

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220629004

狭长受限空间内燃气燃爆灾害演化规律研究*

金友平^{1,2}, 帅健¹, 王旭³, 张圣柱³, 王如君³, 多英全³

(1. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249; 2. 深圳市燃气集团股份有限公司, 深圳 518049;
3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

摘要: 为研究狭长受限空间内燃气燃爆灾害的演化规律, 采用三维仿真软件FLACS分别建立全密闭和半密闭两种受限空间模型, 对比研究了两种模型的火焰传播形态, 并分析了两种模型在不同工况条件下的燃爆灾害规律。结果表明: 两种模型的燃爆火焰形态显著不同; 对于全密闭空间, 长宽比的增大会促进火焰传播同时增大爆炸压力值的波动性, 稍高于化学当量比的甲烷浓度产生的爆炸压力最大, 并且富燃爆炸比贫燃爆炸的压力要高; 对于半密闭空间, 气云体积的增大加大了火焰传播距离的同时也提高了开口端的火焰速度, 障碍物数量的增多使爆炸火焰呈现先促进后削弱的现象, 并加大了最大爆炸压力和燃爆速度的变化幅度。

关键词: 狭长受限空间; FLACS; 燃气; 火焰传播; 燃爆灾害; 爆炸压力

中图分类号: TE88; X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1366-11

Study on Evolution Law of Gas Explosion Disaster in Narrow and Confined Space

JIN Youping^{1,2}, SHUAI Jian¹, WANG Xu³, ZHANG Shengzhu³, WANG Rujun³, DUO Yingquan³

(1. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;
2. Shenzhen Gas Corporation Ltd, Shenzhen 518049, China; 3. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: To study the evolution law of gas combustion and explosion disaster in narrow and long confined space, the three-dimensional simulation software FLACS was used to establish two confined space models, i.e., the fully confined space model and the semi-confined space model, respectively. The flame propagation patterns of the two models were compared, and the flammability and explosion disaster law of the two models under different working conditions was analyzed. The results show that the combustion and explosion flame forms of the two models are significantly different. For fully confined space, the increase of aspect ratio will promote flame propagation and increase the fluctuation of explosion pressure value. The methane concentration slightly higher than the chemical equivalent ratio

* 收稿日期:2022-06-29;修回日期:2022-11-12

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3070100)、国家自然科学基金(51806247)、中国石油大学(北京)科研基金(2462022YXZZ002)资助

作者简介:金友平(1996—),男,硕士研究生。主要从事城镇燃气泄漏后果研究。E-mail:jinyouping2@163.com

通讯作者:帅健(1963—),男,教授,博士。主要从事油气管道安全管理方面的研究。E-mail:shuaij@cup.edu.cn

produces the maximum explosion pressure, and the pressure of rich combustion explosion is higher than that of lean combustion explosion. For semi-confined space, the increase of gas cloud volume increases the flame propagation distance and the flame velocity at the open end. The addition of obstacles initially enhances and then diminishes the intensity of the explosion flame, leading to a broader range of maximum explosion pressures and velocities. The analysis results of this study offer valuable insights for preventing and controlling urban gas explosion risks in narrow and long confined spaces.

Keywords: long-narrow confined space; FLACS; gas; flame propagation; explosion disasters; explosion pressure

0 引言

目前国内燃气发展普及率已超过97.9%,燃气被认为是我国实现“双碳”目标的重要过渡能源之一^[1]。燃气管道多位于建筑物密集地区,并且由腐蚀引发的泄漏一般位于地下暗渠、地下管涵、地下综合管廊等狭长形受限空间。狭长形受限空间通常可分为全密闭形和半密闭形,如台湾高雄“8·1”燃气爆炸发生在两端被杂物封闭的地下暗渠中,可视为狭长全密闭形受限空间;湖北十堰“6·13”重大燃气爆炸发生在一端封闭一端开口的地下河道中,可视为狭长半密闭形受限空间。泄漏后的燃气在地下狭长受限空间内聚集往往隐蔽性大,难以察觉。燃气遇点火源后发生燃爆,造成大量的人员伤亡与环境破坏。由于狭长受限空间内具有长宽比大的特点,导致爆炸火焰发展迅猛,其产生的巨大破坏性应予以重视。

目前对气体在受限空间内的爆炸研究,多数采用实验和数值模拟的研究方法。齐圣等^[2]通过可视化实验对受限空间内油气燃爆火焰形态进行研究,提出光滑球形、褶皱球形、卷曲絮状3种火焰,并分析了其形成机理。李静野等^[3]、N.Zhou等^[4]等分别对不同长径比、存在弯管的受限空间结构内火焰传播特性进行分析,发现长径比越大,爆炸超压越出现先上升后下降的趋势,而受限空间内出现弯管能降低爆炸的压力和速度。李阳超等^[5]、庞磊等^[6]、L.Pang等^[7]分别采用模拟试验和Auto Rea Gas软件分析了半受限空间内气体无约束泄爆特性和泄爆面的特征参数对爆炸超压的影响。Q.Zhang等^[8]对三种不同尺寸的瓦斯巷道模型进行分析,得到超压随尺寸变化的规律。刘中宪等^[9]、史明方等^[10]使用有限元软件分析了地下综合管廊内燃气爆炸特性

和爆炸冲击波对钢结构的破坏效应,发现爆炸冲击波在不同方向上的传播速度和压力不同。罗振敏等^[11]采用FLACS软件对矿井瓦斯爆炸进行分析,发现爆炸燃烧波以近球面波的形式向四周传播。杨明磊等^[12]采用FLACS软件构建了地下暗渠爆炸场景,分析了点火源、障碍物阻塞率对燃气爆炸的影响。T.Aleš等^[13]、K.H.Sung等^[14]分别采用数值模拟对气体泄漏到密闭空间中的浓度分布、流动形式进行了分析。Z.Li等^[15]通过实验和数值模拟相结合的方法探讨了狭长形密闭空间的爆炸压力,发现通风口的存在能有效降低爆炸压力。以上学者通过实验、数值模拟方法对受限空间内的气体爆炸进行了大量研究,但缺少对全密闭形和半密闭形两种狭长形受限空间对比分析研究,并且缺乏考虑在不同工况条件下的燃气燃爆灾害研究。

本文采用FLACS数值模拟软件,分别研究全密闭形和半密闭形受限空间内燃气燃爆灾害的演化规律,并且对全密闭形和半密闭形受限空间分别分析了不同的影响因素,进一步总结了狭长形受限空间的燃爆规律,可为有效防治燃气在狭长形受限空间内的燃爆灾害提供依据。

1 模型构建及参数设置

1.1 模型构建

本文基于FLACS构建两种典型狭长受限空间分析燃气燃爆灾害规律。以长宽比50:2的密闭受限空间为例,如图1所示。该模型中两端完全封闭,模型几何尺寸为50 m×2 m×2 m,墙体厚度均设置为0.2 m。点火源设置在密闭受限空间内的一端中央,并沿着密闭受限空间中央点火端为起点,依次设置监测点MP1~MP11,间隔为5 m。边界条件均设置为欧拉(EULER)边界,环境温度设置为20℃,

初始压强为大气压,其余设置均为默认设置。半密闭受限空间模型为一端开口一端封闭,如图2所示。几何尺寸为50 m×2 m×2 m,形状、墙体厚度与密闭一致,监测点增加了MP12~MP14用来监测空间外爆炸参数。在边界条件上,由于气体爆炸后泄放在开敞空间上,因此在X正方向(一端开口方向)设置为平面波(PLAN_WAVE)边界,其他场景设置与密闭受限空间模型一样。网格均使用均一网格,大小为0.2 m,其中密闭网格区域为X[-1,51]、Y[-1,3]、Z[-1,3],半密闭网格为X[-1,70]、Y[-1,3]、Z[-1,3]。

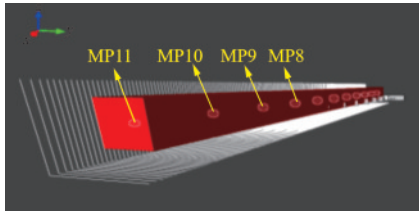


图1 全密闭受限空间模型

Fig.1 Fully confined space model

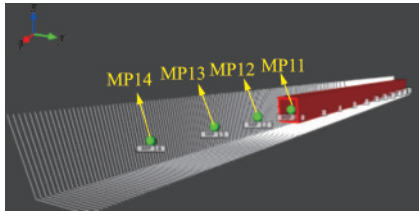


图2 半密闭受限空间模型

Fig.2 Semi-confined space model

1.2 数学模型

FLACS在进行燃气爆炸数值模拟上表现出复杂的非稳态湍流流动,模拟过程中各个状态参数遵循质量方程、动量方程、能量方程3个基本方程,如下式所示^[16-18]。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \nabla p - \rho g = \vec{f} + \nabla \cdot \tau \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \vec{u} = \frac{Dp}{Dt} + q + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i \rho h_i D_i \nabla Y_i - \nabla q_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ 为流体密度,kg/m³;t为时间,s; \vec{u} 为流场矢量速度,m/s;p为流场压力,Pa;g为重力加速度,m/s²;f为所受力的矢量和,N;h为流体总焓,J/mol;h_i为

流场中组分i的焓,J/mol;T为流场温度,K;k为系数;Y_i为流场中组分i的质量浓度,kg/m³;D_i为组分i相对分子质量; τ 为速度流场黏性应力张量;q_r为热辐射通量方程;q为流体燃烧反应放出的热量,J。

1.3 模型验证

为了验证FLACS对狭长形受限空间数值模拟的准确性,建立和文献[15]相同的狭长形受限空间尺寸模型,并且代入本文中设置的FLACS参数,模拟结果如图3所示。由该图可知数值模拟结果和实验结果压力峰值的发展趋势基本一致,距点火端近处模拟结果压力峰值稍高于实验结果,原因是FLACS数值模拟爆炸过程中没有考虑壁面的传热和壁面粗糙度对爆炸压力的影响,而在爆炸初期阶段壁面条件对爆炸压力的影响较大^[19]。通过对比实验结果与数值模拟结果,从而验证了数值模拟的准确性。

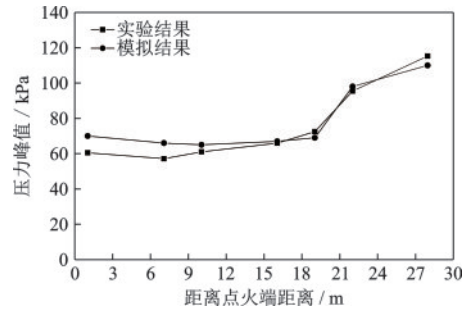


图3 实验与模拟结果对比

Fig.3 Comparison of experimental and simulation results

1.4 场景参数设置

由于全密闭受限空间更多关注的是长宽比结构和燃气气云当量比,而半密闭受限空间内气体通常会在开口一端逸出并且多数还存在管线横跨的情况。因此对全密闭场景聚焦在空间结构和气云当量比问题上,而半密闭场景研究气云体积和障碍物数量对燃爆灾害的影响。研究方案采用控制变量法,其中分析受限空间结构、气云体积、障碍物数量时燃气浓度均为化学当量比浓度9.48%;分析气云当量比、气云体积、障碍物数量时空间结构大小均为50 m×2 m×2 m;分析空间结构、气云当量比、障碍物数量时空间内均预先充满混合好的甲烷-空气混合气体。其变化工况条件见表1。

表1 模拟场景设置

Table 1 Setting of simulation scenes

受限类型	分析因素	工况设置				
全密闭	不同受限空间结构/m	30×2×2	50×2×2	70×2×2		
	不同气云当量比/%	7	8	9.48	9.91	12
半密闭	不同气云体积/m	2×2×2	2×2×6	2×2×10	2×2×25	2×2×50
	不同障碍物数量	1根管	3根管	5根管	7根管	

2 结果分析与讨论

2.1 燃爆火焰对比分析

两种受限空间燃爆火焰演化形态如图4、图5所示。全密闭火焰形态最初由于前驱冲击波处于萌芽阶段,传播的距离有限,对气体的扰动程度较弱而形成“半球形”火焰(250.04 ms);随后发展成“指尖形”火焰(499.79 ms),这是由于火焰在长直密闭空间中传播,火焰两侧受到壁面的约束,在火焰和壁面耦合过程中前驱冲击波出现衰减,并且能量有所损失,而在空间中部的火焰受限程度低故表现出中间火焰比两侧火焰长度更长;之后转变成经典的“Tulip(郁金香)形”火焰(750.30 ms),这时的火焰长度约占空间长度的1/2,其火焰锋面向可燃区一侧内凹;最后由于爆炸火焰前驱冲击波与另一端壁面产生的反射波发生碰撞和叠加现象,而变成“不规则锋面”火焰(1 250.21 ms)。

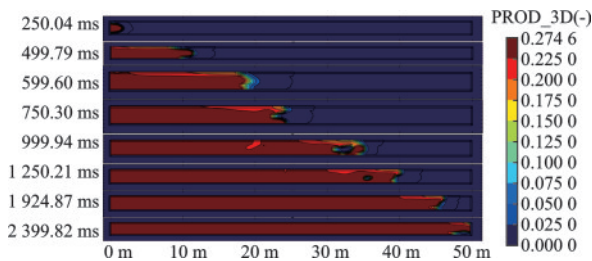


图4 全密闭形爆炸火焰分布

Fig.4 Flame distribution of fully enclosed explosion

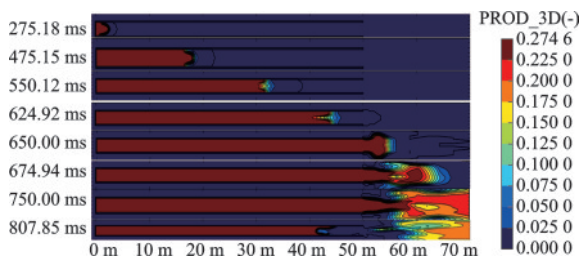


图5 半密闭形爆炸火焰分布

Fig.5 Flame distribution of semi-hermetic explosion

对于半密闭火焰,由于开口一端的泄压作用,当火焰传播到开口一端时,火焰前驱锋面将不再受到上下两边壁面的限制,而瞬间急剧膨胀,形成“蘑菇形”火焰(650.00 ms)。当“蘑菇形”火焰在受限空间外继续传播时,由于火焰不受限制,并且已燃区的火焰冲击波将冲散位于开口端的预混气体,使其一部分气体泄放在空间外被点燃,因此在该模拟区域中的50~70 m的燃爆火焰发生急剧的扰动与膨胀。另外,在807.85 ms时,观察到受限空间内外的火焰形态发生脱离,这是由于火焰燃爆到后期在开口处左右10 m内产生双向压力波,推动着空间内的火焰使其内凹,空间外的火焰继续向外扩散。

2.2 全密闭形受限空间燃爆灾害分析

2.2.1 受限空间结构对燃爆的影响

图6为3种不同受限空间结构下的爆炸火焰发展图。从该图中可观察到,火焰传播锋面随着长宽比的增大而传播的更远更快,长宽比对火焰的湍流效应具有明显的促进作用,这是由于较大的长宽比使其预混气体有足够的时间来进行化学反应,并且火焰锋面有足够的空间长度使其向前发展^[3]。另一方面,在爆炸火焰传播后期,长宽比越大的受限空间内爆炸火焰向前传播的更加显著。如在1 400.33 ms时,点火开始时间相同的情况下,长宽比70:2的受限空间反而比长宽比50:2和30:2的火焰冲击波传播的更远,其火焰锋面形态的不规则褶皱程度也更加明显。通过对比发现,长宽比为70:2的受限空间

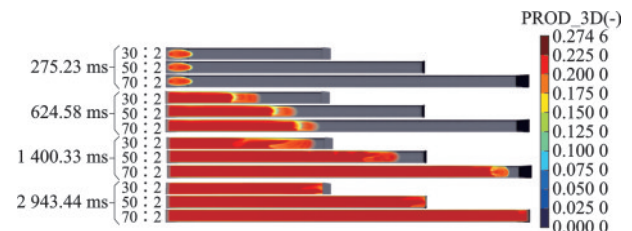


图6 不同受限空间结构3D爆炸火焰时空分布

Fig.6 3D spatial and temporal distribution of explosive flames with different confined space structures

内爆炸火焰产生的压力波对火焰锋面向前传播的激励作用更显著,并且另一端产生的反射压力波的阻滞作用相对长宽比小的受限空间更弱,这是因为长宽比越小一端壁面产生的反射压力波对火焰锋面的扰动程度和扰动频率将更大^[20],这将更加限制长宽比小的爆炸火焰向前传播。

进一步分析不同受限空间结构对爆炸压力的影响,如图7~9所示。由图7绘制长宽比为30:2的爆炸压力图可知,该受限空间内的左右两端和中间的爆炸压力变化趋势基本一致,爆炸压力随着时间的变化逐渐变大,但变化比较平稳,没有出现较大的波动性。而图8~9绘制长宽比为50:2和70:2的爆炸压力图显示压力的波动幅度随长宽比的增大而逐渐增大,并且两端的压力波动比中间的大。这是由于长宽比越大,火焰到达壁面的距离增大,使火焰前驱冲击波和压力反射波反复碰撞和叠加的频率降低,预混气体爆炸后的产物和热量不断聚集在受限空间内而无法排出空间外,压力得不到有效的泄放,而长度的增大使爆炸内的气体流动性增加,受限空间内的爆炸产物和释放出的能量湍流效应更加明显,不稳定性进一步增强,导致爆炸压力随时间波动上升更加剧烈。另外,由于空间长度的增加,火焰前驱冲击波和反射波在短时间内出现滞后现象,导致左右两端的爆炸压力在后期呈现出相反的凹凸变化。

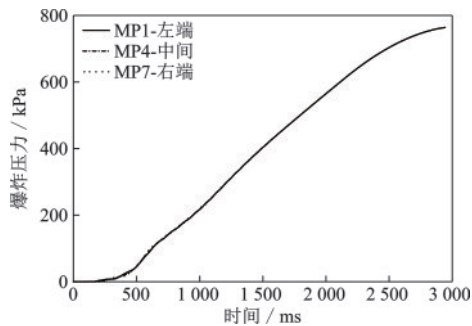


图7 长宽比30:2

Fig.7 Aspect ratio 30:2

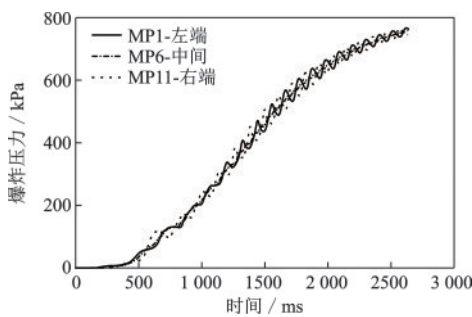


图8 长宽比50:2

Fig.8 Aspect ratio 50:2

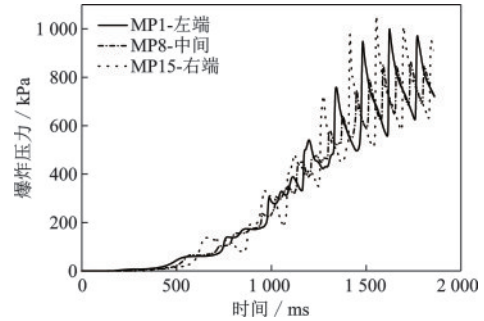


图9 长宽比70:2

Fig.9 Aspect ratio 70:2

对3种受限空间结构的最大爆炸压力(PMAX)进行对比分析,如图10所示。由该图可知,狭长密闭受限空间的结构对爆炸压力有显著的影响,随着长宽比的增大两端和中间的PMAX均会增大。并且两端的爆炸峰值增大程度要比中间增大的幅度大,且离点火源另一端(右端)的增大程度比点火源一端(左端)的增大程度稍高。另外随着长宽比的增大反而使反应时间减少,显然是由于受限空间结构长度的增大导致预混气体反应速度也相应的增大,并且反应速度比结构长度的增大作用更加显著,进而导致了爆炸反应时间的减少。

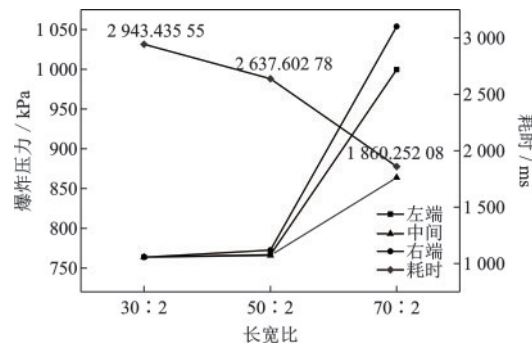


图10 不同长宽比爆炸压力对比

Fig.10 Comparison diagram of explosion pressure with different aspect ratios

2.2.2 气云当量比对燃爆的影响

图11中由上至下分别表示甲烷气云当量比浓度为7%、8%、9.48%(化学当量比浓度)、9.91%、12%。由图可知气云当量比为9.48%、9.91%的燃爆火焰始终处于其他当量比火焰的前方,并且9.91%爆炸火焰略微领先,这与文献[21]研究的煤矿瓦斯受限空间得出的结论一样,甲烷气云当量比浓度稍高于化学当量比浓度时,产生的爆炸火焰威力将达到最大。最终甲烷浓度为9.91%的爆炸火焰最先到达密闭受限空间的另一端,其次是12%、9.48%、8%、7%。

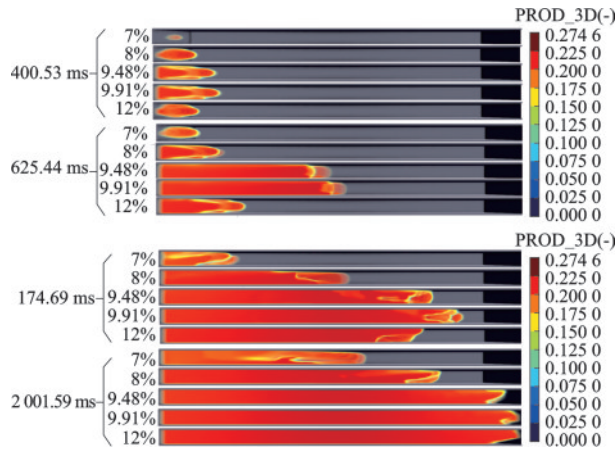


图11 不同甲烷浓度3D爆炸火焰时空分布

Fig.11 3D spatial and temporal distribution of explosive flame with different methane concentrations

进一步分析甲烷气云当量比浓度对爆炸压力的影响,如图12~14所示。图12、图14描述了密闭受限空间两端的爆炸压力,两端爆炸压力变化趋势相似,当甲烷浓度处于贫燃爆炸时(甲烷浓度小于9.48%),爆炸压力随时间的变化平稳上升,并且甲烷浓度越接近爆炸下限(5%),最大爆炸压力越小;而当甲烷浓度处于富燃爆炸时(甲烷浓度大于9.48%),爆炸压力随时间的变化波动上升,且在稍高于化学当量比的甲烷浓度(9.91%),其波动幅度表现的最大,右端最大可达150 kPa左右,另外甲烷浓度为9.91%时,爆炸压力峰值将比其他甲烷浓度的峰值更大。图13为中间位置的爆炸压力,由图可知,在贫燃爆炸时,其爆炸压力的变化与两端变化趋势一致,PMAX也非常接近;而在富燃爆炸时,其爆炸压力的变化与两端出现了明显的差异性,随时间的变化波动性有所下降,并且最大峰值也相应的下降。

图15描述了不同甲烷浓度下最大爆炸超压随距离的变化情况。由图可知,最大爆炸超压由大到

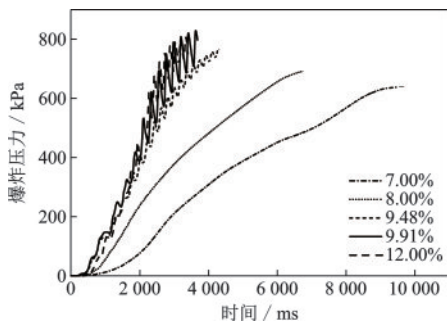


图12 左端MP1(点火端)

Fig.12 Left MP1 (ignition end)

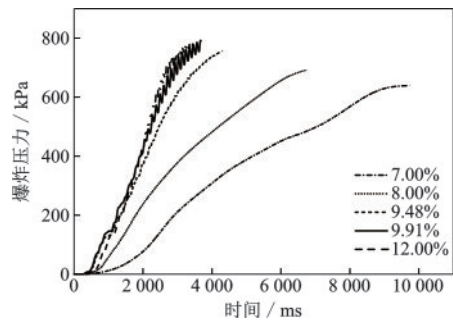


图13 中间MP6

Fig.13 Middle MP6

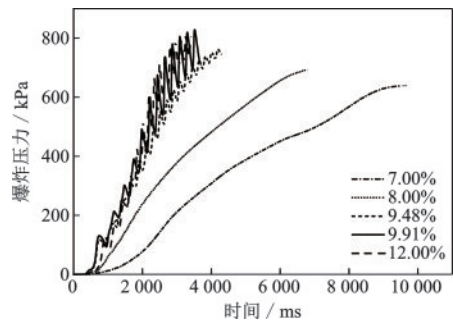


图14 右端MP11

Fig.14 Right MP11

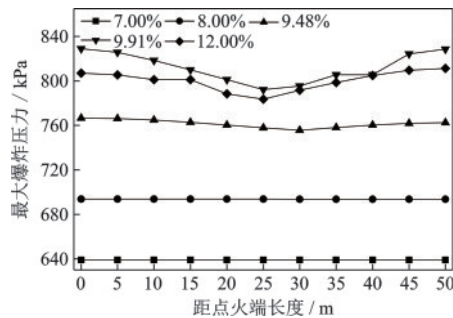


图15 不同甲烷浓度爆炸压力变化

Fig.15 Change of explosion pressure at different methane concentrations

小排序为 $PMAX_{(9.91\%)} > PMAX_{(12\%)} > PMAX_{(9.48\%)} > PMAX_{(8\%)} > PMAX_{(7\%)}$,这与一般情况处于化学当量比(9.48%)时爆炸超压最大不一致。分析原因可知,由于在狭长全密闭受限条件下,燃气在爆炸层流阶段还未完全反应加速就受到另一端壁面反射压力波的削减作用^[22]。由图11也可看出稍高于化学当量比(9.91%)爆炸火焰发展的最充分,甲烷-空气化学反应涉及多个步骤,当浓度进一步增大到12%时,空气不足会削弱化学反应能量的释放,但仍然比9.48%高,因为9.48%的一端壁面产生的反射压力波作用最强。进一步分析可知,富燃爆炸的最大压力显著大于贫燃爆炸,贫燃爆炸的最大压力

空间分布比较稳定,而富燃爆炸的最大压力呈现“两端高中间低”的特点。在本研究中,由于预混气体充满整个受限空间,较低的燃料浓度将和部分氧气进行化学反应,导致空间内还有部分氧气未参与反应,这部分氧气将限制爆炸冲击波的上升并且导致压力在整个受限空间内变化不大;而在接近或者高于化学当量比浓度时,反应将变得更加剧烈,在整个受限空间内的振荡频率也增大,最终导致爆炸超压富燃比贫燃爆炸的更大,并且在两个端面处的反射波和火焰冲击波碰撞和叠加现象更加显著,最终呈现出“两端高中间低”的特点。

2.3 半密闭形受限空间燃爆灾害分析

2.3.1 气云体积对燃爆的影响

气云体积对爆炸的影响如图16所示,不同气云体积对应的最大燃爆火焰传播距离显著不同。预混气云长度为2、6、10 m的火焰区长度最远分别达15、50、70 m左右;而预混气云长度为25、50 m的火焰区长度均超过70 m,并且预混气云长度为50 m的火焰发展趋势要比25 m的更加长远。另外预混气云长度的不同,在开口一端的最大火焰形态也有差异,因为在封闭一端点火引爆将产生巨大的冲击波将未燃区预混气体推向开口一端,而未燃区的预混气云体积量越多,扩散到空间外的预混气云体积将增多,导致火焰在空间外的传播距离更远。同时气云体积越大,在开口一端的瞬间泄压作用导致的燃爆火焰也将更加剧烈。

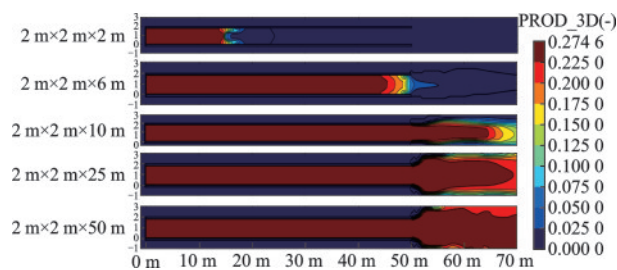


图16 不同气云体积下最大燃爆火焰空间分布

Fig.16 Spatial distribution of maximum detonation flame under different gas cloud volumes

分析不同气云体积下的最大爆炸压力云图,如图17所示。由该图可知,PMAX的空间分布由点火端到开口端逐渐下降,在受限空间内的爆炸压力分布呈现断层式结构,在开口端爆炸压力发生急剧下降,受限空间外的压力分布图呈现不规则形状。开口端的爆炸压力随时间的变化如图18所示,发现爆

炸压力在后期随时间的波动性较大,并且出现负压现象,气云体积越大压力作用的时间越长。另外,提取出监测点MP1~MP14的最大爆炸压力值,如图19所示。由图可知,在半密闭受限空间内0~50 m,气云长度为2 m的爆炸压力显著小于其他气云长度,这由图16可以解释,气云长度为2 m的爆炸火焰最远距离为15 m,还未到达开口端,而其他气云长度产生的爆炸火焰最远距离均到达或者超过开口端,导致气云长度为2 m的各个监测点测得的爆炸压力远小于其他气云长度产生的最大爆炸压力;气云长度为6、10、25、50 m的PMAX在受限空间内均表现出先减小后增大再减小的趋势,并且在距点火端距离相同的位置上PMAX变化不大。而在开口端(50 m)处的PMAX大小为 $PMAX_{(50m)} = PMAX_{(25m)} > PMAX_{(10m)} > PMAX_{(6m)} > PMAX_{(2m)}$,可见当气云体积量小于受限空间体积一半时,随着气云体积的减小,半密闭受限空间开口端的最大爆炸压力也会减小。另外对于开口端后(>50 m)的PMAX变化情况,表现出 $PMAX_{(2m)}$ 和 $PMAX_{(6m)}$ 随爆炸冲击波的传播逐渐趋于0 kPa,而 $PMAX_{(10m)}$ 、 $PMAX_{(25m)}$ 、 $PMAX_{(50m)}$ 由于一部分预混气体扩散至受限空间外继续燃爆导致最大爆炸压力在10 kPa左右波动。

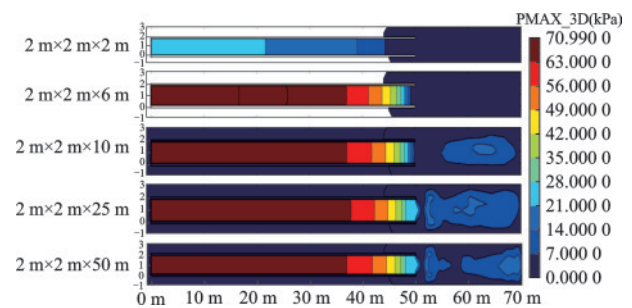


图17 不同气云体积下 PMAX 分布

Fig.17 PMAX distribution under different gas cloud volumes

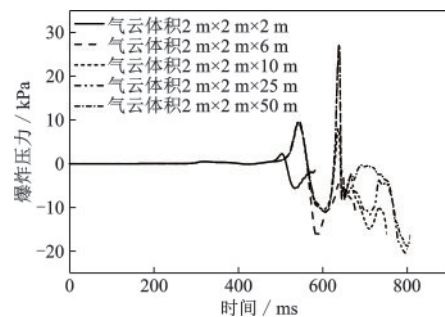


图18 开口端爆炸压力随时间的变化

Fig.18 Change of open end explosion pressure with time

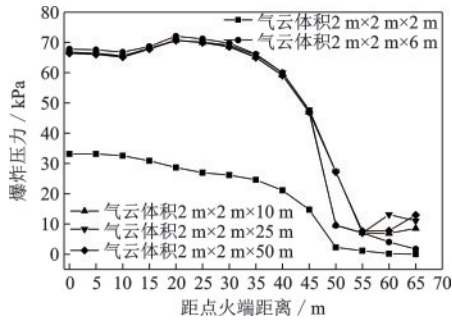


图 19 不同气云体积下爆炸压力

Fig.19 Explosion pressure at different gas cloud volumes

对不同气云体积下的燃爆速度进一步分析,如图 20 所示。由该图可知,不同气云长度下的燃爆速度云图有所差异,但都表现出在开口端后爆炸速度呈现最大,受限空间内的爆炸速度由点火端向开口端逐渐增大,受限空间外的爆炸速度云图呈环状由中心线向外围减小的趋势。另外,对监测点 MP1~MP14 测得的最大爆炸火焰速度随点火端距离长度的变化进行了分析,如图 21 所示。由图 21 可知,在受限空间内(0~50 m)各测点测得的火焰速度随着气云体积的增大而增大,并且当气云长度小于受限空间一半的长度时(2、6、10 m)增大的幅度较大,同时这三种气云长度在受限空间内火焰速度均表现出先增大后减小再增大的趋势。对比开口端(50 m)火焰速度可知, $V_{(2m)} < V_{(6m)} < V_{(10m)} < V_{(25m)} < V_{(50m)}$,可见开口处的爆炸速度是随着气云体积的增大而增大。在开口端后(>50 m),监测点测得的火焰速度除了气云长度 2 m 开始下降外,其余气云长度火焰速度均继续上升了一段距离,在 55 m 处达到最大值。随后 55 m 后的最大火焰速度,除气云长度为 50 m 的还有点波动外,其余气云长度均表现下降趋势。

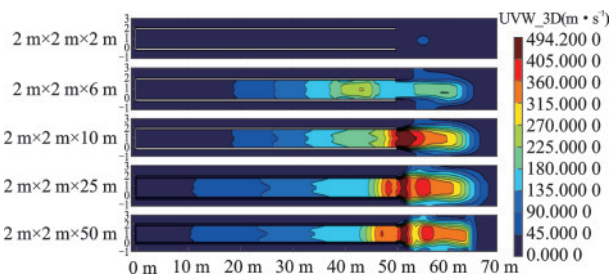


图 20 不同气云体积下燃爆速度分布

Fig.20 Distribution of velocity under different gas cloud volumes

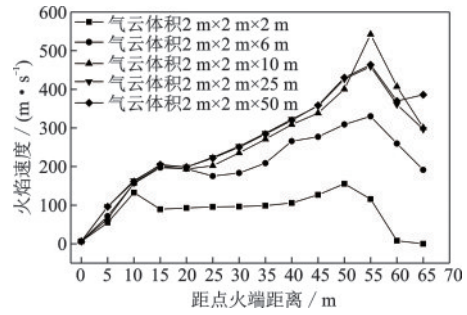


图 21 不同气云体积下燃爆火焰速度

Fig.21 Flame velocity at different gas cloud volumes

2.3.2 障碍物数量对燃爆的影响

如图 22 是 7 根管障碍物位置摆放示意图。其中圆柱形直径为 1 m,长度设置为 2 m,将圆柱形管线按照 7 m 间距摆放在受限空间内部,设置 4 种工况分别是 1 根管、3 根管、5 根管、7 根管,以此分析不同障碍物数量对爆炸的影响。图 23 为 4 种工况下的最大燃爆火焰空间分布图。由该图可知,不同障碍物数量对爆炸火焰的形态有一定的影响,当受限空间内摆放 3 根管时,爆炸火焰向前传播的趋势最旺盛,而随着数量的进一步增多,火焰形态冲出开口端时有一定的削弱。这种现象是由于障碍物一方面对爆炸火焰产生扭曲变形,湍流效应促进火焰的进一步传播,另一方面当火焰遇到障碍物时截面积的突然减小又抑制火焰向前发展,从而使火焰产生一种“竞争机制”^[23]。很明显当空间内有 5 根、7 根管时抑制作用大于促进作用,从而导致火焰传播产生一定的削弱作用。

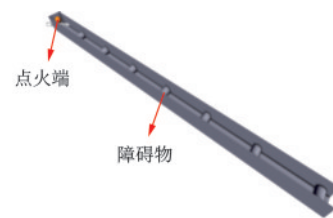


图 22 7 根管障碍物示意

Fig.22 Schematic diagram of 7 root canal obstacles

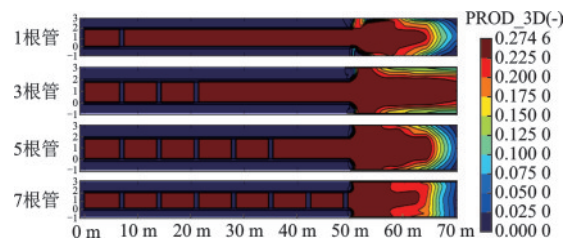


图 23 不同障碍物数量火焰分布

Fig.23 Flame distribution of different number of obstacles

图 24 分析了障碍物数量对最大爆炸压力的影响。由该图可知,不同障碍物数量对爆炸压力的影响显著。随着障碍物数量的增多,受限空间内的 P_{MAX} 增大,并且在有障碍物的位置 P_{MAX} 急剧增大,这是因为障碍物的阻碍作用,增大了空间的受限程度,导致爆炸冲击波与障碍物壁面发生剧烈的碰撞与叠加作用,并且这种碰撞的频率也在增大,最后导致爆炸压力快速上升。另外,在开口一端(50 m),由于截面的瞬间变化,爆炸压力在此位置将瞬间产生泄压作用,导致 P_{MAX} 急剧下降。图 25 分析了开口端爆炸压力随时间的变化情况,爆炸压力在爆炸后期短时间内快速上升,并且随着障碍物数量的增多压力上升的越快并且越高,随后急剧下降。图 26 绘制了监测点 MP1~MP14 的最大爆炸压力随点火距离的变化图。由该图可知,在半密闭受限空间内(0~50 m)最大爆炸压力大小为 P_{MAX(7根管)} > P_{MAX(5根管)} > P_{MAX(3根管)} > P_{MAX(1根管)},可见爆炸压力随着障碍物数量的增大而增大。P_{MAX(1根管)} 的变化幅度最小,而 P_{MAX(7根管)} 变化幅度最大,说明随着管线数量的增大 P_{MAX} 随点火距离的波动程度也会增大,这是由于障碍物的分布位置导致爆炸冲击波碰撞叠加现象更加显著,因而呈现上升一下降的趋势更明显。在开口端(50 m)位置,开口端最大爆炸压力增长幅度随着障碍物数量的增多而减小。在开口端后(>50 m)的最大爆炸压力随障碍物数量的变化差异不大,在 30 kPa 左右波动,直至降低到最低水平。

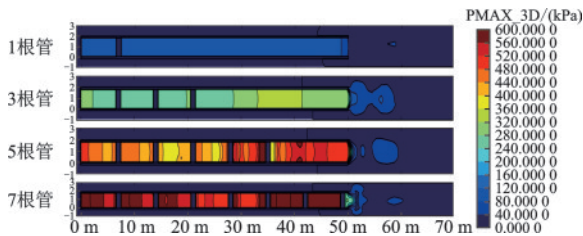


图 24 不同障碍物数量 P_{MAX} 分布

Fig.24 P_{MAX} distribution of different number of obstacles

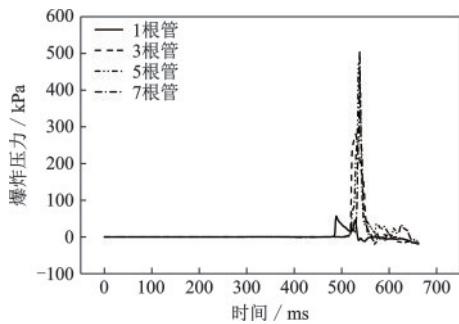


图 25 开口端爆炸压力随时间的变化

Fig.25 Change of open end explosion pressure with time

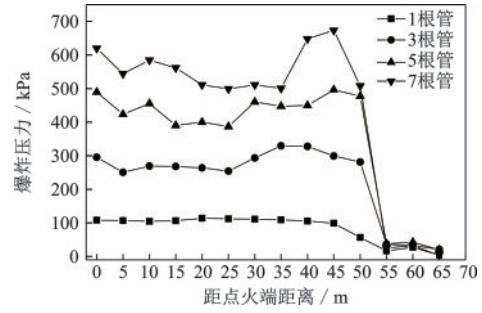


图 26 不同障碍物数量爆炸压力变化

Fig.26 Variation of explosion pressure with different number of obstacles

图 27 进一步分析了障碍物数量对燃爆火焰速度影响的空间分布云图。由该图可知,爆炸火焰速度在受限空间内分布逐渐随着距点火源的距离增大而增大,并且在开口端爆炸火焰速度达到最大。另外,在开口端的爆炸火焰速度随着障碍物数量的增多而增大,如在 7 根管线时,爆炸火焰速度云图颜色最深,火焰速度锋面变成“锥形”。这是由于爆炸火焰锋面到达障碍物时,障碍物产生的阻碍作用使其湍流效应更加显著,从而发生剧烈的碰撞导致火焰速度快速上升^[24]。图 28 为爆炸火焰速度随点火距离的变化情况。由该图可知,整体上在受限空间内(0~50 m)爆炸火焰速度是随着距点火源距离的增大而增大。其中管线数量越少,其最大火焰速度越平稳的上升,管线数量为 7 根管时,在每个位置上的最大爆炸火焰速度上升一下降的频率最高,这进一步说明障碍物数量越多导致火焰的扰动现象越强烈。在开口端(50 m)时,管线越多在开口端产生的爆炸火焰速度越大。而在开口端后(>50 m)7 根管的火焰速度下降的最快,这与图 23 解释的“竞争机制”一致。障碍物对火焰速度的抑制作用大于促进作用,因而 7 根管线的燃爆火焰速度在开口端后小于其他管线,而 3 根管线的燃爆火焰速度大于其他管线。

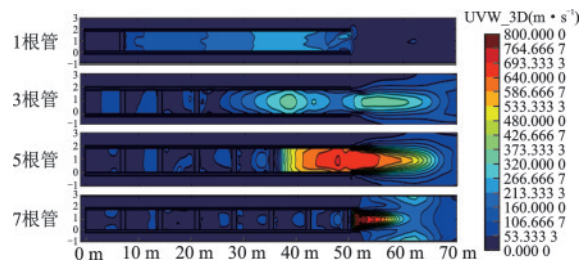


图 27 不同障碍物数量燃爆速度分布

Fig.27 Distribution of velocity with different number of obstacles

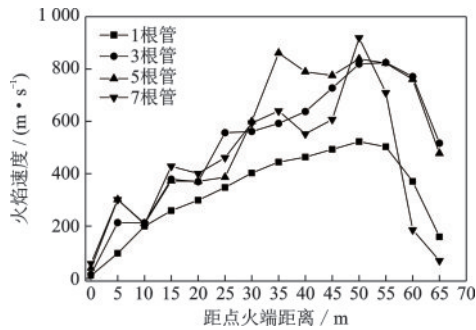


图 28 不同障碍物数量燃爆火焰速度变化

Fig.28 Flame velocity with different number of obstacles

3 结 论

建立了两种受限空间数值模拟分析模型,通过对比分析和考虑不同工况条件得出以下结论:

(1)研究分析了全密闭和半密闭受限空间内的燃爆火焰演化规律。全密闭形燃爆火焰呈现“半球形—指尖形—Tulip(郁金香)形—不规则锋面”的演化规律;而半密闭形燃爆火焰在开口端后会出现“蘑菇形”火焰,接着火焰发生急剧的扰动与膨胀,随后在开口端产生双向压力波,最终导致火焰出现脱离现象。

(2)全密闭受限空间长宽比的增大促进了火焰的湍流效应,同时对火焰向前传播的激励作用更显著,使火焰前驱冲击波和压力反射波反复碰撞和叠加的频率降低,增加了气体流动性,导致爆炸压力波动上升更剧烈。而两端和中间的P_{MAX}均会增大,两端的增大程度要比中间增大的幅度大。

(3)全密闭受限空间内甲烷气云当量比浓度稍高于化学当量比浓度时,爆炸火焰传播的最快,并且富燃爆炸比贫燃爆炸的爆炸压力要高,两端的富燃爆炸产生的爆炸压力波动幅度比中间的更大。另外,富燃爆炸的P_{MAX}在空间上呈现出“两端高中间低”的特点。

(4)半密闭受限空间内随着气云体积的增大,燃爆火焰传播的距离增大,并且在开口端的泄压作用导致的燃爆火焰将更加剧烈,而P_{MAX}从点火端到开口端逐渐下降,并在开口端压力急剧下降。当气云体积量小于受限空间体积一半时,随着气云体积的减小开口端的P_{MAX}也会减小;另外在受限空间内的火焰速度随着气云体积的增大而增大,并在开口端后速度达到最大。

(5)半密闭受限空间内随着管线障碍物的增加

燃爆火焰的发展趋势呈现先促进后削弱,表现出一种“竞争机制”,同时会提高P_{MAX},并且P_{MAX}随点火距离的波动程度也会增大;障碍物数量越多导致火焰的扰动现象越强烈,加大了最大燃爆火焰速度的变化幅度,并且在开口端达到最大爆速。

参考文献:

- [1] 孟伟,何卫,李璐伶,等.城镇燃气行业发展现状与关键前沿技术[J].油气储运,2022,41(6): 673-681.
Meng W, He W, Li L L, et al. Development status and key frontier technology of urban gas industry[J].Oil & Gas Storage and Transportation, 2022,41(6): 673-681. (in Chinese)
- [2] 齐圣,杜扬,梁建军,等.受限空间油气爆燃火焰形态[J].爆炸与冲击,2016,36(6): 832-838.
Qi S, Du Y, Liang J J, et al. Flame patterns of gasoline-air mixture deflagration in a confined space[J].Explosion and Shock Waves, 2016, 36(6): 832-838. (in Chinese)
- [3] 李静野,蒋新生,李进,等.长径比对管道油气爆炸特性与火焰传播规律影响研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(8): 88-94.
Li J Y, Jiang X S, Li J, et al. Study on influence of length-diameter ratio on explosion characteristics and flame propagation laws of gasoline-air mixture in pipeline[J].Journal of safety science and technology, 2020, 16(8): 88-94. (in Chinese)
- [4] Zhou N, Wang T, Li X, et al. Experimental study on hydrogen-air premixed gas explosion in confined space [J].Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects,2020: 1-12.
- [5] 李阳超,杜扬,王世茂,等.半受限空间油气无约束泄爆外场特性研究[J].中国安全科学学报,2017,27(8): 50-55.
Li C Y, Du Y, Wang S M, et al. Study on external characteristics of gasoline-air mixture's free venting explosion in semi-confined space[J].China Safety Science Journal,2017,27(8): 50-55. (in Chinese)
- [6] 庞磊,胡倩然,马菲菲,等.泄爆面特征参数对天然气爆炸超压峰值的影响规律[J].中国安全生产科学技术,2020,16(4): 126-131.
Pang L, Hu Q L, Ma F F, et al. Effect of vent characteristic parameters on overpressure peaks of natural gas explosion[J].Journal of Safety Science and Technology, 2020,16(4): 126-131. (in Chinese)
- [7] Pang L, Wang T, Zhang Q, et al. Nonlinear distribu-

- tion characteristics of flame regions from methane - air explosions in coal tunnels[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 92(3): 193-198
- [8] Zhang Q, Pang L, Zhang S X. Effect of scale on flame speeds of methane-air[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(5): 705-712.
- [9] 刘中宪,王治坤,张欢欢,等. 燃气爆炸作用下地下综合管廊动力响应模拟[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(4): 624-632.
Liu Z X, Wang Z K, Zhang H H, et al. Numerical simulation of blast-resistant performance of utility tunnel under gas explosion [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(4): 624-632. (in Chinese)
- [10] 史明方,刘振宇,田志昌,等. 火灾下爆炸冲击波在钢结构中的传播规律及破坏机理[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(2): 283-293.
Shi M F, Liu Z Y, Tian Z C, et al. Propagation law of explosion shock wave in steel structure[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(2): 283-293. (in Chinese)
- [11] 罗振敏,张群,王华,等. 基于FLACS的受限空间瓦斯爆炸数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(8): 1381-1387.
Luo Z M, Zhang Q, Yu H, et al. Numerical simulation of gas explosion in confined space with FLACS [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1381-1387. (in Chinese)
- [12] 杨明磊,张振武,周骥飞,等. 地下暗渠内气体爆炸影响范围的仿真研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(6): 2500-2504.
Yang M L, Zhang Z W, Zhou Y F, et al. Simulation on influence area of gas explosion in an underground culvert [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(6): 2500-2504. (in Chinese)
- [13] Aleš T, Mynarz M, Milada K. Study of quantification and distribution of explosive mixture in a confined space as a result of natural gas leak[J]. *The European Physical Journal Conferences*, 2014, 67: 02119.
- [14] Sung K H, Bang J W, Li L, et al. Effect of crack size on gas leakage characteristics in a confined space [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(7): 3411-3419.
- [15] Li Z, Chen L, Yan H, et al. Gas explosions of methane-air mixtures in a large-scale tube [J]. *Fuel*, 2021, 285: 119239.
- [16] 李佳航,杨国梁,多英全,等. 基于FLACS的海上钻探平台天然气井喷扩散模拟分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(增1): 121-127.
Li J H, Yang G L, Duo Y Q, et al. Simulation analysis of natural gas blowout diffusion on offshore drilling platform based on FLACS [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(Sup1): 121-127. (in Chinese)
- [17] Wang D, Qian X, Ji T, et al. Flammability limit and explosion energy of methane in enclosed pipeline under multi-phase conditions[J]. *Energy*, 2021, 217: 119355.
- [18] 朱渊,杨强,左腾腾,等. 基于FLACS的清管作业接收筒燃爆事故后果模拟及分析[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(5): 1762-1767.
Zhu Y, Yang Q, Zuo T T, et al. Simulation and analysis of the fire and explosion accident consequence of receiving tubes in pigging operation based on FLACS [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(5): 1762-1767. (in Chinese)
- [19] Jiang B, Lin B, Zhu C, et al. Premixed methane-air deflagrations in a completely adiabatic pipe and the effect of the condition of the pipe wall[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(4): 782-791.
- [20] 蒋新生,谢威,赵亚东,等. 不同长径比的狭长管道油气爆炸实验[J]. *油气储运*, 2020, 39(8): 879-884.
Jiang X S, Xie W, Zhao Y D, et al. Experiment on oil and gas explosion of slender pipelines with different length-to-diameter ratios [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(8): 879-884. (in Chinese)
- [21] Ma Q, Zhang Q, Li D, et al. Effects of premixed methane concentration on distribution of flame region and hazard effects in a tube and a tunnel gas explosion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 34: 30-38.
- [22] 陈先锋,张银,许小江,等. 不同当量比条件下矿井瓦斯爆炸过程的数值模拟[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(3): 429-433.
Chen X S, Zhang Y, Xu X J, et al. Numerical simulation on mine gas explosion in different gas content [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(3): 429-433. (in Chinese)
- [23] 尉存娟,谭迎新,袁宏魁. 水平管道内障碍物数量对瓦斯爆炸过程的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(6): 60-64.
Wei C J, Tan Y X, Yuan H S. Study on the influence of obstacle quantity on gas explosion process in horizontal pipe device [J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(6): 60-64, (in Chinese)
- [24] 刘梦杰,徐景德,张延炜,等. 受限空间内瓦斯爆炸障碍物附近流场结构演化实验研究[J]. *爆破*, 2021, 38(2): 160-166.
Liu M J, Xu J D, Zhang Y W, et al. Experimental study on evolution of flow field near gas explosion barriers in confined space [J]. *Blasting*, 2021, 38(2): 160-166. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)