

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0023

混凝土中多点聚集爆炸效应起爆参数优化设计*

时本军, 李杰, 徐小辉, 徐天涵, 郭伟, 李孝臣, 李超, 李干

(中国人民解放军陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏南京 210007)

摘要: 混凝土介质中多点同时或彼此微差爆炸可产生复杂的地冲击波叠加聚集效应, 从而使特定区域内的地冲击波压力显著增强, 大大提升爆炸的毁伤威力。为获取多点爆源不同排布方式下爆炸聚集效应及地冲击传播衰减规律, 进行了混凝土中单点和七点聚集爆炸的现场和数值模拟试验, 基于正交设计方法和灰色系统理论对多点起爆参数进行了优化设计, 建立了比例装药间距、比例有源装药高度和比例起爆微差等因素与不同爆心距下峰值压力间的灰色关联度系数及灰色关联度, 确定了起爆参数的优选组合, 并开展了数值模拟试验检验。分析结果表明: 影响地冲击聚集效应的主要因素为比例装药间距, 其次为比例起爆微差, 再次为比例有源装药高度。在本模拟试验情况下, 采用优化的起爆参数时, 即在比例装药间距为 $0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、比例起爆微差 $0.239 \text{ m/kg}^{1/3}$ 和比例有源装药高度为 $0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 地冲击波聚集效应达到最佳, 最大可达单点同等装药量产生的地冲击压力的 4.7 倍。

关键词: 灰色理论; 聚集爆炸; 混凝土; 关联度; 优化设计

中图分类号: O382

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Optimization of detonation parameters for multi-point aggregated explosion effects in concrete

SHI Benjun, LI Jie, XU Xiaohui, XU Tianhan, GUO Wei, LI Xiaochen, LI Chao, LI Gan

(State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: Simultaneous or slightly different explosions at multiple points in the concrete medium can generate a complex superposition and aggregation effect of ground shock waves, significantly enhancing the pressure of ground shock waves in a specific area and greatly improving the destructive power of the explosion. In order to obtain the explosion aggregation effect and ground shock propagation attenuation law under the different arrangement of multi-point explosive sources. Firstly, field tests were carried out on single and seven-point aggregated explosions in concrete. Then, the reliability of the RHT material model parameters and the SPH numerical algorithm were verified based on experimental data. On this basis through the orthogonal design method and gray system theory on the multi-point detonation parameters for the optimization of design. Gray correlation coefficients and gray correlations between scaled charge spacing, scaled active charge height, scaled detonation time difference and peak pressure at different proportional bursting center distances were established. Finally, single-objective factor optimization and multi-objective factor optimization were identified, a set of preferred combinations of each factor was determined, and simulation tests were conducted to verify the results. The analysis results show that the concrete material model of RHT and the SPH algorithm can reasonably predict the shock wave propagation attenuation characteristics of multipoint charge explosions at different scaled bursting center distances as well as the induced damage and destruction of concrete; The main factors affecting the impact of the ground shock aggregation of explosive effect, in order of

* 收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(52279120, 12072371); 江苏省自然科学基金(BK20221528);
爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室基金(LGD-SKL-202202)

第一作者: 时本军(1993—), 男, 博士研究生, benjunshi@163.com

通信作者: 李杰(1981—), 男, 博士, 教授, lijief@163.com

magnitude: scaled charge spacing, scaled detonation time difference and scaled active charge height. The use of optimized detonation parameters, that is, in the case of this test, in the proportional charge spacing $0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$, the proportional detonation time difference of $0.239 \text{ m/kg}^{1/3}$, the proportional active charge height of 0, the ground shock aggregation effect to achieve the best, up to the same amount of single-point group charging the same amount of ground shock pressure of 4.7 times.

Keywords: gray theory; aggregated explosion; concrete; degree of association; optimal design

混凝土中多点爆炸产生的爆炸波聚集效应问题是军事和民用领域的热门话题^[1-4]。在军事应用方面,采取多弹同时打击,可大幅增加钻地导弹的地冲击效应,是摧毁高强防护目标的优选方式之一。在民用方面,采用多点同时或彼此微差爆炸方式可在特定范围形成高压区,可极大提升爆炸有效能量的占比。

由于多点间爆炸波相互作用的复杂性,目前主要采用试验和仿真手段开展研究工作。美国核防局^[5-6]对多点同时和微差爆炸的空气或地面冲击波做了丰富的理论和试验探究,表明在特定区域内,与单点爆炸比较,多点爆炸产生的峰值压力是单点的 3~8 倍,对深地防护工程带来极大威胁。Hu 等^[7]研究了多点不同爆炸阵列对水下爆炸参数的影响,结果表明装药数量的增加可以提高冲击波的高压区域范围以及冲量,阵列距离的增大可提高冲量和延长冲击波作用时间,冲击波压力正压作用时程与装药数量、阵列距离密切相关。Izumi 等^[8]通过实验研究了空气中不同平面激波强度和不同抛物形壁面深度对反射激波相互作用的影响,结果表明激波马赫反射所形成的 2 个三波点的碰撞是形成激波聚焦的局部高压区的主要原因,同时,根据反射激波在聚焦前后的形态及其位置关系将激波聚焦分成了 A、B 和 C 等 3 种模式。除了冲击波压力聚集引起的高压区外,Kishige 等^[9]通过辐射测量实验证实了氩气中冲击波压力聚集还伴随着高温区。Qiu 等^[10]构建了一套同步进行光弹性和焦散方法的同步测量系统,给出了两点同时爆炸爆炸波的相互作用的光弹和焦散线场图,存在聚集现象。李旭东等^[11]结合应变仪和高速数字图像相关方法,探究了三点同时爆炸时爆炸波在水泥板中聚集效应的特性,结果表明,聚集效应将引起正应变在聚集区域强烈的非线性激增,这种猛烈的大变形将对介质和结构带来显著的毁坏作用,并且该非线性效应的存在与爆炸点之间的距离有着密切的联系。Lin 等^[12]对水下多点同步爆炸进行了数值仿真分析,结果表明水下两点同步爆炸的冲击波压力具有非线性叠加效应,约为单点爆炸的 1.48~2.52 倍;在总炸药质量不变的条件下,8 个炸药同步爆炸对靶体的毁坏作用最严重。Kim 等^[13]采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法,对弱冲击波的聚集效应开展了数值分析,从峰值压力、气体动力和几何焦点 3 个方面探究了激波的聚焦特性,结果表明激波聚集的峰值压力及其位置与入射激波马赫数和反射面几何形状有很大关联性;而气体动力焦点的位置总是比几何焦点的位置短,同时随着入射冲击波的增强,这种趋势更加明显。Liang 等^[14]利用欧拉求解法数值研究了激波聚焦在抛物面反射器上的详细流场;之后他^[15]又计算了抛物面矢量上的轴对称冲击波聚焦现象,得到了不同入射激波马赫数下不同深度反射器聚集轴对称激波的复杂流场分布,从计算的流场中可以确定最大压力发生的位置。Qiu 等^[16]利用 Overture 数值软件基于有限差分方法研究了多点爆炸源起爆时冲击波的相互作用和融合,其目的是为了通过多点起爆的方式增加特定区域的压力峰值增大伤害性并大大减小远离目标区域的附带伤害。刘玲等^[17]通过 AUTODYN 仿真软件研究了商场内部单点爆炸和多点爆炸下爆炸波传播的特性。研究表明:从人员伤害角度来分析,多点同时起爆较单点爆点的毁伤半径变大,较单点提高 1.41 倍。

综上所述,目前多点聚集爆炸效应研究多集中于水或空气介质,关于混凝土等固体介质中多点聚集爆炸效应鲜有深入探讨。本文中,在前人研究的基础上,利用实验和数值模拟手段对混凝土中多点聚集爆炸效应进行研究,并运用灰色系统理论优化设计起爆参数,以期为提高类似介质中多点爆炸毁伤效能提供原技术参考。

1 混凝土多点聚集爆炸效应数值模拟

1.1 几何模型

为探究混凝土中七点爆炸对地冲击聚集效应的影响,建立了图 1(a) 所示的几何模型。该模型由混

凝土、药球和钢筋网 3 部分组成, 其中该模型外形是长方体, 长 1.5 m, 宽 1.5 m, 高 1.6 m。在距混凝土自由面 0.42 m 处以正六边形方式布置 7 个药球, 所用药球的质量均为 10.5 g, 共 73.5 g, 起爆点位于药球球心; 钢筋网安放在靶体边界, 加固靶体。由文献 [18-20] 可知, 影响多点聚集爆炸效应的起爆参数主要包括装药间距、有源装药高度和起爆微差时间; 其中, 装药间距是投影面上 7 号药球的球心到 5 号药球球心的距离 L (图 1(b) 上部分); 有源装药高度是 7 号药球的球心到周围 1~6 号药球球心所构成的平面的高度 H (图 1(b) 下部分)。为提高 7 号药球产生的爆炸波与 1~6 号药球产生的爆炸波相互作用的同步性, 在设置起爆微差时间 $\Omega = L/W^{1/3}$ 时, 令 7 号药球起爆时间迟于或等于 1~6 号药球的起爆时间。对以上起爆参数分析各记为: 比例装药间距为 $\Omega = L/W^{1/3}$, W 为 7 个药球的质量之和, 本文中选取 73.5 g; 比例有源装药高度为 $\Psi = H/W^{1/3}$; 比例起爆微差时间 $\Gamma = \Delta Tc/W^{1/3}$, c 为混凝土的纵波波速。

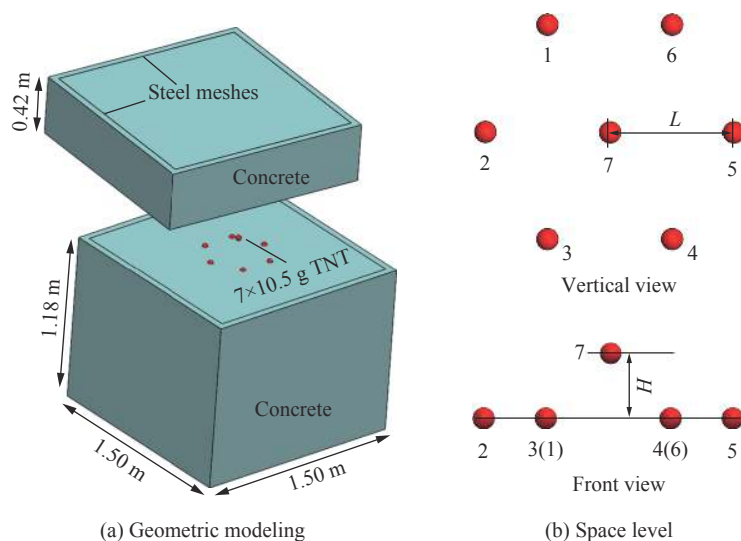


图 1 多点爆炸模型

Fig. 1 Multi-point explosion model

1.2 有限元模型

考虑上述几何模型的对称性以及降低计算周期, 建立了 1/4 有限元模型, 如图 2(a) 所示。数值模拟时, 对靶体和炸药选用 SPH 算法, 钢筋选用 beam 算法。如图 2(b) 所示, 边界条件定义为无反射固定边界, 在对称界面设置对称约束以限制粒子的旋转和位移; 在装药中心正下方设置了 S1~S5 监测点, 量测爆炸波应力时程曲线。计算单位制采用 mm-g-ms。

对混凝土选用材料库中内置的 35 MPa 模型^[21], 由 p - α 状态方程和 RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) 本构方程组成, 如图 3 所示。采用 p - α 状态方程来表征混凝土等脆性介质在不同受力情况下的力学行为, 当压力小于孔隙破碎压力 p_{el} 时, 介质处于弹性状态; 一旦压力超过 p_{el} , 孔隙坍塌, 引起材料的有效体积模量减小; 当压力达到 p_{co} , 孔隙被完全压实, 全程是塑性变化。RHT 本构方程中有 3 个固定失效面, 如图 3(b) 所示。对损伤采用侵蚀算法, 将侵蚀因子设置为 2.5。对单层钢筋网选用材料库中内置的 STEEL 模型^[21]。

对药球选用材料库中炸药模型^[21]。Jones-Wilkins-Lee 方程通常来定义炸药的爆炸, 其具体关系^[22]为:

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

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为特征常数; $\bar{V} = \rho_0/\rho$, ρ_0 为初始密度, ρ 为密度; E_0 为初始体积内能。炸药参数取值如表 1 所示^[21], D 为爆轰速度。

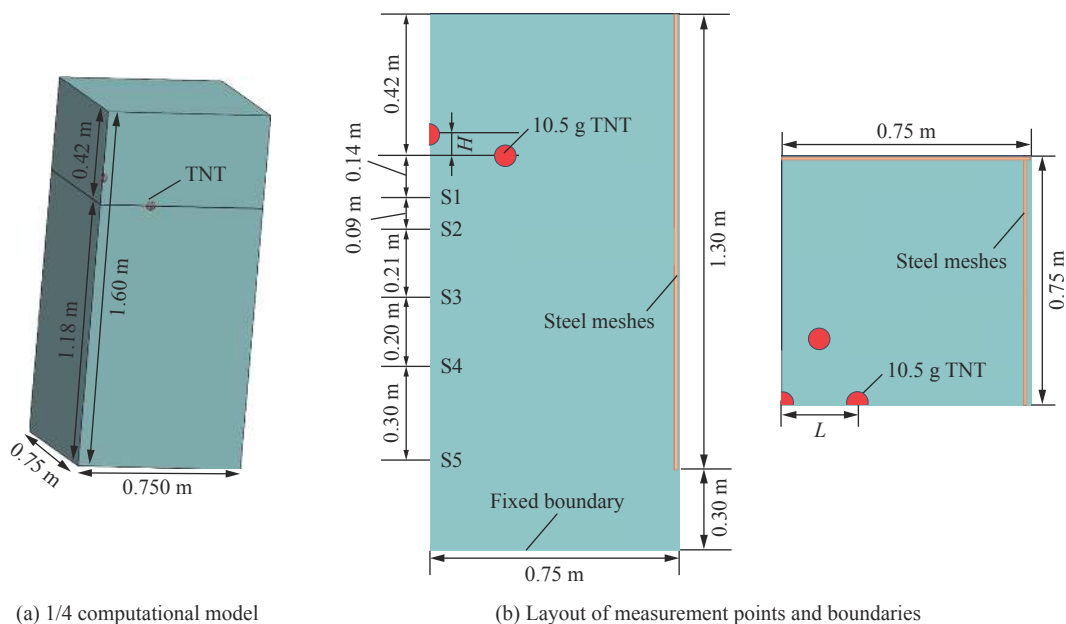


图 2 有限元模型及边界条件

Fig. 2 Finite element model and boundary conditions

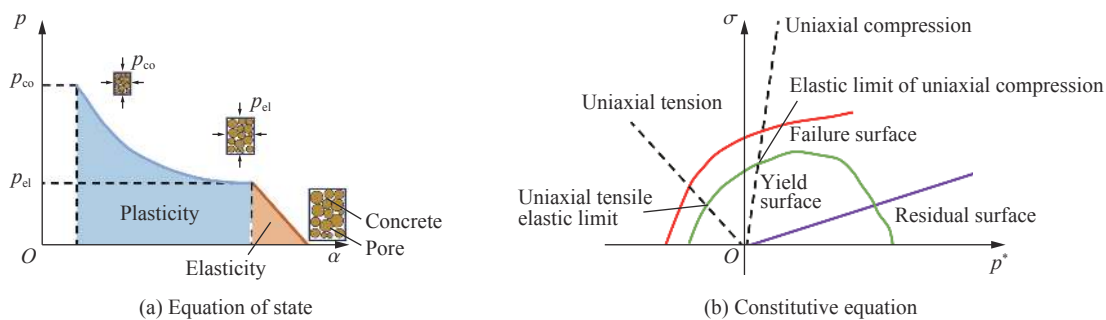


图 3 RHT 模型原理

Fig. 3 Principle of the RHT model

表 1 TNT 炸药的参数

Table 1 Parameters for TNT explosive

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$D/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	E_0/GPa
1.63	373.77	3.7471	4.15	0.90	0.35	6.93	6.0

1.3 粒子尺寸无关性分析

为提高计算精度和求解效率, 对计算模型进行粒子无关性分析。为此, 分别选用粒子尺寸为 4、5、8、10 和 20 mm 进行爆炸波传播的数值模拟。图 4 为距装药中心 0.26 和 0.40 m 处混凝土中的应力时程曲线。

从图 4 可以看出, 在粒子尺寸的增大时, 爆炸波波峰由陡峭变得平缓, 波阵面前的应力由 0 增大到峰值应力的斜率逐渐降低, 爆炸波应力波形逐渐失真。对比图 4 中 2 个距离下不同粒子尺寸的冲击波应力-时程曲线, 发现粒子尺寸小于 5 mm 的数值模拟是收敛的。因此, 选用粒子尺寸为 5 mm 进行接下来爆炸波传播过程的数值模拟。

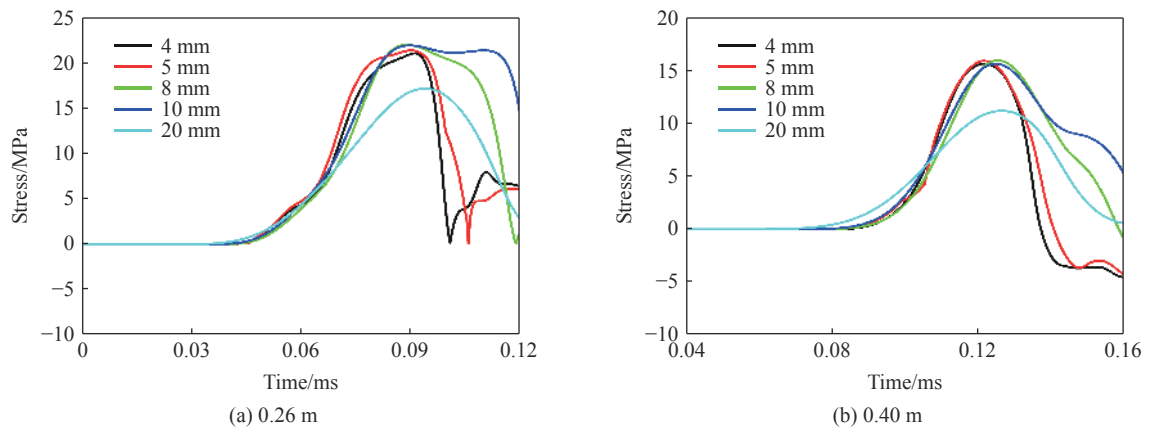


图 4 不同网格尺寸模拟得到的距装药中心不同距离处混凝土中的应力时间历程
 Fig. 4 Stress-time histories at different monitoring points in concrete with different distances away from the explosive charge center simulated by applying different mesh sizes

2 计算模型的试验验证

2.1 装药设计

图 5 为混凝土中七点爆炸和单点爆炸的布置图。第 1 组采用七点装药: 单个药球质量为 10.5 g, 药

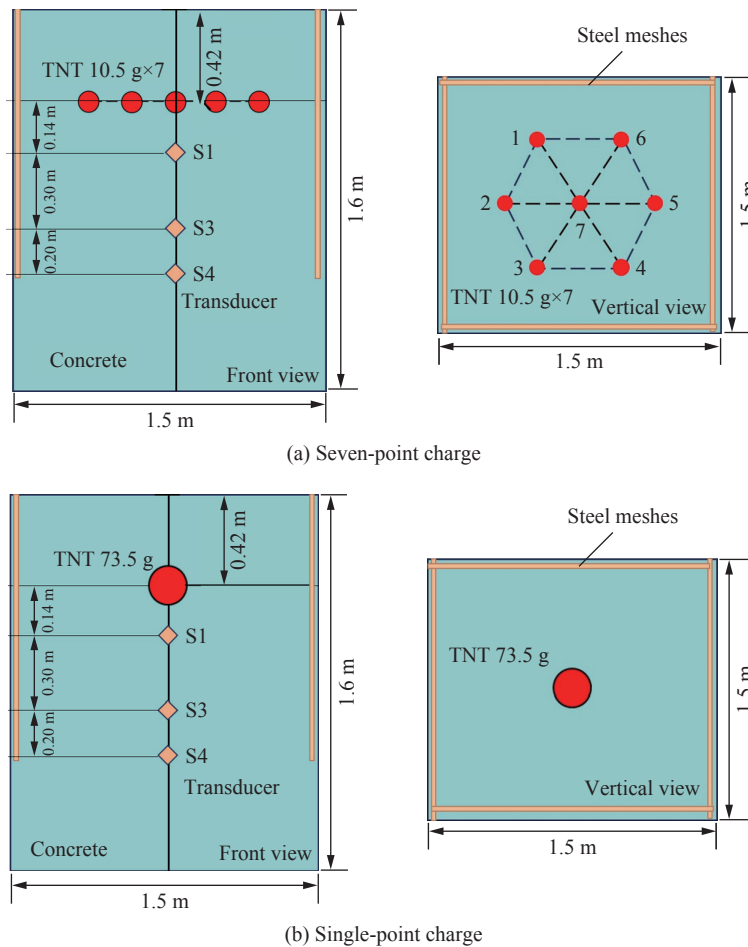


图 5 两种试验工况
 Fig. 5 Two test conditions

球的排列轮廓线是边长为 0.23 m 的正六边形, 比例有源装药高度为 0, 装药埋深为 0.42 m, TNT 药球总质量为 73.5 g, 起爆方式采用 7 点同时起爆, 如图 5(a) 所示。第 2 组采用单点装药: 装药质量仍为 73.5 g, 埋深不变, 作为参照组, 如图 5(b) 所示。

试验炸药均采用球形装药, 图 6(a) 为试验中所用药球的示意图, 装药密度为 1.5 g/cm^3 , 装药上方预留有直径为 8 mm 的雷管安装孔。该装药采用散装三硝基甲苯 (TNT), 经一体成型工艺压装而成。图 6(b)~(c) 分别为 10.5 和 73.5 g 药球, 通过雷管起爆。

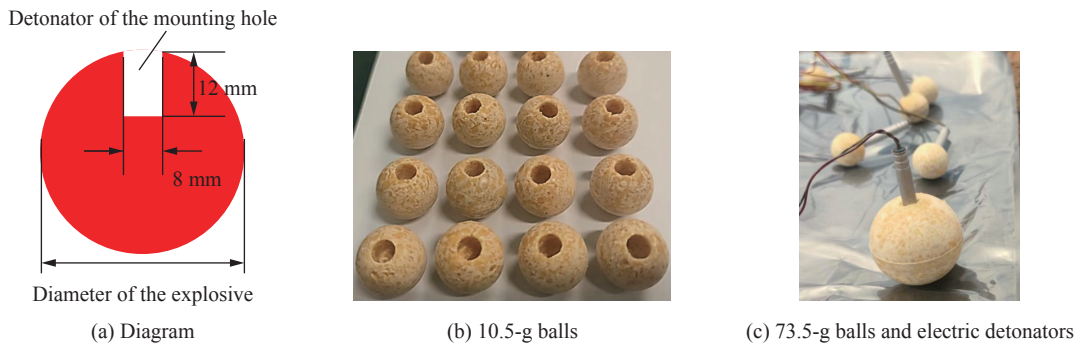


图 6 TNT 药球

Fig. 6 TNT explosive balls

2.2 靶体设计

采用 C35 混凝土浇筑试验靶体, 如图 7 所示。图中 2 个靶体分别是七点装药和单点装药的试验靶体, 这 2 个靶体的尺寸和数值模拟中的几何模型一致。养护 28 d 后, 测得 C35 混凝土的密度为 $2\,200 \text{ kg/m}^3$, 抗压强度为 36 MPa。试验中, 采用 PVDF 压电式传感器获取不同测点处爆炸波法向应力的时程曲线。电荷放大器选用东华测试公司生产的 DH5863A 型号, 数据采集选用东华的 DH5960 高性能动态信号测试系统, 采样频率为 1 MHz。



图 7 混凝土靶体

Fig. 7 Concrete targets

2.3 试验结果与计算模型验证

为验证数值的准确性, 分别对 2.1 节两试验工况开展模拟, 并互相对比, 计算结果见图 8~9 以及表 2~3。图 8 中比色卡为混凝土靶体的损伤值, 是靶体材料塑性应变的累计, 当靶体材料断裂时, 其值为 1; 可以观察到, 不同装药方式下在混凝土顶部表面均有裂纹, 但未见有明显弹坑和抛掷现象, 说明 2 种装药方式下爆破能量基本被封

闭。位于七点装药所在的平面, 各空腔之间相互贯穿, 外观类似饼状, 见图 8(a); 而单点爆炸产生一个独立空腔, 见图 8(b), 破坏区域较七点装药的小。在试验现场发现, 靶体后表面有明显的层裂, 这是由反射拉伸波造成的。通过对比可知, 所使用的数值计算模型可以准确地模拟和反映混凝土靶体的破碎及裂纹扩展情况。试验和数值模拟得到的混凝土弹坑深度和宽度见表 2, 最大误差为 12.5%。图 5 给出了试验监测点的示意图, 分 3 层布设于爆心下方。这两工况试验下各测点的应力时程曲线见图 9, 因为部分

表 2 试验与数值模拟得到的弹坑尺寸

Table 2 Crater dimensions by test and numerical simulation

工况	弹坑的深度			弹坑的直径		
	模拟值/m	试验值/m	偏差/%	模拟值/m	试验值/m	偏差/%
七点爆炸	0.441	0.430	2.56	0.748	0.755	-0.93
单点爆炸	0.530	0.490	8.16	0.225	0.200	12.50

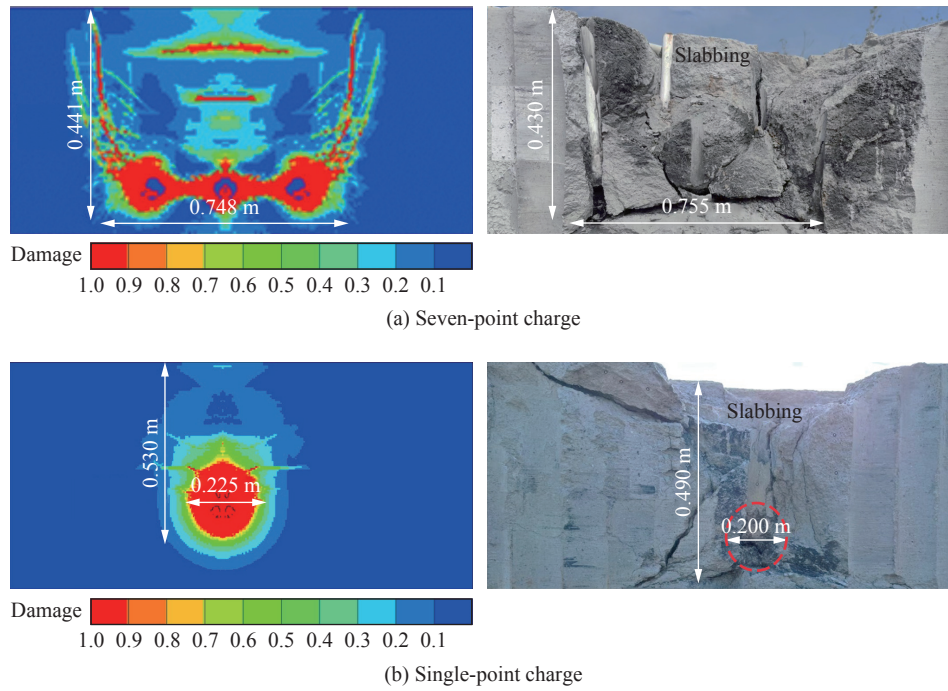


图 8 封闭爆炸时数值模拟结果与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of numerical simulation results and experimental ones during closed explosion

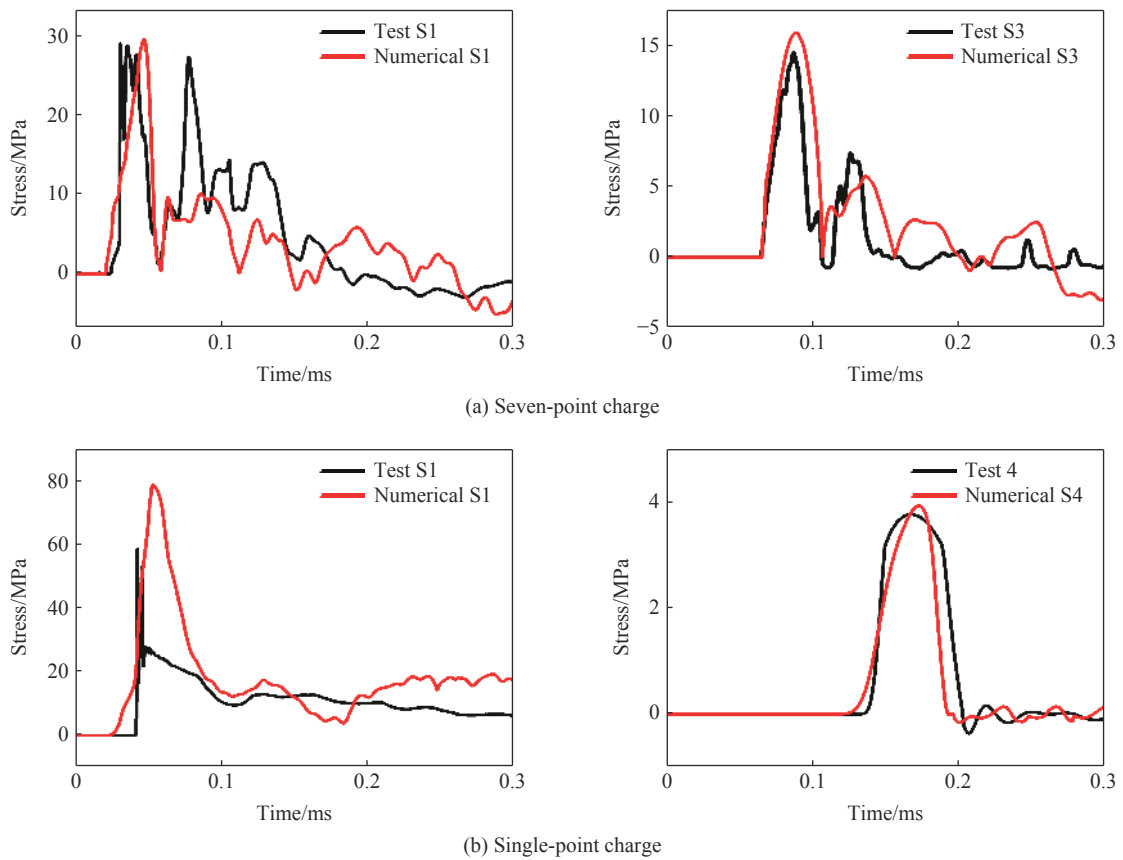


图 9 不同工况下测点的压力时程以及相应的数值模拟结果

Fig. 9 Stress-time histories at the measured points under different test conditions and the corresponding numerically-simulated results

数据异常, 未给出所用的曲线; 对比可见, 数值模拟的爆炸波峰值应力、升压时间和正压持续时间均与实验数据吻合度较好, 经计算其平均偏差约为 11.2%。

目前一致认为^[23]可以利用公式 $\sigma=K(j/W^{1/3})^N$ 描述混凝土爆炸波应力衰减规律, 其中 W 为装药质量, 单位 kg, j 为爆炸中心到测点的距离, 单位 m; K 和 N 分别为衰减系数和衰减指数。提取各目标点的峰值应力和比例爆心距离, 由上述公式, 拟合衰减曲线, 如图 10 所示。可知, 单点爆炸下衰减指数 N 为 -1.810, 位于 Mu 等^[23] 通过实验数据确定的不同强度混凝土的衰减系数范围内 ($N=-1.84 \sim -1.67$), 与之吻合较好。多点爆炸下衰减指数 N 为 -0.652, 约为单点爆炸应力波衰减指数的 0.36 倍, 表明多点爆炸合成的平面应力波衰减速度比单点爆炸产生的球面波要慢, 这与平面波可以降低能量耗散速度的事实是一致的。

总之可知, 本文中建立的有限元模型和相关材料模型参数能够准确地模拟封闭爆炸下单点装药和多点装药对混凝土靶体的破坏过程和地冲击传播的规律。

3 不同比例装药间距对爆炸波传播的影响

同种材料中, 取 5 种不同装药间距对七点同时爆炸进行数值模拟研究。图 11 中比例装药间距 Ω 分别取为 0.239、0.406、0.549、0.812 和 0.955 m/kg^{1/3}。每种工况的炸药总质量均为 73.5 g, 所用药球的质量和试验药球保持一致。

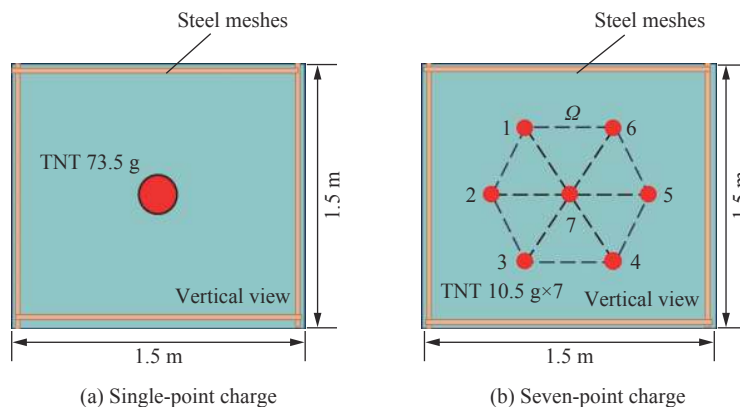


图 11 装药布置的示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of the charge arrangements

图 12 为装药中心下方不同比例装药间距下 5 个监测点处的应力时程曲线, 其中 S1、S2、S3、S4、S5 测点位置关系见图 2。另外, 图 12(a)~(e) 依次为爆炸波分别在 21.7、38.6、82.1、124.3 和 184.9 μs 时

表 3 试验与数值荷载峰值比较

Table 3 Comparison of experimental and numerical peak loads

工况	测点	荷载峰值		
		模拟值/MPa	试验值/MPa	偏差/%
七点爆炸	S1	29.7	29.2	1.71
	S3	16.0	14.6	9.59
单点爆炸	S1	79.2	59.0	34.23
	S4	3.9	3.7	5.41

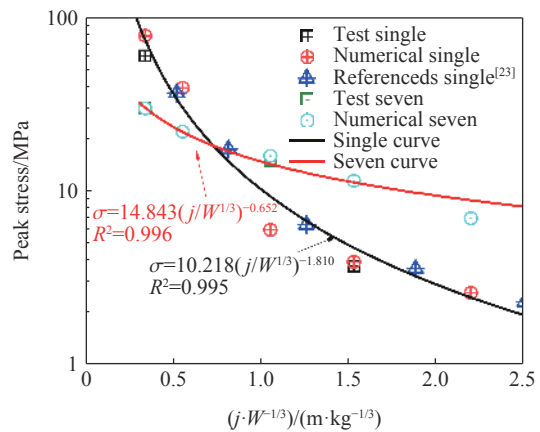


图 10 爆炸波峰值应力随距离的变化

Fig. 10 Variation of peak blast wave stress with distance

刻传播至装药中心下方 S1、S2、S3、S4 和 S5 等 5 点处对应的应力时程曲线。由图 12 可知, 尽管多点同时爆炸时单个药球质量在减小, 但在 S3、S4 和 S5 监测点处的峰值应力较单点爆炸时有所增大提高, 并且在比例装药间距增大的过程中存在一最佳比例装药间距, 即在比例装药间距为 $0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 在各工况中其峰值应力整体最大, 在最佳比例装药间距下 S3、S4 和 S5 等 3 个观测点处, 峰值应力分别为 16、11 和 7.8 MPa, 较单点爆炸分别提高 62.5%、63% 和 65.3%; 在爆炸近区观测点 S1 和 S2 处多点爆炸波的峰值应力是偏低的, 这是由于爆炸近区能量过于分散造成。图 13 展示了变装药间距下爆炸近区和

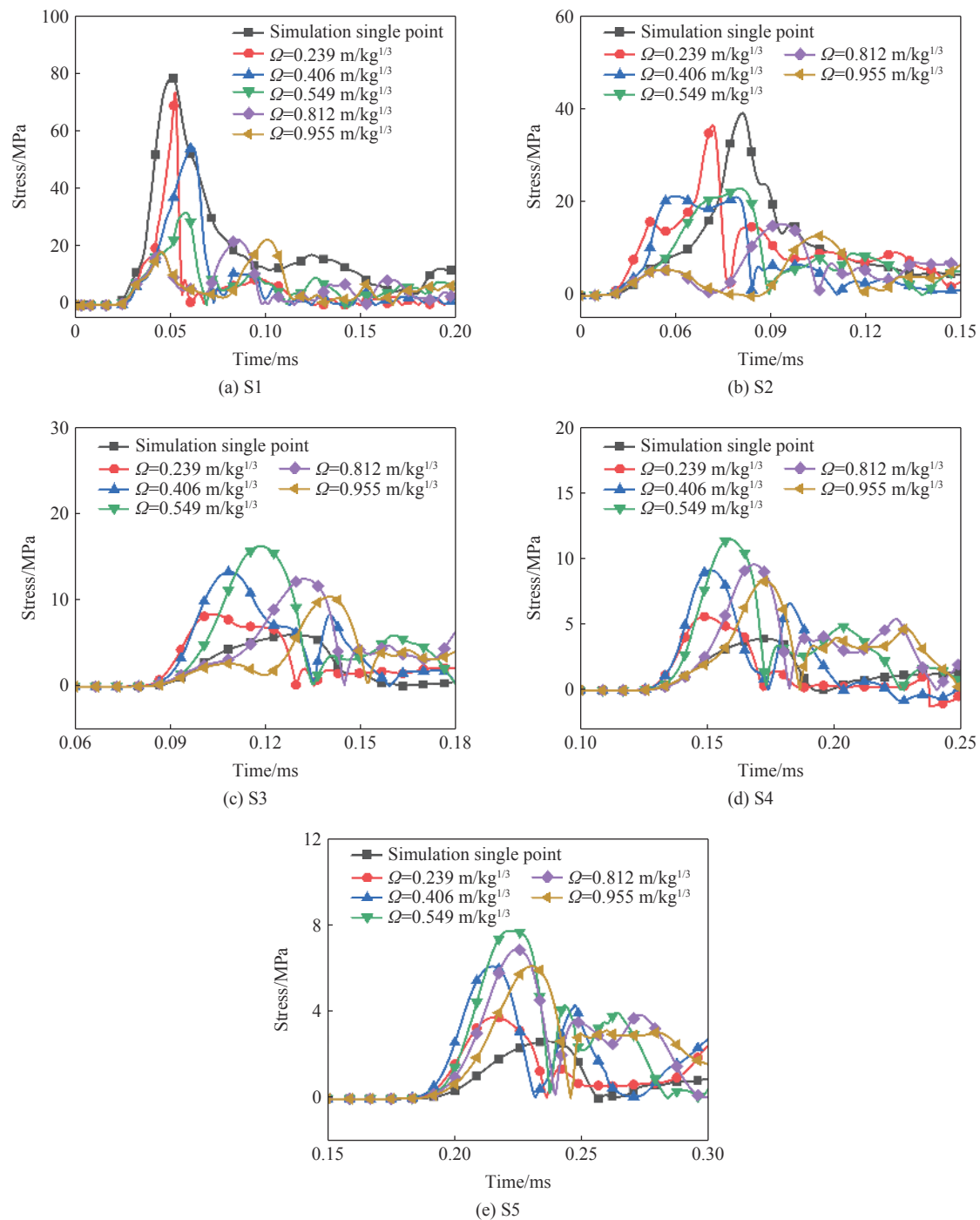


图 12 装药中心正下方应力时程曲线

Fig. 12 Stress-time curves directly below the center of the charge

爆炸远区的压力分布云图。观察可知, 在爆炸近区 $0.191 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处, 单点装药分散成 7 个相同质量的药球时, 按 5 种装药间距进行排布, 虽然在装药当量相同的条件下压力作用范围增大, 但爆炸能量空间分布较分散, 峰值应力要比单点爆炸的低, 且装药间距越大峰值应力越低(图 13(a))。当爆炸波传播至爆心下方 $1.62 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处, 多点爆炸产生的爆炸波在爆源远区进行相互叠加合成新类型的波, 即各爆源的小球面波叠加变为近平面波传播, 且高压区面积显著增大, 在比例装药间距为 $0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时达到最大, 如图 13(b) 所示。

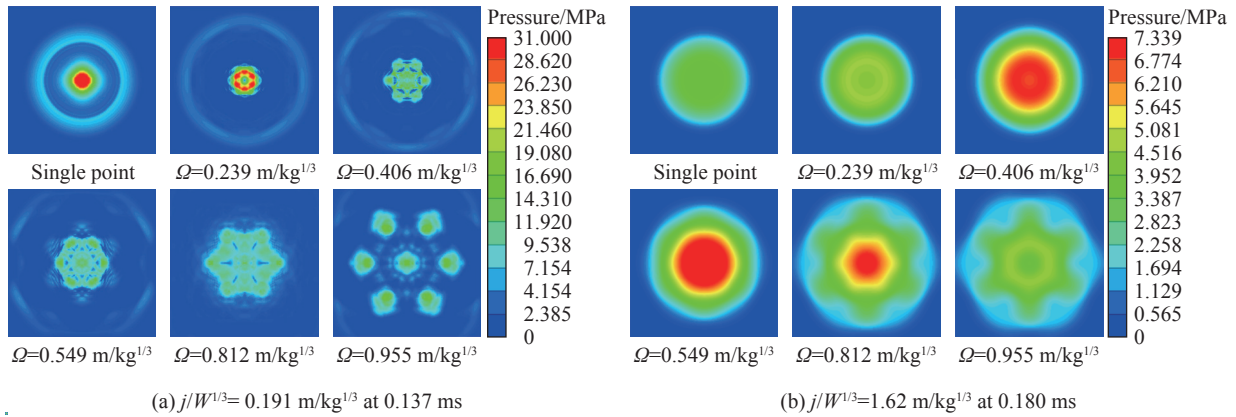


图 13 不同装药间距下装药下方比例爆心距 0.191 和 $1.62 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处的压力分布

Fig. 13 Pressure distribution at the scaled distances to explosion center 0.191 and $1.62 \text{ m/kg}^{1/3}$ below the charge center under different charge spacings

提取图 12 中的峰值应力, 由公式 $\sigma = K(j/W^{1/3})^{-N}$ 拟合不同比例装药间距条件下地冲击峰值应力, 如图 14(a) 所示。表 4 列出了各工况下的衰减系数 K 和衰减指数 N 的值; 用各间距下的衰减曲线与单点装药爆炸衰减曲线进行做比值计算, 得到各自的放大倍数变化曲线, 如图 14(b) 所示。由图 14 可以看出, 药量 73.5 g 、比例装药间距 $0.955 \text{ m/kg}^{1/3}$ 以内爆炸均可以产生聚集爆炸效应(浅绿色区域); 而且随着比例装药间距的变化, 混凝土中爆炸波在衰减特性出现差异性变化, 在比例装药间距为 $0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆炸波衰减速度较其他工况下慢, 地冲击波聚集效应整体表现最佳, 且爆炸波传播的距离越远这种聚集效应越显著, 如在比例爆心距为 $2.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处, 多点爆炸产生的峰值应力是单点装药的 4.2 倍。在比例装药间距逐渐减小时, 地冲击波聚集效应位置在更高的压力水平和更浅的深度发生(浅红色区域)。从表 4 可以看

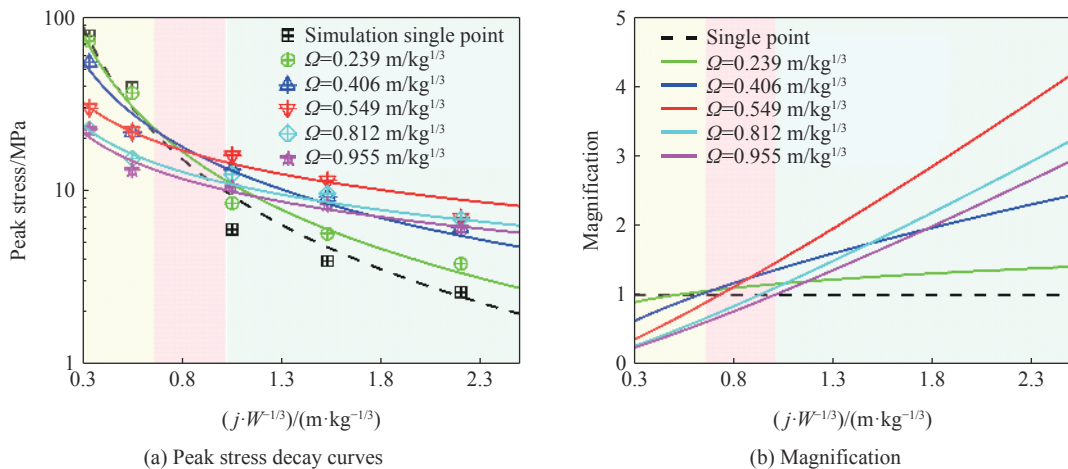


图 14 不同装药间距下峰值应力衰减曲线及放大倍数

Fig. 14 Peak stress decay curves and their magnifications for different charge spacings

出, 随着装药间距的增大, 衰减指数 N 逐渐变小, 最终约为单点爆炸衰减指数的 $1/3$, 表明爆炸波已(从)球面波变为近似平面波, 爆炸波几何上的衰减逐渐消失; 而衰减系数 K 的值随着比例装药间距的增大先增大后减小, 在比例装药间距为 $0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时达到最大。

表 4 不同比例装药间距下拟合参数

Table 4 Fitting parameters for different proportions of charge spacing

$\Omega/(\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3})$	K	N	$\Omega/(\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3})$	K	N
0	10.218	-1.810	0.549	14.843	-0.652
0.239	11.826	-1.597	0.812	11.218	-0.627
0.406	13.851	-1.169	0.955	10.220	-0.629

4 多点聚集爆炸效应优化设计方法

4.1 灰度理论介绍

在系统分析中, 定量预测方法多集中于回归分析模型^[24]、时间序列分析^[25]、马尔柯夫链模型^[26]和微分方程模型^[27]。以上预测方法往往需要较多的样本数据, 且样本需要满足典型分布, 现实情况下收集较多的数据较困难, 通常很难开展下去。而灰色预测模型中的灰色关联分析法则没有特殊的条件和限制, 通过各因素演变态势的相近度或相异度来权衡各因素的关联度。灰色理论现实价值非常大, 很好地解决了常用系统分析预测方法难以解决的难题^[28-30]。

4.2 无量纲化

在进行灰色理论优化时, 由于各因素在量纲上的不同, 在求解灰色关联度前有必要对各因素序列进行无量纲化, 具体方法为:

$$x_i(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: m 为实验工况数, n 为目标数, $x_i^{(0)}(k)$ 和 $x_i(k)$ 分别为原序列和处理之后的序列, $\max x_i^{(0)}(k)$ 和 $\min x_i^{(0)}(k)$ 分别为原始序列最大值和最小值。

4.3 灰色关联度的求解

设经过数据变换后, 比较序列 $X_i = \{x_i(k), k = 1, 2, \dots, m\}$, 参考序列 $X_0 = \{x_0(k), k = 1, 2, \dots, n\}$, 则 X_i 对于 X_0 在第 k 点的灰色关联度系数:

$$\varepsilon_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: $\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$; $\Delta_{\min} = \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$; $\Delta_{\max} = \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$; ξ 为分辨系数。 ξ 的取值既要体现关联度的整体性, 又要兼备抗干扰的能力^[31]。按此式取值参考:

$$\Delta = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |x_0(k) - x_i(k)|$$

记 $\varepsilon_{\Delta} = \Delta/\Delta_{\max}$, ξ 的取值是 $\varepsilon_{\Delta} \leq \xi \leq 2\varepsilon_{\Delta}$; 当 $\Delta_{\max} > 3\Delta$ 时, $\varepsilon_{\Delta} \leq \xi \leq 1.5\varepsilon_{\Delta}$; 当 $\Delta_{\max} \leq 3\Delta$ 时, $1.5\varepsilon_{\Delta} \leq \xi \leq 2\varepsilon_{\Delta}$ 。

在获得关联系数后, 比较序列 X_i 对于参考序列 X_0 的关联度:

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{0i}(k) \quad (4)$$

关联度 r_{0i} 越大, 意味着比较序列 X_i 与参考序列 X_0 越接近, 当 $r_{0i} = 1$ 时, 比较序列与参考序列相同。

4.4 优化效果分析

应用灰色理论研究比例装药间距 Ω 、比例有源装药高度 Ψ 、比例起爆微差时间 Γ 对峰值应力的影

响。由表 5 可知: 所研究的问题包含 3 个控制因素, 分别记为 X_1 、 X_2 、 X_3 , 每个控制因素有 3 水平。为了提高试验效率、揭示问题的本质, 文中暂不研究参数间的交互作用, 采用正交表 $L_9(3^3)$ 设计试验, 具体设计的试验工况如表 6 所示。

4.4.1 关联度的计算

将聚集爆炸放大范围的峰值应力作为参考序列, 由第 3 节分析可知, 比例爆心距在 $0.962 \sim 2.500 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内多点爆炸才有聚集放大效应, 即取 S3、S4 和 S5 监测点的峰值应力作为参考序列, 分别记为 $y_1(k)$ 、 $y_2(k)$ 、 $y_3(k)$ 。将比例装药间距、比例有源装药高度、比例起爆微差时间三因素作为比较序列, 记为 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$; 将聚集放大区域的 S3、S4 和 S5 处的峰值应力为参考序列, 则比较序列与参考序列的表达式为:

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(k)\} \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$Y = \{y(1), y(2), \dots, y(k)\} \quad (6)$$

对以上 9 种模拟方案进行数值模拟, 得出模拟结果序列值为:

$$Y = \begin{pmatrix} 13.330 & 14.106 & 14.501 & 14.117 & 16.898 & 15.037 & 15.826 & 12.896 & 13.557 \\ 9.228 & 9.802 & 10.210 & 10.115 & 11.708 & 10.187 & 10.824 & 9.178 & 10.559 \\ 6.129 & 6.701 & 6.512 & 6.676 & 7.812 & 6.675 & 6.918 & 6.155 & 7.305 \end{pmatrix} \quad (7)$$

为确保求得的关联度的准确性, 由式 (2) 对各序列数值进行量纲归一化, 得各数据序列区间值像, 表 7 给出了 S3、S4 和 S5 监测点无量纲化后的结果。

对 S3 处峰值应力, 由式 (6) 得:

$$\Delta = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |x_0(k) - x_i(k)| = 0.446 \quad (8)$$

由于 $\varepsilon_\Delta = \Delta/\Delta_{\max} = 0.446/1 = 0.446$, 且 $\Delta_{\max} \leq 3\Delta$, 因此 $1.5\varepsilon_\Delta \leq \xi \leq 2\varepsilon_\Delta$, 取 $\xi = 0.88$ 。同理, 求 S4 和 S5 监测点下分辨系数, 均是 $\xi = 0.8$ 。由式 (3) 和式 (4) 计算得到了 S3 目标下的关联度系数关联度, 如表 8, 同理计算 S4 和 S5 目标下的关联度系数关联度。

综上, 求得关联矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} 0.741 & 0.696 & 0.738 \\ 0.756 & 0.680 & 0.691 \\ 0.749 & 0.687 & 0.677 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^3 r_{i1} = 2.246, \quad \sum_{i=1}^3 r_{i2} = 2.063, \quad \sum_{i=1}^3 r_{i3} = 2.106 \quad (10)$$

所以, 可知比例装药间距 Ω 占主要因素, 起爆微差时间 Γ 次之, 最后是有源比例装药高度 Ψ 。

表 5 控制因素和控制水平

Table 5 Control factors and level of control

控制因素	水平		
	1	2	3
$(X_1) \Omega / (\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	0.406	0.549	0.812
$(X_2) \Psi / (\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	0	0.048	0.095
$(X_3) \Gamma / (\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	0	0.239	0.477

表 6 试验设计 $L_9(3^4)$ 矩阵

Table 6 Experimental design $L_9(3^4)$ matrix

方案	水平组合			方案	水平组合		
	Ω	Ψ	Γ		Ω	Ψ	Γ
1	1	1	1	6	2	3	2
2	1	2	2	7	3	1	2
3	1	3	3	8	3	2	3
4	2	1	3	9	3	3	1
5	2	2	1				

表 7 正交试验各序列区间值像

Table 7 Orthogonal test interval values for each sequence

工况	序列区间值像					
	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$y_1(k)$	$y_2(k)$	$y_3(k)$
1	0.000	0.000	0.000	0.108	0.020	0.000
2	0.000	0.505	0.501	0.302	0.247	0.340
3	0.000	1.000	1.000	0.401	0.408	0.228
4	0.352	0.000	1.000	0.305	0.370	0.325
5	0.352	0.505	0.000	1.000	1.000	1.000
6	0.352	1.000	0.501	0.535	0.399	0.324
7	1.000	0.000	0.501	0.732	0.651	0.469
8	1.000	0.505	1.000	0.000	0.000	0.015
9	1.000	1.000	0.000	0.165	0.546	0.699

4.4.2 起爆参数多目标综合优化

分别计算比例装药间距、比例有源装药高度、比例起爆微差时间对七点爆炸聚集区峰值应力的灰色关联度系数均值, 得到多目标综合优化后的平均关联系数如表 9 所示。从表 9 可以看出: 比例装药间距 Ω 对多目标综合优化的灰色关联序为: $r_0(0.549 \text{ m/kg}^{1/3}) > r_0(0.406 \text{ m/kg}^{1/3}) > r_0(0.812 \text{ m/kg}^{1/3})$; 比例有源装药高度 Ψ 对多目标综合优化的灰色关联序为 $r_0(0) > r_0(0.048 \text{ m/kg}^{1/3}) > r_0(0.095 \text{ m/kg}^{1/3})$; 比例起爆微差时间 Γ 对多目标综合优化的灰色关联序为 $r_0(0.239 \text{ m/kg}^{1/3}) > r_0(0) > r_0(0.477 \text{ m/kg}^{1/3})$ 。基于以上分析可知混凝土中七点爆炸聚集效应多目标求得一组较佳的组合参数: 比例装药间距 $\Omega=0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、比例有源装药高度 $\Psi=0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、比例起爆微差时间 $\Gamma=0.239 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。

将优化的起爆参数在仿真软中进行计算, 给出了优化设计后应力衰减曲线和放大倍数, 如图 15 所示。从图 15 可知: 开展多目标优化的起爆参数后, 地冲击波聚集效应得到进一步提高, 其中, 应力衰减公式中衰减系数 K 的值在增大, 较单点增加了 6.587; 同时爆炸压力在爆心距为 $2.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处, 最大放大倍数由 4.2 倍提高到了 4.7 倍, 表明七点聚集爆炸效应得到了明显的提高。

表 8 3 种因素在 3 种水平下就 S3 峰值应力的关联度系数和关联度

Table 8 Correlation coefficients and correlation of peak S3 stress at different levels of different factors

工况	关联度系数		
	Ω	Ψ	Γ
1	0.925	0.925	0.925
2	0.773	0.844	0.847
3	0.713	0.618	0.618
4	0.986	0.771	0.580
5	0.598	0.665	0.486
6	0.860	0.680	1.000
7	0.796	0.567	0.823
8	0.486	0.660	0.486
9	0.533	0.533	0.875
关联度	0.741	0.696	0.738

表 9 多目标灰色关联度系数平均值

Table 9 Mean values of gray correlation coefficients for pairs of indicators

控制因素	平均灰色关联系数		
	1	2	3
Ω	0.816	0.829	0.601
Ψ	0.763	0.696	0.604
Γ	0.590	0.870	0.533

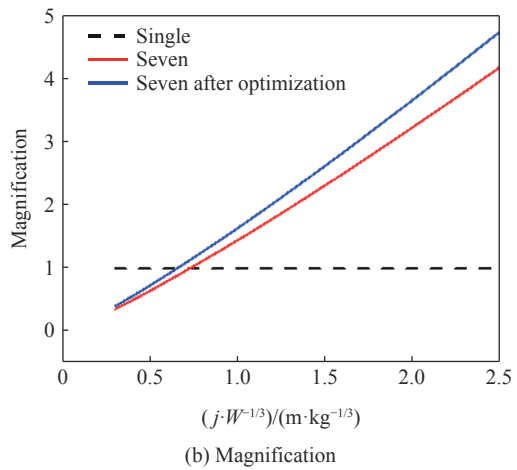
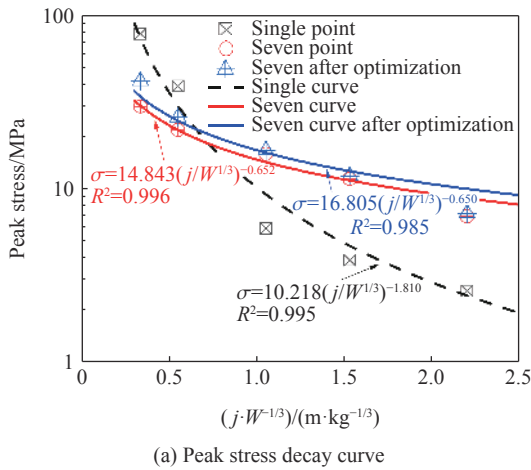


图 15 优化后起爆参数峰值应力衰减曲线及放大倍数

Fig. 15 Optimized peak stress decay curve and amplification of detonation parameters

5 结论

对多点装药爆炸引起的混凝土内冲击波衰减进行了实验和数值模拟工作, 研究了装药间距对爆炸波的影响, 通过正交设计方法和灰色系统理论对多点起爆参数进行优化设计, 确定了最优的起爆参数推

荐值, 主要贡献和结论如下:

(1) RHT 的混凝土材料模型和 SPH 算法可以合理地预测集团和多点装药爆炸在不同爆点下的冲击波传播以及混凝土的诱导损伤和破坏。

(2) 七点装药爆炸引起的混凝土爆炸波传播规律与单点装药爆炸差异较大, 且随着比例装药间距的增大, 爆炸聚集效应先增强后减弱, 在比例装药间距为 $0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 为最佳, 在爆心距为 $2.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处, 可达同等装药量单点装药地冲击力的 4.2 倍;

(3) 计算了比例有源装药高度 $0 \sim 0.095 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、比例起爆微差时间 $0 \sim 0.477 \text{ m/kg}^{1/3}$ 和比例装药间距 $0 \sim 0.812 \text{ m/kg}^{1/3}$ 条件下的混凝土冲击波聚集效应, 结合灰色关联分析法根据仿真结果求解了起爆参数的关联度系数和关联度, 发现在比例装药间距、比例有源装药高度、比例起爆微差时间起爆参数中, 比例装药间距对多点爆炸混凝土中聚集效应影响最为显著。在本试验情况下, 给出了七点爆炸计算模型的最优起爆参数为比例装药间距 $\Omega=0.549 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、比例有源装药高度 $\Psi=0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、比例起爆微差时间 $\Gamma=0.239 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。通过对优化设计前后冲击波压力放大指标的对比可知, 七点聚集爆炸效应得到显著改善, 验证了优化设计方法的可靠性。这为优化多点起爆参数提供了一种行之有效的办法, 丰富了灰色理论的应用价值。

参考文献:

- [1] 邓国强, 周早生, 郑全平. 钻地弹爆炸聚集效应研究现状及展望 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2002, 3(3): 45–49. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2002.03.012.
DENG G Q, ZHOU Z S, ZHENG Q P. Study status quo and development of aggregated effect of multiple earth penetrator bursts detonated simultaneously [J]. *Journal of the PLA University of Science and Technology*, 2002, 3(3): 45–49. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2002.03.012.
- [2] LENG Z D, SUN J S, LU W B, et al. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 129: 103873. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103873.
- [3] LENG Z D, FAN Y, GAO Q D, et al. Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(3): 373–380. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.010.
- [4] GAO Q D, LU W B, YAN P, et al. Effect of initiation location on distribution and utilization of explosion energy during rock blasting [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(5): 3433–3447. DOI: 10.1007/s10064-018-1296-4.
- [5] PHILLIPS J S, BRATTON J L. ground shock analysis of the multiple burst experiments: ADA 088510 [R]. Springfield: NITS, 1978.
- [6] RUETENIK J R, HOBBS N P, SMILEY R F. Calculation of multiple burst interactions for six simultaneous explosions of 120 Ton ANFO charges: ADA 091978 [R]. Springfield: NITS, 1979.
- [7] HU H W, SONG P, GUO S F, et al. Shock wave and bubble characteristics of underwater array explosion of charges [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(8): 1445–1453. DOI: 10.1016/J.DT.2021.05.020.
- [8] IZUMI K, ASO S, NISHIDA M. Experimental and computational studies focusing processes of shock waves reflected from parabolic reflectors [J]. *Shock Waves*, 1994, 3(3): 213–222. DOI: 10.1007/BF01414715.
- [9] KISHIGE H, TESHIMA K, NISHIDA M. Focusing of shock waves reflected from an axisymmetrically parabolic wall [C]. Proceedings of the 18th International Symposium on Shock Waves. Sendai: Springer, 1992: 341–345. DOI: 10.1007/978-3-642-77648-9_50.
- [10] QIU P, YUE Z W, ZHANG S C, et al. An *in situ* simultaneous measurement system combining photoelasticity and caustics methods for blast-induced dynamic fracture [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(11): 115113. DOI: 10.1063/1.4994811.
- [11] 李旭东, 刘凯欣, 张光升, 等. 冲击波在水泥砂浆板中的聚集效应 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2008, 48(8): 1272–1275. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2008.08.004.
LI X D, LIU K X, ZHANG G S, et al. Focusing of shock waves in cement mortar plates [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2008, 48(8): 1272–1275. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2008.08.004.
- [12] LIN S J, WANG J X, LIU L T, et al. Research on damage effect of underwater multipoint synchronous explosion shock waves on air-backed clamped circular plate [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 240: 109985. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109985.

- [13] KIM H D, KWEON Y H, SETOYUCHI T, et al. A study on the focusing phenomenon of a weak shock wave [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2003, 217(11): 1209–1220. DOI: 10.1243/095440603771665241.
- [14] LIANG S M, TSAI C J, WU L N. Efficient, robust second-order total variation diminishing scheme [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(1): 193–195. DOI: 10.2514/3.13042.
- [15] LIANG S M, WU L N, HSU R L. Numerical investigation of axisymmetric shock wave focusing over paraboloidal reflectors [J]. *Shock Waves*, 1999, 9(6): 367–379. DOI: 10.1007/S001930050167.
- [16] QIU S, ELIASSON V. Interaction and coalescence of multiple simultaneous and non-simultaneous blast waves [J]. *Shock Waves*, 2016, 26(3): 287–297. DOI: 10.1007/s00193-015-0567-2.
- [17] 刘玲, 袁俊明, 刘玉存, 等. 大型商场多点爆炸恐怖袭击事故数值模拟 [C]//中国化学会第 29 届学术年会摘要集: 第 29 分会: 公共安全化学. 北京: 中国化学会, 2014.
- [18] 邓国强, 龙汗, 周早生, 等. 钻地弹砂土中聚集爆炸地冲击试验与预测 [J]. *防护工程*, 2001, 23(3): 24–28.
- [19] 叶海旺, 石文杰, 王二猛, 等. 金堆城露天矿生产爆破合理微差时间的探讨 [J]. *爆破*, 2010, 27(1): 96–98. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2010.01.026.
YE H W, SHI W J, WANG E M, et al. Research of reasonable delay intervals in Jinduicheng open-pit mine [J]. *Blasting*, 2010, 27(1): 96–98. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2010.01.026.
- [20] 顾强, 张世豪, 安晓红, 等. 基于灰色理论的两点爆炸起爆参数优化设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 359–365. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0359-07.
GU Q, ZHANG S H, AN X H, et al. Optimization design for priming parameters of two-point explosion based on gray theory [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 359–365. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0359-07.
- [21] Century Dynamics Inc. Ansys/Autodyn Version 11.0: user documentation [Z]. Pennsylvania, USA: Century Dynamics Inc, 2007: 89–112.
- [22] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *The Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362–2372. DOI: 10.1063/1.862940.
- [23] MU C M, ZHOU H, MA H F. Prediction method for ground shock parameters of explosion in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123372. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123372.
- [24] OSEI F B, DUKER A A, STEIN A. Bayesian structured additive regression modeling of epidemic data: application to cholera [J]. *BMC Medical Research Methodology*, 2012, 12(1): 118. DOI: 10.1186/1471-2288-12-118.
- [25] LI F G, LUAN P X. ARMA model for predicting the number of new outbreaks of Newcastle disease during the month [C]. // 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. Shanghai, China: IEEE, 2011: 660–663. DOI: 10.1109/CSAE.2011.5952933.
- [26] KOROSTIL I A, PETERS G W, CORNEBISE J, et al. Adaptive Markov chain Monte Carlo forward projection for statistical analysis in epidemic modelling of human papillomavirus [J]. *Statistics in Medicine*, 2013, 32(11): 1917–1953. DOI: 10.1002/sim.5590.
- [27] ROBERTS M G, LAWSON J R, GEMMELL M A. Population dynamics in echinococcosis and cysticercosis: mathematical model of the life-cycles of *Taenia hydatigena* and *T. ovis* [J]. *Parasitology*, 1987, 94(1): 181–197. DOI: 10.1017/S0031182000053555.
- [28] HUANG J C. Application of grey system theory in telecare [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2011, 41(5): 302–306. DOI: 10.1016/j.combiomed.2011.03.007.
- [29] LEE Y S, TONG L I. Forecasting energy consumption using a grey model improved by incorporating genetic programming [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(1): 147–152. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.053.
- [30] 王莹, 肖巍, 姚熊亮, 等. 水下爆炸冲击波载荷作用下冰层破碎特性及其影响因素 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(7): 073103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0141.
WANG Y, XIAO W, YAO X L, et al. Fragmentation of ice cover subjected to underwater explosion shock wave load and its influence factors [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(7): 073103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0141.
- [31] 吕锋. 灰色系统关联度之分辨系数的研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 1997, 17(6): 49–54. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6788.1997.06.011.
LŪ F. Research on the identification coefficient of relational grade for grey system [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1997, 17(6): 49–54. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6788.1997.06.011.

(责任编辑 张凌云)