

文章编号: 1006-9941(2012)02-0146-05

灰色关联分析在温压炸药配方设计中的应用

黄菊, 王伯良, 仲倩, 惠君明

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为研究固体温压炸药主体组分及对比对爆炸性能的影响规律, 在 1 kg 量级装置静爆试验的基础上采用灰色关联方法分析 5 种组分原材料对冲击波超压的关联程度。结果表明, 与距爆心 3 m 处冲击波超压正相关的因素依次为: 高能炸药(RDX)、超细 AP(3 μm); 而与距爆心 9 m 处冲击波超压则为: 特细铝粉 II(6 μm)、特细铝粉 I(25 μm)、工业 AP(120 μm)。说明, 高能炸药、超细 AP 对较近距离冲击波超压具有主要贡献, 而对较远距离冲击波超压贡献作用较小; 两种粒度的特细铝粉和工业 AP 对不同距离处冲击波强度的作用则与之相反。

关键词: 爆炸力学; 温压炸药; 灰色关联; 配方设计

中图分类号: TJ55; TJ410.4; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.002

1 引言

温压炸药的主要组分为高能炸药、高能活化剂、高能金属粉以及粘结剂等, 由于炸药中各组分反应快慢不同, 其爆炸反应过程可分为三个阶段: 一是化学炸药的爆轰反应; 二是爆轰产物的二次反应, 主要是爆轰产物 CO_2 、 CO 和 H_2O 在高温高压条件下与高能金属粉(如 Al)的二次反应, 尚无外来空气参加; 三是大量外来空气参与的有氧燃烧反应, 主要是炸药中的可燃物质与空气中氧气的快速燃烧反应。为了使炸药最大效率释放能量, 使炸药中各组分的释能与三个阶段相匹配, 特别是建立第三阶段使金属微粒或其他可燃物质与空气混合发生快速燃烧反应的高温条件, 必须在炸药配方和颗粒级配等方面合理设计。

在温压炸药配方设计方面尚未见颗粒级配的专门研究, 而对于一般炸药现有文献主要是通过相关的理论模型, 如最紧密排列理论和干涉论^[1]、球列模型^[2]、分形理论模型^[3]等, 以及对级配、未级配的样品机械感度、力学性能和安全性能进行对比试验的方法^[4-6]来研究颗粒级配技术, 鉴于理论模型需要基于一定的假设为前提以及对对比试验不能全面反映各种颗粒对性

能影响等缺点, 本文引入灰色关联分析方法, 将炸药配方和颗粒级配与性能相结合, 综合研究各组分及其对比对爆炸冲击波压力的影响规律, 为优化温压炸药配方设计提供一种指导方法。

2 灰色关联分析原理

灰色关联分析的基本原理是考察各行为因素之间微观或宏观的几何接近, 以分析和确定各因素之间的影响程度或者若干个子因素(子序列)对主因素(母序列)的贡献程度而进行的一种分析方法^[7]。灰色关联分析的具体计算步骤如下:

(1) 确定反映系统行为特征的参考序列和影响系统行为的比较序列

参考序列(母序列)如式(1)所示:

$$\{X_0^{(0)}(k)\}, k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

比较序列(子序列)如式(2)所示:

$$\{X_1^{(0)}(k)\}, k=1, 2, \dots, n$$

$$\{X_2^{(0)}(k)\}, k=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

⋮

$$\{X_m^{(0)}(k)\}, k=1, 2, \dots, n$$

其中, n 为样本数; m 为因素数。

(2) 对母序列和子序列进行无量纲化处理

由于系统中各因素的物理意义不同, 导致数据的量纲也不一定相同, 为了保证各性状因素具有等效性和同序性, 需要对数据进行无量纲化处理。

收稿日期: 2011-04-28; 修回日期: 2011-06-20

作者简介: 黄菊(1985-), 女, 博士研究生, 从事炸药及其性能研究。
e-mail: huangju1985@yahoo.com.cn

通讯联系人: 王伯良(1964-), 男, 教授, 从事爆炸理论及其应用研究。
e-mail: boliangwang@163.com

$$\chi_i(k) = \frac{X_i^{(0)}(k)}{X_i^{(0)}(l)}, i=0,1,\dots,m, k=0,1,\dots,n \quad (3)$$

(3) 求母序列与子序列的灰色关联系数 $\xi_i(k)$

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |\chi_0(k) - \chi_i(k)| + \rho \max_i \max_k |\chi_0(k) - \chi_i(k)|}{|\chi_0(k) - \chi_i(k)| + \rho \max_i \max_k |\chi_0(k) - \chi_i(k)|} \quad (4)$$

式中, ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 通常取 0.5。

(4) 求关联度 r_i

将各个时刻的关联系数的平均值, 作为子序列与母序列间关联程度的数量表示。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), k=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

(5) 判断关联极性

$$q_i = \sum_{k=1}^n i \chi_i(k) - \sum_{k=1}^n \chi_i(k) \sum_{k=1}^n \frac{i}{n}$$

$$q_r = \sum_{k=1}^n i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n i \right)^2 \quad (6)$$

若 $\text{sgn}\left(\frac{q_i}{q_r}\right) = \text{sgn}\left(\frac{q_j}{q_r}\right)$, 则 χ_i 与 χ_j 正关联;

若 $\text{sgn}\left(\frac{q_i}{q_r}\right) = -\text{sgn}\left(\frac{q_j}{q_r}\right)$, 则 χ_i 与 χ_j 负关联。

(6) 排关联序

将 m 个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列组成关联序, 它反映了对于母序列来说各子序列的“优劣”关系。

3 实验数据的灰色关联分析

3.1 试验

本试验设计了 6 种不同配方的固体温压炸药, 其主要组成为高能炸药 (RDX)、高氯酸铵 (工业 AP)、超细高氯酸铵 (超细 AP)、特细球形铝粉 I (25 μm)、特细球形铝粉 II (6 μm) 和复合粘结剂 (binder)。6 种组分原材料的具体情况见表 1。

制备时首先将物料混合成均匀流动的浆料, 再在专用设备条件下浇注于试验装置中, 经固化保养成型。试验装置每发装填 850 g 温压炸药及 120 g 中心炸药, 装置示意图如图 1 所示。

野外静爆试验时将装置置于 0.9 m 高的木架上, 采用 8 号电雷管从下端起爆。在距爆心 3, 5, 7, 9 m 处布置压力传感器进行冲击波超压参数测试。考虑到温压炸药主要用于对付不同载荷的目标, 故选取 3 m (较近) 和 9 m (较远) 两个测点的冲击波超压进行灰色关联分析, 研究该温压炸药中组分对反应释能过程

及在近场和远场冲击波效应的影响规律。实验所用具体配方以及 3 m 和 9 m 处冲击波超压峰值列于表 2。

表 1 试验用原材料

Table 1 The experiment raw materials

No. raw materials	specification	manufacturer
1 RDX	一级品, I类	江苏盱眙红光化工厂
2 工业 AP	D_{50} 约为 120 μm	大连高佳化工国际工贸有限公司
3 超细 AP	D_{50} 约为 3 μm	南京理工大学粉体中心
4 特细铝粉 I	特细球形, D_{50} 约为 25 μm	鞍钢实业微细铝粉有限公司
5 特细铝粉 II	特细球形, D_{50} 约为 6 μm	鞍钢实业微细铝粉有限公司
6 binder	HTPB 为基的复合粘结剂	自行配制

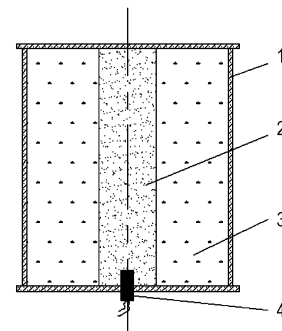


图 1 试验装置示意图

1—壳体, 2—中心药, 3—温压炸药, 4—雷管

Fig. 1 Sketch of experiment device

1—shell, 2—center charge, 3—thermobaric explosive,

4—detonator

3.2 冲击波超压峰值与各组分的关联程度分析

由于粘结剂主要起到将各固体粉料粘结在一起和固化的作用, 本文主要考虑前 5 种主体组分及其配比对超压的影响, 故灰色关联分析时, 取表 2 中前 5 种组分作为考察因素。按照灰色系统关联分析方法, 以测得的超压峰值作为母序列 $X_0^{(0)}$, 炸药配方质量分数 RDX、工业 AP、超细 AP、Al (I)、Al (II) 分别为子序列 $X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, X_4^{(0)}, X_5^{(0)}$, 进行计算。首先按照式 (7) 进行无量纲化处理:

$$\chi_i(k) = [X_i^{(0)}(k) - \bar{X}_i^{(0)}] / \sigma_i \quad (7)$$

式中, $X_i^{(0)}(k)$ 为原始数据, $\bar{X}_i^{(0)}$ 为同一序列的平均值, σ_i 为同一序列的标准差, $\chi_i(k)$ 为原始数据无量纲化处理后的数据, 计算结果列于表 3。

利用表 3 的无量纲数据, 按照式 (4) 计算炸药中 5 种组分与超压峰值的的关联系数, 结果见表 4。

表 2 试验配方和超压峰值

Table 2 The experiment formulations and peak overpressures

No.	RDX/%	coarse AP/%	fine AP/%	Al(I) /%	Al(II) /%	binder/%	peak overpressure/kPa	
							3 m	9 m
1	58.0	0.0	0.0	12.0	18.0	12.0	230.5	27.9
2	29.9	0.0	24.9	13.2	19.7	12.3	211.3	28.0
3	45.5	0.0	10.1	13.3	20.0	11.1	212.4	28.7
4	35.5	0.0	14.2	15.8	23.8	10.7	191.5	29.1
5	35.8	14.3	0.0	16.0	23.9	10.0	195.6	30.2
6	49.1	0.0	0.0	16.4	24.5	10.0	196.0	31.9

表 3 原始数据无量纲化结果

Table 3 The standardization of original data

χ_1	χ_2	χ_3	χ_4	χ_5	χ_0
1.503483843	-0.40824829	-0.803906115	-1.332033310	-1.33004563	1.646618465
-1.187464946	-0.40824829	1.637223429	-0.679608832	-0.710572323	0.344693639
0.306442567	-0.40824829	0.186270929	-0.625240125	-0.601253504	0.419283082
-0.651190454	-0.40824829	0.588223987	0.733977538	0.783451536	-0.997916338
-0.622461464	2.041241452	-0.803906115	0.842714952	0.819891142	-0.719901141
0.651190454	-0.40824829	-0.803906115	1.060189778	1.038528780	-0.692777707

表 4 炸药中 5 种组分与 3 m 超压的关联系数

Table 4 The coefficients of peak overpressures at 3 m correlated with 5 compositions

ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5
0.963778819	0.443917986	0.399337710	0.352134899	0.352291624
0.520714528	0.701669466	0.565568830	0.625920239	0.61830382
0.982002156	0.679079755	0.913485521	0.620925242	0.626859391
0.856909857	0.756775109	0.511574751	0.488427048	0.481038879
0.991533278	0.370154694	1.000000000	0.515517946	0.519402273
0.488516129	0.555300945	0.886955581	0.983052666	0.485252468

在表 4 的基础上,按照式(5)和(6)计算各因素关联度、关联极性并排序,结果见表 5。

根据灰色关联度分析原则,灰色关联度越大的子序列与母序列的关系越密切。从表 5 可以看出,距爆心 3 m 处超压峰值与炸药中 5 种组分的关联度大小依次为:高能炸药 RDX、超细 AP、工业 AP(负关联)、特细铝粉 I(负关联)、特细铝粉 II(负关联)。

当正相关的程度较大时,因素对超压峰值的贡献较大。由表 5 可知,对 3 m 处冲击波超压具有显著贡献的依次是高能炸药(RDX)和超细 AP,分析原因可能如下,高能炸药作为最敏感组分,首先起爆释放能量,之后超细粉碎的 AP 由于其粒度较小,反应活性大,能够使释能反应进行地更为迅速。

按照同样的方法对距爆心 9 m 处冲击波超压进行灰色关联分析,结果见表 6。

表 5 炸药中 5 种组分与 3 m 超压的关联程度和关联极性

Table 5 The correlation degree and polarity of peak overpressure at 3 m associated with 5 compositions

factor	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
correlation degree	0.8117	0.6398	0.7288	0.5147	0.5144
polarity	1	-1	1	-1	-1
order	1	3	2	4	5

表 6 炸药中 5 种组分与 9 m 超压的关联程度和关联极性

Table 6 The correlation degree and polarity of peak overpressure at 9 m associated with 5 compositions

factor	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
correlation degree	0.5955	0.6902	0.5696	0.7688	0.7732
polarity	-1	1	-1	1	1
order	4	3	5	2	1

表6可以看出,距爆心9 m处超压峰值与炸药中5种组分的关联度大小依次为:特细铝粉II、特细铝粉I、工业AP、高能炸药RDX(负关联)、超细AP(负关联)。

将表5和表6中的数据绘制成柱形图如图2所示,可以更加直观地看出,高能炸药与距爆心3 m处冲击波超压的关联极性为正,且贡献程度最大;而与距爆心9 m处冲击波超压的关联极性为负,且“削弱”程度最大。超细AP使释能反应更为迅速,对距爆心3 m处冲击波超压具有贡献作用;而工业AP使释能反应稍慢,则对距爆心9 m处冲击波超压具有贡献作用。两种粒径的特细铝粉关联程度极为接近,与距爆心3 m处超压的关联极性同为负,排在后两位;而与距爆心9 m处超压的关联极性同为正,排在前两位。

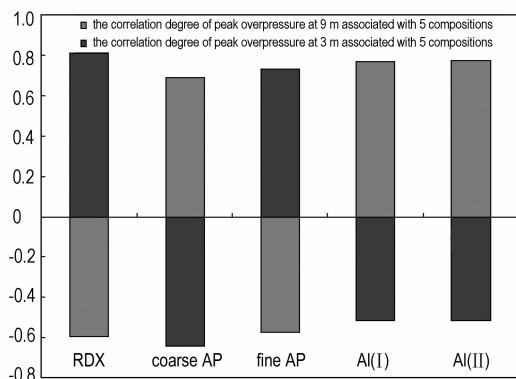


图2 与3 m和9 m处冲击波超压的关联程度

Fig. 2 The correlation degree of overpressures at 3 m and 9 m

对不同距离处冲击波峰值的关联分析结果表明,配方中高能炸药起爆后迅速释放能量,对较近距离的冲击波贡献大,而对较远冲击波超压却有一定削弱作用。金属粉在CJ面上还未来得及反应,它作为“惰性物质”吸收热量,会在某种意义上“削弱”较近位置的冲击波超压峰值,但它能在AP燃烧建立的高温环境下与空气中氧发生剧烈反应,增强炸药的后燃烧效应,为冲击波传播补充能量,在一定程度上延缓其衰减。

4 分析与讨论

在温压炸药配方设计时,应充分利用空气中氧参与释能反应,增强后燃效应,扩大有效作用范围。根据实验和灰色关联分析结果,该浇注温压炸药配方设计应考虑以下几个方面:

4.1 高能炸药

灰色关联分析表明,高能炸药对距爆心3 m处冲击波超压具有主要贡献作用,而对距爆心9 m处冲击

波超压具有“削弱”作用。根据高能炸药和金属粉的反应释能在不同的时间尺度上的特点,高能炸药具有较大的爆热,爆轰时间短,一般不超过 $0.1 \mu\text{s}$,而金属粉则具有很大的燃烧热,其爆炸潜能会在较长的时间尺度上释放,因此,配方设计时应根据目标特性和距离调节各组分用量,例如,对付近距离的硬目标可以适当增加高能炸药含量,而对付较远距离的软目标则应增加金属粉含量并进行合理的颗粒级配和优化设计,一方面使燃料能够充分抛撒,并提供金属粉燃烧的高温条件;另一方面使金属粉进行充分地后续燃烧,实现大面积的毁伤效果。

4.2 活性剂

根据有关研究^[8]结果,铝粉在空气中的着火点大于 $800 \text{ }^\circ\text{C}$,而快速彻底燃烧则需要高达 $1750 \text{ }^\circ\text{C}$,铝粉从点燃到完全反应的整个过程均需要保持高温环境。而AP是一种比高能炸药反应稍迟缓,却比金属粉更易被点燃和释放能量的物质,它的作用不仅可以提供金属粉前期反应所需要的氧,而且反应释放的能量能够建立和维持铝粉燃烧的高温条件。灰色关联分析结果表明,经过超细粉碎处理的AP与工业AP相比,可以使释能反应更为迅速,对较近距离冲击波超压的贡献也更为显著。另外,本试验在制备温压炸药时,采用了两种粒度的高能活化剂(AP),一种为工业级AP,一种为添加某表面活性剂并经超细粉碎处理的AP。制备过程中发现前者容易团聚,制成的样品剖开后有白色颗粒物质存在,而后者则分散均匀,添加的表面活性剂可以使其被复合粘结剂充分润湿并与其他组分混合均匀。与工业级AP相比,超细粉碎的AP具有更好的使用性能。

4.3 铝粉

本实验中铝粉选取了两种不同的粒度规格并按照一定比例进行复配,实验和灰色关联分析结果表明,两种粒径的铝粉与距爆心3 m处的超压峰值为负相关,而与距爆心9 m处的超压峰值为正相关。由于其反应速率慢,在爆炸反应的初期,它作为一种“惰性组分”吸收热量,故对3 m处超压具有一定的“削弱”作用;但它能在高能炸药和活性材料反应提供的高温条件下,吸收空气中的氧进行较长时间的后续燃烧反应,释放的能量在一定程度上延缓了冲击波的衰减,故对9 m超压具有贡献作用。

5 结论

以静爆试验为基础,将灰色系统关联分析理论应

用于温压炸药颗粒级配与配方设计,研究了高能炸药 RDX、工业 AP(120 μm)、超细 AP(3 μm)、特细铝粉 I(25 μm)、特细铝粉 II(6 μm)这 5 种组分原材料对距爆心 3 m 和 9 m 处冲击波超压峰值的影响规律,得到以下结论:

(1) 与距爆心 3 m 处超压峰值正相关的因素依次为: 高能炸药 RDX、超细 AP。

(2) 与距爆心 9 m 处超压峰值正相关的因素依次为: 特细铝粉 II、特细铝粉 I、工业 AP。

(3) 高能炸药对较近距离冲击波超压具有主要贡献,而对较远距离冲击波超压作用较小;两种粒度的特细铝粉则与之相反,对较远距离冲击波超压具有主要贡献,而对较近距离冲击波超压作用较小(或“削弱”)。

(4) 超细 AP 与工业 AP 相比能够使释能反应更为迅速,对较近距离冲击波超压的增强作用明显,且制备过程中发现其使用性能较好;而工业 AP 则对较远距离冲击波具有贡献作用。

因此,在温压炸药配方设计时,应使不同组分在不同作用阶段持续有序并最大化的释放能量,并在设定的与目标易损性相关的冲击波强度情况下获得最大的毁伤范围。

参考文献:

- [1] 肖杨华. 颗粒级配优化研究: 滚动级配法[J]. 推进技术, 1993, 4(4): 60-67.
XIAO Yang-hua. Optimization study on grading composition: Method of grading composition with rolling particles[J]. *Journal*

of Propulsion Technology, 1993, 4(4): 60-67.

- [2] 袁凤英, 闻利群, 张景林. 炸药粒度、粒度级配与质量密度的关系及球列模型研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 304-308.
YUAN Feng-ying, WEN Li-qun, ZHANG Jing-lin. Study on the ball arrangement model and the relationship between the particle size and granularity of explosives and mass density[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(4): 304-308.
- [3] 张奇, 白春华, 刘庆明. 固液混合燃料微观结构与爆轰关系的分形研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 106-111.
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming. Study on microscopic structure in solid and liquid fuel mixture and its relationship with detonation by fractal[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2000, 8(1): 106-111.
- [4] 刘玉存, 王建华, 安崇伟, 等. RDX 粒度对机械感度的影响[J]. 火炸药学报, 2004, 27(2): 7-9.
LIU Yu-cun, WANG Jian-hua, AN Chong-wei, et al. Effect of particle size of RDX on mechanical sensitivity[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004, 27(4): 7-9.
- [5] 刘玉存, 王作山, 吕春玲, 等. 黑索今粒度及粒度级配对接炸药冲击波感度的影响[J]. 兵工学报, 2005, 26(1): 126-128.
LIU Yu-cun, WANG Zuo-shan, LU Chun-lin, et al. Influence of particle size and gradation of RDX on the shock sensitivity of a polymer bonded explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(1): 126-128.
- [6] 宋小兰, 郭效德, 张景林, 等. 粒度及粒度分布对硝酸类炸药及其炸药安全性能的影响[J]. 火工品, 2007(4): 17-21.
SONG Xiao-lan, GUO Xiao-de, ZHANG Jing-lin, et al. Dependence of size and size distribution on safety performance of nitroamine explosives and the multi-component explosives[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2007(4): 17-21.
- [7] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1985.
- [8] May L C, Dung T B, Gary M, et al. Castable thermobaric explosive formulations: US 6969434 B1[P], 2005.

Application of Grey Correlation Analysis in the Formulation Design of Thermobaric Explosive

HUANG Ju, WANG Bo-liang, ZHONG Qian, HUI Jun-ming

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the blast field test results of 1 kg thermobaric explosive, the method of grey correlation analysis was used to investigate the influence rule of 5 raw materials and their contents on blast performances. The results show that the reduced order of the positive correlative factors investigated to the overpressure at 3 m from the explosion center is: high explosive RDX, fine particles of ammonium perchlorate(AP); and with the overpressure at 9 m is: fine particles of aluminum powder Al(II), coarse particles of aluminum powder Al(I) and coarse particles of ammonium perchlorate(AP). It indicates that high explosive RDX and fine particles of AP are in favor of the overpressure at 3 m, but weaken the overpressure at 9 m. Whereas the aluminum powder with two particles size and the coarse particles of AP have the inverse influence on overpressure at both distances.

Key words: explosion mechanics; thermobaric explosive; grey correlation analysis; formulation design

CLC number: TJ55; TJ410.4; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.002