DOI：10.11883/bzycj-2024-0428

触地爆下建筑表面冲击波载荷的分布规律*

马　龙，殷文骏，李　琦，关君翊，童念雪，程　帅，刘文祥，张德志

（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：冲击波作用下建筑表面载荷分布直接影响建筑破坏模式及程度。为深入研究触地爆下建筑表面冲击波载荷分布规律，首先开展了实验室环境下精细缩比实验，获取了球形炸药触地爆下缩比建筑模型表面测点冲击波压力时间曲线，得到了不同工况下冲击波特征参数分布规律；随后发展了冲击波传播数值仿真方法，并使用缩比实验数据对仿真方法进行校核，通过数值方法重点对建筑背爆面载荷分布及冲击波历程进行分析；最后发展了基于冲击波时程分析和叠加法则的理论分析方法，得到了建筑背爆面载荷分布的量化分析模型，并利用仿真结果进行验证。研究结果表明触地爆下建筑迎爆面最大冲击波载荷位于建筑底部，整体载荷分布较均匀；建筑背爆面载荷主要集中在顶角两侧及中轴线区域，由顶边和侧边绕射冲击波叠加形成，最大超压出现在不同绕射冲击波交汇位置，其位置和大小受建筑尺寸和爆心距影响。研究结果可为建筑爆炸破坏后果分析和抗爆设计提供指导。

关键词：触地爆；冲击波载荷；缩比实验；数值模拟

中图分类号：O383　　**国标学科代码：**13035　　**文献标志码：**A

Study on blast load distribution of building surface under surface burst

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

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

Abstract: The load distribution of building surface under blast wave has a direct impact on the failure mode and degree of building. In order to study the distribution of blast wave load of building surface under surface burst, firstly, the fine scaled experiments under laboratory environment were conducted. The blast wave pressure-time curves on the surface of building model under the situation of surface burst of spherical charge as well as the distribution law of blast wave characteristic parameters were obtained. Subsequently, the numerical simulation method of blast wave propagation was developed and verified by the experimental data. Through simulation, the blast load distribution and time-histories of blast pressure on the rear face of building were analyzed. Finally, the theoretical method based on blast wave time-history analysis and superposition rule was proposed, and the quantitative analysis model of the blast load distribution on the rear face of building which was verified by numerical results was obtained. The results show that the maximum blast load on the front face of building located at the bottom of the building, which the overall distribution was relatively uniform. The blast load on the rear face of building was mainly concentrated on the two sides of the top angle and the central axis, which was formed by the superposition of the diffraction waves from top

*收稿日期：2024-11-01；　修回日期：2025-05-28；
第一作者：马　龙（1994-），男，博士，助理研究员. E-mail: malong@nint.ac.cn；
通信作者：张德志（1973-），男，博士，研究员. E-mail: zhangdezhi@nint.ac.cn。

录用稿件，非最终出版稿

and side edges, and the maximum overpressure occurred at the intersection position of different diffraction shock waves, which is affected by the building size and explosion distance. The research results can provide guidance for the damage assessment and design of building under explosion damage.

Keywords: surface burst; blast load; scaled experiment; numerical simulation

城市中意外爆炸事故或恐怖袭击爆炸将对周围建筑产生巨大破坏，造成严重损失。由于常见意外及恐袭爆炸通常发生在地面附近，因此研究触地爆下建筑表面冲击波载荷分布规律对评估建筑毁伤程度、指导建筑抗爆设计具有重要意义。触地爆发生后，冲击波从爆炸中心向外传播，在空气中随传播距离增大强度衰减。为研究冲击波在空气中传播规律，Taylor 及 Sedov 等[1, 2]利用相似律理论及数值方法对空气中爆炸冲击波参数进行表征，此后学者结合理论分析及大量实验数据拟合，得到了描述空气自由场中冲击波传播到时、超压及冲量等特征参数的 Brode 公式[3]、Henrych 公式[4]、Kinney-Grahm 公式[5]、Sadovskiy 公式[6]等。

当冲击波到达建筑表面时发生反射，同时通过建筑顶面及侧面继续向后传播直至到达建筑背爆面，建筑各表面均受到冲击波载荷。美军出版的抗偶然爆炸结构设计手册 UFC-3-340-02[7]对不同爆炸工况下结构表面冲击波各参数进行总结，给出了系列图表和公式指导工程计算，美国联邦应急管理局也出版了建筑防恐袭爆炸的参考手册[8]。近年来随着数值模拟及实验手段的不断发展，爆炸作用下目标结构表面冲击波载荷及其作用研究更加趋于精细化[9-11]。Remennikov 等[12]针对街道爆炸问题发展了基于人工神经网络方法的冲击波载荷快速预测方法；Benselama 等[13]研究了复杂建筑排布中冲击波载荷分布，讨论了建筑间距宽度、建筑高度及爆心距对建筑表面冲击波载荷分布的影响；Codina 等[14]研究了城市建筑环境中建筑间距对爆炸冲击波载荷分布的影响，分析了不同间距下冲击波入射波、规则反射波及马赫反射波的作用区域，给出了冲击波压力及冲量的放大因子分布云图。冲击波传播过程中的绕射及反射对冲击波载荷也有显著影响，学者开展了大量实验及数值方法分析了建筑外挡墙形状及间距对建筑表面载荷分布的影响[15-22]，总结了冲击波在不同条件下绕射后载荷分布规律。对于冲击波经自由场传播后与建筑表面相互作用问题，Trélat 等[23]通过大样本小尺度气体爆炸实验研究了爆心与缩比建筑相对位置关系对建筑表面冲击波载荷分布的影响，并利用小尺度实验数据对数值方法进行验证，得到了描述冲击波入射角及相对爆心距与冲击波载荷的无量纲化工程计算公式。Gebbeken 等[24]使用数值模拟方法对触地爆下不同形状建筑表面冲击波载荷分布进行研究，提出了有效降低爆炸载荷的建议。Gajewski 等[25]开展了系列 200 g 及 400 g TNT 当量实验，分析了建筑转角对冲击波的绕射效果，得到了建筑转角后方冲击波压力峰值与冲量峰值的分布规律。汪维等[26]考虑了空气冲击波与结构间的流固耦合相互作用，得到了方形板结构表面上爆炸冲击波载荷分布函数，并构建了结构表面任意点处冲击波峰值压力和冲量的一般计算方法。喻君等[27]通过数值仿真方法，对近场近地爆炸下建筑中柱构件迎爆面的分布规律进行探究，讨论了比例爆距和比例爆高对建筑柱表面冲击波载荷特征的影响规律，提出了爆炸载荷简化模型。

综上所述，现有工程算法预测触地爆炸冲击波在建筑结构表面载荷时一般对整个壁面做近似计算，以 UFC-3-340-2 为例，建筑物受到平面冲击波加载时，各表面的压力与时间关系表示为两条直线，其关键参数与冲击波及建筑物特征相关，可通过查表方式得到。此方法可以简单得到建筑物表面整体载荷，但是没有考虑迎爆面尤其是背爆面载荷随空间分布情况，也不能考虑加载冲击波不是平面波的情况。当前对于建筑表面载荷分布的实验室环境下炸药爆炸实验研究较少，缺乏精细化冲击波特征参数实验数据，且以上研究大多关注建筑结构及构件的迎爆面载荷，忽略了对背爆面载荷分布规律的深入研究，此外建筑结构自身尺寸对冲击波载荷分布的影响也缺乏考虑。研究建筑背爆面冲击波载荷分布，对于综合分析建筑在爆炸冲击波作用下整体响应，指导设计建筑抗爆设计有着重要意义。

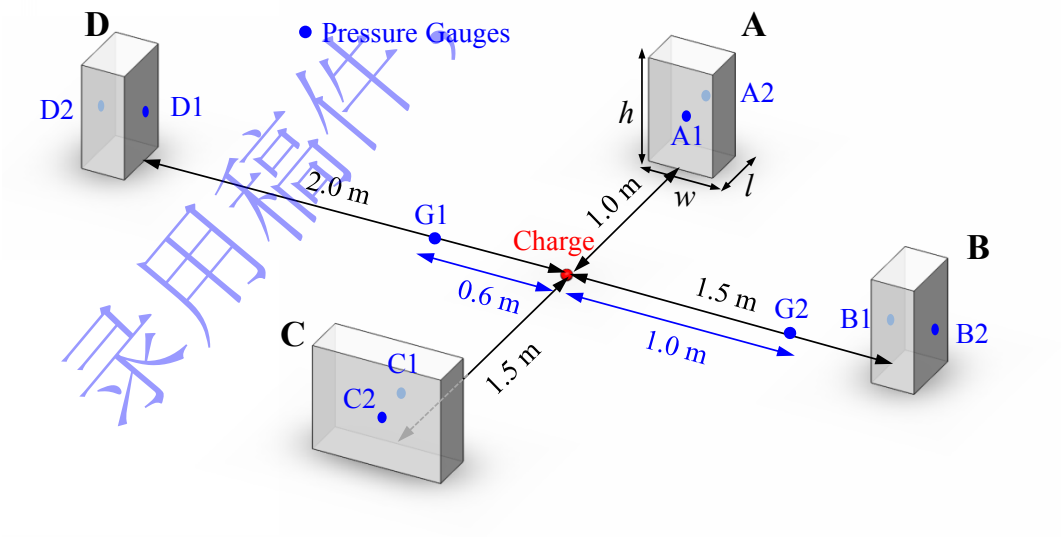
研究冲击波在建筑表面载荷分布及复杂环境对冲击波传播影响[11-29]时，通常不考虑建筑内部结构及其在冲击波作用下的响应，而是按照建筑外形轮廓将其视作刚体处理。对于二维问题，建筑一般简

录用稿件，非最终出版稿

化为多边形轮廓，对于三维问题，建筑直接被简化为不同大小的立方体，建筑群则用不同排布的立方体组合表示。本文同样采用刚体假设，首先开展了缩比实验，获取不同工况下缩比建筑表面冲击波载荷曲线，并利用实验数据对冲击波传播数值方法进行验证，构建了触地爆下冲击波与建筑相互作用仿真模型；随后研究了不同爆距及建筑尺寸对冲击波特征参数的影响，重点讨论了建筑迎爆面和背爆面载荷分布规律；最后利用理论分析方法给出了不同触地爆工况下建筑背爆面冲击波最大载荷及其分布位置与爆距及建筑尺寸的量化关系，为工程应用中建筑爆炸分析及抗爆设计提供指导。

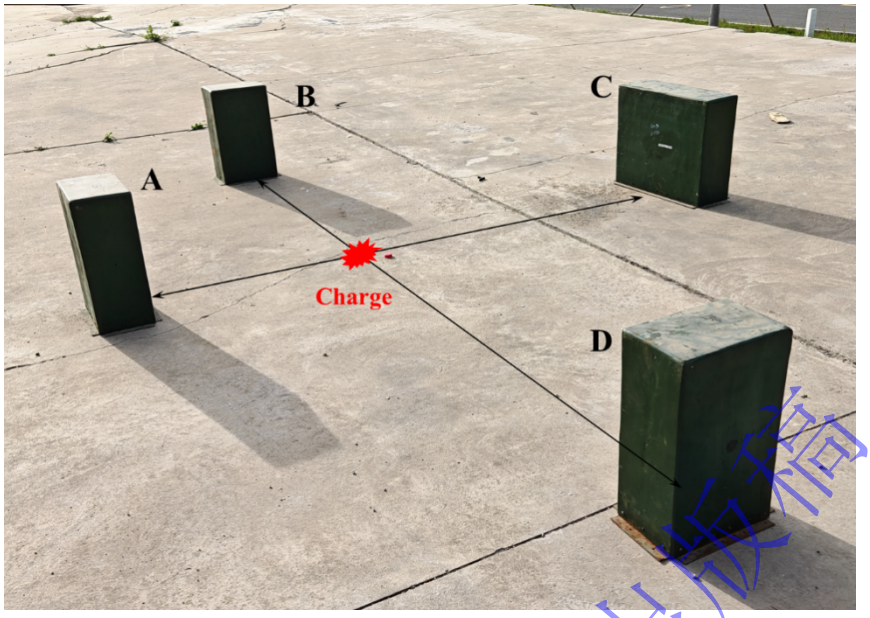
1 冲击波载荷分布实验方法

为研究爆炸冲击波下建筑载荷分布，开展实验室环境精细化缩比爆炸实验。实验使用玻璃钢材料制作缩比模型模拟建筑结构，模型为中空立方体壳，壁厚约 8 mm。选取高度为 25m 的典型多层建筑进行 50 倍缩尺，共制作两种尺寸缩比模型，缩尺后模型尺寸（$w\times l\times h$）分别为 300 mm×200 mm×500 mm 与 600 mm×200 mm×500 mm。根据爆炸缩比相似率，为使冲击波压力峰值及变化趋势不变，尺寸缩比后爆炸当量按缩尺比例立方增大，时间尺度及相应冲量按缩尺比例增大，但是缩尺效应不影响后文中对冲击波传播过程及建筑表面冲击波压力峰值等参数的分析。图 1 为实验布局构型，球形炸药触地放置在钢板上，正对炸药安装 4 个建筑模型，建筑迎爆面垂直于其与爆心连线，迎爆面爆距分别为 1.0 m，1.5 m，1.5 m 与 2.0 m。如图所示，实验前分别在缩比模型的迎爆面中心位置和背爆面中心位置布设压力测点，用于测量建筑表面冲击波压力，此外还在地面布置 G1 与 G2 共 2 个压力测点，爆心距分别为 0.6 m 与 1.0 m，各建筑模型尺寸与传感器安装信息见表 1 所示。为方便表述，将每个模型迎爆面测点标记为 1，背爆面测点标记为 2，例如距离爆心 1.0 m 位置 A 模型迎爆面测点记为 A1，背爆面测点记为 A2。为准确测得建筑模型表面及地面压力，传感器敏感面与被测表面平齐。实验选取球形 T/R 炸药，药球半径约 23 mm，重量 78.1 g，约 100 g TNT 当量，通过精准中心起爆产生理想球形冲击波波阵面。实验时环境温度 15.8℃，相对湿度 14.7%。实验后缩比建筑模型完好无损坏，与地面连接牢固无松动，传感器未从模型和地面上脱落。



(a) Experimental configuration

录用稿件，非最终出版稿



(b) Schematic of field layout

图 1 实验构型及现场布局示意

Fig. 1 Schematic of experimental configuration and field layout

表 1 建筑模型尺寸与爆距

Table 1 Building model size and burst distance

序号	模型尺寸($w\times l\times h$)/mm	距离/m
A	300×200×500	1.0
B	300×200×500	1.5
C	600×200×500	1.5
D	300×200×500	2.0
G1	Ground Gauge	0.6
G2	Ground Gauge	1.0

2 数值模拟方法

基于 OpenFOAM®框架和 blastFoam 库进行数值模拟[30-32]，使用有限体积法对空气中爆炸冲击波传播问题进行离散求解。Euler 形式 N-S 控制方程为：

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

其中 ρ 为密度，$\mathbf{u}=[u\ v\ w]^{\mathrm{T}}$ 为三维速度场，p 为压力，e 为比内能，$\mathbf{I}$ 为单位矩阵。数值模拟中空气采用理想气体状态方程：

$$p=(\gamma-1)\rho e\,, \tag{2}$$

其中 γ 为绝热指数，ρ 为空气密度，e 为空气比内能。本文中空气材料参数取值为 ρ=1.225 kg/m^3，$\gamma=1.4$，大气压 p_0=101.3 kPa，空气温度 T_0=288 K。炸药状态方程采用 3 阶 Birch-Murnaghan 方程描

录用稿件，非最终出版稿

述：

$$p = p_{\mathrm{ref}} + \frac{3}{2}K_0\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{7/3} - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{5/3}\right]\left\{1 + \frac{3}{4}\left(K_0' - 4\right)\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{2/3} - 1\right]\right\}, \tag{3}$$

其中 p_{ref} 和 ρ_0 分别为参考压强和密度，K_0 和 K_0' 分别为零压下体积模量及其导数。炸药爆轰产物采用 JWL 状态方程描述：

$$p = A\left(1 - \frac{\omega\rho}{R_1\rho_0}\right)\mathrm{e}^{-\frac{R_1\rho_0}{\rho}} + B\left(1 - \frac{\omega\rho}{R_2\rho_0}\right)\mathrm{e}^{-\frac{R_2\rho_0}{\rho}} + \omega\frac{\rho}{\rho_0}e_0 , \tag{4}$$

其中 p 为产物压力，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，上式三项分别主导状态方程在高、中、低压力时状态。计算中各参数取 p_{ref}=101.3kPa，ρ_0=1601 kg/m^3，A=371.21 GPa，B=3.23 GPa，R_1=4.15，R_2=0.95，ω=0.3，此外设单位体积内能 e_0=9 GPa，爆速 D=7850 m/s。计算中通量格式选取 Tadmor 方法，时间积分使用 2 阶 Runge-Kutta 格式。

冲击波波阵面是空气状态发生剧烈变化的强间断面，因此计算求解冲击波问题时捕捉波阵面的单元网格尺寸大小对计算精度具有明显影响。一般而言单元网格尺寸越小，计算精度越高，但会造成计算耗时大幅增加。为兼顾计算精度与效率，确定合理单元尺寸，检验计算结果可靠性，选取不同尺寸单元网格进行敏感性分析。对球形炸药爆炸冲击波在空气自由场传播场景进行模拟，参考上述实验设炸药半径为 22.5 mm，计算爆心距 0.5 m 至 1.5 m 范围内冲击波特征参数。

图 2 为最小单元网格尺寸分别为 5 mm、10 mm、20 mm 和 40 mm 时，计算得到冲击波超压峰值及正压冲量与爆心距的关系，图 2(a)显示减小网格尺寸后超压峰值增大，但是在爆心距大于 0.8 m 后，5 mm 相对 10 mm 尺寸网格超压峰值提升不明显；图 2(b)显示冲击波冲量对网格尺寸不敏感。由于下述计算均求解三维模型，进一步缩小网格尺寸对精度提升较小，但是会大幅增加计算时间，因此综合分析选取 10 mm 网格尺寸可以兼顾计算精度与效率。

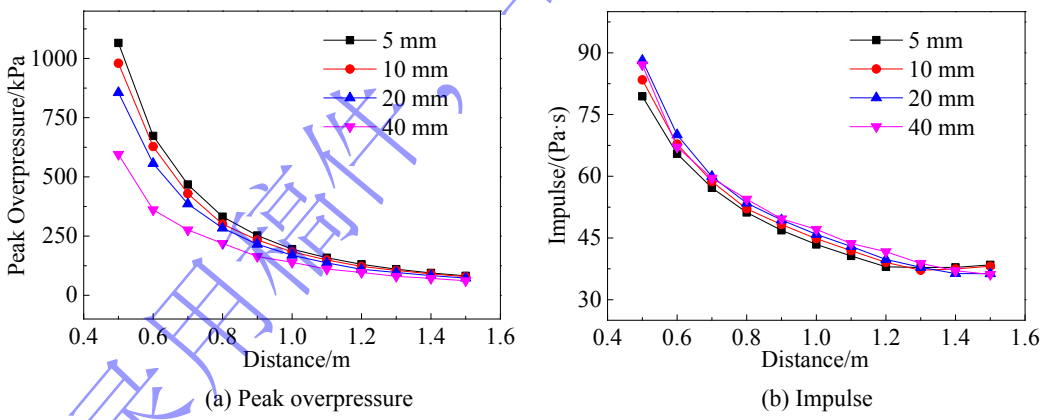


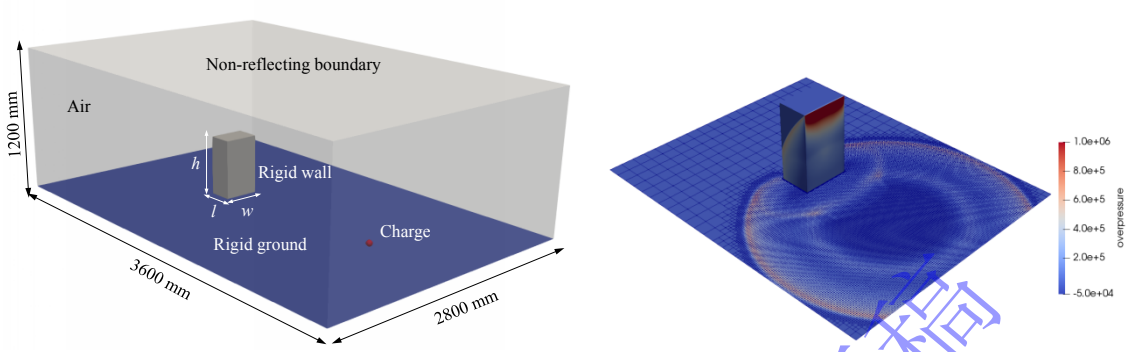
图 2 不同网格尺寸下冲击波参数

Fig. 2 The blast wave parameters under different mesh sizes

实验工况中不同建筑模型正交排列，爆炸冲击波在到达建筑模型表面及侧边后发生反射，随后作用在其他建筑表面。根据建筑模型爆心距、相互之间距离及冲击波波速分析可知，反射波作用在建筑模型表面时，该位置入射波已到达负压区，不影响对冲击波峰值及波形特征进行分析，因此可将实验工况简化为爆炸冲击波对单个建筑模型相互作用过程。使用数值方法对触地爆冲击波与单个建筑相互作用传播过程进行模拟，参照上述实验参数，球形炸药半径设为 22.5 mm 且与地面相切放置，建筑尺寸和爆心距按照表 1 设置，模型构型如图 3(a)所示。模拟中对空气域及建筑模型进行三维建模，空气域边界条件设为无反射边界条件，地面和建筑模型均使用刚体描述，冲击波在地面和建筑表面发生反射，并按图 1 表述在相应位置设置冲击波特征参数测点。为充分消除无反射边界条件影响，在建筑模

录用稿件，非最终出版稿

型附近预留充分空间，求解空气域大小设为 2800 mm×3600 mm×1200 mm。数值模拟中使用自适应网格加密技术，对波阵面等间断面附近压力变化梯度较大位置进行网格加密。如图 3(b)所示，加密前空气域网格为 8cm，对冲击波压力变化区域网格加密 3 次，最小网格为 1cm。



(a) Numerical model (b) Diagram of propagation of blast wave

图 3 球形炸药触地爆冲击波传播数值模型

Fig. 3 Numerical model of propagation of blast wave generated by spherical charge on ground

3 结果与讨论

3.1 实验与模拟结果

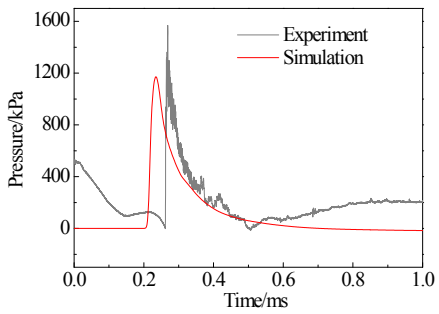
使用数值模拟方法对触地爆建筑表面冲击波载荷分布问题进行研究，并结合实验数据验证数值结果置信度。图 4 展示了所有测点压力时间历程实验与数值结果对比。实验中使用电探针法确定爆炸零时，因此实验曲线横轴的时间零点均为炸药起爆瞬间的真实零时。数值模拟结果不仅可以较为准确描述冲击波压力峰值，还能重现迎爆面压力峰值细节及背爆面测点压力二次峰值变化过程。

图 4(a)(b)分别为地面 G1、G2 测点压力时间历程。本次实验中使用压力传感器型号为 Endevco 压阻式压力传感器，此前已有学者通过实验研究发现[33-35]，部分硅压阻传感器对爆炸光敏感，距离爆源近的压阻传感器受到爆炸强光照射后会产生明显的电信号，爆心距越近闪光响应输出越大，且输出电信号有正有负，严重影响冲击波流场测试结果。文献中分析压阻传感器产生光干扰的影响可能来自两方面原因，其一为传感器内应变计元件及其支撑结构热膨胀系数有差别，强光照射引起的温度变化将导致膜片发生变形，从而输出电压信号；其二为硅材料吸收强光电磁能量后会改变自身电子结构，也会引起电压输出。G1 测点爆心距仅 0.6 m，起爆瞬间被火球覆盖，产生一个负向的干扰信号，此后光电信号与压力信号叠加，曲线能够反映冲击波到来瞬间第一个压力峰值大小，后续的变化过程不能体现真实测点压力情况。图 4(a)显示 G1 测点曲线出现了明显的光干扰现象，图中已将冲击波到达测点时的信号突变位置调整为纵轴零点。当曲线达到压力峰值后迅速衰减，降低至零后又出现反常的上升过程，这都是爆炸强光导致的光干扰信号。G2 测点爆心距 1.0 m，没有受到强光干扰，图 4(b)曲线显示冲击波压力到达峰值后以指数形式衰减，在经历短暂负压后恢复为零。数值结果不考虑实验中光信号扰动影响，得到典型指数衰减形式的冲击波压力历程。

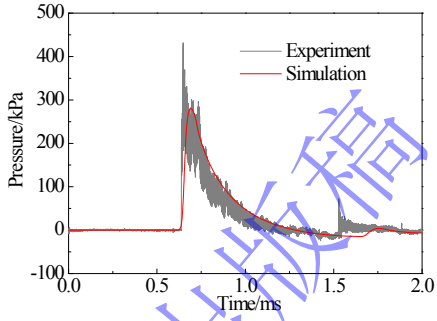
图 4(c)(e)(g)(i)分别为不同爆心距及尺寸建筑模型迎爆面测点的压力时间历程。A1 测点与爆心投影距离 1.0 m，且正对爆心，同样受到强光影响产生明显光干扰信号，图 4(c)中已将冲击波到达瞬间的压力值调整为纵轴零点。B1 与 C1 测点与爆心投影距离同为 1.5 m，二者到时几乎一致，峰值接近，冲击波压力达到峰值后近似以指数形式衰减至负压。零时约 3 ms 之后，由于爆炸产物到达，二者曲线出现小幅跃升，最后逐渐衰减至零。从图中看出，C1 测点冲击波正压作用时间明显大于 B1 测点，因此冲量也大于 B1 测点。D1 测点与爆心投影距离 2.0 m，测点冲击波压力到时最晚，压力峰值最小，压力时间曲线也呈现出指数衰减特征。对比数值模拟结果，可发现迎爆面测点压力在冲击波到达峰值

录用稿件，非最终出版稿

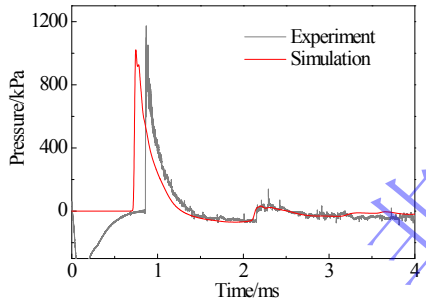
之后，会紧接着产生二次峰值。以 B1 测点为例，对实验结果做 FFT 低通滤波处理，结果在图 4(e)中显示。经过滤除高频噪声信号的实验曲线展示了更丰富的压力变化细节，证实了数值结果出现压力二次峰值的真实性。分析可知，地面上药球爆炸后产生半球面状冲击波向外传播，建筑模型表面冲击波压力测点位于地面以上，因此冲击波以一定角度在压力测点位置发生反射。由于实验中建筑模型爆心距分别为 1.0 m、1.5 m 与 2.0 m，压力测点位于迎爆面几何中心位置，距离地面高度 0.25 m，测点处冲击波入射角远小于马赫反射临界角，冲击波在压力测点位置发生正规反射，因此产生两个压力峰值。



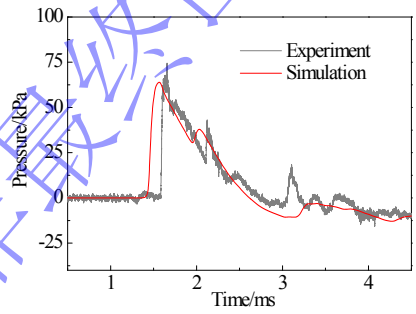
(a) Gauge G1



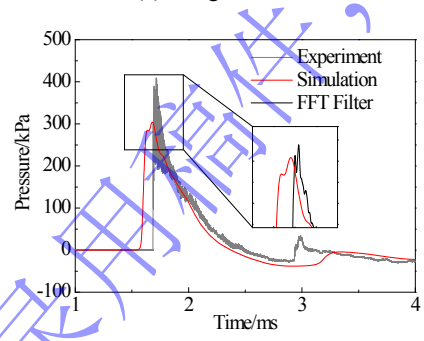
(b) Gauge G2



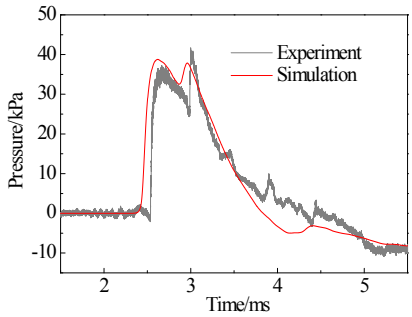
(c) Gauge A1



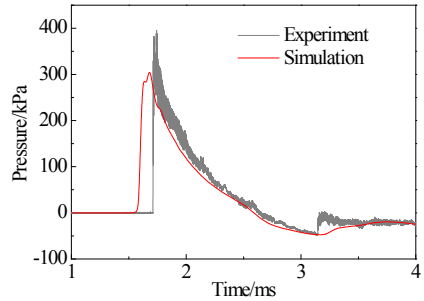
(d) Gauge A2



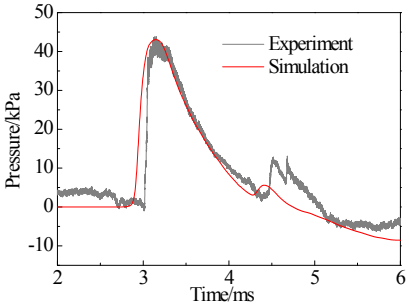
(e) Gauge B1



(f) Gauge B2

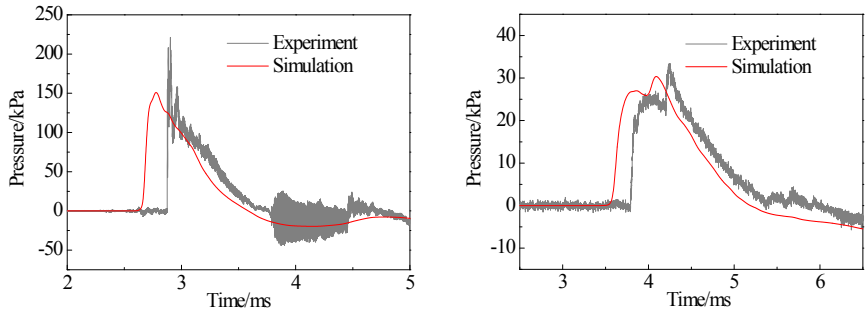


(g) Gauge C1



(h) Gauge C2

录用稿件，非最终出版稿



(i) Gauge D1　　(j) Gauge D2

图 4 各测点冲击波压力-时间曲线实验测量与数值模拟结果

Fig. 4 The experimental and numerical overpressure-time curves at gauges points

图 4(d)(f)(h)(j)分别为不同爆心距及尺寸建筑模型背爆面测点压力时间历程。实验结果显示 A2、B2 和 D2 测点压力曲线均在 0.6 ms 内出现相邻两个大小接近的峰值，而 600 mm 宽度模型背爆面 C2 测点在压力峰值 1.5 ms 后出现二次峰值，且明显小于第一个峰值，数值方法也重现了上述结果。此外，B2 与 C2 测点所在模型爆心距相同均为 1.5 m，但是二者冲击波到时相差约 0.5 ms，反映建筑模型尺寸对冲击波到时具有明显影响。

从图 4 中可以看出，模拟结果的冲击波到时相比实验略小，这可能是由于数值模拟中对实验所用 T/R 炸药的参数设置有偏差导致的，但这不影响数值模拟的整体有效性。表 2 总结了实验结果和数值模拟得到冲击波特征参数的定量对比，包含冲击波到时 t_a、正压作用时间 t_d、冲击波压力峰值 p_m、正压冲量 I，其中实验数据均为经过低通滤波处理后的结果。表 2 显示除个别测点外，t_a、t_d、p_m 和 I 的实验与模拟结果的相对误差分别在 3%、10%、10%和 20%之内，t_a、t_d、p_m 和 I 的相对误差平均值分别约为 8%、17%、10%和 17%。由于爆炸冲击波与建筑相互作用过程问题的复杂性，上述误差在可接受范围内，因此认为数值方法能够较好反映实验结果，尤其是模拟结果能够重现冲击波在建筑位置发生反射绕射过程，助于深入分析三维条件下建筑表面冲击波载荷分布。

表 2 各测点冲击波参数实验与模拟结果定量对比

Table 2 Quantitative comparison of blast wave parameters at pressure gauges

序号	到时 t_a/ms		误差/%	正压时间 t_d/ms		误差/%	压力峰值 p_m/kPa		误差/%	正压冲量 I/(Pa·s)		误差/%
	实验	模拟		实验	模拟		实验	模拟		实验	模拟	
A1	0.86	0.72	-16.3	0.54	0.57	5.56	978.1	1021	4.39	146.5	183.6	25.3
A2	1.59	1.44	-9.43	1.14	1.18	3.51	72.97	63.92	-12.4	30.65	37.00	20.7
B1	1.69	1.59	-5.92	0.80	0.78	-2.50	319.1	304.1	-4.70	86.24	100.0	16.0
B2	2.54	2.44	-3.94	1.78	1.40	-21.3	35.38	32.24	-8.88	29.54	32.28	9.28
C1	1.71	1.59	-7.02	0.93	1.00	7.53	363.2	304.1	-16.3	102.7	114.9	11.9
C2	3.13	2.91	-7.03	2.03	1.84	-9.36	41.56	43.06	3.61	32.17	31.78	-1.21
D1	2.88	2.66	-7.64	0.88	0.92	4.55	197.5	150.9	-23.6	50.88	63.48	24.8
D2	3.80	3.59	-5.53	1.57	1.60	1.91	24.66	27.00	9.49	25.37	26.42	4.14
G1	0.26	0.21	-19.2	0.24	0.49	104	1299	1172	-9.78	84.05	109.4	30.2
G2	0.64	0.64	0.00	0.59	0.64	8.47	297.4	280.2	-5.78	47.53	56.74	19.4

为直观展示实验统计数据，图 5(a)给出了实验测得冲击波到时 t_a 与爆心距 d 之间的关系，每个图标附近的标注代表对应的压力测点编号，其中方块代表迎爆面测点，圆点代表背爆面测点，三角形代表地面测点。针对压力测点不同位置，分别对迎爆面、背爆面和地面测点冲击波到时数据在双对数坐

录用稿件，非最终出版稿

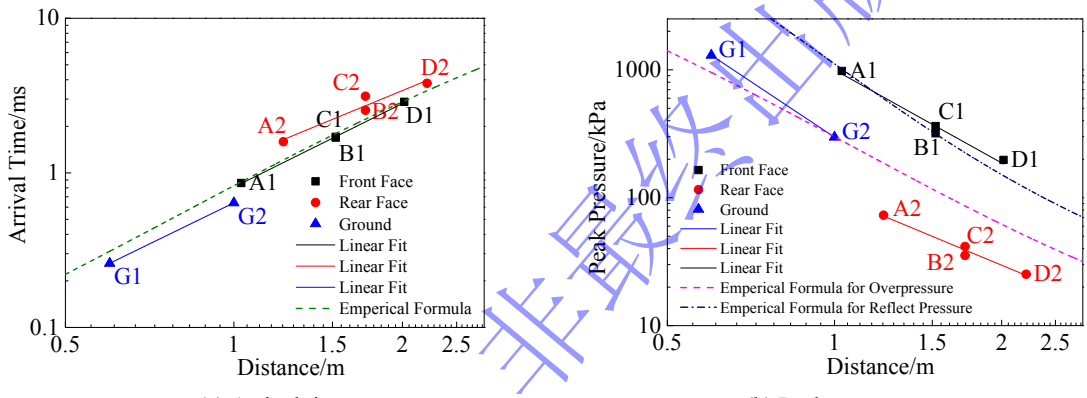
标下进行线性拟合，如图中 3 条实线所示。根据 Kinney 等的经验公式[5]，爆炸冲击波自由场传播下超压 P 经验公式为：

$$P/P_0=\frac{808\left[1+(Z/4.5)^2\right]}{\sqrt{1+(Z/0.048)^2}\sqrt{1+(Z/0.32)^2}\sqrt{1+(Z/1.35)^2}}, \tag{5}$$

其中 P_0 为环境压力，$Z = d/W^{1/3}$ 为比距离，d 为爆心距，W 为爆炸当量。冲击波到时 t_a 与冲击波马赫数 M_x 以及冲击波未到达区域声速 c 相关，爆心距 r 处的冲击波到时可以表示为积分形式：

$$t_a=(1/c)\int_{r_c}^{r}(1/M_x)dr=\frac{1}{c}\int_{r_c}^{r}\left[\frac{1}{1+(6P/7P_0)}\right]^{1/2}dr, \tag{6}$$

其中 r_c 为炸药半径。在本实验中，由于 100 g TNT 当量炸药球水平放置在钢板上，近似认为爆炸能量全部被钢板反射，将其爆炸效果视作 2 倍药量爆炸冲击波在自由场传播。此外环境压力取 101.3 kPa，声速取 340 m/s，炸药球半径 23 mm，容易计算得到冲击波到时与距离的关系，如图 5(a)中虚线所示。



(a) Arrival time (b) Peak pressure

图 5 冲击波参数与距离关系

Fig. 5 The relationship between blast wave parameters and distance

图 5(b)给出了冲击波压力峰值与爆心距 d 之间的关系，与上述相同，不同符号分别代表不同位置测点，并分别对迎爆面、背爆面及地面测点的压力峰值数据在双对数坐标下进行线性拟合，用实线表示。同样地，图 5(b)中用虚线标识公式(5)给出的冲击波超压经验公式值，考虑到冲击波在建筑表面发生反射，压力传感器测量得到的是冲击波反射压，用点划线标识冲击波发生正反射的经验值，其中反射压 P_r 与入射超压 P 的关系为：

$$P_r=P\left[1+\frac{7}{6P_0/(P_0+P)+1}\right]. \tag{7}$$

从图 5(a)中看出冲击波到时与爆心距在双对数坐标下基本成正比关系，到时随爆心距增大而增大，但是不同位置测点到时并不在同一条直线上。通过比较发现，迎爆面冲击波到时实测值与冲击波自由场传播经验值吻合；背爆面冲击波到时明显大于该经验值，原因为相比于自由场传播，冲击波绕射至建筑模型背爆面需要花费更多时间，且 C2 测点到时略高于 B2 测点，说明建筑物越宽，绕射至背爆面中心位置所需时间更长。图 5(a)还显示两个地面测点 G1 与 G2 到时均略低于自由场经验值，分析认为使用公式(5)计算冲击波超压时，将触地爆炸近似等效为当量翻倍的自由场爆炸。这种等效方法能够很好近似半球形炸药触地爆炸时冲击波传播流场，但是本实验使用球形炸药中心起爆，爆心相对地面有一定高度，因此中心起爆后向下传播的冲击波会在地面发生反射，导致地面附近沿水平方向传播的冲击波压力略高于在其他方向上传播的冲击波压力，尤其在爆心距较小时差距更为明显，当爆距

录用稿件，非最终出版稿

增大后各方向冲击波趋于相同。同样地，图 5(b)中 G1 测点压力高于公式(5)中经验值，而 G2 测点压力与经验值接近。由于冲击波压力越高，波速越快，因此图 5(a)中地面测点冲击波到时低于经验值。

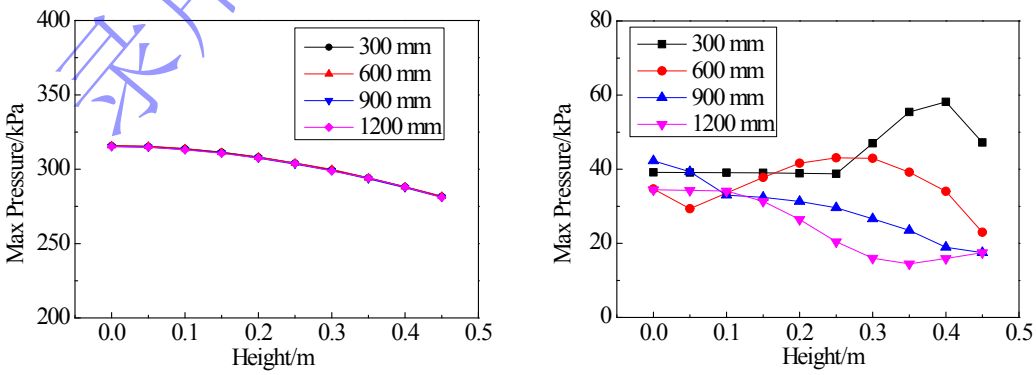
图 5(b)显示冲击波压力峰值与爆心距在双对数坐标下近似成反比关系，压力峰值随爆心距增大而减小，且不同位置测点的压力呈现出明显区别。迎爆面测点受到冲击波反射压作用，测点压力值与反射压经验值近似；地面测点传感器敏感面平行于冲击波传播方向，测量得到的是冲击波超压数据，结果显示测量值略高于超压经验值，为球形炸药球触地中心起爆导致；背爆面由于建筑阻碍冲击波传播作用，压力明显低于超压经验值。

3.2 建筑表面载荷分布及历程

通过精细化缩比实验获取了不同爆心距下不同尺寸建筑模型迎爆面和背爆面中心位置的冲击波压力历程，并验证了数值模拟结果的有效性。为获取更为丰富冲击波载荷数据，研究建筑表面载荷分布和历程，本节使用数值模拟方法进行研究。按照实验构型设定爆心距为 1.5 m，分别计算 100 g TNT 当量球形炸药触地爆炸产生冲击波对不同宽度建筑模型的载荷。数值模拟中建筑迎爆面正对爆心，建筑模型高度统一为 500 mm，沿冲击波传播方向厚度为 200 mm，分别计算模型宽度为 300 mm、600 mm、900mm 以及 1200 mm 时冲击波传播过程。为记录冲击波压力和冲量分布和历程，在建筑迎爆面和背爆面垂直中线位置布设一列测点，测点从地面开始，高度间隔为 5 mm，即在每个建筑模型迎爆面和背爆面各布置 10 个测点。

图 6(a)展示了冲击波传播过程中，建筑物迎爆面不同高度处最大超压分布。结果显示迎爆面最大超压出现在建筑和地面相接位置，随着高度增加，最大超压呈现单调降低变化，在建筑顶部达到最小。整体来看迎爆面压力最小值约为最大值的 90%，压力分布较均匀。此外迎爆面最大超压仅与测点所在位置相关，与建筑宽度无关，不同建筑宽度下各高度测点最大超压值差距较小。

当冲击波波阵面传播到建筑迎爆面之后，经过建筑侧面绕射到达建筑物背爆面。一般而言，建筑越宽对冲击波的衰减作用越强，其背爆面冲击波压力应该更低。然而实验结果图 5(b)及表 2 显示位于宽度为 600 mm 模型背面中心位置的 C2 测点压力峰值相比 300 mm 宽度模型背爆面 B2 测点的压力峰值更高，下面使用数值模拟方法对该现象进行分析。图 6(b)为数值模拟得到建筑物背爆面不同高度处最大冲击波压力分布，显示建筑物宽度对背爆面最大超压分布具有明显影响，且最大超压随着高度增高产生非单调的复杂变化。当建筑宽度为 300 mm 时，背爆面最大超压在高度较低处近似一致，高度大于 0.25 m 后，随着高度增高最大超压增大并在 0.4 m 位置达到最大值，高度进一步增大后最大超压减小；建筑宽度为 600 mm 时，最大超压在约 0.3 m 高度出现最大值，随着高度增大最大超压逐渐减小；建筑宽度为 900 mm 和 1200 mm 时，最大超压在地面附近达到最大值，且都随着高度增大而减小。图 6(b)显示不同宽度建筑表面冲击波超压沿高度方向分布特征不同，由绕射冲击波在背爆面的相互作用引起，与建筑尺寸与爆心距相关，将在后文介绍。

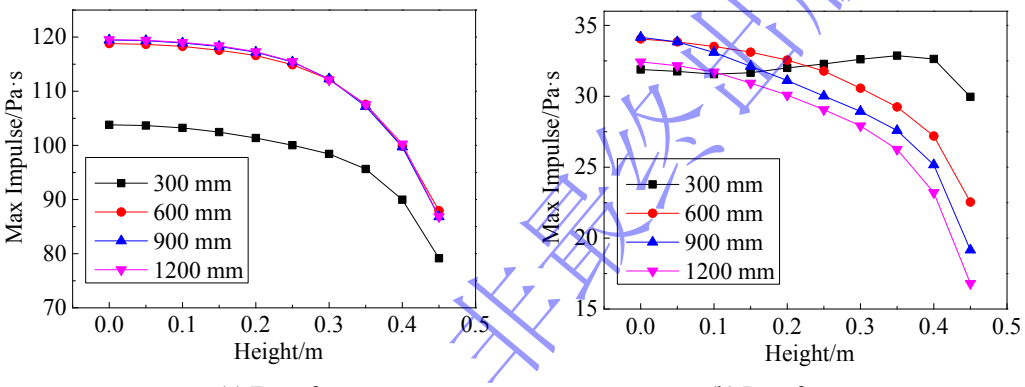


(a) Front face (b) Rear face

图 6 建筑物表面不同高度处冲击波最大超压

Fig. 6 The max overpressure at different heights of building surfaces

图 7 给出了数值模拟得到的冲击波传播过程中，建筑物迎爆面及背爆面垂直中线上不同高度处最大冲量分布。对迎爆面而言，最大冲量出现在建筑底部，随高度增加而减小，在建筑顶部冲量最小。当建筑宽度由 300 mm 增大至 600 mm 时，冲击波与迎爆面相互作用时间增加，冲量明显增大，当宽度继续增大时冲量保持不变。背爆面冲量明显小于迎爆面，建筑宽度为 300 mm 时冲量分布较均匀，当宽度大于 600 mm 后，最大冲量出现在建筑底部，且同时随建筑宽度和高度的增加而减小，在建筑顶部冲量最小。图 7 显示建筑物宽度为 300 mm 时，冲量沿高度方向分布特征与其他宽度不同，这是由边缘向中心传播的稀疏波导致的。当冲击波到达建筑迎爆面表面后向两侧传播，在建筑边缘处发生绕射的同时，稀疏波从边缘处向迎爆面中间传播，迎爆面反射压力也随稀疏波到达而降低。由于稀疏波传播速度近似为声速 c，因此当建筑宽度为 l=300 mm 时，稀疏波从边缘到达中间的时间约为 $t_s=l/(2c)\approx0.44$ ms，当建筑宽度为 600 mm 时，$t_s\approx0.88$ ms。表 2 显示当爆心距为 1.5m 时，宽度 300 mm 和 600 mm 建筑表面冲击波压力正压作用时间分别约为 0.80 ms 和 0.93 ms。因此宽度 300mm 建筑表面中心位置冲击波压力受稀疏波影响而降低，正压冲量显著减小。而对 600 mm 及以上宽度建筑而言，稀疏波到达迎爆面中心位置时，反射压力已基本到达负压区，稀疏波不会影响迎爆面中心位置的正压冲量大小，从而呈现出图 7 中正压冲量随建筑宽度变化的差异。



(a) Front face (b) Rear face

图 7 建筑物表面不同高度处冲击波最大冲量

Fig. 7 The max impulse at different heights of building surfaces

图 6 讨论了建筑物迎爆面及背爆面垂直中线上测点的最大超压随高度变化趋势，其中背爆面最大超压与高度关系较为复杂。为了更直观了解背爆面最大超压分布，图 8 绘制了不同宽度建筑背爆面最大超压分布云图，图中黄点标识出了各背爆面最大超压位置，图中还包含了建筑宽度无限大的情况。从图中看出，背爆面最大超压关于垂直中线呈左右对称分布。随建筑宽度增加，最大超压出现位置 h_m 由高到低逐渐降低，最大超压值总体呈现降低趋势，建筑物宽度无限大后，最大超压在顶部和底部较高，中间位置较低。由图 8 可知，背爆面最大超压分布可以分为三类区域：顶部边角处产生的对称锥形区域、背爆面中心位置区域以及底部中心位置区域。随着建筑物宽度增加，顶部锥形区域变化较小，其他两类区域变化较大。

录用稿件，非最终出版稿

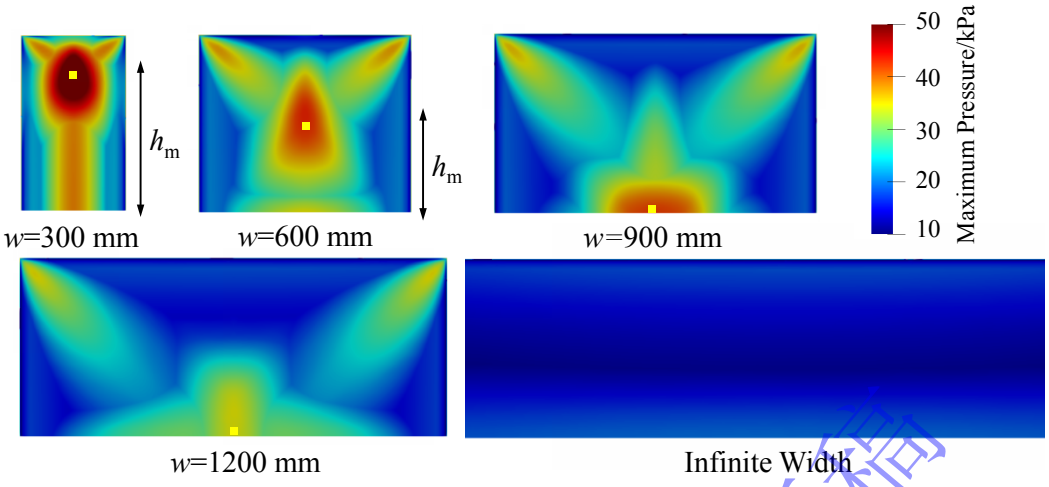


图 8 不同宽度建筑背爆面最大超压分布云图

Fig. 8 The distribution map of max overpressure on rear face of building with different width

为理解建筑背爆面最大超压复杂分布的成因，选取 900 mm 宽建筑为例，给出冲击波在背爆面传播过程的压力云图快照，如图 9 所示，其中(a)、(b)、(c)分别为起爆后 3.0 ms、3.5 ms 以及 4.5 ms 时刻压力分布。图中用黄线标识冲击波波阵面，爆炸产生的球形冲击波传播到达背爆面后分别从顶部及两侧产生三个冲击波，从顶部边界绕射的波 1 自上而下传播，从两侧边界绕射的波 2 及波 3 分别向中间传播。图 9(a)重现了图 8 中顶部两侧出现最大超压分布区域的过程，波 1 与波 2、波 1 与波 3 分别在顶部两侧交汇，冲击波强度增强，形成局部的压力较高区域；随着冲击波继续在背爆面传播，其强度降低，冲击波汇聚形成的局部区域在建筑顶部两侧顶点位置压力最大，且离边界越远压力越小，最终形成图 8 中的分布。由于冲击波正对建筑物传播，因此冲击波在建筑物背爆面的载荷呈对称分布。图 9(b)显示波 2 和波 3 继续向两侧传播，在背爆面中线位置相交，产生局部压力较高区域，同时波 1 即将到达地面，与地面反射后冲击波强度增强，将在地面附近产生局部压力较高区域。图 9(c)展示了波 2 和波 3 强度持续衰减，而波 1 在地面反射后不仅产生了压力较高区域，还产生了一个自下而上传播的波 4，波 4 向上传播至顶部后离开建筑背爆面，至此背爆面的冲击波传播过程结束。

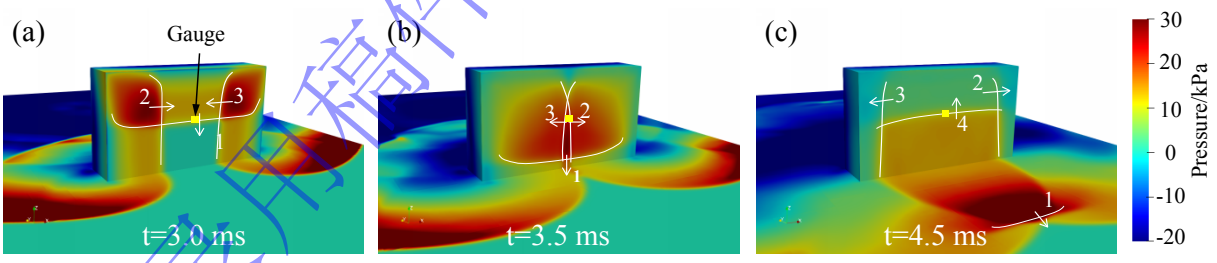


图 9 不同时刻建筑背爆面压力分布云图

Fig. 9 The distribution map of blast pressure on rear face of building at different times

进一步地，在建筑背爆面中心位置设置压力测点，监测冲击波传播过程测点压力时程变化，如图 10 所示。图中蓝线为 900 mm 宽建筑的情况，圆圈中 A、B、C 表示的压力峰值分别对应图 9 中的 3 个时刻。蓝线第一个压力峰值对应图 9(a)中波 1 掠过中心测点，该冲击波强度较小，压力峰值较低；第二个压力峰值对应波 2 与波 3 在中心位置汇聚，冲击波强度增强，压力峰值较高；第三个峰值为地面反射波 4 向上传播经过中心测点产生，压力峰值略高于第一个峰值。图 9 与图 10 中蓝线完整展示了宽度为 900 mm，高度 500 mm 建筑模型背爆面冲击波传播历程，重现了顶部及两侧面的绕射冲击波在背爆面的传播及相互作用关系，揭示了压力时间历程曲线中三个峰值的产生过程。

图 10 中其他建筑宽度情况下压力历程曲线的分析方法与之类似，但是由于三维建筑尺寸的不同，

录用稿件，非最终出版稿

不同冲击波相互作用的时序将发生变化。将图 10 中由两侧面传来的波 2 与波 3 汇聚产生峰值的时间区域定义为Ⅰ区，由顶部传来的波 1 产生峰值的时间区域定义为Ⅱ区，由地面反射波 4 产生峰值的时间区域定义为Ⅲ区。当建筑宽度为 300 mm 时，由于建筑较窄，两侧面传来的波 2 与波 3 首先在中心位置汇聚，在Ⅰ区产生第一个压力峰值，随后当波 1 向下传播到中心位置后在Ⅱ区产生第二个压力峰值，在Ⅲ区出现地面反射波 4 产生的峰值。当建筑宽度为 600 mm 时，波 1、波 2 与波 3 几乎同时到达背爆面中心位置，因此测点压力在Ⅱ区和Ⅰ区交界区产生一个较大的峰值，该峰值包含了 3 个波共同的贡献，随后压力迅速下降，在Ⅲ区出现地面反射波 4 产生的较小峰值。当建筑宽度大于 600 mm 后，顶部冲击波总是首先到达中心测点位置，因此压力曲线均在Ⅱ区内产生第一个峰值，且压力峰值相同；随后两侧冲击波在中心位置汇聚，在Ⅰ区产生第二个峰值，且随着宽度增大峰值减小；最后在Ⅲ区内产生地面反射波导致的第三个峰值。当建筑宽度无限大时，冲击波不会从建筑两侧绕射至背爆面，其仅受顶部波 1 与反射波 4 的作用，因此压力曲线仅有两个峰值。

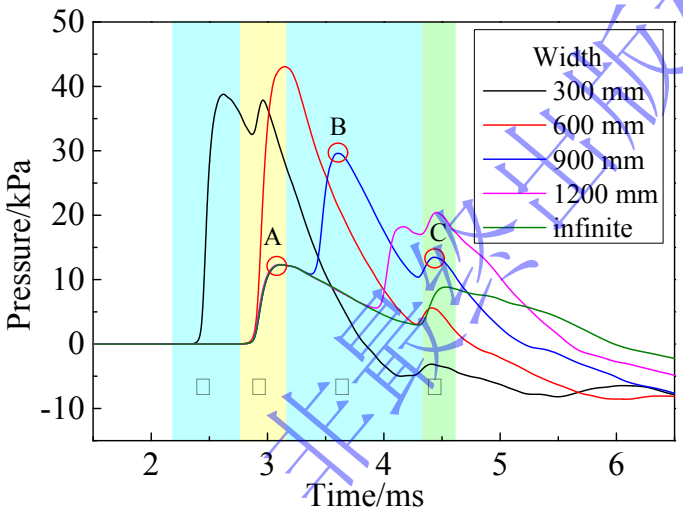


图 10 不同宽度建筑背爆面中心位置测点压力时程曲线

Fig. 10 The overpressure-time curves at center gauges on rear face of building with different width

回顾实验结果图 4(e)(g)及表 2，实验中在背爆面中心位置布置测点，测量结果显示 300 mm 宽建筑背爆面 B2 测点压力曲线出现两个相邻的峰值，对应图 10 中黑线，而 600 mm 宽建筑背爆面 C2 测点压力曲线也出现两个峰值，但是间隔时间较长，且第二个峰值较小，对应图 10 中红线。此外实验测得 B2 测点压力峰值为 35.38 kPa，C2 测点压力峰值为 41.56 kPa，相对更宽建筑的背爆面在部分区域的压力峰值更大，这是绕射冲击波传播至建筑背爆面后相互作用时序导致的，与建筑的三维尺寸相关。当建筑宽度为 600 mm 时，背爆面的 3 个波近似在中心位置汇聚，因此测得压力峰值最大。对于其他宽度的建筑背爆面，通过分析背爆面绕射波传播过程，即可近似确定背爆面上最大超压峰值出现的高度及对应最大超压。

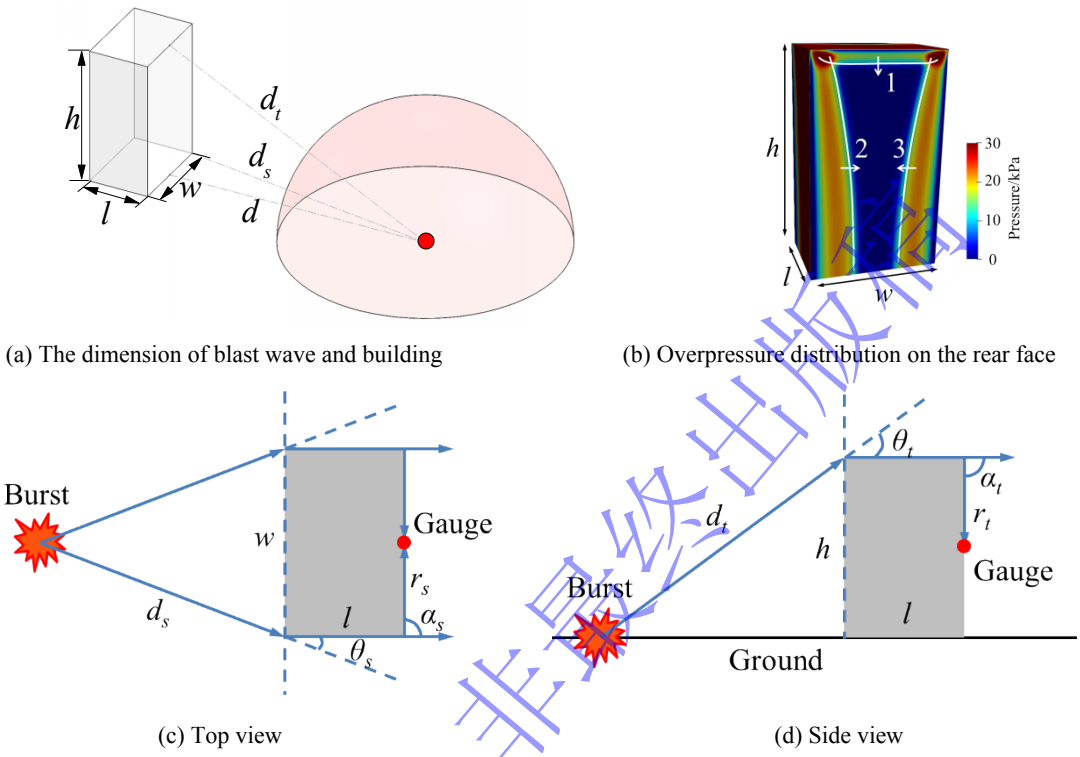
3.3 建筑背爆面最大超压载荷

如图 11 所示，假设爆炸源触地且正对建筑迎爆面放置，记爆心距为 d，建筑宽度为 w，高度为 h，沿冲击波传播方向长度为 l，背爆面最大峰值出现的高度为 h_m。炸药起爆后冲击波以球形波阵面向外传播，首先到达建筑物迎爆面，经绕射后传播至建筑背爆面。首先考虑爆心距无穷大的情况，此时到达建筑物表面的冲击波简化为平面波，冲击波同时到达背爆面的顶边和侧边。对平面波而言，背爆面上各冲击波波速一致，即图 11(b)中 3 个波同时以相同速度向背爆面中心移动，因此最大超压高度为 3 波交汇位置，与建筑几何相关，可以表示为

录用稿件，非最终出版稿

$$h_{\mathrm{m}}=\begin{cases} h\left(1-w/2h\right) & w\le 2h \\ 0 & w>2h \end{cases}. \tag{8}$$

当 $w>2h$ 之后，从顶边由上向下传播的波 1 将首先与地面反射，因此最大超压峰值总是出现在地面附近，即 $h_{\mathrm{m}}=0$。



(a) The dimension of blast wave and building (b) Overpressure distribution on the rear face

(c) Top view (d) Side view

图 11 触地爆冲击波绕射传播示意图

Fig. 11 The Schematic diagrams of surface blast wave diffraction

实际上当爆心距为有限距离时，球形波阵面使得背爆面上各冲击波不再同时到达，因此最大超压高度 h_{m} 无法用式(8)简单表达。如图 11(a)，记爆心和建筑物迎爆面侧边和顶边的距离分别为 d_{s} 和 d_{t}，即

$$d_{\mathrm{s}}=\sqrt{d^2+\left(w/2\right)^2}\,,\quad d_{\mathrm{t}}=\sqrt{d^2+h^2}\,, \tag{9}$$

冲击波到达迎爆面各边后发生绕射，沿着建筑厚度方向继续传播，当冲击波到达建筑背爆面时再次发生绕射。如图 11(c)(d)所示，当冲击波发生两次绕射后，根据几何关系，顶部冲击波和侧边冲击波经绕射后在背爆面测点位置的等效近似传播距离分别为[36]：

$$R_{\mathrm{t}}=\left(d_{\mathrm{t}}+l+r_{\mathrm{t}}\right)\left(1+\sin\theta_{\mathrm{t}}\right)\left(1+\sin\alpha_{\mathrm{t}}\right), \tag{10}$$

$$R_{\mathrm{s}}=\left(d_{\mathrm{s}}+l+r_{\mathrm{s}}\right)\left(1+\sin\theta_{\mathrm{s}}\right)\left(1+\sin\alpha_{\mathrm{s}}\right), \tag{11}$$

因此在测点位置的绕射冲击波强度可用式(5)分别近似表示为

$$P_{\mathrm{t}}=\frac{808P_0\left[1+\left(Z_{\mathrm{t}}/4.5\right)^2\right]}{\sqrt{1+\left(Z_{\mathrm{t}}/0.048\right)^2}\sqrt{1+\left(Z_{\mathrm{t}}/0.32\right)^2}\sqrt{1+\left(Z_{\mathrm{t}}/1.35\right)^2}}\,, \tag{12}$$

录用稿件，非最终出版稿

$$P_s=\frac{808P_0\left[1+\left(Z_s/4.5\right)^2\right]}{\sqrt{1+\left(Z_s/0.048\right)^2}\sqrt{1+\left(Z_s/0.32\right)^2}\sqrt{1+\left(Z_s/1.35\right)^2}}, \tag{13}$$

其中 P_0 为环境压力，$Z_t = d_t/W^{1/3}$, $Z_s = d_s/W^{1/3}$ 分别为等效比距离，W 为炸药当量，同时根据式(6)可以计算得到绕射冲击波在测点位置的到时。

绕射冲击波在背爆面上传播过程如图 11(b)所示，顶部冲击波向下传播，侧边冲击波在背爆面上近似以圆弧形状向中间传播，由几何关系可知因此背爆面上 3 波交汇位置高度 h_m 满足

$$h=h_{\mathrm{m}}+r_{\mathrm{t}}, \tag{14}$$

$$h_{\mathrm{m}}^2+\left(d_{\mathrm{s}}+l+w/2\right)^2=\left(d_{\mathrm{s}}+l+r_{\mathrm{s}}\right)^2. \tag{15}$$

联立式(5)及式(9)-(15)，可利用数值方法求得背爆面最大超压载荷高度 h_{m}。此处假设声速 c 固定为 340 m/s，所有长度变量使用炸药当量作归一化处理，即 $\tilde{h}=h/W^{1/3}$，$\tilde{w}=w/\tilde{h}$，$\tilde{l}=l/\tilde{h}$，$\tilde{d}=d/\tilde{h}$，则 $\tilde{h}_{\mathrm{m}}=\tilde{h}_{\mathrm{m}}\left(\tilde{h},\tilde{w},\tilde{l},\tilde{d}\right)$，其中 h, w, l 为建筑物几何参数，d 为爆心距，W 为爆炸当量。计算得到三波交汇位置后，可根据空气冲击波特征参数关系式(16)(17)以及 LAMB 非线性叠加法则[36]式(18)-式(20)求解该位置处冲击波强度 P_{m}，其中空气参数取 γ=1.4。

$$\frac{\rho}{\rho_0}=\frac{2\gamma+(\gamma+1)(\Delta P/P_0)}{2\gamma+(\gamma-1)(\Delta P/P_0)}=\frac{7+6\Delta P/P_0}{7+\Delta P/P_0}, \tag{16}$$

$$u=\frac{C_0\Delta P}{\gamma P_0}\left(1+\frac{(\gamma+1)\Delta P}{2\gamma P_0}\right)^{-1/2}=\frac{5C_0\Delta P}{7P_0}\left(1+\frac{6\Delta P}{7P_0}\right)^{-1/2}, \tag{17}$$

$$\bar{\rho}=\rho_0+\sum_{i=1}^{N}\Delta\rho_i, \tag{18}$$

$$\vec{u}=\left(1/\bar{\rho}\right)\sum_{i=1}^{N}\rho_i\vec{u}_i, \tag{19}$$

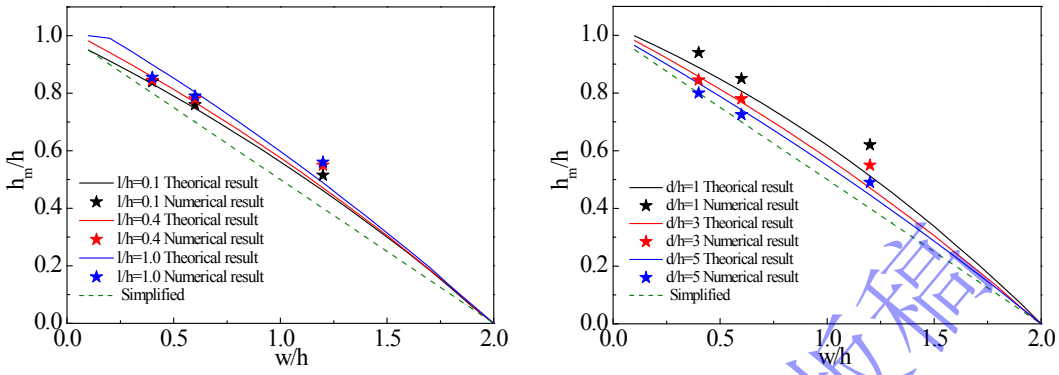
$$P=P_0+\sum_{i=1}^{N}\Delta P_i+1.2\left(\frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{N}\rho_i\left|\vec{u}_i\right|^2\right)-\frac{1}{2}\bar{\rho}\left|\bar{u}\right|^2\right). \tag{20}$$

首先考察不同建筑尺寸 l 和爆心距 d 情况下，最大超压高度 h_{m} 与建筑宽度 w 的关系。为了与实验测量和模拟算例对应，取 h=0.5 m，爆炸当量 W=0.1 kg，此处以高度 h 做归一化。图 12(a)展示了不同建筑尺寸 l/h 下 h_{m}/h 与 w/h 的关系，其中公式(8)的简化结果用虚线表示。结果显示，背爆面最大超压位置随建筑宽度增加而减小，即建筑宽度越大，最大超压出现的位置越低。当建筑相对宽度 w/h 接近 0 时，h_{m}/h 近似为 1，说明建筑很窄时背爆面最大超压总是出现在建筑顶部；当 w/h=2 时均有 h_{m}=0，即当建筑宽度大于 2 倍高度后，背爆面最大超压总是出现在底部，理论公式计算得到曲线趋势与式(8)中简化结果一致。此外相同建筑宽度 w/h 下，建筑尺寸 l/h 越小，背爆面最大超压高度越小，曲线越接近简化结果，即建筑尺寸相对冲击波波阵面半径越小，顶边冲击波和侧边冲击波到达背爆面时间差越小，与式(8)简化结果越接近。图 12(a)中散点为相应工况下数值仿真结果，不同颜色代表不同 l/h，仿真结果随 l/h 和 w/h 的变化趋势与理论分析结果一致，且吻合程度良好。

图 12(b)给出了不同爆心距 d/h 下背爆面最大超压高度 h_{m}/h 与建筑宽度 w/h 的关系，同样地，公式(8)的简化结果用虚线表示。结果显示在不同爆心距 d/h 下 h_{m}/h 均随着 w/h 增大而减小，与前述趋

录用稿件，非最终出版稿

势一致。随着爆心距 d/h 增大，最大高度 h_m/h 减小，说明爆心距增大后，加载在建筑表面的冲击波与平面波更接近，当 d/h 无限大时，理论计算得到曲线退化为图中虚线的简化结果，建筑表面受到平面波加载。图 12(b)中散点同样为相应工况下的数值仿真结果，不同颜色代表不同 d/h，仿真结果随 d/h 和 w/h 的变化趋势与理论分析结果一致，且数值吻合较好。

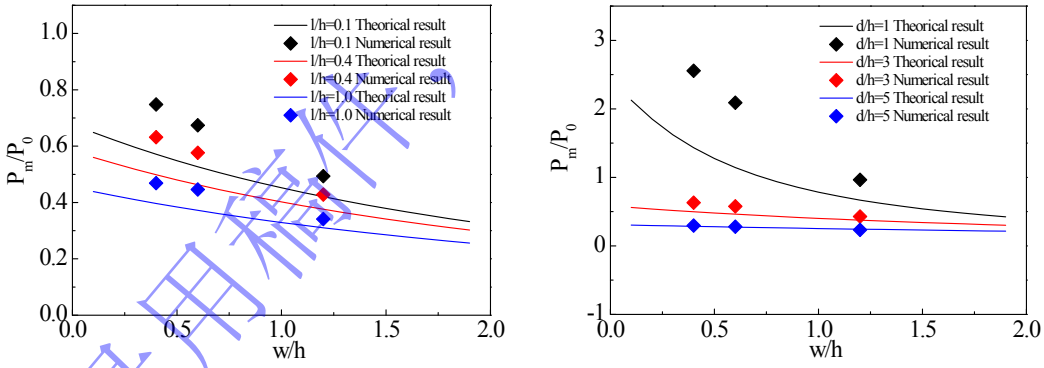


(a) Building size (b) Distance of burst

图 12 建筑背爆面最大超压位置与宽度的关系

Fig. 12 The relationship between the max overpressure location on rear face and the building width

根据计算得到的背爆面最大超压出现位置和冲击波非线性 LAMB 叠加法则，图 13 展示了不同建筑尺寸 l/h 及爆心距 d/h 下背爆面最大超压 P_m/P_0 随建筑宽度 w/h 变化的关系。图 13(a)显示随建筑宽度 w/h 增加，背爆面最大超压 P_m/P_0 降低，且建筑尺寸 l/h 越大， P_m/P_0 越低，说明建筑尺寸越大，总体上对冲击波遮蔽效果越强。图 13(b)同样显示 P_m/P_0 随建筑宽度 w/h 增大而减小，且当爆心距 d/h 增大后，建筑宽度对 P_m/P_0 的影响降低。与上述相似，图中的散点代表相应条件下的数值仿真结果，其趋势与理论分析结果一致，数值略高于理论分析结果，误差可能是公式(10)(11)中等效传播距离近似过程中引入的。



(a) Building size (b) Distance of burst

图 13 建筑背爆面最大超压与宽度的关系

Fig. 13 The relationship between the max overpressure on rear face and the building width

需要说明的是，本文实验与数值模型中建筑物均被假定为刚体，真实建筑结构在冲击波作用下将发生不同程度的破坏。当建筑发生构件等局部损伤时，一方面由于建筑内部墙体等影响，冲击波难以直接穿透建筑作用至背爆面，另一方面建筑构件损伤响应在时间尺度上明显大于冲击波绕射至背爆面所用时间，因此建筑背爆面冲击波载荷可以用本文所用刚体假设进行研究。当建筑受到强冲击波载荷发生完全倒塌等整体级响应时，此时已无必要研究其背爆面冲击波载荷，刚体假设不再适用。

录用稿件，非最终出版稿

4 结 论

针对触地爆下建筑表面冲击波载荷分布规律开展了系统研究，利用精细化缩比实验获取了建筑表面冲击波压力曲线，分析了不同建筑表面冲击波到时、压力峰值、正压冲量等载荷特征参数的分布规律，捕捉了不同测点压力曲线变化特征，并利用实验数据对冲击波传播数值仿真方法进行校核；随后通过高置信度数值仿真模拟对冲击波与建筑表面相互作用进行系统研究，重点分析了建筑背爆面不同冲击波传播及作用历程，得到了其压力分布云图；最后利用理论分析方法对背爆面冲击波压力分布进行量化分析，讨论了不同参量对背爆面压力分布的非线性影响关系，并与仿真结果进行相互验证。本文结果突破了工程算法中关于建筑表面平均载荷处理的局限，得到了建筑表面冲击波载荷随空间分布的情况，并考虑了爆炸产生球面冲击波的影响，具体结论如下：

(1)触地爆下建筑迎爆面载荷分布较均匀，最大冲击波载荷位于建筑底部；

(2)建筑背爆面载荷主要集中在顶角两侧及中轴线区域，由顶边和侧边绕射冲击波叠加形成；

(3)建筑背爆面最大超压出现在不同绕射冲击波交汇位置，其位置和大小受建筑尺寸和爆心距影响；

(4)建筑尺寸越大，背爆面最大超压位置越低，最大超压峰值越小，当建筑宽度超过 2 倍高度后，最大超压总是出现在背爆面中心底部位置；爆心距越大，背爆面最大超压位置越低且接近简化解，最大超压越小，当爆心距大于 3 倍建筑高度后，背爆面最大超压基本不受建筑尺寸影响；

(5)基于绕射冲击波时程分析方法和冲击波叠加法则，得到了触地爆下建筑背爆面冲击波载荷分布模型，可用于建筑爆炸破坏分析及抗爆设计。

参考文献：

[1] TAYLOR G. The formation of a blast wave by a very intense explosion. I. Theoretical discussion[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1950, 201(1065):159-174. **DOI**: 10.1098/rspa.1950.0049.

[2] SEDOV L. Propagation of strong shock waves[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1946(10):241-250.

[3] BRODE H L. Numerical solutions of spherical blast waves[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(6). **DOI**: 10.1063/1.1722085.

[4] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1979. **DOI**: 10.1115/1.3153619.

[5] KINNEY G F, GRAHAM K J. Explosive shocks in air[M]. Berlin: Springer, 1985. **DOI**: 10.1007/978-3-642-86682-1.

[6] SADOVSKIY M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data [M]. Moscow, Russia: Nauka Press, 1952: 6–10.

[7] US Department of Defense. UFC 3-340-02 Structures to resist the effects of accidental explosions[S]. Washington: The US Department of Defense, 2008.

[8] FEMA. FEMA 426: Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings. Risk management series[R]. Federal Emergency Management Agency-General, 2003.

[9] HAO H, HAO Y, LI J, et al. Review of the current practices in blast-resistant analysis and design of concrete structures[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(8): 1193-1223. **DOI**: 10.1177/1369433216656430.

[10] ULLAH A, AHMAD F, JANG H, et al. Review of analytical and empirical estimations for incident blast pressure[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(6): 2211-2225. **DOI**: 10.1007/s12205-016-1386-4.

录用稿件，非最终出版稿

[11] 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.

[12] REMENNIKOV A M, MENDIS P A. Prediction of airblast loads in complex environments using artificial neural networks[C]//International Conference on Structures Under Shock and Impact. 2006. **DOI**:10.2495/su060271.

[13] 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.

[14] CODINA R H, AMBROSINI D, BORBÓN F D. Numerical Study of Confined Explosions in Urban Environments[J]. International Journal of Protective Structures, 2013, 4(4): 591-618. **DOI**:10.1260/2041-4196.4.4.591.

[15] 都浩, 李忠献, 郝洪. 建筑物外部爆炸超压荷载的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007,8(5): 6. **DOI**: 10.7666/j.issn.1009-3443.20070502.
DU H, LI X Z, HAO H. Numerical simulation on blast overpressure loading outside buildings[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007,8(5): 6. **DOI**: 10.7666/j.issn.1009-3443.20070502.

[16] 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. **DOI**: 10.3969/j.issn.1008-3421.2011.05.007.
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. **DOI**: 10.3969/j.issn.1008-3421.2011.05.007.

[17] 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. **DOI**: CNKI:SUN:SYLX.0.2008-02-010.
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. **DOI**: CNKI:SUN:SYLX.0.2008-02-010.

[18] 王仲琦, 宁建国, 赵衡阳, 等. 挡墙对远场爆炸效应影响的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 87-91. **DOI**: 10.3321/j.issn:1001-1455.2000.01.016.
WANG Z Q, NING J G, ZHAO H Y, et al. Numerical Simulation on 2D Explosion Field with the Protective Wall[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(1): 87-91. **DOI**: 10.3321/j.issn:1001-1455.2000.01.016.

[19] SOCHET I, EVEILLARD S, VINÇONT J Y, et al. Influence of the geometry of protective barriers on the propagation of shock waves[J]. Shock Waves, 2017, 27(2): 209-219. **DOI**:.1007/s00193-016-0625-4.

[20] ZHOU X Q, HAO H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(5): 363-375. **DOI**: 10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003.

[21] SUNG S H, CHONG J W. A fast-running method for blast load prediction shielding by a protective barrier[J]. Defence Technology, 2020, 16(2): 308-315. **DOI**: 10.1016/j.dt.2019.07.011.

[22] HÁJEK R, FOGLAR M. The reduction of peak overpressure using concrete blast barriers[J]. Structures Under Shock and Impact XIII, 2014. **DOI**: 10.2495/SUSI140231.

[23] TRÉLAT S, SOCHET I, AUTRUSSON B, et al. Strong explosion near a parallelepipedic structure[J]. Shock Waves, 2007, 16(4-5): 349-357. **DOI**:10.1007/s00193-006-0069-3.

[24] GEBBEKEN N, DÖGE T. Explosion protection-Architectural design, urban planning and landscape planning[J]. International Journal of Protective Structures, 2010, 1(1): 1-22. **DOI**: 10.1260/2041-4196.1.1.1.

[25] GAJEWSKI T, SIELICKI P W. Experimental study of blast loading behind a building corner[J]. Shock Waves, 2020, 30(72): 385-394. **DOI**: 10.1007/s00193-020-00936-1

[26] 汪维, 刘光昆, 赵强, 等. 近爆作用下方形板表面爆炸载荷分布函数研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天

录用稿件，非最终出版稿

文学, 2020, 50(2): 024615. **DOI**: 10.1360/SSPMA-2019-0188.

WANG W, LIU G K, ZHAO Q, et al. Study on load distributing function of square slab surface under close-in blast loading[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(2): 024615. **DOI**: 10.1360/SSPMA-2019-0188.

[27] 喻君, 刘福余, 方秦. 近场近地爆炸下建筑柱爆炸荷载分布规律及简化模型[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(1): 015201. **DOI**: 10.11883/bzycj-2022-0366.

YU J, LIU F, FANG Q. Distribution pattern and simplified model of blast load for building columns under near-field near-ground explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(1): 015201. **DOI**: 10.11883/bzycj-2022-0366.

[28] 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.

[29] HANSEN O R, HINZE P, ENGEL D, et al. Using computational fluid dynamics (CFD) for blast wave predictions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(6): 885-906. **DOI**: 10.1016/j.jlp.2010.07.005.

[30] 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.

[31] SHYUE K M. 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.

[32] 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: 166-220. **DOI**: 10.1017/jfm.2015.728.

[33] 赵亚梅. 某微型压力传感器瞬态光效应的实验与数据处理方法研究[D]. 中北大学, 2007.

[34] 杜红棉, 祖静, 张志杰. 压阻传感器8530B闪光响应规律研究[J]. 测试技术学报, 2011, 25(1): 78-81. **DOI**: 10.3969/j.issn.1671-7449.2011.01.014.

DU H M, ZU J, ZHANG Z J. Research on photoflash response of piezoresistive transducers 8503B [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2011, 25(1): 78–81. **DOI**: 10.3969/j.issn.1671-7449.2011.01.014.

[35] 张健中, 杜红棉, 韩青林, 等. 压阻式压力传感器光干扰消除实验及测试[J]. 仪表技术与传感器, 2014(1): 14-15, 18. **DOI**: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.01.005.

ZHANG J Z, DU H M, HAN Q L, et al. Experiment and test of photoflash response elimination for piezoresistive pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(1): 14-15, 18. **DOI**: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.01.005.

[36] NEEDHAM C E. Blast Waves[M]. Second Edition. Berlin: Springer, 2018. **DOI**: 10.1007/978-3-319-65382-2.

录用稿件，非最终出版稿