DOI: 10.11883/bzycj-2025-0140

燃料浓度对受限空间内氢气/空气预混气体爆炸特性的影响*

楚紫涵,张 云,安文鑫,唐新宇,张 欣,赵 越,谭迎新,曹 雄,尉存娟,曹卫国
(中北大学环境与安全工程学院,山西 太原 030051)

摘要: 氢能作为一种零碳能源,凭借其高能量密度和零碳排放的特性,在国防关键系统中具有广阔的应用前景。为提高能源的利用效率并保障安全,采用试验与数值模拟相结合的方法,系统研究了受限空间内氢气浓度对爆炸动力学特性的影响;在圆柱形容器中进行试验,使用压力传感器和高速摄像机记录爆炸过程中的压力变化和火焰传播规律;同时,结合数值模拟技术,采用包含 19 步反应的氢气/空气详细化学反应机理,准确捕捉了预混气体爆炸过程中气流速度的时空演化过程。结果表明:最大爆炸压力出现在氢气体积分数为 30% 时,峰值达到 0.623 94 MPa;火焰面积峰值在氢气体积分数为 30% 和 45% 工况下最大,相比体积分数为 15% 和 60% 时分别提高了 14.6% 和 6.3%,其中,氢气体积分数为 30% 时,火焰面积在 8.2 ms 时最快达到峰值。此外,在圆柱侧壁与端壁交界区域,由于几何约束导致未燃氢气积聚,造成局部密度和压力升高,在流场中形成 4 个明显的高速区。在 9 ms 时,流场中心线上的气流速度呈对称分布,且单侧出现双峰值结构。在氢气体积分数为 45% 工况下,初期气流速度因局部热释放较强而呈现瞬态速度优势;而氢气体积分数为 30% 时,凭借其持续稳定的燃烧过程,气流在后期实现速度反超,体现出近化学计量比条件下的高效燃烧稳定性,为高效氢气燃烧系统的设计与性能提升提供了科学依据。

关键词: 受限空间;氢气;燃料浓度;气流速度
中图分类号: O389 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

Influence of fuel concentration on the explosion dynamics characteristics of hydrogen/air premixed gas in confined spaces

CHU Zihan, ZHANG Yun, AN Wenxin, TANG Xinyu, ZHANG Xin, ZHAO Yue,
TAN Yingxin, CAO Xiong, YU Cunjuan, CAO Weiguo
(*School of Environment and Safety Engineering*, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*)

Abstract: Hydrogen energy, as a zero-carbon energy source, holds broad application prospects in critical defense systems because of its high energy density and zero carbon emissions. To enhance energy utilization efficiency and ensure operational safety, an integrated approach combining experimental and numerical simulations was adopted to systematically examine the effects of hydrogen concentration on explosion dynamics in a confined space. Experiments were carried out in a cylindrical chamber equipped with high-frequency pressure sensors and a high-speed camera to record transient overpressure and track flame propagation behavior. Complementing the experimental setup, computational fluid dynamics simulations were implemented using a detailed 19-step hydrogen/air chemical reaction mechanism to accurately reproduce the spatiotemporal evolution of flow field velocity during the premixed gas explosion process. Results indicate that the maximum explosion pressure occurred at a hydrogen volume fraction of 30%, peaking at 0.623 94 MPa. The peak flame area was largest at both

* 收稿日期: 2025-05-14; 修回日期: 2025-09-01
基金项目: 国家自然科学基金(12202409);山西省基础研究重大项目(202403021223003);山西省高等学校青年学术带头人项目(2024Q024)
第一作者: 楚紫涵(2002—),女,博士研究生,B202514003@st.nuc.edu.cn
通信作者: 张 云(1986—),女,博士,副教授,zhangyun@nuc.edu.cn

30% and 45%, exceeding results at 15% and 60% by 14.6% and 6.3%, respectively. The 30% condition also achieved the peak flame area in the shortest time, at 8.2 ms. Furthermore, geometric constraints at the junction of the cylindrical sidewall and the endwall led to accumulation of unburned hydrogen, causing localized increases in density and pressure and resulting in four clearly discernible high-velocity regions within the flow field. At 9 ms, the flow velocity profile along the centerline exhibited symmetry with a dual-peak structure appearing unilaterally. While the 45% condition showed an early transient velocity advantage due to intensified local heat release, the 30% condition demonstrated superior late-stage velocity recovery owing to more stable and sustained combustion near the stoichiometric ratio. These findings underscore the high combustion efficiency and stability achievable near stoichiometric conditions, providing a scientific foundation for the design and optimization of high-efficiency hydrogen combustion systems.

Keywords: confined spaces; hydrogen; fuel concentration; flow velocity

在传统化石能源大量使用加剧气候变化[1-5]与“碳达峰、碳中和”[6]战略纵深推进的双重驱动下，军事能源体系正处于向低碳化转型的关键历史阶段。国际军事气候安全理事会指出国防工业是碳氢化合物消费的主要领域[7]，绿色转型刻不容缓[8]。在此背景下，氢能作为“零碳能源”[9-10]，凭借其高质量能量密度和全生命周期零碳排放特性[9]，正逐步替代传统化石能源应用于军事动力系统、战场供能装备等国防工业关键领域[11-16]（图 1）。

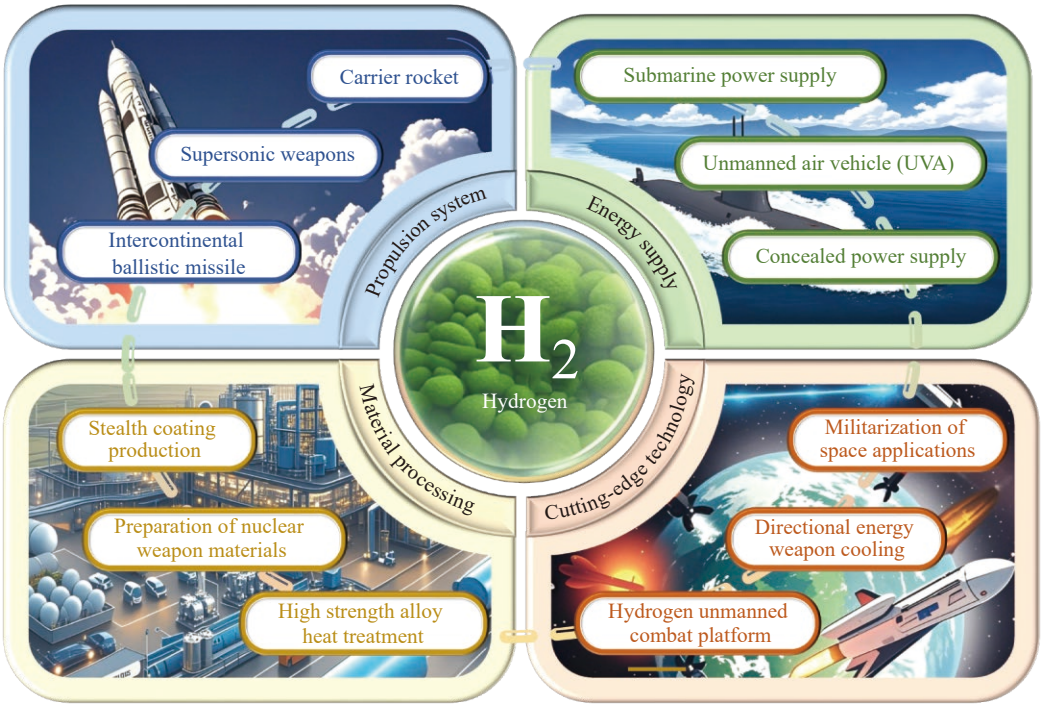


图 1　氢能在国防工业相关领域中的应用

Fig. 1　Hydrogen energy in fields related to the defense industry

近年来，学者们对氢气在国防工业中的应用进行了广泛研究[17-22]。Lichthardt 等[10]基于新型分离式固体推进系统探究了高氮燃料热解生成氢气的燃烧特性，发现富氢气体与固体氧化剂混合后可显著提升燃烧效率，而氢气的低分子量特性优化了能量释放路径。韩长霖等[23]研究了液氢液氧推进剂质量流量对发动机燃烧及传热特性的作用机制，结果表明，随着液氢液氧推进剂质量流量的增大，推力室内的压力水平以及推力室壁面内冷却剂的温度升高幅度均呈现出显著的上升趋势。岳文龙等[24]总结了高性能液氧液氢发动机技术发展历程，指出氢氧发动机具有更显著的应用优势，其本身性能更优越，在提升火箭推进效能方向有更高的研究意义。Ozbek 等[25]通过选择合适氢消耗量的氢燃料电池进行试验，使

用储存的氢气进行地面测试，对氢燃料电池进行性能分析，发现氢燃料电池会使作战无人机系统效率提升 12%，同时削弱能源使用率对无人机作战能力的约束作用。Coral 等[26] 以氢气为推进剂的增材制造了电阻喷射器并对其进行性能测试，发现峰值热效率达 96%，接近理想性能。

为安全提高氢气能量利用率，学者们通过试验或数值模拟的方法，探究了爆炸压力(p)[27-29]、压力上升速率[30-32] 和火焰传播速度[33-35] 等关键参数对氢气爆炸特性的影响。余明高等[36] 通过自搭建试验平台研究了有管条件下障碍物阻塞率对包含氢气在内的爆炸性预混气体爆炸特性的影响，结果表明，预混火焰传播路径与阻塞率负相关，传播速度与障碍物阻塞率及氢气体积分数正相关。马梦飞等[37] 对开放空间中氢气点火爆炸初期的火焰形貌变化过程及爆炸超压时序变化规律进行了研究，当点火距离保持不变时，氢气流量的提升会使得峰值超压增大；当氢气流量维持恒定时，点火距离的增加会导致峰值超压逐渐降低。杜塞枫等[38] 利用自主设计的 5.00 m 长方体管道，研究了破膜压力(p_v)对氢气爆炸过程中管外火焰传播行为及爆炸超压的影响，管道内部最大超压随着 p_v 的升高而增大，最大外部超压与 p_v 呈非正相关趋势。Ma 等[39] 采用 20 L 球形爆炸试验设备研究了惰性气体的掺入对氢气爆炸的影响，发现氢气爆炸反应速率随着惰性气体浓度的增加而降低，火焰形貌及爆炸超压参数均呈线性下降的规律。Li 等[40] 研究了不受限条件下球形爆炸室中氢气/空气混合物的爆炸泄放过程，结果表明，最大爆炸压力和最大压力上升速率在不受限制的泄放条件下显著降低，压力峰值在当量比为 1.5 时出现，后随当量比的增加而单调减小。Cao 等[41] 通过模拟和试验，总结了低浓度气体在管道运输过程中泄放的特点，发现爆炸超压与火焰速度均可分为 3 个阶段，并得到了爆炸泄压装置安装位置的设计基础。

综上所述，氢气作为高能量密度的清洁能源，在国防工业领域具有广泛的应用前景，为安全提高其在国防工业中的能量输出效率，有必要对其爆炸动力学特性进行系统研究。目前，学者们对氢气爆炸的研究主要聚焦于降低其爆炸危险性，以实现能量的安全利用，但对其爆炸能量输出特性的研究较少。为此，本文搭建圆柱形爆炸测试装置，结合数值模拟技术，系统研究燃料浓度对受限空间内氢气爆炸过程中压力变化特性、火焰传播规律及气流速度时空演变过程的影响，揭示氢气爆炸过程中的流动耦合作用及其对爆炸动力学特性的影响，以期为提高氢气能量输出效率提供理论基础。

1　试验装置及试验方法

1.1　试验装置

采用自搭建的圆柱形爆炸测试平台对受限空间内的氢气爆炸特性进行研究。圆柱形爆炸测试容器罐体前后开有观察窗，用光学玻璃密封，以便于观察受限空间中氢气爆炸过程。点火位置位于容器几何中心，点火系统由点火电极及化学点火具组成，通过容器顶盖深入容器内部，化学点火具固定于点火电极之间，为氢气爆炸提供初始能量。配气系统由高压氢气气瓶、真空泵与控制阀组成，根据道尔顿分压定律进行配气。罐体设计包括进气孔、用于连接真空泵的抽真空孔以及位于罐体底部的排气孔。数据采集系统中有 2 个 PCB 压力传感器，用于实时监测压力变化，此外还有高速摄影装置和数据采集设备，用于记录和处理试验过程中的动态信息。压力传感器型号为 113B26，其测量范围为 0～3.45 MPa，灵敏度为 1.45 mV/kPa，非线性度≤1%，安装在容器两侧以监测容器内压力，承压面与容器内表面水平。拍摄频率为 5 000 s^{-1} 的彩色高速摄影装置用于捕捉氢气在受限空间爆炸过程中火焰的形貌变化过程。图 2 为试验装置示意图。

1.2　模型构建及参数设置

基于 Ansys Fluent 软件构建受限空间内氢气爆炸数学模型，采用有限体积法求解非定常 Navier-Stokes 方程，其质量、动量和能量守恒方程[42-46] 如下式所示。

质量方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u})=0 \tag{1}$$

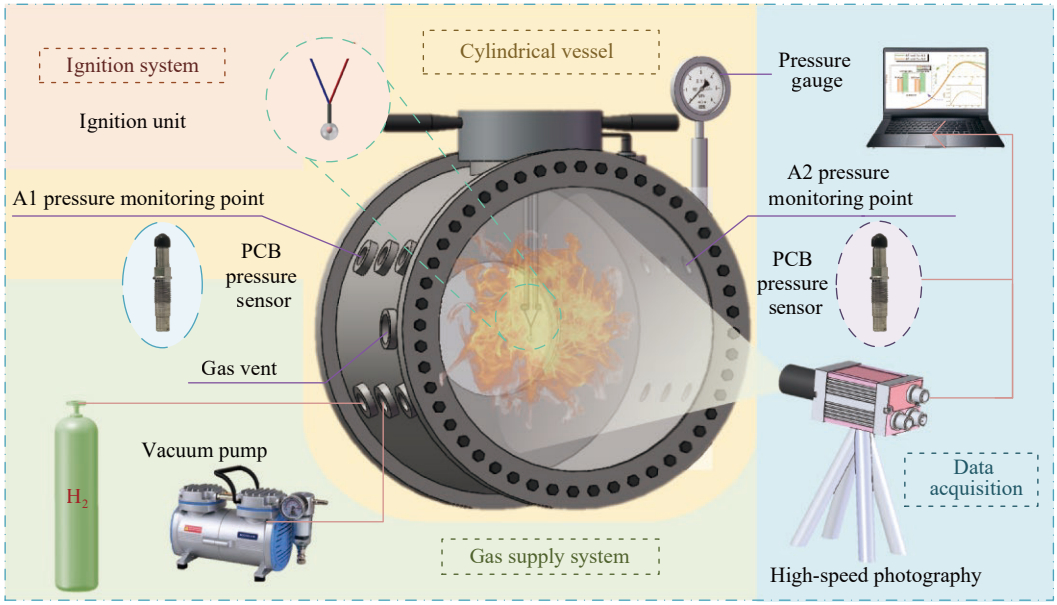


图 2　试验装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the test setup

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{u})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{u})=-\nabla p+\nabla\boldsymbol{\tau}+\rho\boldsymbol{g}+\boldsymbol{F} \tag{2}$$

由分子黏度而引起的应力张量$\boldsymbol{\tau}$可表示为：

$$\boldsymbol{\tau}=\mu\left[\left(\nabla\boldsymbol{u}+\nabla\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\right)-\frac{2}{3}\nabla\cdot\boldsymbol{u}\boldsymbol{I}\right] \tag{3}$$

能量方程：

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla\cdot\left[\boldsymbol{u}(\rho E+p)\right]=\nabla\cdot\left(k_{\mathrm{e}}\nabla T-\sum_{j}h_j\boldsymbol{J}_j+\boldsymbol{\tau}\cdot\boldsymbol{u}\right)+S_{\mathrm{h}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{q}=-k_{\mathrm{e}}\nabla T+\sum_{j}h_j\boldsymbol{J}_j \tag{5}$$

式中：ρ为密度，∇为向量微分算子，$\boldsymbol{u}$为速度向量，p为压力，$\boldsymbol{g}$为重力加速度向量，$\boldsymbol{F}$为额外体积力，μ为动力黏性系数，$\boldsymbol{I}$为单位张量，$\boldsymbol{q}$为热通量，E为内能和动能之和，k_{e}为有效热导率，h_j和$\boldsymbol{J}_j$分别为组分j的显焓和扩散通量，S_{h}为定义的源项。

为了准确地模拟出氢气在爆炸时的流动状态，采用剪切应力传输（shear stress transport, SST）k-ω模型来提高计算精度。k-ω输运方程可表示为：

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\omega\boldsymbol{u})}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\Gamma_{\omega}\left(\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right)+G_{\omega}-Y_{\omega}+S_{\omega} \tag{6}$$

式中：ω为比耗散率，Γ_{ω}为ω的有效扩散率，G_{ω}为ω的生成量，Y_{ω}为湍流引起的ω的耗散，S_{ω}为定义的源项。

本文采用 Chemkin 热力学数据库中由 19 步可逆基元反应构成的氢气/空气详细化学反应机理[47]。网格划分示意图如图 3 所示，圆柱形爆炸测试容器的内径为 300.00 mm，高为 282.94 mm。x 方向和 y 方向的坐标范围为(−150, 150)，z 方向坐标范围为(0, 282.94)。点火位置位于容器中心，对应的坐标为(0, 0, 141.47)。在整个计算域中使用六面体结构化网格进行网格划分，网格数量为 952 644 个。

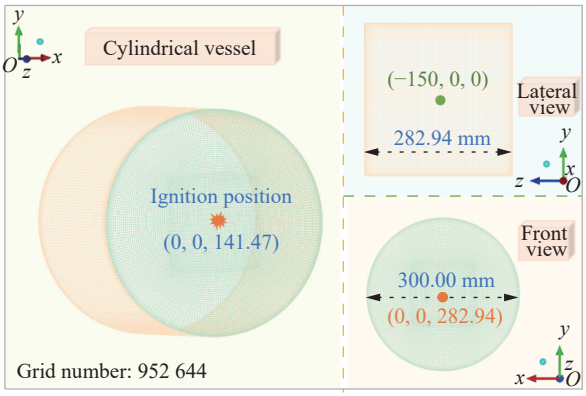


图 3　网格划分示意图

Fig. 3　Schematic diagram of meshing

1.3　结果验证

通过网格收敛指数(grid convergence index, GCI)对爆炸压力进行网格无关性验证[48]，分别选取 254 138、601 354、952 644、1 264 524、1 516 340 以及 2 002 752 个单元的网格进行计算，发现网格数量为 952 644 时的 GCI 小于 3.0%，综合考虑计算效率与计算精度，最终选定网格数量为 952 644 的方案。

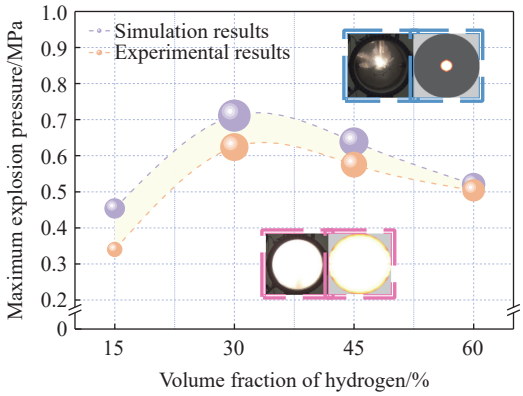


图 4　数值模拟结果验证

Fig. 4　Validation of numerical simulation results

将不同燃料浓度下的压力与模拟压力进行对比，结果如图 4 所示，图中圆球尺寸代表其最大爆炸压力的相对大小。可以看出，压力峰值较为接近，且其差值随燃料体积分数的增加而减小。这是因为体积分数较大时的氢气燃烧受氧气扩散限制，火焰传播过程较慢；而氢气体积分数较小时，因火焰不稳定性和局部熄火效应导致模拟误差较高。此外，通过模拟得到的火焰传播过程与高速摄影拍摄到的火焰传播过程具有较高的一致性，因此认为模拟具有准确性[49]。

2　结果与讨论

2.1　压力变化特性

为系统评估氢气/空气预混气体在受限空间内的爆炸强度特性，在圆柱形爆炸测试容器中设置了两个监测点(A1 和 A2)进行瞬态压力采集。当氢气体积分数为 45% 时，监测点 A1 和 A2 测得的压力曲线如图 5 所示。两监测点所得压力曲线的整体趋势一致，监测点 A1 在 11.14 ms 时监测到压力峰值为 0.577 68 MPa，监测点 A2 在 10.74 ms 时监测到的压力峰值为 0.575 36 MPa。监测点 A1 出现压力峰值的时间较监测点 A2 滞后 0.4 ms，延迟了 3.72%，而压力峰值比监测点 A2 高 2.32 kPa，两监测点测得的压力峰值仅相差 0.403%。这说明虽然不同的几何位置导致压力波传播路径、反射叠加模式及热力学效应存在差异，不同监测点测得的压力特性参数有所不同，但总体差异较小，本文选取监测点 A2 测得的压力特性参数为代表进行后续研究。

为研究受限空间内氢气浓度对氢气/空气预混气体爆炸特性参数的影响，对氢气体积分数为 15%、30%、45% 和 60% 的混合气体在圆柱形容器中的爆炸特性进行试验研究。通过试验测量其实际最大爆炸压力，并通过 Cantera 计算对应的理论最大爆炸压力，如图 6 所示，图中圆球尺寸代表其最大爆炸压力

相对大小。随着氢气浓度的增加，理论最大爆炸压力和实际最大爆炸压力均呈现先增加后降低的趋势，在氢气体积分数为 30% 时达到最大值。由于理论最大爆炸压力是在绝热条件下计算的，而试验测试时存在由热传导、对流、辐射造成的热损失，因此，实际最大爆炸压力均低于理论最大爆炸压力。同时，由于热损失和动态耗散的耦合作用，实际最大爆炸压力与理论最大爆炸压力的差值在氢气体积分数为 60% 时最小，与 Zhuang 等[50] 的研究结果一致。

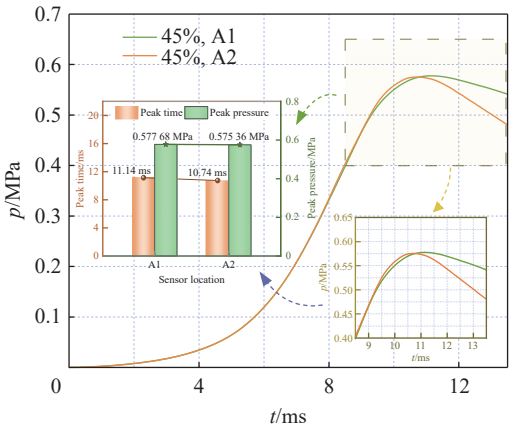


图 5　氢气体积分数为 45% 时 A1 与 A2 监测点测得的压力曲线

Fig. 5　Pressure curves measured at monitoring points A1 and A2 when the volume fraction of hydrogen is 45%

爆炸压力及其上升速率作为表征可燃气体爆炸过程中能量释放量与释放速率的关键参数，是衡量爆炸强度的重要指标。图 7 展示了氢气体积分数为 30% 和 60% 工况下，两测点爆炸压力及其上升速率随时间的变化。从图 7 中可以看出，容器内的爆炸压力均呈现先上升后下降的趋势，但爆炸压力及其上升速率峰值大小与其出现时间存在较大差异。当氢气体积分数为 30% 时，爆炸压力峰值为 0.623 94 MPa，压力上升速率峰值为 149.62 MPa/s。当氢气体积分数为 60% 时，爆炸压力峰值为 0.504 09 MPa，压力上升速率峰值为 89.80 MPa/s，相较于氢气体积分数为 30% 时分别下降了 19.21% 和 39.98%。

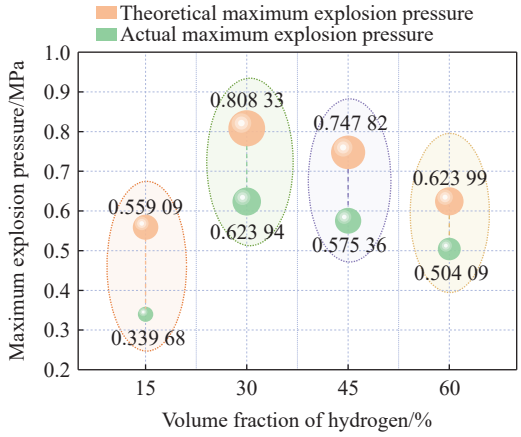


图 6　理论最大爆炸压力与实际最大爆炸压力的对比(A2)

Fig. 6　Theoretical maximum explosion pressure compared to actual maximum explosion pressure (A2)

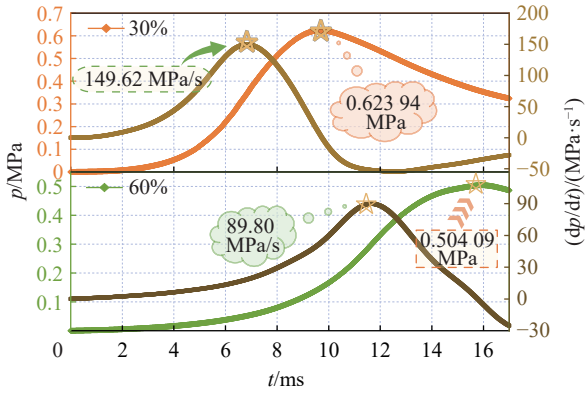


图 7　氢气体积分数为 30% 和 60% 时爆炸压力以及压力上升速率曲线

Fig. 7　Explosive pressure and pressure rise rate curves for when the volume fraction of hydrogen is 30% and 60%

这主要是由于化学当量比对燃烧热力学与反应动力学的协同调控作用。当氢气体积分数为 30% 时接近化学计量比(ϕ=1)，容器内部可以发生完全燃烧反应，使得单位体积混合气体的燃烧焓释放效率达到峰值，且自由基链式反应的传播速率达到极值，燃烧速度快且放出的热量多，最终导致氢气体积分数为 30% 时的爆炸压力和上升速率峰值均大于 60% 时。

2.2　火焰传播规律

受限空间内火焰传播过程可以划分为 3 个主阶段：火焰增长阶段、火焰稳定阶段以及火焰熄灭阶段，如图 8 所示。在火焰增长阶段，先形成直径较小的高温火核，此时以层流燃烧为主，产生微弱的压力波向四周传播，使得火焰近似球形向四周扩散。随着火焰半径的增大，燃烧产物的膨胀加剧气流扰动，使得雷诺数增大，火焰表面出现褶皱，进入湍流燃烧阶段。受限空间内气体体积受限，压力的升高使得

未燃气体被进一步压缩，促使火焰加速传播。在火焰稳定阶段，火焰充满视窗，火焰前锋接近容器壁时，压力波在壁面反射并与入射波叠加，使得容器内压力不断积聚，火焰亮度不断增加。随后，由于受限空间内反应物含量有限，逐渐进入火焰熄灭阶段。同时，由于能量耗散速率从燃烧爆炸时的快速释放转为缓慢散热，3 个阶段中火焰熄灭阶段的持续时间最长。

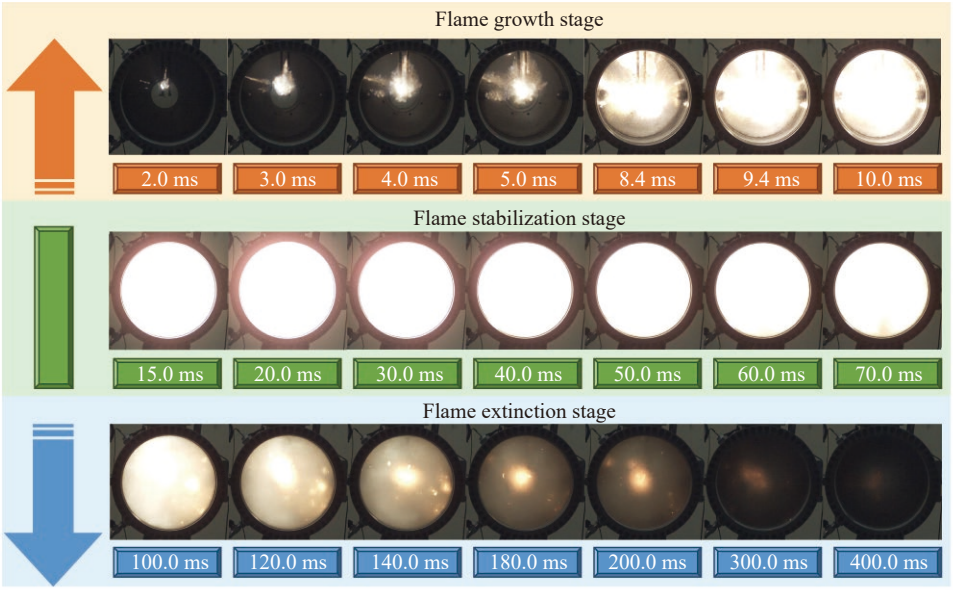


图 8　受限空间内氢气体积分数为 45% 时火焰传播图像

Fig. 8　Flame propagation images in a confined space when the volume fraction of hydrogen is 45%

将试验过程中记录的火焰图像通过 Python 进行自编程，在灰度值为 0～255 内对彩色火焰图片进行灰度处理，随后对经过灰度处理的图像进行二值化处理，得到的白色像素点的总面积即为火焰面积。氢气体积分数为 30% 时，火焰传播面积曲线如图 9 所示。从图 9 中可以观察到，在点火后的 0～8.2 ms 时间内，火焰迅速向外传播，其面积呈现出指数型增长的特征，火焰以点火源为中心，向周围各个方向扩散，如 4.8 ms 时的火焰图像所示，火焰前锋阵面近似球形，火焰面积为 29 995.89 mm^2。随着反应的进行，燃烧释放的热量使气体膨胀，产生压力波推动未燃混合气流动，形成正反馈，进一步加速火焰传播，火焰面积不断增长，在 8.2 ms 时达到所能观察到的火焰面积最大值。在 8.2～64.0 ms 时，由于受限空间壁面反射的压力波与火焰前锋相互作用增强了湍流，使火焰前锋褶皱化，有效燃烧面积显著增大，火焰的尺度和亮度均达到最大值，如 30.6 ms 时的火焰图像所示，火焰面积维持在视窗面积 70 686.00 mm^2。随后，由于受限空间内氧气含量有限，高温燃烧产物通过壁面散热或辐射损失能量，使容器内的压力与温度降低，火焰面积也逐渐降低。78.8 ms 时，火焰面积为 69 414.81 mm^2，火焰亮度与面积相较于 30.6 ms 时有所减少；161.6 ms 时，火焰面积为 38 983.88 mm^2，只有中心区域火焰亮度较高。

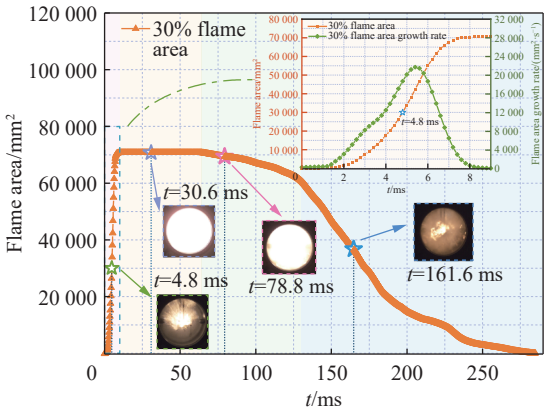


图 9　氢气体积分数为 30% 时火焰传播面积曲线

Fig. 9　Flame propagation area curves when the volume fraction of hydrogen is 30%

为探究浓度对火焰面积的影响，从氢气体积分数为 15%、30%、45% 和 60% 时的火焰面积曲线中

提取出面积峰值和峰值时间两个火焰特性参数，如图 10 所示。从图 10 中可以看出，氢气体积分数为 30% 和 45% 时火焰面积峰值均为 70 686.00 mm^2，而氢气体积分数为 15% 时火焰面积峰值为 60 393.68 mm^2，降低了 10 292.32 mm^2；氢气体积分数为 60% 时火焰面积峰值为 66 242.46 mm^2，降低了 4 443.54 mm^2。且到达面积峰值所需时间随氢气体积分数的升高先减后增，氢气体积分数为 15% 时到达面积峰值所用时间最长，而 30% 时火焰最快达到面积峰值。这是因为在受限空间中，氢气体积分数对火焰面积峰值及峰值时间的影响主要由燃料与氧气的化学计量比、燃烧速率、氧气消耗动态及热力学反馈共同决定。体积分数为 15% 的贫燃混合气因氢气不足，燃烧速率受限于燃料浓度，氧气消耗缓慢，导致火焰面积峰值较低且达到峰值时间延迟。当氢气体积分数为 30% 时，最接近化学计量比，燃烧速率最快，热释放速率最大，火焰传播受湍流增强和压力正反馈的协同作用迅速扩展，火焰面积峰值最大且达到峰值时间最短，但受空间及视窗大小限制，面积峰值只能达到视窗面积 70 686.00 mm^2。在富燃状态下，氧气不足导致部分氢气无法完全燃烧，燃烧速率和热释放量下降，使得氢气体积分数为 45% 时面积峰值虽也达到视窗面积，但到达面积峰值所需时间长于 30% 时。氢气体积分数升高到 60% 时，因氧气快速耗尽及压力积聚提前抑制火焰扩展，火焰面积峰值降低，但因初期燃料充足，其面积峰值大于贫燃状态且峰值时间短于贫燃状态。

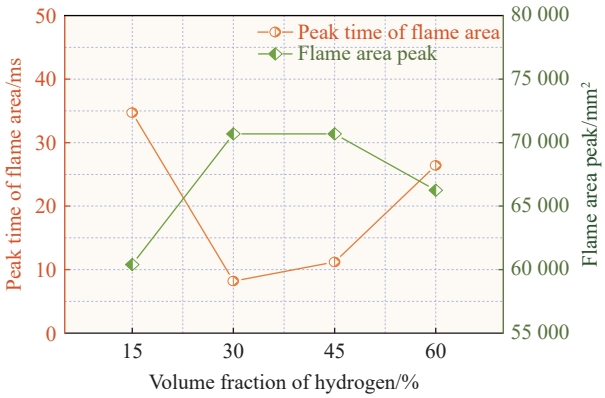


图 10　不同氢气体积分数下火焰传播面积特性参数

Fig. 10　Characteristic parameters of flame propagation area at different volume fractions of hydrogen

2.3　气流速度时空演变过程

为进一步了解三维空间中氢气爆炸时的流场动态特性，提取出了氢气体积分数为 30% 时不同时刻下 x=0 mm、y=0 mm 及 z=141.47 mm 这 3 个平面上的速度场分布，如图 11 所示。从图 11 中可以看出，点火开始后，燃料快速燃烧释放能量，导致局部高压气体膨胀，形成初始压力波向外传播，使得速度从零迅速上升，点火源附近形成高速区域。此时速度分布呈现中心对称性，向外辐射状衰减。3.0 ms 时，气流仍以点火源为中心向四周传播，容器内的压力呈指数级增长，但气流速度显著降低。6.0 ms 时，气流在壁面反射的作用下向点火源运动，整体气流速度下降，但局部湍流出现高速区域。随着时间的推移，圆柱形容器内的三维效应显著，对称平面与轴向平面的速度差异增大。

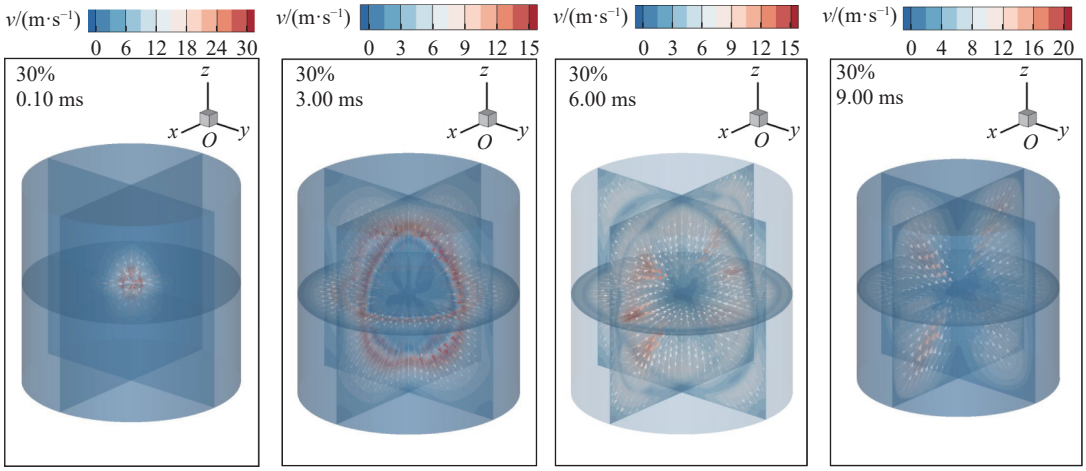


图 11　氢气体积分数为 30% 时容器中的速度场分布

Fig. 11　Velocity field distribution in the vessel when the volume fractions of hydrogen is 30%

9.0 ms 时，x=0 mm 平面处的中心线处参数分布曲线、压力等值线、温度云图、氢气质量分数分布及速度云图如图 12 所示，其中 R 为 x=0 mm 平面处的 y 坐标。根据中心线处温度及氢气质量分数分布曲线，可以看出在同一位置，温度和氢气质量分数不再变化。结合云图可以看出，温度为 3 000 K 的区域与氢气质量分数达到最小值的区域基本一致，是由已燃气体组成的高温区域。在此区域外，压力梯度和密度梯度显著增加，在接近圆柱上、下壁面与侧壁面相接位置时，受容器形状的影响，未燃氢气积聚，密度升高，压力升高。同时，由于此处压力梯度较大，在速度云图中出现了 4 个高速区域。中心线处的速度幅值曲线呈对称分布，单侧具有 2 个速度峰值。膨胀波推动气流速度略微上升，压缩波反射与未燃气体压缩使得气流速度下降，产生第 1 个较小的速度峰值。随后，在火焰前锋阵面附近产生第 2 个较大的速度峰值。这主要是因为由燃烧产物组成的高压区域与由未燃气体组成的低压区域之间形成陡峭的压力梯度，推动未燃气体向壁面方向加速流动。当气流逐渐接近壁面时，速度在近壁面区域因黏性耗散迅速衰减，形成显著的速度梯度。同时，壁面作为刚性边界直接阻断流动，反射压缩波进一步抑制气流运动，最终在壁面处气流速度降为零。

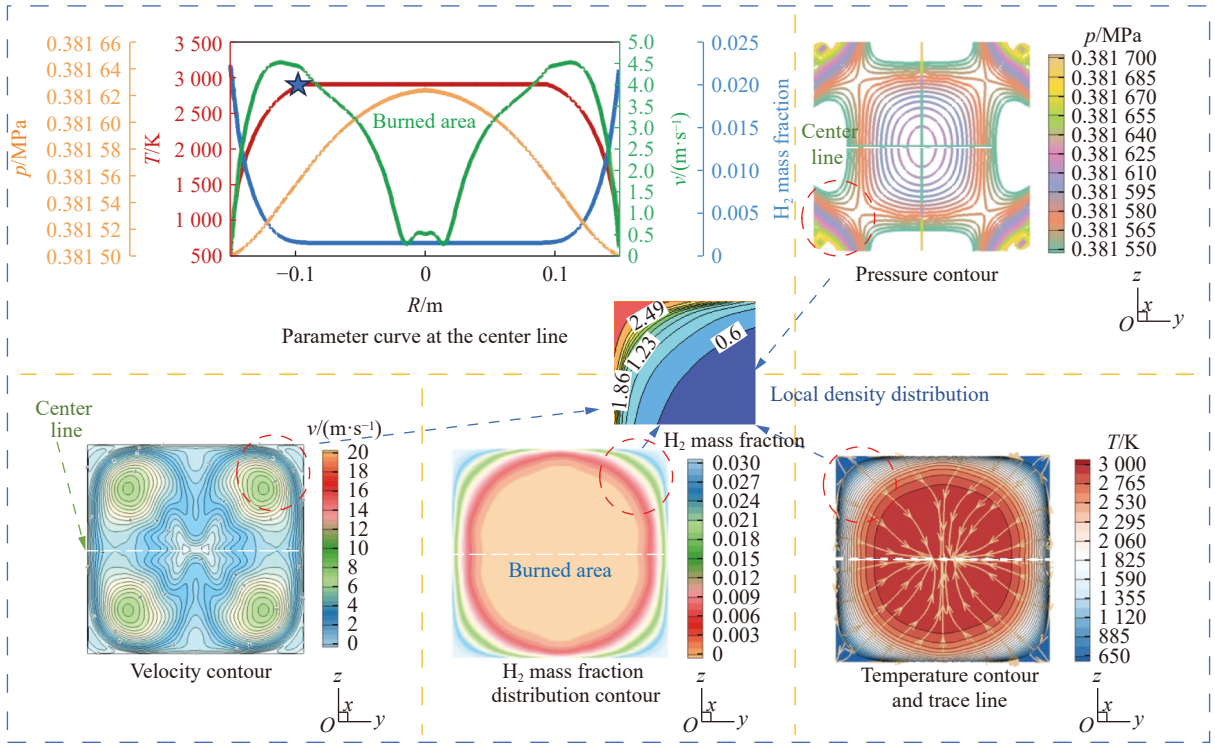


图 12　氢气体积分数为 30% 时的流场分布

Fig. 12　Flow field distribution when the volume fractions of hydrogen is 30%

图 13 显示了不同氢气体积分数下气流速度云图，可以看出，在氢气体积分数为 15% 时气流速度最低，其次是 60% 时。这是因为氢气体积分数为 15% 时预混气体处于贫燃状态，氧气过剩，导致单位体积内反应释热量减少，燃烧温度降低，使得燃烧产物膨胀不足，无法形成强压力波驱动气流加速。而氢气体积分数为 60% 时预混气体处于富燃状态，虽氧气不足导致燃烧不完全，但燃料总量多，局部剧烈反应释放的热量仍能驱动瞬时高速流动。此外，由于高燃料浓度增强了点火后局部的热释放与气体膨胀，产生更强的初始压力波驱动高速流动，使得氢气体积分数为 45% 时在反应初期气流速度高于 30% 时。但随着燃烧进程的推进，氢气体积分数为 45% 时因氧化剂不足反应速率骤降，膨胀驱动力衰减，压力波强度减弱。而氢气体积分数为 30% 时接近化学计量比，火焰锋面稳定传播，燃烧反应充分且持续，气流速度超过 45% 时。

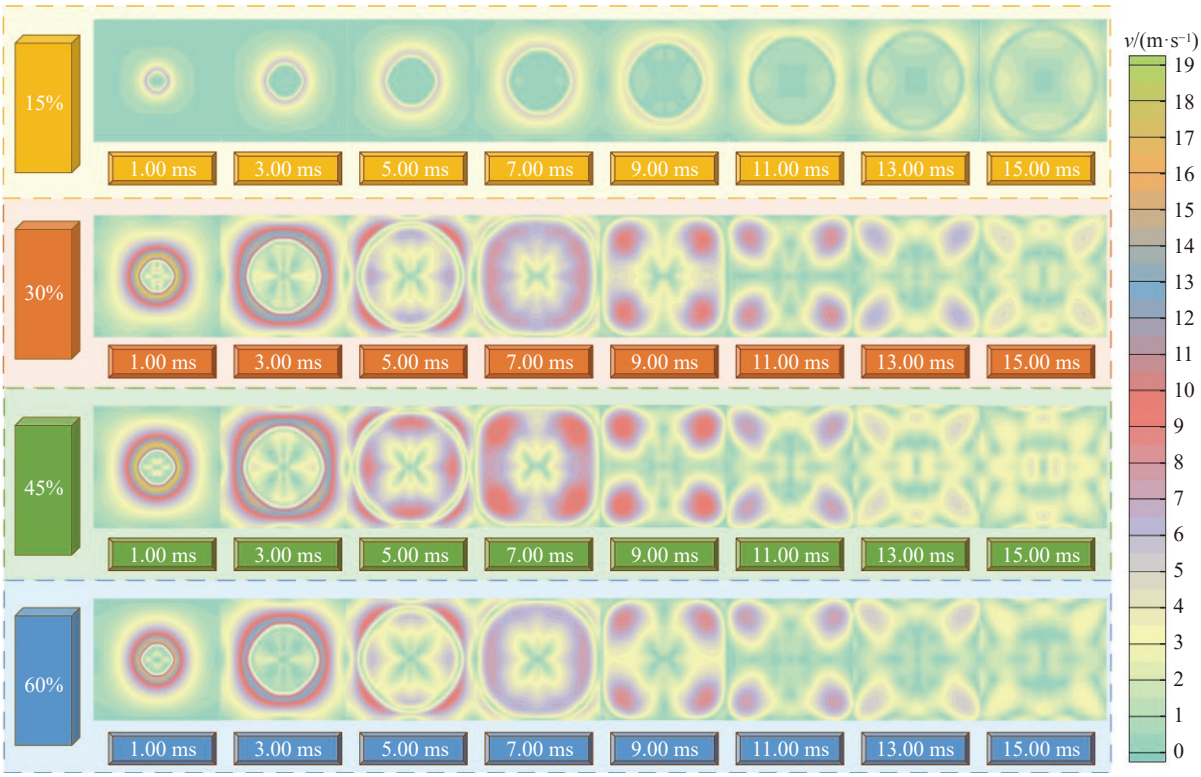


图 13　不同氢气体积分数下气流速度云图

Fig. 13　Velocity clouds of airflow at different volume fractions of hydrogen

3　结　论

本文采用试验与数值模拟相结合的方法，在圆柱形爆炸测试容器中研究了受限空间内燃料浓度对氢气爆炸过程中爆炸压力、火焰传播及气流速度的影响，主要发现如下。

(1) 最大爆炸压力随氢气体积分数的增加先增加后降低，在氢气体积分数为 30% 时取得最大值 0.623 94 MPa，验证了化学计量比附近的高效释能特性。

(2) 火焰面积峰值在氢气体积分数为 30% 和 45% 时最大，在 15% 和 60% 时分别降低了 14.6% 和 6.3%，且在 30% 时最快到达面积峰值，证实了其燃烧速率最优。

(3) 压力梯度在接近圆柱前、后壁面与侧壁面相接位置时较大，导致 9.0 ms 时在 x=0 mm 平面中心线处的速度幅值曲线对称分布，单侧出现双速度峰值。

(4) 氢气体积分数为 45% 时，初期气流速度因富燃料局部的热释放呈现短期速度优势，但后期因氧气不足迅速衰减；氢气体积分数为 30% 时，因燃烧反应充分且持续，后期气流速度反超，体现了近化学计量比的高效稳定性。

参考文献：

[1] ZHANG C B, JIN P G, CHEN C F, et al. Flame propagation characteristics and surface functional groups changes of corn starch dust during the combustion process [J]. Powder Technology, 2023, 430: 118995. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118995.

[2] ZHAO Y, XIAO X, ZHANG X, et al. Experiment study on the explosion suppressing characteristics and mechanism of melamine cyanurate and ammonium dihydrogen phosphate for lignite dust [J]. Powder Technology, 2024, 448: 120246. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.120246.

[3] WANG B, ZHANG C B, ZHANG X, et al. Exploration of corn starch dust combustion and explosion mechanisms via thermal decomposition and functional group changes [J]. Powder Technology, 2025, 456: 120816. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120816.

[4] ZHANG Y, LIU R Q, CAO W G, et al. Effects of RDX and HMX on the thermal stability properties of modified double-base propellants [J]. FirePhysChem, 2025, 5(5): 420–427. DOI: 10.1016/j.fpc.2025.01.006.

[5] LI S Y, CHEN R K, ZHANG Y, et al. The effect of NH_3 concentration on explosion venting characteristics and combustion mechanism [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 101: 1172–1182. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.021.

[6] CHENG S Q, CHEN R K, ZHANG Y, et al. Exploring the venting properties and reaction mechanism of NH_3/air mixtures by combining experiments and molecular dynamics simulations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 109: 712–722. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.147.

[7] International Military Council on Climate and Security. The world climate and security report 2024 [R]. IMCCS, 2021.

[8] PATA U K, DESTEK M A, MANGA M, et al. Militarization of NATO countries sparks climate change? Investigating the moderating role of technological progress and financial development [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 409: 137241. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137241.

[9] 吴蝶, 胡斌. 双碳目标下氢能产业发展的演化博弈研究 [J]. 工程管理科技前沿, 2024, 43(6): 90–96. DOI: 10.11847/fj.43.6.90.
WU D, HU B. Research on the evolution game of hydrogen energy industry development under the double-carbon target [J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management, 2024, 43(6): 90–96. DOI: 10.11847/fj.43.6.90.

[10] LICHTHARDT J P, TAPPAN B C, DE N N, et al. Novel segregated solid propulsion system with separately stored fuel and oxidizer [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(11): e202200142. DOI: 10.1002/prep.202200142.

[11] ZHANG B B, CHENG Y F, MA X W, et al. Damage power enhancement of fuel air explosive with typical metal hydrides additions [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 64: 105440. DOI: 10.1016/j.csite.2024.105440.

[12] 李玉艳, 徐森, 蒋榕培, 等. 氧化亚氮基单元复合推进剂的燃烧热性能研究 [J]. 爆破器材, 2024, 53(2): 22–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2024.02.004.
LI Y Y, XU S, JIANG R P, et al. Study on combustion heat and performances of nitrous oxide based composite monopropellant [J]. Explosive Materials, 2024, 53(2): 22–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2024.02.004.

[13] CAO Y, GAO K H, LI B, et al. Influence of vent size and vent burst pressure on vented ethylene-air explosion: experimental and numerical study [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 297–309. DOI: 10.1016/j.psep.2022.12.012.

[14] LI H T, CHEN X K, SHU C M, et al. Experimental and numerical investigation of the influence of laterally sprayed water mist on a methane-air jet flame [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356: 554–569. DOI: 10.1016/j.cej.2018.09.051.

[15] ZHANG S Z, WANG X, ZHANG Q, et al. Numerical study on explosion risk and building structure dynamics of long-distance oil and gas tunnels [J]. Fire, 2024, 7(9): 302. DOI: 10.3390/fire7090302.

[16] JING Q, XU H J, YANG Z Y, et al. The influence of jet medium disturbance on combustion of hydrogen-doped natural gas in low temperature environment [J]. Renewable Energy, 2025, 245: 122790. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122790.

[17] RUI S C, WANG Q, Wang C J, et al. Effects of ignition location and vent area on the external explosion in vented hydrogen explosions [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 183: 602–616. DOI: 10.1016/j.psep.2023.10.070.

[18] WANG X Y, LI B, HAN B, et al. Explosion of high pressure hydrogen tank in fire: mechanism, criterion, and consequence assessment [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108455. DOI: 10.1016/j.est.2023.108455.

[19] WANG C H, GUO J, WANG H Z, et al. Duct-vented explosion of stoichiometric hydrogen/methane/air mixtures at various hydrogen ratios [J]. Fuel, 2023, 333(Pt 1): 126376. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126376.

[20] CAO X Y, ZHOU Y Q, WANG Z R, et al. Experimental research on hydrogen/air explosion inhibition by the ultrafine water mist [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(56): 23898–23908. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.165.

[21] 陈晓坤, 王君, 程方明. 氢气抑爆材料及其抑爆机理研究进展 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(11): 111101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0418.
CHEN X K, WANG J, CHENG F M. Research progress on hydrogen gas explosion suppression materials and their suppression mechanisms [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(11): 111101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0418.

[22] 蔡冲冲, 苏洋, 王燕. 富氢甲烷的爆燃特性与爆炸抑制研究进展 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(7): 071101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0330.
CAI C C, SU Y, WANG Y. Research progress on the deflagration characteristics and explosion suppression of hydrogen-rich methane [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(7): 071101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0330.

[23] 韩长霖, 田原. 某缩尺推力室燃烧和传热特性研究 [J]. 火箭推进, 2020, 46(1): 28–34. DOI: 10.3969/j.issn.1672-

9374.2020.01.004.

HAN C L, TIAN Y. Study on combustion and heat transfer characteristics of a scaled trust chamber [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(1): 28–34. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9374.2020.01.004.

[24] 岳文龙, 郑大勇, 颜勇, 等. 我国高性能液氧液氢发动机技术发展概述 [J]. 中国航天, 2021(10): 20–25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7742.2021.10.004.

YUE W L, ZHENG D Y, YAN Y, et al. Overiew of technical development of high performance LO_X/LH_2 in China [J]. Aerospace China, 2021(10): 20–25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7742.2021.10.004.

[25] OZBEK E, YALIN G, KARAOGLAN M U, et al. Architecture design and performance analysis of a hybrid hydrogen fuel cell system for unmanned aerial vehicle [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(30): 16453–16464. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.216.

[26] CORAL G, KINEFUCHI K, NAKATA D, et al. Design and testing of additively manufactured high-efficiency resistojet on hydrogen propellant [J]. Acta Astronautica, 2021, 181: 14–27. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.12.047.

[27] 郁雪辰, 杨鹏飞, 王宽亮. 非均匀氢气/空气混合物中一维爆轰波的振荡特性 [J]. 兵工学报, 2023, 44(4): 982–993. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0804.

XI X C, YANG P F, WANG K L. Oscillations characteristics of one-dimensional detonation waves in non-uniform hydrogen-air mixture [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(4): 982–993. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0804.

[28] 雷特, 武郁文, 徐高, 等. 基于大涡模拟方法的三维旋转爆轰流场结构研究 [J]. 兵工学报, 2024, 45(1): 85–96. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0470.

LEI T, WU Y W, XU G, et al. Study on three-dimensional rotating detonation flow field structures based on large eddy simulation [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(1): 85–96. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0470.

[29] HE X, YANG G D, KONG D P. Hydrogen jet fire accident prediction model for hydrogen refueling station based on hybrid neural network [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 197: 107027. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107027.

[30] HUANG Q, SUN Z Y, DU Y L. Enhancing safety in hydrogen storage: understanding the dynamic process in hydrogen-methane mixtures during the pressurized leakage [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 192: 1554–1565. DOI: 10.1016/j.psep.2024.10.100.

[31] RUI S C, XIAO J J, WANG C J, et al. Numerical study of external explosion in vented hydrogen explosions [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 191: 1516–1533. DOI: 10.1016/j.psep.2024.09.022.

[32] LI H C, HOUIM R W. Pore-scale resolved simulation of quenching, acceleration, and transition to detonation of hydrogen explosions by metal foams [J]. Combustion and Flame, 2024, 259: 113118. DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.113118.

[33] GUO Q, LIU J, LIANG W K, et al. Transition of characteristic explosion limits: from hydrogen to diethyl ether [J]. Combustion and Flame, 2024, 261: 113280. DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.113280.

[34] CHEN D, WU C Q, LI J. Assessment of modeling methods for predicting load resulting from hydrogen-air detonation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 180: 752–765. DOI: 10.1016/j.psep.2023.10.051.

[35] HU S T, ZHANG Z W, GONG H, et al. Effect of mesh aluminum alloy on hydrogen and propane explosion characteristics [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 192: 946–959. DOI: 10.1016/j.psep.2024.10.064.

[36] 余明高, 阳旭峰, 郑凯, 等. 障碍物对甲烷/氢气爆炸特性的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.

YU G M, YANG X F, ZHENG K, et al. Effect of obstacles on explosion characteristics of methane/hydrogen [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 19–27. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0172.

[37] 马梦飞, 於星, 张爱凤, 等. 开放空间高压氢气射流中点火爆炸的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(6): 062101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0037.

MA M F, YU X, ZHANG A F, et al. An experimental study on ignition and explosion of high-pressure hydrogen jet in open space [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(6): 062101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0037.

[38] 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.

[39] MA X Y, NIE B S, WANG W L, et al. Investigation on explosion characteristics of hydrogen-air mixtures diluted with inert

gases in confined spaces [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 100: 138–148. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.461.

[40] LI Y C, BI M S, ZHOU Y H, et al. Evaluation of unrestricted hydrogen and hydrogen-methane explosion venting through duct [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(9): 7011–7021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.138.

[41] CAO M T, ZHANG Y S, LI R Z, et al. Explosion and vented explosion behaviors of low-concentration gas in large-scale pipes [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2023, 42: 101410. DOI: 10.1016/j.jestch.2023.101410.

[42] 皇新宇, 纪强, 张宪堂, 等. 地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2022, 41(2): 60-69. DO1: 10.16452/j. cnki. sdkjzk. 2022.02. 007.
HUANG X Y, JI Q, ZHANG X T, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(2): 60-69. DO1: 10.16452/j. cnki. sdkjzk. 2022.02. 007.

[43] LIU C W, LIAO Y H, YANG W, et al. Estimation of explosion overpressure associated with background leakage in natural gas pipelines [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 89: 103883. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103883.

[44] I Y P, CHENG T L. Application of CFD model in an LPG tank explosion accident [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 69: 104367. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104367.

[45] MOMFERATOS G, GIANNISSI S G, TOLIAS I C, et al. Vapor cloud explosions in various types of confined environments: CFD analysis and model validation [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 75: 104681. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104681.

[46] PICO P, RATKOVICH N, MUÑOZ F, et al. Analysis of the explosion behaviour of wheat starch/pyrolysis gases hybrid mixtures through experimentation and CFD-DPM simulations [J]. Powder Technology, 2020, 374: 330–347. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.016.

[47] GANJI H B, EBRAHIMI R. Numerical estimation of blowout, flashback, and flame position in MIT micro gas-turbine chamber [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 104: 857–867. DOI: 10.1016/j.ces.2013.09.056.

[48] FENG G J, ZHANG J L, CHEN M X, et al. Mathematical representation of liquid jet diffusion characteristics effected with evaporation process in supersonic crossflow [J]. Fuel, 2023, 353: 129110. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129110.

[49] SONG Y F, ZHANG Q. Quantitative research on gas explosion inhibition by water mist [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 363: 16–25. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.059.

[50] ZHUANG C J, ZHANG L J, TAO G, et al. Effect of concentration, obstacles, and ignition location on the explosion overpressure of hydrogen-air in a closed-vessel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(61): 23737–23747. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.024.

(责任编辑　王影)