

正庚烷云雾爆轰特性的研究**

胡 栋 章冠人* 林其文* 李招宁

孙珠妹 丁玉珍

(成都科技大学应用物理研究所)

* (中国工程物理研究院流体物理研究所)

摘要 本文从理论和实验上研究了正庚烷的云雾爆轰特性。实验中采用红外技术、传感器技术、烟膜技术分别测量了正庚烷云雾引燃的延迟时间 t_{DDT} , 爆速 D , 爆压 p 和爆轰波阵面结构。在理论上提出了含有化学反应项的液滴燃烧模型, 进行了正庚烷云雾爆轰过程的数值模拟。计算结果和实验基本符合。

关键词 正庚烷 云雾爆轰 数值模拟

一、前 言

汽油等燃料的抗爆性是指汽油等燃料在发动机气缸内燃烧时抗爆轰的能力, 它用辛烷值来评定。在确定辛烷值时, 往往需要以正庚烷的爆轰特性作为标准。汽油或正庚烷属烃类燃料, 在氧化时积累了较多的过氧化物, 它属于具有大量多余能量的极不稳定的化合物, 如积累过多, 就能形成爆轰波。

燃料云雾爆轰属于气、液两相爆轰问题, 它的爆轰特性可近似用一维 C-J 理论来描述。国内外研究人员^[1-3]相继提出了一些计算模型, 计算结果能解释部分实验结果。本文提出的模型也属于拟定态问题, 但带有化学分解, 可用以计算爆轰波阵面的结构参数。

二、实验装置与测试技术

我们采用文献^[3]的方法, 在图1所示的 $\Phi 100 \times 4300$ mm 卧式激波管中成功地研究了正庚烷的云雾爆轰特性。石英压力计1、2、3离点火源的距离分别为0.8、2.35、

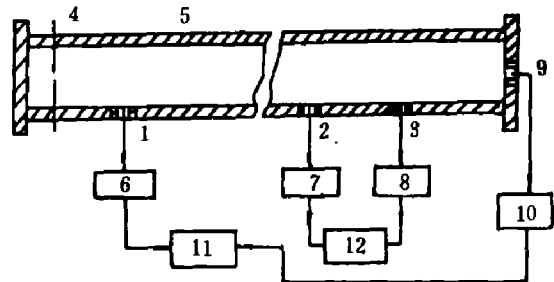


图1 实验装置示意图

- 1、2、3. 石英压力计 4. 火花隙 5. 激波管
6、7、8. 电荷放大器 9. 光导索 10. 红外探测仪
11、12. 示波器

Fig.1 Schematic diagram of the experimental set-up

- 1, 2, 3. Piezoelectric quartz gauge, 4. Electrical spark, 5. Shock tube, 6, 7, 8. Electric charge amplifier, 9. Optical fibre 10. Ultra-violet detector, 11, 12. Oscilloscope

•• 中国工程物理研究院科学基金资助项目。

1989年11月3日收到原稿1990年12月30日收到修改稿。

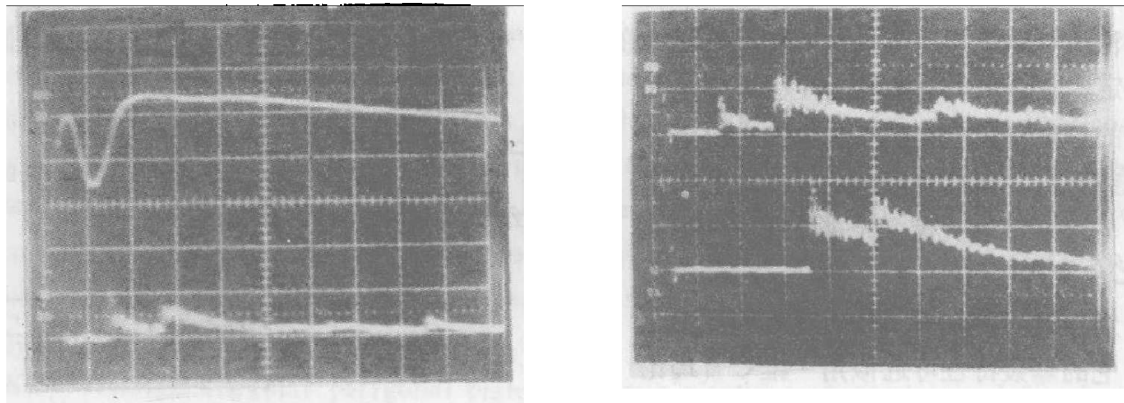
3.35 m, 波阵面到达压力计后的压电信号经过电荷放大器送入示波器。测得波阵面到达不同位置时的时间, 即求得该间距内的平均速度。

图2列出了其典型结果。激波管中充入正庚烷前氧气的初始压力 $p_{O_2} = 0.025 \text{ MPa}$ 。图2(a)中下扫描线为第1个压力计测得的波形; 图2(b)上扫描线为第2个压力计测得的波形, 图2(b)中的下扫描线是第3个压力计测得的波形。图2(a)中的上扫描线为光纤测得的红外光发射强度的变化。其工作原理是: 燃料云雾由爆燃转变为爆轰时其红外光的强度明显增强^[4], 故在激波管端部放置一个光学探头, 即能确定点火后爆燃转变为爆轰的时间 t_{DDT} 。图2(a)上扫描线中的第一个脉冲是电火花发光所致, 第二个脉冲即为爆轰发光。为了验证第二脉冲确系燃料云雾爆轰产生的时刻, 我们利用文献^[5,6]的方法观察波阵面的压力、速度(间距10 mm)是否达到稳定值, 我们还利用烟膜技术成功地观察到正庚烷云雾爆轰波阵面结构如图3所示。从而由多方面证明了爆燃已经发展为爆轰。

爆燃转变为爆轰的距离 x_{DDT} 可近似按下式确定

$$x_{DDT} = t_{DDT} \cdot \bar{D} \quad (2.1)$$

\bar{D} 为接近爆轰时的平均爆速。



(a) 上扫描线: 灵敏度 0.5 V/div , 扫程 0.5 ms/div ; 下扫描线: 灵敏度 0.1 V/div , 扫程 0.5 ms/div ;
(b) 灵敏度: 0.1 V/div , 扫程: 0.5 ms/div

图2 正庚烷 ($p_{O_2} = 0.025 \text{ MPa}$) 爆轰波压力剖面及红外探测仪测得的点火延迟的典型记录

Fig.2 Typical records of the delay of initiation and pressure profile of detonation of heptane by the ultra-violet detector

(a) Upper streak line: sensitivity 0.5 V/div , streak range 0.5 ms/div ; lower-streak line: sensitivity 0.1 V/div , streak range 0.5 ms/div ;

(b) sensitivity: 0.1 V/div , streak range: 0.5 ms/div

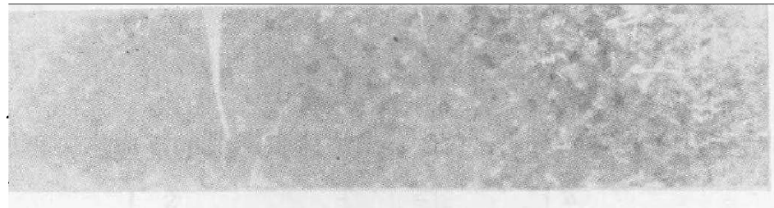


图3 正庚烷 ($\rho_{0_2} = 0.025 \text{ MPa}$) 爆轰波阵面结构的烟膜记录
Fig.3 Record of the structure of the detonation wave front of heptane by the smoke film ($\rho_{0_2} = 0.025 \text{ MPa}$)

三、计算模型

如图4所示。0区为静止区，初始由火花隙产生一冲击波面和I区相接，I区为氧气和庚烷蒸汽混合燃烧区，庚烷蒸汽是通过蒸发和冲击波扫过时带起的液滴和蒸汽产生，II区为气液两相混合燃烧区，III区为爆轰波波前静止区。

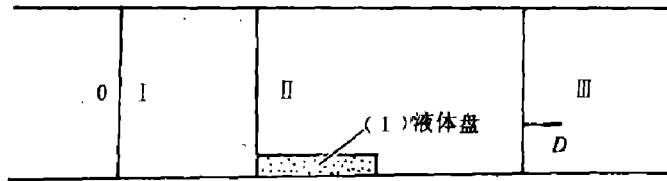


图4 计算模型示意图
Fig.1 Schemetic diagram of the numerical modeling
(1) Fluid pot

由冲激波关系给出初始时刻I区的参量

$$\frac{v_1}{v_{10}} = \frac{(\gamma - 1) M_1^2 + 2}{(\gamma + 1) M_1^2} \tag{3.1}$$

$$\frac{T_1}{T_{10}} = \frac{(\gamma - 1) M_1^2 + 2}{(\gamma + 1) M_1^2 + 2} \tag{3.2}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_{10}} = \frac{2\gamma M_1^2 - \gamma + 1}{\gamma + 1} \tag{3.3}$$

$$M_1 = \frac{u_s}{c} \tag{3.4}$$

$$M = \frac{(\gamma - 1) M_1^2 + 2}{2\gamma M_1^2 - \gamma + 1} \tag{3.5}$$

I区的气相燃烧应用拟稳态的动量方程和能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ a_1 (\rho_s + \rho_v + \rho_d) u_1^2 + a_2 \rho_2 u_2^2 + p \right\} = 0 \tag{3.6}$$

$$\frac{d}{dx} \left\{ a_1 (\rho_g + \rho_v + \rho_d) u_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) + a_2 \rho_2 u_2 \left(e_2 + \frac{u_2^2}{2} \right) + (a_1 u_1 + a_2 u_2) p \right\} = q F(u) \quad (3.7)$$

式中 $F(u)$ 表示化学反应百分数, q 为单位体积燃料的反应热。再加上质量守恒方程

$$\frac{d}{dx} \left\{ a_1 (\rho_g u_1 + \rho_v u_1 + \rho_d u_1) + a_2 \rho_2 u_2 \right\} = 0 \quad (3.8)$$

和状态方程

$$p = (R_g \rho_g + R_v \rho_v + R_d \rho_d) a_1 T_1 \quad (3.9)$$

$$e_1 = c_1 T_1 \quad (3.10)$$

$$e_2 = c_2 T_2 \quad (3.11)$$

$$c_1 = (\rho_g c_g + \rho_v c_v + \rho_d c_d) / (\rho_g + \rho_v + \rho_d) \quad (3.12)$$

式中符号为

| | |
|---------------------|-----------------|
| γ —— 气体多方指数; | ν —— 比容; |
| ρ —— 密度; | T —— 温度; |
| p —— 压力; | u —— 粒子速度; |
| u_s —— 冲击波速度; | R —— 状态方程常数; |
| e —— 内能; | c —— 声速; |
| c_1, c_2 —— 定容比热; | c_p —— 定压比热; |
| a_1 —— 气相容积比; | a_2 —— 液相容积比; |
| d —— 液滴直径; | μ —— 粘滞系数; |
| K —— 热传导系数; | M —— 马赫数 |

下标“g”表示氧气, 下标“v”表示蒸气, 下标“d”表示爆轰产物。下标“1”表示气相, “2”表示液相, “10”表示原始冲击波前。

在第Ⅱ区加入液滴的运动方程, 换热方程及蒸发方程

$$\frac{\rho_2}{6} d^3 \frac{du_2}{dt} = \frac{c_D \rho_1 d^2}{8} |u_1 - u_2| (u_1 - u_2) - \frac{1}{6} d^3 \frac{dp}{dx} - \frac{\rho_1}{12} d^3 \frac{d}{dt} (u_2 - u_1) \quad (3.13)$$

$$\frac{\rho_2}{6} d^3 \frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{c_2} h_p d^2 (T_1 - T_2) \quad (3.14)$$

$$\frac{dv_2}{v_2 dt} = \frac{36 K_1 N_u (T_1 - T_2)}{\pi d^2 \rho_2^2 L_2} + 6 \sqrt{2} \left(\frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2} \right)^{1/6} \left(\frac{\mu_2}{\rho_2} \right)^{1/2} |u_1 - u_2|^{1/2} d^{-3/2} \quad (3.15)$$

式中 $\rho_1 = \rho_g + \rho_v + \rho_d$ 为气相总密度。阻力系数 C_D , 换热系数 h_p 及参数 N_u 的表达式为^[2]

$$N_u = 2 + 0.6 \rho_v^{0.43} R_{ep}^{0.5}$$

$$\begin{aligned}
 R_{ep} &= \rho_1 d |u_1 - u_2| / \mu_1 \\
 p_r &= c_p \mu_1 / K_1 \\
 h_p &= K_1 N_d / d \\
 C_D &= \begin{cases} 27 R_{ep}^{-0.84} & 0 \leq R_{ep} < 80 \\ 0.27 R_{ep}^{0.217} & 80 \leq R_{ep} < 10^4 \\ 2 & 10^4 \leq R_{ep} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

爆轰波速度 D 为

$$\begin{aligned}
 D &= D_0 [a_1 \rho_d / (a_1 \rho_1 + a_2 \rho_2)]^{1/2} \\
 D_0 &= [2(\gamma_d - 1) \phi_d q]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

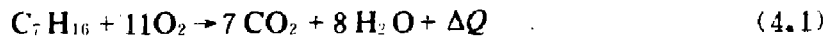
式中 ϕ_d = 已反应庚烷质量/产物质量, 假设过程为拟定态, 把上面的质量方程分解为四个方程、氧、庚烷蒸气, 产物和液滴, 这样总共有10个微分方程, 有10个未知量, 化成一阶线性微分方程组求解。

四、结果分析

1. 实验结果

利用图1所示装置测量了正庚烷 C_7H_{16} (初始密度 $\rho_0 = 0.68 \text{ g/cm}^3$) 云雾爆轰波在激波管中的传播过程及爆轰特性。正庚烷充入激波管前氧气的压力 p_{O_2} 分别为0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.035, 0.04 MPa, 每种条件做1—3发实验。每次实验充入17 g正庚烷。实验结果分别列于图5至图10, 图5分别列出了0.8 m、1.55 m、1 m间距内波阵面传播的平均速度 D_1 , D_2 , D_3 和 p_{O_2} 的关系。该间距分别为点火源与第一个压力计、第一个压力计与第二个压力计、第二个压力计与第三个压力计之间的距离。由图5可以看出 D_1 , D_2 , D_3 和 p_{O_2} 呈倒U关系, 大约在 $p_{O_2} \approx 0.03 \text{ MPa}$ 时速度有极大值。

烃类的化学反应可近似按下式进行, 即

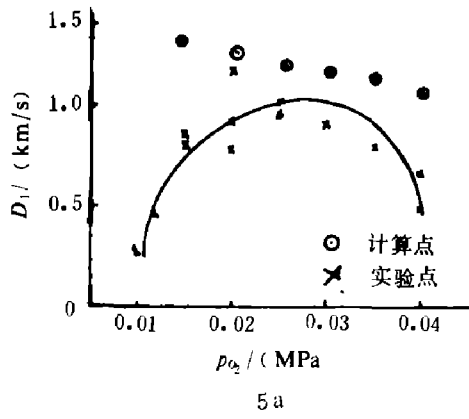


式中 ΔQ 为反应生成热。

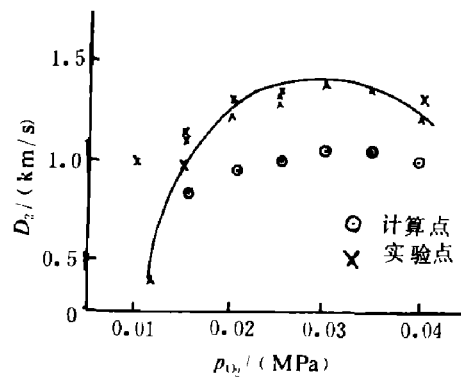
按方程(4.1)计算正庚烷化学反应当量浓度为8.3% (摩尔比), 即正庚烷与氧混合物中, 正庚烷的浓度为8.3%时, 正庚烷与氧完全反应完。按照我们的实验条件, 在 p_{O_2} 为0.03 MPa 时正庚烷的浓度为29%, 可见云雾爆轰化学当量浓度与按(4.1)式计算的化学当量浓度有一定差别, 其原因为尚未剥离出的正庚烷液滴还来不及参加反应, 但是在 D_1 测量区正庚烷的蒸汽浓度为11%, 它与8.3%十分接近。因此燃料必须完全汽化后参加反应方能反应完全。只有当它的液滴尺寸足够小^[1]时, 方能这样, 否则不能完全燃烧。

图6分别列出了压力计1、压力计2、压力计3测量得到的压力 p_1 , p_2 , p_3 和 p_{O_2} 的关系。图6表明, 随着氧初始压力的增加, p_1 , p_2 , p_3 也相应增加, 并且随着爆轰波传播距离的增加, 其压力也逐渐增加, 它说明了云雾爆轰传播时液滴在不断剥离成小颗粒, 汽化后参加反应。

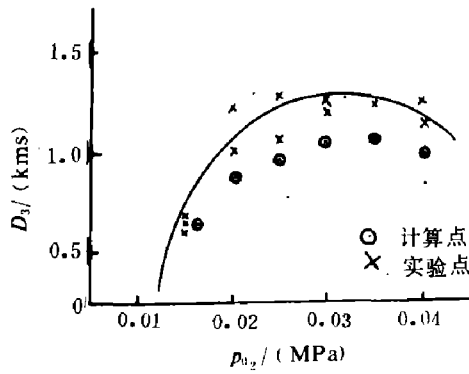
在每一发实验中都利用红外探测仪测量了正庚烷从爆燃转变成爆轰的延迟时间 t_{DDT} 及延



5 a



5 b

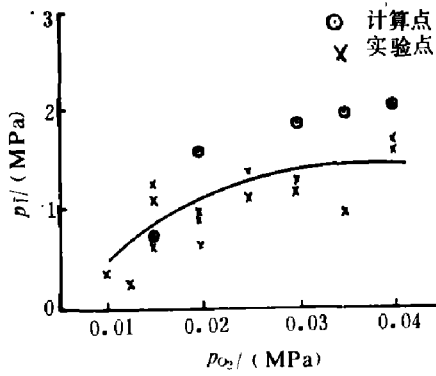


5 c

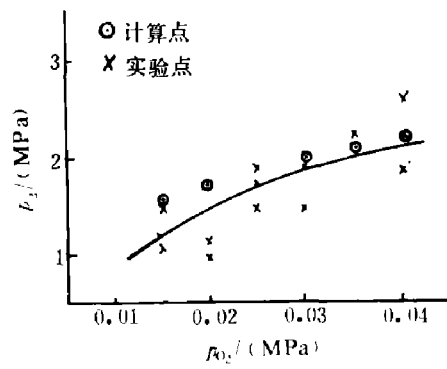
图5 正庚烷云雾爆燃转变成爆轰速度与 p_{02} 的关系

Fig.5 Relationship between the DDT velocity and p_{02} of heptan cloud

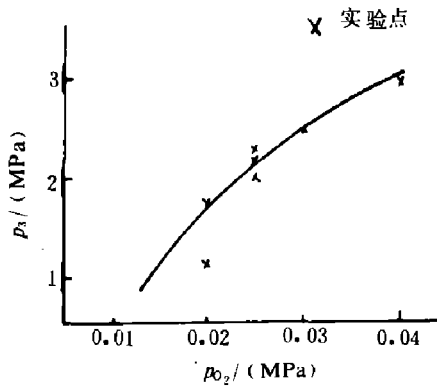
⊙ Calculated data
× Experimental data



6 a



6 b



6 c

图6 不同石英压力计测得压力与 p_{02} 的关系

Fig.6 Pressure versus p_{02} measured by piezoelectric gauges at different points

⊙ Calculated data
× Experimental data

迟距离 x_{DDT} , 其结果分别列于图 7 (a), (b)中。实验结果表明, t_{DDT} 与 p_{O_2} 的关系呈U形曲线, 在 $p_{O_2} \approx 0.03$ MPa 附近 t_{DDT} 达到极小, x_{DDT} 也达极小, 这个结果和 $D \sim p_{O_2}$ 的关系相吻合, 即在爆速 D 达极大时, t_{DDT} (或 x_{DDT}) 达极小, 这当然是可以理解的。

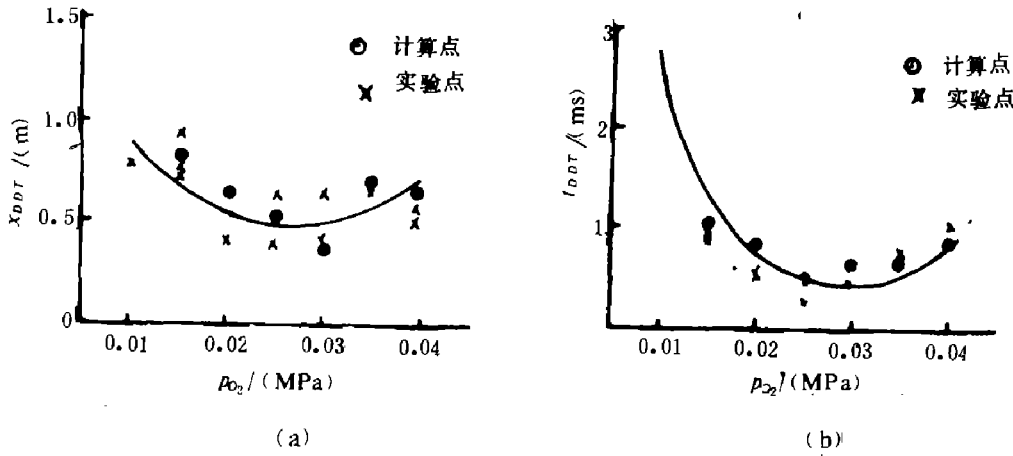


图7 正庚烷 x_{DDT} , t_{DDT} 与 p_{O_2} 的关系

Fig.7 x_{DDT} , t_{DDT} versus p_{O_2} of heptan

⊙ Calculated data × Experimental data

我们还利用烟膜技术观察了正庚烷云雾爆轰波阵面的结构, 它的胞格尺寸明显大于相同初始压力下的气相爆轰波的胞格尺寸, 但是其爆轰压力却比气相爆轰压力大五倍左右。图 8 的结果表明, 随着氧初始压力的增加, 胞格尺寸逐渐变小, 在 p_{O_2} 为 0.04 MPa 时, 其爆轰波胞格宽度仅为 1.5 mm 左右。从图 3 照片也可以看出, 爆轰波胞格尺寸是比较均匀的, 此结果也证明, 在激波管中所形成的正庚烷云雾是比较均匀的。

根据 Lee^[8]提出的爆轰核模型, 爆轰核 R^* 满足如下关系

$$R^* = 1.65 \lambda \tag{4.2}$$

式中 λ 为胞格宽度。此结果列于图 9 中。根据 Lee 的计算与实验都表明, 爆轰核的尺寸 R^* 近似为化学反应周期。按此观点, 正庚烷云雾爆轰的反应周期约为 0.3—1 cm (相应的 p_{O_2} 为 0.015—0.04 MPa)。特别有趣的是爆轰核尺寸和多头螺旋爆轰波胞格长度相联系 (即爆轰核尺寸近似等于爆轰波胞格长度 L)。Strehlow 等人^[9]发表的低爆炸压力下气相爆轰波胞格长度 L 与胞格宽度 λ 之比近似满足如下关系

$$L/\lambda \approx 1.61 \tag{4.3}$$

我们的大量实验结果^[10] (包括高爆轰压力) 表明, 它满足

$$L/\lambda \approx 1.33 \tag{4.4}$$

正庚烷云雾爆轰波胞格长度 L 与胞格宽度之比约为 1.36 (见图 10) 即

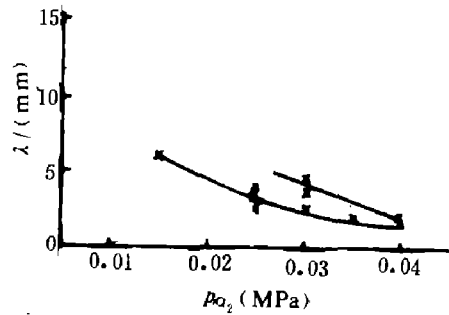


图8 波阵面结构胞格宽度 λ 与 p_{O_2} 的关系
Fig.8 Cell width λ versus p_{O_2} of the wave front structure.

$$L/\lambda \approx 1.36 \quad (4.5)$$

由此可见, 云雾爆轰波的胞格形状与气相爆轰波胞格形状相近。

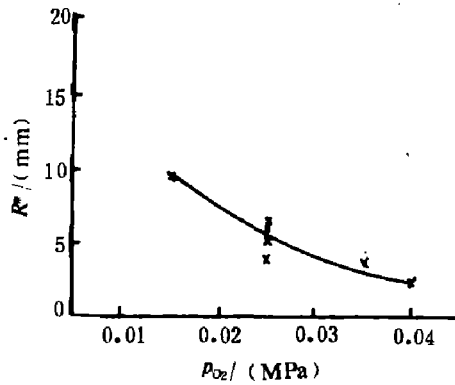


图9 爆轰核 R^* 与 p_{O_2} 的关系
Fig.9 Nucleus of detonation R^* versus p_{O_2}

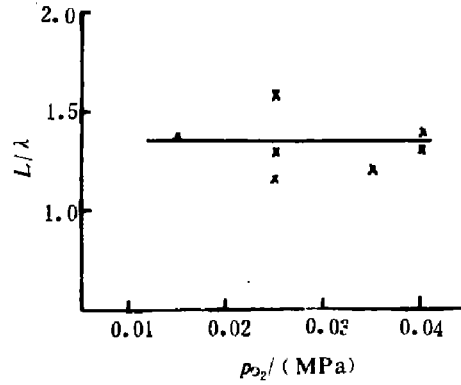
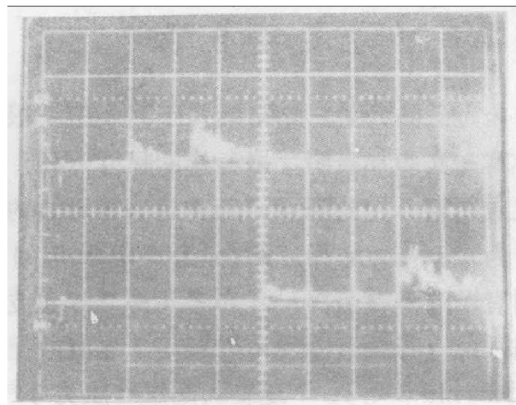
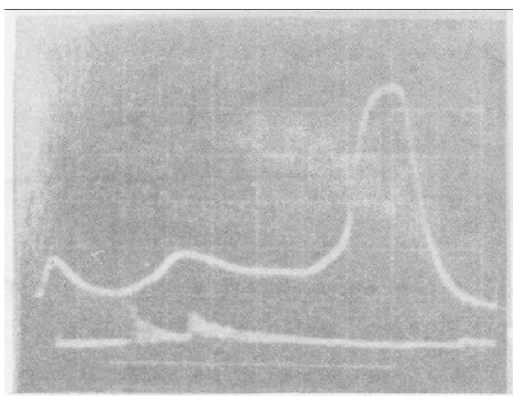


图10 胞格长度 L 和宽度 λ 之比与 p_{O_2} 的关系
Fig.10 Ratio of the cell length L to λ versus p_{O_2}

我们在正庚烷充入前分别充入0.005 MPa 或0.008 MPa 的氧, 该混合物中均不能形成传播的燃烧波, 此时在光学窗口观察不到爆炸光, 由石英压力传感器所测得的压力讯号也没有明显的压力跳跃。但是当充入氧气的压力增加到0.01 MPa 时有时出现爆轰, 有时就出现上述熄灭情况。故近似取它为正庚烷能产生爆轰的最小氧含量。如果在正庚烷中分别充入0.02 MPa 或0.03 MPa 的空气时, 都不能在混合物中形成传播的燃烧波, 在光学窗口也观察不到爆炸光。

当正庚烷充入激波管前氧气的压力为0.015 MPa 时, 爆轰波传播过程中出现了奇异现象 (见图11), 它明显不同于图2所示的结果。图2中的爆轰波阵面压力是逐渐增大并趋于



(a) 上扫描线: 灵敏度0.5 V/div, 扫程0.5 ms/div, 下扫描线: 灵敏度0.1 V/div, 扫程0.5 ms/div
(b) 灵敏度: 0.1 V/div, 扫程: 0.5 ms/div

图11 氧初始压力为0.015 MPa 正庚烷云雾爆轰波压力波剖面及点火延迟时间的测量结果

Fig.11 Records of the delay of initiation and the pressure profile of heptane cloud detonation under the condition that the initial pressure of oxygen was 0.015 MPa

稳定的。图11中的爆轰波传播到1.65 ms时, 爆轰波阵面的压力为1.13 MPa; 但是爆轰波传播到2.50 ms时, 其阵面压力衰减为0.38 MPa; 当爆轰波从激波管法兰盖反射后其阵面的压力又迅速增长到1.22 MPa。这是由于爆轰波的反射所引起的。

我们从红外探测器的结果(见图11(a)中的上扫描线)也可以看出, 它出现了三个尖峰。它比图2(a)中上扫描线多了一个尖峰。第三个尖峰的峰值电压为2.3 V, 而第二个尖峰的峰值电压仅为0.48 V。这第三个尖峰出现的时间正好和压力计测得的高峰值出现时间相一致。

为了验证上述现象的重复性, 进行了五发重复实验, 均出现了上述现象, 所以并不是偶然的。

2. 计算结果 用上面第三节的计算模型计算结果一并示于图5、6和7上, 用 \odot 表示计算点。和实验结果对比, $x_{DDT}-p_{O_2}$ 以及 $t_{DDT}-p_{O_2}$ 的图上可以看出实验和计算符合得很好。 $p-p_{O_2}$ 图上可以看出在0.8 m处基本符合, 2.35 m处符合得很好, 在3.35 m处照计算也应该和2.35 m处一样, 但实验结果压力升高很多, 可能是由于爆轰波在管子另一端反射的缘故。 $D-p_{O_2}$ 的结果则存在差距, 其原因可能是爆轰在这里是从不稳定到稳定的不定常过程, 而我们的模型为拟定常的, 计算过渡区, 只有待稳定后才能准确确定, 这从 $x_{DDT}-p_{O_2}$ 等的符合也可得到说明。

五、结论与讨论

我们在卧式激波管中初步研究了正庚烷云雾爆轰特性并进行了理论模拟计算, 初步结果表明用液滴剥离理论是可以解释实验结果的, 我们的实验测试技术是成功的, 但由于实际爆轰过程为不定常过程, 用拟定常模型去模拟是存在一定的差距, 所以还需要继续进行工作。

参 考 文 献

- [1] Tang Mingjun et al., *Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects*, Peking (1986), 202.
- [2] Ragland, K. W. et al., *Phys. Fluids*, 11 (11) (1968), 2377.
- [3] 胡 栋等, 汽油云雾燃烧特性, 爆轰特性的研究, 待发表.
- [4] 丁玉珍等, 利用红外探测仪测量 DDT的时间, 待发表.
- [5] 胡 栋等, 爆炸与冲击, 9 (3) (1989), 266.
- [6] 孙珠妹等, 高压物理学报, 3 (1) (1989), 78.
- [7] Dabora, E. K. et al., *Acta Astronautica*, 1 (1974), 361.
- [8] Lee, J. H., et al., *Combustion and Flame*, 27 (1976), 331.
- [9] Strehlow, R. A. et al., *Acta Astronautica*, 15 (1970), 345.
- [10] 胡 栋等, 第四届全国爆炸力学会议论文集 (1990), 待发表.

STUDIES OF THE DETONATION CHARACTERISTICS OF HEPTANE CLOUD

Hu Dong, Zhang Guanren*, Lin Qiwen*, Li Zhaoning,
Sun Zhumei, Ding Yuzheng

*(Institute of Applied Physics of Chengdu Science and
Technology University)*

**(Southwest Institute of Fluid Physics, CAEP)*

ABSTRACT In this paper, the detonation characteristics of heptane cloud are studied theoretically and experimentally. In the experiments, the ultra-violet technique, gauge technique and smoke film technique are adopted for the measurements of the delayed time t_{DDT} , velocity, pressure and wave front structure of the detonation. The model of chemical reaction of the heptane drop deflagration is suggested theoretically. The results of numerical modeling of the process of the detonation of the heptane cloud are in accord with that of the experiments approximately.

KEY WORDS heptane, cloud detonation, numerical modeling.