

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.04.005

# 丙烷-氧气预混气体的火焰传播及点火特性\*

章文义<sup>①</sup> 李玉艳<sup>②③</sup> 潘峰<sup>②③</sup> 郑俊杰<sup>②③</sup>

①江苏警官学院警务指挥与战术系(江苏南京,210031)

②南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

③国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘要] 采用有机玻璃管装置,研究了丙烷-氧气预混气体在管道中的火焰传播特性及最小点火能。研究表明:3种惰性气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、Ar)均明显降低了预混气体火焰在管道中的加速进程;其中,CO<sub>2</sub>抑制效果最为显著,其次是N<sub>2</sub>和Ar。点火敏感电极间距为2 mm。最小点火能( $E$ )随混合气体初始压力的增大而减小,初始压力为100 kPa时,0.16 mJ <  $E$  < 0.32 mJ;当压力降至30 kPa时,2.00 mJ <  $E$  < 3.00 mJ。

[关键词] 火焰传播;最小点火能;抑制效果;初始压力

[分类号] TQ221.1<sup>+</sup>3

## Flame Propagation and Ignition Properties of Propane-Oxygen Premixed Gas

ZHANG Wenyi<sup>①</sup>, LI Yuyan<sup>②③</sup>, PAN Feng<sup>②③</sup>, ZHENG Junjie<sup>②③</sup>

①Command and Tactic Department, Jiangsu Police Institute (Jiangsu Nanjing, 210031)

②School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

③National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Flame propagation characteristics and the minimum ignition energy of propane-oxygen premixed gas were studied using PMMA tube. The results show that all the three inert gases significantly reduce the acceleration process of the flame in the tube, among which the inhibition effect of CO<sub>2</sub> is the most significant, followed by N<sub>2</sub> and Ar. The ignition energy sensitive electrode gap is 2 mm. The minimum ignition energy ( $E$ ) decreases with the increase of the initial pressure of the mixture. When the initial pressure is 100 kPa, there is 0.16 mJ <  $E$  < 0.32 mJ. When the pressure drops to 30 kPa, there is 2.00 mJ <  $E$  < 3.00 mJ.

[KEYWORDS] flame propagation; minimum ignition energy; inhibition effect; initial pressure

## 引言

丙烷(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)作为传统的燃料和化工原料,在能源、化工、航天领域应用广泛<sup>[1-2]</sup>。但由于泄漏导致的火灾和爆炸事故层出不穷,尤其在受限空间内沿管道发生爆燃以后会发生回火,造成更严重的后果<sup>[3-4]</sup>。

对于丙烷燃烧及其爆炸特性的数值模拟和实验研究已被大量报道<sup>[5-7]</sup>。葛俊峰<sup>[8]</sup>、周宁<sup>[9]</sup>等分别研究了点火能及不同管道开口率对丙烷-空气的爆炸过程的影响,研究表明,初始点火能对预混气体爆

炸火焰传播规律以及管壁的动态响应有显著影响,点火能越大,爆炸越剧烈,爆炸峰值压力和管壁最大应变就越大,且压力波和管壁应变的发展一致;随着管道开口率的增加,管道内最大爆炸超压迅速降低;开口情况下,最大爆炸超压出现在点火端附近,靠近开口处爆炸超压逐渐下降;而闭口情况下,最大爆炸超压出现在管道两端。孙少辰等<sup>[10]</sup>在水平直管中对丙烷的爆轰火焰在管道阻火器中的火焰传播及淬熄规律进行了研究;陈锐等<sup>[11]</sup>对丙烷的自燃特性及爆震机理进行了实验研究;何学超等<sup>[12]</sup>考察了弯曲管道对丙烷-空气火焰传播的影响。

最小点火能(minimum ignition energy, MIE)可

\* 收稿日期:2019-04-01

第一作者:章文义(1972~),男,博士研究生,主要从事爆炸防控技术教学科研工作。E-mail:171355553@qq.com

通信作者:郑俊杰(1973~),女,高级工程师,主要从事含能材料方面的研究。E-mail:839829396@qq.com

用来衡量可燃气体与空气混合物发生燃烧爆炸的危险性,根据最小点火能的作用,可对可燃气体与空气混合物生产、储运和使用过程的危险性进行安全考核及评估<sup>[13-14]</sup>。Eckhoff 等<sup>[15]</sup>建立了用于测定气体和蒸汽最小点火能的标准火花发生器,对正常大气条件下丙烷-空气的最小点火能进行了测量,并采用了 Moorhouse 等学者在 1974 年提出的可能最高的边界线程序计算,得到了最小点火能为 0.48 mJ。Ebina 等<sup>[16]</sup>通过细镍铬丝熔化释放的能量来测量分散水雾对丙烷-空气混合物最小点火能的影响,得出当水雾质量分数  $Y_0$  为 0.17 时,相对于  $Y_0 = 0$  时水雾的最小 VERR(体积能量释放速率)增加了 50%;当  $Y_0 > 0.20$  时,点火概率为 0。

尽管丙烷-空气的爆炸性能及最小点火能已被广泛研究,但丙烷在高浓度氧气氛围中的火焰传播特性和最小点火能却鲜有报道。

为了给丙烷-氧气预混合体的安全应用提供参考,本文中,采用有机玻璃管、压力采集系统及高压放电装置研究了丙烷-氧气在圆柱形半封闭管道中火焰传播的动力学行为,以及惰性气体对其火焰传播过程的影响规律;同时测定了丙烷-氧气的最小点火能,研究了初始压力及电极间距对丙烷-氧气最小点火能的影响规律。

## 1 实验系统

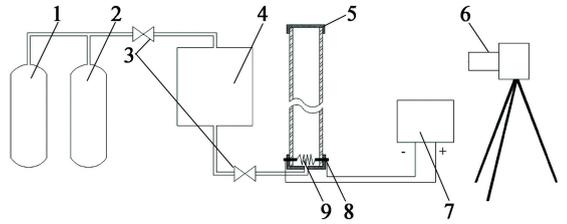
### 1.1 火焰传播装置

该实验系统包括燃烧管、高速摄像机、配气系统、点火系统及同步控制系统等,装置如图 1 所示。燃烧管为竖直放置的圆柱型有机玻璃管,长度为 1 400 mm,内径 50 mm,管壁厚 5 mm。为了便于高速摄像机拍摄管道内火焰的传播特性,有机玻璃管后面设置黑色背景。在距离有机玻璃管下端 20 mm 处设置两个铜棒,将长 100 mm、直径 0.6 mm 的电阻丝卷成螺旋状,两边分别和铜棒相连,通电电源电压为 20 V,通电功率 20 W,点火前瞬间将玻璃管上端密封盖打开。

配气系统:流量计量程为 0 ~ 500 mL/min,误差为  $\pm 0.5\%$ 。配气前先将气袋(30 L)抽至真空,关闭气袋阀门,进气前须将配气管路清洗 3 遍,然后再打开气袋阀门,依次充入丙烷和氧气,气体充入完毕后关闭气袋阀门,静置 24 h,以便气体充分混合均匀。

实验中,高速摄影系统所采用的摄像机为日本 Photron 公司生产的 Fastcam 系列产品。拍摄速度达 20 000 Hz,曝光时间为 100 ns,像素为 640 × 1 024。

整个摄像机由高速处理器、摄像头以及显示器等组成。本实验中,摄像机的拍摄速度设置为 4 000 Hz。



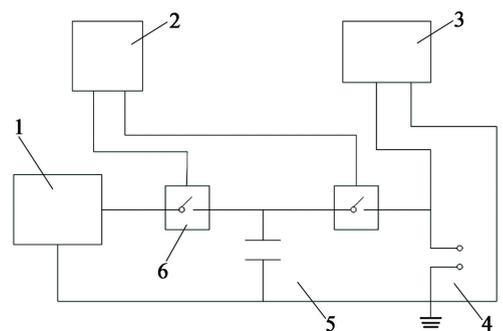
1 - 丙烷;2 - 氧气;3 - 阀门;4 - 气袋;5 - 密封盖;  
6 - 高速摄像机;7 - 电源;8 - 铜柱;9 - 电阻丝。

图 1 火焰传播装置示意图

Fig. 1 Schematic of flame propagator

### 1.2 最小点火能

最小点火能测试装置由有机玻璃燃烧管、高压电源、示波器及控制系统等组成,其中燃烧管尺寸同 1.1,点火时燃烧管两端均处于密封状态,测试装置如图 2 所示。高压电源,东文高压电源(天津)股份有限公司, DW 系列,输出最高直流电压 30 kV(正输出),电压调整率小于 0.1%。高压电源输出电压可通过面板旋钮连续调节。系统可以根据不同的能量选择合适的电容,电容组有 5 ~ 1 000 pF 等规格。示波器,泰克公司,MSO70000C/DX 复合信号示波器。控制系统由工业可编程控制器 PLC 模块及继电器等组成。



1 - 高压电源;2 - PLC;3 - 示波器;  
4 - 放电电极;5 - 可变电容;6 - 开关。

图 2 最小点火能装置测试示意图

Fig. 2 Schematic of testing device for the minimum ignition energy

由于电容存在放电不完全的现象,加上回路中的电能损耗,因此采用电压、电流的瞬时值,对电压和电流进行时间积分,来计算电火花的能量<sup>[17]</sup>:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} V_i I_i dt \quad (1)$$

式中: $E$ 为点火能量,J; $V_i$ 为瞬时电压,V; $I_i$ 为瞬时电流,A; $t_1$ 、 $t_2$ 分别为电极放电初、末时间,s。结果由示波器记录。典型的电流、电压与时间的关系曲线如图3所示。当电容电火花能量 $E$ 小于100 mJ时,电火花的能量为

$$E = \frac{1}{2}CU^2. \quad (2)$$

式中: $C$ 为电容量,F; $U$ 为电路放电时电压,V。

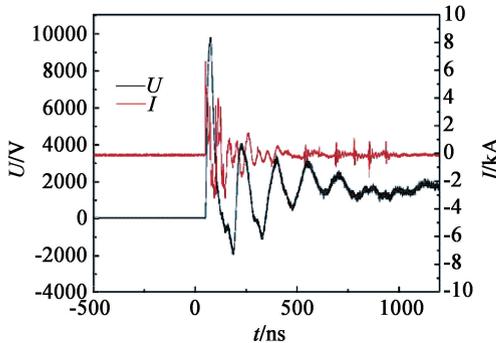


图3 实测电流、电压与时间的关系

Fig. 3  $U$ - $t$  and  $I$ - $t$  curves

最小点火能量( $E$ )介于 $E_1$ (连续10次均出现着火的最大能量值)和 $E_2$ (能够点着的最小能量值)之间,即 $E_1 < E < E_2$ 。

### 1.3 实验材料

丙烷,纯度99.99%;氧气,纯度99.99%;氮气,纯度99.95%;氩气,纯度99.99%;二氧化碳,纯度99.95%。

## 2 结果及讨论

### 2.1 火焰传播特性

图4为丙烷-氧气在圆柱形半封闭管道中火焰传播实物图。预混气体的压力为100 kPa,出现可见火焰记为0时刻。从图4中可以看出,1.0 ms时火

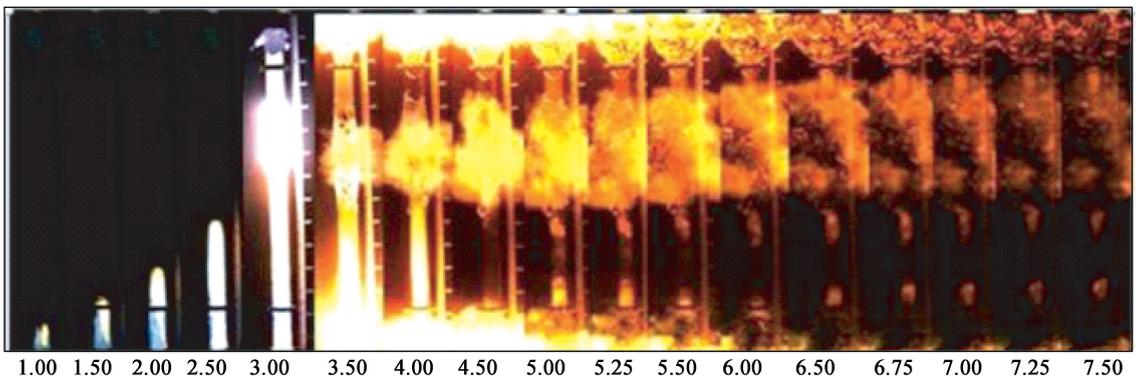


图4 丙烷-氧气在圆柱形半封闭管道中火焰传播的实物图(单位:ms)

Fig. 4 High-speed photography images showing the flame evolution in the semi-closed tube(unit:ms)

焰阵面中间出现凹陷,火焰充满已燃区域,呈亮白色,点火点附近呈蓝色;随着反应的进行,火焰亮度增强,火焰前端截面逐渐转变为规则的平滑弧面;约3.0 ms时,火焰锋面到达有机玻璃管末端,火焰亮度进一步增加,并向有机玻璃管周围扩展,火焰充满已燃区域。随后,火焰截面冲出管道,有机玻璃管出口处呈现火球状结构。

### 2.2 惰性气体对火焰加速进程的影响

图5为预混气体前端位移随时间的变化曲线。实验中分别添加了3种惰性气体:氮气( $N_2$ )、氩气( $Ar$ )和二氧化碳( $CO_2$ ),体积分数均为70%。丙烷-氧气混合物被点燃后,火焰前端位移增加最快,3.0 ms时火焰前端已到达管顶处;其他3种混合物到达管顶的时间分别为5.5 ms( $Ar$ )、6.5 ms( $N_2$ )和7.5 ms( $CO_2$ )。4种预混气体火焰前端位移随时间的变化呈指数关系: $y = y_0 + A \cdot \exp[-0.5(x - x_c)/w]^2$ 。

图6为预混气体前端传播速度随时间的变化曲线。由图6可知,点火后,丙烷-氧气的火焰传播速度迅速增加,2.5 ms时,火焰速度增加至550 m/s;此后,火焰传播速度呈现出跳跃式增长,此过程为爆

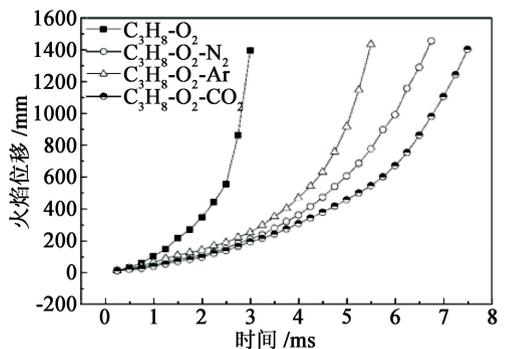


图5 火焰前端位移随时间的变化

Fig. 5 Location of flame leading tip as a function of time

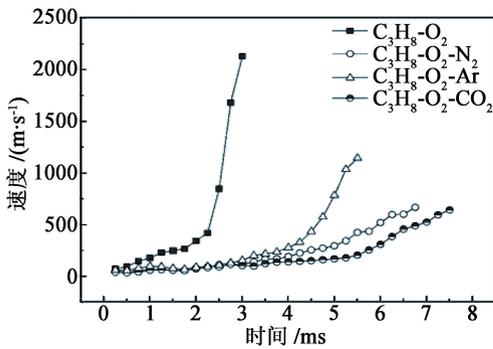


图 6 火焰前端截面传播速度随时间的变化

Fig. 6 Propagation speed of flame leading tip section with time

燃转爆轰过程;3.0 ms 时,火焰速度已达到 1 400 m/s。但添加惰性气体后,火焰传播速度明显降低;点火后,3 种添加惰性气体的混合物点火后均经历一段相对稳定燃烧阶段,在 0~4.0 ms 的时间段内,3 种预混气体的火焰传播速度处于缓慢增加状态。从点火到传播至管顶处,最大速度分别为 1 140 m/s (Ar)、640 m/s(N<sub>2</sub>)和 644 m/s(CO<sub>2</sub>),3 种预混气体均未发生爆轰。与 N<sub>2</sub> 和 Ar 相比,CO<sub>2</sub> 的稀释对爆燃火焰速度的影响更大,这在许多其他燃料-空气-添加剂混合物中都可以观察到<sup>[18]</sup>。稀释丙烷-氧气混合物后,一方面燃料和氧气含量减少,反应过程中产生的能够维持火焰传播的热量也减小,反应区最大火焰温度和燃烧速度均降低;另一方面,CO<sub>2</sub> 在高温下可能参与了反应,进一步降低了丙烷-氧气的反应速率。为了估计 CO<sub>2</sub> 分解对正常燃烧速度的影响,研究者们引入了一种添加剂,一种在化学上不活跃但具有 CO<sub>2</sub> 的热传导特性的物质,这种物质不发生反应,在整个燃烧过程中它的浓度保持不变<sup>[19-20]</sup>。在模拟中,用这种新组分计算的层流燃烧速度位于 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 稀释的层流燃烧速度之间。研究表明,CO<sub>2</sub> 的分解是不可忽视的;但是由于火焰温度的关系,当添加量增加时,CO<sub>2</sub> 的分解作用被减弱。同时,CO<sub>2</sub> 通过热辐射将热量向周围散发,也降低了反应区的反应速率,使火焰燃烧速率进一步降低。

### 2.3 最小点火能

#### 2.3.1 电压对最小点火能的影响

图 7 为电极两端实测的放电电压曲线,充电电容为 100 pF。电容在放电时会有部分冗余,放电不完全。表 1 总结了电压在 2~12 kV 范围内实测电压与设定电压的关系,由表 1 可知:实测电压比设定电压略大,但由于电容放电不完全,导致放电电压与设定电压误差在 4.0% 以下,设定电压 12 kV 时,误

差最小,为 0.3%,但仪器的工作电压范围为 0~12 kV,从安全角度考虑,应选择 12 kV 以下;其次是 8 kV 时误差为 0.5%,比较合理;设定电压在 2~6 kV 范围内,误差在 3.3%~4.0% 之间;同时,设定电压小于 6 kV 时,由于电极材料及尺寸的关系,两电极之间不容易击穿空气,产生火花。综合以上因素,将电压设定为 8 kV。

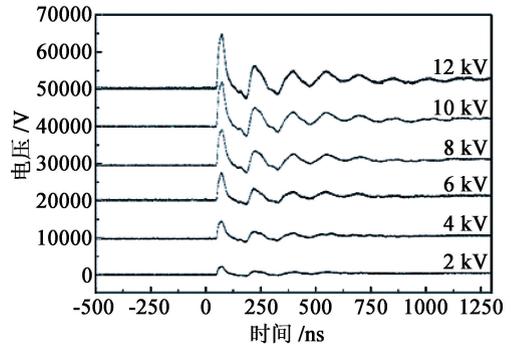


图 7 实测电极两端电压与时间的关系

Fig. 7 Ignition voltage-time curves

表 1 设定电压与实测电压汇总

Tab. 1 Summary of set voltage and measured voltage

| 设定电压/<br>kV | 实测电压/<br>kV | 残余电压/<br>kV | 放电电压/<br>kV | 误差/<br>% |
|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 2.00        | 2.36        | 0.44        | 1.92        | 4.0      |
| 4.00        | 4.74        | 0.90        | 3.84        | 4.0      |
| 6.00        | 7.50        | 1.30        | 6.20        | 3.3      |
| 8.00        | 9.78        | 1.74        | 8.04        | 0.5      |
| 10.00       | 12.06       | 2.22        | 9.84        | 1.6      |
| 12.00       | 14.74       | 2.70        | 12.04       | 0.3      |

#### 2.3.2 初始压力对最小点火能的影响

图 8 为不同初始压力下丙烷-氧气的最小点火能  $E$ 。总体来说,初始压力越小,测得的最小点火能越大,与文献报道的规律相符<sup>[21]</sup>;初始压力为 30 kPa 时,2.00 mJ <  $E$  < 3.00 mJ;初始压力为 50 kPa 时,0.64 mJ <  $E$  < 0.96 mJ;初始压力为 100 kPa 时,预混气体的最小点火能明显降低,0.16 mJ <  $E$  < 0.32 mJ。对于碳氢燃料而言,最小点火能均在富燃料比组分条件下获得,这是因为点火时火花处的燃料被瞬间耗尽,而周围的燃料由于相对缓慢的扩散速度无法及时扩散至点火核心处,因此,为了保证点火初期点火核心的增长,就必须提供所需的燃料分子,增加单位体积内燃料的密度;同时,压力越小,单位体积内发生碰撞的分子数量越少,通过电极散失的能量增加,用于点燃燃料的能量降低,点燃燃料就

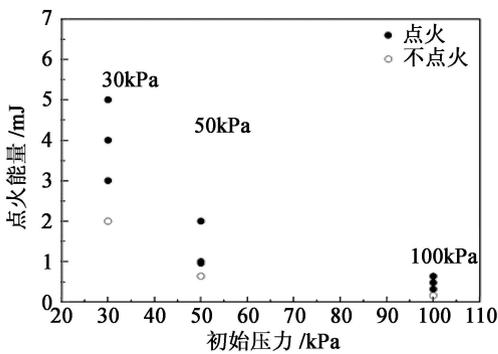


图8 不同初始压力下丙烷-氧气的最小点火能

Fig. 8 The minimum ignition energy of the mixed gas at various initial pressure

需要更高的点火能量<sup>[22]</sup>。

### 2.3.3 电极间距对最小点火能的影响

通过实验,得到电极间距和当量比对储存最小点火能  $E$  的影响,分别如图9所示。从图9可以看出,存在一个最佳的电极间距(2 mm),使得点火能量达到最小。当电极间距为2 mm时, $0.16 \text{ mJ} < E < 0.32 \text{ mJ}$ 。由于电极材料均为金属,是热和电的良导体,电极间距较小时,电极的失热作用占据主导,电极核心区气体被点燃后,反应放出的热量由电极散失,当散热速率大于放热速率时,反应无法自行传递下去,从而使反应终止,火焰难以蔓延。同时,当间距较小时,电极间的气体受热急剧膨胀,产生冲击波,一部分能量以冲击波的形式散失,导致点燃气体所需能量增加;相反,当电极间距偏大时,两电极间的空气不易被击穿。即使击穿,由于较大的间距,能量不能集中,点燃混合气体时需要更大能量,造成测试数据偏大<sup>[23-24]</sup>。

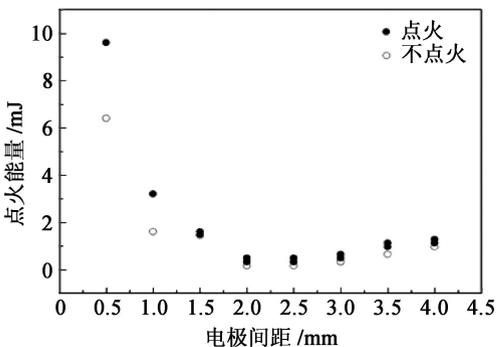


图9 最小点火能随电极间距的变化

Fig. 9 The Minimum ignition energy of propane-oxygen mixture at various electrode gap

## 3 结论

1) 采用有机玻璃管装置研究了丙烷-氧气在半

封闭燃烧管中的火焰传播特性,预混气体被点燃后,经过2.5 ms的缓慢加速阶段,进入爆燃转爆轰阶段,到达管道顶端的最大速度为1400 m/s;  $\text{N}_2$ 、Ar和 $\text{CO}_2$  3种惰性气体均会减缓预混气体火焰加速进程,但 $\text{CO}_2$ 效果最为显著,其次是 $\text{N}_2$ 和Ar。

2) 实验中设定电压为8 kV,测得最小点火能试验系统的敏感间距为2 mm;最小点火能随着气体初始压力的增大而减小,初始压力为30、50 kPa和100 kPa时,最小点火能的范围分别为: $2.00 \text{ mJ} < E < 3.00 \text{ mJ}$ ,  $0.64 \text{ mJ} < E < 0.96 \text{ mJ}$ 和  $0.16 \text{ mJ} < E < 0.32 \text{ mJ}$ 。

## 参考文献

- [1] 张云明. 丙烷/空气拉伸火焰传播稳定性实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(7):42-47. ZHANG Y M. Experimental study on stability of propane/air stretched flame [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(7):42-47.
- [2] 李文杰, 李建中, 任勇智, 等. 丙烷/空气贫油直接喷射燃烧室燃烧特性试验研究[J]. 推进技术, 2017, 38(9):2055-2061. LI W J, LI J Z, REN Y Z, et al. Experimental investigation on combustion characteristics of lean direct Injection combustor with propane/air [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(9):2055-2061.
- [3] RAZUS D, MOVILEANU C, OANCEA D. The rate of pressure rise of gaseous propylene-air explosions in spherical and cylindrical enclosures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(1):1-8.
- [4] WERLINGY L, LAUCK F, FREUDENMANN D, et al. Experimental investigation of the flame propagation and flashback behavior of a green propellant consisting of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{C}_2\text{H}_4$  [J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2017(11):735-752.
- [5] TANG C L, ZHENG J J, HUANG Z H, et al. Study on nitrogen diluted propane-air premixed flames at elevated pressures and temperatures [J]. Energy Conversion & Management, 2010, 51(2):288-295.
- [6] LOHRER C, DRAME C, SCHALAU B, et al. Propane/air deflagrations and CTA measurements of turbulence inducing elements in closed pipes [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, 21(1):1-10.
- [7] RAZUS D, BRINZEA V, MITU M, et al. Temperature and pressure influence on explosion pressures of closed vessel propane-air deflagrations [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1/2/3):548-555.
- [8] 葛俊峰. 不同管道开口率下丙烷-空气预混火焰传播

- 规律的研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2015, 44(6):785-787, 791.
- GE J F. Investigation of the propagation law of premixed propane-air flame in the dust with different opening ratios [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University(Natural Science Edition), 2015, 44(6):785-787, 791.
- [9] 周宁, 耿莹, 冯磊, 等. 点火能对预混气体爆炸过程及管道薄壁加载响应的影响[J]. 实验力学, 2015, 30(5):643-648.
- ZHOU N, GENG Y, FENG L, et al. On the influence of ignition energy on dynamic response of pipe wall in premixed gas explosion process [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(5):643-648.
- [10] 孙少辰, 毕明树, 刘刚, 等. 爆轰火焰在管道阻火器内的传播与淬熄特性 [J]. 化工学报, 2016, 5(5):2176-2184.
- SUN S C, BI M S, LIU G, et al. Detonation flame propagation and quenching characteristics in crimped-ribbon flame arrester [J]. CIESC Journal, 2016, 5(5):2176-2184.
- [11] 陈锐, 张鹏飞, 潘家营, 等. 丙烷自燃特性及爆震机理的试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(12):1217-1222.
- CHEN R, ZHANG P F, PAN J Y, et al. Experimental study of spontaneous combustion characteristics and knocking mechanism of propane [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(12):1217-1222.
- [12] 何学超, 孙金华, 丁以斌, 等. 90°弯曲管道对丙烷-空气预混火焰传播的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(3):241-245.
- HE X C, SUN J H, DING Y B, et al. Influence of 90° bend on propane-air premixed flame propagation [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(3):241-245.
- [13] 张驰, 钟北京, 郑东. 正庚烷/空气混合气最小点火能量及其影响因素[J]. 航空动力学报, 2018, 32(2):456-462.
- ZHANG C, ZHONG B J, ZHENG D. Minimum ignition energy of *n*-heptane/air mixtures and its affecting factors [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 32(2):456-462.
- [14] 王乐, 姜夏冰, 张景林, 等. 可燃气体(液体蒸气)爆炸测试装置的改进研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(12):89-95.
- WANG L, JIANG X B, ZHANG J L, et al. Improvement on the explosion testing equipment of combustion gases (vapors) [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(12):89-95.
- [15] ECKHOFF R K, NGO M, OLSEN W. On the minimum ignition energy (MIE) for propane/air [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1/2/3):293-297.
- [16] EBINA W, LIAO C, NAITO H, et al. Effect of water mist on minimum ignition energy of propane/air mixture [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2):3271-3278.
- [17] Standard test method for minimum ignition energy and quenching distance in gaseous mixtures: ASTM E, 582-88(1999)[Z]. 1999.
- [18] ZHANG X, HUANG Z H, ZHANG Z Y, et al. Measurements of laminar burning velocities and flame stability analysis for dissociated methanol-air-diluent mixtures at elevated temperatures and pressures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(11):4862-4875.
- [19] HALTER F, FOUCHER F, LANDRY L, et al. Effect of dilution by nitrogen and/or carbon dioxide on methane and iso-octane air flames [J]. Combustion Science and Technology, 2009, 181(6):813-827.
- [20] DI BENEDETTO V, DI SARLI E, SALZANO F, et al. Explosion behavior of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34:6970-6978.
- [21] LEE T W, JAIN V, KOZOLA S. Measurements of minimum ignition energy by using laser sparks for hydrocarbon fuels in air: propane, dodecane, and jet-A fuel [J]. Combustion & Flame, 2001, 125(4):1320-1328.
- [22] LIM E H. Effects of spark kernel dynamics on laser induced minimum ignition energies of combustible gases [D]. Los Angeles: University of Southern California, 1997.
- [23] 赵翔宇, 李洪波, 李自力, 等. 低温工况甲烷最小点火能实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2):353-358.
- ZHAO X Y, LI H B, LI Z L, et al. Experimental study on the minimum ignition energy of methane at low temperature [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2):353-358.
- [24] 王犇, 邵世玺, 赵清, 等. 丙烯气体最小点火能研究 [J]. 环境工程, 2014(z1):387-390.
- WANG B, SHAO S X, ZHAO Q, et al. Study on the minimum ignition energy of propylene [J]. Environmental Engineering, 2014(z1):387-390.