综述与专论

DOI：10.11949/0438-1157.20261102

氢气混合体系爆炸特性研究进展及发展趋势

罗振敏[1,2]，白福硕[1,2]，南凡[1,2]，王涛[1,2]

（[1]西安科技大学安全科学与工程学院，陕西 西安 710054；[2]西安市城市公共安全与消防救援重点实验室，陕西 西安 710054）

摘要： 氢气混合体系是传统燃料低碳利用和氢能应用的重要形式，但氢气会改变混合物的爆炸特性与火焰传播规律。文中围绕气相预混、气液两相和气固两相三类氢气混合体系，综述了氢气混合体系爆炸极限、爆炸压力、火焰传播及层流燃烧速度的研究进展，从量子化学、反应动力学和计算流体力学三个方面归纳作用机理，并对未来的发展趋势进行了探究。在爆炸特性研究方面，氢气能拓宽气相体系的爆炸极限，提高爆炸压力并加快火焰传播；气液两相体系中，氢气能加快火焰传播，并在一定云雾浓度下使最大爆炸压力呈先升后降变化；氢气/金属粉尘混合体系中，掺氢可强化爆炸并诱发压力双峰和二次爆炸。机理方面，掺氢主要通过强化链分支反应并提高·H、·O和·OH等活性自由基浓度促进能量释放；气相预混体系主要受均相链式反应控制，气液体系还受到液滴蒸发及混合过程影响，气固体系则涉及颗粒着火、表面氧化及相间传递。通过对现有研究分析，开展非均匀浓度场下氢气混合燃料爆炸响应、基于机器学习的复杂体系爆炸特性参数快速预测和人工智能驱动的计算流体力学模拟研究是未来的发展趋势。

关键词： 氢气混合体系爆炸；爆炸特性；爆炸机理；人工智能

中图分类号： X932　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（XXXX）XX-0001-20

Research progress and development trends in explosion characteristics of hydrogen-containing mixtures

LUO Zhenming[1,2], BAI Fushuo[1,2], NAN Fan[1,2], WANG Tao[1,2]

([1]*School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*; [2]*Xi'an Key Laboratory of Urban Public Safety and Fire Rescue, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*)

Abstract: Hydrogen-containing mixtures represent an important pathway for the low-carbon utilization of conventional fuels and the broader application of hydrogen energy. However, hydrogen addition can considerably alter the explosion characteristics and flame propagation behavior of fuel mixtures. To clarify the effects of hydrogen addition on different fuel systems, research progress in explosion limits, explosion pressure, flame propagation, and laminar burning velocity is reviewed for gas-phase premixed, gas - liquid two-phase, and gas - solid two-phase hydrogen-containing mixtures. The underlying mechanisms are analyzed from the perspectives of quantum chemistry, chemical kinetics, and computational fluid dynamics (CFD). The results show that hydrogen addition generally broadens the explosion limits of gas-phase premixed mixtures, increases explosion pressure, and

收稿日期： 2026-08-19　　**修回日期：** 2026-10-20

通信作者： 南 凡（出生年1993— ），男，博士，讲师，nanf@xust.edu.cn

第一作者： 罗振敏（出生年1976— ），女，博士，教授，zmluo@xust.edu.cn

基金项目： 国家自然科学基金项目（52474250,52604368）；陕西省教育厅基金项目（23JP092）

引用本文： 罗振敏，白福硕，南凡，王涛. 氢气混合体系爆炸特性研究进展及发展趋势[J]. 化工学报，XXXX，XX(XX)：1-20

Citation: LUO Zhenming, BAI Fushuo, NAN Fan, WANG Tao. Research progress and development trends in explosion characteristics of hydrogen-containing mixtures[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-20

accelerates flame propagation, although the extent of these effects varies with the base fuel and operating conditions. In gas–liquid two-phase mixtures, hydrogen accelerates flame propagation, while the maximum explosion pressure may initially increase and subsequently decrease within a certain fuel-mist concentration range. This behavior is jointly affected by droplet concentration, evaporation, and gas–liquid interphase transport. In gas–solid two-phase mixtures, hydrogen addition can intensify explosions and induce characteristic phenomena such as double-peaked pressure profiles and secondary explosions. These phenomena are closely associated with particle ignition, surface oxidation, and gas–solid interphase transport. Mechanistic studies indicate that hydrogen promotes rapid energy release primarily by enhancing chain-branching reactions and increasing the concentrations of active radicals such as ·H, ·O, and ·OH. Gas-phase premixed systems are mainly governed by homogeneous chain reactions, whereas gas–liquid and gas–solid systems additionally involve multiphase transport and phase-specific combustion processes. Future studies should focus on the explosion response of hydrogen-containing fuel mixtures in non-uniform concentration fields, rapid machine-learning prediction of explosion characteristic parameters for complex mixtures, and artificial-intelligence-driven CFD simulations.

Keywords: hydrogen-containing mixture explosion; explosion characteristics; explosion mechanism; artificial intelligence

引 言

在能源低碳转型和可再生能源规模化利用背景下，氢能已成为连接能源生产、储运与终端利用的重要载体[1-4]。受纯氢输运设施成本和终端适配限制，将氢气掺入天然气、氨气及低碳液体燃料等，是现阶段扩大氢能利用的重要途径。英国HyDeploy天然气管网掺氢示范项目已完成20%体积分数掺氢天然气的管网试验[5]，我国也在推进掺氢天然气及纯氢管道示范[6-7]。然而，氢气扩散快、爆炸极限宽且点火能低，其与气态燃料、液体燃料蒸气或金属粉尘共存时，可能改变混合物的泄漏扩散、点火及爆炸过程，带来新的安全风险。2021年罗马尼亚某化肥厂氨生产装置在重启过程中，高压富氢合成气管道破裂，泄漏气体引燃并发生爆炸火灾，造成1人受伤[8]；2019年江苏昆山某金属加工企业因镁合金废屑遇水产氢，氢气爆炸扬起镁屑并诱发氢气/镁合金碎屑混合爆炸，造成7人死亡、5人受伤[9]。

针对氢气混合燃料的研究，早期（20世纪末至21世纪初）主要围绕富氢压缩天然气（hydrogen-enriched compressed natural gas，HCNG）在内燃机和工业燃烧器中的应用展开，重点关注掺氢对燃烧热效率的提升作用及终端燃烧器的兼容性评估[10]。2010年后，随着氢能规模化输送需求的兴起，研究重心逐步由终端高效利用向中下游安全输运转移，国内外学者开始系统地开展掺氢天然气在管网输送、高压储运以及密闭空间泄漏后的爆炸极限、压力上升速率和动态火焰传播规律研究[11]；同时，研究介质也由氢/甲烷体系，逐步拓展至合成气、生物质气等多组分掺氢燃气体系[12-13]。近年来，在双碳目标的推动下，国内外关于掺氢燃气的研究进入了多元探索与本征安全防控的新阶段。其中《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》等文件中明确将氢气混合燃料作为战略性新兴产业发展方向，学术界的目光已从天然气掺氢，延伸至氨氢融合，以攻克氨能燃烧瓶颈、低碳醇掺氢等零碳/低碳混合燃料领域[14-15]。当前研究进一步由均相气体向复杂多相体系拓展，重点关注氢气/液体喷雾气液两相燃爆、宽工况安全边界标定及管道爆燃向爆轰转变（deflagration-to-detonation transition，DDT）的主动控制，旨在为产业化应用提供多场景、全链条的安全技术支撑[16]。与此同时，面向金属加工和固态储氢等场景，研究对象进一步延伸至氢气/铝粉、氢气/氢化镁等气固两相体系，重点关注气相反应与颗粒燃烧的耦合机制及爆炸风险[17]。

现有研究已积累了大量特定燃料和实验条件下的掺氢爆炸数据，但不同燃料及不同相态体系之间仍缺少系统比较。对于气液和气固体系，气相燃烧与液滴蒸发、颗粒着火及表面反应之间的耦合关系尚不清楚，压力双峰、火焰前锋分离和二次爆炸等特殊现象的形成条件仍需进一步研究。此外，微观反应机理与宏观爆炸特性之间的联系仍不充分，现有动力学与数值模型对非均匀浓度场和复杂受

限空间爆炸过程的描述能力仍需验证。基于此，本文系统梳理气相预混、气液两相和气固两相三类氢气混合体系的爆炸特性研究进展，并从量子化学、燃烧反应动力学和计算流体力学三个方面归纳其作用机理。在此基础上，围绕人工智能驱动的网格生成与自适应优化、基于机器学习的氢气混合燃料爆炸参数预测及非均匀浓度场爆炸等问题，总结现有研究不足并提出未来研究方向，为氢气混合体系的安全利用和风险防控提供参考。

1 掺氢对混合体系爆炸特性的影响

氢气具有反应活性高、爆炸范围宽和点火能低等特性，将氢气与不同类型的燃料混合，其爆炸极限、爆炸压力以及火焰传播特性会呈现出不同的变化规律。目前，国内外研究较多的氢气混合燃料包括氢气/甲烷（掺氢天然气）、氢气/氨气、氢气/低碳醇、氢气/一氧化碳（合成气）、矿井瓦斯多元混合气体、氢气/汽油、氢气/金属粉尘等，按照爆炸前混合物的相态，相关研究可分为气相预混、气液两相和气固两相三类；液体燃料完全蒸发并与空气均匀混合时归入气相预混体系，以液滴或云雾形式存在时归入气液体系。

1.1 气相预混体系爆炸特性

1.1.1 氢气/甲烷混合气体爆炸特性 通过天然气管网掺氢输送技术是解决大规模风光电消纳问题和实现“双碳”目标的有效途径之一[18]，但掺氢所带来的安全隐患不容忽视。天然气的主要成分是甲烷，在氢气/甲烷混合体系中，当氢气比例（γ）小于20%时，混合气体爆炸极限变化较小；当氢气比例大于20%时，爆炸极限范围会随掺氢比例的增大呈现指数上升的趋势[19-20]。同时，掺氢也会提升甲烷爆炸压力，相比纯甲烷，掺氢后最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率及爆燃指数均有所增加。在293 K、101.3 kPa的20 L球形容器中，如图1(b)所示，不同当量比（φ）下最大爆炸压力总体随掺氢比增加而近似线性升高；图1(c)中的最大爆炸压力上升速率则呈现更明显的非线性增长[21-25]。此外，氢气加入不仅显著提高火焰传播速度，还会改变火焰形态并增强火焰不稳定性。在常压下的1000 mm×100 mm×100 mm半开口管道内，当掺氢比为20%、当量比为1时，火焰依次经历蘑菇形、指形和倾斜平面火焰等形态，变化过程见图1(a)；掺氢比提高后，火焰传播时间明显缩短，传播后期出现反转火焰或郁金香火焰[26-29]。相关学者采用Markstein长度和临界胞状半径等参数进行量化评估，随着掺氢比的增加，混合气体的Markstein长度显著减小并逐渐转负，火焰失稳的临界半径显著减小，胞状不稳定性在传播早期（较小半径处）便会提前诱发[30-31]。掺氢还能显著提升甲烷的层流燃烧速度，且随氢气比例增加呈上升趋势，其增长模式也存在线性或非线性的细微差异[32-34]。

1.1.2 氢气/氨气混合气体爆炸特性 氨气作为氢能载体，是一种潜在的零碳燃料。氨具有燃点高、最小点火能量高以及燃烧缓慢等劣势，通常需要借助氢气作为助燃剂[35]，但掺氢也会使混合气体的燃烧与爆炸特性更为复杂。在爆炸极限方面，氢气的加入使纯氨的单调曲线转变为具有三阶段的Z形曲线，大幅拓宽了爆炸极限范围，图2(b)为当量比1、温度（T）600 ~ 2200 K和压力（P）$10^{1.5}$ ~ $10^{7.5}$ Pa下的绝热定容计算结果[36]。与纯氨相比，氢氨混合燃料的爆炸压力参数均随掺氢比（X_{H2}）单调上升，但呈现阶段性差异。在293 K、100 kPa的圆柱形燃烧弹中，最大爆炸压力（P_{max}）在低掺氢比（20% ~ 40%）时提升显著，在高掺氢比（>60%）后增幅放缓，见图2(c)。而最大爆炸压力上升速率和爆炸指数在掺氢比超过60%后快速上升，同时爆炸压力参数也受当量比和初始压力的影响[37-38]。在火焰传播特性方面，掺氢会改变氨氢火焰的传播速度与形态，初始温度为298 K时，矩形密闭燃烧管道内不同掺氢比下（R）的典型火焰演化过程见图2(a)[15]。掺氢显著影响火焰形态与稳定性：在低掺氢比（≤33%）与贫燃条件下，火焰因体积力不稳定性增强；当掺氢比≥50%时，火焰表面出现裂纹并分裂为胞状结构，表现出热扩散与流体动力学不稳定性共同作用的不稳定形态[39]。氢气的加入可以显著提升氨气的层流燃烧速度，随掺氢比的增加，氨/氢火焰的层流燃烧速度呈现指数增长[40-43]。另外，氨气燃烧生成的氮氧化物（NO_x）也是学者关注的指标之一。添加氢气能降低NO_x的排放量[44]，尤其是在较高氢含量下，NO形成路径中HNO与·H的反应重要性下降。

1.1.3 氢气/液体燃料蒸气预混体系爆炸特性 绿色低碳醇（甲醇/乙醇）作为优质储氢运氢载体，是破解氢能储运难题的重要方案之一[45]，液体燃料完全蒸发后，其蒸气可与氢气和空气形成均相预混物，泄漏后遇点火源存在燃烧爆炸风险。研究表明，乙

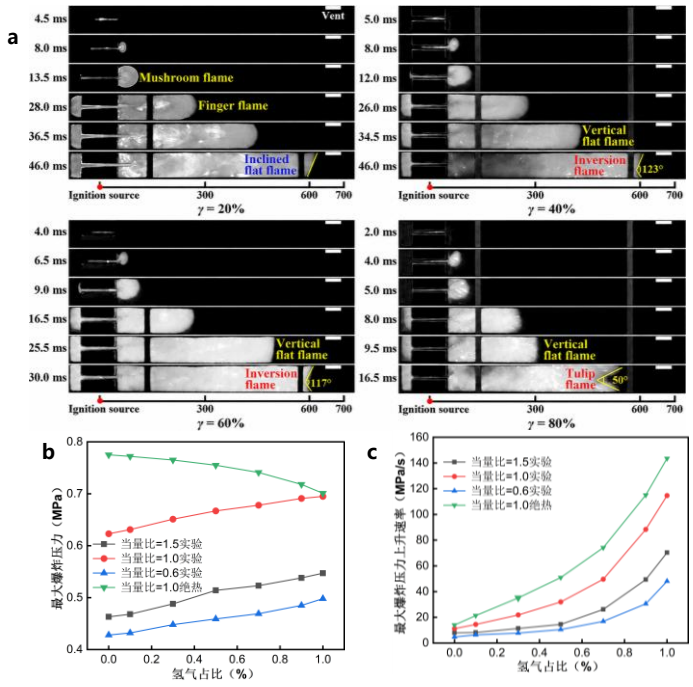


图1　不同掺氢比下H_2/CH_4混合气体的火焰传播与爆炸压力特性：(a)半开口管道内火焰形态演化[29]；(b)最大爆炸压力[21]；(c)最大爆炸压力上升速率[21]

Fig.1　Flame propagation and explosion pressure characteristics of H_2/CH_4 mixtures at different hydrogen blending ratios: (a) flame morphology evolution in a half-open duct[29]; (b) maximum explosion pressure[21]; (c) maximum explosion pressure rise rate[21]

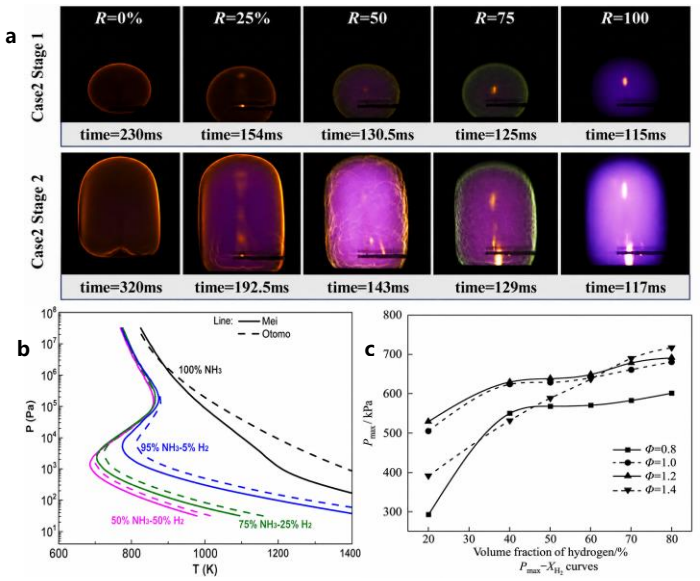


图2　H_2/NH_3混合气体的火焰传播与爆炸特性：(a)不同掺氢比和当量比下的火焰形态演化[15]；(b)不同掺氢比下爆炸极限随温度和压力的变化[36]；(c)不同掺氢比和当量比下的最大爆炸压力[38]

Fig.2　Flame propagation and explosion characteristics of H_2/NH_3 mixtures: (a) flame morphology evolution at different hydrogen blending ratios and equivalence ratios[15]; (b) variation of explosion limits with temperature and pressure at different hydrogen blending ratios[36]; (c) maximum explosion pressure at different hydrogen blending ratios and equivalence ratios[38]

醇-氢气混合气体最大爆炸压力在当量比1.2～1.3时达到最高，并随初始压力增大而升高；1.94 L定容燃烧弹在初始温度为(T_0)450 K、初始压力(P_0)0.3 MPa和当量比1.3下的实验结果表明，最大爆炸压力上升速率随氢气含量显著增加；爆燃指数(K_G)也随氢气比例增大而增强，导致爆炸危险性显著上升，见图3(b)[46-47]。在乙醇和甲醇体系中掺入氢气均能提高层流燃烧速度，初始温度400 K、初始压力0.1

MPa条件下，图3(c)所示计算结果表明，乙醇体系在不同当量比下均表现出随掺氢比增加而升高的趋势[48-50]。氢气添加促进了火焰胞状不稳定性的发展，图3(a)为33.5 L定容燃烧弹在375 K、100 kPa和当量比0.8条件下的火焰演化过程；胞状化进程随掺氢比例(X_h)增加而提前，其中贫燃火焰的不稳定性主要由热扩散不稳定性主导，而富燃火焰主要受流体动力学不稳定性控制。衡量火焰拉伸响应灵敏度的马克斯坦长度则随氢气比例增加而减小甚至转负，意味着火焰更易失稳、加速向湍流转变[51-54]。

除低碳醇外，正己烷和甲苯参比燃料(toluene reference fuel，TRF)蒸气与氢气形成的预混体系也受到关注，研究发现，在贫燃条件下，随着氢气添加量增加，正己烷/氢气/空气混合物最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率均增大，且峰值位置向更贫燃方向偏移；而在富燃条件下则呈现相反趋势[55]。针对TRF/氢气预混火焰的研究进一步表明，掺氢可提升层流燃烧速度，并使燃烧速度峰值向富燃侧偏移[56]。此外，相关研究采用Markstein长度表征火焰稳定性，发现在贫燃工况下，掺氢比越大，Markstein长度越小，火焰不稳定性越强，富燃工况下则相反[57-58]。

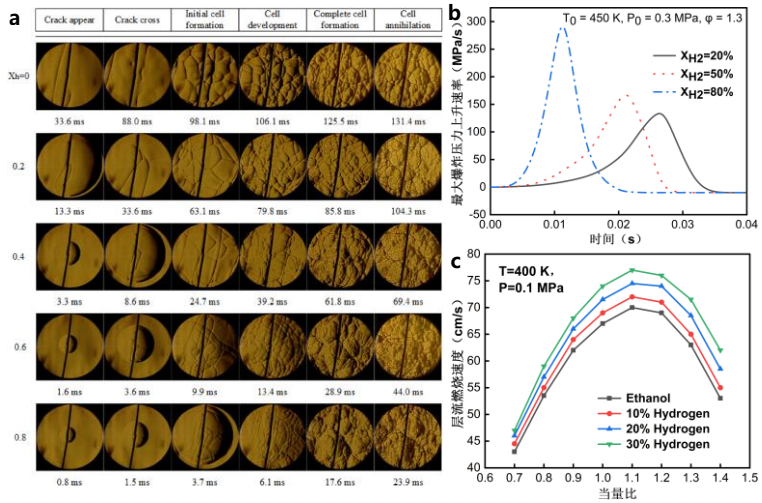


图3 掺氢低碳醇燃料的火焰与爆炸特性：(a)氢气/甲醇火焰胞状演化[51]；(b)乙醇/氢气/空气混合物最大爆炸压力上升速率[46]；(c)乙醇/氢气/空气混合物层流燃烧速度[48]

Fig.3 Flame and explosion characteristics of hydrogen-enriched low-carbon alcohol fuels: (a) cellular evolution of H_2/methanol flames[51]; (b) maximum explosion pressure rise rate of ethanol/hydrogen/air mixtures[46]; (c) laminar burning velocity of ethanol/hydrogen/air mixtures[48]

1.1.4 氢气/一氧化碳混合气体爆炸特性 氢气/一氧化碳混合气体又称为合成气，是一种洁净的可再生燃料。合成气中氢气含量增加会显著降低爆炸下限并扩大爆炸上限，从而提升爆炸危险性，即使添加微量氢气，混合物的爆炸极限曲线也会从单调形式转变为非单调Z形曲线，初始温度升高也会明显改变爆炸极限的变化趋势[59-62]。合成气的爆炸压力参数和爆燃指数通常随当量比先升高后降低，其峰值对应的当量比受到H_2/CO比及初始条件影响。在初始温度298 K、初始压力0.1 MPa的6.91 L定容燃烧容器内，最大爆炸压力上升速率在当量比约为1.6时达到峰值，并随H_2/CO比提高而整体增大，见图4(c)[63-68]。图4(a)给出了1000 mm×100 mm×100 mm半开口管道在298 K、101.3 kPa和当量比为1.0时，不同氢气体积分数下的火焰形态演化过程，图4(a)中φ为氢气体积分数。随着氢气体积分数增加，火焰到达管道末端的时间明显缩短，当氢气比例大于50%时，所有当量比下均出现明显的郁金香火焰扭曲现象，当氢气比例小于50%时，扭曲仅出现在部分条件下[69-70]。在氢气比例小于15%时，层流燃烧速度增长显著，而在氢气比例大于15%时，增长趋缓[71-75]。火焰不稳定性同样受氢气比例与当量比共同影响，在初始压力0.2 MPa、当量比0.6的140 mm定容燃烧容器内，随着H_2/CO比和火焰半径增加，火焰表面的褶皱和胞状结构更加明显，如图4(b)所示[76-77]。

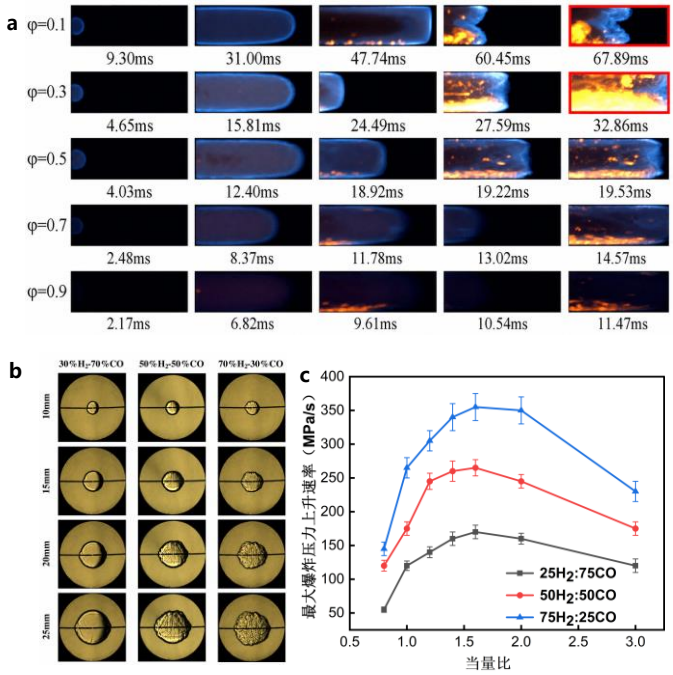


图4　不同H_2/CO比例下合成气的管道火焰传播、球形火焰失稳及爆炸压力上升特性：(a)管道内火焰形态演化[70]；(b)不同火焰半径下球形火焰的胞状结构[77]；(c)最大爆炸压力上升速率随当量比的变化[67]

Fig.4　Duct flame propagation, spherical flame instability, and explosion pressure rise characteristics of syngas at different H_2/CO ratios: (a) flame morphology evolution in a duct[70]; (b) cellular structures of spherical flames at different flame radii[77]; (c) variation of the maximum explosion pressure rise rate with equivalence ratio[67]

1.1.5　氢气/多组分气体混合爆炸特性　煤矿瓦斯(煤层气)是以甲烷为主、包含氢气等多种烃类及非烃类气体的多组分混合物，而煤自燃等灾害会进一步产生CO、H_2、烷烃及烯烃等气体，形成复杂的多元可燃体系，显著增加了爆炸事故风险[78]。研究表明，矿井火区产生的其他可燃气体，尤其是乙烯和氢气，会显著拓宽甲烷混合气体的爆炸极限范围，既降低爆炸下限，又提高爆炸上限，使其在更宽的浓度范围内存在燃烧爆炸风险。相比之下，一氧化碳(CO)的影响较小，而乙烷的作用则较为不稳定[79-80]。此外，在初始温度298～373 K、其他可燃气体浓度0.4%～2.0%条件下，多种混合气体的掺入会显著提升贫燃甲烷(7% CH_4)最大爆炸压力与压力上升速率；而在富燃条件(11% CH_4)下则呈现相反的削弱作用[81-85]。在火焰传播行为方面，随着混合气体体积分数的增加，贫燃火焰传播速度整体呈上升趋势，当添加体积分数为2.0%时，最大火焰传播速度从1.25 m/s增至1.93 m/s，增幅达56.9%；但在较低添加量(0.4%和0.8%)下，火焰传播速度反而略低于纯甲烷体系[86]。

综合已有研究，掺氢通常会拓宽气相燃料的爆炸极限，提高层流燃烧速度和爆炸压力，但多组分体系在富燃条件下的爆炸压力可能降低；在部分体系中，掺氢还会降低Markstein长度、促进胞状结构提前出现，从而增强火焰不稳定性。不同燃料对掺氢的响应存在差异：H_2/CH_4体系在较低掺氢比下爆炸极限变化较小，H_2/NH_3体系和低氢含量的H_2/CO体系则可能呈现Z形爆炸极限曲线；H_2/NH_3体系的最大爆炸压力和层流燃烧速度分别表现出阶段性和指数变化，H_2/CO体系还受到H_2/CO比和当量比共同影响，而多组分气体的爆炸响应与贫燃或富燃状态密切相关。

1.2　气液两相体系爆炸特性

液体燃料能量密度高、储运体系成熟，是氢气混合燃料研究的重要对象。气液雾滴体系的爆炸过程同时受到气相反应、液滴蒸发和相间传递影响，现有研究主要关注云雾浓度、液滴粒径和掺氢比对爆炸压力及火焰传播的作用。余轲等[87-88]采用5 L方形密闭管道，在初始温度300 K、初始压力101.3 kPa条件下研究了氢气/汽油云雾混合物的爆炸特性，结果表明，在一定汽油云雾浓度(C_G)范围内(29.18～116.72 g/m^3)，氢气存在临界添加水平，该水平随汽油云雾浓度增加而降低，当低于临界添加水平时，最大爆炸压力随氢气增加而升高，超过该

水平后则呈下降趋势，随着云雾浓度增加，最大爆炸压力上升速率显著下降。相应的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率变化分别见图5(b)、(c)[88]。Wang等[89]研究发现，在正癸烷云雾体系中，在相同液相浓度下，液滴粒径越小，爆炸峰值压力越大，液滴粒径增大会提升爆炸下限。在火焰传播方面，液滴粒径增大会延长火焰传播时间和液滴群存活时间，氢气添加则提高火焰传播速度，随着汽油喷雾浓度增加，火焰前锋由较平滑结构逐渐出现明显褶皱，燃烧特征由均相燃烧向非均相燃烧转变，如图5(a)所示[88,90]。Xu等[91]研究发现，在氢气/甲醇喷雾体系中，掺氢能够缩短火焰传播时间，并使最大爆炸压力总体升高；但在较高甲醇喷雾浓度和较低掺氢比下，最大爆炸压力会因氧气不足而略有降低，表明甲醇喷雾浓度与掺氢比共同影响混合物的爆炸特性。

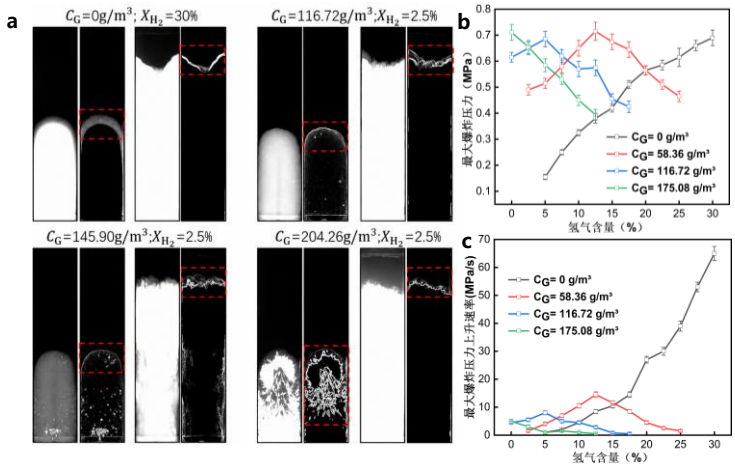


图5 不同汽油喷雾浓度和掺氢比下氢气/汽油喷雾两相混合物的火焰传播与爆炸压力特性[88]：(a)火焰形态及火焰前锋结构；(b)最大爆炸压力；(c)最大爆炸压力上升速率

Fig.5 Flame propagation and explosion pressure characteristics of two-phase hydrogen/gasoline spray mixtures at different gasoline spray concentrations and hydrogen blending ratios[88]: (a) flame morphology and flame-front structure; (b) maximum explosion pressure; (c) maximum explosion pressure rise rate

1.3 气固两相体系爆炸特性

在金属加工、湿法除尘及固态储氢材料制备过程中，泄漏或反应生成的氢气可能与悬浮、沉积的金属粉尘形成爆炸性混合物。现有研究主要关注氢气与铝粉、镁粉及钛粉混合后的爆炸压力和火焰传播特性。在氢气/铝粉体系中，当氢气体积分数高于4%时，最大爆炸压力显著增加；超过10%后，最大爆炸压力上升速率明显提高。随着氢气体积分数进一步升高，火焰传播速度曲线可出现双峰，并发生氢气与铝粉火焰前锋分离，相应典型条件见表1。氢气火焰前锋的传播速度高于铝粉火焰前锋，最高可达97.6 m/s，典型过程见图6(a)[92-93]。此外，减小铝粉粒径可提高最大爆炸压力及其上升速率，并使火焰传播位移曲线由双峰转为单峰[94-95]。

在氢气/镁粉体系中，添加1%氢气即可降低镁粉最低爆炸浓度(lower explosion concentration, LEC)[96]；氢气/镁粉爆炸压力曲线在一定条件下出现双峰，其中第一压力峰主要对应氢气燃烧并伴有部分镁粉参与，第二压力峰主要对应镁粉爆炸，其出现时间约为第一压力峰的2.4倍，且第二阶段的爆炸特征参数均大于相应浓度的纯镁粉和纯氢气[9,97]。在边长30 cm的立方容器内，当氢气体积分数为30%时，初始氢气爆炸可扬起底部5.4 g沉积镁粉并诱发二次爆炸，压力－时间曲线见图6(b)；爆炸压力还受到粉尘层厚度、粒径、环境湿度、初始压力及点火位置等因素的共同影响[9]。除氢气与镁粉形成的气固混合环境外，MgH_2等固态储氢材料受热脱氢后，释放的氢气与剩余固体可共同参与燃烧爆炸，其危险性还与材料储氢容量和脱氢温度有关[98]。

氢气/钛粉研究表明，不同粒径钛粉的爆炸压力对氢气浓度呈现不同响应：41.90 μm钛粉的爆炸压力随氢气浓度增加而升高，28.20和4.91 μm钛粉的爆炸压力在氢气体积分数由0增至4%时降低，随后在4%～25%范围内升高[99]。氢气/金属粉尘爆炸并非只取决于掺氢比，而是受到粉尘质量浓度、粒径尺寸及悬浮或沉积状态的影响，并可在特定条件下

出现爆炸压力双峰、火焰前锋分离及二次爆炸等特征，相关典型现象及其关键条件汇总于表1。

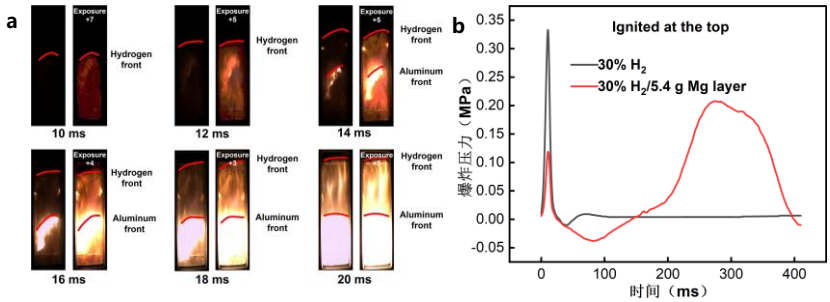


图6　氢气/金属粉尘体系的火焰传播与二次爆炸特性：(a)25% 氢气、1000 g/m³铝粉条件下的火焰前锋分离[92]；(b)30% H_2与5.4 g沉积镁粉层构成的非预混体系爆炸压力－时间曲线[9]

Fig.6　Flame propagation and secondary-explosion characteristics of hydrogen/metal-dust systems: (a) flame front separation at 25% hydrogen and 1000 g/m³ aluminum dust[92]; (b) explosion pressure－time curve of an unpremixed system comprising 30% H_2 and a 5.4 g deposited Mg dust layer[9]

表1　氢气/金属粉尘体系典型爆炸现象及关键条件

Table 1　Typical explosion phenomena and key conditions of hydrogen/metal-dust mixtures

体系	典型现象	φH_2/%	c_d/(g·m^{-3})	m_d/g	d/μm	文献
H_2/Al	火焰传播速度曲线双峰	>15	1000～2000	—	56.18	[92]
H_2/Al	氢气与铝粉火焰前锋分离	>20	1000	—	56.18	[92]
H_2/Al	火焰传播位移曲线由双峰转为单峰	15①	1500	—	56.18、30.82→5.07	[94]
H_2/Mg	爆炸压力曲线双峰	≥10	>50	—	32.40	[9,97]
H_2/Mg	沉积镁粉二次爆炸	30①	—	5.40	51.40	[9]
H_2/Ti	爆炸压力变化趋势发生转折	4②	200～800	—	4.91、28.20	[99]

注：φH_2为氢气体积分数，c_d为悬浮粉尘质量浓度，m_d为沉积粉尘质量，d为中位粒径。①为典型实验工况，并非临界值；②为最大爆炸压力变化的转折点，并非压力曲线双峰；“—”表示不适用。

2　氢气混合体系爆炸机理

氢气的加入会显著改变不同燃料体系的爆炸特性，其根本原因在于掺氢改变了体系的燃烧反应动力学过程。为进一步揭示掺氢燃料爆炸行为的内在机制，学者主要从量子化学、化学反应动力学以及计算流体动力学三个方面研究了氢气混合燃料的作用机理。

2.1　高斯/量子化学

现有采用Gaussian软件研究氢气混合燃料反应机理的工作主要集中于CH_4及H_2/CH_4体系，其他混合燃料的相关研究较少。因此，本节主要以甲烷及H_2/CH_4体系为例，介绍Gaussian在关键基元反应、过渡态以及自由基生成路径分析中的应用。

在甲烷爆炸中，$CH_4+O_2\rightarrow\cdot CH_3+\cdot HO_2$链引发反应焓变为259.26 kJ·mol^{-1}，吉布斯自由能为210.68 kJ·mol^{-1}，必须有较高的能量才能激发反应进行。$CH_2O+O_2\rightarrow\cdot HO_2+\cdot HCO$链分支反应在整个反应中起重要作用[100]。王秋红等[101]对甲烷爆炸简化机理中反应物、中间体、过渡态和产物进行结构优化与频率计算，发现·OH的形成主要受$O_2+\cdot H\rightarrow\cdot OH+\cdot O$和$\cdot O+H_2\rightarrow\cdot OH+\cdot H$协同控制，其中$O_2+\cdot H\rightarrow\cdot OH+\cdot O$的自由能垒高达312.4 kJ·mol^{-1}，是甲烷爆炸链式反应中的关键限速步骤。在H_2/CH_4体系中，CH_4在链引发阶段仍占主导，H_2不会优先取代CH_2O与O_2反应，也不会抑制CH_4氧化；但当链反应启动后，·OH自由基优先与H_2反应，氢气在链转移阶段优先级高于甲烷[102]。其生成的·H、$\cdot HO_2$等活性自由基可提高体系中活性自由基浓度，加速$CH_4\rightarrow\cdot CH_3\rightarrow CH_2O\rightarrow\cdot HCO\rightarrow CO\rightarrow CO_2$的氧化路径，从而表现为点火延迟缩短和层流燃烧速度升高。对于含CO、C_2H_4、C_2H_6和H_2的多元可燃气体系，量子化学计算揭示了图7所示的自由基自促进与微循环过程。爆炸初始阶段并非所有组分同时参与反应，而是先由CH_4氧化产生$\cdot CH_3$，再诱导H_2参与反应生成·H，随后由·H推动CO、C_2H_4和C_2H_6进入反应网络，降低多

组分共同参与爆炸所需的活化能[103-104]。

在气相掺氢燃料研究中，Gaussian计算主要集中于H_2/CH_4体系，因其反应机理研究较为成熟，关键链分支和自由基转移路径相对明确，便于开展过渡态及反应能垒计算。氨氢、醇氢及多组分掺氢燃料涉及含氮、含氧或多碳中间体，反应网络和主控过渡态更为复杂，相关研究较少。对于气液和气固两相体系，液滴蒸发、颗粒表面反应及相间传递等跨尺度过程难以由Gaussian直接描述，因此通常需结合化学反应动力学与计算流体力学开展研究。

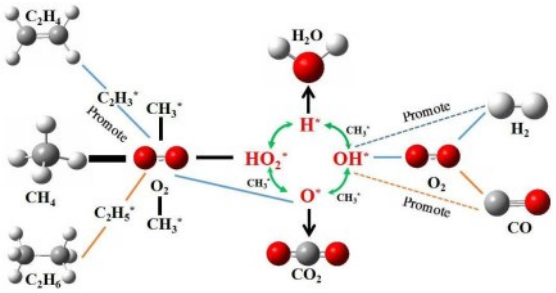


图7 Gaussian计算揭示的多组分可燃气体爆炸自由基自促进与微循环机制[103]

Fig.7 Radical self-promotion and microcirculation mechanism of multicomponent flammable-gas explosions revealed by Gaussian calculations[103]

2.2 化学反应动力学模拟

化学反应动力学模拟是解析掺氢燃料爆燃机理的核心。由于不同基底燃料的元素组成和物种演化网络存在差异，现有研究多采用针对性的动力学机理，如甲烷（GRI-Mech 3.0）、氨气（Konnov机理）、乙醇（Marinov机理）等。掺入氢气后，系统内·H自由基浓度剧增，加速了最敏感的链分支反应·H+O_2⇌·O+·OH，·O与·OH浓度快速升高，进而提高层流燃烧速度和爆炸超压，但其对不同燃料氧化路径的调控仍存在差异。

在甲烷体系燃烧过程中，中间产物甲基（CH_3）极易与体系内·H结合引发R52链终止反应·H+·CH_3(+M)⇌CH_4(+M)，导致燃烧速率受限。而掺氢提供的过量·H改变了甲基的消耗平衡R97（·OH+·CH_3⇌CH_2+H_2O），从而在微观上压制了原有R52链终止效应[105-109]。纯氨氧化速率较低，其反应过程受·NH_2等含氮自由基转化控制；掺氢通过R9等链分支反应促进·H和·OH生成，并加快NH_3逐步脱氢及后续含氮中间体转化[110-111]。针对乙醇等燃料，其氧化过程原受制于脱氢与C-C键断裂的高能垒，而掺氢通过R1链分支反应产生的·H和·OH自由基，促进乙醇向乙醛及甲酰基等中间产物转化，同时减弱R127等甲基三体复合反应造成的链终止作用，从而缩短主要放热反应历程[112-113]。在H_2/CO体系中，·OH既参与H_2氧化，又通过CO+·OH⇌CO_2+·H反应促进CO向CO_2转化，是联系H_2与CO氧化路径的重要自由基；掺氢还可减弱三体复合反应引起的活性自由基消耗[114-116]。对于含烃类和CO的多组分体系，不同组分之间还存在反应路径竞争。贫燃条件下，掺氢增加活性自由基浓度，可促进各组分协同氧化；富燃条件下，氧气不足与2·CH_3(+M)⇌C_2H_6(+M)等复合反应会增加活性中心消耗，使掺氢的促进作用受到限制[117-119]。

在氢气/汽油喷雾气液两相体系中，Yu等[87]采用Chemkin零维反应器和Shao-muller机理，以TRF表征汽油，分析了自由基演化及主要氧化路径。·H+O_2⇌·O+·OH和H_2+·OH⇌·H+H_2O是氢气参与汽油氧化的主要反应，可提高·H、·O和·OH的生成速率。需要指出的是，该动力学计算主要针对蒸发后燃料组分的气相反应过程，并未直接耦合液滴蒸发、粒径演化及气液相间传递模型。

在氢气/金属粉尘体系中，氢气优先氧化可促进·H、·O和·OH等关键自由基生成，从而提高气相反应活性并促进颗粒燃烧。Ji等[120]发现，掺氢能够缩短镁粉进入剧烈燃烧阶段的时间；Lee等[121]采用详细化学反应动力学模型和Cantera模拟表明，·O+H_2⇌·H+·OH促进·H和·OH生成，·OH+H_2⇌·H+H_2O生成的H_2O可进一步参与Al+H_2O⇌AlO+H_2反应，实现H_2再生；但掺氢对燃烧速率的影响仍取决于体系的动力学与扩散控制条件。

上述不同相态体系的动力学模拟路径见图8。气相体系以均相反应为主，液体燃料参与气相反应前需经历蒸发过程，固相颗粒则涉及着火、表面氧化及气相—颗粒物种交换；各体系的气相反应均涉及·H、·O、·OH和·HO_2等活性自由基的生成与转化。

2.3 计算流体力学模拟

计算流体力学（computational fluid dynamics，CFD）模拟可从流场尺度分析氢气混合体系中火焰传播、压力波演化及多相耦合过程。现有研究涉及气相、气液和气固体系，不同数值框架对化学反应及多相过程的处理方式存在差异。

在气相体系中，H_2/CH_4火焰在管壁约束和压力波作用下依次经历自由膨胀、指形火焰、火焰反转

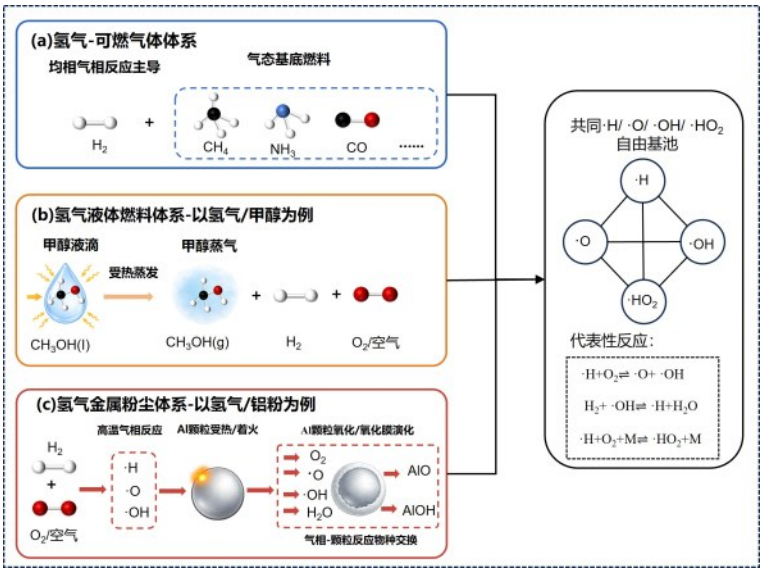


图8 氢气混合体系的反应机理示意图

Fig.8 Schematic diagram of reaction mechanisms in hydrogen-blended systems

和郁金香火焰，火焰撞击壁面及燃烧面积变化会引起压力波动，掺氢可提高反应速率并缩短压力峰值到达时间[122]。H_2/NH_3火焰前期以层流传播为主，随着压力和湍流动能增大，火焰前锋褶皱加剧并逐渐转为湍流燃烧[123]。甲醇蒸气/H_2爆炸的温度响应呈现“两波三区”结构，火焰前锋始终滞后于冲击波，前方流动方向随火焰传播发生变化，相关火焰与速度场演化见图9[124]。在H_2/CO体系中，H_2比例升高可加快火焰传播，使CO氧化放热更加集中并提高绝热火焰温度[125]。

气液两相模拟还需处理液滴运动、蒸发及相间传递。在H_2/汽油喷雾体系中，Fluent将涡耗散概念（eddy dissipation concept，EDC）燃烧模型与液滴蒸发过程耦合；EDC用于描述湍流混合与化学反应的相互作用，液滴过程则由多相模型处理。液滴粒径增大会延长蒸发和火焰传播时间，掺氢则可促进混合物均化和火焰传播[90]。在H_2/甲醇喷雾体系中，部分预混燃烧模型与离散相模型（discrete phase model，DPM）耦合；掺氢后火焰前方流动增强，火焰由早期近球形逐渐转变为指形和褶皱结构[91]。

对于H_2/铝粉气固两相爆炸，研究者将计算流体力学程序DET3D扩展至气固体系，并利用CREBCOM化学反应模型分别描述H_2/O_2气相反应和Al/O_2颗粒燃烧。较低氢气体积分数和铝粉质量浓度下，氢气先燃烧并加热颗粒，随后引燃铝粉，体系呈两阶段燃烧；随着氢气或铝粉浓度升高，氢气可迅速引燃颗粒，两者趋于同步燃烧。为再现铝粉延迟着火及压力分阶段上升过程，模型依据实验结果设置了铝粉燃烧启动阈值[126]。不同多相模型的适用体系、反应处理方法及验证方式见表2。

表2 不同多相氢气混合体系数值模型的比较

Table 2 Comparison of numerical models for multiphase hydrogen mixtures

数值框架	适用体系	多相过程处理	反应处理方法	验证方式
Fluent+EDC	H_2/汽油喷雾	考虑液滴蒸发过程	EDC耦合湍流混合与化学反应	30% H_2条件下的火焰形态和压力－时间曲线
Fluent+部分预混燃烧模型+DPM	H_2/甲醇喷雾	DPM跟踪液滴运动、蒸发和破碎	采用反应进度变量和混合分数描述火焰传播，甲醇采用简化反应	火焰形态和火焰前锋位置
DET3D+CREBCOM	H_2/Al粉尘	分别处理气相反应与颗粒燃烧	分别设置H_2/O_2和Al/O_2反应速率，并设置铝粉燃烧启动阈值	20 L球形容器实验的爆炸压力、压力上升速率及两阶段燃烧过程

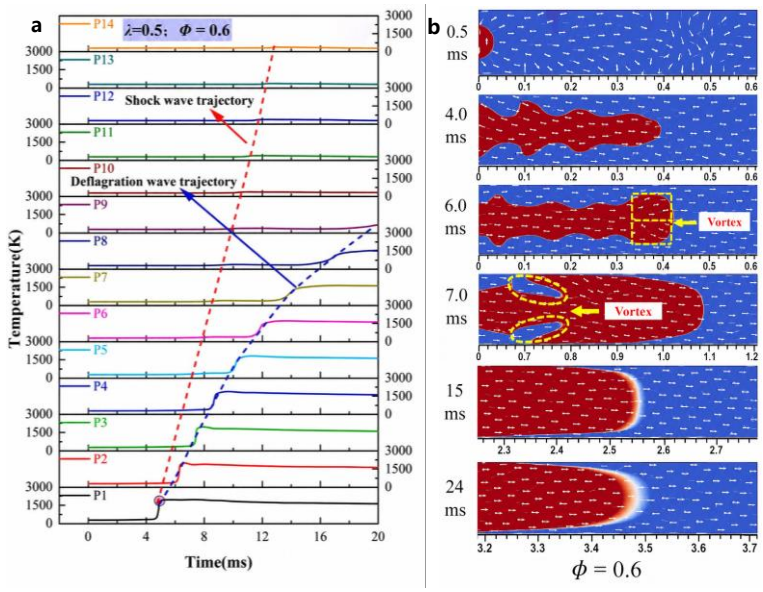


图9 甲醇蒸气/氢气爆炸“两波三区”特征及其火焰－流场可视化[124]：(a)温度响应与爆燃波、冲击波传播轨迹；(b)火焰传播与速度场演化(掺氢比λ=0.5，φ=0.6)

Fig.9 Two-wave/three-zone characteristics and corresponding flame－flow visualization of methanol-vapor/hydrogen explosions[124]: (a) temperature responses and propagation trajectories of the deflagration and shock waves; (b) evolution of flame propagation and velocity field (hydrogen blending ratio λ = 0.5, φ = 0.6)

3 氢气混合体系爆炸特性研究发展趋势

基于前文对氢气混合燃料宏观爆炸特性和燃爆机理的梳理，本章从人工智能驱动的数值模拟、机器学习爆炸参数预测和非均匀浓度场爆炸响应三个方面归纳研究前沿与发展方向。其中，人工智能网格生成与自适应优化可为复杂Fluent模拟提供前处理支撑，机器学习为爆炸极限与压力参数的快速预测提供了新的方法，但其跨燃料和跨工况适用性仍需验证；非均匀浓度场下多种氢气混合燃料的火焰传播及爆炸压力响应仍需进一步研究。

3.1 人工智能驱动的网格生成和自适应优化

受限空间内氢气混合燃料爆炸涉及火焰前锋、障碍物尾流、压力波及局部涡结构的快速耦合演化，对网格分辨率和动态加密能力提出了较高要求。针对Fluent数值模拟受网格构建和局部加密制约的问题，人工智能网格生成与自适应优化为提高CFD前处理及计算效率提供了新途径，但其在氢气爆炸模拟中的应用仍较有限。

王年华等[127-128]将人工神经网络与阵面推进法结合，使二维非结构三角形网格的生成效率提高约30%，并通过径向基函数插值和人工神经网络建立尺度控制模型，使计算效率提高5～10倍。此后，生成对抗网络、机器学习回归模型、图神经网络和循环神经网络被用于初始网格预测、网格尺度控制及各向异性自适应加密[129-133]，但相关研究主要面向通用CFD算例。在氢气爆燃模拟中，障碍物附近的火焰前锋和尾流区域需要较高的网格分辨率[134]，现有研究多采用人工划定的局部加密区域[135]。Vanbersel等[136]提出面向湍流火焰传播的自适应网格加密方法(turbulent flame propagation-adaptive mesh refinement，TFP-AMR)，可使障碍空间爆燃模拟的计算成本降低32%～64%，及与静态均匀网格参考计算(reference simulation，REF)的对比见图10。Meziat Ramirez等[137]进一步将该方法用于贫燃氢气/空气爆燃，通过在火焰前锋和涡结构区域采用1 mm细网格、其他区域采用5 mm粗网格，再现了火焰加速、压缩波汇聚和强激波形成过程。

总体而言，氢气爆燃模拟中的动态网格加密仍主要依据火焰位置、压力梯度和涡量等物理判据，人工智能网格方法则多处于通用CFD算例验证阶段。未来可将机器学习与火焰进度变量、压力梯度、涡量及浓度梯度等特征结合，实现氢气混合燃料爆炸过程的智能动态网格优化。

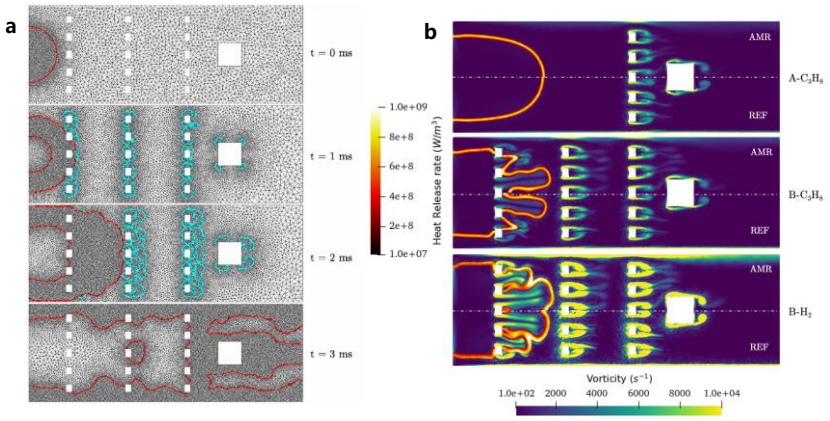


图10 自适应网格对障碍空间内丙烷与氢气爆燃火焰及涡结构的追踪[136]:(a)氢气火焰传播过程中的网格动态加密;(b)火焰放热区与涡结构的计算结果对比

Fig.10 Adaptive-mesh tracking of flame and vortex structures in propane and hydrogen deflagrations within an obstructed enclosure[136]: (a) dynamic mesh refinement during hydrogen flame propagation; (b) comparison of the calculated flame heat-release zones and vortex structures

3.2 基于机器学习的氢气混合燃料爆炸特征参数预测

爆炸极限与爆炸压力是表征氢气混合燃料燃爆危险性的关键参数,受燃料组成、初始温度和压力及环境条件等因素影响。由于传统模型对复杂工况的适用性有限,机器学习逐渐应用于相关参数预测。

爆炸极限预测早期主要采用定量结构—性质关系(QSPR),以分子结构和物性参数为输入,研究表明随机森林(RF)和支持向量机(SVM)的预测精度通常高于多元线性回归(MLR)[138-140]。相关方法随后拓展至含氢混合体系。Li等[141]针对H_2/O_2/稀释气体系建立爆炸状态分类模型,多种算法的预测准确率均超过88%,其中前馈神经网络(feedforward neural network,FNN)最高达到96%,相应建模流程见图11。针对高温高压H_2/C_2H_5OH体系,Qi等[142-143]将温度、压力、掺氢比及·H、·O、·OH、·HO_2和H_2O_2浓度作为输入,建立的爆炸下限和爆炸上限预测模型测试集决定系数分别达到0.9864和0.9814,实现了动力学特征与宏观爆炸极限的关联。对于复杂合成气,Su等[144]基于169组实验数据建立预测模型,随机森林和多层感知机对爆炸下限和爆炸上限的测试集决定系数分别达到0.96和0.99。Junias等[145]将混合物组成、初始温度、绝热火焰温度和Lewis数作为输入,模型对爆炸下限和爆炸上限的平均绝对偏差分别为0.23和0.51 mol% H_2;沙普利加法解释(Shapley additive explanations,SHAP)分析表明,绝热火焰温度对预测结果的影响最大。

在爆炸压力预测方面,基于声学理论、层流燃烧速度和火焰褶皱系数的传统模型可预测H_2/CH_4混合物的峰值爆炸压力,但计算结果对火焰褶皱系数及空间结构较为敏感[146-147]。对于非大气温压条件下的H_2/C_2H_5OH体系,K近邻模型的测试集决定系数达到0.986,预测性能优于多元线性回归和随机森林[148]。在障碍管道H_2/CH_4/空气爆炸中,Li等[149]将初始超压为零和超压非负约束嵌入神经网络损失函数,可同时预测超压随时间的变化、峰值超压和压力冲量,并减少非物理预测结果。

总体来看,机器学习已应用于氢气混合燃料的爆炸极限与压力参数预测,相关模型也由单纯数据拟合逐步向融合动力学特征和物理约束发展。然而,现有模型通常基于特定燃料、实验装置和数据集建立,更换燃料或实验条件后的预测精度仍需验证。未来应完善数据库,融合实验、动力学与数值模拟数据,提高模型的泛化能力和物理可信度。

3.3 非均匀浓度场下氢气混合燃料爆炸响应

现有氢气混合燃料爆炸研究多基于均匀预混条件,主要围绕掺氢比例、初始压力、障碍物、泄爆条件及当量比等因素,分析火焰传播、压力增长和爆炸强度变化[150-152]。但在真实泄漏事故中,燃料云通常难以保持均匀预混状态。氢气密度低、扩散快,与其他燃料混合后易在管道和受限空间中形成浓度梯度、组分分层和局部富氢区。以H_2/CH_4混合物为例,其爆炸响应与均匀预混条件下的结果存在明显差异[153]。研究表明,非均匀氢气泄漏爆炸中,扩散时间会改变湍流状态、浮力分层和火焰结构,

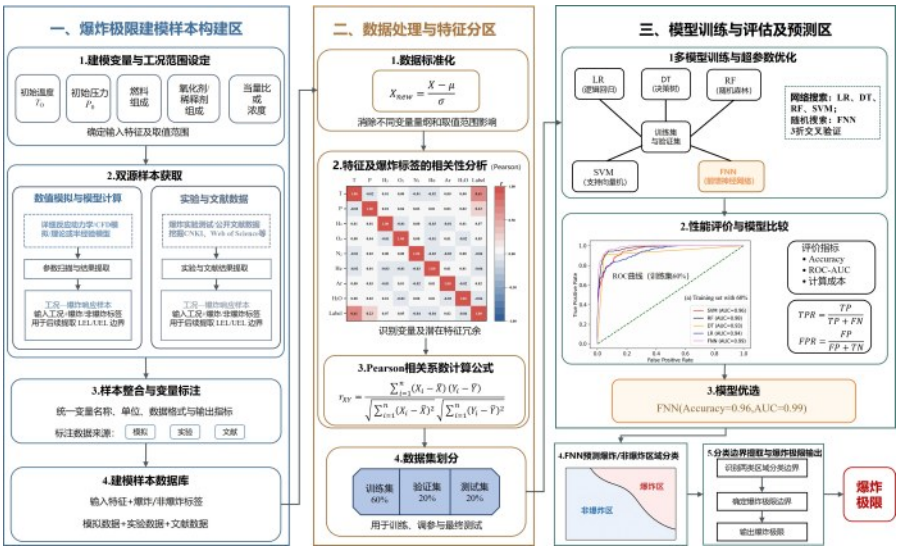


图11 氢气混合体系爆炸极限机器学习建模与预测流程[141]

Fig.11 Machine-learning workflow for modeling and predicting the explosion limits of hydrogen-containing mixtures[141]

进而影响最大超压和火焰速度，体积分数梯度也会造成火焰传播、温度和爆炸压力变化差异[154-155]。在甲烷及掺氢甲烷体系中，点火位置、横向浓度梯度和当量比分布会改变火焰传播路径、泄爆过程和超压峰值[156-157]，非均匀H_2/CH_4/空气混合气中，掺氢比例和扩散时间(t_d)共同影响混合程度，并使火焰形态、火焰速度和超压水平发生变化，如图12所示，以燃料中氢气体积分数为50%的工况为例，随着扩散时间延长和混合均匀程度提高，火焰形态、火焰尖端速度及爆炸超压同步发生变化，表明初始浓度分布能够通过调控火焰传播过程进一步影响宏观压力响应[158]。其他氢气混合燃料的非均匀研究相对较少，现有H_2/NH_3研究主要关注反应性分层对火焰传播的影响。Liang等[159]构建了由H_2/空气向NH_3/H_2/空气过渡的反应性分层，发现该分层可促进氨侧火焰传播并拓宽其可燃范围。在此基础上，Chi等[160]进一步发现，随着温度、压力及下游氢气体积分数升高，组分分层对火焰速度的影响逐渐减弱，主要原因是·H和H_2的优先扩散作用减弱。

目前，非均匀条件下的研究主要集中于纯氢、甲烷和H_2/CH_4体系，H_2/NH_3体系则开始涉及组分分层条件下的火焰传播，而H_2/CO、氢气/低碳醇及多组分掺氢燃料的非均匀爆炸研究仍较少。未来应进一步考察真实泄漏条件下浓度分层、点火位置、组分扩散和局部当量比演化对火焰传播及压力增长的影响。

4 结 论

文中围绕气相预混、气液两相和气固两相三类氢气混合体系，系统综述了爆炸极限、压力特性、火焰传播、燃爆机理的研究进展，并分析了相关研究前沿与挑战，主要结论如下：

(1)掺氢总体上可拓宽气态混合燃料的爆炸极限，提高爆炸压力、压力上升速率和火焰传播速度，但不同基底燃料的变化规律存在差异。气液两相体系同时受到液滴浓度、粒径和蒸发过程影响；气固两相体系则由气相反应、颗粒氧化及相间传热传质共同控制，掺氢对爆炸特性的影响还取决于液滴或颗粒参数。

(2)燃爆机理方面，量子化学和化学反应动力学模拟表明，氢气主要通过强化·H+O_2⇌·O+·OH等链分支反应、提高·H、·O和·OH自由基浓度，并改变不同燃料的氧化及链终止路径，加快着火和能量释放。气液体系会随喷雾浓度升高由动力学控制向蒸发控制转变；气固体系中自由基反应与颗粒表面氧化相互耦合。CFD模拟进一步揭示了反应速率、液滴蒸发、颗粒燃烧及流场结构对火焰传播和压力响应的共同作用。

(3)人工智能已用于复杂几何模型的初始网格生成及通用CFD算例的网格自适应优化，其在氢气爆炸流场中的应用仍处于探索阶段。现有机器学习模型对爆炸极限和爆炸压力参数具有较高的预测精度，但跨燃料、跨装置的独立验证仍较少。非均匀浓度场中，浓度梯度、组分分层和点火位置对

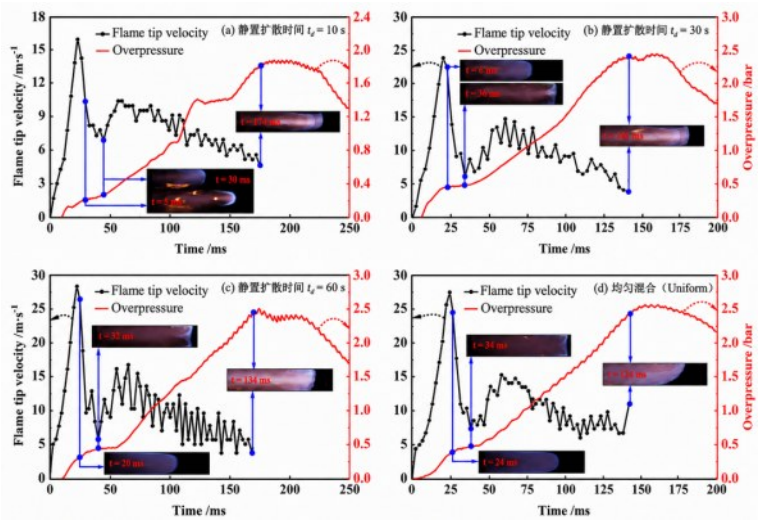


图 12 不同混合均匀程度下非均匀 H_2/CH_4/空气混合物火焰尖端速度与爆炸超压的耦合演化[158]

Fig.12 Coupled evolution of flame-tip velocity and explosion overpressure in non-uniform H_2/CH_4/air mixtures under different mixing uniformities[158]

火焰传播及爆炸压力的影响尚待深入研究。

参考文献

[1] Osman A I, Mehta N, Elgarahy A M, et al. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, **20**(1): 153-188.

[2] 张智, 赵苑瑾, 蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望[J]. 天然气工业, 2022, **42**(5): 156-165.
Zhang Z, Zhao Y J, Cai N. Technological development status and prospect of hydrogen energy industry in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, **42**(5): 156-165.

[3] Muhammed N S, Gbadamosi A O, Epelle E I, et al. Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: Recent advances towards sustainable energy[J]. Journal of Energy Storage, 2023, **73**: 109207.

[4] Hren R, Vujanović A, Van Fan Y, et al. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: an environmental footprint assessment[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, **173**: 113113.

[5] Isaac T. HyDeploy: the UK′s first hydrogen blending deployment project[J]. Clean Energy, 2019, **3**(2): 114-125.

[6] 蒋宏业, 寇明月, 廖柯熹, 等. 掺氢天然气管道泄漏扩散研究现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2024, **43**(8): 855-868.
Jiang H Y, Kou M Y, Liao K X, et al. Current status and developmental trend on leakage and dispersion research for hydrogen-blended natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, **43**(8): 855-868.

[7] 张智, 许宝进, 梁斌, 等. "双碳"背景下中国氢能发展回顾、面临挑战及建议[J]. 天然气工业, 2025, **45**(4): 179-192.
Zhang Z, Xu B J, Liang B, et al. Review, challenges and suggestions for China′s hydrogen energy development in the context of dual carbonstrategy[J]. Natural Gas Industry, 2025, **45**(4): 179-192.

[8] Munteanu L, Florea G D, Simon-Marinica B A, et al. A case study of a synthesis gas system (H2) failure in an ammonia production facility[C]//23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM2023, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Vol 23, Issue 1.1. July 3-9, 2023. Albena, Bulgaria. STEF92 Technology, 2023: 619-626.

[9] Xiong X Y, Gao K, Mu J, et al. Study on explosion characteristic parameters and induction mechanism of magnesium powder/hydrogen hybrids[J]. Fuel, 2022, **326**: 125077.

[10] Prasad R K, Jain S, Verma G, et al. Laser ignition and flame kernel characterization of HCNG in a constant volume combustion chamber[J]. Fuel, 2017, **190**: 318-327.

[11] Shen X B, Xiu G L, Wu S Z. Experimental study on the explosion characteristics of methane/air mixtures with hydrogen addition[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, **120**: 741-747.

[12] Liang W K, Liu J, Law C K. On explosion limits of H2/CO/O2 mixtures[J]. Combustion and Flame, 2017, **179**: 130-137.

[13] Ciccarelli G, Jackson D, Verreault J. Flammability limits of NH_3 - H2 - N2 - air mixtures at elevated initial temperatures[J]. Combustion and Flame, 2006, **144**(1/2): 53-63.

[14] Zhou C L, Yang Z, Chen G H, et al. Study on leakage and explosion consequence for hydrogen blended natural gas in urban distribution networks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, **47**(63): 27096-27115.

[15] Liang H, Yan X Q, Shi E H, et al. Effect of hydrogen blending on ammonia/air explosion characteristics under wide equivalence ratio[J]. Energy, 2024, **297**: 131334.

[16] Zhang K, Yang W, Yang X F, et al. Experimental study on the explosion characteristics of methane/hydrogen/air localized accumulations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **179**: 151593.

[17] Yu X Z, Yu J L, Zhang X Y, et al. Combustion behaviors and residues characteristics in hydrogen/aluminum dust hybrid explosions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, **134**: 343-352.

[18] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战[J]. 化工进展, 2021, **40**(10): 5499-5505.

Shang J, Lu Y H, Zheng J Y, et al. Research status-in-situ and key challenges in pipeline transportation of hydrogen-natural gas mixtures[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, **40**(10): 5499-5505.

[19] Molnarne M, Schroeder V. Hazardous properties of hydrogen and hydrogen containing fuel gases[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, **130**: 1-5.

[20] Li Q Z, Lin B Q, Dai H M, et al. Explosion characteristics of H_2/CH_4/air and CH_4/coal dust/air mixtures[J]. Powder Technology, 2012, **229**: 222-228.

[21] Ma Q J, Zhang Q, Chen J C, et al. Effects of hydrogen on combustion characteristics of methane in air[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, **39**(21): 11291-11298.

[22] Ma Q J, Zhang Q, Pang L, et al. Effects of hydrogen addition on the confined and vented explosion behavior of methane in air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, **27**: 65-73.

[23] 梅亮, 郭进, 黄时凯, 等. 密闭容器内氢气-甲烷-空气的爆炸特性[J]. 含能材料, 2025, **33**(3): 225-235.
Mei L, Guo J, Huang S K, et al. Explosion characteristics of Hydrogen-Methane-Air in a closed vessel[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2025, **33**(3): 225-235.

[24] Wang T, Liang H, Lin J J, et al. The explosion thermal behavior of H2/CH_4/air mixtures in a closed 20 L vessel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, **47**(2): 1390-1400.

[25] Yang Y, Luo Z M, Zhang F, et al. Study on the effects of hydrogen addition ratio and diluent gas concentration on the explosion characteristics of methane/hydrogen gas-mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2026, **99**: 105764.

[26] 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.

[27] Zheng K, Yu M G, Zheng L G, et al. Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, **42**(8): 5426-5438.

[28] 陈东梁, 孙金华, 刘义, 等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征[J]. 爆炸与冲击, 2008, **28**(5): 385-390.
Chen D L, Sun J H, Liu Y, et al. Propagation characteristics of premixed methane-air flames[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, **28**(5): 385-390.

[29] Cheng M, Cong H Y, Yuan Z Q, et al. Experimental study on the premixed H2/CH_4/air flame inversion behavior in a half-open duct under narrow space ignition condition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **172**: 151289.

[30] Moccia V, D′Alessio J. Burning behaviour of high-pressure CH_4-H2-air mixtures[J]. Energies, 2013, **6**(1): 97-116.

[31] Yu M G, Zheng K, Zheng L G, et al. Effects of hydrogen addition on propagation characteristics of premixed methane/air flames[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, **34**: 1-9.

[32] Hu E J, Huang Z H, He J J, et al. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane - hydrogen - air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, **34**(11): 4876-4888.

[33] Tahtouh T, Halter F, Samson E, et al. Effects of hydrogen addition and nitrogen dilution on the laminar flame characteristics of premixed methane - air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, **34**(19): 8329-8338.

[34] Okafor E C, Hayakawa A, Nagano Y, et al. Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen - methane - air[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, **39**(5): 2409-2417.

[35] 丁颖, 韩东, 黄震. 氨燃料汽车发动机燃烧技术研究进展[J]. 汽车工程学报, 2023, **13**(4): 437-443.
Ding Y, Han D, Huang Z. Research progress on combustion technology for ammonia-fueled automotive engines[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, **13**(4): 437-443.

[36] Liu Y S, Han D. Numerical study on explosion limits of ammonia/hydrogen/oxygen mixtures: Sensitivity and eigenvalue analysis[J]. Fuel, 2021, **300**: 120964.

[37] 罗振敏, 孙亚平, 刘璐, 等. 氢气影响氨气爆炸动力学研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, **21**(11): 58-67.
Luo Z M, Sun Y P, Liu L, et al. Study on the influence of hydrogen on the explosion kinetics of ammonia[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, **21**(11): 58-67.

[38] 吴彬华, 郭进, 吴泽龙, 等. 当量比与掺氢比对氨/氢/空气火焰及爆炸特性的影响[J]. 化工学报, 2026, **77**(2): 1009-1020.
Wu B H, Guo J, Wu Z L, et al. Influence of equivalence ratio and hydrogen ratio on flame and explosion characteristics of ammonia/hydrogen/air mixture[J]. CIESC Journal, 2026, **77**(2): 1009-1020.

[39] Hu X M, Luo C Y, Chen X, et al. Study on flame propagation and inherent instability of hydrogen/ammonia/air mixture[J]. Fuel, 2024, **357**: 129848.

[40] Ichikawa A, Hayakawa A, Kitagawa Y, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/hydrogen/air premixed flames at elevated pressures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, **40**(30): 9570-9578.

[41] Hayakawa A, Goto T, Mimoto R, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures[J]. Fuel, 2015, **159**: 98-106.

[42] 张云明. 可燃气体火焰传播与爆轰直接起爆特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Zhang Y M. Investigation on the characteristics of flame propagation and direct initiation of detonation for combustible gas [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[43] 刘芳世. 氨氢燃料的预混燃烧特性研究[D]. 成都: 西华大学, 2024.
Liu F S. Study on premixed laminar combustion characteristics of ammonium-hydrogen fuels[D]. Chengdu: Xihua University, 2024.

[44] Duynslaegher C, Jeanmart H, Vandooren J. Flame structure studies of premixed ammonia/hydrogen/oxygen/argon flames: Experimental and numerical investigation[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, **32**(1): 1277-1284.

[45] Monteiro E, Brito P S D. Hydrogen supply chain: Current status and prospects[J]. Energy Storage, 2023, **5**(7): e466.

[46] 张嘉玮, 张衍, 姜根柱, 等. 乙醇-氢气-空气预混燃气爆炸特性的研究[J]. 新能源进展, 2023, **11**(2): 189-196.
Zhang J W, Zhang Y, Jiang G Z, et al. Explosion characteristics of ethanol-hydrogen-air premixed gas[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, **11**(2): 189-196.

[47] Mitu M, Brandes E. Influence of pressure, temperature and vessel volume on explosion characteristics of ethanol/air mixtures in closed spherical vessels[J]. Fuel, 2017, **203**: 460-468.

[48] Zhou J X, Lu C Y, Xu C S, et al. Experimental and numerical study on the effect of hydrogen addition on laminar burning velocity of ethanol – air mixtures[J]. Energies, 2022, **15**(9): 3114.

[49] 朱源, 姜根柱, 王筱蓉, 等. 高温下掺氢燃气层流燃烧速度和稳定性研究[J]. 车用发动机, 2023(6): 26–32.
Zhu Y, Jiang G Z, Wang X R, et al. Laminar combustion speed and stability of hydrogen-doped gas at high temperature[J]. Vehicle Engine, 2023(6): 26–32.

[50] 苏傲成, 朱源, 王筱蓉, 等. 常压下掺混氢气对乙醇–空气混合物层流燃烧特性的影响[J]. 海军工程大学学报, 2025, **37**(3): 44–51.
Su A C, Zhu Y, Wang X R, et al. Effect of hydrogen addition on laminar combustion characteristics of ethanol-air mixture at atmospheric pressure[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2025, **37**(3): 44–51.

[51] Wu H, Zheng J X, Dong X, et al. Investigations on the cellular instabilities of expanding hydrogen/methanol spherical flame[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, **46**(67): 33601–33615.

[52] 朱源, 姜根柱, 王筱蓉, 等. 掺氢乙醇预混燃料火焰不稳定性研究[J]. 可再生能源, 2025, **43**(11): 1428–1434.
Zhu Y, Jiang G Z, Wang X R, et al. Study on flame instability of hydrogen-added ethanol premixed fuel[J]. Renewable Energy Resources, 2025, **43**(11): 1428–1434.

[53] 张衍, 张嘉玮, 王筱蓉. 高压下氢气–乙醇球形膨胀火焰的层流燃烧速度和火焰不稳定性研究[J]. 新能源进展, 2023, **11**(1): 69–75.
Zhang Y, Zhang J W, Wang X R. Investigation of laminar combustion velocity and flame instability in hydrogen-ethanol spherical expansion flames under high pressures[J]. Advances in New and Renewable Enengy, 2023, **11**(1): 69–75.

[54] 张璇, 王筱蓉, 张嘉玮, 等. 氢气乙醇混合物层流燃烧速度及火焰不稳定性研究[J]. 分布式能源, 2023, **8**(2): 61–66.
Zhang X, Wang X R, Zhang J W, et al. Study on laminar burning velocity and flame instability of hydrogen-ethanol mixture[J]. Distributed Energy, 2023, **8**(2): 61–66.

[55] Zhang L, Ma H H, Pan J, et al. Effects of hydrogen addition on the explosion characteristics of n-hexane/air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, **44**(3): 2029–2038.

[56] Gong X, Li H L, Bao X C, et al. Flame propagation dynamics in spherically expanding flames of gasoline-hydrogen blends[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **101**: 815–825.

[57] He X, Hou X H, Yang Q, et al. Study of laminar combustion characteristics of gasoline surrogate fuel-hydrogen-air premixed flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, **44**(26): 13910–13922.

[58] Guo H S, Neill W S. The effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of an n-heptane fuelled HCCI engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, **38**(26): 11429–11437.

[59] Liang W K, Liu Z R, Law C K. Explosion limits of H2/CH_4/O2 mixtures: Analyticity and dominant kinetics[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, **37**(1): 493–500.

[60] Grune J, Breitung W, Kuznetsov M, et al. Flammability limits and burning characteristics of CO – H2 – H_2O – CO_2 – N2 mixtures at elevated temperatures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, **40**(31): 9838–9846.

[61] Van den Schoor F, Norman F, Vandermeiren K, et al. Flammability limits, limiting oxygen concentration and minimum inert gas/combustible ratio of H2/CO/N2/air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, **34**(4): 2069–2075.

[62] Su B, Tan Y S, Hao R L, et al. Experimental and numerical investigation on the near flammability limits behavior of syngas/air mixtures: effect of H2/CO ratios and inert gas additions[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, **67**: 104155.

[63] Zhou Q, Cheung C S, Leung C W, et al. Explosion characteristics of bio-syngas at various fuel compositions and dilutions in a confined vessel[J]. Fuel, 2020, **259**: 116254.

[64] Skrinsky J. Influence of pressure and temperature on safety characteristics of syngas-air mixture produced by autothermal gasification technology[J]. Chemical Engineering Transactions, 2018, **65**: 133–138.

[65] Sun Z Y. Laminar explosion properties of syngas[J]. Combustion Science and Technology, 2020, **192**(1): 166–181.

[66] Xie Y L, Wang J H, Cai X, et al. Pressure history in the explosion of moist syngas/air mixtures[J]. Fuel, 2016, **185**: 18–25.

[67] Tran M V, Scribano G, Chong C T, et al. Experimental and numerical investigation of explosive behavior of syngas/air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, **43**(16): 8152–8160.

[68] Luo Z M, Zuo W K, Su B, et al. Explosion dynamics and energy dissipation in syngas/air mixtures diluted by inert gases[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2026, **172**: 110254.

[69] Yu M G, Yang X F, Zheng K, et al. Experimental study of premixed syngas/air flame deflagration in a closed duct[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, **43**(29): 13676–13686.

[70] Yu M G, Yang X F, Zheng K, et al. Experimental study of premixed syngas/air flame propagation in a half-open duct[J]. Fuel, 2018, **225**: 192–202.

[71] 王玮, 王宇, 寇江. CO\H2合成气层流火焰速度实验研究[J]. 自动化应用, 2022, **63**(8): 126–129, 134.
Wang W, Wang Y, Kou J. Experimental study on laminar flame velocity of CO\H2 syngas[J]. Automation Application, 2022, **63**(8): 126–129, 134.

[72] Cai X, Wang J H, Zhao H R, et al. Flame morphology and self-acceleration of syngas spherically expanding flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, **43**(36): 17531–17541.

[73] Zhao H R, Wang J H, Bian Z J, et al. Onset of cellular instability and self-acceleration propagation of syngas spherically expanding flames at elevated pressures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, **44**(51): 27995–28006.

[74] 阳旭峰. 合成气–空气预混爆炸火焰动力学特征及传播机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Yang X F. Study on flame and propagation dynamics of premixed syngas-air mixtures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[75] Zhang Y, Shen W F, Fan M, et al. Laminar flame speed studies of lean premixed H2/CO/air flames[J]. Combustion and Flame, 2014, **161**(10): 2492–2495.

[76] Piemsinlapakunchon T, Paul M C. Effect of syngas fuel

compositions on the occurrence of instability of laminar diffusion flame[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, **46**(10): 7573-7588.

[77] Li H M, Li G X, Sun Z Y, et al. Experimental investigation on laminar burning velocities and flame intrinsic instabilities of lean and stoichiometric H2/CO/air mixtures at reduced, normal and elevated pressures[J]. Fuel, 2014, **135**: 279-291.

[78] 李小东, 王晶禹, 刘庆明. 燃烧管中烟煤粉粉尘云传播参数的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2009, **9**(6): 164-167.
Li X D, Wang J Y, Liu Q M. Experimental investigation of propagation parameters through bituminous coal powder clouds in a combustion tube[J]. Journal of Safety and Environment, 2009, **9**(6): 164-167.

[79] 单麒源, 刘永立, 巩宪辉, 等. 采空区火灾多元可燃气体对CH_4爆炸极限的影响[J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, **34**(6): 829-833.
Shan Q Y, Liu Y L, Gong X H, et al. Influence of multiple combustible gases on explosion limit of CH_4 in goaf fires[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2024, **34**(6): 829-833.

[80] 罗振敏, 林京京, 郭正超, 等. 煤矿其他可燃气体对空气中甲烷爆炸极限的影响[J]. 中国安全科学学报, 2015, **25**(1): 91-97.
Luo Z M, Lin J J, Guo Z C, et al. Influence of various other flammable gases in coal mine on explosion limits of methane[J]. China Safety Science Journal, 2015, **25**(1): 91-97.

[81] 罗振敏, 刘利涛, 王涛, 等. C_2H_6、C_2H_4、CO与H2对甲烷爆炸压力及动力学特性影响[J]. 工程科学学报, 2022, **44**(3): 339-347.
Luo Z M, Liu L T, Wang T, et al. Effect of C_2H_6, C_2H_4, CO and H_2 on the explosion pressure and kinetic characteristics of methane [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, **44**(3): 339-347.

[82] 罗振敏, 王子瑾, 苏彬, 等. 多元可燃气体对CH_4爆炸及其自由基发射光谱影响试验[J]. 中国安全科学学报, 2020, **30**(4): 1-7.
Luo Z M, Wang Z J, Su B, et al. Influence of multi-component combustible gases on explosion characteristics and free radical emission spectrum of CH_4[J]. China Safety Science Journal, 2020, **30**(4): 1-7.

[83] 罗振敏, 高帅帅, 李逵, 等. 多元可燃性气体爆炸压力与中间产物发射光谱特性的耦合研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, **16**(1): 11-17.
Luo Z M, Gao S S, Li K, et al. Coupling research on explosion pressure of multi-component combustible gas and emission spectrum characteristics of intermediate products[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, **16**(1): 11-17.

[84] Luo Z M, Zhang F, Liu L T, et al. Effects of mixing CO and H_2 as main components on the explosion characteristics and dynamics properties of methane[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **49**: 166-177.

[85] Su B, Luo Z M, Deng J, et al. Comparative study on methane/air deflagration with hydrogen and ethane additions: Investigation from macro and micro perspectives[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, **174**: 561-573.

[86] 罗振敏, 刘利涛. 以氢气为主要成分的其他可燃气体对低浓度甲烷爆炸特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2019, **19**(1): 167-172.
Luo Z M, Liu L T. Impact of the various other inflammable gases on the explosion features of low concentration methane[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, **19**(1): 167-172.

[87] Yu K, Hu Y, He L F, et al. Experimental and numerical study on aerosol explosion characteristics and flame propagation behavior of hydrogen and gasoline spray mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **133**: 276-290.

[88] 余轲. 氢气/汽油云雾两相混合爆炸及火焰传播特性与机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2025.
Yu K. Study on the characteristics and mechanism of hydrogen/gasoline cloud two-phase mixed explosion and flame propagation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2025.

[89] Wang Y, Liu X L, Qi C. Experimental study on the explosion parameters of *n*-decane aerosol under saturated vapor pressure[J]. ACS Omega, 2024, **9**(6): 6381-6390.

[90] Ma Y W, Hu Y, Yu K. Two-phase explosion and flame propagation of gasoline spray/hydrogen mixture: a numerical study [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, **3158**(1): 012037.

[91] Xu Z Z, Sun H, Yang X X, et al. Study on the effect of hydrogen addition on the explosion characteristics of methanol spray[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2026, **251**: 156175.

[92] Yu X Z, Yu J L, Wang C Y, et al. Experimental study on the overpressure and flame propagation of hybrid hydrogen/aluminum dust explosions in a square closed vessel[J]. Fuel, 2021, **285**: 119222.

[93] Denkevits A, Hoess B. Hybrid H2/Al dust explosions in Siwek sphere[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, **36**: 509-521.

[94] Yu X Z, Yan X Q, Yu J L, et al. Effects of aluminum particle size distributions on the explosion behaviors of hydrogen/aluminum dust hybrid mixtures[J]. Powder Technology, 2022, **405**: 117548.

[95] 于小哲. 氢气/铝粉混合体系爆炸特性及火焰传播机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Yu X Z. Explosion characteristics and flame propagation mechanism of hydrogen/aluminum dust hybrid mixtures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[96] Zhang M G, Wang D C, Zhu Z Y, et al. Effect of hydrogen addition on the explosion intensity of magnesium powders at the relatively low-concentration[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, **167**: 109258.

[97] 王阳. 氢气/镁粉两相体系混合爆炸特性与机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
Wang Y. Investigation on hybrid explosion characteristics and mechanism of hydrogen/magnesium dust two-phase system[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.

[98] Tsai Y T, Huang G T, Zhao J Q, et al. Dust cloud explosion characteristics and mechanisms in MgH_2-based hydrogen storage materials[J]. AIChE Journal, 2021, **67**(8): e17302.

[99] Ji W T, Meng L X, Xiao H L, et al. On explosion overpressure behavior and flame propagation characteristics for hybrid mixture of hydrogen and micron-sized titanium dust in a semi-closed pipeline[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **169**: 151096.

[100] 罗振敏, 邓军, 郭晓波. 基于Gaussian的瓦斯爆炸微观反应机理[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, **27**(3): 325-328.
Luo Z M, Deng J, Guo X B. Microcosmic mechanism of gas explosion based on Gaussian[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2008, **27**(3): 325-328.

[101] 王秋红, 蒋夏夏, 代爱萍. 基于Gaussian的甲烷爆炸微观反应计算分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, **18**(6): 178-184.
Wang Q H, Jiang X X, Dai A P. Calculation and analysis on micro reaction of methane explosion based on Gaussian[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, **18**(6): 178-184.

[102] Su B, Luo Z M, Wang T, et al. Chemical kinetic behaviors at the chain initiation stage of CH_4/H2/air mixture[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **403**: 123680.

[103] Luo Z M, Su B, Li Q, et al. Micromechanism of the initiation of a multiple flammable gas explosion[J]. Energy & Fuels, 2019, **33**(8): 7738-7748.

[104] 罗振敏, 张江, 王涛. CO/CH_4链式爆炸反应机理研究[J]. 兵工学报, 2017, **38**(S1): 49-59.
Luo Z M, Zhang J, Wang T. Study of CO/CH_4 explosion chain reaction mechanism[J]. Acta Armamentarii, 2017, **38**(S1): 49-59.

[105] Li Y C, Bi M S, Li B, et al. Effects of hydrogen and initial pressure on flame characteristics and explosion pressure of methane/hydrogen fuels[J]. Fuel, 2018, **233**: 269-282.

[106] Faghih M, Gou X L, Chen Z. The explosion characteristics of methane, hydrogen and their mixtures: a computational study[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, **40**: 131-138.

[107] 彭世垚, 刘罗茜, 刘振翼, 等. 掺氢甲烷混合气体爆炸极限试验研究及动力学分析[J]. 安全与环境学报, 2026, **26**(2): 595-602.
Peng S Y, Liu L Q, Liu Z Y, et al. Experimental study and dynamic analysis on the explosion limit of hydrogen doped methane mixture gas[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, **26**(2): 595-602.

[108] Shi L, Meng X B, Wu Y. Numerical study on the propagation of CH_4/H2 flame in a pipeline under different H_2 enrichment conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, **423**: 138689.

[109] Dong H T, Li R Z, Zhao W B, et al. Chemical kinetics properties and the influences of different hydrogen blending ratios on reactions of natural gas[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, **41**: 102676.

[110] Sun G Z, Deng H X, Xu Z Z, et al. Experimental and simulation study of NH_3 - H2-Air flame dynamics at elevated temperature in a closed duct[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **50**: 48-61.

[111] Li Y C, Bi M S, Li B, et al. Explosion hazard evaluation of renewable hydrogen/ammonia/air fuels[J]. Energy, 2018, **159**: 252-263.

[112] 闫晨朝, 姜根柱, 王筱蓉. 氢气-乙醇-空气预混层流燃烧特性仿真研究[J]. 新能源进展, 2023, **11**(5): 450-456.
Yan C C /Z), Jiang G Z, Wang X R. Simulation study on laminar combustion characteristics of hydrogen-ethanol-air premix[J]. Advances in New and Renewable Enengy, 2023, **11**(5): 450-456.

[113] 陆皓炜, 姜根柱, 王筱蓉. 乙醇氢气预混燃料层流燃烧特性[J]. 南方能源建设, 2025, **12**(2): 134-144.
Lu H W, Jiang G Z, Wang X R. Laminar combustion characteristics of ethanol-hydrogen premixed fuel[J]. Southern Energy Construction, 2025, **12**(2): 134-144.

[114] Su B, Dong H W, Luo Z M, et al. Effects of H2/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.

[115] 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.

[116] 苏彬. 合成气爆燃特性及反应动力学研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
Su B. Research on the deflagration characteristics and kinetic behaviors of syngas-air mixture[D]. Xi′an: Xi′an University of Science and Technology, 2022.

[117] 罗振敏, 刘荣玮, 王超, 等. 多元混合气体对CH_4爆炸影响的反应动力学模拟[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, **40**(6): 1-9.
Luo Z M, Liu R W, Wang C, et al. Reaction kinetic simulation of the effect of multi-component mixed gas on CH_4 explosion[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, **40**(6): 1-9.

[118] 罗振敏, 罗传旭, 刘利涛, 等. 多元混合气体对瓦斯爆炸动力学特性影响研究[J]. 安全与环境学报, 2024, **24**(8): 2949-2960.
Luo Z M, Luo C X, Liu L T, et al. Study on the influence of multicomponent gases on the dynamic characteristics of gas explosion[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, **24**(8): 2949-2960.

[119] Luo Z M, Hao R L, Su B, et al. Flammability limits and near-limit kinetic behaviors of multi-component syngas: a combined experimental and numerical study[J]. Fuel, 2026, **405**: 136642.

[120] Ji W T, Wang Y, Yang J J, et al. Explosion overpressure behavior and flame propagation characteristics in hybrid explosions of hydrogen and magnesium dust[J]. Fuel, 2023, **332**: 125801.

[121] Lee M, Saeki R, Kim W. Numerical study of hydrogen addition effects on aluminum particle combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2022, **105**: 72-80.

[122] 董冰岩, 查裕学, 邹颖, 等. 球形压力容器中甲烷-氢气-空气爆炸过程数值模拟及实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, **19**(3): 157-163.
Dong B Y, Zha Y X, Zou Y, et al. Numerical simulation and experimental study of methane-hydrogen-air explosion process in spherical pressure vessel[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, **19**(3): 157-163.

[123] 宋宜彬. NH3-H2/CH4-Air预混气体爆炸实验与模拟研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2025. Song Y B. Experimental and simulation study on explosion of NH_3-H2/CH4-air premixed gas [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2025.

[124] Zhou G, Ji Y H, Kong Y, et al. Research on the explosion dynamics and mechanism of locally premixed methanol vapor/hydrogen blended gas in a semi-enclosed space: Effect of equivalent ratio and hydrogen blended ratio[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2026, **206**: 108288.

[125] Tran M V, Scribano G, Chong C T, et al. Simulation of explosion characteristics of syngas/air mixtures[J]. Energy Procedia, 2018, **153**: 131-136.

[126] Redlinger R. Numerical simulation of hybrid dust/gas explosion experiments in the standard 20-L sphere[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, **100**: 419-424.

[127] 王年华, 鲁鹏, 常兴华, 等. 基于机器学习的非结构网格阵面推进生成技术初探[J]. 力学学报, 2021, **53**(3): 740-751.
Wang N H, Lu P, Chang X H, et al. Preliminary investigation on unstructured mesh generation technique based on advancing front method and machine learning methods[J]. Chinese Journal of

Theoretical and Applied Mechanics, 2021, **53**(3): 740−751.

[128] 王年华, 鲁鹏, 常兴华, 等. 基于人工神经网络的非结构网格尺度控制方法[J]. 力学学报, 2021, **53**(10): 2682−2691.
Wang N H, Lu P, Chang X H, et al. Unstructured mesh size control method based on artificial neural network[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, **53**(10): 2682−2691.

[129] Xu R, Lyu H Q, Yu J, et al. Implicit geometry neural network for mesh generation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, **38**(4): 103315.

[130] Wu T F, Liu X J, An W, et al. A mesh optimization method using machine learning technique and variational mesh adaptation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, **35**(3): 27−41.

[131] Lock C, Hassan O, Sevilla R, et al. Meshing using neural networks for improving the efficiency of computer modelling[J]. Engineering with Computers, 2023, **39**(6): 3791−3820.

[132] Pelissier U, Parret−Fréaud A, Bordeu F, et al. Graph neural networks for mesh generation and adaptation in structural and fluid mechanics[J]. Mathematics, 2024, **12**(18): 2933.

[133] Bohn J, Feischl M. Recurrent neural networks as optimal mesh refinement strategies[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2021, **97**: 61−76.

[134] Han Y N, Gao J F, Wu Y, et al. Experimental and LES study of H2/CH_4 premixed gas deflagration under different obstacle conditions[J]. Applied Sciences, 2024, **14**(23): 10843.

[135] Liu X R, Cong L X, Han B, et al. Study on the coupled flame propagation dynamics of hydrogen/air deflagration in interconnected vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2026, **100**: 105933.

[136] Vanbersel B, Meziat Ramirez F A, Mohanamuraly P, et al. A systematic adaptive mesh refinement method for large eddy simulation of turbulent flame propagation[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2024, **112**(4): 1127−1160.

[137] Meziat Ramirez F A, Vanbersel B, Dounia O, et al. Numerical study of the flame acceleration mechanisms of a lean hydrogen/air deflagration in an obstructed channel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **89**: 224−232.

[138] Yuan S, Jiao Z R, Quddus N, et al. Developing quantitative structure − property relationship models to predict the upper flammability limit using machine learning[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, **58**(8): 3531−3537.

[139] Jiao Z R, Yuan S, Zhang Z R, et al. Machine learning prediction of hydrocarbon mixture lower flammability limits using quantitative structure−property relationship models[J]. Process Safety Progress, 2020, **39**(2): e12103.

[140] Park S, Bailey J P, Pasman H J, et al. Fast, easy−to−use, machine learning−developed models of prediction of flash point, heat of combustion, and lower and upper flammability limits for inherently safer design[J]. Computers & Chemical Engineering, 2021, **155**: 107524.

[141] Li J H, Liang W K, Han W H. Predicting the explosion limits of hydrogen−oxygen−diluent mixtures using machine learning approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **50**: 1306−1313.

[142] Qi Y Q, Liu J R, Pan Y, et al. Experimental and mechanism research on the upper flammability limit of H2/C_2H_5OH mixture at various temperatures and pressures[J]. Fuel, 2025, **386**: 134325.

[143] Qi Y Q, Pan Y, Liu S S, et al. Study on the lower flammability limit of H2/C_2H_5OH mixture based on chemical kinetics[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **52**: 739−751.

[144] Su B, Tan Y S, Zhang L D, et al. Prediction models for flammability limits of syngas/air mixtures based on machine learning approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **98**: 1356−1365.

[145] Junias J K, Shaanika E, Holtappels K, et al. Hydrogen mixtures flammability limits prediction using machine learning models[J]. Hydrogen Safety, 2026, **3**(1): 84−96.

[146] Li Y C, Yang S Y, Bi M S, et al. Evaluation of hydrogen−blended methane explosion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, **48**(80): 31400−31411.

[147] Li R Z, Zhang Y H, Jia Q S, et al. A study of the effect of hydrogen on methane deflagration characteristics in a square confined space [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **62**: 947−958.

[148] Qi Y Q, Ye R, Pan Y, et al. Experimental and mechanism research on the deflagration characteristics of H2/C_2H_5OH mixture under non−atmospheric conditions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, **196**: 106928.

[149] Li S, Gao Y K, Gao W, et al. Flame acceleration and explosion overpressure formation of hydrogen−methane−air mixture in an obstructed duct[J]. Fuel, 2027, **428**: 140462.

[150] Zheng K, Yu M G, Zheng L G, et al. Effects of hydrogen addition on methane−air deflagration in obstructed chamber[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, **80**: 270−280.

[151] Liu G L, Wang J, Zheng L G, et al. Effect of hydrogen addition on explosion characteristics of premixed methane/air mixture under different equivalence ratio distributions[J]. Energy, 2023, **276**: 127607.

[152] 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.

[153] Marangon A, Carcassi M N. Hydrogen − methane mixtures: Dispersion and stratification studies[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, **39**(11): 6160−6168.

[154] Yang W, Zhang K, Jiang B P, et al. Experimental study on the effect of diffusion time on non−uniform hydrogen explosion induced by leakage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **177**: 151614.

[155] 刘振翼, 刘婧怡. 密闭空间内非均匀预混氢气泄漏爆炸过程数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2026, **26**(2): 421−428.
Liu Z Y, Liu J Y. Numerical simulation of hydrogen−air explosions with volume fraction gradients in confined spaces[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, **26**(2): 421−428.

[156] Zhang H W, Guo J, Wang J G, et al. Effects of ignition position on the explosion of methane−air mixtures with concentration gradients[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, **85**: 105152.

[157] Wu J H, Wang J G, Guo J, et al. Effects of transverse concentration gradients on the vented explosion of methane−air mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, **86**: 105180.

[158] Zheng K, Song C, Song Z Y, et al. Experimental study on the explosion behavior of nonuniform hydrogen/methane/air mixtures in a duct[J]. Fuel, 2024, **368**: 131655.

[159] Liang W K, Law C K. Enhancing ammonia combustion using reactivity stratification with hydrogen addition[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, **39**(4): 4419–4426.

[160] Chi C, Inna V, Guan W, et al. Reactivity stratified flame to enhance ammonia combustion with hydrogen: Effects of temperature, pressure, downstream mixture, and molecular diffusion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2025, **41**: 105907.