

网格划分对冲击波波形的影响分析

索强, 徐鹏, 尤文斌

引用本文:

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.

您可能感兴趣的其他文章

1. [冲击诱导CL-20/TNT含能共晶初始分解机制](#)

引用本文: 刘海, 李毅, 陈鸿, 等. 冲击诱导CL-20/TNT含能共晶初始分解机制[J]. [兵器装备工程学报](#), 2019, 40(6): 186–191.

2. [基于惯组实测数据的外挂导弹着陆冲击条件拟合方法](#)

引用本文: 王亮, 蔡毅鹏, 周剑波, 等. 基于惯组实测数据的外挂导弹着陆冲击条件拟合方法[J]. [兵器装备工程学报](#), 2017, 38(2): 18–22.

3. [水下近场爆炸冲击波作用下光测设备防护平台动态响应特性研究](#)

引用本文: 焦安龙, 高浩鹏, 张姝红. 水下近场爆炸冲击波作用下光测设备防护平台动态响应特性研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(9): 148–151.

4. [高速摄像防护结构抗水中爆炸冲击仿真研究](#)

引用本文: 张姝红, 陈高杰, 高浩鹏, 等. 高速摄像防护结构抗水中爆炸冲击仿真研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(5): 53–56.

5. [基于AUTODYN爆炸场三波点的数值模拟](#)

引用本文: 张学伦, 张团, 王昭明. 基于AUTODYN爆炸场三波点的数值模拟[J]. [兵器装备工程学报](#), 2015, 36(3): 17–19.

网格划分对冲击波波形的影响分析

索强^a, 徐鹏^a, 尤文斌^b

(中北大学 a. 理学院; b. 仪器与电子学院, 太原 030051)

摘要:使用 ANSYS/LS-DYNA 建立了 TNT 炸药在空气中爆炸的三维计算模型, 比较了不同网格划分比, 爆炸冲击波的结果。当网格划分为炸药体边长的 1/32 时, 模拟冲击波的各项参数与经验计算值的误差都小于 5%。在此基础上, 进行 TNT 炸药在空中爆炸的实验, 验证了本研究结论是正确性。

关键词:冲击波; 冲击波波形; 正压时间; 超压上升时间; 超压峰值; 爆炸实验

本文引用格式: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.

Citation format: SUO Qiang, XU Peng, YOU Wenbin. Analysis of Influence of Mesh Generation on Shock Wave Type[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(2): 198-203.

中图分类号: O382

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)02-0198-06

Analysis of Influence of Mesh Generation on Shock Wave Type

SUO Qiang^a, XU Peng^a, YOU Wenbin^b

(a. School of Science; b. School of Instruments and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: ANSYS/LS-DYNA was used to establish a three-dimensional calculation model of TNT explosive propagation in the air, and the results of blast wave of explosion were compared with those of different meshing proportions. It is found that when the mesh was divided into 1/32 of the side length of the explosive body, the error between the parameters of the simulated shock wave and the empirical calculation value was less than 5%. On this basis, TNT explosion in the air experiment was carried out, and the experiment was simulated. The conclusion of this paper was proved to be correct.

Key words: shock wave; shock wave type; positive pressure time; overpressure rise time; peak of overpressure; explosion experimental

冲击波超压是武器弹药最主要的毁伤元, 对绝大部分目标起主要毁伤作用, 冲击波效应一般以冲击波超压峰值、正压持续时间和比冲量进行表征, 通常关注的是冲击波各项参数中的某一项, 而冲击波的整体波形往往被忽略。事实上, 冲击波波形对毁伤过程的研究具有重要作用, 其直接与毁伤威力大小紧密相关。并且在对冲击波仿真计算分析时, 为简化计算, 往往将冲击波脉冲等效为三角波或矩形波, 冲击波波形也是压力简化参数设置的重要依据^[1]。对爆炸冲击波进行数值模拟时, 有限元网格尺寸对数值仿真的精度具

有很大的影响^[2-5]。目前, 已有部分学者提出或研究过爆炸波模拟中的网格尺寸效应。崔莹等通过开展钢管混凝土柱爆炸试验, 分析不同空气和炸药网格尺寸对冲击波传播及数值分析结果的影响, 最终确定网格尺寸为 20 mm 符合折合距离不超过 $1.1 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 试验条件下的爆炸数值模拟要求^[6]; Luccioni 等^[7]研究了利用流体力学软件模拟预测爆炸荷载时的网格尺寸效应, 认为 100 mm 的网格尺寸就可以较为精确的模拟爆炸荷载的传播规律, 而较粗的网格尺寸则仅仅可以用来定性的模拟爆炸荷载在城市复杂环境中的传播

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61701445)

作者简介: 索强(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸力学的研究, E-mail: 1203198455@qq.com。

通讯作者: 徐鹏(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事侵略、爆炸过程测试及其结构力学行为的计算机模拟研究, E-mail: xptj1972@163.com。

规律;石磊等^[8]研究了与炸药当量相关的网格划分方法,并应用有限元软件 LS-DYNA 进行了计算对比,结果表明按照 3/80 倍炸药体边长进行网格划分在计算精度与计算效率上取得了很好的平衡;可见,不同研究者在研究中使用的网格尺寸有较大差别且只关注冲击波的个别参数信息,对冲击波的波形关注不够,模拟结果的精度不够。已有文献对网格尺寸效应的研究往往针对某一特定情况,故提出的网格尺寸的使用有较大的局限性。而且,由于爆炸问题的复杂性,多数爆炸冲击波的网格效应的研究均集中在理论分析和数值模拟的对比上,缺乏有效的实验验证。

本研究运用 ANSYS/LS-DYNA 软件对炸药在空气中的爆炸进行模拟,对比分析不同网格尺寸对冲击波波形的影响,得出与经验计算误差小于 5%,并且计算时间合理的最佳网格划分尺寸。并进行爆炸实验,用本文得出的网格尺寸对实验进行模拟,与实验结果进行比较,模拟结果与实验结果的误差小于 5%,证明本文结果的正确性与适用性。

1 爆炸冲击波及其经验计算方法

自由空气中的理想冲击波超压曲线,如图 1 所示。在冲击波到达之前,该处的压力等于大气压力 P_0 ,压力经过时间 T_c 由大气压力突跃至最大值。压力最大值与 P_0 的差值,通常称为入射超压峰值 P_∞ 。波阵面通过后压力即迅速下降,经过时间 T_d ,压力经指数衰减到大气压力并继续下降,直至出现负超压峰值,在一定时间内又逐渐地回升到大气压力^[9]。

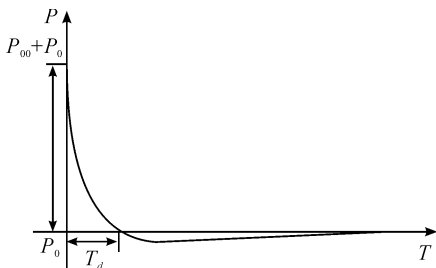


图 1 理想冲击波超压曲线

目前常用的方法,是用比例距离表达冲击波的各种参数。比例距离为 $Z = R/W^{1/3}$ 。其中, R 为测点与爆心之间的距离, W 为等效 TNT 药量^[10-13]。参照文献[8]和文献[9],选取以下经验公式。

Henrych 根据实验提出冲击波的超压峰值(MPa)表达式为:

$$P_\infty = \begin{cases} \frac{1.40717}{Z} + \frac{0.55397}{Z^2} - \frac{0.03572}{Z^3} + \frac{0.000625}{Z^4} & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ \frac{0.61938}{Z} - \frac{0.03262}{Z^2} + \frac{0.21324}{Z^3} & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{0.0662}{Z} + \frac{0.405}{Z^2} + \frac{0.3288}{Z^3} & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases} \quad (1)$$

Henrych 根据实验提出冲击波超压峰值(MPa)的表达式为:

$$\frac{T}{\sqrt[3]{W}} = 10^{-3} (0.107 + 0.444Z + 0.264Z^2 - 0.123Z^3 + 0.0334Z^4) \quad 0.05 \leq Z \leq 3 \quad (2)$$

Chengqing Wu 和 Hong Hao 给出了冲击波超压上升段(从大气压上升到峰值)持续时间的表达式为:

$$T_c = 0.0019Z^{0.13}C \quad (3)$$

萨多夫斯基建议爆炸冲击波超压持续时间为:

$$T_d = 1.35 \times 10^{-3} \times \sqrt[9]{W} \sqrt{R} \quad (4)$$

2 单元网格尺寸对爆炸冲击波波形的影响

分别取 0.84 kg, 13.12 kg, 105 kg 炸药作为计算模型,利用计算模型的对称性取 1/8 模型进行计算,对称面采用对称边界,非对称面采用透射边界,炸药和空气均采用 LS-DYNA Explicit 3D SOLID164 模型,炸药边长为 d , d 分别取 80 mm, 200 mm, 400 mm, 模型如图 2。当比例距离小于 1.3 时,网格尺寸对冲击波波形计算结果影响较大,这里计算并比较了比例距离小于 1.3 时的冲击波结果。

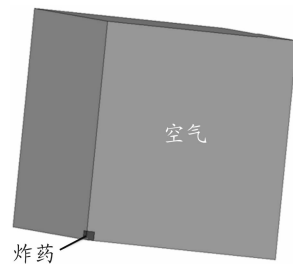


图 2 计算模型

2.1 材料的状态方程和参数

空气采用 *MAT_NULL 材料模型,压力 P 用线性多项式状态方程 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 来描述^[14]。

$$P = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + (C_4 + C_5 u + C_6 u^2) E \quad (6)$$

$$u = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

式中: E 为单位初始体积内能; ρ 为空气质量密度; ρ_0 为参考质量密度;线性多项式状态方程描述空气时遵守 γ 定律; V 为初始相对体积; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 为实常数。材料参数如表 1 所示。

炸药采用 ANSYS/LS-DYNA 中的 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,定义压力 P 为相对体积初始能量 E 的函数^[15]。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (7)$$

式中: V 为相对体积; E 为单位体积内能; A, B, R_1, R_2, ω 为表征炸药材料特性的常数。JWL 状态方程参数及炸药参数如表 2 所示。

通过对爆炸冲击波已有研究成果进行对比分析,参照文献[6-8]和文献[11-13],发现当冲击波超压峰值的误差较小时,网格划分在炸药体边长的1/8至炸药体边长的3/80之间。所以,本文模拟时的单元划分尺寸 w 分别采用1/4、1/8、1/16、1/32倍炸药体边长(d)。

表1 空气参数

C_0/Pa	C_1	C_2	C_3	C_4
-1×10^{-6}	0	0	0	0.4
C_5	C_6	E/Pa	V	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
0.4	0	0.25	1	1.2929×10^{-3}

表2 炸药参数

炸药密度 $R_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	爆速 $D/(\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	C-J爆压 P_{CJ}/MPa	A/ MPa	B/ MPa
1.64	0.693	0.27×10^5	3.71×10^5	3.23×10^3
R_1	R_2	w	E/MPa	V
4.15	0.95	0.35	0.8×10^5	1

2.2 模拟结果及分析

图3(a),图3(b),图3(c)分别是 $d=80\text{ mm}$, 200 mm , 400 mm 时,分别按照1/4、1/8、1/16、1/32倍炸药体边长 d 进行单元划分的超压峰值曲线,图4、图5分别为图3相对应的正压时间曲线和超压上升时间曲线。可以看出:①随着比

例距离的增大,超压峰值的模拟结果与式(1)之间的相对误差越来越小;②相同网格划分时,炸药的当量越大,在相同的比例距离,模拟结果的超压峰值相同,而超压上升时间和正压时间与式(3)和式(4)的误差越大;③爆炸冲击波的超压峰值,正压时间和超压上升时间随着单元尺寸的减小而越来越接近经验公式值,冲击波从平滑曲线变为上升和下降明显的三角形曲线;④在比例距离为0.1~0.2时,网格划分为1/16 d 的冲击波各项参数的误差都大于5%,发现当进一步划分网格至1/32 d 时,0.1~0.2比例距离的冲击波各项参数很接近经验公式,误差小于5%。导致这种情况的主要原因可能是当网格划分的单元比较大时,提取点距爆心的比例距离小于0.1,这导致了计算数值提取点与相应比例距离的偏差,而在0.1~0.2比例距离内冲击波高频分量作用显著,受爆心距影响非常明显,这种微小的偏差足以导致计算结果的巨大差异。当网格划分的单元比较小时,这种偏差也就减小了,计算结果将更为精确。

进一步探究网格划分对冲击波结果的影响,对比分析不同网格划分对冲击波模拟结果和经验公式的误差,确定准确的单元网格划分方法。图6为比例距离为0.2时,炸药体边长 d 分别为80 mm,200 mm,400 mm时,不同网格划分的冲击波超压峰值和式(1)的误差曲线。在网格划分小于1/27 d 以后,误差均小于5%,认为是符合模拟的精度要求的。图7为比例距离为0.3时, d 分别为80 mm,200 mm,400 mm时,不同网格划分的正压时间模拟结果和式(4)的误差曲线。在网格划分小于1/29 d 以后,误差均小于5%符合模拟精度要求。

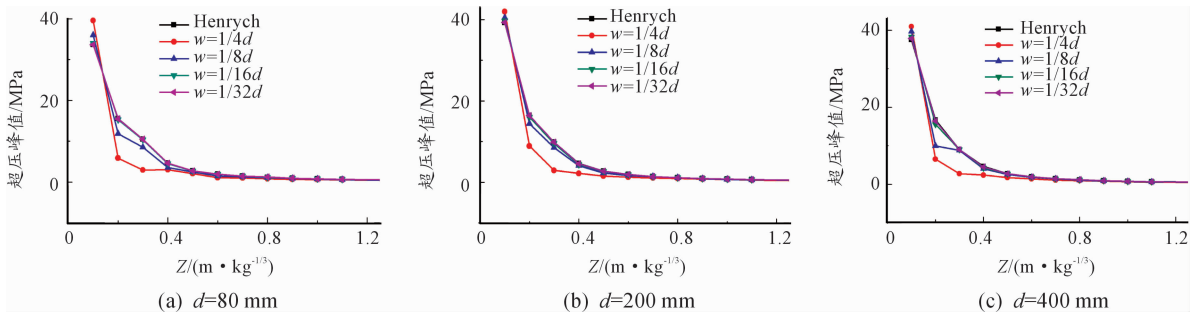


图3 不同当量炸药不同网格尺寸的超压峰值曲线

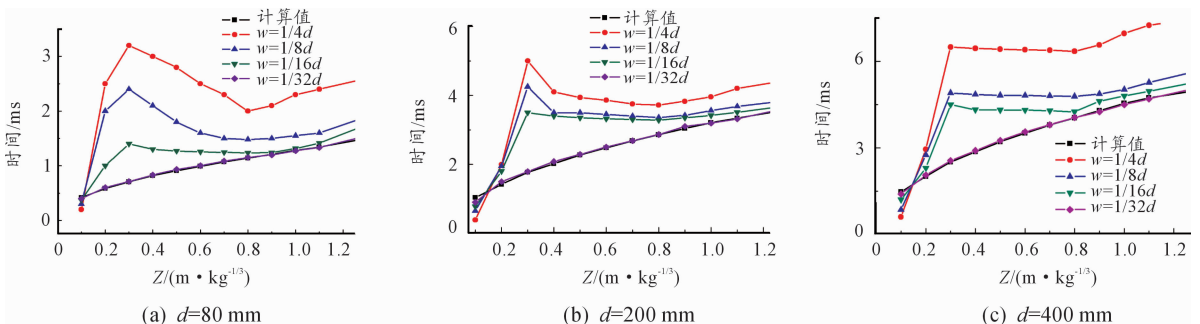


图4 不同当量炸药不同网格尺寸的正压时间曲线

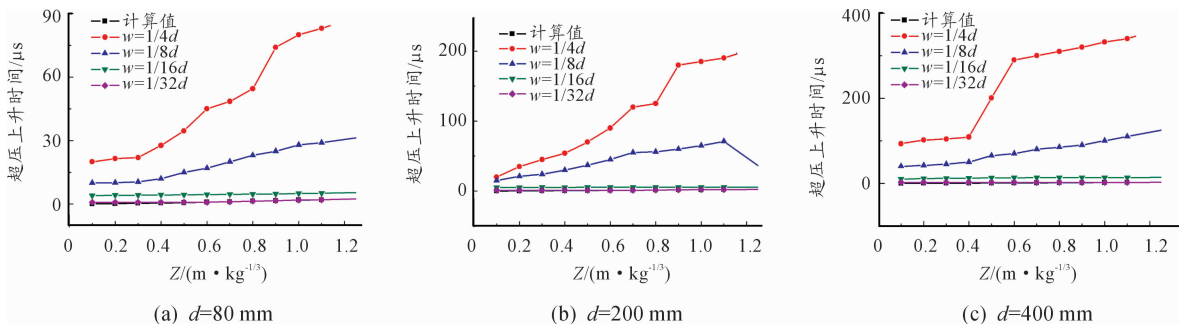


图5 不同当量炸药不同网格尺寸的超压上升时间曲线

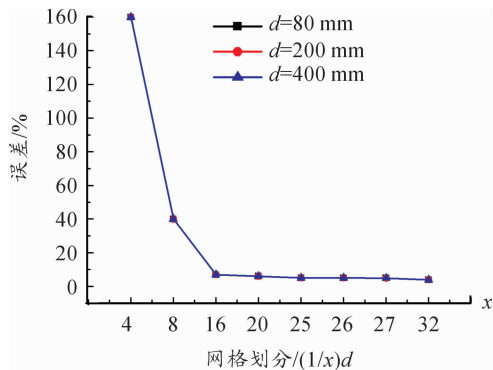


图6 不同网格划分的超压峰值和经验公式的误差曲线

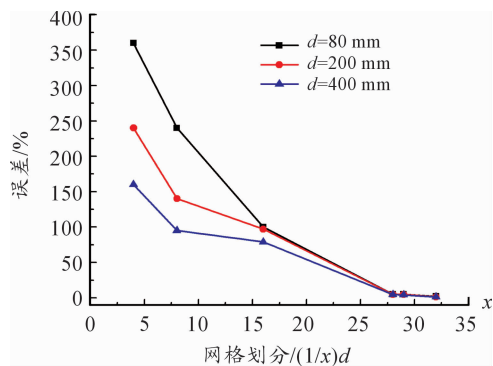


图7 不同网格划分的正压时间和经验公式的误差曲线

随着炸药当量的增大,相同网格划分的正压时间模拟结果和经验公式的误差逐渐减小。导致这种情况的主要原因可能是当炸药当量比较大时,相同比例距离的位置距离炸药的 实际距离较远,当单元比较小时,计算数值提取点与相应比例距离的偏差减小了,计算结果将更为精确。

图8为比例距离为0.2时, d 分别为80 mm,200 mm,400 mm时,不同网格划分的超压上升时间曲线和式(3)的误差曲线。在网格划分小于 $1/30d$ 以后,误差均小于5%,符合模拟的精度要求。但随着炸药当量的增大,相同网格划分的超压上升时间的模拟结果和经验公式的误差逐渐增大。于是进一步研究网格划分为炸药体边长的 $1/32$ 时,不同炸药

当量对模拟结果的影响,冲击波超压上升时间的模拟结果和式(3)的误差曲线如图9所示。可以得出:炸药质量在1 000 kg以内,网格划分为炸药体边长的 $1/32$ 时,模拟得到的冲击波各项参数都符合精度要求,冲击波的波形也符合精度要求。

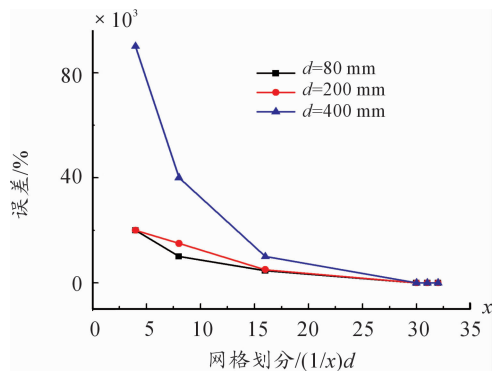


图8 不同网格划分的超压上升时间和经验公式的误差曲线

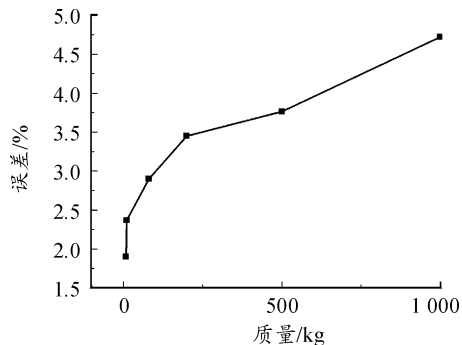


图9 不同炸药当量对模拟结果和经验公式的误差曲线

3 爆炸实验及对实验的模拟

3.1 实验样品和靶场布置

实验采用弹体进行试验,由于冲击波正压时间一般在从几毫秒到数十毫秒,上升前沿仅为数微秒,测试装置采用高频响测试系统,主要由压力传感器和瞬态数据采集仪组成。传感器选用美国PCB公司的压电式传感器113 A。实验样

品为弹药,等效 TNT 药量 m 为 515 kg,装药密度为 $1.64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,装药长径比为 1:1。传爆药为 JH-14,质量为 30 g,为减小冲击波能量对地作用损耗,采用 8 号铜雷管从装药底端起爆。

实验时,将弹药放在距地面 3 m 的支架上,以装药在地面上的垂直投影点为爆心,在爆心区周围 200 m 内无建筑物、较开阔的地面上布置地面传感器,如图 10 所示。压力传感器安装在 $\Phi 200 \text{ mm}$ 的钢质基础上,传感器敏感面与基准地面平齐安装并用土夯实进行防护,防止热及冲击振动干扰。实验现场布置如图 11 所示。

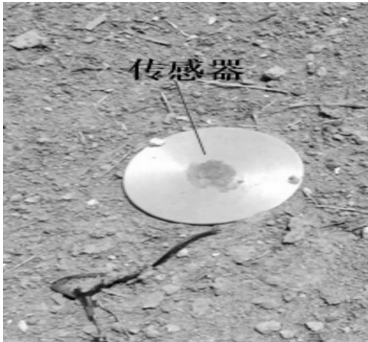


图 10 传感器

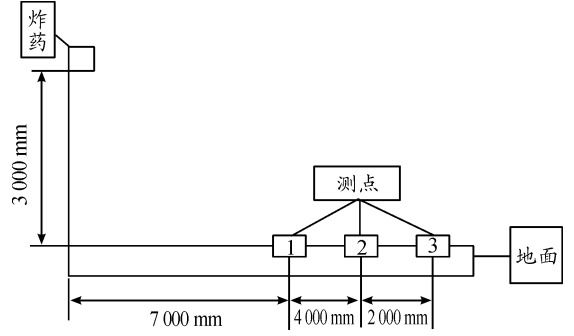


图 11 实验现场布置示意图

3.2 对实验的模拟

土选取 SOIL_AND_FOAM_FAILURE 材料模型,该模型在某些方面具有流体性质,其应用于土或泡沫被限制在结构中或有几何边界存在的情况下。压力是正压缩,在负压缩情况下,体积应变是相对体积的自然对数,相对体积是计算开始时当前体积与初始体积之比。其塑性屈服极限函数 φ 根据应力偏量第二不变量 J_2 描述^[16]。

$$\varphi = J_2 - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) \quad (8)$$

式中: $J_2 = S_{ij}S_{ij}/2$, a_0, a_1, a_2 为常数; p 为压力。主要材料参数参见表 3。

表 3 主要材料参数

ρ	G/GPa	B	a_0/GPa	a_1/GPa	a_2/GPa	P_e/GPa	C_{VCR1}	ϵ_{e2}^p
1.8	6.385×10^{-4}	0.3	3.4×10^{-13}	7.033×10^{-7}	0.3	-6.9×10^{-8}	0	-0.104
ϵ_{e3}^p	ϵ_{e4}^p	ϵ_{e5}^p	ϵ_{e6}^p	ϵ_{e7}^p	ϵ_{e8}^p	ϵ_{e9}^p	ϵ_{e10}^p	
-0.016	-0.192	-0.22	-0.246	-0.271	-0.283	-0.29	-0.4	
P_3/GPa	P_4/GPa	P_5/GPa	P_6/GPa	P_7/GPa	P_8/GPa	P_9/GPa	P_{10}/GPa	
4×10^{-4}	6×10^{-3}	1.2×10^{-3}	2×10^{-3}	4×10^{-3}	6×10^{-3}	8×10^{-3}	4×10^{-2}	

取 515 kg 炸药作为计算模型,利用计算模型的对称性取 1/8 模型进行计算,对称面采用对称边界,非对称面采用透射边界。炸药和空气均采用 LS-DYNA Explicit 3DSOLID164 模型,炸药边长为 680 mm,炸药离地 3 m,利用模型的对称性取 1/8 模型进行计算,网格划分为炸药体边长 d 的 1/32,模型如图 12。

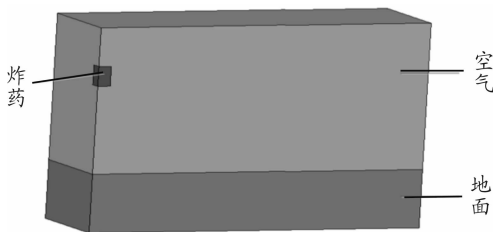


图 12 实验的模拟模型

3.3 模拟结果分析

爆炸实验的测点 1 处的实验结果如图 13 所示,图 14 为对应的模拟结果,表 4 列出了本次实验 3 个测点处冲击波的实验值,模拟值和计算值。

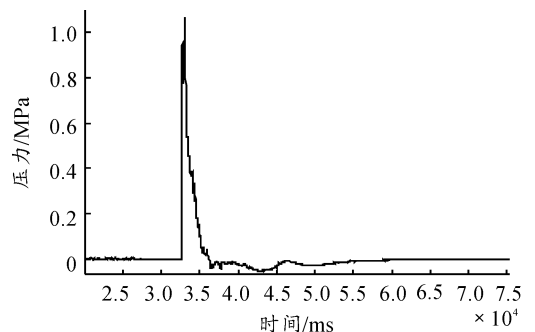


图 13 实验结果

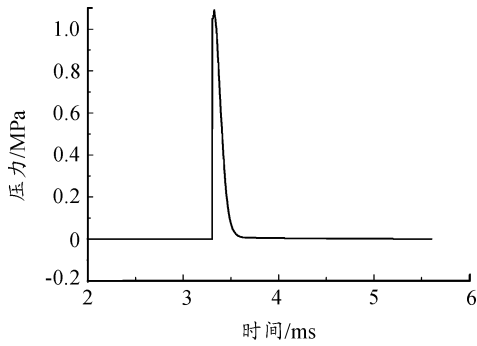


图 14 模拟结果

表 4 冲击波的实验值,模拟值和计算值的偏差分析

测点		超压峰值/MPa	正压时间/ms	超压上升时间/ μ s
1	经验计算值	1.086	1.588	1.800
	实验值	1.071	1.600	1.860
	模拟值	1.090	1.596	1.820
	实验和计算误差/%	1.381	1.247	3.330
	实验和模拟误差/%	1.800	0.232	2.150
2	经验计算值	0.400	1.928	3.020
	实验值	0.405	1.950	3.100
	模拟值	0.407	1.956	3.130
	实验和计算误差/%	1.235	1.128	2.580
	实验和模拟误差/%	1.720	0.307	0.968
3	经验计算值	0.276	2.088	3.750
	实验值	0.275	2.020	3.860
	模拟值	0.2790	2.940	3.800
	实验和计算误差/%	0.364	3.250	2.93
	实验和模拟误差/%	1.450	3.530	1.58

从表 4 可以看出,网格划分为炸药体边长 d 的 $1/32$ 时,模拟结果的各项参数对实验值和计算值的误差都小于 5%,实验结果和模拟结果的冲击波波形基本一致,能够满足模拟的精度要求。

4 结论

不同网格尺寸对冲击波波形有影响。网格尺寸过大时,压力小于真实值,随着网格的不断减小,超压峰值逐渐增大,接近真实值。在网格尺寸小于炸药体边长的 $1/27$ 后,超压峰值符合精度要求。网格尺寸越小,正压时间越小,越符合真实值。在网格尺寸小于炸药体边长的 $1/29$ 后,正压时间符合精度要求。网格尺寸越小,超压上升时间越小,越符合真实值。在网格尺寸小于炸药体边长的 $1/32$ 后,超压上升时间符合精度要求。数值模拟与实验值和理论值的误差随着网格的减小而不断减小,冲击波波形从平缓曲线变为上升段和下降段明显的三角形曲线。实验结果表明,在炸药小于 1 000 kg,单元网格划分小于炸药体边长的 $1/32$ 时,模拟结果与计算结果,模拟结果和实验结果的各项参数误差都小于 5%。

参考文献:

- [1] 姬建荣,苏健军,张玉磊,等.不同量级 TNT 爆炸冲击波正压时间的试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(5):202-206.
- [2] HASHEMI S K, BRADFORD M A. Numerical Simulation of Free-Air Explosion Using LS-DYNA[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 553(2014): 780-785.
- [3] YANCHAO S, ZHANGXIAN L I, HONG H. Mesh size effect in numerical simulation of blast wave propagation and interaction with structures[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(6): 396-402.
- [4] 高轩能,刘颖,王书鹏.基于 LS-DYNA 的大空间柱壳结构爆炸波压力场分析[J].振动与冲击,2011,30(9):70-75.
- [5] 任朋飞,王显会,张进成,等.刚性地面爆炸冲击场仿真与试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(21):30-36.
- [6] 崔莹,赵均海,张常光,等.基于爆炸试验的冲击波传播网格划分效应研究[EB/OL]. [2013-10-31]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201310-435>.
- [7] LUCCIONI B, AMBROSINI D, DANESI R. Blast load assessment using hydrocodes [J]. Engineering Structures, 2006, 28(12): 1736-1744.
- [8] 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):1465-1466.
- [9] 杨鑫,石少卿,程鹏飞,等.爆炸冲击波在空气中传播规律的经验公式对比及数值模拟[J].四川建筑,2007,27(5):71-73.
- [10] 杨坤,陈朗,伍俊英,等.计算网格与人工粘性系数对炸药水中爆炸数值模拟计算的影响分析[J].兵工学报,2014(s2):237-243.
- [11] 张社荣,李宏璧,王高辉,等.水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸确定方法[J].振动与冲击,2015,34(8):93-100.
- [12] 胡兆颖,唐德高.空气中 TNT 爆炸的数值模拟[J].爆破,2014,31(4):41-45.
- [13] 姜浩然,胡晶,梁向前,等.超重力场下球形炸药水下爆炸实验及数值模拟[J].工程爆破,2017,23(3):15-21.
- [14] 杜欣新,毛磊.网格划分影响二维爆炸冲击波数值模拟精度的研究[J].天津城建大学学报,2013(4):277-279.
- [15] 仲倩,王伯良,黄菊,等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J].火炸药学报,2010,33(4):32-35.
- [16] 李顺波,东兆星,齐燕军,等.爆炸冲击波在不同介质中传播衰减规律的数值模拟[J].振动与冲击,2009,28(7):115-117.