DOI: 10.11883/1001-1455(2015)03-0359-07

基于灰色理论的两点爆炸起爆参数优化设计*

顾 强,张世豪,安晓红,张 亚
(中北大学机电工程学院,山西 太原 030051)

摘要:针对混凝土两点爆炸起爆参数选择问题,提出了一种基于灰色理论的参数优化方法。通过正交试验方法设计试验方案,运用 AUTODYN 软件进行了不同起爆参数组合条件下的静爆试验,计算了起爆参数与爆坑直径、爆坑深度的关联系数和关联度,进行了单目标因素优化和多目标因素优化,确定了一组各因素的优选组合,并进行了试验验证。验证结果表明:采用优化的起爆参数时,爆坑直径增大(4~42)%,左爆坑深度增大(0~29)%,右爆坑深度增大(0~32)%,两点爆炸混凝土靶体的毁伤效果得到明显改善。

关键词:爆炸力学;灰色理论;关联度;混凝土;正交试验;优化
中图分类号:O382 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

现代战争中,在摧毁敌方坚固目标及地下深层目标方面钻地武器发挥的作用愈发突出,其破坏效应引起了高度关注。其中,采取多点(多弹)同时或彼此微差爆炸方式,是摧毁地下目标的最优方式之一。多点爆炸能量聚集效应,不仅可以大幅提升钻地武器的冲击效应,而且能够极大地提高爆炸能量利用率,进而增强对防护工程的毁伤效果[1]。

由于多点爆炸所产生的多个冲击波相互作用的复杂性,再加上岩土类介质物理力学性质比空气复杂得多,所以目前采用试验和数值模拟 2 种方法仍是主要的研究手段。陈志林[2]对空中两点聚集爆炸进行了研究,认为仅就空气冲击波这个杀伤因素而言,在当量相同的条件下,多点聚集爆炸造成地面破坏的杀伤范围超过单点爆炸。顾文彬等[3]、孙白连等[4]对浅层水中沉底的 2 个装药爆炸冲击波相互作用进行了数值模拟,发现一定条件下冲击波相互作用的压力叠加或多次冲击作用大大提高了爆炸威力。李旭东等[5]研究了 3 点同时爆炸时冲击波在水泥砂浆板中聚集效应的特点和规律,发现聚集效应将引起正应变在聚集区域强烈的非线性激增,并且将在距离爆炸点更长的距离内维持高应力状态。

分析以上研究成果不难发现,当前主要选择空气及水为目标介质,并未对混凝土介质中多点爆炸深入开展相关研究。本文中在前人工作基础上,借助 AUTODYN 软件对混凝土中两点爆炸起爆因素进行正交模拟试验,并运用灰色理论对试验结果进行优化设计,以期为提高混凝土中多点爆炸毁伤效果提供理论基础。

1 计算模型及正交试验设计

1.1 有限元建模及模型验证

根据实际问题需要,建立三维计算模型,如图 1 所示。混凝土尺寸为 1200 mm × 1200 mm × 600 mm,装药尺寸为∅16 mm×50 mm,左装药起爆深度为 92 mm。为了提高计算效率,计算时取 1/2 对称模型。数值计算过程中,对弹、靶均采用 SPH 算法,其中混凝土靶体粒子直径为 10 mm,装药粒子直径为 4 mm;另外,将混凝土四周边界条件

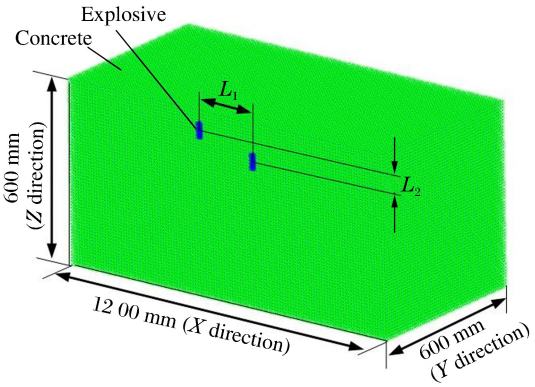

图 1 两点爆炸有限元计算模型
Fig. 1 FEA calculation model for two-point explosion

* 收稿日期:2014-02-19;修回日期:2014-05-17
第一作者:顾 强(1961—),男,硕士,教授,硕士生导师,hg14gu@163.com。

定义为无反射固定边界。采用 AUTODYN 软件,计算时间为 2 ms,此时混凝土爆炸成坑趋于稳定。

材料模型均采用 AUTODYN 软件材料库中相关材料模型。其中装药选用 COMP-B 材料模型,采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程描述炸药能量释放过程,密度为 1.72 g/cm^3;混凝土靶体采用 CONC-35MPA 材料模型,P-α 状态方程,响应过程选用 RHT 混凝土强度模型和毁伤模型,采用侵蚀算法,侵蚀因子为 2.5,其假密度(混凝土材料是非均匀多孔材料,因此按均匀材料的密度概念,其宏观密度为假密度)为 2.75 g/cm^3。

1.2 模型验证

为验证所选用的材料模型与状态方程,将数值分析结果与理论结果进行比较。爆坑半径和爆坑深度可由下式[6]计算:

$$R_1/W^{1/3.4}=0.611+0.72(H/W^{1/3.6})-0.18\,(H/W^{1/3.6})^2-0.11\,(H/W^{1/3.6})^3 \tag{1}$$

$$R_2/W^{1/3.4}=0.177+0.63(H/W^{1/3.6})-0.20\,(H/W^{1/3.6})^2-0.13\,(H/W^{1/3.6})^3 \tag{2}$$

式中:R_1、R_2和 H 分别为可见爆坑半径、可见爆坑深度和埋深,mm;W 为装药的 TNT 当量,g。

由图 2 爆坑半径随装药埋深的变化关系可知:线性拟合后的爆坑半径直线与经验公式所得爆坑半径规律大致相同,两者相对误差小于 20%,吻合较好,符合爆炸相似率原则。因此,说明本文中所采用的 SPH 算法中粒子直径、RHT 混凝土等材料模型、状态方程等合理可靠,对计算结果影响较小,可忽略不计。

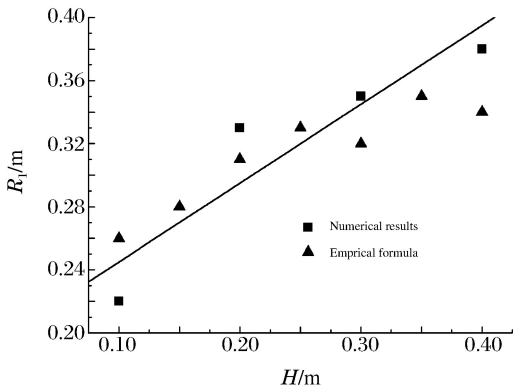

图 2 爆坑半径随装药埋深的变化

Fig. 2 Variation of crater radius with charge depth

1.3 正交试验设计

本文中主要研究两点爆炸起爆参数对混凝土毁伤效果的影响,进而对靶体毁伤效果进行优化设计。由文献[1,7]可知,影响多点爆炸混凝土毁伤效果的起爆因素主要有装药水平间距 L_1、装药垂直间距 L_2和装药起爆时差 T,记 $\alpha=L_1/d$,d 为装药直径,β 为比例深度[8],$\beta=L_2/W^{1/3}$,W 为单药包装药量,所以取 α、β 和 T 为控制因素,水平数均取 3,具体的试验条件如表 1 所示。由于起爆后 2 爆坑深度不同,因此取爆坑直径、2 爆坑深度 3 个目标进行综合优化评估,且分别记作 D、h_1和 h_2。

根据因素和水平的数目选用适合的正交表,然后根据正交表的布局合理安排试验计划。由表 1 可知:所研究的问题包含 3 个因素,每个因素有 3 个水平。为了提高试验效率、抓住问题的本质,本文中暂不考虑各因素之间的交互作用,所以应选用正交表 L9(3^3),具体的试验计划布局如表 2 所示。

表 1 正交试验因素水平

Table 1 Factor level of orthogonal experiment

水平	α	β	T/μs
水平 1	12.500	0.000	0
水平 2	15.625	0.116	25
水平 3	18.250	0.232	50

表 2 正交试验设计方案

Table 2 Design schemes of orthogonal experiment

工况	L_1/mm	L_2/mm	T/μs
1	12.500	0.000	0
2	12.500	0.116	25
3	12.500	0.232	50
4	15.625	0.000	50
5	15.625	0.116	0
6	15.625	0.232	25
7	18.250	0.000	25
8	18.250	0.116	50
9	18.250	0.232	0

2 计算结果分析

图 3 给出了 9 种工况在 2 ms 时混凝土靶体两点装药爆炸毁伤云图。由图 3 可知:当 α 相同时(如

工况 1～3)，爆坑直径浮动范围为 5%～8%，变化较小；由于左装药优先起爆，在靶体内靠近右装药一侧产生了较大范围的毁伤变形区，因此右装药后起爆所形成的毁伤区域较同步起爆会有所扩大；另外，由于 2 装药存在垂直间距，且右侧装药较深，所以右侧爆坑深度相应变大。当 β 相同时(如工况 1、4、7)，由于水平间距的增大，导致毁伤区域变大，进而爆坑直径也随之变大；另外，由于微差起爆，造成右侧爆坑深度略微变大，但不太明显。同理可知：当 T 相同时(工况 1、5、9)，爆坑直径随水平间距的增大而变大，爆坑深度随垂直间距的增大而变大。

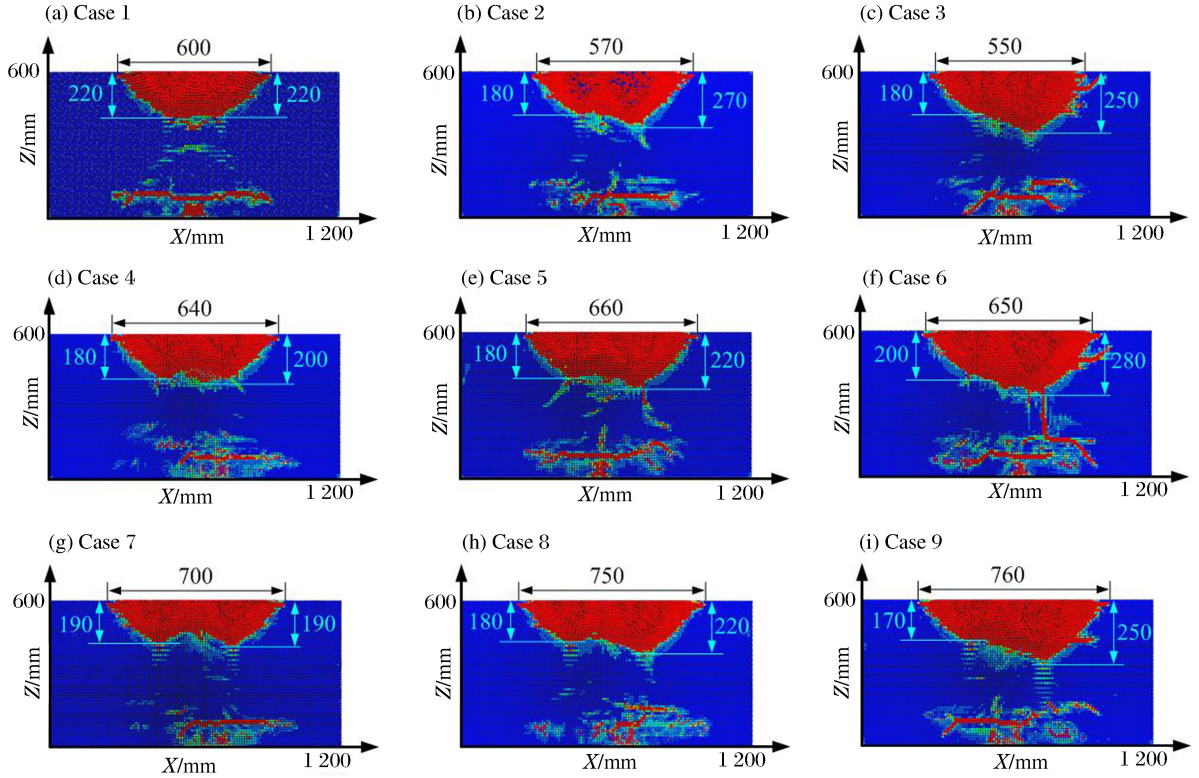

图 3　2 ms 时 9 种工况下靶体毁伤云图

Fig. 3 Damage coutors of targets in 9 cases at 2 ms

3　灰色理论优化算法

在系统分析中，常用的定量方法是数理统计法，但是数理统计法往往要求大样本，且要求只有典型的概率分布，而这在实际中很难实现。灰色理论提出的灰色关联分析法则不受这些局限。关联度越大，因素之间的相似程度越大；反之，相似程度越小。灰色关联分析是对一个系统发展变化态势的定量比较和反映，通过灰色关联度，分析确定系统因素间的影响程度或因素对系统主行为的贡献度[9]，因此实用价值较大，灰色关联分析的一般步骤如图 4 所示。

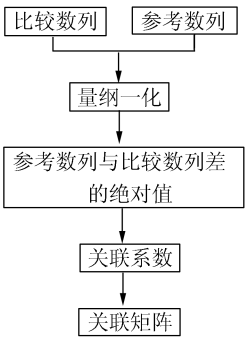

图 4　灰色关联分析法步骤

Fig. 4 Steps of gray relational analysis method

3.1　量纲一化

利用灰色系统理论进行优化时，由于各数据序列具有不同的量纲、范围，在计算灰色关联度之前要对数据序列进行量纲一化，由区间值化算子计算公式求出各序列区间值像：

$$x_i(k)=\frac{x_i^{(0)}(k)-\min x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(x)-\min x_i^{(0)}(x)} \tag{3}$$

式中：$i=1,\cdots,m$；$k=1,\cdots,n$；m 和 n 分别为试验次数和目标数。$x_i^{(0)}(k)$和 $x_i(k)$分别为原序列进而数据预处理后的序列，$\max x_i^{(0)}(k)$和 $\min x_i^{(0)}(k)$为 $x_i^{(0)}(k)$的最大值和最小值。

3.2 灰色关联度计算

设参考序列为 $X_0=\{x_0(k),k=1,2,\cdots,n\}$，比较序列为 $X_i=\{x_i(k),k=1,2,\cdots,n\}$；$i=1,\cdots,m$。则 X_i对于 X_0在第 k 点的灰色关联度系数：

$$\varepsilon_{0i}(k)=\frac{\Delta_{\min}+\xi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k)+\xi\Delta_{\max}} \tag{4}$$

式中：ξ 为分辨系数，$\Delta_{0i}(k)$为比较序列与参考序列在 k 点的差值，即：

$$\Delta_{\min}=\min_i\min_k|x_0(k)-x_i(k)| \tag{5}$$

$$\Delta_{\max}=\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)| \tag{6}$$

获得关联度系数后，比较序列 X_i对于参考序列 X_0的关联度：

$$\gamma_{0i}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\varepsilon_{0i}(k) \tag{7}$$

关联度 γ_{0i}越大，表示 X_i与 X_0越接近，当 $\gamma_{0i}=1$ 时，比较序列与参考序列相同。

4 试验结果的灰色关联度分析

4.1 计算关联度

设经过数据变换的爆坑直径 D、左爆坑深度 h_1、右爆坑深度 h_2序列为参考序列，α、β、T 序列为比较序列。对各序列数值进行量纲一化得各数据序列区间值像，如表 3 所示。

分辨系数 ξ取值的原则[10]即要充分体现关联度的整体性，还要具有抗干扰作用。记所有差值绝对的均值为：

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

记 $\varepsilon_\Delta=\Delta/\Delta_{\max}$，取值为 $\varepsilon_\Delta\leqslant\xi\leqslant2\varepsilon_\Delta$，且当 $\Delta_{\max}>3\Delta$ 时，$\varepsilon_\Delta\leqslant\xi\leqslant1.5\varepsilon_\Delta$，当 $\Delta_{\max}\leqslant3\Delta_v$时，$1.5\varepsilon_\Delta\leqslant\xi\leqslant2\varepsilon_\Delta$。对于爆坑直径 D，按式(6)求得：

$$\Delta=\frac{1}{nm}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}|x_0(k)-x_i(k)|=0.322 \tag{9}$$

$\varepsilon_\Delta=\Delta/\Delta_{\max}=0.322/1=0.322$，因为 $\Delta_{\max}>3\Delta$，所以 $0.322=\varepsilon_\Delta\leqslant\xi\leqslant1.5\varepsilon_\Delta=0.483$，取 $\xi=0.4$。类似的对于左侧爆坑深度 h_1、右侧爆坑深度 h_2分别取 $\xi=0.8$，$\xi=0.7$。

根据式(3)～(7)计算每个因子水平对试验指标的关联系数和关联度，如表 4～6 所示。

表 3 正交试验各序列区间值像

Table 3 Sequences region value of orthogonal experiment

工况	序列区间值像					
	L_1	L_2	T	d	h_1	h_2
1	0.0	0.0	0.0	0.238	1.0	0.333
2	0.0	0.5	0.5	0.095	0.2	0.889
3	0.0	1.0	1.0	0.000	0.2	0.667
4	0.5	0.0	1.0	0.333	0.2	0.111
5	0.5	0.5	0.0	0.524	0.2	0.333
6	0.5	1.0	0.5	0.476	0.6	1.000
7	1.0	0.0	0.5	0.714	0.4	0.000
8	1.0	0.5	1.0	0.952	0.2	0.333
9	1.0	1.0	0.0	1.000	0.0	0.667

表 4 不同因素在不同水平下对爆坑直径的关联度系数和关联度

Table 4 Gray relational degrees and gray incidence coefficients between crater diamemter and different factors at different levels

工况	关联度系数		
	L_1	L_2	T
1	0.627	0.627	0.627
2	0.808	0.497	0.497
3	1.000	0.286	0.286
4	0.705	0.546	0.375
5	0.943	0.943	0.433
6	0.943	0.433	0.943
7	0.583	0.359	0.651
8	0.893	0.469	0.893
9	1.000	1.000	0.286
关联度	0.834	0.573	0.554

表 5 不同因素在不同水平下对左侧爆坑深度的关联度系数和关联度

Table 5 Gray relational degrees and gray incidence coefficients between left crater depth and different factors at different levels

工况	关联度系数		
	L_1	L_2	T
1	0.444	0.444	0.444
2	0.800	0.727	0.727
3	0.800	0.500	0.500
4	0.727	0.800	0.500
5	0.727	0.727	0.800
6	0.889	0.667	0.889
7	0.571	0.667	0.889
8	0.500	0.727	0.500
9	0.444	0.444	1.000
关联度	0.656	0.634	0.694

表 6 不同因素在不同水平下对右侧爆坑深度的关联度系数和关联度

Table 6 Gray relational degrees and gray incidence coefficients between right crater depth and different factors at different levels

工况	关联度系数		
	L_1	L_2	T
1	0.678	0.678	0.678
2	0.441	0.643	0.643
3	0.512	0.678	0.678
4	0.643	0.863	0.441
5	0.807	0.808	0.678
6	0.583	1.000	0.583
7	0.412	1.000	0.583
8	0.512	0.807	0.512
9	0.678	0.678	0.512
关联度	0.585	0.795	0.590

得到关联矩阵：

$$\boldsymbol{\Gamma}=\begin{bmatrix}0.834 & 0.573 & 0.554\\ 0.656 & 0.634 & 0.694\\ 0.585 & 0.795 & 0.590\end{bmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^{3}\gamma_{i1}=2.075,\qquad \sum_{i=1}^{3}\gamma_{i2}=2.002,\qquad \sum_{i=1}^{3}\gamma_{i3}=1.738$$

因此，可知系统各因素：水平间距 L_1＞垂直间距 L_2＞起爆时差 T。

4.2　单目标起爆参数优化

求不同起爆参数对两点爆炸靶体毁伤范围的灰色关联度系数均值，得到平均灰色关联度系数如表 7 所示。灰色理论关联分析的基本思想是根据系统行为特征序列曲线几何形状的相似程度来判断其与参考特征行为序列的紧密程度，3 个指标均希望越大越好。

表 7 单指标下平均灰色关联度系数

Table 7 Average gray incidence coefficient in single objective function

试验因素	水平	平均灰色关联度系数		
		D	h_1	h_2
α	12.500	0.812	0.681	0.544
	15.625	0.864	0.781	0.678
	18.250	0.825	0.505	0.534
β	0.000	0.511	0.637	0.847
	0.116	0.636	0.727	0.753
	0.232	0.573	0.537	0.785
T/μs	0	0.449	0.748	0.623
	25	0.697	0.835	0.603
	50	0.518	0.500	0.544

由表 7 可看出,在本试验条件下,以单个目标为优化目标,起爆参数推荐值如下:以爆坑直径 D 为优化目标时,各因素推荐值为 $\alpha=15.625(L_1=250\ \text{mm})$,$\beta=0.116(L_2=30\ \text{mm})$,$T=25\ \mu\text{s}$;以左爆坑深度 h_1 为优化目标时,各因素推荐值为 $\alpha=15.625(L_1=250\ \text{mm})$,$\beta=0.116(L_2=30\ \text{mm})$,$T=25\ \mu\text{s}$;以右爆坑深度 h_2 优化目标时,各因素推荐值为 $\alpha=15.625(L_1=250\ \text{mm})$,$\beta=0.000(L_2=0)$,$T=0$。

4.3 多目标起爆参数优化

计算 3 个目标优化综合平均关联系数如表 8 所示。从表 8 可以看出:α 对 3 目标优化的灰色关联序为:$r(15.625)>r(12.5)>r(18.25)$;$\beta$ 对三目标优化的灰色关联序为:$r(0.116)>r(0)>r(0.232)$;起爆时差 T 对三项指标的灰色关联序为:$r(25\ \mu\text{s})>r(0\ \mu\text{s})>r(50\ \mu\text{s})$。综合考虑两点爆炸混凝土毁伤效应三目标得出一组优选的参数:$\alpha=15.625$,$\beta=0.116$,$T=25\ \mu\text{s}$,即水平间距为 250 mm,垂直间距为 30 mm,起爆时差为 25 μs。

根据正交试验及灰色关联分析法的最优参数组合在 AUTODYN 软件中建模,进行有限元数值仿真,得到优化设计后靶体毁伤云图,如图 5 所示。由图 5 可知:进行多目标优化设计后,爆坑直径增大 4%~42%,左侧爆坑深度增大(0~29)%,右侧爆坑深度增大(0~32)%,即混凝土中两点爆炸靶体毁伤效果得到明显改善。

表 8 多项指标灰色关联系数平均值

Table 8 Average gray incidence coefficient in multi-objective function

试验因素	灰色关联系数		
	1	2	3
L_1	0.679	0.774	0.621
L_2	0.665	0.705	0.632
T	0.607	0.712	0.521

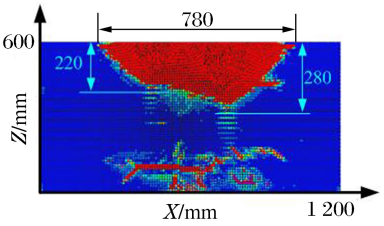

图 5 优化后起爆参数毁伤云图

Fig. 5 Damage coutor by means of optimized priming parameters

5 结 论

(1)在 AUTODYN 软件平台下,将灰色关联分析法成功运用于混凝土中两点爆炸毁伤效果的优化设计,拓展了灰色理论的应用领域。

(2)在混凝土中两点爆炸毁伤效果三目标优化设计过程中,计算了水平间距、垂直间距、起爆时差 3 个因素与爆坑直径、左爆坑深度、右爆坑深度 3 个试验指标的关联系数,得到了关联度矩阵,说明了各因素与试验指标之间的关联程度。

(3)在关联系数计算中,正交试验法减少了仿真次数,灰色关联分析法根据仿真试验结果求解出两点爆炸计算模型的最优设计参数为水平间距 250 mm、垂直间距 30 mm、和起爆时差 25 μs。通过对优化设计前后各试验指标的对比可知,两点爆炸靶体毁伤效果得到明显改善,证明所采用的优化设计方法切实有效。本文作为基础研究,对于侵彻类武器战斗部爆炸毁伤效果优化设计具有借鉴作用。

参考文献:

[1] 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(3):24-28.

[2] 陈志林. 关于多点爆炸效应的初步探讨[C]// 爆炸作用及其防护学术交流会和学组会成立会. 洛阳:总参工程兵科研三所,1988.

[3] 顾文彬,孙百连,阳天海,等. 浅层水中沉底爆炸冲击波相互作用数值模拟[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2003,4(6):64-68.

Gu Wen-bin, Sun Bai-lian, Yang Tian-hai, et al. Numerical simulation of explosive shockwave interaction in shallow-layer water[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2003,4(6):64-68.

[4] 孙百连,顾文彬,蒋建平,等. 浅层水中沉底的两个装药爆炸的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(5):460-465.

Sun Bai-lian, Gu Wen-bin, Jiang Jian-ping, et al. Numerical simulation of explosion shock wave interaction in shallow-layer water[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(5):460-465.

[5] 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.
Li Xu-dong, Liu Kai-xin, Zhang Guang-sheng, et al. Focusing of shock waves in cement mortar plates[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008,48(8):1272-1275.

[6] 宋浦，顾晓辉，王晓鸣，等. 混凝土中的爆坑试验研究[J]. 火炸药学报，2005,28(2):60-62.
Song Pu, Gu Xiao-hui, Wang Xiao-ming, et al. Experimental investigation on cratering of concrete[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005,28(2):60-62.

[7] 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.
Ye Hai-wang, Shi Wen-jie, Wang Er-meng, et al. Research of reasonable delay intervals in jinduicheng open-pit mine[J]. Blasting, 2010,27(1):96-98.

[8] 穆朝民，任辉启，李永池，等. 变埋深条件下饱和土爆炸能量耦合系数的试验研究[J]. 岩土力学，2010,31(5):1574-1578.
Mu Chao-min, Ren Hui-qi, Li Yong-chi, et al. Experiment study of explosion energy coupling coefficient with different burial depths in saturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(5):1574-1578.

[9] 华尔天，周科，费玉莲，等. 基于灰色理论的车门系统参数多目标优化[J]. 计算机集成制造系统，2012,18(3):486-491.
Hua Er-tian, Zhou Ke, Fei Yu-lian, et al. Multi-objective optimization for automotive door parameters based on grey theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012,18(3):486-491.

[10] 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.
Lü Feng. Research on the identification coefficient of relational grade for grey system[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 1997,17(6):49-54.

Optimization design for priming parameters of two-point explosion based on gray theory

Gu Qiang, Zhang Shi-hao, An Xiao-hong, Zhang Ya
(*College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*)

Abstract: Aimed at the selection problem of priming parameters of two-point explosion in concrete, a method for optimizing the parameters was proposed based on the gray theory. The experimental program was developed by the orthogonal experimental design technique, static explosion experiments were simulated by the software AUTODYN under different priming parameters. The gray relational degree and the gray incidence coefficient between the priming parameters and crater diameter as well as crater depth were calculated. The optimization of the priming parameters was done based on the single-objective function and the multi-objective function, and the additional production experiments were completed. The results show that the crater diameter increases 4%－42%, the left crater depth increases (0－29)% and the right crater depth increases (0－32)% by means of the optimized parameters, the damage effect of two-point explosion in concrete is improved than before.

Key words: mechanics of explosion; gray theory; relational degree; concrete; orthogonal experiment; optimization

（责任编辑　张凌云）