

文章编号: 1001-1455(2004)02-0158-05

环氧丙烷-空气混合物爆轰波胞格结构的研究*

徐晓峰, 解立峰, 彭金华, 何志光
(南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094)

摘要: 对碳氢燃料云雾爆轰波胞格结构的影响因素进行了分析: 比较了初始温度在 25 °C 和 100 °C 条件下碳氢燃料胞格尺寸, 发现胞格尺寸相差不大; 胞格尺寸随初始压力的降低而增大, 在相对压力为负压条件下得到清晰的爆轰波胞格结构; 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: 爆炸力学; 爆轰波; 环氧丙烷; 胞格结构

中图分类号: O381 国标学科代码: 130°3510 文献标志码: A

1 引言

对碳氢燃料的爆轰特性研究由来已久。爆轰波胞格尺寸作为一个重要的爆轰特征参数, S. R. Tieszen 等^[1] 和 V. N. Gamezo 等^[2] 在 80~90 年代对现在气、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。其中对低碳的燃料与空气的混合物进行了广泛的研究, 在常温常压下, 这些燃料都有较高的蒸气压支持气相爆轰, 而对在常温常压蒸气压较低的大分子燃料, 只有在较高温度下对爆轰波胞格现象进行实验和机理分析。

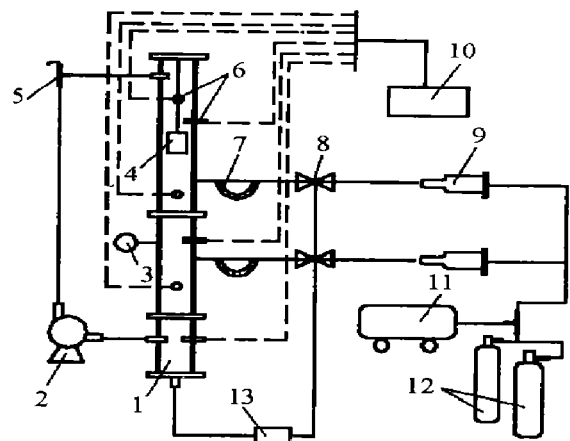
本文中, 对几个主要影响爆轰波胞格的因素进行较全面的分析, 研究了初始温度、初始压力、稀释气体和起爆能对它的影响, 并对一些现象进行了分析和讨论。

2 实验

2.1 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 5.2 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: 初始压力为常压的实验条件下, 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



1. Shock tube; 2. Vacuum pump; 3. Pressure meter;
4. Smoked foil; 5. Triple valve; 6. Pressure transducer;
7. U-shape reservoir; 8. Magnet valve; 9. Chamber;
10. Data acquisition system; 11. Pressure pump;
12. High pressure tank; 13. Power control system

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

* 收稿日期: 2003-01-24; 修回日期: 2003-07-10

基金项目: 爆炸灾害预防、控制国家重点实验室基金项目(2001-01)

作者简介: 徐晓峰(1978—), 男, 硕士。

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。

2.2 常温负压实验步骤

起爆端在管的底部, 事先将激波管抽一定的真空度, 然后通过软塞用注射器把燃料注入激波管中, 接着用真空泵使激波管中的燃料和空气循环起来, 一般维持 40 ~ 60 min, 使得燃料和空气混合均匀, 设置好各仪器参数, 然后用 8[#] 电雷管和炸药起爆液滴云雾与空气混合; 从距起爆端 0.5 m 处开始, 沿管轴方向间隔 0.5 m 布置 8 个侧向压电式传感器。通过分析测得的火焰阵面超压和火焰传播平均速度判断云雾是否爆轰。烟薰铝板放在激波管的上端, 用来记录胞格尺寸。

2.3 实验条件

实验初始温度为常温。在激波管实验中, 起爆药(最大直径 10 mm)相对于内 200 mm 的激波管主体可看作点爆源, 爆炸所产生的波为球面波, 但由于所用激波管的管径与实验燃料的胞格尺寸之比大于 10, 可以忽略管壁效应对胞格尺寸的影响, 因而可近似将此看作平面波^[3]。

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, 在常温下因为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 C_6H_6 在 25 °C 时的胞格尺寸外, 表 1 中的数据摘自参考文献[1])。对甲烷、乙烷、乙烯和乙炔而言, 温度升高, 爆轰波胞格尺寸有所减小, 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。我们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^[4]; 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, 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 S 比较 ($p_0=101.3$ kPa, 当量比 $\varphi=1$)

Table 1 Comparison between cell size S value at 25 °C and 100 °C ($p_0=101.3$ kPa, $\varphi=1$)

燃料	$S_{25^\circ\text{C}}/\text{mm}$	$S_{100^\circ\text{C}}/\text{mm}$	$S_{100^\circ\text{C}}/S_{25^\circ\text{C}}$
CH ₄	305.0	260.0	0.85
C ₆ H ₆	51.5 *	55.0	1.07
C ₃ H ₈	50.0	52.0	1.04
C ₂ H ₆	50.0	48.0	0.96
C ₂ H ₄	19.5	16.0	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, 这是因为此时的爆轰不稳定, 很难捕捉到清晰的爆轰波胞格结构, 通过改变爆轰的初始压力是研究爆轰波胞格结构的重要途径。我们在大型立式激波管中测量了环氧丙烷云雾爆轰波在激波管中的传播。在不同的初始条件下, 进行了云雾爆轰波胞格结构的研究。图 2 是环氧丙烷在常温常压下充入氮气、当量比为 1 的初始条件下的云雾爆轰波胞格, 图 3 是环氧丙烷在初始压力为 62.3 kPa、当量比为 1.15 的初始条件下云雾爆轰波胞格。图 4 是环氧丙烷在初始压力为 59.5 kPa、当量比 1.15 的初始条件下云雾爆轰波胞格及其说明。

实验所得如图 5 所示, 随着初始压力的增大, 环氧丙烷-氧气混合物的爆轰波胞格尺寸逐渐减小。即当初始压力较小时, 胞格尺寸更大一些, 当初始压力增大时, 胞格尺寸慢慢变小, 而且随压力的增大这

种变化趋快。

比较在常压下与负压(低于 1 个大气压)下的爆轰波阵面留下的烟迹,在图 2 中,由于环氧丙烷在常温常压下是液体,在喷入激波管的同时就点火引爆混合燃料,由于时间短,环氧丙烷来不及挥发,因此反应是在气液两相中进行的;而图 3 和图 4 的反应条件为:初始压力分别为 62.3 kPa、59.5 kPa,饱和蒸气压为 47.9 kPa(环境温度为 15 °C,由图 6 可以得到)。通过循环 0.5~1 h,此时环氧丙烷已挥发成气体。比较图 2、3 和 4,在初始压力为常压条件下,得到的胞格结构长度和宽度之比为 1.67 左右,R. A. Strehlow 等人发现低爆炸压力下气相爆炸波胞格长度与宽度之比近似等于 1.61。通过以上分析,认为在常温常压下的爆轰是气液两相爆轰,而在负压下进行的爆轰为气相爆轰。



图 2 $p_0=101.32 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=1$ 得到的烟迹
Fig. 2 The record of smoked foil
at $p_0=101.32 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=1$

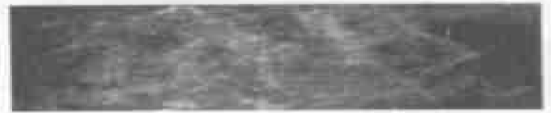


图 3 $p_0=62.3 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=1.15$ 得到的烟迹
Fig. 3 The record of smoked foil
at $p_0=62.3 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=1.15$

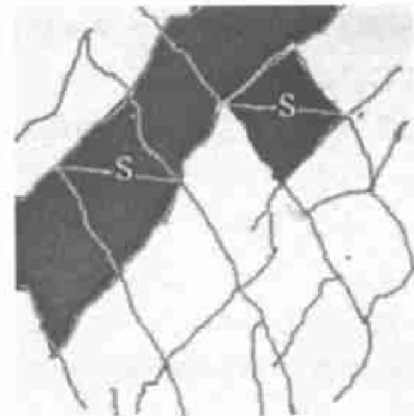


图 4 $p_0=59.5 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=1.15$ 的烟迹说明

Fig. 4 The record of smoked foil at $p_0=59.5 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=1.15$ and interpretation of smoked foil record

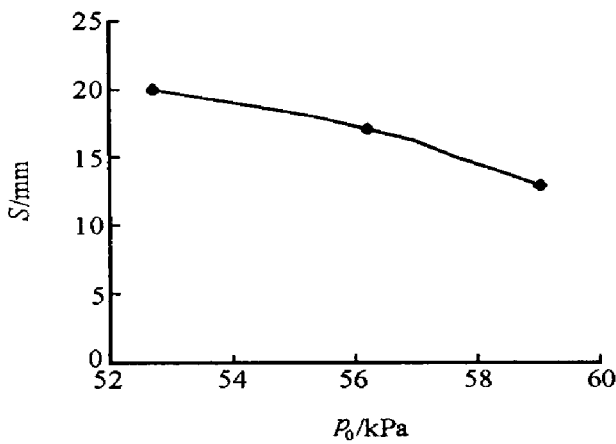


图 5 环氧丙烷胞格宽度随初始压力的变化曲线
Fig. 5 The relation between propylene
epoxide-air cell size

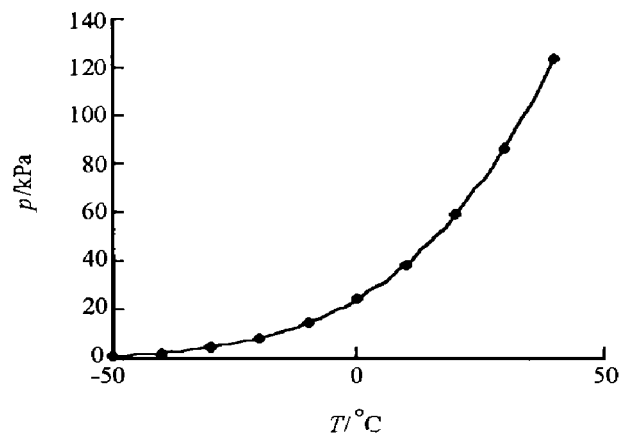


图 6 环氧丙烷在不同温度下的蒸气压
Fig. 6 The vapor pressure of propylene epoxide
at different temperature

3.3 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,其表征为胞格尺寸和胞格的规则性。参考文献[3]表明起爆能的增大将引起胞格不规则。从实验中得到当起爆能足够高时,在主要的胞格结构内有更小的胞格结构出现。对与液相炸药同样现象的分析明在三个波系(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,不易得到大的胞格结构,相反有大量的小的胞格出现(见图 7),表 2 所列实验结果表明,在 1、2、3 种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 8)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均匀的体系,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体系,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向前传播的能量的时刻变化,导致马赫杆和反射波时刻不停地发生变化,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 7 所示),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,从而出现次胞格结构(如图 7 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,认为起爆能是导致次胞格结构出现的主要原因。

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 result of cell size of C_3H_6O -air-mixture at different conditions

试验序号	p_0/kPa	T_0/K	起爆药量/g	氧化剂	稀释剂	当量比	S/mm
1	101.3	293	1D+1.0g [*]	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

D 代表 8[#] 电雷管, 1.0 g 代表 1.0 g 塑性炸药

4 结论

对气、液碳氢燃料混合物的爆轰波胞格特性的实验研究表明:碳氢燃料空气混合物的爆轰波胞格尺寸受初始温度的影响不大;而在不同的初始压力的作用下,胞格尺寸有较大的变化,在负压条件下得到了清晰的爆轰波胞格结构。

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。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

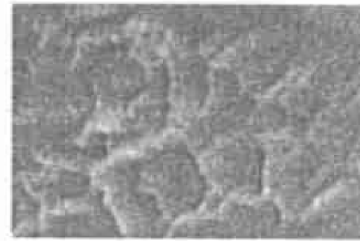


图 7 在表 2 中试验 2 烟迹板记录的次胞格结构

Fig. 7 The secondary cellular structure on the smoked foil at the test 2 of table 2

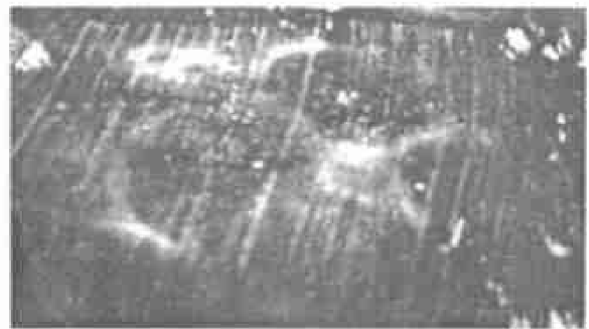


图 8 在表 2 中试验 4 烟迹板的胞格尺寸

Fig. 8 The typical smoked foil record of PO spray-air detonation at test 4 of table 2

波点形成,从而出现次胞格结构。

参考文献:

- [1] Tieszen S R, Stamps D W, Westbrook C K. Gaseous hydrocarbon-air detonations[J]. *Combustion and Flame*, 1991, 84(3): 376—390.
- [2] Gamezo V N, Desbordes D, Oran E S. Formation and evolution of two-dimensional cellular detonations[J]. *Combustion and Flame*, 1999, 116: 154—165.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Gamezo V N, Khokhlov A M, Oran E S. Secondary detonation cells in systems with high activation energy[EB/OL]. <http://reaflow.iwr.uni-heidelberg.de/~icders99/program/papers/201-300/237.pdf>, 1999-07-25.

Study on the detonation cellular structure of propylene epoxide-Air

XU Xiao-feng^{*}, XIE Li-feng, PENG Jin-hua, HE Zhi-guang
(*Chemical School, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: The experimental results indicate that cell size increase slightly with the increase of initial temperature while cell size decreases significantly with higher initial pressure and the clear records of the cellular structure are obtained, and more complex detonation cell structure was observed when initialized energy is increased.

Key words: explosion mechanics; detonation; propylene epoxide; cellular structure

* Corresponding author: XU Xiao-feng
E-mail address: xxf@auxin-tech.com.cn
Telephone: 010-88577700-327