

典型密闭装置内爆炸尺寸效应研究*

连贇猛^① 方道红^② 顾晓辉^① 刘 帅^① 邵苗苗^①
①南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)
②中国人民解放军 78666 部队(云南宜良,652102)

[摘 要] 为研究密闭装置内爆炸冲击波的传播规律及密闭装置尺寸效应对冲击波超压空间分布和爆炸荷载特征参数的影响,在混凝土密闭装置内爆炸试验的基础上,结合 LS—DYNA 有限元程序对不同尺寸的装置内爆炸进行数值模拟。结果表明:密闭装置内爆炸超压时程曲线大多呈现多峰特性,装置顶角、棱线附近超压曲线的周期宏观脉动现象比较明显,超压衰减缓慢;当结构长宽比例 $1.2 \leq L:W \leq 3$ 时,结构对冲击波的约束不是很明显,冲击波超压空间分布比较有规律;而当 $L:W > 3$ 时,结构对冲击波的约束表现得异常明显,冲击波超压空间分布规律不显著。对于 5 种不同尺寸的装置内爆炸,当比例距离 $2.134 \text{ m/kg}^{1/3} \leq \bar{r} \leq 3.201 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,冲击波流场异常复杂且超压曲线多峰特性开始凸显,不能用简单的数学关系来描述冲击波的空间分布。

[关键词] 尺寸效应 内爆炸 冲击波 密闭装置 数值模拟

[分类号] O383 TJ510.3

引言

近些年,国内外大批学者对密闭结构内爆炸做了大量的研究,但是对于密闭结构尺寸效应对冲击波空间分布的影响研究较少。其中,陈剑杰等^[1]概述了内爆炸作用下密闭结构的尺寸效应对结构抗爆性能和准静态气体压力的影响。曲树盛、Zhang 等^[2-3]分别对地铁车站内爆炸和管道内的瓦斯爆炸进行数值模拟,结果表明:结构尺寸效应不仅影响冲击波超压分布,而且波形也存在差异。本文采用实验与仿真相结合的手段,研究冲击波在密闭结构中的传播规律和结构尺寸效应对冲击波的空间分布的影响。

1 内爆炸试验

试验装置为 C35 级混凝土密闭长方体,内腔长、宽、高的尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,即长宽比例 $L:W=2:1$,壁厚为 150mm。在

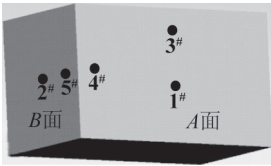


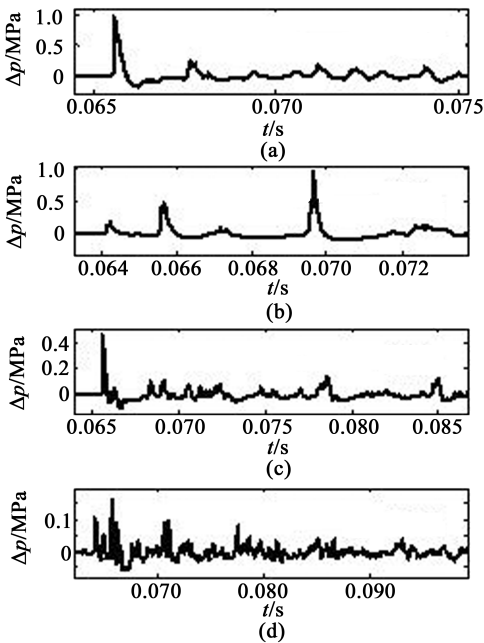
图 1 混凝土装置测点布置图

相邻两堵墙上共设置 5 个测点,用于安装压力传感器,测点布置如图 1 所示。在装置的顶面设置一个装药安装孔,装药中心位于装置的几何中心,距顶板内表面 750mm 处;采用 TNT 圆柱形装药,装药密度为 1.46 g/cm^3 。主要测试系统由压力传感器、工装

压力测试仪及计算机系统组成。

2 试验结果

试验采取药量递增的方式,先从小药量开始,后面药量的增加和试验次数根据实际试验结果及装置的破坏情况来决定。其中 75g 药量试验 3 次,装置基本保持完好。限于篇幅,本文只列出其中一发 75g 药量下 4 个测点的超压时程曲线,如图 2 所示。



(a) 测点 1; (b) 测点 2; (c) 测点 3; (d) 测点 4
图 2 75g 药量各测点超压波形

* 收稿日期:2012-05-06
基金项目:基础产品创新计划火炸药科研专项
作者简介:连贇猛(1984~),男,硕士,研究方向为终点效应与目标毁伤技术、爆炸力学、可靠性分析。E-mail:pyypresents@yahoo.com
通讯作者:顾晓辉(1964~),男,教授,博导,研究方向为弹药系统工程、灵巧与智能弹药设计、弹药测试技术、目标识别与跟踪、智能控制、计算机控制与应用等。E-mail:gxiaohui@mail.njust.edu.cn

由于第 5 个测点的超压波形图与测点 4 基本相似,在此略去图形。

由图 2 可以看出:1) 测点 1 超压时程曲线只有一个峰值较大的初始脉冲,正压持续时间为 400 μs 左右。2) 测点 2 超压时程曲线呈现 4 个脉冲,且第 4 个脉冲峰值最大。主要原因在于密闭结构狭长,冲击波经过多次反射后汇聚于 B 面,直接导致第 4 个峰值大于首个超压峰值。3) 测点 3、测点 4 和测点 5 位于装置棱线附近,因为冲击波的汇聚作用,冲击波超压多呈现多峰特性,宏观脉动现象明显,且测点 4 和测点 5 的首个脉冲超压峰值并不是最大的。

3 数值模拟

3.1 建模分析

建立与试验装置尺寸相同的有限元模型(为方便下节叙述,记为模型 2),考虑装置的对称性和测点的位置,选取装置的 1/8 实体建模,对称面施加位移约束。炸药和空气两种材料采用欧拉网格建模,单元使用多物质 ALE 算法^[4]。由于在本次试验过程中,75g 药量时装置并未被破坏,因此忽略钢筋混凝土的变形吸能作用,将钢筋混凝土简化为刚体模型。结构与炸药和空气之间采用流固耦合算法,装药通过关键字 * INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 在计算初始化阶段填充到空气单元中去,从而可以简化建模过程^[5]。

3.2 材料模型及参数的确定

TNT 装药采用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料模型,装药密度 $\rho = 1.46\text{g/cm}^3$,爆速 $D = 0.693\text{cm}/\mu\text{s}$ 。爆轰产物的压力与爆轰产物相对比容和比内能之间的关系采用 JWL 状态方程表示,具体形式为^[6]:

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

式中: $A = 374\text{GPa}$ 、 $B = 3.2\text{GPa}$ 、 $R_1 = 4.20$ 、 $R_2 = 0.95$ 、 $\omega = 0.30$ 为状态方程参数; V 为爆轰产物的相对比容; $E = 8.0\text{GPa}$ 为爆轰产物的比内能。

空气采用 * MAT_NULL 材料模型和多项式状态方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 来描述,其表达式为: $p = (\gamma - 1) \rho E / \rho_0$; 空气初始密度 $\rho_0 = 1.29 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$; 绝热指数 $\gamma = 1.4$, 初始能量密度 E 取 0.25MPa ; ρ 为空气当前密度。

3.3 计算结果分析

3.3.1 冲击波传播状态

冲击波的传播状态如图 3 所示。

1) 炸药起爆后,在未与装置内壁接触前,爆炸冲击波迅速向外膨胀^[7-8],见图3(a); $t = 750\mu\text{s}$ 时,冲

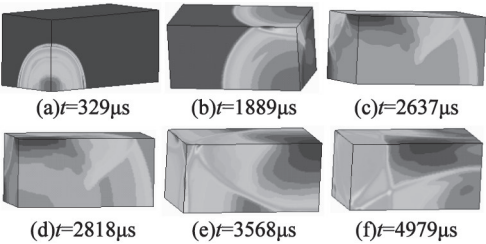


图 3 75g 装药中心内爆不同时刻爆炸冲击波

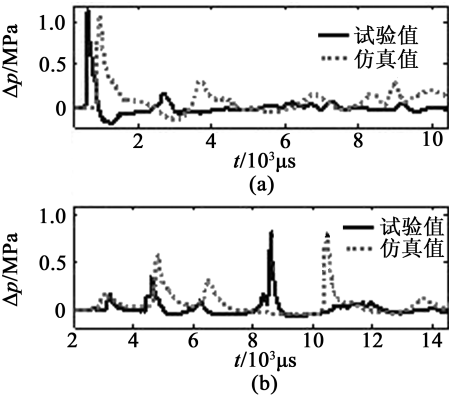
击波到达 A 面并形成正反射,随后,冲击波在装置内多次反射,沿装置长度方向传播,由图 3(b)可以看出,在传播过程中,冲击波在棱线附近汇聚;并在 $t = 2637\mu\text{s}$ 的时候形成较明显的马赫波^[9],如图 3(c)所示。2) $t = 2818\mu\text{s}$ 时,冲击波到达 B 面,并发生正反射,如图 3(d);随着时间的推移,冲击波逐步汇聚于 B 面、B 面与 A 面相交棱线附近,如图 3(e)、(f)所示;作用时间较长,说明了冲击波超压曲线在棱线附近的多峰特性和宏观脉动现象。

3.3.2 与试验结果的比较

表 1 列出仿真的首个脉冲超压和最大脉冲超压,与 3 发 75g 药量试验平均值的对比和相对误差。图 4 为试验平均值超压曲线与数值模拟仿真对应测点的超压曲线对比;由图 4(a)可见,测点 1 数值模拟值与试验值都只有一个峰值较大的初始脉冲;由图 4(b)可以看出,测点 2 的仿真超压曲线也出现 4 个脉冲,且第 4 个脉冲峰值最大;从整体上来看,仿真值低于试验值,仿真脉冲时间滞后于实验脉冲;测点 1 对应的误差比测点 2 的要大,因为爆炸冲击波

表 1 试验值与仿真值对比

测点	首个脉冲峰值/MPa			最大脉冲峰值/MPa		
	试验均值	仿真值	误差/%	试验均值	仿真值	误差/%
1	1.150	1.080	6	1.150	1.080	6
2	0.157	0.149	5	0.806	0.789	2



(a) 测点 1; (b) 测点 2

图 4 75g 药量试验与模拟超压曲线对比

峰值的比例距离越大,网格尺寸敏感性越差^[10]。

由以上分析,数值模拟能较好地反应出试验的实际情况,因此在数值模拟分析密闭结构尺寸效应对冲击波的空间分布的影响时,均采用与模型 2 相同的参数,以保证计算精度。

4 结构尺寸效应对超压空间分布的影响

除了以上已经建立的实际尺寸模型(模型 2),保持模型长度尺寸 3m 不变,缩小或放大高、宽尺寸,再分别建立了 4 种不同尺寸的模型:模型 0、模型 1、模型 3、模型 4,内腔长宽(高)比例 $L:W$ 分别为 3.0:0.7、3.0:1.0、3.0:2.0、3.0:2.5。

分别对模型 0、1、2、3、4 沿爆心与测点 2 的连线每隔 0.15m 取一个超压参考点,考虑到比例距离小于 0.5m/kg^{1/3} 时,空气冲击波和爆轰产物膨胀界面可能没有完全分离^[11-13],因此,参考点 1 的爆心距为 0.45 m,对应比例距离为 1.067m/kg^{1/3};共取 7 个参考点,依次记为 1,2,⋯,7。

根据表 2 列出的数据,对模型 0、1、2、3、4 分别建立最大超压峰值和首个脉冲峰值随比例距离变化的数学关系;采用 matlab 对数据进行处理和分析,得到首个脉冲超压峰值 (Δp_i) 和最大超压峰值 (Δp_{\max}) 随比例距离 (\bar{r}) 的变化关系,如图 5 和图 6 所

示,对应数学模型如式(2)、式(3);式中 R^2 表示数据拟合相关系数均方值。

$$\Delta p_i = \begin{cases} \text{无确切数学关系} & \text{模型 0} \\ 0.8016\bar{r}^{-2.0413} (R^2 = 0.999) & \text{模型 1} \\ 0.9303\bar{r}^{-2.0776} (R^2 = 0.999) & \text{模型 2} \\ 0.9351\bar{r}^{-2.1895} (R^2 = 0.998) & \text{模型 3} \\ 0.7592\bar{r}^{-2.012} (R^2 = 0.999) & \text{模型 4} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta p_{\max} = \begin{cases} 1.1657\bar{r}^{-1.2188} & 1.067 \leq \bar{r} \leq 2.134 (R^2 = 0.992) \\ \text{无确切数学关系} & 2.134 < \bar{r} \leq 3.201 \quad \text{模型 0} \\ 0.7376\bar{r}^{-1.6790} & 1.067 \leq \bar{r} \leq 2.134 (R^2 = 0.976) \\ \text{无确切数学关系} & 2.134 < \bar{r} \leq 3.201 \quad \text{模型 1} \\ 0.9186\bar{r}^{-2.0291} & 1.067 \leq \bar{r} \leq 2.134 (R^2 = 0.998) \\ \text{无确切数学关系} & 2.134 < \bar{r} \leq 3.201 \quad \text{模型 2} \\ 0.9282\bar{r}^{-2.0842} & 1.067 \leq \bar{r} \leq 2.134 (R^2 = 0.988) \\ \text{无确切数学关系} & 2.134 < \bar{r} \leq 3.201 \quad \text{模型 3} \\ 0.684\bar{r}^{-1.5690} & 1.067 \leq \bar{r} \leq 2.134 (R^2 = 0.956) \\ \text{无确切数学关系} & 2.134 < \bar{r} \leq 3.201 \quad \text{模型 4} \end{cases} \quad (3)$$

由图 5 和式(2),模型 1、2、3、4 的首个超压峰值随比例距离的增大而按照幂函数规律衰减,衰减指数约为 2,这 4 种模型呈现出很强的规律性和相似性;首个脉冲超压峰值沿长度方向受到结构的影

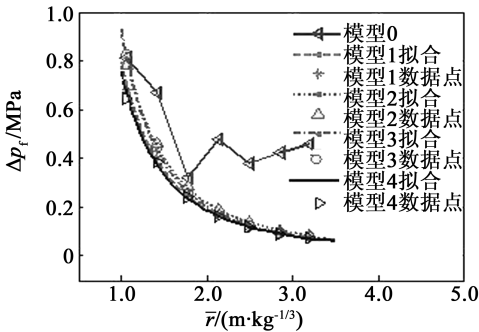


图 5 首个脉冲超压与比例距离的关系

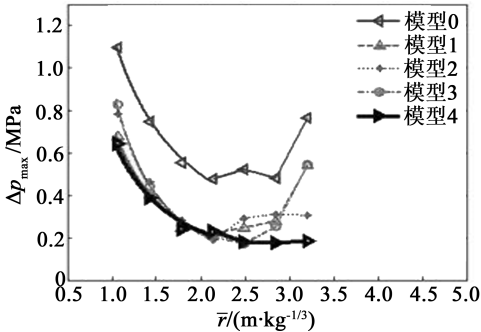


图 6 最大超压与比例距离的关系

表 2 5 种模型的最大超压峰值和首个脉冲峰值

参 考 点	爆心 距/m	比例距离/ (m · kg ^{-1/3})	模型 0		模型 1		模型 2		模型 3		模型 4	
			首个脉 冲峰值 /MPa	最大超 压峰值 /MPa	首个脉 冲峰值 /MPa	最大超 压峰值 /MPa	首个脉 冲峰值 /MPa	最大超 压峰值 /MPa	首个脉 冲峰值 /MPa	最大超 压峰值 /MPa	首个脉 冲峰值 /MPa	最大超 压峰值 /MPa
1	0.45	1.067	0.8171	1.0970	0.6810	0.6810	0.7862	0.7862	0.8312	0.8312	0.6452	0.6452
2	0.60	1.423	0.6709	0.7477	0.4075	0.4075	0.4668	0.4668	0.4449	0.4449	0.3876	0.3876
3	0.75	1.778	0.3204	0.5563	0.2519	0.2519	0.2873	0.2873	0.2547	0.2547	0.2428	0.2428
4	0.90	2.134	0.4788	0.4788	0.1685	0.2238	0.1914	0.1934	0.1706	0.2049	0.1648	0.2310
5	1.05	2.490	0.3831	0.5252	0.1216	0.2507	0.1369	0.2962	0.1221	0.1742	0.1196	0.1840
6	1.20	2.850	0.4240	0.4828	0.0939	0.2806	0.1046	0.3116	0.0944	0.2529	0.0911	0.1768
7	1.35	3.201	0.4581	0.7655	0.0755	0.5410	0.0839	0.3092	0.0783	0.5481	0.0734	0.1851
8	1.50	3.557	3.3460	3.3460	0.1417	0.9762	0.1393	0.9526	0.1579	0.8614	0.1370	0.3131

响较小。模型 0 的首个脉冲超压峰值并没有随比例距离的增加而逐渐衰减,数据变化分散,可见,对于 $L:W>3$ 的密闭装置,其冲击波传播和流场分布受结构的约束表现得非常明显。

由图 6 和式(3),5 种模型的最大超压峰值沿轴向的分布按照比例距离的不同分段来表示,当 $\bar{r}<2.134\text{m/kg}^{1/3}$ 时,最大超压都按照幂函数规律衰减;当 $\bar{r}=2.134\text{m/kg}^{1/3}$ 时,首个脉冲超压峰开始出现了多峰特性;当 $\bar{r}>2.134\text{m/kg}^{1/3}$ 时,随着比例距离的增加,冲击波流场开始受到结构的约束,而且最大超压随比例距离的增加总体上呈现上升趋势;只有模型 4 因为密闭空间大,最大超压随比例距离的变化不明显,且 5 种模型的最大超压峰值随比例距离的变化关系很难用数学关系来描述。

5 结论

1) 采用试验与仿真相结合的手段,分析密闭装置内爆炸冲击波的传播规律和结构尺寸效应对冲击波空间分布的影响;数值模拟结果与试验结果吻合。

2) 当密闭结构长宽(高)比例 $1.2\leq L:W\leq 3$ 时,结构对冲击波约束不明显,首个脉冲超压随比例距离的增大按幂函数规律衰减,衰减指数约为 2,最大脉冲超压与比例距离 \bar{r} 的关系则分段表示:当 $1.067\text{m/kg}^{1/3}\leq\bar{r}\leq 2.134\text{m/kg}^{1/3}$ 时,最大脉冲超压随比例距离的增大按照幂函数规律衰减; $2.134\text{m/kg}^{1/3}\leq\bar{r}\leq 3.201\text{m/kg}^{1/3}$ 时,冲击波流场异常复杂,且超压曲线多峰特性开始凸显,不能用简单的数学关系来描述冲击波的空间分布。

参 考 文 献

[1] 陈剑杰,钱七虎. 密闭结构在近距离内部爆炸波作用

下的抗爆性能研究新进展[C]. 上海:同济大学出版社,2006:807-812.

[2] 曲树盛,李忠献. 地铁车站内爆炸波的传播规律与超压荷载[J]. 工程力学,2010,27(9):240-247.

[3] Zhang Q., Pang L., Liang H. M. Effect of Scale on the Explosion of Methane in Air and Its Shockwave[J]. J. Loss. Prevent. Proc., 2011,24(1):43-48.

[4] 饶国宁,陈网桦,王立峰. 内部爆炸荷载作用下容器动力响应的数值模拟[J]. 中国安全科学学报,2007,17(2):129-133.

[5] 成凤生,顾晓辉,曾星星,等. TNT 装药爆炸波在刚性平面上方传播反射的数值研究[J]. 爆破器材,2011,40(4):1-4.

[6] 赵铮,陶钢,杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报,2009,23(4):277-282.

[7] 黄寅生. 炸药理论[M]. 北京:兵器工业出版社,2009:230-235.

[8] 宁建国,王成,马天宝. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2010:110-120.

[9] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社,1992:280-285.

[10] 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):1665-1670.

[11] 张德志,李焰,王等旺,等. 球型装药近距离爆炸正反射冲击波实验研究[J]. 兵工学报,2009,30(12):1663-1667.

[12] 宋克健,龙源,胡新印,等. 装药结构对药孔爆破初始压力及能量利用率的影响[J]. 爆破器材,2011,40(3):1-3.

[13] 王神送,张立,程宏兵. 装药密度对空气冲击波参数影响的实验研究[J]. 爆破器材,2010,39(1):4-7.

Effect of Scales on Typical Closed Structure Due to Internal Explosion

LIAN Yunmeng^①, FANG Daohong^②, GU Xiaohui^①, LIU Shuai^①, SHAO Miaomiao^①

①School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②No.78666 Unit of PLA. China(Yunnan Yiliang,652102)

[ABSTRACT] To study the propagation law of shockwave and the effect of scale effects of closed structure on the distribution of shockwave and characteristic parameters of blasting loading due to internal explosion, internal explosion experiment in the reinforced concrete is carried out in this issue. Based on the experiment, explosion in the closed structure with five types of different scales is simulated with LS-DYNA software. The results indicate that overpressure histories obtained by experiment and simulation both have many peaks; and the periodically macro fluctuation of overpressure histories are evidently at the corner and across of two walls in the structure. The shockwave in the closed structure is of a slower attenuation. Shockwave distribution in the space is regular when the ratio of length and width ($L:W$) of the structure is between 1.2 and 3. When $L:W>3$, shockwave is confined evidently and distributed erratically. For the explosion inside the structure with five types of different scales, the shockwave is complex and the overpressure histories start to have many peaks when the scaled distance is $2.134\text{m/kg}^{1/3}\leq\bar{r}\leq 3.201\text{m/kg}^{1/3}$, the distribution of shockwave can not be expressed mathematically.

[KEY WORDS] scale effects, internal explosion, shockwave, closed structure, numerical simulation