

文章编号: 1001-1455(2012)06-0592-07

$C_2H_2-O_2-Ar$ 和 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 直接起爆 形成爆轰的临界能量*

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: 采用高压电点火进行直接起爆形成爆轰, 起爆能量通过放电过程中电流的输出信号确定。首先通过实验测定并对比 $C_2H_2-O_2-Ar$ 和 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 等 2 种混合物在各种初始状态下直接起爆形成爆轰的临界起爆能量。实验结果表明, 在相同状态下 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合物的临界起爆能量显著高于 $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合物的。进一步基于各物质爆炸特征长度和爆轰临界管径的参量关系对临界起爆能量差异性进行分析, 得到了 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合气体的爆轰临界管径预测曲线, 并在此基础上得出 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合物爆炸特征长度与临界管径的关系为 $r_0 = 2.5d_c$, 而 $C_2H_2-O_2-Ar$ 两者关系为 $r_0 = 2d_c$ 。结果清晰地表明, 使用 N_2O 作为氧化剂, 爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的比例因数增大, 表明该物质直接起爆形成爆轰所需的起爆源单位能量增大, 因而直接形成爆轰的临界能量相应提高。

关键词: 爆炸力学; 临界起爆能量; 直接起爆; $C_2H_2-O_2-Ar$; 爆轰; 爆炸特征长度; 爆轰临界管径

中图分类号: O381

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

$C_2H_2-O_2$ 混合物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 Ar 气稀释可改变其爆轰波传播速度、胞格规律等特性, 因此 $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合物是研究爆轰现象使用较多的测试气体。然而 C_2H_2 与其他氧化剂混合物的爆轰传播机理研究甚少。J. C. Libouton 等^[1]对 $C_2H_2-N_2O$ 混合气体的研究表明, 即使是混合气体中 Ar 气的体积分数达到 0.5, 由烟熏痕迹发现爆轰波的胞格存在子结构(也即一个爆轰胞格内部存在着多个结构较小的胞格), 因而很难通过胞格尺寸判断该物质的爆轰敏感度。而直接起爆形成爆轰的临界起爆能量是表征爆炸物质敏感度的核心指标, 通过临界起爆能量的大小是判断物质敏感度最直接和有效的方法^[2-3]。

起爆源产生的强爆炸波可直接形成爆轰, 因此起爆源的能量分布决定可燃物质能否产生直接起爆。而爆炸特征长度 $r_0 = (E_s/p_0)^{1/3}$ (其中 E_s 和 p_0 分别为点火能量和初始压力) 可作为强爆炸波衰减和起爆源能量分布的特征参数^[2]。J. H. S. Lee^[3]考虑到爆炸特征长度必须联立化学反应长度尺寸(如爆轰临界管径)才能对爆轰波的结构进行描述, 所谓爆轰临界管径是指平面爆轰波可顺利传播至自由场形成球面爆轰的最小管道直径。而对于 $C_2H_2-O_2-Ar$ 和 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合物爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的关系及该关系对临界起爆能量的影响仍没有系统地研究。

本文中首先通过实验测定 $C_2H_2-O_2-Ar$ 和 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 等 2 种混合物在不同初始条件下(不同压力、化学当量比、Ar 气体积分数)直接起爆形成爆轰的临界起爆能量。为了进一步研究这 2 种物质临界起爆能量的差异, 从爆炸特征长度进行定量分析。通过测量 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合物的爆轰临界管径, 得到爆轰临界管径预测模型, 同时与 $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合物进行对比, 分别建立 2 种物质爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的关系。最终得出不同的氧化剂(O_2 和 N_2O)对 C_2H_2 混合物临界起爆能量的影响。

* 收稿日期: 2011-07-15; 修回日期: 2012-11-10

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2012M520852)

作者简介: 张 博(1983—), 男, 博士, 讲师。

1 实验原理和方法

1.1 测定直接起爆临界起爆能量装置

直接起爆实验主要是在直径为 203.2 mm, 壁厚为 50.8 mm 的高压球形容器^[4]中进行。容器壁上安装 PCB 压力传感器, 测定爆炸波到达壁面的时间和压力, 以此作为判断直接起爆的依据, 并通过底部的冲击波探针得到爆炸波到达时间来进一步验证是否形成爆轰。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放电能量。电极末端是间隙为 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。点火能量采用的是放电电流初始 1/4 周期能量^[5], 即 $E_s = \int_0^{\frac{T}{4}} i^2 R_s dt$ 。

1.2 测定爆轰临界管径装置

C₂H₂-N₂O-Ar 混合气体爆轰临界管径的测定^[6]在图 1 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 的螺旋凹槽, 增加对爆炸波的扰动, 以便形成爆轰。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(为爆炸波压力感应探测器), 两者分别测定爆炸波在各处的到达时间, 通过到达时间计算得出爆炸波的速度, 以此作为判断管内和球形自由场中是否形成爆轰的依据。实验前, 通过真空泵把容器内的压力抽为真空(压力至少小于 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。当管径确定时, 通过改变初始压力的大小测定在该管径中成功形成球形爆轰的临界压力, 并且通过使用不同直径的爆轰管来改变内径。

图 2 是 C₂H₂-2.5O₂ 混合气体在初始压力为 12 kPa, 管道内径为 19.05 mm 时, 通过光学探针和冲击波探针得到的爆炸波到达时间的轨迹图。由图可知, 爆炸波到达光学探针的时间为 201 μs, 爆炸波的速度为 2 079.6 m/s, 约为 CJ 爆轰速度的 91%, 因此认为爆炸波在管内传播至光学探针处已经发展为爆轰波; 当爆轰波传播进入球形自由场中, 并最终与容器底部的冲击波探针碰撞, 到达的时间为 317 μs, 速度为 2 129.3 m/s, 约为 CJ 爆轰速度的 94%。由此可见, 在初始压力为 12 kPa 时, 由于管道直径大于爆轰直径的临界值, 因此, 平面爆轰由管道成功向自由场传播, 并形成球形爆轰。如果光学探针与冲击波探针的间隔时间大于 120 μs, 则认为此时不能形成球形爆轰。

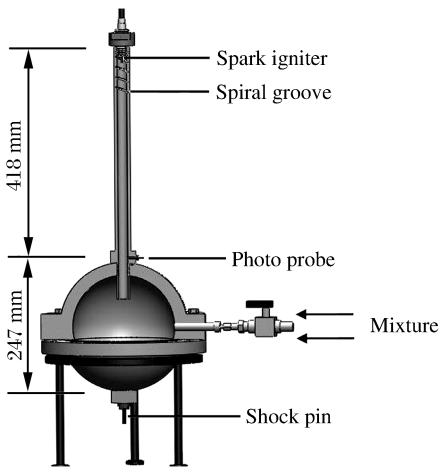


图 1 测定爆轰临界管径的实验装置
Fig. 1 Sketch of experimental apparatus measuring critical tube diameter for detonation

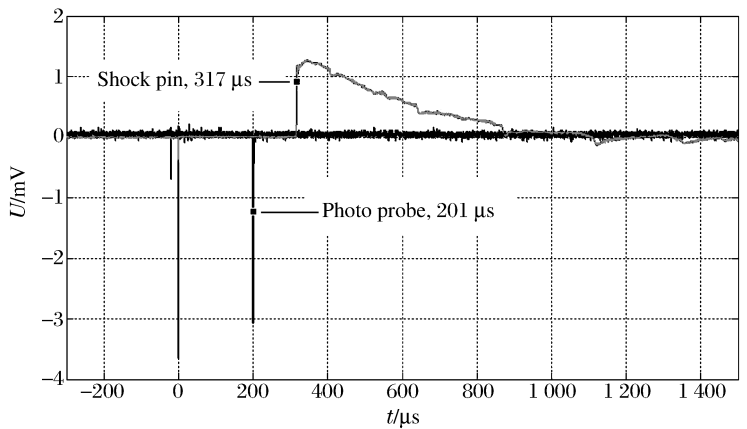


图 2 爆炸波到达光学探针和冲击波探针的时间轨迹
Fig. 2 Voltage-time trace for the blast wave arrival at the photo probe and shock pin

2 实验结果与讨论

2.1 $C_2H_2-O_2-Ar$ 和 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 的临界起爆能量

通过直接起爆的实验测量,得出 $C_2H_2-O_2$ 和 $C_2H_2-N_2O$ 在不同初始条件下(不同的压力、化学当量比和 Ar 气的体积分数)的临界起爆能量,分别如图 3~5 所示。为了提高实验可靠性,在临界起爆能量附近至少分别得到 3 次直接形成爆轰和 3 次不能直接形成爆轰的点火能量。图 3~5 中的实验结果中列出引起直接起爆的最低能量和不能引起直接起爆的最高能量,因此临界起爆能量应该介于两者之间。

图 3 是理论配比的 $C_2H_2-N_2O$ 和 $C_2H_2-O_2$ 混合物在不同压力下的临界起爆能量,通过实验发现两者的爆轰敏感度有数量级的差异,为了保证临界起爆能量测量的精度,因此对 2 种物质分别选取不同压力区域进行临界起爆能量的测量,并通过临界起爆能量实验值的拟合曲线分析差异。由图 3 可知,两者的临界起爆能量都随着压力的升高而降低,而在相同压力下, $C_2H_2-N_2O$ 的明显高于 $C_2H_2-O_2$ 的。

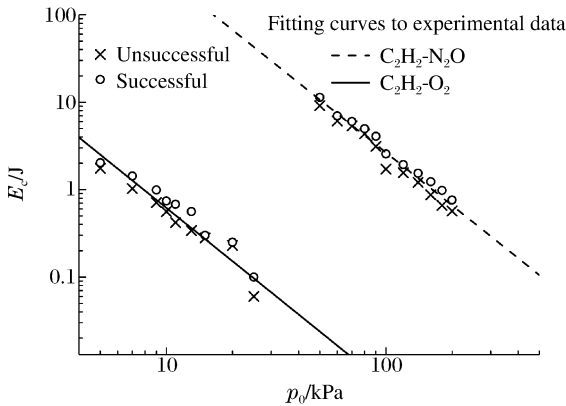


图 3 理想配比的 $C_2H_2-O_2$ 和 $C_2H_2-N_2O$ 在不同初始压力下的临界起爆能量

Fig. 3 Critical energy as a function of initial pressure for stoichiometric $C_2H_2-N_2O$ and $C_2H_2-O_2$ mixtures

图 4 是 $C_2H_2-N_2O$ 和 $C_2H_2-O_2$ 在初始压力不变的条件下,改变各自的化学当量比时的直接起爆形成爆轰的临界起爆能量。由图 3 已知,在相同压力下 2 种物质的爆轰敏感度有数量级的差异,因此为了保证临界起爆能量的测量准确性,并分析不同化学当量比对各自临界起爆能量的影响,选择 $C_2H_2-N_2O$ 的初始压力为 100 kPa, $C_2H_2-O_2$ 的初始压力为 10 kPa。由图 4 可知,2 种物质的临界起爆能量与化学当量比呈“U”型关系,在化学当量比 $\varphi = 2.5$ 附近,都存在着临界起爆能量的最低值。

图 5 是初始压力为 100 kPa 的条件下, $C_2H_2-N_2O$ 和 $C_2H_2-O_2$ 中加入不同体积分数的 Ar 气稀释时,临界起爆能量与 Ar 气体积分数之间的关系。须指出的是,Ar 气体积分数为 0 和 0.22 的 $C_2H_2-2.5O_2$ 混合物在 100 kPa 时的临界起爆能量很低(约 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ J 数量级),通过实验无法准确测量,图中的数据是通过其爆轰胞格尺寸的经验公式以及临界起爆能量的预测模型计算得到的^[4]。比较 2 种物质的临界起爆能量发现,随着 Ar 气体积分数的提高,临界起爆能量都显著提高。

以上实验测量表明: $C_2H_2-N_2O$ 与 $C_2H_2-O_2$ 的直接起爆形成爆轰的临界起爆能量都依赖于初始压

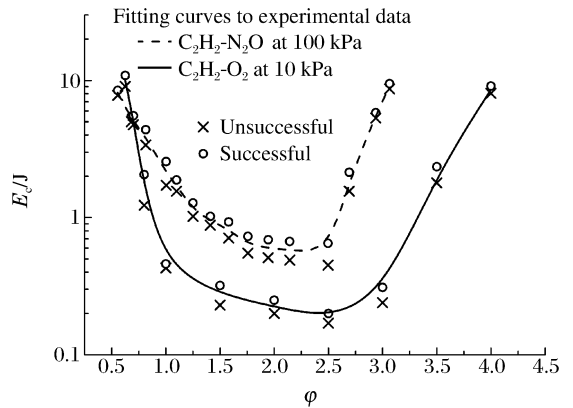


图 4 $C_2H_2-O_2$ 和 $C_2H_2-N_2O$ 在不同化学当量比时的临界起爆能量

Fig. 4 Critical energy as a function of equivalence ratio for $C_2H_2-N_2O$ and $C_2H_2-O_2$ mixtures

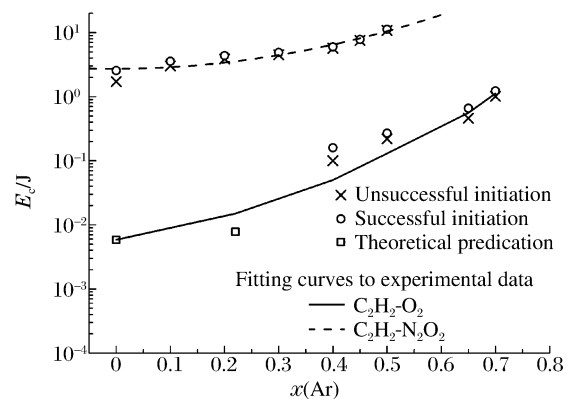


图 5 $C_2H_2-N_2O$ 和 $C_2H_2-O_2$ 在不同体积分数的 Ar 气稀释时临界起爆能量

Fig. 5 Critical energy as a function of argon gas volume fraction for $C_2H_2-N_2O$ and $C_2H_2-O_2$ mixtures

力,初始压力越小临界起爆能量越大,两者呈反相关指数关系;临界起爆能量与化学当量比 φ 呈“U”型关系,并在 $\varphi=2.5$ 附近临界起爆能量都有最低值;随着 Ar 气体积分数的提高,混合物的临界起爆能量都显著提高。在相同条件下,C₂H₂-N₂O-Ar 的临界起爆能量显著高于 C₂H₂-O₂-Ar 的。

为了进一步讨论 2 种混合物临界起爆能量显著差异的原因,从爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的联系角度进行分析。爆轰临界管径的测量为下文建立爆炸特征长度与爆轰临界管径的联系、分析不同的氧化剂对乙炔混合物临界起爆能量的影响提供依据。

2.2 C₂H₂-N₂O-Ar 爆炸特征长度与爆轰临界管径

2.2.1 爆轰临界管径

爆轰临界管径作为判断物质爆轰敏感度的参数之一,可和爆轰结构的其他参数相关联,如爆轰诱导区长度。ZND 诱导区长度可以通过 Chemkin 程序^[7]和 Konnov 化学反应机制^[8]计算得到,因此爆轰临界管径与 ZND 诱导区长度之间的关系表示为 $d_c = A \Delta_1$ 。

基于 C₂H₂-N₂O-Ar 混合物在不同初始条件下的爆轰临界管径的实验值,参数 A 表示为化学当量比 φ 、Ar 气的体积分数 $x(\text{Ar})$ 以及压力比值 p_1/p_0 的函数,即

$$A = 594.8\varphi^{0.623} [1 - x(\text{Ar})]^{0.2176} \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{-0.0246} \quad (1)$$

C₂H₂-N₂O-Ar 混合物在各初始条件下爆轰临界管径的实验测量值以及通过公式(1)的预测曲线如图 6~7 所示。在图 7 中,对于被体积分数为 0.5 的 Ar 气稀释的 C₂H₂-5N₂O 混合物,部分数据来自于 S. Laberge 等^[9]的实验测量,这与本实验的测量值基本符合。通过图 6~7 中实验值与理论值的对比表明,公式(1)的决定因数 R^2 和最大误差分别为 0.909 和 10.67%,因此公式(1)对 C₂H₂-N₂O-Ar 混合物的爆轰临界管径能比较准确地预测,对在实验不能测量的初始状态下的爆轰临界管径,通过公式(1)计算得到。爆轰临界管径的测量和预测为建立爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的联系提供依据。

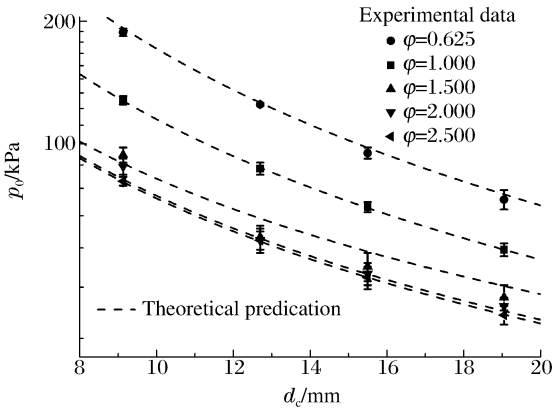


图 6 C₂H₂-N₂O 混合物在不同化学当量比时爆轰临界管径与初始压力的关系

Fig. 6 Critical tube diameter varied with initial pressure for C₂H₂-N₂O mixtures with different compositions

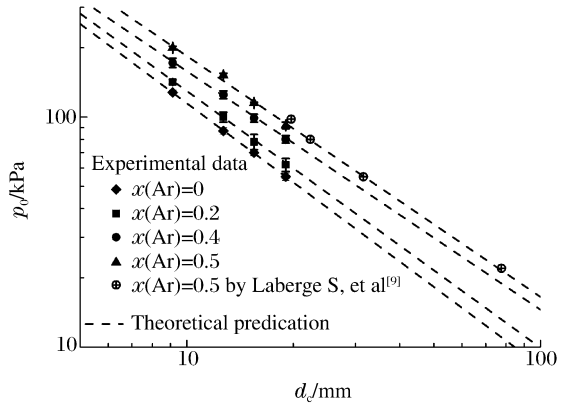


图 7 C₂H₂-N₂O 混合物在不同浓度氩气稀释时爆轰临界管径与初始压力的关系

Fig. 7 Critical tube diameter varied with initial pressure for C₂H₂-N₂O mixtures diluted by argon gas with different volum fraction

2.2.2 爆炸特征长度与爆轰临界管径的联系

对 C₂H₂-N₂O-Ar 混合物的临界起爆能量的计算可直接得出其爆炸特征长度。所谓的爆炸特征长度 r_0 是依赖于临界起爆能量的参数,并且能够通过式 $r_0 = (E_c/p_0)^{1/3}$ 计算得到。因此,联立式(1),得出 C₂H₂-N₂O-Ar 混合物爆炸特征长度与爆轰临界管径的关系,如图 8 所示。

由图 8 可知,C₂H₂-N₂O-Ar 混合物爆炸特征长度与爆轰临界管径的关系为线性,即

$$r_0 = 2.5d_c \quad (2)$$

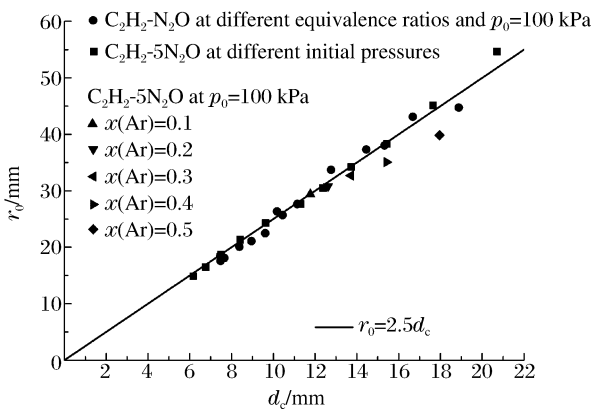


图 8 C₂H₂-N₂O-Ar 混合物爆轰临界管径与爆炸特征长度的关系

Fig. 8 Explosion length as a function of critical tube diameter for C₂H₂-N₂O-Ar mixtures

表 1 爆轰胞格尺寸与初始压力之间的拟合参数

Table 1 Fitting parameters of cell size as a function of initial pressure

混合物	$x(\text{Ar})$	C/mm	α
C ₂ H ₂ -O ₂	0	9.24	0.96
C ₂ H ₂ -2.5O ₂	0	18.90	1.02
C ₂ H ₂ -4O ₂	0	54.97	1.17
C ₂ H ₂ -2.5O ₂ -Ar ^[10]	0.5	61.50	1.12
C ₂ H ₂ -2.5O ₂ -Ar ^[10]	0.7	113.81	1.20

2.3 C₂H₂-O₂-Ar 爆炸特征长度和爆轰临界管径

2.3.1 爆炸特征长度与胞格尺寸的联系

为研究 C₂H₂-O₂-Ar 混合物爆炸特征长度和爆轰临界管径的关系,首先须分析爆炸特征长度与爆轰胞格尺寸的关系。对于 C₂H₂-O₂-Ar 混合物爆轰胞格,可由基于实验测量基础上的经验关系得出,其中 Ar 气体积分数分别为 0.5 和 0.7 的 C₂H₂-2.5O₂-Ar 混合气体的爆轰胞格尺寸与初始压力的经验关系来自于 M. I. Radulescu^[10],而对于未稀释气体胞格尺寸的数值来自于对 CALTECH 爆轰数据库^[11]中胞格数据的拟合,因此胞格尺寸与初始压力的关系 $\lambda = C(p_0/\text{kPa})^{-\alpha}$ 的拟合参数如表 1 所示。

通过表 1 以及爆炸特征长度的计算,得出 C₂H₂-O₂-Ar 混合物爆炸特征长度 r_0 与爆轰胞格尺寸 λ 之间的关系图,如图 9~10 所示。

由图 9 可知,对未用 Ar 气稀释的混合物,爆炸特征长度与爆轰胞格之间为线性关系,即 $r_0 = 26\lambda$,并且该关系式对 3 种不同比例混合的物质都适用。然而对于 C₂H₂-2.5O₂ 混合物中加入体积分数为 0.5 的 Ar 气稀释后,爆炸特征长度与爆轰胞格之间仍为线性关系,但是比例因数为 37.3;混合物中加入体积分数为 0.7 的 Ar 气稀释后,线性关系为 $r_0 = 54.8\lambda$ 。

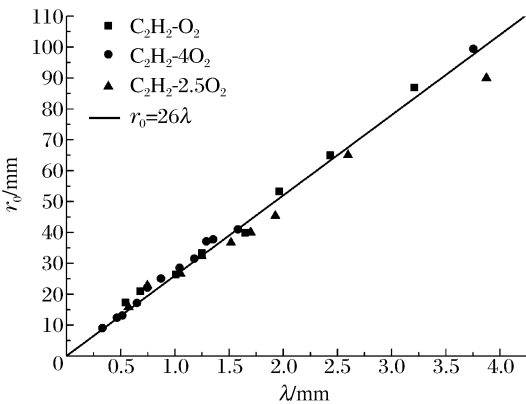


图 9 C₂H₂-O₂, C₂H₂-4O₂, C₂H₂-2.5O₂ 混合物爆轰胞格与爆炸特征长度的关系

Fig. 9 Explosion length as a function of cell size for C₂H₂-O₂, C₂H₂-4O₂, C₂H₂-2.5O₂ mixtures

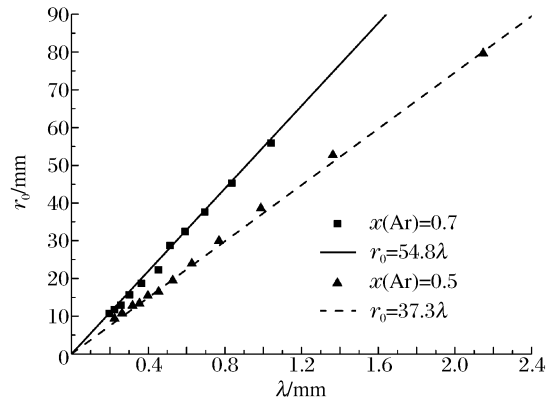


图 10 2 种不同 C₂H₂-2.5O₂-Ar 混合物的爆轰胞格与爆炸特征长度的关系

Fig. 10 Explosion length as a function of cell size for C₂H₂-2.5O₂ diluted by argon gas with different volume fractions

2.3.2 爆炸特征长度与爆轰临界管径的联系

V. V. Mitrofanov 等^[12]和 D. H. Edwards 等^[13]研究得出,对于可燃气体与氧气或者空气的混合物,爆轰直径 d_c 约为爆轰胞格尺寸 λ 的 13 倍,即 $d_c = 13\lambda$ 。而 B. Zhang 等^[14]最近的研究验证了该关系,并发现对于 Ar 气体积分数为 0.5 的 C₂H₂-2.5O₂-Ar 混合物, $d_c = 21\lambda$; Ar 气体积分数为 0.7 的 C₂H₂-

2. $5O_2-Ar$ 混合物, $d_c = 29\lambda$, 由此得出 $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合物爆炸特征长度与爆轰临界管径的参量关系, 如图 11 所示。

由图 11 可知, $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合物爆炸特征长度与爆轰临界管径之间为线性关系, 即

$$r_0 = 2d_c \quad (3)$$

公式(2)和(3)表明, 使用 N_2O 作为氧化剂, 爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的比例因数增大, 而爆炸特征长度作为起爆能量分布的特征参数, 其数值的提高表明直接起爆该物质所需起爆源单位能量增大, 因而导致 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合物的临界起爆能量明显大于 $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合物的。

3 结论

采用了高压电火花点火进行直接起爆形成爆轰的研究, 分别测定了 $C_2H_2-O_2-Ar$ 和 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 等 2 种物质在不同初始状态下直接起爆形成爆轰的临界起爆能量, 并从爆炸特征长度进行定量分析, 建立了 2 种物质爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的关系, 最终得出了不同的氧化剂对 C_2H_2 混合物临界起爆能量的影响。得出的结论如下:

(1) $C_2H_2-N_2O$ 与 $C_2H_2-O_2$ 的临界起爆能量依赖于初始压力, 初始压力越低临界起爆能量越高, 两者呈反相关指数关系; 临界起爆能量与化学当量比 φ 的关系曲线呈“U”型, 并在 $\varphi = 2.5$ 附近临界起爆能量有最低值; 随着 Ar 气体积分数的提高, 混合物的临界起爆能量都显著提高; 在相同条件下 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 临界起爆能量明显高于 $C_2H_2-O_2-Ar$ 的。

(2) 得出 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合气体的爆轰临界管径预测曲线, 并在此基础上得出 $C_2H_2-N_2O-Ar$ 混合气体的爆炸特征长度与爆轰临界管径的关系为 $r_0 = 2.5d_c$, 而 $C_2H_2-O_2-Ar$ 两者关系为 $r_0 = 2d_c$ 。因此使用 N_2O 作为氧化剂, 爆炸特征长度与爆轰临界管径之间的比例因数增大, 直接起爆该物质起爆源单位能量增大, 因而临界起爆能量相应提高。

参考文献:

- [1] Libouton J C, Jacques A, Van Tiggelen P J. CINETIQUE, structure and entretien des ondes detonation[C]// Proceedings of Colloque International Berthelot-Vieille-Mallard-LeChatelier. Bordeaux, France, 1981, 2: 437-444.
- [2] Lee J H S. Dynamic parameters of gaseous detonations[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1984, 16: 311-336.
- [3] Lee J H S. Initiation of gaseous detonation[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 1977, 28: 75-104.
- [4] 张博, Lee J H S, 白春华. CH_4-O_2 混合气体直接起爆的临界能量[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2): 113-120.
ZHANG Bo, Lee J H S, BAI Chun-hua. Critical energy for direct initiation of $C_2H_4-O_2$ mixture[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(2): 113-120.
- [5] Zhang B, Ng H D, Lee J H S. Measurement of effective blast energy for direct initiation of spherical gaseous detonations from high-voltage spark discharge[J]. Shock Waves, 2012, 22(1): 1-7.
- [6] 张博, 白春华, Lee J H S. $C_2H_2-2.5O_2-Ar$ 混合气体临界管径和爆轰胞格及临界起爆能量的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(3): 226-230.
ZHANG Bo, BAI Chun-hua, Lee J H S. Experimental research on the relation of parameters of $C_2H_2-2.5O_2-Ar$ mixtures detonation: Critical tube diameter, cell size and critical energy of direct initiation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(3): 226-230.
- [7] Kee R J, Rupley F M, Miller J A. Chemkin-II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics[R]. Sandia National Laboratories Report: SAND89-8009, 1989.

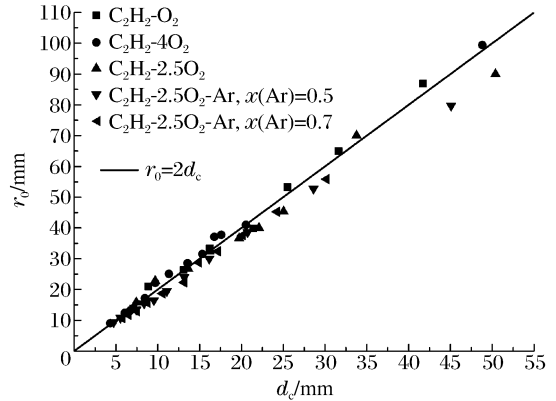


图 11 $C_2H_2-O_2-Ar$ 混合物爆轰临界管径与爆炸特征长度的关系

Fig. 11 Explosion length as a function of critical tube diameter for $C_2H_2-O_2-Ar$ mixtures

- [8] 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/>.
- [9] Laberge S, Knystautas R, Lee J H S. Propagation and extinction of detonation waves in tube bundles[J]. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1993,153:380-396.
- [10] Radulescu M I. The propagation and failure mechanism of gaseous detonations: Experiments in porous-walled tubes[D]. Montreal: McGill University, 2003.
- [11] Kaneshige M, Shepherd J E. Detonation database[R]. GALCIT Report FM97-8. Pasadena: California Institute of Technology, 1997.
- [12] Mitrofanov V V, Soloukhin R I. The diffraction of multi-front detonation waves[J]. *Soviet Physics Doklady*, 1965,9(12):1055-1058.
- [13] 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.
- [14] Zhang B, Ng H D, Lee J H S. Direct measurement and relationship between critical tube diameter and critical energy for direct detonation initiation[C]//*Proceedings of the 23rd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. Irvine, US: University of California, 2011.

Critical energy for direct initiation of spherical detonations in $C_2H_2-O_2-Ar$ and $C_2H_2-N_2O-Ar$ mixtures^{*}

ZHANG Bo^{1,2}, BAI Chun-hua²

(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: Direct initiation was achieved via a high-voltage capacitor spark discharge and the critical energy was accurately estimated from the analysis of the current output. Experiments were carried out to measure the critical energies of $C_2H_2-O_2-Ar$ and $C_2H_2-N_2O-Ar$ mixtures under different initial conditions. The critical energies for $C_2H_2-N_2O-Ar$ mixtures are significantly higher than those for $C_2H_2-O_2-Ar$ mixtures under the same initial conditions. The relation between explosion length and critical tube diameter was analyzed to explore the large discrepancy of the critical energy between those mixtures. The critical tube diameter measurement in $C_2H_2-N_2O-Ar$ mixtures was further investigated, and based on the critical tube diameter correlation, the relationship between explosion length and critical tube diameter for $C_2H_2-O_2-Ar$ mixtures was found to be $r_0 = 2.5d_c$. And the corresponding relationship is $r_0 = 2d_c$ for $C_2H_2-O_2-Ar$ mixtures. It displays that the proportional factor between explosion length and critical tube diameter will increase if N_2O is used as an oxidizer, which results in more initiation energy per unit required for initiating the mixture to achieve a direct detonation. Thus the critical energy of direct initiation tends to be higher.

Key words: mechanics of explosion; critical initiation energy; direct initiation; $C_2H_2-O_2-Ar$; detonation; explosion length; critical tube diameter

* Received 15 July 2011; Revised 10 November 2012

Corresponding author: ZHANG Bo, bzhang@ecust.edu.cn