延迟时间的影响, 并拟合得到了不同压力与当量比下混合气着火延迟时间的 Arrhenius 关系式。结果表明: 在不同压力与当量比下, 混合气的着火延迟时间的对数与着火温度的倒数呈线性关系, 同时, 随着着火温度与压力的升高以及混合气当量比的降低, 着火延迟时间逐渐缩短。

关 键 词: RP-3 航空煤油; 着火延迟时间; 化学激波管; 当量比; 着火温度

中图分类号: V231.2; TK401

文献标志码: A

Experiment of ignition characteristics of RP-3 kerosene

ZENG Wen, LI Hai-xia, MA Hong-an, CHEN Bao-dong

(Faculty of Aerospace Engineering,

Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The ignition delay times of RP-3 kerosene/O₂/Ar mixtures within the ignition temperature range of 1100–1600 K, at pressures of 0.1, 0.2, 0.3 MPa, and equivalence ratios of 0.5, 1.0, 1.5, were measured behind reflected shock waves, using side-wall pressure and OH auto-luminescence signal measurements in a chemical shock tube. The effects of ignition temperature, pressure and equivalence ratio on the ignition delay time were investigated and the Arrhenius correlations for the ignition delay time of the mixture under different pressures and equivalence ratios were also deduced. The results show that the correlation between the logarithm of the ignition delay time of the mixture and the reciprocal ignition temperature is linear under different pressures and equivalence ratios. At the same time, with the increase of ignition temperature and pressure and the decrease of equivalence ratio, the ignition delay time of the mixture is shortened.

Key words: RP-3 kerosene; ignition delay time; chemical shock tube; equivalence ratio; ignition temperature

在航空发动机燃烧室内, 航空燃料(航空煤油)的混合、着火与燃烧是一个复杂的湍流混合和强烈受控于化学反应动力学的湍流燃烧过程。为了准确地了解航空发动机燃烧室中的燃烧细节, 在对航空发动机燃烧室燃烧过程进行数值计算时

有必要采用航空燃料的化学反应动力学模型^[1-2]。但是, 由于缺乏国产 RP-3 航空煤油的化学反应动力学模型, 目前在航空发动机燃烧过程的数值计算中, 一般采用燃料的单步反应机理, 燃烧特性的计算结果与实验数据偏差较大。

收稿日期: 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51376133); 辽宁省自然科学基金(2013024009); 沈阳市科技攻关项目(F13024200)

作者简介: 曾文(1977—), 男, 湖南沅江人, 副教授, 博士后, 主要从事航空发动机燃烧过程与排放物生成的数值研究。

由烷烃、烯烃、环烃和芳香烃等几十种甚至上百种组分组成的航空煤油由于自身成分极其复杂,直接建立其化学反应动力学模型将十分困难.近年来,开发与航空煤油物理与化学特性相似的数值模拟替代燃料以及建立其化学反应动力学模型已经成为国内外学者研究的热点^[3-6],而航空煤油着火特性的实验数据将为寻找与航空煤油着火与燃烧特性相似的数值模拟替代燃料以及构建其化学反应动力学模型并验证其合理性提供重要的实验依据.

目前测量燃料着火特性(着火延迟时间)的实验装置主要有喷射搅拌反应器^[7]、连续流动反应管^[8]、重活塞压缩装置、定容弹和激波管等^[9].激波管能在极短的时间内(毫秒级甚至更低)将实验混合气提升到理想的温度和压力(整个过程几乎绝热),同时,能实现温度和压力变化的准确控制、着火始点和着火滞燃期的可靠定义,且不受表面反应和输运问题的影响,实验可重复性高.因此,其作为高温条件下研究燃料着火特性最为理想的实验手段而备受国内外学者的关注. Pfahl 等^[10]对正癸烷在激波管内的着火特性进行了实验研究,详细分析了当量比与反应温度对着火延迟时间的影响. Vasu 等^[11]利用带加热装置的高压激波管开展了温度为 874~1 220 K,压力为 1.7~5.1 MPa 条件下气态 Jet 燃料的着火滞燃期的实验研究,并使用压力归一法分析了混合气当量比的影响以及负温度系数特性. Freeman 等^[12]对 Jet-A 航空煤油在激波管中的着火延迟时间进行了实验测量,获得了着火延迟时间与温度、燃油体积分数以及氧气体积分数之间的函数关系. 张英

佳等^[13]利用反射激波方法开展了煤油/空气混合气在温度为 1 445~1 650 K,压力为 0.1 MPa,当量比为 1.0 条件下的着火滞燃期的研究. 唐洪昌等^[14]在加热激波管中利用反射激波着火,采用壁端压力和 CH 发射光作为着火指示信号,测量了气相煤油/空气混合物的着火延时,分析了着火温度、压力和化学计量比对着火延时的影响.

本文利用化学激波管实验装置对 RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气在温度为 1 100~1 600 K,压力为 0.1,0.2,0.3 MPa,当量比为 0.5,1.0,1.5 的条件下的着火特性进行了测量,并分析了着火温度、压力与当量比对 RP-3 航空煤油着火特性的影响,为选择合理的国产 RP-3 航空煤油数值模拟替代燃料以及构建其化学反应动力学模型提供了实验参考数据.

1 实验装置

实验在横截面为 130 mm×80 mm,壁厚为 10 mm 的化学激波管实验装置上开展. 管体由矩形不锈钢管对接而成,一个双膜破膜机构将其分成长为 4 m 的高压驱动段和长为 5.3 m 的低压被驱动段两部分. 由于可燃混合气的自着火主要发生在化学激波管端面附近,这部分实验段将承受最高的实验压力. 因此,在保证内截面一致的条件下,将 1.3 m 长的实验段壁厚增加至 20 mm 以保证高压条件下激波管的强度. 选择不同厚度的 PET 膜片作为破膜材料,通过改变膜片的厚度来实现不同实验压力的需求. 选择氩气为稀释气体,氦气与氮气的混合气为高压驱动气体. 实验装置如图 1 所示.

在化学激波管实验段侧壁沿轴线方向布置了

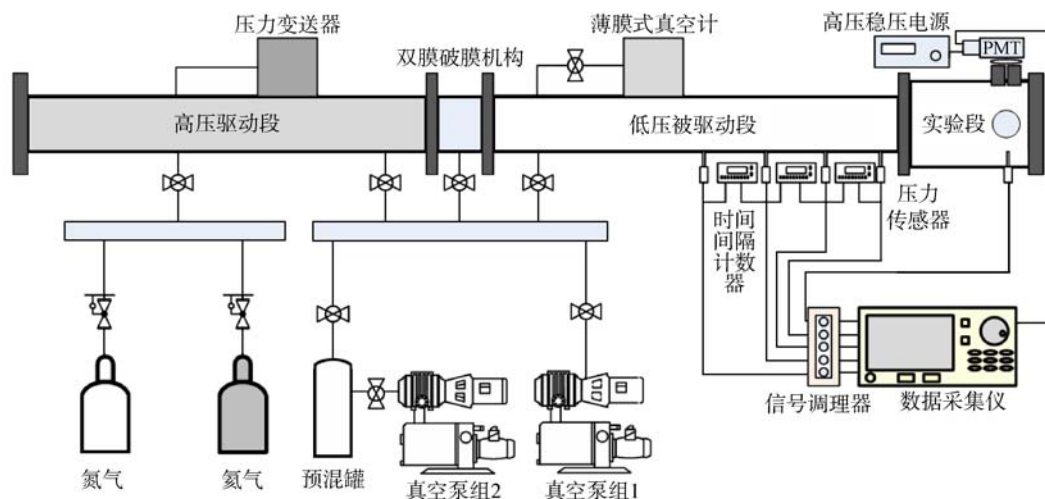


图1 化学激波管实验装置

Fig. 1 Experimental setup of chemical shock tube

4 个压力传感器,各压力传感器之间的间隔均为 50 mm. 3 个时间间隔计数器并联于 4 个压力传感器之间,利用测量的 3 个时间间隔 Δt 和已知的压力传感器之间的距离,通过最小二乘法线性反推至实验段端面处得到入射激波速度,进而得到入射激波马赫数.利用薄膜式真空计监测实验段混合气压力,在距离实验段端面 20 mm 处的位置安装一个带加速补偿的电荷型传感器,用于监测反射激波后的压力.在电荷型传感器正对面相同位置处安装一个光电倍增管(PMT),配联一个高压稳压电源为光电倍增管提供稳定的直流电压,来探测可燃混合气自着火发生时的微弱光信号.在光电倍增管前安置一块波长为 307 nm 的窄带通滤波片用于滤掉除 OH 自发光信号以外的所有光,特制了一块 0.6 mm 宽的狭缝来保证探测的 OH 自发光信号与测量的反射激波压力信号对应.用一个数据采集仪记录所有的压力信号和 OH 自发光信号.

2 着火延迟时间

不同燃料在不同温度条件下的自着火方式有两种:强着火与弱着火. RP-3 航空煤油的自着火温度较高,抗爆性能较强,导致 RP-3 航空煤油的自着火强度相对较弱,属于弱着火方式.图 2 显示了当量比 ϕ 为 1.0,反射激波后的压力 p 为 0.2 MPa,温度 T 为 1258 K 时 RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气着火过程中典型的压力曲线与 OH 自发光信号曲线.

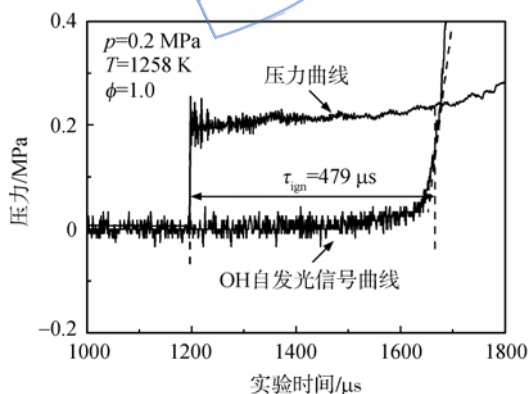


图2 混合气着火过程中压力曲线与 OH 自发光信号曲线

Fig. 2 Curves of pressure and OH auto-luminescence signal in mixture ignition process

从图 2 可以看出,混合气的着火并不是瞬间完成,而是逐渐发生的.此时,着火终了时刻对应的诊断信号无论是压力还是 OH 自发光信号,都

不是十分明显,这给着火延迟时间的定义带来了困难.对于弱着火方式的着火延迟时间,本文定义为压力曲线出现第一次阶跃与 OH 自发光信号曲线最大斜率点线性反推至基线的交叉点之间的时间间隔.因此,在该工况下,RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间 τ_{ign} 为 479 μs .

3 实验结果与分析

RP-3 航空煤油属于高碳数碳氢混合物燃料,其组成非常复杂,包含 $C_7 \sim C_{16}$ 等多种链烃、环烷以及芳香族化合物.范学军等^[15]对 RP-3 航空煤油进行了色谱分析,从体积组成上看,大致包括体积分数为 92.5% 的饱和碳氢化合物,0.5% 的不饱和碳氢化合物以及 7% 左右的芳香族化合物.在燃料着火延迟时间测定实验中,当确定燃料与氧化剂的比例后,其化学计量比随着燃料化学分子式的变化而变化,而且随着燃料化学分子式不同,相同初始状态计算得到的反射激波后实验段气体在着火发生时的温度也存在差异.因此,在实验前需确定 RP-3 航空煤油的化学分子式.梁金虎^[9]分别采用 3 种不同化学分子式($C_{9.49}H_{19.54}$, $C_{10}H_{22}$, $C_{11}H_{22}$)对 RP-3 航空煤油在相同工况下的着火温度进行了计算,发现在各工况下,采用这 3 种化学分子式计算得到的着火温度略有差异(约为 4~5 K).本文选定 $C_{10}H_{22}$ 作为 RP-3 航空煤油的化学分子式.

实验测量了压力分别为 0.1, 0.2, 0.3 MPa, 当量比分别为 0.5, 1.0, 1.5, 温度范围为 1100~1600 K 时,RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间.不同当量比下燃料、氧化剂以及稀释气体所占体积分数如表 1 所示.在特定的实验中,可以有两种改变当量比的方法:一种是固定混合物中燃料的体积分数不变,通过改变氧化剂的体积分数来改变当量比;另一种是通过固定混合物中氧化剂的体积分数不变,通过改变燃料的体积分数来改变当量比.在本实验中采用第一种当

表 1 不同当量比下混合气中各组分的体积分数

Table 1 Volume fraction of various components of mixture at different equivalence ratios

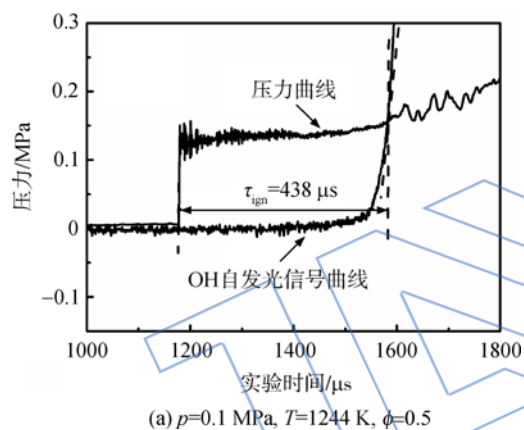
序号	当量比	体积分数/%		
		RP-3 航空煤油	氧气	氩气
1	0.5	0.5	15.5	84
2	1.0	0.5	7.75	91.75
3	1.5	0.5	5.167	94.333

量比改变方式。

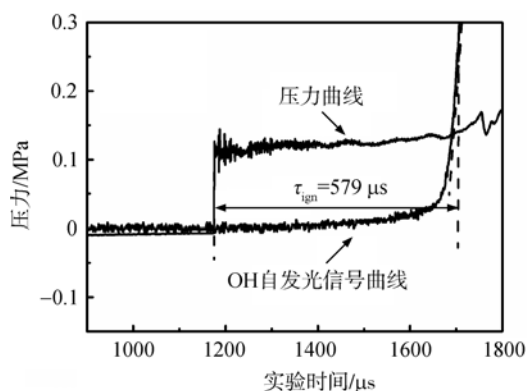
3.1 当量比对着火特性的影响

图 3 显示了压力为 0.1 MPa, 当量比分别为 0.5, 1.0, 1.5 时, 某着火温度下 RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气着火过程中典型的压力曲线与 OH 自发光信号曲线。

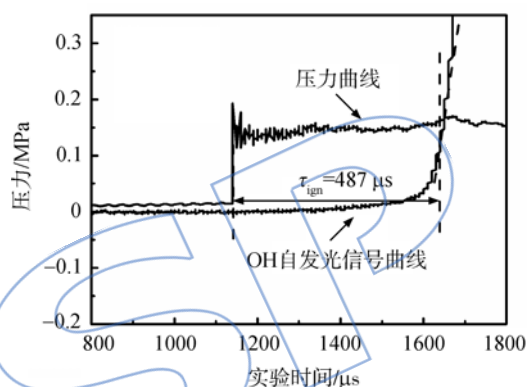
表 2 显示了压力为 0.1 MPa, 当量比分别为 0.5, 1.0, 1.5 时不同着火温度下 RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间。从表可以看出: 当量比为 0.5, 着火温度为 1132~1416 K 时, 混合气的着火延迟时间为 53~1775 μs ; 当量比为 1.0, 着火温度为 1205~1485 K 时, 混合气的着火延迟时间为 59~2074 μs ; 当量比升高至 1.5, 着火温度为 1283~1583 K 时, 混合气的着火延迟时间为 60~1224 μs 。



(a) $p=0.1$ MPa, $T=1244$ K, $\phi=0.5$



(b) $p=0.1$ MPa, $T=1287$ K, $\phi=1.0$



(c) $p=0.1$ MPa, $T=1364$ K, $\phi=1.5$

图 3 不同当量比下, 混合气着火过程中压力曲线与 OH 自发光信号曲线

Fig. 3 Curves of pressure and OH auto-luminescence signal of mixture in ignition process with different equivalence ratios

表 2 不同着火温度下混合气的着火延迟时间 ($p=0.1$ MPa)

Table 2 Ignition delay time of mixture at different ignition temperatures ($p=0.1$ MPa)

$\phi=0.5$			$\phi=1.0$			$\phi=1.5$		
p/MPa	T/K	$\tau_{\text{ign}}/\mu\text{s}$	p/MPa	T/K	$\tau_{\text{ign}}/\mu\text{s}$	p/MPa	T/K	$\tau_{\text{ign}}/\mu\text{s}$
0.117	1277	251	0.119	1341	365	0.118	1439	193
0.117	1287	223	0.124	1252	988	0.117	1455	173
0.122	1347	107	0.116	1329	443	0.123	1504	100
0.119	1329	145	0.124	1287	579	0.120	1540	81
0.120	1416	53	0.121	1279	807	0.119	1559	69
0.121	1385	67	0.127	1205	2074	0.122	1583	60
0.119	1322	150	0.120	1406	129	0.119	1334	679
0.117	1233	452	0.118	1405	144	0.120	1334	665
0.132	1132	1775	0.120	1371	179	0.119	1364	487
0.122	1248	376	0.117	1445	94	0.111	1404	370
0.123	1199	753	0.120	1461	70	0.114	1283	1224
0.123	1244	438	0.122	1485	59	0.120	1346	529
0.126	1186	915	0.120	1338	335	0.122	1326	796
0.122	1148	1543	0.122	1230	1270			
0.118	1221	598	0.115	1279	665			
			0.121	1327	352			

图4显示了压力分别为0.1 MPa与0.2 MPa,当量比分别为0.5,1.0,1.5时,RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间随着着火温度的变化趋势.图中 τ_{ign} 为着火延迟时间, T 为着火温度.

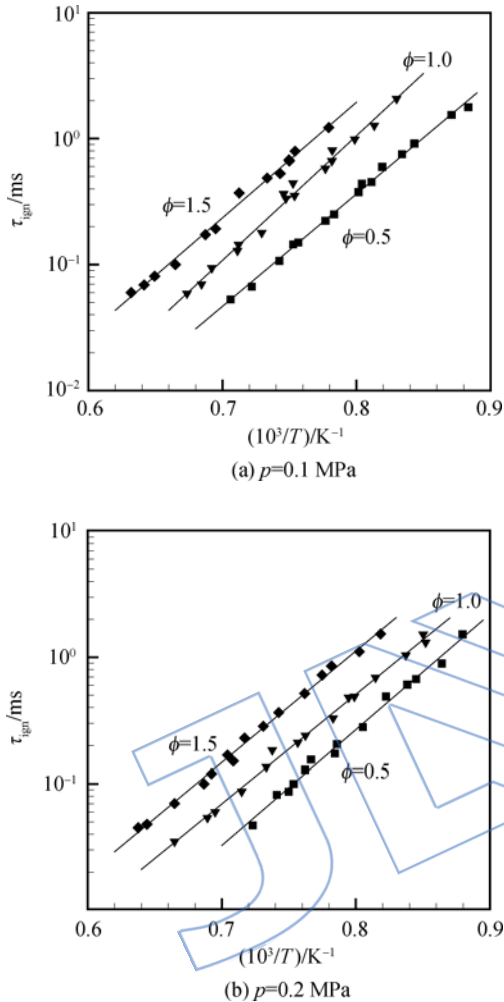


图4 不同压力下混合气的着火延迟时间随着着火温度的变化

Fig. 4 Ignition delay time of mixture varying with ignition temperature at different pressures

从图4可知,在压力分别为0.1 MPa与0.2 MPa时,不同当量比下RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间的对数与着火温度的倒数($\ln \tau_{\text{ign}} \sim 1/T$)呈线性关系,并且随着着火温度的升高,着火延迟时间逐渐缩短.同时,在相同压力与着火温度下,随着当量比的增加,混合气着火延迟时间逐渐延长.

利用多元线性回归拟合得到了压力分别为0.1 MPa与0.2 MPa时混合气的着火延迟时间Arrhenius关系式如下:

压力为0.1 MPa时

$$\tau_{\text{ign}} = 3.91 \times 10^{-5} \phi^{1.52} \exp \left(\frac{1.78 \times 10^5}{RT} \right) \quad (1)$$

压力为0.2 MPa时

$$\tau_{\text{ign}} = 6.55 \times 10^{-5} \phi^{1.26} \exp \left(\frac{1.67 \times 10^5}{RT} \right) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中 ϕ 为当量比, R 为通用气体常数.

从式(1)、式(2)可知,在相同压力下,当量比与着火延迟时间的对数之间呈正比关系,即当量比增加,RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间延长.在高温条件下,链分支反应 $\text{H} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{O}$ 在碳氢燃料着火过程中占绝对主导地位,混合气当量比越小(或混合气越稀),氧气相对燃料越过量,过量的氧气将加速该反应的链分支反应来提高总包反应速率,促进燃料着火,从而使燃料的着火延迟时间缩短.同时,随着压力升高,当量比的指数变小(由1.52下降为1.26)、混合气的活化能降低(由 $1.78 \times 10^5 \text{ J/mol}$ 下降为 $1.67 \times 10^5 \text{ J/mol}$).

3.2 压力对着火特性的影响

图5显示了当量比为1.0,压力分别为0.2 MPa与0.3 MPa时,某着火温度下RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气着火过程中典型的压力曲线与OH自发光信号曲线.

表3显示了当量比为1.0,压力分别为0.2 MPa与0.3 MPa时不同着火温度下RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间.从表可以看出,当压力为0.2 MPa,着火温度为1176~1504 K时,混合气的着火延迟时间为35~1517 μs ;当压力为0.3 MPa,着火温度为1174~1405 K时,混合气的着火延迟时间为70~1111 μs .

图6显示了当量比分别为0.5,1.0,1.5,压力分别为0.1,0.2,0.3 MPa时,混合气的着火延迟时间随着着火温度的变化趋势.

从图6可知,当当量比分别为0.5,1.0,1.5时,不同压力下着火延迟时间的对数与着火温度的倒数同样呈现线性关系,同时,当混合气为稀(当量比为0.5)或浓(当量比为1.5)混合气时,不同压力下各直线基本平行.但是,当混合气处于化学计量比时,不同压力下的着火延迟时间与着火温度的倒数拟合直线的斜率随着着火温度的变化将出现交叉,尤其当压力较低时(0.1,0.2 MPa)较为明显.

利用多元线性回归拟合得到了当量比分别为0.5,1.0,1.5时RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间Arrhenius关系如下式:

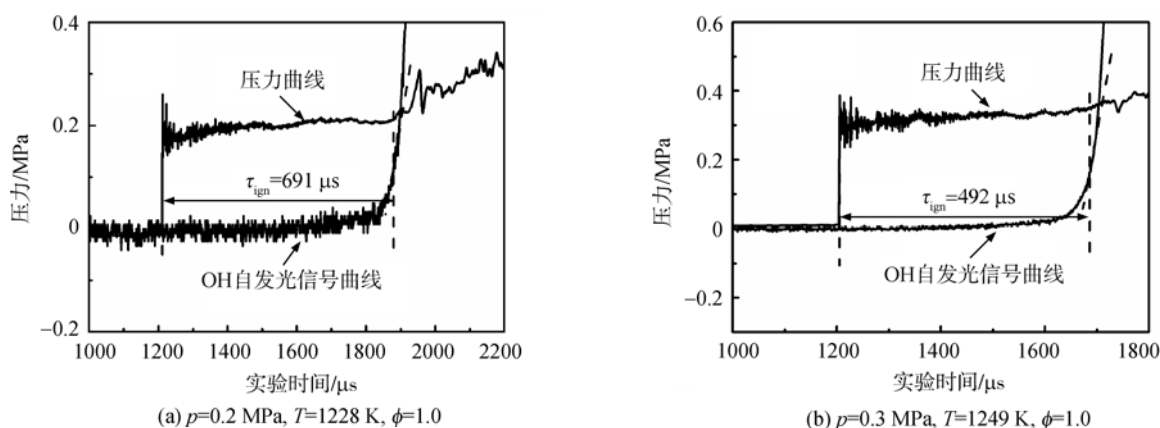


图5 不同压力下混合气着火过程中压力曲线与OH自发光信号曲线

Fig. 5 Curves of pressure and OH auto-luminescence signal of mixture in ignition process with different pressures

表3 不同着火温度下混合气的着火延迟时间 ($\phi=1.0$)Table 3 Ignition delay time of mixture with different ignition temperatures ($\phi=1.0$)

p/MPa	T/K	$\tau_{\text{ign}}/\mu\text{s}$	p/MPa	T/K	$\tau_{\text{ign}}/\mu\text{s}$	p/MPa	T/K	$\tau_{\text{ign}}/\mu\text{s}$
0.204	1277	329	0.196	1364	136	0.296	1278	289
0.200	1356	184	0.209	1399	87	0.309	1405	70
0.207	1322	211	0.205	1439	60	0.304	1297	309
0.198	1194	1040	0.196	1451	54	0.307	1212	690
0.202	1176	1517	0.196	1504	35	0.292	1249	492
0.193	1228	691	0.199	1252	488	0.299	1202	855
0.196	1258	479	0.299	1306	230	0.313	1174	1111
0.207	1312	240	0.305	1330	153	0.277	1367	122

当量比为 0.5 时

$$\tau_{\text{ign}} = 2.35 \times 10^{-6} p^{-0.61} \exp\left(\frac{1.73 \times 10^5}{RT}\right) \quad (3)$$

当量比为 1.0 时

$$\tau_{\text{ign}} = 5.79 \times 10^{-5} p^{-0.88} \exp\left(\frac{1.74 \times 10^5}{RT}\right) \quad (4)$$

当量比为 1.5 时

$$\tau_{\text{ign}} = 1.56 \times 10^{-4} p^{-0.93} \exp\left(\frac{1.71 \times 10^5}{RT}\right) \quad (5)$$

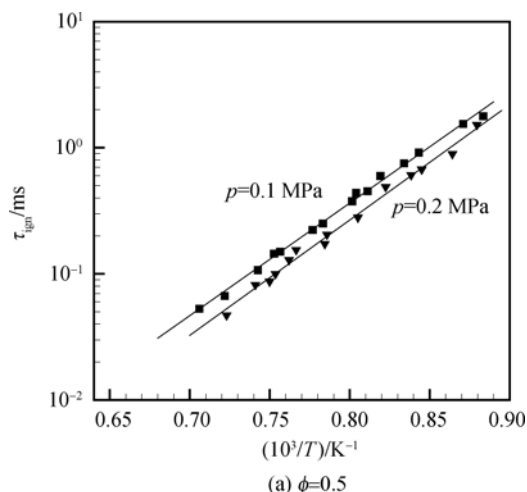
由式(3)~式(5)可知,在相同当量比下,压力与着火延迟时间的对数之间呈反比关系,即压力升高,RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间缩短。

3.3 混合气着火延迟时间的 Arrhenius 关系式

从上述分析可以看出,着火温度、压力以及混合气当量比是 RP-3 航空煤油着火延迟时间的主要影响因素。综合上述各工况下的实验数据,利用多元线性回归拟合得到了着火温度范围为 1100~1600 K,压力范围为 0.1~0.3 MPa,当量比范围

为 0.5~1.5 的条件下,RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间 Arrhenius 关系式为

$$\tau_{\text{ign}} = 8.03 \times 10^{-5} p^{-0.87} \phi^{1.36} \exp\left(\frac{1.72 \times 10^5}{RT}\right) \quad (6)$$



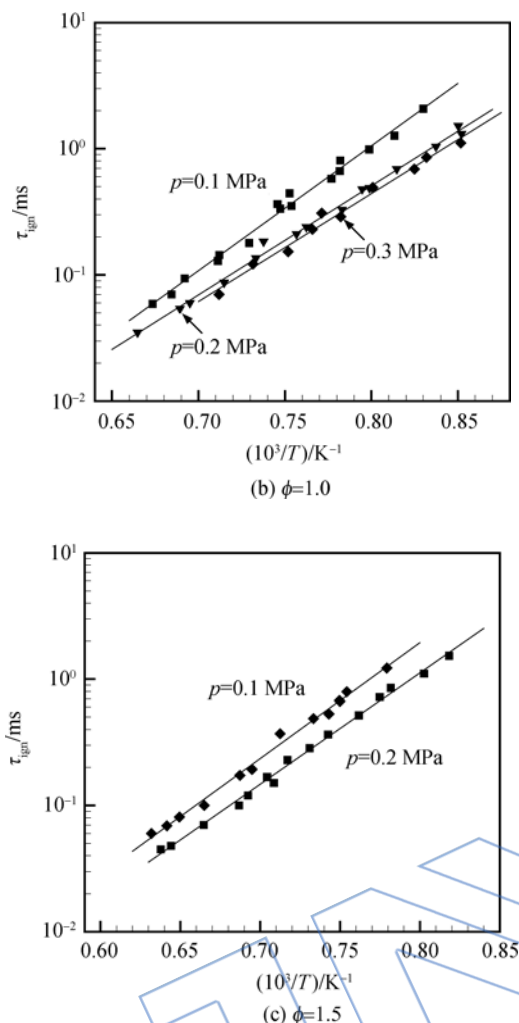


图6 不同当量比下混合气的着火延迟时间随着温度的变化

Fig. 6 Ignition delay time of mixture varying with ignition temperature at different equivalence ratios

4 结论

本文利用化学激波管实验装置对 RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气在温度为 1100~1600 K, 压力为 0.1, 0.2, 0.3 MPa, 当量比为 0.5, 1.0, 1.5 条件下的着火特性进行了实验测量, 并分析了着火温度、压力与当量比对 RP-3 航空煤油着火特性的影响, 得到如下结论:

1) 压力分别为 0.1 MPa 与 0.2 MPa 时, 不同当量比下, RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间的对数与着火温度的倒数呈线性关系. 同时, 随着着火温度的升高, 着火延迟时间逐渐缩短. 并且, 随着混合气当量比的增加, 在相同着火温度与压力下混合气的着火延迟时间逐渐延长.

2) 当量比分别为 0.5, 1.0, 1.5 时, 不同压力

下, RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气的着火延迟时间的对数与着火温度的倒数同样呈现线性关系. 当混合气处于化学计量比时, 不同压力下的拟合直线斜率随着着火温度的变化将出现交叉, 而当混合气为稀或浓混合气时则基本平行. 同时, 随着压力升高, 在相同着火温度与当量比下混合气的着火延迟时间逐渐缩短.

3) 经过对各工况下实验数据的多元线性回归拟合, 当压力范围为 0.1~0.3 MPa, 当量比范围为 0.5~1.5, 着火温度范围为 1100~1600 K 时, RP-3 航空煤油/氧气/氩气混合气着火延迟时间与压力、当量比以及着火温度之间的 Arrhenius 关系式为

$$\tau_{\text{ign}} = 8.03 \times 10^{-5} p^{-0.87} \phi^{1.36} \exp\left(\frac{1.72 \times 10^5}{RT}\right)$$

参考文献:

- [1] Edwards T, Maurice L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(2): 461-466.
- [2] Riesmeir E, Honnet S, Peters N. Flamelet modeling of pollutant formation in a gas turbine combustion chamber using detailed chemistry for a kerosene model fuel[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 899-905.
- [3] Bikas G, Peters N. Kinetic modelling of *n*-decane combustion and autoignition[J]. Combustion and Flame, 2001, 126(1/2): 1456-1475.
- [4] Dagaut P, Reuillon M, Cathonnet M. High pressure oxidation of liquid fuels from low to high temperature. 3. *n*-decane[J]. Combustion Science and Technology, 1994, 103(2): 349-359.
- [5] Dagaut P, Reuillon M, Boettner J C, et al. Kerosene combustion at pressures up to 40 atm: experimental study and detailed chemical kinetic modeling[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1994, 25(2): 919-926.
- [6] Violi A, Yan S, Eddings E G, et al. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixture[J]. Combustion Science and Technology, 2002, 174(11/12): 399-417.
- [7] Wen Z, Yun S, Thomson M J, et al. Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 2003, 135(3): 323-340.
- [8] Patterson P M, Kyne A G, Pourkhashanian M, et al. Combustion of kerosene in counterflow diffusion flames[J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16(3): 453-460.
- [9] 梁金虎. 煤油着火延时特性及其污染效应的激波管研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

LIANG Jinhu. Ignition delay characteristics study of kerosene and contaminated kerosene in shock tube[D].

- Chongqing; Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [10] Pfahl U, Fieweger K, Adomeit G. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1996, 26(1): 781-789.
- [11] Vasu S S, Davidson D F, Hanson R K. Jet fuel ignition delay times; shock tube experiments over wide conditions and surrogate model predictions [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 152(1/2): 125-143.
- [12] Freeman G, Lefebvre A H. Spontaneous ignition characteristics of gaseous hydrocarbon-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 1984, 58(2): 153-162.
- [13] 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(1): 85-93.
ZHANG Yingjia, HUANG Zuohua, WANG Jinhua, et al. Shock tube study on auto-ignition characteristics of kerosene/air mixtures [J]. *Chinese Science Bull*, 2011, 56(1): 85-93. (in Chinese)
- [14] 唐洪昌, 张昌华, 李萍, 等. 煤油自着火特性的实验研究 [J]. *物理化学学报*, 2012, 28(4): 787-791.
TANG Hongchang, ZHANG Changhua, LI Ping, et al. Experimental study of auto-ignition characteristics of kerosene [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(4): 787-791. (in Chinese)
- [15] 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): 187-192.
FAN Xuejun, YU Gang. Analysis of thermophysical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(2): 187-192. (in Chinese)

JALSP