

DOI: 10.11883/bzycj-2021-4058

不同初始压力下可爆预混气体通过 波纹板阻火器的淬熄特性研究*

张炼卓, 闫兴清, 吕先舒, 喻健良, 李通征, 詹潇兵
(大连理工大学大学化工学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 阻火器是一种应用广泛的爆炸阻隔装置。为了深入理解影响阻火器性能的因素, 通过实验方法探究了不同初始压力下可爆预混气体通过波纹板阻火器的淬熄特性。结果表明, 可燃气体的活性、体积分数和初始压力均会影响火焰速度稳定性、传播模式以及淬熄难度。实验发现火焰传播具有 3 种模式: 直接淬熄、穿过阻火单元后逐渐淬熄、淬熄失败。可淬熄的最大初始压力 p_{lim} 用以表征火焰淬熄难度, 虽然其最小值位于化学计量比, 但在一定体积分数范围内保持恒定。此外, 基于传热作用得到密闭管道中丙烷-空气预混气爆燃阻火速度公式, 并进行了实验验证。

关键词: 波纹板阻火器; 预混火焰; 淬熄; 初始压力; 火焰速度

中图分类号: O389; TQ569

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

On quenching characteristics of combustible premixed gas through a crimped-ribbon flame arrester at different initial pressures

ZHANG Lianzhuo, YAN Xingqing, LYU Xianshu, YU Jianliang, LI Tongzheng, ZHAN Xiaobing
(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: The crimped flame arrester is a common disaster prevention and control device. Most of the research focuses on the higher-pressure working conditions instead of the pressure lower than 0.1 MPa when it applies in special areas or environments. This paper explores the quenching characteristics of different combustible gas-air mixtures passing through crimped ribbon flame arresters at different initial pressures to replenish the low-pressure protection test and understand the factors affecting the performance of the flame arrester deeply. The experiments were carried out in the DN80 circular pipe. And the crimped ribbon plate slit channel with a cross-section of an approximately equilateral triangle is 38 mm long and 0.8 mm high. The experimental gases are premixed propane-air with a volume fraction of 4.2% and premixed ethylene-air with different concentrations obtained according to the partial pressure method. The ignition voltage is 10 kV. It is found that the activity, concentration, and initial pressure of combustible gas will affect the stability of flame velocity, propagation mode, and quenching difficulty. The results show that there are three modes of flame propagation: direct quenching, quenching after passing through the flame retardant unit, and quenching failure. They can be explained as the flame not passing through the slits, the flame passing through the slits but being extinguished before reaching the pipe end, and the flame keeps spreading until the pipe end. Also, the velocity oscillation occurs on the unprotected side of the pipeline, and the velocity rises incredibly when the quenching failed flame passes through the protected side. The formula of deflagration flame quenching velocity of premixed propane-air in a closed pipe was established based on the heat transfer effect and verified by the quenching experiment of premixed gas with a volume fraction of 4.2%. The maximum initial pressure is defined as the limit pressure that

* 收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(52174167)

第一作者: 张炼卓(1998—), 女, 硕士研究生, zhanglian-zhuo333@163.com

通信作者: 喻健良(1963—), 男, 博士, 教授, yujianliang@dlut.edu.cn

quenching would fail at initial pressure higher than it. It is proposed to use the limit pressure to characterize the degree of quenching difficulty. It is worth remarking that quenching is the most difficult at stoichiometric concentration, where the limit pressure is the smallest, and the limit pressure will remain constant within a certain concentration range.

Keywords: crimped-ribbon flame arrester; premixed flame; quenching; initial pressure; flame speed

阻火器是一种应用广泛的隔爆阻火装置,其核心元件是内部的阻火单元。深入理解火焰通过不同类型阻火单元的淬熄行为,明确不同规格阻火单元能够淬熄的临界火焰参数特性及其影响因素,是构建阻火器理论与模型、开展结构设计与优化的基础。

Payman 等^[1]和 Cubbage^[2]较早进行了煤气阻爆实验,发现火焰传播速度能够显著影响阻火器性能。Palmer 等^[3]、Langford 等^[4]通过化学计量比的丙烷-空气预混气火焰淬熄实验,发现阻火单元的狭缝几何尺寸与火焰进口速度成正比,并将热量传递作为火焰淬熄的原因。Berlad^[5]研究了矩形管道中丙烷-氧-氮混合气火焰淬熄距离随压力的变化规律。Kersten 等^[6]记录了火焰在波纹板阻火器中的传播过程以及爆炸各阶段的火焰速度和压力。Henkel 等^[7]采用湍流模型预测了火焰在阻火器微通道中的传播过程,认为化学动力学机制对火焰淬熄有显著影响。周凯元等^[8-9]开展了平行板狭缝、波纹板阻火器的阻火实验,提出了淬熄长度、淬熄边界层等概念,并推导了 II A 类气体爆燃火焰的阻火器参数计算公式。陈鹏^[10]模拟了火焰在圆管和平行板狭缝中的淬熄过程,对比了多种惰性气体对淬熄的促进作用。张省漪^[11]总结了多孔隙通道中丙烷-空气预混气火焰速度与压力的相互影响。孙少辰等^[12-13]开展了不同活性预混气爆轰火焰在波纹管道阻火器内的传播与淬熄实验,探讨了装置结构参数等因素对传播过程的影响。王鲁庆等^[14]对 II A 类气体波纹板阻爆燃型阻火器进行了实验研究,得到了阻火速度与狭缝通道的长度、扩张比的平方成正比的结论。

在多种阻火器类型中,波纹板阻火器因阻火性能好且受阻力较小^[15],通常被研究人员采用。调研发现,现有研究多关注常压工况,实验介质大多为化学计量比的丙烷-空气预混气体。实际上,阻火器的设计和选型还要考虑应用环境和气体介质的种类,因此,研究不同活性、不同初始压力下可燃预混气体的淬熄特性,有助于理解阻火器性能及指导科学应用。

本文中,参考标准 GB/T 13347—2010《石油气体管道阻火器》^[16],以不同体积分数的丙烷-空气、乙烯-空气可燃预混气体为介质开展实验研究,系统探讨不同初始压力下可燃预混气体通过波纹板阻火器的火焰传播与淬熄过程。

1 实验装置及方法

实验装置由圆形管道、阻火器、配气系统、点火系统、测量及数据采集系统等组成,如图 1 所示。圆形管道总长 4 000 mm,由 4 段长 1 000 mm 的管道通过法兰连接而成,公称直径 DN80,壁厚 4 mm,管道点火端到阻火器入口为未受保护侧管道,长度 $L_1=3\ 000\ \text{mm}$,阻火器出口到管道末端为受保护侧管道,长度 $L_2=1\ 000\ \text{mm}$ 。

阻火器主要由单层波纹板、外壳及配件构成,波纹板通道狭缝近似为正三角形,狭缝高 $h=0.8\ \text{mm}$,通道长 $L=38\ \text{mm}$ 。阻火器外壳内径 165 mm,长 $L_0=420\ \text{mm}$ 。

采用分压法配制一定体积分数的预混气体,气体静置 24 h 后使用。将整个管道抽至绝对真空状态后充气进行实验。采用 10 kV 双电极高压点火,点火持续时间为 1 s,点火前管内气体静置 3 min。测量及数据采集系统由光电传感器、光电转换电路、高频数据采集卡等组成。光电传感器接收到火焰的光信号后,经转换电路将光信号转换为电信号,采集卡将信号采集、存储并传输至计算机。每段管道布置 4 个光电传感器,相邻传感器之间距离 200 mm,第 1 个传感器距离管道点火端 1 200 mm,共布置 12 个光电传感器。两传感器间距与接收信号时间差之比即为火焰速度。

实验介质参考标准 GB/T 13347—2010《石油气体管道阻火器》^[16]选取,表 1 列举了所配制的预混气体类型、可燃气体积分数 φ 和当量比 ϕ 。

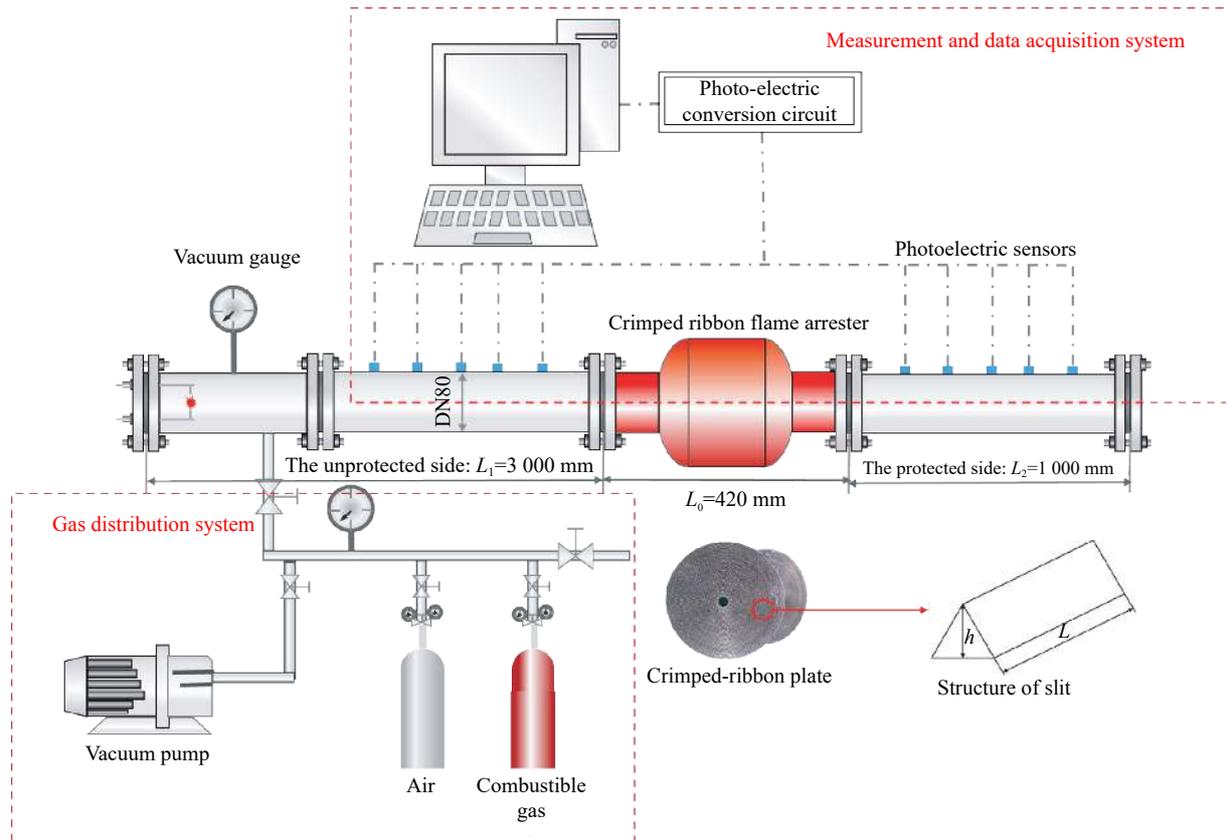


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental system

表 1 可燃气体-空气预混气体

Table 1 Combustible gas-air premixed gas

预混气体	$\varphi/\%$	ϕ
丙烷-空气(C ₃ H ₈ -air)	4.2	1.03
	5.0	0.76
	5.5	0.83
乙烯-空气(C ₂ H ₄ -air)	6.5	1.00
	7.5	1.16
	8.5	1.33
	9.5	1.50

2 实验结果与讨论

2.1 不同体积分数乙烯-空气预混气体的淬熄特性

图 2(a)~(c) 分别给出了乙烯体积分数为 5.0%、5.5% 和 6.5% 的乙烯-空气预混气体在不同初始压力 p_0 时的火焰速度曲线。图 2(a) 中, 当 $p_0=60$ kPa 时, 阻火器入口火焰速度为 9 m/s, 阻火器出口后的第 1 个火焰传感器未收到信号, 说明淬熄发生于阻火单元内。当 $p_0=70$ kPa 时, 阻火器入口火焰为 36 m/s, 阻火单元内火焰速度为 31 m/s, 即阻火器出口的第 1 个火焰传感器接收到信号, 说明火焰穿过阻火单元后仍传播一段距离, 淬熄发生于管道末端前。而当 $p_0 \geq 80$ kPa 时, 火焰则会直接穿过阻火器继续向下游传播, 直至管道末端熄灭。因此, 将上述 3 种火焰传播模式分别定义为直接淬熄、穿过阻火单元后逐渐淬熄和

淬熄失败。根据该定义, 可以发现, 图 2(b)~(c) 分别在初始压力为 50 和 30 kPa 时直接淬熄, 在初始压力为 60 和 40 kPa 时淬熄失败。

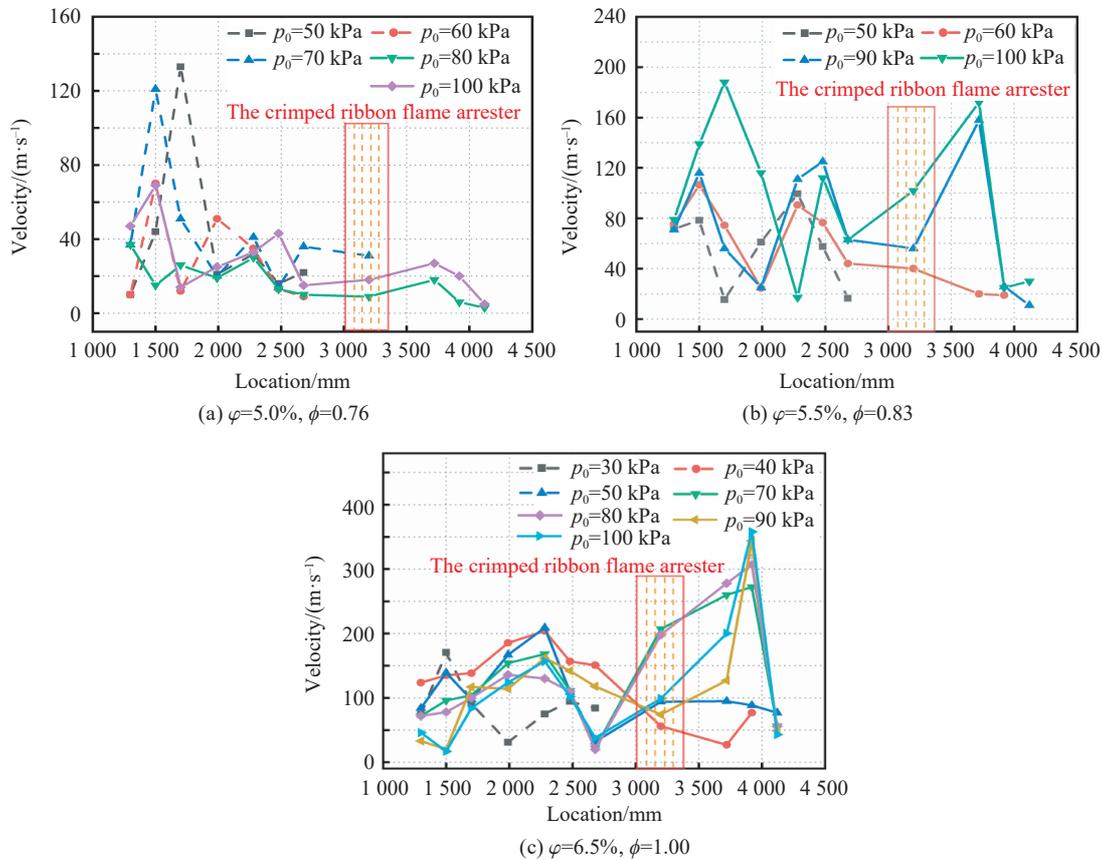


图 2 不同初始压力下的乙烯-空气预混气体火焰传播速度曲线(贫燃料)

Fig. 2 Flame propagation velocity of premixed C₂H₄-air under different initial pressures (lean fuel)

图 3(a)~(c) 分别给出了乙烯体积分数为 7.5%、8.5% 和 9.5% 的乙烯-空气预混气体在不同初始压力 p_0 下的火焰速度曲线。根据之前对火焰传播模式的定义, 富燃料预混气体火焰通过阻火单元时存在 2 种传播模式: 直接淬熄、淬熄失败。

火焰传播过程中的热量损失和自由基损耗致使火焰可能在阻火单元内淬熄。然而, 少量自由基穿透熄灭层^[8]继续反应是火焰穿过阻火单元后逐渐淬熄的原因。因为当单位体积内存在更多自由基时, 穿越熄灭层的自由基更多, 整体穿透熄灭层几率更大, 在穿越熄灭层的自由基支持下, 火焰得以继续传播。但是由于尚存的自由基数量有限, 因而反应速率有限, 其释放热量也有限, 无法持续支持反应进行, 最终火焰也会熄灭。此外, 狭缝壁温持续上升, 火焰与狭缝壁温差缩小, 热量损失减小, 因此火焰最终传播至管末, 出现淬熄失败。

观察图 2~3, 速度曲线在管道未受保护侧振荡, 该现象与压力波相关。反应产生的压力波传播至狭缝通道, 阻火器外壳扩张产生反射压力波^[13], 由于与火焰传播方向相反, 会阻碍火焰向前, 反射波通过后, 火焰锋面与前方未燃烧气体接触, 反应加速, 速度再次上升。若火焰速度较大, 火焰锋面与压力波的距离较小, 反射波对火焰作用很小或者没有与火焰锋面相遇, 则对火焰抑制效果不明显。

从速度衰减次数和衰减幅度角度分析可燃气体积分分数和初始压力对火焰速度振荡的影响。从速度衰减次数看, 可燃气体积分分数会产生影响, $\varphi=5.0\%$ 时, 会出现 3 次减速; 而当可燃气体积分分数更高时, 至多出现 1 或 2 次减速。从图 4 可以看出, 初始压力也会对速度衰减次数产生影响, 当初始压力低于 60 kPa 时, 出现 2 次减速; 当初始压力提升至 70 和 80 kPa 时, 出现 3 次减速; 然而当初始压力进

一步提升至 100 kPa 时, 减速又重新降至 2 次。这是由于对于低体积分数的预混气体, 单位体积内乙烯分子较少, 反应不够剧烈, 火焰速度较小, 如图 2(c) 和图 3 所示, 火焰初始速度大多处于 70~120 m/s 区间, 而图 2(a) 中 $\varphi=5.0\%$ 的预混气初始速度则小于 50 m/s。因此受压力波影响大, 若初始压力增加, 反射波强度也随之增大, 但此时火焰仍未达到较高速度, 压力波仍然存在较大影响, 因此速度衰减次数随初始压力提升而增加。当初始压力进一步提升时, 火焰速度达到较大值, 反射波对火焰的抑制作用减弱, 速度衰减次数也随之减少。因此, 未受保护侧管道火焰速度衰减次数会随着可燃气体积分数增大而减少, 对于低体积分数预混气体, 则会在初始压力较低时随压力升高而增加, 在初始压力较高时随压力升高而减少。

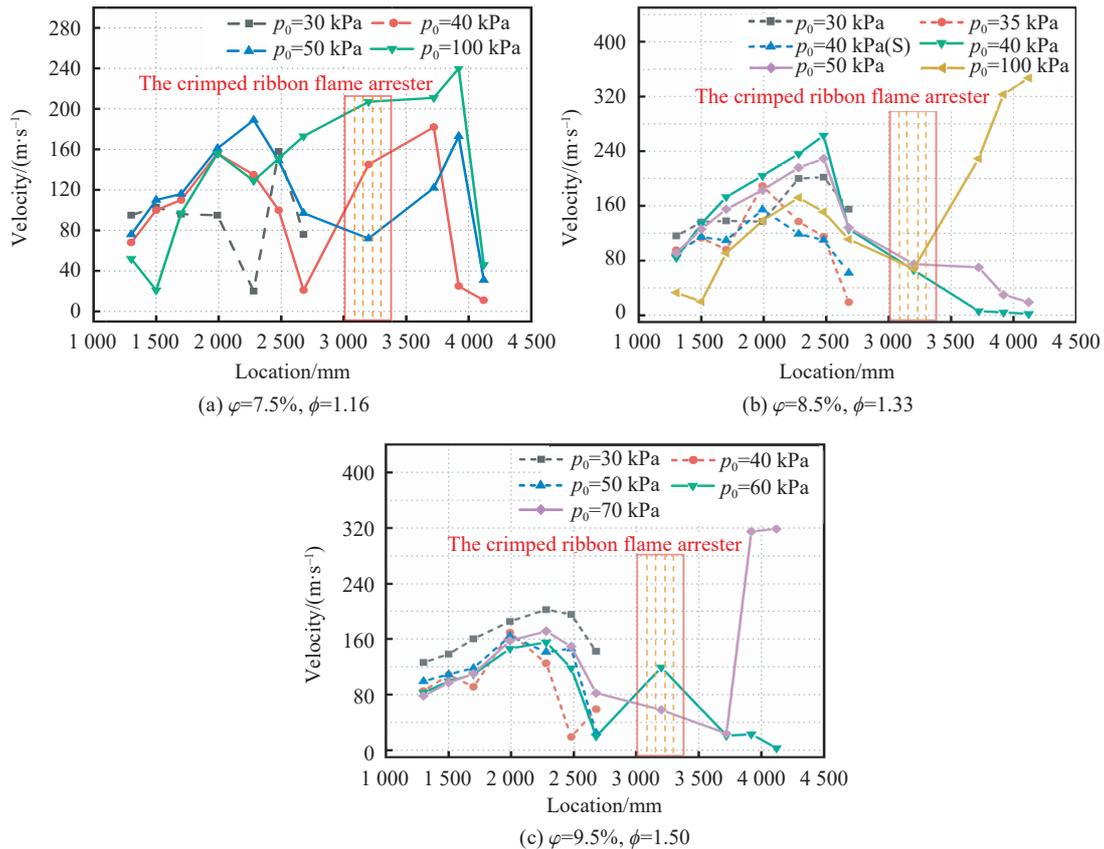


图 3 不同初始压力下的乙烯-空气预混气体火焰传播速度曲线(富燃料)

Fig. 3 Flame propagation velocity of premixed C_2H_4 -air under different initial pressures (rich fuel)

从速度衰减幅度来看, 图 4~5 中的 δ 表征一次速度衰减过程的速度衰减幅度, 定义为一次减速过程中最大火焰速度与最小火焰速度的差值与最大火焰速度之比, δ 越大, 表明速度衰减幅度越大。由图 5 可知, 当可燃气体的体积分数相同时, 由于反射波对速度的抑制作用随初始压力升高而增强, 总体来说, 当初始压力为 100 kPa 时, δ 值略大。而体积分数的影响还与初始压力相关。当初始压力较低 ($p_0=50$ kPa) 时, δ 在贫燃料侧随着体积分数增大呈下降趋势, 在 $\varphi=6.5\%$ 时达到最小, 随后在富燃料侧呈上升趋势。当初始压力较高 ($p_0=100$ kPa) 时, δ 随体积分数增大而减小。当 $\varphi=6.5\%$ 时, 燃烧反应最充分和迅速, 火焰速度也更快, 与之相比, 贫燃料会因为乙烯气体分子不充分而反应缓慢, 富燃料则因乙烯气体分子较多致使反应受到抑制, 因此, 在初始压力较低、反射波强度较小时, 贫燃料侧 δ 随着体积分数增大而减小, 富燃料侧则呈相反趋势。而初始压力较高时, 反射波抑制作用显著, 贫燃料受反应速率所限, 低速火焰状态下受反射波影响较大, 而富燃料则在火焰相对高速状态下受影响较小, δ 随体积分数增大而减小。

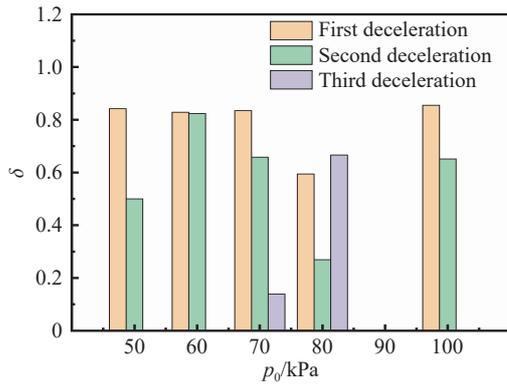


图 4 未受保护侧体积分数 5.0% 的乙烯-空气预混气体火焰速度振荡分析

Fig. 4 Flame velocity oscillation analysis of 5.0% C₂H₄-air premixed gas on the unprotected side

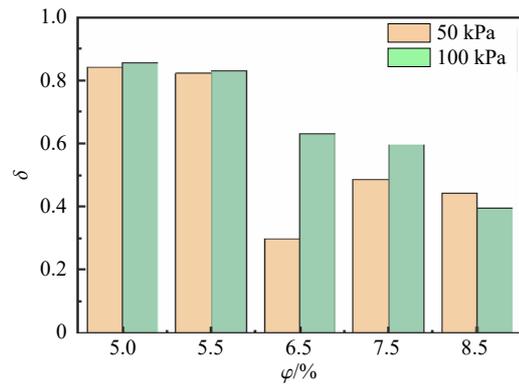


图 5 未受保护侧不同体积分数乙烯-空气预混气体火焰速度振荡分析

Fig. 5 Flame velocity oscillation analysis of C₂H₄-air premixed gas with different volume fractions on the unprotected side

对于管道受保护侧, 火焰速度存在不降反升现象, 在初始压力较高时尤为明显。当初始压力为 100 kPa 时, 图 2(a) 中火焰速度较平稳, 但随着体积分数增大, 火焰明显加速, 尤其是在化学计量比(化学反应恰好能完全反应时的体积分数)时, 阻火器入口和出口火焰速度分别为 118 和 344 m/s, 变化最剧烈。

一方面, 火焰经过狭缝表面扭曲伸展, 与预混气接触面积增大, 导致反应加速和火焰加速。另一方面, 自由基碰撞损耗会造成反应速率降低和火焰减速。由于体积分数对自由基数量的影响较明显, 对于贫燃料预混气体, 自由基数量较少, 自由基碰撞损耗对化学反应速率影响较大, 从而减缓了狭缝扰动对火焰的加速作用, 甚至出现图 2(a) 中速度较平稳的现象; 对于富燃料预混气体, 更多自由基意味着自由基碰撞损耗对反应影响较小, 因此火焰加速明显。然而, 富燃料预混气体存在与活化中心结合几率更小、通过狭缝发生碰撞几率更大、自由基损耗数量更多的情况, 相较于化学计量比时, 管道受保护侧速度增幅更小。因此, 乙烯-空气预混气体火焰通过阻火器后会加速, 且在化学计量比时加速幅度最大。

2.2 不同初始压力下丙烷-空气预混气体的淬熄特性

图 6 给出了不同初始压力下 4.2% 丙烷-空气预混气体的火焰传播速度曲线, 根据之前的定义, 火焰传播有 2 种模式: 直接淬熄和淬熄失败。在 $p_0=80$ kPa 时, 阻火器入口火焰速度为 25 m/s, 火焰直接淬熄; 在 $p_0=90$ kPa 时, 阻火器入口火焰速度为 39 m/s, 淬熄失败。

丙烷火焰淬熄的主要原因被普遍认为是由于冷壁效应, 因此有学者基于传热作用给出了半封闭管道的阻火速度计算式^[8]:

$$D^2 = 81.84A^2 Pr^{-2/3} \nu L_q / u_\infty \quad (1)$$

式中: D 为平板狭缝直径; $u_\infty = v - v_0$, v 为火焰传播速度, v_0 为介质燃烧速度; ν 为狭缝中气流的运动黏度; Pr 为 Prandtl 数; L_q 为火焰淬熄距离; A 为火焰淬熄时淬熄边界层厚度^[8]与热边界层厚度的比值。

将平板狭缝换为波纹板的三角形狭缝时, 存在特征尺寸关系^[5]:

$$D^2/12 = D_1^2/80 \quad (2)$$

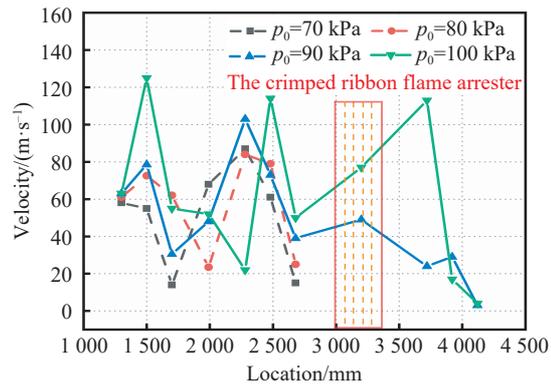


图 6 $\phi = 4.2\%$ 时不同初始压力下丙烷-空气预混气体的火焰传播速度曲线

Fig. 6 Flame velocity of C₃H₈-air premixed gas under different initial pressures ($\phi = 4.2\%$)

式中: D_i 为三角形边长, 转化为波纹板狭缝高度 h (正三角形高, 即为波高)。得到:

$$u_\infty = \frac{409.2A^2vL}{Pr^{2/3}h^2} \quad (3)$$

式中: L 为狭缝通道长度, 即波纹板厚度。

运动黏度 ν 与动力黏度 μ 和流体密度 ρ 之间的关系:

$$\nu = \mu/\rho \quad (4)$$

预混气体动力黏度计算公式:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}} \quad (5)$$

式中: 下标 i 表示组分, μ_m 为混合气体的动力黏度, y_i 为组分 i 的摩尔分数, μ_i 为组分 i 的动力黏度, M_i 为组分 i 的分子质量。

将式 (4)~(5) 代入式 (3), 可以得到:

$$u_\infty = 409.2 \frac{A^2 \mu_m^{1/3} \lambda_m^{1/3} L}{\rho_m c_{p,m}^{2/3} h^2} \quad (6)$$

式中: λ_m 为导热系数, ρ_m 为混合气体的密度, $c_{p,m}$ 为比定压热容。

介质燃烧速度 v_0 相比火焰传播速度 v 较小, 因此将 u_∞ 近似看作 v 。式 (6) 适用于半封闭管道, 而封闭管道需要考虑压力影响。初始压力对反应速率和压力波强度的影响, 随着压力波的传播进而影响火焰速度以及爆炸压力, 因此对于封闭管道需要考虑压力修正。参考 Palmer 所提出的 p_0/p 压力修正项, 将式 (6) 增加 p_0/p 的压力修正项, 得到封闭管道阻火速度:

$$v_b = 409.2 \frac{A^2 \mu_m^{1/3} \lambda_m^{1/3} L p_0}{\rho_m c_{p,m}^{2/3} h^2 p} \quad (7)$$

式中: p 为预混气的爆炸压力, 物性参数 μ_m 、 λ_m 、 ρ_m 、 $c_{p,m}$ 均与可燃气积分分数相关。这说明, 阻火速度不仅受阻火器结构参数影响, 还与使用场景下的气体体积分分数和初始压力相关, 因此阻火器的设计与选型需要考虑适用对象和场景。

丙烷为组分 1, 空气为组分 2。常温 25 °C 下, 黏度 $\mu_1=83.3 \mu\text{P}$, $\mu_2=184.5 \mu\text{P}$, 导热系数 $\lambda_1=0.01792 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\lambda_2=0.02604 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。对于可燃气体积分数为 4.2% 的丙烷-空气预混气体, $\mu_m=179.3 \mu\text{P}$, $\rho_m=1.1957 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\lambda_m=0.02498 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $c_{p,m}=1.0449 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。代入式 (7) 可得:

$$v_b = 4.99 \frac{L p_0}{h^2 p} \quad (8)$$

利用软件 GASEQ97 计算常温下 $\phi=4.2\%$ 的丙烷-空气在不同初始压力下反应的爆炸压力。当 $p_0=80 \text{ kPa}$ 时, 爆炸压力 $p=755.3 \text{ kPa}$; $p_0=90 \text{ kPa}$ 时, $p=851.2 \text{ kPa}$ 。计算结果显示, 若阻火器入口火焰速度超过 31.37 m/s, 火焰淬熄失败。实验显示, 当 $p_0=80 \text{ kPa}$ 时, 阻火器入口火焰速度为 25 m/s; 当 $p_0=90 \text{ kPa}$ 时, 阻火器入口侧火焰速度为 39 m/s, 说明利用式 (8) 计算可燃气体的阻火速度是可行的。由于式 (8) 的推导过程基于传热作用, 因此适用于活性较低、火焰速度较低的丙烷-空气预混气体, 高活性可燃气体的阻火速度公式仍需要进一步研究。

2.3 预混气体阻火结果对比

图 7 给出了不同压力下各组预混气体的阻火结果, 将火焰会发生熄灭的最大初始压力定义为极限压力^[15] p_{lim} , 极限压力越小, 阻火越困难。对比同处于化学计量比的预混气体, $p_{\text{lim,C}_3\text{H}_8}$ 为 90 kPa, 而 $p_{\text{lim,C}_2\text{H}_4}$ 仅为 50 kPa, $p_{\text{lim,C}_2\text{H}_4} < p_{\text{lim,C}_3\text{H}_8}$ 。

图 8 给出了不同体积分分数 (当量比 ϕ) 的乙烯-空气的极限压力 p_{lim} 。由图 8 可知, 在当量比 $\phi=1.00$ 时, p_{lim} 最小。在贫燃料侧, p_{lim} 随 ϕ 增大而减小; 而在富燃料侧, 在 $1.00 \leq \phi \leq 1.33$ 区间, p_{lim} 并未改变, 在

$\phi > 1.33$ 时, p_{lim} 随 ϕ 增大而增大。化学计量比时极限压力最小, 火焰淬熄最困难, 但在富燃料侧存在预混气体极限压力不变的体积分数区间, 在实际应用中需要谨慎对待该危险体积分数区间。

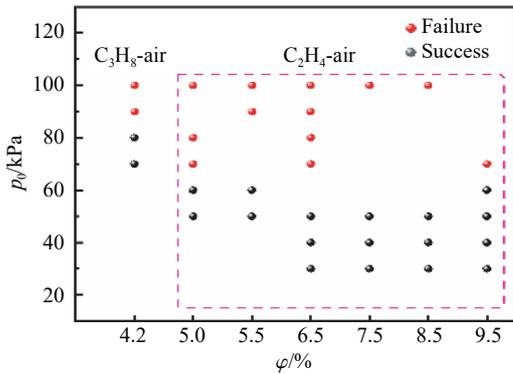


图 7 不同初始压力下可燃气-空气预混气体的阻火结果
Fig. 7 Quenching results of premixed combustible gas-air under different initial pressures

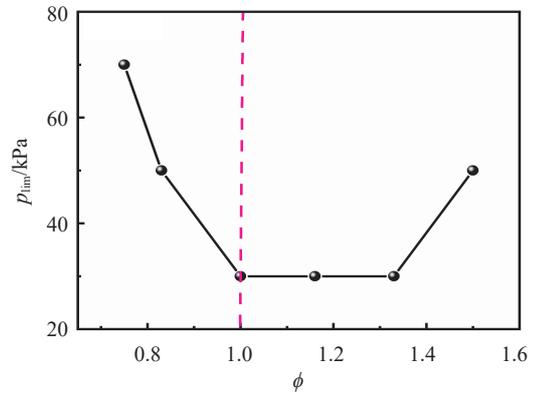


图 8 不同体积分数(当量比)乙烯-空气预混气体的极限压力
Fig. 8 Limit pressure of premixed C₂H₄-air with different volume fractions (equivalence ratios)

图 9 分析了临界压力下同处于化学计量比的丙烷-空气和乙烯-空气预混气体火焰速度。在未受保护侧管道, 二者均出现了 2 次减速。第 1 次减速, 丙烷-空气预混气体的 δ 小于乙烯-空气预混气体, 第 2 次减速情况则相反。乙烯预混气体经过第 1 次速度大幅衰减后, 速度还未充分加速又再次减速, 此时 δ 较小, 其速度振荡也呈逐渐缓和趋势。在受保护侧管道时, 丙烷-空气预混气体火焰在阻火器入口的速度为 50 m/s, 穿过阻火器后加速至 113 m/s, 该速度增幅低于乙烯-空气预混气体(5.0% 乙烯-空气除外)。

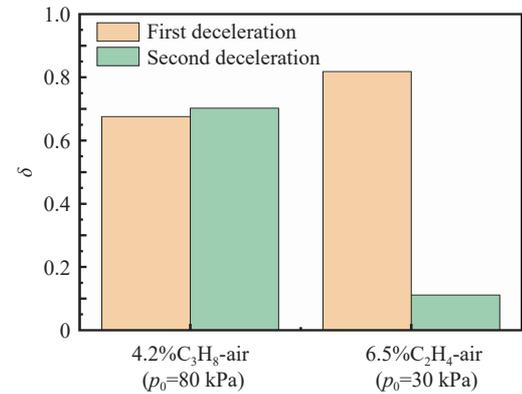


图 9 临界压力下未受保护侧可燃气-空气预混气体火焰速度分析

Fig. 9 Flame velocity analysis of premixed combustible gas-air under critical pressure on the unprotected side

乙烯活性更高, 其易于反应、反应放热多的特点会使反应更加剧烈, 火焰淬熄更困难, 因此有 $p_{lim, C_2H_4} < p_{lim, C_3H_8}$ 。丙烷活性较低使得反应速率和放热量较低, 火焰速度受反应速率限制, 因此在未受保护侧管道火焰速度衰减幅度几乎不变, 速度振荡更加均匀, 且在火焰传播初期的振荡相较于乙烯预混气体更小。同时, 由于自由基通过狭缝碰撞销毁等因素不利于反应进行, 最终狭缝扰动对火焰的加速作用有限。

3 结 论

通过对不同初始压力下可燃气-空气预混气体通过波纹板阻火器的淬熄特性进行研究, 得到以下主要结论。

(1) 可燃气的活性、体积分数和初始压力影响火焰通过阻火器的传播模式及阻火器两侧的火焰速度。火焰通过阻火器有 3 种传播模式: 直接淬熄、穿过阻火单元后逐渐淬熄和淬熄失败。初始压力越高、体积分数越低, 未受保护侧管道内火焰速度越不稳定, 受保护侧管道内火焰速度在化学计量比时上升幅度最大。

(2) 基于传热作用, 得到了带压力项的阻火速度计算公式, 通过丙烷体积分数为 4.2% 的丙烷-空气的淬熄实验得以验证。

(3) 可燃气的活性和体积分数影响火焰淬熄困难程度, 化学计量比乙烯-空气预混气体极限压力 p_{lim} 最小, 极限压力越小, 阻火越困难。一定体积分数区间内的富燃料预混气体的极限压力不随体积分数变化。

参考文献:

- [1] PAYMAN W, WHEELER R V. Propagation of flames through tubes of small diameter [J]. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 1918, 113(2): 36–45. DOI: 10.1039/CT9181300656.
- [2] CUBBAGE P A. Flame traps for use with town gas/air mixtures [M]. London, UK: Gas Council, 1959: 30–47.
- [3] PALMER K N, TONKIN P S. The quenching of flames by crimped ribbon flame arresters: fire research notes 438 [R]. International Association for Fire Safety Science, 1960.
- [4] LANGFORD B, PALMER K N, TONKIN P S. The performance of flame arresters against flames propagating in various fuel/air mixtures: fire research notes 486 [R]. International Association for Fire Safety Science, 1961.
- [5] BERLAD A L. Flame quenching by a variable-width rectangular-channel burner as a function of pressure for various propane-oxygen-nitrogen mixtures [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1954, 58(11): 1023–1026. DOI: 10.1021/j150521a021.
- [6] KERSTEN C, FÖRSTER H. Investigation of deflagrations and detonations in pipes and flame arresters by high-speed framing [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2004, 17(1): 43–50. DOI: 10.1016/j.jlp.2003.09.004.
- [7] HENKEL S, ZAKEL S, STOLPE F. Determination of the performance limits of flame arresters at increased oxygen concentrations [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 58: 17–21. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.01.003.
- [8] 周凯元, 李宗芬, 周自金. 波纹板阻火器对爆燃火焰淬熄作用的实验研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 1997, 27(4): 449–454.
ZHOU K Y, LI Z F, ZHOU Z J. The quenching of deflagration by crimped ribbon flame arresters [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1997, 27(4): 449–454.
- [9] 周凯元. 气体爆燃火焰在狭缝中的淬熄 [J]. 火灾科学, 1999, 8(1): 22–33.
ZHOU K Y. The quenching of gaseous deflagration in narrow channels [J]. *Fire Safety Science*, 1999, 8(1): 22–33.
- [10] 陈鹏. 管内气体爆炸数值模拟与惰性气体的淬熄研究 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2007. DOI: 10.7666/d.y1093162.
CHEN P. Numerical simulation of premixed combustible gas explosion in duct and study on quenching effects of inert gas [D]. Dalian, Liaoning, China: Dalian University of Technology, 2007. DOI: 10.7666/d.y1093162.
- [11] 张省漪. 多孔结构对管道内火焰速度和压力的影响 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2011.
ZHANG S Y. The effect of porous structure on flame velocity and pressure in pipes [D]. Dalian, Liaoning, China: Dalian University of Technology, 2011.
- [12] 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. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151383.
SUN S C, BI M S, LIU G, et al. Detonation flame propagation and quenching characteristics in crimped-ribbon flame arrester [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2016, 5(5): 2176–2184. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151383.
- [13] 孙少辰. 波纹管阻火器系统的阻爆特性研究 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.
SUN S C. Research of explosion resistant characteristic in in-line crimped-ribbon flame arrester [D]. Dalian, Liaoning, China: Dalian University of Technology, 2018.
- [14] 王鲁庆, 马宏昊, 沈兆武, 等. 波纹板阻爆燃型阻火器对丙烷-空气预混火焰的淬熄研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 766–772. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0766-07.
WANG L Q, MA H H, SHEN Z W, et al. Quenching of crimped ribbon deflagration arrester by propane-air premixed flame [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 766–772. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0766-07.
- [15] BERLAD A L, POTTER A E JR. Prediction of the quenching effect of various surface geometries [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1955, 5(1): 728–735. DOI: 10.1016/S0082-0784(55)80100-2.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 石油气体管道阻火器: GB/T 13347—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Flame arresters for petroleum gas pipeline systems: GB/T 13347—2010 [S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2011.

(责任编辑 曾月蓉)