

高压物理学报

双重异性障碍物下掺氢甲烷的燃爆压升效应

徐阳 李冕 李元兵 龙凤英

Pressure Rise Effect of Hydrogen-Methane Mixture Combustion under Dual Heterogeneous Obstacles

XU Yang, LI Mian, LI Yuanbing, LONG Fengying

引用本文:

徐阳, 李冕, 李元兵, 等. 双重异性障碍物下掺氢甲烷的燃爆压升效应[J]. 高压物理学报, 2025, 39(5):055201. DOI: 10.11858/gywlb.20240944

XU Yang, LI Mian, LI Yuanbing, et al. Pressure Rise Effect of Hydrogen-Methane Mixture Combustion under Dual Heterogeneous Obstacles[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(5):055201. DOI: 10.11858/gywlb.20240944

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240944>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多种材质障碍物对甲烷-氢气预混燃气的促爆影响

Effect of Various Material Obstacles on the Promoting Explosion of Methane-Hydrogen Premixed Gas

高压物理学报. 2024, 38(1): 015202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230682>

丝瓜络对甲烷/空气预混气体的阻火抑爆性能

Fire and Explosion Suppression Performance of Luffa Sponge in Premixed Methane/Air Gas

高压物理学报. 2021, 35(6): 065202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210778>

典型固体抑爆剂对乙炔-空气的抑爆特性

Inhibition Characteristics of Typical Solid Explosion Suppressors on Acetylene-Air Explosion

高压物理学报. 2022, 36(6): 065201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220580>

氢气比例和点火能量对CH₄-H₂混合气体爆炸强度影响的实验研究

Experimental Study of the Hydrogen Proportion and Ignition Energy Effects on the CH₄-H₂ Mixture Explosion Intensity

高压物理学报. 2020, 34(1): 015201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190803>

H型巷道内采用不同布置方式的双爆源瓦斯爆炸传播特性

Propagation Characteristics of Dual Explosive Sources Gas Explosion in Different Arrangements in H-Type Tunnel

高压物理学报. 2024, 38(2): 025201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230760>

圆柱形障碍物对2H₂+O₂+nAr预混气体的再起爆实验研究

Experimental Study on Re-initiation of 2H₂+O₂+nAr Premixed Gas by Cylindrical Obstacle

高压物理学报. 2023, 37(5): 055202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230672>

双重异性障碍物下掺氢甲烷的燃爆压升效应

徐 阳^{1,2}, 李 晁³, 李元兵^{1,2}, 龙凤英⁴

- (1. 重庆安全技术职业学院安全监督管理学院, 重庆 404121;
2. 重庆安全技术职业学院安全职业教育研究所, 重庆 404121;
3. 重庆安全技术职业学院建筑与环境安全学院, 重庆 404121;
4. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 气体燃爆灾害特性是国内外研究的热点和重点, 研究复杂约束条件下的燃爆特性极具意义。针对刚性障碍物和柔性障碍物, 通过实验探究了长直形管道中双重异性障碍物下掺氢甲烷气体的燃爆过程。结果表明: 较无障碍物环境, 双重障碍物对火焰速度、爆炸压力以及爆炸强度指数的影响表现为随柔性障碍物阻塞率的提高和掺氢的置入而提升, 并且爆炸压力和爆炸强度指数的增幅高于火焰速度的增幅。在掺氢和双重障碍物的共同作用下, 火焰接触速度增幅可达 176.51%, 最大速度增幅达 316.40%。双重障碍物导致上游区域出现压力先升后降现象, 下游区域的压力振荡明显; 掺氢后, 与无障碍环境相比, 管内最大爆炸压力增幅可达 1280.9%, 最大爆炸强度指数提升至 167.65 倍。在约束设施布局工程项目中, 应首选较小阻塞率的柔性障碍物, 以有效减轻爆炸危害。

关键词: 气体燃爆; 双重障碍物; 火焰速度; 爆炸压力; 爆炸强度指数

中图分类号: O382.1; O521.9

文献标志码: A

当前, 气体爆炸事故影响我国多种行业的安全发展, 气体爆炸灾害效应仍然是广大科研工作者的研究重点。统计显示, 仅 2024 年上半年, 我国发生的燃气事故累计 181 起, 造成 27 人死亡、158 人受伤^[1]。受限空间较开敞空间更易积聚气体, 气体泄露后与空气混合, 达到爆炸极限后, 与点火能接触即可发生爆炸^[2-3]。因而, 爆炸事故多发生于厂房、地下空间等受限空间^[4-6]。气体爆炸也易受空间内多种约束条件(如障碍物)的影响, 造成显著的促爆效应^[7-8], 导致障碍物环境中的气体爆炸危害程度显著高于无障碍物环境^[9-10]。

已有的研究报道大多将障碍物看作理想的刚体, 忽略了障碍物的物质属性及其在爆炸环境中的表现对爆炸危害的影响。为此, 学者们将气体爆炸环境中能够产生形变、弯曲、倾倒等效应的物体定义为柔性障碍物^[11], 反之, 则称为刚性障碍物, 并分别开展了爆炸特性研究。对于刚性障碍物对气体爆炸特性的影响: 徐阿猛等^[12]发现, 爆炸火焰波在经过不同刚性障碍物时均会发生明显绕流, 加速火焰波传播, 并且障碍物尺寸越大, 爆炸压力峰值越高; Xiu 等^[13]、Wang 等^[14]、Duan 等^[15]的研究表明, 增加障碍物数量时, 湍流强度与压力损失之间存在竞争机制, 火焰速度及爆炸压力与障碍物数量呈正相关; 雷桐桐^[16]发现, 随着障碍物数量的增加, 火焰速度和超压峰值的增幅逐渐减小。对于柔性障碍物对气体爆炸特性的影响: 王哲石^[17]发现, 膜状柔性障碍物越接近爆炸火焰和冲击波, 所受合力越大, 致使障碍物产生拉伸, 并发生类锥形形变; 焦一飞等^[18]验证了促爆强度与障碍物材质的相关性, 得出爆炸强度指数与柱

* 收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2025-01-09

基金项目: 中国高校产学研创新基金-新一代信息技术创新项目(2021ITA08007); 重庆市职业教育教学改革研究项目(Z2241166)

作者简介: 徐 阳(1988—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事风险评估、矿山安全等灾害防治技术研究。

E-mail: 1027877851@qq.com

状柔性障碍物的弯曲强度成正比。另外, 研究显示, 柔性障碍物在爆炸场域内的弯曲表现导致不同类型的流场分离现象, 阻碍剪切层重新附着在障碍物上, 从而降低爆炸危害^[19-21]。

掺氢天然气作为氢能源的主流利用形式之一, 能够在确保安全利用的同时, 实现氢能源和天然气能源的有效利用, 我国如国家电投-辽宁朝阳天然气掺氢示范现场等项目的掺氢比例已达 10%^[22]。天然气的主要成分是甲烷, 因此, 掺氢甲烷的燃烧和爆炸特性成为爆炸防治领域的研究重点。有研究者提出, 将燃气管线并入综合管网以实现运输至各个终端^[23-25]。然而, 针对复杂的管廊输送工程, 其内部设定的固定(刚性)和非固定式(柔性)多重约束设施将加剧爆炸场域内火焰、流场、压力荷载等的演化特性。工程中用于支撑的固定结构的尺寸通常较非固定结构大, 对于管廊这类燃爆事故场所, 柔性管线系统、固定梁结构、可移动标志牌以及固定式钢结构等不同类型的部件往往位于管廊内部, 在这些双重异性特征障碍物的耦合作用下, 气体爆炸特性差异尚未予以揭示, 为燃爆防治工作带来了难题。为此, 本研究综合考虑管廊的实际场景, 选用阻塞率为 0.6 的刚性障碍物, 探究刚性和柔性两种不同物质属性的障碍物下掺氢甲烷气体的爆炸特性, 以期为爆炸安全设施布局提供理论和数据支撑。

1 实 验

1.1 实验平台搭建

如图 1 所示, 实验平台包括爆炸测试管道、供气系统、压力采集系统、火焰数据采集系统。爆炸测试管道的材质为透明有机玻璃, 尺寸为 100 cm×10 cm×10 cm。供气系统包含 1 个装有甲烷气瓶(甲烷纯度 99.99%)和氢气气瓶(氢气纯度 99.99%)的防爆储柜、1 个圆柱形空气压缩机、3 个额定流量为 5 L/min 的质量流量计。压力采集系统由 2 个 PCB 压电式传感器、冲击波测试仪、压力采集主机和软件 Tytest Date Veiw 组成, 传感器的采样频率为 50 kHz。火焰数据采集系统包含高速摄像机(Phantom V710L)、火焰采集主机以及软件 PCC 3.8, 其中 PCC 3.8 的采集频率为 2000 幅/秒, 分辨率设为 1280×480 像素。单次实验中火焰和压力的采样总时间均设置为 200 ms。

图 2 显示了实验工况。定义甲烷体积分数(φ_{CH_4})为甲烷占容器内总混合物(甲烷和空气)的体积分数, 设定为 9.5%; 定义掺氢比为氢气占容器内注入的混合燃料(甲烷和氢气)的体积分数, 设定为 10%。以无障碍物环境工况作为空白对照; 首先考虑同种燃料浓度中刚性障碍物与柔性障碍物混合环境中甲烷的燃爆特性随柔性障碍物阻塞率(障碍物高度与管道高度之比)的变化, 其中, 刚性障碍物的阻塞率(b_r)固定为 0.6, 柔性障碍物的阻塞率(b_f)以 0.2 的梯度变化; 而后, 考察在同种刚性障碍物与柔性障碍物组合环境中掺氢对甲烷燃爆特性的影响。障碍物的安装位置参考文献 [10, 15], 即刚性障碍物距点火端 40 cm, 柔性障碍物距点火端 50 cm。按照图 2 所列工况开展实验, 为减少实验误差, 每组实验进行 3 次。

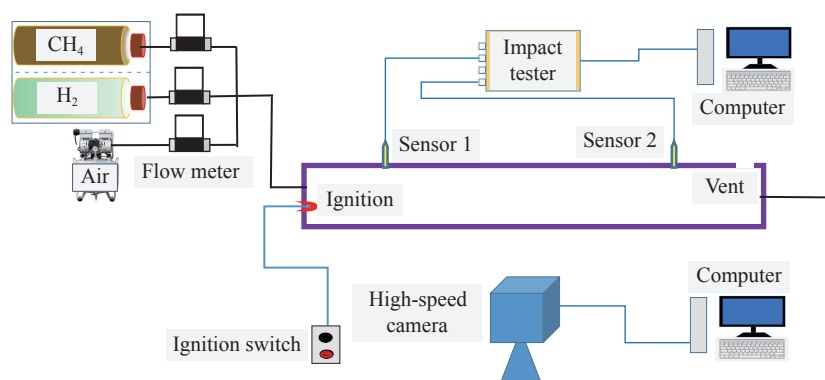


图 1 实验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental platform

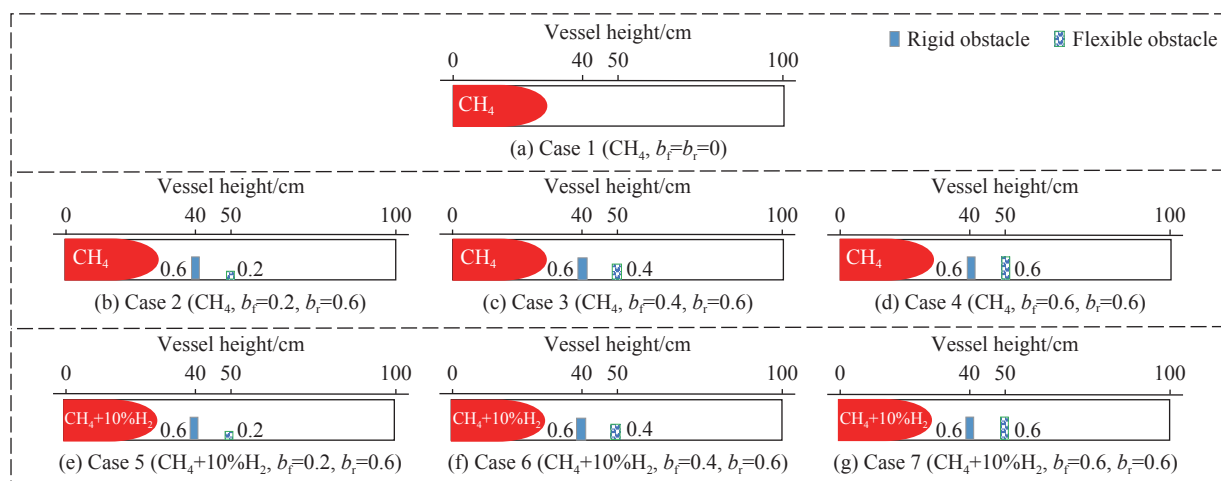


图 2 实验工况示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of experimental conditions

2 实验结果与讨论

2.1 火焰结构

图 3 显示了无障碍物工况下火焰的结构变化。可以看出：火焰结构可以分为 4 个阶段，即半球形阶段(5.0~10.0 ms)、指形阶段(20.0~35.0 ms)、平面火焰阶段(40.0~45.0 ms)、郁金香形火焰阶段(65.0~110.0 ms)；110.0 ms 时，火焰传至右端泄爆口。Yu 等^[20]发现，距点火端 40 cm 处压力促进机制最显著，柔性障碍物在一定程度上降低了燃爆风险。为此，在刚性障碍物的基础上引入柔性障碍物，探究柔性障碍物对燃烧和爆炸特性的影响，结果如图 4 所示。从图 4 可以明显看到，双重障碍物对火焰早期形状几乎无影响，火焰仍然呈球形和指形，只是这两个阶段的起始时间较图 3 有所延迟。这主要归因于甲烷燃爆冲击波撞击刚性障碍物时，中下部冲击波几乎完全反射，反作用于火焰发育过程，抑制火焰传播。在双重障碍物作用下，火焰传至右侧泄爆口处的时间提前，较图 3 所示时间分别提前 57.5、59.0、61.0 ms；随着柔性障碍物

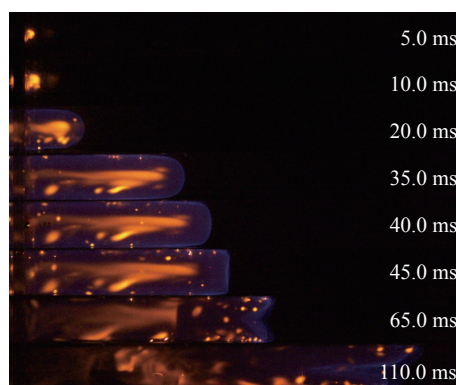


图 3 无障碍物条件(工况 1)下甲烷燃爆火焰结构变化

Fig. 3 Structural changes of methane explosion flame under obstacle-free condition (Case 1)

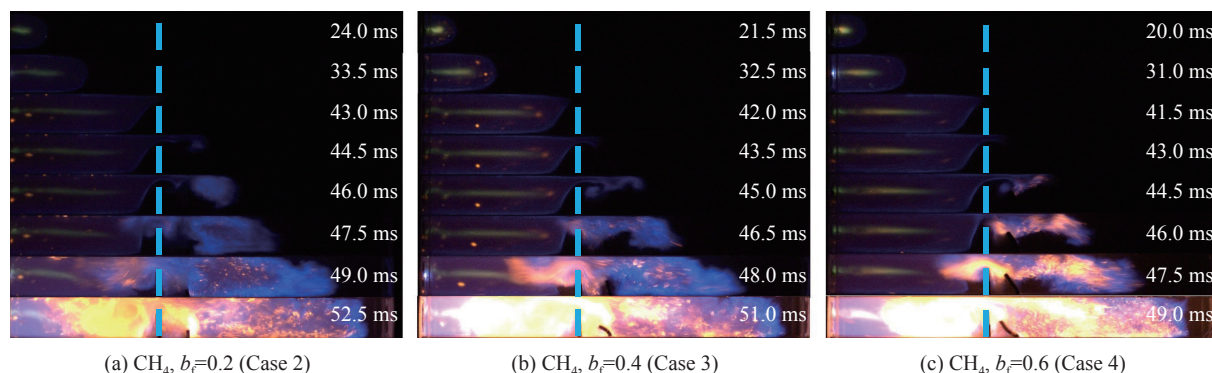


图 4 刚柔障碍物工况下甲烷燃爆火焰结构变化

Fig. 4 Structural changes of methane explosion flame under rigid-flexible obstacle conditions

阻塞率的增加, 火焰锋面传至泄爆口的时间逐渐缩短, 且相差时间间隔较短(1~2 ms)。柔性障碍物的阻塞率越大, 对火焰和流场的扰动越强烈(柔性障碍物的弯曲和倾倒导致爆炸环境中柔性障碍物的实际阻塞率总是小于 0.6), 说明刚性障碍物对火焰的传播仍占主导作用^[14, 19]。

图 5 显示了刚柔双重障碍物工况下掺氢甲烷燃爆火焰结构变化。对比图 4 和图 5 可知, 氢气的掺入增加了甲烷的燃烧效率, 在双重障碍物工况下, 球形和指形火焰阶段的时间提前, 但较无障碍物工况有所延迟, 此时障碍物的反射冲击波效应占据主导作用。火焰到达刚性障碍物上方时, 中下部火焰发育被抑制, 上部火焰受到的反射作用较弱, 这种差异导致拉伸现象形成, 火焰的拉伸效应随着氢气的掺入有所加剧, 且火焰尖端出现尺寸各异的涡旋, 标志着火焰由各向同性阶段转变为各向异性阶段, 即火焰出现涡旋反向回流燃烧至管内上游区域。随着时间的进行, 掺氢也导致同一双重障碍物工况下火焰传递至右侧泄爆口的时间提前。

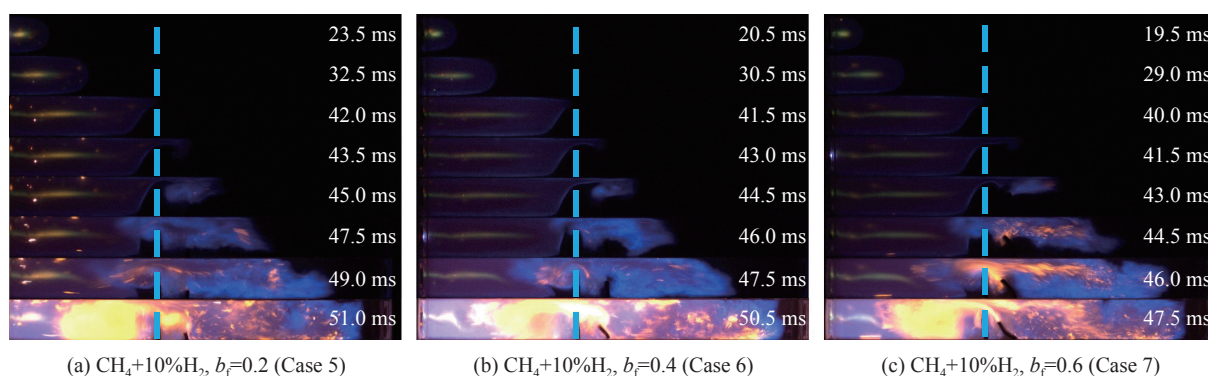


图 5 刚柔障碍物工况下掺氢甲烷燃爆火焰结构变化

Fig. 5 Structural changes of hydrogen-methane mixture explosion flame under rigid-flexible obstacle conditions

2.2 火焰速度

根据 7 种工况下的火焰径向传播距离计算火焰锋面的传播速度和火焰前锋位置的变化过程, 结果如图 6 所示。定义火焰传播至刚性障碍物上方时的速度为接触速度, 图 7 显示了不同工况下接触速度(v_c)和最大速度(v_{max})的对比。可以看出, 较无障碍物工况, 双重障碍物的置入大幅缩短了火焰传播时

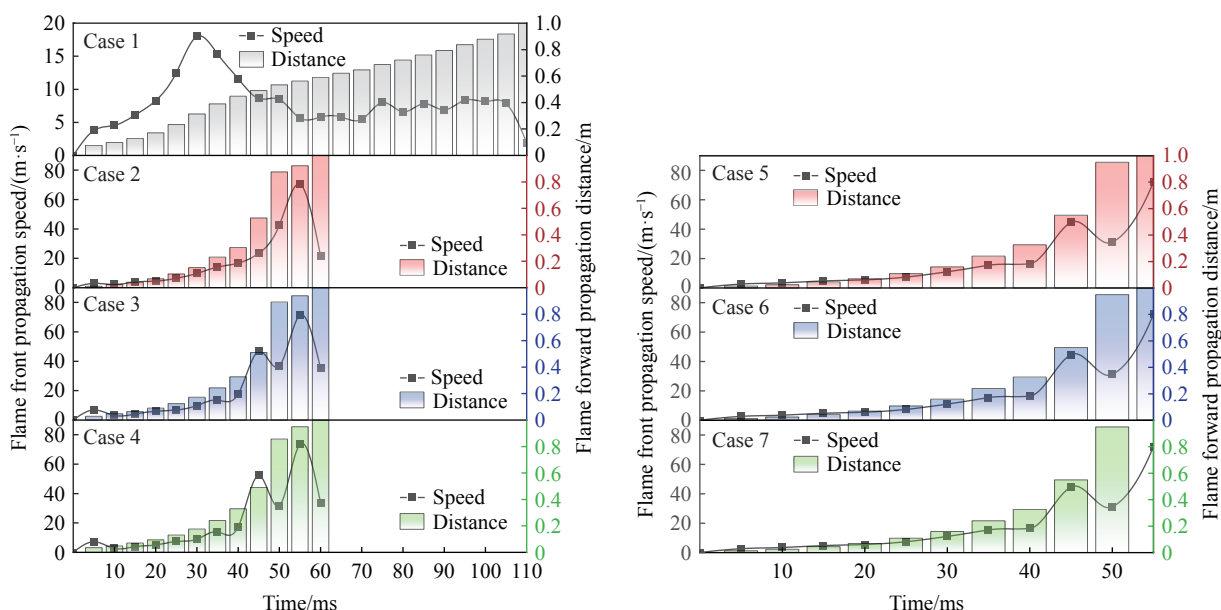


图 6 各工况下火焰锋面传播速度和火焰前锋位置随时间的变化

Fig. 6 Changes in flame front propagation speed and flame front position with time under all conditions

间, 纯甲烷(未掺氢)燃爆火焰传至右侧泄爆口所需时间约 60 ms, 而掺氢甲烷则需要约 55 ms。结合图 6 和图 7 可以看出, 无障碍物工况中接触速度与最大速度一致, 均出现在距点火端 40 cm 处。甲烷燃爆的接触速度随着柔性障碍物阻塞率的增加而增大, 较无障碍物工况, 分别提高 139.18%、158.23%、165.99%; 掺氢则加速接触速度的变化, 较无障碍物工况, 分别提高 143.93%、160.25%、176.51%。采用火焰锋面的最大速度衡量火焰传播过程快慢。由图 7 可知, 对于同一燃料组分条件下的最大锋面速度, 双重障碍物工况较无障碍物工况分别提高 296.18%、301.12%、313.66%, 与接触速度相似, 掺氢对火焰最大速度的贡献也有所增加, 较无障碍物工况下的最大速度分别增加 298.52%、305.45%、316.40%。以上火焰速度数据表明, 刚柔障碍物混置条件下, 随着柔性障碍物阻塞率的增加, 火焰传播速度加快, 柔性障碍物对火焰传播过程的作用越显著, 但仍以刚性障碍物的阻塞效应为主导。

2.3 压力变化趋势及峰值变化

设管道内距点火端 0~50 cm 为上游区域, 距点火端 50~100 cm 为下游区域, 传感器 1 测量上游压力变化, 传感器 2 测量下游压力变化。图 8 为不同工况下上游和下游区域的压力时程曲线。管内压力经历 3 个阶段: 初始压力上升阶段、最大爆炸压力形成和衰减阶段、终端压力回升阶段。较无障碍物

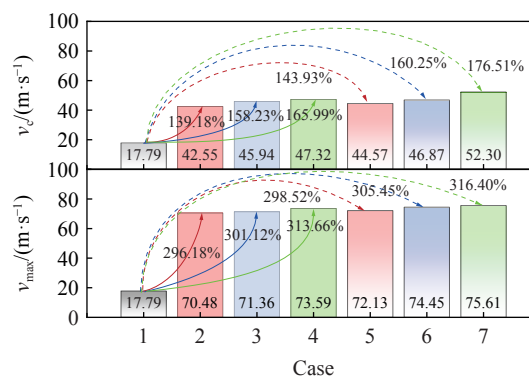


图 7 不同工况下接触速度(v_c)与最大速度($v_{\max}$)的关系

Fig. 7 Relationship between contact speed (v_c) and maximum speed ($v_{\max}$) under different conditions

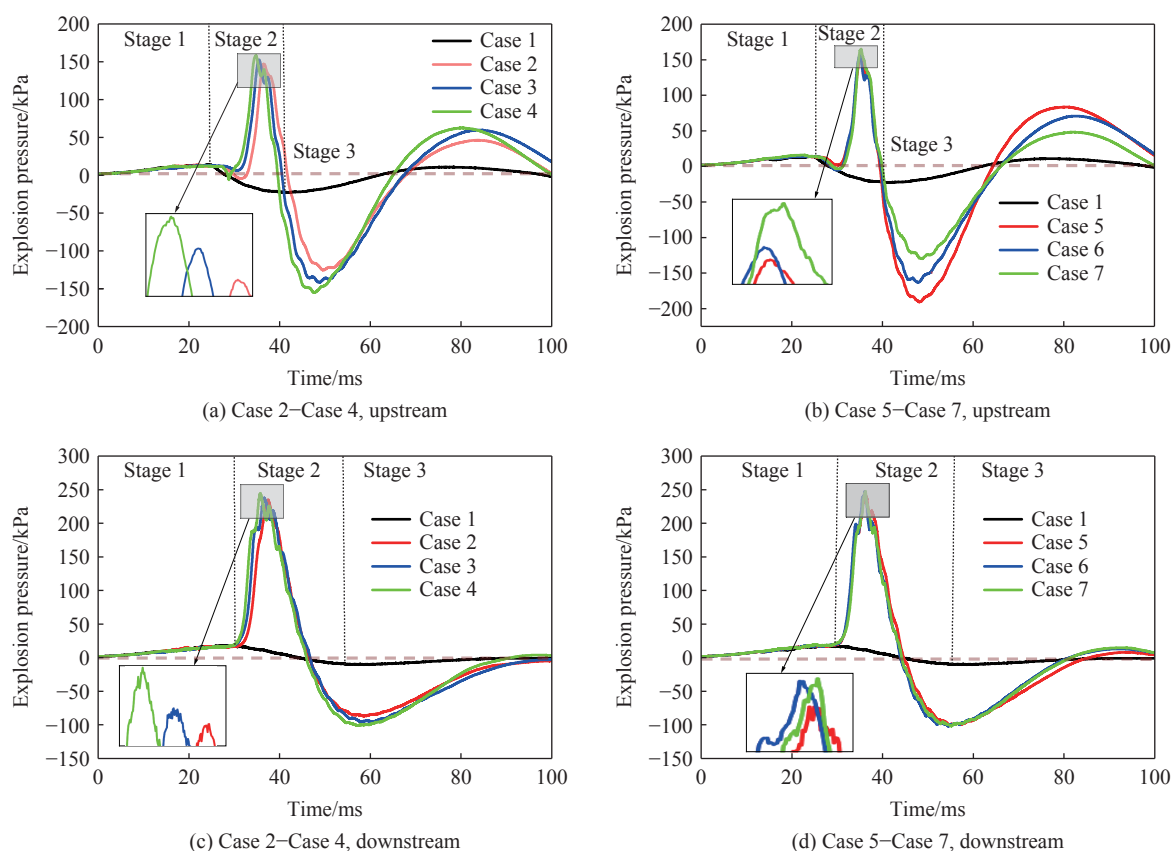


图 8 不同工况下爆炸压力随时间的变化

Fig. 8 Deflagration pressure versus time under different experimental conditions

工况, 双重障碍物影响最大爆炸压力形成前的阶段性过程, 表现为最大爆炸压力($p_{\max}$)形成前爆炸压力先升后降, 甚至出现负压。与上游区域的峰值压力相比, 下游的顶峰部位振荡现象更为明显, 且下游区域的峰值压力高于上游区域的峰值压力。图 9(a) 给出了双重障碍物下甲烷与掺氢甲烷较无障碍物工况(工况 1)下管内最大爆炸压力的对比。结合图 8 和图 9 可得, 上游区域的爆炸压力远小于下游区域的爆炸压力。管内最大爆炸压力分布与火焰速度的表现一致: 同一燃料浓度下, 爆炸压力随着柔性障碍物阻塞率的增加而增大; 无障碍物工况下, 上、下游区域的最大爆炸压力分别为 14.42、18.12 kPa; 柔性障碍物阻塞率为 0.2 的工况下, 上、下游区域的最大爆炸压力分别提高了 919.00% 和 1210.93%。随着氢气的掺入, 最大爆炸压力有所提升, 在柔性障碍物阻塞率为 0.2 的条件下, 掺氢甲烷的上、下游最大爆炸压力增幅是无障碍环境下的 971.22%、1263.02%, 且最大爆炸压力随着柔性障碍物阻塞率的增加而增大, 阻塞率为 0.6 时达到最大, 增幅分别为 1117.27%、1280.85%。

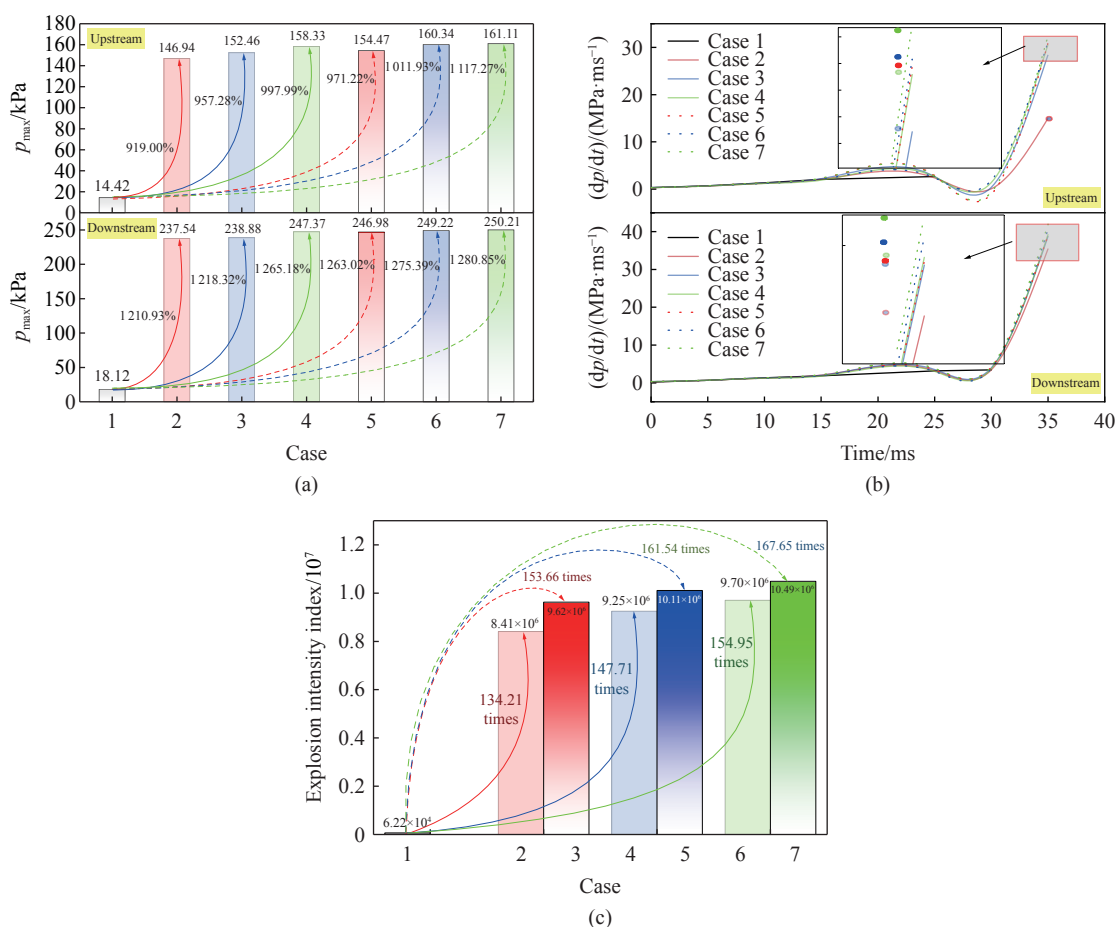


图 9 上游和下游区域的最大爆炸压力、压升率及爆炸强度指数的对比

Fig. 9 Comparison of the maximum explosion pressure, pressure rise rate, and explosion intensity index

从图 9(a) 还可以看出, 双重障碍物对爆炸压力的增幅效果远高于对火焰速度的增幅效果。因此, 探究爆炸压力的提升过程可为燃爆危害防控提供借鉴。以 5 ms 为时间间隔, 得到从零时刻到最大爆炸压力时刻的压升率(dp/dt)变化曲线, 如图 9(b) 所示。无障碍物工况下, 上、下游区域的压升率变化近似为直线; 双重障碍物工况下, 压升率曲线与爆炸压力曲线的表现一致, 最大压升率随着柔性障碍物阻塞率的增加而增大, 并且掺氢加速了管内燃烧效率, 缩短了压力上升过程, 这也是图 8 和图 9(a) 中压力峰值出现的原因。Xiao 等^[9]、Cui 等^[26] 提出用爆炸强度指数(最大压升率与最大爆炸压力的乘积)衡量爆炸危害程度。不同工况的爆炸强度指数如图 9(c) 所示。可以看出, 双重障碍物对于降低管内爆炸危害程度做出了主要贡献, 氢气则在此基础上发挥了进一步的促进作用, 同一燃料浓度下后置柔性障碍物阻塞率为 0.6 时爆炸强度指数最大, 是无障碍物工况下的 154.95 倍, 而掺氢后则提升至 167.65 倍。

2.4 压升效应演化机制

如图10所示,在上游区域,压力演化的第1阶段是由于燃烧,燃烧热、冲击波与球形火焰一起向右传播,下部冲击波受到刚性障碍物的反射从而阻碍火焰传播,上部火焰受障碍物的反射作用较弱,上下部所受的冲击波作用诱导火焰出现拉伸效应。伴随着上部区域燃料的消耗以及冲击波挤压燃料将燃料输送至下游,上游区域的压力降低,甚至出现负压,如图8(a)所示。在第2阶段,火焰和冲击波越过障碍物上方,在刚性障碍物与柔性障碍物之间形成冲击波和高压气穴,引起更强烈的反射波,带动燃料反向运输至上游区域,导致压力逐渐增大并形成最大爆炸压力,随后燃料和空气的消耗以及冲击波和火焰由泄爆口流出[27]诱发压力峰值下降,火焰传播过程伴随着柔性障碍物的扰动,表现为柔性障碍物的阻塞率越大,扰动越明显,压力峰值亦如此。第3阶段是压力回升阶段,表现为压力的平衡条件,随着管内燃烧爆炸过程的持续,流向外界的冲击波和产物使压力下降,外界压力迫使空气向管内输送[28]。在下游区域,3个阶段的形成过程中总是伴随着障碍物扰动和燃料集聚,火焰和冲击波持续存在,因此,最大爆炸压力出现前并未出现压力下降阶段。

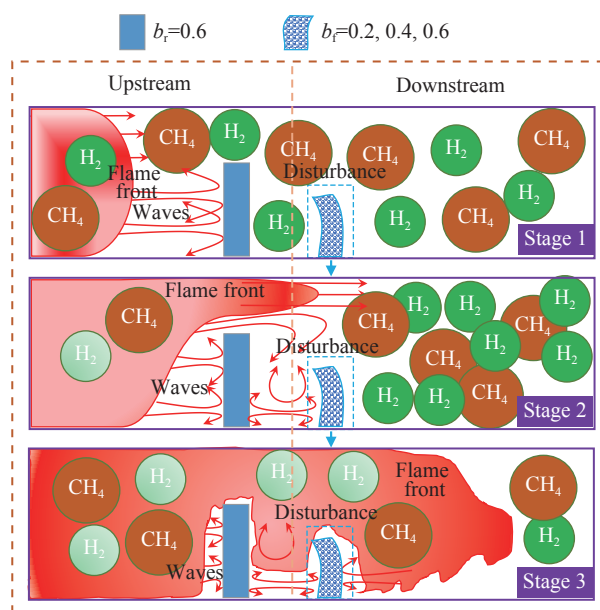


图10 管内压升效应的演化机制

Fig. 10 Evolution mechanism of pressure rise effect inside the pipe

3 结 论

通过实验探究了双重异性障碍物下掺氢甲烷的燃爆压升效应,系统分析了火焰结构、火焰传播速度、爆炸压力、压升率等参数,揭示了其演化机制,得到如下主要结论。

(1) 双重障碍物导致球形、指形、平面形和郁金香形火焰锋面延迟形成,但火焰锋面传播至泄爆口的时间提前,且柔性障碍物阻塞率为0.6时传播速度最大,与无障碍物工况相比,火焰接触速度增幅达165.99%,最大速度增幅为313.66%,掺氢后火焰接触速度增幅为176.51%,最大速度增幅为316.40%。

(2) 双重障碍物影响爆炸压力的阶段性变化,上游区域出现压力先升后降现象,下游区域压力振荡明显,最大爆炸压力增大。随着柔性障碍物阻塞率的增加,管内最大爆炸压力增大,掺氢可提升最大爆炸压力。当柔性障碍物阻塞率为0.6时,最大爆炸压力最大,掺氢后,与无障碍物工况相比,上游区域增幅达1117.27%,下游区域增幅达1280.85%,表明双重障碍物对爆炸超压的影响高于对火焰速度的影响。

(3) 双重障碍物对于降低爆炸危害程度的贡献随柔性障碍物阻塞率的增加而增大,氢气的作用相对较弱。后置柔性障碍物的阻塞率越大,爆炸强度指数越大;柔性障碍物阻塞率为0.6时,较无障碍物工况,同一燃料浓度下爆炸强度指数的增幅倍数约为161.54,掺氢后提升至167.65倍。

(4) 在实际的构筑物建设过程中,当刚性障碍物的阻塞率较大时,应尽可能地确保后置柔性障碍物的阻塞率小于刚性障碍物,从而实现燃爆安全设施的有效性,降低燃爆事故灾害后果。

参考文献:

- [1] 中国城市燃气协会安全管理工作委员会. 全国燃气事故分析报告 (2024 年上半年报告) [EB/OL]. (2024-10-09)[2024-11-02]. https://m.gmw.cn/2024-10/22/content_1303877758.htm.
The Safety Management Working Committee of China Urban Gas Association. National gas accident analysis report (first half

- of 2024) [EB/OL]. (2024-10-09)[2024-11-02]. https://m.gmw.cn/2024-10/22/content_1303877758.htm.
- [2] ASTBURY G R. A review of the properties and hazards of some alternative fuels [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008, 86(6): 397–414.
- [3] CAI P, LI M Z, LIU Z Y, et al. Experimental and numerical study of natural gas leakage and explosion characteristics [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(29): 25278–25290.
- [4] KANG Y, MA S Y, SONG B X, et al. Simulation of hydrogen leakage diffusion behavior in confined space [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 53: 75–85.
- [5] YANG N N, DENG J, WANG C P, et al. High pressure hydrogen leakage diffusion: research progress [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50: 1029–1046.
- [6] KINDRACKI J, KOBIERA A, RARATA G, et al. Influence of ignition position and obstacles on explosion development in methane-air mixture in closed vessels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4/5/6): 551–561.
- [7] QIAO Z L, MA H, LI C. Influence of change in obstacle blocking rate gradient on LPG explosion behavior [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, 16(2): 104496.
- [8] LI D, ZHANG Q, MA Q J, et al. Influence of built-in obstacles on unconfined vapor cloud explosion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 449–456.
- [9] XIAO G Q, WANG S, MI H F, et al. Analysis of obstacle shape on gas explosion characteristics [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 161: 78–87.
- [10] DUAN Y L, LEI S L, LI Z H, et al. Study on flexible/rigid protection mechanism of hydrogen/methane premixed gas explosion in urban underground space [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 182: 808–822.
- [11] LI Q, CICCARELLI G, SUN X X, et al. Flame propagation across a flexible obstacle in a square cross-section channel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(36): 17480–17491.
- [12] 徐阿猛, 陈学习, 贾进章. 障碍物对瓦斯爆炸冲击波传播的影响研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(9): 96–101.
- XU A M, CHEN X X, JIA J Z. Effects of obstacles on gas explosion shock wave propagation [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(9): 96–101.
- [13] XIU Z, LIU Z Y, LI P L, et al. Effects of combined obstacles on deflagration characteristics of hydrogen-air premixed gas [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(79): 31008–31021.
- [14] WANG S, XIAO G Q, FENG Y, et al. Investigation of premixed hydrogen/methane flame propagation and kinetic characteristics for continuous obstacles with gradient barrier ratio [J]. *Energy*, 2023, 267: 126620.
- [15] DUAN Y L, LONG F Y, HUANG J, et al. Effects of porous materials with different thickness and obstacle layout on methane/hydrogen mixture explosion with low hydrogen ratio [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(63): 27237–27249.
- [16] 雷桐桐. 障碍物影响气体爆炸特性的研究进展 [C]//2024 年度灭火与应急救援技术学术研讨会. 珠海: 中国人民警察大学, 中国消防协会, 2024: 30–33.
- [17] 王哲石. 密闭管道内柔性障碍物对可燃气体爆炸特性的影响机制研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- WANG Z S. Effect mechanism of flexible obstacles on gas explosion characteristics in a confined [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023.
- [18] 焦一飞, 熊晓曼, 任昊, 等. 多种材质障碍物对甲烷-氢气预混燃气的促爆影响 [J]. *高压物理学报*, 2024, 38(1): 015202.
- JIAO Y F, XIONG X M, REN H, et al. Effect of various material obstacles on the promoting explosion of methane-hydrogen premixed gas [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(1): 015202.
- [19] LI Q, SUN X X, WANG X, et al. Experimental study of flame propagation across flexible obstacles in a square cross-section channel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(7): 3944–3952.
- [20] YU S W, DUAN Y L, LONG F Y, et al. The influence of flexible/rigid obstacle on flame propagation and blast injuries risk in gas explosion [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023, 45(2): 4520–4536.
- [21] 张静雯, 彭澳, 陈先锋, 等. 扰动作用下爆轰形成机理 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(6): 062303.
- ZHANG J W, PENG A, CHEN X F, et al. Mechanisms of detonation initiation under the effect of perturbation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(6): 062303.
- [22] 张立业, 邓海涛, 孙桂军, 等. 天然气随动掺氢技术研究进展 [J]. *力学与实践*, 2022, 44(4): 755–766.
- ZHANG L Y, DENG H T, SUN G J, et al. Research progress of natural gas follow-up hydrogen mixing technology [J].

- Mechanics in Engineering*, 2022, 44(4): 755–766.
- [23] ARIARATNAM S T, LUEKE J S, MICHAEL J K. Current trends in pipe bursting for renewal of underground infrastructure systems in North America [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 39: 41–49.
- [24] TONG Z X, FANG J. Comprehensive evaluation of PPP project construction for urban underground pipe gallery [C]// *Proceedings of International Conference on Construction and Real Estate Management 2019*. Reston, 2019: 425–433.
- [25] WANG Z H, CHEN X D. Risk management of urban pipe gallery based on system dynamics [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 693(1): 012003.
- [26] CUI Y Y, WANG Z R, ZHOU K B, et al. Effect of wire mesh on double-suppression of CH₄/air mixture explosions in a spherical vessel connected to pipelines [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 45: 69–77.
- [27] 曹玉忠, 卢泽生, 管怀安, 等. 抗爆容器内爆炸流场数值模拟 [J]. *高压物理学报*, 2001, 15(2): 127–133.
CAO Y Z, LU Z S, GUAN H A, et al. Numerical simulations of blast flow-fields in closed blast-resistant containers [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(2): 127–133.
- [28] WANG Z S, ZHANG Z L, YU J, et al. The effect of flexible obstacles with different thicknesses on explosion propagation of premixed methane-air in a confined duct [J]. *Heliyon*, 2023, 9(8): e18803.

Pressure Rise Effect of Hydrogen-Methane Mixture Combustion under Dual Heterogeneous Obstacles

XU Yang^{1,2}, LI Mian³, LI Yuanbing^{1,2}, LONG Fengying⁴

(1. *Safety Supervision and Management School, Chongqing Vocational Institute of Safety & Technology, Chongqing 404121, China;*

2. *Safety Vocational Education Research Institute, Chongqing Vocational Institute of Safety & Technology, Chongqing 404121, China;*

3. *School of Architecture and Environmental Safety, Chongqing Vocational Institute of Safety & Technology, Chongqing 404121, China;*

4. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)*

Abstract: The disaster characteristics of gas combustion and explosion are hot and key topics in domestic and international research. Studying the combustion and explosion characteristics under complex constraint conditions is of great significance. Regarding rigid and flexible obstacles, the combustion and explosion process of hydrogen-doped methane gas in a long straight pipeline with double heterogeneous obstacles was explored through experiments. The results show that, compared with the obstacle-free environment, the influence of double obstacles on the flame speed, explosion pressure, and explosion intensity index increases with the increase in the blockage ratio of the flexible obstacle and the addition of hydrogen. Moreover, the increase in explosion pressure and explosion intensity index is greater than that of the flame speed. Under the combined action of hydrogen addition and double obstacles, the flame contact speed can increase by up to 176.51%, and the maximum speed can increase by up to 316.40%. The double obstacles cause the pressure in the upstream region to rise first and then fall, and the pressure oscillation in the downstream region is obvious. After hydrogen addition, compared with the obstacle-free environment, the maximum explosion pressure in the pipeline can increase by up to 1280.9%, and the maximum explosion intensity index can increase to 167.65 times. In the layout engineering projects of constraint facilities, flexible obstacles with a smaller blockage ratio should be preferred to effectively mitigate the consequences of explosion hazards.

Keywords: gas explosion; dual obstacles; flame speed; explosion pressure; explosion intensity index