

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0503

城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸的灾害效应 (II) : 影响因素分析及后果评估*

杨石刚¹, 蔡炯炜^{1,2}, 杨 亚¹, 孙文盛¹, 门敬敏¹

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 73021 部队, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为系统地评估城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸的灾害后果, 利用 FLACS 软件模拟得到了可燃气体的爆炸荷载, 并分析了该灾害对建筑物破坏和人员伤害的危险距离及影响因素。结果表明: 当点火位置靠近管沟中间位置时, 超压峰值和危险距离较大; 泄爆口的大小对危险距离的影响不大, 而对离泄爆口较近处的超压峰值影响较大; 气云长度越长, 超压峰值和危险距离也越大, 但增幅逐渐减小直至不变; 管沟的横截面面积越大, 超压峰值和危险距离也越大; 为避免造成严重的灾害后果, 高耸建筑物和密集人群应远离泄爆口。

关键词: 城市地下浅埋管沟; 可燃气体; 爆炸冲击波; 危险距离; 超压峰值; 气云长度; 后果评估

中图分类号: O382 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Disaster effects of combustible gas explosion in an urban shallow-buried pipe trench (II): influencing factor analysis and consequence evaluation

YANG Shigang¹, CAI Jiongwei^{1,2}, YANG Ya¹, SUN Wensheng¹, MEN Jingmin¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. 73021 Troop of PLA, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Gas explosion accidents occurring in urban shallowly-buried pipe trenches can cause enormous casualties and property damage through shock waves transmitting from explosion vents, while many influencing factors exist in the process of gas explosion. In order to evaluate the disaster consequences of combustible gas explosion in an urban shallow-buried pipe trench systematically, the different conditions were established including different ignition points, different vent sizes, different gas cloud lengths and different trench cross-sectional areas. The computational fluid dynamics software FLACS was used to perform numerical simulation. And the explosion load of the combustible gas was obtained in the X, Y, and Z directions. The characteristics of the explosion overpressure peak distribution were analyzed, and the load generation mechanism was illustrated by analyzing the explosion process. The overpressure criteria were selected to demarcate the dangerous distances and the critical distances for damage to buildings and humans were determined. The mild, moderate, severe dangerous distances for building damage and personal injury were recorded and the influences of different factors on the change of the dangerous distances were analyzed. The results show that when the ignition position is closer to the middle of the

* 收稿日期: 2021-12-08; 修回日期: 2022-09-18

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2103300); 江苏省自然科学基金优秀青年基金(BK20180081)

第一作者: 杨石刚(1985—), 男, 博士, 副教授, youngshg@126.com

通信作者: 蔡炯炜(1994—), 男, 硕士研究生, 1348230496@qq.com

pipe trench, the overpressure peak is greater and the dangerous distance is larger. The change of the vent sizes has a little effect on the fluctuation range of the dangerous distance, but has a great effect on the overpressure peak near the vent. The longer the gas cloud length, the greater the overpressure peak and the larger the dangerous distance, but the increase decreases gradually until it remains unchanged. The larger the cross-sectional area of the pipe trench, the greater the overpressure peak and the larger the dangerous distance. When the cross-sectional area of the pipe trench increases, the gas cloud volume participating in the combustion reaction in the pipe trench also increases, which intensifies the reaction degree of the gas explosion. In order to avoid serious disaster consequences, high-rise buildings and dense crowd should be far away from the explosion vent.

Keywords: urban shallow-buried pipe trench; gas explosion; explosion load; dangerous distance; overpressure peak; gas cloud length; consequence assessment

近年来,随着产业升级的不断深入,我国对天然气的需求量在稳步提高,天然气在我国能源系统中的主体地位也得到了稳固。然而天然气作为一种可燃气体,无论是工业生产还是日常使用极易发生泄漏,当遇到合适的点火源时,会发生严重的爆炸事故。如 2021 年 6 月,湖北十堰的一条煤气管道被腐蚀,导致煤气泄漏发生爆炸,事故造成了 25 人死亡,138 人受伤。2020 年 6 月,浙江温岭的一辆油罐车阀门遭到严重的侧撞,导致可燃气体泄漏发生爆炸,事故造成了 20 人死亡,172 人受伤。而当泄漏的可燃气体进入到城市地下浅埋管沟中积聚爆炸时,会造成更严重的灾害后果,如 2013 年 11 月山东青岛的排水暗渠可燃气体爆炸,2014 年 7 月台湾高雄的地下管沟可燃气体爆炸。由于爆炸事故会造成严重的人员伤亡和财产损失,也会给社会带来极其恶劣的影响,因此对城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸灾害后果进行分析 and 评估具有重要意义。

目前,对于爆炸灾害的后果评估,运用最多的是超压准则,超压准则认为超压值的大小是评估人员和建筑物是否受到伤害和破坏的唯一评判标准,当冲击波超压超过某一阈值时,会对目标造成一定的伤害^[4]。而在某些情况下,超压峰值往往并不是很大,但是由于超压作用时间较长,也会造成较严重的影响,目前美国国防部在统一设施标准^[5]中根据冲量准则给出了人员的伤害标准。超压-冲量准则综合考虑了目标性质、破坏等级、冲击波超压和冲量这 4 个参数作为参考值,认为对目标的灾害效应评估应该综合考虑超压和冲量,只有当两者的组合达到某一临界值时才会对目标造成相应的伤害,不少学者也得到了一些研究成果^[6-11]。此外,李峰^[12]结合了超压准则和超压-冲量准则,首次提出了人体伤害当量的概念,用于预测地下交通爆炸对人员的伤害,并针对隧道内发生爆炸的场景给出了人员伤亡的分布区域。也有一些学者^[13-15]利用概率方程,即根据不同的伤害类型,利用超压和冲量的组合得到伤害百分比,实现了对冲击波灾害效应的定量评估,以此可以确定冲击波对目标的伤害等级及危险距离。另外,Assael 等^[2]列出了人员的鼓膜破裂、肺出血、头部及全身撞击死亡的概率方程,Aloson 等^[16]则将概率方程应用到特征曲线中。目前,关于城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸的灾害后果评估尚未见有公开报道,现有的灾害后果评估研究成果主要是借鉴固体炸药爆炸事故,对城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸的适用性不强,功能性也不完善,需要进行更具体和深入地研究。

本文中,利用计算流体动力学软件 FLACS,对城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸荷载进行数值模拟,选用超压准则评估传播到地面的爆炸冲击波对建筑物破坏和人员伤害的危险距离,并对影响荷载分布和危险距离的因素进行分析,以期对建筑物的安全设计以及爆炸事故的灾害预防提供一定参考。

1 管沟可燃气体爆炸荷载数值模拟

1.1 模拟工况设置

管沟的数值模型如图 1 所示,其中 L 为泄爆口之间的距离, l 为气云的长度, D 为正方形泄爆口的边

长。分别考虑点火点位置、泄爆口大小、气云长度和管沟横截面面积这 4 个因素的影响, 工况记录如表 1 所示。工况 1~4 分别表示点火点位于管沟内部 $(4/8)L$ 、 $(5/8)L$ 、 $(6/8)L$ 、 $(7/8)L$ 处, 用以研究点火位置对危险距离的影响。在实际管沟中, 雨水井是日常检修预留的孔口, 将工况 1、5 和 6 的泄爆口边长 D 分别设置为 1.0、0.8 和 0.6 m, 研究泄爆口大小对危险距离的影响。气体爆炸的强度与气体量的大小紧密相关, 工况 1、7~10 分别表示气云长度 l 为 90、60、40、20 和 10 m 的可燃气体爆炸, 研究气云长度对危险距离的影响。参照相关规范^[17], 将工况 1、11 和 12 分别表示管沟横截面面积为 1、2 和 3 m^2 的可燃气体爆炸, 研究管沟横截面面积对危险距离的影响。

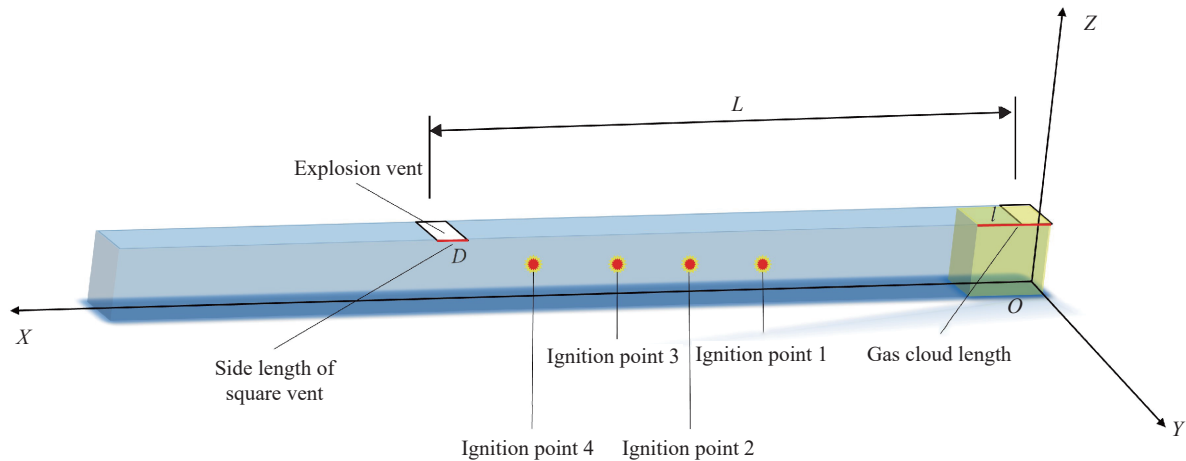


图 1 管沟的数值模型

Fig. 1 The numerical model established for a pipe trench

表 1 管沟可燃气体爆炸数值模拟工况

Table 1 Numerical simulation conditions on combustible gas explosion in a pipe trench

工况	点火位置	气云长度/m	截面积/ m^2	泄爆口边长/m	工况	点火位置	气云长度/m	截面积/ m^2	泄爆口边长/m
1	$(4/8)L$	90	1	1.0	7	$(4/8)L$	60	1	1.0
2	$(5/8)L$	90	1	1.0	8	$(4/8)L$	40	1	1.0
3	$(6/8)L$	90	1	1.0	9	$(4/8)L$	20	1	1.0
4	$(7/8)L$	90	1	1.0	10	$(4/8)L$	10	1	1.0
5	$(4/8)L$	90	1	0.8	11	$(4/8)L$	90	2	1.0
6	$(4/8)L$	90	1	0.6	12	$(4/8)L$	90	3	1.0

1.2 影响因素分析

由已有研究结果可知, 管沟内可燃气体爆炸冲击波通过泄爆口传播到地面的过程可分为稳定段、超压峰值 Δp_1 段、超压峰值 Δp_2 段^[18]。由于超压峰值 Δp_1 较小, 对地面的影响较有限, 而超压峰值 Δp_2 大、危险性高, 因此本节仅选取超压峰值 Δp_2 作为研究内容, 在空气域中沿 X 、 Y 、 Z 方向上布置的测点作为研究对象, 用于记录超压峰值 Δp_2 的变化, 分析其影响因素。

1.2.1 点火位置的影响

图 2(a) 和 (b) 分别为在不同的点火位置点火时, 在 X 和 Y 方向上的超压峰值分布, 其中红色虚线表示泄爆口所在位置。可以发现, 当点火点位于 $(4/8)L$ 处时超压峰值最大, 而当点火点位于 $(7/8)L$ 处时超压峰值最小; 在泄爆口两侧沿 Y 方向上超压峰值大致呈对称衰减的趋势, 但是在泄爆口两侧 X 方向上超压峰值呈不对称衰减的特征。

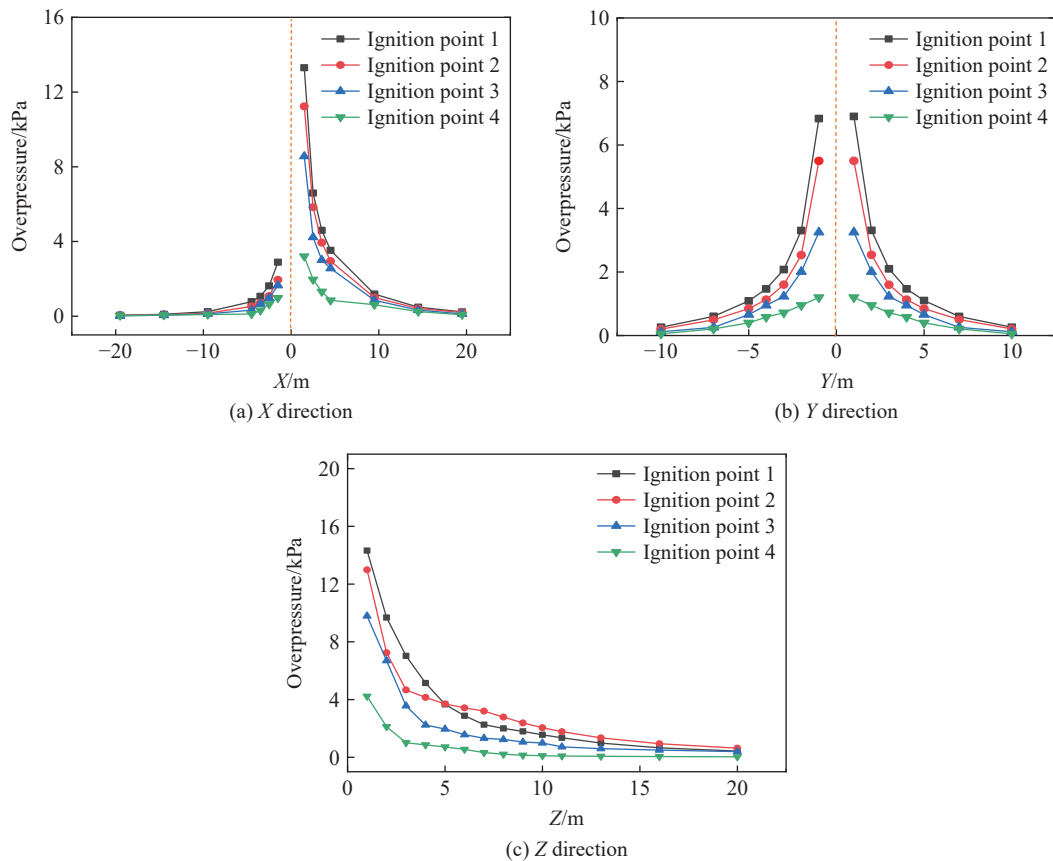


图 2 不同点火位置时的超压峰值分布

Fig. 2 Peak overpressure distribution at different ignition positions

在 Z 方向上, 超压峰值随高度的上升而逐渐减小(见图 2(c))。当 $Z < 5$ m 时, 工况 1 中超压峰值最大; 当 $Z > 5$ m 时, 工况 2 中超压峰值最大, 这是由于空气流场的带动在泄爆口上方有大量的残余燃料, 当火焰锋面传播到泄爆口上方时, 残余燃料与火焰波阵面接触后会继续燃烧, 此时部分火焰已传递到泄爆口上方约 5 m 处, 导致此处的超压峰值衰减较慢。而工况 1 中, 燃料受空气流场的影响, 被大量排到泄爆口上方区域, 而此时火焰波阵面仅传播到管沟内部, 因此泄爆口上方的残余燃料并没有参与燃烧而是仅被气流推动到空气域中, 在泄爆口上方测点的超压峰值呈现快速衰减的趋势。因此在 $Z=5$ m 的分界点处, 工况 2 的超压峰值出现反超的情况。而工况 4 中, 在 Z 方向上超压峰值始终最小, 可能的原因是: 当处于该点火位置时, 燃料参与燃烧反应的量较小, 导致火焰波传播到泄爆口处的能量也较低, 超压峰值偏小。

1.2.2 泄爆口大小的影响

图 3 为在不同的泄爆口面积下, 测点的超压峰值分布情况。在 X 负方向上, 各工况之间的超压峰值相差较小, 不超过 10%; 而在 X 正方向上, 当 $D=0.8$ m 时, 测点的超压峰值最大。在 Y 方向上, 当 $D=0.8$ m 时, 泄爆口处的超压峰值达到 7.8 kPa, 分别比 $D=0.6$ m 和 $D=1.0$ m 时的大 12.2% 和 29.3%。这是由于 X、Y 方向的超压峰值主要受内部爆炸荷载大小、爆炸波从泄爆口传出角度 2 个因素的影响。随着泄爆口尺寸的增大, 在泄爆作用下, 一方面内部爆炸荷载随之减小, 两者呈负反馈机制, 另一方面爆炸波传播方向更偏向地面, 对于 X、Y 方向的超压是正反馈机制。所以在两者的共同作用下, X、Y 方向的超压峰值与泄爆口大小之间并不呈规律性变化。而在 Z 方向上, $D=0.6$ m 时的超压峰值最大, 这是由于在 Z 方向的超压峰值主要受内部爆炸荷载的影响, 随着泄爆口尺寸的减小, 对应的超压峰值增大, 同时受泄爆口的约束作用, 其向空气域传播的方向也更偏向于沿 Z 方向传播。

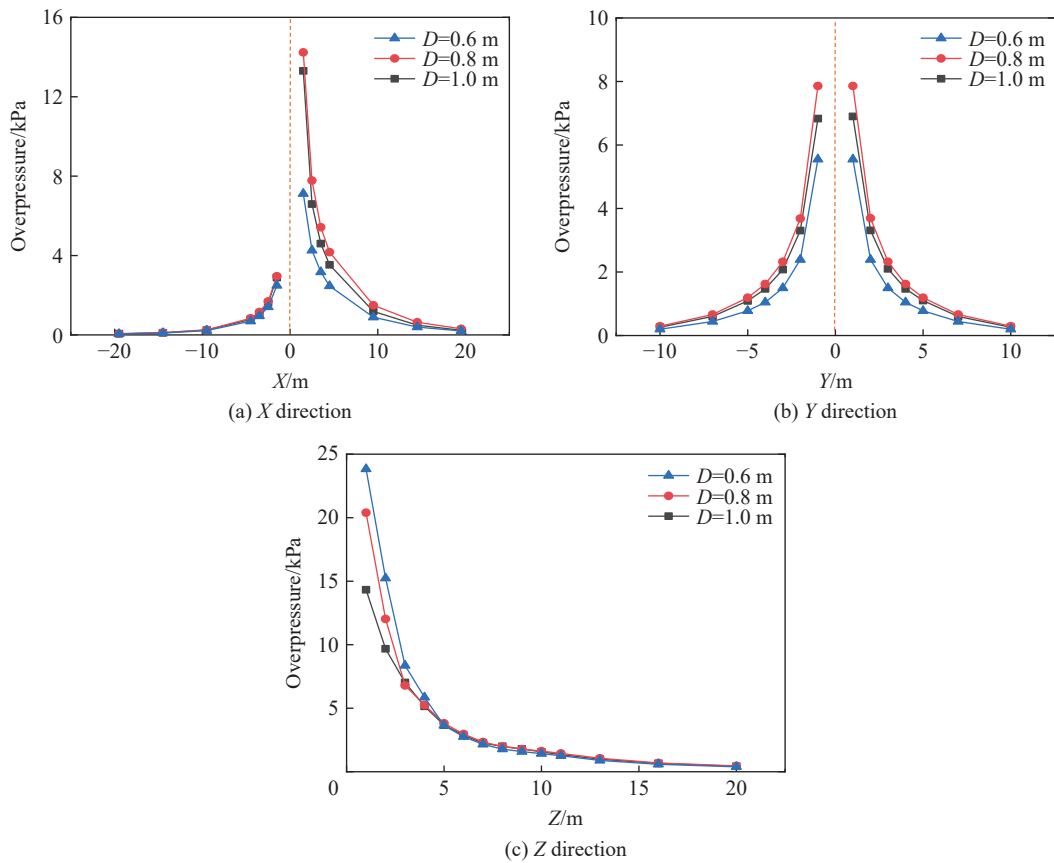
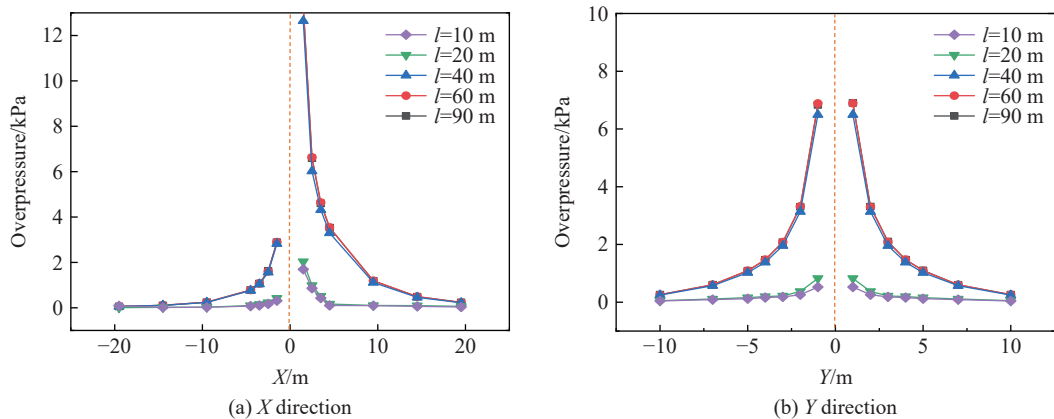


图 3 不同泄爆口面积时的超压峰值分布

Fig. 3 Peak overpressure distribution under different vent areas

1.2.3 气云长度的影响

由图 4 可知, 测点的超压峰值受管沟内气云长度 l 的影响。当气云的长度为 90 m 时超压峰值最大, 而气云长度为 10 m 时超压峰值最小。但同时也发现当气云长度为 60 和 40 m 时, 超压峰值与气云长度为 90 m 时的相差不大。这说明, 当气云达到一定长度后, 继续增大气云长度对超压的影响不大。可能的原因是, 管沟内参与燃烧反应的气云量有限, 未能参与反应的气云只能通过泄爆口被排放到空气中稀释, 而并未参与到燃烧反应中, 因此对超压峰值的影响有限。



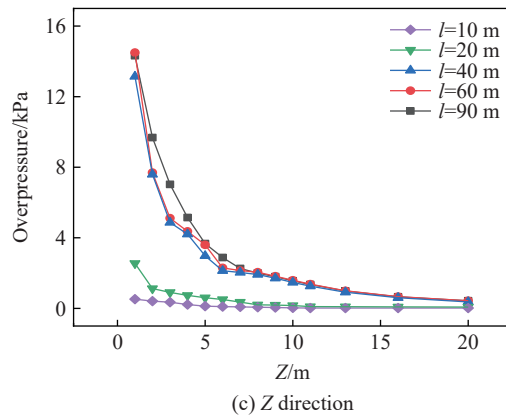


图 4 不同气云长度下的超压峰值分布

Fig. 4 Peak overpressure distribution under different gas cloud lengths

1.2.4 截面面积的影响

由图 5 可知, 当管沟横截面面积 S 增大 2 倍时, X 、 Y 、 Z 方向上的最大超压峰值分别增大到 3.3、4.6 和 4.8 倍; 而当管沟横截面面积增大 3 倍时, X 、 Y 、 Z 方向上的最大超压峰值分别增大到 4.8、7.7 和 6.9 倍。这是由于当管沟横截面面积增大时, 管沟内参与燃烧反应的气云量也增加, 加剧了燃气爆炸的反应程度, 使得测点处的超压峰值也变大。管沟横截面面积变化时, Y 、 Z 方向的超压峰值变化更为敏感, 这是由于冲击波在管沟内沿 X 方向有限距离传播, 而传播到泄爆口后进入到无限空气域中, 管沟横截面面积的影响会相对弱化。

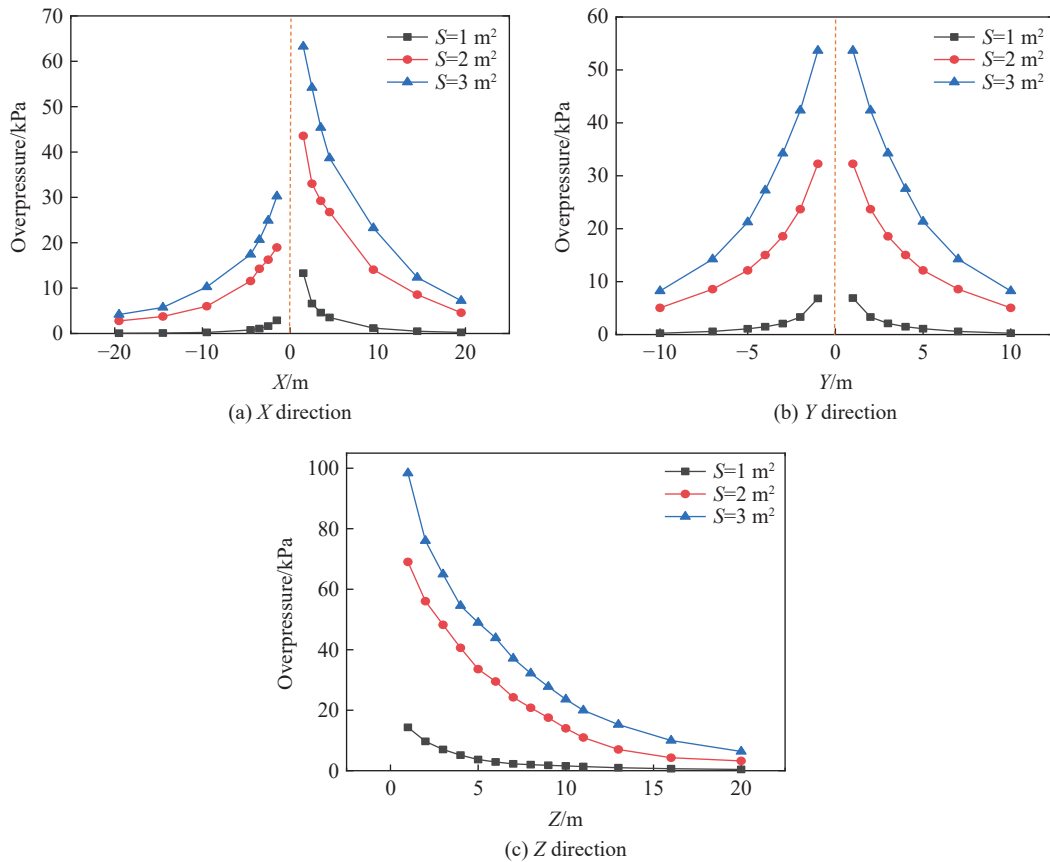


图 5 不同横截面面积的管沟内燃气爆炸超压峰值分布

Fig. 5 Peak distribution of gas explosion overpressure in trenches with different cross-sectional areas

2 管沟可燃气体爆炸灾害效应评估

选用超压准则, 来评估管沟内的爆炸冲击波传播到地面后对人员伤害和建筑物破坏的危险距离。冲击波超压对建筑物的影响可以参照化工安全的行业标准^[19], 如表 2 所示。本文中分别以 2.07、6.90、34.50 kPa 作为爆炸冲击波超压造成建筑物轻度破坏、中度破坏和重度破坏的临界值。

表 2 冲击波超压对建筑物的影响^[19]

Table 2 Impact of shock wave overpressure on buildings^[19]

超压/kPa	影响	区域	超压/kPa	影响	区域
0.14	出现噪音	安全区	>6.90	房屋受到破坏	中度破坏区
0.21	大玻璃可能破碎		9.00	钢构件出现轻微形变	
0.69	小玻璃可能破裂		13.80	墙面局部出现坍塌	
1.03~2.07	玻璃破碎的典型超压值		20.70~34.50	钢结构出现大变形	
>2.07	安全距离; 屋顶出现破坏	轻度破坏区	>34.50~48.20	房屋严重损坏	重度破坏区
3.40~6.90	窗户遭到破坏		68.9	建筑物全部遭受破坏	

根据爆炸造成人员伤亡的不同概率, 可以将爆炸危险源的中心从内向外依次可划分为死亡区、重伤区、轻伤区、安全区^[8], 表 3 为冲击波超压对人员伤害的区域划分^[3]。本文中分别以 10、45、75 kPa 作为爆炸冲击波超压造成人员轻伤、重伤和死亡的临界值。

表 3 冲击波超压对人员的影响^[3]

Table 3 Impact of shock wave overpressure on personnel^[3]

超压/kPa	伤害等级	区域	超压/kPa	伤害等级	区域
<10	安全	安全区	45~75	50%重伤率	重伤区
10~25	轻伤	轻伤区	>75	死亡	死亡区
>25~45	1%重伤率				

2.1 冲击波对建筑物破坏的危险距离

图 6 为当 $Y=0$ 时, 沿 XOZ 面爆炸冲击波对建筑物破坏区域的剖面图, 蓝色表示轻度破坏区域, 红色表示中度破坏区域, 绿色表示重度破坏区域, 但由于爆炸冲击波的能量有限, 在地面上并没有出现重度破坏的区域。由图可知, 轻度、中度破坏区域的空间形状并不规则, 且轻度破坏区域比中度破坏区域要大得多。

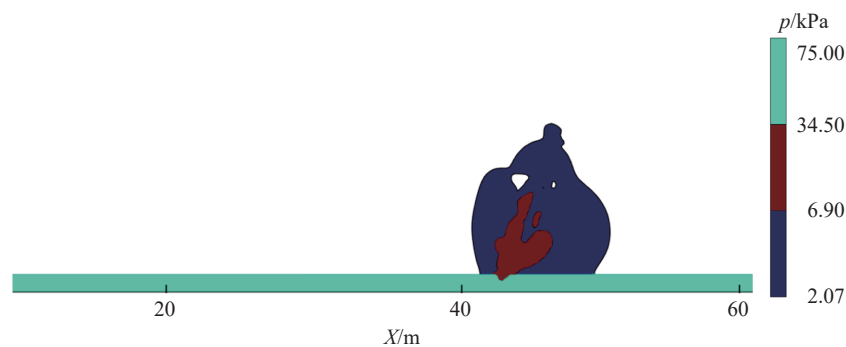


图 6 可燃气体爆炸对建筑物破坏区域的剖面图

Fig. 6 Sectional view of the damage area of the building caused by the explosion of combustible gas

为了能定量分析爆炸冲击波对建筑物造成破坏的最大危险距离, 汇总了不同高度处建筑物破坏区域的二维分布图 (见 图 7) 并得到最大的危险距离, 图中蓝色为轻度破坏区域, 红色为中度破坏区域。中度及轻度破坏区域与高度 Z 有关, 当 $Z > 7$ m 时, 随着爆炸冲击波的衰减, 并没有出现中度破坏 (见 图 7(a)), 随后将其各自的等值线投影到 XOY 平面 (见 图 7(b))。

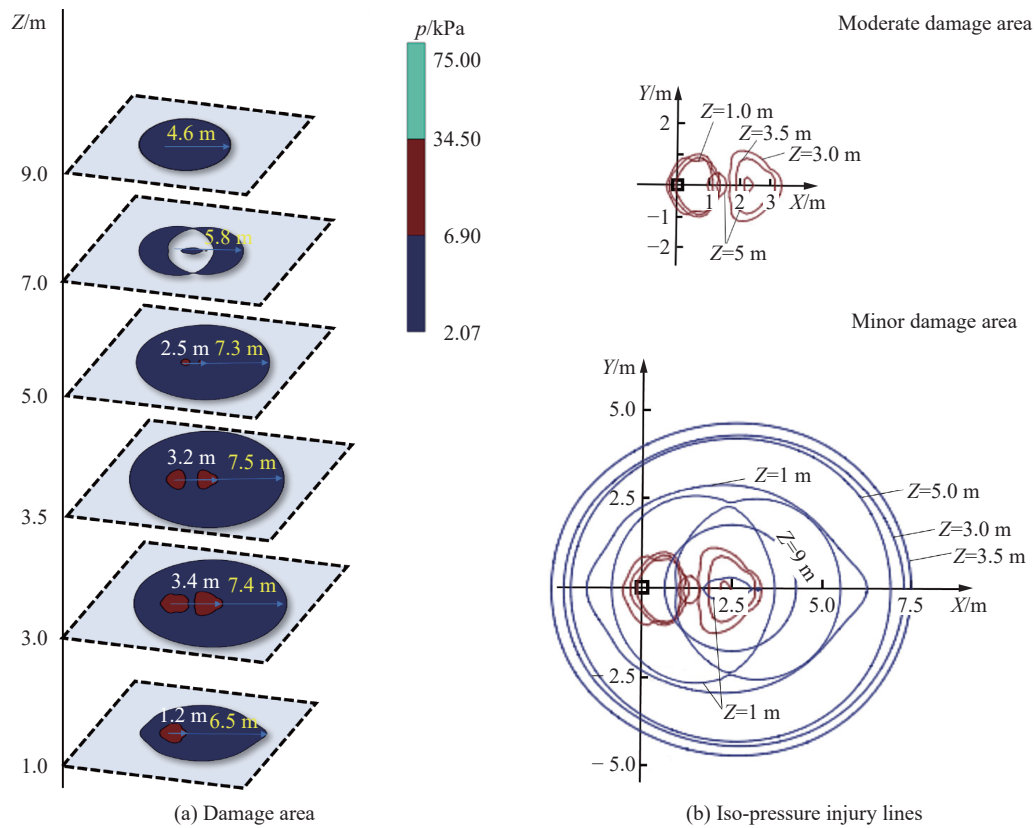


图 7 可燃气体爆炸对建筑物破坏区域的二维分布图

Fig. 7 Two-dimensional distribution of the damage area of the building caused by the explosion of combustible gas

当 $Z=3$ m 时, 中度破坏区域的范围最大, 因此为了得到该最大危险距离, 画出该高度下中度破坏的等压力伤害线 (见 图 8)。可以得到等压力伤害线上的点离泄爆口的距离互不相等, 由于其沿 Y 轴对称分布, 因此当 $Y=0$ 时, 等压力伤害线与 X 轴正方向的交点的距离为 3.4 m, 为中度破坏的危险距离。由于在确定安全范围时, 需把不确定因素考虑在内, 因此危险范围可以扩大为以泄爆口为圆心、半径为 3.4 m 的圆形区域。同理, 当 $Z=3.5$ m 时, 轻度破坏区域的范围达到最大, 该危险距离为 7.5 m。

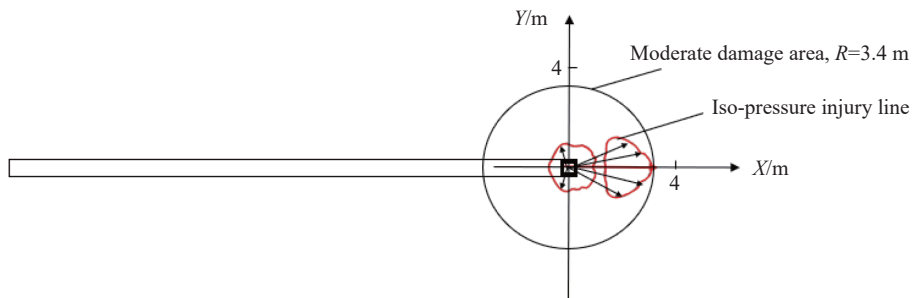


图 8 中度破坏危险范围

Fig. 8 Dangerous range of moderate damage

图 9(a) 为点火位置与危险距离的关系, 橙色部分为轻度破坏区域, 绿色部分为中度破坏区域, 红色部分为重度破坏区域, 其余部分为安全区域。由图可知, 对于任一点火位置, 轻度破坏的危险距离比中度和重度破坏要大。当点火点位于管沟 $(4/8)L$ 处时, 中度破坏和轻度破坏的危险距离最大, 分别为 7.0 和 2.8 m。而当点火点位置位于管沟 $(7/8)L$ 处时, 中度破坏和轻度破坏的危险距离为零。

图 9(b) 为管沟泄爆口大小与危险距离的关系。当泄爆口边长在 0.6~1.0 m 的范围时, 中度破坏和轻度破坏的危险距离分别在 3~4、5~9 m 的范围之间, 幅度波动不大。其中当泄爆口的边长为 0.8 m 时, 中度破坏及轻度破坏的危险距离最大, 分别为 8.6 和 3.9 m; 而当泄爆口边长为 0.6 m 时, 中度破坏及轻度破坏的危险距离最小, 分别为 5.2 和 3.1 m。

图 9(c) 为气云长度对危险距离的影响。由图可知, 气云的长度越长, 危险距离就越大; 但当气云达到一定的长度后, 危险距离基本保持不变。

图 9(d) 为管沟截面面积对危险距离的影响。从图中可得, 当管沟的截面面积越大时, 轻度破坏和中度破坏的危险距离也越大。当截面面积为 2 m^2 时, 建筑物出现了重度破坏, 其危险距离为 1.5 m, 而当管沟截面面积为 3 m^2 时, 重度破坏危险距离达到 2.4 m。

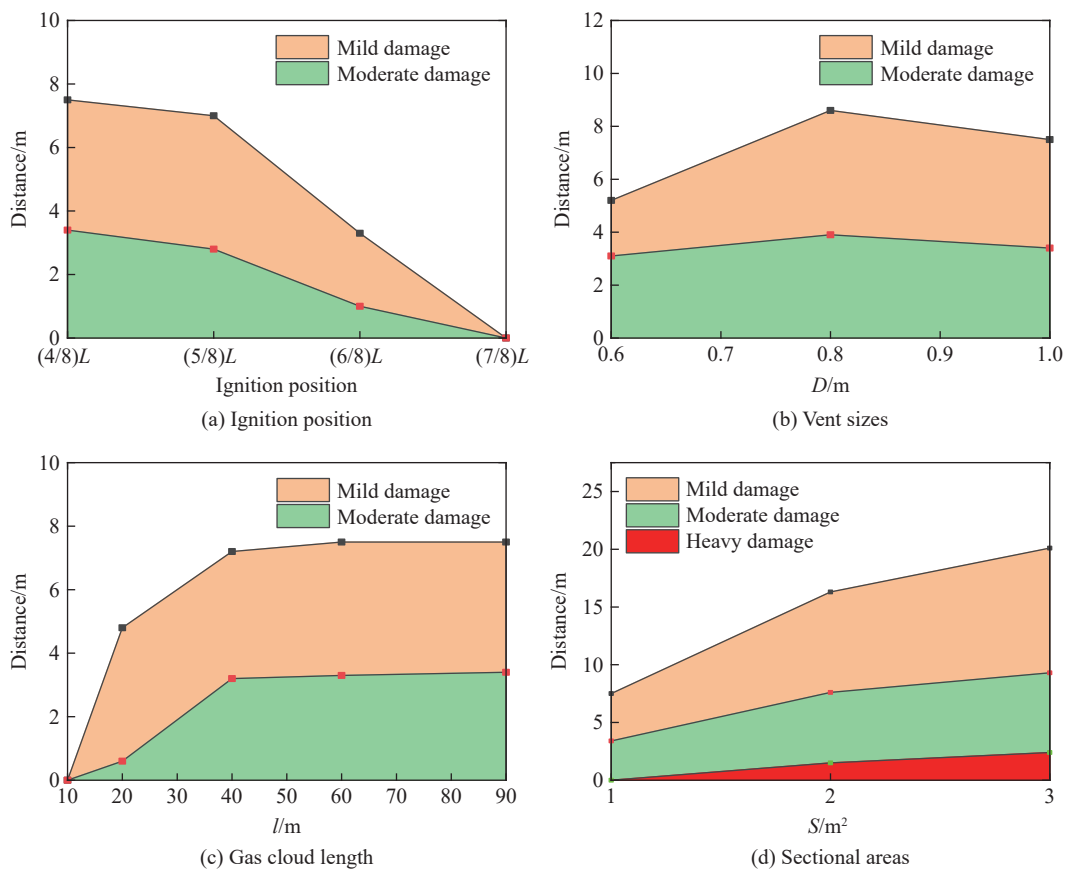


图 9 不同因素对建筑物破坏危险距离的影响

Fig. 9 Effects of different factors on the dangerous distance for building damage

2.2 冲击波对人员伤害的危险距离

汇总不同高度处人员危险距离的二维剖面图并得到最大危险距离, 如图 10 所示, 图中红色为人员轻伤区域。可以得到在地面上并没有出现人员的重伤区和死亡区。

由于在不同高度下的人员轻伤区具有不同的危险区域, 因此可以得到其所对应的等压力伤害线, 如图 11 所示。当 $Z=2.9 \text{ m}$ 时, 危险距离达到最大值 3.2 m。

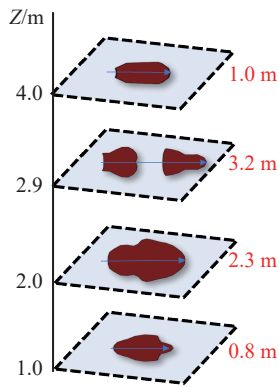


图 10 人员轻伤区的二维剖面图

Fig. 10 Two-dimensional section view of lightly-injured area

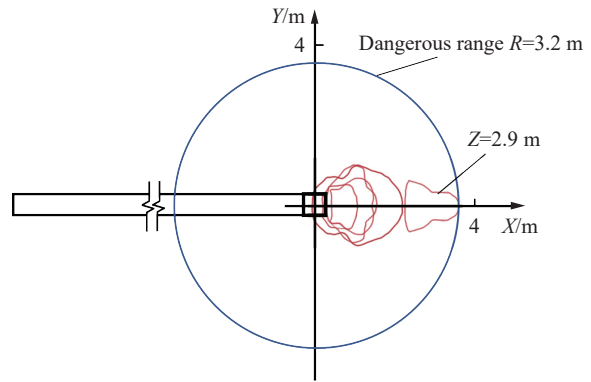


图 11 人员轻伤区危险距离

Fig. 11 Dangerous range of minor injury zone

图 12 为点火位置、泄爆口大小、气云长度和管沟截面面积与人员危险距离的关系, 橙色部分为轻伤区, 红色部分为重伤区, 其余为安全区。由图可知, 当点火点位置位于管沟 $(4/8)L$ 时, 人员受轻伤的危险距离最大; 而当点火点位置位于管沟 $(6/8)L$ 和 $(7/8)L$ 处时, 危险距离为零。当泄爆口大小变化时, 人员轻伤的危险距离基本始终在 3 m 左右小幅度波动。而当气云的长度越长时, 人员轻伤的危险距离增加的幅值也越小, 直至危险距离达到最大值。而当管沟的截面面积越大时, 人员受伤的危险距离也越大。

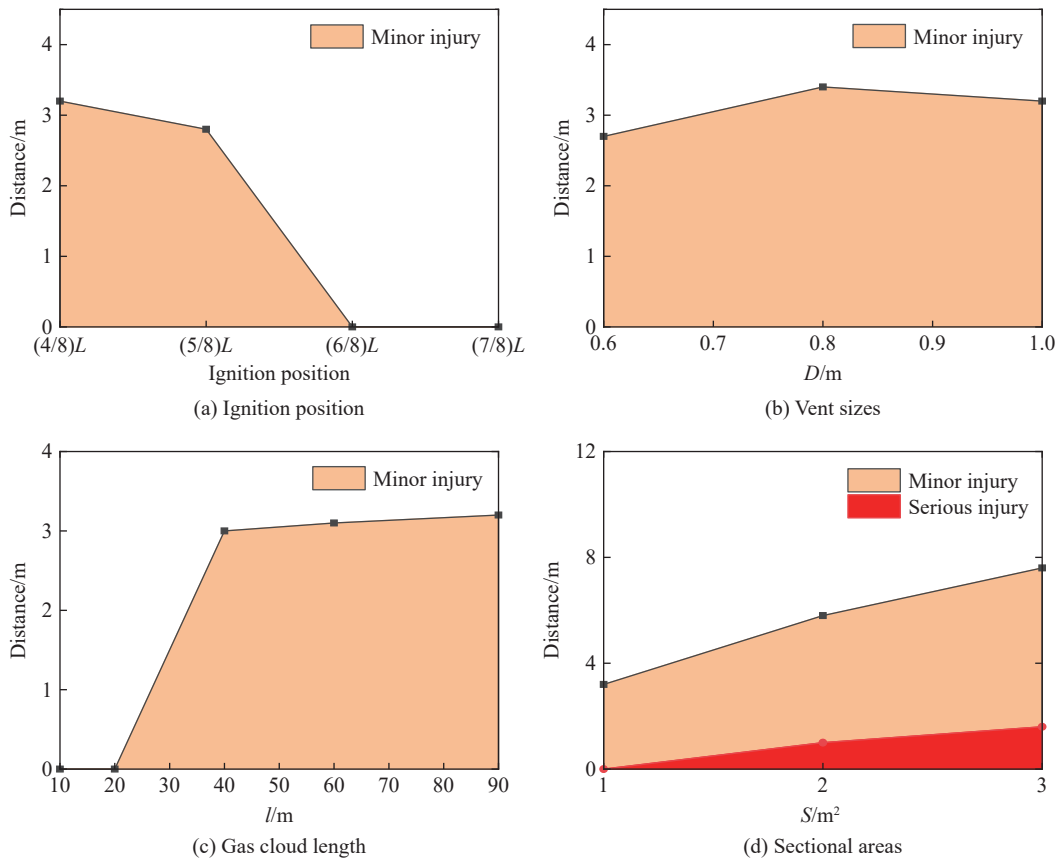


图 12 不同因素对人员伤害危险距离的影响

Fig. 12 Effects of different factors on dangerous distance of personal injury

3 结 论

基于 FLACS 软件对城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸荷载进行了数值模拟, 用超压准则评估了可燃气体爆炸产生的冲击波对建筑物破坏和人员伤害的危险距离, 并分析了影响因素, 具体结论如下。

(1) 当点火点位置位于管沟 $(4/8)L$ 和 $(5/8)L$ 时, 超压峰值和危险距离较大。

(2) 当正方形泄爆口边长为 $0.6\sim 1.0\text{ m}$ 时, 危险距离的波动范围不大, 而对离泄爆口较近处的超压峰值影响较大。

(3) 气云的长度越长, 超压峰值和危险距离也越大, 但当长度达到一定距离后, 其增幅受限。

(4) 管沟的截面面积越大, 超压峰值和危险距离也越大。

(5) 为避免管沟可燃气体爆炸造成严重的后果, 高耸的建筑物和聚集的人群应远离泄爆口。

参考文献:

- [1] YU G D, WANG Y L, ZHENG L, et al. Comprehensive study on the catastrophic explosion of ammonium nitrate stored in the warehouse of Beirut port [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 152: 201–219. DOI: 10.1016/j.psep.2021.05.030.
- [2] ASSAEL M J, KAKOSIMOS K E. Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis [M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2010.
- [3] WANG K, SHI T T, HE Y R, et al. Case analysis and CFD numerical study on gas explosion and damage processing caused by aging urban subsurface pipeline failures [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 97: 201–219. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.052.
- [4] ZHANG Q T, ZHOU G, HU Y 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.
- [5] Structures to resist the effects of accidental explosions: UFC 3-340-02 [S]. USA: Department of Defense, 2008.
- [6] RUSSO P, DE MARCO A, PARISI F. Failure of reinforced concrete and tuff stone masonry buildings as consequence of hydrogen pipeline explosions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(38): 21067–21079. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.225.
- [7] LEES F. Lees' loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control [M]. 4th ed. Amsterdam, USA: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [8] 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.
ZHANG Y M. Gas explosion principle and prevention technology [M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2018.
- [9] MA G W, SHI H J, SHU D W. *P-I* diagram method for combined failure modes of rigid-plastic beams [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(6): 1081–1094. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.05.001.
- [10] 汪维. 钢筋混凝土构件在爆炸荷载作用下的毁伤效应及评估方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 103–118.
WANG W. Study on damage effects and assessments method of reinforced concrete structural members under blast loading [D]. Changsha, Hunan, China: National University of Defense Technology, 2012: 103–118.
- [11] American Institute of Chemical Engineers. Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards [M]. 2nd ed. New York, USA: Wiley, 2010: 86–95.
- [12] 李峰. 城市地下交通空间爆炸人员及结构毁伤研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014: 98–125.
LI F. Study on personal injury and structural damage due to urban traffic underground explosion [D]. Xi'an, Shaanxi, China: Chang'an University, 2014: 98–125.
- [13] SONG X Z, ZHANG J, ZHANG D, et al. Dispersion and explosion characteristics of unconfined detonable aerosol and its consequence analysis to humans and buildings [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 152: 66–82. DOI: 10.1016/j.psep.2021.05.041.
- [14] PRUGH R W. The effects of explosive blast on structures and personnel [J]. *Process Safety Progress*, 1999, 18(1): 5–16. DOI: 10.1002/prs.680180104.

- [15] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for consequence analysis of chemical releases [M]. 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2010: 50–62.
- [16] ALONSO F D, FERRADÁS E G, SÁNCHEZ T D J J, et al. Consequence analysis to determine the damage to humans from vapour cloud explosions using characteristic curves [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(1): 146–152. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.089.
- [17] 中国石油化工集团公司总图技术中心站. 钢筋混凝土矩形排水沟及盖板: SHT102—2006 [S]. 2006.
Genral Layout Technology Center Station of China. Petrochemical Corporation Reinforced concrete rectangular drainage trench and cover plate: SHT102—2006 [S]. 2006.
- [18] 杨石刚, 蔡炯炜, 杨亚, 等. 城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸的灾害效应 (I): 冲击波在地面的传播 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(10): 105101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0502
YANG S G, CAI J W, YANG Y, et al. Disaster effects of combustible gas explosion in an urban shallow-buried pipe trench (I): shock wave propagation on the ground [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2022, 42(10): 105101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0502
- [19] 国家安全生产监督管理总局. 化工企业定量风险评价导则: AQ/T3046—2013 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
State Administration of Work Safety. Guidelines for quantitative risk assessment of chemical enterprises: AQ/T3046—2013 [S]. Beijing, China: Coal Industry Press, 2013.

(责任编辑 张凌云)