文章编号：1000-5773(2005)03-0230-05

碳氢混合燃料(C_5～C_6)气云爆轰胞格结构实验研究*

何小波[1]，解立峰[2]，彭金华[2]

(1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所，四川绵阳 621900；
2. 南京理工大学化工学院，江苏南京 210094)

摘要：改进烟迹技术之后，在初始为常温常压的条件下，进行了碳氢混合燃料(C_5～C_6)的气云爆轰胞格结构实验研究，得到了清晰的胞格烟迹记录，同时讨论了燃料气云的当量比和起爆能对胞格结构的影响。实验表明：C_5～C_6 混合燃料的爆轰波胞格宽度和胞格长度均随当量比的增加而线性增大；随着起爆能的不断增大，混合燃料的胞格宽度和胞格长度均是先增大后减小，且当起爆能足够高时，在胞格结构内可观察到精细结构的存在。

关键词：烟迹技术；气云爆轰；胞格结构
中图分类号：O381 **文献标识码**：A

1 引 言

燃料空气炸药的毁伤作用，主要是通过云雾爆轰产生的爆炸波及冲击波实现的[1]。由于其爆轰能量大，破坏力强，所以对其爆轰特性的研究被摆在突出的位置。

S. R. Kumer [2]等人测试了多种燃料(如甲烷、乙烷、乙炔、丙烷、辛烷和癸烷等)空气混合物化学计量比浓度的胞格尺寸，通过比较其胞格尺寸来确定爆轰敏感度。I. O. Moen [3]等人研究了氢-氧-稀释剂混合气体的胞格状况，讨论了初始压力和稀释剂对胞格尺寸的影响，同时给出了预测胞格尺寸的经验公式。D. C. Bull [4]等人在矩形截面激波管里研究了氢气、乙烯、乙炔、乙烷、丙烷与空气混合物的胞格结构，结果发现：随着初始压力和温度的升高，胞格尺寸逐渐减小。

燃料气云爆轰波胞格结构尺寸是其爆炸特性的一个重要参数。胞格结构尺寸大小和分布规律与混合物的初始条件有关，组分、密度、温度、压力和燃料的气云爆轰特性等对爆轰波胞格尺寸均有影响。根据爆轰波的胞格结构，结合其它测试手段，可以了解燃料气云爆炸机理，这对 FAE 武器的设计有重要的实用价值。由此可见，研究燃料的胞格结构对研究多相爆轰的反应特性是非常重要的。本工作对 C_5～C_6 混合燃料-空气混合物进行了胞格结构的实验研究，得到了一些有价值的结果。

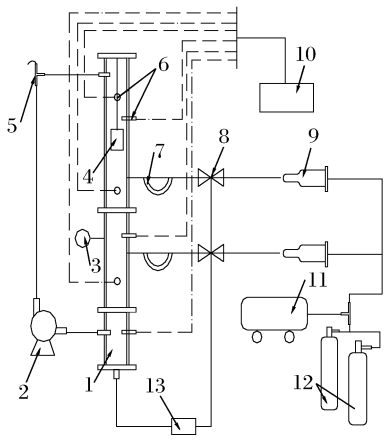
2 实验装置与实验步骤

本实验是在高 5.2 m、外径 240 mm、内径 200 mm 的大型立式激波管中进行的。实验装置的结构如图 1 所示。

全部实验均用 8 号雷管和一定量的塑性炸药引爆，实验初始压力为一个大气压，温度 298 K。起爆端在管的底部，首先安装好烟熏板，然后向激波管内注入一定体积燃料，再密闭好激波管底部，接着用真

* **收稿日期**：2004-07-03；**修回日期**：2005-01-07
基金项目：国防科研计划项目(40404050201)
作者简介：何小波(1977—)，男，硕士研究生，研究实习员，主要研究方向为多相爆轰理论研究及应用.
E-mail：hexiaoboaa@163.com

空泵使激波管中的燃料和空气循环。混合均匀后,点火起爆,分析和存储各传感器记录的压力波形,通过分析测得的激波波阵面超压和激波传播平均速度,判断燃料气云是否爆轰。取出烟熏板观察爆轰胞格结构的烟迹,测量胞格尺寸并拍照。



1. Shock tube; 2. Vacuum pump; 3. Vacuometer; 4. Soot foil;
5. Three-way valve; 6. Pressure transducer; 7. U-tube;
8. Electromagnetic valve; 9. Gas chamber;
10. Data processing system; 11. Air compressor;
12. High-pressure gas cylinder;
13. Electrical source control system

图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Experimental set-up

3　烟迹技术的改进

烟熏板是用来记录爆轰胞格结构的,因此它的设计与制备是本实验中一个非常关键的环节。本工作选用铝板作为加工材料,形状设计为半圆环形,这样既方便安装又便于对胞格结构烟迹记录的观察。与垂直悬空的矩形直板相比,采用半圆环形板可紧贴激波管管壁,从而减小了对整个管内爆轰流场的影响。熏板所用的燃油料为纯煤油。

在实验中发现,当爆轰波扫过烟熏板之后,板上的熏烟很难被粘住,这其中又特别是二次板(在实验中已经至少使用过一次的板)的制备。因此在经过不断地摸索和实践后,本实验采用如下方法制备烟熏板:首先清洁板面,再在板面上涂上一层薄的油膜,然后用煤油灯火焰熏烤制备。

4　实验结果及其分析与讨论

4.1　C_5～C_6 混合燃料的胞格实验

近年来,随着 C_5～C_6 混合燃料在燃料空气炸药中的广泛应用,对其爆轰性能的研究也显得越来越为突出。我们着重研究了 C_5～C_6 混合燃料-空气混合物在常压下的爆轰胞格结构。由于本实验采用环形烟迹板,测量胞格尺寸时先用细线在烟迹板上量测,然后用游标卡尺测量细线的长度,且在每张烟迹板上所得胞格中,选取 10 个以上胞格图案进行测量并求平均值,从而保证了测量数据的可靠性和准确度。

4.1.1　不同当量比时混合燃料的胞格尺寸

不同当量比混合燃料的实测爆轰波胞格尺寸以及爆轰压力和爆轰速度等参数见表 1。可以看出,混合燃料胞格宽度和胞格长度均与当量比基本成正比关系,即随当量比的增加而线性增大。爆轰压力和爆轰速度也随着当量比的增加而均逐渐增大。当量比的增加,亦即反应物浓度增大,反应平衡右移,从而体系释放能量增大,由此表明了在相同起爆能的情况下,胞格尺寸的大小从侧面反映了爆轰体系能量的大小。

表 1　不同当量比时混合燃料的几种爆轰参数值

Table 1　Several detonation parameter at the different equivalence ratio in the cloud fuel mixture

Equivalence ratio	Cellular width /(mm)	Cellular length /(mm)	Detonation pressure /(MPa)	Detonation velocity /(m/s)
1.03	16	23	2.22	1784
1.23	19	28	2.24	1795
1.48	25	30	2.29	1817

4.1.2 不同起爆能时混合燃料的胞格尺寸

不同起爆能时混合燃料的实测爆轰波胞格尺寸以及爆轰压力和爆轰速度等参数见表 2。可以看出,随着起爆能的不断增大,混合燃料的胞格宽度和胞格长度均是先增大后减小,其爆轰压力和爆轰速度也略有增加,但变化的幅度不大。实验表明:当起爆能足够高时,在胞格结构内可观察到精细结构的存在。也即是说,如果在 3 个波系(马赫波、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,就可观察到精细结构的存在(如图 3(b)所示)。

表 2 不同起爆能时混合燃料的几种爆轰参数值

Table 2 Several detonation parameter at the different initiation energy in the cloud fuel mixture

Initiation energy / (kJ/m^2)	Cellular width / (mm)	Cellular length / (mm)	Detonation pressure / (MPa)	Detonation velocity / (m/s)
562.59	19	28	2.24	1795
749.21	27	37	2.28	1801
1122.46	20	27	2.34	1816

在整个反应体系中的压力分布极不均匀,因此支持爆轰波向前传播的微爆轰的化学反应所提供的能量时刻发生着变化,引起马赫杆和反射波也时刻不停地发生变化,从而导致了气云爆轰形成的爆轰波胞格的大小不均匀、形状不规则。而起爆能的增大将使得形成三波点更不稳定[5],在局部改变三波点的轨迹,形成次三波点,从而就有了精细结构的存在。

4.1.3 C_5～C_6 混合燃料气云爆轰胞格结构图案

多头均相爆轰胞格结构的典型特征如图 2[6]所示。通过未反应混合物的前导冲击波传播速度为平均爆轰波速度 D,近似等于 CJ 速度 D_{CJ}。这一前导冲击波由传播速度大于 D 的马赫杆(图中标记为 MS)和传播速度小于 D 的入射冲击波(图中标记为 I)交替组成,这两者之间的交接点为三波点。横波或反射波(在图中标记为 R)在传播到未反应物前,未反应物已被入射冲击波压缩,图中虚线表示三波点的运动轨迹。爆轰波阵面并非平滑的平面,而是由若干有弧度的弯曲阵面组成的。胞格结构,是由大量的微爆轰碰撞而形成的,即先有许多微爆轰,它们开始先在其侧边上互相碰撞,后来侵入到顶部形成前导冲击波。冲击波的反射在相邻微爆轰碰撞处起初是正规反射,但是当反射角增大时,形成了马赫杆。

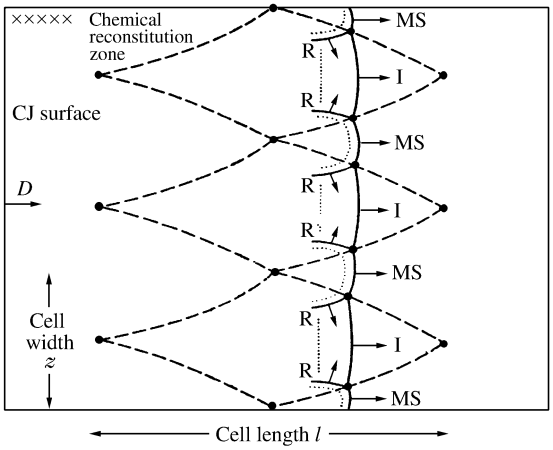
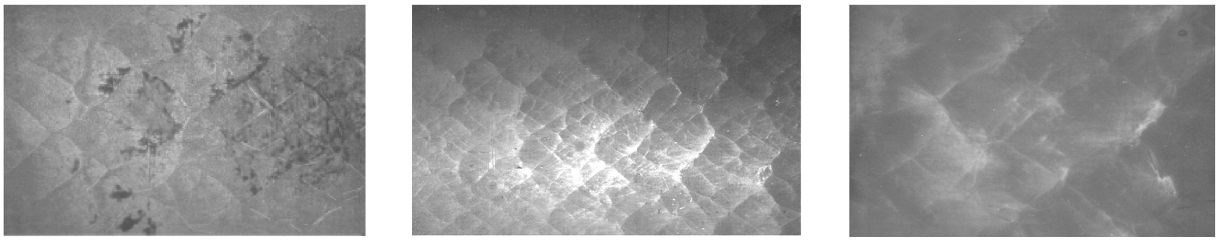


图 2 爆轰胞格结构示意图

Fig. 2 Detonation cellular patterns

从宏观上来看,爆轰波的平均传播速度接近 CJ 爆速,这时,由于与相邻胞格传来的爆轰波的碰撞又突然加速到过度爆轰状态,于是开始另一个周期,不断地重复下去。所以爆轰波的传播就是这一系列由局部爆炸所产生和支持的横波的不断碰撞的周而复始的过程。

下面是 C_5～C_6 混合燃料气云爆轰胞格结构图案。图 3 是不同当量比下混合燃料爆轰波的胞格结构实验记录照片。图 3(a)和图 3(b)分别是 C_5～C_6 混合燃料当量比均为 $\Phi=1.23$,起爆能为 562.59 kJ/m^2、1122.46 kJ/m^2 时爆轰波的胞格结构实验照片,图 3(c)是戊二烯在当量比为 $\Phi=1.2$、起爆能为562.6 J/m^{2}时爆轰胞格结构实验照片。



(a)　(b)　(c)

图 3　C_5～C_6 混合燃料气云爆轰胞格结构图案

Fig. 3　The detonation cellular patterns caused by C_5～C_6 cloud fuel mixture

4.2　不同燃料的胞格尺寸比较

实验结果见表 3。实验燃料有环氧丙烷、C_5～C_6 混合燃料、戊二烯、乙炔、氢气、乙烯、乙烷、丙烯、丙烷、正丁烷、硫化氢、甲烷等。实验均是在常温常压下进行,其中环氧丙烷的当量比为 1.24,C_5～C_6 混合燃料的当量比为 1.23,戊二烯的当量比为 1.22,其余燃料的当量比均为 $\Phi=1$。

由表 3 中的实验数据可以看出,烷烃的胞格宽度明显大于烯烃,而烯烃的胞格宽度又大于炔烃,并且戊二烯的胞格宽度大于丙烯和乙烯的胞格宽度。由此可以得出如下结论:随着烃类物质不饱和度的增加,其爆轰波的胞格尺寸将随之减小。另外,丙烷的胞格宽度是 69 mm,而环氧丙烷的胞格宽度是 5.8 mm,这表明不仅不饱和度的增加能减小燃料爆轰波的胞格尺寸,而且环氧原子的加入也对其爆轰波胞格尺寸的减小有所贡献。

一般来说,胞格尺寸越小,其混合物的爆轰敏感度愈高,越易形成爆轰。由此可判断,在本实验中,环氧丙烷爆轰敏感度最高,戊二烯次之,而 C_5～C_6 混合燃料的爆轰敏感度较低。这与等当量比时通过临界起爆能的数据来判断的结果完全一致。

表 3　常温常压下不同燃料混合物的爆轰波胞格宽度

Table 3　The detonation cellular width of the different fuel mixture under the initial atmospheric pressure and room temperature

Fuel	Cellular width /(mm)	Note	Fuel	Cellular width /(mm)	Note
C_5～C_6 fuel mixture	19	Experimental data	Ethane	54～62	Ref.[3]
Propane oxide	5.8	Experimental data	Proplyene	52	Ref.[3]
Pentylene	15	Experimental data	Propane	69	Ref.[3]
Acetylene	9.8	Ref.[3]	*n*-Butane	50～62	Ref.[3]
Hydrogen	15	Ref.[3]	Methane	250～310	Ref.[3]
Ethylene	28	Ref.[3]			

5　结　论

通过对烟迹技术进行改进之后,在∅240 mm×20 mm×5 200 mm 的大型立式激波管中得到了 FAE 燃料气云爆轰的清晰胞格。实验结果表明:

(1) C_5～C_6 混合燃料的胞格宽度和胞格长度均与当量比成正比关系,随当量比的增加而线性增大;爆轰压力和爆轰速度也随着当量比的增加而均逐渐增大。随着起爆能的不断增大,混合燃料的胞格宽度和胞格长度均是先增大后减小;其爆轰压力和爆轰速度也略有增加,但变化的幅度不大。当起爆能足够高时,在主要的胞格结构内有次胞格结构的出现。

(2) 随着烃类物质不饱和度的增加,其爆轰波的胞格尺寸将随之减小。不仅不饱和度的增加能减小燃料爆轰波的胞格尺寸,而且环氧原子的加入也对其爆轰波胞格尺寸的减小有所贡献。

References:

[1] Hui J M, Zhang Z C. Study on Increasing the Power of FAE(Ⅱ)—The Discussion of Cloud Initiation and Detonation [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1995, 19(6): 493－496. (in Chinese)
惠君明,张正才. 提高FAE威力的研究(Ⅱ)——云雾起爆与爆轰的讨论 [J]. 南京理工大学学报, 1995, 19(6): 493－496.

[2] Kumer S R, Pizz W J. Detonation Cell Widths in Hydrogen-Oxygen-Diluent Mixtures [J]. Combust Flame, 1990, 80: 157.

[3] Moen I O. Detonation in Fuel-Air Explosive Clouds [J]. J Hazard Mater, 1993, (33): 159－192.

[4] Bull D C, Elsworth J E. Detonation Cell Structure in Fuel-Air Mixture [J]. Combust Flame, 1982, 45: 7.

[5] Gamezo V N, Khokhlov A M, Oran E S. Secondary Detonation Cells in Systems with High Activation Energy [A]. Proc of the 17th ICDERS [C]. Heidelberg, 1999.

[6] Tarver C M. Chemical Energy Release in the Cellular Structure of Gaseous Detonation Waves [J]. Combust Flame, 1982, 46: 135－156.

Experimental Investigation on the Detonation Cellular Structure Caused by $C_5 \sim C_6$ Cloud Fuel Mixtures

HE Xiao-Bo[1], XIE Li-Feng[2], PENG Jin-Hua[2]

(1. *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *College of Chemical Engineering, NUST, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: The detonation cellular structures caused by $C_5 \sim C_6$ cloud fuel mixtures are studied under the initial atmospheric pressure and room temperature by improved soot foil technique. Sharp cellular patterns are obtained. Meanwhile, the effect of equivalence ratio and initiation energy on the detonation cell size are also discussed respectively. The experimental results show that the detonation cell size of $C_5 \sim C_6$ increases almost linearly with the increase of the equivalence ratio, but the detonation cell size increases first then decreases with the increase of the initiation energy. Moreover, when the initiation energy gets high enough, the fine structures in cellular structures are observed.

Key words: soot foil technique; cloud detonation; detonation cellular patterns