

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0153

两装药同时起爆时金属靶板的动态响应*

赵伟成, 翟红波, 毛伯永, 杨 峰

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 采用量纲分析的方法, 分析了两装药同时爆炸加载下金属薄板动态响应过程中的相关独立变量, 并使用有限元软件进行数值计算, 研究了两装药同时起爆情况下装药量、装药间距及炸距对 45 钢靶板响应特性的影响。基于数值模拟和量纲分析的结果, 分别建立了相关参量与金属靶板最大变形挠度的函数关系, 获得了适用于一定范围的靶板挠度计算模型。该研究能够在一定程度上实现不同分布装药的爆炸效应快速计算。

关键词: 同时起爆; 量纲分析; 金属靶板; 动态响应

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Dynamic response of a metal target plate to simultaneous initiation of two charges

ZHAO Weicheng, ZHAI Hongbo, MAO Boyong, YANG Feng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: To study the response law of a metal target plate under the simultaneous initiation of two charges and to construct a calculation model for the deformation and deflection of the target plate under the action of dual explosion source shock waves, the dynamic response of the metal plate under the action of double explosion sources was studied through dimensional analysis. Based on the numerical simulation calculation results using the finite element software, the influence of the charge quality, charge spacing, and vertical distance from the charge to the target plate of the double explosion source on the maximum deflection of the 45 steel target plate was summarized. The results show that the maximum deflection of the target plate increases linearly with the charge mass, decreases linearly with the charge spacing and decreases exponentially with the vertical distance from the charge to the target plate. The functional relationship between different parameters and the maximum deformation deflection of the target plate was fitted. This study can to some extent achieve rapid calculation of the explosion effect of charges with different distributions.

Keywords: simultaneous explosion; dimensional analysis; metal target plate; dynamic response

金属薄板结构作为飞机、车辆、舰船等大多数军事目标中的基本结构之一, 对其在爆炸载荷作用下动态响应过程的研究能够支撑多种复杂目标的易损性分析^[1-4]。王芳等^[5]、郑成等^[6]和 Zheng 等^[7]基于板的大挠度变形理论和能量守恒原理, 对爆炸冲击波载荷作用下四边约束方形靶板的响应情况进行了理论分析和试验验证, 得到了方靶的塑性变形半经验公式, 建立了矩形板在爆炸载荷作用下发生塑性大变形的弹塑性分析方法。Baker^[8]将正方形板在 2 个坐标方向的变形假设为正弦曲线, 基于能量守恒原理, 假设作用在板上的爆炸冲击波能量与板的变形能相等, 从而得出爆炸冲击波作用下方靶中心最大变形挠度的计算公式。陈长海等^[9]开展了近距离爆载荷下固支方板的响应研究, 分析了钢板的破坏模式, 提

* 收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(12102337)

第一作者: 赵伟成(1998—), 男, 硕士研究生, 1046989259@qq.com

通信作者: 翟红波(1987—), 男, 博士, 研究员, zhaihongbo@qq.com

出了爆炸载荷作用下钢板的局部破裂判据。闫永明等^[10]开展了 TNT 空爆载荷下高强钢的变形行为研究, 结合 ABAQUS 模拟计算, 得到了在不同质量的 TNT 爆炸载荷下不同厚度钢板中心的最大变形挠度, 并分析了钢板的应变硬化行为机制。

基于单次爆炸冲击波载荷下金属靶板的动态响应特性研究, 许多学者进行了多点同时起爆毁伤和累积毁伤等方面的研究。冯海云等^[11]通过建立不同阵列距离两装药爆炸的冲击波场模型, 分析了装药量和阵列距离对冲击波威力的影响, 并对 2 个 1 kg TNT 装药、相距 4 m 的工况进行了试验验证, 建立了最佳阵列距离和冲击波作用区面积的增益计算模型。Rezasefat 等^[12]针对单层、双层、三层的等面积密度板结构, 通过连续加载 5 次, 研究了重复局部脉冲载荷对多层圆板结构性能和动态响应的影响。翟红波等^[13]开展了某舰船舱室 1 : 8 等效缩比模型内的双点装药同步起爆试验, 并与单点起爆进行了对比分析, 两装药同时起爆的冲击波冲量效应和毁伤效果比同等药量的单点爆炸有显著增加。

本文中, 通过量纲分析的方法分析在两球形装药同时起爆作用下金属薄板的动态响应过程所涉及的相关物理量, 并通过 Autodyn 和 LS-DYNA 等软件对双爆源冲击波的传播规律以及在两装药同时爆炸加载下金属靶板的响应过程进行数值模拟, 分析装药量、装药间距和炸距对靶板最大变形挠度的影响, 并对装药量、装药间距、炸距和靶板最大变形挠度的关系进行拟合, 以期研究结果可为武器设计及工程防护提供参考。

1 理论分析

1.1 靶板响应的量纲分析

爆炸冲击波作用下金属靶板的响应过程涉及多个参量, 两装药同时起爆时, 分析过程更复杂, 可以通过量纲分析的方法找出响应过程中独立的物理量^[14-16]。

两装药同时起爆时, 球形装药的物理量主要包括装药质量 m_{e1} 和 m_{e2} 、装药密度、爆轰速度 D_1 和 D_2 、单位质量炸药所释放的化学能 E_{e1} 和 E_{e2} 以及爆炸产物的膨胀指数 γ_{e1} 和 γ_{e2} 。金属靶板的物理量主要包括长度 a 、宽度 b 、厚度 δ 、材料密度 ρ_t 、杨氏模量 E 、屈服强度 Y_t 以及 Grüneisen 状态方程中的参数 c 、 α 、 μ 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、Grüneisen 系数 γ_0 和材料内能 E_t 。同时, 两装药到靶板之间的垂直距离(以下称炸距) h_1 和 h_2 以及两装药之间的距离 l 也是影响爆炸冲击毁伤靶板的重要参量, 图 1 为金属靶板响应过程中各参量示意图。分析时, 将球形装药作为点爆源, 忽略装药几何尺寸的影响, 同时忽略靶板重力、应变强化和应变率效应的影响, 即金属靶板的最大变形挠度 ω 为上述所有参数的函数:

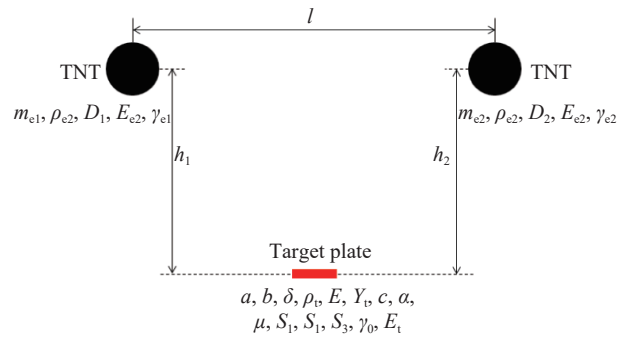


图 1 量纲分析物理量示意图

Fig. 1 Dimensional analysis of physical quantities

$$\omega = f(m_{e1}, m_{e2}, \rho_{e1}, \rho_{e2}, D_1, D_2, E_{e1}, E_{e2}, \gamma_{e1}, \gamma_{e2}; a, b, \delta, \rho_t, E, Y_t, c, \alpha, \mu, S_1, S_2, S_3, \gamma_0, E_t; h_1, h_2, l) \quad (1)$$

为简化研究过程, 取两装药均为 TNT 且质量相同的情况进行分析, 即 $m_{e1}=m_{e2}=m_e$, $D_1=D_2=D$ 。取 δ 、 m_e 和 D 为基本量, 组成单位系统, 并对式 (1) 进行变换处理, 可得:

$$\frac{\omega}{\delta} = f\left(\frac{\rho_{e1}}{m_e \delta^{-3}}, \frac{\rho_{e2}}{m_e \delta^{-3}}, \frac{E_{e1}}{m_e D^2}, \frac{E_{e2}}{m_e D^2}, \gamma_{e1}, \gamma_{e2}, \frac{a}{\delta}, \frac{b}{\delta}, \frac{\rho_t}{m_e \delta^{-3}}, \frac{E}{m_e \delta^{-3} D^2}, \frac{c}{D}, \alpha, \mu, S_1, S_2, S_3, \gamma_0, \frac{E_t}{m_e D^2}, \frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \frac{l}{\delta}\right) \quad (2)$$

金属靶板在爆炸载荷作用下的响应过程中, 炸药性质不变, 即涉及炸药的物理量 $\rho_{e1}/(m_e \delta^{-3})$ 、 $\rho_{e2}/(m_e \delta^{-3})$ 、 $E_{e1}/(m_e D^2)$ 、 $E_{e2}/(m_e D^2)$ 、 γ_{e1} 和 γ_{e2} 为常数; 在一定的冲击压力下, 靶板材料的基本性质不变, 即参量 $E/(m_e \delta^{-3} D^2)$ 、 c/D 、 α 、 μ 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 γ_0 和 $E_t/(m_e D^2)$ 为常数, 固支状态下靶板的边缘尺寸不改变, 即 a/δ 和 b/δ 为常数。

此时可以得到在两装药同时起爆时, 金属靶板的变形挠度为:

$$\frac{\omega}{\delta} = f\left(\frac{l}{\delta}, \frac{m_{e1}}{\rho_l \delta^3}, \frac{m_{e2}}{\rho_l \delta^3}, \frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}\right) \quad (3)$$

由此可知, 当两装药特性与金属靶板材料特性及尺寸一致时, 靶板在两装药爆炸冲击波作用下的最大变形挠度与装药量、炸距以及装药间距相关。本文中, 利用有限元软件, 对不同工况下两装药同时起爆时金属薄板的动态响应进行数值模拟, 确定靶板的最大变形挠度与装药量、炸距及两装药间距的关系。

计算过程中保持金属靶板的几何尺寸不变, 控制炸距和装药间距一致, 则 h_1/δ 、 h_2/δ 、 a/δ 、 b/δ 和 l/δ 均为常数, 改变装药质量, 保持 $m_{e1}=m_{e2}=m_e$, 此时靶板的最大变形挠度为:

$$\frac{\omega}{\delta} = f\left(\frac{m_e}{\rho_l \delta^3}\right) \quad (4)$$

爆炸响应过程中, 若控制装药质量及装药间距一致, 则 $m_{e1}/(\rho_l \delta^3)$ 、 $m_{e2}/(\rho_l \delta^3)$ 、 a/δ 、 b/δ 和 l/δ 为常数, 改变炸距, 保持 $h_1=h_2=h$, 此时得到靶板的最大变形挠度为:

$$\frac{\omega}{\delta} = f\left(\frac{h}{\delta}\right) \quad (5)$$

若控制装药量和炸距保持不变, 则 $m_{e1}/(\rho_l \delta^3)$ 、 $m_{e2}/(\rho_l \delta^3)$ 、 a/δ 、 b/δ 、 h_1/δ 和 h_2/δ 为常数, 此时可得到一个无量纲的靶板最大变形挠度的函数关系式:

$$\frac{\omega}{\delta} = f\left(\frac{l}{\delta}\right) \quad (6)$$

1.2 两装药同时起爆冲击波传播及载荷作用规律

利用 Autodyn 对两装药同时起爆时冲击波的传播规律进行数值模拟, 冲击波的传播过程如图 2 所示。在冲击波耦合前, 两爆源产生的冲击波阵面呈球形向外传播。传播过程中, 冲击波的超压峰值逐渐衰减。当两冲击波耦合时, 耦合处冲击波的超压峰值增大, 并沿两装药连线的中垂线向外传播。由于两冲击波在中间耦合部位形成了加强冲击波, 使得耦合后冲击波的传播速度大于单个爆源产生的冲击波的传播速度, 从而产生了中间突起、两边为圆弧形状的波阵面。

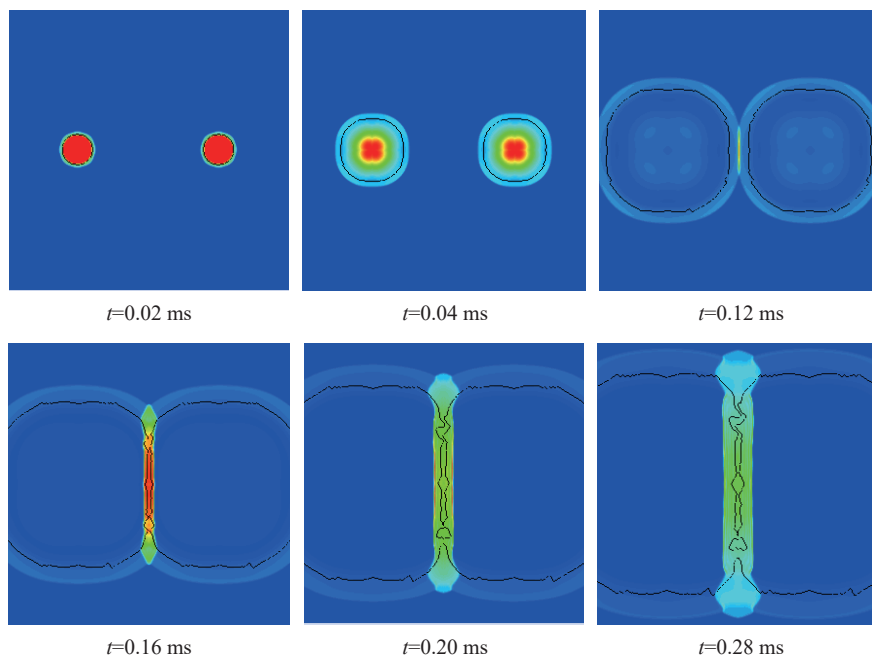


图 2 两装药同时起爆冲击波传播

Fig. 2 Propagation of shock waves caused by simultaneous initiation of two charges

双爆源冲击波作用在靶板上时, 如果靶板尺寸较大且距离爆源较近, 两爆源产生的冲击波先各自作用在靶板两端, 之后耦合冲击波再作用至靶板中心。如果爆源距离靶板较远, 两爆源产生的冲击波在耦合后再作用至靶板上, 此时靶板仅受到耦合后冲击波载荷。2 种情况如图 3 所示。

本文中, 仅针对双爆源冲击波耦合后作用在靶板上的情况, 设置了不同的工况进行数值模拟, 研究不同因素对耦合冲击波作用下靶板变形挠度的影响。

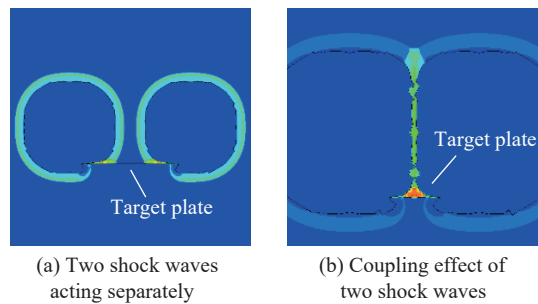


图 3 靶板受双爆源冲击波载荷作用情况
Fig. 3 Target plates subjected to the loading of shock waves from a double explosion source

2 数值建模

2.1 有限元模型

利用 LS-DYNA 软件, 采用壳单元建立方形金属靶板模型, 靶板尺寸为 150 mm×150 mm×0.5 mm, 共划分 12 450 个网格, 24 653 个节点, 如图 4 所示。金属靶板材料选用 A3 钢, 建模时使用 *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK 关键字对靶板进行描述, 其相关参数见表 1^[17]。采用 *LOAD_BLAST_ENHANCED 关键字描述爆炸载荷, 设置炸点位置、起爆时间及球形 TNT 装药质量, 对四周边界固支的金属靶板进行不同工况的爆炸加载。

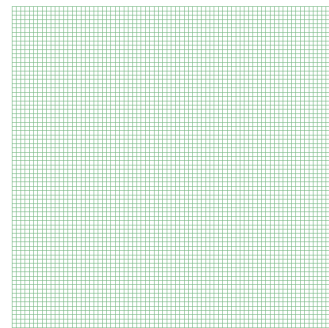


图 4 金属靶板有限元模型及网格划分
Fig. 4 A finite element model for the metal target plate and its grid division

表 1 A3 钢靶板的本构模型参数^[17]

Table 1 Constitutive model parameters of the A3 steel target plate^[17]

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	杨氏模量 E/GPa	泊松比 ν	A/MPa	B/MPa	N	C
7.8	200	0.3	410	20	0.08	0.100

2.2 模型有效性验证

王芳等^[5]采用不同药量的长径比为 1 : 1 的 TNT 药柱进行试验, 对不同厚度的 A3 钢板进行爆炸加载, 测量了钢板的变形挠度。本文中基于文献 [5] 中的试验结果验证有限元模型的有效性, 仿真计算结果与试验数据的对比如表 2 所示。

表 2 部分试验数据与仿真结果

Table 2 Partial test data and simulation results

序号	靶板厚度/mm	TNT 质量/g	炸距/cm	挠度/mm		挠度误差/%
				试验	计算	
1	1	700	98	79	71.132	10.0
2	1	708	80	102	91.946	9.9
3	1	1 108	133	82	68.235	16.8
4	2	700	47	79	81.841	3.6

从表 2 可以看出, 使用该模型对爆炸载荷下金属靶板的变形挠度进行计算, 其误差均在 16.8% 以下, 说明该有限元模型的算法及网格参数设置合理, 用作进一步的计算分析能够保证结果准确。

2.3 仿真工况设计

将上述验证后的有限元模型中 A3 钢的材料参数改为 45 钢的材料参数, 计算在爆炸冲击波载荷作用下不同因素对 45 钢变形挠度的影响。45 钢的相关参数如表 3^[17] 所示。

表 3 45 钢的本构模型参数^[17]

Table 3 Constitutive model parameters of the 45 steel target plate^[17]

密度 ρ (g·cm ³)	杨氏模量 E /GPa	泊松比 ν	A /MPa	B /MPa	N	C
7.8	200	0.3	507	320	0.28	0.064

在对爆炸加载过程的计算中使用球形 TNT 炸药, 基于量纲分析的结果, 计算过程中炸药及靶板的特性不发生变化, 在不同的装药量条件、炸距及两装药之间的距离的情况下, 获取不同工况下金属靶板的最大变形挠度。

采用*LOAD_BLAST_ENHANCED 关键字模拟球形 TNT 爆炸进行加载, TNT 及靶板位置如图 1 所示, 其中两装药中心位于靶板中心正上方。设置 TNT 药量为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 和 5.0 kg, 为保证双爆源冲击波耦合后作用在靶板上, 将炸距设置为 2~3 m, 使比例距离(比例距离 $Z = R/\sqrt{m}$, 其中 R 为装药中心与靶板中心的距离, m 为装药质量)均大于 1 m/kg^{1/3}, 装药间距为 50~250 cm, 2 个 TNT 装药的起爆时间均为零时刻。

3 计算结果分析

3.1 装药质量对靶板变形挠度的影响

同时改变两 TNT 装药的质量, 并保证 $m_{e1}=m_{e2}$, 计算不同工况下靶板的最大变形挠度, 分析药量对靶板挠度的影响。表 4 为不同工况的计算结果, 经过处理后得到图 5, 对图中曲线进行拟合, 得到:

$$\frac{\omega}{\delta} = 2.666\ 54 \times 10^{-6} \frac{m_e}{\rho_t \delta^3} + 7.749\ 58 \quad R = 0.999\ 01 \quad (7)$$

从图 5 及式 (7) 可以看出, 在装药间距为 1.5 m、炸距为 2.0 m 时, 45 钢靶板在爆炸冲击载荷作用下的变形挠度受装药量影响。两装药质量相同时, 在 $4.84 \times 10^6 \leq m_e/(\rho_t \delta^3) \leq 2.42 \times 10^7$ 范围内, 随着装药质量的增加, 靶板的变形挠度线性增大。

表 4 不同药量下靶板的最大变形挠度

Table 4 The maximum deformation deflections of target plates under different charge amounts

序号	装药质量/kg		炸距/m	装药间距/m	靶板变形挠度/mm
	装药1	装药2			
1	1.0	1.0	2.0	1.5	9.815
2	1.5	1.5			13.561
3	2.0	2.0			17.016
4	2.5	2.5			20.36
5	3.0	3.0			23.61
6	5.0	5.0			35.852

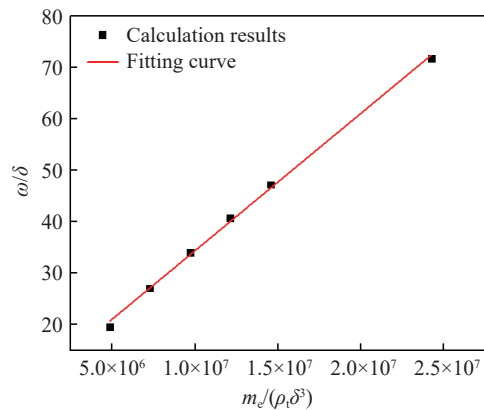


图 5 靶板挠厚比与装药质量无量纲数的关系

Fig. 5 Relationship of deflection-to-thickness ratio of the target plate with charge mass non-dimensional number

3.2 炸距对靶板变形挠度的影响

固定靶板几何尺寸、装药质量及间距不变, 在保持两装药的炸距相等的情况下, 同时改变两药的炸距, 通过数值模拟结果分析两药炸距对靶板变形挠度的影响。计算结果如表 5 所示, 表 5 中结果经处理后得到图 6。

表 5 炸距不同时靶板的最大变形挠度

Table 5 The maximum deformation deflections of target plates with different explosive distances

序号	装药质量/kg		炸距/m	装药间距/m	靶板变形挠度/mm
	装药1	装药2			
1			2.0		17.020
2			2.1		15.653
3			2.2		14.349
4			2.3		13.235
5			2.4		12.268
6	2.0	2.0	2.5	1.5	11.324
7			2.6		10.522
8			2.7		9.704
9			2.8		8.972
10			2.9		8.331
11			3.0		7.869

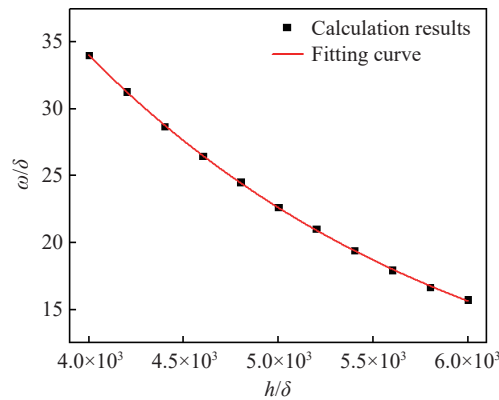


图 6 靶板挠厚比与炸距无量纲数的关系

Fig. 6 Relationship of deflection-to-thickness ratio of the target plate with explosive distance non-dimensional number

以指数形式对图 6 中的曲线进行拟合, 得到:

$$\frac{\omega}{\delta} = 4.602\ 53 + 209.136\ 66 \exp\left(\frac{h/\delta}{2\ 039.475\ 7}\right), \quad R = 0.999\ 91 \quad (8)$$

从图 6 和式 (8) 可以看出, 在保持装药量为 2 kg、装药间距为 1.5 m、仅改变炸距的情况下, 在 $4000 \leq h/\delta \leq 8000$ 的范围内, 随着炸距的增大, 靶板的变形挠度呈指数分布减小。

3.3 装药间距对靶板最大变形挠度的影响

固定装药量及炸距不变, 使用上述模型对两装药间距不同的工况进行计算, 分别设置装药间距为 50~250 cm, 获取靶板的最大变形挠度, 分析装药间距对靶板变形挠度的影响。表 6 为金属靶板在不同间距两装药同时起爆作用下的最大变形挠度。

表 6 金属靶板的最大变形挠度计算结果

Table 6 Calculation results of the maximum deformation deflections of metal target plates

序号	装药质量/kg		炸距/m	两装药间距/cm	靶板变形挠度/mm
	装药1	装药2			
1				50	11.850
2				70	11.587
3				90	11.213
4				100	10.978
5				110	10.778
6	1.0	1.0	1.0	130	10.305
7				150	9.815
8				180	8.991
9				200	8.427
10				230	7.577
11				250	7.054

统计计算结果中靶板的最大变形挠度, 经处理得到图 7 所示的结果, 并对获得的曲线进行拟合获得:

$$\frac{\omega}{\delta} = -0.00248 \frac{l}{\delta} + 26.77184, \quad R = 0.99607 \quad (9)$$

从图 7 及式 (9) 可以看出, 在装药量为 1 kg、炸距为 1 m 的情况下, 金属靶板在爆炸冲击载荷作用下的变形挠度受装药间距影响。当 $1000 \leq l/\delta \leq 5000$ 时, 随着装药距离的增大, 靶板的最大变形挠度呈线性减小。

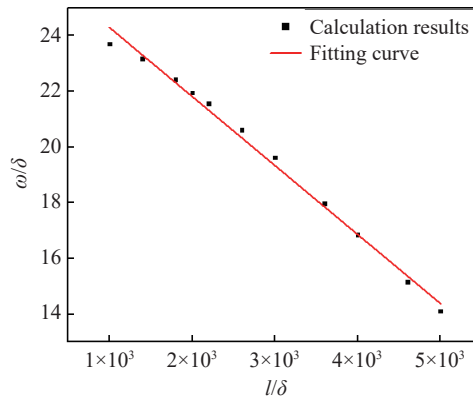


图 7 靶板挠厚比与装药间距无量纲数的关系

Fig. 7 Relationship of the deflection-to-thickness ratio of the target plate with the charge spacing non-dimensional number

4 靶板挠度计算模型

4.1 靶板挠度计算模型

由量纲分析可知, 靶板的最大变形挠度与装药质量、炸距及两装药间距有关。通过数值模拟获得的结果, 分别拟合出了靶板的挠厚比 ω/δ 与 $m_c/(\rho_c \delta^3)$ 、 l/δ 、 h/δ 之间的定量关系。

为了能够实现不同分布装药毁伤效应的快速计算, 将获得的定量函数关系式 (7)~(9) 进一步分析处理, 获取靶板的挠度 ω 与 $m_c/(\rho_c \delta^3)$ 、 l/δ 、 h/δ 的关系式。

首先, 采用比例距离的定义对金属靶板的变形挠度与装药质量、炸距之间的关系进行进一步分析。定义比例装药距离 Z_1 和比例炸距 Z_2 分别为:

$$Z_1 = (l/\delta) / \sqrt[3]{m_e / (\rho_t \delta^3)}, \quad Z_2 = (h/\delta) / \sqrt[3]{m_e / (\rho_t \delta^3)}$$

本文中, $m_{e1}=m_{e2}=m_e$, $h_1=h_2=h$, 对计算结果进行处理, 获得表 7~8。

表 7 不同比例装药间距下靶板的变形挠度

Table 7 Deformation deflections of target plates under different proportional charge spacings

序号	装药质量/kg		装药间距/m	炸距/m	Z_1	Z_2	靶板变形挠度/mm
	装药1	装药2					
1			0.5		7.887 09		20.664
2			0.7		11.041 92		20.155
3			0.9		14.196 75		19.519
4			1.1		17.351 59		18.767
5	2.0	2.0	1.3	2.0	20.506 42	31.548 34	17.923
6			1.5		23.661 26		17.016
7			1.7		26.816 09		15.933
8			1.9		29.970 93		15.074
9			2.0		31.548 34		14.624

表 8 不同比例炸距下靶板的变形挠度

Table 8 Deformation deflections of target plates at different proportional explosive distances

序号	装药质量/kg		装药间距/m	炸距/m	Z_1	Z_2	靶板变形挠度/mm
	装药1	装药2					
1				2.0		31.548 34	17.02
2				2.1		33.125 76	15.653
3				2.2		34.703 18	14.349
4				2.3		36.280 59	13.235
5				2.4		37.858 01	12.268
6	2.0	2.0	1.5	2.5	23.661 26	39.435 43	11.324
7				2.6		41.012 85	10.522
8				2.7		42.590 26	9.704
9				2.8		44.167 68	8.972
10				2.9		45.167 68	8.331
11				3.0		47.322 51	7.869

利用表 7 中的数据, 绘制靶板变形挠度与比例装药距离之间的关系曲线, 如图 8 所示。利用表 8 中的数据绘制靶板变形挠度与比例炸距之间的关系曲线, 如图 9 所示。

拟合图 8~9 中的曲线, 获得靶板挠度 ω 与比例装药距离 Z_1 和比例炸距 Z_2 之间的关系分别为:

$$\frac{\omega}{\delta} = -0.527 33Z_1 + 46.204 66, \quad R = 0.995 05 \tag{10}$$

$$\frac{\omega}{\delta} = 24 193.967 16Z_2^{-1.899 99}, \quad R = 0.999 43 \tag{11}$$

之后对靶板变形挠度与比例装药距离 Z_1 和比例炸距 Z_2 之间的关系进行分析, 处理数据得到图 10 所示的曲面。

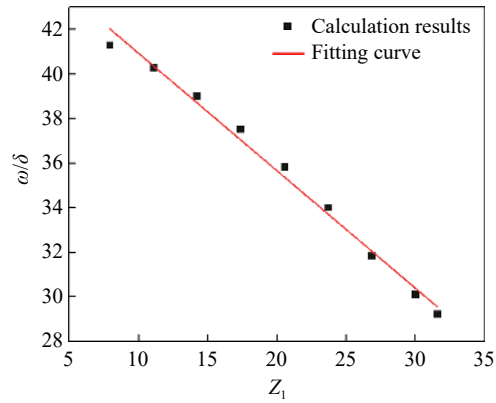


图 8 靶板挠厚比与比例装药距离的关系

Fig. 8 Relationship of deflection-to-thickness ratio of the target plate with proportional charge distance

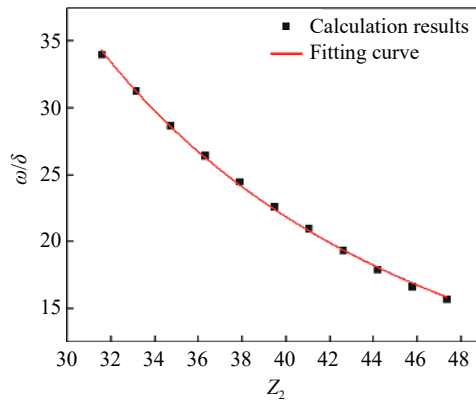


图 9 靶板挠厚比与比例炸距的关系

Fig. 9 Relationship of deflection-to-thickness ratio of the target plate with proportional explosive distance

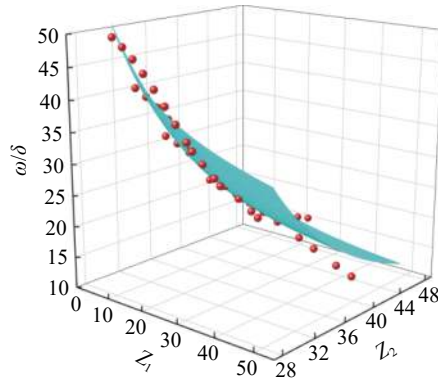


图 10 靶板挠厚比与比例装药距离和比例炸距的关系

Fig. 10 Relationships of deflection-to-thickness ratio of the target plate with proportional charge distance as well as proportional explosion distance

对曲面进行拟合得到:

$$\frac{\omega}{\delta} = 87\,452.992\,18Z_1^{-0.240\,33}Z_2^{-2.059\,14}, \quad R = 0.988\,39 \quad (12)$$

$$7.4 \leq Z_1 = \frac{l/\delta}{\sqrt[3]{m_e/(\rho_t\delta^3)}} \leq 31.5, \quad 29.3 \leq Z_2 = \frac{h/\delta}{\sqrt[3]{m_e/(\rho_t\delta^3)}} \leq 47.3$$

式 (12) 即为金属靶板在两相同装药同时起爆情况下的挠厚比计算模型。

4.2 模型验证

为验证本文中获得的挠度计算模型的准确性,在给出的适用范围内设置了不同的工况,采用上述材料参数,对尺寸为 150 mm×150 mm×0.5 mm 的 45 钢制靶板进行了数值模拟,将模型计算结果与数值模拟结果进行对比,如表 9 所示。

表 9 数值模拟结果与模型计算结果的对比

Table 9 Comparison of numerical simulation results with model calculation results

序号	TNT质量/kg		装药间距/m	炸距/m	Z_1	Z_2	靶板挠度/mm		误差/%
	装药1	装药2					仿真计算	模型计算	
1	2.0	2.0	1.0	2.5	15.74061	39.35152	12.396	11.717	5.5
2	3.0	3.0	1.5	2.8	20.62603	38.50193	12.724	11.485	9.7
3	4.0	4.0	2.0	3.0	24.98666	37.47999	12.967	11.592	10.6
5	5.0	5.0	2.5	3.3	28.99445	38.27267	11.928	10.713	10.2
6	6.0	6.0	3.0	3.5	32.74179	38.19875	11.352	10.446	8.0

从表 9 可得,仿真计算得到的靶板变形挠度与靶板挠度计算模型获得的结果误差在 10.6% 以下。可见,本文中提出的靶板挠度计算模型具有一定的准确性,能够在一定程度上实现两装药同时起爆情况下毁伤结果的快速计算。

5 结 论

运用量纲分析对四周固支方板在两装药同时爆炸作用下的动态响应问题进行了分析,获取了靶板响应中的无量纲挠厚比,并通过控制变量进行数值计算,获取了两装药的装药间距对靶板最大变形挠度的影响,对计算结果进行了拟合,获得了以下结论。

(1) 在两装药同时起爆作用下,靶板的挠厚比由装药量、炸距及两装药的装药间距决定,运用量纲分析和数值模拟计算结果建立了相关参量与挠厚比的定量关系。

(2) 随装药间距的增大,靶板的最大变形挠度呈线性减小;随装药量的增加,靶板的变形挠度呈线性增大;随炸距的增大,靶板的变形挠度近似呈指数减小。

(3) 得到了适用于一定范围的两装药同时起爆作用下靶板变形挠度与装药质量、炸距及装药间距的定量关系式,能够在一定程度上实现不同分布装药爆炸效应的快速计算。

获得的定量关系是仅通过数值模拟在一定范围内得出的,其普适性和准确性需进一步研究验证。

参考文献:

- [1] 李芝绒, 张玉磊, 袁建飞, 等. 内部爆炸薄圆板的变形及有效载荷 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 113101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0045.
ZHANG Z R, ZHANG Y L, YUAN J F, et al. Deformation and payload of thin circular plates subjected to internal explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11): 113101. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0045.
- [2] 韩璐, 袁建飞, 张玉磊, 等. 固支矩形钢板近距爆炸的毁伤特性 [J]. *火炸药学报*, 2021, 44(2): 225–232. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202004023.
HAN L, YUAN J F, ZHANG Y L, et al. Damage characteristics of fixed rectangular steel plate under close-in explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2021, 44(2): 225–232 DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202004023.
- [3] NASIRI S, SADEGH-YAZDI M, MOUSAVI S M, et al. Repeated underwater explosive forming: experimental investigation and numerical modeling based on coupled Eulerian-Lagrangian approach [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 172: 108860. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108860.
- [4] AUNE V, VALSAMOS G, CASADEI F, et al. On the dynamic response of blast-loaded steel plates with and without pre-formed holes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 27–46. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.04.001.

- [5] 王芳, 冯顺山, 俞为民. 爆炸冲击波作用下靶板的塑性大变形响应研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2003, 13(3): 58–61. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2003.03.016.
WANG F, FENG S S, YU W M. Study on large plastic deformation response of target plate under explosive blast wave [J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(3): 58–61. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2003.03.016.
- [6] 郑成, 孔祥韶, 吴卫国. 爆炸载荷下矩形板弹塑性动态响应研究 [J]. *中国造船*, 2015, 56(3): 19–30. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2015.03.003.
ZHENG C, KONG X S, WU W G. Elastic-plastic dynamic response of rectangular plates subjected to blast loads [J]. *Shipbuilding of China*, 2015, 56(3): 19–30. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2015.03.003.
- [7] ZHENG C, KONG X S, WU W G, et al. Experimental and numerical studies on the dynamic response of steel plates subjected to confined blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 113:144–160. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.013.
- [8] BAKER W E. Approximate techniques for plastic deformation of structures under impulsive loading: III [J]. *Shock and Vibration Digest*, 1982, 14(11): 3–11. DOI: 10.1177/058310248201401103.
- [9] 陈长海, 朱锡, 侯海量, 等. 近距空爆载荷作用下固支方板的变形及破坏模式 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 368–375. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0368-08.
CHEN C H, ZHU X, HOU H L, et al. Deformation and failure modes of clamped square plates under close-range air blast loads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 368–375. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0368-08.
- [10] 闫永明, 尉文超, 何肖飞, 等. TNT 空爆载荷下 WELDOX 700E 钢变形行为研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(7): 073102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0430.
YAN Y M, WEI W C, HE X F, et al. Deformation behavior of WELDOX 700E steel subjected to TNT air-blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(7): 073102. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0430.
- [11] 冯海云, 胡宏伟, 肖川, 等. 两点阵列爆炸威力场分布及增益研究 [J]. *火炸药学报*, 2020, 43(3): 345–350. DOI: 10.14077/j.is-sn.1007-7812.201911014.
FENG H Y, HU H W, XIAO C, et al. Research on the blast power field distribution and gain of two-point array explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2020, 43(3): 345–350. DOI: 10.14077/j.is-sn.1007-7812.201911014.
- [12] REZASEFAT M, MOSTOFI T M, OZBAKKALOGLU T. Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 144: 106332. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106332.
- [13] 翟红波, 李芝绒, 苏健军, 等. 多点同步内爆炸下典型舱室的毁伤特性 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(2): 169–174,181. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.02.025.
ZHAI H B, LI Z R, SU J J, et al. Damage characteristics of a typical cabin with multi-point simultaneous inner explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(2): 169–174,181. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.02.025.
- [14] 陈新祥, 刘彦. 爆炸冲击载荷作用下靶板动态响应研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(S2): 149–153.
CHEN X X, LIU Y. Research on dynamic response of target plate under blast impact loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(S2): 149–153.
- [15] 吴义田, 张庆明. 近距离爆炸下不同厚度靶板的动态响应分析 [J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(7): 568–571. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2007.07.002.
WU Y T, ZHANG Q M. Dynamic response of plates of varied thickness subjected to close range explosion [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(7): 568–571. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2007.07.002. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2007.07.002.
- [16] 陈能翔, 钟巍, 王澍霏, 等. 远距离爆炸荷载作用下钢框架几何相似律研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(1): 013101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0498.
CHEN N X, ZHONG W, WANG S F, et al. Study on geometric similarity law of steel frame under a far-field explosion load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(1): 013101. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0498.
- [17] 陈刚, 陈小伟, 陈忠富, 等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(5): 390–397. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)05-0390-08.
CHEN G, CHEN X W, CHEN Z F, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting onto 45 steel plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(5): 390–397. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)05-0390-08.

(责任编辑 张凌云)