

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202004011



复杂建筑结构环境下冲击波 超压的快速估算方法

陈鑫^{1,2}, 高轩能¹, 付诗琦¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 为解决复杂建筑结构环境下,冲击波模拟成本与计算精度之间的矛盾,提出利用低成本建模提取超压,再通过修正获得高精度超压的快速估算方法.首先,通过建模分析入射超压的模拟误差,给出精细网格密度下限值 λ_{lim} ;然后,进一步大量建模,对超出 λ_{lim} 限值的粗网格模拟超压进行修正,并拟合出超压修正系数公式;最后,利用修正系数进行超压估算与验证.研究表明:超压模拟误差随着网格密度的增大而减小;利用低成本粗网格建模模拟并加以修正后获得的估算超压值与理论值、试验实测值的误差较小;粗网格模型估算超压值的计算精度与高成本精细网格模型相当.

关键词: 爆炸;低成本;快速估算;冲击波超压;修正系数;网格密度

中图分类号: O 382; TU 13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)01-0048-08

Rapid Estimation Method of Shock Wave Overpressure in Complex Building Structure Environment

CHEN Xin^{1,2}, GAO Xuanneng¹, FU Shiqi¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between cost of shock wave simulation and accuracy of calculation in complex building structure environment, a rapid estimation method of overpressure was proposed, which used low-cost model to extract overpressure, and then obtained high-precision overpressure by correction. Firstly, the simulation error of incident overpressure was analyzed by modeling, and the lower limit of mesh density λ_{lim} was given. Then a large number of models were built to revise the overpressure simulated by the coarse mesh, and the overpressure correction coefficient formula was fitted. Finally, the overpressure was estimated and verified by the correction coefficient. The results show that the errors decrease with the increases of mesh density. The results show that the errors decrease with the increases of mesh density. There are small errors between the calculated overpressure value and the theoretical value or the measured value. The precision of overpressure value estimated by coarse mesh model is equal to that of high cost fine mesh model.

Keywords: explosion; low-cost; rapid estimation; shock wave overpressure; correction coefficient; mesh density

收稿日期: 2020-04-03
通信作者: 高轩能(1962-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事钢结构及工程结构灾害控制的研究. E-mail: gaoxn117@sina.com.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278208);福建省教育厅科研基金资助项目(KLA19018A);福建省科技计划重点项目(2018Y0063)

爆炸荷载的破坏力巨大,快速评估爆炸袭击或意外爆炸对建筑结构及人员安全的影响具有重要的意义. 以往的研究已经总结了无约束环境下的爆炸冲击波超压的经验公式,但当在城市街区中或大型结构内等复杂三维环境下发生爆炸时,爆炸点高度、地面刚度、地面成坑情况、建筑表面形状、墙面和窗户的刚度和破损程度等诸多不确定因素都使爆炸荷载变得极为复杂,经验公式无法适用. 因此,必须寻求一种在复杂建筑结构环境下,爆炸冲击波超压荷载分布的快速计算方法.

杨亚东等^[1]以结构壁面作为镜面,把反射波按镜像爆炸源的入射波计算,并叠加各壁面的镜像入射波,快速获得了长方体房间内的内爆炸冲击波. 但这一计算方法必须将壁面假设为刚性,且适用于较为简单的几何空间区域. 另外,由于进行足尺模型爆炸试验的成本昂贵,而缩尺模型试验受到材料的高应变率效应的影响,存在不完全相似关系,与实际情况存在偏差^[2]. 因此,采用数值方法建立流固耦合模型模拟,是目前分析复杂环境内超压荷载分布的主要手段.

为了获得较高的计算精度,流固耦合模型需要大量精细的任意拉格朗日欧拉(ALE)网格^[3],计算成本高. LS-DYNA 有限元软件提供的 ALE 与 LBE 相结合的方法^[4-5],以及 AUTODYN 软件提供的重映射(REMAP)技术^[6],都是将爆炸荷载分成简单自由场传播和流固耦合两阶段计算,节约了计算成本. 这两种方法适用于爆炸源周围空旷无干扰,需要流固耦合分析的目标区域小的情况,若要对较大的耦合场进行分析时,依然需要大量的 ALE 网格. 鉴于降低计算成本和提高计算精度的矛盾,本文提出采用粗网格进行低成本的流固耦合模拟,初步获得爆炸荷载场,再利用基于经验公式拟合的修正公式进行修正,获得精度较高的超压估算方法.

1 有限元模型与材料参数

估算方法的核心在于拟合出超压修正公式,为确定超压修正公式的适用范围,利用 LS-DYNA 有限元软件,建立自由场空爆 ALE 模型,根据对称性建立 1/8 模型. 模型的计算空间尺寸为 4 m×4 m×15 m(长×宽×高)的空气域,如图 1 所示. 利用“体积分数”语句在空气域中分割一个球形的区域,用以填充炸药材料. 在模型的 3 个对称面上施加对称约束,其余表面均采用透射边界以模拟无限空气域.

炸药选用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,并用 Jones-Wilkins-Lee 状态方程描述爆炸物的特性,表达式为

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\exp(-R_1V)+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\exp(-R_2V)+\frac{\omega E_0}{V}.$$

(1)

式(1)中: P 为压力; V 为体积; A,B,R_1,R_2,ω 为状态方程参数,通过试验确定参数的取值; E_0 为炸药的单位体积初始内能. 炸药的材料参数^[7],如表 1 所示. 表 1 中: v 为爆速; P_{CJ} 为爆压. 炸药密度 ρ 取 1 630 kg·m⁻³.

表 1 炸药的材料参数

Tab. 1 Material parameters of explosive

参数	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	P_{CJ}/GPa
取值	540.9	9.4	4.5	1.1	0.35	8	6 718	18.5

空气选用 * MAT_NULL 材料模型,方程选用 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL,即

$$P=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_a.$$

(2)

式(2)中: $\mu=\rho_a/\rho_{a0}-1$, ρ_{a0} 为空气的参考质量密度, ρ_a 为空气密度,取 1.290 kg·m⁻³;单位体积内能 E_a 取 2.5×10⁵ J·m⁻³;实常数 $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0,C_4=C_5=0.4$.

2 超压误差和网格尺寸经济性分析

利用节 1 中自由场空爆模型对超压模拟误差进行分析,并进一步定义网格尺寸的粗细程度. 为了便于分析,引入网格密度 λ ,即

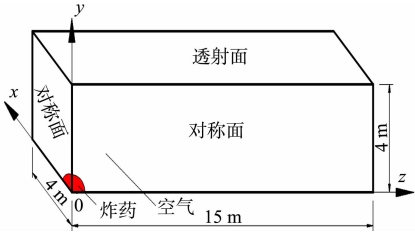


图 1 自由场空爆模型
Fig. 1 Model of free-field explosion

$\lambda = r/b.$ (3)

式(3)中: r 为炸药半径, $r=\sqrt[3]{\frac{3W}{4\pi\rho}}$, W 为炸药质量; b 为立方体单元网格的边长.

2.1 冲击波超压的误差分析

取 $b=0.05\text{ m}$, $W=100\text{ kg}$ 进行计算,易得炸药半径 $r=0.245\text{ m}$, 网格密度 $\lambda=4.90$. 将文中模拟得到的爆炸冲击波超压峰值 ΔP_M 与文献[8-11]中的入射超压经验公式计算值进行对比,结果如表 2 所示. 表 2 中: ΔP_H 为根据 Henrych 等^[8]的试验公式计算出的超压值,有

$$\Delta P_H = \begin{cases} \frac{1.407\ 17}{\bar{R}} + \frac{0.553\ 97}{\bar{R}^2} - \frac{0.035\ 72}{\bar{R}^3} + \frac{0.000\ 625}{\bar{R}^4}, & 0.05 \leq \bar{R} \leq 0.3, \\ \frac{0.619\ 38}{\bar{R}} - \frac{0.032\ 62}{\bar{R}^2} + \frac{0.213\ 24}{\bar{R}^3}, & 0.3 \leq \bar{R} \leq 1, \\ \frac{0.066\ 2}{\bar{R}} + \frac{0.405}{\bar{R}^2} + \frac{0.328\ 8}{\bar{R}^3}, & 1 \leq \bar{R} \leq 10, \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: \bar{R} 表示比例距离, $\bar{R}=R/W^{1/3}$, R 为测点到炸药中心的距离; ΔP_W 为吴彦捷等^[9]综合 21 组经验公式获得的拟合公式计算的超压值,有

$$\Delta P_W = \begin{cases} \frac{0.294\ 8}{\bar{R}} - \frac{0.831\ 8}{\bar{R}^2} + \frac{0.728\ 4}{\bar{R}^3}, & 0.3 \leq \bar{R} \leq 1, \\ \frac{0.084\ 2}{\bar{R}} + \frac{0.328\ 1}{\bar{R}^2} + \frac{0.878\ 7}{\bar{R}^3}, & 1 \leq \bar{R} \leq 15; \end{cases} \quad (5)$$

ΔP_Y 为杨涛春等^[10]统计 18 组入射波超压公式获得的回归公式计算值; ΔP_B 为根据 GB 6722—2014《爆破安全规程》^[11]公式计算的超压值.

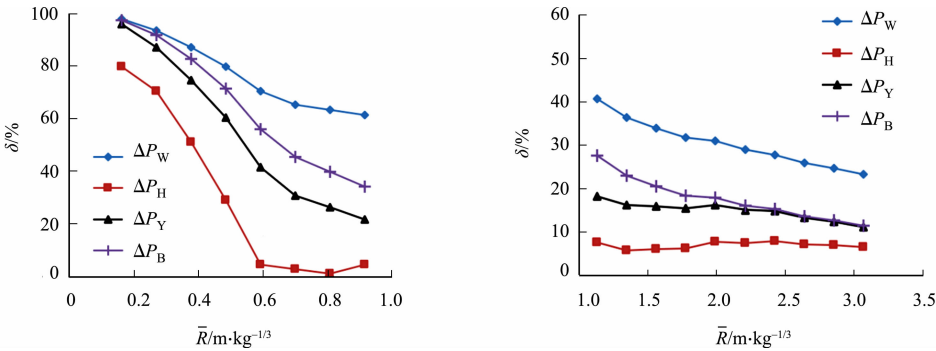
由表 2 可知:在 4 组经验公式中, ΔP_H 的数值最小,且与 ΔP_M 最为接近, ΔP_W 最为保守.

表 2 文中模拟值与经验公式计算值的对比

Tab. 2 Comparison of overpressure values by numerical simulation and empirical formula

R/m	$\bar{R}/\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$	$\Delta P_M/\text{MPa}$	$\Delta P_H/\text{MPa}$	$\Delta P_W/\text{MPa}$	$\Delta P_Y/\text{MPa}$	$\Delta P_B/\text{MPa}$
5.25	1.131	0.557	0.602	0.938	0.681	0.769
7.25	1.562	0.277	0.295	0.419	0.329	0.348
9.25	1.993	0.163	0.177	0.236	0.194	0.199
11.25	2.424	0.110	0.119	0.127	0.129	0.130
13.25	2.855	0.081	0.087	0.093	0.092	0.093

不同比例距离时,文中模拟值与各经验公式计算值的误差(δ),如图 2 所示. 由图 2 可知: ΔP_M 相对于 ΔP_H 的误差最小,当 $\bar{R}<0.6\text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时, δ 值随着 \bar{R} 的增大迅速减小,当 $\bar{R}\geq 0.6\text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 后, δ 稳定地在小于 10% 的范围内波动;其余各曲线的 δ 值均随着 \bar{R} 的增大而不断减小.



(a) $\bar{R} \leq 1\text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ (b) $\bar{R} > 1\text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$

图 2 比例距离与超压模拟误差曲线($\lambda=4.90$)

Fig. 2 Curves of scale distance and overpressure simulation error ($\lambda=4.90$)

将误差最小的 ΔP_H 作为参照(下同),对比不同网格密度 λ 对超压模拟误差 δ 的影响,如图 3 所示.

由图 3 可知:随着网格密度的减小(或 b 的增大), δ 急剧增大;以 $\bar{R}=1.31 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 处的测点为例,网格密度从 4.90 降低到 0.49 时,误差从 7.5% 增大到 76.8%。总体来说, δ 值随着 \bar{R} 的增大而减小,但当网格足够细致,且 \bar{R} 增大到一定范围($\bar{R} \geq 0.6 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 且 $\lambda \geq 4.90$; 或 $\bar{R} \geq 1.3 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 且 $\lambda \geq 2.50$) 时, ΔP_M 逐渐接近 ΔP_H , δ 趋于稳定。

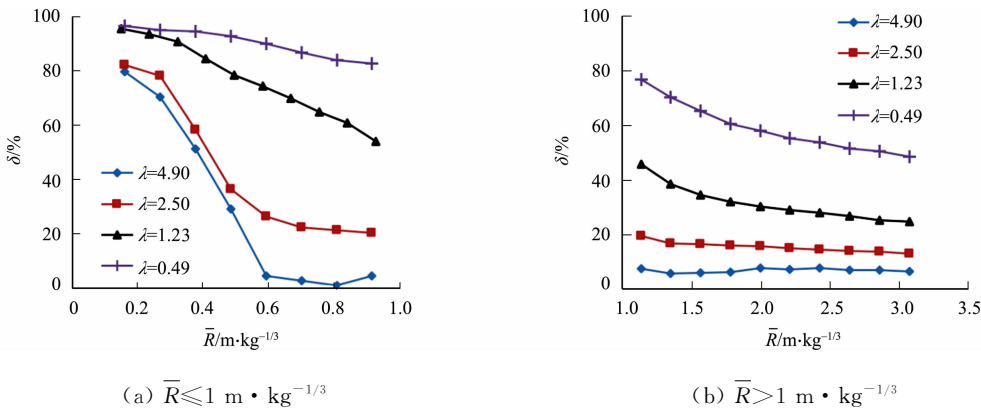


图 3 网格密度对超压模拟误差的影响

Fig. 3 Influence of mesh density on overpressure simulation error

冲击波阵面是一个强间断面,超压在一个极短的区段内发生阶跃,瞬间达到峰值后又迅速衰减。因此,网格越精细,越能精确捕捉到超压的真实峰值。随着 \bar{R} 的增大,冲击波阵面厚度逐渐增大,超压的阶跃也趋于缓和, ΔP_M 与真实值的差距逐渐缩小,对网格密度的要求也逐渐降低。

对于相同的网格尺寸,炸药质量 W 的变化会改变网格密度 λ ,从而影响超压误差 δ 。分析炸药质量 W 对 δ 的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可知:不同炸药质量下,相同网格密度的超压误差曲线基本重合,说明只要保证相同的网格密度,可以忽略炸药质量对超压误差的影响。

2.2 网格尺寸经济性分析

通过节 2.1 的分析可知,越接近爆炸中心, δ 越大。因此,需要根据模拟区域大小和误差限值的要求,选择适合的网格密度。选择 20% 作为误差控制限值,将 ΔP_H 作为参照,在 $\bar{R} > 1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内,网格密度下限值 λ_{lim} 可取为 2.50;在 $\bar{R} > 0.52 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内, λ_{lim} 可取为 4.90(图 3)。

在 $\bar{R} \leq 1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内, ΔP_M 变化幅度大,超压误差 δ 也较大,为了给出更具参考意义的 λ 限值,收集文献[12-18]中对爆炸模拟推荐的网格尺寸,并统一换算为 λ_{lim} 。由于在爆源附近, $\bar{R} \leq 0.3 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内,各学者推荐的 λ_{lim} 差异极大,故不作讨论。将 $\bar{R} > 0.3 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内的 λ_{lim} 拟合为与 \bar{R} 相关的函数曲线,如图 5 所示。由图 5 可知:文中的推荐值与限值曲线差异较小。

综合 $\bar{R} > 1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 的情况,最终获得 λ_{lim} 的表达式为

$$\lambda_{\text{lim}} = \begin{cases} -3.15 \ln \bar{R} + 3.3, & 0.3 < \bar{R} \leq 1, \\ 2.50, & \bar{R} > 1. \end{cases} \quad (6)$$

由此,定义 $\lambda < \lambda_{\text{lim}}$ 的网格尺寸为粗网格;反之,则为细网格。采用细网格对 3D 环境进行模拟,所需要的单元数量十分巨大。以装药量 860 kg 的“飞毛腿 B”导弹为例,杀伤半径达到 150 m。若建立尺寸为 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)的爆炸区域,采用由 λ_{lim} 计算的 0.2 m 细网格,至少需要 16.875 亿

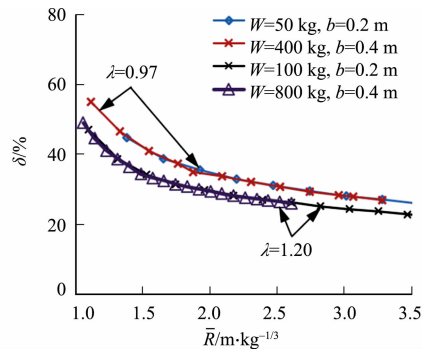


图 4 炸药质量对超压模拟误差的影响

Fig. 4 Influence of explosive weight on overpressure simulation error

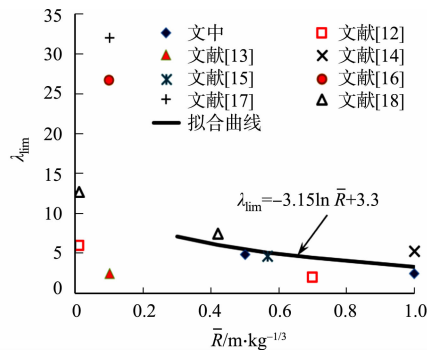


图 5 网格密度限值与比例距离的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of mesh density limit and scale distance

个单元,还未计入城市建筑模型的单元数量.由于细网格的计算成本极高,在计算资源有限的情况下,可以采用粗网格模拟计算,并通过修正获得更精确的冲击波超压.

3 冲击波超压的快速估算

为了修正粗网格建模模拟的冲击波超压,将自由场经验公式计算的超压值作为修正目标,引入修正系数 η ,对模拟获得的入射超压 ΔP_M 加以修正,并将 η 拟合为与比例距离 \bar{R} 相关的函数,即

$$\eta = D_1 \times \bar{R}^{-D_2} + D_3. \tag{7}$$

式(7)中: D_1, D_2 和 D_3 均为无量纲的拟合系数.

如前文所述,冲击波超压的模拟精确度受比例距离 \bar{R} 和网格密度 λ 的影响.为了计算不同 \bar{R} 和 λ 下的修正系数 η ,先将数值模型(图 1)的 z 向长度扩大到 25 m,扩大测点的比例距离取值范围.同时,分别用 5 种网格尺寸(b 分别为 0.20,0.25,0.30,0.40,0.50 m)进行模型单元划分;再进一步模拟各网格下炸药质量分别为 50,100,200,400,800 kg 时的超压,涵盖了从 0.39 到 2.50 范围内的网格密度.

3.1 修正系数式 1

先将 Henrych 公式的超压计算值 ΔP_H 作为修正目标,提取 $\bar{R} > 1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内测点的超压值,计算并拟合出不同网格密度下的修正系数 η .以 $b = 0.30 \text{ m}, W = 50 \text{ kg}$,即 $\lambda = 0.65$ 为例,拟合出修正系数表达式为

$$\eta = 2.34 \times \bar{R}^{-1.475} + 1.265. \tag{8}$$

式(8)中: $D_1 = 2.34; D_2 = 1.475; D_3 = 1.265$.

提取不同网格密度下的 D_1, D_2 和 D_3 ,得到网格密度与拟合系数曲线,如图 6 所示.根据各数据点的分布规律,将 D_1, D_2 和 D_3 拟合为与网格密度 λ 相关的函数,即

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= 1.01\lambda^{-1.616}, \\ D_2 &= -0.0127\lambda + 1.524, \\ D_3 &= -0.1254\lambda + 1.351. \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

将式(9)中的 D_1, D_2 和 D_3 代入式(7)中,即可得到同时考虑 λ 和 \bar{R} 的 η 表示式,即

$$\eta = (1.01\lambda^{-1.616})\bar{R}^{0.0127\lambda - 1.524} - 0.1254\lambda + 1.351, \quad 0.39 \leq \lambda \leq 2.50, \quad \bar{R} > 1. \tag{10}$$

同理,还可以对 $0.3 < \bar{R} \leq 1$ 的 η 进行拟合,由于在这一区段内对网格密度的要求更高,因此,将拟合范围扩大到 $0.39 \leq \lambda \leq 4.90$,获得的修正系数表示式为

$$\eta = (1.26\lambda^{-1.74})\bar{R}^{0.0096\lambda - 1.531} - 0.1205\lambda + 1.384, \quad 0.39 \leq \lambda \leq 4.90, \quad 0.3 < \bar{R} \leq 1. \tag{11}$$

利用式(10),(11)或式(8)的修正系数,可以快速修正数值模拟的 ΔP_M ,修正后的冲击波超压 ΔP_R 表达式为

$$\Delta P_R = \eta \times \Delta P_M. \tag{12}$$

以 $\lambda = 0.65$ 的算例为例,提取 11 个测点,将修正后的 ΔP_R 与 ΔP_H 进行对比.修正前、后超压的对比,如图 7 所示.由图 7 可知:修正后的超压值与经验公式计算值 ΔP_H 吻合良好;分析 11 个测点的数据,按式(8)或式(10)修正后, ΔP_R 相对于 ΔP_H 的最大误差分别为 4.2% 和 1.8%,误差较小.

3.2 修正系数式 2

由节 2.1 的分析可知,根据 Henrych 的经验公式(式(4))计算出的超压峰值偏小,存在低估爆炸冲击波荷载的风险;而吴彦捷等^[9]综合 21 组经验公式的超压平均值,拟合获得的超压计算公式(式(5))更具有参考意义,计算出的超压 ΔP_w 也更为安全.因此,以 ΔP_w 作为修正目标,再次进行模拟超压 ΔP_M 的修正拟合.

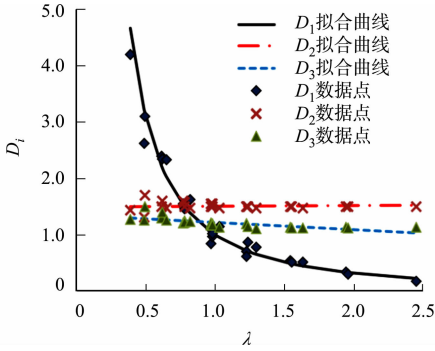


图 6 网格密度与拟合系数曲线
Fig.6 Curves of mesh density and fitting coefficient

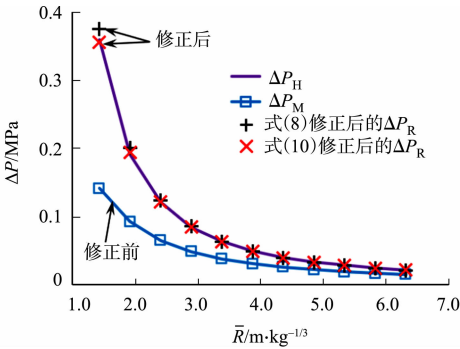


图 7 修正前、后超压的对比
Fig.7 Comparison of overpressure before and after correction

与式(10),(11)的拟合方法相同,先计算并拟合出不同网格密度 λ 下的 D_1,D_2 和 D_3 ,再将 D_1,D_2 和 D_3 拟合为与 λ 相关的函数,最终获得修正系数式为

$$\eta=(2.705\lambda^{-1.031})\bar{R}^{0.279\lambda-1.976}-0.266\lambda+1.609, \quad 0.39\leq\lambda\leq2.50, \quad \bar{R}>1, \quad (13)$$

$$\eta=(5.312\lambda^{-1.079})\bar{R}^{0.078\lambda-1.689}+0.032\ 4\lambda+0.827, \quad 0.39\leq\lambda\leq4.90, \quad 0.3<\bar{R}\leq1. \quad (14)$$

3.3 理想刚性墙面反射超压的估算与验证

在获得修正系数 η 之后,即可按照式(12)修正低成本粗网格模型的模拟超压,获得较为精确的估算超压值.为了检验估算超压的准确性,模拟计算刚性墙面的反射超压,并与理论值进行对比.对于无限大的理想刚性墙面,李翼祺等^[19]给出了正反射超压 ΔP_2 与入射超压 ΔP_1 之间的关系式,即

$$\Delta P_2=2\Delta P_1+\frac{6\Delta P_1^2}{\Delta P_1+7P_0}. \quad (15)$$

式(15)中: P_0 为标准大气压,取 0.1 MPa.以 $W=100$ kg 为例,根据式(4)计算得到入射超压 $\Delta P_1=0.078\ 4$ MPa,代入式(15),即可算得的理论上的 $\Delta P_2=0.204$ MPa.

在图 1 模型的基础上,于 $z=14$ m 的平面处增设一片刚性墙体,墙体选用 SHELL163 壳体单元,约束所有自由度.根据式(6)的定义,在 $R=14$ m($\bar{R}=3.016\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)位置, λ_{lim} 要取 2.50 及以上才能保证模拟精度.因此,取 4 种网格密度(λ 分别为 0.49,1.23,2.50,4.90,即 b 分别为 0.50,0.20,0.10,0.05 m)进行计算,并计算 $R=14$ m 处的 ΔP_M ;将粗网格模型的 ΔP_M 用式(10)的 η 进行修正,获得估算超压 ΔP_{R-H} ,如表 3 所示.

表 3 理想刚性墙面反射超压估算

Tab.3 Estimation of reflection overpressure on ideal rigid wall

λ	理论值 ΔP_2	修正前		修正后		ALE 单元数量
		$\Delta P_M/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\Delta P_{R-H}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	
4.90	0.204	0.184	9.8	—	—	1 920 000
2.50	0.204	0.161	21.1	—	—	240 000
1.23	0.204	0.136	33.3	0.181	11.1	30 000
0.49	0.204	0.086	57.7	0.163	19.9	1 920

由表 3 可知:经过超压修正后,超压误差 δ 明显减小,修正效果良好.利用粗网格(λ 为 0.49,1.23)模拟并修正后的 ΔP_{R-H} ,可以获得与细网格(λ 为 2.50,4.90)的 ΔP_M 相当的模拟精度,且只需要细网格模型的 1/125,甚至更少的单元数量,极大地降低了计算成本.

3.4 封闭空间内爆炸的超压估算与验证

为进一步验证文中估算方法的有效性和准确性,对试验模型进行超压估算.文献[20]中进行的封闭空间内爆炸试验示意图,如图 8 所示.试验模型采用 150 mm 厚的钢筋混凝土制成,内壁布置了 5 个超压测点(1#~5#).试验分别进行多个炸药量(W 分别为 75,150,200,300,500 g)的内爆炸,起爆点均设在模型的几何中心处.根据对称性,建立 1/8 模型,空气域尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 0.8 m \times 0.8 m \times 1.6 m,以 $b=0.025$ m 进行网格划分,同时,按照图 8 布置刚性墙面,建模方式同节 3.3.封闭空间内爆炸数值模型示意图,如图 9 所示.

取 $W=75$ g($\lambda=0.89$)进行模拟,并提取各测点超压时程曲线的第一次峰值(ΔP_M),再分别利用式(10),(11)和式(13),(14),计算修正后的超压 ΔP_{R-H} 和 ΔP_{R-W} ,结果如图 10(a)所示.图 10(a)中: ΔP_{test} 为实测超压.由图 10(a)可知:修正结果明显降低了超压误差,各测点的修正超压与实测超压吻合较好;仅 1#测点和 3#测点的 ΔP_{R-H} 偏小,正如节 3.2 所述, ΔP_{R-H} 存在低估超压的风险.将 1#,3#测点的 ΔP_M 按照式(13),(14)进行修正后,两个测点的 ΔP_{R-W} 与 ΔP_{test} 的误差仅为 11.6%和 17.2%,与细网格的模拟精度相当,说明通过两组修正公式的互补可以较好地控制误差.

封闭空间内爆炸的超压曲线具有多峰值的特点,2#测点实测超压时程曲线的最大峰值均大于第一次峰值.因此,进一步模拟并提取不同 W 下,2#测点的超压最大峰值,将修正超压与实测超压进行对比,如图 10(b)所示.由图 10(b)可知:除 $W=75$ g 的工况外,其他弹药量下的 ΔP_{test} 均介于 ΔP_{R-H} 和 ΔP_{R-W} 之间,且误差基本控制在 20%以下,达到细网格的模拟精度要求.

综上所述,利用文中估算方法获得的修正超压与理论值和试验实测值吻合良好.限于篇幅,文中仅

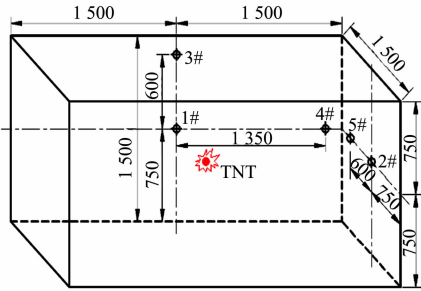


图 8 封闭空间内爆炸试验示意图(单位:mm)

Fig. 8 Schematic of explosion test in closed space (unit: mm)

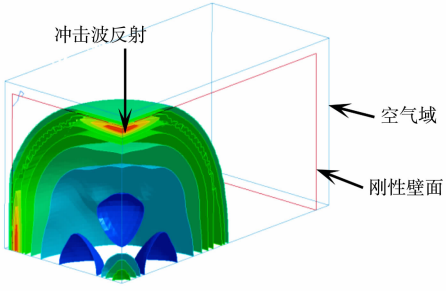
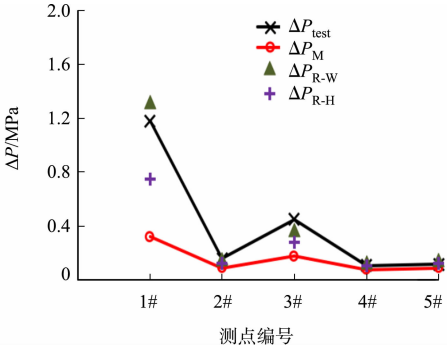
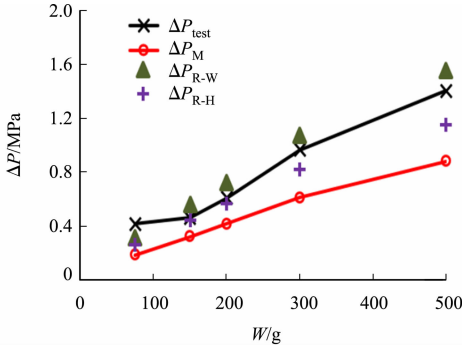


图 9 封闭空间内爆炸数值模型示意图

Fig. 9 Schematic of explosion numerical model in closed space



(a) 第一峰值(W=75 g)



(b) 最大峰值(2# 测点)

图 10 超压实测值与估算值的对比

Fig. 10 Comparison of overpressure test values and estimated values

验证了刚性壁面环境下的模拟超压值。对于考虑壁面刚度和壁面破坏等更为复杂情况下的超压场,修正公式的准确性还有待进一步验证。将实际壁面假设为刚性壁面进行模拟,由于未考虑壁面的耦合吸能,会使反射超压偏大,计算获得的超压场偏保守,因此,可以将其作为实际壁面环境下超压场的上限值。

4 结论

为了确定复杂环境下的爆炸超压场,提出利用粗网格建立低成本模型,再对模拟超压进行修正,以获得高精度超压的快速估算方法,得到以下 3 点结论。

1) 数值模拟获得的冲击波超压 ΔP_M 与 Henrych 公式的计算超压 ΔP_H 最接近。网格密度 λ 越小,超压模拟误差 δ 越大。总体而言, δ 随着比例距离 \bar{R} 的增大而减小,但当 λ 足够大,且 \bar{R} 增大到一定范围时, δ 将稳定地处于一个较低的水平。在相同的网格密度下,炸药质量的变化对 δ 影响很小。

2) 以 20% 作为误差限值,给出了网格密度下限值 λ_{lim} 的计算方法,可为比例距离 $\bar{R} > 0.3 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 范围内的爆炸数值模拟选定经济的网格尺寸提供参考。

3) 利用拟合的冲击波超压修正系数公式,能够有效地对网格密度小于 λ_{lim} 的粗网格模型进行超压修正,获得较为精确的估算超压。通过估算超压与理论值、试验实测值的对比,验证提出的超压估算方法是可行的,且可以大幅度降低计算成本,为复杂环境下的超压荷载计算提供参考。

参考文献:

[1] 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.

[2] FU Shiqi,GAO Xuanneng,CHEN Xin. The similarity law and its verification of cylindrical lattice shell model under internal explosion[J]. International Journal of Impact Engineering,2018,112:38-49. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2018.08.010.

[3] HAO Hong,HAO Yifei,LI Jun,et al. Review of the current practices in blast-resistant analysis and design of con-

- crete structures[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(8): 1193-1223. DOI:10.1177/1369433216656430.
- [4] LEN S. A brief introduction to coupling load blast enhanced with multi-material ALE; The best of both worlds for air blast simulation[J]. *German LS-DYNA Forum*, 2010, 2(3): 205-211.
- [5] 周云波,郭启涛,余磊,等. 基于 LBE 方法的驾驶室防护仿真[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(3): 237-241. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645. 2016. 03. 004.
- [6] ZHI Xudong, QI Shaobo, FAN Feng. Temporal and spatial pressure distribution characteristics of hemispherical shell structure subjected to external explosion[J]. *Thin Walled Structures*, 2019, 137: 472-486. DOI:10.1016/j.tws. 2019. 01. 021.
- [7] 高轩能,王书鹏,江媛. 爆炸荷载下大空间结构的冲击波压力场分布及泄爆措施研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(4): 226-233.
- [8] HENRYCH J, ABRAHAMSON G R. The dynamics of explosion and its use[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(1): 218-218. DOI:10.1115/1.3153619.
- [9] 吴彦捷,高轩能. 爆炸冲击波数值模拟及超压计算公式的修正[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(3): 321-326. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013. 2014. 03. 0321.
- [10] 杨涛春,罗尧治. 建筑抗爆研究中超压的分布特征及确定方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(2): 115-124. DOI:10.11835/j.issn.2096-6717. 2019. 151.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2014.
- [12] 张社荣,李宏璧,王高辉,等. 空中和水中爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸效应对比分析[J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 298-306. DOI:10.13243/j.cnki.slxb. 2015. 03. 006.
- [13] LUCCIONIC B, AMBROSINI D, DANESI R. Blast load assessment using hydrocodes[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(12): 1736-1744. DOI:10.1016/j.engstruct. 2006. 02. 016.
- [14] 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): 413-418. DOI:10.3969/j.issn.1009-3443. 2007. 05. 002.
- [15] DRAGANI H, VAREVAC D. Analysis of blast wave parameters depending on air mesh size[J]. *Shock and Vibration*, 2018(6): 1-18. DOI:10.1155/2018/3157457.
- [16] 石磊,杜修力,樊鑫. 爆炸冲击波数值计算网格划分方法研究[J]. *北京工业大学学报*, 2010, 36(11): 1465-1470.
- [17] 索强,徐鹏,尤文斌. 网格划分对冲击波波形的影响分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(2): 198-203. DOI:10.11809/bqzbgcxb2020. 02. 040.
- [18] 吴赛,赵均海,张冬芳,等. 自由空气中爆炸冲击波的数值分析[J]. *工程爆破*, 2019, 25(3): 1-6, 31. DOI:10.3969/j.issn.1006-7051. 2019. 03. 001.
- [19] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社, 1992.
- [20] 连赞猛. 典型密闭装置内爆炸试验及其数值模拟[D]. 南京:南京理工大学, 2013.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)