

接触爆炸下双爆源对靶板的毁伤特性*

简茹慧¹, 杜宁¹, 余天晨¹, 郭秋萍², 潘明然³

(1. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳, 110159;

2. 沈阳局沈二室, 辽宁 沈阳 101416;

3. 辽沈工业集团有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要: 为研究接触爆炸条件下装药间距对 Q235 钢板毁伤效果的影响规律, 并为装甲抗爆结构设计 with 多点同步起爆战斗部布局优化提供理论依据, 本文以 JH-2 炸药和 Q235 钢板为研究对象, 采用数值模拟方法, 开展了接触爆炸条件下双爆源爆炸载荷对钢板的毁伤效应研究。首先, 建立了接触爆炸数值模拟模型, 通过与试验结果对比验证了模型的精度与可靠性; 在此基础上, 分析了两装药爆炸后冲击波的耦合作用及其对钢板塑性变形特征、冲塞破坏模式的影响规律。结果表明: 装药总质量恒定下, 两点阵列的毁伤范围随装药间距增大而增大, 能够形成完整冲塞破孔的临界阵列间距为 30mm; 三点阵列接触爆炸下, 毁伤面积随阵列间距增大呈先升后降的单峰变化特征, 最优装药阵列间距为 26.23mm, 此时靶板毁伤效能最大。建立的高斯预测公式拟合优度为 0.92115, 可快速定量预估 12.6~50mm 范围内任意阵列间距对应的钢板毁伤面积。研究结果可为接触爆炸双装药耦合毁伤效能评估、抗爆结构设计提供理论依据与量化数据支撑, 同时为多点同步起爆阵列装药布局设计提供参考。

关键词: 数值模拟; 多点爆炸; 接触爆炸; 阵列爆炸

中图分类号: O383; O521.9

文献标识码: A

爆炸载荷作用下金属结构的动态响应与毁伤效应, 始终是军事防护工程、民用爆破工程领域的核心研究课题, 对提升结构抗爆性能与安全防护水平具有重要工程价值^[1-3]。接触爆炸主要应用于民用工程爆破与军工毁伤防护两大领域, 前者包括建筑物爆破拆除、水下工程爆破作业, 后者包括装备与防护结构的爆炸毁伤评估。

近年来, 爆炸冲击波对靶板的毁伤效果研究主要包括以下两个方面, 一是基于试验与数值模拟对接触爆炸的毁伤效果进行研究, 薛建锋等^[4]利用数值模拟接触爆炸下聚脲图层对钢筋混凝土梁的防爆效果, 并给毁伤程度划分了等级; 孟元沛等^[5]利用量纲分析、理论计算和数值模拟的方法, 研究了接触爆炸中密实介质的爆轰波传播规律, 并建立了一套预测模型; 赵小华等^[6]通过数值模拟, 探究了接触爆炸下玄武岩纤维长度和掺量对混凝土板防爆性能的影响; Zhao H等^[7]通过现场试验与数值模拟, 系统研究了钢筋增强聚合物板在接触和近场爆炸下的毁伤规律, 明确了不同工况的失效模式, 并建立了破口直径的预测公式; Yanghua H等^[8]研究人员通过实验与数值模拟相结合的方法, 分析了接触爆炸载荷下 17mm 厚钢板的损伤行为, 揭示了其损伤模式随装药量的变化规律与微观断裂机制, 并提出了新的损伤模式判据, 验证了数值模拟方法的可靠性; Nestor Mejia 等^[9]研究了钢筋混凝土 (RC) 柱在接触爆炸下的损伤响应, 识别了四种主要损伤模式, 并发现了轴压和箍筋布置对柱抗爆性能的重要影响。二是针对非接触爆炸下单点、多点爆炸冲击波载荷对钢板的毁伤研究, 王芳等^[10]通过对比理论与实验结果分析靶板在爆炸冲击波作用下的变形情况, 总结出四边约束方形靶板在冲击波作用下的挠度公式; 陈新祥等^[11]利用量纲分析以及数值模拟等方法分析炸距和装药量对变形挠度值的影响并得出影响规律; Shanyong Chu 等^[12]通过数值模拟与理论分析, 探究了同步双爆载荷下钢板的变形规律, 发现等重装药分两发起爆可显著增大钢板塑性变形, 且存在使变形最

*收稿日期: 2026-07-13; 修回日期: 2026-09-01

基金项目: 国家自然科学基金 (12202285); 兴辽英才计划青年拔尖人才 (XLYC2503071)

作者简介: 简茹慧 (2003—), 女, 研究生, 主要从事高效毁伤及其防护技术研究. E-mail: 3510267193@qq.com

通讯作者: 杜宁 (1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高效毁伤及其防护技术研究. E-mail: duning521519@126.com TEL: 17625906489

大化的最优装药间距;赵伟成等^[13]研究TNT两装药同时起爆时,在冲击波耦合作用下45钢制靶板的挠度变化与装药量、炸距、装药间距的关系并建立了可快速计算靶板挠度的预测模型;Wang Q等^[14]基于理论分析建立了爆炸载荷下金属板变形的理论模型,结合数值模拟与实验验证,分析了不同尺寸金属板在不同装药条件下的变形行为,并通过Python回归分析建立了多项式预测模型,提升了变形预测效率;Mohottige W等^[15]深入研究了多装药同时起爆下的爆炸载荷特性,为工程实践提供了预测模型和理论依据。从总体上看,现有研究多聚焦于接触爆炸作用下混凝土结构的毁伤特性,以及接触爆炸下单点、多点装药冲击波对钢板的毁伤规律;但针对多装药与接触爆炸耦合工况,装药间距等关键装药参数对钢板毁伤效应仍缺乏系统研究。已有研究表明,总装药量不变,通过合理布置可实现更优的毁伤效果与炸药能量利用率。因此,开展接触爆炸和多点起爆两条件同时作用下钢板的毁伤效应研究具有重要工程价值。

本文以Q235钢作为研究对象,采用数值模拟与试验验证相结合的方法,对比分析了接触爆炸条件下装药间距对靶板毁伤效应的影响规律。通过建立多装药接触爆炸数值模型,并结合试验结果,研究了不同装药间距下,钢板的破口形态、毁伤范围。研究表明,装药间距是影响毁伤效果的关键参数,其变化会对多装药爆炸冲击波耦合对靶板的毁伤效果造成影响。本文的研究结论可为装甲防护性能评估提供理论依据与数据支撑,同时也为民用爆破工程中钢板结构的抗爆设计与安全防护提供参考。

1 接触爆炸下双爆源对钢板的毁伤试验

1.1 试验布局

为探究在接触爆炸下两装药同时起爆对钢板的毁伤情况,试验布置了不同装药间距在靶板上方向同时起爆,观察靶板的毁伤情况,建立毁伤效果与装药间距的关联。金属靶板为500mm×500mm×6mm的Q235钢板,在钢板四边下方放置木方,支撑钢板,试验布置示意图如图1所示。选用JH-2两装药同时起爆,炸药的尺寸为 $\varnothing 25 \times 36 \text{mm}$,单发装药量约为30g,总装药量约60g。在炸药上方安装铝制雷管座,用来固定雷管,雷管为8号电雷管,连接的方式采用串联连接,试验现场布置情况如图2所示。

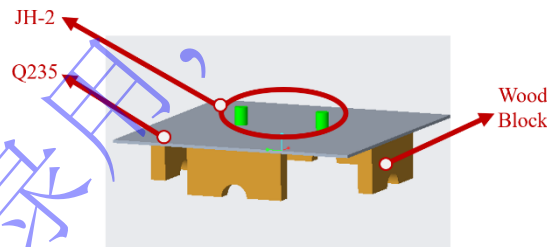


图1 试验布置示意图
Fig. 1 Schematic of test layout

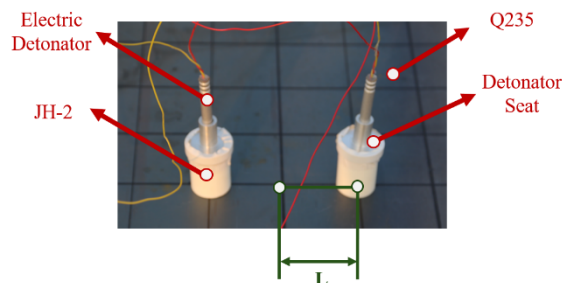


图2 试验现场布置图
Fig. 2 Layout of test site

保持装药质量、靶板厚度不变,修改阵列间距 L ,两点阵列间距为两炸药中心到药柱中心的距离,分别为12.5mm(两装药贴着放置)、20mm、25mm、30mm、35mm、40mm、45mm、50mm。

1.2 试验结果分析

钢板正面毁伤情况如图3所示,从图中可以看出在阵列间距为12.5mm时,两侧有明显的撕裂,说明此时冲击波相互叠加,爆轰产物在垂直于装药轴线处汇聚,且靶板上侧的冲击波对靶板造成的压力要远大于靶板下侧所受压力,因此造成严重的撕裂,此时冲击波叠加对靶板造成的伤害最明显;在阵列间距小于35mm时,靶板毁伤结果为一个连贯的孔洞,在阵列间距为35mm时,靶板毁伤为两个孔洞,中间有一条连接两个洞的裂缝,在阵列间距大于35mm时,靶板的毁伤结果同样为两个孔洞,但中间并无连通的裂纹,因此阵列间距为35mm时是判定毁伤结果孔洞个数的一个临界值。

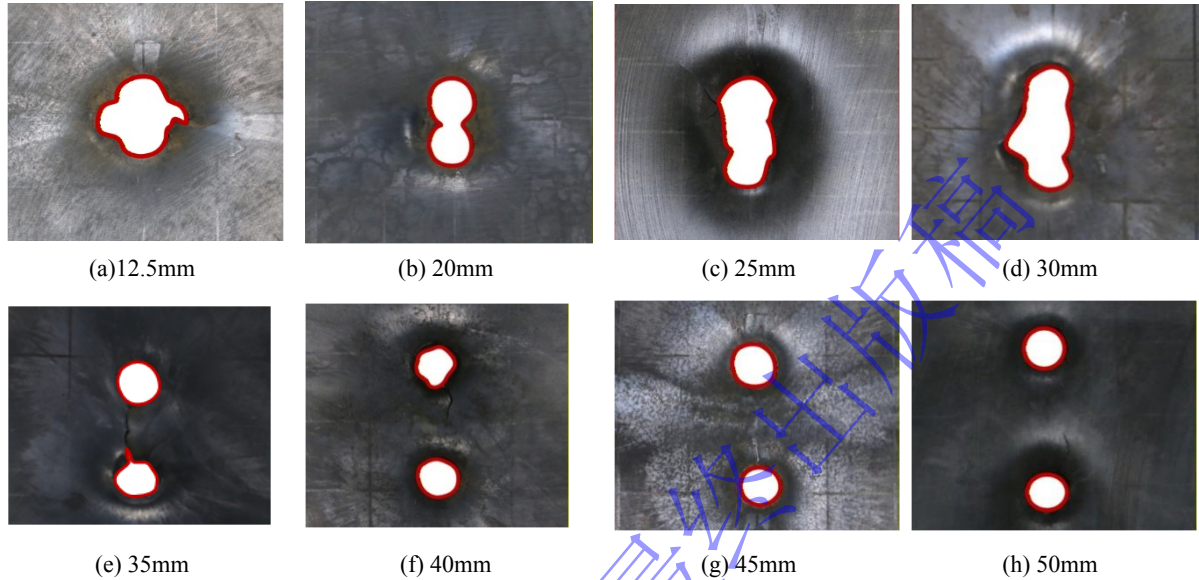


图3 靶板正面毁伤情况
Fig. 3 Front damage of target plate

2 数值模拟分析

2.1 有限元模型建立

利用有限元软件对模型进行处理,采用ALE算法计算冲击波对靶板的毁伤,炸药 $\varnothing 25\text{mm} \times 36\text{mm}$ 的圆柱形JH-2装药,靶板为 $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的Q235钢板。钢板四边采用完全固定约束(约束X、Y、Z三个方向的平动自由度),模拟试验中木方支撑对钢板边缘的刚性约束;空气域除与靶板接触面外,其余外表面均施加无反射边界条件,模拟无限空气域。炸药采用Euler单元建立,靶板采用Lagrange单元建立,流固耦合用关键字CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID描述。

金属靶板材料为Q235钢,采用GRUNEISEN状态方程以及采用JOHNSON_COOK累积损伤失效模型对材料进行描述,单元损伤度 D 定义为:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon^f} \quad (1)$$

式中: $\Delta \epsilon_p$ 为单个时间步等效塑性应变增量; ϵ^f 为当前应力、应变率、温度条件下的失效应变。 $D \in [0,1]$, 初始无损伤时 $D=0$; 当 $D=1$ 时材料发生失效, 单元被删除。失效应变表达式

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*][1 + D_5 T_H] \quad (2)$$

式中: σ^* 为应力三轴度; $D_1 \sim D_5$ 为材料失效参数。具体Q235材料参数^[16]详见表1。

表1 Q235 钢材料参数^[16]

Table 1 Material parameters of Q235 steel^[16]

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	σ_s / MPa	E / GPa	λ	ψ_ρ	$C_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1 / Pa
--	-------------------------	------------------	-----------	-------------	--	-------------------

7.83	206	206	0.30	2.17	4569	1.49
E_T/GPa	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	
0.13	0.0705	1.732	-0.54	-0.015	0.0	

炸药材料为 JH-2，采用 JWL 状态方程来描述装药性质，材料参数^[17-18]详见表 2。表中 P_{CJ} 为爆轰产物压力； V_D 为爆轰速度； A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 W 为常数； ω 为常数； E_0 为单位体积内能。

表 2 JH-2 材料参数^[17-18]

Table2 JH-2 material parameters^[17-18]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	P_{CJ}/GPa	$V_D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	A/MPa	B/MPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$
1.695	29.5	8425	854.5	20.493	4.6	1.35	0.25	8.5

JWL 状态方程是用来描述爆轰产物在高温、高压下，压力、体积与内能之间的关系，方程^[19-20]表示如下

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中： P 为爆轰产物压力； E 为单位体积内能； V 为相对体积； A 、 B 、 R_1 、 R_2 为常数。

2.2 模型有效性验证

2.2.1 网格收敛性分析

网格尺寸的选择是数值模拟结果精度的关键，选择合适的网格可以提升计算效率。因此为提高效率和精度，在阵列间距为 25mm 的条件下，建立炸药网格尺寸为

0.5mm、1mm、1.5mm、2mm、2.5mm 的五组工况，确保炸药、靶板、空气域的网格尺寸比例为 1: 1: 2，进行网格收敛性分析。选取靶板毁伤面积作为评价指标，以 0.5mm 网格的计算结果作为收敛基准，各组网格对应的相对误差如表 3 所示。

表 3 不同网格尺寸下靶板毁伤面积计算结果

Table 3 Calculation results of target plate damage area for different mesh sizes

Mesh size /mm	S/mm ²	Relative error to reference mesh	Relative error to experiment
0.5	2362.75	0.00%	0.98%
1.0	2376.33	0.57%	1.56%
1.5	2403.73	1.73%	2.73%
2	2534.55	7.27%	8.32%
2.5	2590.81	9.65%	10.73%

由表 3 可知，粗网格条件下单元更容易达到失效判据，数值模拟得到的毁伤面积较大，网格尺寸为 2.5mm 时与试验值对比的相对误差超过 10%；网格加密后，毁伤面积计算结果趋于稳定，接近试验值，当网格尺寸为 0.5mm 时，相对试验误差值仅为 0.98%。

网格尺寸为 1.0mm、1.5mm 时，相对于基准网格的误差值分别为 0.57%、1.73%，满足网格无关性要求；当网格尺寸大于 1.5mm 后，计算误差增大，不再满足收敛要求。将仿真结果与试验数据对比，1.0mm 网格方案的相对试验误差仅为 1.56%，满足计算精度需求。同时考虑计算精度与计算时长两方面，因此选取炸药、靶板模型为 1×1×1mm 的六面体网格，空气域模型为 2×2×2mm 的六面体网格示意图如图 4 所示。

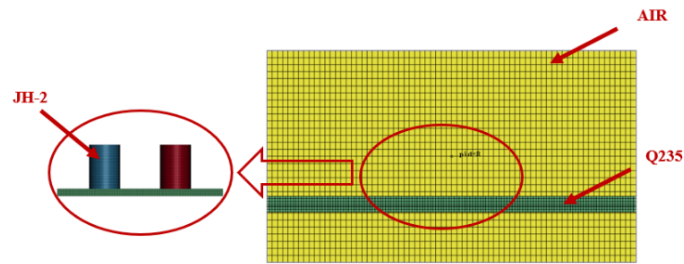


图4 网格划分示意图
Fig. 4 Schematic of mesh discretization

2.2.2 数值模拟与试验结果分析

采用上述模型参数对两装药接触爆炸下靶板毁伤试验进行数值模拟，装药间距为 12.5mm 的试验结果与数值模拟结果对比如图 5 所示，图中左侧是钢板正面毁伤轮廓的对比图，从外轮廓上看，形状较为接近，在装药中轴线上，冲击波叠加，爆轰产物汇聚，作用于钢板上，在钢板两侧形成三角形的破口；图中右侧为钢板穿孔后形成的翻唇对比图，可以看出翻唇在两侧较为明显，数值模拟与试验的钢板穿孔后翻唇外轮廓形状相似。通过对比钢板在接触爆炸时的毁伤面积，计算相对误差，各组工况结果值比对详见表 4。

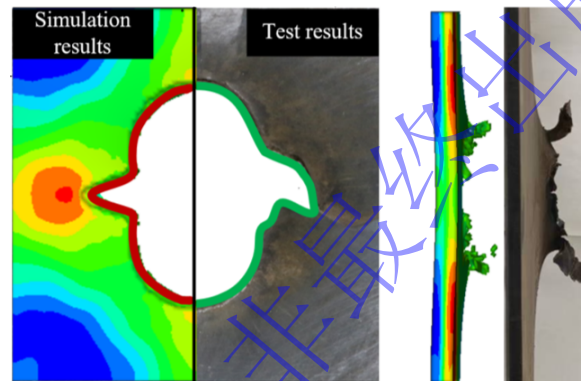


图5 试验与数值模拟结果轮廓对比图

Tag5 Comparison of contours between experimental and numerical simulation results

表4 试验与数值模拟结果

Table 4 Experimental and numerical simulation results

Case	L/mm	Test Data(S_1/mm^2)	Numerical Simulation Data(S_1/mm^2)	Relative Error
1	12.5	1923.27	1856.91	3.45%
2	20	1745.63	1847.43	5.83%
3	25	2239.84	2376.33	6.09%
4	30	2308.39	2418.35	4.76%
5	35	1506.82	1577.37	4.68%
6	40	1461.43	1445.68	1.08%
7	45	1577.26	1435.14	9.01%
8	50	1451.17	1451.06	0.01%

由表 4 数据可知，各工况数值模拟得到的靶板毁伤面积与试验测试结果基本一致，数值模拟与试验之间相对误差介于 0.01%~9.01%，最大相对误差 9.01%，均低于 15%，平均相对误差仅 4.36%。同时数值模拟能较为准确的预测出最优毁伤效果对应的装药间距，反映毁伤面积随装药间距增大的变化趋势。上述结果可以验证该模型参数的合理性，可用于本文的数值模拟研究。

2.2.3 误差来源分析

试验结果与数值模拟结果存在一定偏差,综合分析误差来源主要包括:一是边界条件简化,试验中木方支撑存在间隙和弹性变形,而数值模拟采用理想固定边界条件对边缘进行约束,存在一定偏差;二是数值模拟中将空气域设为无限域,不受冲击波反射干扰,但试验过程中不可避免会受到土壤反射冲击波的影响,导致结果出现一定偏差。从整体上看,误差处于合理范围,该数值模型可用于分析接触爆炸下阵列装药间距不同对钢板的毁伤特性。

2.3 两装药同时起爆时爆轰产物的扩散规律

利用数值模拟软件探究爆轰产物扩散规律,当阵列间距设置为 12.5mm 时,爆轰产物扩散特征如图 6 所示。结果表明,两侧装药产生的爆轰产物在钢板表面相互汇聚叠加,能量集中于装药中心轴线位置;爆轰产物进一步贯穿钢板结构,于钢板背侧形成两处近似锥形的产物扩散区域,且两处区域最终发生融合叠加作用于钢板上,因此垂直于两装药中轴线上的破孔宽度可以直接反映冲击波的耦合作用。

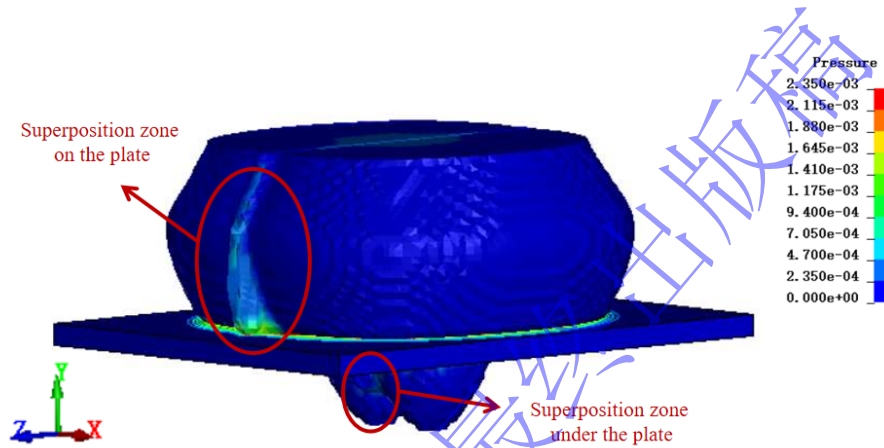


图 6 爆炸过程应力云图

Fig. 6 Stress contours during explosion

图 7 为钢板背侧爆轰产物的扩散过程。结果表明:6 μ s 时,爆轰产物尚未穿透钢板;8 μ s 时,产物穿透钢板,在背侧形成对称的压力场分布;10 μ s 时,两侧产物开始向装药轴线汇聚,发生初步叠加;至 12 μ s 时,产物在轴线处形成明显的高压叠加区域,能量集中效应显著,表明双装药的爆轰产物的耦合作用有效强化了钢板背侧的毁伤效果。

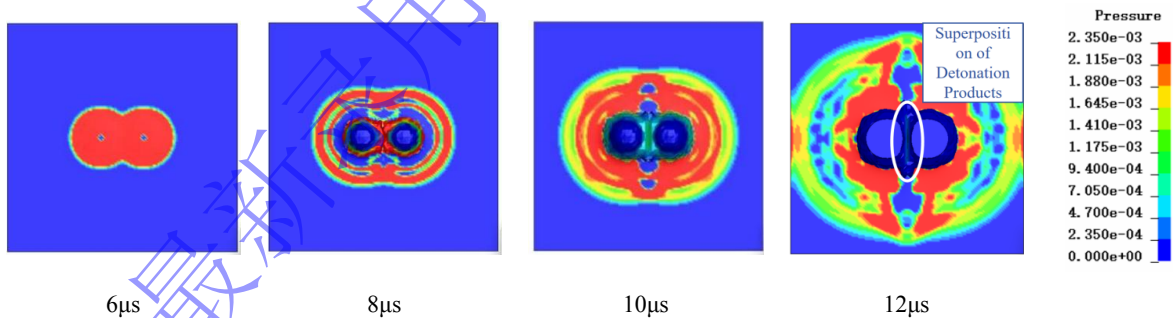


图 7 钢板背侧应力云图

Fig. 7 Stress contours on the rear side of steel target

图 8 为两装药轴线处 Y-Z 平面上的爆轰产物传播过程。结果表明:2~4 μ s 内,两侧爆轰产物由独立传播逐渐融合,形成统一的高压场;6 μ s 时爆轰产物到达钢板表面并开始施加冲击载荷;8 μ s 时爆轰产物穿透钢板,在背侧形成向轴线汇聚的压力场;10 μ s 时汇聚效应达到峰值,形成局部高压;至 12 μ s 时,爆轰能量大幅衰减。

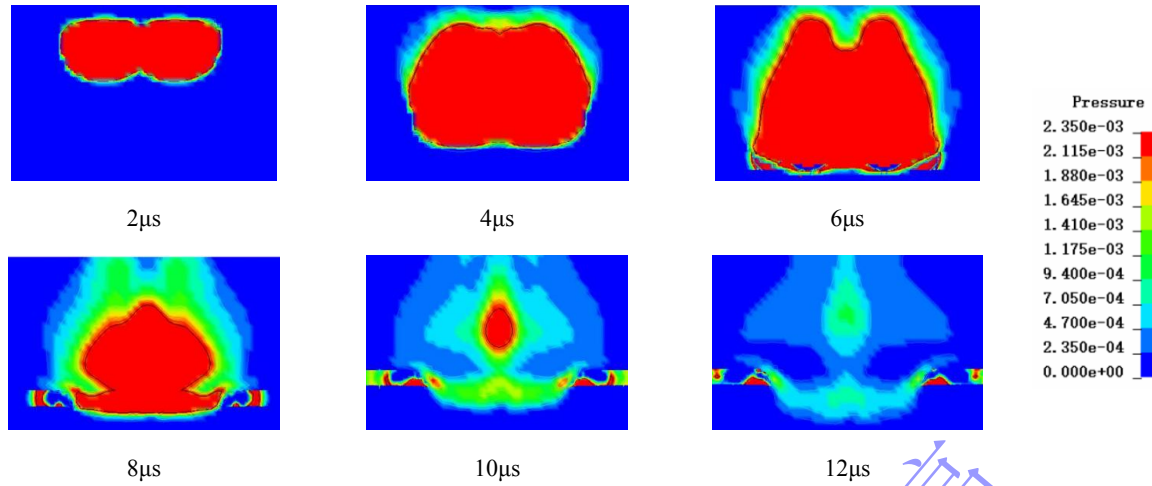


图 8 Y-Z 平面应力云图

Fig. 8 Stress contours on Y-Z plane

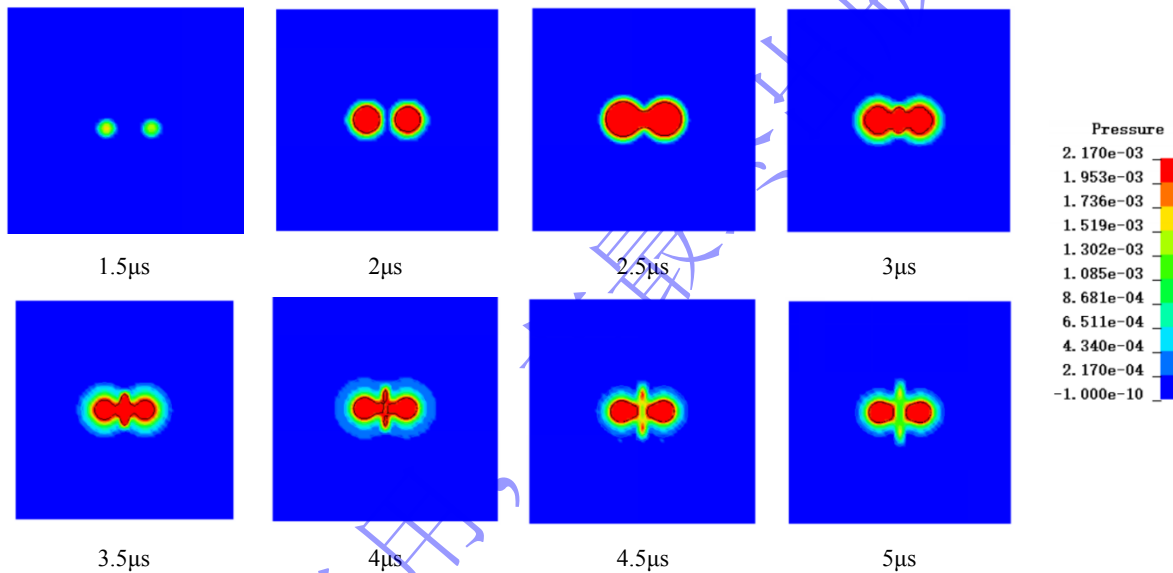


图 9 X-Z 平面应力云图

Fig. 9 Stress contours on X-Z plane

图 9 为两炸药顶部 X-Z 平面上的爆轰产物扩散规律，步长设置为 $0.5\mu\text{s}$ ，可以看出两炸药爆轰产物在 $1.5\text{--}2\mu\text{s}$ 时处于独立传播的状态，在 $2.5\text{--}3\mu\text{s}$ 时出现叠加， $2.5\text{--}4\mu\text{s}$ 时爆轰产物沿两装药连线的中垂线向外传播。由于中间耦合部分的传播速度要大于单个爆源冲击波的传播速度，因此形成了中间突起，两边为圆弧状的波阵面^[10]。

2.4 三点阵列爆炸对钢板毁伤的数值模拟研究

在确保装药总质量不变的情况下，将两个药柱分为三个药柱，单发药柱的质量约为 20g ，三发总质量仍为 60g 。利用数值模拟软件观察不同阵列距离下，成等边三角形分布的药柱在起爆后冲击波对靶板的毁伤情况，阵列距离 L 为阵列中心到炸药中心的距离，三点阵列摆放示意图如图 10 所示。

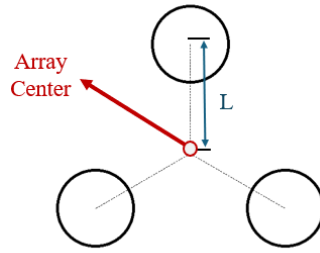


图 10 三点阵列摆放示意图

Fig. 10 Schematic of three-point array layout

以工况 4 为例展示三点起爆过程，在 $8\mu\text{s}$ 时冲击波在相邻药柱中心处、阵列中心处叠加并形成高压区。爆轰产物的扩散过程如图 11 所示。钢板变形过程图如图 12 所示，在 $8\mu\text{s}$ 时，钢板表面形成三个孔洞，在 $12\mu\text{s}$ 时，阵列中心处出现微小形变，在 $14\mu\text{s}$ 时钢板中心处被穿透， $22\mu\text{s}$ 时中心孔洞逐渐扩大， $30\mu\text{s}$ 时开始出现断裂，且钢板中心部分位移逐渐增大， $46\mu\text{s}$ 以后中心处全部断裂。

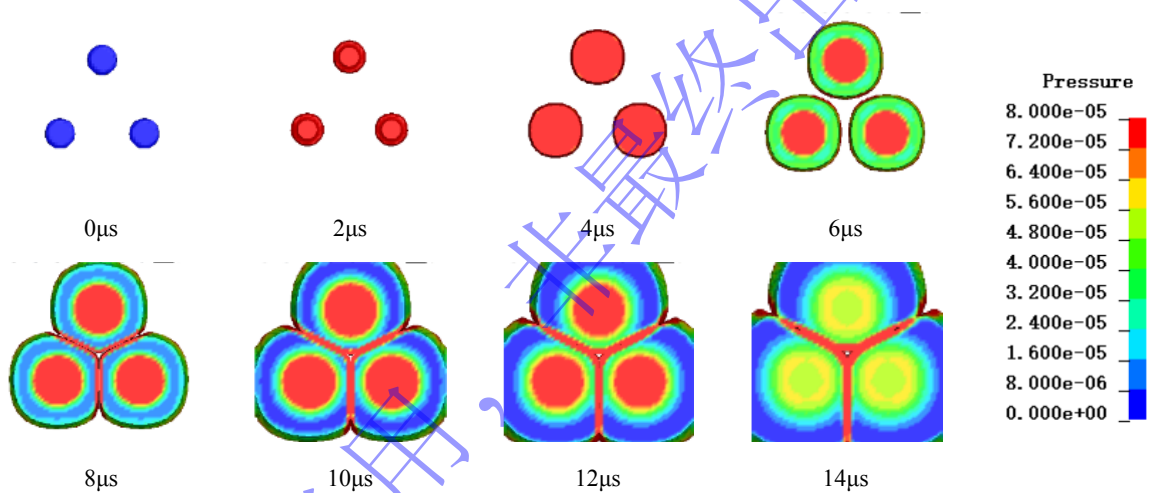


图 11 三点阵列爆炸时序演化云图

Fig. 11 Explosion evolution contours of three-point array

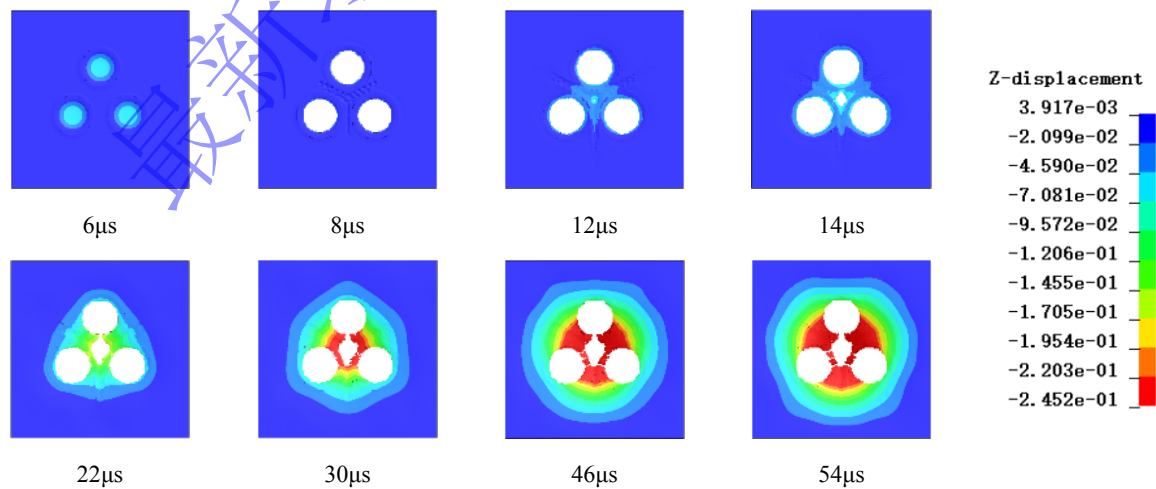


图 12 靶板变形过程图

Fig. 12 Deformation process of target plate

图 13 为每组工况钢板的毁伤情况, 工况 1 钢板毁伤呈现近似圆形的破口, 工况 2-4 呈现一个完整的近似三角形孔洞, 工况 5-7 破口处呈现四个孔洞, 且相邻孔洞之间有轻微裂纹, 工况 8 钢板毁伤形状为 4 个孔洞, 相邻孔洞之间并无裂纹。每组工况靶板的毁伤面积具体数据如表 5 所示。

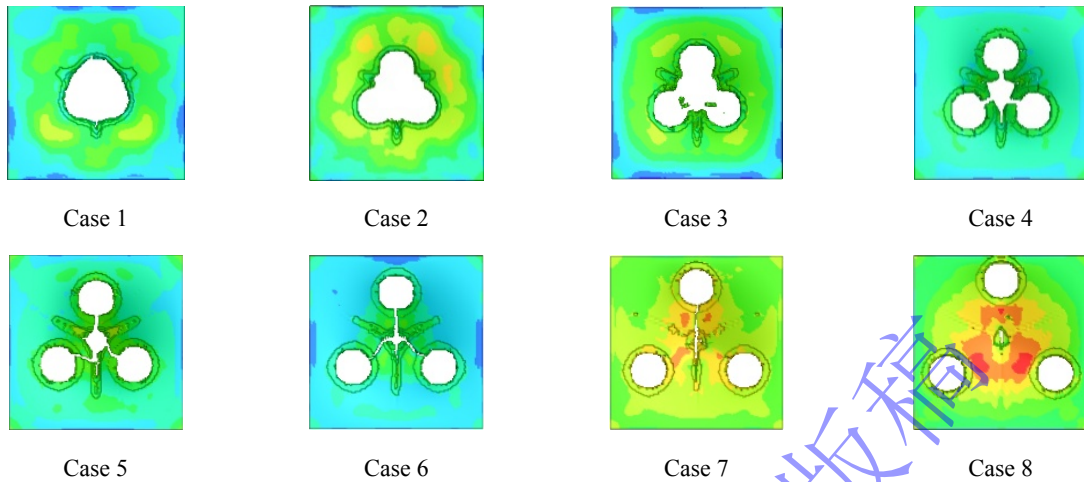


图 13 各组工况下钢板的变形情况

Fig. 13 Deformation of steel plate under various working conditions

表 5 三点阵列下钢板的毁伤面积

Table 5 Damage area of steel plate under three-point array

Case	L/mm	S_2/mm^2	Case	L/mm	S_2/mm^2
1	12.6	1862.59	5	35	2274.28
2	20	2424.08	6	40	2023.57
3	25	2583.78	7	45	1904.06
4	30	2346.99	8	50	1855.84

由表 5 数据可得, 三点爆炸下阵列装药间距改变时, 钢板的毁伤面积呈现先增大后减小的变化规律, 阵列间距在 25mm 附近时, 毁伤面积达到峰值。为消除量纲影响, 采用靶板厚度作为特征长度进行无量纲处理, 定义无量纲装药间距 $\xi=L/\delta$ 、无量纲毁伤面积 $\eta=S/\delta^2$ 。采用高斯函数对数值计算结果拟合, 得到经验预测公式:

$$\frac{S}{\delta^2} = 51.11273 + 19.69865 \exp \left[- \left(\frac{L/\delta - 4.37201}{1.82306} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: $\eta=S/\delta^2$ 为无量纲毁伤面积; $\xi=L/\delta$ 为无量纲装药间距, $\delta=6\text{mm}$ 为靶板厚度。拟合优度 $R^2=0.92115$, 该公式仅适用于钢板厚 6mm 装药总质量为 60g 且 $2.10 \leq \xi \leq 8.33$ 的三点等边阵列 JH-2 装药接触爆炸。该公式仅为工况范围内的预测公式, 若超出区间范围预测误差较大。

从图 14 及式(4)可以看出, 接触爆炸条件下靶板毁伤效果受阵列间距影响; 随着阵列间距增大, 无量纲毁伤面积呈现先增大后减小的变化趋势。仅在 $\xi=4.372$ 左右冲击波耦合毁伤效果最优, 钢板毁伤面积达到峰值, 对应实际装药间距 $L=26.23\text{mm}$ 。

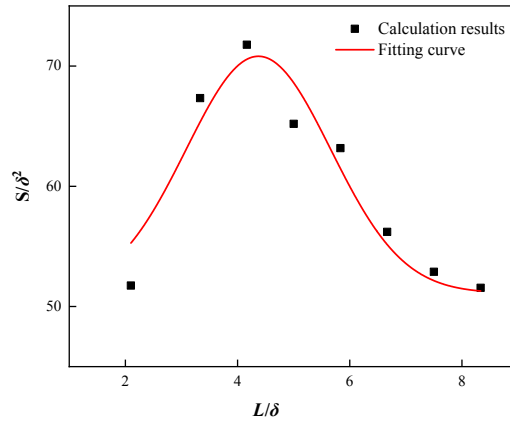


图 14 三点阵列装药间距与钢板无量纲毁伤面积高斯拟合曲线
Fig. 14 Gaussian fitting curve of dimensionless damage area vs. three-point array charge spacing

2.5 两点与三点阵列装药作用下靶板毁伤特性分析

为对比两点、三点阵列装药在装药总质量不变的前提下，不同装药间距下对钢板的毁伤效果，提取各数值工况下靶板毁伤面积结果如表 6 所示。表中 L 为阵列装药间距， S_1/mm^2 为两点爆炸下的毁伤面积， S_2/mm^2 为三点爆炸下的毁伤面积。

表 6 不同装药间距下两点与三点阵列装药靶板毁伤面积

Table 6 Damage area of target plate under two-point and three-point array charges with different charge spacings

Case	L/mm	S_1/mm^2	S_2/mm^2
1	12.5/12.6	1856.91	1862.59
2	20	1847.43	2424.08
3	25	2376.33	2583.78
4	30	2418.35	2346.99
5	35	1577.37	2274.28
6	40	1445.68	2023.57
7	45	1435.14	1904.06
8	50	1451.06	1855.84

Note: 两点阵列 12.5mm，三点阵列 12.6mm，装药接触放置

由表 6 中数据可知，在装药总质量恒定条件下，两点与三点阵列装药的靶板毁伤面积均随阵列间距增大呈现先升后降的变化趋势，但二者的峰值位置和耦合作用区间存在差异。

两点阵列的毁伤面积在 $L=30\text{mm}$ 时达到峰值 2418.35mm^2 ，随后在 $L=35\text{mm}$ 处快速下降至 1577.37mm^2 。这是由于毁伤模式由单孔向双孔转变的临界状态，当 $L \geq 35\text{mm}$ 时，两装药冲击波仍有叠加，但叠加后对靶板的毁伤效果微弱，可忽略不计，因此毁伤面积稳定在 $1445\text{--}1451\text{mm}^2$ 。

三点阵列的毁伤面积在 $L=25\text{mm}$ 时即达到峰值 2583.78mm^2 ，较两点阵列峰值提前。当 $L \geq 25\text{mm}$ 时毁伤面积逐渐减小，减小速度明显小于两点阵列，至 $L=50\text{mm}$ 时仍保持 1855.84mm^2 。这是由于三点等边阵列爆炸时，三向冲击波在阵列几何中心形成的三维对称汇聚效应具有更强的空间鲁棒性，即使间距增大，中心高压区仍能维持较高的能量，延缓毁伤效能的衰减。

将两点阵列与三点阵列对比可得：在 $L \leq 25\text{mm}$ 的紧密布置区间范围内，两种阵列毁伤面积接近，阵列排布形式的差异对结果影响不大；在 $L=25\text{--}40\text{mm}$ 的区间范围内，三点阵列毁伤优势显著，在 $L=35\text{mm}$ 时二者差距达到最大；当 $L \geq 45\text{mm}$ 时，两者毁伤面积趋于一致，说明过大间距下多点耦合效应均微弱，此时毁伤效能主要取决于单发药量而非阵列布局。

造成以上差异的原因在于冲击波耦合形式与能量汇聚模式的不同：两点阵列为二维线性汇聚，冲击波耦合效应受间距影响大，临界间距后毁伤面积大幅度下降；三点阵列为三向中心汇聚，能量

在靶板中心形成近似圆形的叠加高压区, 作用于钢板的有效耦合区间更大, 毁伤面积变化更平缓。因此, 在总装药量受限的工程应用中, 三点等边阵列较两点阵列在一定区间范围内具有更优的毁伤效能与布局容错性。

3 结论

利用试验和数值模拟数据对比, 分析两装药在接触爆炸条件下影响钢板破坏特性的因素装药间距对毁伤效果的影响, 通过数值模拟分析装药阵列间距对钢板毁伤效果的影响, 获得以下结论:

(1) 通过开展接触爆炸条件下双爆源对靶板的毁伤试验, 发现钢板的毁伤特性由装药的阵列间距决定, 装药长径比为 1.44, 单发质量为 30g, 6mm 厚的 Q235 钢板在阵列间距为 30mm 时毁伤的范围最大, 在阵列间距为 12.5mm 时 (炸药接触放置), 两装药的冲击波汇聚作用于靶板上的效果最明显。在装药长径比 1.44、单发质量 30g 条件下, 6mm 厚 Q235 钢板的毁伤特性显著受到阵列间距的影响。当阵列间距为 12.5mm 时两装药冲击波汇聚效应最强, 靶板撕裂最为严重; 间距为 30mm 时毁伤面积达到峰值; 装药间距为 35mm 时是毁伤模式由单孔变为双孔的临界值。

(2) 试验与数值模拟的毁伤面积相对误差在 15% 以内, 模拟了接触爆炸与双爆源爆炸两种条件作用下, 装药爆炸毁伤钢板的过程, 验证了数值模拟方法的有效性。并得到, 在阵列间距为 15-30mm 时, 随着装药间距的拉大, 耦合作用逐渐增强, 钢板的毁伤面积逐渐增大。

(3) 通过开展三点阵列接触爆炸的数值模拟, 得到阵列间距在 12.6mm-50mm 区间内, 钢板毁伤面积随阵列间距增大呈现先增大后减小的单峰变化趋势, 最优阵列间距为 26.23mm, 得到了适用于一定范围的三点接触爆炸靶板毁伤面积与阵列间距的定量关系式, 在一定程度上为多点阵列爆炸装药结构优化设计提供便捷的量化预测手段。

(4) 对比分析表明, 在总装药量恒定条件下, 三点等边阵列其毁伤面积峰值较两点阵列提前, 且在间距为 25-40mm 区间范围内三点毁伤优势显著, 布局容错性更强; 当间距 ≥ 45 mm 时, 两种阵列毁伤效能趋于一致, 耦合效应均可忽略。因此在总装药量受限的工程应用中, 适当减小单发药量、增加装药点数并优化阵列间距, 可在冲击波耦合叠加效应作用下增加毁伤效能。

参考文献

- [1] Zhao N, Yao S, Zhang D, et al. Experimental and numerical studies on the dynamic response of stiffened plates under confined blast loads[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 154: 106839-106839.
- [2] Zhou Z, Zechen D, Zhang Y, et al. Microscopic defects formation and dynamic mechanical response analysis of Q345 steel plate subjected to explosive load[J]. Defence Technology, 2024, 32: 430-442.
- [3] Tiaoqi F, Zhang M, Zheng Q, et al. Scaling the response of armor steel subjected to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 153: 103863-103863.
- [4] 薛建锋, 章琪月, 许红浩, 等. 接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能[J]. 高压物理学报, 2025, 39(5): 61-77.
XUE J F, ZHANG Q Y, XU H H, et al. Blast resistance of POZD-coated reinforced concrete beams under contact explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(5): 61-77.
- [5] 孟元沛, 马跃, 何源, 等. 接触爆炸下密实介质对爆轰波垂直入射压力的影响规律研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(2): 305-315.
MENG Y P, MA Y, HE Y, et al. Study on influence of dense medium on impact pressure of detonation waves subjected to contact blasts[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(2): 305-315.
- [6] 赵小华, 李亚男, 赵浩楠, 等. 接触爆炸下玄武岩纤维混凝土板毁伤特性研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44 (11): 39-49.
ZHAO X H, LI Y N, ZHAO H N, et al. Damage characteristics of basalt fiber reinforced concrete slab under contact explosion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44 (11): 39-49.
- [7] Zhao H, Fang H, Zhao X. The dynamic response and damage models of rebar reinforced polymer slabs subjected to contact and near-field explosions[J]. Defence Technology, 2023, 28: 330-342.

- [8] Yanghua H, Liu Z, Mingzhi L, et al. The Damage to Thick Steel Plates by Local Contact Explosions[J]. Materials, 2023,16(8):2966-2966.
- [9] Mejía N, Peralta J, Tapia R, et al. Damage assessment of RC columns under the combined effects of contact explosion and axial loads by experimental and numerical investigations[J]. Engineering Structures, 2022, 254: 113776-113776.
- [10] 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.
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.
- [11] 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.
- [12] Chu S, Yuan Y, Huang Y, et al. Double blast loadings of clamped square steel plates[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 112484-112484.
- [13] 赵伟成, 翟红波, 毛伯永, 等. 两装药同时起爆时金属靶板的动态响应[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43 (12): 3-13.
ZHAO W C, ZHAI H B, MAO B Y, et al. Dynamic response of a metal target plate to simultaneous initiation of two charges[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43 (12): 3-13.
- [14] Wang Q, Ren H, Jianqiao L. Dynamic response of contact-blast-loaded free metal plate: Theoretical model, experiments and numerical simulation[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 175: 109228-109228.
- [15] Mohottige W, Chengqing W, Hao H. Characteristics of Free Air Blast Loading Due to Simultaneously Detonated Multiple Charges[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2014, 14(04): 1450002-1450002.
- [16] 郭克强, 孙华, 赵沁, 等. 空中和水中近场爆炸冲击波对靶板作用效应对比分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41 (01): 42-48.
GUO K Q, SUN H, ZHAO Q, et al. Contrastive analysis of shock wave effect on target plate in near-field explosion in air and underwater[J]. Journal of Nan-University of China (Natural Science Edition), 2020, 41 (01): 42-48.
- [17] 方一舟, 张先峰, 熊玮, 等. 聚能射流侵彻有限厚钢靶后效参数的特性[J]. 含能材料, 2024, 32(09): 899-910.
Fang Y Z, Zhang X F, Xiong W, et al. Characteristics of After-effect Parameters of Shaped Charge Jet Penetrating Finite Thickness Steel Target[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(09): 899-910.
- [18] 余天晨, 杜宁, 潘明然, 等. 基于 GA-BP 神经网络的水介质药型罩结构优化[J]. 弹道学报, 2026, 38 (01): 105-112.
YU T C, DU N, PAN M R, et al. Structural Optimization of Water-medium Shaped Charge Liner Based on GA-BP Neural Network[J]. Journal of Ballistics, 2026, 38(01): 105-112.
- [19] 刘飞, 唐献述, 任新见. 接触爆炸作用下钢板层裂效应数值分析[J]. 工程爆破, 2011, 17 (02): 15-18, 22.
LIU Fei, TANG Xiangshu, REN Xinjian. Numerical analysis of spall effect of steel plate under contact explosion[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(2): 15-18, 22.
- [20] 张强, 余曜, 迟德建, 等. 柱形装药接触爆炸条件下对钢筋混凝土板的毁伤规律研究[J]. 空天防御, 2020, 3(2): 16-23.
ZHANG Q, YU Y, CHI D J, et al. Study on the damage effect of cylindrical charge on reinforced concrete slabs[J]. Air & Space Defense, 2020, 3(2): 16-23.

Damage Characteristics of Target Plate under Double Detonation Sources in Contact Explosion

JIAN Ruhui¹, DU Ning¹, YU Tianchen¹, PAN Mingran², Guo Qiuping³

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China;

2. Office 2, Shenyang Bureau, Shenyang 101416, Liaoning, China;

3. Liaoshen Industrial Group Co., Ltd, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: To investigate the influence law of charge spacing on the damage effect of Q235 steel plates under contact explosion conditions, and to provide a theoretical basis for the design of explosion-resistant armor structures and layout optimization of multi-point simultaneous detonation warheads, this paper takes JH-2 explosive and Q235 steel plate as research objects. Employing numerical simulation methods, the study examines the damage effect of blast loads from dual explosion sources on steel plates under contact explosion conditions. First, a numerical simulation model for contact explosion was developed, and its accuracy and reliability are verified by comparing it with experimental results. Based on this, the coupled effect of shock waves generated by two charges after detonation and its influence law on the plastic deformation characteristics and plugging failure mode of steel plates are analyzed. The results show that, with a constant total charge mass, the damage range of the two-point array expands with the increase of charge spacing, and the critical array spacing capable of forming complete plugging holes is 30 mm. Under contact explosion of the three-point array, the damage area presents a single-peak variation characteristic that rises first and then declines as the array spacing increases. The optimal charge array spacing is 26.23 mm where the maximum damage efficiency of the target plate is achieved. The established Gaussian prediction formula has a goodness-of-fit of 0.9212, which can rapidly and quantitatively predict the damage area of steel plates corresponding to any array spacing within the range of 12.6 to 50 mm. The research results not only provide a theoretical basis and quantitative data support for evaluating the coupled damage efficiency of dual charges under contact explosion and the design of explosion-resistant structures, but also provide references for the layout design of multi-point simultaneous detonation array charges.

Keywords: numerical simulation; multi-point explosion; contact explosion; array explosion