

# 强点火条件下 RP-3 航空煤油 燃爆特性实验研究\*

毛浩清, 黄炜超, 李 斌, 解立峰

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**为进一步探究影响 RP-3 航空煤油燃爆特性参数的因素, 在内径为 200 mm、高度为 5 400 mm 的立式激波管中, 采用强点火方式, 测定了其在不同浓度下的临界起爆能以及不同起爆能量、浓度当量比、喷雾压力下 RP-3 航空煤油的爆速和爆压。实验结果表明: 航空煤油的临界起爆能随浓度当量比的增加先急剧降低, 达到最小值后又缓慢上升, 基本呈“L”形变化; 在喷雾压力为 0.20~0.60 MPa、同一浓度条件下, RP-3 航空煤油的爆速、爆压随喷雾压力的变化曲线呈倒“U”形; 随着起爆能量升高, 爆速、爆压均呈直线上升趋势, 并且当起爆能量小于 1.68 MJ/m<sup>2</sup> 时, 煤油未达到直接爆轰状态; 燃料的爆速、爆压随浓度当量比的增加先上升后下降, 其变化趋势也基本呈倒“U”形。

**关键词:** RP-3 航空煤油; 立式激波管; 强点火; 临界起爆能; 爆速; 爆压

**中图分类号:** O389; TE626

**文献标识码:** A

随着我国民航和军事装备等行业的发展, 各种客机、高性能战斗机陆续投入使用。作为我国航空发动机的主要动力燃料, RP-3 航空煤油的安全性越来越受到研究者的关注。此外, 航空煤油具有一定的挥发性和极高燃烧热值。在发动机喷雾燃烧及储运过程中, 其蒸气与空气的混合物一旦遇明火将极易发生燃烧爆炸事故, 造成极大的人员伤亡和财产损失。因此, 有关 RP-3 航空煤油燃爆特性的研究对于军事及工业安全有着重要的意义。

目前, 国内外许多学者对航空煤油的各种特性进行了研究。姚广涛等<sup>[1]</sup>在分析航空煤油理化特性的基础上, 开展了航空煤油负荷特性的台架实验研究, 并论证了航空煤油代替军用车燃料的可行性。梁金虎等<sup>[2]</sup>在激波管中开展了 RP-3 航空煤油点火延时特性实验, 得到了不同压力条件下 RP-3 航空煤油点火延时与点火温度、压力、当量比及煤油氧气浓度的关系。周舟等<sup>[3]</sup>研究了 RP-3 航空煤油的液滴超临界蒸发性, 得出其在不同工况下超临界蒸发的特征, 并发现影响蒸发的两个主要因素是环境温度和压力, 且不同温度范围内, 液滴的蒸发特征截然不同。Heng 等<sup>[4]</sup>研究了航空煤油在喷雾压力为 0.16~1.20 MPa 条件下的性能, 得出喷雾压力的增大使单位时间内通过喷嘴的燃料流量增加, 从而对喷雾锥角产生影响。Dagaut 等<sup>[5]</sup>在流动搅拌器中进行了航空煤油燃烧特性的研究, 通过测定煤油燃烧产物组成, 建立了模拟航空煤油燃烧过程的燃烧动力学模型。Liu 等<sup>[6]</sup>在 20 L 爆炸球中研究了 JP-10 航空煤油-空气混合物在不同粒度和浓度下的爆炸温度、爆炸压力及爆炸下限特征。然而, 目前对 RP-3 航空煤油的研究主要集中在点火延时及燃烧、蒸发特性上, 较少涉及其燃爆特性的研究。

\* 收稿日期: 2017-05-20; 修回日期: 2017-06-05

基金项目: 科技部国际科技合作重大专项(2013DFR60080)

作者简介: 毛浩清(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事燃烧、爆炸、爆轰及其作用机理研究。

E-mail: Mao\_haoqing@163.com

通信作者: 解立峰(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事多相爆轰理论与防火防爆技术研究。

E-mail: xielifeng319@sina.com

本研究利用大型立式激波管,测定燃料的临界起爆能以及在不同喷雾压力、起爆能量、浓度当量比条件下 RP-3 航空煤油的燃爆参数,以期为航空煤油的安全性研究提供参考。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验设备

实验装置立式激波管主要由激波管管体、喷雾系统、点火系统、测压系统 4 部分组成,如图 1 所示。激波管管体由起爆源段、主实验段和观察窗段 3 部分组成。管体总长为 5.4 m,外径为 240 mm,内径为 200 mm,有效容积约为 169 L。喷雾系统由空气压缩机、储气罐、U 型管储液储粉装置、喷头等组成。喷头均匀分布于有 119 个孔(直径 0.5 mm)的半球。在将液体装载在 U 形管中之前,用压缩空气填充空气室。一旦电磁阀打开,根据文丘里原理,由压缩空气形成的高速射流将会穿过中空喉部,形成负压,并在短时间内将液体雾化。点火系统由延时点火器、起爆线、雷管基座等组成。实验时将一定重量的 C4 塑料炸药与一发 8# (1D)电雷管一起放置在雷管基座上。测压系统由传感器、电荷放大器、数据采集卡、计算机等组成。其中压力测点如图 1 中的 2#~7# 所示,相邻测点的间距为 0.5 m,与起爆源之间的距离依次为 1.4、1.9、2.4、2.9、3.4、3.9 m。传感器为扬州无线电二厂生产的压电式石英传感器,主要参数如下:灵敏度为 $-10\text{PC}/105\text{ Pa}$ ,线性度小于 1%,绝缘阻抗不小于  $10^3\ \Omega$ ,测量范围  $0\sim 6\text{ MPa}$ ,工作温度为 $-40\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ ,过载能力 150%,采样频率为 1 MHz。

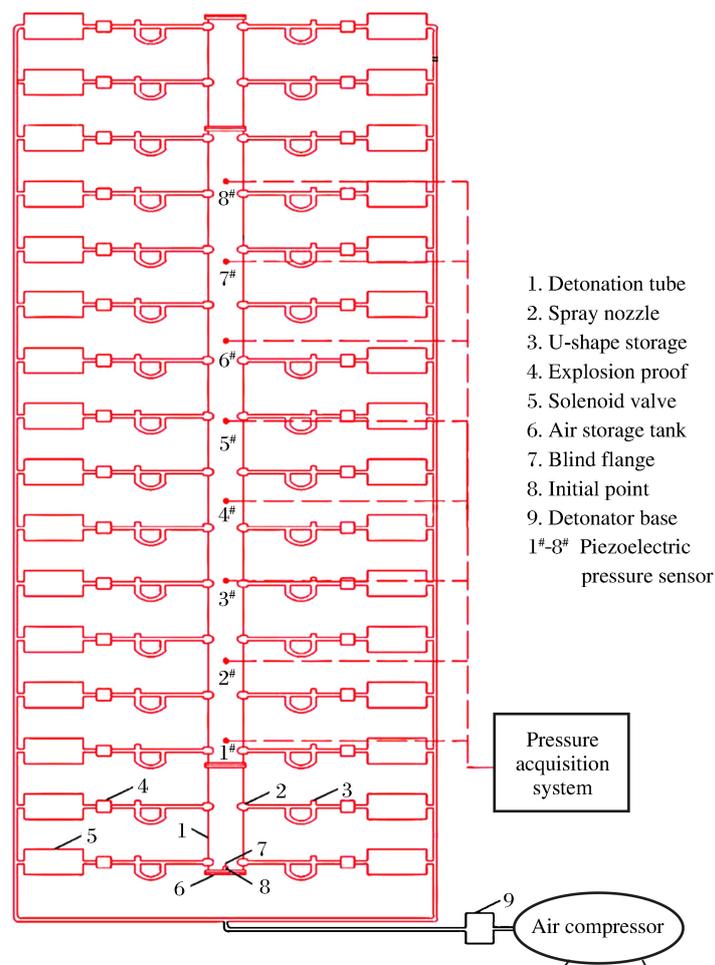


图 1 立式激波管示意图

Fig. 1 Structure of the vertical shock tube

## 1.2 主要原料

实验油样采用国产 RP-3 型航空煤油,为较重煤油型燃料。其具体组分构成极为复杂,包括约 92.1% 饱和烃和约 7.9% 的芳香烃,RP-3 型航空煤油各成分质量分数见表 1<sup>[7]</sup>。液体燃料的密度、黏度、热值、馏程等理化性质对其燃爆特性有重要影响,RP-3 型航空煤油的主要理化特性见表 2<sup>[8-9]</sup>。

表 1 RP-3 航空煤油组分

Alkanes	Naphthenes			Alkyl benzenes	Indan & tetralin	Naphthalene	Naphthalene derivatives
	Monocyclic	Bicyclic	Tricyclic				
52.2	33.8	6.0	0.1	5.1	1.3	0.6	0.9

表 2 RP-3 航空煤油主要理化特性

Molecular formula	Molecular weight	Density at 20 °C/(g · cm <sup>-3</sup> )	Boiling point/°C	Condensation point/°C
C <sub>7</sub> -C <sub>16</sub>	148.33	0.79	185	-60
Smoke point/°C	Theoretical air-fuel ratio	Latent heat of vaporization/(J · g <sup>-1</sup> )	Low heating value/(kJ · m <sup>-3</sup> )	Cetane index
24.6	16	345	43 200	43

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 典型实验

根据图 1 所示,典型实验过程如下:首先将液体燃料左右相错地加入各 U 形管中,同时利用空气压缩机将除湿后的干燥空气充入储气罐中,以达到一定的压力;再将起爆源安装在下法兰,并封闭上、下法兰;然后设置好压力采集系统,由 DHY-6 延迟时间控制器使电磁阀和雷管有序触发,采集爆炸后压力数据;每次实验完成后,用新的压缩空气多次清洁管体。

### 1.3.2 点火延迟时间的选择

本实验将打开电磁阀和触发雷管之间的时间定为 1.00 s。根据产品参数,电磁阀完全打开和关闭的时间共需 0.20 s,高压气体从储气罐到喷头需要 0.10 s,喷雾持续时间需要 0.30 s,这样才可以保证燃料全部被喷出,加上雾滴悬浮液时间 0.30 s,为了安全起见,选择延迟时间为 1.00 s,以确保在爆炸开始之前所有阀门都关闭<sup>[10]</sup>。

### 1.3.3 临界起爆能

实验中采用上升下降法及对折实验法测定燃料的临界起爆能,并通过火焰是否燃烧至激波管顶判定燃料是否起爆。同时,为了保证准确,确定一个起爆能时至少重复进行两次实验。

## 1.4 起爆源

实验起爆源为 1 发 8 号工业雷管(1D)加若干 C4 塑性炸药。起爆能量可以通过改变塑性炸药的质量改变。根据文献[11]中的起爆能量公式,得出实验所采用的起爆物的能量与药量关系

$$E = 5945.3 + 5860W \quad (1)$$

式中: $E$  为起爆能量,J; $W$  为炸药质量,g。药量与起爆能量的关系见表 3。

表 3 药量与起爆能量

Initiation source	$E$ /kJ	$E_1$ /(MJ · m <sup>-2</sup> )	Initiation source	$E$ /kJ	$E_1$ /(MJ · m <sup>-2</sup> )
1D	5.94	0.19	1D+3 g C4	23.53	0.75
1D+1 g C4	11.78	0.37	1D+5 g C4	35.25	1.12
1D+2 g C4	17.66	0.56	1D+8 g C4	52.82	1.68

激波管实验中,由于起爆能量是在瞬间产生的,可以认为起爆能量是沿激波管体径向均匀分布。定义平面起爆能量  $E_1$  为起爆能量  $E$  与其所作用面积的比值

$$E_1 = E/(\pi r^2) \quad (2)$$

式中:  $r$  为激波管内半径, m。

## 2 结果分析讨论

### 2.1 浓度当量比对燃料临界起爆能的影响

临界起爆能是指能够引起直接起爆的最小点火能量,直接反映了被起爆系统的感度,是重要的爆炸特性参数<sup>[12]</sup>。燃料的浓度当量比  $\varphi$  表示单位质量的燃料完全燃烧所需的理论空气质量与实际供给的空气质量之比。当量比  $\varphi=1$  时,燃料和氧气完全反应,产生二氧化碳和水。本研究中当量比  $\varphi=1$  时的燃料体积  $V_1$  确定方法如下:首先通过理想气体状态方程计算出管体中空气的物质的量  $n$ ,再根据(4)式计算浓度当量比  $\varphi=1$  时燃料的体积。

$$pV_{\text{tube}} = nRT \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{21\%nM}{a\rho} \quad (4)$$

式中:  $p$  为激波管中的压强, Pa;  $V_{\text{tube}}$  为激波管管体的体积,  $\text{m}^3$ ;  $n$  为激波管中空气物质的量, mol;  $T$  为环境的绝对温度, K;  $R$  为气体常数,  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $V_1$  为浓度当量比  $\varphi=1$  时燃料的体积, mL;  $M$  为燃料分子量;  $a$  为燃料空燃比;  $\rho$  为燃料密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$  (数值见表2)。由于采用的航空煤油物性数值本身就有一定的偏差,对比采用不同文献的物性数值计算体积后发现误差在1%左右。

激波管实验中,燃料的临界起爆能与喷雾压力、延迟点火时间和浓度当量比等条件有关。固定喷雾压力为0.40 MPa,延时点火时间为1.00 s,通过实验测定了5个浓度当量比  $\varphi$  条件下航空煤油云雾的临界起爆能  $E_{1,\text{min}}$ 。此喷雾压力下,燃料粒径  $D_{v50}$  为  $491.2 \mu\text{m}$ ,  $D_{[3,2]}$  为  $354.5 \mu\text{m}$ 。具体实验结果见表4和图2。表4中  $V$  为加入激波管的航空煤油体积。由表4和图2可知:当  $\varphi < 1$  时,航空煤油的临界起爆能  $E_{1,\text{min}}$  随着当量比的升高而迅速降低;当  $\varphi > 1$  时,  $E_{1,\text{min}}$  随着当量比升高而升高,但是趋势缓慢。航空煤油液滴云雾的临界起爆能随当量比的增加,其变化趋势近似于“L”形,说明在一定的浓度当量比范围内 ( $1 < \varphi < 2$ ),航空煤油的临界起爆能都比较低,且十分接近。

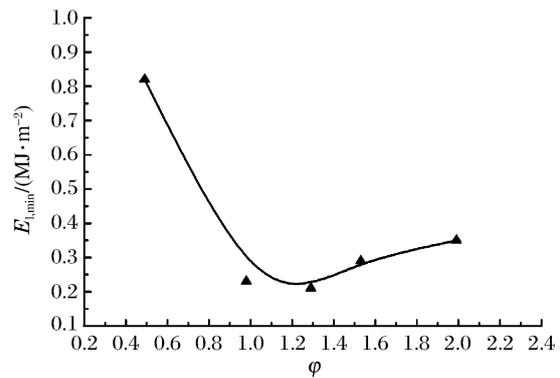


图2 煤油-空气云雾临界起爆能随当量比的变化图

Fig. 2 Variation of minimum ignition energy with equivalence ratio for aviation kerosene cloud

表4 不同浓度当量比下航空煤油-空气云雾的临界起爆能

Table 4 Minimum ignition energy of aviation kerosene cloud with different equivalence ratios

$\varphi$	$V/\text{mL}$	$E_{1,\text{min}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$\varphi$	$V/\text{mL}$	$E_{1,\text{min}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$	$\varphi$	$V/\text{mL}$	$E_{1,\text{min}}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$
0.46	19.5	0.82	1.28	54.6	0.21	1.98	84.5	0.35
0.91	39.0	0.23	1.52	65.0	0.29			

理论上,当  $\varphi=1$  时,燃料所需的起爆能是最低的。这是因为当  $\varphi < 1$  或  $\varphi > 1$  时,即在氧气过多或燃料过多情况下,这些相对多出来的氧气或者燃料都需要吸收热量,却不参加燃爆反应,使得部分能量并未参与到反应中,因而比  $\varphi=1$  时需要更多的能量才能使燃料点燃。但是,实验测定出的煤油云雾液滴的临界起爆能的极值并不是在  $\varphi=1$  处,而是偏向富燃料一侧,其原因如下:首先,由于气液两相云雾爆

炸与气相不同,两相有比气相爆炸更为复杂的诱导期;其次,高压气体驱动喷出的燃料液滴是有大小的,有少部分燃料未参与爆炸反应或反应不完全,也有部分燃料在喷出后吸附在激波管管壁上而无法参与反应<sup>[13]</sup>;最后,由于煤油是烷烃与芳香烃混合物,每个组分的沸点、可燃性、挥发性都有所差异,当较小的起爆能量引爆云雾时,会有部分相对难燃的组分未参与反应。

## 2.2 喷雾压力对燃料爆速和爆压的影响

喷雾压力为储存在储气罐中用于驱动液体燃料的压缩空气的初始压力,决定了液滴云雾的大小、比表面积等,并直接影响着燃料的燃爆压力和速度。实验时可以通过设置空气压缩机的参数改变储气室内空气的压力,从而改变喷雾压力。测定了 0.2~0.6 MPa 范围内 5 个喷雾压力下 RP-3 航空煤油液滴云雾爆炸压力与速度。实验起爆源均为 1 发 8 号工业雷管加 5 g 炸药,即平面起爆能为 1.12 MJ/m<sup>2</sup>。另外,加入的燃料体积为 39 mL,浓度当量比为 0.91。

定义平均爆压  $p_{ave}$  和平均爆速  $D_{ave}$  为

$$p_{ave} = \frac{1}{5} \sum_{i=3}^7 p_i, \quad D_{ave} = \frac{1}{5} \sum_{i=3}^7 D_i \quad (5)$$

式中:  $p_3 \sim p_7$  分别为 3<sup>#</sup>~7<sup>#</sup> 传感器测得的压力值,MPa;  $D_3 \sim D_7$  分别为 3<sup>#</sup>~7<sup>#</sup> 传感器测得的平均爆炸传播速度,m/s。由于 2<sup>#</sup> 传感器测到的爆压受起爆源影响较大,因此计算平均值时不考虑  $p_2$ 。

以平均爆压、平均爆速为纵轴,喷雾压力为横轴,将实验结果绘制于图 3 中。由图 3 可知:当喷雾压力为 0.40 MPa 时,RP-3 航空煤油的平均爆速和爆压达到最大;当喷雾压力为 0.20~0.40 MPa 时,喷雾压力增加,RP-3 航空煤油的平均爆压和平均爆速均呈上升趋势;而当喷雾压力大于 0.40 MPa 时,燃爆参数随着喷雾压力的增加有所降低。此外,当喷雾压力从 0.20 MPa 上升到 0.40 MPa 时,平均爆压的上升速度较快;从 0.40 MPa 上升到 0.60 MPa 时,平均爆压的下降趋势较为平缓。爆炸速度总体在 590~610 m/s 范围内波动。随着喷雾压力的增加,航空煤油液滴云雾的平均爆速和平均爆压的变化曲线均近似呈倒“U”形。

分析其原因,一方面在较低的喷雾压力范围内,燃料形成的液滴云雾粒径较大,从而其比表面积小,挥发的速率慢,形成的蒸气量小,燃爆性能受到影响。另一方面,在较低的气体压力推动下,液滴云雾产生的水平运动速度相对较小,有部分液滴因此发生沉降而导致云雾量减少,也会影响燃爆的威力。而随着喷雾压力升高,激波管内形成的液滴云雾越来越均匀细小,从而挥发或分解出足够的蒸气量,燃料爆速、爆压自然上升<sup>[14]</sup>。而当燃料喷雾压力大于 0.40 MPa 时,平均爆压有小幅降低,可能是由于有少部分燃料液滴云雾在起爆前就撞击到了激波管的壁面上,被管壁吸附,从而无法参加反应,影响了爆炸参数。

## 2.3 起爆能量对燃料爆速和爆压的影响

改变起爆源能量,得到起爆能量取 0.37~1.68 MJ·m<sup>-2</sup> 范围内 5 个值时激波管中 RP-3 航空煤油的爆炸压力与爆炸速度。实验中喷雾压力为 0.40 MPa,浓度当量比为 1.28,实验结果见表 5。

由表 5 可知,同一组实验中, $p_3$  相比  $p_2$  有较大的衰减。这是由于 2<sup>#</sup> 传感器距离起爆源比较近,受到了起爆源爆炸波的影响,而 3<sup>#</sup>~7<sup>#</sup> 传感器距离起爆源较远,所受影响很小。同时, $p_3 \sim p_7$  的波动范围基本在 0.10 MPa 以内。由此可以判断,航空煤油在激波管 1.9 m 后爆炸波形成了稳定的传播。另一方面,当起爆能量一定时,距离爆炸源越近,爆炸速度越大,但是其衰减趋势较为平缓。5 组实验中, $D_3 \sim D_7$  分别衰减了 20.03%、15.06%、14.84%、16.45%、21.31%。

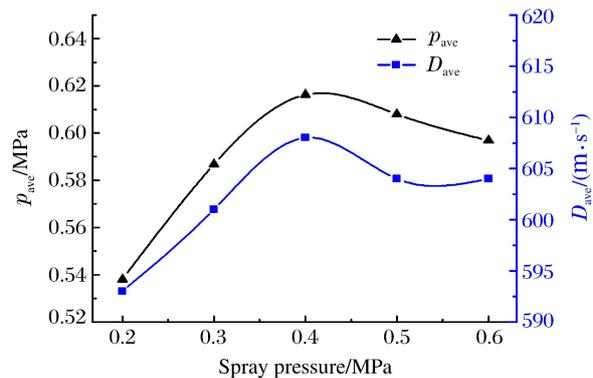


图 3 爆速、爆压随喷雾压力的变化

Fig. 3 Detonation velocity and explosion pressure of RP-3 aviation kerosene under different spray pressures

由图 4 可知,随着起爆能量的增加,平均爆速  $D_{ave}$ 、平均爆压  $p_{ave}$  均明显上升,其趋势近似于直线。这是由于燃料液滴云雾的起爆过程包含燃料液滴在激波阵面的迅速加速、变形、蒸发、热传递等物理过程以及其后的气相氧化过程。在燃料蒸气发生氧化反应后,会释放能量至前导激波。而起爆源能量越大,这种效应就会越显著。但是根据爆燃与爆轰的区别<sup>[15]</sup>,从实验测定的爆压和爆速来看,这 5 组起爆能量下的航空煤油云雾显然均未达到爆轰状态。这可能是因为航空煤油在常温下的饱和蒸气压较低,挥发性差,并且在起爆过程中燃料产生的蒸气量不大,因而气相化学反应产生的能量无法支撑爆炸达到爆轰状态。

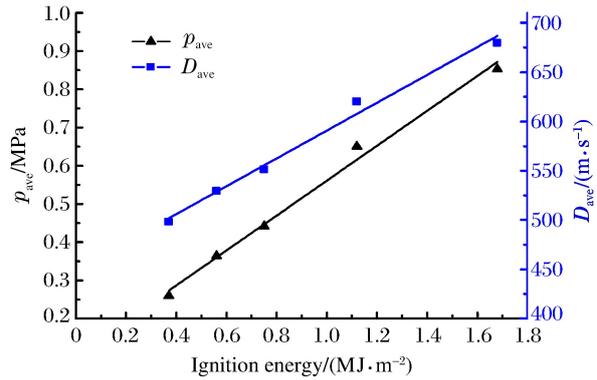


图 4 爆速、爆压随起爆能量的变化

Fig. 4 Detonation velocity and explosion pressure of RP-3 aviation kerosene under different initiation energies

表 5 不同起爆能量条件下的实验结果

Table 5 Experimental results under different initiation energy conditions

$E_1 /$ (MJ · m <sup>-2</sup> )	Pressure/MPa						$p_{ave} /$ MPa	Velocity/(m · s <sup>-1</sup> )					$D_{ave} /$ (m · s <sup>-1</sup> )
	2#	3#	4#	5#	6#	7#		3#	4#	5#	6#	7#	
0.37	0.35	0.29	0.27	0.23	0.25	0.26	0.26	559	520	476	488	447	498
0.56	0.81	0.40	0.38	0.35	0.34	0.35	0.36	571	537	533	521	485	529
0.75	0.82	0.47	0.45	0.43	0.43	0.42	0.44	593	560	567	631	505	571
1.12	1.30	0.76	0.56	0.66	0.64	0.66	0.66	693	614	618	606	579	622
1.68	1.70	0.94	0.77	0.73	0.86	0.96	0.85	774	712	654	649	609	680

### 2.4 浓度当量比对燃料爆速和爆压的影响

燃料的燃爆参数与反应时的浓度当量比有着密切的联系。取平面起爆能量为 1.12 MJ/m<sup>2</sup>, 喷雾压力为 0.40 MPa, 通过实验测定了 RP-3 航空煤油在 0.46、0.63、0.91、1.28、1.52、1.67、1.98 这 7 个浓度当量比下的爆速和爆压。具体实验结果见表 6, 根据表 6 中数据, 绘制平均爆压、平均爆速随浓度当量比的变化关系, 如图 5 所示。

从表 6 中数据可以看出, 除  $p_2$  外, 压力传感器测得的最大爆压为 0.76 MPa, 相应的最大爆速为 693 m/s, 平均爆压的最大值为 0.66 MPa, 平均爆速的最大值为 622 m/s, 且最大值均发生在浓度当量比为 1.28 的实验组中。进一步计算可知, 相比于浓度当量比取值为 0.46、0.63、0.91、1.52、1.67、1.98 的 6 个实验组, 浓度当量比取值为 1.28 实验组的平均爆压  $p_{ave}$  分别提高了 17.9%、11.9%、8.2%、1.5%、1.5%、11.8%, 平均爆速  $D_{ave}$  分别提高了 3.5%、4.0%、2.3%、1.1%、0.6%、2.0%。由此可知, 浓度当量比对爆压的影响比爆速更明显。由图 5 可知: 当  $\varphi < 1.3$  时, 平均爆速、平均爆压均随着浓度当量比的增加快速上升; 在  $\varphi = 1.3$  附近, 平均爆速、平均爆压到达峰值, 之后缓慢下降, 整体趋势基本呈倒“U”形。综上所述, RP-3 航空煤油-空气混合物发生爆炸存在最佳浓度, 此时反应释放出来的能量最大。

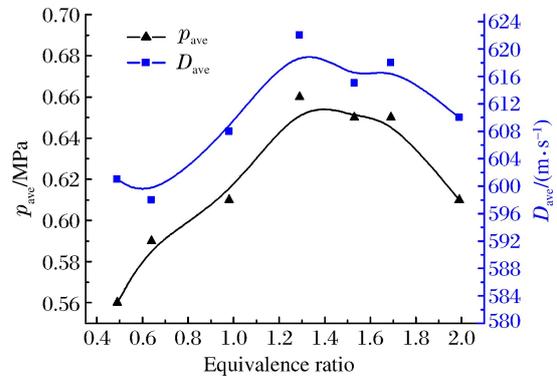


图 5 爆速、爆压随浓度当量比的变化

Fig. 5 Detonation velocity and explosion pressure of RP-3 aviation kerosene under different equivalence ratios

表 6 不同浓度当量比下的实验结果

Table 6 Experimental results under different equivalence ratio conditions

Equivalence ratio	Pressure/MPa						$p_{ave}/$ MPa	Velocity/( $m \cdot s^{-1}$ )					$D_{ave}/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )
	2#	3#	4#	5#	6#	7#		3#	4#	5#	6#	7#	
0.46	1.04	0.65	0.57	0.56	0.57	0.59	0.56	639	633	609	578	548	601
0.63	1.30	0.68	0.60	0.59	0.56	0.53	0.59	651	625	600	578	546	598
0.91	1.28	0.69	0.57	0.62	0.59	0.58	0.61	667	638	611	581	546	608
1.28	1.30	0.76	0.56	0.66	0.64	0.66	0.66	693	614	618	606	579	622
1.52	1.28	0.61	0.61	0.75	0.62	0.63	0.65	632	674	606	603	559	615
1.67	1.27	0.72	0.59	0.68	0.61	0.66	0.65	638	676	625	594	558	618
1.98	1.28	0.72	0.60	0.58	0.58	0.59	0.61	659	630	600	598	565	610

### 3 结 论

(1) 激波管实验中,RP-3 航空煤油临界起爆能随浓度当量比的变化呈“L”形,且在  $\varphi=1.28$  时达到最小值  $0.21 \text{ MJ/m}^2$ 。

(2) 本实验条件下最佳喷雾压力为  $0.40 \text{ MPa}$ ,此时燃料的爆压、爆速达到最大。爆速、爆压随着喷雾压力的升高呈倒“U”形。

(3) 实验表明在常温常压下航空煤油液滴云雾爆炸波能稳定传播,并且达到爆燃状态,但难以直接达到爆轰状态。在  $0.37 \sim 1.68 \text{ MJ/m}^2$  的强点火能量范围内,起爆能量越高,RP-3 航空煤油的爆速、爆压越高,且有较强的线性关系。

(4) 随着浓度当量比增加,航空煤油燃爆参数逐渐升高,直到浓度当量比  $\varphi=1.28$  时,燃料的爆速、爆压达到最高;但随着浓度当量比继续增加,燃爆参数有下降趋势。

### 参考文献:

- [1] 姚广涛,刘宏威,杨春浩,等. 军用车辆柴油机燃用航空煤油性能研究 [J]. 内燃机工程,2017,38(1):76-80.  
YAO G T, LIU H W, YANG C H, et al. Study on the performance of jet fuel burned in diesel engine of military vehicle [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017, 38(1): 76-80.
- [2] 梁金虎,王苏,张灿,等. RP-3 航空煤油点火特性研究 [J]. 力学学报,2014,46(3):352-360.  
LIANG J H, WANG S, ZHANG C, et al. Studies on the autoignition characteristics of RP-3 aviation kerosene [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(3): 352-360.
- [3] 周舟,范玮,靳乐,等. 单个 RP-3 航空煤油液滴的超临界蒸发实验研究 [J]. 推进技术,2016,37(8):1422-1430.  
ZHOU Z, FAN W, JIN L, et al. Experimental investigation on super critical evaporation of RP-3 aviation kerosene droplet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(8): 1422-1430.
- [4] HENG Q P, JASUJA A K, LEFEBVRE A H. Influence of air and fuel flows on gas turbine sprays at high pressures [J]. Symposium on Combustion, 1996, 26(2): 2757-2762.
- [5] DAGAUT P, CATHONNET M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: a review of experimental and kinetic modeling [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2006, 32(1): 48-92.
- [6] LIU X L, WANG Y, ZHANG Q. A study of the explosion parameters of vapor-liquid two-phase JP-10/air mixtures [J]. Fuel, 2016, 165: 279-288.
- [7] 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 X J, YU G. Analysis of thermo-physical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 187-192.
- [8] 刘宇,曾文,马洪安,等. 氢气添加对 RP-3 航空煤油着火特性的影响 [J]. 推进技术,2016,37(9):1742-1751.  
LIU Y, ZENG W, MA H A, et al. Effects of hydrogen addition on ignition characteristics of RP-3 kerosene [J].

- Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(9): 1742-1751.
- [9] 朱玉红, 余彩香, 李子木, 等. 航空燃料超临界热裂解过程中焦炭的形 [J]. 石油化工, 2006, 35(12): 1151-1155.  
ZHU Y H, YU C X, LI Z M, et al. Formation of coke in thermal cracking of jet fuel under super critical conditions [J]. Petrochemical Technology, 2006, 35(12): 1151-1155.
- [10] WANG H, SUN X, RAO G, et al. The critical energy of direct initiation in liquid fuel-air and liquid fuel-RDX powder-air mixtures in a vertical detonation tube [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(4): 597-603.
- [11] 黄勇, 解立峰, 鲁长波, 等. 柴油云雾最小点火能量的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2015, 29(2): 149-154.  
HUANG Y, XIE L F, LU C B, et al. Experimental study on minimum ignition energy of diesel-air cloud [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015, 29(2): 149-154.
- [12] PENG L, GAO X, MANNAN M S. Prediction of minimum ignition energy of aerosols using flame kernel modeling combined with flame front propagation theory [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1): 103-113.
- [13] 姚干兵. 液态碳氢燃料云雾爆轰及其抑制与泄放研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 16-18.  
YAO G B. Investigation on detonation characteristics of liquid fuel-air mixtures, explosion suppression and venting [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2006: 16-18.
- [14] 李俊, 鲁长波, 安高军, 等. 汽油、甲醇汽油和乙醇汽油燃爆特性的对比研究 [J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(8): 64-68.  
LI J, LU C B, GAO A J, et al. Comparative study on combustion and explosion characteristics of gasoline, methanol-gasoline and ethanol-gasoline [J]. Chinese Science Safety Journal, 2016, 26(8): 64-68.
- [15] 张宝坪, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2009: 4-5.  
ZHANG B P, ZHANG Q M, HUANG F L. Detonation physics [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2009: 4-5.

## Explosion Characteristics of RP-3 Aviation Kerosene Ignited by a High Explosive

MAO Haoqing, HUANG Weichao, LI Bin, XIE Lifeng

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In this study, the deflagration and detonation parameters of RP-3 aviation kerosene in a vertical shock tube, 200 mm in inner diameter and 5 400 mm in height, was measured at different initiation energies, spray pressures and equivalence ratios in direct ignition by a high explosive to further explore the influencing factors of the combustion characteristics of the RP-3 aviation kerosene. The results show that the critical initiation energy of the aviation kerosene decreases sharply at first and then rises slowly with the increase of the equivalence ratio, and its changing trends are basically in an “L” shape. When the spray pressure varies from 0. 20 MPa to 0. 60 MPa, the detonation velocity and the explosion pressure are both in the shape of an inverted “U” along with the changing of the spray pressure at the same fuel concentration. The detonation velocity and the explosion pressure curves have a linear ascending tendency with the increase of the initiation energy. Moreover, when the initiation energy ranges from 0. 37 MJ/m<sup>2</sup> to 1. 68 MJ/m<sup>2</sup>, the aviation kerosene cannot reach the state of detonation. The detonation velocity and the explosion pressure of the fuel at first increase and then decrease along with the rising of the equivalence ratio, also in an inverted “U” shape.

**Keywords:** RP-3 aviation kerosene; vertical shock tube; direct ignition; critical initiation energy; detonation velocity; explosion pressure