DOI: 10.11883/bzycj-2025-0123

掺氨量对管道氨气-氢气-空气预混气体爆燃特性的影响*

葛　雨[1], 汪　泉[1,2], 朱文艳[1], 李　瑞[1], 冯鼎玉[1], 徐建设[1], 杨耀勇[3]

（1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;
2. 安徽理工大学安徽省新型爆炸材料与爆破技术工程研究中心, 安徽 淮南 232001;
3. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001）

摘要： 为了深入研究氨气-氢气-空气预混气体火焰在管道内外的燃烧特性, 在长 2000 mm 的不锈钢管道中开设尺寸为 400 mm×70 mm 的观察窗, 借助高速摄影和压力传感器, 测试分析了化学计量比 (Φ=1) 的条件下掺氨量 (φ) 在 30%～85% 范围内对火焰形态和管道内外压力演化的影响。结果表明, 掺氨量 (φ) 会显著影响管道中火焰的传播过程以及压力时程曲线。管道内火焰的传播速度随掺氨量的增加而降低, 到达由二次爆炸引起的回流现象的时间也随之延长; 管内距离泄爆口 400 mm 处设置压力测点 PS1 采集数据, 各工况下管道内压力曲线均呈现 p_1、p_2 和 p_3 的三峰结构, 3 个压力峰分别由泄爆口薄膜破裂、管内气体泄放以及管外二次爆炸产生的气体回流引起, p_1 的大小取决于泄爆膜的抗拉强度, 其幅值几乎与掺氨量 (φ) 无关, p_2 和 p_3 均随着掺氨量 (φ) 的增加而升高, 其中 p_3 升高速率最大; 管外距离泄爆口 500 mm 处设置压力测点 PS2 采集数据, 管外二次爆炸压力峰值（p_{out}）随着掺氨量 (φ) 的增加而降低, 到达 p_{out} 的时间则随之延长。

关键词： 泄爆; 动态压力变化; 超压; 火焰形态

中图分类号： O381　　**国标学科代码：** 13035　　**文献标志码：** A

Influence of ammonia content on ammonia-hydrogen-air premixed gas duct-vented explosions

GE Yu[1], WANG Quan[1,2], ZHU Wenyan[1], LI Rui[1], FENG Dingyu[1], XU Jianshe[1], YANG Yaoyong[3]

（1. *School of Chemical and Blasting Engineering*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*;
2. *Anhui Province Engineering Research Center for New Explosive Materials and Blasting Technology*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*;
3. *School of Civil Engineering and Architecture*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*）

Abstract: Renewable energy is addressing some of the key challenges facing global society today, and zero-carbon energy systems are the fundamental way to achieve carbon neutrality. Therefore, hydrogen and ammonia have gained great attention as zero-carbon energy sources. To further study the combustion characteristics of ammonia-hydrogen-air premixed gas flame inside and outside the duct, the influence of ammonia doped amount (φ) on the flame morphology and the evolution of pressure inside and outside the duct under stoichiometric ratio was explored with the help of high-speed photography and pressure sensor in a 2000 mm stainless steel duct with a 400-mm-long and 70-mm-wide observation window. The results show that φ significantly affects the pressure inside and outside the duct, and the time to reach the reverse flow phenomenon caused by the

* **收稿日期：** 2025-04-24；**修回日期：** 2025-08-12
基金项目： 安徽省重点研究与开发计划社会领域项目（2023g07020002）
第一作者： 葛　雨（1998—　）, 女, 硕士, 786026710@qq.com
通信作者： 汪　泉（1980—　）, 男, 博士, 教授, 博士生导师, wqaust@163.com

secondary explosion also increases. The pressure measuring point PS1 is set at 400 mm away from the explosion vent in the duct to collect data. The pressure curves in the duct under each working condition are presented as a three-peak structure, named p_1, p_2, and p_3. The three pressure peaks are caused by the rupture of the explosion vent film, the gas venting in the duct, and the gas reverse generated by the secondary explosion outside the duct. The size of p_1 depends on the tensile strength of the explosion venting membrane, and its amplitude is almost independent of the φ. p_2 and p_3 both increase with the increase of φ, and the p_3 increase rate is the largest when φ is in 50%-65%. p_2 changes from a single peak to a fluctuating pressure platform in the pressure curve diagram, and the time of the platform extends with the increase of φ. The pressure measurement point PS2 is set at the horizontal central axis, 500mm away from the explosion vent outside the duct, to collect data. And the peak pressure of the secondary explosion outside the duct (p_{out}) decreases with the increase of the φ, and the time to reach p_{out} increases. This study provides a theoretical basis for the utilization of ammonia and hydrogen energy.

Keywords: explosion venting; dynamic pressure change; overpressure; flame pattern

发展可再生能源与推动能源系统零碳化，被视为应对全球环境问题和实现碳中和的根本途径[1]，在这一背景下，氢气和氨气作为零碳能源获得了极大的关注,其中氢能作为最受青睐的清洁能源，具有来源广泛、安全可控、高效灵活和低碳环保等优点[2-3]。然而，氢气的低密度、较宽的可燃极限和较高的火焰传播速度在一定程度上影响了其使用过程中的安全性[4-5]。研究人员对氢气与其他含碳化合物燃料的共燃进行了大量的研究[6-11]，发现混合燃料可以满足工业需求，却不可避免地会产生碳排放。工业中氨/氢混合输运的工况主要集中在合成氨工艺、氨裂解制氢中。另有研究人员对氨能否作为氢能储存运输的载体进行了探讨[12-14]，认为氨是缓解氢储存和运输挑战的潜在候选者。可再生的无碳燃料氨因其能量密度高、便于工业规模运输等优点而受到越来越多的关注。由于氨的低反应性和极弱的燃烧强度，其直接作为燃料使用具有一定挑战，学者们通过向其中添加高活性燃料来提高燃烧性能[15-19]。由此，氢气和氨气优势互补，两者结合可以很好地解决现阶段所面临的能源高效利用和环保问题。

可以通过优化混合物中燃料比例及能量输出特性，从而形成一种有前景的复合燃料系统[20]，然而，与纯氨相比，氨/氢混合物可能会增加安全事故的风险。可燃气体混合物的主要危险来自于燃烧特性和爆炸压力。迄今为止，气体混合物的燃烧特性受到了研究人员的相当重视。He 等[21] 在掺氨量 0%～100%（0%、25%、50%、75% 和 100%）范围内开展了测试实验，发现掺氨量 $\varphi \leqslant 75\%$ 时管道内火焰形态演化相似，混合物爆燃超压随掺氨量变化明显。Lhuillier 等[22] 通过向外传播球形火焰法研究了高温下氨/氢/空气混合气的层流燃烧速度，发现当氢气含量为 20%～40% 之间时，氢气的添加更好地符合层流燃烧速度关联式。Zheng 等[23] 通过实验和数值模拟的方法研究了氨/氢/空混合气在密闭空间内的火焰形态和燃烧性质，发现随着氨气含量的上升，火焰前锋速度降低。Fernando 等[24] 通过计算发现，在 Chapman-Jouguet 状态下，氮氧化合物的生成量与氨/氢混合物中的氢气比例有关。Wang 等[25] 通过在体积为 1 m^3 容器中实验得出随着氢气浓度的增大，顶端泄爆口外部火焰的长度增加，火焰持续时间缩短。Shrestha 等[26] 通过实验发现，氢/氨/空气混合气的层流燃烧速度随着初始温度、氧气含量和氢气含量的提高而升高，随着初始压力的升高而降低。Chen 等[27] 通过实验发现，随着初始压力的升高，层流燃烧速度单调降低，火焰厚度单调减小。氨/氢燃料的进一步发展不仅需要了解其燃烧特性，还需要考虑可能存在的爆炸危险性。Su 等[11] 通过实验发现，在混合气（H_2/CO/air）中爆炸压力、压力上升速率随着当量比 (Φ) 的增大先升高后降低，同时，氢气含量的增大会使爆炸压力上升，火焰速度加快。Yu 等[15] 通过数值模拟研究了温度和氢气含量对发动机发生爆震时间的影响，结果表明爆震的时间随着初始温度或 H_2 含量的升高而缩短。Wu 等[17] 对高温高压内燃机环境下混合气火焰的传播过程开展了数值模拟，发现高压环境下温度升高使得火焰传播速度提升了 5 倍，氨/氢燃料预混燃烧模式的实际应用中当量比在 1.4 以下为宜。Li 等[28] 借助云爆炸实验平台实验发现，随着氨气含量的升高，绝热火焰温度和热扩散率的降低有助于降低层流燃烧速度，随着当量比的增加，影响层流燃烧速度的主要因素是化学反应。Yang 等[29] 研究了合成气/空气混合气在 2 种管道中的火焰发展，发现随着氢气含量的增加，火焰变得不稳定。Cao 等[30] 发现当氢气

体积浓度为 30% 时，泄爆管道中的压力在管道传播中表现为先增大后减小，均低于容器内部压力。上述文献表明，众多学者的研究主要关注燃烧速度、氢气比例、初始压力等因素对预混气体混合物燃烧性质的影响。

尽管对预混气体火焰的传播行为已经开展了较多研究工作，但目前对化学计量比条件下不同氨气含量对氨气/氢气/空气预混气体燃烧特性的影响进行的实验研究较少。氨气-氢气-空气预混火焰的传播行为是揭示燃料爆炸危险性的基本特性。Wang 等[31] 和 Zhu 等[32] 前期对管道内掺氨预混气体的火焰行为以及压力演化进行了相关研究，探究了不同当量比对预混气体的影响，但未涉及掺氨量变化对预混气体影响的研究。本文通过研究半封闭管道内外火焰传播行为和管内火焰爆燃压力，探讨氨气含量对氨气-氢气-空气混合气火焰传播行为的影响，以期为广泛的掺氨量范围内提高化学计量比条件下氨气-氢气-空气混合燃料的安全利用提供理论依据。

1　实　验

1.1　实验系统

实验系统组成如图 1 所示。不锈钢加速火焰管道总长 2 m，左侧为 1 m 长的不锈钢方管，方孔内边长为 120 mm，在方管侧面距点火端 1.30 m 处设有长 400 mm、宽 70 mm 的观察窗；右侧为 1 m 长的不锈钢圆管，内径为 120 mm，最右端为点火端，由不锈钢法兰封闭，最左边设为泄爆口，用 PE 薄膜对其进行弱封闭，PE 薄膜厚度为 0.02 mm，抗拉强度为 20 MPa，静态动作压力为 3.25 kPa[33]。在距离点火端 1.65 m 处布有置 PCB 113B24 压电式压力传感器，参数如表 1 所示，距离泄爆口 0.5 m 水平中轴线处布置有 CY-YD-202 压电式压力传感器，参数如表 2 所示，利用独立支架固定，进行采集管内外压力的工作，通过示波器将管内外混合气体爆燃过程的压力可视化，所有数据均通过 HIOKI 8841 存储记录仪进行存储。在观察窗和通风口外架设 NAC Memrecam HX-3 高速摄影相机，采集泄爆火焰图像，采集速率为 5 000 s^{-1}。

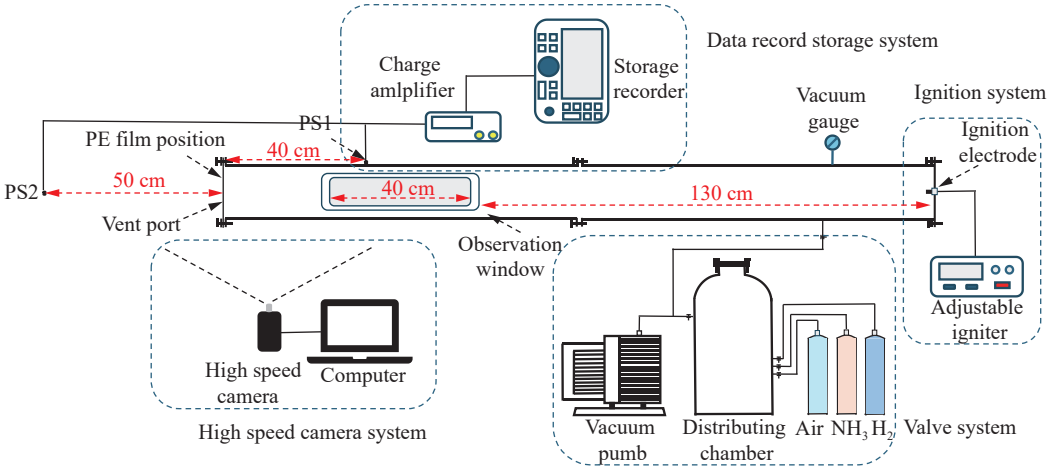


图 1　预混火焰传播实验装置示意图

Fig. 1　Sketch of premixed flame propagation experimental setup

本实验使用的点火系统由点火电极和点火器组成，输出电压可调，其名义点火能根据下式计算：

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \tag{1}$$

式中：E 为名义点火能，C 为点火电容，U 为电容放电电压。实验所用点火电压为 90 V，该点火电压对应的点火能为 3 J。

表 1　PCB 113B24 压电式压力传感器参数

Table 1　Parameters of PCB 113B24 piezoelectric pressure sensor

技术指标	参数范围
量程	0～13.79 kPa
最大压力	68.95 MPa
分辨率	0.035 pPa
谐振频率	≥500 kHz
上升时间	≤1 μs
非线性度	≤1%
放电时间常数	≤1.4Pa/(m·s^{-2})
加速度灵敏度	＞100 s

表 2　联能 CY-YD-202 压电式压力传感器参数

Table 2　Parameters of CY-YD-202 piezoelectric pressure sensor

技术指标	参数范围
量程	0～10 MPa
过载能力	120%
参考压力灵敏度	32.3pC/10^5 Pa
自振频率	＞100 kHz
电容	43.3 pF
工作温度	-10～80 ℃
非线性	＜1.5%FS
绝缘电阻	＞10^{12} Ω

1.2　实验方法

探究掺氨量对氨气-氢气-空气可燃混合气管道泄爆影响，首先制备合理的实验方案，根据下式可计算气体燃料的当量比 Φ：

$$\Phi = \frac{n_{carb}/n_{air}}{(n_{carb}/n_{air})_{st}} \tag{2}$$

式中：n_{carb} 和 n_{air} 分别为燃料和空气的物质的量。

掺氨量 φ 可用下式计算：

$$\varphi = \frac{V_{NH_3}}{V_{NH_3} + V_{H_2}} \tag{3}$$

式中：V_{NH_3} 和 V_{H_2} 分别为可燃预混气中氨气和氢气的体积分数。

实验均在环境压力（101.325 kPa）和常温（298 K）条件下进行，实验名义点火能量为 3 J。实际应用中典型氨氢混合气的代表为掺氨量 φ=25% 和 φ=50%[23]，此前的相关研究掺氨量选取多以 0%～100% 范围内大跨度百分比，为探究更广泛掺氨量条件下管道燃爆特性，本研究在当量比Φ=1 条件下，对不同掺氨量 φ 的氨气-氢气-空气可燃混气进行管道燃爆实验，氨氢掺混比如表 3 所示。在混气罐中根据道尔顿分压定律分别对 12 种不同配比可燃混气进行混合，每组实验混气静置 2 h，以确保各种气体充分混合。实验前使用真空泵将不锈钢管道抽真空，充入可燃混气直至环境压力，静置 1 min 后进行点火，同步控制压力数据采集系统和高速摄像机记录实验数据。每组实验进行 3～5 次，实验重复性良好。选取其中一组作为实验数据，如图 2 可以看出，波动范围很小，重复实验压力峰值误差不超过±3%。

表 3　配制气体方案

Table 3　Schemes of gas distribution

NO	Φ	φ	V(NH$_3$)/%	V(H$_2$)/%	V(air)/%
1	1	85	19.61	3.46	78.25
2		80	18.71	4.68	77.94
3		75	17.79	5.93	77.61
4		70	16.84	7.22	77.27
5		65	15.86	8.54	76.93
6		60	14.85	9.90	76.58
7		55	13.81	11.30	76.21
8		50	12.75	12.75	75.83
9		45	11.65	14.23	75.45
10		40	10.51	15.77	75.05
11		35	9.34	17.35	74.64
12		30	8.13	18.98	74.21

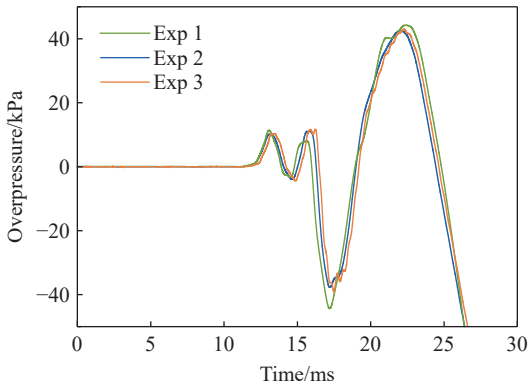


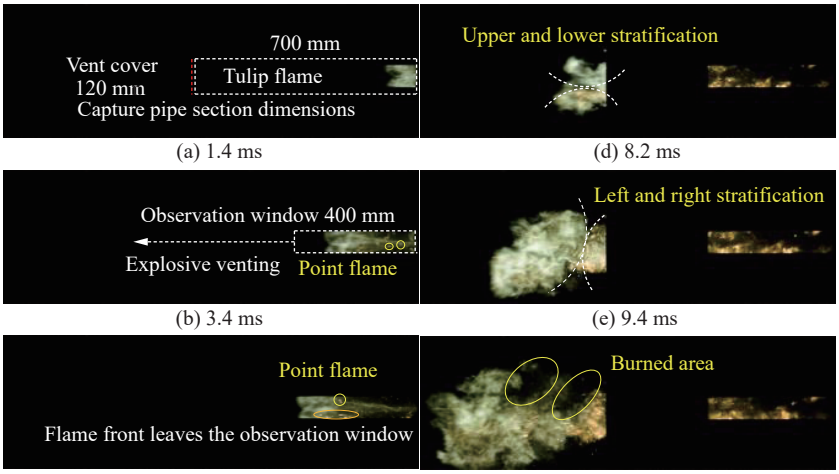
图 2　典型实验数据

Fig. 2　Typical experimental data

2　结果与讨论

2.1　氨气-氢气-空气预混气体火焰传播特性分析

图 3 为实验过程中高速摄影拍摄的观察窗内 φ=35% 时火焰传播形态图片。定义火焰进入观察窗前一帧为零时刻。如图 3(a) 所示，t=1.4 ms 时火焰锋面显示为郁金香火焰，表现为双峰凹陷的火焰前锋，实验表明，郁金香火焰是火焰与流体运动相互作用而产生的流体动力学现象[34]。t=3.4 ms 开始，由于爆燃后管道内部成分变得更为复杂，火焰传播时局部反应性增加，化学发光强度增加[35]，火焰传播过程中出现多处明亮的火焰光点，这些火焰光点主要分布在管道中部和底部，随着时间变化，火焰向左侧通风口推移，由于黏滞性的存在，这些光点不发生明显的位置变化。t=8.2 ms 时，此时管道左边通风口薄膜已经破裂，由于管道内部体积有限，产生的压力波作用使管内混合气体向通风口泄放，管口外部火焰呈现喷射状，因为轻气体混合物和热燃烧产物的浮力作用，导致管道外分为上下 2 个燃烧区域[36]，在图 3(d) 中可以看出。时间推移到 t=9.4 ms 时，如图 3(e) 所示，管外被点燃的可燃气云向四周释放能量，火焰从爆炸通风口释放，携带未燃烧的混合气体，加速向前方的空气域移动，管内持续的反应使火焰继续从爆炸通风口释放，随着反应的发生氧气浓度逐渐不足，低供氧量无法匹配火焰后端燃烧区的高需氧量，管外的火焰能量分配不均匀[37]，致使管外燃烧区域出现另一种火焰分层现象。t=10.8 ms 时，由于外部爆炸的发生，火焰锋面被推向未燃气体，管道内部超压降低[25]，同时泄出气体与环境气体进行额外的混合，增加了湍流强度，火焰面由于瑞利泰勒不稳定性变得更加粗糙[38-39]，内部超压增大，此时后端火焰强度不足，使得火焰云外边缘首先出现已经完成燃烧的区域，图 3(f) 中表现为火焰边缘暗部。



(a) 1.4 ms　(d) 8.2 ms

(b) 3.4 ms　(e) 9.4 ms

(c) 4.4 ms　(f) 10.8 ms

图 3　φ=35% 时管道内外的火焰图像

Fig. 3　Flame images inside and outside the duct at φ=35%

图 4 为实验过程中高速摄影拍摄的观察窗内 φ=45% 时火焰传播形态图片。为了保证实验重复性，基础设置数据与图 3 相同。同样，在管内如图 4(c) 中可以观察到明亮的火焰光点，管外如图 4(d) 中可以观察到火焰分层。在图 4(e)～4(f) 和图 5 中可以观察到管道内出现火焰逆流现象，此时火焰边缘由清晰转为模糊，这是这是因为火焰泄放至管道外部后，点燃了破膜后泄放至管外的可燃气体云，使其发生管外的二次爆炸，外部二次爆炸使得泄爆口附近的压力上升，从而降低了泄爆口内外压力梯度，进而阻碍管道内部压力释放，使气体混合物反向流入管内，管道内部的混合气燃烧使得局部压力暂时超过管口压力[40]。随着掺氨量的增加，火焰回流现象出现的时间往后推移。

通过确定实验过程中不同时间下火焰前锋的位置变化，结合高速摄像机运行速度，可以得出如图 6 所示的时间-位移-速度点线图。图 6 为环境室温（298 K）以及大气压（101.325 kPa）条件下，破膜前管道内部火焰前锋位置和火焰前锋传播速度随时间的变化，位置设定为距离观察窗右端的距离。由图可以看

出，在观察窗可视区间内，火焰的传播速度随时间变化整体呈现震荡上升趋势，这是由于在实验过程中，管内可燃混合气体的火焰前锋和反应产生的压力波相互作用，压力波驱动火焰呈现周期性震荡[41]。在震荡的基础上，由于管内气体爆燃行为的发生，管内能量一直处于上升的阶段，造成火焰传播速度持续上升，直至压力波冲破薄膜，未燃混合气体和火焰相继喷射出管口。图 7 显示了不同氨气含量（φ=30%～50%）下，Φ=1 和标准状况（101.325 kPa, 298 K）的氨气-氢气-空气混合气的管内火焰传播速度，可以观察到，随着难燃氨含量的降低，管内难燃氨燃烧所需能量降低，可燃混合气燃烧产生的能量更多作用于管内火焰行为，观察窗内火焰传播速度升高，同时，由于观察窗左侧接近管道通风口，出口为弹性膜封闭，当管道内部火焰前方部分预混气体抵达弹性膜附近时，使得弹性膜附近原有气体由稳定转向不稳定，这种气体的不稳定现象会影响后方火焰的传播，图 6 中体现在火焰传播速度曲线出现较大幅度波动。

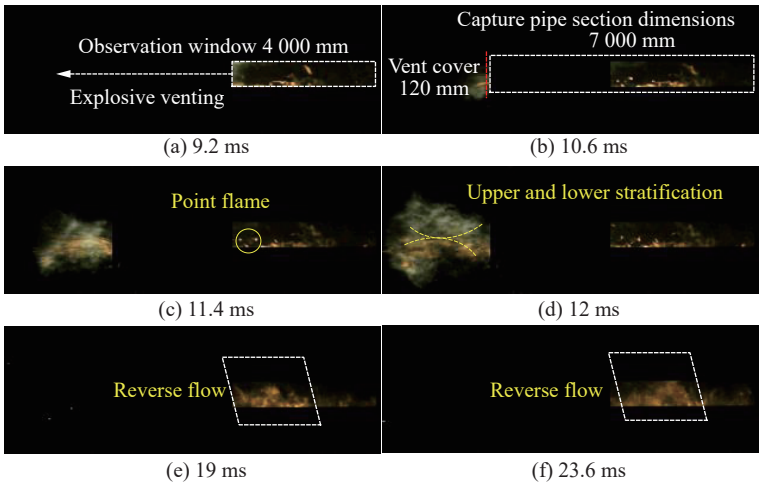


图 4　φ=45% 时管道内外的火焰图像

Fig. 4　Flame images inside and outside the duct at φ=45%

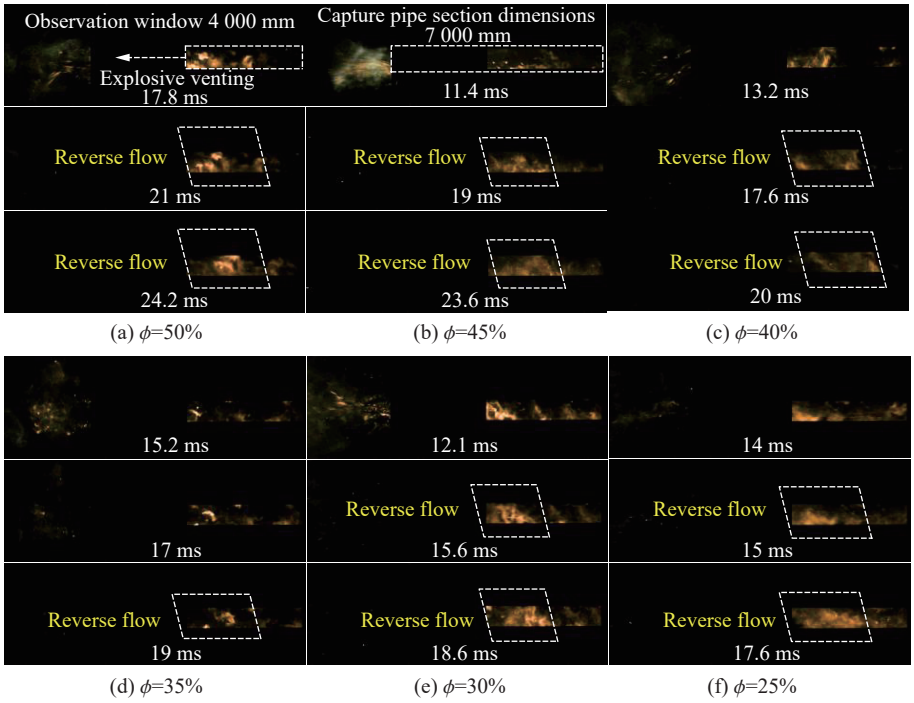


图 5　φ=25%～50% 时管道内火焰逆流图像

Fig. 5　Images of reverse flow flame inside the duct at φ=25%-50%

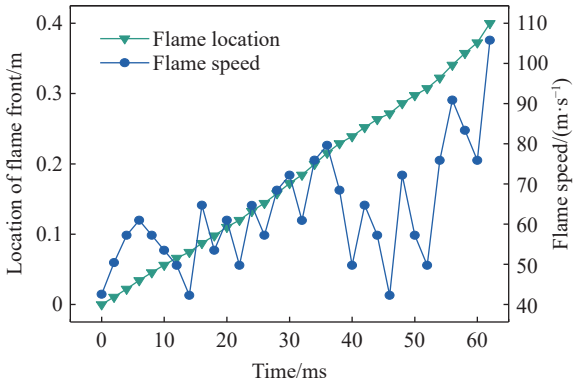


图 6　φ=45% 时管内火焰锋面位置变化及火焰传播速度

Fig. 6　Location of flame front and flame speed in the duct at φ=45%

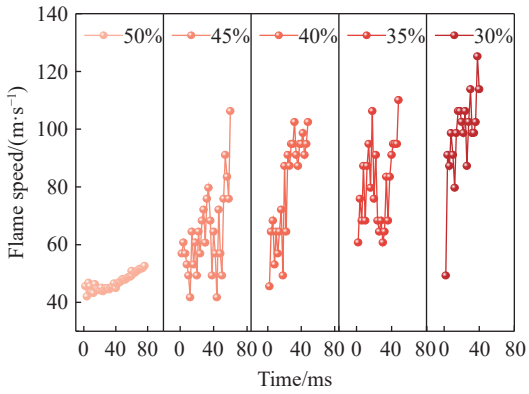


图 7　不同 φ 对管内火焰传播速度的影响

Fig. 7　Flame propagation speed in the duct for different φ

2.2　不同 φ 对预混气体管内爆燃压力的影响

管内爆炸压力能够反映气体爆燃过程的爆炸危险性，爆炸压力是衡量爆炸事故后果的关键指标。管道内不同 φ 的爆燃压力时程曲线走势相似，几乎所有工况压力时程曲线均表现为三峰结构，如图 8～10 所示，由左向右分别命名它们为 p_1、p_2 和 p_3。点火后，管内预混气体被点燃，管内燃烧混合物从右向左对未燃预混气进行挤压和点燃行为，使得管内压力逐渐升高，直到一部分未燃混合气体冲破通风口薄膜，形成破膜压 p_1，由于 p_1 大小取决于泄爆膜的耐拉特性，其幅值几乎与掺氨量无关[42]；破膜促使在管内传播的火焰湍流程度增加，管内爆燃反应加剧，管内爆燃产生的大量燃烧混合物在向泄爆口传递的过程中随爆燃火焰经过管内压力测点 PS1 处，使 PS1 处压力升高，同时，由于大量燃烧混合物泄放出管道，致使管道内部出现负压，测点 PS1 处压力降低，这一过程形成了测点 PS1 处的第 2 个压力峰，即泄放压力 p_2，p_2 是由燃烧混合物的泄放引起的；当火焰波阵面到达泄爆口时，将破膜后冲出管道的未燃混合气点燃，在管道外部发生二次爆炸。二次爆炸降低了管内外压力梯度，使部分燃烧混合物逆向进入管道，提升管内测点处的压力峰值，形成二次爆炸超压 p_3。

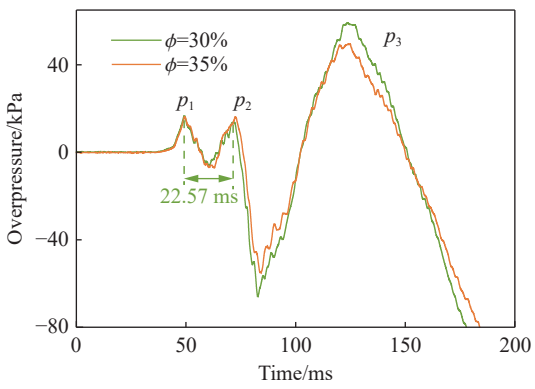


图 8　φ=30%, 35% 条件下管内压力的对比

Fig. 8　Comparison of the pressure in the duct under the condition of φ=30%, 35%

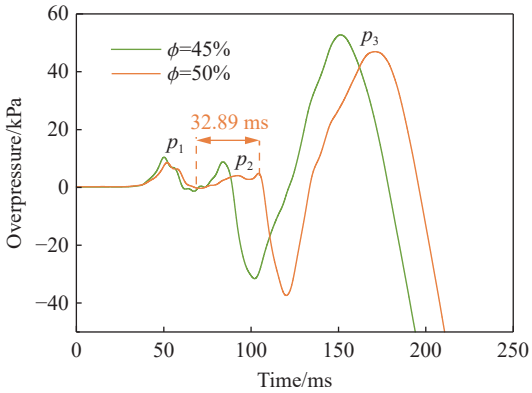


图 9　φ=45%, 50% 条件下管内压力的对比

Fig. 9　Comparison of the pressure in the duct under the condition of φ=45%, 50%

φ=30% 时，由于难燃氨 φ 远小于氢气，管内混合气体行为受氢气的影响更大，压力波动幅度更明显，同时由图 8 可知，此时管道内火焰速度较快，反应时程较短，从图 8 可以看出此时 p_1 和 p_2 的间隔时间 t=22.57 ms，与 φ=45% 的 t=33.86 ms 相比缩短了 33.2%。前驱混合气冲出管道，泄出气体在管道外部爆炸反应剧烈，未泄出气体暂时滞留在管道内部，因为难燃氨 φ 较小，气体密度较小，破膜后管内气体湍流和

泰勒-瑞利不稳定性影响更大，使得第 3 个峰值在上升的过程中与高 φ 相比表现出许多震荡峰[43]。

如图 9 所示，随着掺氨量的增加，管内混合气燃烧产生能量一部分作用于难燃氨，燃烧混合物的生成率降低，相应的流出率就相对增加，因此 p_2 的升压速率逐渐减缓 p_2 也逐渐趋于平缓，峰值压力也逐渐减小。当 φ=45% 时，点火后经历 84 ms 压力曲线达到峰值 p_2 为 8.8 kPa，当 φ=50% 时，由于掺氨量的增加，使得燃烧混合物的生成率和流出率达到动态平衡，形成一段类稳定平台，压力曲线经历 32.89 ms 的平台以后达到峰值 p_2 为 4.5 kPa，同时峰值与 φ=45% 时相比降低了 48.8%。与典型掺氨量（φ=50%）超压变化特性相似，随着 φ 的上升，p_3 峰值随之降低。

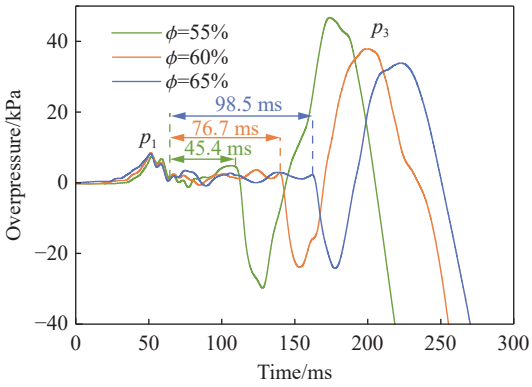


图 10　φ=55%, 60%, 65% 条件下管内压力的对比

Fig. 10　Comparison of the pressure in the duct under the conditions of φ=55%, 60%, 65%

如图 10 所示，此时 φ＞50%，为 55%, 60%, 65%，选取 φ=60% 的线条进行讨论。管内混合气向管外逸出，管内混合气体与管外环境空气发生额外的混合，使得管口湍流增强，同时火焰波阵面抵达管外点燃逸出混合气，由于此时 φ 较大，管外爆炸受难燃氨影响，爆炸威力与 φ=45% 时相比较小，爆炸产生的压力波向管内传播，管内燃烧产生的压力向管外传播，管道内外压力相互作用，压力曲线进入到未燃混合气 p_2 所处的一个波动向前区间，区间内无明显突出峰值，延续时间随着 φ 的升高而增加，波动区间时长由 45.4 ms 增至 98.5 ms。p_2 期间，t=96.33 ms 时，$p_{t\text{-}96}$ 处的压力峰值为 2.34 kPa，随着管道内剩余气体的减少，燃烧产物的生成率降低，而燃烧混合物的体积流出率增加，两者在管口达到动态平衡，这导致 p_2 以 2.34 kPa 的低振幅振荡，在持续 t=44.24 ms 的时间-压力区间内形成一个类稳定的平台，由于管外反应消耗了可燃混合物，可燃混合物在管外的含量降低，导致流出率超过生成率，溶解了类稳定平台，管道内出现负压[44]，并且由于稀薄波效应降低了 p_2[32]。

将不同 φ 下 p_1、p_2 和 p_3 峰值总结归纳到图 11 中，随着 φ 的升高，3 种压力峰值均表现为不同程度的下降，其中 p_3 受到的影响最显著。在氢氨混合气体管道内的反应过程中，φ 较小时，管内氢气含量相对较高，点火后氢气先一步与氧气反应产生大量能量，快速生成燃烧混合物，同时，部分难燃的氨气会吸收氢气燃爆释放的能量，参与到爆燃反应中生成燃烧混合物，这时燃烧混合物的生成率远大于泄放率，p_3 峰值相对较高，当 φ 增大时，难燃氨含量升高，相对而言氢含量变少，大量难燃氨的存在使得可燃气所需的能量增多，在相同点火能条件下，管内参与反应的可燃气量减少，管内燃爆反应速率降

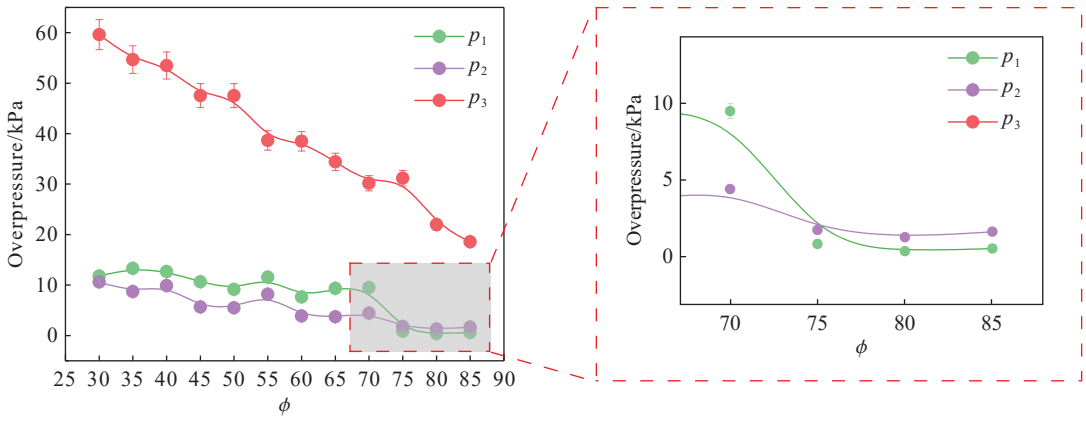


图 11　管内不同 φ 条件下 p_1、p_2、p_3 的比较

Fig. 11　Comparison of p_1, p_2, p_3 in the duct under different φ values

低，导致燃烧混合物的生成率和泄放率差值变小，p_3 逐渐减小。同时，管外为开放环境，泄爆引发的管外二次爆炸产生的能量除了向管内传播，也向周围环境中释放，在开放环境中反应继续消耗了一部分能量，在 φ=35%，40%，45%，50%，55%，60%，65%，70% 的 8 组工况实验中，表现为 $p_1>p_2$。在 φ=70% 升到 75% 区间，随着难燃氨含量的升高，自由基产量和体积热释放速率方面，反应性降低，p_1 发生较大幅度的变化，在 φ=75% 时显著降低，使得 $p_1<p_2$。p_3 随着 φ 的升高持续降低，难燃氨的存在有效抑制了氢气的爆燃效果。

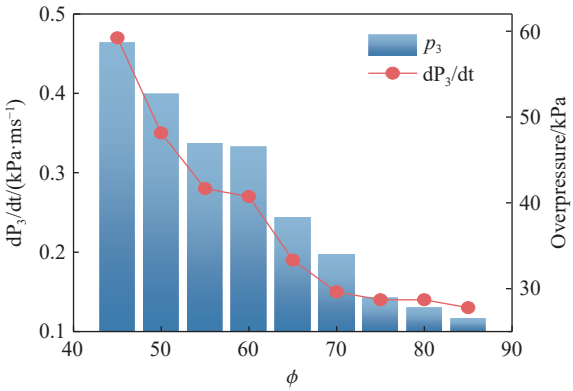


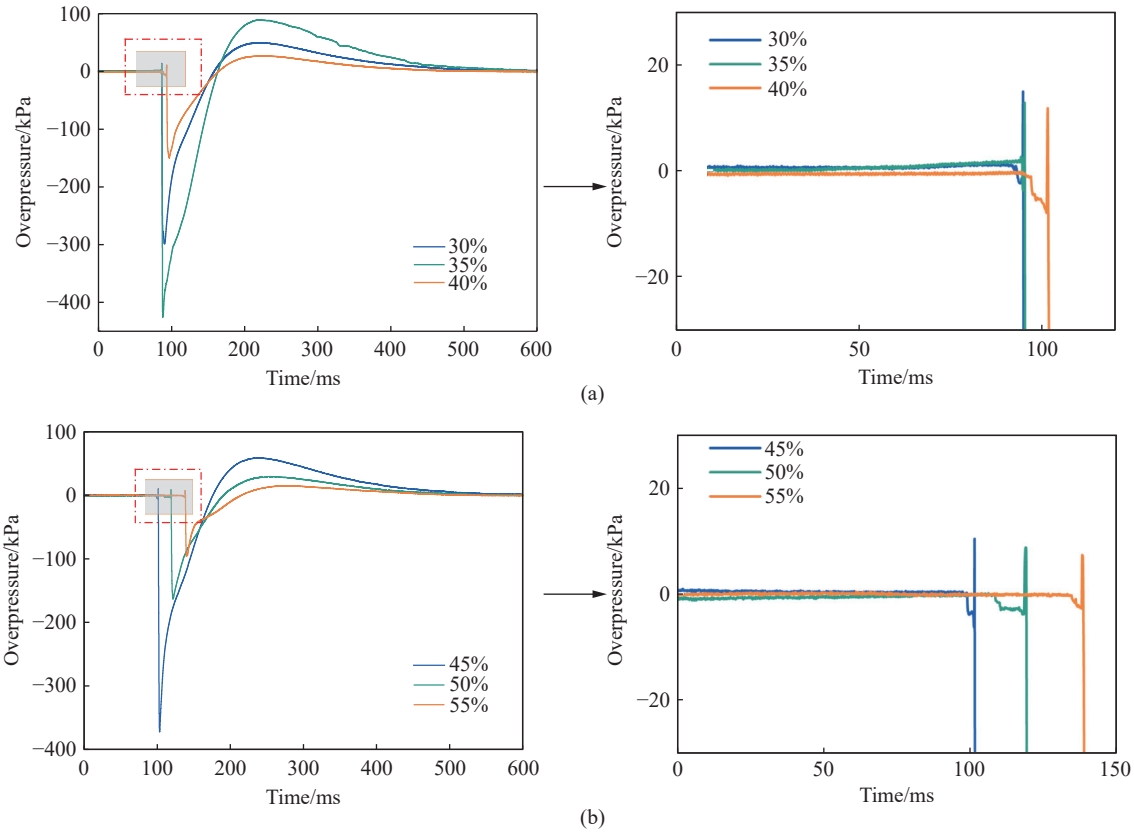
图 12　不同 φ 条件下管内 p_3 和 dp_3/dt 的变化趋势

Fig. 12　Trend of P_3 and dp_3/dt in the duct under different φ

如图 12 所示，p_3 随着 φ 变化的趋势，当 45%≤φ≤70% 时快速降低，当 70%≤φ≤85% 时缓慢下降，dp_3/dt 为形成第 3 个峰值的最大升压速率，随着 φ 的增加总体上表现为减小的趋势，这是由于增加氢量能有效的点燃燃料混合物，在管内反应时产生足够的热量，保持稳定的火焰，而随着 φ 增加，较少的氧化剂排出与燃料结合，效果减弱[45]，燃料反应性降低，从而导致 dp_3/dt 降低。

2.3　不同 φ 对预混气体管外爆燃压力的影响

在研究氨浓度对氨气-氢气-空气爆炸特性的影响时，研究外部火焰压力的变化是一项必不可少的工作。外部压力由设置在管道中轴线上距泄爆口右侧 0.5 m 的压力传感器所记录。图 13 是不同掺氨量工况下，压力传感器所记录的压力时程曲线图。



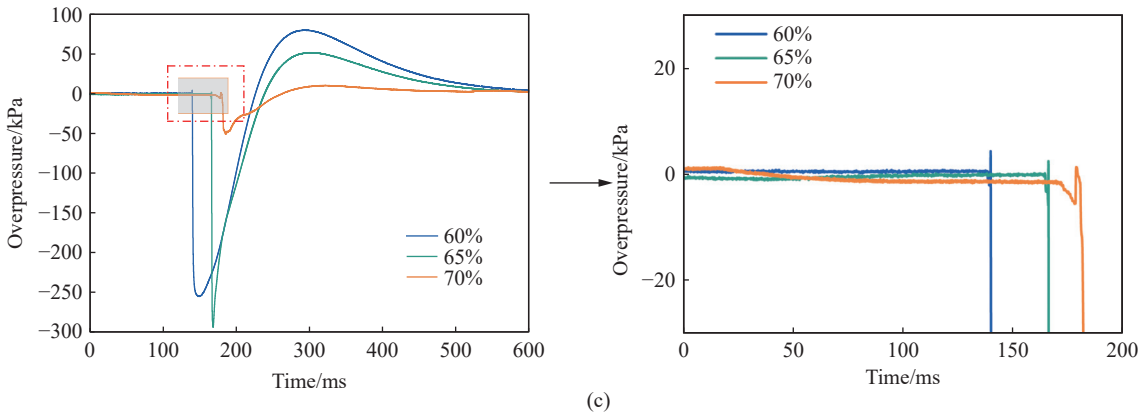


图 13　不同 φ 条件下管外 p_{out} 随时间的变化趋势

Fig. 13　Trend of p_{out} outside the duct with time under different φ values

火焰外部压力的形成与泄放至管外可燃气云的活化程度密切相关。管内氨气-氢气-空气可燃混气被电火花点燃后，前驱压力波快速到达泄爆口处，快速的压力脉冲使覆盖在泄爆口处的 PE 薄膜破裂，处于弱封闭状态的泄爆口打开，此时火焰锋面距离泄爆口较远，部分未燃烧的预混气体首先被排出管道，并在管外形成可燃气云团[46]。随着管道内火焰的继续传播，燃烧混合物大量生成，在管道壁面效应的约束下火焰加速向泄爆口传播，在抵达泄爆口时快速泄放至管外，点燃积聚在泄爆口处的可燃气云，从而在管外形成爆炸，即管外二次爆炸[47]。二次爆炸的巨大能量释放在测点 PS2 处产生了一个压力脉冲，压力传感器记录到管外二次爆炸压力峰值 p_{out}，记点火瞬间为 t=0 ms 时刻，从点火到 p_{out} 形成的时间长度为 Δt。

图 14 为管外二次爆炸压力峰值 p_{out} 和到达时间 Δt 随氨含量的变化趋势图。管内爆燃火焰泄放至管外后，点燃破膜后在管外积聚的可燃气云，引起外部爆炸现象，进而在测点 PS2 处形成压力峰值。自掺氨量从 30% 增加至 70% 时，p_{out} 从 14.85 kPa 降至 2.35 kPa，降幅达到 84.18%；Δt 从 87 ms 增加到 179 ms，对于点火后到达峰值的时间长度，最大掺氨量所用时间是最小掺氨量所用时间的 2.06 倍。氨气含量的增加使管外二次爆炸的压力持续降低，也延长了自点火后到达外部爆炸压力峰值的时间，分析可得，由于氨的难燃特性，氨气的增加一方面增高了破膜后泄放至管外的可燃气云所需的活化能量，另一方面降低了管内可燃气体的反应速率，使得泄放火焰的能量降低，二者共同作用使管外二次爆炸的剧烈程度降低，同时减缓了反应进程，因此二次爆炸压力峰值 p_{out} 降低，点火后到达压力峰值所需时间 Δt 增加。

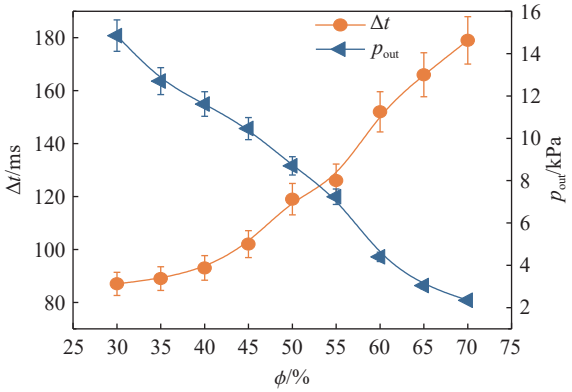


图 14　不同 φ 条件下 Δt 和 p_{out} 的变化趋势

Fig. 14　Trend of Δt and p_{out} under different φ values

3　结　论

通过自主搭建的 2 m 长不锈钢实验管道平台，在化学计量比 (Φ=1) 的条件下，探究了不同掺氨量（φ=30%～85%）对氨气-氢气-空气预混气体管道泄爆火焰行为和压力演化特性的影响，所得主要结论如下：

(1) 掺氨量的变化会影响火焰传播的行为，表现在管内火焰逆流时间随着掺氨量的增加而增加，而随着掺氨量的降低，火焰受到泰勒-瑞利不稳定性的影响更大，压力曲线出现较多震荡峰，此时爆炸危险性更高。

(2) 随着掺氨量的升高，火焰传播速度以及超压均有不同程度的下降，达到超压峰值的时间延长，最大掺氨量（φ=85%）到达超压峰值所用时间是最小掺氨量（φ=35%）所用时间的 2.06 倍。

(3) 不同掺氨量压力时程曲线均呈现三峰结构，与其他文献结果一致。随着 φ 的上升，3 种峰值有不同程度的降低，其中 p_3 降低幅度最大，降幅达到 84.18%。氨气含量的上升可以很好地抑制氢气爆炸危害性。

参考文献：

[1] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 69: 63–102. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.07.001.

[2] ORUC O, DINCER I. Assessing the potential of thermo-chemical water splitting cycles: A bridge towards clean and sustainable hydrogen generation [J]. Fuel, 2021, 286: 119325. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119325.

[3] ISLAM A, ISLAM T, MAHMUD H, et al. Accelerating the green hydrogen revolution: A comprehensive analysis of technological advancements and policy interventions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 67: 458–486. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.142.

[4] AZIZ M, JUANGSA F B, IRHAMNA A R, et al. Ammonia utilization technology for thermal power generation: A review [J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 111: 101365. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101365.

[5] WU Z J, YU Y, XIE W, et al. Optimization of the flame characteristics of H_2–O_2 coaxial injection applied to hydrogen-fueled argon cycle engines [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(27): 14780–14789. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.197.

[6] VAN DEN SCHOOR F, VERPLAETSEN F, BERGHMANS J. Calculation of the upper flammability limit of methane/hydrogen/air mixtures at elevated pressures and temperatures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(4): 1399–1406. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.01.002.

[7] SU B, DONG H W, LUO Z M, et al. Effects of H_2/CO ratio and CO_2 dilution on the explosion behavior and flame evolution of syngas/air mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 69: 451–465. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.360.

[8] ICHIKAWA Y, OTAWARA Y, KOBAYASHI H, et al. Flame structure and radiation characteristics of CO/H_2/CO_2/air turbulent premixed flames at high pressure [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1543–1550. DOI: 10.1016/j.proci.2010.05.068.

[9] LEE M C, YOON J, JOO S, et al. Gas turbine combustion characteristics of H_2/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(34): 11032–11045. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.086.

[10] WANG L, JIANG Y, PAN L W, et al. Lagrangian investigation and chemical explosive mode analysis of extinction and re-ignition in H_2/CO/N_2 syngas non-premixed flame [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(8): 4820–4830. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.043.

[11] SU B, LUO Z M, KRIETSCH A, et al. Quantitative investigation of explosion behavior and spectral radiant characteristics of free radicals for syngas/air mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 1359–1368. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.280.

[12] KOJIMA Y, YAMAGUCHI M. Ammonia as a hydrogen energy carrier [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(54): 22832–22839. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.096.

[13] SUN S C, JIANG Q Q, ZHAO D Y, et al. Ammonia as hydrogen carrier: Advances in ammonia decomposition catalysts for promising hydrogen production [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 169: 112918. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112918.

[14] LAMB K E, DOLAN M D, KENNEDY D F. Ammonia for hydrogen storage; A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(7): 3580–3593. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.024.

[15] YU Z, ZHANG H W. End-gas autoignition and knocking combustion of ammonia/hydrogen/air mixtures in a confined reactor [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(13): 8585–8602. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.181.

[16] ZHANG F Y, ZHANG G X, WANG Z C, et al. Experimental investigation on combustion and emission characteristics of non-premixed ammonia/hydrogen flame [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 61: 25–38. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.281.

[17] WU Z J, ZHANG G Y, WANG C X, et al. Numerical investigation on the flame propagation process of ammonia/hydrogen blends under engine-related conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 60: 1041–1053. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.186.

[18] TINGAS E A, GKANTONAS S, MASTORAKOS E, et al. The mechanism of propagation of NH_3/air and NH_3/H_2/air laminar premixed flame fronts [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 78: 1004–1015. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.289.

[19] ICHIKAWA A, NAITO Y, HAYAKAWA A, et al. Burning velocity and flame structure of CH_4/NH_3/air turbulent premixed flames at high pressure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(13): 6991–6999. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.193.

[20] KURATA O, IKI N, INOUE T, et al. Development of a wide range-operable, rich-lean low-NO_x combustor for NH_3 fuel gas-turbine power generation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37: 4587–4595. DOI: 10.1016/j.proci.2018.09.012.

[21] LIANG H, YAN X Q, SHI E H, et al. Flame evolution and pressure dynamics of premixed stoichiometric ammonia/hydrogen/air in a closed duct [J]. Fuel, 2024, 363: 130983. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.130983.

[22] LHUILLIER C, BREQUIGNY P, LAMOUREUX N, et al. Experimental investigation on laminar burning velocities of ammonia/hydrogen/air mixtures at elevated temperatures [J]. Fuel, 2020, 263: 116653. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116653.

[23] ZHENG K, SONG Z Y, SONG C, et al. Investigation on the explosion of ammonia/hydrogen/air in a closed duct by experiments and numerical simulations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 79: 1267–1277. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.124.

[24] VEIGA-LÓPEZ F, MÉVEL R. Detonation properties and nitrogen oxide production in ammonia–hydrogen–air mixtures [J]. Fuel, 2024, 370: 131794. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131794.

[25] WANG J G, GUO J, YANG F Q, et al. Effects of hydrogen concentration on the vented deflagration of hydrogen-air mixtures in a 1-m^3 vessel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(45): 21161–21168. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.108.

[26] SHRESTHA K P, LHUILLIER C, BARBOSA A A, et al. An experimental and modeling study of ammonia with enriched oxygen content and ammonia/hydrogen laminar flame speed at elevated pressure and temperature [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(2): 2163–2174. DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.197.

[27] CHEN X, LIU Q M, JING Q, et al. Flame front evolution and laminar flame parameter evaluation of buoyancy-affected ammonia/air flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(77): 38504–38518. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.099.

[28] LI Y C, BI M S, ZHOU Y H, et al. Characteristics of hydrogen-ammonia-air cloud explosion [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148: 1207–1216. DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.037.

[29] YANG X F, YANG W, LIU C L, et al. Experimental study on the deformation and oscillation of premixed syngas/air flames in closed ducts [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 179: 373–383. DOI: 10.1016/j.psep.2023.09.011.

[30] CAO W G, LIU Y F, CHEN R K, et al. Pressure release characteristics of premixed hydrogen-air mixtures in an explosion venting device with a duct [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(12): 8810–8819. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.052.

[31] WANG Q, ZHU W Y, YANG R, et al. Impact of ammonia content on explosion of methane-air premixed gas duct with varying equivalence ratios [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2025, 115: 763–780. DOI: 10.1007/s10494-025-00647-6.

[32] ZHU W Y, WANG Q, LI R, et al. Experimental study on the equivalence ratio effects in ammonia-hydrogen-air premixed gas duct-vented explosions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 88: 977–985. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.262.

[33] 朱文艳, 汪泉, 张军, 等. 泄爆条件对管内气粉两相混合体系燃爆特性的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(7): 075402. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0024.

ZHU W Y, WANG Q, ZHANG J, et al. Influence of explosion venting conditions on the deflagration characteristics of gas-

powder two-phase mixture system in pipe [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(7): 075402. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0024.

[34] PONIZY B, CLAVERIE A, VEYSSIÈRE B. Tulip flame-the mechanism of flame front inversion [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(12): 3051–3062. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.06.001.

[35] ZHU X R, ROBERTS W L, GUIBERTI T F. UV-visible chemiluminescence signature of laminar ammonia-hydrogen-air flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4): 4227–4235. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.021.

[36] 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.

[37] QIU D Y, CHEN X F, HAO L J, et al. Partial suppression of acetaminophen dust explosion by synergistic multiphase inhibitors [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 172: 262–272. DOI: 10.1016/j.psep.2023.02.021.

[38] CHAO J, BAUWENS C R, DOROFEEV S B. An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2367–2374. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.144.

[39] HISKEN H, ENSTAD G A, MIDDHA P, et al. Investigation of concentration effects on the flame acceleration in vented channels [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 447–459. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.005.

[40] 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 and Engineering Chemistry Research, 2016, 55(35): 9518–9523. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02029.

[41] XIAO H H, SUN J H, CHEN P. Experimental and numerical study of premixed hydrogen/air flame propagating in a combustion chamber [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 268: 132–139. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.060.

[42] WANG C H, GUO J, ZHANG K, et al. Experiments on duct-vented explosion of hydrogen-methane-air mixtures: effects of equivalence ratio [J]. Fuel, 2022, 308: 122060. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122060.

[43] TOMLIN G, JOHNSON D M, CRONIN P, et al. The effect of vent size and congestion in large-scale vented natural gas/air explosions [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 169–181. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.014.

[44] 杜赛枫, 张凯, 陈昊, 等. 破膜压力对氢-空气预混气体燃爆特性的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(2): 025401. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0174.
DU S F, ZHANG K, CHEN H, et al. Effects of vent burst pressure on explosion characteristics of premixed hydrogen-air gases [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(2): 025401. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0174.

[45] TANG G, JIN P F, BAO Y L, et al. Experimental investigation of premixed combustion limits of hydrogen and methane additives in ammonia [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(39): 20765–20776. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.154.

[46] 陈昊, 郭进, 王金贵, 等. 破膜压力对氢气-甲烷-空气泄爆的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 115401. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0418.
CHEN H, GUO J, WANG J G, et al. Effects of vent burst pressure on hydrogen-methane-air deflagration in a vented duct [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 115401. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0418.

[47] 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.

(责任编辑　张凌云)