文章编号：1000-5773(2007)01-0077-06

激波管内燃料两相云雾爆轰的实验研究*

姚干兵[1,2]，解立峰[1]，刘家骢[1]

(1. 南京理工大学化工学院，江苏南京 210094；
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081)

摘要：在立式激波管中采用压力传感器和烟迹技术实测了 6 种碳氢燃料(环氧丙烷、硝酸异丙酯、C_5～C_6、己烷、庚烷和癸烷)与空气混合物的临界起爆能和爆轰波胞格尺寸。结果表明，燃料气液两相云雾爆轰的临界起爆能与当量比呈“U”形曲线关系，并且最敏感的起爆点在富燃料一侧，这与气相爆轰结论是一致的；由三波点运动的烟迹记录结果分析得出，雾滴的碎解、蒸发汽化过程以及燃烧区前导是控制气液两相云雾爆轰的作用机制。

关键词：燃料；气云；临界起爆能；胞格尺寸
中图分类号：O381 **文献标识码**：A

1 引 言

碳氢燃料的爆轰性能一直是人们感兴趣的课题。它不仅涉及到工业安全，而且还具有军事应用价值。从工业角度来看，研究燃料气云爆轰是为了预防、减缓和控制爆炸灾害的发生；而军事目的则是为了提高杀伤力和对目标的破坏。但就燃料气云爆轰特性这一点，两者的研究是殊途同归的。本工作以常温常压下为液态的碳氢作为燃料，在立式激波管中对燃料云雾爆轰特性进行了大量的实验研究，实测了环氧丙烷、硝酸异丙酯、C_5～C_6、己烷、庚烷和癸烷等 6 种燃料云雾的临界起爆能和爆轰波胞格参数。

2 实 验

2.1 实验装置

实验在高 5.4 m、内径 200 mm 的立式激波管中进行，整套装置由激波管本体、喷雾系统、控制系统、测试系统、点火系统等几部分组成，其装置结构如图 1 所示。激波管主管体两侧交错地布置了喷雾系统。喷雾系统由高压气瓶、气室、电磁阀、储液管、喷雾室、喷头和控制系统控制组成。电磁阀开启后，贮存在气室里的高压气流通过电磁阀进入喷雾室，使“U”形储液管中的燃料通过喷嘴成雾状喷出。喷头为空心半球，其表面均布有 119 个直径为 1 mm 的小孔，以保证在扇形喷雾范围的分布基本均

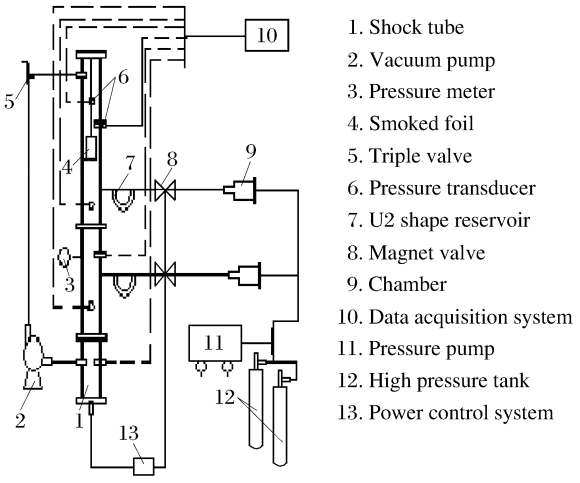


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

* **收稿日期**：2006-02-27；**修回日期**：2006-08-07
基金项目：国家重点实验室基金(KFJJ04-4)
作者简介：姚干兵(1970—)，男，博士，工程师，主要从事多相爆轰理论、工业爆炸灾害防治的研究. E-mail：yaogao11@163.com
通讯作者：解立峰(1965—)，男，副教授，主要从事多相爆轰理论、爆炸测试技术的研究. E-mail：xielifeng319@sina.com

匀。多套喷雾系统同时喷射,从而在管体内形成较均匀的液雾。

测试系统由 Kistler 压电式石英传感器、STY 低噪声电缆、电荷放大器、瞬态波存仪、微机及控制系统组成。当爆炸波或冲击波传到压电传感器时,传感器将压力信号转为电荷信号,再经电荷放大器或适配器转换为相应的电压信号,再经由数据采集系统采集储存,通过计算机对数据进行分析处理,可得到相应的压力随时间的变化曲线,以及与压力有关的一些参数。点火系统由点火元件、起爆装置及控制系统组成。而控制系统则用来控制电磁阀的开启时间及次序、起爆延迟、采集器的触发、起爆线路的通短检查、系统安全联动。

2.2 实验方法

压力传感器沿激波管轴线方向等间距分布(第一个传感器距起爆点 1.0 m),烟熏板紧贴于激波管内表面,从而保证不改变管内云雾爆轰流场。根据升降法原理和对折方法,来测定燃料云雾爆轰直接起爆的临界起爆能。即首先确定两个起爆能量,一个能实现稳定爆轰,另一个则不能实现爆轰。然后取这两个能量的平均值作为下一次实验的起爆能量,若爆轰则取此起爆能量与不能实现爆轰的起爆能的平均值作为下一步实验的起爆能量;若不爆轰则取此起爆能量与能实现爆轰的起爆能的平均值作为下一步实验的起爆能量。重复上面的过程,直到两次起爆的起爆能量重合或达到实验规定的精度要求(小于 0.1 g)为止。云雾是否形成稳定爆轰的判据是压力时间曲线和速度时间曲线,即传感器测到的压力和速度与现有文献有关云雾爆轰特征参数相当,并且这些参数随时间不发生明显改变。

实验时,首先检查气密性,然后把一定量的燃料注入到"U"型储液管中,装好引爆装置,并封闭激波管;接着开启真空泵抽真空,直至达到所需要的真空度,同时开启压缩空气瓶阀门,用高压空气预先充满气室;接着调节好电源控制系统和数据采集系统,通过电源控制系统打开电磁阀,从气室出来的高压空气把储存在"U"型储液管的燃料通过半球形喷头喷入激波管中,在与激波管中的空气预混 1 s 后,通过电源控制系统引爆起爆装置,起爆燃料-空气混合物,形成稳定传播的爆轰波。用数据采集系统记录压力随时间的变化曲线。通过分析压力时间曲线可以得到燃料的爆轰参数。起爆能量由 8# 工业电雷管加塑性炸药组成。初始压力为 101.3 kPa,初始温度 298.15 K。

3 结果与分析

3.1 临界起爆能

3.1.1 不同燃料云雾爆轰临界起爆能

在立式激波管中实验测定的几种燃料云雾爆轰的临界起爆能(E_c)结果见图 2。

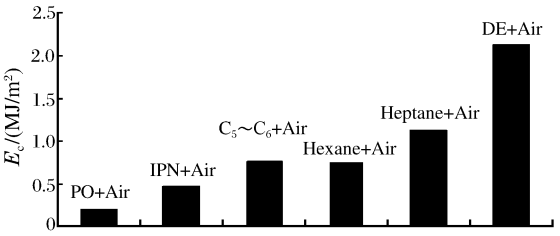


图 2 不同燃料与空气混合物的临界起爆能

Fig. 2 Critical initiation energy of different fuel-air mixtures

从图 2 可以看出,环氧丙烷(PO)-空气混合物爆轰的临界起爆能比较小。因为 PO 在常温下的饱和蒸气压较高,挥发性较强,在激波阵面到达以前,系统中就有相当高浓度的燃料蒸气存在,当燃料蒸气浓度高于某个极限值时,整个过程就由气相反应所控制,容易起爆,感度比较高。

同类型燃料己烷、C_5～C_6、庚烷、癸烷(DE)的沸点比较高且呈递增趋势,在常温下与空气形成的云雾直接起爆的临界起爆能也呈递增趋势。这一混合体系中燃料基本以液滴形式存在,蒸气浓度比较低,其起爆过程包括燃料液滴在激波阵面后的迅速剥离、破碎和汽化,以及随后的气相化学反应诱导期。包含这些诸多物理和化学过程的总诱导期比气相爆轰的诱导期长很多[1]。从直接起爆的临界条件考虑,存在一个总诱导期的临界值,超过这一临界值,化学反应区中释放的能量就不能支持前导激波。同时,在这一诱导期内,还必须维持燃料浓度高于最低的有效化学当量。这说明燃料挥发性在云雾爆轰过程中起重要作用。

硝酸异丙酯(IPN)的沸点明显高于己烷,也高于庚烷,但它的临界起爆能却比己烷和庚烷低得多。

这与燃料的分子结构有关。众所周知,烃类爆轰氧化过程一般是按退化支化链式反应机理进行的[2],感应期长,较为钝感。烃类分解反应的活化能约为 37～65 kJ/mol,而硝酸酯的分解活化能约为 15～19 kJ/mol,显然烃类的活化能比硝酸酯要高 2～3 倍[3]。硝酸异丙酯的酯基键容易断裂,分解反应较己烷、庚烷等烃类容易进行。另外,硝酸异丙酯和己烷两种燃料的 C80 热分析数据也表明,硝酸异丙酯在 413.15～503.15 K 范围内出现了比较明显的放热峰,而己烷在 298.15～573.15 K 之间未出现放热峰[4]。这也说明－O－NO_2 官能团的存在,使得硝酸异丙酯的分解反应较己烷易于进行。

3.1.2　同一燃料在不同当量比下的临界起爆能

对于同一种燃料,当它以不同当量比与空气混合形成云雾时,直接起爆所需的能量也会不同。实验测定了几种燃料在不同当量比(Φ)时的临界起爆能(E_c),其结果列于表 1～表 4、图 3～图 6。

表 1　PO-空气的 E_c 随 Φ 变化

Table 1　Critical initiation energy for PO-air mixtures at different equivalence ratios

Φ	E_c/(MJ/m^2)
0.47	4.66
0.94	0.42
1.05	0.19
1.15	0.19
1.38	0.19
1.47	0.29
1.61	0.73

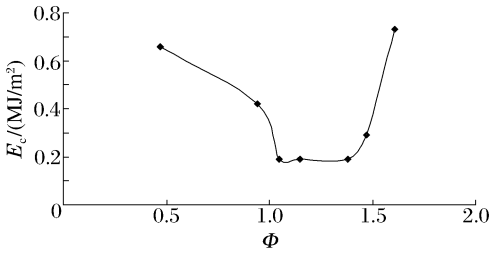


图 3　PO-空气的 E_c 随 Φ 变化曲线

Fig. 3　Critical initiation energy vs. equivalence ratios for PO-air mixtures

表 2　硝酸异丙酯(IPN)-空气的 E_c 随 Φ 变化

Table 2　Critical initiation energy for IPN-air mixtures at different equivalence ratios

Φ	E_c/(MJ/m^2)
0.70	0.56
0.82	0.52
0.94	0.47
1.16	0.47
1.40	0.59
1.60	0.84

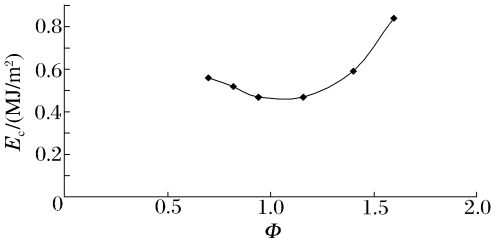


图 4　IPN-空气的 E_c 随 Φ 变化曲线

Fig. 4　Critical initiation energy vs. equivalence ratios for IPN-air mixtures

表 3　C_5～C_6-空气的 E_c 随 Φ 变化

Table 3　Critical initiation energy for C_5～C_6-air mixtures at different equivalence ratios

Φ	E_c/(MJ/m^2)
0.69	1.51
0.81	1.35
1.03	1.06
1.15	0.77
1.38	0.82
1.84	1.12

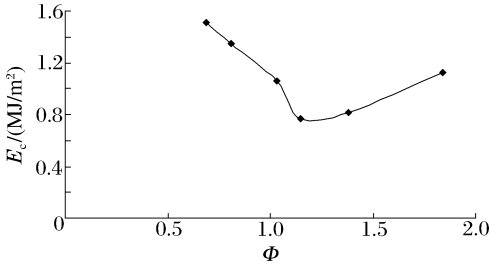


图 5　C_5～C_6-空气的 E_c 随 Φ 变化曲线

Fig. 5　Critical initiation energy vs. equivalence ratios for C_5～C_6-air mixtures

表 4 癸烷(DE)-空气的 E_c 随 Φ 变化

Table 4 Critical initiation energy for DE-air mixtures at different equivalence ratios

Φ	E_c/(MJ/m^2)
0.73	2.35
1.01	2.14
1.12	2.12
1.25	2.24
1.88	2.43

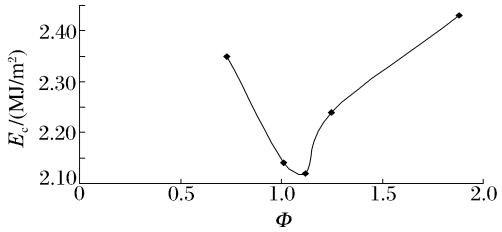


图 6 癸烷(DE)-空气的 E_c 随 Φ 变化曲线

Fig. 6 Critical initiation energy vs. equivalence ratios for DE-air mixtures

从表 1～表 4 和图 3～图 6 中可以看出,PO、IPN、C_5～C_6 和癸烷等几种燃料与空气混合后形成的非均相云雾的临界起爆能与当量比呈"U"型曲线关系,这表明燃料空气混合物发生云雾爆轰反应存在一最佳浓度,此时反应释放出来维持爆轰波传播的能量最大,且在此浓度下最敏感。但这几种燃料的最小临界起爆能点并非在等当量比处,而是稍高于它。其一是由于气液两相云雾与气相云雾不同,液滴是有大小的(其大小分布也并非是绝对均匀的),存在液滴的破碎雾化过程,有少部分燃料未参与爆轰反应或反应不完全;其二是,激波管管壁有吸附作用,使得部分燃料粘附在管壁上,尽管有薄膜爆轰效应存在,还是有很少量的燃料没有参与爆轰反应。而在计算当量比时则是按照燃料完全反应来求算的,因此理论上的等当量情况在实验中就大于 1,本工作实验中几种燃料的当量比在 1.1～1.2 之间。

3.1.3 与前人研究成果的比较

M. J. Tang 等人[5]在长 8.2 m、截面为 4.13 cm×4.13 cm 激波管中进行了癸烷-空气(当量比为 1.20)云雾爆轰实验,其临界起爆能为 9.33 MJ/m^2,比本工作的实验结果高很多。分析认为,M. J. Tang 等人的实验装置的截面宽度为 41.3 mm、截面积为 1 705.7 mm^2,而本工作的实验装置的内径为 200 mm、截面积为 31 400 mm^2,两种实验装置存在明显差异,因而在激波管中用起爆源的总能量来表示临界起爆能是不够准确的,因为只有一部分起爆源能量传递给被起爆的可燃混合物,因此用有效起爆能来描述更为恰当。采用 Borisov 等人[6]提出的有效起爆能公式进行计算,得到的结果见表 5。从计算结果来看,两实验的有效起爆能基本一致。这表明装置结构尺寸对实验结果有较大的影响。

表 5 癸烷-空气混合物的起爆能

Table 5 Initiation energy for DE-air mixtures

Φ	E_c/(MJ/m^2)	E_{eff}/(MJ/m^2)
1.12	2.12	0.785
1.25	2.24	0.831
1.88	2.43	0.902
1.20	9.23[5]	0.827
1.75	11.31[5]	0.893

3.2 燃料云雾爆轰波胞格结构

一般来说,胞格尺寸越小,该混合物的爆轰敏感度越高,越易形成爆轰。本工作对常温常压为液态的几种燃料气云爆轰波胞格参数进行了测定,其数据见表 6。

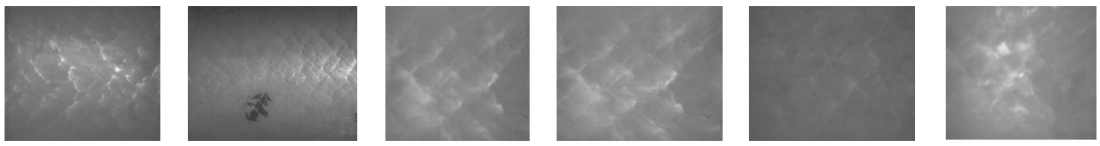
从表 6 中的数据可以看出:在当量比相同的条件下,己烷、C_5～C_6、庚烷、癸烷的胞格尺寸依次增加,它们的胞格尺寸大于 IPN 和环氧丙烷,而 IPN 的胞格尺寸又大于环氧丙烷。Strehlow 等人发现,气相爆轰波胞格的长宽比(胞格长度 L 与胞格宽度 λ 之比)近似等于 1.6。环氧丙烷的沸点比较低,形成的云雾接近于气相,其云雾爆轰机制主要由气相控制。环氧丙烷胞格的长宽比为 1.51,接近 1.6,这一结果证实了环氧丙烷的云雾爆轰接近气相爆轰。己烷、C_5～C_6、庚烷等燃料的沸点比环氧丙烷高,其胞

格的 L/λ 已经偏离了 1.6,其云雾爆轰机制由气相控制为主向气液两相爆轰过渡。这几种燃料由于其蒸气压比较高,在液滴破碎之前系统中就存在足以达到爆炸条件的燃料蒸气,因而有气相爆轰区作为液滴破碎和燃烧区域的前导,这样就造成这些燃料的云雾爆轰具有与气相爆轰相似之处,具有气相云雾爆轰与气液两相云雾爆轰的混合性质。而癸烷-空气混合物胞格的长宽比为 1.17,则远偏离了 1.61。因为在常温常压下,癸烷是一种难以挥发的燃料,癸烷液滴在受到冲击波作用时,首先发生液滴的剥离碎解,变成更小的液滴并挥发后才发生化学反应,所以液滴的碎解过程是控制反应速率的主要步骤,这种情况就是气液两相云雾爆轰。对 IPN 而言,由于其有—O—NO_2 官能团的作用,与以上几种燃料的作用机制有所不同,饱和蒸气压已不再是主要因素。据此,在工作本实验中环氧丙烷的爆轰敏感度最高,IPN 次之,而烷烃类燃料的爆轰敏感度较低。这与同当量比时采用临界起爆能的数据来判断的结果是完全一致的。根据胞格尺寸数据来判断,这几种燃料中环氧丙烷的爆轰敏感度最高,IPN 次之,而烷烃类燃料的爆轰敏感度较低。与同当量比时采用临界起爆能的数据来判断的结果是完全一致的。图 7 为燃料空气混合物爆轰波胞格结构的烟迹记录。

表 6　不同燃料空气混合物胞格尺寸的比较

Table 6　Comparison among cell sizes for different fuel compositions($p_0=101.3$ kPa; $T_0=298.15$ K)

Fuel compositions	Φ	λ/(mm)	L/(mm)	L/λ
PO+Air	1.15	6.1	9.2	1.51
IPN+Air	1.17	8.2	10.1	1.23
Hexane+Air	1.16	11.2	16.7	1.41
$C_5\sim C_6$+Air	1.15	12.3	17.8	1.45
Heptane+Air	1.13	13.2	19.4	1.49
DE+Air	1.12	17.8	20.9	1.17



PO+Air　IPN+Air　Hexane+Air　$C_5\sim C_6$+Air　Heptane+Air　DE+Air

图 7　燃料空气混合物爆轰波胞格结构的烟迹记录

Fig. 7　The cellular structure on smoked foil record for fuel-air mixtures

4　结　论

采用立式激波管对几种常温常压下为液态的碳氢燃料的临界起爆能和爆轰波胞格尺寸进行了实验测定和分析研究。在当量比基本相同的条件下,PO 与空气混合物的临界起爆能最小,癸烷的最大,己烷、$C_5\sim C_6$ 和庚烷的则居中,这主要是由于 PO 在常温下具有较高的蒸气压所致,而 IPN 空气混合物的临界起爆能与其—O—NO_2 官能团有密切关系。同一种燃料的空气混合物的浓度不同,其临界起爆能也不同,与当量比成“U”形曲线关系,且最敏感的起爆点并不是对应于等化学当量的混合物,而是偏向于富燃料。另外,环氧丙烷、己烷、$C_5\sim C_6$、庚烷、癸烷的胞格尺寸依次增大,环氧丙烷、己烷、$C_5\sim C_6$、庚烷胞格结构与气相类似,而癸烷则为云雾多相爆轰。

References:

[1]　Axesson E L, Brezinsky K, Westbrook C K. Chemical Kinetic Modeling of the Oxidation of Large n-Octane Fuel

[A]//The Combustion Institute. 21th Symposium (International) on Combustion [C]. Pittsburgh, Pennsylvania: The Combustion Institute, 1986: 783-799.

[2] Эмануэль Н М. Chemical Kinetics [M]. Translated by Chen G L. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing Company, 1962: 75-82. (in Chinese)
爱玛努爱利·Н М. 化学动力学 [M]. 陈国亮等, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1962: 75-82.

[3] Hu Zh H. Effect and Sensitization Mechanism of Nitrate of Ester on Hydrocarbons Safety [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2002, 24(1): 49-51. (in Chinese)
胡朝晖. 硝酸酯对碳氢燃料危险性影响的机理分析 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2002, 24(1): 49-51.

[4] Yin Q. The Physical & Chemical Characteristics of the Composite Fuels of Double Event Fuel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
殷 清. 二次 FAE 燃料的理化性能分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

[5] Tang M J, Nicholls J A, Sichel M, et al. Direct Initiation of Detonation in a Decane Spray[A]//Combustion Institute, /Canadian Section. 1983 Spring Technical Meeting(CI/CS) [C]. Mcgill University, Montreal, Canada, 1983: 1-31.

[6] Fan B Ch. Flame, Explosion and Detonation of Two-Phase System [M]. Beijing: National Defense Publication Company, 1998. (in Chinese)
范宝春. 两相系统的燃烧、爆炸和爆轰 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

Experimental Study on Detonation Characteristics of Several Liquid Fuel-Air Clouds in Shock Tube

YAO Gan-Bing[1,2], XIE Li-Feng[1], LIU Jia-Cong[1]

(1. *Chemical School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The detonation characteristics of fuel(PO, IPN, $C_5 \sim C_6$, hexane, heptane, Decane)-air cloud were studied in shock tube. The critical initiation energy was measured by the up and down method and cell size by smoked metallic foil. The comparison of detonation characteristics among these fuels was also carried. Results demonstrate that the relationship of critical initiation energy and equivalence ratio shows an "U" shape curve, the minimal critical energy is obtained when equivalence ratio is slightly larger than 1. The conclusion is similar to the gaseous detonation. These experimental results help us deeply understanding the detonation nature of hydrocarbon-air mixtures.

Key words: fuel; cloud; critical initiation energy; cell size