

爆炸冲击波在城市建筑群中传播规律实验研究*

马 龙, 殷文骏, 关君翊, 童念雪, 程 帅, 张德志, 刘文祥

(西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 爆炸冲击波在建筑群传播时受到建筑排布影响, 冲击波在建筑表面发生复杂反射及绕射现象, 导致建筑表面载荷不能由经验公式进行简单估算。为研究近地爆炸冲击波在建筑群中传播规律, 首先在实验室环境下搭建了缩比建筑群中爆炸冲击波载荷测试平台, 使用压力传感器测量触地爆炸冲击波在典型建筑群传播下, 不同位置建筑表面及地面测点的冲击波压力载荷历程, 获取冲击波到时、正压时间、压力峰值及正压比冲量等特征参数, 分析了建筑迎爆面、侧爆面、背爆面以及地面测点冲击波特征参数的分布规律, 并将实验测量结果与冲击波参数经验值进行定量对比。随后开展了三维冲击波传播数值仿真, 重现了冲击波在建筑群传播历程, 得到了冲击波特征参数云图, 定量分析了不同建筑排布下冲击波载荷分布规律。研究结果表面建筑群对冲击波传播具有显著阻滞及衰减作用, 冲击波特征参数衰减程度不仅与比例距离相关, 还受到测点具体位置及建筑排布方式影响。该研究结果可为爆炸冲击波在城市建筑群载荷分布快速评估提供参考。

关键词: 触地爆; 冲击波传播; 建筑群; 缩比实验

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

An experimental study on propagation of blast waves in urban buildings

MA Long, YIN Wenjun, GUAN Junyi, TONG Nianxue, CHENG Shuai, ZHANG Dezhi, LIU Wenxiang

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shanxi, China)

Abstract: The propagation of blast waves in urban buildings is strongly affected by architectural configurations, as the blast waves undergo complex reflection and diffraction phenomena on building surfaces, rendering empirical formulas inadequate for estimating surface loads. To investigate the propagation characteristics of near-field blast waves in urban buildings, an experimental study was conducted. Initially, a scaled test platform was established in a laboratory environment to measure blast wave loading within building clusters. Pressure sensors were employed to obtain pressure-time curves at multiple locations, including building surfaces and the ground gauges, under representative building configurations. Key characteristic parameters were acquired, including blast wave arrival time, positive duration time, peak pressure, and positive impulse. The distribution patterns of these parameters were systematically analyzed across various building surfaces and ground gauges, followed by quantitative comparisons with empirical formulas. Subsequently, a three-dimensional numerical simulation of blast wave propagation was conducted, reproducing the propagation history of blast waves through building clusters. Contour maps of characteristic blast wave parameters were obtained, and the distribution patterns of blast wave loads under different building

*收稿日期: 2025-08-18; 修回日期: 2026-09-15;

第一作者: 马 龙 (1994-), 男, 博士, 助理研究员. E-mail: malong@nint.ac.cn

arrangements were quantitatively analyzed. Experimental results indicate that urban buildings exert significant attenuation and obstruction effects on blast wave propagation. The degree of parameter attenuation correlates not only with scaled distance but also with specific measurement locations and architectural arrangement patterns. The research results can provide guidance for the rapid assessment of the distribution of blast loads in urban buildings.

Keywords: surface burst; blast wave propagation; urban building arrays; scaled experiment

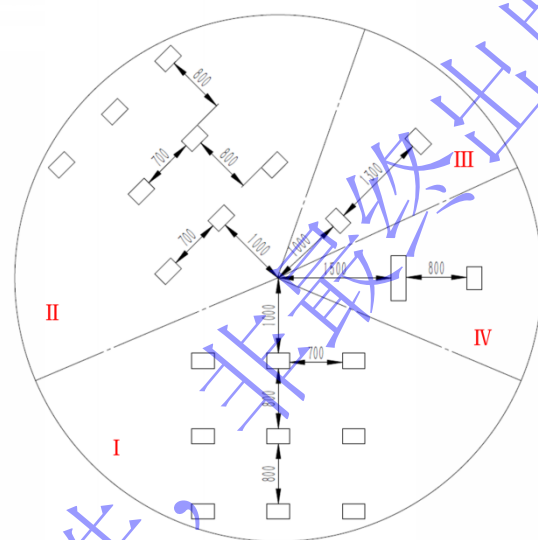
当城市建筑群中发生意外爆炸事故时,冲击波会对建筑、车辆及人员等目标造成巨大伤害,准确得到冲击波传播规律和建筑表面载荷对城市抗爆与防护设计具有重要意义^[1-3]。与自由场环境不同,在复杂建筑环境下冲击波会与建筑群发生反射绕射等相互作用,其传播规律和建筑表面载荷无法使用简单经验公式给出。长期以来国内外学者对此开展了大量研究。Rose^[4-5]等人对城市复杂环境中的爆炸问题做了细致研究,其建立了简化城市模型,综合使用实验和 Air3D 数值模拟方法对城市街道宽度、建筑高度及爆源位置等因素进行研究,讨论了建筑分布对冲击波传播的引导作用,以及街道对冲击波载荷的增强作用。Remennikov^[6]等人利用数值方法研究了相邻建筑对冲击波载荷的影响,讨论了冲击波在有障碍传播与无障碍传播的区别,发现冲击波载荷既可以被建筑物屏蔽而减小,也可由于附近建筑作用而增强。为了研究冲击波与建筑相互作用的一般情况,Rose^[7]等人考虑了冲击波在建筑表面发生斜反射时,建筑边缘和顶部产生的稀疏波对反射波的衰减作用,发现冲击波入射角度与建筑尺寸会显著影响建筑表面载荷。Gajewski^[8]等人开展了外场爆炸实验,研究了不同 TNT 当量下建筑转角对冲击波传播的影响。我国学者对该问题也进行了广泛研究,李世民^[9]等人对爆炸冲击波下建筑迎爆面载荷的经验公式和数值仿真方法进行总结;穆朝民^[10]等人使用实验方法对爆炸冲击波作用于墙体及绕过墙体的规律进行研究,获取了墙体前后不同距离的冲击波压力数据,发现药量与爆心距离对墙体前后压力分布具有重要影响;郝莉^[11]及李鑫^[12]等人分别使用数值方法对爆炸冲击波绕流现象进行了仿真模拟,加深了对冲击波在复杂场景传播规律的认识;近期张晓伟^[13]等人对隔爆墙后爆炸冲击波绕射与超压分布规律进行了深入研究,综合实验和数值仿真方法,得到了不同爆炸当量、爆距、墙高等参数下冲击波超压在不同区域的分布规律,给出了隔爆墙后近地面超压峰值的工程计算公式。

随着数值计算方法的快速发展,复杂建筑构型下的冲击波传播问题得以充分研究。Wang^[14]等人使用 Loci/BLAST 数值方法对冲击波在相邻建筑传播问题进行了模拟,得到了建筑表面精细流场分布,再现了冲击波传播过程。Hank^[15]等人发展了三维多相流模拟软件,对真实城市建筑和复杂地理环境进行三维建模,研究了爆炸冲击波的传播过程,为研究冲击波在建筑群传播和反射等复杂过程提供了新的工具。Benselama^[16]等人提出了一种研究爆炸冲击波在复杂环境传播的数值方法,并将仿真结果与冲击波-障碍物相互作用过程实验数据^[17]进行了对比验证。尽管数值方法能以较为便捷和低成本的方式研究复杂城市建筑中冲击波传播问题,实验方法仍然是重要的研究手段。目前已有一些实验研究主要是野外缩尺爆炸实验^[18],但是实验结果受环境干扰影响因素多。Fouchier^[19]等人实验室环境中对城市环境爆炸冲击波传播进行了实验研究,得到了直街道、T 形路口、十字路口等不同构型下冲击波载荷分布。但是该实验中当量小,且只对地面压力进行测量,没有对建筑表面压力进行研究。综上所述,针对冲击波在城市建筑群传播规律的实验室环境下精细化实验研究较少,获取数据有限,缺乏建筑表面压力数据,存在可用实验数据较匮乏等问题。

针对现有研究存在的不足,本文对城市建筑群中典型排布方式对冲击波传播规律影响进行深入研究,利用缩比实验方法在实验室环境中对爆炸冲击波压力载荷历程进行测量,获得了较为丰富、系统的实验数据,并通过开展数值仿真,结合实验数据及数值模拟结果研究了不同位置冲击波参数特征,总结得到不同排布方式对冲击波载荷的影响规律。

1 实验系统

为研究爆炸冲击波在建筑群中传播规律,在实验室内搭建试验平台和测试系统,设计了缩比实验进行实验研究。设定缩尺比例为 1:50,使用玻璃钢材料制作 3 类共 21 个中空立方体模型作为建筑模型,模型壁厚约 8 mm,长宽高及数量见表 1 所示,用于模拟原型高度为 25 m 和 50 m 的多层城市建筑。缩比建筑模型使用螺栓固定在钢制圆形平台上。沙盘平台上的建筑群模型分为 4 部分区域,分别为阵列式排布(I)、错列式排布(II)、高低排布(III)、宽窄排布(IV),具体位置如图 1 所示。其中,阵列式排布为 9 个相同模型按 3-3-3 方式对齐排布,错列式排布为 8 个相同模型按 3-2-3 方式交错排布,高低排布为 2 个高度不同模型距爆心按高-低顺序排布,宽窄排布为 2 个宽度不同模型距爆心按宽-窄顺序排布。图 1 中长度单位均为毫米,炸药触地放置在沙盘平台中心位置。图 1 中除了标识出 B、C 型建筑模型外,其余均为 A 型建筑模型。实验选取球形梯黑炸药(T/R 炸药, 40% TNT + 60% RDX),半径约 23 mm,重量 78.1 g,等效 TNT 当量约 100 g。该炸药由两个半球组成,在球心位置安装 1 g PETN 小药球,通过柔爆索引爆小药球的方式实现对炸药的精准中心起爆。



(a) Location distribution (top view, unit: mm)



(b) Experimental photograph

图 1 缩比建筑群模型位置分布及实验现场

Fig.1 Location distribution and experimental photograph of scaled building models

表 1 建筑模型尺寸

Table 1 The size of building model

模型类型	模型尺寸(L×W×H)	数量
A	300 mm×200 mm×500 mm	19

B	300 mm×200 mm×1000 mm	1
C	600 mm×200 mm×500 mm	1

根据预估冲击波压力选用了不同量程的 ENDEVCO 8510B 及 8510C 压阻式压力传感器测量爆炸冲击波压力信号,如图 2(a)所示,分别在不同缩比模型迎爆面、侧爆面、背爆面以及平台表面安装传感器,记录不同位置表面处冲击波压力时间历程。图 2(a)中心位置为炸药,特定缩比模型表面处标点示意为压力传感器安装位置,并分别用数字进行编号,传感器具体安装在各表面的几何中心位置。共计在缩比模型表面安装 15 个压力测点,其中 P2、P9、P10、P12、P14、P15 共 6 个压力测点位于建筑模型迎爆面,P1、P4、P5、P6、P8、P11、P13 共 7 个压力测点位于建筑模型背爆面,P3、P7 共 2 个测点位于建筑模型侧爆面。实验重点考察建筑模型迎爆面及背爆面冲击波压力特性,侧爆面冲击波压力测点较少,可由数值仿真结果给出。此外还在平台表面安装 6 个压力传感器,用于测量特定地面位置冲击波压力时间历程,分别用 T1~T6 进行标识,测点具体位置位于相邻缩比模型连线中点处。

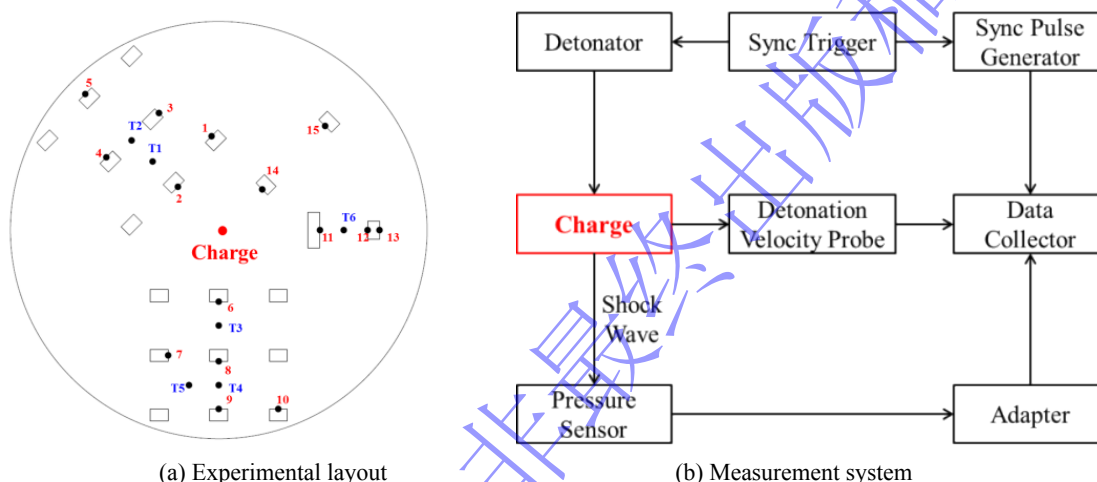


图 2 实验布置及测试系统

Fig.2 Experimental arrangement and measurement system

实验测试系统由同步触发器、起爆器、同步机、压力传感器、适配器、爆速探针、示波器等数据记录终端组成,如图 2(b)所示。同步触发器可由北斗系统精确授时,实现对测试系统远程控制。触发器输出同步信号后触发起爆器和同步机,其中起爆器连接雷管及炸药,同步机输出信号控制示波器进入触发模式,记录炸药起爆后产生的冲击波压力信号,实验后示波器数据保存到终端进行后续处理。实验中还使用了爆速探针与爆速仪记录炸药的真正起爆时刻,配合传感器记录的冲击波波形来获取精确的冲击波到时信息。

为准确测得建筑模型表面及地面压力,传感器敏感面必须与测量表面平齐。设计图 3(a)为传感器工装,使用安装块用于固定并保护传感器,通过螺纹固定在建筑模型表面或沙盘平台表面。实验现场安装方式如图 3(b)所示,安装后传感器敏感面与被测表面平齐,实验时被测表面和工装同时对传感器提供防护功能,保护传感器本体与线缆不受冲击波影响。实验后建筑模型完好无损坏且无塑性变形,与地面连接牢固无松动,传感器未从模型上脱落。

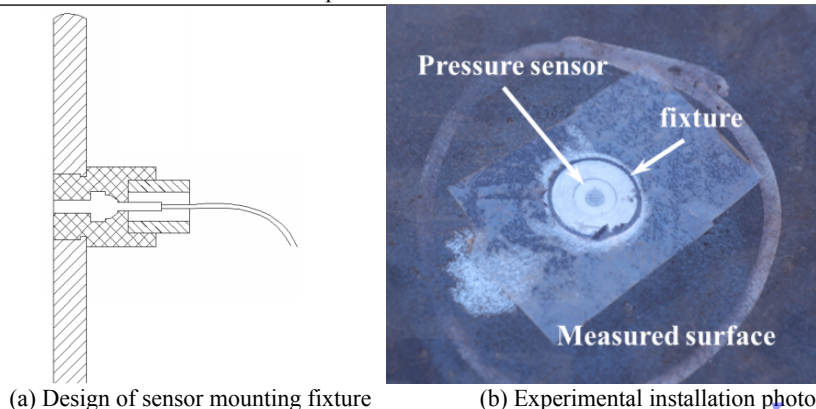


图3 传感器工装设计及安装方式

Fig.3 The design of sensor fixture and installation method

需要说明的是, 本文对多层建筑按照 1:50 缩尺比例开展了爆炸缩比实验, 根据爆炸相似率, 该缩比实验可外推研究高度为 25m 和 50m 的多层建筑在 12.5t TNT 当量炸药爆炸下冲击波流场分布, 该场景可描述卡车炸弹在城市建筑中爆炸的典型情况。在足尺情况下, 相应实验结果可通过比例因子进行缩放分析, 即测量得到的冲击波压力大小参数保持不变, 冲击波压力时间参数增大 50 倍, 冲击波冲量参数增大 50 倍。

2 实验结果

实验获取了所有测点的压力时间历程, 根据爆速探针的测量结果, 所有压力历程的时间零点均调整为炸药起爆瞬间真实零时。图 4 为建筑模型第一、二、三排迎爆面测点的冲击波压力时间历程, 其中压力数据序号对应位置如图 2(a)所示。根据各模型相对爆心位置, 图 4(a)(b)(c)分别为第一排、第二排和第三排模型迎爆面测点数据。从图中可以看出, 第一排建筑模型迎爆面测点冲击波到时最小, 冲击波在迎爆面反射后迅速达到峰值, 随后呈现出与时间相关的指数衰减关系, 迅速衰减至环境压力, 在此过程中没有多余峰值出现。第二排模型迎爆面的压力曲线显示, P12 与 P15 测点冲击波到时接近, 但由于其前方的建筑模型高低宽窄不一, 其峰值压力和冲击波形状也不一致。图 4(b)结果显示冲击波压力在衰减到零后仍会出现较小波动, 这是由于冲击波在第一排模型背爆面的反射造成的。第三排模型迎爆面冲击波到时最大, 峰值压力继续降低, 由于在冲击波传播路径中存在多个建筑物模型, 冲击波发生反复反射及绕射, 因此第三排迎爆面测点的压力历程出现多个明显峰值。

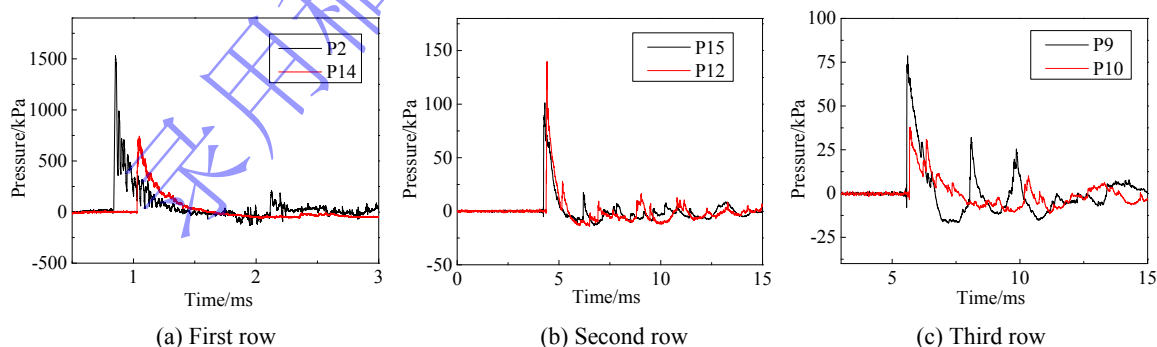


图4 建筑模型第一、二、三排迎爆面测点冲击波压力时间历程

Fig.4 Blast wave pressure-time curves of gauges on front faces of the first, second, and third rows of the building models

图 5 为建筑模型第一、二、三排背爆面及侧爆面测点冲击波压力时间历程, 其中图 5(a)(b)为模型背爆面, 图 5(c)为模型侧爆面。结果显示背爆面测点峰值压力明显小于迎爆面, 波形更为复杂, 不仅在首个压力峰值后出现多个明显峰值, 且第二排及第三排模型背爆面测点压力首峰上升沿趋势变缓, 如图 5(b)中 P13 与 P5 所示。随爆心距增大, 冲击波到时和峰值压力均减小。P5 测点位于第三排模型

背爆面，到时最晚，且峰值压力最小。侧爆面测点 P7 位于建筑模型群内侧，冲击波在建筑群中发生多次反射后产生复杂波系，导致 P7 压力历程出现多个峰值，而 P3 测点位于建筑群外侧，冲击波也产生了多个峰值，但峰值数量明显少于 P7 测点。

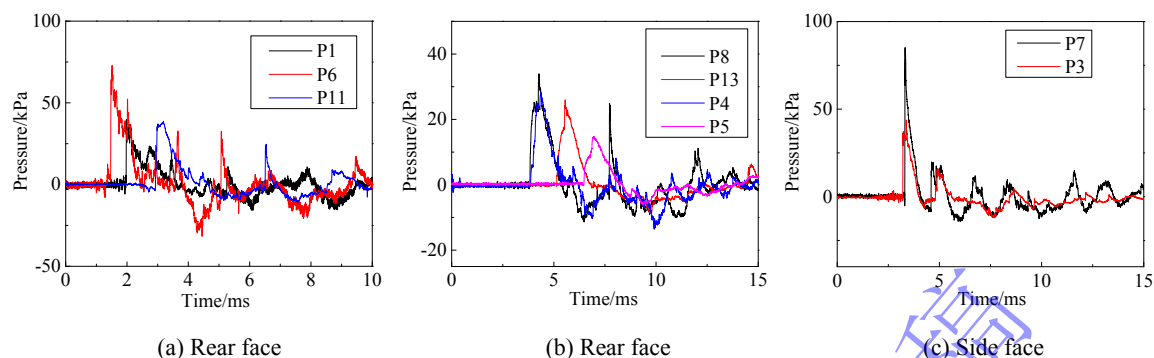


图 5 建筑模型第一、二、三排背爆面及侧爆面测点冲击波压力时间历程

Fig.5 Blast wave pressure-time curves of gauges on rear faces and side faces of the first, second, and third rows of the building models

图 6 为平台表面测点冲击波压力时间历程。T1 与 T3 测点相对爆心位置接近，爆心距相同，且都位于单个 A 型建筑模型后方，因此在前 4 ms 其冲击波压力波形接近。4 ms 后 T3 测点压力出现一个较大峰值，此为冲击波在其正后方 P8 测点所在模型反射后产生的。而 T1 测点位于错列式建筑群，其正后方无模型，因此 T1 测点压力曲线没有该特征。T6 测点位于 C 型模型后方，冲击波与较宽模型作用后，到达 T6 测点的冲击波压力减低，且连续出现两个峰值，体现了建筑尺寸对其周围冲击波流场的重要影响。随着爆心距增大，T2、T4 及 T5 测点冲击波到时增大，峰值压力降低，且出现复杂的多峰波形。

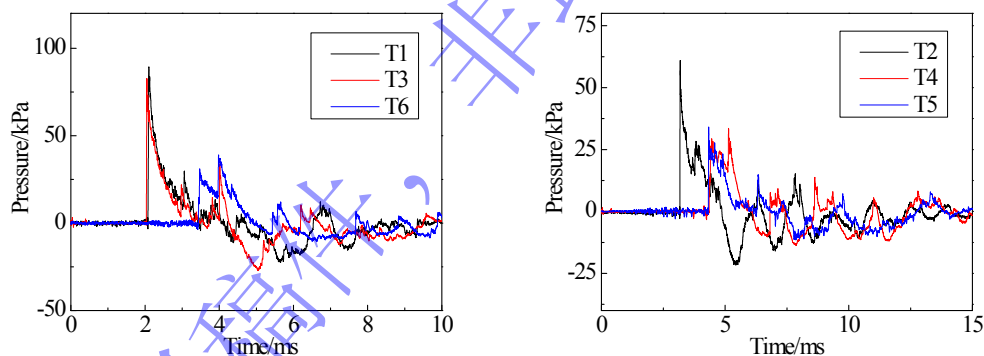


图 6 平台表面测点冲击波压力时间历程

Fig.6 Blast wave pressure-time curves of gauges on the ground of platform

为研究建筑群对冲击波传播的影响，将试验平台上的建筑模型拆除，仅保留平台表面压力测点，并保持传感器型号及测试系统不变。使用与上述实验相同球形炸药及爆心位置，开展触地爆基准实验，测量不同爆心距下平台表面冲击波压力时程曲线。如图 7 所示，基准实验测试结果显示平台上各测点的压力历程曲线在冲击波到达时达到峰值，随后以指数形式衰减，最终到达环境压力。由于缺少缩比模型对冲击波传播的作用，相比于图 6，基准实验冲击波压力曲线只有一个峰值，波形更加单一。

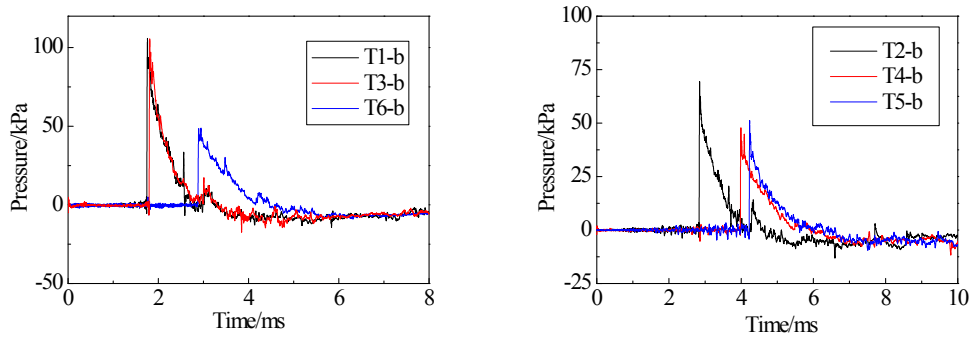


图 7 基准实验平台表面测点冲击波压力时间历程

Fig.7 Blast wave pressure-time curves of gauges on the ground of platform of benchmark experiment

由于实验测量得到冲击波压力曲线不可避免地存在震荡及噪声，为了减小传感器自激等因素导致的高频噪声影响，将所有数据都进行 FFT 低通滤波处理，滤波频率为 100Hz。为准确读取冲击波特征参数，采用绘制对数超压-时间曲线方法^[20, 21]判读冲击波超压峰值。如图 8 所示，对冲击波对数超压-时间曲线初始段进行线性拟合，拟合直线与冲击波到时的交点即为冲击波超压峰值 p_m 。此外获取了冲击波到时 t_a 、正压作用时间 t_d 以及正压比冲量 I 等冲击波特征参数，统计数据见表 2，其中冲击波正压比冲量通过对实验测得冲击波压力曲线进行积分获取，即 $I = \int_{t_a}^{t_d} \Delta P(t) dt$ ，反映了冲击波在正压阶段传递给单位面积结构的动量。表 2 中测点比例爆心距为 $\bar{r} = r/\sqrt[3]{W}$ ， $W=0.1$ kg，此外还列出了基准实验中平台表面 T1-b 至 T6-b 测点冲击波压力特征参数。从表 2 中可看出 P2 测点冲击波到时最小，为 0.84 ms，峰值压力最高为 1219.8 kPa，正压比冲量最大为 143.0 Pa·s，P5 测点冲击波到时最大为 6.48 ms，峰值压力最低为 14.6 kPa，正压比冲量最小为 13.5 Pa·s。

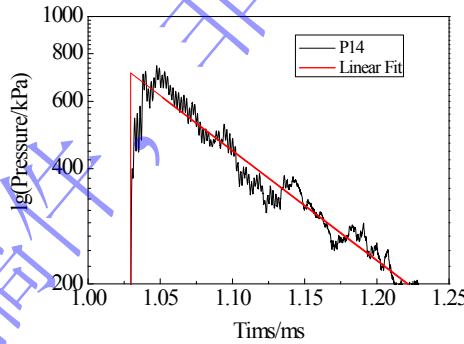


图 8 冲击波压力对数超压-时间曲线

Fig.8 Logarithmic pressure-time curve of blast wave

表 2 冲击波特征参数

Table 2 The characteristic parameters of blast waves

测点序号	$\bar{r}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	t_a/ms	t_d/ms	p_m/kPa	$I/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
1	3.41	1.97	1.54	36.1	24.6
2	2.22	0.84	0.62	1219.8	143
3	4.78	3.21	0.81	44.2	17.0
4	4.88	3.87	2.32	28.2	23.2
5	6.91	6.48	1.73	14.6	13.5
6	2.64	1.47	0.84	72.8	31.4
7	4.91	3.31	0.77	73.5	23.4
8	4.77	3.83	1.46	33.9	25.4
9	6.49	5.57	1.11	80.4	33.4
10	6.83	5.68	1.93	38.4	23.4

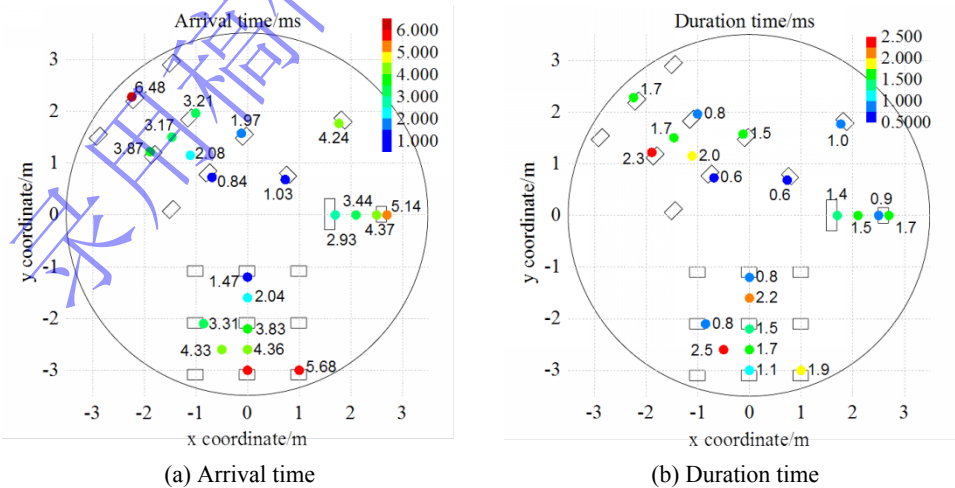
爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

11	3.70	2.93	1.42	38.5	23.9
12	5.41	4.37	0.95	126	37.2
13	5.84	5.14	1.68	26.0	19.6
14	2.41	1.03	0.57	755	107
15	5.41	4.24	0.97	105	33.8
T1	3.45	2.08	1.97	84.5	37.3
T2	4.52	3.17	1.70	52.6	31.3
T3	3.45	2.04	2.22	73.6	35.8
T4	5.60	4.36	1.70	29.0	25.3
T5	5.70	4.33	2.45	28.8	17.8
T6	4.52	3.44	1.50	27.5	25.0
T1-b	3.45	1.75	0.99	91.3	35.6
T2-b	4.52	2.84	1.34	59.9	29.6
T3-b	3.45	1.80	1.50	101	36.5
T4-b	5.60	3.98	1.91	40.0	25.0
T5-b	5.70	4.22	2.04	38.9	23.5
T6-b	4.52	2.88	1.59	47.7	27.3

3 分析与讨论

3.1 实验结果及分析

为了展示各测点相对位置与所测冲击波特征参数，将表 2 数据绘制在图 9 中，其中(a)为冲击波到时，(b)为冲击波正压时间，(c)为冲击波峰值压力，(d)为冲击波正压比冲量。图中将冲击波特征参数的大小用不同颜色标识。图 9(a)显示冲击波到时与测点爆心距密切相关，整体上随着爆心距增大而增大，围绕爆心呈现出近小远大的趋势。图 9(b)则显示冲击波正压作用时间与爆心距不存在明显的正相关关系，各测点正压作用时间分布较为分散，与具体测点位置相关。直观上看，图 9(c)及图 9(d)显示冲击波峰值压力及正压比冲量大小不仅与爆心距相关，且取决于测点所处建筑模型表面位置，整体上迎爆面峰值压力及正压比冲量较大，侧爆面次之，背爆面较小。根据冲击波特征参数及测点位置关系，后文开展了进一步分析。



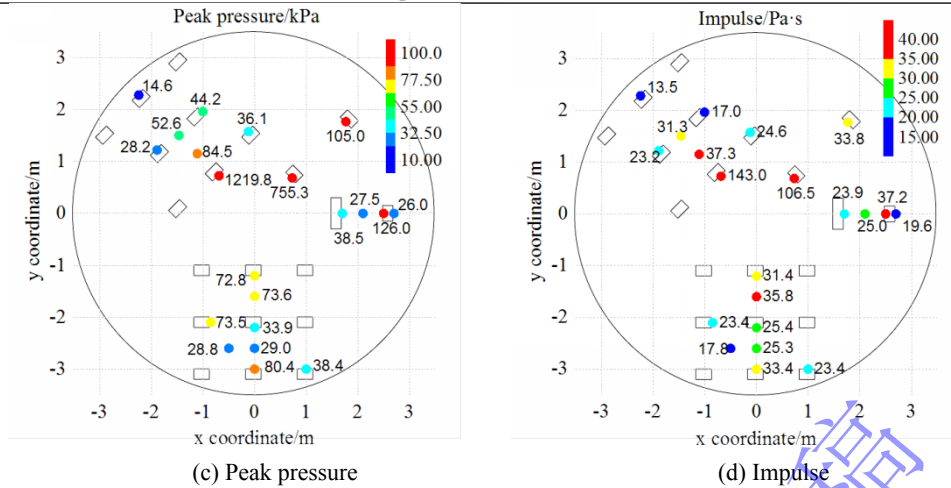


图 9 各测点冲击波特征参数

Fig.9 The characteristic parameters of the blast waves at pressure gauges

为了系统研究冲击波参数随比距离变化关系，将实验数据对爆炸当量进行归一化处理，并与权威手册 Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions^[22] 中半球形 TNT 炸药触地爆炸冲击波特征参数进行对比。归一化处理后，冲击波超压 P (kPa) 保持不变，比例距离 $\bar{r} = r/W^{1/3}$ (m/kg^{1/3})，比例比冲量 $\bar{I} = I/W^{1/3}$ (Pa·s/kg^{1/3})，比例到达时间 $\bar{t}_a = t_a/W^{1/3}$ (s/kg^{1/3})。根据图 1(a) 中建筑模型相互位置关系及测点高度，可计算得到各测点爆心距，以下给出各测点冲击波特征参数与比例距离之间关系。

图 10 为冲击波比例到时与比距离之间的关系，其中不同图例分别代表传感器安装位置为迎爆面、背爆面、侧爆面及平台，并将所有数据进行线性拟合，图中还给出了 UFC 3-340-02 中炸药触地爆炸下冲击波比例到时与比距离关系^[22]。从图中可以看出冲击波到时在实验研究范围内整体上与比距离呈现线性正相关关系，且实验测量值与 UFC 3-340-02 中冲击波到时经验值接近，其中迎爆面及平台表面测点冲击波到时与经验值平均相对偏差较小，分别为 4.85% 及 3.73%，背爆面测点与经验值相对偏差较大，平均相对偏差为 9.27%，而侧爆面测点由于实验值较少，计算得到与经验值平均相对偏差为 10.58%，具体结果如表 3 所示。分析可知，冲击波到达建筑模型迎爆面后，须从顶部及两侧绕射后才能作用在背爆面上，建筑模型对冲击波传播的阻滞作用导致了背爆面上冲击波到时偏高。

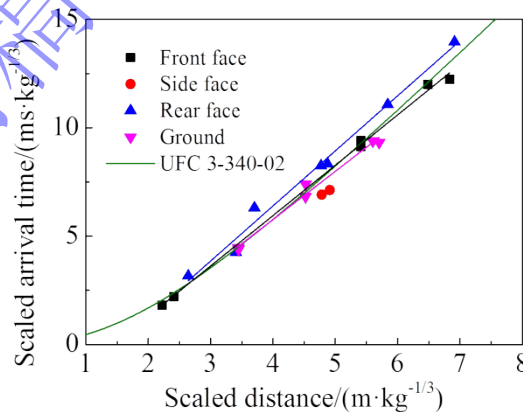


图 10 冲击波比例到时与比距离之间的关系

Fig.10 The relationship between scaled arrival time and scaled distance

表 3 冲击波到时实验值与经验值相对偏差

Table 3 The relative deviation between the experimental and empirical arrival time of blast waves

测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%
迎爆面		侧爆面		背爆面		平台表面	

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

2	12.0	3	10.1	1	3.99	T1	0.50
9	0.90	7	11.0	4	5.19	T2	3.09
10	6.13			5	5.38	T3	2.49
12	1.25			6	12.2	T4	4.02
14	7.13			8	7.68	T5	7.21
15	1.71			11	24.2	T6	5.10
				13	6.35		
平均值	4.85	平均值	10.6	平均值	9.27	平均值	3.73

图 11 展示了各测点冲击波峰值压力与比距离之间的关系，同样地，不同符号代表不同位置测点，并将数据分别进行线性拟合。图中还给出了 UFC 3-340-02 中炸药触地爆炸下冲击波反射超压峰值 P_r 及入射超压峰值 P_{s0} 与比例距离的关系^[22]，分别用实线和虚线表示。为了直观比较各测点位置冲击波压力大小，图 11 中各点附近数字代表测点编号，具体如图 2(a)所示。结果显示各测点峰值压力不仅与比距离相关，还与传感器的安装位置有关，整体上迎爆面峰值压力最高，侧爆面和平台表面次之，背爆面峰值压力最小。图中在双对数坐标系下对峰值压力数据进行线性拟合，发现三种类型的测点峰值压力与比距离分别呈现幂指数关系，但是指数有所差异。

将迎爆面冲击波压力值与 UFC 3-340-02 中冲击波反射压经验值进行对比，发现实验测量值略大与经验值，平均偏差约 35.17%，这是因为经验值为半球形炸药触地爆炸冲击波数值，而实验中采用球形炸药触地爆炸，球形炸药爆炸后会在地面产生冲击波增强效应，导致实验值偏大。将其他位置冲击波压力测量结果与冲击波入射超压经验相比，得到平台表面冲击波压力值略小于经验值，平均偏差约为 16.94%，由于侧爆面测点实验值较少，计算得到与经验值平均相对偏差为 35.12%。由于建筑对冲击波传播的阻碍作用，背爆面测点冲击波压力明显小于入射压经验值，平均相对偏差达到 41.40%，具体结果如表 4 所示。

从图中看出迎爆面 P12 与 P15 测点爆心距相同，但是由于其前方分别为 C 型和 B 型模型，2 类模型宽度及高度尺寸不同，对冲击波传播作用有差异，因此测得 2 个测点峰值压力不同。平台表面 T2 与 T6 测点爆心距相同，由于其前方分别为 A 型和 C 型模型，2 类模型宽度尺寸不同，同样导致测点峰值压力不同，且宽度更大模型对其后冲击波衰减越强，说明建筑排布对冲击波峰值压力分布产生明显影响。

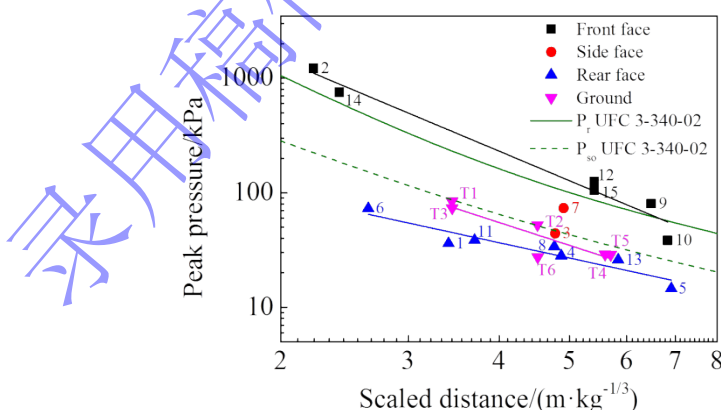


图 11 冲击波峰值压力与比距离之间的关系

Fig.11 The relationship between blast wave peak pressure and scaled distance

表 4 冲击波压力峰值实验值与经验值相对偏差

Table 4 The relative deviation between the experimental and empirical peak pressure of blast waves

测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%
迎爆面		侧爆面		背爆面		平台表面	
2	57.6	3	5.35	1	59.4	T1	2.83

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

9	29.3	7	64.9	4	37.5	T2	1.85
10	32.5			5	42.4	T3	15.3
12	46.1			6	52.1	T4	18.5
14	24.0			8	27.8	T5	16.5
15	21.7			11	48.9	T6	46.7
				13	21.6		
平均值	35.2	平均值	35.1	平均值	41.4	平均值	16.9

图 12 为各测点冲击波比例比冲量与比距离之间的关系，使用不同符号表示不同位置测点，其附近数字用于标识测点编号，并在双对数坐标下分别进行线性拟合。图中分别用实线和虚线给出了 UFC 3-340-02 中炸药触地爆炸下冲击波反射和入射比例比冲量 I_r 及 I_s 与比例距离的关系^[22]。结果显示各测点比例比冲量整体上随比距离增大而减小，并在研究比距离范围内近似与比距离呈现幂指数关系。同时比例比冲量与测点位置密切相关，迎爆面测点比例比冲量最大，地面及侧爆面测点次之，背爆面测点最小。

将各测点比例比冲量测量值与 UFC 3-340-02 中经验值进行对比，得到迎爆面测点比例比冲量小于反射比例比冲量经验值，平均偏差约 26.54%，平台表面测点比例比冲量与入射比例比冲量经验值接近，平均偏差约 9.60%，由于侧爆面测点实验值较少，计算得到实验值与入射冲击波经验值平均相对偏差为 28.44%。由于建筑模型对冲击波的阻碍衰减作用，背爆面测点比例比冲量最小，相比入射冲击波经验值偏小，计算得到平均偏差为 26.44%。具体结果如表 5 所示。与冲击波压力峰值类似，图 12 显示相同爆心距下，位于不同尺寸建筑模型后方的迎爆面 12 号测点与 15 号测点比例比冲量不同，相同爆心距下 T2 和 T6 测点的比例比冲量也由于不同宽度模型对冲击波强度衰减作用不同而产生差异。

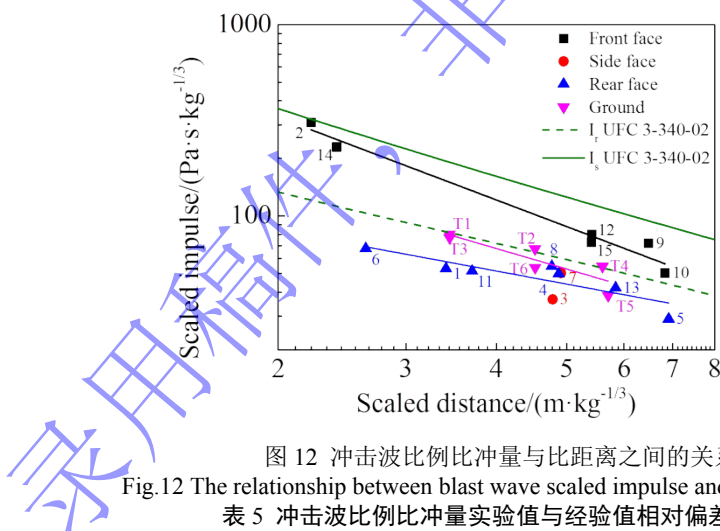


图 12 冲击波比例比冲量与比距离之间的关系
Fig.12 The relationship between blast wave scaled impulse and scaled distance

表 5 冲击波比例比冲量实验值与经验值相对偏差

Table 5 The relative deviation between the experimental and empirical peak pressure of blast waves

测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%	测点序号	相对偏差/%
迎爆面		侧爆面		背爆面		平台表面	
2	3.92	3	40.5	1	35.9	T1	2.01
9	23.8	7	16.4	4	17.5	T2	4.08
10	43.6			5	34.2	T3	5.86
12	30.3			6	34.7	T4	1.97
14	21.0			8	11.5	T5	27.0
15	36.7			11	33.1	T6	16.7

				13	18.1		
平均值	26.5	平均值	28.4	平均值	26.4	平均值	9.60

根据表 2 中数据, 图 13 展示了建筑群对冲击波传播的影响, 其中圆形符号为建筑群排布下地面测点冲击波特征参数, 方形符号为拆除建筑模型后 (基准实验) 相同位置地面测点冲击波特征参数。图 13(a) 显示建筑群对冲击波传播有明显阻滞作用, 有建筑群情况下冲击波比例到时明显大于基准实验到时, 各测点比例到时平均增大约 12.57%。图 13(b) 显示建筑群对冲击波强度有明显衰减作用, 有建筑群情况下冲击波压力峰值明显小于基准实验, 各测点压力峰值平均减小约 23.74%, 且图中曲线显示随比例距离增大, 冲击波衰减越明显。图 13(c) 中各测点比例比冲量相较基准实验测量值平均偏差约 7.67%, 图中显示比例距离较小时, 建筑排布对比例比冲量的影响较小, 而 T5 测点结果明显偏小, 表明受建筑群对冲击波传播影响, 特定位置冲击波比冲量将受到较为显著的衰减。

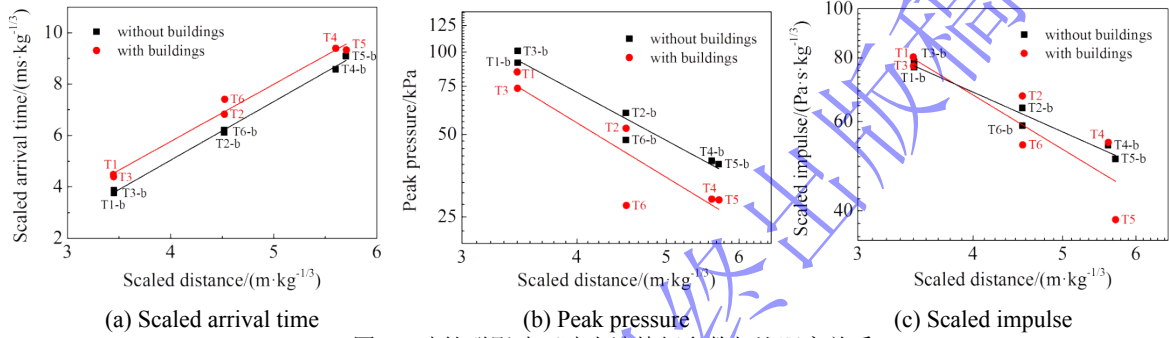


图 13 建筑群影响下冲击波特征参数与比距离关系

Fig. 13 The relationship between blast wave characteristic parameters and scaled distance under the influence of buildings

3.2 数值仿真结果及分析

为进一步研究建筑群对冲击波传播的影响, 开展数值仿真计算。使用有限体积法对爆炸冲击波在建筑群传播问题进行离散求解^[23-26], Euler 形式 Navier-Stokes 控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \mathbf{u} \\ e \end{bmatrix} + \nabla \cdot \begin{bmatrix} \rho \mathbf{u} \\ \rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} + p \mathbf{I} \\ (\rho e + p) \mathbf{u} \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

其中 ρ 为气体密度, $\mathbf{u} = [u \ v \ w]^T$ 为速度场, p 为气体压力, e 为气体比内能, $\mathbf{I}$ 是单位矩阵。空气采用理想气体状态方程进行表征:

$$p = (\gamma - 1) \rho e, \quad (2)$$

其中绝热指数 $\gamma = 1.4$, 空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, e 为空气比内能, 计算中大气压 $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, 空气温度 $T_0 = 288 \text{ K}$ 。炸药采用 JWL 状态方程描述爆轰产物:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) e^{\frac{R_1 \rho_0}{\rho}} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) e^{\frac{R_2 \rho_0}{\rho}} + \omega \frac{\rho}{\rho_0} e_0, \quad (3)$$

其中 A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为拟合系数, ρ 和 ρ_0 分别为爆轰产物密度和炸药初始密度。计算中炸药参数取 $\rho_0 = 1601 \text{ kg/m}^3$, $A = 371.21 \text{ GPa}$, $B = 3.23 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, $\omega = 0.3$, $e_0 = 9 \text{ GPa}$ 。计算中使用 2 阶 Runge-Kutta 时间积分格式, 通量格式为 Tadmor 方法。

对上述实验工况进行离散求解, 按照文献中关于网格尺寸敏感性分析结果^[26], 最小单元网格尺寸选取为 10 mm 时可兼顾计算效率与计算精度。数值仿真中空气边界条件为无梯度流出条件, 地面和建筑模型使用刚体描述, 冲击波在地面和建筑表面发生反射。计算中 100g TNT 当量球形炸药触地放置, 半径为 22.5 mm, 建筑排布方式和爆心距按照实验布置图 1 进行设置。图 14 为数值仿真示意图, 利用可视化方法可以显示触地爆炸产生的半球形冲击波波阵面, 以及建筑表面和地面各时刻压力分布。

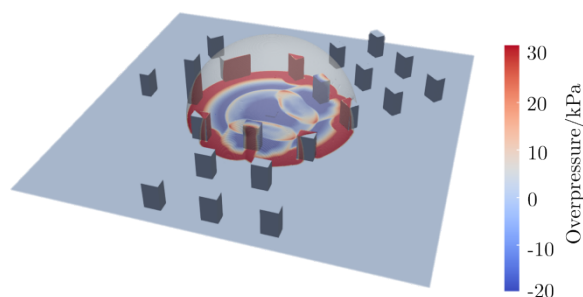


图 14 数值模拟示意图

Fig. 14 The Schematic diagram of numerical simulation

数值模拟中在每个建筑表面中心位置设置压力测点，图 15 列举部分建筑表面及平台表面典型测点的压力时程曲线。结果显示数值模拟结果与实验结果吻合较好，能够较为准确刻画冲击波与建筑表面首个压力峰值大小，当冲击波与建筑群发生复杂作用后，数值结果也能重现出冲击波历程中的多个峰值。

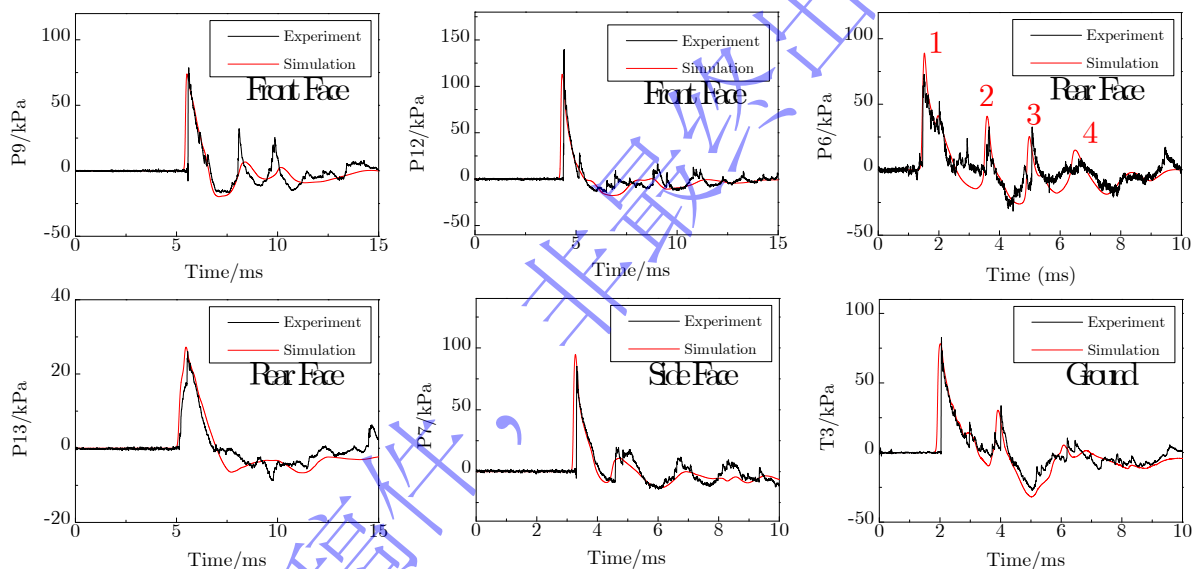


图 15 冲击波压力曲线的实验与模拟结果对比

Fig. 15 The comparison between experimental of numerical results of pressure-time curves

图 15 显示位于阵列式排布第一排背爆面 P6 测点压力曲线依次出现了 4 个峰值，以此测点为例，通过提取冲击波传播过程压力分布云图，分析建筑排布对冲击波传播以及建筑表面载荷的影响。图 16 中分别用序号 1-6 标记阵列式排布中的第一排与第二排建筑模型，当 $t=1.3$ ms 时，冲击波绕射至 2 号模型背爆面到达 P6 测点，产生了第一个峰值，该峰值压力最大，随着冲击波继续传播，P6 测点压力逐步衰减。当 $t=3.1$ ms 附近时，冲击波在 1 号与 3 号模型发生斜反射产生的反射波到达 P6 测点，使得 P6 压力出现第二个峰值，此时冲击波前沿波阵面已到达第二排模型。如图 16(c)所示，当冲击波传播经过第二排模型后，会在模型迎爆面发生反射并分别产生反射波，其中 5 号模型反射波首先到达 P6 测点，形成了 P6 压力曲线的第三个峰值，此后 4 号与 6 号模型反射波同时到达 P6 测点并形成了第四个峰值。通过数值模拟不仅可以得到冲击波压力峰值，还能清晰复现实验过程中冲击波在建筑群发生反射、绕射的复杂过程，助于理解建筑排布对冲击波传播过程和载荷分布的影响机理。

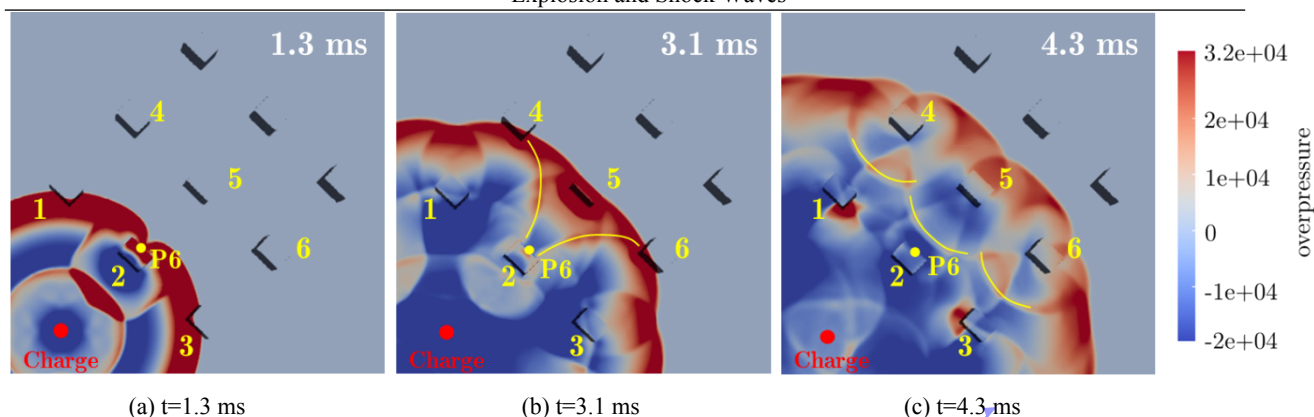
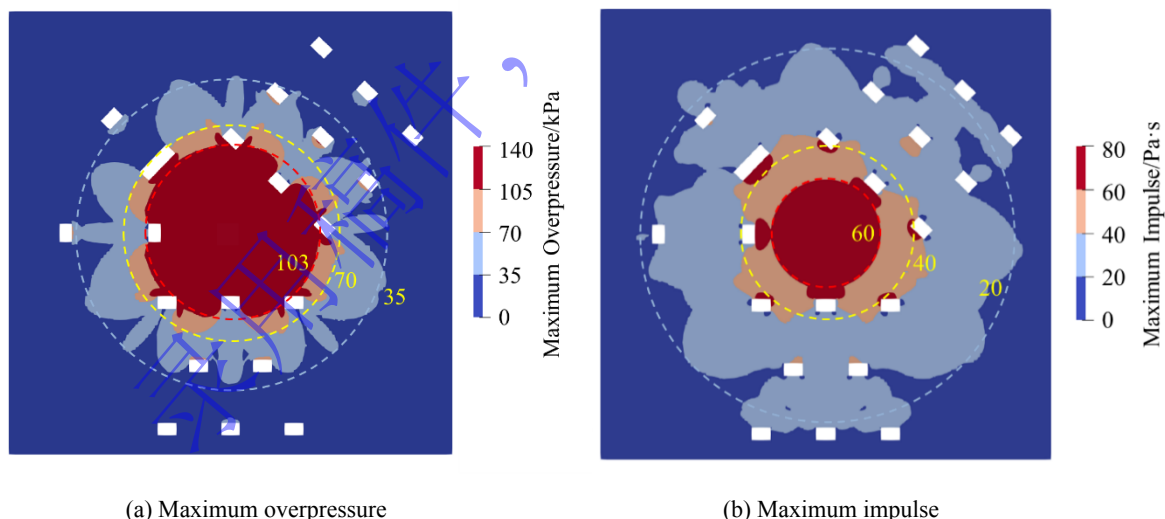


图 16 冲击波在阵列式排布建筑群传播过程

Fig. 16 The blast wave propagation process in array distributed buildings

为评估建筑群对冲击波载荷分布的影响，使用能够对人员造成伤害的冲击波阈值示意说明。根据冲击波对人员致伤 PROBIT 方程^[27-29]，冲击波造成 50% 耳骨膜破裂超压阈值约 103 kPa，在此压力下造成 1% 头部撞击冲量阈值约 3000 Pa·s (1:50 缩尺下约 60 Pa·s)。图 17 分别展示了冲击波在建筑群中传播后上述超压(a)及冲量(b)参数阈值分布，其中虚线同心圆为无建筑群时相同炸药触地爆产生冲击波参数范围，可对比分析建筑群对冲击波载荷分布的影响。图 17(a)显示爆心距较小时(对应超压 103 kPa，红色区域)，建筑群对冲击波超压影响较小，由于冲击波在建筑迎爆面反射及绕射作用，首排建筑迎爆面及绕射面附近超压相比无建筑群时增强，背爆面区域超压降低；爆心距增大后(对应超压 70 kPa，橙色区域)，建筑背爆面区域超压降低范围增大；随爆心距继续增大(对应超压 35 kPa，浅蓝色区域)，建筑群导致超压等值面分布不规则，整体上减小了爆炸冲击波超压造成的伤害范围。图 17(b)显示爆心距较小时(对应冲量 40 Pa·s，红色及橙色区域)，冲击波冲量在建筑迎爆面区域增强，在建筑背爆面区域减小，在两个建筑之间区域略有增强；当爆心距增大后(对应冲量 20 Pa·s，浅蓝色区域)，建筑群导致冲量等值面分布不规则，整体上同样减小了爆炸冲击波冲量造成的伤害范围。



(a) Maximum overpressure

(b) Maximum impulse

图 17 建筑群中冲击波特征参数分布

Fig. 17 The distribution of blast wave characteristic parameters in urban buildings

进一步地，为了量化研究近地爆炸冲击波对不同排布建筑群的载荷大小，图 18 给出了两种排布方式示意图，建筑模型相互位置及尺寸与图 1(a)一致。对不同建筑进行编号，其中第一个数字代表排数，字母 C 代表中间位置，S 表示侧边位置建筑，例如 3-S 代表第三排侧边位置。由于爆心位于建筑群对称轴位置，因此侧边位置建筑所受冲击波载荷对称分布。将数值模拟得到各建筑表面中心位置测点的峰值压力 P_m 与峰值冲量 I_m 列举于表 6，需注意部分模型两个侧爆面压力与冲量不同。爆心与第

一排建筑之间无障碍阻滞，因此不考虑排布方式对第一排建筑载荷的影响。

分析表 6 数据，阵列式排布第二排中间建筑 2-C 峰值压力与冲量均大于错列式排布第二排建筑 2-C，侧边建筑 2-S 峰值压力与冲量最小，因此错列式排布能降低第二排建筑表面最大压力与冲量。阵列式排布第三排中间建筑 3-C 迎爆面、侧爆面、背爆面峰值压力分别为 74.0 kPa、30.5 kPa、24.8 kPa，而错列式排布中相同位置压力分别为 63.8 kPa、22.9 kPa、17.4 kPa，均小于前者；阵列式排布 3-C 建筑迎爆面峰值冲量 44.5 Pa·s，错列式排布中相同位置冲量为 36.6 Pa·s，也小于前者。两类排布中，第三排两侧 3-S 建筑表面峰值压力与冲量数值较低，差距也较小。综上所述，错列式排布能够有效降低近地爆炸冲击波下，后排建筑表面的冲击波峰值载荷。以承受冲击波破坏最主要的迎爆面而言，相比阵列式排布建筑群，错列式排布下第二排建筑峰值压力最大降低近 30%，峰值冲量最大降低约 18%，错列式排布下第三排建筑相同位置迎爆面峰值压力最大降低约 16%，峰值冲量最大降低 22%。

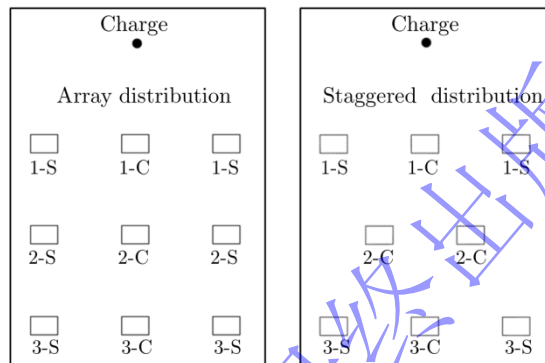


图 18 阵列式与错列式排布建筑示意图

Fig. 18 The Schematic diagram of array and staggered distribution of buildings

表 6 阵列式与错列式排布建筑表面测点峰值压力与冲量

Tab.6 Peak pressure and impulse on surface gauges of array and staggered distribution of buildings

	阵列式/2-C		错列式/2-C		阵列式/2-S		错列式/2-S	
	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$
迎爆面	154	67.4	118	57	118	43.8		
侧爆面	48.8	33.6	44.2/47.0	23.1/34.5	80.6/29.8	31.6/22.2		
背爆面	36.5	31.5	31.2	26.8	18.7	24.2		
	阵列式/3-C		错列式/3-C		阵列式/3-S		错列式/3-S	
	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$	P_m/kPa	$I_m/\text{Pa}\cdot\text{s}$
迎爆面	74.0	44.5	63.8	36.6	31.5	29.3	36.2	30.9
侧爆面	30.5	22.5	22.9	21.2	26.0/14.7	24.5/17.9	23.8/15.9	23.5/19.0
背爆面	24.8	20.2	17.4	20.3	11.3	18.6	14.1	18.4

4 结论

针对触地爆下冲击波在城市建筑群传播规律开展了实验研究，在实验室环境下搭建了缩比建筑群中爆炸冲击波载荷测量平台，获取了不同位置建筑群表面及地面测点的冲击波到时、正压时间、压力峰值及正压比冲量等特征参数，分析了建筑迎爆面、侧爆面、背爆面以及地面测点冲击波特征参数的分布规律，并与 UFC 3-340-02 手册中经验值进行了定量对比。随后开展了三维冲击波传播过程数值仿真，重现了冲击波在建筑群传播历程，得到了冲击波特征参数云图，定量分析了不同建筑排布下冲击波载荷分布规律。

具体结论如下：

- (1) 迎爆面及平台表面测点冲击波到时与经验值接近，平均偏差分别约为 5% 及 4%，背爆面测

点受建筑阻滞到时增大,与经验值相比平均偏差约为 9%;

(2) 迎爆面测点冲击波压力峰值受炸药形状影响,相比冲击波反射压经验值偏大,平均偏差约 35%,受建筑群对冲击波传播过程的衰减作用影响,平台表面及背爆面冲击波压力峰值均小于冲击波入射压经验值,平均偏差分别约为 17%及 41%;

(3) 受建筑群影响,迎爆面测点比例比冲量相比反射比例比冲量经验值略小,平均偏差约 27%,平台表面测点比例比冲量与入射比例比冲量经验值接近,平均偏差约 10%,背爆面测点比例比冲量相比入射冲击波经验值偏差较大,平均偏差达到 26%;

(4) 爆心距较小时,由于冲击波在建筑迎爆面反射及绕射作用,首排建筑迎爆面附近超压及冲量相比无建筑群时增强,背爆面区域超压冲击量降低;爆心距增大后,建筑群导致超压及冲量等值面分布不规则,整体上减小了爆炸冲击波超压及冲量造成的伤害范围;

(5) 错列式排布能够有效降低近地爆炸冲击波下,后排建筑表面的冲击波峰值载荷。以承受冲击波破坏最主要的迎爆面而言,相比阵列式排布建筑群,错列式排布下第二排建筑峰值压力最大降低近 30%,峰值冲量最大降低约 18%,错列式排布下第三排建筑相同位置迎爆面峰值压力最大降低约 16%,峰值冲量最大降低 22%。

参考文献:

- [1] ISAAC O S, ALSHAMMARI O G, PICKERING E G, et al. Blast wave interaction with structures – An overview [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2023, 14(4): 584-630. DOI: 10.1177/20414196221118595.
- [2] 张大民, 张昆, 汤文辉, 等. 剪力墙建筑物在强爆炸作用下的动响应研究[J]. *现代应用物理*, 2022, 13(04): 041003. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2022.041003.
ZHANG D M, ZHANG K, TANG W H, et al. Dynamic response of shear wall buildings under intense explosion [J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13(04): 041003. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2022.041003.
- [3] 廖真, 刘文祥, 程帅, 等. 强爆炸环境下车辆倾覆预测模型研究[J]. *现代应用物理*, 2022, 13(04): 041002. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2022.041002.
LIAO Z, LIU W X, CHENG S, et al. Prediction model of vehicle overturning in a strong explosion environment [J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13(04): 041002. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2022.041002.
- [4] ROSE T A, SMITH P D. Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(4): 359-376. DOI: /10.1016/S0734-743X(01)00060-4.
- [5] SMITH P D, ROSE T A. Blast wave propagation in city streets-an overview [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2006, 8: 16-28. DOI: 10.1002/pse.209.
- [6] REMENNIKOV A M, ROSE T A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries [J]. *Computers & Structures*, 2005, 83(27): 2197-2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003.
- [7] ROSE T A, SMITH P D, MAY J H. The interaction of oblique blast waves with buildings [J]. *Shock Waves*, 2006, 16(1): 35-44. DOI: 10.1007/s00193-006-0051-0.
- [8] GAJEWSKI T, SIELICKI P W. Experimental study of blast loading behind a building corner [J]. *Shock Waves*, 2020, 30(4): 385-394. DOI: 10.1007/s00193-020-00936-1.
- [9] 李世民, 李晓军, 李洪鑫. 恐怖爆炸袭击下建筑迎爆面冲击波荷载的计算[J]. *工程爆破*, 2013, 19(1-2): 32-35. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2013.01-02.008.

- LI S M, LI X J, LI H X. Calculation of shock wave on the face of buildings under the terrorist explosion [J]. *Engineering Blast*, 2013, 19(1-2): 32-35. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2013.01-02.008.
- [10] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 爆炸冲击波作用于墙体及对墙体绕射的实验研究[J]. *实验力学*, 2008, 23(2): 169-174.
- MU C M, REN H Q, LI Y C, et al. Experimental study of blast wave reflection and diffraction on a shelter wall [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(2): 169-174.
- [11] 郝莉, 马天宝, 王成, 等. 爆炸冲击波绕流的三维数值模拟研究[J]. *力学学报*, 2010, 42(6): 1042-1049. DOI: 10.6052/0459-1879-2010-6-lxxb2009-459.
- HAO L, MA T B, WANG C, et al. Three dimensional numerical simulation study on the flow of the explosion shock wave around the wall [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(6): 1042-1049. DOI: 10.6052/0459-1879-2010-6-lxxb2009-459.
- [12] 李鑫, 吴桂英, 贾昊凯. 挡墙对爆炸冲击波传播影响的数值模拟[J]. *工程力学*, 2012, 29(2): 245-250.
- LI X, WU G Y, JIA H K. The numerical simulation of explosion shock wave propagation subject to the retaining wall [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(2): 245-250.
- [13] 张晓伟, 张浩, 杨茂林, 等. 隔爆墙后爆炸冲击波绕射与超压分布规律[J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(4): 372-379. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2020.069.
- ZHANG X W, ZHANG H, YANG M L, et al. Diffraction and overpressure distribution of blast wave behind explosion isolation wall [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(4): 372-379. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2020.069.
- [14] WANG X, REMOTIGUE M, ARNOLDUS Q, et al. High-fidelity simulations of blast loadings in urban environments using an overset meshing strategy[J]. *Shock Waves*, 2017, 27(3): 409-422. DOI: 10.1007/s00193-016-0680-x.
- [15] HANK S, SAUREL R, LE MéTayer O, et al. Modeling blast waves, gas and particles dispersion in urban and hilly ground areas[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 280(000): 436-449. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.08.011.
- [16] BENSELAMA A M, WILLIAM-LOUIS M J P, MONNOYER F. Prediction of blast wave effects on a developed site [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(4): 385-396. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.08.003.
- [17] CATLIN C, IVINGS M, MYATT S, et al. Explosion hazard assessment: a study of the feasibility and benefits of extending current HSE methodology to take account of blast sheltering: Technical report HSL/2001/04 [R]. Sheffield: Health and Safety Laboratory, 2001.
- [18] BRITTLE M. Blast propagation in a geometrically complex environment [D]. Cranfield University, 2004.
- [19] FOUCHIER C, LABOUREUR D, YOUINOU L, et al. Experimental investigation of blast wave propagation in an urban environment[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 248-265. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.06.021.
- [20] KINNEY G F, GRAHAM K J. *Explosive Shocks in Air* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1985. DOI: 10.1007/978-3-642-86682-1.
- [21] 陈龙明, 李志斌, 陈荣, 等. 高原环境爆炸冲击波传播特性的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(5): 053206. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0279.
- CHEN L M, LI Z B, CHEN R, et al. An experimental study on propagation characteristics of blast waves under plateau environment [J]. *Explosion and shock waves*, 2022, 42(5): 053206. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0279.

- [22] DEPARTMENT OF DEFENSE. UFC 3-340-02 Structures to resist the effects of accidental explosions[S]. Washington: Department of Defense, 2008.
- [23] Zheng H W, Shu C, Chew Y T, et al. A solution adaptive simulation of compressible multi-fluid flows with general equation of state[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2011,67(5):616-637. DOI: 10.1002/fld.2380.
- [24] Shyue K. A Fluid-Mixture Type Algorithm for Compressible Multicomponent Flow with Mie - Grüneisen Equation of State[J]. Journal of Computational Physics, 2001,171(2):678-707. DOI: 10.1006/jcph.2001.6801.
- [25] Houim R W, Oran E S. A multiphase model for compressible granular - gaseous flows: formulation and initial tests[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016,789(000). DOI: 10.1017/jfm.2015.728.
- [26] 马龙, 殷文骏, 李琦, 等. 触地爆下建筑表面冲击波载荷的分布规律[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(4): 042201. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0428.
- MA L, YIN W J, LI Q, et al. Study on blast load distribution of building surface under surface burst [J]. Explosion and shock waves, 2026, 46(4): 042201. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0428.
- [27] Prugh R W. The effects of explosive blast on structures and personnel [J]. Process Safety Progress, 1999, 18 (1): 5-16.
- [28] Lees F P. Loss Prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control [M]. London: Butterworths, 2012. DOI: 10.1002/prs.680180104.
- [29] 张毅, 李志斌. 基于超压和冲量的爆炸冲击波杀伤概率计算模型[J]. 指挥控制与仿真, 2023,45, (1): 95-101. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2023.01.016.
- ZHANG Y, LI Z B. Calculation model of killing probability of explosion shock wave based on overpressure and impulse[J]. Command Control & Simulation, 2023,45, (1): 95-101. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2023.01.016.