

文章编号: 1001-1455(2012)01-0108-05

液体燃料云雾爆轰参数实验^{*}

沈晓波^{1,2}, 鲁长波³, 李 斌², 解立峰²

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

3. 总后勤部油料研究所, 北京 102300)

摘要: 为深入了解液体燃料云雾爆轰机理, 借助自行设计和建造的立式爆轰管, 并采用升降法和烟迹技术, 对环氧丙烷等液体燃料云雾爆轰参数(爆速、爆压、临界起爆能和爆轰胞格尺寸)与当量比的关系进行了实验研究。结果表明, 环氧丙烷的爆速和爆压随当量比的增加先增大后平缓减小; 碳氢液体燃料云雾爆轰的临界起爆能与当量比呈“U”型关系, 最佳值点偏向富燃料一侧; 临界起爆能的大小与燃料的分子结构和挥发性有密切关系, IPN 和 PO 临界起爆能相当, 而烷烃类临界起爆能均较大。环氧丙烷在 25 和 50 °C 时的爆轰胞格宽度与当量比皆呈“U”型关系, 最小值点偏向富燃料一侧; 气相爆轰胞格宽度比云雾爆轰略小。常温下环氧丙烷云雾爆轰主要由气相反应所控制。

关键词: 爆炸力学; 云雾爆轰参数; 升降法; 液体燃料; 烟迹技术

中图分类号: O384

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

液体燃料的云雾爆炸在石油、化工、塑料和橡胶等工业生产中频繁发生, 迫切需要对它的爆炸机理进行系统、深入的理论和实验研究。爆速、爆压、临界起爆能以及爆轰胞格尺寸是可燃液体云雾爆轰的重要参数, 反映了爆轰强度、敏感度等特性。

D. C. Bull 等^[1]在 76 mm×38 mm 的方形管中利用烟迹技术测得了氢气、乙炔、乙烯等燃料的爆轰胞格尺寸, 认为胞格尺寸与反应动力学活性一致, 且随着初始压力的增大而减小; J. Papavassiliou 等^[2]研究得到, 在加热激波管(100 和 185 °C)中, 0.5 μm 液态癸烷云雾爆轰胞格尺寸与纯气相相似, 而常温下癸烷云雾爆轰胞格宽度为 78 mm, 为气相爆轰时的约 2 倍, 表明两相爆轰波的传播机理与纯气相爆轰的传播机理不一样; M. J. Tang 等^[3]在截面 41.3 mm×41.3 mm、长 8.2 m 的立式激波管中, 用氢、氧爆轰所产生的爆炸波直接起爆液滴直径为 400 μm 的癸烷-空气的混合物。当管中充满癸烷云雾时, 用爆炸波传播速度计算出的有效起爆能仅为起爆能中总化学能的 50% 左右。环境温度的升高和在燃料中加入敏化剂都会使临界起爆能降低, 同时拓宽燃料的爆轰极限。

本文中, 主要测定环氧丙烷(PO)、硝酸异丙酯(IPN)、C5~C6 烷烃 3 类燃料液雾的爆轰特性, 分析当量比、敏化剂等对爆轰特性的影响规律; 讨论环氧丙烷分别在 25 和 50 °C 时爆轰胞格尺寸的变化规律, 探究环氧丙烷的云雾爆轰机制。

1 实验设备和方法

1.1 实验设备

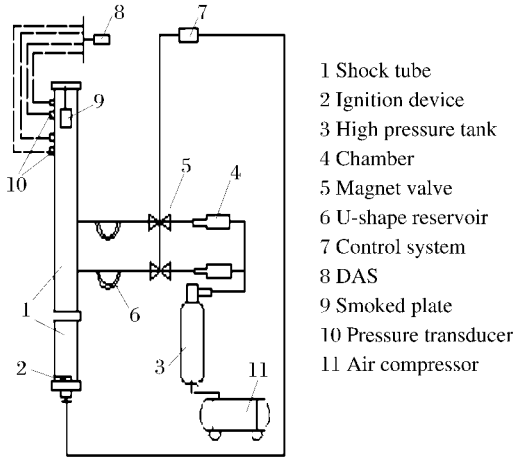
采用自行设计与建造的实验室规模的装置——立式爆轰管实验系统进行云雾爆轰的研究, 结构如图 1 所示。实验装置由激波管主体、进气喷雾系统、控制系统、测试系统以及点火系统组成。各子系统详细构造及工作原理可参见文献[4]。

* 收稿日期: 2010-06-26; 修回日期: 2011-11-01

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金项目(10676120);

爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(KFJJ07-01)

作者简介: 沈晓波(1986—), 男, 硕士研究生。



- 1 Shock tube
- 2 Ignition device
- 3 High pressure tank
- 4 Chamber
- 5 Magnet valve
- 6 U-shape reservoir
- 7 Control system
- 8 DAS
- 9 Smoked plate
- 10 Pressure transducer
- 11 Air compressor



图 1(a) 立式爆轰管系统示意图

Fig. 1(a) Schematic of vertical shock tube

图 1(b) 立式爆轰管系统实物图

Fig. 1(b) Picture of vertical shock tube

1.2 实验方法

根据升降法和对折实验法原理,测定燃料云雾爆轰直接起爆的临界起爆能。初始压力为 101.3 kPa,初始温度为 298.15 K。

爆轰胞格结构一般采用烟迹记录。选用铝板作为加工烟熏板的材料,形状设计为半圆环形。在距底端 3 和 3.5 m 的位置放置 2 块烟熏板^[5]。实验的初始压力为 101.3 kPa,初始温度为 298.15 和 323.15 K。

2 实验结果与讨论

2.1 环氧丙烷的爆速和爆压

爆压、爆速随环氧丙烷燃料与空气混合物的当量比的变化关系分别如图 2 所示。

由图 2 可以看出,PO 的爆速、爆压随当量比的增加先增大后平缓减小,在 $\varphi=1.2$ 附近,爆速和爆压达到最大值,在相当大的范围($\varphi=1\sim 1.4$),爆压和爆速在一个较窄的范围变化(0.99~1.02 MPa, 1.650~1.885 km/s)。由此可以判断,PO 云雾爆轰的范围较宽,在较大的浓度范围,爆速和爆压都较高,破坏能力较强。

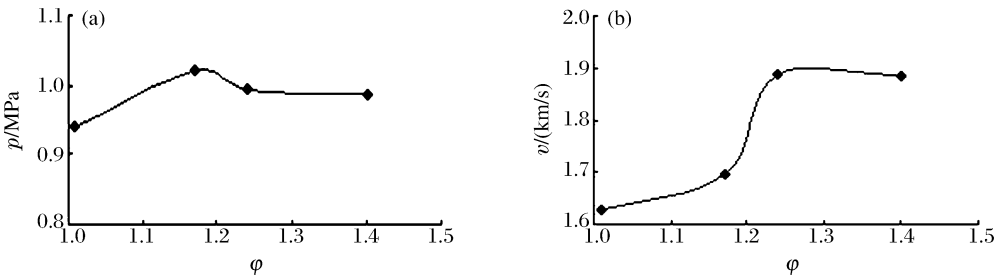


图 2 环氧丙烷的爆压和爆速($p_0=50$ kPa, $T_0=293.15$ K, $E=380$ kJ)

Fig. 2 Detonation pressure and velocity for PO cloud

2.2 直接引发液雾爆轰的临界起爆能

2.2.1 当量比对液雾临界起爆能的影响

图 3 列出了环氧丙烷、IPN 和 C5~C6 烷烃 3 种液雾的临界起爆能与当量比的关系。从图 3(a)可以看出,当 PO 当量比处于 0.94~1.38 范围时,PO 燃料爆轰的临界起爆能变化不大,表现为“U”型曲线底部较宽。由图 3(b)~3(c),相比 PO、IPN 和 C5~C6 烷烃的临界起爆能曲线底部较窄,曲线形状更

接近“V”型。这说明 PO 燃料云雾的爆炸感度更高,当形成细小的云雾时,由于 PO 较强的挥发性,云雾中存在较浓的 PO 蒸气,化学反应由气相控制。当量比为 1.05 时,PO 云雾临界起爆能最低。由图3(d)可以更直观地看出,在当量比 $\varphi=1\sim 1.5$ 的范围内,PO 的临界起爆能最低,爆轰感度最大,但是当 φ 大于 1.5 或小于 1 时,临界起爆能急剧上升,甚至会超过 IPN 和 C5~C6 烷烃的。

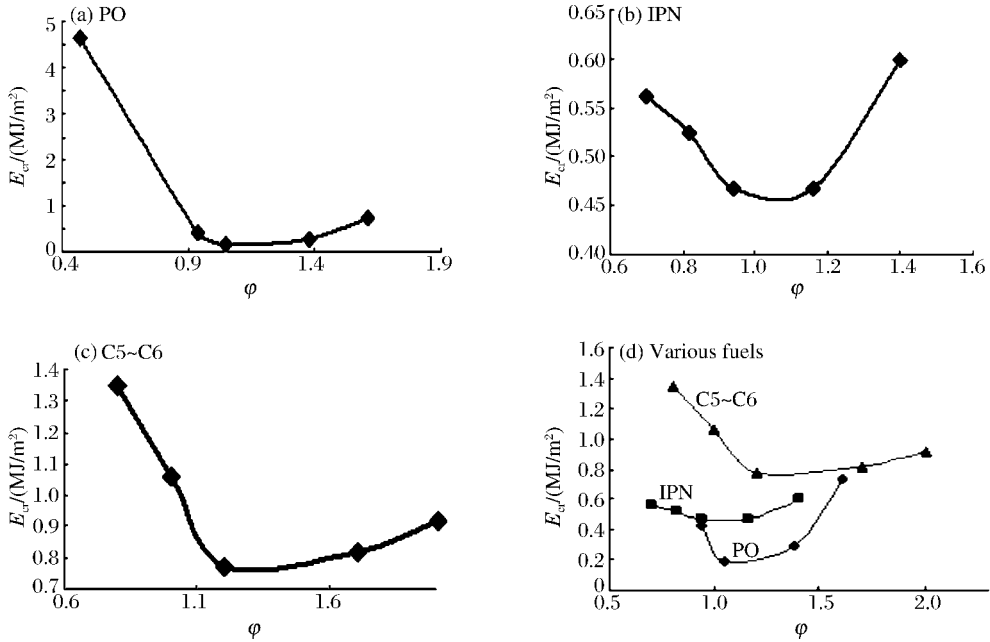


图3 临界起爆能

Fig. 3 Critical initiation energy

2.2.2 不同燃料云雾爆轰的最小临界起爆能

实验还测定了己烷、庚烷云雾爆轰的最小临界起爆能。实验结果如表 1 所示,表中 T_b 为沸点。

由表 1 可以看出,PO 的最小临界起爆能最低,而 C5~C6、己烷和庚烷的最小临界起爆能都比较高。原因是他们大多是饱和烷烃,碳原子以单键结合,反应活性较低,而随着分子量的增大,沸点也会相应升高,爆轰反应更趋近于多相而不是敏感度较高的气相反应。

IPN 的最小临界起爆能仅次于环氧丙烷,但因沸点较高,分子量也很大,可见物理因素并非此现象的原因。而是它的分子结构中的 $-O-NO_2$ 致爆基团对丙烷分子的敏化作用,使得分子能量及敏感度都有所提高。

2.3 环氧丙烷云雾爆轰的胞格结构

爆轰胞格尺寸是云雾爆轰的一个重要参数,且与临界起爆能、临界直径等感度参数有关^[6-9]。环氧丙烷的胞格宽度见表 2、图 4,其中 λ_{50} 、 λ_{25} 分别为 50、25 °C 时的胞格宽度, $\Delta\lambda = \lambda_{25} - \lambda_{50}$ 。由表 2 和图 4 可得,在 25 和 50 °C 时,PO 的胞格尺寸与当量比呈“U”型曲线关系。即随着当量比的增加,胞格尺寸先减小后增大,在 $\varphi=1.15$ 附近,胞格尺寸达到最小。且在该点右侧,胞格尺寸随当量比变化趋于平缓,而在其左侧,变化趋势较为明显。原因是当浓度较大时,爆轰管中氧气量不足,反应不能完全,多余的燃料液体和蒸气对爆轰反应起到一定的抑制作用,因此胞格尺寸在多种因素的耦合影响下,变化规律表现得并不明显。胞格尺寸的最小值出现在 $\varphi=1.2$ 附近,即偏富燃料一侧。这与文献[5]一致。

表 1 不同燃料云雾的临界起爆能

Table 1 Critical initiation energy of various fuel clouds

燃料	$T_b/^\circ\text{C}$	φ	$E_{cr}/(\text{MJ}/\text{m}^2)$
PO + 空气	34.1	1.05	0.19
C5~C6 + 空气	—	1.20	0.77
IPN + 空气	101.5	1.16	0.47
Hexane + 空气	80.7	1.15	0.75
Heptane + 空气	98.4	1.15	1.12

表 2 环氧丙烷胞格宽度
Table 2 Cell widths of PO cloud

φ	λ_{50}/mm	λ_{25}/mm	$\Delta\lambda/\text{mm}$	$\lambda_{25}/\lambda_{50}$
0.67	35.61	—	—	—
0.91	25.78	32.65	6.87	1.27
1.05	21.71	28.56	6.85	1.32
1.15	19.57	27.94	8.37	1.43
1.28	24.67	32.17	7.50	1.30
1.68	26.55	34.84	8.29	1.31

注：—表示实验数据误差过大而舍弃的值。

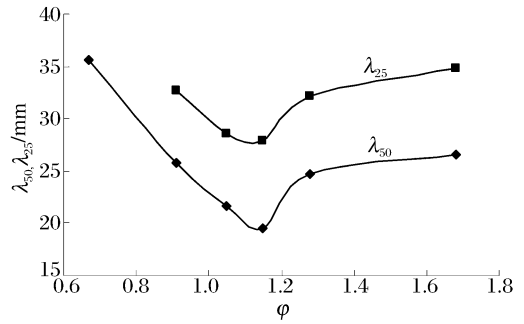


图 4 环氧丙烷胞格宽度

Fig. 4 Cell widths of PO cloud

常温下环氧丙烷的爆轰胞格宽度大于 50 °C 时的值，各当量比下两个温度的对应宽度值之差 $\Delta\lambda$ 在 7.5 mm 左右，从图 4 上所反映出来的就是两曲线相似，只是相对横轴移动了一定距离。胞格宽度可以反应混合物起爆感度的大小，环氧丙烷的沸点是 34 °C。50 °C 初始温度实验条件下，环氧丙烷在点火前基本上都变成蒸气，所以实验结果表明环氧丙烷蒸气更容易起爆，爆轰反应更完全，释放的能量更大。而在常温情况下，环氧丙烷燃料以气液两相存在，爆轰过程更为复杂，起爆感度有所降低。

但在两个温度下环氧丙烷的胞格宽度值相差并不大， $\lambda_{25}/\lambda_{50}$ 在 1.3~1.4。根据经验公式 $\lambda = Al$ (A 为比例系数)可知，燃料的胞格尺寸 λ 与爆轰的化学反应诱导区长度 l 有关。对于云雾两相爆轰，起爆过程包括燃料液滴在激波阵面后的剥离、变形、破碎和雾化等复杂的物理变化以及随后的气相化学反应诱导期，因而总诱导期比气相爆轰的诱导期长很多。所以同一种燃料在同当量比下，气相爆轰的胞格要小于两相爆轰。对于液态的 PO，它的挥发性较强，在常温下饱和蒸气压高，激波阵面到达以前，系统中就有相当高浓度的 PO 蒸气存在，总体上就已经比较接近气相爆轰。姚干兵等^[5]曾对不同温度下环氧丙烷($\varphi=1.15$)的爆轰胞格进行研究，得到 25 和 45 °C 时胞格长宽比 l/λ 分别为 1.51 和 1.59，与 R. A. Strehlow^[10-11]提出的气相爆轰的胞格长宽比 1.6 比较相近。综上可判断环氧丙烷的爆轰机制由气相控制。

3 结 论

(1) 环氧丙烷的爆压和爆速随当量比的增加呈现先增大后平缓减小的规律，且在 $\varphi=1.2$ 附近达到最大值，分别为 1.02 MPa 和 1.886 km/s。

(2) 对于同种燃料，直接爆轰临界起爆能与当量比呈“U”型曲线关系，最佳浓度偏向富燃料一侧。临界起爆能大小与燃料分子结构和挥发性有密切关系，IPN、PO 临界起爆能相当；而烷烃均较大。

(3) 不同初始温度条件下，环氧丙烷爆轰胞格宽度与当量比呈“U”型曲线关系，最小值点偏向富燃料一侧。环氧丙烷在 50 °C 时的胞格宽度略小于 25 °C 时的，且两者变化规律相似。常温时 PO 云雾爆轰主要由气相反应所控制。

参考文献：

[1] Bull D C, Elsworth J E, Shuff P J, et al. Detonation cell structure in fuel-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 1982,45:7-22.

[2] Papavassiliou J, Makris A, Knystautas R, et al. Measurements of cellular structure in spray detonation[C]// Kuhl A L, Leyer J C, Borisov A A, et al. Dynamic Aspects of Explosion Phenomena. USA: AIAA, 1993:148-169.

[3] Tang M J, Nicholls J A, Sichel M, et al. The direct initiation of detonation in decane-air and decane-oxygen spray [R]. Report No UM-018404-1, 1984.

[4] 解立峰. 云雾爆轰测试系统设计和云雾爆轰特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2000.

- [5] 姚干兵,解立峰,刘家聰. 立式激波管内云雾爆轰胞格尺寸的测定与分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 312-318.
YAO Gan-bing, XIE Li-feng, LIU Jia-cong. Measurement and analysis of cell size caused by fuel-air detonation in a vertical shock tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(4): 312-318.
- [6] Stamps D W, Slezak S E, Tieszen S R. Observations of the cellular structure of fuel-air detonations[J]. Combustion and Flame, 2006, 144: 289-298.
- [7] Tieszen S R, Stamps D W, Westbrook C K, et al. Gaseous hydrocarbon-air detonations[J]. Combustion and Flame, 1991, 84: 376-390.
- [8] Tarver C M. Chemical energy release in the cellular structure of gaseous detonation waves[J]. Combustion and Flame, 1982, 46: 135-156.
- [9] Lee J H. The link between cell size, critical tube diameter, initiation energy and detonability limits[J]. Combustion and Flame, 1976, 26: 27-33.
- [10] Strehlow R A. The nature of transverse waves in detonations[J]. Astronaut Acta, 1969, 14(5): 539-548.
- [11] Strehlow R A. Transverse waves in detonations II: Structure and spacing in H_2-O_2 , $C_2H_2-O_2$, $C_2H_4-O_2$ and CH_4-O_2 systems[J]. AIAA Journal, 1969, 7(3): 492-496.

An experimental study of detonation parameters of liquid fuel drops cloud*

SHEN Xiao-bo^{1,2}, LU Chang-bo³, LI Bin², XIE Li-feng²

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

3. Beijing POL Research Institute, Beijing 102300, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of liquid fuel cloud detonation, the up-and-down method and soot trace technique were used to study the relationship between the cloud detonation parameters (velocity, pressure, critical initiation energy and cell width) and equivalence ratio experimentally with a vertical shock tube. Results indicated that the detonation pressure and detonation velocity of propylene oxide (PO) increased and then decreased smoothly with the rising of equivalence ratio. The critical initiation energy that directly initiated the detonation of hydrocarbon liquid fuel cloud showed a U-shaped curve relation with the variation of equivalence ratios. The optimum concentration was found on the side where the equivalence ratio is over 1. The critical initiation energy was also found closely related to molecular structure and volatility of fuels. IPN and PO had similar critical values and those of alkanes were all larger. Detonation cell sizes of PO at both 25 °C and 50 °C showed a U-shaped curve. The minimal cell width also lied on the side of rich-fuel ($\varphi > 1$). The detonation reaction of PO at normal temperature is controlled by gas-phase reaction.

Key words: mechanics of explosion; cloud detonation parameter; up-and-down method; liquid fuel; soot trace technique

* Received 26 June 2010; Revised 1 November 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10676120)

Corresponding author: XIE Li-feng, xielifeng319@sina.com