文章编号：1000-5773(2012)01-0055-08

高浓度氩气稀释对 C_2H_2-2.5O_2 气体直接起爆临界能量影响的实验研究*

张　博[1]，Lee John H S[2]，白春华[1]

（1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081；
2. Department of Mechanical Engineering，McGill University，Montreal H3A 2K6，Canada）

摘要：采用高压电点火进行直接起爆，通过放电过程中电流的输出信号确定起爆能量，实验测定了 C_2H_2-2.5O_2 气体和加入摩尔浓度为70%氩气的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体直接起爆的临界起爆能量，研究了高浓度氩气稀释对 C_2H_2-2.5O_2 混合物临界起爆能量的影响。实验测得的混合物临界起爆能量实验值与 Lee 等人的表面积能量理论值基本吻合。研究表明：C_2H_2-2.5O_2 气体和加入摩尔浓度为70%氩气的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体的临界起爆能量均依赖于初始压力，并呈反相关指数关系；在相同实验条件下，高浓度氩气稀释极大提高了混合气体直接起爆的临界起爆能量。分析认为，由于临界起爆能量正比于诱导区长度的3次方，因此在相同初始压力下，高浓度氩气的稀释增加了 C_2H_2-2.5O_2 混合气体爆轰诱导区长度，并最终导致其临界起爆能量的显著上升。

关键词：直接起爆；临界起爆能量；诱导区长度；电火花点火；氩气
中图分类号：O381　　**文献标识码**：A

1　引　言

爆轰的直接起爆也称为直接爆炸起爆，是指起爆源在极短时间内产生强爆炸波能量作用于混合气体而瞬间直接形成爆轰，不经历火焰加速这个预爆轰阶段[1-2]。自20世纪50年代，Zel'dovich 等人[3]就已开始研究直接爆炸起爆引起的球面爆轰，他们发现直接起爆的本质就是起爆源在瞬间产生足够大的能量。对于给定的爆炸性气体，通过实验来测定该混合物形成爆轰的最小起爆能量是判断该混合物敏感度最直接和有效的方法[4]。研究直接起爆机理对于工业安全生产具有重要意义，通过基于实验数据而得出的先验理论，可以预测爆炸性混合物在特定条件下的临界起爆能量，从而有效控制危险源。

研究表明，凝聚炸药或高压低电感电容瞬间放电可以作为理想起爆源来直接起爆进而引起球面爆轰[5]。在过去几十年中，关于直接爆炸起爆已进行了广泛而系统的研究。通过基于实验数据而建立的理论模型，可以预测一些爆炸性混合气体在不同条件下的临界起爆能量[6]。然而，这些研究大都是通过间接的参数测定来获得临界起爆能量，由于选取模型和实验方法不同，即使对于相同条件下的相同物质，所得的临界起爆能量也具有数量级上的差异，并且得到的所谓临界起爆能量也未证明是否完全有效地作用于直接起爆。这些问题对于直接起爆至关重要，但是目前还没有很好地解决。

本研究通过电火花点火，测量 C_2H_2-2.5O_2 混合气体以及氩气（摩尔浓度为70%）稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体在不同初始压力下直接起爆的临界起爆能量，并与 Lee 等人[7-8]的表面积能量模型的理

* **收稿日期**：2010-07-13；**修回日期**：2010-08-16
基金项目：爆炸科学与技术国家重点实验室重点课题（ZDKT08-2）
作者简介：张　博（1983－），男，博士，主要从事气相燃烧及爆轰研究. E-mail：zhangb@live.cn

论值进行对比，分析高浓度氩气稀释对于临界起爆能量的影响，研究爆轰波在高浓度氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体中的传播和结构特点。

2 实验原理与方法

2.1 实验装置

实验在直径为 20.32 cm、壁厚为 5.08 cm 的高压球形容器中进行，实验装置如图 1 所示。实验前，首先用真空泵对容器进行抽真空，使容器内的压力小于 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。容器壁上安装 PCB 压力传感器，用以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，并利用容器底部的冲击波探针获取爆炸波到达容器底部的时间，进一步验证是否形成爆轰。

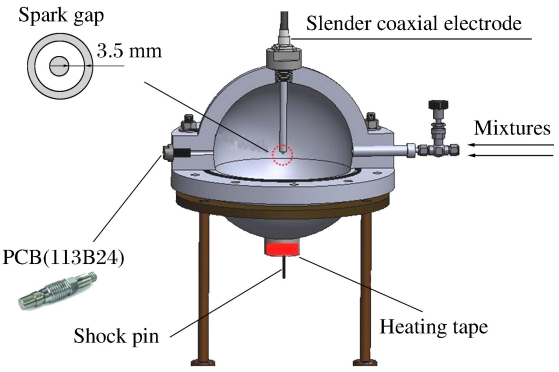


图 1 球形容器示意图

Fig. 1 Sketch of spherical bomb

点火系统主要包括高压电源、电容、间隙开关、触发开关(TM-11A)、电流转化系统和电火花点火装置，如图 2(a)所示。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，分析示波器中的信号便可以得到电火花放电能量。电极末端是间隙为 3.5 mm 的火花塞，电路触发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，点火系统可以简化成 *RLC* 电路，如图 2(b)所示。

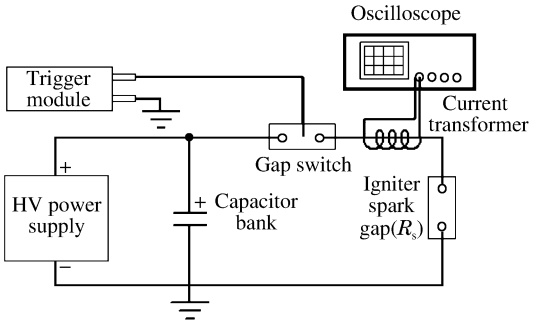


图 2(a) 点火系统示意图

Fig. 2(a) Schematic of the ignition system

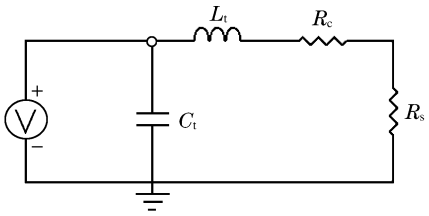


图 2(b) 点火系统等效 *RLC* 电路

Fig. 2(b) Equivalent *RLC* circuit of the ignition system

2.2 实验原理

通常情况下，电容中储存的总电能($E_t=CV^2/2$，C 为电容，V 为电压)被视为作用于混合气体的点火能量，然而在放电过程中由于存在能量损失和欧姆扩散等因素，E_t 仅作为点火能量在数量级上的参考，而不能代表真实起爆能量。研究表明，真正作用于混合物的起爆能量应为[9]

$$E=\int_0^{\infty} I^2 R_s \mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：I 为电流，R_s 为电火花电阻，t 为时间。对于衰减的震荡放电电流

$$I(t)=A\mathrm{e}^{-\alpha t}\sin(\omega t) \tag{2}$$

式中：α 为衰减系数，$\alpha=R_t/(2L_t)$，R_t 和 L_t 为总电阻和总电感；ω 为放电频率，$\omega=\omega_n(1-\zeta^2)^{1/2}$，其中 ω_n 为非衰减放电电流的自然频率，ζ 为阻尼系数。

为了计算作用于混合气体的真实起爆能量(E_s),采用 Kamenskihs 等人[10]提出的方法,对示波器中得到的信号进行分析,具体步骤为:(1)利用 Matlab 将示波器中的电压信号还原为电流信号,利用 ω 和 ζ 计算出电流的自然频率 ω_n;(2)计算电路中的电感,$L_t=(\omega_n^2 C_t)^{-1}$;(3)计算电路总电阻,即 $R_t=2L_t\alpha$;(4)由于电路总电阻 R_t 是电路元件电阻(R_c)与电火花电阻(R_s)之和,因此短路时 $R_s\approx 0$,即 $R_t=R_c$,开路时 $R_t=R_c+R_s$,从而确定了电火花电阻 R_s;(5)利用(1)式计算得出电火花的放电能量 E。

Kamenskihs 等人[10]的研究证明,由于起爆过程非常短,仅为放电时间的 1/4 周期,因此,在放电过程中只有最初 1/4 周期($T/4$)的放电能量真正作用于起爆过程,之后的放电能量对于起爆过程没有影响,因此直接起爆能量为

$$E_s=\int_0^{T/4} I^2 R_s \mathrm{d}t \tag{3}$$

Zhang 等人[11]证实了该理论,并通过该方法准确计算出了氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体直接起爆的临界能量。利用 Kamenskihs 等人[10]的方法得到的放电能量及放电参数如表 1 所示。

表 1 电火花放电实验参数

Table 1 Parameters of the spark ignition

Circuit state	V_0/(kV)	C/(μF)	L/(μH)	ω_n/(MHz)	α/(10^4)	ζ	R_c/(Ω)	R_s/(Ω)	E_s/(J)
Short circuit	10	0.4	1.1791	1.4561	6.9247	0.0476	0.1633	0.0254	0.3059
Open circuit	10	0.4	1.1565	1.4703	8.1573	0.0555	0.1887	0.0254	0.3059
Short circuit	17	2	1.2430	0.6342	4.6262	0.0729	0.1150	0.0127	4.3915
Open circuit	17	2	1.2583	0.6304	5.0725	0.0805	0.1277	0.0127	4.3915

3 实验结果与讨论

3.1 球面爆轰形成的判断

图 3 和图 4 给出了初始压力 $p_0=100$ kPa 时,加入摩尔浓度为 70%的氩气后 C_2H_2-2.5O_2 混合气体在不同起爆能量(0.89 和 0.80 J)作用下产生的自持球面爆轰的爆燃波压力剖面,其中起爆能量由(3)式计算得到。从图 3 中可以看出,起爆能量为 0.89 J 时,85 μs 时混合气体压力陡然上升,此时爆炸

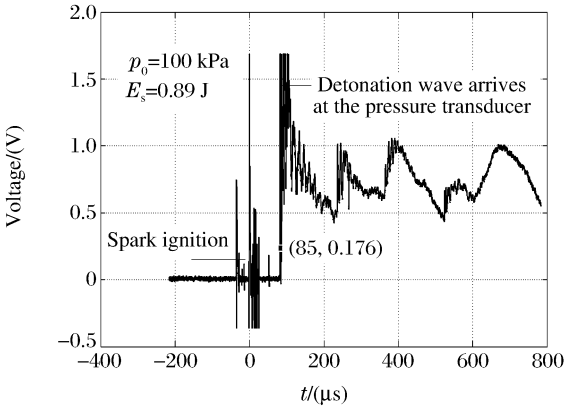


图 3 初始压力为 100 kPa 时摩尔浓度为 70%的氩气稀释后 C_2H_2-2.5O_2 混合气体成功直接起爆时的爆轰波压力剖面

Fig. 3 Detonation pressure trace for a successful direct initiation in C_2H_2-2.5O_2 mixture diluted with 70% argon at 100 kPa

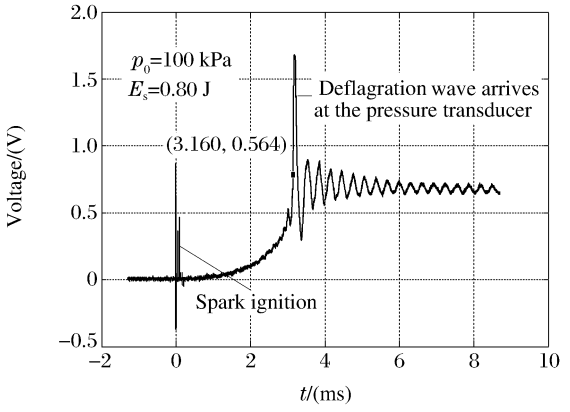


图 4 初始压力为 100 kPa 时摩尔浓度为 70%的氩气稀释后 C_2H_2-2.5O_2 混合气体不成功直接起爆时的爆轰波压力剖面

Fig. 4 Detonation pressure trace for a unsuccessful direct initiation in C_2H_2-2.5O_2 mixture diluted with 70% argon at 100 kPa

波速度为 1 705.8 m/s,爆炸波压力与初始压力的比值 $p/p_0=21.3$。由 CEA 程序可计算得到,该实验条件下 CJ 爆速 v_{CJ} 为 1 832.3 m/s,CJ 爆轰压力与初始压力的比值为 $p_{CJ}/p_0=23.7$。所以,爆炸波速度为 CJ 爆速的 93.1%,压力为 CJ 爆轰压力的 90%,可以确定该起爆能量作用下形成了稳定自持的爆轰波。由于球面爆轰波曲率会影响爆轰速度,因此爆轰的最终速度比 CJ 爆速略小。从图 4 中可以看出,时间约为 3 160 μs 时压力才产生突变,爆炸波速度为 45.9 m/s,故为爆燃波,这是由于起爆能量($E_s=0.80$ J)低于直接起爆的临界起爆能,即不能通过直接爆炸起爆得到球面爆轰,爆炸波形成后立即与其后的反应区解耦并迅速衰减,最终发展为爆燃。

为了提高实验的可靠性,在临界起爆能附近至少得到 3 次爆轰和 3 次爆燃结果。表 2 列出了成功直接起爆和不成功直接起爆产生爆燃波的实验结果,其中 V_0 为初始电压,v 为爆炸波速度。由表 2 中的 6 次实验结果可知,加入摩尔浓度为 70%的氩气稀释后,初始压力为 100 kPa 的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体直接起爆的临界起爆能应介于引起爆燃的最大能量(0.80 J)与引起爆轰最小能量(0.89 J)之间。

表 2 加入摩尔浓度为 70%氩气的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体直接起爆的实验结果($C=0.4$ μF,$p_0=100$ kPa)

Table 2 Results of direct initiation experiments in C_2H_2-2.5O_2 mixture diluted with 70% argon ($C=0.4$ μF,$p_0=100$ kPa)

No.	V_0/(kV)	E_i/(J)	E_s/(J)	v/(m/s)	v/v_{CJ}/(%)	p/p_{CJ}/(%)	Direct initiation
1	18	64.8	1.09	1 711.5	93.4	91.2	Yes
2	17	57.8	0.90	1 707.1	93.2	90.1	Yes
3	17	57.8	0.89	1 705.8	93.1	90.0	Yes
4	16	51.2	0.80	45.9	2.5	9.5	No
5	16	51.2	0.77	44.2	2.4	9.3	No
6	15	45.0	0.71	40.5	2.2	9.0	No

3.2 直接起爆的临界起爆能量

3.2.1 实验值与理论值的对比分析

本研究利用 Lee 等人[7-8]提出的表面积能量模型计算直接起爆的临界起爆能量,并与实验结果进行对比分析。

Lee 等人[7-8]的模型是基于爆轰核心理论,结合爆炸波及 Zel'dovich 理论,把点爆炸起爆模型与平面波起爆模型联系起来,将临界起爆能与作为爆轰特征长度的胞格尺寸相关联。他们认为,由点爆炸引起的爆轰波从过驱爆轰衰减到 CJ 状态时,球面爆轰波表面所含的能量等于平面爆轰在临界直径中的能量,即

$$4\pi R^{*2}=\pi d_c^2/4 \tag{4}$$

式中:d_c 为爆轰直径;R^* 为爆轰核心半径,$R^*=d_c/4$。根据强爆炸波理论,爆炸波能量 E_s 为

$$E_s=4\pi I_0\gamma p_0 Ma_s^2 r_s^3 \tag{5}$$

式中:I_0、γ 为常数,Ma_s 为爆炸波马赫数,r_s 为爆炸波曲率半径。依据 Zel'dovich 准则,当爆炸波衰减到 $Ma_s=Ma_{CJ}$(Ma_{CJ} 为 CJ 马赫数)时,可以得到 $r_s=R^*$。

对于高浓度氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体,爆轰直径与爆轰胞格尺寸 λ 的关系为 $d_c=25-30\lambda$[12],代入(5)式可得

$$E_s=4\pi I_0\gamma p_0 Ma_{CJ}^2\left(\frac{d_c}{4}\right)^3=\frac{3\,375}{2}\pi\rho_0 v_{CJ}^2 I_0\lambda^3 \tag{6}$$

式中:ρ_0 为混合气体的初始密度;I_0 为定常数,当 $\gamma=1.4$ 时,$I_0=0.423$。

另一方面,对于未稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体,爆轰传播机理中爆轰胞格的不稳定性起主导作用,爆轰直径与爆轰胞格尺寸的经验公式为:$d_c=13\lambda$[13],因此由(5)式可得

$$E_s=4\pi I_0\gamma p_0 Ma_{CJ}^2\left(\frac{13\lambda}{4}\right)^3=\frac{2\,197}{16}\pi\rho_0 v_{CJ}^2 I_0\lambda^3 \tag{7}$$

混合物爆轰胞格尺寸 λ 可由经验公式得到。对于加入摩尔浓度为 70%氩气的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体,胞格尺寸(λ,mm)与初始压力(p_0,kPa)的经验公式为 $\lambda = 18.9p_0^{-1.015}$[14]。对于未稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体,胞格尺寸的经验公式则是通过对 CALTECH 爆轰数据库中的胞格数据[15]拟合得到,即 $\lambda = 113.8p_0^{-1.20}$。图 5 给出了两种混合气体在不同初始压力条件下的爆轰胞格尺寸拟合曲线。由图 5 可知,在相同初始压力条件下高浓度氩气稀释的混合气体的爆轰胞格尺寸明显大于未稀释气体。

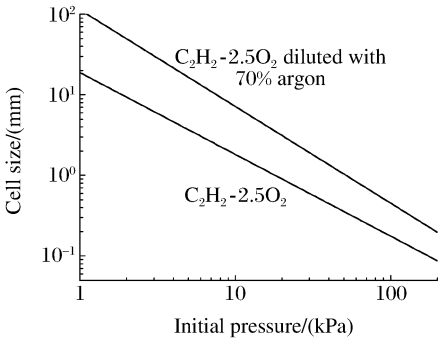


图 5　不同初始条件下氩气稀释和不稀释 C_2H_2-2.5O_2 混合物的爆轰胞格拟合曲线

Fig. 5　Detonation cell size-initial pressure fitting curve for C_2H_2-2.5O_2 mixtures with and without argon

由(6)式、(7)式计算得到两种混合物的临界起爆能量与实验结果的对比,如图 6、图 7 所示。图 6 中,对于加入摩尔浓度为 70%氩气的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体,实验测得的直接起爆的临界起爆能量(E_s,J)与初始压力(p_0,kPa)之间的拟合关系为

$$E_s = 10^6 p_0^{-2.9425} \tag{8}$$

从图 6 中可以看出:对于高浓度氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体,临界起爆能的实验值比理论值稍大,这是由于 Lee 等人的表面积模型是基于爆炸波理论,而实验得到的起爆能量是电火花放电能量,在起爆过程中绝大部分电火花能量转化为爆炸波能量,但还有部分电火花能量转化为光能和热能。

图 7 中,实验测得的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体直接起爆的临界起爆能量(E_s,J)与初始压力(p_0,kPa)之间的拟合关系为

$$E_s = 14.336p_0^{-1.359} \tag{9}$$

从图 7 中可以看出:当压力大于 15 kPa 时,实验值与理论值之间的规律与高浓度氩气稀释时的情况相似;而当压力小于 15 kPa 时,总体上实验数据与理论结果吻合较好,但理论值比实验值略大,这是由于 C_2H_2-2.5O_2 混合气体是爆轰敏感性极强的物质,低压下其胞格结构非常不规则,不同测量方法得到的爆轰胞格尺寸误差很大,而临界起爆能量与爆轰胞格尺寸之间是三次方关系(见(7)式),因此当压力小于 15 kPa 时,理论值的波动较大。

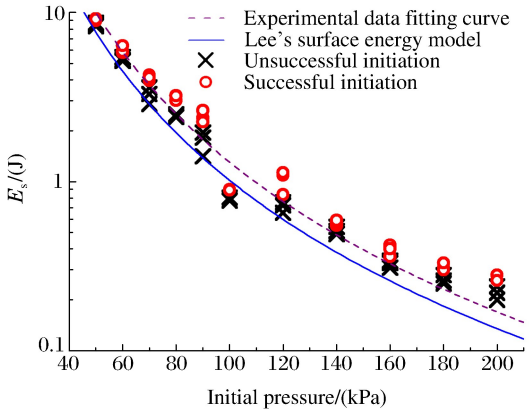


图 6　不同初始压力下 70%氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合物中直接起爆的临界起爆能

Fig. 6　Critical initiation energy as a function of initial pressure for direct initiation of C_2H_2-2.5O_2 mixture diluted with 70% argon

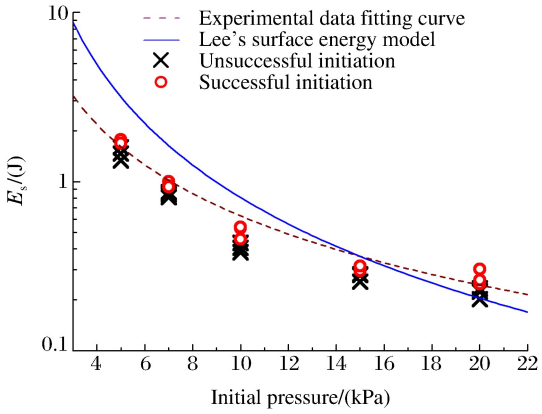


图 7　不同初始压力下 C_2H_2-2.5O_2 混合物中直接起爆的临界起爆能

Fig. 7　Critical initiation energy as a function of initial pressure for direct initiation of C_2H_2-2.5O_2 mixture

由图 6、图 7 可知:虽然混合物直接起爆临界起爆能量的实验值略大于理论值,但是考虑到电火花放电过程中存在部分能量损耗,因此总体上实验值与理论值吻合,验证了本实验方法可以比较精确地测定物质直接起爆的临界起爆能量;物质直接起爆的临界起爆能量依赖于初始压力,并且初始压力越低,混合物的临界起爆能量越高;初始压力为 50 kPa 时,摩尔浓度为 70%氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体的临界起爆能量为 8.97 J,而对于未稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合物,初始压力为 20 kPa 时,临界起爆能量仅为 0.23 J,表明高浓度氩气稀释极大提高了 C_2H_2-2.5O_2 混合气体的直接起爆临界能量。

3.2.2 高浓度氩气稀释对临界起爆能量的影响分析

由 3.2.1 节可知,高浓度氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体直接起爆的临界起爆能量明显大于未稀释混合物。这是因为高浓度氩气稀释使爆轰波在物质中的传播变得稳定,并且具有典型的一维稳定 ZND 模型结构。ZND 模型中,紧随冲击波的是分子热扩散产生的活性基团组成的诱导区。当基团浓度足够高时,反应物通过支链连锁反应迅速转化为爆炸产物。C_2H_2-2.5O_2 混合气体被高浓度氩气稀释后,反应产物的单位质量能量下降,因此 CJ 爆速下降,导致前导激波温度降低,化学反应时间增长。

通过 Chemkin 程序[16]和 Konnov 化学反应动力学原理[17],可以计算出 ZND 诱导区长度。在 C_2H_2-2.5O_2 混合气体中,诱导区长度(Δ,mm)与初始压力(p_0,kPa)之间的拟合关系为:$\Delta = 0.4318 p_0^{-1.1294}$;在氩气(摩尔浓度为 70%)稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合物中,诱导区长度(Δ,mm)与初始压力(p_0,kPa)的拟合关系为:$\Delta = 2.3215 p_0^{-1.127}$,如图 8 所示。由图 8 可知,在高浓度氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体中,诱导区长度明显增大,增幅约为一个数量级,这是由于 ZND 诱导区长度依赖于化学动力学参数,加入高浓度氩气后,混合物的基团浓度极大提高,ZND 诱导区长度增加[18]。

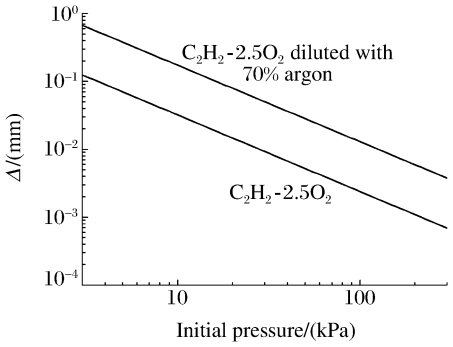


图 8 氩气稀释和未稀释 C_2H_2-2.5O_2 混合气体的 ZND 诱导区长度与初始压力的关系

Fig. 8 ZND induction zone length as a function of initial pressure for C_2H_2-2.5O_2 mixtures with and without argon

结合 λ-p_0 及 Δ-p_0 关系,若不考虑初始压力的影响,C_2H_2-2.5O_2 混合气体满足 $\lambda = 43.8\Delta$,高浓度氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体为 $\lambda = 49\Delta$。由于高浓度氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体的诱导区长度 Δ 比未稀释气体显著增大,因此氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体的爆轰胞格尺寸 λ 将显著大于未稀释气体。

Carnasciali 等人[19]的研究表明,碳氢气体与氧气混合物的爆轰直径 d_c 约为爆轰胞格尺寸的 13 倍,即 $d_c = 13\lambda$。在 C_2H_2-2.5O_2 混合物中加入高浓度氩气后,胞格不稳定性对爆轰波形成和传播的影响很小,爆轰能稳定传播,即为稳定的 ZND 爆轰,因此爆轰直径 d_c 与胞格尺寸 λ 的关系为 $d_c \approx 30\lambda$。在高浓度氩气稀释和未稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体中,爆轰直径大小和爆轰传播机理截然不同:在未稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体中,爆轰传播极不稳定,并且在传播过程中产生局部爆炸中心进而重新起爆;而高浓度氩气稀释后,C_2H_2-2.5O_2 气体中爆轰波波前变得非常规则,爆轰波具有 ZND 结构,当不断衰减的爆轰波曲率超过可以自持传播的临界值时,爆轰波就会不断衰减并最终转化为爆燃波。由(6)式可知,E_s 正比于 d_c^3,因此,如果要通过直接起爆形成爆轰,则氩气稀释的 C_2H_2-2.5O_2 混合气体的起爆能量必须远大于未稀释混合气体,换句话说,高浓度氩气的稀释通过改变爆轰胞格尺寸和爆轰直径极大地提高了混合物的临界起爆能量。

4 结 论

采用电火花点火进行直接起爆,实验研究了 C_2H_2-2.5O_2 气体以及加入摩尔浓度为 70%氩气后的 C_2H_2-2.5O_2 气体在不同初始压力下直接起爆的临界起爆能量,分析了高浓度氩气对 C_2H_2-2.5O_2 混合

气体直接起爆临界起爆能量的影响，得出以下结论：

（1）C_2H_2-2.$5O_2$ 气体和加入摩尔浓度为 70％氩气的 C_2H_2-2.$5O_2$ 气体的临界起爆能量依赖于初始压力，初始压力越小，临界起爆能量越大；

（2）两种混合气体临界起爆能量的实验结果与 Lee 等人的表面积能量理论计算结果基本吻合，在相同实验条件下高浓度氩气稀释极大地提高了混合气体直接起爆的临界起爆能量；

（3）C_2H_2-2.$5O_2$ 气体经过高浓度氩气稀释后，形成的混合物基团浓度极大提高，ZND 诱导区长度显著增加，由于临界起爆能量正比于诱导区长度的三次方，因此在相同初始压力下，高浓度氩气的稀释增加了 C_2H_2-2.$5O_2$ 混合气体的爆轰诱导区长度，并最终导致临界起爆能量的上升。

References：

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

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

[3] 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.

[4] Matsui H，Lee J H S. On the measure of the relative detonation hazards of gaseous fuel-oxygen and air mixture [J]. Proc Combust Inst，1978，17：1269.

[5] Lee J H，Matsui H. A comparison of the critical energies for direct initiation of spherical detonations in acetylene-oxygen mixtures [J]. Combust flame，1977，28：61-66.

[6] Lee J H S，Higgins A J. Comments on criteria for direct initiation of detonation [J]. Phil Trans R Soc Lond A，1999，357：3503-3521.

[7] Benedick W B，Guirao C M，Knystautas R，et al. Critical charge for the direct initiation of detonation in gaseous fuel-air mixtures [A]//Progress in Astronautics and Aeronautics [C]. Reston，USA：AIAA，1986，106：181-202.

[8] Lee J H S，Guirao C M. Fuel-air explosions [M]. Waterloo，Ontario，Canada：University of Waterloo Press，1982：157.

[9] Knystautas R，Lee J H S. On the effective energy for direct initiation of gaseous detonations [J]. Combust Flame，1976，27：221-228.

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

[11] Zhang B，Kamenskihs V，Ng H D，et al. Direct blast initiation of spherical gaseous detonations in highly argon diluted mixtures [J]. Proc Combust Inst，2011，33(2)：2265-2271.

[12] Desbordes D，Guerraud C，Hamada L，et al. Failure of the classical dynamic parameters relationships in highly regular cellular detonation systems [A]//Progress in Astronautics and Aeronautics [C]. Reston，USA：AIAA，1993，153：347-359.

[13] Knystautas R，Lee J H，Guirao C M. The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures [J]. Combust flame，1982，48：63-83.

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

[15] Kaneshige M，Shepherd J E. Detonation database，FM97-8 [R]. Pasadena，USA：California Institute of Technology，1997.

[16] 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 [R]. Washington DC，USA：Sandia National Laboratories，1989.

[17] Konnov A A. Detailed reaction mechanism for small hydrocarbons combustion：Project-in-progress on the world wide web [EB/OL]. http://homepages. vub. ac. be/～akonnov/science/mechanism/15Bel_abs. html.

[18] Shepherd J E. Detonation in gases [A]//Progress in Astronautics and Aeronautics [C]. Reston，USA：AIAA，2009，32：83-98.

[19] Carnasciali F, Lee J H S, Knystautas R, et al. Turbulent jet initiation of detonation [J]. Combust Flame, 1991, 84(1-2): 170-180.

Experimental Investigation of the Influence of Highly Argon Dilution on the Critical Initiation Energy for Direct Initiation of C_2H_2-2.$5O_2$ Mixtures

ZHANG Bo[1], Lee John H S[2], BAI Chun-Hua[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal H3A 2K6, Canada*)

Abstract: Direct initiation is achieved via a high voltage capacitor spark discharge, and the critical energy is accurately estimated from the analysis of the current output. A good agreement is found by comparing the critical initiation energy from experimental measurement and Lee's surface energy model. The influences of highly argon dilution on the critical energy of direct initiation are investigated experimentally for C_2H_2-2.$5O_2$ and 70% argon diluted C_2H_2-2.$5O_2$ mixtures. The results show that the critical energy is inversely exponential to the initial pressure for C_2H_2-2.$5O_2$ mixtures with and without highly argon. Both the experimental and theoretical results indicate that dilution of highly argon in C_2H_2-2.$5O_2$ enhances the critical initiation energy for direct initiation at the same initial condition. Since the critical initiation energy is proportional to the cube of ZND induction zone length, the dilution of highly argon increases the ZND induction zone length of C_2H_2-2.$5O_2$ mixture under the same initial pressure, and accordingly the critical initiation energy is raised remarkably.

Key words: direct initiation; critical initiation energy; induction length; spark ignition; argon