

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.03.005

# 封闭空间内爆炸冲击波超压计算模型 及分布特性研究\*

柏小娜 李向东 杨亚东

南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室(江苏南京,210094)

[摘 要] 建立了封闭空间内爆炸的冲击波超压计算模型,将冲击波在不同壁面的反射冲击波等效为不同位置镜像爆源产生的入射冲击波,密闭空间内冲击波传播和作用过程等效为爆源与镜像爆源形成冲击波相互叠加的过程,基于 LAMB 规则,将所有爆源和镜像爆源的冲击波叠加,从而得到封闭空间内任意位置处的超压,并进行了结构内爆炸试验。研究表明,装药在封闭空间内爆炸超压呈现多峰性,典型位置处的计算超压时程曲线与试验超压时程曲线符合较好,峰值超压的计算误差小于 10.78%,所建模型正确,能够用于内爆炸载荷的快速计算。

[关键词] 爆炸力学;内爆炸;冲击波超压;计算模型;镜像爆源

[分类号] O383+.2; TJ510.6

## 引言

近年来,很多学者对密闭结构内爆炸进行了大量的试验研究,但主要集中在对超压峰值、冲击波的传播规律<sup>[1-5]</sup>以及内爆炸冲击波对建筑结构破坏效应的数值计算和试验研究<sup>[6-8]</sup>,对封闭空间内爆炸毁伤参量的理论预测模型以及毁伤参量的分布规律等方面的研究还不够深入。

本文基于建立装药在密闭空间内爆炸的冲击波超压的解析计算模型,将冲击波在不同壁面的反射冲击波等效为不同位置镜像爆源产生的入射冲击波,将密闭空间内冲击波传播及相互作用的过程等效为爆源及其镜像爆源相互叠加的过程,使用 LAMB 规则(low altitude multiple burst model),得到封闭空间内任意位置处的压力载荷,并进行内爆炸试验及压力测试,检验该计算模型的正确性。

### 1 封闭空间内爆炸形成的入射波与反射波

炸药在封闭空间内爆炸后,形成冲击波向四周传播,当遇到壁面时反射形成反射冲击波,这些反射波及入射波相互叠加,使空间内的压力异常复杂。

#### 1.1 入射波特性

为了描述冲击波的传播,以建筑物几何中心为原点,建筑物的长、宽方向分别为  $x$ 、 $y$  轴,高度方向为  $z$  轴,建立如图 1 所示的右手直角坐标系。

若炸药在位置  $Z(x_b, y_b, z_b)$  处爆炸,则建筑物内

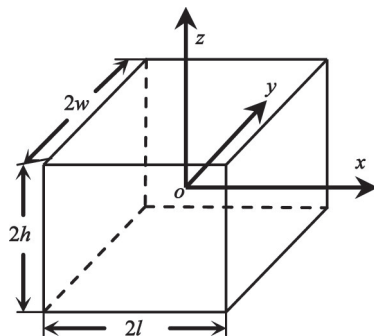


图 1 坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate system

任意位置  $(x, y, z)$  处的峰值超压为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta p_m(x, y, z) = p_s^+ - p_0 = \bar{A} \cdot W^{\frac{2}{3}} R^{-2} = \bar{A} \cdot W^{\frac{2}{3}} [(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 + (z - z_b)^2]^{-1}. \quad (1)$$

式中:  $p_0$  为波阵面前面气体压力;  $p_s^+$  为冲击波峰值压力;  $R$  为所选位置到炸点处的距离;  $\bar{A}$  为常数<sup>[10]</sup>;  $W$  为 TNT 装药质量。

式(1)的计算精度关键在于常数  $\bar{A}$  的取值,不同装药的  $\bar{A}$  值不同。本文采用 TNT 裸装药爆炸试验测试,并对测试结果进行拟合,取  $\bar{A} = 10.54 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2/3}$ ,由式(1)可以得到距爆心不同距离处超压的较精确计算值。

此位置处正压区不同时刻的超压为<sup>[9]</sup>:

\* 收稿日期:2014-09-23

基金项目:国家自然科学基金(51278250)

作者简介:柏小娜(1990~),女,硕士研究生,研究方向为终点效应及目标易损性。E-mail:bai\_xn2014@163.com

通讯作者:李向东(1969~),男,教授,主要从事终点效应及目标易损性研究。E-mail:lixiangdong692003@aliyun.com

$$\Delta p(x, y, z, t) = \Delta p_m(x, y, z) \left( 1 - \frac{t - t_a}{t_d} \right) e^{-\frac{t - t_a}{t_d}} \quad (2)$$

$$(t_a \leq t \leq t_a + t_d)。$$

式中:  $\Delta p(x, y, z, t)$  为  $t$  时刻(假设爆炸时刻为 0 时刻)冲击波波阵面压力;  $t_d$  是冲击波在距离  $R$  处的正压作用时间;  $\alpha$  为超压衰减系数, 由图 2 确定。

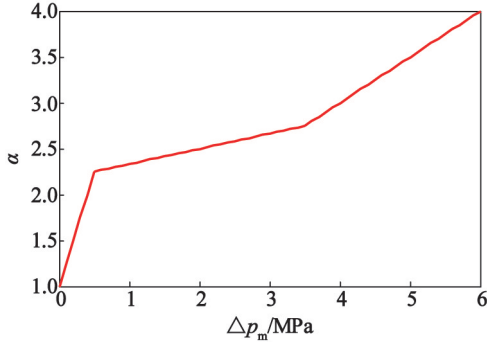


图 2 冲击波衰减系数  $\alpha$  与峰值超压  $\Delta p_m$  的关系

Fig. 2 Relationship between attenuation coefficient  $\alpha$  and peak overpressure  $\Delta p_m$  of the shock wave

$t_a$  为冲击波波阵面传播距离  $R$  所用的时间, 可由式(3)计算<sup>[9]</sup>:

$$t_a = \frac{1}{a_x} \int_{r_0}^R \left( \frac{7p_0}{7p_0 + 6\Delta p_m} \right)^{\frac{1}{2}} dR. \quad (3)$$

式中:  $r_0$  为炸药装药半径, m;  $a_x$  为该位置处的空气音速, m/s。

正压作用时间  $t_d$  的表达式为<sup>[11]</sup>:

$$t_d = B \cdot W^{\frac{1}{6}} \cdot R^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

式中:  $B$  为系数,  $B = 1.3 \times 10^{-3} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/2} \cdot \text{kg}^{-1/6}$ 。

冲击波波阵面后面的质点运动速度矢量  $u$  的方向由波源指向观测点, 大小可通过式(5)计算<sup>[9]</sup>:

$$u = \frac{a_0 \Delta p}{\gamma p_0} \left( 1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

通过峰值压力建立波阵面后空气密度  $\rho$  及波阵面前空气密度  $\rho_0$  的联系, 得  $\rho$  的表达式<sup>[9]</sup>:

$$\rho = \rho_0 \frac{2\gamma p_0 + (\gamma + 1)\Delta p}{2\gamma p_0 + (\gamma - 1)\Delta p}. \quad (6)$$

式(5)和式(6)中:  $\Delta p$  由式(2)求得;  $a_0$  为波阵面前的空气音速, m/s;  $\gamma$  为气体绝热指数, 空气中取 1.4。

## 1.2 镜像反射波

当爆炸冲击波遇到建筑物壁面时, 反射形成一个反射冲击波, 为计算反射冲击波的压力, 引入镜像爆源的概念, 镜像爆源  $B_1$  与爆源  $B_0$  的位置关于壁面对称, 产生的冲击波强度相等, 如图 3 所示。爆源  $B_0$  在刚性壁面上  $R$  点处的反射波等效为爆源  $B_0$  和镜像爆源  $B_1$  产生入射波的叠加波, 而  $Z$  点处的压力是爆源  $B_0$  和镜像爆源  $B_1$  形成的冲击波在  $Z$  点

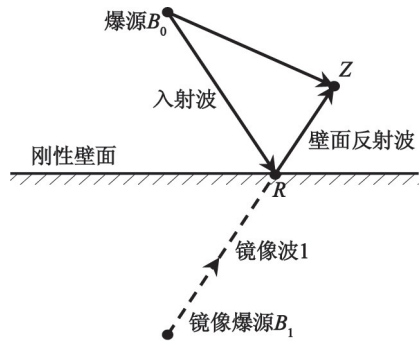


图 3 镜像爆源示意图

Fig. 3 Mirror explosion source

处叠加的结果。

## 2 冲击波叠加

封闭空间内任意位置处的气体状态是由炸点发出的入射波和各壁面形成的反射波共同作用的结果。基于近似的质量、动量和能量守恒, 建立多源爆炸的冲击波叠加 LAMB 规则, 可用式(7)、式(8)和式(9)描述<sup>[12]</sup>。

$$\bar{\rho} = \rho_0 + \sum_{i=1}^N \Delta \rho; \quad (7)$$

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i u_i}{\bar{\rho}}; \quad (8)$$

$$p = p_0 + \sum_{i=1}^N \Delta p_i + \left[ \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^N 1.2 \rho_i |u_i|^2 - \frac{1}{2} \bar{\rho} |u|^2 \right) \right]. \quad (9)$$

式中:  $p$ 、 $\bar{\rho}$ 、 $u$  分别为多源爆炸冲击波叠加后某一点处的压力、密度和质点速度;  $\Delta p_i$ 、 $\rho_i$ 、 $u_i$  分别为第  $i$  个爆源单独爆炸冲击波在该点处的超压、密度和质点速度;  $\Delta \rho$  为各波阵面后的气体密度增量;  $N$  为爆源数目。

## 3 封闭空间内冲击波的叠加

炸药在封闭空间内爆炸, 在 6 个壁面上分别形成反射波。为了方便表述, 作图 4 所示的平面图, 上墙 5 和下墙 6 的反射波情况与侧墙面反射波基本相

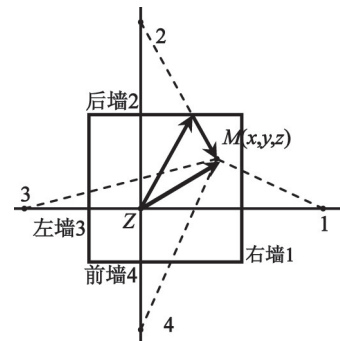


图 4 一次反射镜像爆源示意图

Fig. 4 Mirror explosion source generated by first reflection

同,未在图中表示。

图 4 中  $Z$  为炸点,点  $M(x,y,z)$  是空间内任意一点,入射波到达  $M$  点的时间为  $t_{a0}$ ,作用时间为  $t_{d0}$ ; 设第  $i$  个镜像爆源的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ,镜像波  $i$  到达  $M$  点的时间为  $t_{ai}(i=1\sim6)$ ,在  $M$  点处的作用时间  $t_{di}(i=1\sim6)$ ,则第  $i$  个镜像爆源在  $M$  点的入射波压力由式(1)和式(2)计算,式中测点到镜像爆源距离  $R_i$  为:

$$R_i = [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2]^{\frac{1}{2}}。 (10)$$
 式中:  $-l \leq x \leq l$ ;  $-w \leq y \leq w$ ;  $-h \leq z \leq h$ ;  $l, w, h$  分别为建筑物长、宽、高的一半;  $t \geq t_{a1}$ 。

按 LAMB 规则叠加,可计算  $M$  点处任意时刻的超压:  $0 \sim t_{a0}$  时刻,冲击波未到达  $M$  点,  $M$  点处未受到冲击波作用,此时该点处超压为 0;  $t_{a0} \sim t_{a1}$  时刻,  $M$  点仅受到入射波作用,  $M$  点的超压由式(2)计算;  $t_{a1}$  时刻后,  $M$  点的超压由式(2)和式(9)计算。

装药爆炸产生的冲击波经 6 面墙反射,形成 6 个一次虚拟镜像源,反射波又经其他 5 面墙反射,形成二次镜像源,6 个一次镜像源共形成 30 个二次镜像源。而由于建筑物墙体面积的有限性,各壁面相关的镜像源有其各自的作用域。

如图 5 所示,  $S_1$  是爆源  $Z$  关于墙  $DC$  的镜像源,  $S_{12}$  是一次镜像源  $S_1$  关于墙  $AD$  的二次镜像源,  $S_1$  在整个  $ABCD$  空间内均起作用,而  $S_{12}$  只作用在  $AED$  区域,而对  $DEBC$  区域无影响。依此类推,可形成更多次的反射,但由于冲击波经多次反射衰减,反射次数越多,冲击强度越弱,对前面的冲击波峰值影响越小,且多次反射形成的镜像源多而复杂,所以计算时只考虑到二次反射。

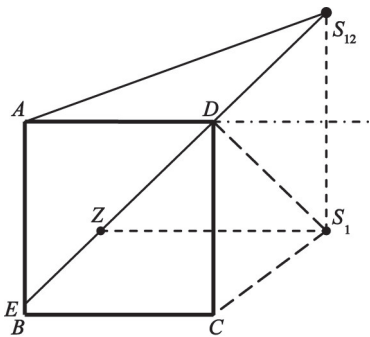


图 5 镜像源作用域示意图  
Fig 5 Scope of the mirror explosion source

#### 4 计算及结果分析

##### 4.1 结构内部超压分布分析

按照建立的理论模型,计算结构内腔长  $\times$  宽  $\times$  高为 4 800 mm  $\times$  4 800 mm  $\times$  2 656 mm 的密闭结构内部不同位置点的超压分布,装药位于密闭结构的

几何中心位置,采用密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup> 的 TNT 炸药,装药质量为 315 g。计算爆心与侧墙棱边中点连线  $ZA$ 、爆心与结构角点连线  $ZC$  上不同位置处的压力,计算结果如表 1 和表 2 所示。

表 1  $ZA$  段上各点的位置坐标及第一峰值超压

Tab. 1 Coordinate and first peak overpressure of points in segment  $ZA$

位置	坐标			爆心距 $R/m$	超压 $p/MPa$
	$x/m$	$y/m$	$z/m$		
1	0.90	0.90	0	1.272 8	0.305 4
2	1.20	1.20	0	1.697 1	0.170 9
3	1.50	1.50	0	2.121 3	0.109 1
4	1.80	1.80	0	2.545 6	0.075 6
5	2.00	2.00	0	2.828 4	0.061 1
6	2.20	2.20	0	3.111 3	0.085 0
7	2.40	2.40	0	3.394 1	0.128 7

表 2  $ZC$  段上各点的位置坐标及第一峰值超压

Tab. 2 Coordinate and first peak overpressure of points in segment  $ZC$

位置	坐标			爆心距 $R/m$	超压 $p/MPa$
	$x/m$	$y/m$	$z/m$		
8	0.90	0.90	0.45	1.349 3	0.271 4
9	1.20	1.20	0.66	1.822 3	0.147 8
10	1.50	1.50	0.83	2.277 9	0.094 6
11	1.80	1.80	1.00	2.733 5	0.065 5
12	2.00	2.00	1.01	3.004 4	0.054 2
13	2.20	2.20	1.21	3.338 6	0.043 9
14	2.40	2.40	1.33	3.663 9	0.147 9

根据表 1 和表 2 中的数据,得到结构内部空间  $ZA$  线和  $ZC$  线上的超压分布如图 6 所示,其中  $R$  为所取各点距炸点的距离。

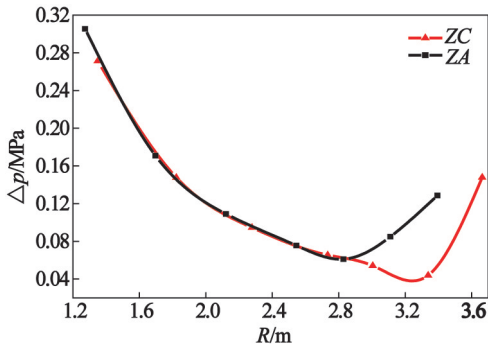


图 6 结构内部  $ZA$  线和  $ZC$  线上超压分布

Fig. 6 Distribution of overpressure in segment  $ZA$  and  $ZC$  in the structure

由图 6 可以看出,冲击波超压总体上随着炸点距离的增加而减小,但到达棱边或墙角处时,超压值

随着距炸点距离的增加而增大,这主要由于结构壁面的反射及冲击波的相互叠加汇聚引起的。这种汇聚效应在墙角处比棱边处更加明显,因为墙角处有更多的反射波汇聚和叠加。

4.2 模型计算结果与试验对比分析

为验证所建计算模型的正确性,设计了长方体混凝土密闭结构作为试验靶房,进行内爆试验,试验靶房与测点布置如图 7 所示。密闭混凝土结构内腔尺寸为 4 800 mm×4 800 mm×2 656 mm,底板厚度及各侧壁厚均为 240 mm,顶板厚度为 144 mm。为便于退模和试验人员出入,在前墙右下角处开有 500 mm×1 000 mm 的开口,试验时用 25 mm 厚的钢板封堵,保证密封效果。墙体采用 HRB335 钢筋框架,以 C30 混凝土浇筑。

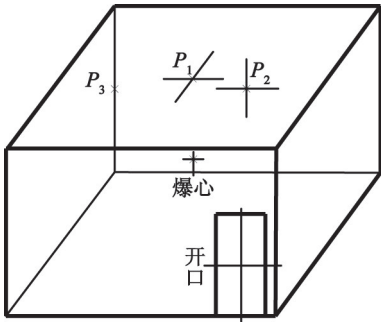


图 7 压力测试点分布示意图  
Fig. 7 Distribution of pressure test points

在  $P_1 \sim P_3$  处放置传感器测试其压力。其中  $P_1$ 、 $P_2$  位于顶板和侧墙的爆心投影位置,  $P_3$  位于两侧墙交线中点。试验中采用 TNT 柱形装药,放置于结构的几何中心,距离顶板约 1 330 mm。

进行了 3 种装药质量的爆炸试验,试验测试及理论计算结果如表 3。

表 3 各测点首个峰值超压的试验值与计算值对比  
Tab. 3 Comparison between test value and calculated value of the first peak overpressure at each point

装药质量/ g	测点	试验值/ MPa	理论值/ MPa	相对误差/ %
275	$P_1$	—	0.365 9	—
	$P_2$	0.165 8	0.159 1	-4.04
	$P_3$	0.106 6	0.117 3	+10.04
315	$P_1$	0.405 4	0.449 1	+10.78
	$P_2$	0.171 1	0.174 9	+2.22
	$P_3$	0.129 4	0.128 8	-0.46
484	$P_1$	0.750 9	0.812 2	+8.16
	$P_2$	0.251 6	0.235 1	-6.56
	$P_3$	0.161 9	0.172 2	+6.36

注:“—”表示未测到试验数据。

装药质量为 315 g 时试验测到的冲击波超压时程曲线及理论计算曲线,如图 8 所示。

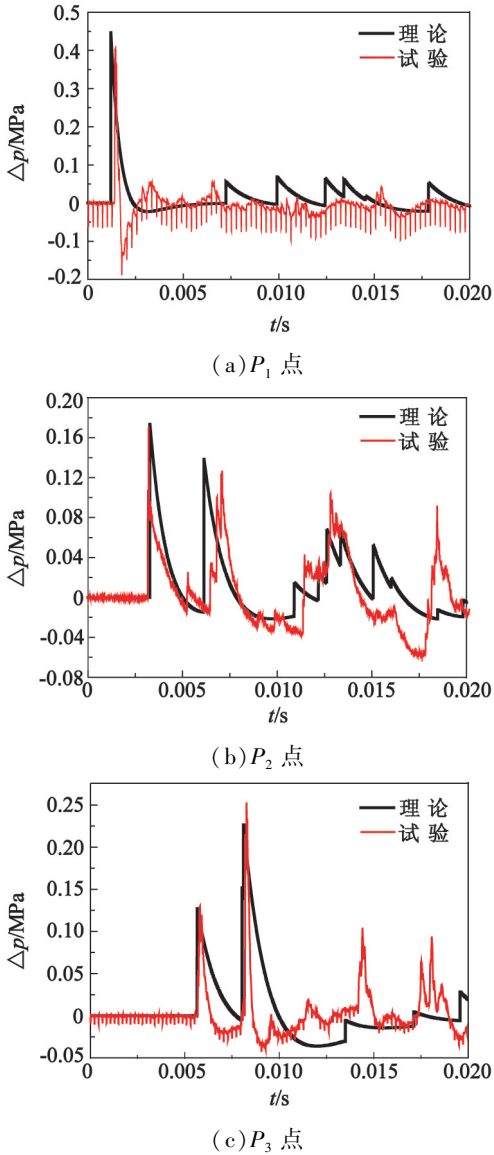


图 8 315 g TNT 各测点试验测试及计算曲线  
Fig. 8 Test and calculated curves of each point under 315g TNT

由表 3 和图 8 中试验测试及理论计算结果对比可以看出:

- 1) 测点  $P_1$  (顶墙中心) 处只有一个较大的初始脉冲,后续冲击波超压呈现轻微的长时程波动,试验测试曲线与理论计算曲线符合较好,首个冲击波峰值超压的最大相对误差为 10.78%。
  - 2) 测点  $P_2$  (侧墙中心) 处理论计算曲线和试验测试曲线的前两组波峰符合较好。首个冲击波峰值超压的最大相对误差为 6.56%。
  - 3) 测点  $P_3$  (棱边中点) 处第一个冲击波峰值超压的最大相对误差为 10.04%。
- 产生上述误差的主要原因在于计算中未考虑各



冲击波相互之间的影响。先到达的冲击波会影响后到达反射波波阵面前的空气初始参数,而为了简化计算,各个冲击波到达前的空气初始参数均按未扰动前的空气参数计算,从而引起了峰值时间、峰值压力的计算值与试验值的误差。

## 5 结论

1)建立的内爆炸冲击波超压的计算模型能快速计算封闭空间内任意位置处的压力载荷,经试验验证,冲击波超压的模型计算时程曲线与试验时程曲线一致,峰值超压的最大相对误差小于 10.78%,能够满足工程计算的需要。

2)装药在封闭空间内爆炸超压时程曲线呈现多峰性,具有 2~3 个较强波峰,在棱边处,第二个峰值比第一个峰值高。

## 参 考 文 献

- [1] 庞伟宾,何翔,李茂生,等. 空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(6):573-576.  
Pang Weibin, He Xiang, Li Maosheng, et al. The formula for airblast time of arrival in tunnel[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6):573-576.
- [2] 杨秀敏,杨科之,林晨. 封闭空间内爆炸效应[J]. 中国人民防空,2006(18):64.
- [3] Remennikov A M, Timothy A R. Modeling blast loads on buildings in complex city geometries[J]. Computers and Structures, 2005,83(27):2197-2205.
- [4] Remennikov A M. A review of methods for predicting bomb blast effects on buildings[J]. Journal of Battlefield Technology, 2003,6(3):5-10.
- [5] 陈昊,陶钢. 温压弹在有限空间内爆炸的超压测试和

分析[J]. 爆破器材,2009,38(5):4-7.

Chen Hao, Tao Gang. The test and analysis on overpressure generated by thermo-baric grenade explosion in limited space[J]. Explosive Materials, 2009, 38(5):4-7.

- [6] Syrunin M A, Fedorenko A G, Ivanov A G. Dynamic strength of fiber glass shell[J]. Journal de Physique, 1997, 7(3):517-521.
- [7] 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,2008,9(4):345-350.  
Guo Zhikun, Song Fengliang, Liu Feng, et al. Experiment of closed flat box structure subjected to internal detonation[J]. Journal of PLA University of Science and technology, 2008, 9(4):345-350.
- [8] 武海军,黄风雷,付跃升,等. 钢筋混凝土中爆炸破坏效应数值模拟分析[J]. 北京理工大学学报,2007,27(3):200-204.  
Wu Haijun, Huang Fenglei, Fu Yuesheng, et al. Numerical simulation of reinforced concrete breakage under internal blast loading[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(3):200-204.
- [9] 李向东,杜忠华. 目标易损性[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
- [10] Krauthammer T, Astarlioglu S, Blasko J, et al. Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural component[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8):771-783.
- [11] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [12] Charles E N. Blast waves(shock wave and high pressure phenomena)[M]. Springer, 2010.

## Calculation Model and the Distribution of Wave Pressure under Internal Explosion in Closed Space

BAI Xiaona, LI Xiangdong, YANG Yadong

ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] A calculation model of the explosive shock wave in closed space was set up. The shock waves reflected by different wall surfaces were equivalent to the incident shock waves generated by the mirror explosion sources at different positions. The propagation and reaction process of shock waves in closed space could be equivalent to the process that the shock waves generated by the explosion source and its mirror image sources were superimposed. Based on the LAMB rules, the shock waves of all explosive source and the mirror sources would be superimposed to obtain the overpressure at an arbitrary position in the closed space. Moreover, internal explosion experiments were conducted. The results indicate that the overpressure exhibits multiple peaks. The calculation overpressure history curves at the typical positions are in good agreement with the experimental ones. The calculation error of overpressure is less than 10.78%. Therefore, the model is correct and could quickly calculate the blast loads under internal explosion.

[KEY WORDS] explosion mechanics; internal explosion; overpressure of shock waves; calculation model; mirror sources