

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0459

泄爆和氮气惰化耦合作用对氢-空气 爆炸影响的实验研究*

张 凯, 杜赛枫, 陈 昊, 郭 进, 王金贵, 洪溢都
(福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 为了解受限空间内不同氮气体积分数 φ 对氢-空气泄爆的影响, 在高 1 m 的顶部开口容器中进行了实验。结果表明: 当 $\varphi \leq 40\%$ 时, 容器内部的最大压力峰值由外部爆炸造成; 而当 $\varphi > 40\%$ 时, 内部最大压力峰值则由泄爆膜破裂引起; 在所有实验中, 都观察到内部压力的亥姆霍兹振荡, 其振荡频率随 φ 的增加而降低; 声学振荡仅出现在 $\varphi=25\%, 30\%$ 时; 容器内 3 个不同压力监测点(靠近泄爆口、容器中心和接近容器底端)的最大爆炸超压 p_{\max} 都随着 φ 的增加而降低, 且整体上最大的 p_{\max} 始终在爆炸容器底部附近出现。但当 $\varphi > 40\%$ 时, 3 个监测点间 p_{\max} 的差异可忽略不计; 外部最大爆炸超压也随 φ 的增加而减小, 且不论其大小如何, 均对内部压力曲线有显著影响。

关键词: 氢气; 泄爆; 氮气惰化; 超压; 火焰

中图分类号: O381; X932

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Experiments on the effects of venting and nitrogen inerting on hydrogen-air explosions

ZHANG Kai, DU Saifeng, CHEN Hao, GUO Jin, WANG Jingui, HONG Yidu

(College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China)

Abstract: Explosion venting and inerting are two commonly used explosion protective measures in hydrogen-based industries, both of them are effective in reducing the maximum explosion overpressure when used alone. However, the coupling effects of venting and inerting on hydrogen deflagrations have not been well understood. To this end, experiments were carried out in a 1 m high top-vented vessel with a cross-section area of 0.3 m×0.3 m to investigate the effects of nitrogen volume fraction (φ) in the range of 0 to 50% by volume on vented hydrogen-air explosions with a fixed equivalence ratio. The premixed hydrogen-nitrogen-air mixtures obtained according to Dolton's law of partial pressure were ignited in the center of the vented container by an electric spark with an energy of about 500 mJ. A 0.75-m long transparent window was installed in the center of the vented container, through which the flame images in the container were recorded by a high-speed camera at 2 000 frames per second. The pressure-time histories within and outside the vented container were measured by four piezoresistive pressure sensors with a measuring range of 0–150 kPa. The experimental results reveal that φ significantly affects the vented deflagration of hydrogen-air mixtures. The pressure peak owing to the external explosion dominates the internal pressure-time histories when $\varphi \leq 40\%$ and that resulting from the rupture of vent cover becomes dominant for higher values of φ . Under the current experimental conditions, Helmholtz-type oscillations with a frequency decreasing with φ are always observed, and acoustic oscillations appear in the tests only for $\varphi=25\%, 30\%$. The maximum internal explosion overpressures (p_{\max}) near the vent, at the center of the vessel, and near the bottom of the vessel decrease with increasing φ .

* 收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(51904285); 福建省自然科学基金(2020J01505)

第一作者: 张 凯(1996—), 男, 硕士研究生, 17318532395@163.com

通信作者: 洪溢都(1989—), 男, 博士, 讲师, yidu.hong@fzu.edu.cn

Moreover, the highest overall p_{\max} is obtained always near the bottom of the vessel. However, the difference of p_{\max} between the three measuring points is negligible when φ is larger than 40%. The maximum external explosion overpressure decreases with increasing φ . In addition, significant effects of the external explosion on the internal pressure-time histories are observed in all tests, regardless of its explosion overpressure.

Keywords: hydrogen; explosion venting; nitrogen inerting; overpressure; flame

与石油和煤炭等化石燃料相比,氢是一种清洁高效的能源载体。目前,氢能的开发利用已呈可持续发展的趋势。但是,氢气具有可燃范围广、点火能量低、燃烧速度快等特点,当它在密闭空间内积聚,遇到意外火源时极易爆炸并产生超压,会对临近人员的安全和建筑结构的完整性构成威胁。如 2011 年 3 月 11 日日本福岛核事故和 2018 年 12 月 26 日我国北京交通大学实验室爆炸事故,主要就是由氢气爆燃引起的。因此,在以氢能为基础的工业中,控制氢气爆炸已经成为一个急需解决的重要安全问题。

泄爆和抑爆是两种常用的防爆减灾措施^[1-2]。泄爆是通过预设低强度材料为泄爆口,在爆炸早期提前泄压;抑爆则是通过加入惰性物质来降低受限空间内爆炸性混合物中的氧浓度,抑制其反应性,减弱爆炸超压。目前,学者们已通过大量实验和数值模拟研究了泄放参数^[3-7](如燃料浓度、泄爆面积、点火位置、破膜压力、障碍物和泄放容器等)对泄爆过程的影响,并阐明了爆炸容器内不同压力峰值、亥姆霍兹振荡和声学振荡及外部爆炸的形成机制^[8-11]。近年来,学者们也大量研究了各种惰化剂的性质和浓度对气体爆炸的抑制效果^[1,12-14]。这些研究表明,单独采用泄爆或惰化都可有效降低最大爆炸超压。那么,这两种方式的结合能否进一步降低爆炸超压,值得深入研究。

崔益虎等^[2]和 Zhang 等^[15]分别在不同的容器中研究了泄爆和 CO₂ 惰化共同作用对甲烷-空气混合物爆燃的影响,证实与单一方法相比,二者的耦合作用可以显著降低爆炸超压。这个结论也在泄爆与细水雾耦合^[16-17]或同时使用泄爆与细水雾、氮气^[18-19]对氢-空气爆炸特性影响的实验及数值模拟中得到验证。此外, Wen 等^[20]在有障碍物的泄放管道中研究了泄爆和超细水雾协同作用对氢-甲烷-空气混合物爆炸特性的影响; Pei 等^[21]则指出,泄爆与氮气和超细水雾的联合应用也可以显著提高对管内瓦斯爆炸超压的抑制效果; Ingram 等^[22]还联合使用氢氧化钠细水雾和泄爆的方式来抑制 H₂/O₂/N₂ 预混气体的爆炸过程。刘洋等^[23]利用 FLACS 软件,模拟了在末端点火时长 30 m 管道内不同浓度 CO₂、N₂ 和水蒸气分别与泄爆耦合作用对甲烷-空气混合物的抑爆效果,发现当这 3 种气体的体积浓度分别为 25%、26% 和 30% 时能完全抑爆和抑制超压振动。张迎新等^[24]分别讨论了泄爆与 3 种不同体积分数的 N₂ 和 CO₂ 耦合对瓦斯爆炸超压的影响,实验指出瓦斯爆炸超压会随着惰性气体添加量的增加而减小。Lu 等^[25]在泄爆口附近及下游位置,通过喷射氮气抑制甲烷-空气爆炸发现,氮气的喷出压力决定能否防止泄爆过程中火焰的传播。对泄爆和其他惰性剂如七氟丙烷^[26]和碳酸氢钠粉末^[27-28]等耦合在抑爆方面的效果,也已有大量的研究。

以上表明,关于泄爆和惰化对气体爆燃耦合效应的研究主要集中在碳氢化合物-空气混合物,而对反应性和扩散性更强的氢气的研究^[16-19]却十分有限;而且,之前研究人员注重于分析二者耦合作用对最大超压峰值及其上升速度的影响,而对抑爆过程中火焰的演化、内部超压不同峰值和振荡的产生机制、外部爆炸的形成及其对内部压力的影响等却较少涉及。此外,使用水雾或同时水雾和氮气作为惰性剂来抑制氢-空气的爆燃,在一些特殊场所中是不允许的。因此,有必要进一步研究惰性气体如氮气,是如何缓解氢-空气爆炸强度的。

本文中,在顶部泄放的矩形容器内,进行泄爆和氮气惰化对内部火焰行为、外部爆炸形成和内外压力曲线耦合效应的实验,以期阐明氮气添加量对恒定当量比氢-空气混合物泄爆特性的影响。

1 实 验

实验是在高 1 m、截面 0.3 m×0.3 m 的竖直爆炸容器中开展的,如图 1 所示。泄爆口位于容器顶部中央,其面积为 0.25 m×0.25 m;用法兰固定的铝膜作为泄爆封口,其静态破膜压力为 (8±1) kPa。爆炸室中

央有长 0.75 m、宽 0.3 m 的透明观察窗, 高速摄像机可通过该窗口以频率 2 kHz 记录火焰图像。内外压力分别由 4 个量程为 0~150 kPa 的压阻式压力传感器 PS1~PS4 测量。其中, PS1~PS3 分别安装在爆炸室内部距离泄爆口 875、500 和 125 mm 处; PS4 则安装在爆炸室外, 距离泄爆口 350 mm。预混气体在爆炸室中心被能量约 500 mJ 的电火花点火器点燃。

在对爆炸容器配气前, 先用盲板将泄爆口密封, 再用真空泵将容器抽至真空状态, 确保容器内压没有波动, 通过顶部装有压力表的配气柱, 将氢气、氮气和空气分别按道尔顿分压定律的特定分压充入容器内。配气结束后, 将盲板沿着容器顶端水平移开, 同时沿着盲板挪开的方向密封一片铝膜, 然后在铝膜上方用螺栓固定一块方形法兰。

混合气体制备完成后, 为确保其均匀性, 在点火前保持静止 15 min。最后, 由同步控制器输出信号, 同时触发点火系统, 高速摄像机和数据采集系统记录数据。所有实验均在初始压力 101 kPa 和初始温度 285 K 下进行。在实验中, 混合物的当量比均为 1.6, 而氮气体积分数不同。

2 结果和讨论

2.1 泄爆过程中的典型火焰

在实验中, 不同氮气体积分数 φ 下的火焰演化行为相似, 但亮度会随着 φ 的增加而变得黯淡。以 $\varphi=20\%$ 为例, 说明泄爆过程中爆炸室内外典型的火焰行为, 如图 2 所示。

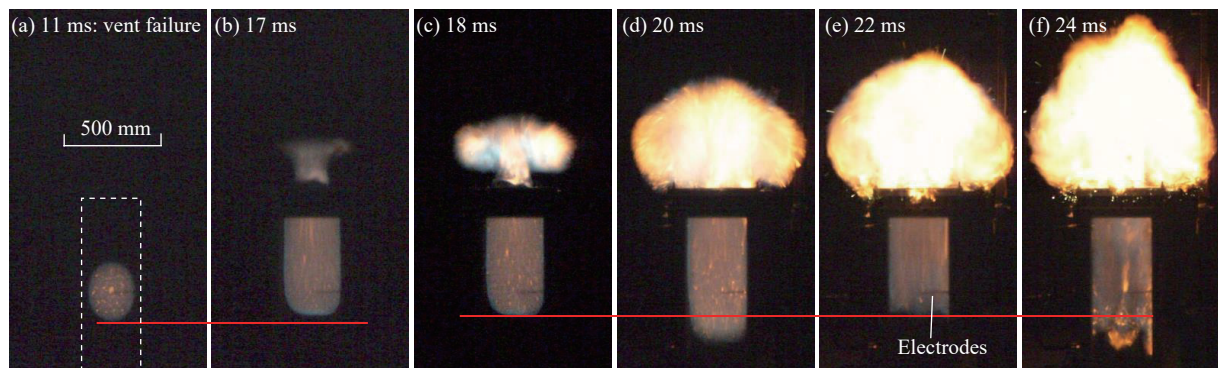


图 2 当 $\varphi=20\%$ 时容器内外火焰演化过程

Fig. 2 Flame evolution inside and outside the vessel for $\varphi=20\%$

图 2(a) 为点火 11 ms 后泄爆封口破裂时的火焰图像, 此时火焰的上锋面仍远离泄爆口, 因此未燃烧的氢-氮-空气混合物先排出容器, 并在外部形成可燃气云。火焰也在泄放气流作用下被拖向泄爆口, 如图 2(b) 所示。此外, 图 2(b) 中火焰的下锋面较图 2(a) 的更高, 这个现象在 φ 更高时更加明显。当内部火焰从泄爆口喷射出来后, 外部的可燃气云随即被点燃, 并由此触发外部爆炸, 该过程已经被通过纹影系统和示踪粒子方式的研究^[10-11,29] 验证。外部爆炸过程的独特现象是, 在很短时间内泄爆口附近形成了一个明亮的火球。

外部爆炸发生后, 内部火焰的下锋面开始上下剧烈地跳动, 见图 2(d)~(f)。根据文献 [8,30], 这是亥姆霍兹振荡现象。当火焰向下跳跃, 即火焰内部低密度燃烧产物向容器底部高密度未燃烧氢-氮-空气混

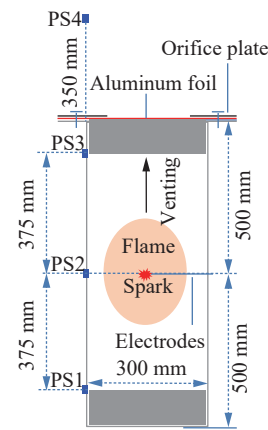


图 1 矩形泄放容器

Fig. 1 Rectangular vented vessel

合物加速时, 就会在火焰下锋面触发形成瑞利-泰勒不稳定现象^[30-31], 火焰下锋面的泰勒不稳定现象将会导致火焰在容器内部的燃烧速率和燃烧面积增大^[30], 如图 2(f) 所示。随着火焰的传播, 容器内外压差逐渐减小, 在阻力的作用下火焰下锋面上下跳动的振幅随时间逐渐减小, 当火焰下锋面接近容器底部时, 几乎无法分辨。与此同时, 容器外的火球也逐渐变形为射流结构火焰。

图 3 为火焰上下锋面在点火后的位置和传播速度。位置是指火焰锋面与点火电极之间的距离; 火焰的速度是指火焰锋面位移与时间之比, 负值为朝向容器底部的运动。火焰位置和速度可以通过高速摄像机的火焰图像计算。考虑火焰亮度对数据精度的影响, 分析 $\varphi=0\%$ 时火焰上下锋面的速度和位置在泄爆过程中的演变。

在破膜前, 由于浮力的作用^[32-33], 火焰向上膨胀的速度较快。需要说明: 由于火焰速度随着爆炸容器内 φ 的增高而减小, 因而浮力对内部火焰的影响在 φ 较高时会较突出; 破膜后, 火焰上锋面在泄放气流作用下向泄爆口明显加速, 同时下锋面也朝着泄爆口的方向运动。当爆炸室外火球开始形成时, 火焰上锋面有最大速度约 253 m/s, 随后迅速下降。此外, 在外部爆炸发生后不久, 火焰下锋面开始剧烈振荡, 其最大速度至 171 m/s、最小速度至 -147 m/s。这种振荡与内部超压的亥姆霍兹型振荡同时发生, 将在下节详细讨论。

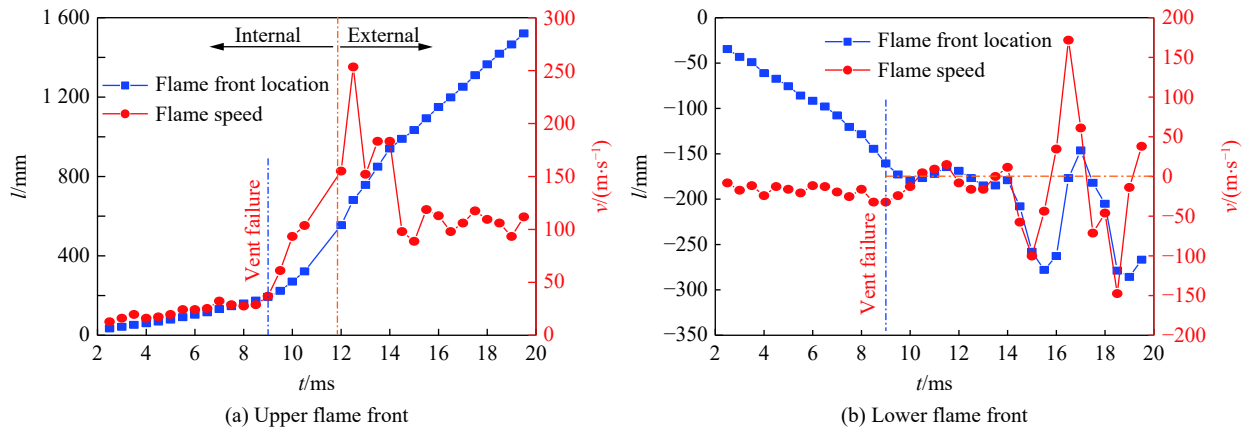


图 3 当 $\varphi=0\%$ 时点火后火焰锋面的位置和速度

Fig. 3 Flame front locations and velocities after ignition for $\varphi=0\%$

2.2 氮气体积分数对内部超压的影响

图 4 为氮气体积分数从 0% 增加到 50% 的内部压力曲线, φ 显著影响内部压力演变过程。当 $\varphi < 20\%$ 时, 内部压力曲线与 $\varphi=10\%$ 的类似, 可见到两个压力峰值 p_1 、 p_2 和亥姆霍兹振荡。 p_1 由泄爆膜破裂而产生^[7,34], p_2 则是外部爆炸和火焰下锋面泰勒不稳定耦合作用的结果^[5,35]。外部爆炸降低了泄爆口内外压力梯度, 火焰下锋面出现的泰勒不稳定则增加了火焰面积, 这些因素的耦合将使内部压力快速上升。

有学者认为, 燃烧气体泄放会造成爆炸容器内的体积流出率急剧增加, 导致内部压力迅速下降而形成压力峰值 p_2 , 其出现的时间通常与内部火焰到达泄爆口时相对应^[3,6]。但火焰传播速度很快, 使该峰值在很多情况下无法与外部爆炸导致的内部超压正确区分, 尤其是小尺度实验容器。在本实验中, 当 $\varphi=10\%$ 、 25% 时, 结合同步的火焰图像可发现, p_2 出现的时间始终滞后于火焰到达泄爆口处的时间; 当 $\varphi=25\%$ 时, 火焰到达泄爆口时并未导致内部压力峰值, 且外部压力峰值甚至早于 p_2 出现(下文将展示)。这些现象表明, p_2 在火焰冲出爆炸容器并触发外部爆炸之后出现。

随后, 在压力曲线出现了亥姆霍兹振荡, 它由外部爆炸发生后、内部火焰下锋面持续上下跳动所导致。它如同活塞, 以很高速度周期性地压缩容器底部的未燃气体。在所有实验中, 都可以观察到亥姆霍兹振荡, 当 $\varphi > 20\%$ 时更易辨识。此外, 这种活塞式运动会随着时间逐渐衰弱, 因此亥姆霍兹振荡的振幅会逐渐减小。

当 $\varphi=25\%$, 30% 时, 内部压力曲线上出现了频率约 1.25 kHz 的声学振荡和第 2 个压力峰值 p_3 。由文献 [3,5,9], 这种类型的振荡由混合气体在容器底角的声学增强燃烧引起。在有些情形中, p_3 甚至成为最大内部压力峰值 [9,30,36], 但在本文中, p_3 始终小于 p_2 。当 $\varphi>30\%$ 时, 声学振荡消失。声学振荡只在 $\varphi=25\%$, 30% 时才出现, 说明燃烧过程和声波之间微妙的耦合作用只出现在特定情形。

由图 4 还可以发现, φ 能显著影响亥姆霍兹振荡的频率。这是因为, 爆炸室声速会随着 φ 的增加而减小 [8], 导致叠加在火焰下锋面活塞式运动上的压力振荡, 其频率会从 $\varphi=0\%$ 时的 220 Hz 减小到 $\varphi=50\%$ 时的 130 Hz。

此外, 当 $\varphi<50\%$ 时, p_2 始终是最大的内部压力峰值, 而当 $\varphi=50\%$ 时, p_1 成为最大压力峰值。由此可以推断, 当 $\varphi\geq 50\%$ 时, 内部最大爆炸超压将与 φ 无关, 因为 p_1 近似等于破膜压力, 而后者在燃烧速率低的混合气体泄爆中几乎不会变化 [30]。

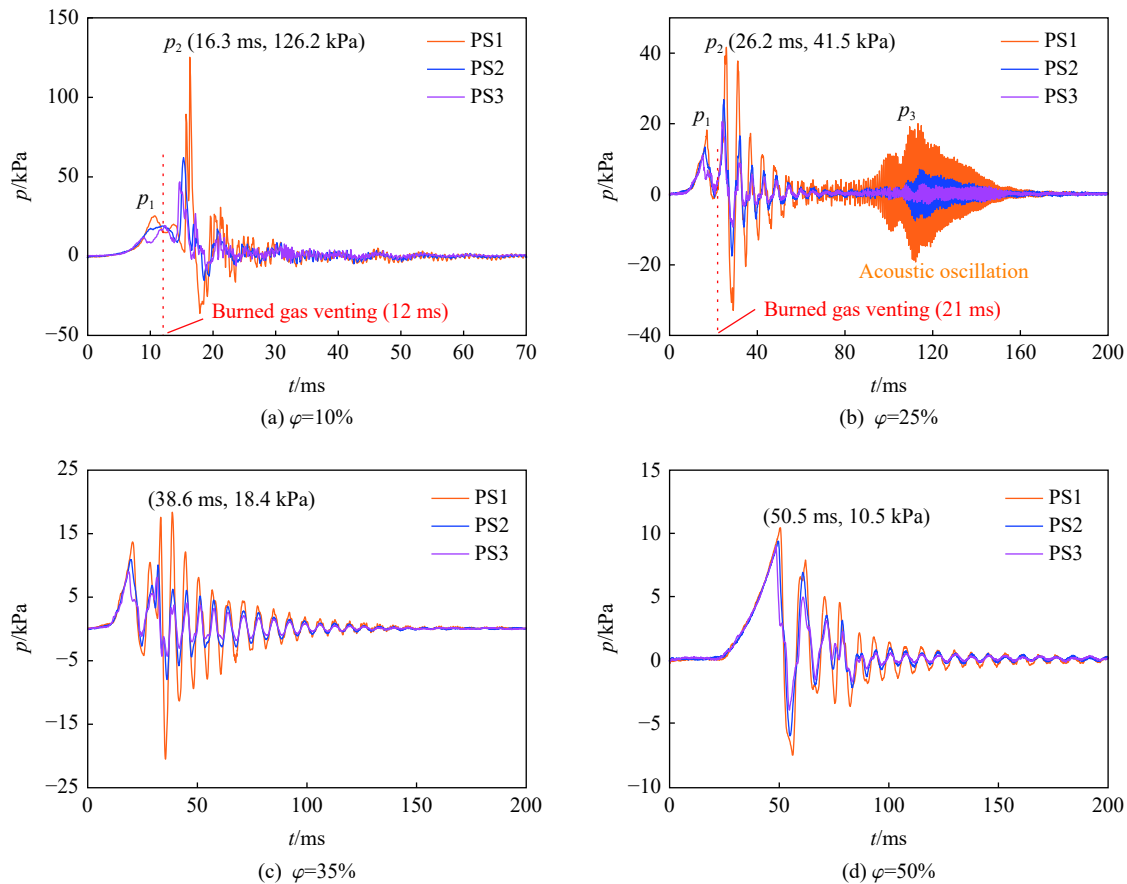


图 4 容器内部压力曲线

Fig. 4 Internal pressure curves of the vessel

2.3 氮气体积分数对最大内部超压的影响

图 5 为爆炸容器内部最大超压和氮气体积分数的关系。显然, 对于给定的 φ , 3 个压力监测点的 p_{\max} 存在较大差异。除 $\varphi=0\%$, 在其他实验中, p_{\max} 都随着压力传感器与泄爆口距离的增加而增加。而对 $\varphi=0\%$ 时的情形, 可以由图 6 解释: 点火约 13 ms 时, PS3 的压力曲线出现了一个持续时间很短的压力尖峰, 几乎与外部压力峰值同时出现, 这说明该压力尖峰是由外部爆炸产生的冲击波引起的。由于爆炸容器内部的压力取决于燃烧的体积生成速率和泄放的体积流出速率。显然, 当 $\varphi=0\%$ 时, 外部爆炸最剧烈, 在此情形下外部爆炸产生的冲击波最大限度地限制了爆炸室内部燃烧产物的体积流出速率, 使 PS3 的最大超压大于 PS2 的。

由图 5 中还发现, PS1~PS3 的 p_{\max} 的差值随着 φ 的增加而减小, 且当 φ 增加到 50% 时, 压差几乎减小为零。在相同的压力监测点, p_{\max} 总体上随着 φ 的增加而减小。如, PS1 的 p_{\max} 先从 $\varphi=0\%$ 时的 145 kPa 迅速减小到 $\varphi=35\%$ 时的 19 kPa, 后又缓慢减小到 $\varphi=40\%$ 时的 12 kPa, 最后随着 φ 进一步增加到 50%, p_{\max} 几乎不再减小。 p_{\max} 随着 φ 的增大而减小的原因是, φ 增加会降低内部氢-氮-空气混合物的燃烧速率^[37]。

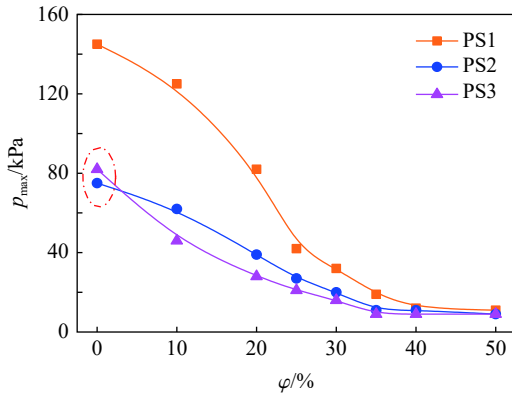


图 5 容器最大内部超压和氮气体积分数的关系

Fig. 5 Relations between maximum internal overpressures of the vessel and nitrogen addition ratios

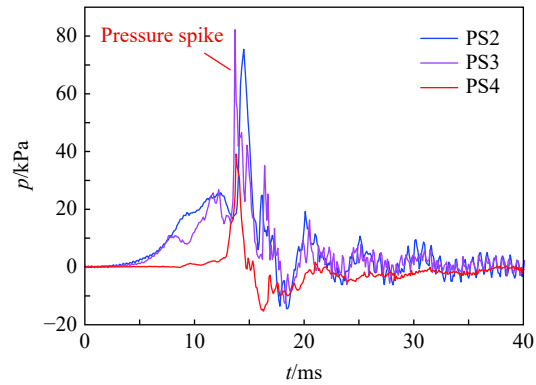


图 6 当 $\varphi=0\%$ 时容器内外压力曲线

Fig. 6 Internal and external pressure curves of the vessel for $\varphi=0$

2.4 氮气体积分数对外部爆炸的影响

如上所述, 外部爆炸由爆炸室外可燃云爆燃导致。外部爆炸会在容器外产生一个压力峰值, 典型的外部压力曲线如图 7 所示。当 $\varphi < 40\%$ 时, 外部压力曲线与 $\varphi=20\%$ 的类似。其中, 泄爆封口破裂会产生一个很小的压力峰值。之后, 由于外部爆炸, 外部压力曲线上会出现另外一个压力峰值 p_{ext} 。而在本文实验中, 当 φ 更高时, 可在外部压力曲线中观察到两个压力峰值 $p_{\text{ext},1}$ 和 $p_{\text{ext},2}$, 外部压力曲线与 $\varphi=40\%$ 的类似。这可通过容器外火焰的行为解释, 而后者又与可燃云团的形状密切相关, 下段作具体解释。

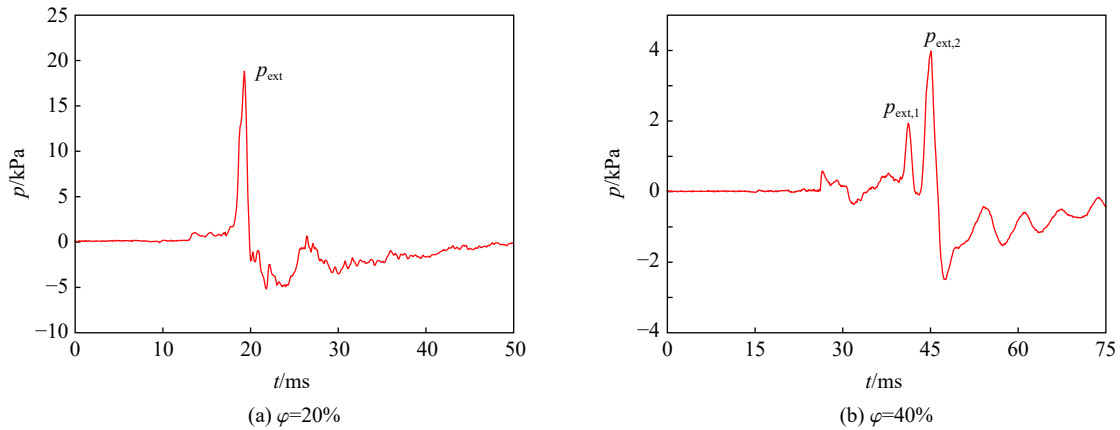


图 7 当 $\varphi=20\%$, 40% 时容器外部压力曲线

Fig. 7 External pressure curves of the vessel for $\varphi=20\%$, 40%

Proust 等^[11]通过在预混气体中添加示踪粒子(细二氧化硅颗粒)的方式, 揭示了泄爆口外可燃云的形状会从蘑菇状变成射流结构。当 $\varphi < 40\%$ 时, 未燃气体在泄爆口附近形成蘑菇状可燃云。当蘑菇状可燃云被点燃时, 会形成单个火球并产生单个压力峰值。然而, 由于容器内混合气体的燃烧速度会随着 φ 的增加而降低, 这会使火焰在容器内的传播时间延长, 为可燃气云从蘑菇状转变为射流结构提供更长的时间。因此, 当射流结构的可燃云被点燃时, 会在几毫秒内在外部流场中形成两个明显的火球, 同步火焰图像如图 8 所示, 由此产生的两个外部压力峰值也能在外部压力曲线中区分。

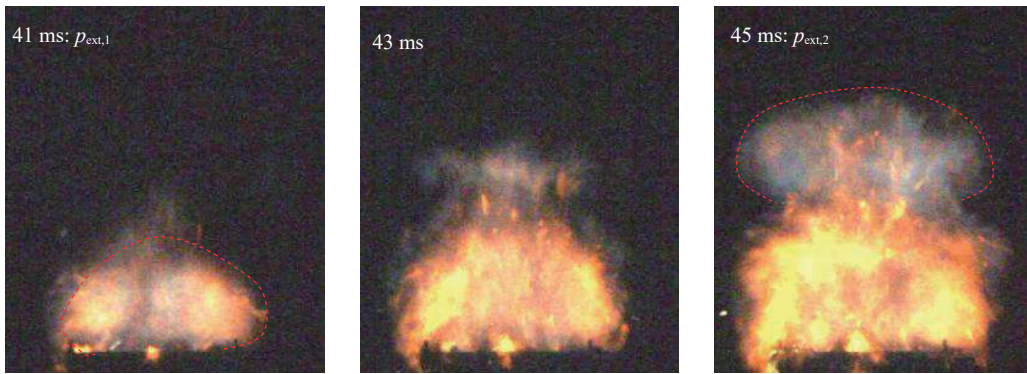


图 8 当 $\varphi=40\%$ 时容器外部火焰演变过程

Fig. 8 External flame evolution of the vessel for $\varphi=40\%$

图 9 为不同氮气体积分数的最大外部超压峰值。由文献 [6,10], p_{ext} 取决外部可燃云团的体积、形状、湍流水平和反应性等。在本文实验中, p_{ext} 随着 φ 的增加而单调减小的趋势, 主要由外部可燃云团活性的改变而导致。后者随着 φ 的增加而降低, 这同样可通过外部爆炸发生时火球亮度的变化中得到证实。如图 10 所示, 火球在 $\varphi=0\%$ 时非常明亮, 但随着 φ 的增加, 火球的亮度明显变暗, 当 φ 增加到 50% 时, 外部火球甚至无法辨别出来。

由文献 [5,35,38], 外部爆炸会以降低泄爆口内外压力梯度的方式来影响爆炸室内的泄放过程。在本文实验中也存在这种现象, 且与外部爆炸的强度无关。如图 6 所示, 当 $\varphi=0\%$ 时外部爆炸会使容器内部出现一个振幅很大的压力峰值。虽然 φ 的增加能够显著削弱外部爆炸的强度, 如图 11 所示, 当 $\varphi=25\%$, 40% 时, 容器内的压力峰值仍几乎与外部压力峰值同时出现。即使当 $\varphi=40\%$ 时, 虽然两个外部压力峰值只有几千帕, 也能清晰地从 PS3 的压力曲线中区分相应的内部压力峰值(见图 11(b))。

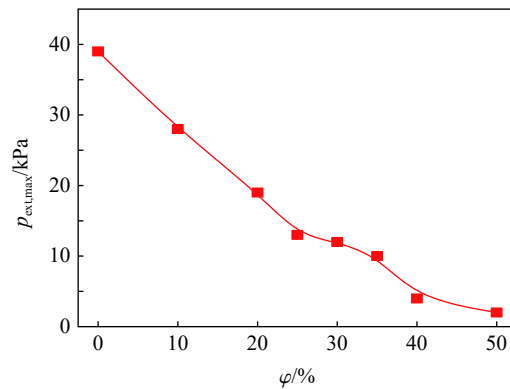


图 9 容器最大外部超压与氮气体积分数的关系

Fig. 9 Relations between maximum external overpressures of the vessel and nitrogen addition ratios

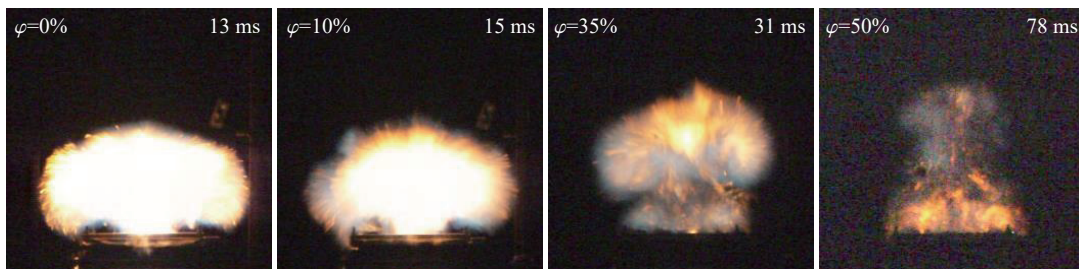


图 10 不同氮气体积分数下最大外部超压峰值时的火球

Fig. 10 Fireballs at maximum external overpressure under different nitrogen addition ratios

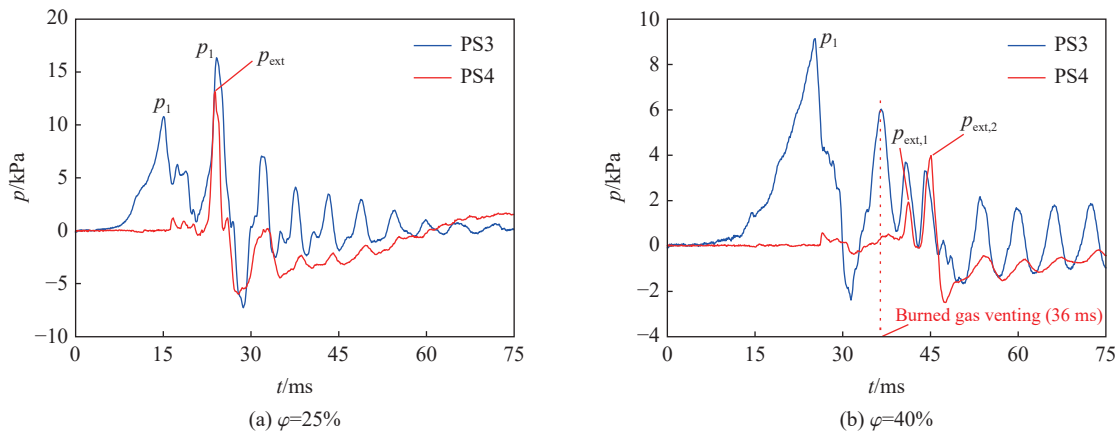


图 11 容器外部爆炸对内部压力的影响

Fig. 11 Effects of external explosion on internal pressure of the vessel

3 结 论

(1) 泄爆容器内的最大压力峰值和压力振荡取决于氮气体积分数: 当 $\varphi \leq 40\%$ 时, 由外部爆炸导致的内部压力峰值最大, 而当 $\varphi > 40\%$ 时, 则由泄爆膜破裂产生的压力峰值最大; 在所有实验中, 都观测到了亥姆霍兹振荡, 且其频率随着 φ 的增加而降低; 声学振荡只在 $\varphi = 25\%, 30\%$ 时才出现, 振荡频率约为 1.25 kHz。

(2) 内部最大爆炸超压随着氮气体积分数和压力监测点到泄爆口之间的距离而变化: 对于给定的 φ , p_{\max} 随着压力监测点与泄爆口之间距离的增加而增加, 仅在 $\varphi = 0\%$ 时, 由于剧烈的外部爆炸, 靠近泄爆口的 p_{\max} 才略高于泄放容器中心的 p_{\max} 。容器内部 3 个测点间的压差随着 φ 的增加而减小, 当 $\varphi \geq 40\%$ 时, 压差几乎可以忽略不计。总体上, p_{\max} 随着 φ 从 0% 增加、到 50% 降低。

(3) 在一些实验中, 外部压力曲线中出现了由外部爆炸产生的两个压力峰值。外部爆炸的强度随着 φ 的增加而降低。此外, 外部爆炸显著地影响内部压力曲线, 即使在外部爆炸超压很低的情况下, 也能观测到由其导致的内部超压峰值。

(4) 本文实验在小尺度的爆炸容器内开展, 火焰图像和压力数据可为氢气爆炸抑制机理的研究提供基础数据。实验结果可为氢能源在工业生产、储运和利用过程中的防爆设计, 开发和验证气体爆炸相关的 CFD 软件(如 FLACS)等, 提供参考。

参考文献:

- [1] 郑远攀, 景国勋, 张亚丽. CH_4/CO_2 混合气体爆燃特性研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(2): 203–210. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0203-08.
ZHENG Y P, JING G X, ZHANG Y L. A review of explosion characteristics of methane and carbon dioxide gas mixtures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2): 203–210. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0203-08.
- [2] 崔益虎, 蒋军成, 喻源, 等. 受限空间内气体爆炸惰化泄爆实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(3): 421–425. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000127.
CUI Y H, JIANG J C, YU Y, et al. Experimental study of the influence of inert gas addition on gas explosion release in confined space [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(3): 421–425. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000127.
- [3] CHOW S K, CLEAVER R P, FAIRWEATHER M, et al. An experimental study of vented explosions in a 3 : 1 aspect ratio cylindrical vessel [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2000, 78(6): 425–433. DOI: 10.1205/095758200530970.
- [4] FERRARA G, DI BENEDETTO A, SALZANO E, et al. CFD analysis of gas explosions vented through relief pipes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(2): 654–665. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.03.037.

- [5] BAUWENS C R, CHAFFEE J, DOROFEEV S. Effect of ignition location, vent size, and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2010, 182(11/12): 1915–1932. DOI: 10.1080/00102202.2010.497415.
- [6] GUO J, SUN X X, RUI S C, et al. Effect of ignition position on vented hydrogen-air explosions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(45): 15780–15788. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.09.038.
- [7] 曹勇, 郭进, 胡坤伦, 等. 点火位置对氢气-空气预混气体泄爆过程的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(6): 847–852. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0847-06.
- CAO Y, GUO J, HU K L, et al. Effect of ignition locations on vented explosion of premixed hydrogen-air mixtures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 847–852. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0847-06.
- [8] MCCANN D P J, THOMAS G O, EDWARDS D H. Gasdynamics of vented explosions (I): experimental studies [J]. *Combustion and Flame*, 1985, 59(3): 233–250. DOI: 10.1016/0010-2180(85)90128-2.
- [9] COOPER M G, FAIRWEATHER M, TITE J P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions [J]. *Combustion and Flame*, 1986, 65(1): 1–14. DOI: 10.1016/0010-2180(86)90067-2.
- [10] JIANG X H, FAN B C, YE J F, et al. Experimental investigations on the external pressure during venting [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005, 18(1): 21–26. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.09.002.
- [11] PROUST C, LEPRETTE E. The dynamics of vented gas explosions [J]. *Process Safety Progress*, 2010, 29(3): 231–235. DOI: 10.1002/prs.10368.
- [12] 钱海林, 王志荣, 蒋军成. N_2/CO_2 混合气体对甲烷爆炸的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 445–448. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0445-04.
- QIAN H L, WANG Z R, JIANG J C. Influence of N_2/CO_2 mixture on methane explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 445–448. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0445-04.
- [13] SHEN X B, ZHANG N N, SHI X M, et al. Experimental studies on pressure dynamics of C_2H_4/N_2O mixtures explosion with dilution [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 74–80. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.053.
- [14] WEI H Q, XU Z L, ZHOU L, et al. Effect of hydrogen-air mixture diluted with argon/nitrogen/carbon dioxide on combustion processes in confined space [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(31): 14798–14805. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.038.
- [15] ZHANG Q W, YU Y, LI Y H, et al. Coupling effects of venting and inerting on explosions in interconnected vessels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 65: 104132. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104132.
- [16] HOLBORN P G, BATTERSBY P, INGRAM J M, et al. Modelling the mitigation of lean hydrogen deflagrations in a vented cylindrical rig with water fog [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(20): 15406–15422. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.131.
- [17] HOLBORN P G, BATTERSBY P N, INGRAM J M, et al. Modelling the mitigation of a hydrogen deflagration in a nuclear waste silo ullage with water fog [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91(6): 476–482. DOI: 10.1016/j.psep.2012.11.001.
- [18] BATTERSBY P N, AVERILL A F, INGRAM J M, et al. Suppression of hydrogen-oxygen-nitrogen explosions by fine water mist (2): mitigation of vented deflagrations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(24): 19258–19267. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.10.029.
- [19] HOLBORN P G, BATTERSBY P, INGRAM J M, et al. Modelling the mitigation of hydrogen deflagrations in a vented cylindrical rig with water fog and nitrogen dilution [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(8): 3471–3487. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.134.
- [20] WEN X P, WANG M M, SU T F, et al. Suppression effects of ultrafine water mist on hydrogen/methane mixture explosion in an obstructed chamber [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(60): 32332–32342. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.110.
- [21] PEI B, YU M G, CHEN L W, et al. Experimental study on the synergistic inhibition effect of nitrogen and ultrafine water mist on gas explosion in a vented duct [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 546–553. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.005.
- [22] INGRAM J M, AVERILL A F, BATTERSBY P N, et al. Suppression of hydrogen-oxygen-nitrogen explosions by fine water mist (1): burning velocity [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(24): 19250–19257. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.092.

- [23] 刘洋, 李展, 方秦, 等. 惰性气体和水蒸气对长直空间燃气爆炸超压及其振荡的抑制作用 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(5): 055201. DOI: 10.11858/gywlxb.20200654.
LIU Y, LI Z, FANG Q, et al. Inert gas and water vapor suppressing overpressure and its oscillation of gas explosion in long straight space [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(5): 055201. DOI: 10.11858/gywlxb.20200654.
- [24] 张迎新, 吴强, 刘传海, 等. 惰性气体 N_2/CO_2 抑制瓦斯爆炸实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(5): 906–912. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0906-07.
ZHANG Y X, WU Q, LIU C H, et al. Experimental study on coal mine gas explosion suppression with inert gas N_2/CO_2 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(5): 906–912. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0906-07.
- [25] LU C, WANG H B, PAN R K, et al. Preventing the propagation of gas explosion in ducts using spurted nitrogen [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 123: 11–23. DOI: 10.1016/j.psep.2018.12.028.
- [26] LI G C, WANG X S, XU H L, et al. Experimental study on explosion characteristics of ethanol gasoline-air mixture and its mitigation using heptafluoropropane [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 378: 120711. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.05.104.
- [27] ZHENG L G, LI G, WANG Y L, et al. Effect of blockage ratios on the characteristics of methane/air explosion suppressed by BC powder [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 355: 25–33. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.04.070.
- [28] 郑立刚, 王亚磊, 于水军, 等. $NaHCO_3$ 抑制瓦斯爆炸火焰与压力的耦合分析 [J]. *化工学报*, 2018, 69(9): 4129–4136. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180433.
ZHENG L G, WANG Y L, YU S J, et al. Coupled relationship between flame and overpressure of gas explosion inhibited by $NaHCO_3$ [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(9): 4129–4136. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180433.
- [29] GUO J, WANG C J, LIU X Y. Experimental study on duct-vented explosion of hydrogen-air mixtures in a wide range of equivalence ratio [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(35): 9518–9523. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02029.
- [30] LI J L, WANG X B, GUO J, et al. Effect of concentration and ignition position on vented methane-air explosions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 68: 104334. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104334.
- [31] SOLBERG D M, PAPPAS J A, SKRAMSTAD E. Observations of flame instabilities in large scale vented gas explosions [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, 18(1): 1607–1614. DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80164-6.
- [32] LI Q Q, HU E J, CHENG Y, et al. Measurements of laminar flame speeds and flame instability analysis of 2-methyl-1-butanol-air mixtures [J]. *Fuel*, 2013, 112: 263–271. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.05.039.
- [33] ZENG W, LIU J, MA H A, et al. Experimental study on the flame propagation and laminar combustion characteristics of landfill gas [J]. *Energy*, 2018, 158: 437–448. DOI: 10.1016/j.energy.2018.06.062.
- [34] 郑立刚, 朱小超, 于水军, 等. 浓度和点火位置对氢气-空气预混气爆燃特性影响 [J]. *化工学报*, 2019, 70(1): 408–416. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180726.
ZHENG L G, ZHU X C, YU S J, et al. Effect of concentration and ignition position on characteristics of premixed hydrogen-air deflagration [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(1): 408–416. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180726.
- [35] YANG J, GUO J, WANG C H, et al. Effect of equivalence ratio on hydrogen-methane-air deflagration in a duct with an open end [J]. *Fuel*, 2020, 280: 118694. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118694.
- [36] BAO Q, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures [J]. *Fuel*, 2016, 175: 40–48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084.
- [37] ZHANG C, WEN J, SHEN X B, et al. Experimental study of hydrogen/air premixed flame propagation in a closed channel with inhibitions for safety consideration [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(40): 22654–22660. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.032.
- [38] KUZNETSOV M, FRIEDRICH A, STERN G, et al. Medium-scale experiments on vented hydrogen deflagration [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 416–428. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.013.

(责任编辑 丁峰)