

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0502

# 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\*

杨石刚<sup>1</sup>, 蔡炯炜<sup>1,2</sup>, 杨 亚<sup>1</sup>, 孙文盛<sup>1</sup>, 门敬敏<sup>1</sup>

(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:** 城市地下浅埋管沟燃气爆炸事故会造成严重的灾害后果, 然而目前针对长直空间内的爆炸荷载通过泄爆口向外传播规律的研究较少。以此类事故为基础, 基于前期进行的长直泄爆空间可燃气体爆炸试验, 利用 FLACS 软件, 对城市地下浅埋管沟内可燃气体爆炸冲击波超压通过泄爆口到达地面后的分布进行了数值模拟, 揭示了管沟内燃气爆炸冲击波在地面的传播规律。结果表明: 传播到地面的爆炸冲击波会产生 2 个特征超压峰值  $\Delta p_1$  和  $\Delta p_2$ ;  $\Delta p_1$  较小, 主要由压缩波引起,  $\Delta p_2$  为最大超压峰值, 主要由火焰波引起;  $\Delta p_2$  随着与泄爆口之间的距离  $d$  的增大而逐渐减小, 且各方向上数值的差异性较大, 其中在沿管沟截面的短边方向上, 呈对称衰减的趋势;  $\Delta p_2$  与  $d$  大致满足指数函数关系, 且拟合度均高于 98.8%。

**关键词:** 城市地下管沟; 可燃气体; 爆炸冲击波; 超压峰值

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 ( I ): shock wave propagation on the ground

YANG Shigang<sup>1</sup>, CAI Jiongwei<sup>1,2</sup>, YANG Ya<sup>1</sup>, SUN Wensheng<sup>1</sup>, MEN Jingmin<sup>1</sup>

(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:** The blast shock wave will be transmitted to the ground through the vent as a gas explosion accident occurs in an urban shallowly-buried pipe trench, and cause serious disaster consequences. However, there are few studies on the propagating law of the explosion load outward through the explosion vent in the long and straight space. Thus, it is necessary to reveal the explosion load distribution law on the ground of such accidents. Based on the combustible gas explosion test in the long and straight venting space conducted in the previous period, the applicability of parameters and grid size in FLACS software were verified. Then the FLACS software was used to carry out numerical simulations of the gas explosion process in the urban shallow buried pipe trench. The propagation process of shock wave was divided into three stages: stable stage,  $\Delta p_1$  stage and  $\Delta p_2$  stage, and the mechanism of shock wave was analyzed by fuel, flame, flow velocity and density. The results show that the value of  $\Delta p_1$  is small, mainly caused by compression waves, and  $\Delta p_2$  is the maximum overpressure peak, mainly caused by flame waves. The characteristics of the overpressure time-history curve were studied. The results show that  $\Delta p_1$  has smaller differences in each direction than  $\Delta p_2$ , and the wave propagation has obvious directionality in  $X$  and  $Z$  directions, while symmetrical in the  $y$  direction. The attenuation law of shock waves in space was studied and the attenuation formula in each

\* 收稿日期: 2021-12-08; 修回日期: 2022-05-24

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

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

通信作者: 蔡炯炜(1994—), 男, 硕士, [1348230496@qq.com](mailto:1348230496@qq.com)

direction was obtained by data fitting. The results show that  $\Delta p_2$  gradually decreases with the increase of the distance from the venting port, and the value of the value in each direction varies greatly, among which, it shows a symmetrical attenuation trend along the short side of the pipe trench section;  $\Delta p_2$  and distance roughly satisfy the exponential function relationship, and the fitting degree is above 98.8%.

**Keywords:** urban shallow buried pipe trench; gas explosion; explosion shock wave; peak overpressure

根据中国城市建设统计年鉴<sup>[1]</sup>的记载,截至 2019 年,我国可燃气体管道在城市地下空间的长度达 76.7 万公里。然而可燃气体管道时常因阀门失灵、管道破损、操作失误等原因而泄漏,一旦可燃气体在城市地下浅埋管沟内积聚,在遇到点火点时,极易发生严重的可燃气体爆炸事故,同时造成恶劣的社会影响。如 2013 年 11 月,山东青岛一条输油管道在地下暗渠中发生了严重的可燃气体爆炸事故,造成了 62 人死亡、136 人受伤<sup>[2]</sup>。2014 年 7 月,台湾高雄一条输送丙烯液体的地下管道发生了严重的蒸气云爆炸事故,造成了 32 人遇难、321 人受伤<sup>[3]</sup>。因此,对城市地下浅埋管沟内可燃气体爆炸的荷载进行研究,以期减轻爆炸灾害效应,具有重要的经济价值和社会意义。

学者们对长直空间内可燃气体爆炸已开展了不同类型的试验研究。王东武等<sup>[4]</sup>、司荣军<sup>[5]</sup>、Ma 等<sup>[6]</sup>分别在大尺寸的巷道、圆形管道和天然气管道内进行了可燃气体爆炸试验,研究爆炸冲击波在装置内的传播规律,得到了冲击波在受限空间内的超压峰值分布特征和衰减过程。在小尺寸可燃气体爆炸试验方面,Ciccarelli 等<sup>[7]</sup>在边长 7.6 cm、长 3.6 m 的管道中进行了不同障碍物拥塞率的多组天然气爆炸试验;Na'inna 等<sup>[8]</sup>在直径为 16.2 cm、长 4.5 m 的管道中进行了多组体积分数为 10% 的甲烷爆炸试验,发现了超压和火焰速度与障碍物尺寸符合平方关系;孙庆文<sup>[9]</sup>对一段尺寸为 0.11 m×0.11 m×6 m、顶部设置了若干个泄爆口的小比例综合管廊进行了试验研究,结果表明:设置泄爆口往往能降低管沟内 50% 以上的超压和冲量值。另外,Hou 等<sup>[10]</sup>结合了管沟的实际情况,自主设计了一种 Y 形结构的分支管沟,还原了山东青岛“11·22”爆炸事故的破坏场景,分析了管沟内外的超压时程曲线,划分了管沟内超压变化的不同阶段,研究表明管沟盖板会同时受到前驱波和燃烧波的影响。目前,试验研究大多是在长径比较大的小截面管道中进行的。受环境条件、试验操作危险性和外界其他复杂因素的约束,关于大尺寸原型试验研究的报道较少。

数值模拟分析具有经济性和高效性的优点,也是研究可燃气体爆炸的一种重要手段。目前,全球通用的燃气爆炸效应分析数值模拟软件主要有 FLACS、AutoReaGas、Fluent、CFX 等,其中 FLACS 是一款被众多国际组织和标准认证的气体爆炸分析专业软件。宫广东等<sup>[11]</sup>应用 AutoReaGas 软件定量研究了管道中瓦斯爆炸的特性,分析了不同初始压力、初始温度、障碍物形状、尺寸及空间位置等条件对管道中瓦斯爆炸超压及火焰速度的影响。龚焱<sup>[12]</sup>利用 Fluent 软件对规范中防火分区内一段长为 200 m 的综合管廊燃气仓进行了可燃气体爆炸数值模拟分析,结果表明:当泄爆口设置在投料仓和通风口之间时,泄爆效果较好。董浩宇<sup>[13]</sup>、刘洋等<sup>[14]</sup>、陈晓坤等<sup>[15]</sup>、王涛<sup>[16]</sup>、Hisken 等<sup>[17]</sup>和 Zhang 等<sup>[18]</sup>利用 FLACS 软件分别对综合管廊、密闭方形管道、独头巷道、圆形玻璃管道、带有障碍物的方形管道、隧道进行了可燃气体爆炸数值模拟,研究了爆炸冲击波在不同的长直空间结构内的传播特性。目前的研究多是通过建立长直空间的数值模型分析空间内部的爆炸荷载,而对长直空间内的荷载通过泄爆口向地面传播的规律及特征的研究较少。

本文中,将基于大尺寸管沟可燃气体爆炸试验,利用 FLACS 软件对管沟内可燃气体爆炸产生的冲击波通过泄爆口向地面传播的机理、超压时程曲线特征及超压峰值分布规律进行数值模拟研究。

## 1 模型验证

### 1.1 试验

试验系统的主体是管沟装置,总长度为 30 m,由 10 节长 3 m、截面尺寸为 0.8 m×0.8 m 的长方体组装而成,如图 1(a) 所示。试验系统还包含浓度仪、点火系统、燃气装置、气体混合风机、传感器及数据采

集装置等<sup>[19]</sup>, 如图 1(b) 所示。其中管沟端部中间位置预留小孔用以安装点火装置, 管沟尾部设置有尺寸为 0.8 m×0.8 m 的泄爆口, 管沟顶部也设置有尺寸为 0.6 m×0.6 m 的泄爆口, 泄爆口的数量和尺寸可以根据实际工况灵活调整。

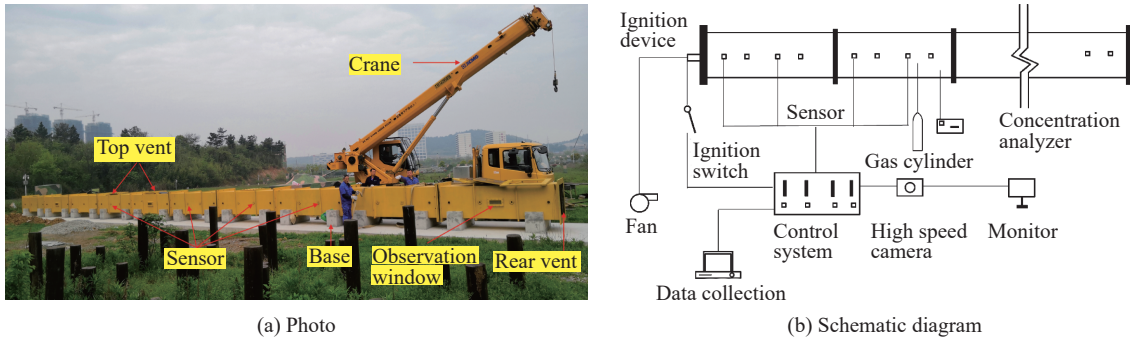


图 1 管沟试验装置  
Fig. 1 Pipe trench test device

试验以常见的可燃气体甲烷作为研究对象, 分别设置了不同的泄爆口方式和甲烷体积分数, 具体工况见 表 1。点火点位于管沟端部中央位置, 仅在管沟端部这一节充入甲烷, 即可燃气云尺寸为 0.8 m×0.8 m×3 m。

表 1 管沟可燃气体爆炸工况记录

**Table 1 Working condition record of combustibile gas explosion in pipe trench**

工况	泄爆口位置	顶部泄爆口数目	甲烷体积分数/%
1-A	尾部+顶部	3	7.5
1-B	尾部+顶部	3	8.5
1-C	尾部+顶部	3	9.5
1-D	尾部+顶部	3	10.5
1-E	尾部+顶部	3	11.5
2-C	密闭, 无泄爆口	0	9.5
3-C	尾部	0	9.5

### 1.2 模型验证及网格敏感性分析

基于上述管沟试验装置, 利用 FLACS 软件建立了相应的数值模型。通过分析以往城市地下管沟燃气爆炸事故可知, 爆炸荷载如果通过管沟顶部或尾部的孔口直接传播到地面, 通常会造成比较大的危害, 因此选取 表 1 中试验工况 1-C 来验证, 点火点设置在管沟端部中间位置, 管沟内中线上设置 10 个压力测点 (P1~P10), 第 1 个测点距端部水平距离为 1.1 m, 其余相邻测点之间的水平间距均为 3 m, 如图 2 所示。

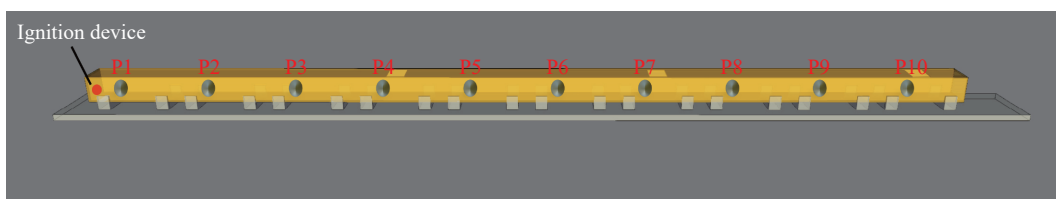


图 2 管沟内测点的分布  
Fig. 2 Distribution of measuring points in the pipe trench

为了验证数值模型的网格敏感性, 根据管沟截面尺寸以及泄爆口大小, 选取了 0.05、0.10 和 0.20 m 共 3 种网格尺寸进行数值模拟, 部分测点(P1、P5、P10)的数值模拟结果与试验数据的对比如图 3 所示。可以看到, 当网格尺寸为 0.20 m 时, 数值模拟的曲线变化趋势与试验结果基本吻合, 可以较好地呈现测点的超压随时间的变化规律, 而当网格尺寸为 0.10 和 0.05 m 时, 模拟结果均大于试验数据。这主要是由于预混合燃烧的亚网格模型在网格单元尺寸较小时适用性较差, 对燃烧速度的计算往往存在较大偏差, 模拟结果会高估爆炸超压。综合考虑计算效率及准确性, 选择 0.20 m 的网格尺寸来进行数值模拟。

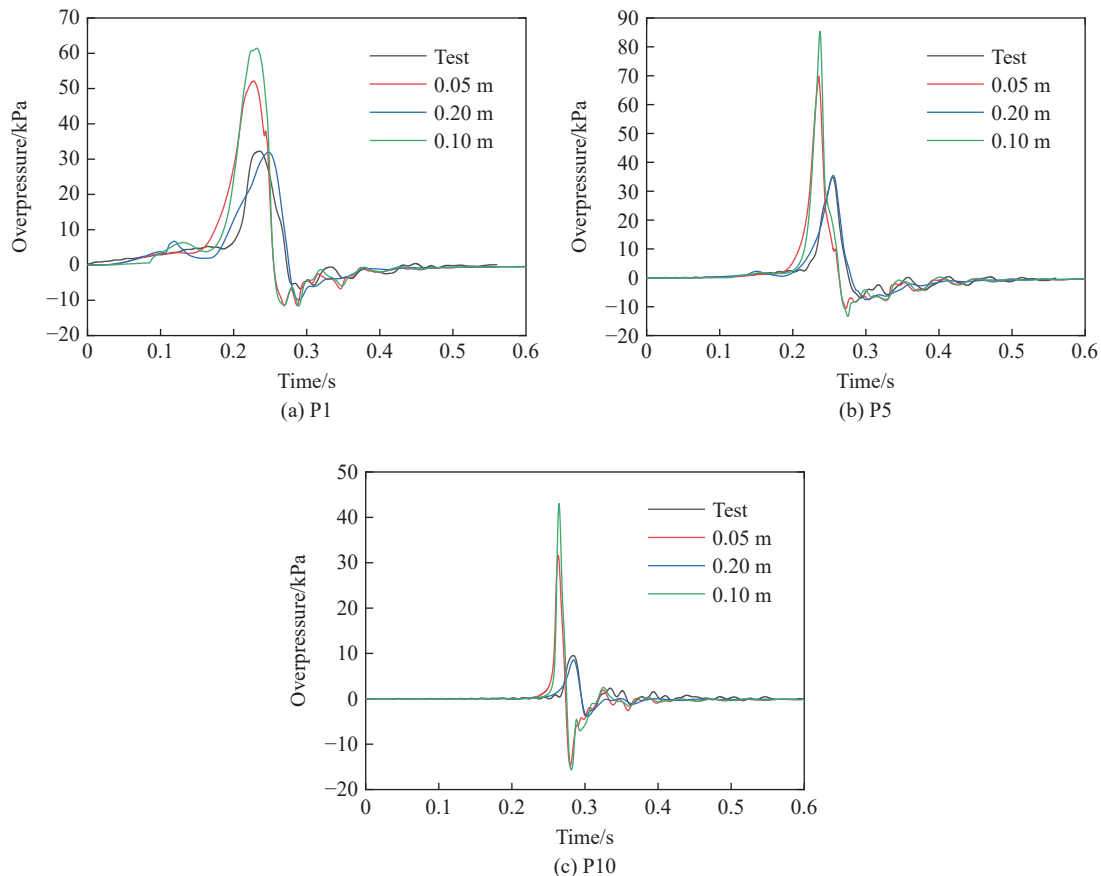


图 3 网格敏感性测试结果

Fig. 3 Grid sensitivity test results

## 2 地面可燃气体爆炸冲击波传播规律分析

### 2.1 物理模型

城市管沟通常浅埋在土壤里, 由于铺设的长度较长, 为了便于检修和后期维护, 每隔一定距离都会设置一个检查井。根据国家标准规定, 当管沟高度为 0.8~1.0 m 时, 检查井的最大间距为 90 m<sup>[20]</sup>。因此, 在实际试验中, 建立一段尺寸为 180 m×1 m×1 m 的城市浅埋管沟模型, 如图 4 所示, 其中检查井之间的距离为 90 m, 检查井上方的盖板为无约束泄爆口, 为了研究管沟内的爆炸冲击波通过泄爆口向地面传播的分布规律, 沿检查井 X 方向两侧各预留长度为 45 m 的管沟, 沿管沟 Y 方向两侧各预留长度为 10 m 的地面, 管沟顶部与地面平齐、地面上方空气域的高度为 20 m (见图 5), 由于本文的边界条件设为平面波, 因此可以避免反射回来的波对结果的影响。

考虑极端的爆炸情况, 假设 AB 两端检查井之间(90 m×1 m×1 m)填充满体积分数为 9.5% 的甲烷, 点火点位于管沟内 2 个检查井的中心。环境温度与大气压强分别设置为 20 °C、100 kPa, 边界条件设置为平面波, 湍流模型采用  $k-\varepsilon$  模型。为排除其他外界因素对管沟可燃气体爆炸的影响, 假设: (1) 爆炸产

生的能量不会与管沟进行传热而损失; (2) 管沟内没有其他障碍物; (3) 壁面绝对光滑; (4) 在可燃气体爆炸作用下管沟不发生形变。

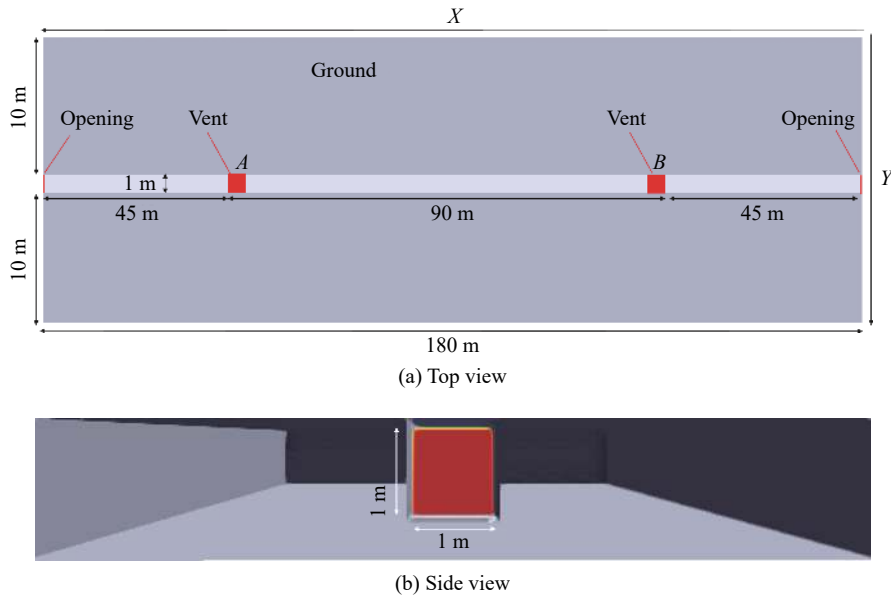


图 4 浅埋管沟数值模型

Fig. 4 The numerical model of the shallow-buried pipe trench

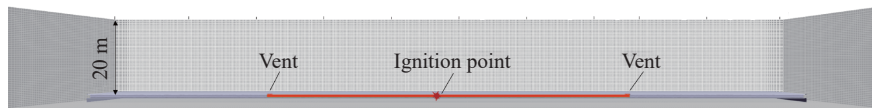


图 5 浅埋管沟数值模型的网格分布

Fig. 5 Grid distribution of a numerical model for the shallowly-buried pipe trench

在土壤及空气域所在的区域设置核心网格, 网格尺寸为 0.2 m, 核心区域外伸展系数为 1.2, 如图 5 所示。在泄爆口上方的空气域中, 沿 X、Y、Z 轴方向上分别设置 14 个测点, 用于记录超压时程曲线的变化, 由于在泄爆口附近的荷载较大、超压变化幅度较大, 因此在尾部开孔附近的空气域中测点布置得较密集, 在远离开孔的空气域中测点布置得较稀疏, 具体设置如表 2 和图 6 所示。

表 2 测点的坐标

Table 2 Coordinates of measuring points

X 轴方向		Y 轴方向		Z 轴方向	
测点	坐标/m	测点	坐标/m	测点	坐标/m
X1	(25, 0, 1)	Y1	(44.5, -10, 1)	Z1	(44.5, 0, 1)
X2	(30, 0, 1)	Y2	(44.5, -7, 1)	Z2	(44.5, 0, 2)
X3	(35, 0, 1)	Y3	(44.5, -5, 1)	Z3	(44.5, 0, 3)
X4	(40, 0, 1)	Y4	(44.5, -4, 1)	Z4	(44.5, 0, 4)
X5	(41, 0, 1)	Y5	(44.5, -3, 1)	Z5	(44.5, 0, 5)
X6	(42, 0, 1)	Y6	(44.5, -2, 1)	Z6	(44.5, 0, 6)
X7	(43, 0, 1)	Y7	(44.5, -1, 1)	Z7	(44.5, 0, 7)
X8	(46, 0, 1)	Y8	(44.5, 1, 1)	Z8	(44.5, 0, 8)
X9	(47, 0, 1)	Y9	(44.5, 2, 1)	Z9	(44.5, 0, 9)

表 2 (续)  
Table 2 (Continued)

X 轴方向		Y 轴方向		Z 轴方向	
测点	坐标/m	测点	坐标/m	测点	坐标/m
X10	(48, 0, 1)	Y10	(44.5, 3, 1)	Z10	(44.5, 0, 10)
X11	(49, 0, 1)	Y11	(44.5, 4, 1)	Z11	(44.5, 0, 11)
X12	(54, 0, 1)	Y12	(44.5, 5, 1)	Z12	(44.5, 0, 13)
X13	(59, 0, 1)	Y12	(44.5, 7, 1)	Z12	(44.5, 0, 16)
X14	(64, 0, 1)	Y12	(44.5, 10, 1)	Z12	(44.5, 0, 20)

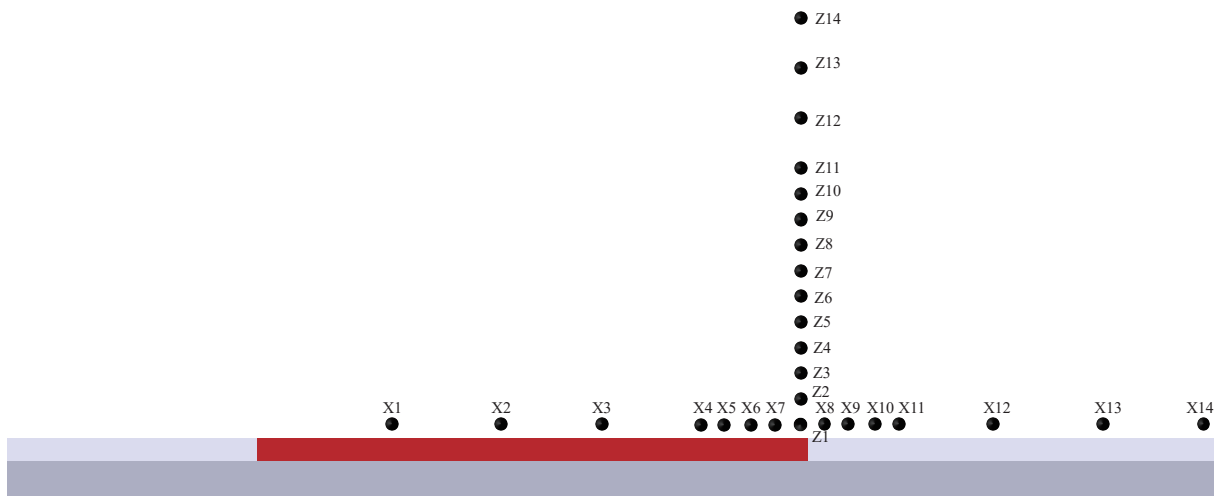
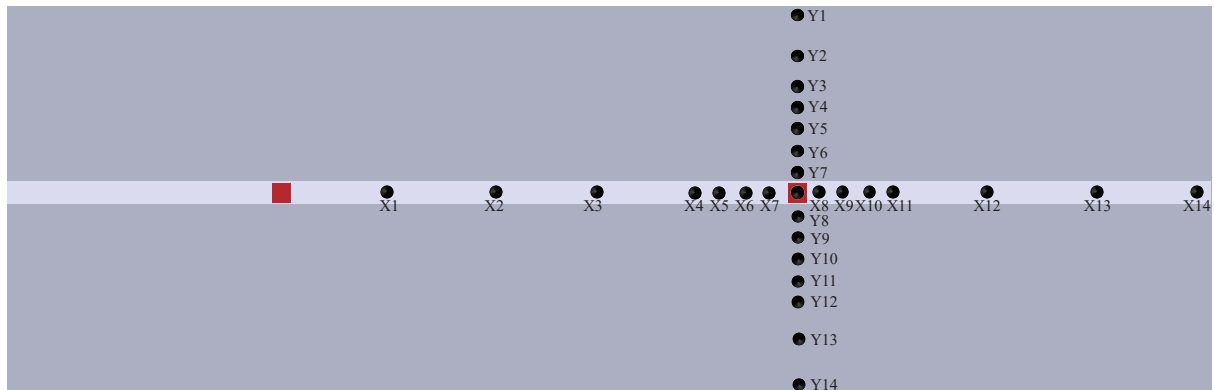


图 6 测点的布置

Fig. 6 Layout of measuring points

2.2 管沟外冲击波传播过程及机理分析

通过对管沟外部 X、Y、Z 轴等 3 个方向不同测点处超压时程曲线特征的分析, 将其划分为 3 个阶段: 稳定段、超压峰值  $\Delta p_1$  段、超压峰值  $\Delta p_2$  段, 如图 7~8 所示。随后研究了超压、燃料、燃烧产物以及速度矢量的动态变化过程, 并由此阐述了不同阶段爆炸荷载产生的机理。

阶段 I—稳定段 ( $t < 200$  ms): 管沟内的超压值不断提高, 地面上测点的超压值几乎可以忽略且基本不变。图 9 为燃料和燃烧产物的体积分数二维分布云图。管沟内的可燃气体遇点火后发生燃烧反应,

而此时产生的燃烧产物仅在管沟内部传播, 未传播到泄爆口和地面 (见 图 9(b)), 同时管沟内的燃料还未通过泄爆口被排放到空气域中 (见 图 9(a)), 因此测点未出现超压峰值。

阶段 II—超压峰值  $\Delta p_1$  段 ( $200 \text{ ms} < t < 500 \text{ ms}$ ): 空气域经历第 1 个超压峰值  $\Delta p_1$  期间。随着燃烧反应的不断加剧, 管沟内的火焰不断朝泄爆口方向传播, 推动管沟内残余燃料通过泄爆口喷向空气域中 (见 图 9(a))。当  $t=300 \text{ ms}$  时, 空气域中的残余燃料在流场的作用下 (见 图 10) 具有一定的运动速度, 波的最大速度为数十米每秒, 因此燃料会压缩分界面处的空气, 形成一个有限幅度的压力扰动, 导致空气域中产生压缩波 (见 图 8)。当空气压缩波的超压作用结束后, 测点就受稀疏波的影响, 超压值迅速减小乃至低于大气压力。当  $t=350 \text{ ms}$  时, 空气域中的残余燃料不断减少, 压缩波继续向周围空气域传播, 其强度也逐渐变小直至为零。

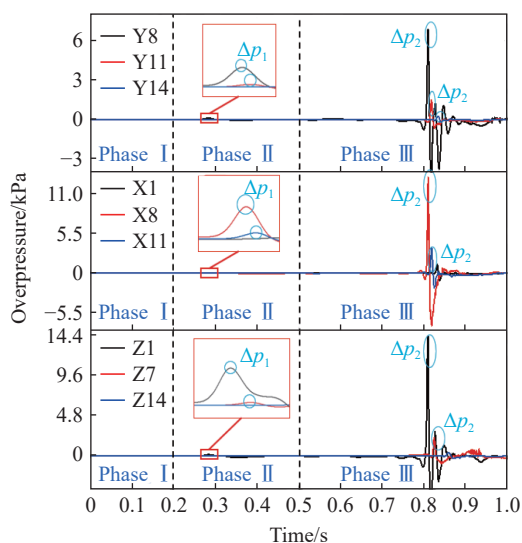


图 7 超压时程曲线的阶段划分

Fig. 7 Stage division of overpressure time-history curves

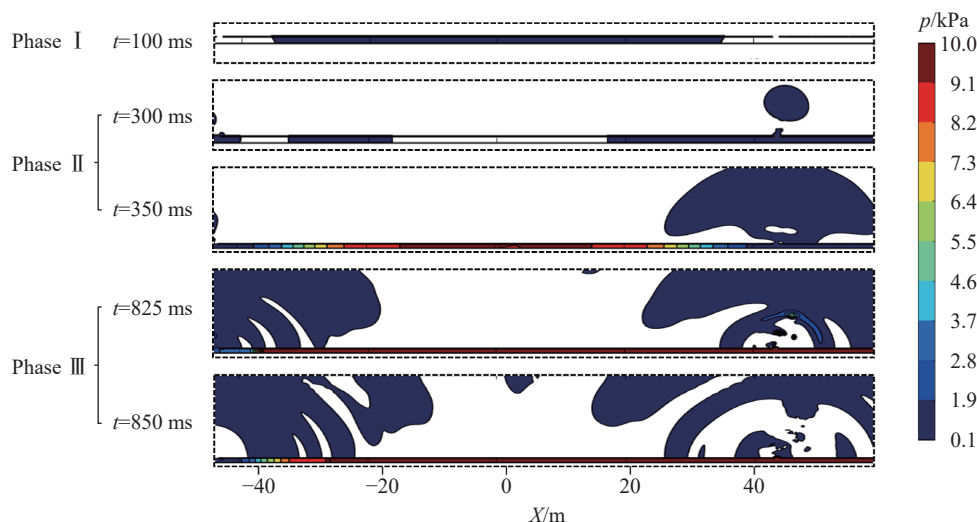


图 8 超压二维分布

Fig. 8 Two-dimensional distribution of overpressure

阶段 III—超压峰值  $\Delta p_2$  段 ( $t > 500 \text{ ms}$ ): 管沟外空气域经历第 2 个超压峰值  $\Delta p_2$  及之后的小幅振荡直至消失。在管沟中由于有泄爆口的存在, 当波传播到泄爆口附近时, 管沟内部气体与外部大气之间的存在明显的压力差, 管沟内部压力能够得到释放, 从而会出现负波峰。当  $t=825 \text{ ms}$  时, 火焰沿管沟的方向到达泄爆口附近, 同时受管沟尾部壁面约束的作用而向空气域内传播, 火焰波阵面产生的燃烧产物具有高温特性 (如 图 11 所示), 并与空气域发生热量的交换, 使得燃烧产物迅速膨胀, 压缩周围空气介质, 并推动周围空气向外运动, 形成了密度突跃的阵面 (如 图 12 所示), 即该强扰动以冲击波形式在空气中传播, 因此出现第 2 个超压峰值  $\Delta p_2$ 。此时波的传播速度如 图 13 所示, 在该阶段中波的最大速度能够达到数百米每秒。由于火焰波的强度要远大于阶段 II 中压缩波的能量, 同时波的传播速度也远大于阶段 II 中的速度, 因此第 III 阶段的最大超压峰值  $\Delta p_2$  要远大于第 II 阶段的超压峰值  $\Delta p_1$ 。随着燃烧产物的膨胀, 其压力、密度和运动速度不断下降, 随之能量密度就逐渐减小, 当燃烧产物内的

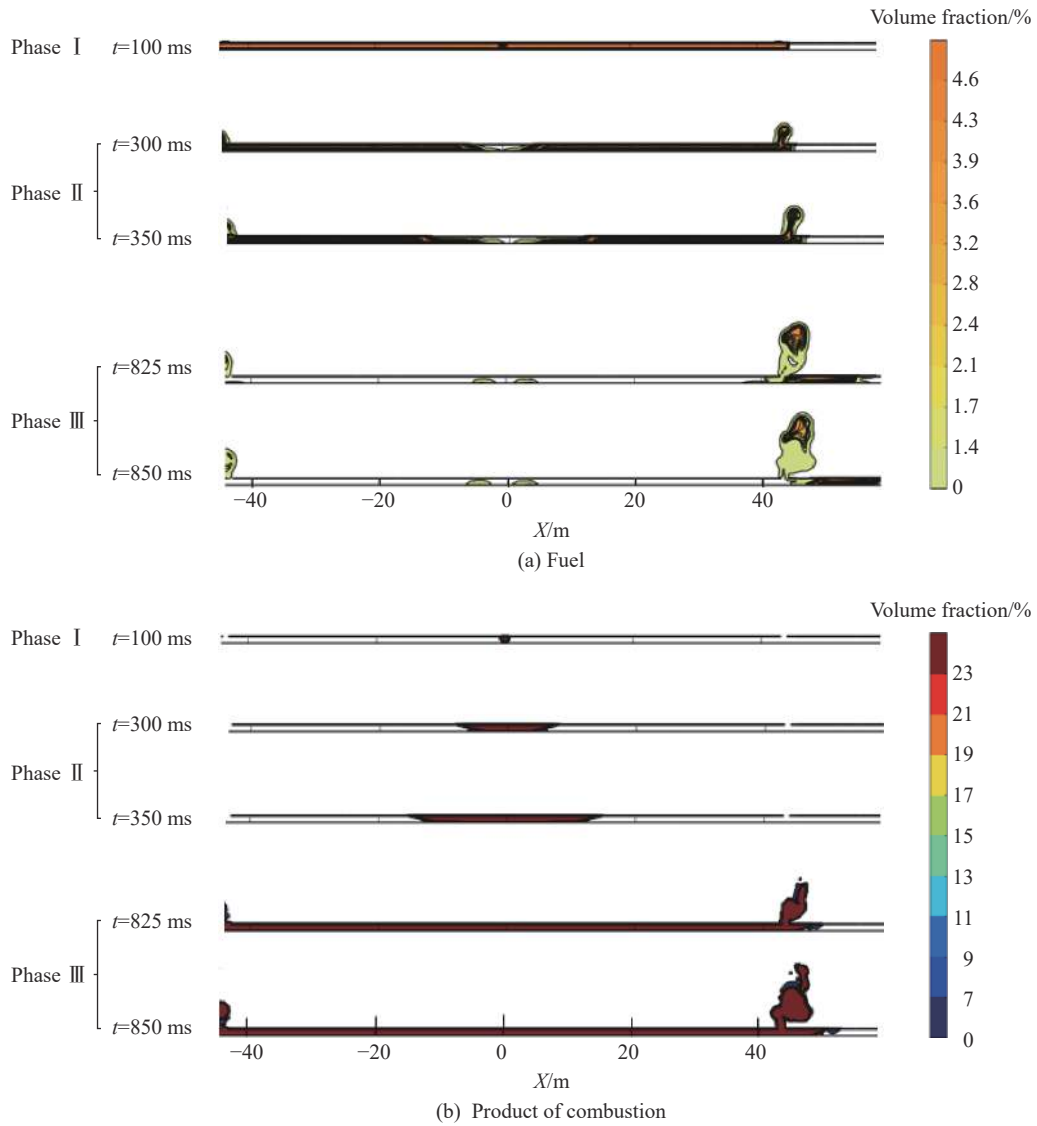


图 9 燃料与燃烧产物的体积分数二维分布

Fig. 9 Two-dimensional distribution of fuel and combustion product

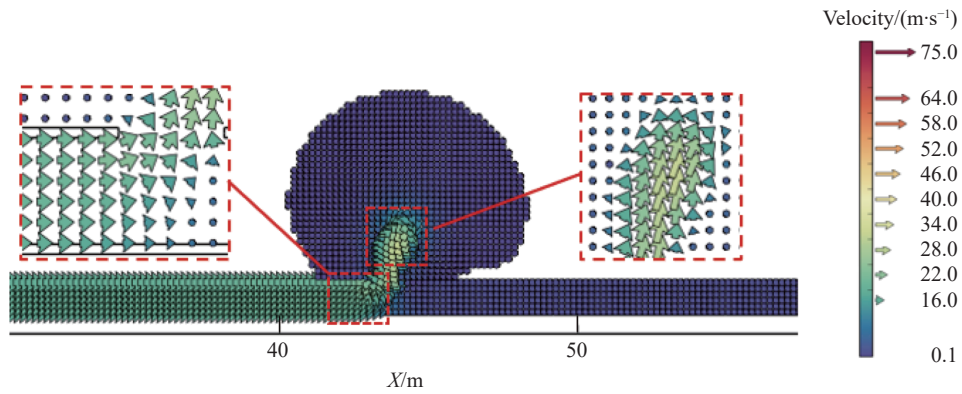


图 10 阶段 II 流场速度矢量

Fig. 10 Velocity vectors in the flow field in phase II



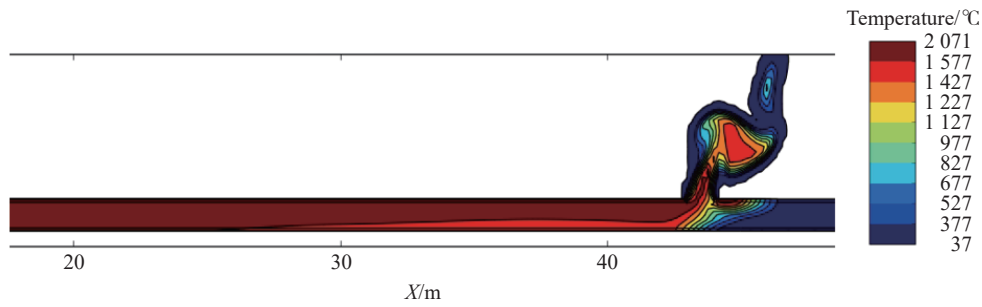


图 11 温度二维分布

Fig. 11 Two-dimensional distribution of temperature

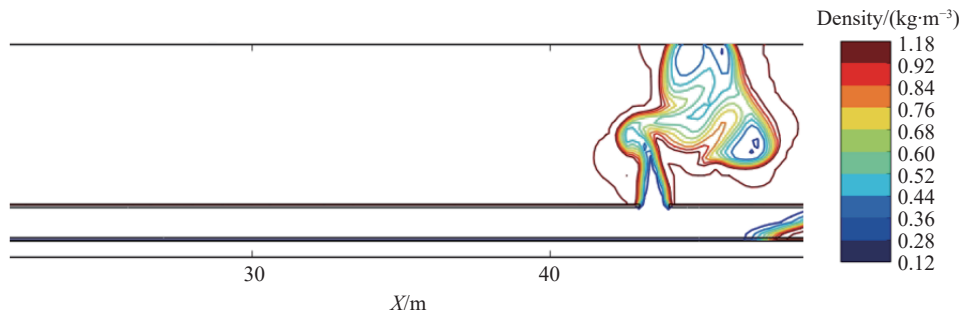


图 12 密度二维分布

Fig. 12 Two-dimensional distribution of density

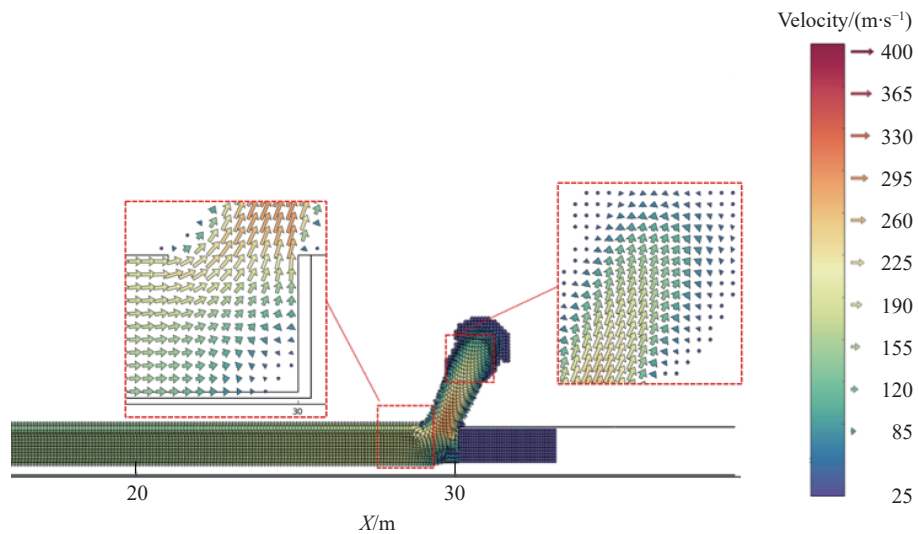


图 13 阶段 III 流场速度矢量

Fig. 13 Velocity vectors in the flow field in phase III

压力下降到大气压力时, 火焰波就脱离燃烧产物向前运动并在尾部形成稀疏区。当  $t=850 \text{ ms}$  时, 火焰波不断衰减并大致呈不规则的半球形在空气域中向外传播, 在泄爆口两侧沿  $Y$  方向大致呈对称分布, 但是在泄爆口两侧沿  $X$  轴方向并不呈均匀对称分布 (见 图 14), 其可能的原因是受空气流场的影响, 当火焰传到泄爆口后, 偏向于沿火焰传播的方向分布。同时泄爆口附近还有一部分强度较小的残余火焰会向空气域中传播能量较低的火焰波, 导致该阶段会出现多峰值波动状, 但是随着振荡的进行, 超压峰值在逐渐减小。

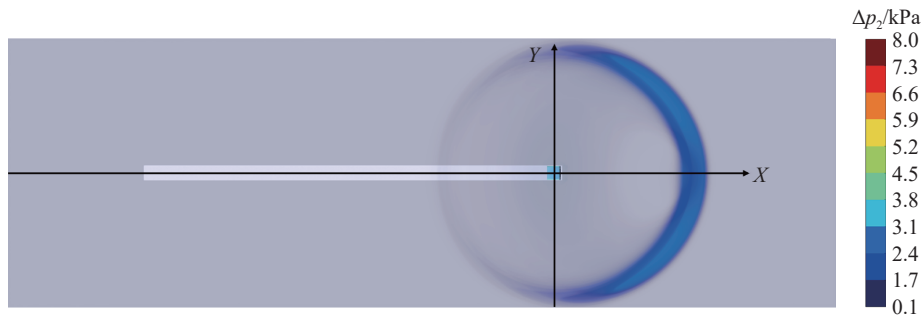


图 14  $\Delta p_2$  的三维分布俯视图

Fig. 14 Vertical view of three-dimensional distribution of  $\Delta p_2$

### 2.3 超压时程曲线特征分析

在三维坐标系中, 选取在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向上具有代表性的全过程超压时程曲线, 如图 15 所示。由图 15(a) 可以看出, 沿  $X$  轴方向, 各个测点上的第 1 个超压峰值  $\Delta p_1$  相差较小, 第 2 个超压峰值  $\Delta p_2$  相差

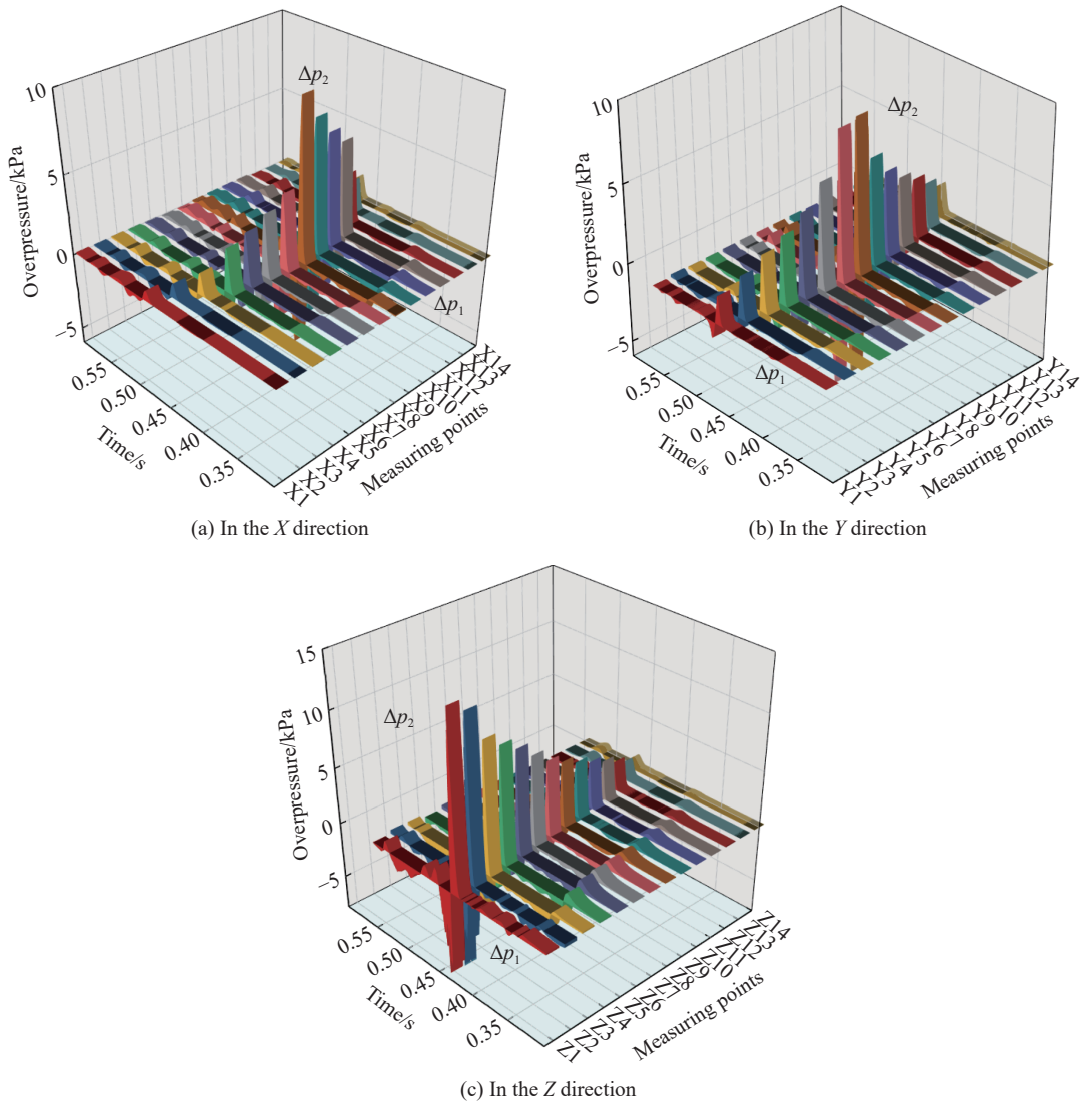


图 15 超压时程曲线

Fig. 15 Overpressure-time history curves

较大。在沿  $X$  轴方向上, 最大超压峰值  $\Delta p_2$  位于测点 X8, 约为 13 kPa, 且在泄爆口两侧, 测点离泄爆口的距离越远, 超压峰值  $\Delta p_1$  越小。同时, 也可以观察到测点 X1~X7 一侧的超压峰值小于测点 X8~X14 一侧的超压峰值。

由图 15(b) 可以看出, 在沿  $Y$  轴方向上, 最大峰值超压  $\Delta p_2$  位于距离泄爆口最近的测点 Y7 和 Y8, 其值约为 7 kPa, 并且在泄爆口两侧超压峰值  $\Delta p_2$  随着距离的增加呈对称衰减的趋势。

由图 15(c) 可以看出, 在沿  $Z$  轴方向上, 第 2 个超压峰值  $\Delta p_2$  的最大值位于测点 Z1, 其值约为 14.5 kPa, 且随着测点高度的上升, 火焰波在空气域中逐渐衰减导致超压峰值  $\Delta p_2$  也逐渐减小。

### 2.4 超压峰值分布规律

通过对超压时程曲线的分析, 可以看出, 城市地下浅埋管沟内可燃气体爆炸冲击波通过泄爆口到达地面后有 2 个超压峰值  $\Delta p_1$  和  $\Delta p_2$ , 图 16 为这 2 个超压峰值在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的分布。以泄爆口位置为参照点, 管沟内冲击波传播的方向为  $X$  的正方向, 管沟内冲击波传播的反方向为  $X$  的负方向,  $Z$  和  $Y$  方向则与坐标轴设置保持一致。由图 16 可知, 与超压峰值  $\Delta p_2$  相比, 超压峰值  $\Delta p_1$  很小, 且各个测点之间波动幅度不大。对于超压峰值  $\Delta p_2$ , 其值随泄爆口距离的增加而衰减。同时, 在  $Y$  方向上的超压峰值会明显小于  $X$  正方向和  $Z$  方向上的超压峰值, 这是由于爆炸冲击波的传播具有方向性而引起的。

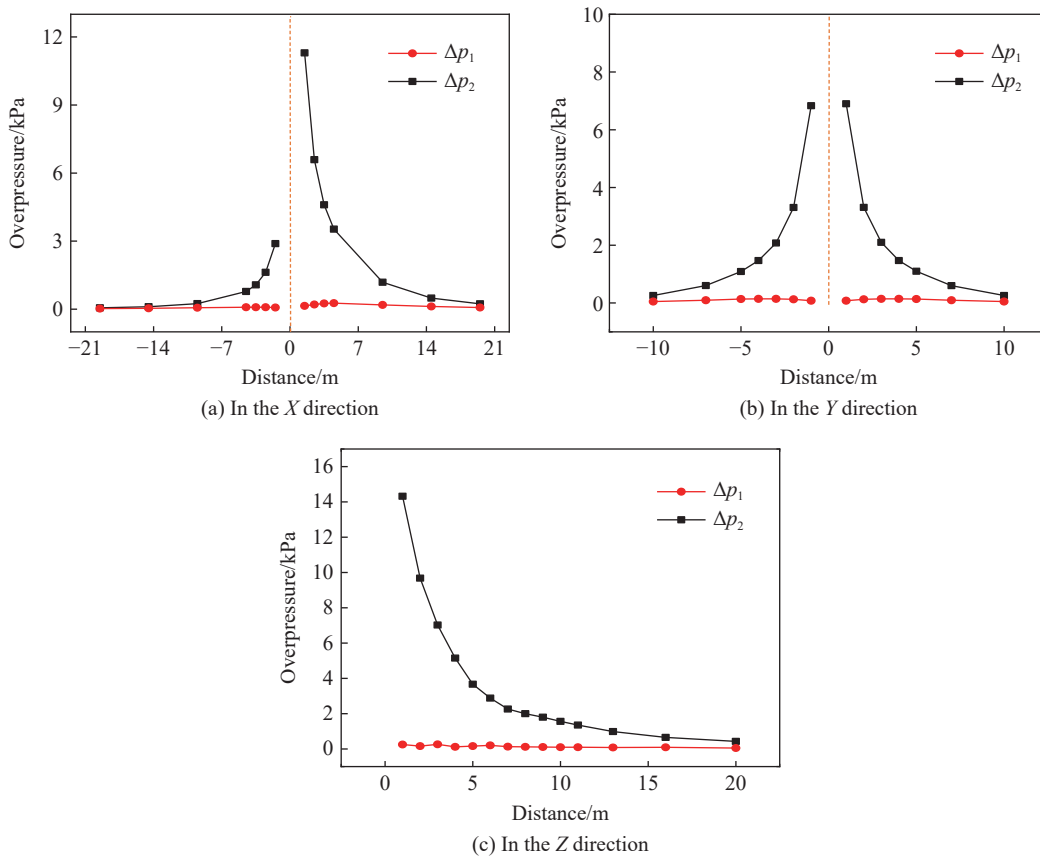


图 16 超压峰值  $\Delta p_1$  和  $\Delta p_2$  在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的分布

Fig. 16 Distribution of Overpressure peaks  $\Delta p_1$  and  $\Delta p_2$  in the  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions

为进一步分析超压峰值  $\Delta p_2$  的衰减规律, 参照空气域中的超压峰值分布的数据, 可以对其进行非线性曲线拟合, 得到测点的超压峰值  $\Delta p_2$  和泄爆口之间的距离  $d$  大致满足指数函数型的关系:

$$\Delta p_2 = a - bc^d \tag{1}$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

根据已有测点的数据, 通过拟合分别可以得到沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上的  $\Delta p_2$ - $d$  关系式:

$$\Delta p_2 = \begin{cases} 0.574 + 21.301 \times 0.624^d & \text{沿 } X \text{ 正方向} \\ 0.131 + 6.001 \times 0.589^d & \text{沿 } X \text{ 负方向} \\ 0.518 + 12.775 \times 0.492^d & \text{沿 } Y \text{ 方向} \\ 0.865 + 19.364 \times 0.685^d & \text{沿 } Z \text{ 方向} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta p_2$  为超压峰值, kPa;  $d$  为与泄爆口之间的距离, m。该拟合公式适用于甲烷体积分数为 9.5%、盖板为无约束的情况。

将式 (2) 中超压峰值  $\Delta p_2$  与距离  $d$  的指数函数型方程关系作拟合曲线, 如图 17 所示。可以得到: 曲线的拟合质量较理想, 拟合度均在 98.8% 以上;  $\Delta p_2$  拟合曲线在沿  $Z$  和  $X$  正方向上的超压峰值最大, 但同时其衰减速度(斜率)也是最大的, 同时  $\Delta p_2$  拟合曲线在沿  $X$  负方向上的超压峰值最小, 其衰减速度(斜率)也是最小的, 当测点与泄爆口的距离足够远时, 在  $Z$ 、 $X$ 、 $Y$  方向上的超压峰值大致相等。

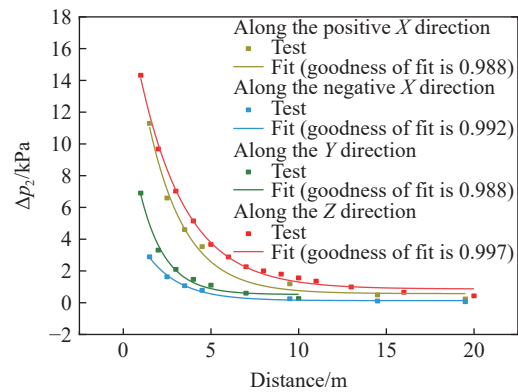


图 17 到泄爆口不同距离处的超压峰值

Fig. 17 Peak overpressures at measuring points with different distances away from the vent

### 3 结 论

利用 FLACS 软件建立了城市地下浅埋管沟内燃气爆炸的数值模型, 基于管沟可燃气体爆炸的试验数据验证了模型的准确性, 随后分析了爆炸冲击波通过泄爆口向地面传播的机理和超压峰值分布规律, 具体结论如下。

(1) 爆炸荷载通过泄爆口向地面传播过程可分为 3 个阶段: 阶段 I, 即稳定段, 该阶段测点的超压值很小, 基本未受影响; 阶段 II, 即超压峰值  $\Delta p_1$  段, 经历第 1 个超压峰值  $\Delta p_1$  的期间; 阶段 III, 即超压峰值  $\Delta p_2$  段, 经历第 2 个超压峰值  $\Delta p_2$  及之后的小幅振荡直至消失。

(2) 阶段 II 的  $\Delta p_1$  较小, 主要是由残余燃料挤压空气产生压缩波引起的; 而阶段 III 的  $\Delta p_2$  较  $\Delta p_1$  更危险, 其主要是由燃料燃烧产生火焰波引起的。

(3) 超压峰值  $\Delta p_2$  和与泄爆口之间距离  $d$  的关系大致满足  $\Delta p_2 = a - bc^d$  的关系式, 且拟合效果较好。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019 年城市建设统计年鉴 [EB/OL]. (2020-12-31)[2021-10-08]. <https://www.mohurd.gov.cn/file/old/2020/20201231/w02020123122485271423125000.xls>.
- [2] 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.
- [3] YANG H N, CHEN J H, CHIU H J, et al. Confined vapor explosion in Kaohsiung City: a detailed analysis of the tragedy in the Harbor City [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 41: 107–120. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.017.
- [4] 王东武, 杜春志. 巷道瓦斯爆炸传播规律的试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(4): 475–480, 485. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3363.2009.04.017.
- WANG D W, DU C Z. Experimental study on gas explosion and propagation in a test gallery [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2009, 26(4): 475–480, 485. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3363.2009.04.017.
- [5] 司荣军. 管道内瓦斯爆炸传播试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(2): 47–49; 123. DOI: 10.13199/j.cst.2009.02.52.sirj.022.
- SI R J. Test and research on gas explosion transmission in pipeline [J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(2): 47–49; 123. DOI: 10.13199/j.cst.2009.02.52.sirj.022.
- [6] MA H Y, ZHONG M S, LI X H, et al. Experimental and numerical simulation study on the shock and vibration effect of

- OD1422-X80 mainline natural gas pipeline explosion [J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019: 6824819. DOI: 10.1155/2019/6824819.
- [7] CICCARELLI G, JOHANSEN C T, PARRAVANI M. The role of shock-flame interactions on flame acceleration in an obstacle laden channel [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(11): 2125–2136. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.05.003.
- [8] NA'INNA A M, PHYLAKTUO H N, ANDREWS G E. Explosion flame acceleration over obstacles: effects of separation distance for a range of scales [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 107: 309–316. DOI: 10.1016/j.psep.2017.01.019.
- [9] 孙庆文. 城市综合管廊内天然气爆炸荷载特性研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2018: 15–33.  
SUN Q W. Study on the characteristics of gas explosion load in urban utility tunnel [D]. Beijing, China: Beijing University of Technology, 2018: 15–33.
- [10] HOU L F, LI Y Z, QIAN X M, et al. Large-scale experimental investigation of the effects of gas explosions in underdrains [J]. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2021, 2(2): 90–99. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2021.03.001.
- [11] 宫广东, 刘庆明, 白春华. 管道中瓦斯爆炸特性的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2010, 31(S1): 17–21.  
GONG G D, LIU Q M, BAI C H. Numerical simulation for gas explosion in tubes [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1): 17–21.
- [12] 龚焱. 燃气管线入综合管廊的抗爆防护技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 17–36.  
GONG Y. Research on anti-explosion protection technology of gas pipeline entering the comprehensive pipe gallery [D]. Nanjing, Jiangsu, China: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 17–36.
- [13] 董浩宇. 地下综合管廊燃气爆炸灾害效应时空演化规律及防控策略 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 25–35. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnl.2020.004461.  
DONG H Y. Law of temporal and spatial evolution of gas explosion hazard and prevention and controlling in utility tunnel [D]. Guangzhou, Guangdong, China: South China University of Technology, 2020: 25–35. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnl.2020.004461.
- [14] 刘洋, 李展, 方秦, 等. 惰性气体和水蒸气对长直空间燃气爆炸超压及其振荡的抑制作用 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(5): 055201. DOI: 10.11858/gywlyxb.20200654.  
LIU Y, LI Z, FANG Q, et al. Inert gas and water vapor suppressing overpressure and its oscillation of gas explosion in long straight space [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(5): 055201. DOI: 10.11858/gywlyxb.20200654.
- [15] 陈晓坤, 郭丽萍, 程方明, 等. 独头巷道瓦斯爆炸的数值模拟 [J]. *煤矿安全*, 2012, 43(7): 20–22. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2012.07.058.  
CHEN X K, GUO L P, CHENG F M, et al. Numerical simulation of gas explosion in heading face [J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(7): 20–22. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2012.07.058.
- [16] 王涛. 管道内甲烷爆炸特性及 CO<sub>2</sub> 抑爆的实验与数值模拟研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014: 25–49.  
WANG T. Experimental and numerical studies on methane explosion and the suppression effect of CO<sub>2</sub> in vessel [D]. Xi'an, Shaanxi, China: Xi'an University of Science and Technology, 2014: 25–49.
- [17] HISKEN H, ENSTAD G A, MIDDHA P, et al. Investigation of concentration effects on the flame acceleration in vented channels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 447–459. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.005.
- [18] ZHANG S H, MA H T, HUANG X M, et al. Numerical simulation on methane-hydrogen explosion in gas compartment in utility tunnel [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 140: 100–110. DOI: 10.1016/j.psep.2020.04.025.
- [19] 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: 104409. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104409.
- [20] 中国建筑标准设计研究院. 市政排水管道工程及附属设施: 06MS201 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.  
China Building Standard Design and Research Institute. Municipal drainage pipeline engineering and ancillary facilities: 06MS201 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.

(责任编辑 张凌云)