

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.016

# 光滑管道内 $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}n\text{Ar}$ 爆燃到爆轰转捩特性研究

吕兆文<sup>1</sup>, 李 权<sup>1,2,3</sup>, 刘 虎<sup>1</sup>, 王昌建<sup>1,2,4</sup>, 魏 臻<sup>3,5</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省氢安全国际联合研究中心, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥工大高科信息科技股份有限公司, 安徽 合肥 230088; 4. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230601; 5. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601)

**摘 要:** 文章研究不同灵敏度的  $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}n\text{Ar}$  火焰在光滑管道下游的爆轰起爆特性。使用平行放置于管道顶部的压电压力传感器记录爆炸压力, 并基于此计算平均速度; 同时采用烟迹示踪技术记录爆轰起爆过程的胞格演变规律。通过上述 2 种方法获得爆轰起爆距离, 使爆轰的起爆能够可靠、准确地定位; 并根据爆燃到爆轰转变过程的化学动力学与特性分析对 Silvestrini 公式和 Saif 公式进行修正, 从而确定初始点火位置与爆轰起爆距离之间的经验相关性。

**关键词:** 氢能; 爆燃转爆轰; 胞格结构; 临界条件; 爆轰起爆距离

**中图分类号:** TQ038 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)06-0817-06

## Study of $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}n\text{Ar}$ deflagration-to-detonation transition characteristics in a smooth channel

LYU Zhaowen<sup>1</sup>, LI Quan<sup>1,2,3</sup>, LIU Hu<sup>1</sup>, WANG Changjian<sup>1,2,4</sup>, WEI Zhen<sup>3,5</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui International Joint Research Center on Hydrogen Safety, Hefei 230009, China; 3. Hefei Gocom Information Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China; 4. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology of Ministry of Education, Hefei 230601, China; 5. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** This paper reported the initiation characteristics of detonation of  $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}n\text{Ar}$  flames with different sensitivities downstream of a smooth channel. Piezoelectric pressure sensors were flushed-mounted on the top wall of the channel to record pressure time histories, based on which combustion wave velocities were calculated. Soot foil technique was also used to record the evolution of the cellular pattern during the detonation initiation process. And the detonation initiation distance was obtained by these two methods, so that the initiation can be reliably and accurately located. In addition, the Silvestrini and Saif formulas were modified based on analyzing the chemical kinetics and characteristics of the deflagration-to-detonation transition (DDT) process. Thus, the empirical correlation between the initiation position and the detonation initiation distance can be defined.

**Key words:** hydrogen; deflagration-to-detonation transition (DDT); cellular structure; critical condition; detonation initiation distance

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12102117); 安徽省重点研究与开发计划资助项目(2022h11020013)和合肥工业大学学术新人提升计划 B 资助项目(JZ2022HG7B0267)

作者简介: 吕兆文(1996—), 男, 安徽界首人, 合肥工业大学硕士生;

李 权(1991—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: quanli@hfut.edu.cn;

王昌建(1975—), 男, 四川眉山人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师;

魏 臻(1965—), 男, 安徽无为, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

## 0 引言

传统化石能源的大量开采引发的环境和能源问题一直备受关注<sup>[1-2]</sup>,因此迫切需要开发有效的替代能源,而氢能以其高可用性、高燃烧热值、零温室气体排放等优点受到广泛关注。作为一种具有氢脆性质的特殊气体,氢气在运输管道和储存容器中泄漏的事件时有发生。由于氢气的点火能量较低,反应活性较高,爆炸极限较宽,泄漏到密闭空间的氢气极易着火<sup>[3-4]</sup>,而且在适当的条件下,火焰以燃烧波的形式传播并加速到爆燃,最终会转变为爆轰,即燃烧转爆轰(deflagration-to-detonation transition, DDT)。

DDT 过程大致分为 2 个阶段,即早期的火焰加速以及后期的准稳态爆燃状态到爆轰状态的过渡,其中涉及激波、湍流、边界层等作用的影响。现有的研究大多通过有障碍物的管道来研究火焰加速和 DDT 过程。文献[5]研究了带有孔板的管道中的 DDT 现象,指出压力的增加产生了向爆轰过渡的条件;文献[6]研究了燃烧波在矩形管道中的行为,结果表明方形障碍物比格栅障碍物更容易促进爆轰的形成;文献[7]研究了障碍物的几何形状对燃烧波传播的影响,发现相对较弱的冲击波通过梯度反应机制导致向爆轰的延迟过渡;文献[8]研究了爆轰波在含有不同厚度孔板的燃烧室内的传播机制及其随着孔板厚度的改变,并发现了 2 种不同的点火机制(对称点火和非对

称点火)。

在这些研究中,障碍物的参与通常用于增强流场的扰动,进而诱发高速爆燃到爆轰的转变。然而关于光滑管道内无障碍物作用下的高速爆燃到爆轰转变的研究较为匮乏。

本研究通过烟迹示踪技术以及压力传感器所采集的数据来探索光滑管道下游爆轰的起爆现象;在此基础上,对不同比例 Ar 稀释下  $2\text{H}_2\text{-O}_2$  爆轰起爆距离进行统计,以寻求对爆燃到爆轰转变过程的合理精度的预测。值得注意的是,本文实验中所采用的障碍物只是为了获得低速爆燃,以便缩短起爆距离。

## 1 实 验

燃烧管道示意图如图 1 所示。爆轰实验系统由 7 段  $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 630\text{ mm}$  的燃烧室组成;在实验系统的左端放置阻塞比为 50% 的格栅型障碍物用于加速火焰,以便在较短的距离内获得爆燃到爆轰的转变;管道的末端设置了一个典型的泄压槽,用来缓冲爆炸冲击所产生的压力;此外,8 个间距为 304 mm 的压力传感器(PCB113B24)P1~P14 平行放置在管道的顶部位置,其灵敏度为 0.725 mV/kPa,这些传感器被用于监测燃烧波到达的时间,并基于所测量的平均速度来识别火焰的传播模式;260 mm $\times$ 70 mm 的烟熏板被放置于管道的侧壁,用以捕捉爆燃到爆轰转变的胞格特征。

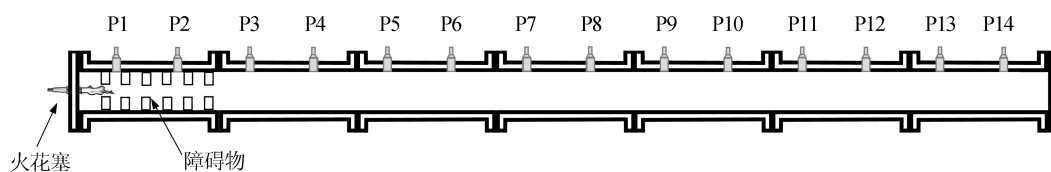


图 1 燃烧管道示意图

实验中使用化学计量比的  $2\text{H}_2\text{-O}_2$ 、 $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}25\%\text{Ar}$ 、 $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}50\%\text{Ar}$  预混气体。这些混合气通过分压法制备,并在预混罐中储存至少 24 h,以确保它们充分混合。实验环境温度为 295 K,初始压力( $P_0$ )范围为 5~45 kPa;在填充所需的实验预混气体之前,用真空泵将管道压力抽到 100 Pa 以下。这些压力状态通过一个精确的数字压力表(0~100 kPa)进行监测,满量程精度为  $\pm 0.05\%$ 。火焰的点火由管道的左端电容式火花系统来实现,提供大约 5 J 的能量。为确保实验数据的可靠性,每组实验重复 3 次。

点火后,火焰在光滑管道内持续加速,并在某一时刻会有速度的突然跃升,伴随着传播模态由爆燃态到爆轰态转变,这一过程的典型压力历史数据如图 2 所示。

图 2 中:传感器 P1~P3 测得的峰值相对较小,对应爆轰起爆前的快速火焰状态;传感器 P4 与 P5 之间有一个极大的压力值突变,对应于爆轰的起爆过程,P4 和 P5 所测得的压力峰值  $P_{\max}$  分别为 225.07、953.80 kPa;而压力传感器 P6~P8 测得的压力峰值  $P_{\max}$  相对平稳,对应起爆后爆轰状态。

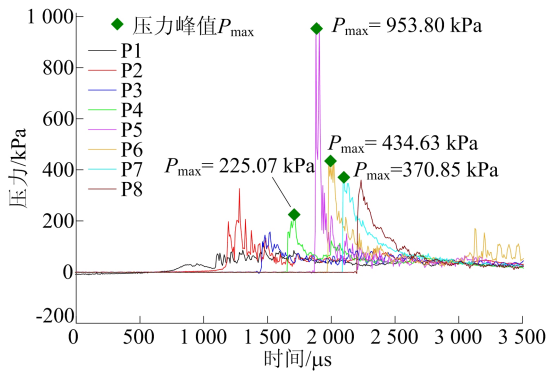


图 2 爆轰起爆过程的典型压力历史数据

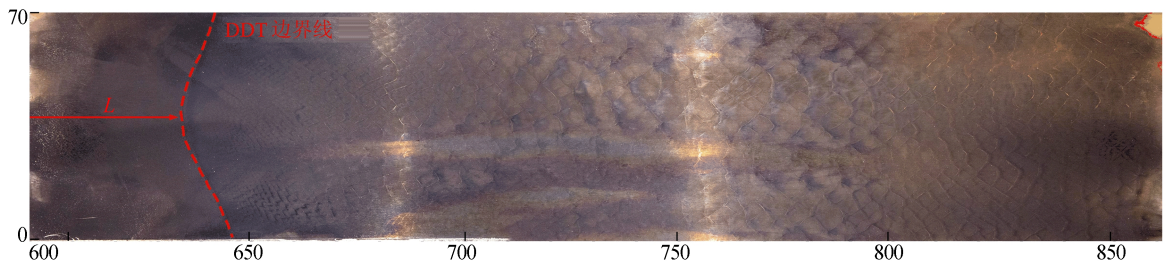
## 2 实验结果及分析

### 2.1 典型胞格特征分析

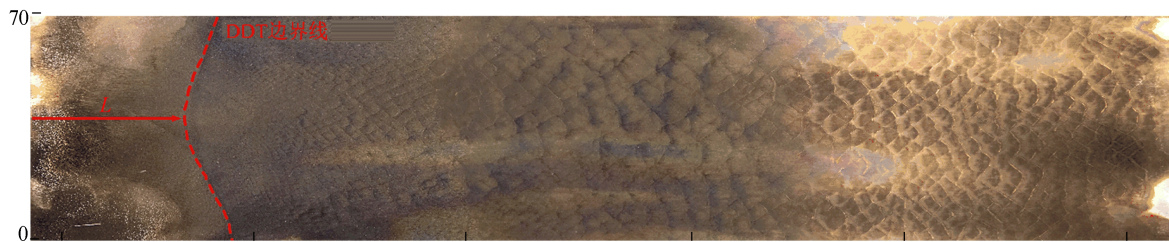
不同初始压力  $P_0$  下, 2H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 预混气体在光滑管道下游起爆过程的典型胞格特征如图 3 所示。其中:  $L$  定义为初始点火点到 DDT 边界线的距离; 火焰传播方向从左到右。

这一起爆过程有一个统一的特征是烟熏板上

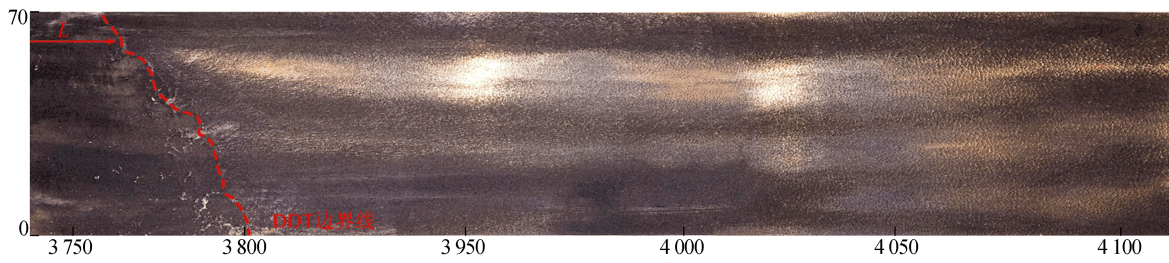
有一条明显的边界线, 分割着有、无胞格的区域。这些边界线反映了 DDT 的性质, 揭示了爆轰的起源。在边界线的下游, 最初充满着极其致密的胞格, 随后胞格逐渐变大直至统一模式, 如图 3a 和图 3b 所示, 这表明爆轰的强度先经历一个过驱动状态, 然后衰减为 Chapman-Jouguet (CJ) 爆轰强度。这种过驱动状态爆轰通常起源于热点或局部爆炸, 其中涉及湍流或激波等复杂作用<sup>[9-10]</sup>。热点产生于湍流火焰面附近或边界层失稳区域, 在其作用下局部会产生更强的激波与燃烧带的耦合, 这种模式高速传播并迅速扩展到整个燃烧面上, 进一步向前追赶上原来的燃烧波系, 完成爆燃到爆轰的突变。而图 3c 所示的烟熏板上致密的细小胞格充满着边界线下游的全部区域, 与图 3a 和图 3b 不同, 这是由于该烟熏板所记录的是管道末端的三波点轨迹特征, 由热点起爆所产生的较强激波追赶前方的波系, 撞击到盲板并折回, 以至于达到了更强的过驱动状态。



(a)  $P_0 = 20.54$  kPa, DDT 边界距离  $L = 648$  mm



(b)  $P_0 = 18.59$  kPa, DDT 边界距离  $L = 1288$  mm



(c)  $P_0 = 15.13$  kPa, DDT 边界距离  $L = 3761$  mm

单位: mm

图 3 不同初压下 2H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 预混气体在光滑管道下游起爆过程的典型胞格特征

图 3 所示的 DDT 边界线划分了爆燃与爆轰这 2 种火焰传播模式, 可以看出, 2 种模式转变所

需要的距离  $L$  均随初始压力  $P_0$  的增大而减小。这是因为较高的初始压力下所对应的气体灵敏度

较高,所以能够在较短的距离内形成爆轰。

为更好地表征气体活性与爆燃到爆轰转变过程的关系,定义起爆距离  $L_{DDT}$ 。以初始压力  $P_0 = 20.56 \text{ kPa}$  为例,相同的工况下重复实验 3 次所得的火焰传播速度曲线如图 4 所示,可以看出,爆燃转爆轰过程的速度变化趋势基本一致,都是先经历驱动状态,再衰减为 CJ 爆轰。将火焰传播速度达到  $u_{CJ}$  时所需要的距离定义为起爆距离  $L_{DDT}$ ; 并取相同实验工况下各测点 3 次采集数据的算术平均值作为火焰传播速度。这种测量方法与烟熏板所测得距离之间的误差为  $3\% \sim 5\%$ 。

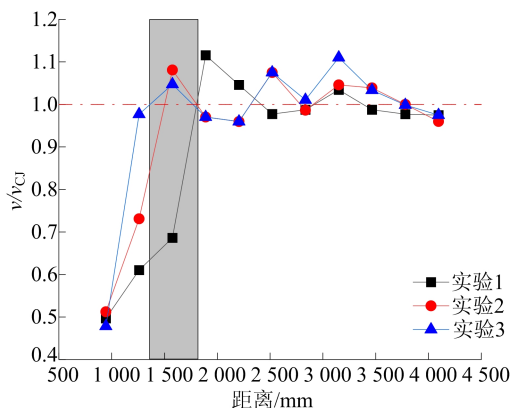


图 4  $P_0 = 20.56 \text{ kPa}$  时 3 次实验各测点火焰传播速度曲线

## 2.2 起爆距离分析

对于不断加速的  $2\text{H}_2\text{-O}_2$  超声速火焰,爆燃到爆轰过程的压力范围较窄。为进一步探究气体活性与爆燃到爆轰转变过程的关系,实验中加入不同比例的 Ar 进行惰化。统计不同比例 Ar 稀释作用下的起爆距离与初始压力之间的关系,结果如图 5 所示。由图 5 可知:对于同一种气体,  $L_{DDT}$  随着管道内初始压力的增高而逐渐减小,两者之间大约成线性关系;而随着 Ar 比例的不断提高,爆轰形成所需要的距离逐渐增大,这是由于 Ar 的加入显著削弱了 DDT 过程的化学反应速率,表征为整体平均传播速度下降;对于  $2\text{H}_2\text{-O}_2$  和  $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}25\%\text{Ar}$  的预混气体,所测得起爆距离有部分重合(图 5 中红色圆点和黑色方点),这可能是由于 25% 体积分数的 Ar 稀释的  $2\text{H}_2\text{-O}_2$  是一种性质介于稳定与不稳定之间的气体。

为了进一步验证这种推断,引入无量纲局部爆炸参数  $\chi$ 。  $\chi$  将不稳定性与混合物的热化学性质联系起来,用来表征爆轰的稳定性和形成热点的趋势,即

$$\chi = \varepsilon_1 \Delta_1 / \Delta_R = \varepsilon_1 \Delta_1 \sigma_{\max} / u_{CJ} \quad (1)$$

其中:  $\varepsilon_1$  为诱导过程的活化能;  $\Delta_1$ 、 $\Delta_R$  分别为特征诱导长度和反应长度;  $\sigma_{\max}$ 、 $u_{CJ}$  分别为爆轰坐标系下 CJ 平面上的最大热释放和粒子速度<sup>[11]</sup>。

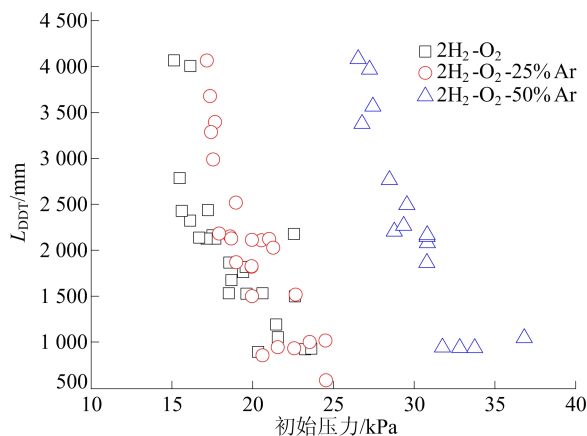


图 5 起爆距离随初始压力的变化规律

与 ZND 模型相关的诱导反应时间和放热反应时间通过 SDT<sup>[12]</sup> 和 Cantera<sup>[13]</sup> 软件计算得出,并将水力半径  $D$  归一化后的起爆距离  $L_{DDT}$  与  $\chi$  之间的相关性绘制如图 6 所示。

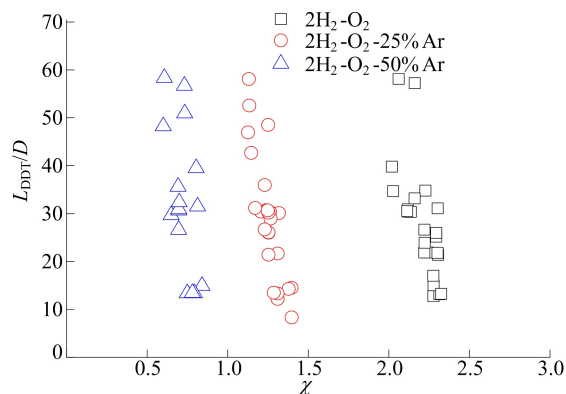


图 6 实验值  $L_{DDT}/D$  与  $\chi$  之间的关系

从图 6 可以看出:随着 Ar 体积分数的增加 ( $0 \sim 50\%$ ) 的增加,  $\chi$  值逐渐减小;同时,  $L_{DDT}/D$  随  $\chi$  的增加而减小,表征为灵敏度越高的混合物 ( $\chi$  越大) 越容易起爆。这是由于不同比例 Ar 的加入明显改变了混合气体的活性,反应进行所需要的活化能也有所增加,进而需要更长的诱导时间。以初始压力  $P_0 = 20.00 \text{ kPa}$  为例,对于  $2\text{H}_2\text{-O}_2$ 、 $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}25\%\text{Ar}$  和  $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}50\%\text{Ar}$  3 种预混气体,诱导反应时间分别为  $5.401 \times 10^{-7}$ 、 $5.437 \times 10^{-7}$ 、 $6.789 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。此外,由于初始压力的变化,在相同比例惰性气体稀释的混合物中产生了非常大的  $L_{DDT}/D$  散射,与图 5 结果相似,这是由

于 Ar 的惰化作用明显改变了爆轰的起爆条件,致使爆燃到爆轰转捩的临界压力范围变宽。

关于 DDT 起爆距离的预测,大多研究基于经典爆轰理论来构建模型。在 ZND 理论基础上,文献[14]提出起爆距离  $L_{DDT}$  与  $\chi$  的关系为:

$$L_{DDT} \propto L_{1D}/\chi \propto ct_R \left(\frac{E_a}{RT}\right)^{-1} \quad (2)$$

其中: $L_{1D}$ 为一维稳定激波以爆燃速度传播运动达到爆轰状态的距离; $t_R$ 为放热反应时间; $\frac{E_a}{RT}$ 为无量纲活化能。本文通过计算得出这些参数,并将其绘制成图,如图 7 所示。

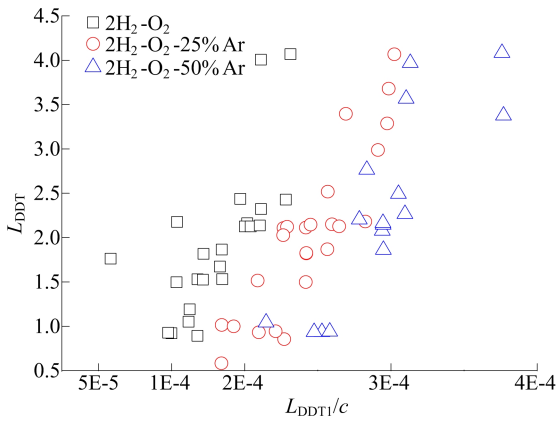


图 7 实验值  $L_{DDT}$  与 Saif 公式计算值  $L_{DDT1}/c$  的对比

可以看出图 7 中的点较为离散,计算值与实验测量值之间并非呈线性关系。这是由于 Saif 实验是通过研究已经建立的爆轰通过孔板障碍物解耦后重新起爆的过程来表征 DDT 的,虽然这一重起爆过程与湍流火焰加速转变为爆轰过程具有同样的激波-火焰耦合结构,但两者之间的流场动力学参数和火焰行为却不完全相同,故而这一模型不能较好地适用于本实验。

文献[15]分别建立了无障碍物圆管以及等间距  $D$  放置圆环障碍物管道内的自由传播火焰转变为爆轰的距离模型,公式如下:

$$\left(\frac{X}{D}\right)_{DDT \text{ Smooth}} = \frac{1}{0.006 \cdot 1(\sigma - 1)} \left(\frac{0.15}{D}\right)^{0.4} \ln\left(0.077 \frac{v_{CJ}}{\sigma S_L}\right) \quad (3)$$

$$\left(\frac{X}{D}\right)_{DDT \text{ BR}} = \frac{1}{1 + 15B_R} \left(\frac{X}{D}\right)_{DDT \text{ Smooth}} \quad (4)$$

其中: $\sigma$ 为膨胀比,是未燃烧气体与燃烧气体密度的比值; $v_{CJ}$ 为 CJ 爆轰速度; $S_L$ 为层流火焰燃烧速度。

通过计算相关参数得出该模型下的起爆距离

$X_{DDT}$ ,并将其与图 5 中所记录的实验值  $L_{DDT}$  进行对比,结果如图 8 所示。

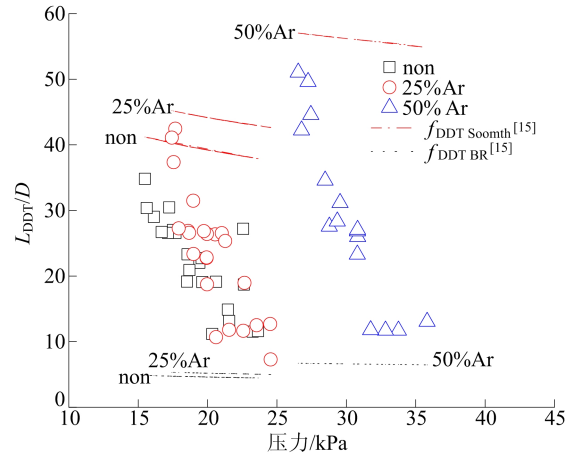


图 8  $L_{DDT}/D$  实验值和 Silvestrini 公式计算值随压力的变化

由图 8 可知,实验中所测得的距离点大致分布在  $f_{DDT \text{ Smooth}}$  和  $f_{DDT \text{ BR}}$  这 2 条曲线之间。该模型较好地表征了  $L_{DDT}$  的上、下限,但它们之间的关联性较差,并不能对起爆距离进行很好地预测。这是由于本实验中所采用的管道只在第 1 段放置障碍物,以便于缩短爆燃到爆轰转变的距离。此外,该模型引入了湍流火焰速度  $S_L$  和膨胀比  $\sigma$  等物性参数,侧重于求解低速火焰传播并连续加速到达  $v_{CJ}$  时所需要的距离。这与爆燃到爆轰转变的实际过程有出入。DDT 过程包含低速爆燃波的持续加速和爆轰的突然形成 2 个阶段:前一阶段爆燃火焰不断加速会达到一个准稳态状态,以大约  $v_{CJ}/2$  速度自持传播,并为后一阶段热点的爆炸提供一个外部环境;第 2 阶段中,燃烧波最终以准稳态爆燃状态转变为爆轰波是一个强间断过程,取决于热点的爆炸及其与周围燃烧波系的耦合作用。

Saif 法和 Silvestrini 法均提供了预测爆轰起爆距离的手段,前者侧重于爆燃波的连续性加速过程,后者则引入了局部爆炸参数  $\chi$  来表征起爆距离。将这 2 种方法结合并加以不同权重得到:

$$L_{DDT} = Am(X/D)_{DDT \text{ BR}} + nf(\chi) \quad (5)$$

其中: $m$ 、 $n$ 为权重系数; $A$ 为与有等间距障碍物管道相比较而言的加速倍数。由于实验中火焰加速至准爆燃阶段的距离占  $L_{DDT}$  总距离的 0.737 3~0.905 7,取算术平均值 0.821 5 为第 1 阶段占比。对于第 2 阶段,取  $0.177 5L_{DDT}$  和  $\chi$  进行回归性分析,最终可得:

$$L_{DDT} = \frac{0.475}{0.006 \cdot 1(\sigma - 1)} \left(\frac{0.15}{D}\right)^{0.4} \ln\left(0.077 \frac{v_{CJ}}{\sigma S_L}\right) +$$

$$\exp(9.29\chi - 42.23) \quad (6)$$

烟熏板上所得实际起爆距离与计算值的对比结果如图 9 所示,可以看出,两者相关性较强。式(6)能够较好地预测不同比例氩气稀释后的  $2\text{H}_2\text{-O}_2$  混合气体在光滑管道中的爆轰起爆距离。

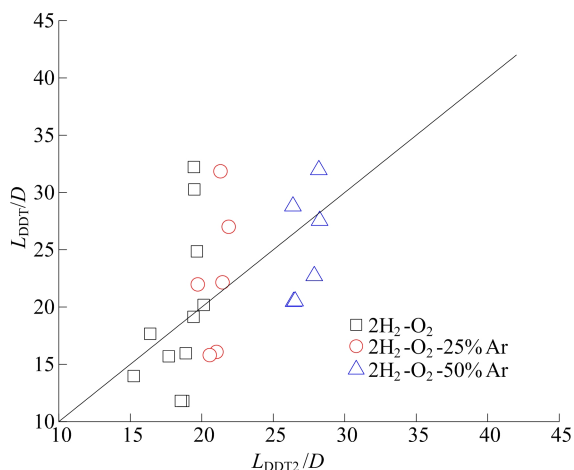


图 9 实验值  $L_{\text{DDT}}/D$  与修正公式计算值  $L_{\text{DDT}2}/D$  的对比

### 3 结 论

本文采用烟熏板和压力传感器对矩形光滑管道下游的  $2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-}n\text{Ar}$  混合气体的爆轰起爆现象进行了研究。研究烟熏板所记录的胞格演变规律发现,爆轰的起爆先经历一个过驱动状态,然后衰减为 CJ 爆轰。对于不同活性的  $2\text{H}_2\text{-O}_2$  气体,随着 Ar 比例的提高,爆燃到爆轰转变的临界压力范围逐渐变宽。同时,引入了无量纲参数  $\chi$  用于表征不同比例 Ar 稀释下的  $2\text{H}_2\text{-O}_2$  爆轰起爆特性。随着气体活性的逐渐降低, $\chi$  呈现逐渐减小的趋势,对应于需要在更高的压力梯度和更长的距离下才会形成 DDT 的转变。基于 DDT 过程的化学动力学与转变特性分析,本文对 Silvestrini 公式和 Saif 公式进行了经验性修正。

### [参 考 文 献]

- [1] LI Q, KELLENBERGER M, CICCARELLI G, et al. Geometric influence on the propagation of the quasi-detonations in a stoichiometric  $\text{H}_2\text{-O}_2$  mixture[J]. Fuel, 2020, 269: 117396-1-13.
- [2] 雷明川,喻健良,闫兴清,等. 惰性气体对氢气/空气爆轰传

- 播的抑制作用[J]. 化工学报, 2022, 73(10): 4754-4761.
- [3] 郑津洋,刘自亮,花争立,等. 氢安全研究现状及面临的挑战[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 106-115.
- [4] 陈祥,潘剑锋,朱跃进,等. 管道截面突缩对爆轰波起爆特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2021, 27(1): 74-80.
- [5] CHAMBERS J M, AHMED K A, ONEILL L, et al. Evidence of pressure build-up in  $\text{H}_2\text{-Air}$  fast flames for deflagration-to-detonation [C]//Pressure Gain Combustion: AIAA SciTech Forum and Exposition, San Diego: AIAA, 2019: 603-607.
- [6] WANG L Q, LI Q, MA H H, et al. Experimental study of DDT in hydrogen-methane-air mixtures in a tube filled with square orifice plates[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 116: 228-234.
- [7] XIAO H H, ORAN E S. Shock focusing and detonation initiation at a flame front[J]. Combustion and Flame, 2019, 203: 397-406.
- [8] SUN X X, LU S X. Effect of obstacle thickness on the propagation mechanisms of a detonation wave[J]. Energy, 2020, 198: 117186.
- [9] DOROFEEV S B. Flame acceleration and explosion safety applications[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2161-2175.
- [10] NG H D, LEE J H S. Comments on explosion problems for hydrogen safety [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(2): 136-146.
- [11] NG H D, JU Y, LEE J H S, et al. Assessment of detonation hazards in high-pressure hydrogen storage from chemical sensitivity analysis[J]. Int J Hydrogen Energy, 2007, 32(1): 93-99.
- [12] BROWNE S, ZIEGLER J, SHEPHERD J E, et al. Numerical solution methods for shock and detonation jump conditions: GALCIT Report FM2006. 006[R]. Pasadena: California Institute of Technology, 2015.
- [13] GOODWIN D G, MOFFAT H K, SPETH R L, et al. Cantera: an object oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Version 2. 2. 0 [EB/OL]. (2015-06-04). <https://zenodo.org/records/48735>.
- [14] SAIF M, WANG W, PEKALSKI A, et al. Chapman-Jouguet deflagrations and their transition to detonation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 2771-2779.
- [15] SILVESTRINI M, GENOVA B, PARISI G. Flame acceleration and DDT run-up distance for smooth and obstacles filled tubes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(5): 555-562.

(责任编辑 胡亚敏)