

中文引用格式:彭善碧,李薇,唐平. 基于FLACS的地下暗厨房燃气爆炸数值模拟[J]. 中国安全科学学报,2024,34(1):215-222.

英文引用格式:PENG Shanbi, LI Wei, TANG Ping. Numerical simulation of gas explosion in underground unventilated kitchen based on FLACS[J]. China Safety Science Journal,2024,34(1): 215-222.

基于 FLACS 的地下暗厨房燃气爆炸数值模拟*

彭善碧¹教授, 李薇¹, 唐平²

(1 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500;

2 中国石油西南油气田公司 集输工程技术研究所, 四川 成都 610095)

中图分类号:X932 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.01.0275

基金项目:四川省自然科学基金资助(2023NSFSC0422)。

【摘要】 为更好地按抗爆要求设计地下暗厨房,利用 FLACS 软件建立含地下暗厨房的某民用建筑有限元模型,研究气云尺寸、点火位置、障碍物的形状以及位置和尺寸对燃气爆炸压力的影响,并根据数值模拟结果确定爆炸对暗厨房结构的损伤程度。研究表明:在暗厨房中,随着气云尺寸增大,爆炸对建筑物损坏程度也加大。点火位置在厨房、通风井和客厅时,压力峰值分别为 41.9、19.5 和 3.25 kPa。障碍物的存在会使爆炸产生更大的压力,障碍物截面形状为正方形时的压力峰值远大于圆形和长方形;障碍物越靠近点火位置,压力峰值越大;随着障碍物截面尺寸增加,压力峰值不断升高,电梯区域附近压力峰值上升幅度最大。地下暗厨房燃气爆炸产生的冲击波对地上空间影响大于传统厨房。

【关键词】 FLACS; 地下暗厨房; 燃气爆炸; 数值模拟; 压力峰值; 点火位置; 障碍物

Numerical simulation of gas explosion in underground unventilated kitchen based on FLACS

PENG Shanbi¹, LI Wei¹, TANG Ping²

(1 School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 2 Research Institute of Gathering and Transportation Engineering of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu Sichuan 610095, China)

Abstract: In order to optimize the anti-explosion design of an underground unventilated kitchen, the finite element model of a house with an underground unventilated kitchen was established in FLACS software. Based on this model, the effect of gas cloud size, ignition position, shape of obstacle, position, and size of obstacle on gas explosion pressure was investigated. The extent of explosion damage to the unventilated kitchen structure was obtained according to simulation results. The results show that when the gas cloud size increases in the unventilated kitchen, the explosion damage to the building is more severe. The maximum pressure peak values are 41.9, 19.5, and 3.25 kPa when ignition is in the kitchen, ventilation shaft, and living room. When an obstacle exists, a greater amount of pressure is generated. The peak pressure is much higher when the obstacle cross-section shape is square than when it is circular and rectangular. The closer the obstacle is to the ignition position, the more intense the pressure peak. With

the increase in the obstacle section size, the peak pressure increases continuously. The greatest rise in peak pressure is near the elevator. Shock waves from gas explosions in unventilated kitchens have a greater impact on the floor space than in traditional kitchens.

Keywords: FLACS; underground unventilated kitchen; gas explosion; numerical simulation; peak pressure; ignition position; obstacles

0 引言

据统计^[1],2021年全国共发生燃气事故1140起,其中居民用户事故610起,死亡48人,受伤390人。由于居民区地下空间通风效果差,燃气泄漏不宜察觉,燃气事故^[2]更为严重,这一问题已引起学者的关注^[3-4]。

目前分析地下空间燃气泄漏爆炸常用的方法包括数值模拟和试验研究,例如:王秋红^[5]和MISHRA^[6]等采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件模拟了埋地管道内燃气泄漏和爆炸过程,结果表明:热辐射是造成人员伤亡的主要原因。为定量评估城镇燃气管网泄漏爆炸事故风险,王轶宏等^[7]提出一种网格化的风险评估方法。李昂等^[8]应用FLUENT软件建立了管道系统,用以模拟煤矿井瓦斯爆炸,研究发现,设置泄爆门对冲击波有衰减作用,但对火焰温度无影响。ZHANG Shuhao等^[9]利用FLACS软件模拟研究了城市综合管廊燃气舱内甲烷-氢气混合物的爆炸过程,发现气云的长度和高度对爆炸压力的影响大于气云质量的影响。WANG Dan等^[10]通过试验研究了污水管道内水位高度和水流速率对甲烷扩散的影响特征。

以上研究主要集中在埋地管线、煤矿井和城市综合管廊,尚未见居民住宅地下暗厨房燃气泄漏爆炸研究。因此,笔者将采用FLACS软件模拟成都市某民用建筑地下暗厨房中预混燃气云爆炸过程,研究不同点火位置、不同障碍物尺寸、形状和位置下的燃气爆炸,为居民区域地下暗厨房燃气事故的防治提供理论依据。

1 燃气爆炸数值模拟

1.1 有限元模型建立

FLACS软件模拟受限空间甲烷-空气预混可燃云爆炸已被试验验证^[11-12],因此,本文也利用FLACS建立层高为3m的3层民用建筑有限元模型,房间内部不设置障碍物,假设所有门窗敞开。建筑地下一层洗衣房被私自整改为厨房,厨房无窗户,

这一层还包括通风井、客厅和电梯,并设9个监测点(M1—M9),布局如图1所示,其中通风井部分被遮挡,仅留一扇较窄窗户自然通风。

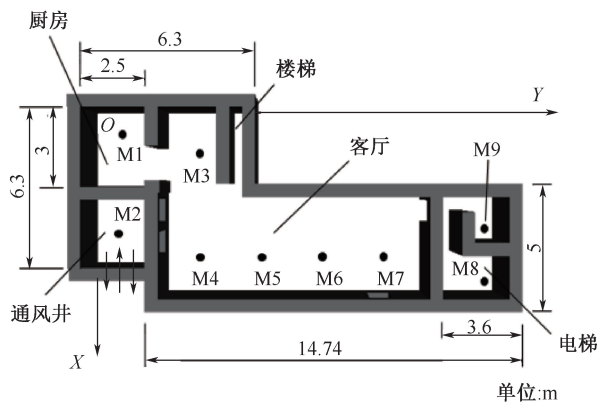


图1 地下一层布局

Fig. 1 Basement layout

1.2 燃气爆炸监测点设置

为研究燃气爆炸对建筑的影响情况,除负一层设9个监测点外(位置如图1所示),地上一层设3个监测点、二层设1个监测点,其坐标见表1。所有方向设为Euler边界,特征速度和相对湍流强度为0;温度为20℃,大气压为101.325kPa。

表1 监测点坐标

Tab. 1 Coordinate monitoring points

楼层	监测点	坐标
一层	M10	(2.51, 5.11, 5.21)
	M11	(6.01, 5.11, 5.21)
	M12	(6.01, 8.11, 5.21)
二层	M13	(6.01, 6.11, 8.21)

1.3 网格数量设置

网格数量分别为513000、709128、1001100和1504656时,监测点M1、M12和M13的爆炸压力值如图2所示。可以看出,除513000外,其他3种网格数量下3个监测点的压力几乎相同。为保证数值模拟结果的准确性,并降低计算成本,将网格数量设为1001100。

1.4 数值模拟工况设置

不考虑燃气泄漏过程,假设负一层气云为均匀

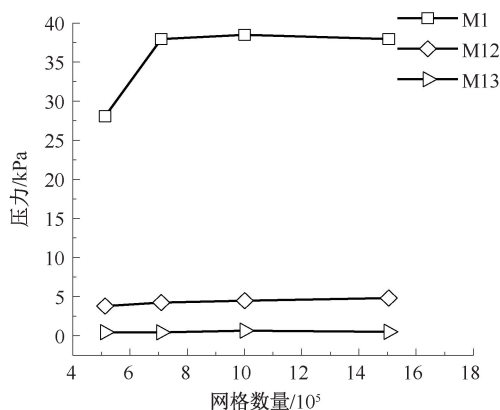


图 2 网格数量-爆炸压力曲线

Fig. 2 Grid number-pressure curve

分布的立方体甲烷-空气混合气体(甲烷体积分数为 9.5%);考虑气云尺寸、点火位置、障碍物形状、位置和尺寸的变化,数值模拟工况见表 2。该建筑燃气泄漏为地下暗厨房,无窗户自然通风。根据文

献[13]的分析结果可知:无风时厨房内燃气泄漏 2 500 s 后,气云分布在 1.2 m 处泄漏孔附近及上方区域。因此,在距地板 1.2 m 处设置高 1.8 m 的 4 种尺寸气云(工况 1—4)。假设气云被厨房中老化的插座短路所产生的电火花点燃。燃气泄漏后,可能在室内任意位置被点燃,因此,工况 4—6 研究点火位置对爆炸压力的影响。考虑不同形状、尺寸且摆放于不同位置的家具,工况 7—9 研究相同体积的不同截面形状障碍物对爆炸压力的影响;工况 7、10—12 研究障碍物位置对爆炸压力的影响,障碍物摆放位置如图 3 所示。工况 13—16 研究长方体障碍物尺寸对爆炸压力的影响。为对比地下暗厨房与传统厨房在相同情况下的爆炸特性,建立窗户尺寸为 0.9 m×1.5 m 的传统厨房模型,窗户采用 4 mm 浮法玻璃,窗户开启压力为 7.3 kPa,工况 17 和 18 分别模拟窗户关闭和打开时气云爆炸。

表 2 气云爆炸模拟工况

Tab. 2 Gas cloud explosion simulation scenarios

工况编号	气云尺寸: 长×宽×高/ m×m×m	气云覆盖区域	点火坐标	障碍物形状	障碍物位置	障碍物尺寸:长×宽×高/m×m×m		
1	1.8×1.8×1.8	厨房局域	(1.91, 2.11, 2.11)	—	—	无障碍物		
2	3×2.5×1.8	厨房顶部所有区域						
3	4×4×1.8	厨房顶部所有区域、通风井和客厅部分区域						
4	6×5×1.8	厨房顶部所有区域、通风井和客厅顶部局域	(5.91, 1.97, 2.11)	长方体	位置 1	1.3×1.5×1.2		
5			(5.91, 4.51, 2.11)			正方形	1.4×1.4×1.2	
6			(1.91, 2.11, 2.11)			圆柱体	圆柱体 直径 $d=1.58$, 高度 $h=1.2$	
7						长方体	位置 2	1.3×1.5×1.2
8							位置 3	
9							位置 4	
10			(1.91, 2.11, 2.11)			长方体	位置 1	0.7×0.9×0.5
11								0.9×1.1×0.5
12								1.1×1.3×0.5
13								1.3×1.5×0.5
14	—	—	—	—	无障碍物			
15								
16								
17								
18	—	—	—	—	—	无障碍物		

2 燃气爆炸数值模拟结果与分析

2.1 气云尺寸对爆炸的影响

根据 FLACS 模拟结果,在气云中心高度平面

处,采用爆炸压力准则^[14]研究不同尺寸气云爆炸对人员及钢筋混凝土建筑物的损伤范围。气云尺寸为 1.8 m×1.8 m×1.8 m 和 3 m×2.5 m×1.8 m 时爆炸压力较低,不存在人员伤亡区域。工况 3—4 的人员伤

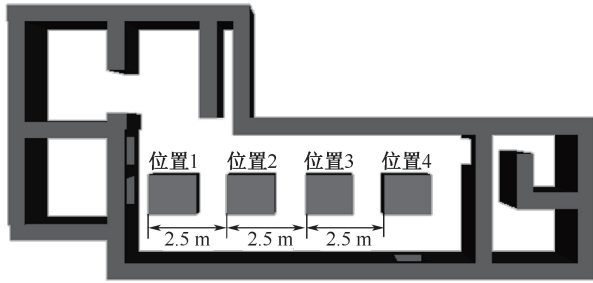


图3 不同位置障碍物(工况7、10—12)

Fig.3 Obstacles in different locations (Case 7, 10—12)

亡范围如图4所示,工况3的轻伤区为负一层电梯

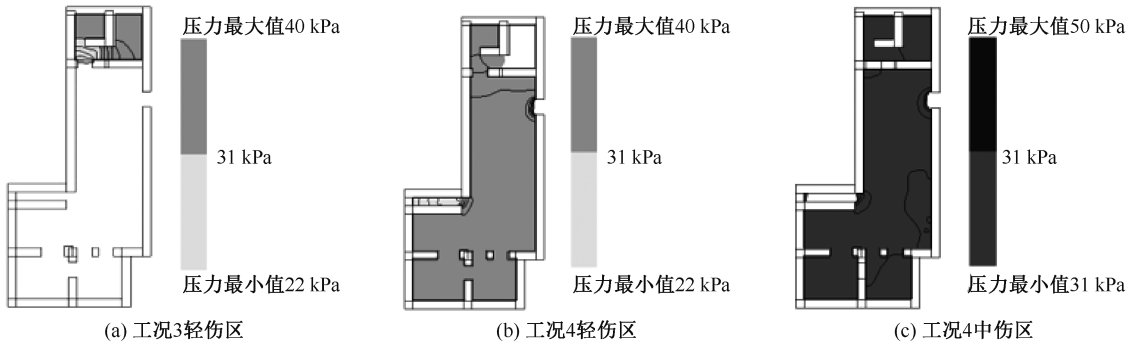


图4 不同尺寸气云爆炸时人员的伤亡范围

Fig.4 Range of damage to personnel from gas cloud explosions of different sizes

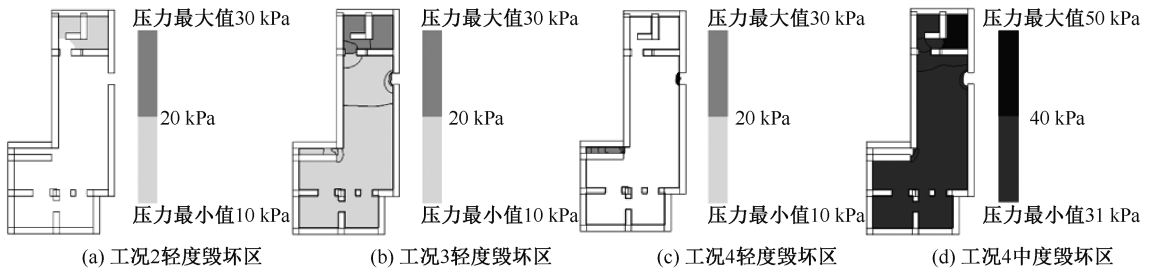


图5 不同尺寸气云爆炸时建筑物的毁坏范围

Fig.5 Range of damage to buildings from gas cloud explosions of different sizes

2.2 点火位置对爆炸的影响

由于建筑内部空间有限,压力传播至部分监测点的时间远小于爆炸压力的上升时间,导致部分监测点压力-时间曲线重合。因此,仅分析 M1、M8—M11、M13 的压力-时间曲线,如图6所示。发现点火位置在厨房、通风井和客厅时压力峰值都出现在电梯区域(M8),分别为 41.9、19.5 和 3.25 kPa,且厨房中 M1 的压力值都略小于电梯区域。在通风井点火时,M1 的压力发生震荡,如图6b所示。这是由于靠近泄爆口点火时声学震荡导致压力震荡,这与文献[17]观察到的现象一致。工况4—6中地上一层的压力峰值都出现在 M10,分别为 15.6、13.5 和

及其相邻房间,工况4的轻伤区为楼梯区域,其他区域为中伤区(压力 30~50 kPa),中伤区人员将会出现内伤和耳聋^[14]。图5为各工况下建筑物的损坏情况,工况2的轻度毁坏区为电梯及其相邻房间,工况3的轻度毁坏区为整个负一层,工况4的轻度毁坏区为楼梯区域,其他区域为中度毁坏区。随着气云尺寸的增大,建筑物被破坏的范围越广,损伤程度越严重。由于压力峰值(p)与气云体积的 $1/3$ 次方($V^{1/3}$)正相关,气云体积越大,压力峰值越高^[15-16];气云覆盖的障碍物越多,气云湍流越剧烈,火焰阵面传播更迅速,压力峰值更大。

1.7 kPa;地上二层爆炸压力值(M13)都趋于0。

不同点火位置爆炸压力峰值差异大的原因是通风井和客厅点火时厨房燃气气未完全燃烧,如图7b和图7c所示。不同点火位置的气云爆炸在压力峰值时刻的火焰形状如图8所示,点火位置位于厨房时,湍流最剧烈;在客厅点火时,冲击波向电梯区域传播过程中无门窗等障碍物阻挡,冲击波遇外界约束发生的反射作用小,因此爆炸压力值低。

2.3 障碍物对爆炸的影响

2.3.1 障碍物形状对爆炸的影响

障碍物截面为长方形、正方形和圆形时爆炸压力峰值(M8)分别为 52.94、57.11 和 51.25 kPa,见

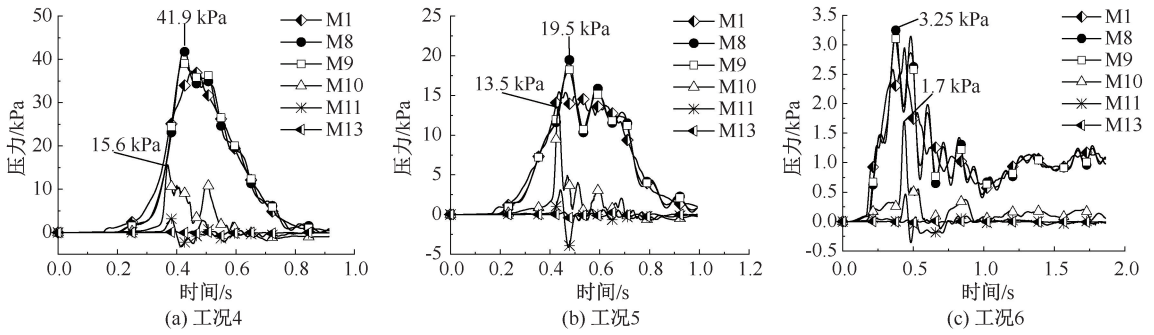


图 6 不同点火位置爆炸压力-时间曲线

Fig. 6 Explosion pressure-time curves for different ignition positions

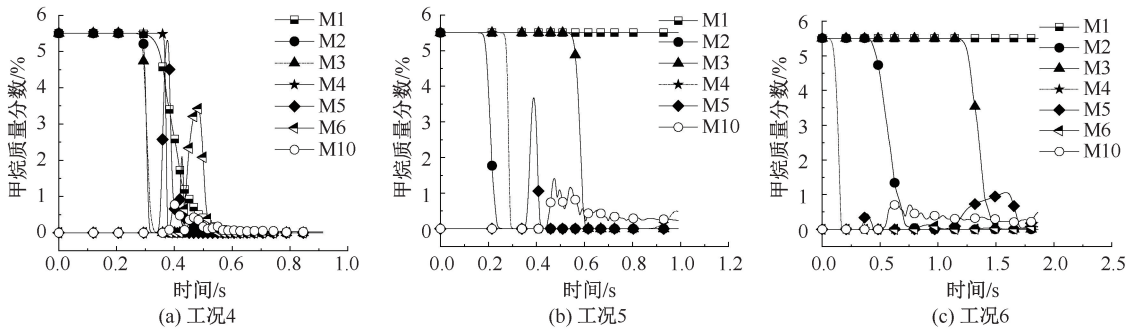


图 7 不同点火位置甲烷质量分数曲线

Fig. 7 Methane mass fraction curves for different ignition positions

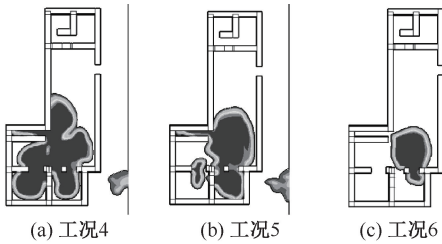


图 8 $Z=2.1\text{m}$,不同点火位置火焰形状

Fig. 8 $Z=2.1\text{m}$, flame shapes at different ignition positions

表 3。障碍物截面为正方形时各监测点压力峰值均大于截面为长方形和圆形。是由于正方形截面障碍物棱角多,导致气云湍流更强,因此,爆炸压力更大。障碍物截面为长方形时负一层监测点(M1—M9)的压力都略大于截面为圆形,但地上一层(M10—M12)和二层压力(M13)相较于截面为圆形时略小。

表 3 障碍物形状对各监测点压力峰值的影响

Tab. 3 Influence of obstacle shape on peak pressure at each monitoring point kPa

监测点	截面形状		
	长方形	正方形	圆形
M1	44.28	45.45	44.13
M2	43.72	45.15	43.72
M3	43.85	45.24	43.76

续表 3

监测点	截面形状		
	长方形	正方形	圆形
M4	43.81	44.91	43.47
M5	43.73	44.98	43.36
M6	44.54	46.06	43.91
M7	46.24	48.05	46.16
M8	52.94	57.11	51.25
M9	49.37	53.03	48.00
M10	15.58	15.82	15.64
M11	3.20	3.26	3.21
M12	2.96	3.02	2.97
M13	0.33	0.34	0.34

2. 3. 2 障碍物位置对爆炸的影响

障碍物依次位于 1 号、2 号、3 号和 4 号位置时爆炸压力峰值分别为 52.94、43.64、42.32 和 42.05 kPa,见表 4,障碍物越靠近点火位置,压力峰值越大。图 9 为障碍物位于不同位置时 M8 的压力-时间曲线,发现 4 种工况的压力几乎同时达到峰值,障碍物位置对爆炸压力上升速率影响小。无障碍物和存在障碍物的爆炸反应时间约为 0.91 和 0.87 s,障碍物的存在加剧了燃气爆炸。相较于无障碍物,障碍物位于 1 号和 4 号位置时压力峰值升高了 11 和 0.15 kPa,障碍物距离点火位置越远,压力峰值上升

幅度也在减小。

表 4 障碍物位置对各监测点压力峰值的影响

Tab. 4 Influence of obstacle position on peak pressure at each monitoring point

监测点	障碍物位置				
	1号位置	2号位置	3号位置	4号位置	无障碍物
M1	44.28	39.11	37.62	37.83	37.37
M2	43.72	38.85	37.40	37.43	37.05
M3	43.85	38.83	37.34	37.40	37.03
M4	43.81	38.68	37.22	37.24	36.89
M5	43.73	38.77	37.23	37.20	36.89
M6	44.54	38.95	37.56	37.67	37.40
M7	46.24	40.01	38.51	38.16	38.06
M8	52.94	43.64	42.32	42.05	41.90
M9	49.37	41.09	39.93	39.63	39.45
M10	15.58	15.67	15.77	15.73	15.65
M11	3.20	3.19	3.22	3.22	3.20
M12	2.96	2.96	2.99	2.98	2.96
M13	0.33	0.27	0.30	0.28	0.30

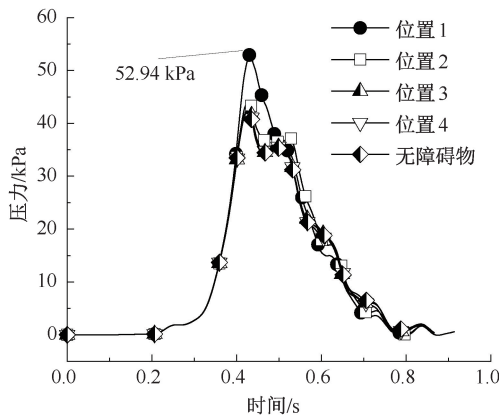


图 9 不同障碍物位置压力-时间曲线 (M8)

Fig. 9 Pressure-time curves for different positions of obstacle (M8)

2.3.3 障碍物尺寸对爆炸的影响

障碍物截面尺寸为 1.5×1.3、1.3×1.1、1.1×0.9 和 0.9 m×0.7 m 时 M8 的压力峰值分别为 60.49、56.70、49.73 和 43.69 kPa, 见表 5。随着障碍物尺寸增大, 各监测点压力值也逐渐增大, 其中电梯区域附近监测点 (M7、M8) 的压力增加幅度最大。

表 5 障碍物尺寸对各监测点压力峰值的影响

Tab. 5 Influence of obstacle size on peak pressure at each monitoring point

监测点	截面尺寸/m×m			
	1.5×1.3	1.3×1.1	1.1×0.9	0.9×0.7
M1	44.53	44.12	42.87	39.72
M2	44.10	43.79	42.27	39.49

续表 5

监测点	截面尺寸/m×m			
	1.5×1.3	1.3×1.1	1.1×0.9	0.9×0.7
M3	44.40	44.03	42.19	39.42
M4	43.97	43.67	41.91	39.33
M5	44.00	43.80	42.10	39.40
M6	44.69	44.41	42.98	39.78
M7	46.88	46.35	44.56	40.84
M8	60.49	56.70	49.73	43.69
M9	56.60	53.69	47.78	41.28
M10	15.95	15.72	15.65	15.62
M11	3.38	3.27	3.21	3.19
M12	3.05	2.99	2.97	2.96
M13	0.42	0.36	0.33	0.29

3 暗厨房与传统厨房爆炸结果比较

地下暗厨房 (工况 4)、传统厨房窗户关闭和打开 (工况 17 和 18) 的爆炸压力峰值都出现在 M8, 见表 6, 分别为 41.9、32.41 和 23.06 kPa。工况 18 中位于地上一层的 M10 的压力值为 9.16 kPa, 相较于工况 4 降低了 6.49 kPa。地下暗厨房爆炸产生的冲击波对负一层和地上一层影响更大, 但 3 种工况对地上二层影响都很小。

表 6 地下暗厨房与传统厨房内各监测点压力峰值

Tab. 6 Peak pressure at each monitoring point in underground unventilated and traditional kitchens

监测点	窗户状态		
	暗厨房	窗户关闭	窗户打开
M1	37.37	26.29	15.23
M2	37.05	26.56	16.27
M3	37.03	26.73	16.06
M4	36.89	26.31	15.91
M5	36.89	26.36	16.51
M6	37.4	27.94	16.89
M7	38.06	29.41	17.95
M8	41.9	32.41	23.06
M9	39.45	30.08	20.80
M10	15.65	12.87	9.16
M11	3.2	2.85	2.57
M12	2.96	2.64	2.29
M13	0.3	0.32	0.15

M1 的压力-时间曲线如图 10 所示。可以看出, 地下暗厨房爆炸压力最早达到峰值, 然后依次是传统厨房窗户关闭和打开工况。工况 4 和 17 在 M1 的压力-时间曲线在 0.312 s 前完全重合, 在 0.312 s 后, 窗户关闭下的压力-时间曲线先下降后持续上

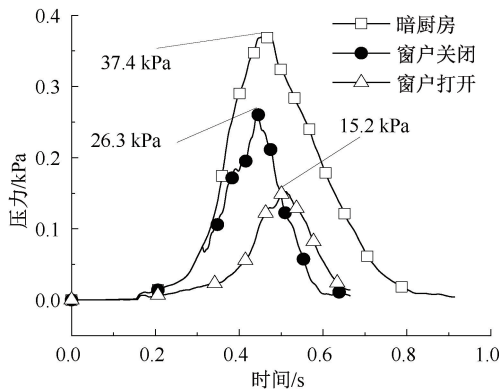
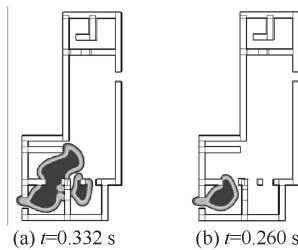


图 10 窗户不同状态下压力-时间曲线 (M1)

Fig. 10 Pressure-time curves for different window conditions (M1)

图 11 $Z=2.1\text{m}$, 窗户开/闭时的火焰形状 (工况 17—18)Fig. 11 $Z=2.1\text{m}$, flame shapes with windows open and closed (Case 17-18)

升,但爆炸压力上升速率小于地下暗厨房。是由于在 0.312 s 时气云产生的爆炸压力达到厨房窗户的

开启压力,窗户玻璃破碎,燃烧产物泄放到室外,如图 11a 所示,内部压力得到释放,从而抑制爆炸压力。地下暗厨房气云爆炸厨房内 M1 的压力峰值是厨房窗户打开工况压力峰值的 2.46 倍。

4 结 论

1) 燃气云尺寸增大,燃气爆炸对建筑物和人员的损伤范围不断扩大;不同尺寸气云爆炸压力峰值都出现在电梯附近。

2) 由数值模拟结果可知:点火位置在厨房、通风井、客厅时,气云爆炸压力峰值分别为 41.9、19.5 和 3.25 kPa。点火位置在通风井和客厅时,厨房气云未被完全燃烧,有二次爆炸风险。

3) 障碍物截面为正方形时,气云湍流最剧烈,产生的压力峰值最大,其次是长方形和圆形。障碍物越靠近点火位置,对气云火焰传播的阻碍作用越明显,爆炸压力峰值也越大,压力峰值为 52.94 kPa。障碍物截面尺寸越大,爆炸压力值也越大,障碍物截面尺寸为 $1.5\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ 时,爆炸压力峰值为 60.49 kPa。

4) 地下暗厨房压力峰值比传统厨房窗户关闭和打开下高 9.5 和 18.8 kPa;地下暗厨房爆炸产生的冲击波对地上一层影响大于传统厨房,其在 M10 的压力值比传统厨房窗户打开时高 6.49 kPa。

参 考 文 献

- [1] 中国城市燃气协会安全管理工作委员会,中国燃气安全杂志社,燃气安全与服务微信公众号. 全国燃气事故分析报告(2021 年全年综述)[R/OL]. [2022-09-20]. https://mp.weixin.qq.com/s/i_D2dwF6yOlgnab9miUI7g.
- [2] 湖北省十堰市张湾区艳湖社区集贸市场“6·13”重大燃气爆炸事故调查报告[R/OL]. [2021-11-24]. <https://yjt.hubei.gov.cn/yjgl/aqsc/sgdc/202109/P020211002415958135749.pdf>.
- [3] 宋斌. 居民室内燃气爆炸特征及防控措施研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [4] RYSZARD C, ALEKSANDRA B. Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: DOI: 10.1016/j.job.2021.102815.
- [5] 王秋红, 王力文, 蒋军成, 等. 城镇地理天然气管道泄漏诱发气云爆炸仿真[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 75-82.
WANG Qihong, WANG Liwen, JIANG Juncheng, et al. Simulation study on gas explosion induced by gas leakage of urban buried gas pipelines[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(9): 75-82.
- [6] MISHRA K B, WEHRSTEDT K D. Underground gas pipeline explosion and fire: CFD based assessment of foreseeability [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 526-542.
- [7] 王轶宏, 翟越, 李艳, 等. 城市燃气管网泄漏蒸气云爆炸事故风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 194-201.
WANG Yihong, ZHAI Yue, LI Yan, et al. Risk assessment of vapor cloud explosion accident of urban gas pipe network under leakage condition[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 194-201.
- [8] 李昂, 司俊鸿, 李雪冰. 泄爆门泄爆特性试验及数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(8): 51-56.

- LI Ang, SI Junhong, LI Xuebing. Experiment and numerical simulation for venting characteristics of explosion venting door[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8): 51-56.
- [9] ZHANG Shuhao, MA Hongtao, HUANG Xiaomei, et al. Numerical simulation on methane-hydrogen explosion in gas compartment in utility tunnel[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 140: 100-110.
- [10] WANG Dan, HUANG Ping, QIAN Xinming, et al. Study on the natural gas diffusion behavior in sewage pipeline by a new outdoor full-scale water cycling experimental pipeline system[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 599-609.
- [11] 郭丹彤. 窨井内受限空间可燃气体爆炸特性研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2017.
GUO Dantong. Research on explosive characteristics of combustible gas in wells within the restricted space[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2017.
- [12] LI Zhan, CHEN Li, FANG Qin, et al. Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 129: 66-79.
- [13] 于义成. 室内燃气泄漏扩散模拟及爆炸后果分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
YU Yicheng. The diffusion simulation and explosion consequence analysis of the indoor gas leakage[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] 张云明. 气体爆炸原理与防治技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 117-128.
- [15] 孙博. 开敞空间可燃气体云爆炸研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [16] BAO Qi, FANG Qin, YANG Shigang, et al. Experimental investigation on the deflagration load under unconfined methane-air explosions[J]. Fuel, 2016, 185: 565-576.
- [17] CAO Yong, GUO Jin, HU Kunlun, et al. The effect of ignition location on explosion venting of hydrogen-air mixtures[J]. Shock Waves, 2017, 27(4): 691-697.



作者简介: 彭善碧 (1980—),女,土家族,重庆人,硕士,教授,主要从事燃气负荷智能预测与燃气安全智能管控等方面的研究。E-mail: shanbipeng@swpu.edu.cn。