

基于正向射线追踪的框架建筑内爆冲击波多房间传播快速计算方法*

李勃翰¹, 朱亚智¹

(1. 同济大学土木工程学院建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 提出了一种基于正向射线追踪的多房间建筑内爆冲击波传播简化算法, 旨在快速预测冲击波在砌体填充墙分隔建筑中的传播过程, 实现建筑物毁伤范围的准确预测。算法从爆源出发向空间发射射线束, 通过对冲击波球面进行三角形分割生成均匀射线束, 模拟冲击波的直射与反射过程, 并采用时间步进法追踪射线在房间内的传播路径及与墙面的相互作用。针对填充墙对冲击波传播的阻断作用, 采用离散化网格模型将墙体划分为规则排列的砌块单元, 并基于砌块单元粘结失效准则和墙体整体失效准则, 在各时间步判定墙体的开洞破坏状态。当砌块单元达到失效条件时, 射线可穿透该区域进入相邻房间, 实现对多房间连续传播的模拟。通过单房间及多房间工况的试验及有限元模拟对比验证, 模型在墙面中心超压时程和房间破坏范围等关键指标上吻合良好, 验证了其在建筑内爆荷载快速评估中的有效性。模型仅适用于砌体填充墙分隔的框架结构建筑内爆场景, 对于包含剪力墙等刚性墙体的情况, 需进一步修正。

关键词: 建筑内爆; 多房间; 路径追踪; 正向射线

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

A simplified model for internal blast wave propagation in multi-room structures based on forward ray-tracing

LI Bohan¹, ZHU Yazhi¹

(1. Department of Structural Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A simplified algorithm for internal blast wave propagation in multi-room buildings was developed based on forward ray tracing, aiming to rapidly predict the propagation range of blast waves in buildings partitioned by masonry infill walls. The algorithm emitted ray bundles from the explosion source into space and generated uniformly distributed rays by performing triangulation on the spherical blast wavefront, ensuring that the ray density adequately represented the energy distribution of the incident wave. The algorithm simulated both the direct propagation of blast waves and their reflection off wall surfaces, and employed a time-stepping method to track the propagation paths of each ray within rooms and their interactions with wall boundaries. To address the blocking effect of infill walls on blast wave propagation, the walls were discretized into regularly arranged masonry units using a grid model with dimensions consistent with the actual masonry units. Based on the bond failure criterion of individual masonry units and the overall shear failure criterion of the wall, the opening state of the wall was determined at each time step; when a masonry unit reached the failure condition, it was removed from the grid, allowing rays to penetrate through the damaged region into adjacent rooms, thus enabling the simulation of continuous blast propagation across multiple rooms. The proposed model was validated through comprehensive comparisons with experimental data and finite element

*收稿日期: 2026-07-27; 修回日期: 2026-10-09;

基金项目: 国家自然科学基金 (52378179);

第一作者: 李勃翰 (1997-), 男, 硕士, 博士生. E-mail: bohan_li@tongji.edu.cn;

通信作者: 朱亚智 (1987-), 男, 博士, 副教授. E-mail: yzzhu@tongji.edu.cn.

simulations under both single-room and multi-room configurations, focusing on key metrics including wall surface overpressure time histories and overall damage ranges. Good agreement is achieved across all test cases, confirming the model's capability in rapid assessment of internal blast loads in buildings. It should be noted that the model is specifically developed for buildings partitioned by masonry infill walls; for scenarios involving rigid walls or structural components with openings such as doors and windows, the current formulation requires further refinement and additional treatment of diffraction effects.

Keywords: internal blast; multi-room building; path tracing; forward ray

近年来,恐怖袭击和意外爆炸等事件增多,对建筑结构的抗爆设计提出了更高的要求。建筑内爆炸荷载的准确计算是合理预测破坏范围的前提。冲击波在建筑内部的传播受构件分隔影响,尤其砌体填充墙的存在使得传播范围的判定更为复杂^[1]。传统精细数值模拟虽结果可靠,但计算耗时,尤其在应急响应等场景中,难以满足快速评估需求^[2]。因此,有必要研究建筑内爆冲击波传播模型,建立适用于多房间建筑的快速算法,在保证计算精度的前提下提升求解效率。

当前,对于复杂建筑空间内爆炸荷载的研究主要是采用缩尺试验和精细化有限元模拟等方法。Julien 等^[3]、Sochet 等^[4]和 Ruscade^[5]等通过一系列内爆炸缩尺试验研究了复杂空间布局、门洞位置及形状对爆炸波传播与荷载的影响,提出了相应的爆炸荷载简化计算方法。郭志昆等^[6]通过多次内爆炸试验研究了混凝土结构的荷载分布规律及隔墙的影响。胡洋等^[7]和张晓伟等^[8]在试验的基础上,对密闭空间内三硝基甲苯(trinitrotoluene, TNT)爆炸效应开展了数值模拟分析。

除试验和有限元精细仿真分析外,还有一些学者针对结构爆炸冲击荷载分布的快速计算方法开展了研究。杨亚东等^[9]用镜像爆源结合非线性叠加原理描述内爆炸的多波耦合效应,建立了长方体密闭结构内爆炸冲击波传播与叠加理论模型。马涛^[10]采用基于逆向路径追踪的虚拟爆源法模拟爆炸冲击波的直射、反射及绕射过程。陈鑫等^[11]通过引入修正系数函数对粗网格有限元分析结果进行修正,实现了爆炸荷载的快速计算。另外一些研究通过引入衰减公式的方法以考虑冲击波在建筑物内部因构件阻隔导致的压力峰值衰减。刘盛^[12]开展了框架建筑中横向和竖向空间内爆炸冲击波的传播衰减规律研究,并建立了爆炸荷载沿两个方向的衰减公式。郭玉斌等^[13]基于数值模拟的结果拟合得到了从起爆房间向外泄露的空气冲击波压力峰值衰减公式。何翔等^[14]依据试验结果,通过量纲分析的方法建立了泄漏冲击波超压峰值及冲击波超压折减系数的工程算法。

现有针对建筑结构内部复杂空间爆炸冲击波荷载的试验研究和有限元仿真能够较为准确地表征冲击波传播及其与结构构件之间的相互作用,但通常具有试验复杂和计算成本高等特点,难以满足工程场景下快速分析与评估的需求。另一方面,既有的快速算法多依赖经验公式或试验数据拟合,其适用范围受限于特定空间构型和爆炸工况,且难以有效考虑围护构件动态破坏与冲击波传播之间的耦合作用。

针对上述问题,本文基于正向路径追踪思想,聚焦爆炸源所在楼层内冲击波在多房间空间中的传播过程,提出一种适用于框架结构建筑物内爆场景的多房间冲击波快速分析框架。首先,建立爆炸荷载粒子的生成、传播及荷载计算流程;在此基础上,提出冲击波与砌体填充墙之间的耦合处理方法,包括墙体离散化、局部失效判定以及粒子的透射与反射机制;进一步构建面向多房间场景的冲击波传播简化计算框架,并采用单房间和多房间工况下的试验结果及数值模拟结果对所提方法进行验证。

与现有射线追踪类快速方法通常将墙体理想化为固定刚性边界不同,本文方法进一步考虑了砌体填充墙动态破坏对冲击波传播过程的实时影响。具体而言,通过时间步进方式计算墙面反射超压,并结合砌块失效准则识别填充墙局部破坏及开洞过程,据此动态更新冲击波粒子的反射与透射条件,从而实现传播路径随墙体损伤演化而变化的近似描述。基于该机制,所提出方法可为多房间框架建筑内爆作用下的快速毁伤评估提供冲击荷载输入。

需要说明的是,本文方法主要面向由砌体填充墙分隔的框架建筑内部爆炸场景,其当前建模框架尚未显式考虑冲击波与梁、柱等主体承重构件之间的相互作用;同时,对于爆炸当量较大并导致楼板

发生显著破坏、空间拓扑关系明显改变的工况，现有简化假定可能不再适用。因此，此类场景仍需进一步引入梁柱遮挡、楼板破坏及跨楼层传播等机制，以拓展方法的适用范围。

1 基于正向射线追踪的建筑物内爆冲击波传播基本方法

射线追踪法源于几何光学理论，其核心思想是通过追踪波的传播路径来模拟波在复杂环境中的传播行为^[9,15-17]。射线追踪算法包含两种主要实现形式，即逆向射线追踪和正向射线追踪，如图 1 所示。逆向射线追踪算法从测点出发，通过反向搜索追踪所有可能到达测点的路径，仅考虑对目标测点有贡献的路径，因而计算效率较高。但该算法在处理复杂几何环境下的多次反射与绕射时，递归搜索成本显著增加。正向射线追踪算法从波源向空间发射射线，模拟波的自然传播过程，算法直观且实现简单，适用于全局场分布分析，能方便地处理多路径效应。对于建筑内爆炸冲击波传播问题，正向算法从爆源发射射线，能直观模拟波在三维空间中的全局传播过程；同时，建筑内部构件众多，冲击波与构件间存在耦合效应，正向算法通过实时追踪射线与构件的相互作用，可判定射线在构件表面的反射或穿透破坏后的构件，能较好地处理这类问题。因此，对于建筑内爆炸冲击波传播这类需全局分析且环境复杂的物理问题，正向射线追踪算法是更合适的选择。

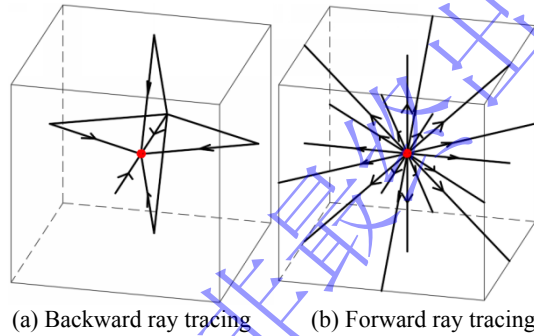


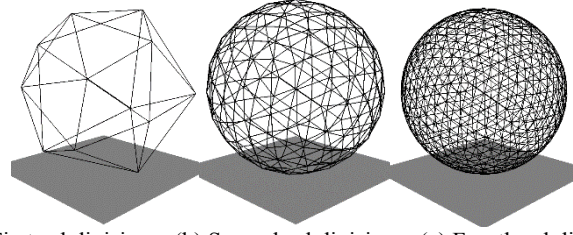
图 1 逆向和正向射线追踪法示意图
Fig. 1 Illustration of backward and forward ray-tracing methods

1.1 射线的生成

爆炸产生的冲击波在无障碍物的情况下波阵面为一球面，因此射线束末端在与墙面接触之前应均匀分布在一球面中。本文将球面用三角形进行近似，首先采用正二十面体对球面进行第一次分割，随后采用等边三角形对多面体进行逐次细分，每一次细分将大三角形划分为四个三角形，而三角形顶点始终保持在球面上。以四次细分为例（图 2），球面最终由 $20 \times 4 \times 4 \times 4 = 1280$ 个相同的等边三角形近似拟合。从爆源（球心）指向每一三角形重心的方向即为每一束射线的初始方向，每条射线即可看作是与之对应三角形的法线。

为便于理解，将射线看作空间中的“粒子”运动后形成的轨迹，粒子与上述三角形重心的重合。粒子的初始方向与射线方向一致，粒子的初始速度在第 1.2 节中给出，与爆源当量有关。此外，每个粒子都有波阵面上的某一三角形与之一一对应。三角形的面积即为该粒子的影响范围。在无障碍物的情况下，波阵面的半径会随冲击波的传播逐渐增大，三角形的尺寸也应随着冲击波的传播逐渐增大。为量化三角形面积的大小，记三角形重心至顶点的距离为 s （初始值为 s_0 ），初始三角形重心至爆源（球心）的距离为 r_0 ，粒子运动距离为 d ，则 s 与距离 d 的关系有：

$$s(d) = \frac{r_0 + d}{r_0} s_0 \quad (1)$$



(a) First subdivision (b) Second subdivision (c) Fourth subdivision

图 2 波阵球面的三角形逼近过程示意图

Fig. 2 Illustration of remeshing of wave spherical surface

射线密度由波阵球面的三角形细分次数控制。细分次数过少时，粒子退出计算时对应三角形尺寸偏大，墙面荷载分辨率不足，难以满足砌块单元失效判定需求；过多则计算量显著增加。本文综合考虑精度与效率选取四次细分。此时射线密度已满足分辨率要求，继续增加细分次数对计算结果影响有限。

1.2 射线的传播速度

本文采用迭代方法计算所有粒子在任意时间的位置及速度，记时间步长为 Δt ，则第 i 时间步粒子前进的距离 Δd_i 为^[18]：

$$\Delta d = D_i \Delta t = M_i c \Delta t \quad (2)$$

式中： D_i 为粒子速度； c 为声速； M_i 为马赫数，表示为：

$$M_i = \sqrt{1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \frac{\Delta p}{p_0}} \quad (3)$$

式中： γ 为空气绝热指数，对于理想气体 $\gamma=1.4$ ； p_0 为大气压强； Δp 为波前超压，可采用以下经验公式计算^[19]：

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{14.0717}{Z} + \frac{5.5397}{Z^2} - \frac{0.3572}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} & (0.05 \leq Z \leq 0.3) \\ \frac{6.1938}{Z} - \frac{0.3262}{Z^2} + \frac{2.1324}{Z^3} & (0.3 \leq Z \leq 1) \\ \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} & (1 \leq Z \leq 10) \\ \frac{0.84}{Z} + \frac{2.7}{Z^2} + \frac{7}{Z^3} & (Z > 10) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $Z=d/Q^{1/3}$ 为比例距离（单位为 $\text{m/kg}^{1/3}$ ）； Q 为炸药 TNT 当量（单位为 kg ）； Δp 单位为 kgf/cm^2 。

粒子距爆源的距离 d 有：

$$d = r_0 + \sum \Delta d_i \quad (5)$$

利用式(2)-(5)可以得到粒子在与墙面碰撞前的每一个时间步的速度， r_0 可由式(4)中比例距离适用范围的下限值确定，进而得到粒子的初始速度 v_0 。本文时间步长取 $\Delta t = 0.05 \text{ ms}$ 。典型内爆响应过程持续数毫秒至数十毫秒，该步长约为其百分之一至千分之一，可充分捕捉冲击波传播与墙体动态破坏的主要特征。

1.3 射线粒子的影响范围及反射超压

粒子在某一时间步与障碍物接触后，该时间步下粒子的波前超压 Δp 即为入射超压。对于正反射、规则斜反射和马赫反射，其对应的反射超压为^[20]：

$$\Delta p_r = \begin{cases} 2\Delta p + \frac{6\Delta p^2}{\Delta p + 7p_0} & (\text{正反射}) \\ \left[\frac{\tan \delta + A(1 + 0.028 \tan^2 \delta)}{\tan \delta - A(0.028 + \tan^2 \delta)} \right] (\Delta p + p_0) - p_0 & (\text{斜反射}) \\ \left[\frac{0.106}{Z} + \frac{0.43}{Z^2} + \frac{1.4}{Z^3} \right] (1 + \cos \varphi) & (\text{马赫反射}) \end{cases} \quad (6)$$

式中： δ 为反射角，根据文献^[20]确定；参数 $A = (\omega - 1) \tan \varphi / (\omega + 0.028 + (1 + 0.028\omega) \tan^2 \varphi)$ ， $\omega = (\Delta p + p_0) / p_0$ ； φ 为入射角。

超压持续时间 t_d （单位为 s）为^[21]：

$$t_d = 1.35 \times 10^{-3} Q^{1/6} \sqrt{d} \quad (7)$$

式中： Q 和 d 的分别单位为 kg 和 m。

粒子在其影响范围内的超压时程有^[9]：

$$\Delta p_r(t) = \Delta p_r \left(1 - \frac{t - t_a}{t_d} \right), \quad t_a \leq t \leq t_a + t_d \quad (8)$$

式中： t_a 为粒子到达障碍物的时间； t_d 为超压持续时间。

多个粒子同时影响某一测点时需要考虑其耦合作用，其超压采用 LAMB 叠加原理^[22]进行计算：

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= \rho_0 + \sum_{i=1}^N \Delta \rho_i \\ \mathbf{v} &= \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \mathbf{v}_i}{\bar{\rho}} \\ p_r &= \sum_{i=1}^N \Delta p_{r,i} + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N 1.2 \rho_i |\mathbf{v}_i|^2 \right) - \frac{1.2 \bar{\rho} |\mathbf{v}|^2}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

式中： p_r 、 ρ 和 $\mathbf{v}$ 分别为叠加后测点处的超压、密度和速度； $\Delta p_{r,i}$ 、 ρ_i 和 $\mathbf{v}_i$ 分别为第 i 个粒子在影响范围内的超压、密度和速度。

当粒子运动方向与障碍物平面法向之间的夹角（即入射角 φ ）为 0 时，粒子发生正反射；当 $\varphi \neq 0$ 且 $\varphi \neq \pi/2$ 时，应考虑粒子的斜反射或马赫反射，其影响范围由三角形在障碍物平面上的投影确定。

若测点位于三角形内部，则计算该三角形对应粒子影响范围内的反射超压时程，并根据式(9)给出的 LAMB 准则考虑时间历程内所有影响该测点的粒子，从而得到总反射超压时程。当测点位于三角形的边界（公共边）时（图 4），上述算法会重复考虑粒子的影响，导致边界上的超压被高估，此时应对计算得到的反射超压进行折减，本文采用的折减系数为 1/2。类似地，对于测点位于三角形顶点的情况（公共顶点），本文考虑反射超压的折减系数为 1/6。

1.4 射线粒子退出判据

每一时间步均需判定粒子是否应当终止追踪并从粒子池中移除。本文设定如下退出判据，当任一射线粒子满足以下条件之一时，该粒子即被判定失效并予以删除。

1) 超压衰减至阈值以下。粒子在传播足够远后，能量已充分耗散。若粒子累积碰撞次数 $n > 2$ ，且当前超压 Δp 低于 0.1 倍环境大气压即 $0.1p_0$ ，则认为该粒子已无法对结构产生有效冲击作用，予以退出。

2) 目标物缺失。该粒子未检测到有效目标面（粒子前进方向上没有构件），此时追踪无物理意义，予以退出。

2 冲击波与砌体填充墙耦合作用的计算方法

砌体填充墙是框架结构建筑内部实现空间分隔与功能划分的主要非结构构件。在内部爆炸事件中，该类构件的动力响应与渐进失效过程，显著影响着爆炸冲击波在多室环境下的传播规律。具体而言，墙体的存在、损伤与否及其破坏模式，是造成冲击波传播路径发生切换、能量在传播过程中有效衰减以及压力波重塑的关键因素。因此，建立可精确描述填充墙失效的物理或计算模型，是实现后续房间及主体结构进行可靠荷载计算的先决条件。

2.1 墙面荷载计算

为获取整面墙体的超压荷载及建立破坏准则，需将填充墙离散为计算单元。实际错缝砌筑的墙体在面外爆炸荷载下，其破坏主要受弯曲变形和砂浆灰缝粘结剪切控制，错缝提供的面内咬合作用对响应影响甚微；且爆炸冲击下砂浆灰缝在极早期即发生退化，砌块间的互锁效应随之削弱。因此，忽略错缝几何对墙体面外响应的模拟精度影响较小。基于此，本文采用规则排列的网格状分布砌块单元，每一网格即代表一个砌块单元，网格的大小保持与砌块的大小一致，如图3所示。

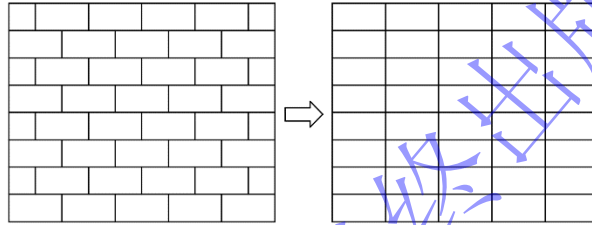


图3 砌体填充墙的理想化离散

Fig. 3 Discretization of masonry infill wall

假设在 t 时刻有若干粒子到达某砌体墙，则遍历所有到达该墙的粒子，并逐一判断粒子附近的砌块单元是否位于该粒子的影响范围内（根据砌块单元几何中心点是否位于三角形内部来判断，如图4所示）。若砌块单元位于该粒子的影响范围内，且砌块未飞出（即损伤值 $Damage=0$ ），则其超压荷载按照 1.3 节中的方法计算。砌块单元受爆面上的超压荷载统一采用该单元几何中心点处超压值。

爆炸荷载的总作用力则由所有受载砌块的反射超压峰值与其迎爆面面积的乘积之和确定。爆炸荷载作用下砌块承受的总荷载为：

$$F_s = \sum \Delta p_r S_b \quad (10)$$

式中： S_b 为单个砌块的迎爆面积。

2.2 填充墙响应计算

当墙体变形较小时，填充墙通过整体弯曲变形抵御冲击波荷载。本文采用单自由度爆炸效应设计电子表格（single-degree-of-freedom blast effects design spreadsheets, SBEDS）^[23] 理论获取砌体填充墙的峰值抗力 $q_{\max}$ 和峰值挠度 δ_m ：

$$\begin{aligned} q_{\max} &= \frac{8}{h^2} C_1 (b_w - b_f - \delta_m) \\ C_1 &= 0.85 f_m b_f \\ \delta_m &= \min \left(\frac{h}{30}, \frac{b_w}{2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中： h 为墙高； f_m 为砌体材料抗压强度； b_w 为墙厚； b_f 为受压区高度，实心砌体墙取 $b_f=0.1b_w$ ，空心砌块墙取砌块侧壁厚度； C_1 为墙体受压区合力。

若墙面等效均布超压荷载^[24]大于 $q_{\max}$ ，则整面墙均失效。需要说明的是，本文针对墙体弯曲破坏仅采用基于拱效应的简化拟静力方法进行判定，未进一步建立等效单自由度（single degree of freedom, SDOF）动力响应方程。鉴于本文所研究工况下墙体弯曲破坏并非主要控制破坏模式，采用上述简化处理能够满足本文快速评估框架的分析需求。对于需要进一步获得墙体弯曲变形及其动力响

应特征的情况,可采用完整的 SBEDS 方法或其他基于 SDOF 理论的动力分析工具进行更为精细的计算^[25]。

除整体弯曲破坏外,填充墙在爆炸荷载作用下还可能发生冲切破坏。在爆炸荷载作用下,填充墙中心区域砌块可能由于压力较高被压碎,或周边区域砌块由于砂浆砌块黏结面破坏而发生飞散。由于砌块抗压强度通常大于砂浆砌块粘结面的抗剪强度,砌体墙的冲切破坏主要由砂浆砌块界面的黏结强度决定。冲切区域边缘砂浆提供的黏结力 F_B 为:

$$F_B = \sum \sigma_v L_c b_w \quad (12)$$

式中: L_c 为单个砌块的砂浆砌块接触面长度; σ_v 为砌体沿砂浆砌块界面的抗剪强度平均值,按下式计算:

$$\sigma_v = k \sqrt{f_c} \quad (13)$$

式中: f_c 为砂浆的抗压强度,单位为 MPa; k 为与砖种类有关的系数,见《砌体结构设计规范》^[26]。

每一时间增量步开始时,遍历墙体所有砌块,筛选当前处于爆炸冲击波影响范围内、承受超压荷载的有效砌块单元。对于这些受载的砌块,还需进一步考查其相邻砌块的受力和损伤状态,从而确定应计入抗剪计算的接触面(即受剪接触面)长度 L_c ,具体判定准则如下(图4红色单元边线):

- 1) 当相邻砌块尚未飞出且不受载(上一增量步结束时砌块损伤值 $Damage=0$, $\Delta p=0$) 或该受载砌块位于填充墙边界位置时,该侧黏结面计入有效受剪接触面;
- 2) 当相邻砌块已经飞出(上一增量步结束时砌块损伤值 $Damage=1$) 或相邻砌块已受载($\Delta p>0$) 时,该侧黏结面不计入有效受剪接触面。

当砌块承受的荷载 F_S 大于黏结力 F_B 时,砌块脱离墙体发生飞散。

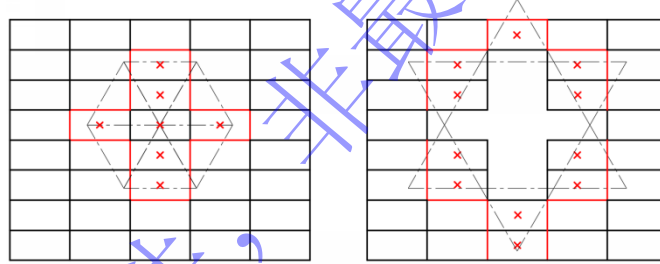


图4 受剪接触面长度的判定
Fig. 4 Determination of shear surface

填充墙采用先冲切、后弯曲的破坏判定流程。在每一时间步中,首先检查墙体是否满足冲切破坏判据。若已发生冲切破坏,则认为局部剪切失效已使墙体完整性受到破坏,因此后续计算中不再对该墙体进行整体弯曲破坏判定。对于未发生冲切破坏的墙体,则继续在各时间步内进行弯曲破坏校核。当墙体达到弯曲破坏判据时,在本文的简化计算模型中认为其整体承载能力已显著丧失,并将整面墙按完全破坏状态处理。

2.3 粒子与填充墙的耦合作用

粒子在与填充墙碰撞后可能发生两种状态: 1) 砌块飞出,部分粒子穿过填充墙,部分粒子反射; 2) 粒子接触未破坏墙面后反射。

墙体在未破坏的情况下可视为刚性壁,粒子着壁后发生反射,其反射速度大小与入射速度一致。当砌块单元在某一时间步达到破坏条件时,即墙体发生破坏的情况下,该墙体产生开洞,冲击波粒子可通过开洞穿过填充墙。为确定粒子穿过墙体后的速度,本文基于能量守恒原理建立透射速度计算模型。

入射粒子在该时间步被划分为两部分: 一部分粒子在与砌块碰撞后反射,另一部分粒子作为透射波穿过开洞区域继续传播。设入射角为 θ ,参考文献^[27]透射系数模型,透射粒子占总粒子的比例 $\eta(\theta)$ 如式(14)所示:

$$\eta(\theta) = \cos^2 \theta \quad (14)$$

根据 (14)，得到的透射系数与入射角的关系如图 5 所示：

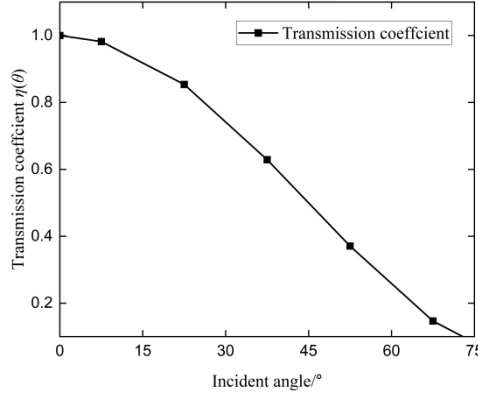


图 5 透射系数与入射角关系

Fig. 5 Transmission coefficient versus incident angle

对该时间步内在一定入射角范围内射向该墙体的每一粒子，以概率 $\eta(\theta)$ 判定其穿过，以概率 $1 - \eta(\theta)$ ，判定其反射。例如入射角在 0 到 15 度范围内的粒子，以统一 $\eta(7.5)$ 的概率判定其穿过。采用随机抽样方法在程序中实现该分配比例。

设在当前时刻 t 时间步内，共有 N 块砌块单元被判定为失效飞出，到达该墙面的粒子总数为 M 。对于入射粒子，其中第 j 个粒子的入射能量为 $E_{in,j}$ ，可通过式 (15) 确定：

$$E_{in,j} = \left(\frac{\Delta p_{in,j}}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho_{in,j} u_{in,j}^2 \right) \cdot A_{ray} \cdot D_{in,j} \cdot \Delta t_j \quad (15)$$

式中： $\Delta p_{in,j}$ 为该粒子所在位置对应的入射超压峰值； A_{ray} 为单个粒子代表的波前面积，由式 (1) 确定； $D_{in,j}$ 为该粒子的入射速度； Δt_j 为该粒子的有效作用时间； $u_{in,j}$ 为空气质点的速度，可由式 (16) 得到：

$$u_{in,j} = \frac{\Delta p_j}{\rho_0 D_{in,j}} \quad (16)$$

因此，所有 M 个粒子的总入射能量为：

$$E_{in,total} = \sum_{j=1}^M E_{in,j} \quad (17)$$

砌块单元所受的实际驱动力为反射超压，且各砌块单元所受冲击波荷载的到达时间和幅值存在差异，其飞散速度亦不相同。考虑到本文算法定位于工程快速评估，且最终开洞范围及透射能量对砌块飞散速度的个体差异不敏感，本文取所有飞出砌块具有相同的飞散速度 v_b ，由各飞出砌块所受冲量的平均值确定。单块砌块的质量为 m_b ，受荷面积为 S_b ，则飞出砌块的速度 v_b 可表示为：

$$v_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{S_b}{m_b} \int_0^{\Delta t_i} \Delta p_{r,i}(t) dt \quad (18)$$

N 块飞出砌块所消耗的总动能为：

$$E_{brick} = \frac{1}{2} N m_b v_b^2 \quad (19)$$

该飞散耗能 E_{brick} 由所有 M 个粒子按入射能量比例共同分摊，则第 j 个粒子分摊的砌块飞散耗能为：

$$E_{b,j} = E_{brick} \cdot \frac{E_{in,j}}{E_{in,total}} \quad (20)$$

对于判定为穿过或反射的第 j 个粒子，其能量为入射能量扣除分摊的飞散耗能：

$$E_{out,j} = E_{in,j} - E_{b,j} = E_{in,j} \left(1 - \frac{E_{brick}}{E_{in,total}} \right) = \alpha E_{in,j} \quad (21)$$

若该粒子被判定为穿过，则 $E_{out,j}$ 为其透射能量，粒子沿入射方向继续传播；若被判定为反射，则 $E_{out,j}$ 为其反射剩余能量，粒子沿反射方向继续传播。设粒子与墙体作用后的速度为 $D_{out,j}$ ，剩余能量 E_{out} 可表示为：

$$E_{out,j} = \left(\frac{\Delta p_{out,j}}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho_{out,j} u_{out,j}^2 \right) \cdot A_{ray} \cdot D_{out,j} \cdot \Delta t_j \quad (22)$$

与式 (16) 类似，反射或透射粒子的空气质点速度 u_{out} 有：

$$u_{out,j} = \frac{\Delta p_{out,j}}{\rho_0 D_{out,j}} \quad (23)$$

将式 (21) 和式 (23) 代入式 (22) 整理可得：

$$\alpha E_{in,j} = \left(\frac{1}{\gamma - 1} \rho_0 D_{out,j} u_{out,j} + \frac{1}{2} \rho_{out,j} u_{out,j}^2 \right) \cdot A_{ray} \cdot D_{out,j} \cdot \Delta t_j \quad (24)$$

将式 (15) 代入式 (24)， γ 取 1.4，整理可得：

$$\alpha D_{in,j} (D_{in,j}^2 - c^2) \frac{D_{in,j}^2 + 2c^2}{D_{in,j}^2 + 5c^2} = D_{out,j} (D_{out,j}^2 - c^2) \frac{D_{out,j}^2 + 2c^2}{D_{out,j}^2 + 5c^2} \quad (25)$$

定义：

$$x_{in} = \frac{D_{in}}{c}, \Phi(x) = \frac{x(x^2 - 1)(x^2 + 2)}{x^2 + 5} \quad (26)$$

在 x_{in} 远大于 1 时，即强激波情况下， $\Phi(x) \approx x^3$ 。因此构造式 (25) 的解如下：

$$\frac{D_{out,j}}{D_{in,j}} \approx \begin{cases} \alpha^{1/3} + (1 - \alpha^{1/3}) \frac{5 - x_{in}}{4x_{in}}, & 1 \leq x_{in} < 5 \\ \alpha^{1/3}, & x_{in} \geq 5 \end{cases} \quad (27)$$

式 (27) 的物理意义为：在强激波情况下，所有粒子的速度按同一比例衰减，衰减程度由砖块飞散耗能占总入射能量的比例决定。对于穿过粒子， $D_{out,j}$ 为透射速度；对于反射粒子， $D_{out,j}$ 为反射速度，两者的区别仅在于传播方向不同。式 (27) 相比于式 (25) 得到的数值解误差在 10% 以内。

需要说明的是，在实际爆炸作用下，各砌块的飞散速度受其空间位置、受力状态及破坏程度等因素影响，通常具有一定的离散性。严格计算砌块群的总动能 E_{brick} 需要分别确定各砌块的质量及其飞散速度，并对各砌块动能进行累加。考虑到本文旨在建立面向砌体填充墙整体破坏及冲击波传播过程的快速分析模型，若逐块追踪砌块的运动状态，将显著增加模型的自由度、计算复杂度及计算成本。因此，本文采用统一的等效飞散速度对砌块群的整体运动状态进行简化表征。

3 多房间内爆冲击波传播简化算法框架

3.1 算法实现流程

基于上述给出的正向射线追踪法，本节建立框架结构多房间爆炸冲击波荷载计算框架，算法采用迭代的方法逐步更新系统状态。初始化阶段设定时间变量 $t=0$ ，随后进入循环结构，每轮迭代以 Δt 为增量推进模拟时间。算法首先检测当前时间是否达到预设起爆条件，若满足则触发爆炸粒子的生成机制，根据 1.1 节理论生成爆炸粒子。通过几何关系确定粒子与目标构件之间的空间关系，包括计算粒子到构件表面的距离、粒子在构件上的落点等。在爆炸粒子生成后，对粒子的单次迭代具体计算过程如下：

1) 第一步：确定射线与墙的交点

在粒子到达墙面前的每一时间步均需更新粒子到墙面的距离，每一时间步粒子的运动距离根据 1.2 节式(2)确定。在每一时间步内，对所有构件依次进行射线-构件碰撞检测。首先排除射线方向与构件所在平面平行以及射线与构件平面的交点位于射线反向延长线上的情况；随后计算射线与构件平面的交点，并进一步判断该交点是否位于构件四边形边界范围内。对于满足上述条件的所有有效交点，选取沿射线传播方向距离当前粒子位置最近的交点所对应构件作为目标构件。当交点位于构件边界或邻近边界区域时，为避免因浮点误差或几何容差导致目标构件识别不稳定，将该交点沿构件平面内指向构件几何中心的方向施加微小偏移，并以修正后的点作为后续碰撞判定与传播计算的位置。

2) 第二步：粒子到达墙后赋予砌块荷载

当检测到粒子与墙面发生接触时，根据粒子的入射超压特性，采用 1.3 节给出的方法计算构件表面的反射超压荷载。

3) 第三步：墙体响应计算

砌体填充墙响应根据 2.2 节给出的方法计算。

4) 第四步：碰撞后粒子的运动状态

若粒子在墙面发生反射，则根据几何关系确定粒子反射后的运动方向。若粒子穿过损伤墙体，则根据 2.3 节的方法确定粒子衰减后的运动速度。对于未与墙体发生相互作用的粒子，即直接穿过墙体开洞（开洞发生在先前时间步），算法仅需更新其坐标位置及运动速度。

值得注意的是，由于各个“粒子”间的运动是相对独立的。因此，整个遍历计算过程中，包括粒子及构件的遍历，均可采用并行方法进行计算，以提升运算效率。采用 1.4 节判据判定是否终止对某粒子的计算。时间步进机制与条件分支结构的结合，使得算法能够捕捉瞬态物理现象，实现冲击波传播与构件响应的耦合。整体计算框架如图 6 所示。

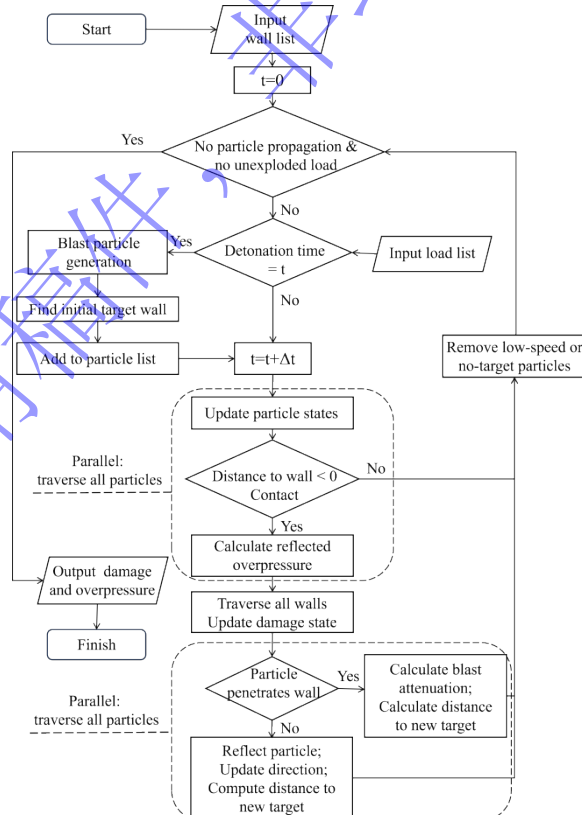


图 6 多房间内爆冲击波传播计算流程

Fig. 6 Computational procedure for internal blast wave propagation in multi-room buildings

3.2 本文方法适用性讨论

建筑内爆过程中,冲击波主要经历直射、反射、绕射及衍射。本文采用正向射线追踪方法描述冲击波的直射与反射过程,不显式求解障碍物边缘及开口附近的局部绕射与衍射波场。

与理想刚性障碍物不同,砌体填充墙具有脆性显著、抗拉强度较低等特点,其损伤破坏过程与爆炸冲击波传播在时间尺度上存在明显重叠。已有研究表明,砖砌体在爆炸作用后的数毫秒内即可发生裂纹扩展、局部破坏,并进一步形成较大贯通孔洞^[28,29]。因此,在内爆冲击波传播过程中,填充墙不宜始终视为完整的刚性遮挡边界,而应考虑其破坏演化对冲击波传播路径的动态影响。当墙体局部区域发生贯通破坏后,原有遮挡条件随之改变,后续冲击波可主要通过相应破坏区域继续向后传播。

此外,本文的研究重点在于获得可用于后续结构构件破坏判定的冲击荷载,而非对墙体破坏区域附近局部波场进行高保真重构。墙体局部开裂、开洞及边缘区域可能引起一定的冲击波绕射及局部波场重分布,但显式描述上述过程将显著增加快速分析模型的复杂度。基于本文的研究目标与简化建模思路,所提出方法主要考虑冲击波的直接传播、墙面反射以及墙体动态破坏所引起的遮挡条件和传播路径变化,而未对破坏孔洞及墙体边缘附近的局部绕射效应进行显式建模。由此产生的局部波场误差及其对构件荷载预测的影响,有待后续通过高保真数值模拟或试验结果进一步评估。

此外,框架结构建筑内部爆炸的典型破坏模式主要为爆炸源层毁伤,因此本文方法聚焦于单层内的冲击波传播,当爆炸当量较大导致楼板构件发生明显破坏时,冲击波将通过竖向路径传播至其他楼层,本文方法将不再适用。

综上,本文模型适用于砌体填充墙分隔的单层建筑内爆场景,且要求主体结构在爆炸荷载作用下保持基本完整;对于含剪力墙或需考虑竖向传播的情况,需进一步修正。

4 模型验证

4.1 单面砌体墙破口面积验证

选取 Shi 等^[30]开展的砌体填充墙近区野外爆炸试验,验证本文提出的砌体填充墙简化模型的准确性。墙体和砌块尺寸分别为 $1.2 \times 1.5 \times 0.24$ m (宽 $\times$ 高 $\times$ 厚)和 $240 \times 115 \times 53$ mm,砂浆厚度为 10 mm。砌块和砂浆强度等级分别为 MU15 和 M5。将 6 kg 的 TNT 炸药布置在墙体中心前 0.4 m 处引爆。

图 7 展示了本文算法得到的填充墙破坏动态过程。在冲击波到达后($t=0.05$ ms),墙体中心区域开始承受荷载。随后,中心区域的砌块单元因达到冲切破坏准则而失效,并以碎片形式飞散(以黑色三角表示),形成初始破口($t=0.45$ ms)。随着时间推移,砌块飞散形成最终的稳定损伤形态($t=3.25$ ms 后)。这一过程清晰地复现了爆炸荷载下墙体发生冲切破坏并向外飞散的物理现象。

图 8 将模型的最终损伤预测结果与试验照片进行了对比。本文算法成功预测了墙体中心区域出现近似矩形破口的核心破坏模式,破口位置与试验结果基本一致。另一方面,本文算法得到的墙体正面开洞面积约为 28.6%,而试验中观察到的面积约为 21.7%。两者数值接近,表明模型对损伤范围的预测具有较高的准确度。

尽管预测结果与试验吻合良好,但理论预测的开洞面积略大于试验值。其主要原因在于模型的简化假设:本文的理论模型为便于计算,将实际工程中更为坚固的错缝砌筑方式理想化为通缝砌筑的规则网格。这种简化在一定程度上低估了砌体墙协同工作带来的面外整体抗力。算例结果验证了本文所提出的填充墙离散化方法、冲切破坏准则的有效性。

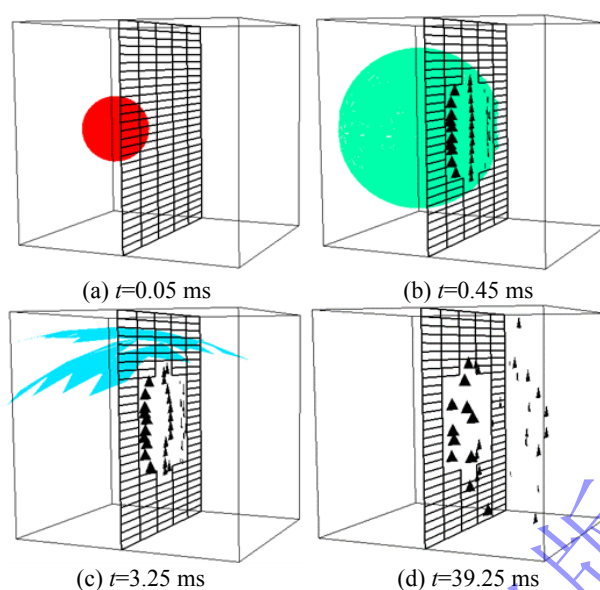
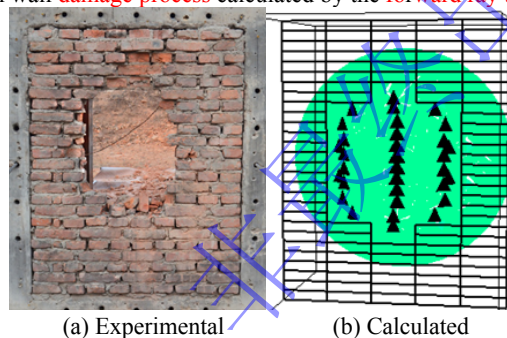


图 7 正向射线追踪模型计算得到的填充墙破坏过程
Fig. 7 Infill wall damage process calculated by the forward ray tracing model



(a) Experimental (b) Calculated

图 8 试验^[30]与本文模型计算的墙面损伤性态对比
Fig. 8 Comparison of damage between tests and theoretical results

4.2 单房间内部爆炸超压时程验证

采用胡洋等^[7]、杨亚东等^[9]和柏小娜等^[16]开展的密闭房间内爆炸试验验证本文方法的准确性。试验基本信息如表 1 试验 1~3 所示。爆源均位于房间中心。坐标系如图 9 所示，以房间左下角为坐标原点，后续均采用此坐标系。

表 1 单房间和多房间内爆试验参数

Table 1 Parameters of single-room and multi-room internal blast tests

试验	房间尺寸($l \times w \times h$)/mm	当量/g	测点位置/m
试验 1 ^[7]	1500×3000×1500	75	(1.5,1.5,0.75)
试验 2 ^[9]	4800×4800×2660	315	(4.8,2.4,1.33)
试验 3 ^[16]	4800×4800×2660	720	(4.8,2.4,1.33)
试验 4 ^[12]	4200×6000×3600	3000	P1 (2.1,4.5,0.0) P3 (6.3,4.5,0.0)

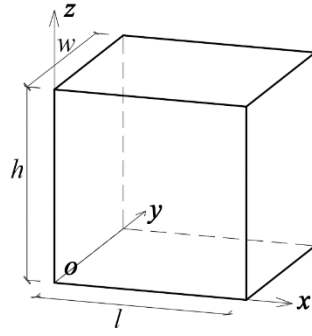


图9 密闭房间坐标系

Fig. 9 Coordinate system of a confined room

图10分别对比了三个算例测点处的正向路径追踪理论预测结果、逆向路径追踪理论预测结果^[15]和试验结果，可以看出三者在峰值超压和变化趋势上均吻合较好，超压峰值误差分别为10.2%、8.3%和12.9%，这初步验证了本文正向路径追踪方法的有效性。尽管如此，模型在部分细节，尤其是在转角测点处的预测存在一定误差。其原因在于，转角区域的冲击波传播涉及更为复杂的反射、绕射与叠加效应，而本文简化模型未考虑冲击波绕射。

爆炸荷载分析的最终目的通常是评估墙板等结构构件的整体动力响应与损伤。对于正向路径追踪方法而言，其优势在于能够计算作用于整个构件表面的全部“粒子”带来的综合效应。因此，即使由于射线或网格的离散性导致个别测点的压力计算产生波动，但当对整个构件面积进行荷载积分以求解动力响应时，这些局部误差在很大程度上会被平均和抵消，对最终的构件位移或损伤评估影响较小。

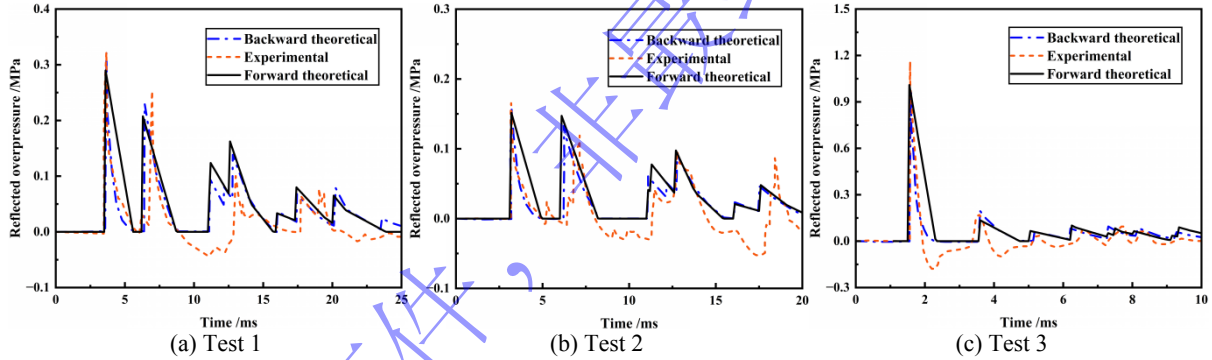


图10 正向路径追踪理论结果与试验及逆向理论^[15]结果对比

Fig. 10 Comparison of results from forward tracing theory with experiments and backward tracing theory^[15]

4.3 多房间内部爆炸超压时程验证

采用刘盛^[12]开展的多房间内爆炸试验结果进一步验证本文方法的准确性。结构包含左右两个房间，每个房间的其中一面侧墙设置有窗户开洞，洞口尺寸为1.8×1.8 m，如图11所示。炸药位于左跨房间中心，距离底板1.8 m，当量为3 kg。试验其它参数参见表1试验4。除楼板及顶板为钢筋混凝土板外，其余侧墙均为砌体墙。使用C35混凝土及HRB300钢筋，砌体墙由空心混凝土砌块及砂浆砌筑而成，砌块尺寸为600×240×240 mm，砂浆的抗压强度为10 MPa。爆源位于图11中左侧房间的中心处。同时测量两个房间钢筋混凝土楼板上的超压时程，P1测点位于起爆房间，P3测点位于相邻房间。



图 11 多房间冲击波传播试验照片^[12]

Fig. 11 Photograph of tests of multi-rooms subjected to internal blast

图 12 对比了测点 P1 和 P3 处超压时程的理论 and 试验结果。可以看到，本文模型预测的起爆房间及相邻房间的超压时程曲线与试验结果基本吻合，超压峰值误差分别为 19.9% 和 10.5%。相较于 P3 测点，P1 测点具有更少的超压峰值点，这几个峰值对应着冲击波直射和在楼板及顶板间的多次反射，本文模型较好地捕捉到了这一特征。P3 测点的超压时程曲线包含了冲击波穿过砌体墙后对相邻房间楼板的作用，其波形表现出多峰值的特点。由于本文模型未考虑冲击波荷载的负压效应，因此本文模型预测的 P3 超压时程曲线在反射超压为负时与试验结果差异较大。

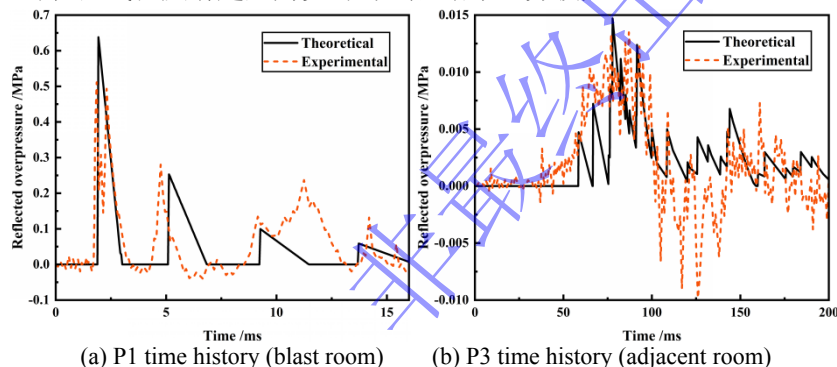


图 12 反射超压的理论结果与试验结果^[12]对比

Fig. 12 Comparison of overpressure between analytical and experimental results^[12]

4.4 多房间内部爆炸破坏范围验证

刘盛^[12]基于 LS-DYNA 软件建立了典型单层多多房间的钢筋混凝土框架结构有限元模型，如图 13 所示。结构中单个房间净空长度为 4.2 m，宽度为 6.0 m，高度为 4 m，砌体隔墙厚度为 0.2 m，泄压口尺寸为 1.8×2.0 m。采用 1/2 对称建模，以爆源所在平面为对称轴，沿房间长度方向从爆源房间开始依次建立 6 个相同的房间，有限元模型的总长度为 24.3 m。炸药为当量 500 kg 的球形 TNT。

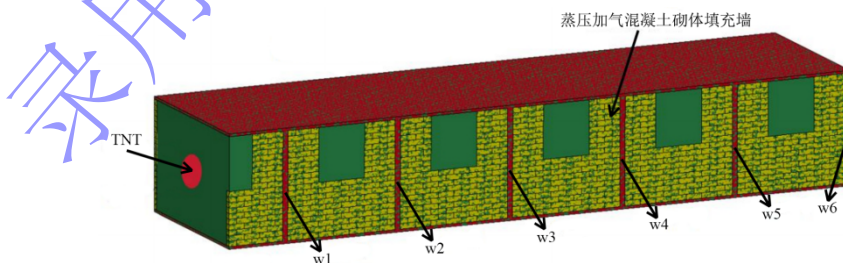


图 13 多房间内部爆炸有限元模型^[12]

Fig. 13 Finite element model of multi-rooms under internal blast

图 14 展示了在四个不同时刻，本文模型（左图）与有限元仿真（右图）关于冲击波在建筑横向空间内传播过程的对比。在起爆初期($t=0.47$ ms)，两种方法均显示冲击波阵面被完全限制在第一个房间（爆源间）内，尚未与第一面隔墙发生相互作用。此时的波阵面形态和范围基本一致。在 $t=1.73$ ms 时，两种模型均显示第一道隔(W1)已被摧毁，冲击波进入第二个房间。到 $t=4.27$ ms 时，冲

击波已传播至第二道隔墙(W2)并对其产生作用。在这一系列过程中, 本文模型准确地模拟了隔墙被破坏后, 冲击波得以继续向前传播的关键行为。在远场传播阶段, 两种模型均显示冲击波已穿透多道隔墙。有限元结果显示冲击波已进入第四个房间, 而本文模型也显示第三道隔墙已被破坏, 代表冲击波的粒子已传播至相似的距离。

通过图 14 结果的对比可以看出, 在每个时间节点, 本文模型预测的冲击波“球面”位置与有限元仿真结果基本吻合。这表明, 本文模型所采用的射线追踪、墙体损伤判定以及粒子穿透衰减等简化算法, 能够模拟冲击波在穿过多道隔墙时发生的能量损失和传播衰减, 验证了本文建立的多房间爆炸冲击波荷载计算框架的合理性与准确性。

本文算法在配备第 12 代 Intel Core i7-12700 处理器的计算机上运行, 本节多房间内爆算例单次计算耗时约 3 min。相比精细化有限元方法需要进行大规模网格离散、接触计算及小时间步积分, 本文算法显著减少了计算量, 可在分钟量级内完成多房间内爆荷载评估, 满足建筑内爆荷载快速评估的需求。

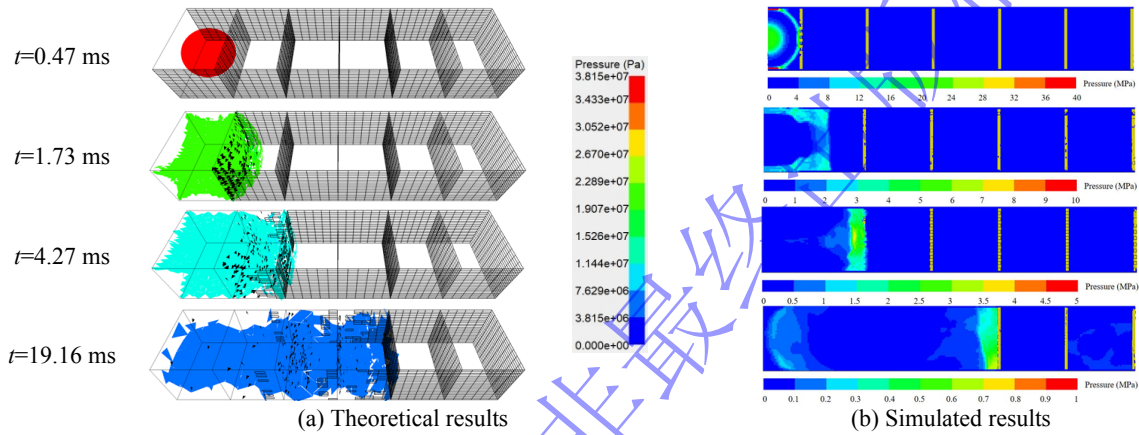


图 14 框架建筑横向空间内爆炸冲击波传播过程

Fig. 14 Propagation of blast wave in multi-room structure predicted by theoretical model and finite element model

5 结论

本文提出了一种基于正向射线追踪的多房间内爆炸冲击波传播与荷载计算理论框架, 并通过与试验及数值模拟的对比, 验证了其有效性。主要结论如下:

1) 本文提出的计算方法, 通过将爆炸冲击波等效为由三角形细分生成的离散射线束, 能够实现对冲击波直射与反射过程的物理模拟。通过引入墙体离散化方法, 并综合考虑基于整体变形与砂浆粘结冲切破坏的失效准则, 实现了冲击波传播与填充墙响应的耦合计算, 能够合理地预测砌体填充墙的破坏过程。

2) 通过单房间及多房间两种典型工况下的算例验证, 本文模型的预测结果在峰值超压、荷载时程曲线以及破坏范围等方面, 均与试验数据及有限元仿真结果展现出良好的一致性。结果表明, 模型虽然在局部测点存在约 15% 的计算偏差, 但这些偏差对评估构件的整体动力响应影响较小, 其总体预测精度能够满足工程应用的需求。

3) 本文模型仅适用于砌体填充墙分隔的建筑内爆场景, 在该类问题中填充墙破坏形成的大尺寸开洞使得绕射与衍射效应对构件破坏的影响较小, 对于剪力墙作为分隔构件的情况则需进一步修正。本文模型适用于主要破坏模式为爆炸源层的多房间破坏的情况, 对于大当量爆炸致楼板发生明显破坏的情况需要进一步修正。

参考文献

- [1] 曹宇航, 张晓伟, 张庆明. 框架结构建筑物内爆炸冲击波传播规律研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 189-195. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.03.029.
- CAO Y H, ZHANG X W, ZHANG Q M. Study on the propagation characteristics of shock wave in frame construction buildings under internal explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(3): 189-195. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.03.029.
- [2] 王成, 王雪桃, 李涛, 等. 复杂结构内爆炸冲击波传播的大规模计算方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(1): 39-50. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.078.
- WANG C, WANG X T, LI T, et al. Study on large scale calculation method of explosive shock wave propagation in complex structure[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(1): 39-50. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.078.
- [3] JULIEN B, SOCHET I, VAILLANT T. Impact of the volume of rooms on shock wave propagation within a multi-chamber system[J]. Shock Waves, 2016, 26(2): 87-108. DOI: 10.1007/s00193-015-0603-2.
- [4] SOCHET I, GAULT K, HAKENHOLZ L. Propagation of shock waves in two rooms communicating through an opening[M/OL]/RAO S P. Direct numerical simulations: an introduction and applications. London: IntechOpen, 2019[2026-10-09]. <https://www.intechopen.com/chapters/67877>. DOI: 10.5772/intechopen.87190.
- [5] RUSCADE G, SOCHET I, DJAFER K. Mach stem evolution in a confined multi-room[J]. Shock Waves, 2022, 32(5): 395-404. DOI: 10.1007/s00193-022-01083-5.
- [6] 郭志昆, 宋锋良, 刘峰, 等. 扁平箱形密闭结构内爆炸的模型试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, 9(4): 345-350. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.04.008.
- GUO Z K, SONG F L, LIU F, et al. Experiment of closed flat box structure subjected to internal detonation[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 9(4): 345-350. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.04.008.
- [7] 胡洋, 朱建芳, 朱锴. 长方体单腔室空腔环境内爆炸效应的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 340-346. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0340-07.
- HU Y, ZHU J F, ZHU K. Experimental study on explosion effect in a closed single rectangular cavity[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 340-346. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0340-07.
- [8] 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.
- [9] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 长方体密闭结构内爆炸冲击波传播与叠加分析模型[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1449-1455. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.016.
- YANG Y D, LI X D, WANG X M. An analytical model for propagation and superposition of internal explosion shockwaves in closed cuboid structure[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8): 1449-1455. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.016.
- [10] 马涛. 空气中爆炸波快速算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [11] 陈鑫, 高轩能, 付诗琦. 复杂建筑结构环境下冲击波超压的快速估算方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 48-55. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202004011.
- CHEN X, GAO X N, FU S Q. Rapid estimation method of shock wave overpressure in complex building structure environment[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2021, 42(1): 48-55. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202004011.
- [12] 刘盛. 框架建筑空间内爆炸威力场分布范围研究[D]. 北京: 军事科学院, 2024.
- [13] 郭玉斌, 田宇隆, 张斌. 地下建筑内爆炸冲击波荷载分布规律研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9): 88-93, 148. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4431.2012.09.019.
- WU Y B, TIAN Y L, ZHANG B. Distribution law of in-underground structure explosion-induced shock wave load[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(9): 88-93, 148. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4431.2012.09.019.
- [14] 何翔, 孙桂娟, 任新见, 等. 砖隔墙前爆炸泄漏空气冲击波工程算法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2150-2154. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.06.006.
- HE X, SUN G J, REN X J, et al. Explosion-leakage air shock wave engineering algorithm in front of brick partition wall[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6): 2150-2154. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.06.006.
- [15] 吕晋贤, 吴昊, 卢永刚, 等. 爆炸作用下建筑结构高效毁伤评估方法[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(1): 015101. DOI: 10.11883/bzyej-2024-0053.
- LYU J X, WU H, LU Y G, et al. High-efficiency assessment method of damage for building structures under explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(1): 015101. DOI: 10.11883/bzyej-2024-0053.
- [16] 柏小娜, 李向东, 杨亚东. 封闭空间内爆炸冲击波超压计算模型及分布特性研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(3): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.03.005.
- BAI X N, LI X D, YANG Y D. Calculation model and the distribution of wave pressure under internal explosion in closed space[J]. Explosive Materials, 2015, 44(3): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.03.005.
- [17] ZHANG Y, WU M, LIU Z, et al. Fast-running model for predicting the blast loads in a confined room[J]. International Journal of Protective Structures, 2026, 17(1): 137-165. DOI: 10.1177/20414196251336763.
- [18] KINNEY G F, GRAHAM K J. Explosive shocks in air[M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1985. DOI: 10.1007/978-3-642-86682-1.
- [19] HENRYCH J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987.

- [20] ОПЛЕХКО Л П. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用: 上册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [22] NEEDHAM C E. Blast waves[M]. 2nd ed. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-65382-2.
- [23] US ARMY CORPS OF ENGINEERS PROTECTIVE DESIGN CENTER. Methodology manual for the single-degree-of-freedom blast effects design spreadsheets (SBEDS): PDC TR-06-01[R]. Omaha, NE: US Army Corps of Engineers Protective Design Center, 2006.
- [24] US DEPARTMENT OF DEFENSE. Structures to resist the effects of accidental explosions: UFC 3-340-02[S]. Washington, DC: US Department of Defense, 2008.
- [25] 陈德, 吴昊, 方秦. 爆炸荷载作用下单向砌体填充墙动态响应计算方法[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(10): 197-210. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0130.
- CHEN D, WU H, FANG Q. Dynamic responses calculation method of one-way masonry infill wall under blast loadings[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(10): 197-210. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0130.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [27] 高文蛟, 单仁亮, 李建湘, 等. 爆炸应力波入射一定厚度结构面时透射系数分析[J]. 矿冶工程, 2001, 21(1): 16-18.
- GAO W J, SHAN R L, LI J X, et al. Analysis of transmission coefficient of blasting stress wave entering structural face of certain depth[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2001, 21(1): 16-18.
- [28] WEI J, DU Z, ZHENG Y, et al. Research on damage characteristics of brick masonry under explosion load[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(1): 5519231. DOI: 10.1155/2021/5519231.
- [29] LANTZ L, MAYNEZ J, COOK W, et al. Blast protection of unreinforced masonry walls: a state-of-the-art review[J]. Advances in Civil Engineering, 2016, 2016: 8958429. DOI: 10.1155/2016/8958429.
- [30] SHI Y, XIONG W, LI Z X, et al. Experimental studies on the local damage and fragments of unreinforced masonry walls under close-in explosions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 90: 122-131. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.002.