

文章编号: 1001-1455(2007)04-0312-07

立式激波管内云雾爆轰胞格尺寸的测定与分析*

姚千兵^{1,2,3}, 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. 扬州大学化学化工学院, 江苏 扬州 225002;

3. 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: 采用烟迹技术在立式激波管中测定了环氧丙烷、90# 汽油、硝酸异丙酯、庚烷、癸烷、戊二烯等几种燃料气液两相云雾爆轰的胞格尺寸。结果表明, 云雾爆轰的胞格尺寸随当量比的变化呈“U”形曲线关系, 且最小胞格尺寸并不是对应于等化学当量比而是偏向于富燃料一侧, 这与气相爆轰的结论是一致的。胞格尺寸随起爆能的增加而减小。当起爆能达到一定值后, 胞格尺寸变化不明显, 若起爆能继续增加, 在通常的胞格内出现精细结构。云雾爆轰波胞格长度与宽度的比值比气相爆轰小。另外, 根据烟迹记录分析了云雾爆轰作用机制, 认为液滴的破碎、汽化过程以及燃烧区前导是控制气液两相云雾爆轰的主要因素。

关键词: 爆炸力学; 爆格结构; 爆轰; 燃料; 云雾

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引 言

随着人类开发和运用能源技术的不断改进和发展, 碳氢燃料在工业生产中得到了广泛应用。在军事上, 也利用燃料的某些特性研制了燃料气云空气炸药(FAE)。从工业角度来研究燃料气云发生爆炸的作用机理, 是为了预防、减缓和控制此类爆炸灾害的发生, 给工业生产提供必要的安全技术和措施; 而军事目的则是为了提高武器的杀伤力和对设施的破坏效应。由于燃烧爆炸过程是一个相当复杂的物理化学现象, 涉及到诸多学科。因此对燃料气云爆轰特性的研究不仅具有重要的工业和军事应用背景, 还具有重要的理论价值。而且这类问题的研究还将有助于相关学科的开拓与发展。

胞格尺寸是燃料云雾爆轰的一个重要参数, 可以通过它来判定燃料气云爆轰的相对敏感度。S. R. Kumer 等^[1]测定了 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、 C_3H_8 、 C_8H_{18} 、 $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ 等与空气等化学当量混合物的胞格尺寸, 通过比较其胞格尺寸来确定爆轰敏感度, 其结论与文献[2]中所得结果一致。I. O. Moen 等^[3-4]研究了氢-氧-稀释剂混合气体的胞格, 讨论了初始压力和稀释剂对胞格尺寸的影响, 给出了预测胞格尺寸的经验公式。D. C. Bull 等^[5]在方形爆轰管里研究了 H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 C_2H_6 、 C_3H_8 等与空气混合物的胞格, 结果表明随着初始压力和温度的升高, 胞格尺寸逐渐减小。J. Papavassiliou 等^[6]通过研究得到加热激波管(185 °C 和 100 °C)中 $0.5 \mu\text{m}$ 液态云雾爆轰胞格尺寸与纯气相爆轰相似, 认为非均相爆轰波的传播机理与纯气相爆轰的传播机理是一样的, 即横波是前导爆轰波阵面与反应区的必要连接。这与在粗糙管实验爆轰过程相似^[7]。胡湘渝等^[8]对前人实验研究进行了分析和归纳后根据气相爆轰胞格结构的规则特性建立一种以子单元分解胞格结构的新方法, 并根据该子单元的性质和斜冲击波关系, 求解胞格结构中的三波点对撞问题, 推导沿三波点运动方向, 爆轰速度的相对波动幅度仅依赖于胞格几何形状的关系。

对于均相爆轰而言, 反应诱导区长度取决于化学反应速率, 而对多相云雾爆轰, 反应诱导区长度既取决于液滴物理变化过程(液滴破碎、热传递、蒸发), 也取决于化学反应速率。因此, 多相云雾的爆轰化

* 收稿日期: 2006-03-17; 修回日期: 2006-11-06

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(KFJJ04-4)

作者简介: 姚千兵(1970—), 男, 博士, 讲师。

学反应机制与气相是不完全相同的。云雾多相爆轰是一个复杂的过程,影响因素比较多,探讨其胞格结构有助于认识多相爆轰反应机理。在本文中,借助于当量比和起爆能的改变,在立式激波管中对燃料云雾的胞格进行了实验测定和理论分析。

2 实验部分

2.1 实验设备

实验是在高 5.4 m、内径 200 mm 的立式圆型激波管中进行的,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。

激波管管体两侧交错布置了喷雾系统,该系统由空气压缩机、高压气瓶、气室、电磁阀、单向阀、储液管、喷雾室、喷头和控制系统控制组成。单向阀的作用是为了防止过高的激波压力损坏电磁阀。电磁阀开启后,贮存在气瓶里的高压气流通过单向阀进入储液管,使“U”形管中的燃料通过小孔呈射流状进入喷雾室空腔,再经喷嘴成雾状喷出。喷头为空心半球,其表面均布有 119 个直径为 0.5 mm 的小孔,保证在扇形喷雾范围的分布基本均匀。多套喷头同时交错喷射,从而在管体内形成较均匀的液雾。另外,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。

测试系统由 Kistler211B 型压电式石英传感器、STY 低噪声电缆、5124A 放大器、JV5201 数据采集器、微机及控制系统组成。管道两侧布有压力信号测孔,测点分别距点火端 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 m。点火系统由点火元件、起爆装置及控制系统组成,起爆装置安装在激波管底端。而控制系统则是通过同步控制器来实现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、系统安全联动等。

2.2 实验方法

爆轰波三波点运动的轨迹一般采用烟迹来记录,而烟迹板的制作是其中的关键技术。烟迹层既要薄又要均匀,还要具有一定粘附能力,才能保证烟灰不被激波打掉,并且准确可靠地记录三波点运动的轨迹。选用铝板作为加工烟熏板的材料,形状设计为半圆环形(板长 200 mm、厚 2 mm、内径 180 mm),这样既方便安装又便于对烟迹记录的观察,而且半圆环形板可紧贴激波管管壁,从而保证不改变管内云雾爆轰流场。铝板加工好后,通过烟熏的办法将煤油烟灰粘附到板上。具体熏制方法是:首先清洁板面,然后待晾干后在板面上涂上一层薄而均匀的油脂,再用煤油灯火焰进行熏烤,在熏烤过程中来回匀速移动煤油灯,并保持火焰焰心距离心板 3~5 cm。熏制一块烟熏板大约需要 60~70 min。熏制好的板倒扣存放于柜中待用。

实验时的具体操作是:首先检查激波管的气密性,检查完后将烟熏板紧贴于激波管内表面安装,3 块板距点火端的距离分别为 3.0、3.5、4.0 m;接着把一定量的燃料注入到“U”形储液管中,并装好引爆装置,封闭激波管,开启真空泵抽真空,然后开启压缩气瓶阀门,用高压气体预先充满气室;最后调节好控制系统和数据采集系统参数,开启电磁阀,通过高压气体把储存在“U”形储液管的燃料喷入激波管中,预混 1 s 后引爆。实验时的初始压力为 101.3 kPa,初始温度为 298.15 K。数据采集系统记录管内云雾的压力和速度变化。

待管内反应结束后,取出烟熏板,用游标卡尺测量每个胞格的长度和宽度(见图 2),并统计每块板上胞格的数目。最后,将统计得到的结果取数学平均作为胞格的长度和宽度。至于云雾是否形成稳定

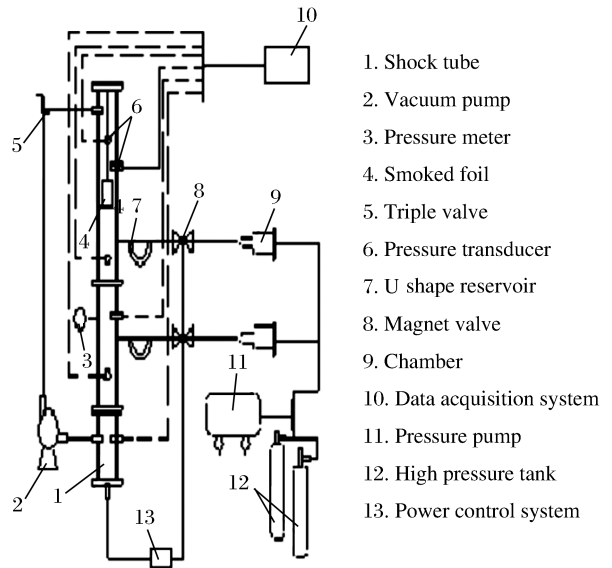


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

爆轰的判据是,由各传感器记录的压力波形以及波阵面超压和波传播的速度,并且这些参数随时间的变化不发生明显改变。此外,处于同一位置的烟熏板记录到的胞格尺寸在两次平行实验中出现明显的误差(超过正常的误差范围),则再加 3 次平行实验,保证数据的可靠性和准确性,从而确保实验结果具有良好的重复性。

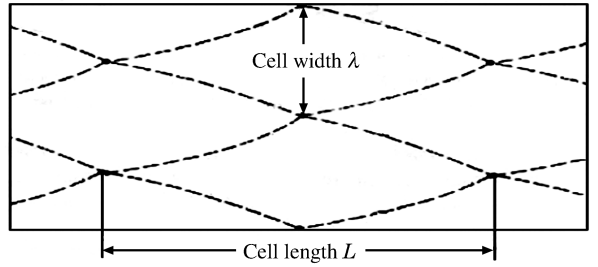


图 2 胞格尺寸测量示意图

Fig. 2 Measurement of cell sizes

3 结果与分析

3.1 当量比对胞格尺寸的影响

燃料与空气混合的当量比 Φ 是影响云雾爆轰特性的一个重要因素。当量比不同,化学反应进行的程度、反应产物以及释放的能量也就不同,云雾爆轰直接起爆的临界起爆能、爆轰波阵面的压力和传播速度等参数均要发生变化,胞格结构也就会发生改变。在不同当量比下,激波管内实测环氧丙烷(PO)和 90# 汽油两种燃料云雾的胞格尺寸见表 1 和表 2。以表中的数据作图,得到燃料空气混合物气云爆轰波胞格尺寸与当量比的关系曲线,如图 3 所示。

表 1 PO 在不同当量比下的胞格尺寸

表 2 90# 汽油在不同当量比下的胞格尺寸

Table 1 Cell sizes for PO-air mixtures at different equivalence ratios ($p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 298.15 \text{ K}$)

Table 2 Cell sizes for gasoline-air mixtures at different equivalence ratios ($p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 298.15 \text{ K}$)

Φ	λ / mm	L / mm	L / λ
0.67	17.8	23.9	1.34
0.91	11.7	16.6	1.42
1.06	8.4	12.6	1.50
1.15	6.1	9.2	1.51
1.28	17.3	23.3	1.35
1.68	30.1	36.5	1.21

Φ	λ / mm	L / mm	L / λ
0.69	51.3	69.7	1.36
0.92	32.8	45.0	1.37
1.02	17.2	24.5	1.42
1.15	12.3	17.8	1.45
1.38	29.1	37.5	1.29
1.84	39.2	46.2	1.19

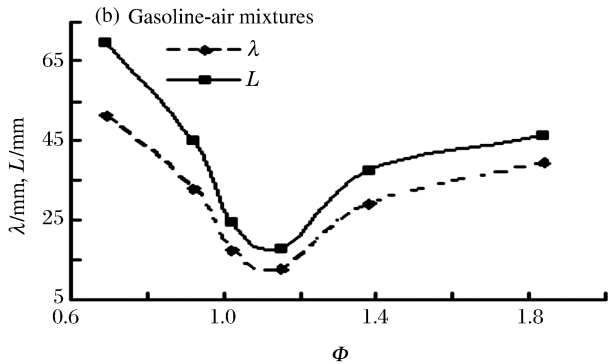
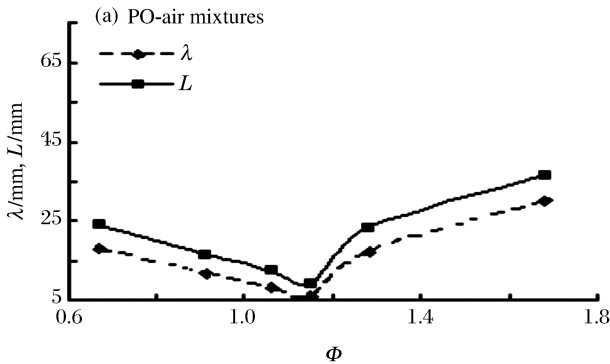


图 3 燃料胞格尺寸随当量比的变化曲线

Fig. 3 Cell sizes vs equivalence ratios for fuel-air mixture

从图表中的数据可以得出:两种燃料的胞格尺寸与当量比的关系呈“U”形曲线关系。亦即这两种燃料的胞格尺寸先随着当量比的增加而减小,达到最小值后,再随当量比的增加而增大;最小胞格尺寸所对应的当量比为 1.1~1.2,偏向于富燃料一侧。这一变化趋势与气相爆轰是一致的。它表明燃料云雾爆轰也存在一最佳浓度,此时化学反应最完全,释放出来维持爆轰波传播的能量最大。最小胞格尺寸所对应的当量比在 1.1~1.2,原因是:(1) 由于雾滴是有大小的(从微观角度来看其大小和分布也并非严格均匀),存在液滴的破碎雾化过程,可能有少量燃料未参与爆轰反应或反应不完全;(2) 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,也可能有很少量燃料没有参与爆轰反应或反应不完全。在此,有必要说明的是,在每次实验完毕后,清理激波管时均发现有少量的碳黑

粘附管壁上,这是认定云雾多相爆轰反应不完全的依据之一。而理论上计算当量比则认为燃料是完全反应了的,因此实验中的等当量比就略大于 1。就环氧丙烷和 90# 汽油云雾爆轰胞格尺寸比较而言,同当量比条件下 PO 的胞格尺寸比较小,且其胞格尺寸与当量比的关系曲线开口也要比汽油的宽。这表明 PO 云雾的爆轰感度比 90# 汽油高。此外,两种燃料云雾爆轰波胞格的长宽比与当量比呈倒“U”形关系,越接近于化学反应等当量比,胞格长宽比值越大。这也表明,等当量时化学反应最完全,释放能量最大,有利于燃料液滴的破碎和汽化,云雾爆轰机制就越类似于气相爆轰;而偏离等当量时就体现了燃料云雾多相爆轰的特性。两种燃料胞格的烟迹记录也说明了这一点,见图 4、5。

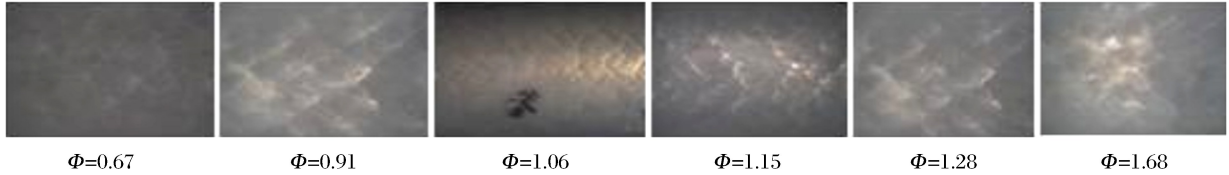


图 4 PO 胞格结构的烟迹记录

Fig. 4 The cellular structure on smoked foil record for PO-air mixture

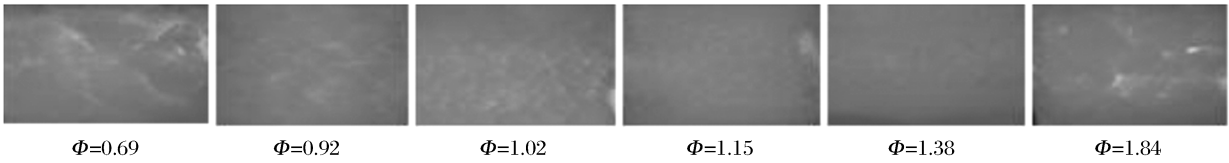


图 5 90# 汽油胞格结构的烟迹记录

Fig. 5 The cellular structure on smoked foil record for gasoline-air mixture

3.2 起爆能对胞格尺寸的影响

在不同起爆能下,实测环氧丙烷和 90# 汽油两种燃料气液两相云雾爆轰波胞格尺寸的数据见表 3 和表 4。以表中的数据作图,得到胞格尺寸与起爆能的关系曲线,见图 6。从图 6 中可以得出,两种燃料的胞格尺寸都是随着起爆能的增大而减小,达到一定的数值之后,再增加起爆能,胞格尺寸几乎不发生变化。这表明燃料云雾达到完全爆轰后其胞格尺寸不再发生变化。90# 汽油胞格尺寸比 PO 的大,且与起爆能的关系曲线也比 PO 的平缓,说明 PO 的爆轰感度比 90# 汽油高。

表 3 PO 在不同当量比下的胞格尺寸

表 4 90# 汽油在不同当量比下的胞格尺寸

Table 3 Cell sizes for PO-air mixtures at different ignition energies ($p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 298.15 \text{ K}$)

Table 4 Cell sizes for gasoline-air mixtures at different ignition energies ($p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 298.15 \text{ K}$)

$E_i / (\text{kJ}/\text{m}^2)$	λ / mm	L / mm	L / λ
562.59	7.3	10.1	1.38
749.21	6.1	9.2	1.51
935.84	6.0	8.7	1.45
1122.46	6.0	8.5	1.42

$E_i / (\text{kJ}/\text{m}^2)$	λ / mm	L / mm	L / λ
562.59	22.7	35.3	1.56
749.21	17.2	24.4	1.42
935.84	12.3	17.8	1.45
1122.46	12.1	17.5	1.45

两种燃料气液两相云雾爆轰波胞格的烟迹记录如图 7、8 所示。从烟迹记录结果来看,当起爆能较小时,得到的胞格相对而言比较有规则性;但随着起爆能的增加,在主要的胞格内有更小的胞格出现,观察到胞格内精细结构的存在。经过分析认为,气液两相云雾爆轰属于多相爆轰,复杂多变。从宏观上看整个反应体系是均匀的,爆轰是稳定,爆轰波胞格大小是比较规则的;但从细观上来考虑,物质分布就不均匀了,支持爆轰波向前传播的爆轰化学反应提供能量时刻发生着变化,导致马赫杆和反射波时刻发生变化,因此云雾爆轰波胞格大小、形状存在着差异。起爆能比较大时,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能量过大,形成许多微爆轰,从而在通常的胞格内出现精细结构。

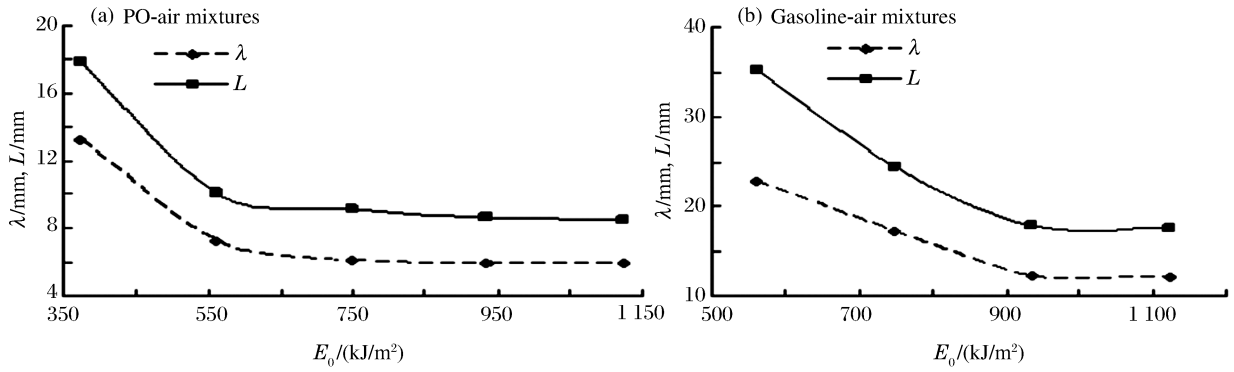


图 6 燃料胞格尺寸随当量起爆能的变化曲线

Fig. 6 Cell sizes vs ignition energies for fuel-air mixture

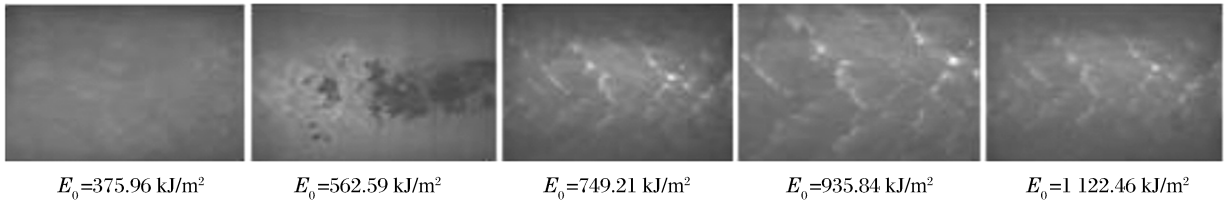


图 7 PO 胞格结构的烟迹记录

Fig. 7 The cellular structure on smoked foil record for PO-air mixture

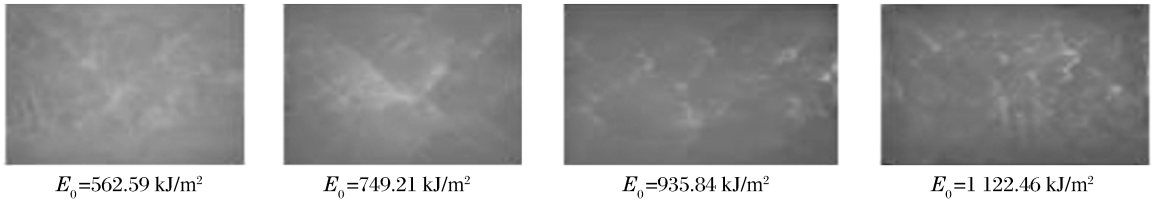


图 8 90# 汽油胞格结构的烟迹记录

Fig. 8 The cellular structure on smoked foil record for gasoline-air mixture

3.3 不同燃料胞格尺寸的比较

常温下几种液态燃料云雾爆轰波胞格尺寸的实测结果见表 5。

表 5 不同燃料云雾的胞格尺寸

Table 5 Cell sizes for fuel-air mixture($p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 298.15 \text{ K}$)

燃 料	T_F / K	T_0 / K	Φ	λ / mm	L / mm	L / λ
癸 烷	377.75	298.15	1.12	17.8	20.9	1.17
庚 烷	371.55	298.15	1.13	13.2	19.4	1.47
90# 汽油	—	298.15	1.15	12.3	17.8	1.45
戊二烯	—	298.15	1.19	10.9	15.4	1.41
环氧丙烷	307.25	298.15	1.15	6.1	9.2	1.51
环氧丙烷	307.25	318.15	1.15	4.4	7.0	1.59
IPN	374.65	298.15	1.17	8.2	10.1	1.23

通过比较表 5 中的数据可以得出：液态烷烃类燃料的胞格尺寸随着碳原子的增加而增加；不饱和烯烃的胞格尺寸小于烷烃的；戊二烯的胞格尺寸又大于 IPN；IPN 的胞格尺寸又大于环氧丙烷。PO 由于挥发性比较强，当形成细小的云雾时，云雾中就存在较浓的 PO 蒸气，化学反应主要是由气相控制，胞格尺寸比较小。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。由此可见，实验中的几种燃料中环氧丙烷的爆轰敏感度最高，IPN 次之，戊二烯再次之，而烷烃类燃料的爆轰敏感度最低。

环氧丙烷气相爆轰波的胞格的长宽比为 1.59，而其云雾的为 1.51，两者比较接近。R. A. Strehlow

等^[9-10]发现气相爆轰波胞格的长宽比近似等于1.6。这一结果说明环氧丙烷的云雾爆轰机制主要由气相控制。90#汽油、庚烷、戊二烯等燃料胞格的长宽比在1.4~1.5,偏离了1.6,其云雾爆轰机制由气相控制为主向多相爆轰过渡。而癸烷云雾胞格的长宽比为1.17,则远偏离了1.61。癸烷在常温常压下是一种难挥发燃料,液滴在受到冲击波作用时,首先发生剥离破碎,变成更小的液滴,并挥发形成一定浓度的燃料蒸汽后才发生化学反应,液滴的破碎过程是控制反应速率的主要步骤。对IPN而言,由于其有-O-NO₂官能团的作用,与上述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,具体分析作者有另文述及^[11]。

4 结 论

采用烟迹技术,对常温常压下为液态的几种碳氢燃料空气混合物的云雾爆轰胞格尺寸进行了实验研究,得到如下结论:

- (1) 90#汽油、PO两种燃料的胞格尺寸都与当量比呈“U”形曲线关系,即先随着当量比的增加而减小,达到一数值后,再随着当量比的增加而逐渐增大,并且最小胞格尺寸所对应的当量比为1.1~1.2,偏向于富燃料一侧,这与气相云雾爆轰结论是一致的;
- (2) PO云雾爆轰的胞格尺寸比较小,其爆轰机制主要由气相控制,庚烷、90#汽油、戊二烯的云雾胞格形状与气相类似,而癸烷的云雾胞格形状则与气相爆轰波不同,液滴的破碎过程是控制其爆轰反应速率的主要步骤;
- (3) 液态烷烃类燃料的胞格尺寸随着碳原子的增加而增加,不饱和烯烃的胞格尺寸小于烷烃的;
- (4) 云雾爆轰波胞格长度与宽度的比值比气相爆轰小;
- (5) 90#汽油、PO两种燃料的胞格尺寸均随着起爆能的增加而减小,达到一定的数值之后,再增加起爆能,胞格尺寸几乎不发生变化;当起爆能量足够大时,由于爆轰波阵面的驱动部分能量过大,在通常胞格内出现精细结构。

参考文献:

- [1] Kumer S R, Pizz W J. Detonation cell widths in hydrogen-oxygen-diluent mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 1990,80:157-169.
- [2] Borisov A A, Khomik S V, Mikhalkin V R, et al. Critical energy of direct detonation initiation in gaseous mixtures [C]//12th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, AIAA Inc, 1989:131-142.
- [3] Moen I O, Bjerketvedt D, Jenssen A, et al. Transition to detonation in a large fuel-air cloud[J]. *Combustion and Flame*, 1985,61 (3):285-291.
- [4] Moen I O. Detonation in fuel-air explosive clouds[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1993,33(2):159-192.
- [5] 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.
- [6] Papavassiliou J, Makris A, Knystautas R, et al. Measurements of cellular structure in spray detonation[C]//13th International Symposium on the Dynamics of Explosions and Reactive System, AIAA Inc, 1991:1-16.
- [7] Teodorezyk A, Lee J H, Knystautas R. Photographic studies of the structure and propagation mechanism-s of quasi-detonations in rough tube[C]//12th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, AIAA Inc,1989:133-223.
- [8] 胡湘渝,张得良.气相爆轰波贯穿胞格变化研究[J].北京理工大学学报,2001,21(3):286-291.
HU Xiang-yu, ZHANG De-liang. Variation of the gaseous detonation wave through the detonation cell[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001,21(3):286-291.
- [9] Strehlow R A. Transverse waves in detonations II: structure and spacing in H₂-O₂, C₂H₂-O₂, C₂H₄-O₂ and CH₄-O₂ systems[J]. *AIAA Journal*, 1969,7(3):492-496.
- [10] Strehlow R A. The nature of transverse waves in detonations[J]. *Astronaut Acta*, 1969,14(5):539-548.
- [11] 姚干兵,解立峰,刘家骢.液体碳氢燃料云雾爆轰特性的实验研究[J].爆炸与冲击,2006,26(6):543-549.

YAO Gan-bing, XIE Li-feng, LIU Jia-cong. Experimental study on detonation characteristics of liquid fuel-air mixtures[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(6):543-549.

Measurement and analysis of the cell size caused by fuel-air detonation in a vertical shock tube

YAO Gan-bing^{1,2,3*}, XIE Li-feng¹, LIU Jia-cong¹

(1. *Chemical School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

2. *College of Chemistry & Chemical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225002, Jiangsu, China;*

3. *State Key Lab of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)*

Abstract: The cell sizes caused by fuel-air cloud detonation were investigated by smoked foil in a vertical shock tube. It indicates that the relationship of the cell sizes and equivalence ratios shows a U-curve, The minimal cell size is obtained when equivalence ratio is slightly larger than 1. This result is similar to that in gaseous detonation. A more complex cellular structure takes place with the enhancement of ignition energy. The cell size of hydrocarbon-air cloud increases with the number of carbon atoms, and the ratio of its length to width is less than that of the gaseous fuel. Experimental results are helpful to understand the detonation nature of hydrocarbon fuel-air mixtures.

Key words: mechanics of explosion; cellular structure; detonation; fuel; spray

* Corresponding author: YAO Gan-bing
E-mail address: yaogao11@163.com
Telephone: 86-25-84315526-811