

文章编号: 1006-9941(1999)02-0083-06

# 模糊数学在评价炸药性能中的应用

胡庆贤

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 成都 610003)

**摘要:** 提出了用模糊数学对炸药进行分类的方法。其要点是将已知炸药和拟评估炸药的各种性能参数进行模糊聚类, 为炸药的合理应用提供依据。

**关键词:** 炸药性能; 模糊数学的应用; 评价

**中图分类号:** O159; TQ560.71

**文献标识码:** A

## 1 引言

研究炸药的各种性能, 如爆轰性能、感度、力学性能、成型性能、环境适应性等, 是正确评价和使用炸药的前提。炸药每一种性能的测试有多种方法, 如炸药的感度就有热感度、撞击感度、摩擦感度、枪击感度、静电火花感度、苏珊感度、滑道试验等方法。对于同一种炸药, 采用不同的试验方法, 由于试验装置、试样的量及状态、刺激炸药的能大小及方式不同, 所得结果也不尽一致, 如果再考虑到炸药的其它性能数据, 综合评价炸药的性能就显得有些困难。本文运用模糊聚类的方法, 将待评价炸药的性能与一些使用多年的炸药进行比较, 以便较准确地评定该炸药的应用价值。

## 2 方法概述<sup>[1]</sup>

### 2.1 数据标准化

设论域  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_1, x_2, \dots, x_n$  为被分类的炸药, 每种炸药又由  $m$  个参数表示其性质:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

于是, 得到原始数据矩阵  $A$  为

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

作平移-极差变换

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}^{(j)}}{x_{\max}^{(j)} - x_{\min}^{(j)}}$$

其中,  $x_{ij}$  是第  $i$  种炸药的第  $j$  项参数。  $x_{\max}^{(j)}, x_{\min}^{(j)}$  分别是这  $n$  种炸药第  $j$  项参数的最大值和最小值,  $\bar{x}_{ij}$  是标准化后第  $i$  种炸药的第  $j$  个参数的标准值。通过平移-极差变换后从原始数据矩阵得到如下的矩阵

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \dots & \bar{x}_{1m} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{x}_{n1} & \bar{x}_{n2} & \dots & \bar{x}_{nm} \end{bmatrix}$$

### 2.2 建立模糊相似矩阵

采用加权绝对值距离法计算模糊相似矩阵  $R$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

$$r_{ij} = 1 - \sum_{k=1}^m a_k |\bar{x}_{ik} - \bar{x}_{jk}|$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, n) \text{ 及 } \sum_{k=1}^m a_k = 1$$

加权系数  $a_k (k = 1, 2, \dots, m)$  的选择根据炸药的应用情况、各参数在决定炸药性能上所起的作用确定。

### 2.3 聚类

用平方法求  $R$  的传递闭包, 即得模糊等价矩阵  $R^*$ , 再让置信度水平  $\lambda$  由 1 变小, 求出炸药的分类并作出动态聚类图。

## 3 几种炸药的感度聚类

设  $x_1, x_2, \dots, x_6$  分别表示 PBX-9404、PBX-9501、CompB-3、赛克洛托 (RDX/TNT 75/25)、奥克托儿 (HMX/TNT 75/25)、PBX-9011 炸药, 每种炸药的感度

取决于撞击感度、冲击波感度(小隔板试验)、苏珊试验、滑道试验四个参数,即

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}) \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

为了进行计算,需确定这六种炸药的苏珊试验、滑道试验的感度参数值。根据这六种炸药的苏珊试验、滑道试验结果,按感度的高低依次排序,最敏感炸药的感度参数值为6,随感度的降低其值依次减小,感度最低的炸药感度参数值为1。其原始数据矩阵的数据如表1所示。

表1 几种炸药的感度参数值<sup>[2]</sup>  
Table 1 Sensitivity of some explosives

炸药名称	撞击感度 $H_{50}/\text{cm}$	冲击波感度 $G_{50}/\text{mm}$	苏珊 试验	滑道 试验
PBX-9404	34	2.5	6	6
PBX-9501	44	1.6	5	2
CompB-3	29	1.3	1	3
赛克洛托	33	0.33	3	5
奥克托儿	41	0.64	4	4
PBX-9011	44	1.6	2	1

作平移-极差变换后得矩阵

$$\begin{bmatrix} 0.3333 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0.5853 & 0.8000 & 0.2000 \\ 0 & 0.4470 & 0 & 0.4000 \\ 0.2667 & 0 & 0.4000 & 0.8000 \\ 0.8000 & 0.1429 & 0.6000 & 0.6000 \\ 1 & 0.5853 & 0.2000 & 0 \end{bmatrix}$$

取 $(a_1, a_2, a_3, a_4) = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)$ 计算得模糊相似矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.4796 & 0.3784 & 0.5334 & 0.4690 & 0.2796 \\ & 1 & 0.4654 & 0.4204 & 0.6894 & 0.8000 \\ & & 1 & 0.6215 & 0.5240 & 0.5654 \\ & & & 1 & 0.7310 & 0.4204 \\ & & & & 1 & 0.5894 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

用平方法求得传递闭包

$$R^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.5334 & 0.5334 & 0.5334 & 0.5334 & 0.5334 \\ & 1 & 0.6215 & 0.6894 & 0.6894 & 0.8000 \\ & & 1 & 0.6215 & 0.6215 & 0.6215 \\ & & & 1 & 0.7310 & 0.6894 \\ & & & & 1 & 0.6894 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

( $R$ 和 $R^*$ 矩阵中因为 $r_{ij} = r_{ji}$ ,故只写出了主对角线上方的元素 $r_{ij}$ 。)

当置信度水平 $\lambda$ 由1, 0.8000, ...一直减小到0.5334时,由模糊等价矩阵 $R^*$ 将炸药按感度分类如下。

当 $\lambda = 1$ 时,炸药分为六类: $\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}$ 。即每一种炸药各成一类。

当 $\lambda = 0.8000$ 时,炸药分为五类: $\{x_2, x_6\}, \{x_1\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}$ 。即PBX-9501、PBX-9011被分为一类。说明在置信度0.8水平上,可认为这两种炸药的感度大致相当。其余炸药仍各成一类。

当 $\lambda = 0.7310$ 时,炸药分为四类: $\{x_2, x_6\}, \{x_4, x_5\}, \{x_1\}, \{x_3\}$ 。即在该置信度水平上, PBX-9501、PBX-9011为一类,赛克洛托、奥克托儿分为另一类, PBX-9404、CompB-3炸药的感度与上述两类炸药的感度不同,各成一类。

当 $\lambda = 0.6894$ 时,炸药分为三类: $\{x_2, x_4, x_5, x_6\}, \{x_1\}, \{x_3\}$ 。即PBX-9501、PBX-9011、赛克洛托、奥克托儿分为一类,其他两种炸药各成一类。

当 $\lambda = 0.6215$ 时,炸药分为两类: $\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_1\}$ 。即除PBX-9404外,其余炸药分为一类。

当 $\lambda = 0.5334$ 时,炸药分为一类: $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ 。

其动态聚类图如图1所示。

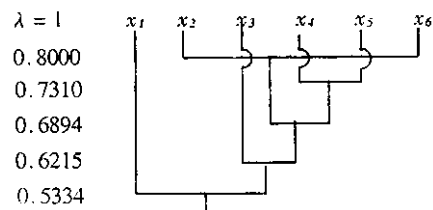


图1 几种炸药感度的动态聚类图

Dynamic classification of some explosive sensitivity

#### 4 几种炸药按性能分类

设 $x_1, x_2, \dots, x_6$ 分别表示JO-9159、TNT/RDX(40/60)、JOB-9003、TH-4748、JB-9001、TNT炸药,每种炸药的性能取决于爆速、爆压、撞击感度、苏珊试验、爆发

点、抗压强度等 13 个指标,即

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{i13}) \quad (i = 1, 2, \dots, 6)。$$

苏珊试验多用苏珊感度曲线表示。为了将苏珊试验结果用数字表示出来,作者根据苏珊感度五条曲线<sup>[3]</sup>(见图 2),将试验结果分为七级。将 PBX-9404-03、LX-10 的感度等级作为 7, LX-04 的感度等级为 6, CompB-3 的等级为 5, TNT 为 3, TATB 为 1。根据炸药在苏珊感度曲线图上的位置,判断其苏珊感度的等级。对滑道试验,主要根据试验中最高反应等级及相应的落高,分成 0 ~ 10 十个感度等级(表 2)。所研究炸药及其数值如表 3<sup>[4,5]</sup>所示。

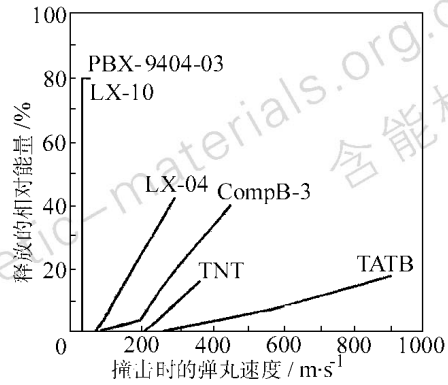


图 2 几种炸药的苏珊试验结果

Fig. 2 Susan test results of some explosives

表 2 滑道试验结果与感度等级对照表

Table 2 Comparison of skid test results and sensitivity grade

最高反应等级 的相应落高 $H/cm$	最高反应等级	感度等级	最高反应等级 的相应落高 $H/cm$	最高反应等级	感度等级
$H < 0.38$	6	10	$1.52 \leq H < 3.05$	6	5
	5	8		5	4.5
	4	7		4	4
	3	6		3	3.5
$0.38 \leq H < 0.53$	6	8	$3.05 \leq H < 4.30$	2	3
	5	7		6	4.5
	4	6		5	4
	3	5.5		4	3.5
	2	4.5		3	3
$0.53 \leq H < 1.07$	6	7	$4.30 \leq H < 6.0$	2	2
	5	6		1	1
	4	5.5			
	3	4.5			
	2	4			
$1.07 \leq H < 1.52$	1	3.5			
	6	6	$H > 6.0$	2	1
	5	5		1	0.5
	4	4.5			
	3	4			
2	3.5				
	1	3			

注: 撞击角为 14°。

表 3 几种炸药的主要性能数据  
Table 3 Main parameters of some explosives

参 数	JO-9159	RDX/TNT(40/60)	JOB-9003	TH-4748	JB-9001	TNT
爆速 $D/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	8.862	7.878	8.712	8.237	7.658	6.928
爆压 $p_{c-j}/\text{Gpa}$	36.8	27.0	35.2	33.11	31.66	19.1
圆筒试验比动能 $E/\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	1.651	1.320	1.558	1.312	1.036	0.947
平面飞片速度 $\mu_t/\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	4.557	4.083	4.445	4.163	3.691	3.459
撞击感度/%	15	44	0	0	0	8
摩擦感度/%	15	4	5	0	0	4
冲击波感度 $G_{50}/\text{mm}$	22.61	18.75	20.93	20.10	15.00	21.86
枪击感度 <sup>1)</sup>	25	10	17	0	0	6
滑道试验反应级别	5	4	2	0	0	1
苏珊试验反应级别	7	5	5	3.5	1	3
爆发点/ $^{\circ}\text{C}$	320	280	330	347	429.4	475
抗拉强度/MPa	4.84	1.96	6.47	6.27	7.71	0.80
抗压强度/MPa	30.89	10.79	44.85	33.40	30.30	9.32

注：1) 以 TNT 当量(g)表示。

平移 - 极差变换后得矩阵, 矩阵第 1 行、第 2 行... 第 6 行, 分别为炸药  $x_1, x_2, \dots, x_6$  的各种性能参数的标准值, 第 1 列、第 2 列... 第 13 列分别示出  $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} \dots, x_{i13}$  的标准值。

加权系数的选择如表 4 所示。考虑到这些炸药是作为成型药柱使用, 在有关感度的各项指标中加大了苏珊试验、滑道试验的加权系数。在能量参数中, 加大了圆筒试验、平面飞片速度试验的加权系数。

1	1	1	1	0.341	1	1	1	1	1	0.205	0.585	0.607
0.491	0.446	0.511	0.568	1	0.267	0.493	0.40	0.800	0.667	0	0.168	0.041
0.922	0.910	0.863	0.898	0	0.333	0.779	0.680	0.400	0.667	0.256	0.821	1
0.677	0.792	0.499	0.641	0	0	0.670	0	0	0.417	0.344	0.792	0.678
0.377	0.710	0.092	0.211	0	0	0	0	0	0	0.766	1	0.591
0	0	0	0	0.182	0.267	0.901	0.240	0.200	0.333	1	0	0

表 4 各指标的加权系数值  
Table 4 Weighted coefficient of some parameters

指标	爆速	爆压	圆筒试验	平面飞片速度	撞击感度	摩擦感度	冲击波感度	枪击感度	滑道试验	苏珊试验	爆发点	抗拉强度	抗压强度
$x_{ij}$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	$x_{i3}$	$x_{i4}$	$x_{i5}$	$x_{i6}$	$x_{i7}$	$x_{i8}$	$x_{i9}$	$x_{i10}$	$x_{i11}$	$x_{i12}$	$x_{i13}$
$a_k$	0.0738	0.0738	0.08	0.08	0.0738	0.0741	0.0769	0.0769	0.08	0.08	0.0769	0.0769	0.0769

计算得模糊相似矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.526 & 0.725 & 0.532 & 0.308 & 0.290 \\ & 1 & 0.582 & 0.609 & 0.465 & 0.573 \\ & & 1 & 0.752 & 0.522 & 0.422 \\ & & & 1 & 0.765 & 0.545 \\ & & & & 1 & 0.592 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

用平方法求得传递闭包  $t(R) = R^* = R^4$

$$R^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.609 & 0.725 & 0.725 & 0.725 & 0.592 \\ & 1 & 0.609 & 0.609 & 0.609 & 0.592 \\ & & 1 & 0.752 & 0.752 & 0.592 \\ & & & 1 & 0.765 & 0.592 \\ & & & & 1 & 0.592 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

( $R$  和  $R^*$  矩阵中因为  $r_{ij} = r_{ji}$ , 故只写出了主对角线上方的元素  $r_{ij}$ 。)

当置信度水平  $\lambda$  由 1, 0.765, ... 一直减小到 0.592 时, 由模糊等价矩阵  $R^*$  将炸药分类如下。

当  $\lambda = 1$  时, 炸药分为六类:  $\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}$ 。即上述六种炸药 JO-9159、TNT/RDX、JOB-9003、TH-4748、JB-9001、TNT 自成一类。

当  $\lambda = 0.765$  时, 炸药分为五类:  $\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5\}, \{x_6\}$ 。即炸药 TH-4748、JB-9001 被分为一类。认为在这六种炸药中, 按上述所列性能综合评价, 在置信度为 0.765 时, 这两种炸药可认为性能相似, 可归为一类。其余炸药各成为一类。

当  $\lambda = 0.752$  时, 炸药分为四类:  $\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3, x_4, x_5\}, \{x_6\}$ 。即在该置信度水平上, JOB-9003、TH-4748、JB-9001 分为一类, 其余炸药各成一类。

当  $\lambda = 0.725$  时, 炸药分为三类:  $\{x_1, x_3, x_4, x_5\}, \{x_2\}, \{x_6\}$ 。即在 0.725 的置信水平上 JO-9159、JOB-9003、TH-4748、JB-9001 分为一类, TNT/RDX、TNT 各自成为一类。

当  $\lambda = 0.609$  时, 炸药分为两类:  $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, \{x_6\}$ 。即 TNT 炸药为一类, 其余炸药为一类。

当  $\lambda = 0.592$  时, 六种炸药归为一类:  $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ 。

其动态聚类图如图 3 所示。

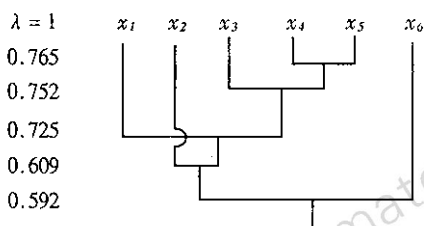


图 3 几种炸药按性能分类的动态聚类图

Fig. 3 Dynamic classification diagram of some explosives by properties

## 5 讨 论

(1) 从本文第 3 节“几种炸药感度的聚类”可见, 所列炸药用不同的测试方法测试的结果不同, CompB-3 的撞击感度 (50% 爆炸特性落高) 为 29mm, 在六种炸药中感度最高, 但在苏珊试验中, 它却表现出比较钝感, 是所列炸药中感度最低的一种; PBX-9011 的苏珊感度、冲击波感度比 CompB-3 高, 但撞击感度、滑道试

验测定的感度比 CompB-3 低。根据所列出的感度数据用模糊聚类的方法进行综合评价, 可以看出这两种炸药的感度是否相当。在置信度水平较高 (0.8) 时, PBX-9011 只能与 PBX-9501 分为一类, 而不能与 CompB-3 分为一类。只有在置信水平较低 (0.689) 时, PBX-9011 才与 CompB-3 分为一类, 这表明这两种炸药的感度不相当。用模糊聚类的方法, 可根据炸药的多种参数将炸药进行分类, 观察该炸药在何种置信水平上与一种性能熟知的炸药归为一类。与已知炸药归为一类的置信水平  $\lambda$  越高, 表明与已知炸药的性能越接近。再与已知炸药各项参数的比较, 可为正确评价及使用炸药提供依据。

(2) 通过模糊聚类图, 可以看出炸药分类的情况。从图 3 可知, 用 13 个参数评价炸药的性能, 在置信水平 0.765 时 JB-9001 只能与 TH-4748 归为一类, 表明在所示的几种炸药中这两种炸药的性能最相近。在置信水平 0.752 时, JB-9001、TH-4748、JOB-9003 归为一类。在置信水平 0.725 时, JB-9001、TH-4748、JOB-9003、JO-9159 归为一类。随置信水平的降低, 归为一类的炸药数增加。从这些炸药的性能看, 自 JB-9001 到 JO-9159, 炸药的感度、炸药的能量都依次增加, 在较低置信度水平上, 它们虽然被归为一类, 但在性能上已有较大不同, 从钝感高能炸药逐渐变为感度较高的高能炸药。在较高的置信度水平上 ( $\lambda > 0.765$  时), JB-9001 与 TH-4748 也不能归为一类, 这是由于这两种炸药在性能上仍有较大的不同所致。

(3) 本文根据不同的研究对象选取了不同加权系数。在评价几种炸药的感度时, 取每个参数的  $a_i$  为 0.25。这是因为每种感度测试方法对评价炸药的感度都有重要的作用。例如撞击感度, 测试粒状炸药对撞击的敏感程度, 这对单体炸药、造型粉的生产、运输、成型等有重要意义。而苏珊试验、滑道试验能模拟药柱在受到撞击、摩擦、挤压等因素作用下的敏感性, 对研究炸药在使用过程中的安全性有重要意义。在评价炸药的性能时偏重于成型炸药的性能, 取苏珊试验、滑道试验的加权系数大于撞击感度、摩擦感度的加权系数。而在能量指标上, 取圆筒试验、平面飞片速度的加权系数大于爆速、爆压的加权系数。

(4) 文中用炸药的多种参数进行计算, 因个别炸药的参数值尚未测定或无法采用, 使用了估计值。例如 JB-9001 炸药的冲击波感度, 由于测试该炸药的方法与测试其他炸药的冲击波感度方法不同, 测得的数

据与其他炸药的冲击波感度没有可比性,不能采用。考虑到 JB-9001 是以 TATB 为主的炸药,其冲击波感度应比所列的其他炸药的冲击波感度低,文中采用  $G_{50}$  为 15.0mm,可能该值与其实际值差别较大,它仅表示该炸药在所列炸药中的冲击波感度的次序。对苏珊试验、滑道试验结果都换算成一定的数值,这种换算虽不够准确,但从计算结果看,现在这种估计还是可行的。

(5) 本文使用了传递闭包法分类。当矩阵阶数不高时,可采用最大树方法或其他方法进行分类。

(6) 若被分类炸药的某一性能数据相同,即  $x_{\max}^{(j)} = x_{\min}^{(j)}$  时,则在模糊聚类中,可不考虑此参数。

致谢:本工作曾得到花成同志的帮助,并采用了陈启珍、向勇、张俊隆、马丽莲、黄毅民、吕学国、廖鸿铭、舒远杰等同志的有关实验数据,特此致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 湛红. 模糊数学在国民经济中的应用[M]. 华中理工大学出版社,1995.
- [2] UCRL-14592.
- [3] UCID-17808.
- [4] 董海山,周芬芬编. 高能炸药及相关物手册[M]. 北京: 科学出版社,1989.
- [5] 阮庆云,陈启珍. 评价炸药安全性能的苏珊试验[J]. 爆炸与冲击,1989(1).

## Application of Fuzzy Mathematics to Evaluation of Explosive Properties

HU Qing-xian

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Chengdu 610003, China)

**Abstract:** A method of classifying explosives by fuzzy mathematics is proposed. The property parameters of the well-known and that to be evaluated explosives are classified in fuzzy clusters so as to provide a proper basis for their application.

**Key words:** explosive property; application of fuzzy mathematics; evaluate

(上接第 75 页)

## Combustion Behaviors of Two Kinds of Energetic Droplets

YU Yong-gang<sup>1</sup>, JIN Zhi-ming<sup>1</sup>, LUO Yun-jun<sup>2</sup>

(1. College of Power Eng. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

(2. College of Chemical Engineering Material Sciences, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The combustion behaviors of liquid energetic materials, HY91 and OTTO-II, were investigated by using their droplets in the high temperature range of 700 ~ 850°C. The ignition delay, lifetime, ignition temperature and average mass burning rate of the droplets were measured by a high-speed camera and two thermocouples. The results show that OTTO-II is ignited earlier than HY91, but its burning rate is much slower than the later. These data obtained are of practical references for improving the igniter and injection device of the regenerative liquid propellant gun(RLPG).

**Key words:** combustion behavior; liquid propellant; liquid propellant gun