DOI: 10.11883/bzycj-2017-0098
文章编号: 1001-1455(2018)05-1121-09

Ar 稀释 $C_2H_2+2.5O_2$ 预混气高频爆轰的端面结构*

赵焕娟,伯玉兰,张英华,严屹然
(北京科技大学资源与工程学院,北京 100083)

摘要: 为了研究预混气爆轰的内部结构,对不同浓度的 Ar 稀释的 $C_2H_2+2.5O_2$ 预混气进行爆轰实验和数值计算。首先,在内径 63.5 mm 的管道内进行爆轰实验,使用烟熏玻璃记录了不同初始压力下 $C_2H_2+2.5O_2$ 预混气的爆轰端面结构。使用数字化图像处理技术来分析烟熏玻璃记录的三波点轨迹,以减少人为误差。然后,观察实验结果并描绘规则图形,图像识别程序经过验证后,用于分析实验结果。从端面结构中对封闭图形进行圆的拟合,用胞格半径方差来表示胞格大小的均匀程度;用相邻胞格圆心距的方差来表示胞格分布的规则程度。通过对比不同 Ar 稀释下半径方差和圆心距方差随胞格数量的变化,给出不同浓度 Ar 稀释下 $C_2H_2+2.5O_2$ 预混气的端面胞格尺寸及分布规律,随着 Ar 浓度的升高,预混气端面胞格分布更加规律。

关键词: 乙炔预混气;爆轰实验;烟熏玻璃;稳定性;端面胞格结构
中图分类号: O381;TD774 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

乙炔是工业上切割板材最常用的气体之一。乙炔极易燃烧、分解、爆炸,而且破坏力极大,爆炸事故屡屡发生,而乙炔十分不稳定,对它的研究比较少。有学者为了获得清晰的胞格,在 C_2H_2-O_2 中加入 Ar[1-2],研究 Ar 对预混气的胞格结构的影响,但大多是定性分析[3],且限于表征壁面胞格[4]。在我国,学者们在气相胞格爆轰传播现象方面进行了大量研究[5-6],且大多采用烟膜法进行[7],在胞格结构表征爆轰、胞格形成机理及其量化规律方面取得了较大进展[8-12]。

Shepherd 等[13-14]、Lee 等[15-16]都尝试过使用数字图像处理技术进行定量的不稳定度分析,通过数字图像处理技术直接扫描烟膜来获得端面结构。由于非均匀烟灰沉积物产生的误差,导致“灰度不均匀”,所以数字化处理的灰度图像误差较大,因此,必须对灰度进行处理。Lee 等[15-16]、赵焕娟等[17-18]求助于手绘记录扫描,得到可以进行数字处理的图片。在进行烟膜手绘记录时,需要加入少量人为主观性判断,以消除少量的杂散线和实验中的误操作导致的线条。

环绕在管内壁的烟膜上仅记录了爆轰管壁处的三波点经过的路径,当前对爆轰结构的研究大多集中在管壁上螺旋爆轰结构上[19],对其内部发展规律研究较少。Voitsekhovskii 等[20]在螺旋爆轰面单头、双头和四头螺旋爆轰的横波运动方面做了大量研究。对于更高频的螺旋爆轰,其横波运动穿过爆轰面的表征方法非常困难,需要实验结果的支持,如何清晰地记录爆轰面的结构是一个关键问题[21]。

本文中,使用在管道末段设置烟熏玻璃的方法,记录 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 和 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气高频螺旋爆轰端面结构,通过自编程序对端面记录图像进行数字化处理,分析表征高频螺旋爆轰端面胞格结构。

1 实 验

1.1 方法

实验装置主要包括 4 个部分,分别是爆轰管道系统、数据采集系统、点火系统和充配气系统,如图 1 所示。

* **收稿日期**: 2017-03-29; **修回日期**: 2017-09-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(11602017);中央高校基本科研业务费专项项目(FRF-TP-15-105A1);
中国博士后科学基金项目(2015M580049)
第一作者: 赵焕娟(1985—),女,博士,副教授; **通信作者**: 张英华,zyhustb@163.com。

爆轰管道系统由驱动段和测试段组成。驱动段为长 1 000 mm、内径 63.5 mm、壁厚 10 mm 的钢管，测试段为聚碳酸酯透明管。在驱动段左侧法兰端面处安装点火塞，并在靠近点火塞位置布置 Shchelkin 螺旋增爆器，用来加速爆轰的形成过程，从而在驱动段内形成稳态爆轰。

将测试主体管两端密封，检查测试主体管的密封性，将测试段的一端通过法兰密封，在测试段的另一端安装开槽法兰，将烟熏玻璃(厚 4～6 mm)置于法兰末端，保证放置过程中烟熏玻璃无旋转。

制备化学当量比为 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 和 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 的预混气，所有的爆炸性气体都已预先在高压瓶由分压的方法制备，通过控制面板将不同气体分别安全输入到充配气系统的预混气高压瓶中，充罐后预混气放置 24 h 以上，以确保罐内不同气体均匀混合。

将测试段抽真空，前后分别充入引爆气 C_2H_2-O_2 及实验气体 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 和 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 点火，爆轰结束后将管内抽真空，平稳缓慢放入大气，以保证不在烟熏玻璃上形成冲刷痕迹。打开测试段末端法兰，取出烟熏玻璃后进行扫描。

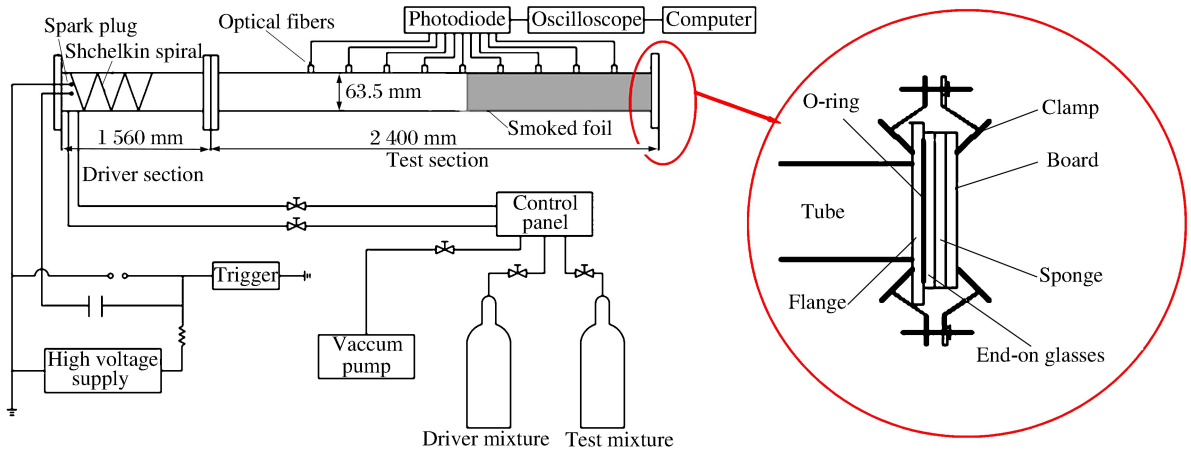


图 1 直径 63.5 mm 爆轰管道的结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of detonation tube with diameter of 63.5 mm

1.2 结果

在初始压力高于 5 kPa 时，获得自持爆轰传播。为了能够容易区分螺旋头的个数，对于 70%Ar 的预混气，通过压力传感器把初始压力分别定为 5.32、5.74、7.45、10.57 kPa，得到的端面烟膜图如图 2 所示。

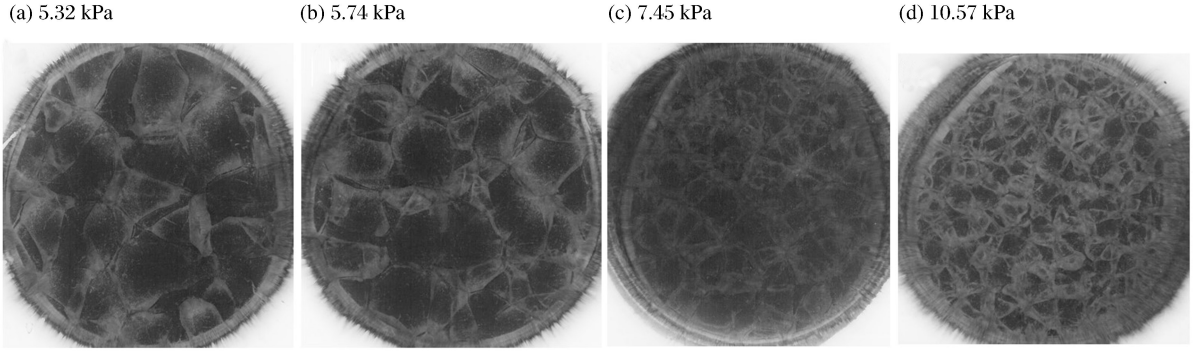


图 2 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 预混气的烟膜记录

Fig. 2 Smoked foils records of premixed $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$

对于含 85%Ar 预混气，通过压力传感器把初始压力分别定为 3.65、14、15.57、16.23 kPa，得到的端面烟膜图如图 3 所示。

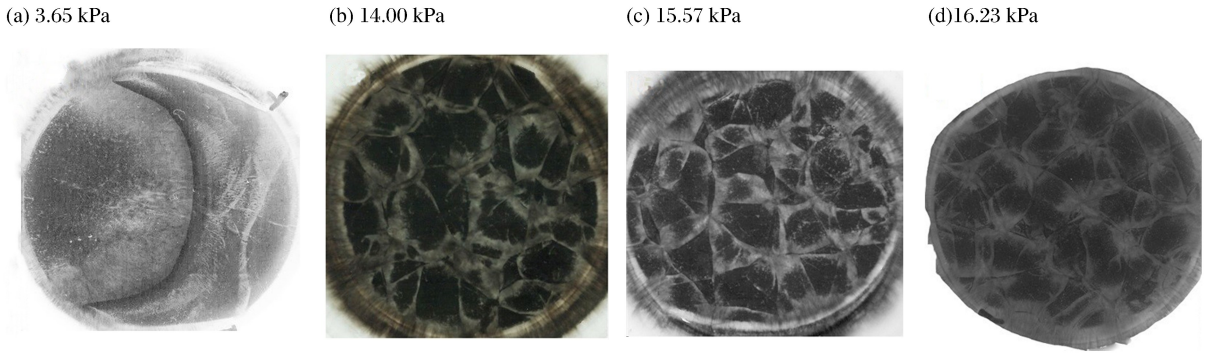


图 3 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气的烟膜记录

Fig. 3 Smoked foils records of premixed $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$

2 结果分析

2.1 端面烟膜数字化处理

为了获得清晰的端面结果，取 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 预混气初始压力分别为 5.32、5.74、7.45、10.57 kPa 的端面烟膜图(见图 2)，使用图像处理软件 Photoshop，通过调整色差和对比度，利用钢笔工具进行描点，然后描边轨迹，填充椭圆工具选择出来的圆，画出三波轨迹，如图 4 所示。阴影为管道内径范围，直径为 63.5 mm，下同。

取 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气初始压力分别为 3.65、14.00、15.57、16.23 kPa 的端面烟膜图(见图 3)，处理的三波轨迹如图 5 所示。

由图 4～5 可知，随着压力的增大，端面结构都变得更加复杂，得到的封闭图形的尺寸也都在变小。胞格尺寸代表波中能量的大小，爆轰的传播有波峰面燃烧的热量和爆轰波的能量，因为爆轰初始压力的增大，分子初始获得的能量多，更多活化分子参与反应，提高分子间反应速率，可以形成更多胞格，表现在胞格尺寸就是变小。

但是，可以发现两种预混气的胞格规则程度不同，需要定量分析。这是因为随着 Ar 浓度越高，对 C_2H_2 稀释越强，爆轰得到稳定的多头爆轰需要的压力更大，所以 85%Ar 的预混气形成单头爆轰的压力更高。由于单头爆轰、双头爆轰及四头爆轰所给出的胞格数量太少，不具有参考性，所以主要研究多头爆轰随气体浓度及初始压力的关系。

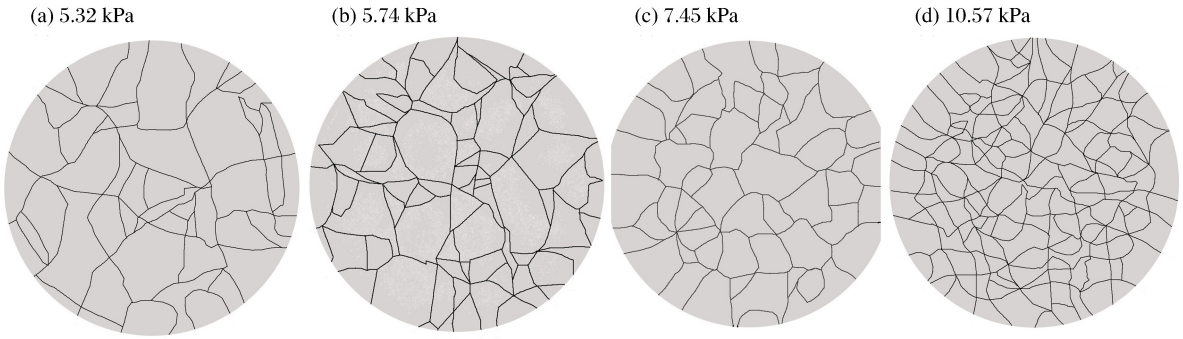


图 4 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 预混气的端面示意图

Fig. 4 End-on result of premixed $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$

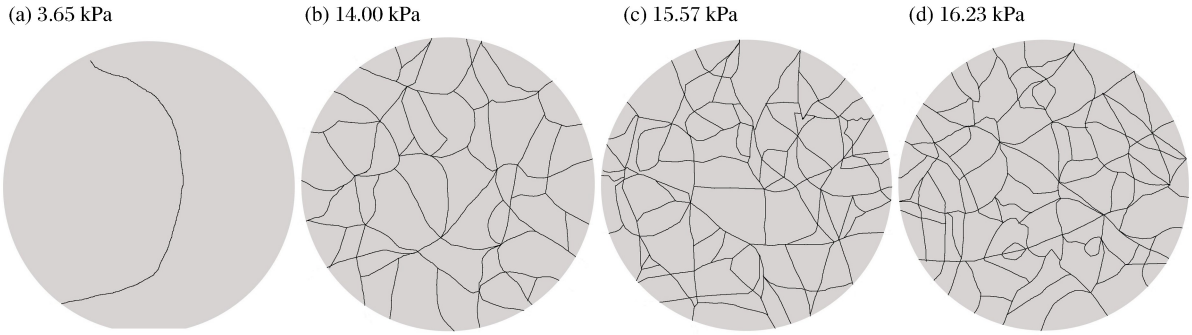


图 5 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气的端面示意图

Fig. 5 End-on result of premixed $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$

为了说明多头爆轰端面结构与气体浓度和气体初始压力的关系，将端面结构中每个封闭的图形进行圆的拟合，得到对应封闭图形的圆心及半径。常见的圆曲线的拟合方法主要有平均值法、加权平均法及最小二乘法。平均值法与加权平均法虽然计算过程简单、难度较低，但是二者都只能作到在一定程度上的近似，在离散点分布均匀或者精度要求不高的情况下可以使用；而最小二乘法理论严密、精度最高，拟合效果最佳，是目前圆曲线拟合的主要方法，本文中采用最小二乘法进行圆的拟合。通过 MATLAB 软件，编制图像识别程序，得到每个圆心的极坐标。相邻圆的两个圆心的距离为圆心距，对圆的半径和圆心距进行数字化处理，得到半径和圆心距的方差。通过半径和圆心距的方差，可以判断出胞格大小的离散程度和胞格分布的离散程度，从而判断出爆轰端面结构的规则程度。

根据爆轰端面实验结果，给出了几种标准图形，如图 6 所示。根据绘制的端面结果示意图，用 MATLAB 程序进行图像识别并数字化处理，得到相应的胞格半径方差、相邻胞格圆心距方差及胞格数，见表 1。

由表 1 可知，随着胞格数的增大，胞格半径方差减小，相邻胞格圆心距方差减小，端面胞格尺寸更均匀且分布更规则。程序识别得到的结果和图片结果相符，说明该程序可靠。

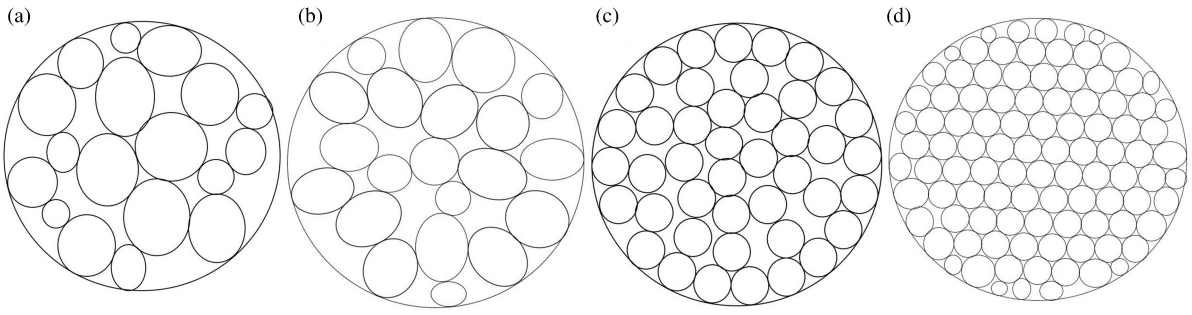


图 6 预混气端面处理结果示意图

Fig. 6 Schematic diagram of end-on results of premixed gas

表 1 预混气在不同压力状况下的半径方差、圆心距方差及胞格数

Table 1 Radius variance, center distance variance and number of cells under different pressures

压力状况	$V(r)$/mm	$V(l)$/mm	n
(a)	4.032 6	5.944 0	34
(b)	3.140 5	5.091 7	39
(c)	1.107 0	2.098 0	77
(d)	0.255 1	0.561 7	119

2.2　$C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 端面结构处理

2.2.1　胞格半径

以胞格半径尺寸为横坐标，以胞格数量为纵坐标，得到相应的直方图如图 7 所示。比较胞格数的变化及胞格半径的分布情况，可以判断出出胞格大小的集中程度。

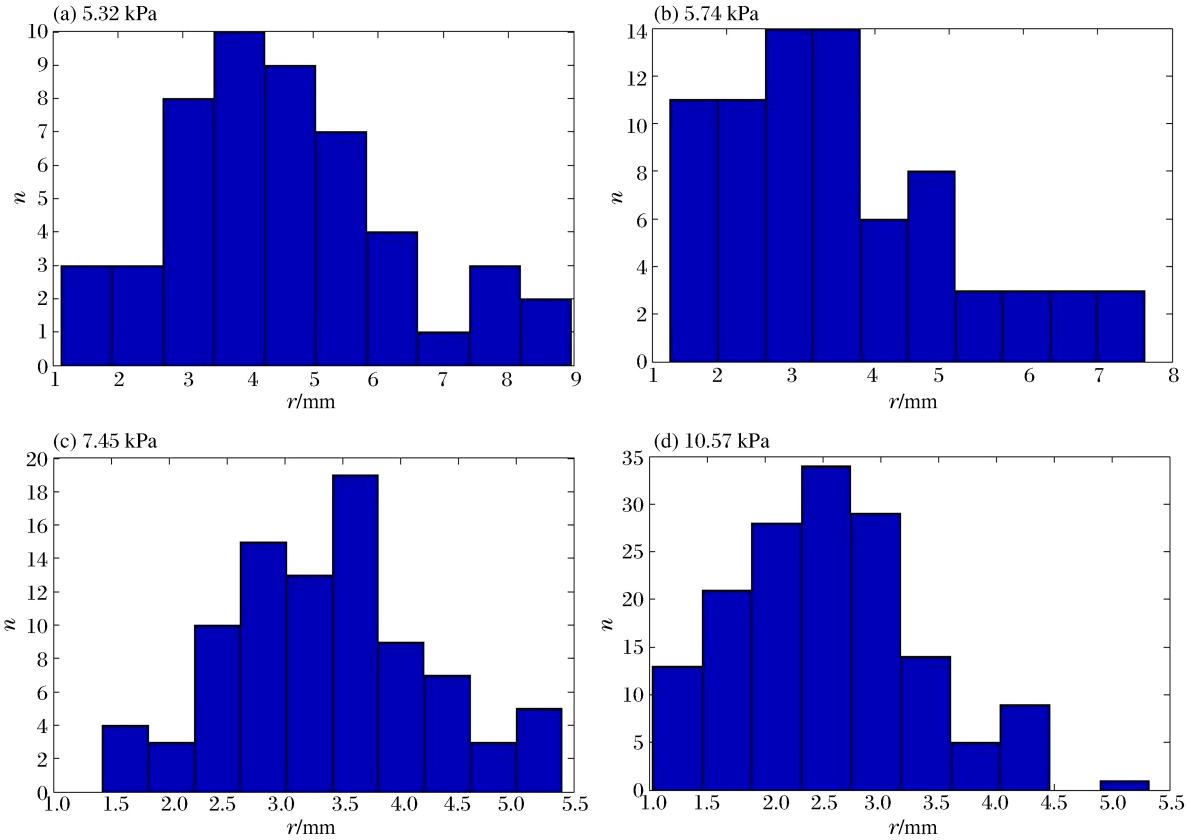


图 7　$C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 预混气爆轰端面结构半径等间距直方图

Fig. 7　Histograms with same radius distance

从直方图可以看出，随着压力的增大，半径大小逐渐变小且更加集中，从纵坐标可以看出胞格的个数逐渐增多，说明随着压力的增大，端面结构胞格大小趋于稳定，最后稳定在 1.5～3.0 mm 之间。

方差作为随机变量偏离程度的参考量，可以用来量化胞格半径的偏离程度。所以使用统计学方差公式来计算间距数据，可得到半径方差，见表 2。

通过方差的小大可以看出来，随着压力的增大，方差逐渐变小，且趋于稳定。说明压力越大，半径的离散度越小，且逐渐趋于稳定，与直方图得出的结论一致。

2.2.2　相邻胞格中心距离

以相邻胞格中心距离为横坐标，以胞格个数为纵坐标，可得到相应的直方图。比较纵坐标的变化及圆心距的分布情况，可给出胞格分布的均匀程度。其中，在初始压力为 10.57 kPa 下得到的直方图，如图 8 所示。

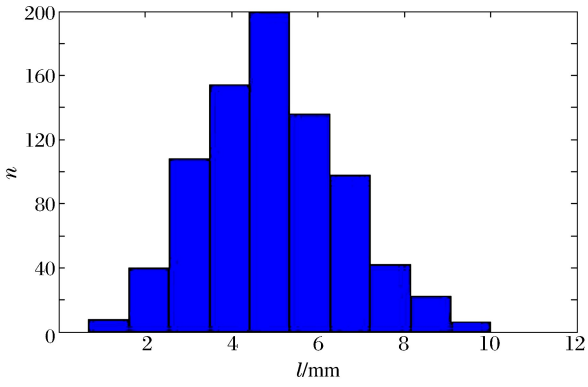


图 8　$C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 预混气爆轰端面结构圆心距等间距直方图

Fig. 8　Histograms with same center distance

可以看出，随着压力的增大，圆心距逐渐趋于集中，且个数逐渐变多，说明随着压力的增大，胞格分布趋于稳定。得到的不同初始压力下圆心距方差，见表 2。

比较方差的小大，可以发现，方差随初始压力的增大逐渐变小。说明压力越大圆心距的离散度越小，胞格的分布越均匀，与直方图得出的结论一致。

表 2 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 在不同压力下的半径方差和圆心距方差

Table 2 Radius variance, center distance variance of $C_2H_2+2.5O_2+70\%$ Ar under different pressures

p/kPa	$V(r)$/mm	$V(l)$/mm
5.32	3.169 8	9.983 9
5.74	2.446 1	7.080 4
7.45	2.145 4	5.511 7
10.57	0.674 8	2.189 6
12.71	0.331 2	1.218 9

表 3 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 在不同压力下的半径方差和圆心距方差

Table 3 Radius variance, center distance variance of $C_2H_2+2.5O_2+85\%$ Ar under different pressures

p/kPa	$V(r)$/mm	$V(l)$/mm
8.40	11.779 9	26.149 0
10.50	5.065 9	10.481 2
14.00	1.910 5	6.992 6
15.57	1.905 4	5.861 6
16.23	1.354 0	4.797 7

2.3 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 端面结构处理

2.3.1 胞格半径

同样，以胞格半径为横坐标，以相应胞格个数为纵坐标，得到相应的直方图。比较纵坐标的变化及半径的分布情况，给出胞格大小的集中程度。其中，在初始压力为 16.23 kPa 下得到的直方图，如图 9 所示。

由直方图可以看出，随着压力的增大，半径越来越小，且圆的个数越来越多。说明随着压力的增大，胞格大小更加稳定，胞格半径集中在 2～5 mm。同样，可以得到半径的方差，见表 3。

通过方差的小大变化，可以看出，随着压力的增大，方差逐渐变小。说明压力越大，半径的离散度越小，胞格大小更加稳定，与直方图得出的结论一致。

2.3.2 相邻胞格中心距离

同样，相邻胞格中心的距离为横坐标，以相应的胞格个数为纵坐标，得到相应的直方图。比较纵坐标的变化及相邻胞格中心距离的分布情况，给出胞格分布的均匀程度。其中，在初始压力为 16.23 kPa 下得到的直方图，如图 10 所示。

从直方图可以发现，随着压力的增大，圆心距逐渐趋于集中，且个数逐渐变多。说明随着压力的增大，胞格分布趋于稳定。同样，可以得到圆心距的方差，见表 3。

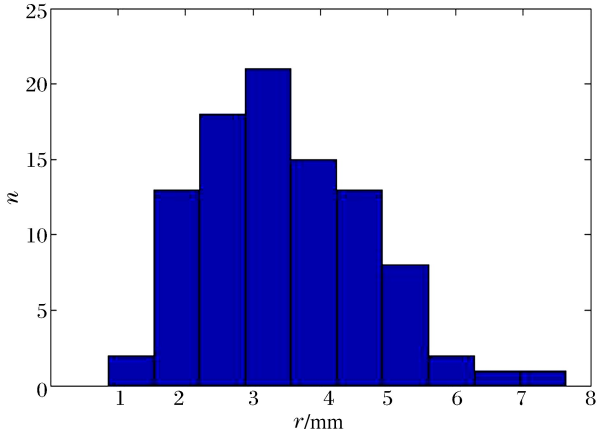


图 9 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气爆轰端面结构半径等间距直方图

Fig. 9 Histograms with same radius distance

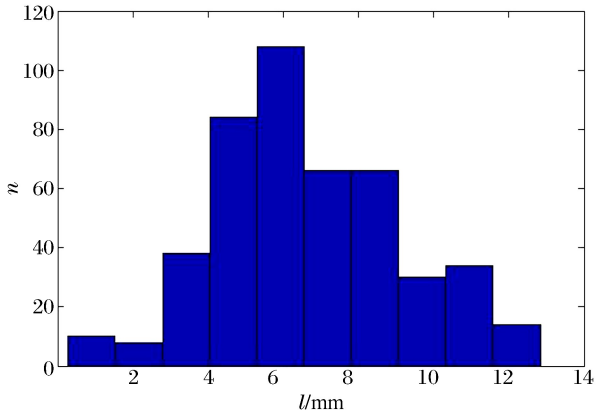


图 10 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气爆轰端面结构圆心距等间距直方图

Fig. 10 Histograms with same center distance

通过方差的小大可以看出来，随着压力的增大，方差逐渐变小。说明压力越大圆心距的离散度越小，胞格的分布越均匀，与直方图得出的结论一致。

2.4　不同 Ar 浓度的对比分析

不同预混气体的活化能受到初始压力的影响较大，导致不同初始压力下形成的端面胞格数量差别太多，样本数量不够精确，所以压力较小时得到的胞格数量样本不够。因此，尝试分析胞格数近似的不同预混气的端面结构的稳定性。将 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 及 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气在不同初始压力下形成的端面结果，通过编程处理得到的胞格数及半径方差与圆心距方差进行对比分析，如图 11～12 所示。

由图可知，胞格数相近的 $C_2H_2+2.5O_2$ 预混气，Ar 浓度越高，半径方差及圆心距方差越小。说明胞格的稳定性随着 Ar 浓度的升高而增强。

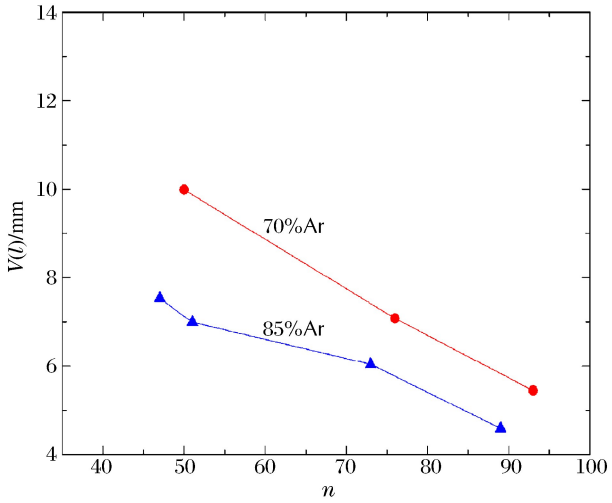


图 11　不同浓度预混气胞格半径方差随胞格数的变化

Fig. 11　Variation of radius variance with number of cell for different Ar concentrations

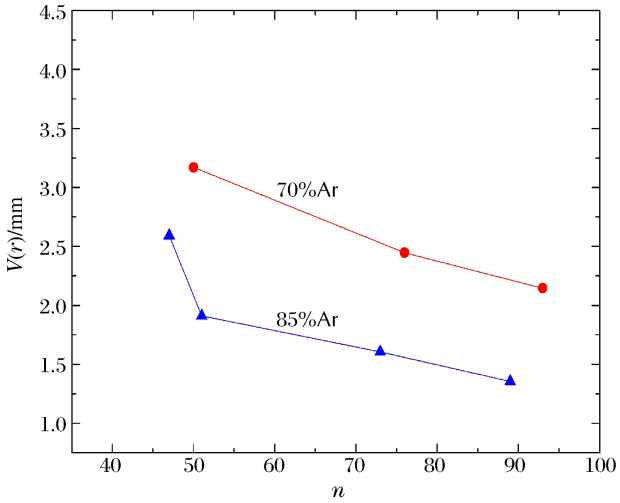


图 12　不同浓度预混气相邻胞格圆心距方差随胞格数的变化

Fig. 12　Variation of center distance variance with number of cell for different Ar concentrations

3　结　论

(1)在内径 63.5 mm 圆形管道进行爆轰实验，得到不同 Ar 浓度的乙炔预混气在不同初始压力下形成的端面结构。

(2)使用数字化图像技术，处理实验得到了端面烟膜记录，获得不同初始条件下的 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 和 $C_2H_2+2.5O_2+85\%Ar$ 预混气的爆轰端面结构。其中 $70\%Ar$ 预混气得到的胞格半径稳定在 1.5～3.0 mm，半径方差在 0.331 2～3.169 8 mm，圆心距方差在 1.218 9～9.983 9 mm；$85\%Ar$ 预混气得到的胞格半径稳定在 2.0～5.0 mm，半径方差在 1.354 0～11.779 9 mm，圆心距方差在 4.797 7～26.149 0 mm。并且，随着压力的增大，胞格更加稳定且更加均匀。

(3)在胞格数近似的情况下，$85\%Ar$ 预混气得到的半径方差及圆心距方差比 $70\%Ar$ 的方差小，Ar 浓度越高的预混气得到的胞格结构越稳定。

参考文献：

[1]　STREHLOW R A, LIAUGMINAS R, WATSON R H, et al. Transverse wave structure in detonations[J]. Symposium on Combustion, 1967,11(1):683-692.

[2]　喻健良，高远，闫兴清，等. 高浓度氩气稀释气体爆轰波临界管径和临界间距关系[J]. 爆炸与冲击，2015,35(4):603-608.

YU Jianliang, GAO Yuan, YAN Xingqing, et al. Correlation between the critical tube diameter and annular interval for detonation wave in high-concentration argon diluted mixtures[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(4): 603-608.

[3] BIVOL G Y, GOLOVASTOV S V, GOLUB V V. Prechamber initiation of gaseous detonation in a channel[J]. Combustion Science and Technology, 2016,188(7):1165-1179.

[4] 张博,白春华.气相爆轰动力学特征研究进展[J].中国科学:物理学、力学、天文学,2014,44(7):665-681.
ZHANG Bo, BAI Chunhua. Research progress on the dynamic characteristics of gaseous detonation[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica and Astronomica, 2014,44(7):665-681.

[5] 姜宗林,滕宏辉.气相规则胞格爆轰波起爆与传播统一框架的几个关键基础问题研究[J].中国科学:物理学、力学、天文学,2012,42(4):421-435.
JIANG Zonglin, TENG Honghui. Research on some fundamental problems of the universal framework for regular gaseous detonation initiation and propagation[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica and Astronomica, 2012,42(4):421-435.

[6] 张博, LEE J H S, 白春华.高浓度氩气稀释对 C2H2-2.5O2 气体直接起爆临界能量影响的实验研究[J].高压物理学报,2012,26(1):55-62.
ZHANG Bo, LEE J H S, BAI Chunhua. Experiment investigation of the influence of highly argon dilution on the critical initiation energy for direct initiation of C_2H_2-2.$5O_2$ mixtures[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(1):55-62.

[7] 韩学斌.管道内甲烷-空气预混气体火焰传播特性和结构特征的研究[D].北京:北京化工大学,2011.

[8] TROTSYUK A V, FOMIN P A, VASIL'EV A A. Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36:394-403.

[9] 徐晓峰,解立峰,彭金华,等.环氧丙烷-空气混合物爆轰波胞格结构的研究[J].爆炸与冲击,2004,24(2):158-162.
XU Xiaofeng, XIE Lifeng, PENG Jinhua, et al. Study on the detonation cellular structure of propylene epoxide-air [J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):158-162.

[10] 王昌建,徐胜利.直管内胞格爆轰的基元反应数值研究[J].爆炸与冲击,2005,25(5):405-416.
WANG Changjian, XU Shengli. Numerical study on cellular detonation in a straight tube based on detailed chemical reaction model[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):405-416.

[11] 刘岩,武丹,王健平.低马赫数下斜爆轰波的结构[J].爆炸与冲击,2015,35(2):203-207.
LIU Yan, WU Dan, WANG Jianping. Structure of oblique detonation wave at low inflow Mach number[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(2):203-207.

[12] TENG H, NG H D, KANG L, et al. Evolution of cellular structures on oblique detonation surfaces[J]. Combustion & Flame, 2014,162(2):470-477.

[13] SHEPHERD J E, MOEN I O, MURRAY S B, et al. Analyses of the cellular structure of detonations[J]. Symposium on Combustion, 1986,21(1):1649-1658.

[14] SHEPHERD J E, TIESZEN S R. Detonation cellular structure and image proces[C]// The 21st International Symposium on Combustion. Munich, West Germany, 1986.

[15] LEE J J, FROST D L, LEE J H S, et al. Digital signal processing analysis of soot foils[C]//KUHL A, LEYER J, BORISOV A, et al. Dynamic aspects of detonations. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993:182-202.

[16] LEE J J, GARINIS D, FROST D L, et al. Two-dimensional autocorrelation function analysis of smoked foil patterns[J]. Shock Waves, 1995,5(3):169-174.

[17] ZHAO H J, LEE J H S, LEE J, et al. Quantitative comparison of cellular patterns of stable and unstable mixtures[J]. Shock Waves, 2016,26(5):621-633.

[18] 赵焕娟, LEE J H S, 张英华,等.边界条件对甲烷预混气爆轰特性的影响[J].爆炸与冲击,2017,37(2):201-207.
ZHAO Huanjuan, LEE J H S, ZHANG Yinghua, et al. Effects of boundary conditions on premixed CH_4+2O_2 detonation characteristics[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(2):201-207.

[19] LEE J H S. The detonation phenomenon[M]. New York: Cambridge University Press, 2008.

[20] VOITSEKHOVSKII B V, MITROFANOV V V, TOPCHIYAN M E. Structure of the detonation front in gases (survey)[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1969,5(3):267-273.

[21] 赵焕娟，LEE J H S，张英华，等. 爆轰波三波点擦除烟迹表面积碳机制[J]. 工程科学学报，2017,39(3):335-341. ZHAO Huanjuan, LEE J H S, ZHANG Yinghua, et al. Precise mechanism of triple point passage removing soot on soot-coated surface[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017,39(3):335-341.

High-frequency spiral detonation end-on records of premixed $C_2H_2+2.5O_2$ with different argon dilution

ZHAO Huanjuan, BO Yulan, ZHANG Yinghua, YAN Yiran

(*School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to study the internal structure of premixed gas detonation, detonation experiments and calculation analysis of $C_2H_2+2.5O_2$ premixed gas diluted with different concentrations of argon were performed. Firstly, the detonation experiment was carried out in a pipe with an internal diameter of 63.5 mm. The detonation end-on structures of $C_2H_2+2.5O_2$ premixed gas under different initial pressures were recorded by using smoke glass. Digital image processing was used to analyze the three-point of smoked glass records to reduce human errors. Then, the regular graphics were obtained after the examination of experimental results, the calculations of experimental results were performed using a verified program. From the end-on structure, the closed graph is fitted with circle. The uniformity of cell size was expressed by the variance of cell radius. The regularity of the distribution of cell lattices was expressed by the variance of the distance between the centers of adjacent cells. By comparing the variance of the radius and the variance of the center distance with the change of cell number in different argon dilution, the size and distribution regulation of $C_2H_2+2.5O_2$ premixed gas under different argon dilution were given. With the increase of argon concentration, the size and distribution of the cell is more regular.

Keywords: premixed C_2H_2-O_2 mixtures; detonation experiment; smoked glasses; stability; end-on cellular structure

（责任编辑　丁　峰）