文章编号：1000-5773(2013)02-0287-05

C_2H_2-O_2-Ar 混合气体爆轰特征参数研究*

张　博[1,2]，白春华[2]

（1.华东理工大学资源与环境工程学院，上海　200237；
2.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：通过实验对 C_2H_2-O_2-Ar 混合气体的临界起爆能量和爆轰临界管径进行测量，基于临界起爆能量计算爆炸长度，分析爆炸长度与爆轰胞格尺寸及临界管径之间的规律，并对各种物质临界起爆能量与诱导区长度的关系进行了研究。结果表明：C_2H_2-O_2 混合气体，其爆炸长度与胞格尺寸之间的关系为 $R_0=26\lambda$，加入 50%和 70%氩气稀释的混合物，两者的关系分别为 $R_0=37.3\lambda$ 和 $R_0=54.8\lambda$；C_2H_2-O_2-Ar 混合气体爆炸长度与爆轰临界管径之间的关系为 $R_0=2D_C$；对于 70%浓度氩气稀释的 C_2H_2-O_2 混合气体，其爆轰波具有稳定的一维 ZND 结构，临界起爆能量正比于诱导区长度的 3 次方。

关键词：临界起爆能量；临界管径；胞格尺寸；爆炸长度；诱导区长度

中图分类号：O381　　**文献标识码**：A

1　引　言

乙炔与氧气混合物（C_2H_2-O_2）由于爆轰敏感度极大，在较小的点火能量下即可形成爆轰，并且爆轰波的传播速度波动非常大，传播规律极不稳定，所以胞格极不规则；而一旦加入高浓度的氩气（Ar）进行稀释，则胞格趋于规则，爆轰波的传播速度也较稳定，因此，在研究爆轰机理的过程中广泛运用 C_2H_2-O_2-Ar 混合气体[1-2]。爆轰胞格尺寸、临界管径、临界起爆能量、爆炸长度和诱导区长度是研究爆轰涉及最多的特征参数，也可作为判断混合物爆轰敏感度的依据[3-4]。其中爆炸长度依赖于临界起爆能量，是描述起爆源能量分布的特征参数。Radulescu 等[5]的研究表明，爆炸长度不会随着爆轰空间维数的变化而改变；Lee 等[6]考虑到爆炸长度必须联立化学反应长度尺寸才能对爆轰波的结构进行描述，并推测得出如果爆轰波处于自持状态，则爆炸长度的临界值与爆轰结构中的化学反应长度存在着线性比例关系。因此，本研究首先通过实验测定 C_2H_2-O_2-Ar 混合气体临界起爆能量和爆轰临界管径，在此基础上研究爆炸长度与爆轰胞格以及临界管径的联系；其次，对 C_2H_2-O_2 以及加入高浓度氩气的混合物进行研究，分析临界起爆能量与诱导区长度之间的关系。

2　实验原理和方法

2.1　直接起爆时测定临界起爆能量的装置

直接起爆实验主要是在直径为 8 英寸、壁厚为 2 英寸的高压球形容器中进行，装置如图 1 所示。容器壁上安装 PCB 压力传感器，用于测定爆炸波到达壁面的时间和压力，通过时间的长短和爆炸压力大小来判断是否成功形成爆轰，并通过容器底部的冲击波探针得到爆炸波到达容器底部的时间来进一步验证是否形成球面爆轰。点火系统主要包括高压电源、电容、间隙开关、触发开关（TM-11A）、电流转化

* **收稿日期**：2011-04-07；**修回日期**：2011-08-04

基金项目：中央高校基本科研业务费资助项目（222201314030）；中国博士后科学基金（2012M520852）；上海市博士后基金（13R21411800）

作者简介：张　博（1983—），男，博士，主要从事气相爆轰直接起爆研究. E-mail：zhangb@live.cn

系统和电火花点火装置。电路中的电流信号通过电流转换器转化为示波器中的电压信号，并通过对信号的分析得出电火花的放电能量。在电极的末端是间隙为 3.5 mm 的火花塞，电路触发以后通过火花塞产生放电能量，放电能量的大小通过控制放电电压的高低和改变电容大小来实现。直接起爆的临界起爆能量测量可参考文献[1,7]。

2.2 测定爆轰临界管径的装置

C_2H_2-O_2-Ar 混合气体爆轰临界管径的测定在图 2 所示装置中进行，装置由垂直的爆轰管与球形容器连接而组成。实验中采用高压电火花起爆，管内靠近起爆端一侧是长度约 100 mm、深度为 3 mm 的螺旋凹槽，用于增加对爆炸波的扰动，以便在垂直管中形成爆轰。在球形容器上方的管内安装有光学探针，容器底部为冲击波探针，两者分别用于测定爆炸波在各处的到达时间，并通过计算得出爆炸波的速度，根据速率大小判断在管内和在球形容器中是否形成爆轰。在实验之前，通过真空泵把容器内的压力抽至小于 80 Pa，然后打开球阀缓慢加入混合气体，并通过电子压力表控制进入容器的气体量。为保证管内的气体浓度均匀，加入气体 10 min 后进行点火。管内气体的浓度通过管内压力与标准压力的混合物浓度对比得出。当管径确定时，通过改变初始压力的大小，测定在该管径时爆轰波可成功传播至自由场形成球面爆轰的临界压力，并且通过使用不同直径的爆轰管来改变内径。

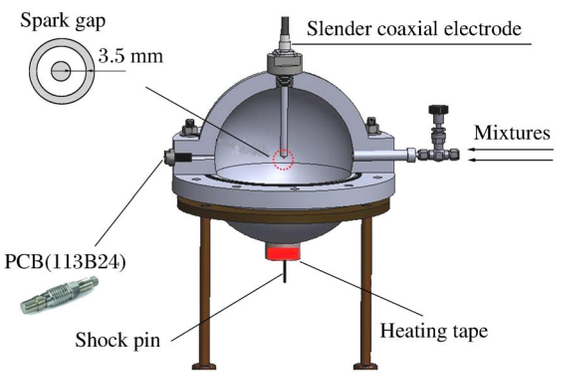


图 1 直接起爆实验装置

Fig. 1 Sketch of spherical bomb for direct initiation

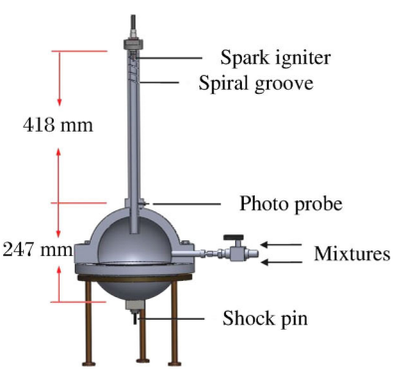


图 2 测定临界管径的实验装置

Fig. 2 Sketch of apparatus for critical tube experiment

3 实验结果与讨论

3.1 C_2H_2-O_2-Ar 临界起爆能量与爆轰管径

3.1.1 临界起爆能量

通过实验测定的 C_2H_2-O_2-Ar 混合气体在不同初始条件下的临界起爆能量如图 3 所示。

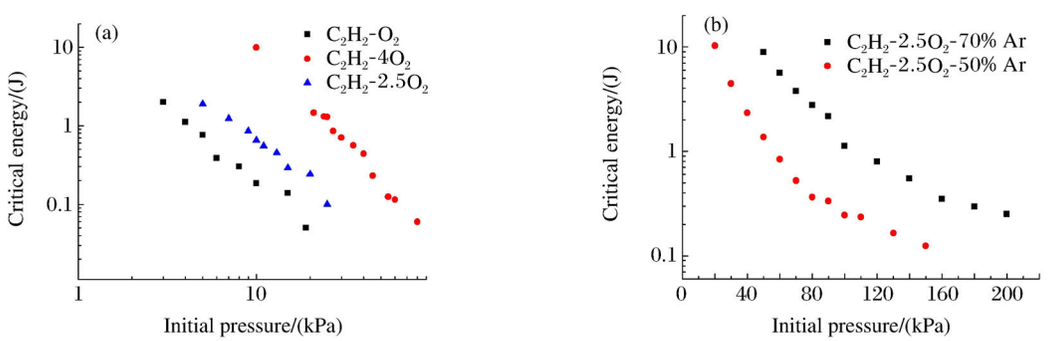


图 3 C_2H_2-O_2-Ar 混合物在不同初始条件下的临界起爆能量

Fig. 3 The critical energy at each initial condition for C_2H_2-O_2-Ar mixtures

图 3(a)给出的是 C_2H_2-O_2、C_2H_2-2.5O_2 和 C_2H_2-4O_2 3 种混合气体在不同初始压力下的临界起爆能量。图 3(b)给出的是理论配比的 C_2H_2-O_2 分别加入体积浓度为 50%和 70%氩气后的混合气体在不同初始压力下的临界起爆能量。以上实验中初始温度为 29 K,湿度为 40%。

3.1.2 爆轰临界管径

实验测得的 C_2H_2-O_2-Ar 混合气体在各直径的管道中可传播至自由场形成球面爆轰的临界压力如图 4 所示。对于未用氩气稀释的混合气体,临界管径的测量值与 Matsui 和 Lee[6] 以前所得到的数据曲线基本吻合。

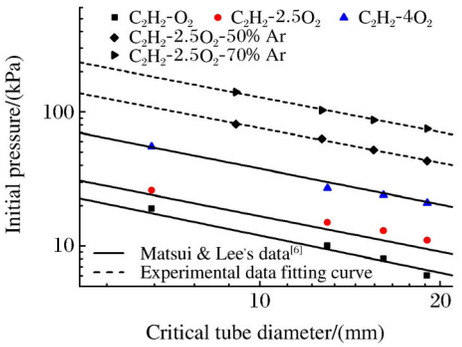


图 4 C_2H_2-O_2-Ar 混合物在不同管径中可以传播至自由场形成球面爆轰的压力

Fig. 4 Critical tube diameter as a function of initial pressure for C_2H_2-O_2-Ar mixtures

3.2 爆炸长度与爆轰胞格尺寸

爆炸长度(R_0)是依赖于临界起爆能量 E_C 的参数,可通过公式计算得到[6],即

$$R_0 = (E_C/p_0)^{1/3} \tag{1}$$

式中:p_0 为初始压力。爆轰胞格尺寸(λ)的实验值可由文献[8-9]获得,胞格尺寸与初始压力的拟合关系为 $\lambda = Cp_0^{-\alpha}$,拟合参数 C、α 见表 1。通过表 1 可得出爆炸长度与爆轰胞格尺寸之间的关系,如图 5 所示。由图 5 可知,对未用氩气稀释的混合物,爆炸长度与爆轰胞格尺寸之间为线性关系,即 $R_0 = 26\lambda$。拟合公式的决定系数 R^2 为 0.844,最大偏差为 39.05%,且该关系式对 3 种不同比例混合的物质都适用。然而对于 C_2H_2-2.5O_2 混合物加入 50%体积的氩气稀释,爆炸长度与爆轰胞格尺寸之间仍为线性关系,但是比例系数为 37.3;加入 70%体积的氩气稀释后,线性关系为 $R_0 = 54.8\lambda$。

表 1 爆轰胞格尺寸与初始压力关系曲线的拟合参数

Table 1 The fitting parameters of the relationship between cell size and the initial pressure

Mixtures	C	α	Mixtures	C	α
C_2H_2-O_2	9.24	0.96	C_2H_2-2.5O_2-50%Ar[9]	61.50	1.12
C_2H_2-2.5O_2	18.90	1.02	C_2H_2-2.5O_2-70%Ar[9]	113.81	1.20
C_2H_2-4O_2	54.97	1.17			

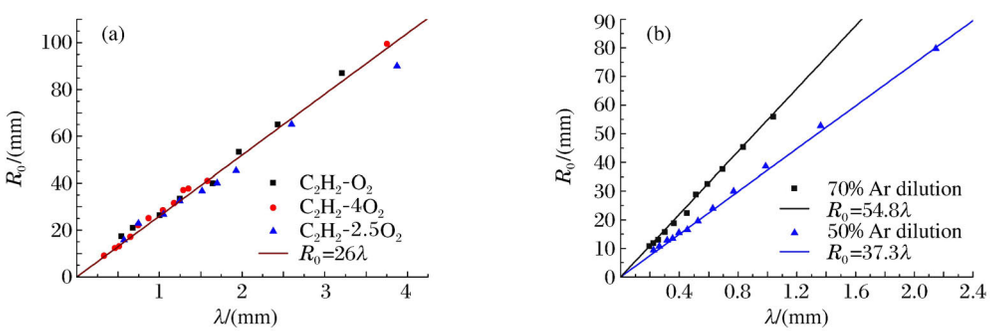


图 5 C_2H_2-O_2-Ar 混合物爆炸长度与胞格尺寸之间的关系

Fig. 5 Explosion length as a function of cell size for C_2H_2-O_2-Ar mixtures

3.3 爆炸长度与爆轰临界管径

通过实验测得不同初始压力下各种物质可以成功形成球面爆轰的临界管径(D_C),并与该压力下胞格尺寸进行比较,可得出爆轰临界管径与胞格尺寸的关系,如图 6 所示。图 6 表明,对于未用氩气稀释的混合物,爆轰临界管径与胞格尺寸之间的关系为 $D_C = 13\lambda$,该结论与 Mitrofanov 等人[10] 和 Edwards 等人[11] 的研究结论吻合。实验同时发现对于 C_2H_2-2.5O_2-50%Ar 混合物,$D_C = 21\lambda$;C_2H_2-2.5O_2-70%Ar 混合物,$D_C = 29\lambda$。由此得出 C_2H_2-O_2-Ar 混合物爆炸长度与爆轰临界管径的参量关系,如图 7 所

示。由图 7可知，C_2H_2-O_2-Ar 混合物爆炸长度与爆轰临界管径之间的关系为线性，即

$$R_0 = 2D_C \tag{2}$$

(2)式拟合的决定系数 R^2 为 0.929，最大偏差为 15.65%。

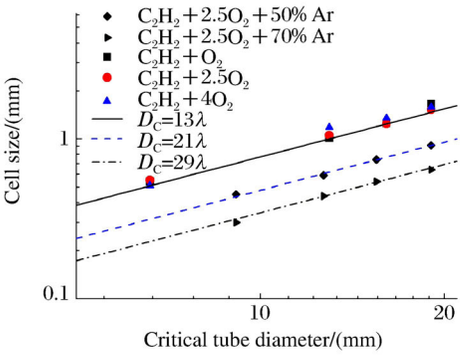


图 6 C_2H_2-O_2-Ar 混合物爆轰临界管径与胞格尺寸之间的关系

Fig. 6 Critical tube diameter as a function of cell size for C_2H_2-O_2-Ar mixtures

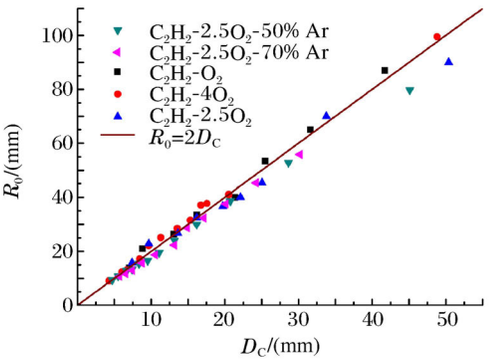


图 7 C_2H_2-O_2-Ar 混合物爆炸长度与爆轰临界管径之间的关系

Fig. 7 Explosion length as a function of critical tube diameter for C_2H_2-O_2-Ar mixtures

3.4 临界起爆能量与诱导区长度

Zel'dovich[12] 早期针对爆轰波研究曾提出，理想的爆轰波具有稳定的一维 ZND 结构，爆轰波如果能自持传播就必须满足：当爆炸波衰减为 CJ 状态时，爆炸波的半径必须至少约为诱导区的长度；并提出临界起爆能(E_C)与 ZND 诱导区长度(Δ_I)的 3 次方成正比关系，即

$$E_C \propto \Delta_I^3 \tag{3}$$

但在通常情况下，Lee 等[13] 研究发现，在爆轰波传播过程中不稳定性起决定性作用，爆轰波具有不稳定的三维结构。研究同时发现，如果加入高浓度氩气进行稀释以后，不稳定性在爆轰传播过程中失去主导作用，胞格趋于规则，爆轰波具有 ZND 结构。

ZND 诱导区长度通过 Chemkin 程序[14] 和 Konnov[15] 化学反应动力机制计算得到，因此，C_2H_2-O_2-Ar各混合气体临界起爆能量与诱导区长度 3 次方之间的关系如图 8 所示。由图 8 可知，对于 C_2H_2-O_2、C_2H_2-$4O_2$ 和 C_2H_2-$2.5O_2$ 混合气体，甚至加入 50%体积浓度氩气稀释的混合气体，临界起爆能量与 ZND 诱导区 3 次方之间是 $E_C=(\Delta_I^3)^a$ 的乘幂关系，而非线性关系；而对于 C_2H_2-$2.5O_2$-70%Ar 混合气体，临界起爆能量与诱导区 3 次方之间的参量关系非常接近线性，即

$$E_C = 7.2\times10^5\Delta_I^3$$

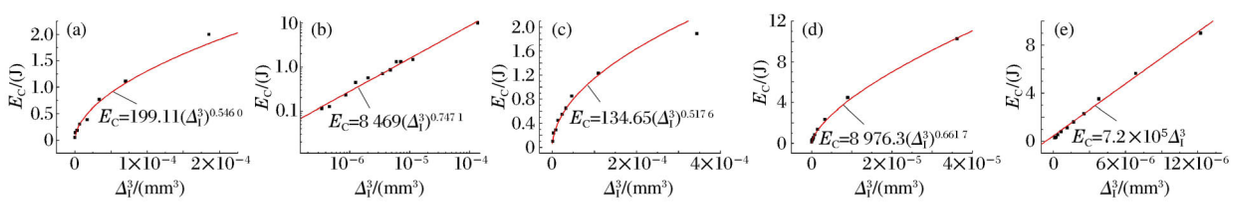


图 8 C_2H_2-O_2-Ar 混合物在不同初始条件下的临界起爆能量

Fig. 8 The critical energy at each initial condition for C_2H_2-O_2-Ar mixtures

4 结 论

通过实验测量和分析得出以下结论：(1) C_2H_2-O_2 混合气体，其爆炸长度与胞格尺寸之间的关系为 $R_0=26\lambda$，对于加入 50% 和 70% 氩气稀释的混合物，两者的关系分别为 $R_0=37.3\lambda$ 和 $R_0=54.8\lambda$；(2) C_2H_2-O_2-Ar 混合气体，爆炸长度与爆轰临界管径之间的关系为 $R_0=2D_C$；(3) 70%浓度氩气稀释的 C_2H_2-O_2 混合气体，爆轰波具有稳定的一维 ZND 结构，临界起爆能量正比于诱导区长度的 3 次方。

References：

[1] Zhang B, Kamenskihs V, Ng H D, et al. Direct blast initiation of spherical gaseous detonation in highly argon diluted mixtures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2265-2271.

[2] Radulescu M I, Ng H D, Lee J H S, et al. The effect of argon dilution on the stability of acetylene-oxygen detonations [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2825-2831.

[3] Lee J H S. Initiation of gaseous detonation [J]. Ann Rev Phys Chem, 1977, 28: 75-104.

[4] Lee J H S. Dynamic parameters of gaseous detonations [J]. Ann Rev Fluid Mech, 1984, 16: 311-336.

[5] Radulescu M I, Higgins A J, Lee J H S, et al. On the explosion length invariance in direct initiation of detonation [J]. Proc Combust Inst, 2000, 28(1): 637-644.

[6] Matsui H, Lee J H. On the measure of the relative detonation hazards of gaseous fuel-oxygen and air mixtures [J]. Symposium (International) on Combustion, 1979, 17(1): 1269-1280.

[7] Kamenskihs V, Ng H D, Lee J H S. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in high-pressure H_2-O_2 mixtures [J]. Combust Flame, 2010, 157(9): 1795-1799.

[8] Kaneshige M, Shepherd J E. Detonation database, FM97-8 [R]. USA: Explosion Dynamics Laboratory, 1997.

[9] Radulescu M I. The propagation and failure mechanism of gaseous detonations: Experiments in porous-walled tubes [D]. Montreal: McGill University, 2003.

[10] Mitrofanov V V, Soloukhin R I. The diffraction of multifront detonation waves [J]. Sov Phys Dokl, 1965, 9(12): 1055.

[11] Edwards D H, Hooper G, Morgan J M. An experimental investigation of the direct initiation of spherical detonations [J]. Acta Astronautica, 1976, 3(1/2): 117-130.

[12] Zel'dovich Y B, Kogarko S M, Simonov N N. An experimental investigation of spherical detonation in gases [J]. Sov Phys Tech Phys, 1957, 1: 1689-1713.

[13] Lee J H S, Radulescu M I. On the hydrodynamic thickness of cellular detonations [J]. Combustion, Explosion, Shock Waves, 2005, 41(6): 745-765.

[14] Kee R J, Rupley F M, Miller J A. Chemkin-Ⅱ: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics, SAND89-8009. UC-401 [R]. USA: Sandia National Laboratories, 1989.

[15] Konnov A A. Detailed reaction mechanism for small hydrocarbons combustions: Project-in-progress on the world wide web [EB/OL]. http://homepages. Vub. Ac. be/akonnov/.

Investigation on the Characteristic Detonation Parameters of C_2H_2-O_2-Ar Mixtures

ZHANG Bo[1,2], BAI Chun-Hua[2]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai* 200237, *China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The critical initiation energy and critical tube diameter of C_2H_2-O_2-Ar mixtures were measured in the experiment. The relationship between explosion length, which is theoretical calculated from critical energy, and detonation cell size as well as critical tube diameter was analyzed. The relationship between critical initiation energy and induction zone length was also investigated for each mixture. The results show that, for C_2H_2-O_2 mixtures, a parametric relationship between explosion length and cell size is $R_0=26\lambda$, however, this function is changed to $R_0=37.3\lambda$ and $R_0=54.8\lambda$ when 50% and 70% argon diluted, respectively. The relationship between critical tube diameter and explosion length is $R_0=2D_C$. The results indicate that detonation has stable one-dimension ZND structure when argon dilution up to 70%, and a linear relationship is found between critical energy and the cube of induction zone length.

Key words: critical initiation energy; critical tube diameter; cell size; explosion length; induction zone length