

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0123

城市地下排水管道中燃气爆炸 及气-液两相耦合作用规律*

周刚^{1,2}, 孔阳^{1,2}, 崔洋洋³, 钱新明⁴, 傅砺焯⁴, 张琦^{1,2,4}

- (1. 山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;
3. 应急管理部研究中心, 中国煤炭工业发展研究中心, 北京 100713;
4. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为研究城市地下排水管道中燃气爆炸传播特性和气-液两相耦合作用规律, 基于气-液两相流理论和计算流体力学方法, 对不同水深率下的天然气/空气混合物的爆炸-加速-衰减过程进行了数值模拟。研究表明: 当水深率小于0.7时, 随着水深率的增加, 气相空间的长径比增大, 燃料燃烧加剧, 火焰的加速现象逐渐显著, 导致峰值超压逐渐增大, 超压峰值显现时间逐渐缩短, 且峰值超压沿轴向的提升效果更加显著; 当水深率达到0.7时, 火焰在管道内的传播明显受阻, 水震荡产生的波动及细水柱迅速占据了有限的气相空间, 阻断了火焰的自维持传播, 使得爆炸超压仅在点火源附近显现。不同水深率条件下, 管道中相同区域内, 同一时刻水面被扬起的高度和气相区域的速度场不同, 被卷扬起的低温液体对其相邻区域的高温火焰形成降温和阻断, 之后由于气体的宏观流动, 与液面相邻的低温气体流动至管道内高温区域, 进而造成管道内火焰温度降低, 同时, 水的震荡和细水柱的飞扬大大降低了爆炸超压风险。

关键词: 城市排水管道; 天然气爆炸; 爆炸超压; 火焰熄灭

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

The law of gas explosion and gas-liquid coupling in urban underground drainage pipelines

ZHOU Gang^{1,2}, KONG Yang^{1,2}, CUI Yangyang³, QIAN Xinming⁴, FU Liye⁴, ZHANG Qi^{1,2,4}

- (1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;
2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-Founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;
3. China Center for Safety Research, Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China and China Coal Strategic Research Center, Beijing 100713, China;
4. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: There are frequent gas explosion accidents in urban rain and sewage drainage pipes, which pose a serious threat to people's lives and property safety. To study the propagation characteristics of gas explosion and the law of gas-liquid two-

* 收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(52204227); 山东省自然科学基金(ZR2022QE220); 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金(KFJJ23-23M)

第一作者: 周刚(1979—), 男, 博士, 教授, zhougang@sdust.edu.cn

通信作者: 张琦(1991—), 男, 博士, 教授, zhangqi2021@sdust.edu.cn

phase coupling in urban underground drainage pipes, based on the gas-liquid two-phase flow theory and computational fluid dynamics method, a numerical simulation study of the explosion-acceleration-decay process of gas/air mixture under different water depth ratio was conducted. The results show that when the water depth ratio is less than 0.7, as the water depth ratio increases, the long-diameter ratio of the gas phase space increases, the fuel combustion intensifies, and the flame acceleration phenomenon gradually becomes significant, which leads to a gradual increase in peak overpressure, a gradual reduction in peak overpressure time, and a more significant effect of peak overpressure along the axial direction. When the water depth ratio reaches 0.7, the propagation of the flame in the pipeline is blocked, and the fluctuation caused by the water shock and the fine water column quickly occupy a small gas phase space, blocking the continuous propagation of the flame, which makes the explosion overpressure appear only near the ignition source. Under different water depth ratios, in the same zone of the pipeline and at the same moment, the height of the water being rolled up and the velocity field of the gas phase region is different, and the cryogenic liquid is rolled up to cool and block the high-temperature flame in the adjacent zone. Then, due to the macroscopic flow of the gas, the cryogenic gas adjacent to the liquid surface flows to the high-temperature region in the pipeline, resulting in a decrease in the flame temperature in the pipeline. The shock of water and the flying of fine water columns greatly reduce the risk of explosion overpressure. The research results provide a scientific basis for the explosion protection of urban gas lifelines.

Keywords: urban drainage pipeline; natural gas explosion; explosion overpressure; flame extinction

随着城市化水平的提高,地下燃气管网的规模也在大幅提升。根据住建部发布的数据,2021年,我国城市管道总长约 3.3×10^6 km,其中燃气管道长约 9.4×10^5 km。但是,由于管道自身疲劳以及第三方破坏等原因,管道发生破裂进而导致可燃气体泄漏事故时有发生,泄漏后的可燃气体大多通过多孔介质的土壤快速扩散至相邻地下空间^[1],例如:雨污排水管道、人防空间、地下停车场、地铁等,其中以分布最广泛的雨污排水管道最常见^[2];此外,雨污排水管道中积存的有机残渣发生氧化反应释放大量的沼气。上述2种情况均可在排水管道中形成爆炸性混合气体,一旦遇到足够能量的点火源便会发生爆炸。由于地下空间管网的连通特性,爆炸一旦发生,将会造成大规模的管网传播,往往会引起一系列的多米诺灾害反应,造成巨大的经济损失和恶劣的社会影响^[3]。

近年来,由于可燃物质泄漏导致的相邻地下含水空间的爆炸事故频繁发生。例如:2013年,山东省青岛市发生的输油管道泄漏爆炸事故是由于在输油管道与排水暗渠交汇处,管道受到腐蚀发生破裂,导致原油泄漏至排水暗渠,泄漏原油的挥发分与空气形成爆炸性混合物,遇电火花发生爆炸^[4]。在含水的受限空间中,水的流动大大加速了可燃气体的蔓延,同时,爆炸冲击波所带来的水的震荡使得火焰传播与熄灭更加复杂,增加了爆炸风险的同时,也为城市燃气管网的爆炸防控设置了障碍。

含水管道可近似视为一个相对封闭的空间,针对封闭空间中的天然气爆炸及火焰传播规律,学者们已经开展了大量的实验及数值模拟研究^[5-8]。Zhu等^[9]研究了甲烷浓度和横截面对爆炸规律的影响。Wang等^[10]研究了管道粗糙程度对爆炸传播的影响,发现在光滑管道内,爆轰波以稳定的速度在极限范围内传播。Akkerman等^[11]研究了内壁粗糙程度对气体爆炸火焰传播速度的影响。Kundu等^[12]发现,天然气在湍流场中的爆炸强度、压力上升速率和火焰速度要比静态时更大。Starke等^[13]、Ibrahim等^[14]和Wang等^[15]揭示了障碍物形状和尺寸对气体爆炸火焰加速传播的影响。这些研究大多在刚性约束边界条件下开展,而对于连续相水等柔性边界条件的研究尚不多见。

针对水与爆炸的耦合关系研究,多集中在离散细水雾的抑爆特性方面^[16-17]。Wang等^[18]研究了细水雾的液滴尺寸对爆炸的影响,发现直径为45和100 μm 的细水雾液滴不仅不能抑制爆炸,反而会促进爆炸,而雾滴直径大于160 μm 的细水雾抑制爆炸的效果较好。Jing等^[19]研究了直径为10 μm 的单分散超细水雾抑制甲烷爆炸的效果,得出了将甲烷爆轰衰减为爆燃的水雾临界浓度和将甲烷爆轰完全抑制的

水雾临界浓度。Li等^[20]研究了喷雾压力对爆炸的影响,发现增加细水雾的压力会降低火焰高度并增大火焰倾斜角度,且低速火焰比高速火焰受到细水雾施加的横向剪切力的影响更大。Liang等^[21]和Li等^[22]分析了细水雾对爆炸的抑制机理,发现加入细水雾后诱导爆炸的时间延长,原因在于,水雾一方面降低了活性H、O、OH自由基的浓度,另一方面干扰了气体爆炸能量的产生,并通过吸热消耗气体爆炸火焰。针对天然气在雨污排水管道中的爆炸火焰传播与熄灭特性的研究尚不多见。前期,Zhang等^[23]研究了低水位条件下气体爆炸与连续相水的耦合作用,分析了冲击波作用下连续相水的运动及形态发展规律,为揭示含水管道的火焰传播与熄灭特征提供了重要科学依据。

然而,受到天气降雨以及居民用水量等因素的影响,城市雨污排水管道中水相及气相空间比例变化多样,这将对管道内气体爆炸火焰的传播及熄灭机制产生重要影响。本文中,基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法,在不同水深率的含水管道的天然气爆炸与传播特性研究,得到含水管道中形成气体爆炸传播的临界水位高度,揭示不同水位高度与爆炸超压、火焰特征的耦合作用关系,为城市燃气生命线爆炸防控提供科学依据。

1 数学模型与验证

1.1 数学模型

关于气体爆燃的数学模型与文献[24-25]中的一致,主要包括连续性方程,质量、能量、动量守恒方程^[26-31]和基于湍流动能和扩散速率的 $k-\varepsilon$ 模型^[32-34]以及考虑了温度和湍流影响的有限速率/涡流耗散模型^[24],而水的实现通过多相流(volume of fluid, VOF)模型^[35-36]进行定义。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) = 0 \quad (1)$$

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (2)$$

式中: α_l 为液相介质的体积分, α_g 为气相介质的体积分, \mathbf{v}_l 为液相介质的速度, ρ_l 为液相介质的密度。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{v}_l) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{v}_l) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho g \quad (4)$$

式中: p 为压力; u 为速度在 x 方向上的分量; v 为速度在 y 方向上的分量; ρ 为密度, $\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l$, 下标 g 和 l 分别代表气相和液相; μ 为动力黏度, $\mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l$; g 为重力加速度, 取值为 9.81 m/s^2 。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [(\rho E + p) \mathbf{v}_l] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

式中: κ 为热传导系数, $\kappa = \alpha_g \kappa_g + \alpha_l \kappa_l$; T 为温度; E 为内能与动能之和, $E = \frac{\alpha_g \rho_g E_g + \alpha_l \rho_l E_l}{\alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l}$ 。

VOF模型并不求解每一相的连续性方程,而是求解被设置为次相的物质的连续性方程。在求得次相的体积分之后,根据在网格内所有相的体积分之和等于1的原则,进而计算主相的体积分。与此同时,两相间共用一个动量方程和能量方程,方程中出现的各项物质的强度参数,如密度、动力黏度、热传导系数,均被视为两相介质所组成混合物的强度参数,并通过将已知的各相介质的相应强度参数的体积分加权计算得到。

由于Renormalization Group(RNG) $k-\varepsilon$ 模型在其 ε 方程中增加了一项,提高了高速流动的准确性,并

考虑了涡流对湍流的影响, 提高了旋涡流动的精度, 同时在多个不同工况的算例中表现最稳定, 且计算结果与实验值之间的相对误差较小, 因此, 本文中选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。

基于 Boussinesq 假设的湍动能 k 方程及湍动能耗散率 ε 方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \nabla \cdot (pkv) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho\varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\varepsilon) + \nabla \cdot (p\varepsilon v) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; v 为计算域内的速度向量; E_{ij} 为应变率的分量; μ_t 为湍流黏度 ($\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$); C_μ 、 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为模型常数, 取值分别为 0.084 5、0.719 4、0.719 4、1.42、1.68。

通过结合组分运输模型及有限速率/涡流耗散模型来进行对甲烷爆炸的模拟, 参与化学反应的各组分对流-扩散方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho Y_i v) = \nabla \cdot \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i \right] + R_i \quad (8)$$

式中: Y_i 为组分 i 的质量分数, $D_{i,m}$ 为组分 i 在混合物中的扩散系数, Sc_i 为湍流施密特数, R_i 为组分 i 由于化学反应的单位体积质量生成率/消耗率 (若 i 为生成物, R_i 为正; 若 i 为反应物, R_i 为负)。

由有限速率/涡流耗散模型得到:

$$R_i = \pm M_{w,i} \eta_i K n_{\text{CH}_4}^{0.2} n_{\text{O}_2}^{1.3} \quad (9)$$

$$K = A e^{-E_a / (R_u T)} \quad (10)$$

式中: $M_{w,i}$ 为组分 i 的相对分子质量, η_i 为组分 i 的化学计量系数, K 为反应常数, n_{CH_4} 为甲烷的物质的量浓度, n_{O_2} 为氧气的物质的量浓度, A 为指前因子, E_a 为化学反应活化能, R_u 为普适气体常数。

1.2 物理模型

为了方便开展模拟研究, 将城市雨污水管道简化为一个二维矩形封闭管道, 这是研究复杂爆炸现象常用的有效方法。水深率 γ 与管道内水面到管道底端的距离 h 和管道直径 D 的关系为:

$$\gamma = \frac{h}{D} \quad (11)$$

图 1 展示了不同水深率下的物理模型。其中, 矩形管道长为 3 m, 管道直径 D 为 10 cm, 管道内水面到管道底端的距离 h 分别设置为 2、3、4、5、6 和 7 cm, 则水深率分别为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 和 0.7。管道四周封闭, 点火源位于管道左端气相空间的中部位置, 采用电火花点火, 点火源半径为 1.5 cm, 点火能量为 20 J。代表固体废物的 10 组障碍物设置在管道左侧, 总长度为 1 m, 2 个相邻障碍物的间距为 0.1 m, 整个管道气相空间填充 CH_4 /空气混合物, 其中甲烷在气体混合物中的体积分数为 9.5%。

1.3 网格划分和独立性检验

模型采用了 2.0、1.0 和 0.5 mm 的 3 种全局结构化网格方案, 如图 2 所示。图 3 展示了 3 种网格方案下轴向测点的最大爆炸超压 (p_{max}) 及相对变化。将 2.0、1.0 和 0.5 mm 方案下, 计算得到的 p_{max} 分别标记为 $p_{\text{max-2.0}}$ 、 $p_{\text{max-1.0}}$ 和 $p_{\text{max-0.5}}$, 定义 $\delta_{2.0 \rightarrow 1.0}$ 为当网格尺寸由 2.0 mm 加密至 1.0 mm 时 p_{max} 的相对变化率, 相应地, $\delta_{1.0 \rightarrow 0.5}$ 为当网格尺寸由 1.0 mm 加密至 0.5 mm 时 p_{max} 的相对变化率, 具体计算过程表示为:

$$\delta_{2.0 \rightarrow 1.0} = \frac{p_{\text{max-1.0}} - p_{\text{max-2.0}}}{p_{\text{max-2.0}}} \quad (12)$$

$$\delta_{1.0 \rightarrow 0.5} = \frac{p_{\text{max-0.5}} - p_{\text{max-1.0}}}{p_{\text{max-1.0}}} \quad (13)$$

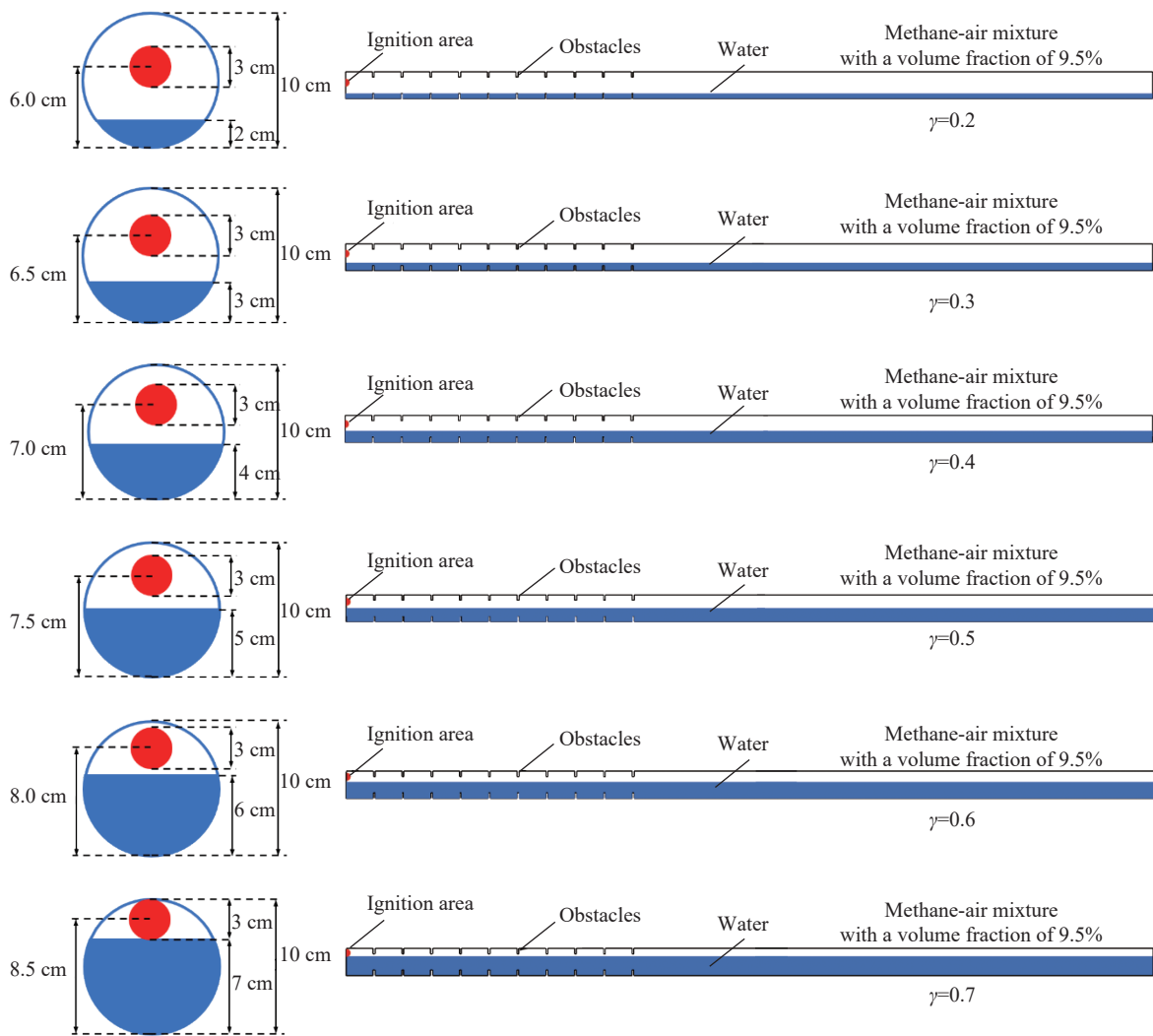


图 1 不同水深率条件下含水管道路气体爆炸与传播的物理模型

Fig. 1 Physical models for gas explosion and propagation in water-bearing pipelines under different water depth ratios

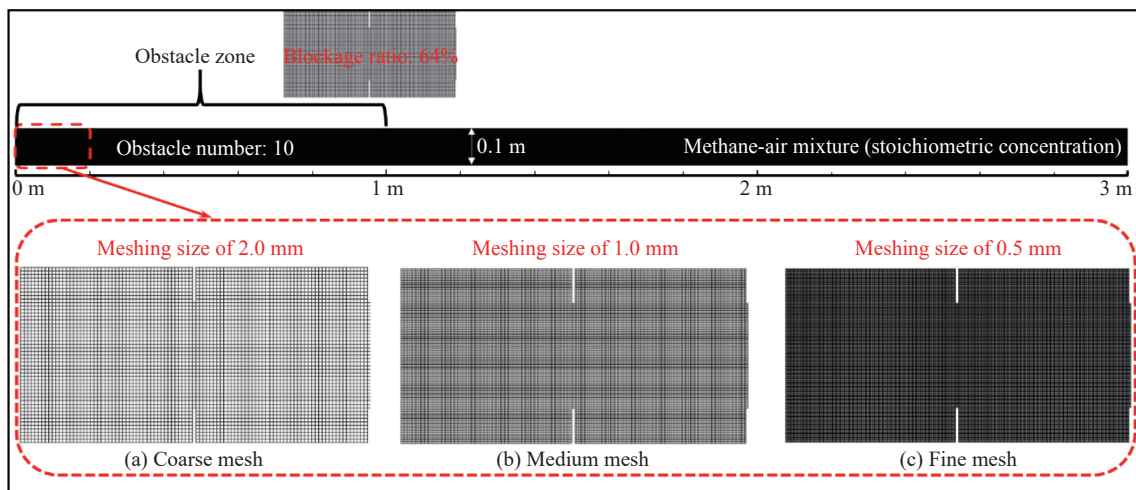


图 2 不同网格划分方案下的网格分布特征

Fig. 2 Mesh distribution characteristics under different meshing schemes

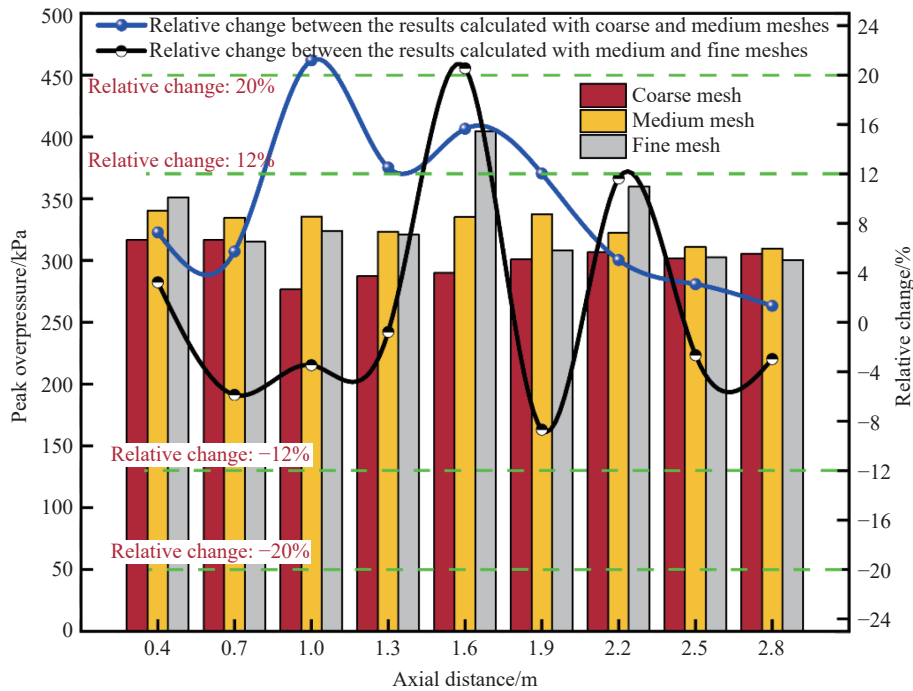


图 3 不同网格划分方案下各测点超压峰值及相对变化率

Fig. 3 Peak overpressures and relative change ratio at each measuring point under different meshing schemes

从图 3 可以看出, 3 种网格方案下, 不同测点超压峰值的统计学极差为 9.18~114.27 kPa, 大部分测点处超压峰值的统计学极差小于 58.65 kPa, 验证了数值模拟结果的准确性和稳定性^[37]。 $\delta_{2.0 \rightarrow 1.0}$ 的取值为 1.33%~21.18%, 平均值为 9.31%; $\delta_{1.0 \rightarrow 0.5}$ 的取值为 -8.68%~20.55%, 平均值为 1.22%, 由此可见, 当网格尺寸由 1.0 mm 加密至 0.5 mm 时, 超压的相对变化率较小。综合考虑数值模拟结果的准确性以及计算耗时, 1.0 mm 网格尺寸足以满足本文中数值模拟的要求, 因此, 选用 1.0 mm 的网格进行数值模拟计算。

1.4 数值模型验证

为了验证数值模拟结果的准确性, 还需要通过实验方法对数值模拟结果进行验证。考虑到超压与温度是相互耦合的关系, 这里只对比分析超压结果。一旦超压结果被验证, 则爆炸动力学过程也得到验证^[38-39]。

1.4.1 实验装置

搭建了密闭含水管道的燃气爆炸特性实验平台, 如图 4 所示。实验平台包括实验管道和加水系统、充配气系统、气体循环系统、点火系统、数据采集系统。管道开头放置了一段长 1.0 m、阻塞比为 64% 的圆环障碍物, 用于加速火焰的传播, 同时模拟真实排水管道中的固体废物; 通过在管道上方安设漏斗, 可以实现不同水量的添加。充配气系统主要包含真空泵、真空压力表、甲烷气瓶(甲烷纯度 99.9%, 北京华通精科气体化学有限公司提供)、空气瓶等。空气瓶既可以为爆炸提供氧化物, 又可以在爆炸之后用作废气吹扫。气体循环系统由循环风扇和循环管组成, 主要用于快速搅拌气体达到充分预混的状态。点火方式为电容放电, 点火能量设定为 10 J, 点火电极位于管道最左端, 电极间距离为 2~3 mm, 电极材料采用钨棒。管道的不同壁面安设有压电式压力传感器(KD2004G01 型, 扬州科动有限公司提供), 压力传感器依次与电荷放大器、数据采集仪、电脑相连接。实验时, 管道内水深率为 0.2, 气相空间为常温常压, 甲烷体积分数为 9.5%。

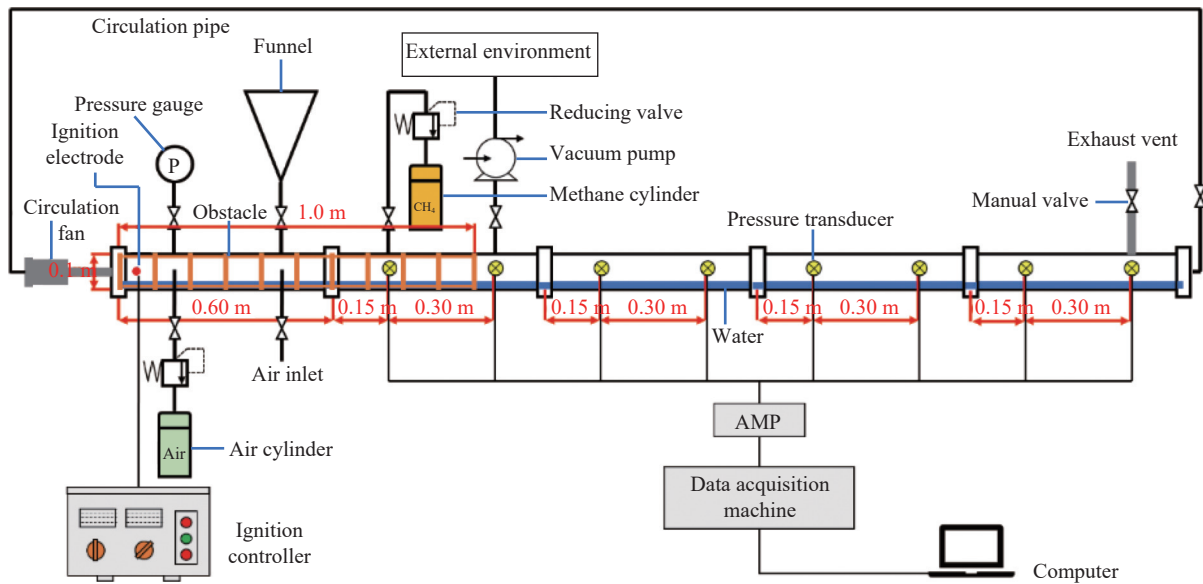


图 4 含水管道气体爆炸与传播实验平台示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental platform for gas explosion and propagation in a water-bearing pipeline

1.4.2 模型验证

图 5 展示了水深率为 0.2 时, 距离点火点 2.25、2.55 和 2.85 m 处的最大爆炸超压的实验值、模拟值以及相对误差。其中, 实验值为 3 次有效实验数据的平均值。由图 5 可知, 模拟值总是大于实验值, 这主要是由于数值模拟不考虑壁面的热量散失; 模拟值的相对误差为 18.77%~28.31%, 这主要来自于 $k-\varepsilon$ 湍流模型本身的计算准确度、不考虑壁面的热量散失、不考虑水蒸发的误差; 平均相对误差为 20.89%, 该值小于 25%, 在工业尺度上认为模拟结果是可接受的^[24]。

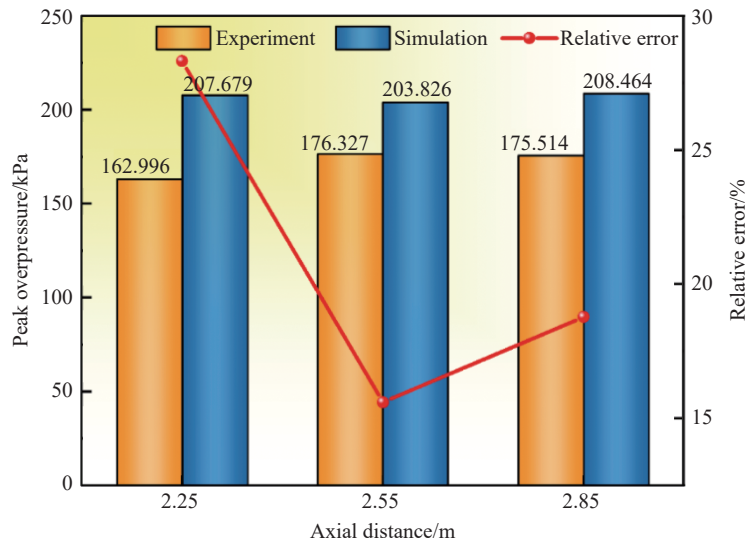


图 5 不同测点处超压峰值的实验及模拟值

Fig. 5 Experimental and simulated values of peak overpressure at different measuring points

2 结果与讨论

2.1 爆炸超压

爆炸超压是指爆炸产生的冲击波造成高于标准大气压的压力。其中, 冲击波指的是一种在介质中以超过当地声速的速度传播的扰动, 将会导致介质在冲击波峰面处物理性质阶跃性甚至间断性的改

变^[40]。水深率不同时,管道内不同位置处超压随时间变化的曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,当水深率小于 0.7 时,随着水深率的增大,各测点处的最大爆炸压力明显增大,且最大爆炸压力达到时间显著提前。推测超压曲线上的小幅度波动是由水的震荡造成的。当水深率达到 0.7 时,各测点的超压峰值远小于其他工况,且只有在靠近点火点的测点处(0.4 m)产生了超过 100 kPa 的超压,而在 1.0 m 之后,超压可忽略不计,这是由于水震荡产生的波动及细水柱迅速占据了狭小的气相空间,扬起的细水柱阻断了气体质量传递,同时高表面积细水柱大大降低了火焰峰面的温度,进而阻断了火焰的传播。

随着轴向距离的增加,在超压上升至峰值的过程中,平均压力上升速率不断增大。在 1.6 m 之前(包括 1.6 m),同一测点处,平均压力上升速率随水深率的增大而增大;而 1.6 m 之后,各工况对应的平均压力上升速率之间的差距不再明显。水深率不同时,各轴向位置处的峰值超压以及达到峰值的时间沿轴向的演化情况如图 7 所示(水深率为 0.7 时,只给出了 0.4 m 处的超压峰值,其他位置处的超压峰值,由于数值太小,本文中不作分析)。

由图 7(a)可知,当水深率为 0.2 时,随着轴向距离的增加,超压峰值呈现逐渐下降趋势,这意味着此时火焰的加速程度并不充分;当水深率为 0.3 和 0.4 时,超压峰值整体随着轴向距离呈现先缓慢上升后缓慢下降的趋势,此时火焰的加速效应已经显现;当水深率为 0.5 和 0.6 时,超压峰值呈现先快速上升然后快速下降的趋势,这意味着大

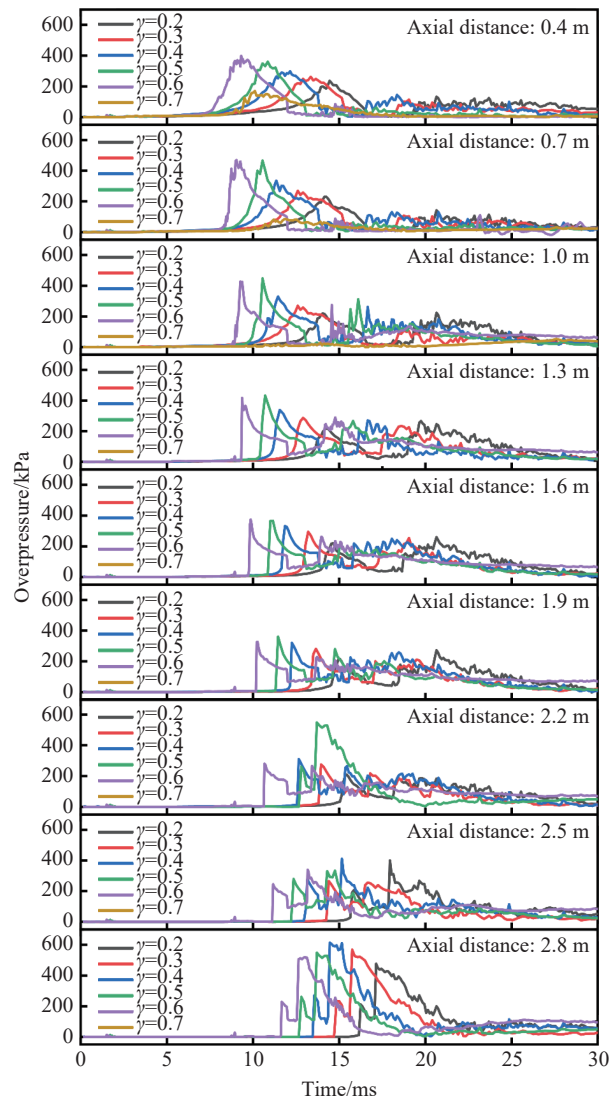
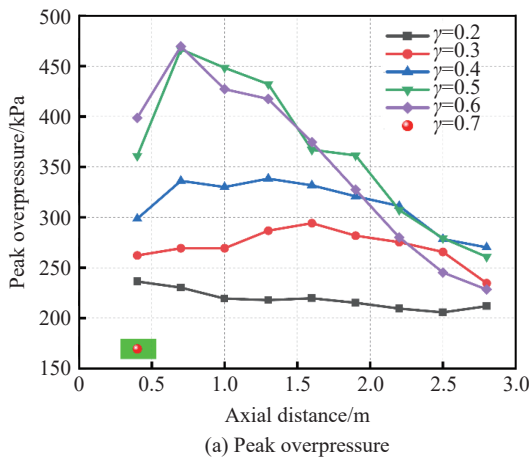
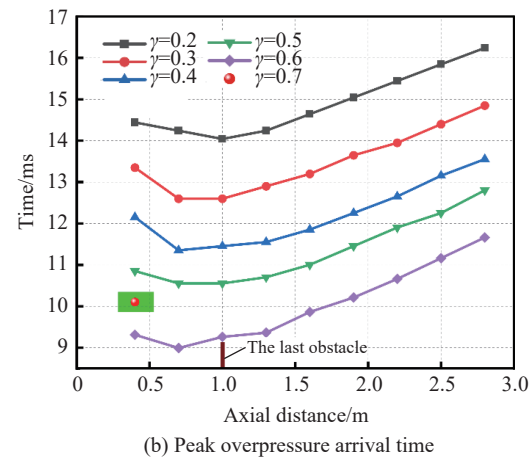


图 6 不同水深率时管道内不同位置超压随时间变化曲线

Fig. 6 Time variation curves of overpressure at different positions in the pipeline under different water depth ratios



(a) Peak overpressure



(b) Peak overpressure arrival time

图 7 水深率不同时各轴向测点的峰值超压以及超压峰值到达时刻随轴向距离的演化

Fig. 7 Evolution of peak overpressure and peak overpressure arrival time with axial distance at each axial measuring point under different water depth ratios

长径比造成的火焰加速效应逐渐显现, 且连续相水震荡引起的细水柱和离散相水滴对火焰的熄灭效果逐渐显现。整个过程中, 随着水深率的增加, 各测点的超压峰值基本上呈现出逐渐增大的趋势。显然, 水深率的增大加剧了爆炸风险。然而, 爆炸超压并不是随着水深率的增大而无限增大的, 当水深率为 0.7 时, 超压峰值迅速降至最低, 且仅在点火源附近有所显现, 这意味着当水深率达到 0.7 时, 水的震荡以及细水柱的飞扬将会大大降低爆炸超压风险, 这对于城市排水管道内的可燃气体爆炸防控具有重大意义。

由图 7(b) 可知, 除水深率为 0.7 的工况外, 水深率越大, 达到超压峰值的时间越早, 这意味着当水深率小于 0.7 时, 随着水深率的增大, 气相空间的长径比增大, 火焰传播加速导致冲击波传播速度提升, 从而导致超压显现时间缩短, 这与 Zhang 等^[24]的发现类似。然而, 该结论并不适用于水深率大于 0.7 的情况, 此时连续相水所带来的气体爆炸抑制效果明显。

2.2 火焰传播速度

图 8 给出了不同水深率时, 点火 0~30 ms 内不同时刻管道内的温度(T)和水的体积分数(φ_w)分布云图。

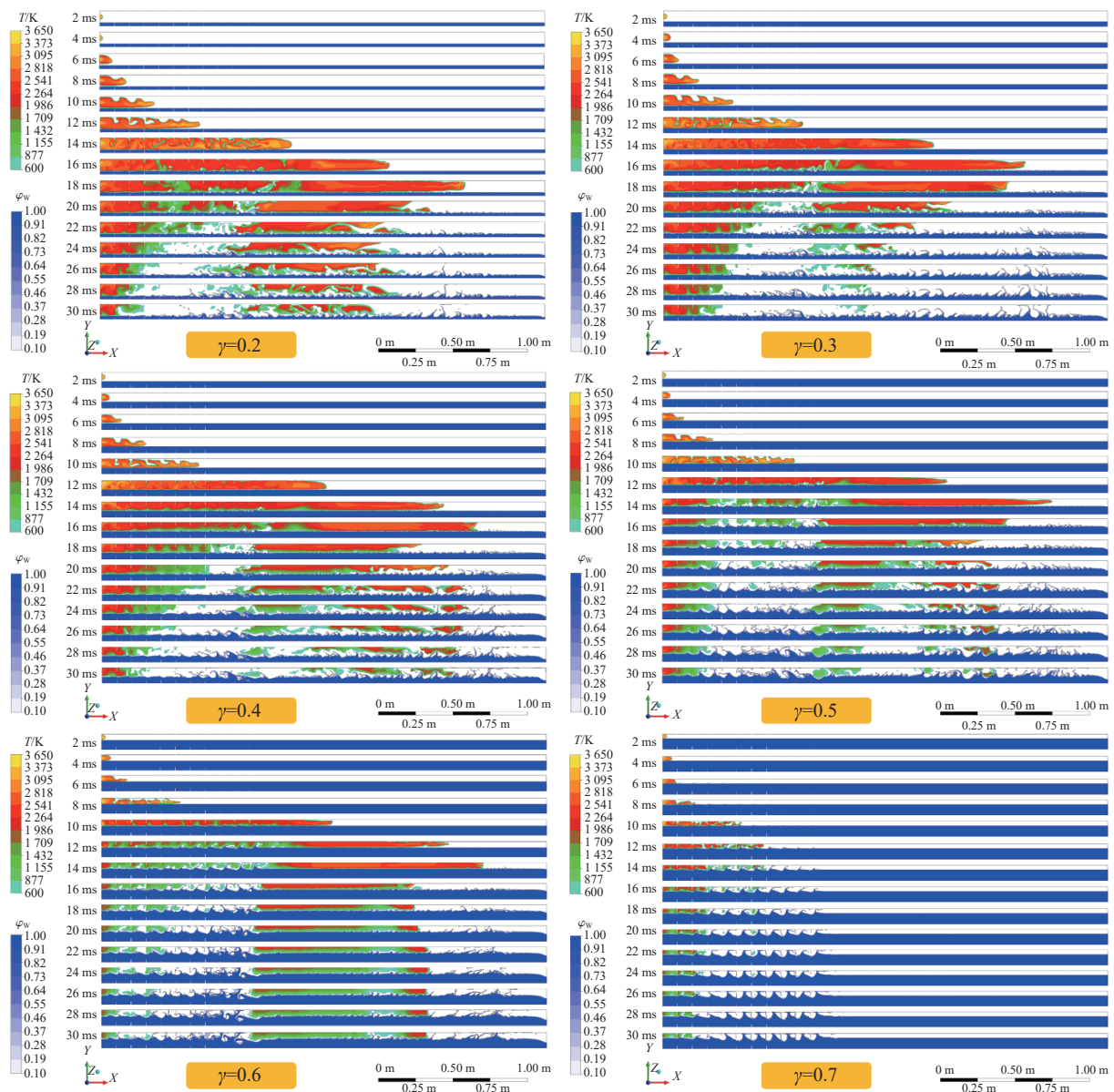


图 8 不同水深率条件下管道内不同时刻的温度与水的体积分数云图

Fig. 8 Contours of temperature and water volume fraction at different times in the pipeline under different water depth ratios

从图 8 可以看出,当火焰经过障碍物区域时,水深率越大,水面越快被卷吸起来,从而降低上方临近气相区域的温度。水深率为 0.7 时,卷吸起的水使得上方火焰面处的温度大幅降低,从而抑制了火焰的向前传播。水深率为 0.2~0.6 时,在 14 ms 之前,总体而言,随着水深率的增大,同一时刻火焰面的位置更靠前,且阻断火焰传播的时间更提前。这是因为障碍物的存在加剧了水的震荡,当冲击波在封闭管道中发生反射时,会加剧水的震荡并慢慢产生扬起的细水柱,水深率越大,扬起的细水柱越多,进而隔绝了热量的传递、加速了火焰降温,从而阻断了火焰的传播,导致火焰熄灭。

图 9 给出了水深率不同时,点火之后火焰锋面位置和火焰速度随时间的变化。从图 9 可以看出,从火焰锋面位置来看,在 20 ms 之前,所有条件下火焰锋面位置均向右传播至最远位置;20 ms 之后,火焰锋面位置随着时间的推移发生振荡;最后,所有条件下的火焰锋面位置均向左出现不同程度的平移(火焰最初向右传播)。

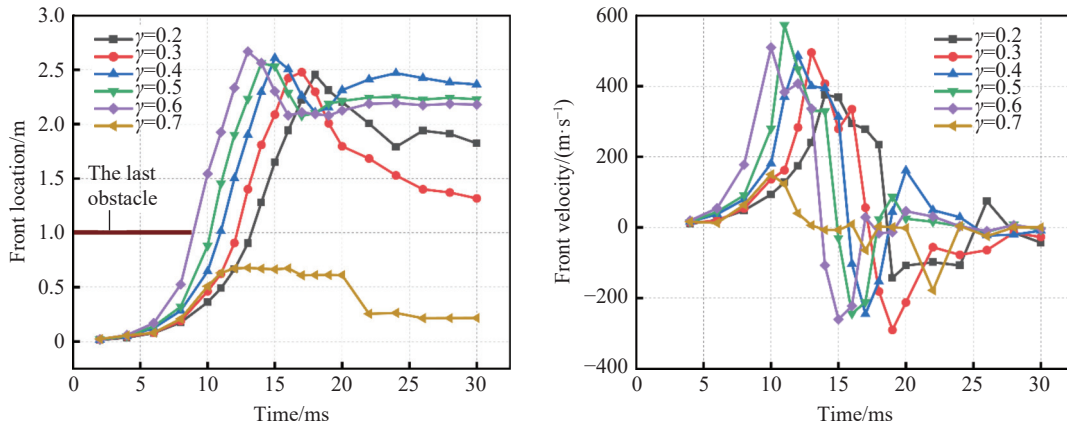


图 9 水深率不同时管道内点火后不同时刻火焰锋面位置及火焰速度

Fig. 9 Flame front position and flame velocity at different times after ignition in the pipeline with different water depth ratios

各工况下,火焰速度整体上呈现先迅速增大至最大值,后迅速减小至最小值,然后震荡减小,最后趋于零的过程。具体来说,当水深率为 0.7 时,相比其他工况,火焰在管道内的传播明显受阻。10 ms 之前,火焰尚可以保持加速趋势;10 ms 之后,火焰速度迅速下降;14 ms 之后,经历一次波动后整体保持在零左右。对于其他工况,水深率增大时,火焰速度更快且上升至最大值耗时更短,同时也在更早的时刻下降至最小值。

随着水深率的增大,由于气体所处空间更加狭长,火焰会更早到达在管道中传播的轴向最远距离。在达到轴向传播的最远距离后,火焰面遭遇了由管道右端反射回的压缩波,该压缩波向左传播,不断压缩气体,使得在压缩波面所到之处均产生快速的向左流动的气流,导致火焰阵面产生向管道左端的位移。然而,当右端反射回的压缩波向左传播时,由于管道封闭,同时会有一个稀疏波向右传播,虽然当压缩波与火焰面相遇时,向左传播的气流速度很大,但之后会逐渐降低,火焰面存在短时间内继续向右传播的可能。

因此,结合图 9 可知,当水深率为 0.4、0.5、0.6 时,火焰速度下降到最低值后,会在一定的时间段内上升至零以上,伴随着火焰面继续向右传播。但当水深率为 0.2 或 0.3 时,火焰面总体上始终维持着向左传播的趋势,火焰速度基本位于零以下(火焰速度方向向右时,火焰速度为正,反之为负)。

2.3 火焰温度

水深率为 0.2~0.7 时,管道内部温度峰值随火焰沿轴向传播距离的变化曲线如图 10 所示。其中,各测点处的温度峰值如表 1 所示。结合图 10 和表 1 可知:各测点处,水深率为 0.7 时温度峰值最低,这是由于当水深率为 0.7 时,火焰传播受阻,最远仅传播至距管道左端约 0.68 m 处,导致在 0.7 m 以外的位置,温度峰值均小于 500 K;当水深率为 0.2 时,火焰的传播距离小于 2.5 m;而对于水深率为 0.3~0.6 的工况,火焰的传播距离均大于 2.5 m。

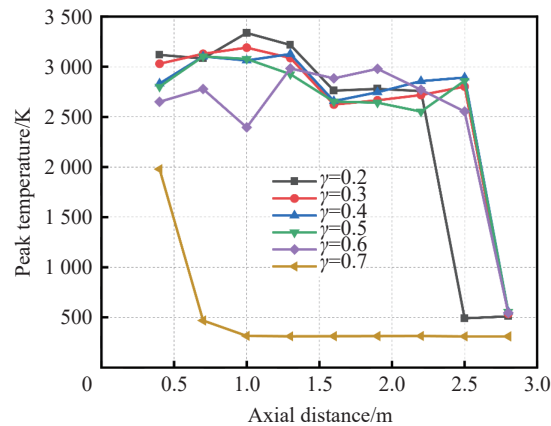


图 10 水深率不同时温度峰值随火焰轴向传播距离的变化

Fig. 10 Variation of temperature peak with flame axial propagation distance under different water depth ratios

表 1 水深率不同时管道内不同测点处的温度峰值

Table 1 Temperature peak at different measuring points in the pipeline under different water depth ratios

水深率	不同测点的温度峰值/K								
	0.4 m	0.7 m	1.0 m	1.3 m	1.6 m	1.9 m	2.2 m	2.5 m	2.8 m
0.2	3 117.6	3 082.4	3 336.6	3 216.4	2 760.8	2 778.5	2 757.1	490.8	510.9
0.3	3 029.9	3 128.6	3 190.2	3 086.7	2 622.4	2 664.6	2 717.9	2 801.7	536.2
0.4	2 832.4	3 102.3	3 062.2	3 126.8	2 657.6	2 745.1	2 856.3	2 892.2	557.7
0.5	2 800.9	3 102.2	3 077.3	2 925.4	2 652.6	2 641.6	2 552.3	2 860.3	556.1
0.6	2 650.7	2 777.9	2 395.2	2 983.2	2 883.8	2 978.6	2 770.4	2 552.8	547.0
0.7	1 978.3	469.3	316.2	312.3	313.2	313.8	314.9	310.9	310.7

就水深率为 0.2~0.6 的工况而言,因冲击波产生后,水震荡产生的波动及细水柱迅速占据了有限的气相空间,阻碍火焰的自维持传播并降低了火焰温度,而水面震荡部分气相空间截面面积发生变化,湍流燃烧强度略微增大导致火焰峰值略微增大。最后因 CH_4 被不断消耗,当火焰传播至最远距离后,随着轴向距离的增加,火焰温度逐渐下降,导致温度峰值随轴向传播距离的增加整体上呈现先增大后减小的趋势;而当水深率为 0.6 时,温度峰值在上升至最大值之前,因冲击波引起的细水柱的降温灭火作用与未燃气体再次燃烧导致湍流强度增大的竞争机制,导致火焰温度经历了相对较大的振荡。总体来看,只要是火焰传播到的地方,水深率的大小对不同测点处温度峰值的影响并不明显。

图 11 给出了点火后不同水深率下管道内距离点火点 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m 处温度随时间的变化曲线。从图 11 可以看出,当水深率为 0.7 时,由于火焰向前传播明显受阻,在所有测点中,仅有 0.5 m 处的测点可以提取到超过 2 000 K 的升温,对于其他工况,在 0.5 m 处,各工况下的火焰在达到峰值温度之后,伴随着不同程度的振荡,逐渐衰减至 500 K 以下。

除水深率为 0.7 的工况之外,在 1.0 m 测点处,对于水深率为 0.2、0.4 的工况,该测点处的温度在接近 30 ms 时仍然保持大幅振荡趋势,而其他工况的温度在达到峰值之后,便在不同程度的振荡中逐渐衰减至 500 K 以下;对于 1.5 m 测点处的温度,水深率为 0.2 的工况对应的温度在接近 30 ms 时仍然保持着振荡,而水深率为 0.6 时的温度则在达到峰值之后,总体呈现缓慢下降的趋势,对于其他工况,温度在接近 30 ms 时已经大幅度下降(除水深率为 0.4 的工况,其他工况下的温度已下降至 500 K 以下);在 2.0 m 测点处,对于水深率为 0.4 与 0.6 的工况,在接近 30 ms 时仍然保持着超过 1 000 K 的温度,而其他工况下的温度已下降至 500 K 以下。

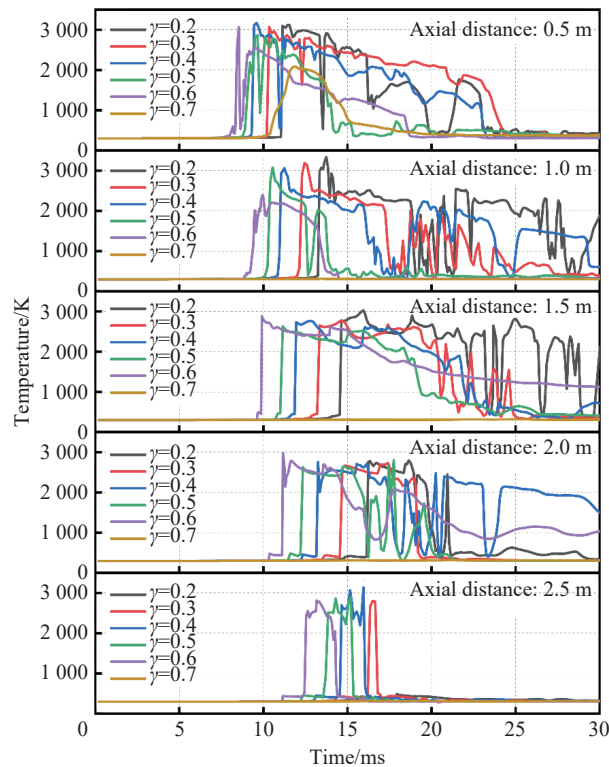


图 11 不同水深率时点火后管道内不同位置处温度随时间的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of temperature with time at different positions in the pipeline after ignition under different water depth ratios

在 2.5 m 测点处, 除水深率为 0.2 的工况(该工况下火焰未传播至该处), 其他工况下的温度均经历了一个快速上升-快速下降的过程, 其原因可总结为: 当火焰刚刚传播过 2.5 m 处时, 遭遇了从右端壁面反射回的压缩波, 进而在压缩波的作用下产生了快速向左的位移, 意味着刚刚移动至 2.5 m 测点右侧的火焰又快速回到了 2.5 m 测点的左侧。

3 结 论

(1) 水深率为 0.7 时, 火焰在管道内的传播明显受阻, 14 ms 后, 火焰速度总体维持在零左右。水深率为 0.2~0.6 时, 火焰速度均经历了快速上升-快速下降的阶段, 随着水深率的增大, 火焰速度在加速阶段会更快增加到最大值, 并在减速阶段更快减小到最小值。同时, 水深率为 0.2 时, 火焰轴向传播的最远距离接近 2.5 m; 水深率为 0.7 时, 火焰轴向传播的最远距离小于 0.7 m, 其他工况下, 火焰轴向传播的最远距离均稍大于 2.5 m。

(2) 水深率为 0.7, 火焰面到达时各测点处的温度峰值最低。水深率为 0.2~0.6, 火焰面到达时, 各测点处温度峰值总体上随火焰传播距离的增加先增大后减小; 火焰面经过之后, 由于水深率的不同, 管道中相同区域内同一时刻下水面被卷扬起的高度和气相区域的速度场不同, 被卷扬起的低温液体对其相邻区域的气体形成降温, 导致含水管道内不同位置处的温度均出现不同程度的降低。

(3) 水深率为 0.7 时, 火焰传播受阻, 各测点处因第 1 次入射波形成的超压峰值远低于其他工况, 且仅在距点火源 0.4 m 的测点处超压值大于 100 kPa。水深率为 0.2~0.6 时, 随着水深率的增大, 各测点由第 1 次入射波形成的超压峰值所需的时间更短。同时, 在管道的前半段, 随着水深率的增大, 各测点的超压峰值逐渐增大; 在管道的后半段, 超压峰值随点火点轴向距离的增加而不断衰减, 且水深率越大, 衰减的速率越快。

参考文献:

- [1] 程方明,南凡,肖旻,等. CF_3I 和 CO_2 抑制甲烷-空气爆炸实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(6): 065402. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0386.
CHENG F M, NAN F, XIAO C, et al. Experimental study on the suppression of methane-air explosion by CF_3I and CO_2 [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(6): 065402. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0386.
- [2] ZHANG Z W, HOU L F, YUAN M Q, et al. Optimization monitoring distribution method for gas pipeline leakage detection in underground spaces [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 104: 103545. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103545.
- [3] CHEN C H, SHEEN Y N, WANG H Y. Case analysis of catastrophic underground pipeline gas explosion in Taiwan [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 65: 39–47. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.03.013.
- [4] ZHU Y, QIAN X M, LIU Z Y, et al. Analysis and assessment of the Qingdao crude oil vapor explosion accident: lessons learnt [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 33: 289–303. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.004.
- [5] 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): 551–561. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.05.010.
- [6] 郑永辉,魏继锋.水介质初始参数设置对水下爆炸载荷的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 053201. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0485.
ZHENG Y H, WEI J F. Effect of initial parameter setting of water on load characteristics of underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 053201. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0485.
- [7] CAO Y, LI B, XIE L F, et al. Experimental and numerical study on pressure dynamic and venting characteristic of methane-air explosion in the tube with effect of methane concentration and vent burst pressure [J]. *Fuel*, 2022, 316: 123311. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123311.
- [8] 文彦博,胡亮亮,秦健,等.近场水下爆炸气泡脉动及水射流的实验与数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 053203. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0206.
WEN Y B, HU L L, QIN J, et al. Experimental study and numerical simulation on bubble pulsation and water jet in near-field underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 053203. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0206.
- [9] ZHU Y F, WANG D M, SHAO Z L, et al. Investigation on the overpressure of methane-air mixture gas explosions in straight large-scale tunnels [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 135: 101–112. DOI: 10.1016/j.psep.2019.12.022.
- [10] WANG L Q, MA H H, SHEN Z W, et al. Experimental investigation of methane-oxygen detonation propagation in tubes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 1300–1307. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.045.
- [11] AKKERMAN V, BYCHKOV V, PETCHENKO A, et al. Accelerating flames in cylindrical tubes with nonslip at the walls [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 145(1/2): 206–219. DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.10.011.
- [12] KUNDU S K, ZANGANEH J, ESCHEBACH D, et al. Explosion characteristics of methane-air mixtures in a spherical vessel connected with a duct [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 111: 85–93. DOI: 10.1016/j.psep.2017.06.014.
- [13] STARKE R, ROTH P. An experimental investigation of flame behavior during explosions in cylindrical enclosures with obstacles [J]. *Combustion and Flame*, 1989, 75(2): 111–121. DOI: 10.1016/0010-2180(89)90090-4.
- [14] IBRAHIM S S, MASRI A R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(3): 213–221. DOI: 10.1016/S0950-4230(00)00024-3.
- [15] WANG C, HUANG F L, KWASI E, et al. Effect of concentration and obstacles on flame velocity and overpressure of methane-air mixture [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 302–310. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.05.021.
- [16] 余明高,杨勇,裴蓓,等. N_2 双流体细水雾抑制管道瓦斯爆炸实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.
YU M G, YANG Y, PEI B, et al. Experimental study of methane explosion suppression by nitrogen twin-fluid water mist [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.

- [17] 贾海林, 翟汝鹏, 李第辉, 等. 三种盐类超细水雾抑制管道内甲烷-空气预混气爆炸的差异性 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(8): 082201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0456.
JIA H L, ZHAI R P, LI D H, et al. Differences of premixed methane-air explosion in pipelines suppressed by three ultrafine water mists containing different salts [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(8): 082201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0456.
- [18] WANG F H, YU M G, WEN X P, et al. Suppression of methane/air explosion in pipeline by water mist [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 791–796. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.02.005.
- [19] JING Q, WANG D, LIU Q M, et al. Inhibition effect and mechanism of ultra-fine water mist on CH₄/air detonation: quantitative research based on CFD technology [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 148: 75–92. DOI: 10.1016/j.psep.2020.10.007.
- [20] 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.
- [21] LIANG Y T, ZENG W. Numerical study of the effect of water addition on gas explosion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1/2/3): 386–392. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.064.
- [22] LI X C, ZHANG H, BAI S, et al. Analysis of the effect mechanism of water and CH₄ concentration on gas explosion in confined space [J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2021, 25(11): 101363. DOI: 10.1016/j.jscs.2021.101363.
- [23] ZHANG Q, FU L Y, LI Z Y, et al. Coupling mechanism of natural gas deflagration flame and continuous water in closed pipeline [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 143: 177–185. DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.004.
- [24] ZHANG Q, QIAN X M, FU L Y, et al. Shock wave evolution and overpressure hazards in partly premixed gas deflagration of DME/LPG blended multi-clean fuel [J]. *Fuel*, 2020, 268: 117368. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117368.
- [25] CHEN Y Y, QIAN X M, ZHANG Q, et al. Study on the effects of initial pressure and temperature on the explosion characteristics of DME-blended LPG mixtures in an obstructed confined pipeline [J]. *Fuel*, 2019, 257: 116047. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116047.
- [26] 许晓元, 孙金华, 刘晔亚. 具有体积分数梯度的连通装置甲烷-空气爆炸特性数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(4): 045401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0086.
XU X Y, SUN J H, LIU X Y. Numerical simulation of methane-air explosion in a connected device with volume fraction gradient [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(4): 045401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0086.
- [27] 马晓丽. 故障树分析法在中缅长输原油管道失效风险评价的应用 [J]. *新疆石油天然气*, 2014, 10(3): 119–124, 9. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2677.2014.03.023.
MA X L. The application of china-burma long distance oil pipeline failure risk assessment in the fault tree analysis [J]. *Xinjiang Oil and Gas*, 2014, 10(3): 119–124, 9. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2677.2014.03.023.
- [28] ZHOU G, MA Y, KONG Y, et al. Study on explosion dynamics and kinetic mechanism of DME/H₂ blended gas at typical fuel-lean/rich concentrations [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 40: 102444. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102444.
- [29] ZHANG Q, ZHOU G, HU Y, et al. Risk evaluation and analysis of a gas tank explosion based on a vapor cloud explosion model: a case study [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 101: 22–35. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.03.003.
- [30] 申亮. 天然气高压管道泄漏爆炸后果评价 [J]. *新疆石油天然气*, 2013, 9(1): 90–95. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2677.2013.01.020.
SHEN L. Evaluation on explosion consequence caused by leakage of high-pressure nature gas pipeline [J]. *Xinjiang Oil and Gas*, 2013, 9(1): 90–95. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2677.2013.01.020.
- [31] 徐岩, 李永泉, 郭晓燕, 等. 基于 YOLOv3-tiny 的火焰目标检测算法 [J]. *山东科技大学学报*, 2022, 41(6): 95–103. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.06.010.
XU Y, LI Y Q, GUO X Y, et al. Flame object detection algorithm based on YOLOv3-tinys [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 41(6): 95–103. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.06.010.
- [32] 潘旭海, 徐进, 蒋军成. 圆柱形薄壁储罐对爆炸冲击波动力学响应的模拟分析 [J]. *化工学报*, 2008, 59(3): 796–801. DOI: 10.3321/j.issn:0438-1157.2008.03.041.
PAN X H, XU J, JIANG J C. Simulation analysis of dynamic response of thin-wall cylindrical tank to shock wave [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(3): 796–801. DOI: 10.3321/j.issn:0438-1157.2008.03.041.

- [33] 冯丽, 郝海清, 王凯. 矿井立井防爆盖泄压复位技术及动力学相应规律研究 [J]. *山东科技大学学报*, 2022, 4(3): 51–57. DOI: 10.16425/j.cnki.sdkjzk.2022.03.006.
FENG L, HAO H Q, WANG K. Study on pressure relief and reset technology and dynamic response law of mine shaft explosion-proof covers [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 4(3): 51–57. DOI: 10.16425/j.cnki.sdkjzk.2022.03.006.
- [34] ZHOU G, KONG Y, QIAN X M, et al. Explosion dynamics and sensitivity analysis of blended LPG/DME clean fuel promoted by H_2 in a confined elongated space [J]. *Fuel*, 2023, 331: 125816. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125816.
- [35] SONG Y F, ZHANG Q, WU W W. Interaction between gas explosion flame and deposited dust [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 111(1989): 775–784. DOI: 10.1016/j.psep.2017.09.004.
- [36] DIANAT M, SKARYSZ M, GARMORY A. A coupled level set and volume of fluid method for automotive exterior water management applications [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 91: 19–38. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.008.
- [37] ZHOU G, LIU Y W, KONG Y, et al. Numerical analysis of dust pollution evolution law caused by ascensional/descensional ventilation in fully mechanized coal mining face based on DPM-DEM model [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(3): 107732. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107732.
- [38] 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*, 2022, 41(2): 61–69. DOI: 10.16452/j.cnki.dkjzk.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): 61–69. DOI: 10.16452/j.cnki.dkjzk.2022.02.007.
- [39] YANG Y, YANG S G, FANG Q, et al. Large-scale experimental and simulation study on gas explosion venting load characteristics of urban shallow buried pipe trenches [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123(1): 104409. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104409.
- [40] ZELDOVICH Y B, RAIZER Y P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 76(2): 235–236. DOI: 10.1016/S0022-4073(02)00065-1.

(责任编辑 蔡国艳)