

文章编号: 1006-9941(2003)02-0057-04

碳氢燃料爆轰波胞格结构的实验研究

徐晓峰, 解立峰, 彭金华, 何志光, 惠君明
(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 在实验的基础上,对碳氢燃料云雾爆轰波胞格结构的影响因素进行讨论分析认为:初始温度的变化对胞格尺寸的影响较小;胞格尺寸随初始压力的降低而增大;稀释气体使碳氢燃料的爆轰波胞格尺寸增大,在稀释气体达到一定浓度后,胞格尺寸将迅速增大;起爆能的增大可以导致更加复杂的爆轰波次胞格结构出现。

关键词: 碳氢燃料;爆轰波;胞格结构
中图分类号: O38

文献标识码: A

1 引言

对碳氢燃料的爆轰特性研究由来已久。爆轰波胞格作为一个重要的爆轰特征参数,对其的研究,从 Campell 和 Woodhead 发现波的多维结构^[1]算起,已有七十多年的历史。早些时候对单一的气体碳氢燃料^[2,3],近几年对现在气、液、固多相碳氢燃料空气混合物的爆轰波胞格结构进行了研究^[4,5]。其中对低碳的燃料与空气的混合物进行了大量广泛的研究,在常温常压下,这些燃料都有较高的蒸气压支持气相爆轰,还有在常温常压下的的蒸气压较低的大分子燃料,进行了较高温度的爆轰波胞格现象的实验和机理分析。本文对几个主要影响爆轰波胞格的因素进行较全面的分析,研究了初始温度、初始压力、稀释气体和起爆能对它的影响,并对一些现象进行了分析和讨论。

2 实验装置

立式激波管实验装置如图 1 所示。激波管主体:管体总长 5.4 m,外径 240 mm、内径 200 mm。在主管两侧交错地布置了喷雾接管,以形成均匀的云雾体系。管体两侧对称地分布了压力传感器,以测量云雾的爆轰参数。

进气、喷雾系统: 喷雾系统由高压气瓶、气室、电磁阀、单向阀、喷雾室和喷头组成。气室用来贮存一定压力的空气,单个气室的容积为 0.69 L。电磁阀的开

启时间及顺序由控制系统控制,当其开启后,贮存在气室里的高压气流,通过电磁阀进入喷雾室,同时使“U”形储液管中的燃料通过喷嘴成雾喷出。喷头为空心半球,其表面有 119 个直径在 1 mm 左右的小孔,保证在扇形喷雾范围的分布基本均匀。多套喷雾系统同时喷射,相互填补死角,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、电荷放大器、瞬态波存仪、微机及控制系统组成。燃料为 PO (C_3H_6O),常温常压下为液体。

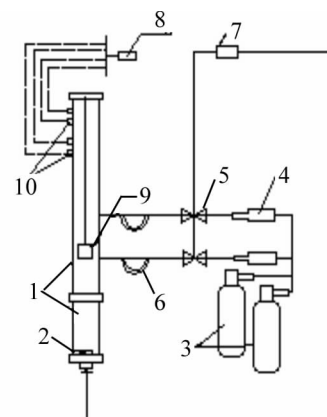


图 1 实验装置示意图

- 1—激波管主体, 2—起爆装置, 3—高压气瓶, 4—气室,
5—电磁阀, 6—U 形储液管, 7—电源控制系统,
8—数据采集系统, 9—烟熏板, 10—传感器

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

- 1—shock tube, 2—initiation device, 3—compressible vessel,
4—chamber, 5—electromagnetic valve, 6—U-shape reservoir,
7—power control system, 8—data acquisition system,
9—smoked foil, 10—transducer

收稿日期: 2002-10-30; 修回日期: 2003-01-09

作者简介: 徐晓峰(1978-), 硕士研究生, 从事燃料空气炸药的研究。

起爆源采用 8# 电雷管引爆不同药量的塑性炸药, 实验温度为常温。在激波管实验中, 起爆药柱可看作点爆源, 爆炸所产生的波为球面波, 但由于本文所用管径与所实验燃料的胞格尺寸之比远大于 10, 因而可近似将此看作平面波^[6]。

3 结果分析

3.1 初始温度的影响

大部分碳氢燃料, 特别是大分子物质, 因为它们常温下蒸气压太低而不易爆轰, 因此有必要在更高的温度下进行实验, 一般在 100 °C。比较常温下的爆轰参数与 100 °C 条件下的爆轰参数显得很重要。

初始温度对爆轰波胞格尺寸的影响见表 1 (除 C₆H₆ 在 25 °C 时的胞格尺寸外, 表 1 中的数据取自参考文献[4])。对甲烷、乙烷、乙烯和乙炔而言, 温度升高爆轰波胞格尺寸减小, 而对苯和丙烷而言, 爆轰波胞格尺寸随温度的升高有所增大。本文认为对于低分子碳氢燃料(常温常压下为气体), 温度的升高增加了碳氢燃料与氧化剂反应的剧烈程度, 反而使胞格尺寸减小, 这是因为碳氢燃料混合物的胞格尺寸随混合物敏感度的提高而减小^[7]; 对于大分子碳氢燃料(常温常压下一一般为液体), 温度的升高, 在增加反应剧烈程度的同时, 提高了碳氢燃料的蒸气压, 对胞格尺寸的增大做出了一定的贡献。由表 1 可以看出, 在 25 ~ 100 °C 范围内, 温度的升高对大分子物质(常温常压下为液体)的爆轰波胞格尺寸的影响不大, 本文认为, 温度不是大分子物质爆轰波胞格尺寸的主要影响因素。

表 1 在 25 °C 和 100 °C 条件下实验所得胞格尺寸比较
($p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\Phi = 1$)

Table 1 Comparison of cell size at different temperature
($p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, $\Phi = 1$)

燃料	$\lambda(25 \text{ °C})/\text{mm}$	$\lambda(100 \text{ °C})/\text{mm}$	$\lambda(100 \text{ °C})/\lambda(25 \text{ °C})$
CH ₄	305	260	0.85
C ₆ H ₆	51.5	55	1.07
C ₃ H ₈	50	52	1.04
C ₂ H ₆	50	48	0.96
C ₂ H ₄	19.5	16	0.82
C ₂ H ₂	5.3	4.0	0.75

3.2 初始压力的影响

很多燃料在常温常压下, 不易得到爆轰波胞格结构, 这是因为在此条件下爆轰波胞格尺寸太小。由实验可得, 随着初始压力的提高, 爆轰波的胞格尺寸随之减小。如图 2 所示, 随着初始压力的增大, C₃H₆O 与氧

气混合物的胞格尺寸逐渐减小。由图 2 可以看出, 在初始压力较小时, 胞格尺寸更大一些, 当初始压力增大时, 胞格尺寸慢慢变小, 而且随压力的增大变化幅度明显趋缓。实验证明文献[8]计算结果的正确性, 即乙烷、丙烷、丙烯等碳氢燃料与氧气以及丁烷和空气的混合物爆轰波所得的胞格尺寸随压力增加不断减小。

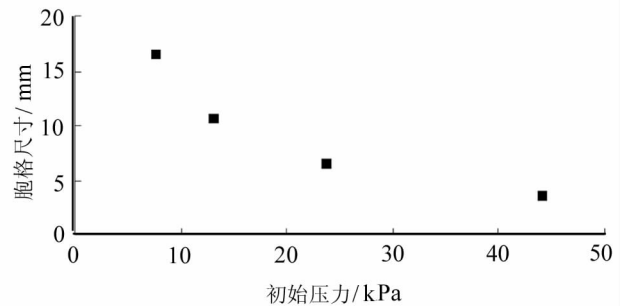


图 2 PO-O₂ 混合物的胞格尺寸随初始压力的变化(293 K, 配比为 1)

Fig. 2 History of cell size of C₃H₆O-O₂-mixture with initial pressure(293 K, ratio = 1)

3.3 稀释气体的影响

常温下, 一部分碳氢燃料与空气或氧气的混合物较难得到爆轰波胞格, 在其中加入一定量的惰性气体(如 N₂ 和 Ar 等), 爆轰波胞格尺寸有较显著变化。因此研究惰性气体对爆轰波胞格尺寸的影响对研究碳氢燃料的爆轰特性是很有意义的。本文主要比较了 C₃H₆O 与 O₂ 混合物的胞格尺寸在 22.5 kPa 时随 N₂ 和 Ar 浓度的变化规律(见图 3)。随着 N₂ 和 Ar 浓度的不断提高, 所得胞格尺寸越来越大, 达到一定浓度后, 胞格尺寸随稀释气体浓度迅速增大。比较 N₂ 和 Ar 对 C₃H₆O 与 O₂ 混合物体系的爆轰波胞格尺寸的影响。

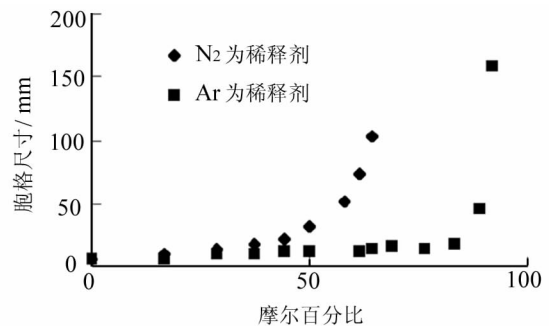


图 3 PO-O₂ 混合物的胞格尺寸随氮气和氩气浓度(摩尔百分比)的变化(293 K, 配比为 1, 22.5 kPa)

Fig. 3 History of cell size of C₃H₆O-O₂-N₂/Ar-mixture with the mole percent of N₂/Ar(293 K, ratio = 1, 22.5 kPa)

由图 3 可以看出,与 Ar 相比, N_2 对该体系爆轰波胞格的影响更容易。这是因为 N_2 摩尔浓度达到 50% 以上,就能使胞格尺寸有较明显的增大,而 Ar 需要达到 88% 以上才能达到同样的效果。

3.4 起爆能的影响

气相和许多均相液体炸药爆轰波形成多维结构,其特征为胞格尺寸和胞格的规则性。在参考文献[9]中,提到气相爆轰实验和用一步 Arrhenius 动力学进行的爆轰多维数值模拟表明起爆能的增大将引起胞格不规则。实验表明当起爆能足够高时,在主要的胞格结构内有更小的胞格结构出现^[10,11]。对液相炸药同样现象的分析^[12,13]表明在三个波系(马赫波系、反射激波和入射激波)相撞形成胞格的时间内,由于爆轰波阵面的驱动部分很不稳定形成次三波点时,就可形成次胞格结构。二维的数值模拟^[14]确认了在一步 Arrhenius 动力学表示的有较高起爆能系统中存在次胞格结构。

本文所进行的云雾爆轰实验结果表明,当起爆能太大时,不易得到大胞格结构,相反有大量的小胞格出现(见图 4),表 2 所列实验结果表明,在 1、2、3 中情况下测得胞格尺寸约 0.5 ~ 10 mm 之间,这与同等条件下得到的其它碳氢燃料爆轰波胞格尺寸相差太大,而第四种情况(见图 5)所得的胞格尺寸在 32 ~ 40 mm 之间。虽然云雾爆轰结构很复杂,但由于其它形式能量不可能留下这样的结构,所以认为前面三种情况下得到的胞格是次胞格结构。相对于气体和均相液体爆轰而言,气液两相的云雾爆轰要复杂的多,这是因为前者在爆轰之前已经形成非常的均匀体系,因而其爆轰稳定,形成的爆轰波胞格结构大小较均匀;而后者由于是气液两相,在整个反应体系中的物质分布极为不均匀,因此支持爆轰波向前传播的由化学反应提供的能量时刻发生着变化。爆轰波的三维胞格结构是由于马

赫杆、入射波和反射波相交于三波点共同作用形成的,由于物质分布的不均匀以及维持爆轰波往前传播的能量的时刻变化,导致马赫杆和反射波时刻不停发生变化,因此由气液两相的云雾爆轰形成的爆轰波胞格的大小不均匀、形状不规则(如图 5 所示),而起爆能的增大将使得形成三波点更不稳定^[9],在局部改变三波点的轨迹,形成次三波点,从而出现次胞格结构(如图 4 所示)。由表 2 可以看出,前面三种情况的起爆能大于第四种情况,而其他条件相同,本文认为起爆能是导致次胞格结构出现的主要原因。

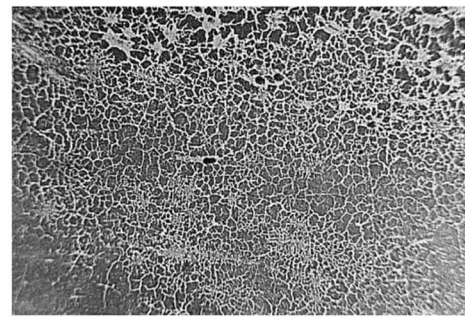


图 4 在表 2 条件下烟迹板记录的次胞格结构

Fig. 4 The secondary cellular structure on the smoked foil under the 2th condition of table 2

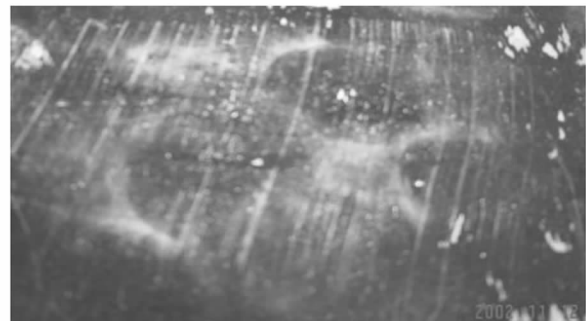


图 5 表 2 条件 4 下烟迹板的胞格尺寸

Fig. 5 Typical smoked foil record of PO spray-air detonation under the 4th condition of table 2

表 2 在不同实验条件 C_3H_6O 空气混合物胞格尺寸的实验结果

Table 2 Experimental results of cell size of C_3H_6O -air-mixture under different conditions

试验序号	初始压力/kPa	初始温度/K	起爆药量	氧化剂	稀释剂	当量比	胞格尺寸/mm
1	101.3	293	1D + 1.0 g	Air	N_2	1	0.5 ~ 5
2	101.3	293	1D + 1.0 g	Air	N_2	1	1 ~ 10
3	101.3	296	1D + 1.0 g	Air	N_2	1	0.5 ~ 2
4	101.3	298	1D	Air	N_2	1	32 ~ 40

注: D 代表 8# 电雷管,1.0 g 代表 1.0 g 塑性炸药。

4 结 论

进行了气、液碳氢燃料混合物的爆轰波胞格特性实验研究,结果表明:碳氢燃料混合物的爆轰波胞格尺寸受初始温度的影响不大;而在不同初始压力作用下,胞格尺寸有较大变化,当初始压力接近大气压时,胞格尺寸受初始压力的影响很小;稀释气体由于能起到降低反应剧烈程度的作用,使得胞格增大,同时还可获知不同的稀释惰性气体对爆轰波胞格的影响不同。

本文实验结果还表明,当起爆液态燃料-空气混合物的能量足够大时,将出现复杂的多维爆轰波胞格结构,即次胞格现象。本文认为出现这种现象是因为爆轰波阵面的驱动部分能量过大,在三波系交汇之前,有次三波点形成,从而出现次胞格结构。

参考文献:

- [1] Campbell C, Woodhead D W. [J]. J. Chem. Soc., 1926. 3010; 1927. 1572.
- [2] Zeldovich Ia B, Kogarko S M, Simonov N N. An experimental investigation of spherical detonation in gases[J]. Sov. Phys. Tech. Phys., 1956,1: 1689 - 1713.
- [3] 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,1969,7(3): 492 - 496.
- [4] Tieszen S R, Stamps D W, Westbrook C K, et al. Gaseous hydrocarbon - air detonations [J]. Combustion and Flame, 1991, 84(3): 376 - 390.
- [5] Gamezo V N, Desbordes D, Oran E S. [J]. Combustion and Flame, 1999, 116: 154 - 165.
- [6] 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.
- [7] 杨立中. 碳氢燃料-空气混合物爆轰反应性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 1996.
- [8] Knystautas R, Lee J H, Shepherd J E, et al. Flame acceleration and transition to detonation in benzene-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 1998, 115: 424 - 436.
- [9] Gamezo V N, Khokhlov A M, Oran E S. Secondary detonation cells in systems with high activation energy [EB].
- [10] Manzhalei V L. [J]. Fizika Goreniya i Vzryva, 1977, 13: 470 - 472.
- [11] Vasiliev A A, Mitrofanov V V, Topchian M E. [J]. Fizika Goreniya i Vzryva, 1987, 23: 109 - 131.
- [12] Dremine A N, Nelin V M, Trofimov V S. [J]. Fizika Goreniya i Vzryva, 1980, 16: 82 - 92.
- [13] Dremine A N. [J]. Fizika Goreniya i Vzryva, 1983, 19: 159 - 169.
- [14] Khokhlov A M. [J]. Journal of Computational Physics, 1998, 143: 519 - 543.

Experimental Studies on the Cellular Structure of Detonation Waves of Hydrocarbon Fuels

XU Xiao-feng, XIE Li-feng, PENG Jin-hua, HE Zhi-guang, HUI Jun-ming

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: On the basis of the affecting factors on the cellular structure of detonation waves of hydrocarbon fuels spraying in air, it can be concluded that a change in initial temperature shows a little influence on the cell size, while the cell size increases with the decrease of initial pressure. Furthermore, the presence of a certain amount of inert gases, such as nitrogen, can enlarge the cell size. The enhance of initiating energy will lead to a more complex cellular structure.

Key words: hydrocarbon fuel; detonation wave; cellular structure