

文章编号: 1006-9941(2012)06-0762-04

固体推进剂安全性能影响因素的灰色关联分析

秦超, 赵孝彬, 李军

(航天工业固体推进剂安全技术研究中心, 湖北 襄阳 441003)

摘要: 采用灰色关联分析方法, 从 NEPE 推进剂的配方组成、结构角度计算了固体推进剂撞击感度、摩擦感度及火焰感度等多项感度的灰色关联度。通过灰色关联度的对比分析, 给出了各感度的主要影响因素及影响因素顺序。配方组成研究结果表明增塑比是影响高能固体推进剂摩擦感度、局部热感度的最主要因素, HMX 含量是影响冲击波感度、5 s 爆发点最主要的因素, 固体含量是影响撞击感度、静电火花感度、火焰感度的最主要因素; 结构研究结果表明铝粉粒度是影响高能固体推进剂摩擦感度、火焰感度、5 s 爆发点的最主要因素; AP 粒度是影响局部热感度、静电火花感度最主要的因素; HMX 粒度是影响撞击感度的最主要因素。

关键词: 安全科学; 固体推进剂; 影响因素; 感度; 灰色关联

中图分类号: TJ55; O29; V512

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.022

1 引言

固体推进剂是一个复杂的含能体系, 影响其安全性能的因素很多, 确定主要影响因素及分析因素之间关系比较困难, 而灰色关联分析则是解决这类问题的一种行之有效的方法。灰色系统理论^[1-2]是针对无经验、少数据的不确定性问题提出的, 是一门极有生命力的系统科学理论, 灰色关联分析是灰色系统理论的重要组成部分, 是对运行机制与物理原型不清晰或者无物理原型的灰色关系序列化、模式化而建立的灰色关联分析模型, 为复杂系统的建模提供了重要的技术分析手段。灰色关联分析方法就是将灰色关联度作为衡量因素间关联程度的一种方法。对于两个系统之间的因素随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度, 称为关联度, 在系统发展过程中, 若两个因素变化的趋势具有一致性, 即同步变化程度较高, 则二者关联程度较高; 反之, 则较低。灰色系统理论提出了对各子系统进行灰色关联度分析的概念, 试图通过一定的方法, 去寻求系统中各子系统(或因素)之间的数值关系。因此, 灰色关联度分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量。

灰色关联分析方法在工业、农业、经济等领域都有着较广泛的应用。如唐健娟^[3]等采用灰色理论方法

研究了沥青混合料的疲劳性能, 王正航^[4]等采用灰色关联方法研究了小麦旗叶叶绿素荧光动力学参数与产量的关系, 李鹏^[5]等采用灰色关联分析及 D-S 理论方法开展了模糊决策研究等。但在固体推进剂领域则几乎还未见应用。

本研究以 NEPE 推进剂为研究对象, 创新性地将灰色理论方法引入进行固体推进剂安全性能研究, 采用灰色关联分析方法从组成及结构角度分析了各影响因素对撞击、摩擦等感度的影响, 确定了各因素的显著程度。

2 方法原理

进行灰色关联分析时, 首先需要确定参考序列和比较序列, 其次, 对序列数据进行归一化处理, 消除数据区间分布不均的影响, 然后依次通过公式求得绝对差序列、灰色关联系数、灰色关联度, 最后对灰色关联度进行排序, 确定各影响因素的显著程度^[2]。

对固体推进剂安全性能影响因素进行灰色关联分析时, 以需要分析的感度(如撞击感度、摩擦感度等)作为参考序列, 各影响因素(如固体含量、增塑比或粒度等)作为比较序列, 将需要分析的某一项感度数值作为参考序列 $y_0(k)$, 影响因素中的某一项数值作为比较序列 $y_i(k)$ 。

确定好参考序列和比较序列后, 对两个序列的原始数据做归一化变换, 采用区间值变换方法, 经过变换, 数据全部统一到 0~1 范围内, 以消除数据量级不同对结果的影响, 变换公式^[6]如(1)所示。

收稿日期: 2011-11-17; 修回日期: 2012-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助(61337-03)

作者简介: 秦超(1982-), 男, 硕士, 工程师, 从事含能材料安全性能研究。e-mail: qinchao820210_0@163.com

$$y(k) = \frac{x(k) - \min x(k)}{\max x(k) - \min x(k)} \quad (1)$$

式中, $x(k)$ 为原始数据; $y(k)$ 为归一化变换后的数据; $\max x(k)$ 为 $x(k)$ 列的最大值; $\min x(k)$ 为 $x(k)$ 列的最小值。

将归一化变换后的序列通过公式(2)求得绝对差序列:

$$\Delta_0(k) = |y_0(k) - y_i(k)| \quad (2)$$

式中, $\Delta_0(k)$ 为绝对差。同时求出绝对差序列中的最小值 Δ_{\min} 与最大值 Δ_{\max} 。

确定绝对差序列后,用公式(3)^[6]计算关联系数:

$$\xi_0(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho + \Delta_{\max}}{\Delta_0(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中, $\xi_0(k)$ 为关联系数; ρ 为分辨系数, ρ 一般取 $0.5^{[6]}$ 。

计算获得关联系数后,再通过公式(4)^[6]求得灰色关联度:

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) \quad (4)$$

式中, $r(x_0, x_i)$ 为灰色关联度; n 为影响因素个数。 x_0 , x_i 分别为变换前的参考序列及比较序列。

最后对求得的灰色关联度进行排序,即根据所求得的灰色关联度对固体推进剂安全性能影响因素进行排序,确定各影响因素的显著程度。

3 结果与分析

3.1 配方组成影响因素

从配方组成角度入手,考察各影响因素对推进剂安全性能的影响。主要考虑固体含量(S)、Al 含量(m_{Al})、AP 含量(m_{AP})、HMX 含量(m_{HMX})、增塑比(m_{PL}/m_{PO})等对固体推进剂安全性能的影响,八个配方的具体组成见表 1。

表 2 组成配方各项敏感度实测值

Table 2 Experimental sensitivities of the solid propellants with different formulations

serial number	flame sensitivity /s	regional thermal sensitivity/s	impact sensitivity /J	friction sensitivity ¹⁾ /%	shock sensitivity /mm	electrostatic spark sensitivity/mJ	5 s explosion temperature/°C
NEPE-1	0.0432	1.5855	7.6	40	17.5	51.5	249
NEPE-2	0.0420	1.9672	8.57	64	26.5	69.63	265
NEPE-3	0.0402	2.0922	12.3	36	28.5	78.54	250
NEPE-4	0.2473	2.9601	10	72	40.5	92.06	248
NEPE-5	0.4755	2.3047	10.5	68	37.5	79.35	259
NEPE-6	0.5421	2.4101	9.36	28	45	78.54	256
NEPE-7	1.3401	3.6094	12	28	30	83.01	296
NEPE-8	1.6050	4.1400	18.2	0	41.5	80.82	298

Note: 1) friction sensitivity was obtained at 60°, 2.5 MPa.

按照均匀设计配方进行推进剂装药后,我们采用摩擦感度测试仪、撞击感度测试仪等测试设备对其成品药各项感度进行了测试,对应各配方的感度实测值见表 2。采用灰色关联分析方法,通过公式(1)~(4)计算获得了撞击感度、摩擦感度、静电火花感度、冲击波感度等感度影响因素的显著程度,结果见表 3。

从表 3 可以看出,增塑比是影响高能固体推进剂摩擦感度、局部热感度的最主要因素;HMX 含量是影响冲击波感度、5 s 爆发点最主要的因素;固体含量是影响撞击感度、静电火花感度、火焰感度的最主要因素。

3.2 结构影响因素

从结构角度入手,采用均匀设计方法对配方进行设计,考察各影响因素对推进剂安全性能的影响。主要考虑 Al 粒度(D_{Al})、AP 粒度(D_{AP})、HMX 粒度(D_{HMX})对固体推进剂安全性能的影响,三种物质的粒度见表 4。

按照均匀设计配方进行推进剂装药后对其成品药各项感度进行了测试,对应各配方的感度实测值如表 5 所示。

表 1 推进剂配方组成

Table 1 Solid propellant formulations with different plasticization ratios

serial number	S/%	m_{AP} /%	m_{Al} /%	m_{HMX} /%	m_{PL}/m_{PO}
NEPE-1	72	53.8	14.6	3.6	2
NEPE-2	80	45.1	10.1	24.8	2.5
NEPE-3	70	30.6	5.6	33.7	2.5
NEPE-4	78	26.4	1.1	50.5	3
NEPE-5	67	16.5	16.9	33.7	3
NEPE-6	76	13	12.4	50.6	3.5
NEPE-7	65	6.3	7.9	50.9	3.5
NEPE-8	74	2.3	3.4	68.3	4

Note: m_{PL}/m_{PO} is plasticization ratio.

表 3 组成各影响因素的灰色关联度及显著程度

Table 3 Values and sequences of Grey relation

gray correlation	grey relation degree					significant level
	S	m_{AP}	m_{Al}	m_{HMX}	m_{PL}/m_{PO}	
impact sensitivity	0.669	0.638	0.556	0.653	0.641	$S > m_{HMX} > m_{PL}/m_{PO} > m_{AP} > m_{Al}$
friction sensitivity	0.740	0.630	0.741	0.609	0.769	$m_{PO} > m_{AP} > m_{Al} > S > m_{AP} > m_{HMX}$
electrostatic spark sensitivity	0.660	0.631	0.638	0.556	0.587	$S > m_{Al} > m_{AP} > m_{PO} > m_{AP} > m_{HMX}$
shock sensitivity	0.722	0.455	0.647	0.740	0.660	$m_{HMX} > S > m_{PO} > m_{AP} > m_{Al} > m_{AP}$
5 s explosion temperature	0.599	0.597	0.523	0.668	0.642	$m_{HMX} > m_{PO} > m_{AP} > S > m_{AP} > m_{Al}$
flame sensitivity	0.663	0.543	0.633	0.622	0.604	$S > m_{Al} > m_{HMX} > m_{PO} > m_{AP} > m_{AP}$
reginal thermal sensitivity	0.699	0.603	0.583	0.638	0.749	$m_{PO} > m_{AP} > S > m_{HMX} > m_{AP} > m_{Al}$

表 5 结构配方各项敏感度实测值

Table 5 Sensitivities of the solid propellant with different granularities

serial number	flame sensitivity /s	impact sensitivity /J	friction sensitivity ¹⁾ /%	regional thermal sensitivity /s	electrostatic spark sensitivity/mJ	5 s explosion temperature/s
NEPE-9	2.0554	6.03	44	3.3252	70.96	270.44
NEPE-10	1.3328	6.91	36	1.8553	65.7	269.59
NEPE-11	2.6621	7.94	68	3.1623	67.6	273.47
NEPE-12	1.388	6.91	96	1.8714	76.52	264.6
NEPE-13	1.0476	7.6	92	3.0338	60.2	274.5
NEPE-14	1.321	8.53	56	2.0463	41.6	264.49
NEPE-15	2.7849	11.2	32	3.9602	38.54	259.35
NEPE-16	1.0449	12.3	60	2.0627	58.69	235.95

Note: 1) the data was obtained at 66°, 2.5 MPa.

表 4 各组分的具体粒度

Table 4 Granularities of some solid propellant compositions

serial number	$D_{AP}/\mu\text{m}$	$D_{HMX}/\mu\text{m}$	$D_{Al}/\mu\text{m}$
NEPE-9	345	360	17
NEPE-10	300	230	4
NEPE-11	245	100	21
NEPE-12	190	15	5
NEPE-13	135	540	25
NEPE-14	100	320	9
NEPE-15	45	160	29
NEPE-16	7	60	13

采用灰色关联分析方法,通过公式(1)~(4)计算了撞击感度、摩擦感度及火焰感度等的影响因素及显著程度,结果见表6。从表6可以看出:铝粉粒度是影响高能固体推进剂摩擦感度、火焰感度、5 s 爆发点的最主要因素;AP 粒度是影响局部热感度、静电火花感度最主要的因素;HMX 粒度是影响撞击感度的最主要因素。

通过灰色关联分析法获得各因素的灰色关联度,并据此确定出了各影响因素的显著程度,不仅可以为固体推进剂配方的安全性能设计提供参考,也可以为安全性能预示等研究工作奠定基础。

表 6 结构各影响因素的灰色关联度及显著程度

Table 6 Values and sequences of Grey relation

test item	grey relation degree			significant level
	D_{AP}	D_{HMX}	D_{Al}	
impact sensitivity	0.654	0.727	0.697	$D_{HMX} > D_{Al} > D_{AP}$
friction sensitivity	0.679	0.678	0.762	$D_{Al} > D_{AP} > D_{HMX}$
flame sensitivity	0.599	0.690	0.716	$D_{Al} > D_{HMX} > D_{AP}$
reginal thermal sensitivity	0.712	0.633	0.650	$D_{AP} > D_{Al} > D_{HMX}$
electrostatic spark sensitivity	0.715	0.698	0.694	$D_{AP} > D_{HMX} > D_{Al}$
5 s explosion temperature	0.624	0.610	0.701	$D_{Al} > D_{AP} > D_{HMX}$

4 结 论

采用灰色关联分析这种“少数数据不确定”的研究方法,从组成及结构角度确定了各影响因素对撞击、摩擦等感度影响的显著程度。通过研究认为:

(1) 采用灰色关联分析方法,可以找出固体推进剂安全性能的主要影响因素及各因子对安全性能的影响程度大小;

(2) 由于灰色关联分析可以在较少的数据下获得比较可靠的结果,可以节省大量验证试验的成本,优于

需要采用大量数据的统计分析方法；

(3) 该方法确定的主要影响因素或影响因素的显著程度可以作为安全性能预示输入参数,同时也可作为配方安全设计提供参考。

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
DENG Ju-long. Grey theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing Agency, 2002.
- [2] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等著. 灰色系统理论及其应用(第五版)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LIU Si-feng, GUO Tian-bang, DANG Yao-guo, et al. Grey theory and application (5th edition) [M]. Beijing: Science Publishing Agency, 2010.
- [3] 唐健娟, 舒富民, 曹海波. 沥青混合料疲劳性能影响因素灰关联熵分析[J]. 现代交通技术, 2008, 5(1): 19-21.
TANG Jian-juan, SHU Fu-min, CAO Hai-bo. Analysis of grey association entropy for fatigue performance influence factors of asphalt mixture[J]. *Modern Transportation Technology*, 2008, 5(1): 19-21.
- [4] 王正航, 武仙山, 昌小平, 等. 小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析. 作物学报[J]. 2010, 36(2): 217-227.
WANG Zheng-Hang, WU Xian-Shan, CANG Xiao-ping, et al. Chlorophyll content and chlorophyll fluorescence kinetics parameters of flag leaf and their gray relational grade with yield in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(2): 217-227.
- [5] 李鹏, 刘思峰. 基于灰色关联分析和 D-S 证据理论的区间直觉模糊决策方法. 自动化学报[J]. 2011, 37(8): 993-998.
LI Peng, LIU Si-Feng. Interval-valued intuitionistic fuzzy numbers decision-making method based on grey incidence analysis and D-S theory of evidence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(8): 993-998.
- [6] 易德生, 郭萍. 灰色理论与方法: 提要. 题解. 程序. 应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
YI De-sheng, GUO Ping. Grey theory and method: summary. solutions. program. application[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing Agency, 1992.

Grey Relational Analysis in Influencing Factors of NEPE Propellant Sensitivity

QIN Chao, ZHAO Xiao-bin, LI Jun

(Aerospace Industry Research Center of Solid Propellant Safety Technology, Xiangyang 441003, China)

Abstract: The Grey relationship degree of NEPE solid propellant sensitivities was calculated by numerical method, including impact sensitivities, friction sensitivities, flame sensitivities and other sensitivities from composing and granularities. The results indicate that plasticization ratio is the main influence factors of friction sensitivity and regional thermal sensitivity. The contents of HMX is the main influence factors of Shock sensitivity and 5 s explosion temperature, S is the main influence factors of impact sensitivity electrostatic spark sensitivity and flame sensitivity. Granularities result indicate that particle size of Al is the main influence factors of friction sensitivity, 5 s explosion temperature and flame sensitivity. The particle size of AP is the main influence factors of regional thermal sensitivity and electrostatic spark sensitivity, particle size of HMX is the main influence factors of impact sensitivity.

Key words: safety science; solid propellant; influencing factor; sensitivity; grey relation analysis

CLC number: Tj55; O29; V512

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.022