

文章编号: 1006-9941(2021)09-0840-08

填充密度对球形非金属隔片抑制丙烷爆炸性能的影响

刘乐海¹, 毕凤荣¹, 于洋洋^{1,2,3}, 张俊红^{1,2}, 孟祥德³, 张学玲³

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学仁爱学院, 天津 301636; 3. 天津捷强动力装备股份有限公司, 天津 300410)

摘要: 为了研究球形非金属隔片填充密度与其抑制丙烷爆炸性能的关系, 利用自主设计的定容燃烧弹并结合高速纹影技术, 在不同丙烷-空气当量比(1、1.5、2)下, 对不同球形非金属隔片填充密度(21.9, 38.7, 45.1 kg·m⁻³)下的丙烷-空气预混气体进行爆炸试验。分析了不同丙烷-空气当量比下, 球形非金属隔片的填充密度对缸内最大爆炸压力、热损失、火焰尖端速度、火焰传播特征以及湍流的影响。结果表明: 球形非金属隔片对丙烷爆炸压力有抑制作用, 但对火焰传播过程有促进作用; 球形非金属隔片填充密度为 45.1 kg·m⁻³时, 各个丙烷-空气当量比下缸内最大爆炸压力降低率与热损失均达到最大, 火焰尖端速度峰值和两点之间最大速度差以及湍流增强系数相对较小, 抑爆效果最好。

关键词: 球形非金属隔片; 填充密度; 丙烷-空气当量比; 抑爆效果

中图分类号: TK16

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2020217

1 引言

储罐会因腐蚀或人为误操作等原因引发泄漏, 情况严重时可能造成爆炸事故, 在其中填充抑爆物可以有效抑制储罐爆炸, 减轻破坏范围和程度^[1]。目前使用的抑爆物分为金属^[2-3]和非金属^[4-5]两大类, 但这两类抑爆物大多存在与油品等化工品相容性较差并且易产生碎屑的缺点, 未得到广泛应用。球形非金属隔片(nonmetallic spherical spacer, NSS)作为一种新型非金属抑爆物, 以惰性有机高分子材料为基体, 具有很好的化学惰性和力学性能, 是一个极具潜力的研究方向^[6]。

抑爆物对封闭空间内典型碳氢燃料(甲烷、丙烷等)的爆炸具有抑制作用^[7-9]。但有关研究^[10-13]表明, 在封闭空间内抑爆物与障碍物对典型碳氢燃料爆炸压

力与火焰传播过程有相似的影响: 抑爆物对通道内的爆炸压力有抑制作用, 但同时会使通道内湍流变强, 火焰速度提高。V.S.Babkin^[14]等研究发现, 受障碍物影响, 封闭空间内火焰和湍流之间会产生正反馈, 导致湍流增强、火焰加速, 但湍流区域内强烈的热交换会使火焰发生局部淬熄从而抑制化学反应, 所以障碍物对爆炸有促进/抑制的双重作用。Liu^[15]、Wang^[16-17]研究发现当封闭空间内障碍物增加, 堵塞率增高时, 障碍物对爆炸的抑制作用变强, 促进作用变弱。由此可见, 填充密度是封闭空间内 NSS 对爆炸双重作用的重要影响因素, 研究填充密度对 NSS 抑爆效果的影响具有重要意义。

可燃气体当量比是影响燃烧过程的重要因素, 学者们广泛研究了可燃气体当量比对有障碍物通道中爆炸压力和火焰传播过程的影响^[18-21], 但对填充抑爆物后通道内爆炸压力和火焰传播过程的影响研究较少。不同的当量比会导致通道内可燃气体出现不同的爆炸压力, 并影响燃烧不稳定性, 从而改变火焰传播状态。气体储存罐发生泄漏后, 会在泄漏区域附近形成包含不同可燃气体体积分数的区域^[22], 易发生爆炸危险。因此在不同当量比下, 研究 NSS 对可燃气体的抑爆效果是十分重要的。

收稿日期: 2020-08-07; 修回日期: 2020-09-28

网络出版日期: 2021-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助(2140316)

作者简介: 刘乐海(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事安全工程研究。e-mail: 1016110345@qq.com

通信联系人: 毕凤荣(1965-), 男, 教授, 主要从事故障诊断, 车辆及动力机械 NVH 研究。e-mail: fr_bi@tju.edu.cn

引用本文: 刘乐海, 毕凤荣, 于洋洋, 等. 填充密度对球形非金属隔片抑制丙烷爆炸性能的影响[J]. 含能材料, 2021, 29(9):840-847.

LIU Le-hai, BI Feng-rong, YU Yang-yang, et al. Influence of Packed Densities of Nonmetallic Spherical Spacers on Propane Explosion Suppression[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(9):840-847.

分填充以及完全填充, 即 $21.9, 38.7, 45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 三种 NSS 填充密度研究其对抑制丙烷爆炸效果的影响。NSS 填充密度计算方法如式(1)所示。

$$\rho = \frac{m_0}{V} \times n \quad (1)$$

式中, m_0 为单个 NSS 的质量, g; n 为 NSS 的填充数量, 个; V 为燃烧室的容积, L。

实验开始前先将 NSS 用镊子按照从左向右、从下向上的填装顺序依次放入燃烧室内, 燃烧室内不同填充密度 NSS 的布置方式如图 3 所示。为减少因重复装填造成 NSS 布置方式不同而产生的偶然误差, 在相同 NSS 填充密度下, 完成不同当量比的试验后再换装 NSS。各初始条件下试验最少进行三次, 每组试验误差都在 5% 以内, 保证试验数据的准确性。试验中, 首

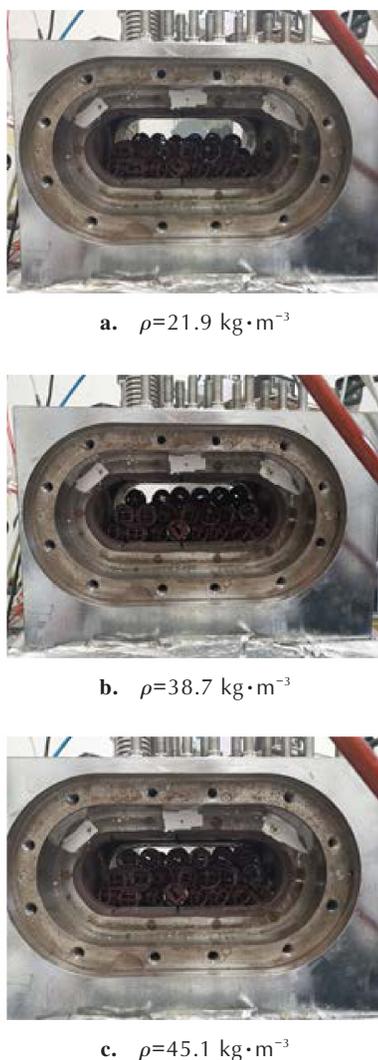


图 3 燃烧室内不同填充密度 NSS 的布置方式
Fig.3 Arrangement modes of NSS with different packed densities in combustion chambers

先将燃烧室抽真空, 根据道尔顿分压定律依次充入丙烷和空气, 静置 2 min, 待丙烷与空气充分混合后, 使用火花塞点燃预混气, 同时进行图像和缸压的采集。

本研究试验参数选择初始温度为 343 K, 初始压力为 0.2 MPa, 丙烷-空气当量比分别为 1、1.5、2, NSS 填充密度依次为 $21.9, 38.7, 45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3 结果与讨论

3.1 NSS 填充密度对缸内最大爆炸压力降低率和热损失的影响

当量比为 1、1.5、2 时, 未填充与填充 NSS 缸内最大爆炸压力 p_{\max} 如表 3 所示, 填充 NSS 后缸内最大爆炸压力降低率 Rp_{\max} 由式(2)计算:

$$Rp_{\max} = \frac{p_{\max}^0 - p_{\max}^1}{p_{\max}^0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, p_{\max}^1 为填充 NSS 时缸内最大爆炸压力, MPa; p_{\max}^0 为不填充 NSS 时缸内最大爆炸压力, MPa。

表 3 缸内最大爆炸压力

Table 3 Maximum explosion pressures in cylinders

$\rho / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Φ	p_{\max} / MPa
0	1	0.744
	1.5	0.956
	2	0.567
21.9	1	0.664
	1.5	0.706
	2	0.509
38.7	1	0.573
	1.5	0.631
	2	0.451
45.1	1	0.519
	1.5	0.592
	2	0.357

Note: 1) Φ is equivalence ratio of propane-air mixture, p_{\max} is maximum explosion pressures.

不同 NSS 填充密度下缸内最大爆炸压力降低率 Rp_{\max} 如图 4 所示。由图 4 可知, 同一当量比下, 随 NSS 填充密度增高, 缸内 Rp_{\max} 增大; 同一 NSS 填充密度下, 缸内 Rp_{\max} 随当量比的提升变化趋势相同, 都出现先上升后下降的现象, 但数值波动幅度不同。缸内 Rp_{\max} 数值的波动幅度随 NSS 填充密度的提高而显著下降, NSS 填充密度为 $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 当量比为 1、1.5、2 时, 缸内 Rp_{\max} 都在 30% 以上。所以, 填充密度越高, NSS 的抑爆能力越好, 且受当量比变化的影响越小。

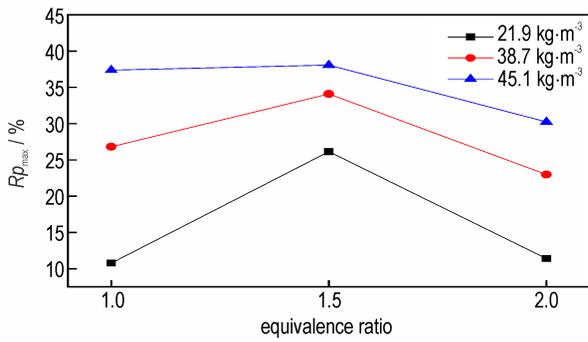


图4 不同NSS填充密度下缸内最大爆炸压力降低率

Fig.4 Descending rates of maximum explosion pressures in cylinders with different packed densities of NSS

NSS造成缸内总热损失 Q_{tr} 与单位面积热损失 q_{tr} 由式(3)和(4)^[17,24]计算:

$$Q_{tr} = \frac{V}{\gamma_{\alpha} - 1} (p_{max}^0 - p_{max}^1) \quad (3)$$

$$q_{tr} = \frac{V}{C^1} \frac{1}{\gamma_{\alpha} - 1} (p_{max}^0 - p_{max}^1) \quad (4)$$

式中, γ_{α} 为燃烧产物的绝热系数; C^1 为填充在燃烧室内NSS的总表面积, mm^2 ; NSS填充密度 21.9, 38.7, 45.1 $kg \cdot m^{-3}$ 时, C^1 分别为 0.146, 0.238, 0.292 m^2 。燃烧产物的绝热系数 γ_{α} 由式(5)^[25]计算:

$$\gamma_{\alpha} = 1 + \frac{1}{\sum_{i=1}^s \frac{a_{ni}}{\gamma_i - 1}} \quad (5)$$

其中 γ_i 、 a_{ni} 分别为第 i 种气体的绝热系数和第 i 种气体所占混合气体总体积的体积分数。

由式(3)计算得出填充NSS造成缸内总热损失 Q_{tr} 如图5所示, 由式(4)计算得出填充NSS造成缸内单位面积的热损失 q_{tr} 如图6所示。由图5可知, 相同当量比下, NSS填充密度越高, 缸内 Q_{tr} 越大。由式(4)可以看出, 缸内 Q_{tr} 一定时, NSS的总表面积 C^1 与缸内 q_{tr} 成反比, C^1 越小, q_{tr} 越大, 而当量比为 1.5 时, 各个NSS填充密度下缸内 Q_{tr} 最为接近。故如图6所示, 当量比为 1、2 时, NSS填充密度越高, 缸内 q_{tr} 越大; 当量比为 1.5 时, NSS填充密度越低, 缸内 q_{tr} 越大。

3.2 NSS填充密度对缸内火焰尖端速度和火焰传播特征的影响

当量比为 1、1.5、2 时, 未填充与填充NSS缸内火焰平均速度 $S_{L,a}$ 如表4所示, 填充NSS火焰尖端速度如图7所示。由表4可以看出, 填充NSS后缸内平均火焰速度明显高于未填充NSS。另一方面, 如

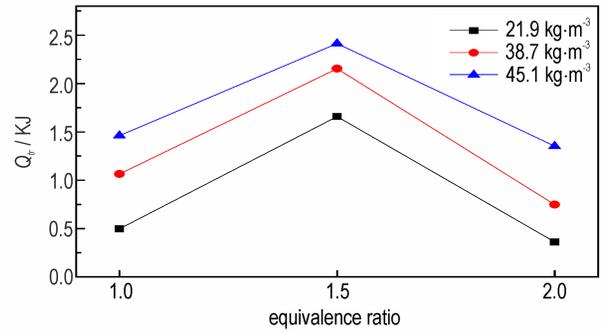


图5 不同NSS填充密度下缸内总热损失

Fig.5 Total Heat loss of cylinders with different packed densities of NSS

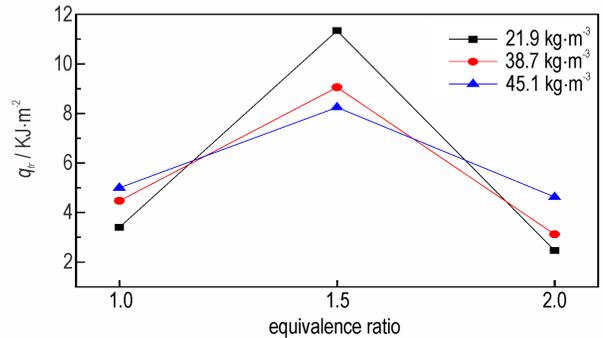


图6 不同NSS填充密度下缸内单位面积热损失

Fig.6 Heat loss per unit area of cylinders with different packed densities of NSS

表4 缸内平均火焰速度

Table 4 Average flame velocities in cylinders

$\rho / kg \cdot m^{-3}$	Φ	$S_{L,a} / m \cdot s^{-1}$
0	1	1.72
	1.5	2.54
	2	0.71
21.9	1	12.41
	1.5	12.74
	2	0.81
38.7	1	15.96
	1.5	13.24
	2	3.26
45.1	1	11.9
	1.5	11.58
	2	1.77

Note: $S_{L,a}$ is flame velocity.

图7标记区域所示, 由于NSS与火焰之间的相互作用, 火焰锋面面积发生突变产生附加湍流, 当量比为 1、1.5 时, 不同NSS填充密度下, 缸内火焰都出现了“喷射”现象, 使局部火焰尖端速度上升, 并且NSS填充密度越高, 火焰尖端速度峰值与两点之间最大速度差越低, 缸内局部湍流越弱。当量比为 2 时, 由于缸内火焰厚度增加导致其稳定性变强, 故

不同NSS填充密度下, NSS对火焰的促进作用较低, 缸内火焰尖端速度整体较低。Oh^[26]等研究得出, 障碍物的存在会使流场产生旋涡, 导致障碍物正后方的火焰速度下降, 而随着旋涡的破碎和火焰阵面的拉伸, 湍流和热扩散又会导致障碍物后方火焰速度上升。由图7可以看出, NSS对火焰传播有相同的影响, 所以填充NSS后缸内火焰尖端速度都出现了不同程度的震荡。

当量比为1、1.5、2, 不同NSS填充密度下, 火焰传播纹影图像如图8所示。由图8可以看出, 在相同NSS填充密度下, 由于缸内填充与未填充NSS区域的火焰传播速度不同, 缸内下半部分填充NSS处

火焰的膨胀程度明显大于上半部分未填充NSS处火焰的膨胀程度, 同时火焰又受到空间的限制和已燃烧产物膨胀的影响^[27-28], 当量比为1、1.5, NSS填充密度为 $21.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时和当量比为1、1.5、2, NSS填充密度为 $38.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 缸内形成了半蘑菇状火焰, 如图8箭头所示。当量比为2, NSS填充密度为 $21.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 火焰受浮力影响贴近缸内上表面传播, 并且NSS所占空间较小, 不能影响火焰传播, 所以缸内没有形成半蘑菇状火焰。NSS填充密度为 $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 各个当量比下缸内都没有形成半蘑菇状火焰, 火焰传播过程最稳定, NSS对火焰的扰动作用最小。

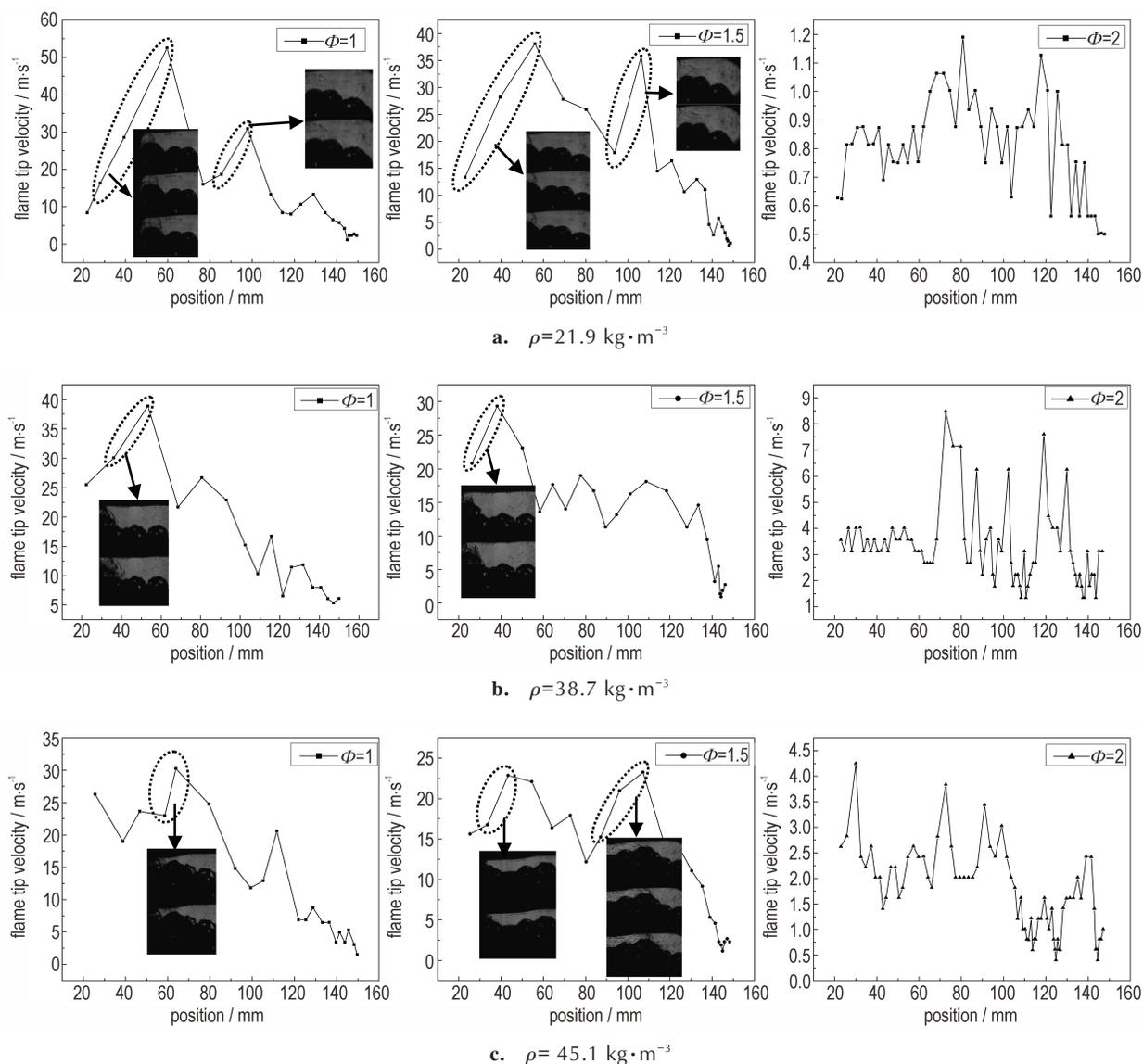


图7 不同NSS填充密度下缸内火焰尖端速度

Fig.7 Flame tip velocities in cylinders with different packed densities of NSS

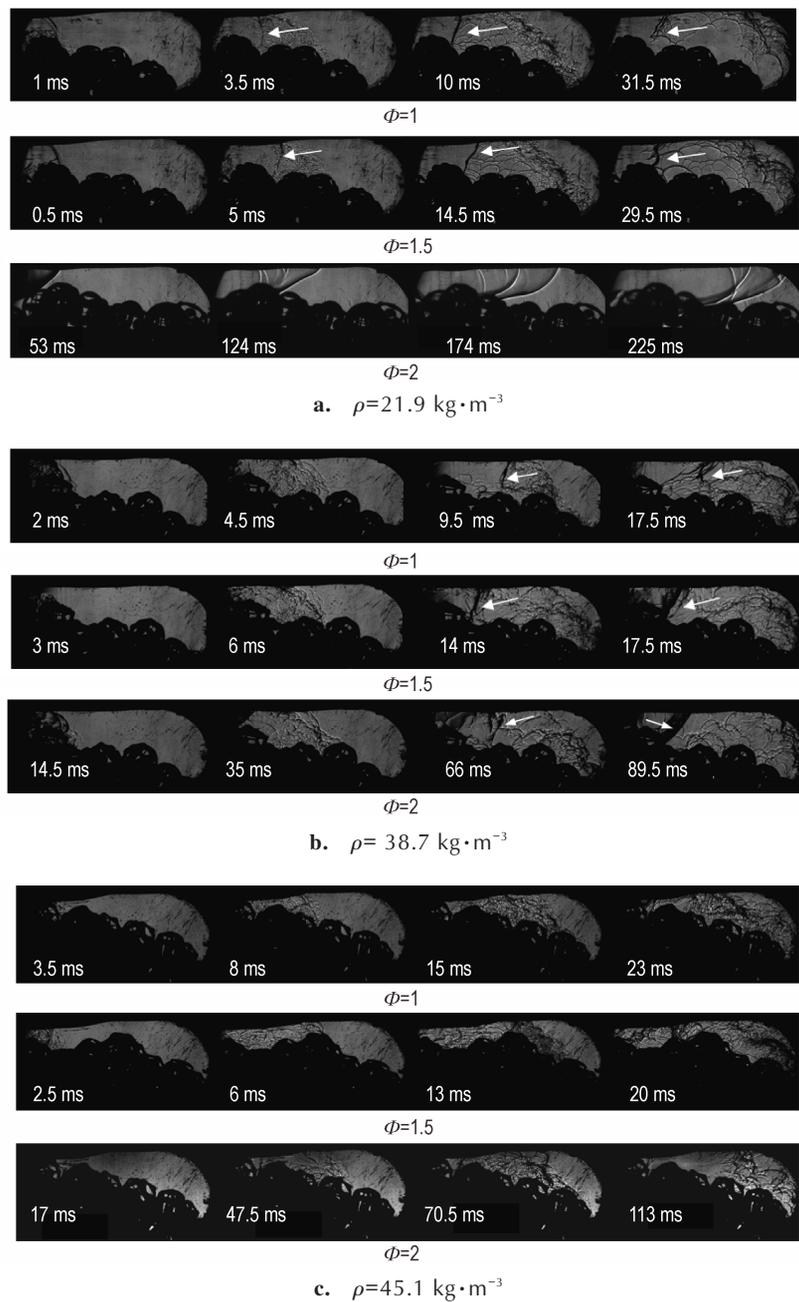


图8 不同NSS填充密度下缸内火焰传播纹影图像

Fig.8 Flame propagation schlieren images in cylinders with different packed densities of NSS

3.3 NSS填充密度对缸内湍流的影响

湍流增强系数 ξ 的计算方法如式(6)^[17]所示:

$$\xi = \frac{S_{L,a}^1}{S_{L,a}^0} \quad (6)$$

其中 $S_{L,a}^1$ 为填充NSS时缸内的平均火焰速度, $m \cdot s^{-1}$; $S_{L,a}^0$ 为不填充NSS时缸内的平均火焰速度, $m \cdot s^{-1}$ 。

不同当量比下,填充NSS导致的湍流增强系数 ξ 如图9所示。可以看出,当量比为1、1.5时,NSS填充密度为 $45.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,缸内的 ξ 最低,整体湍流最弱。当

量比为2时,NSS填充密度为 $21.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,缸内 ξ 最低,整体湍流最弱。结合对火焰传播纹影图像的分析,是由于NSS填充密度太低使其对火焰传播的影响太小导致的。

3.4 抑爆机理分析

NSS为薄壁骨架结构,具有很大的比表面积,填充NSS后,火焰会与NSS表面接触从而产生热损失,虽然NSS会使缸内火焰尖端速度与湍流增强,但火焰在低亚音速传播时,抑爆物的热损失占主导地位^[10]。除此

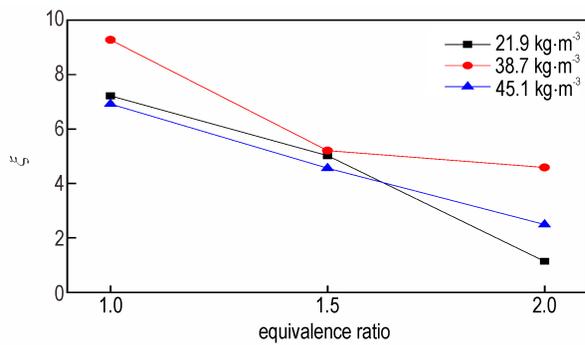


图9 不同NSS填充密度下缸内湍流增强系数

Fig.9 Turbulence enhancement factors in cylinders with different packed densities of NSS

之外, NSS会使缸内火焰前方的冲击波经历周期性反射分散在不同的方向, 从而避免压力波的叠加^[29], 故填充NSS还是会使缸内最大爆炸压力显著下降。NSS会将缸内火焰的传播路径分割成一个个相连的“燃烧室”, 湍流较强时, 相邻“燃烧室”由燃烧产物的“喷射燃烧”引燃点火; 湍流较弱时, 相邻“燃烧室”由“空间燃烧”引燃点火, 而这种点火方式会破坏火焰传播的正反馈作用, 导致火焰出现不完全燃烧或发生淬熄^[30]。由火焰传播纹影图像可以看出, 各当量比下只有NSS填充密度为 $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时缸内火焰没有出现“喷射”现象, 并且没有形成半蘑菇状火焰, 整体湍流较弱。所以填充密度为 $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时各当量比下NSS都具有最好的抑爆效果。

4 结论

(1) 填充NSS会使缸内最大爆炸压力下降, 并造成热损失。各个当量比下, NSS填充密度越高, 缸内最大爆炸压力降低率和总热损失越大且其数值随当量比变化波动幅值越小, 抑爆效果越好。对于本试验环境, 各个当量比下, 填充密度为 $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, NSS具有最好的抑爆效果。

(2) 当量比为1、1.5, NSS填充密度为 $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 缸内火焰尖端速度峰值与两点之间最大速度差以及缸内湍流增强系数最低; 当量比为2, NSS填充密度为 $21.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 由于火焰受浮力作用且NSS所占空间较小, 不能影响火焰传播, 缸内平均火焰速度和湍流增强系数最低。综合来看, 各个当量比下, 填充密度为 $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, NSS对火焰的扰动作用最小。

(3) 填充NSS对缸内最大爆炸压力有抑制作用, 但对火焰传播过程有促进作用, NSS对缸内爆炸具有促进/抑制的双重作用。NSS的抑爆效果受其对爆炸

的抑制作用和促进作用共同影响。

致谢: 感谢天津大学仁爱学院于洋洋老师给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 杨真理. 球形非金属阻隔防爆材料防爆性能关键影响因素研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
YANG Zhen-li. Research on key influence factors of explosion suppression performance of spherical non-metallic material [D]. Nanjing: University of Science and Technology, 2016.
- [2] CHENG Xian-feng, QI Zhao, DAI Hua-ming, et al. Effect of metal mesh on the flame propagation characteristics of wheat starch dust[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 55:107-112.
- [3] JIN Kai-qing, DUAN Qiang-ling, CHEN Jia-yan, et al. Experimental study on the influence of multi-layer wire mesh on dynamics of premixed hydrogen-air flame propagation in a closed duct [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(21): 14809-14820.
- [4] WANG Xin, ZHANG Ping, HUANG Zun-chu, et al. Effect of aluminum diethylphosphinate on the thermal stability and flame retardancy of flexible polyurethane foams[J]. *Fire Safety Journal*, 2019, 106(JUN.):72-79.
- [5] LIU Lei, WANG Zheng-zhou. Facile synthesis of a novel magnesium amino-tris-(methylenephosphonate)-reduced graphene oxide hybrid and its high performance in mechanical strength, thermal stability, smoke suppression and flame retardancy in phenolic foam.[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 357(SEP.5):89-99.
- [6] AN Gao-jun, LU Chang-bo, ZHU Xiang-dong, et al. Study on Explosion Suppression Performance of Spherical Nonmetallic Materials[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84:369-376.
- [7] CHEN Yang, WAN Hao-tian, YU Jian-liang. Research on Explosion Suppression Characteristics of Aluminum Silicate Wool in 90° Bend[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 45(none): 464-469.
- [8] WEN Xiao-ping, XIE Mao-zhao, YU Ming-gao, et al. Porous media quenching behaviors of gas deflagration in the presence of obstacles[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2013, 50: 37-44.
- [9] LU Chang-bo, AN Gao-jun, XIONG Chun-hua, et al. Progress on Fire and Explosion Suppression Technologies for Light Petroleum Fuel [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84 (84) : 384-393.
- [10] Ciccarelli G. Explosion propagation in inert porous media [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370 (1960) : 647-67.
- [11] Ibrahim S S, Hargrave G K, Williams T C. Experimental investigation of flame/solid interactions in turbulent premixed combustion [J]. *Experimental Thermal and Fluid ence (EXP THERM FLUID)*, 2001, 24(3): 99-106.
- [12] Park D J, Lee Y S, Green A R. Prediction for vented explosions in chambers with multiple obstacles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 155(1-2): 183-192.
- [13] Ciccarelli G, Johansen R T, Parravani R. The role of

- shock-flame interactions on flame acceleration in an obstacle laden channel [J]. *Combustion & Flame*, 2010, 157(11): 2125–2136.
- [14] Babkin V S, Korzhavin A A, Bunev V A. Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media[J]. *Combustion and Flame*, 1991, 87(2): 182–190.
- [15] LIU Rui, WANG Lu-qing, PAN Jun, et al. The influence of a crimped-ribbon plate on gaseous explosion characteristics in a closed vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(20): 11866–11874
- [16] WANG Lu-qing, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. On the explosion characteristics of hydrogen-air mixtures in a constant volume vessel with an orifice plate[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12):6271–6277.
- [17] WANG Lu-qing, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu. An experimental investigation on explosion behaviors of syngas-air mixtures in a vessel with a large blockage ratio perforated plate[J]. *Fuel*, 2020, 264(Mar.15):116842.1–116842.10.
- [18] WEI Hai-qiao, ZHAO Jian-fu, ZHOU Lei, et al. Effects of the equivalence ratio on turbulent flame – shock interactions in a confined space[J]. *Combustion and Flame*, 2017, 186(dec.): 247–262.
- [19] LI Quan, SUN Xu-xu, LU Shou-xiang, et al. Experimental study of flame propagation across a perforated plate[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(17): 8524–8533.
- [20] DONG Cheng-jie, BI Ming-shu, ZHOU Yi-hui. Effects of obstacles and deposited coal dust on characteristics of premixed methane-air explosions in a long closed pipe[J]. *Safety ence*, 2012, 50(9):1786–1791.
- [21] WANG Lu-qing, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, et al. Effect of a single orifice plate on methane-air explosion in a constant volume vessel: Position and blockage ratio dependence[J]. *Experimental Thermal and Fluid ence (EXP THERM FLUID)*, 2019, 103:157–162.
- [22] LIU Yan-lei, ZHENG Jin-yang, XU Ping, et al. Numerical simulation on the influence of environment temperature on the leakage and diffusion of high pressured hydrogen due to storage tank failure [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(5):770–772.
- [23] 李伟,张奇. 高压气体泄漏喷射和扩散的数值模拟[C]//中国职业安全健康协会,2008:7.
LI Wei, ZHANG Qi. Numerical simulation of leakage injection and diffusion of high pressure gases [C]//China Occupational Safety and Health Association,2008:7.
- [24] Leyer J C. Contributions a l' étude des instabilités de la combustion et des phénomènes de transfert de chaleur aux parois dans le cas des combustions à volume constant [J]. *Rev Gén Therm*, 1970, 98: 121–38.
- [25] 邵建新. 多元混合理想气体有关问题的研究[J]. 物理与工程, 2007(2): 30–32.
SHAO Jian-xin. Relevant problems of multicomponent ideal gas mixture[J]. *Physics and Engineering*, 2007(2): 30–32.
- [26] Oh K H, Kim H, Kim J B, et al. A study on the obstacle-induced variation of the gas explosion characteristics [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(6): 597–602.
- [27] YANG Xu-feng, YU Ming-gao, ZHENG Kai, et al. An experimental study on premixed syngas/air flame propagating across an obstacle in closed duct [J]. *Fuel*, 2020, 267:117200–.
- [28] Ponizy B, Claverie A, Veyssiere B. Tulip flame-The mechanism of flame front inversion [J]. *Combustion & Flame*, 2014, 161(12):3051–3062.
- [29] Teodorczyk A, Lee J H S, Knystautas R. Propagation mechanism of quasi-detonations [J]. *Symposium on Combustion*, 1989, 22(1):1723–1731.
- [30] Ciccarelli G; Dorofeev S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34(4), 499–550.

Influence of Packed Densities of Nonmetallic Spherical Spacers on Propane Explosion Suppression

LIU Le-hai¹, BI Feng-rong¹, YU Yang-yang^{1,2,3}, ZHANG Jun-hong^{1,2}, MENG Xiang-de³, ZHANG Xue-ling³

(1. State Key Laboratory of Engine, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Renai College, Tianjin University, Tianjin 301636, China; 3. Tianjin Jieqiang Power Equipment Co., Ltd, Tianjin 300410, China)

Abstract: To study the correlation between the packed density of nonmetallic spherical spacers (NSS) and its suppression of propane explosion, a newly designed constant-volume combustion cylinder combined with high-speed schlieren photography was employed. The explosion experiments of propane-oxygen pre-mixtures with different equivalence ratios (1, 1.5 and 2) were conducted in cylinders with different packed densities of NSS ($21.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $38.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). The effect of packed densities of NSS on maximum explosion pressures, total heat loss, flame tip velocities, flame propagation characteristics and turbulence in cylinders with different equivalence ratios of propane-oxygen were analyzed in detail. The results show that NSS has suppression effect on the maximum explosion pressure, and has promotion effect on the flame propagation process. When the packed density of NSS is $45.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, the maximum explosion descending rate and heat loss in cylinders reach maxima, while the peak flame tip velocity, the maximum tip velocity difference between two points and the turbulence enhancement factor in cylinders are relatively small, which indicates the best explosion suppression performance of NSS.

Key words: nonmetallic spherical spacer; packed density; propane-air equivalence ratio; explosion suppression performance

CLC number: TK16

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020217

(责编: 高毅)