

文章编号:1006-9941(2009)05-0612-04

## 火炸药综合感度评估方法研究

朱正福, 李长福, 武 堃, 董明舒

(华北系统工程研究所, 北京 100089)

**摘要:**火炸药的安全性是由综合感度给出的,因而火炸药综合感度评估的有效性极其重要。采用多元统计分析方法中的雷达图法对火炸药的多种感度进行综合分析,并利用偏心距对雷达图进行修正后,提出了一种新的火炸药综合感度评估方法——修正雷达图法。利用该方法对常用的 21 种火炸药进行综合感度评估,并与 BZA-1 法的数据进行对比,分析表明该方法对火炸药综合感度的分辨率更高。

**关键词:**安全管理工程; 风险评价; 火炸药; 安全性; 综合感度; 评估

**中图分类号:** TJ55

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.05.026

### 1 引 言

在特定的条件下,感度是火炸药能否实用的关键性能之一,是火炸药安全性的标度<sup>[1-2]</sup>,感度越高,安全性越低,反之越高。火炸药的感度根据不同激能形式分为热感度、机械感度、冲击波感度等。由于感度本身的多样性和复杂性,以至于目前为止还没有发现这些感度之间有什么可以相互换算的当量关系<sup>[3-4]</sup>,这就给火炸药的感度特性进行比较,特别是安全性评价带来了不便。

L. C. Smith<sup>[3]</sup>提出用特性落高值和用最小起爆药量为两平行轴,将炸药的两个不同试验值用直线连起来。然后在适当的位置引平行于轴的直线与代表各炸药的直线相交,按相交次序决定此种条件下各种炸药的安全性顺序。这种方法的优点是考虑了炸药处理及使用时的安全性。但如何正确确定某两种试验作为“点火”与“传播”的难易程度的代表,按照实际环境条件确定位置带有很大的主观性,只能作概略估计。

德国材料试验所(BAM)的 Treumann 早在 1977 年就提出了用一个单一的值来表示和评价烟火剂的感度特性<sup>[3]</sup>,称 BAM 法。即把烟火剂的各种感度概括为热感度、机械感度和爆轰冲击感度三种感度,分别用点数  $K_{th}$ 、 $K_m$  和  $K_d$  表示,每种感度的最大值为 100 点,三者综合为单一值  $G$ ,综合方法是相加。 $G$  值越大,综合感度越高。

BZA-1 法是张国顺结合火炸药及其制品安全评价而创立的一种方法<sup>[3-4]</sup>。主要是从生产过程出发,考虑了热感度、火焰感度、机械感度、爆轰(冲击波)感度等。这里取 5 种爆轰点、真空安定性、撞击感度、摩擦感度、爆轰感度这 5 种物性危险系数的平均值,作为火炸药的综合感度特征值。

BAM 法和 BZA-1 法对综合感度的计算简单,采用各感度简单地相加或几何均值,不能真实反映不同火炸药的固有危险性。

南京理工大学刘荣海<sup>[3]</sup>提出了加权平均法、航天 42 所李军等<sup>[6-7]</sup>提出了综合感度模糊评价法,利用模糊数学方法,建立了固体推进剂综合感度评价的模糊数学模型,并用于 NEPE 推进剂的综合感度评价。该方法消除了传统几何均值感度的局限性,但各项感度的权重确定带有主观因素,不能客观地给出综合感度。

多元统计分析方法中的雷达图法<sup>[8]</sup>是对多因素进行综合评估的有效方法,本文将引入火炸药的感度综合评估,可以充分利用该方法成熟的技术,同时可以避免人为因素的干扰。

### 2 基于雷达图法的综合感度评价方法

在现有的综合评估方法中,BZA-1 法在火炸药安全性评估方法被广泛采用。然而,这种方法采用线性相加的方法,过于简单,当感度种类不限于 BZA-1 法的五种时,线性相加来进行综合就值得推敲。数据综合的方法有很多,这里以 BZA-1 法为基础,利用多元统计分析中的雷达图法<sup>[8]</sup>对火炸药的安全性进行综合评估,提出了一种新的火炸药感度综合评估方法——修正雷达图法。

BZA-1 法主要考虑了热感度、火焰感度、机械感

收稿日期:2009-02-10;修回日期:2009-05-20

作者简介:朱正福(1965-),男,高级工程师,硕士,主要从事可靠性与安全性研究。e-mail: zhuzf@sohu.com

李长福(1963-),男,研究员,硕士,主要从事弹药可靠性工程研究。

e-mail: LiLic1@sina.com

度、爆轰(冲击波)感度等。这里取 5 s 爆发点  $T_E$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),真空安定性  $S_V$  ( $\text{cm}^3$ ),撞击感度  $S_h$  (cm),摩擦感度  $S_f$  (N),爆轰感度  $S_d$  这 5 种危险系数的平均值,作为火炸药的综合同感度特征值  $\alpha$ ,用来表示火炸药的安全性,即:  $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5)/5$  (1)

取值范围 0 ~ 10。式中,  $\alpha_1 = 13.89 - 2.78 \times 10^{-2} T_E$  为由 5 s 爆发点表示的热爆炸危险性系数;  $\alpha_2 = 1.5 S_V$  ( $\text{cm}^3$ ) 为由真空安定性试验 100  $^{\circ}\text{C}$  测得 40 h

的放气量表示的热分解危险性系数;  $\alpha_3 = 10 - 12.5 \times 10^{-2} S_h$  (cm) 为由美国匹克汀尼兵工厂仪器测定的值,即 2 kg 落锤、10 次试验中至少有 1 次爆炸的最小落高表示的撞击危险性系数;  $\alpha_4 = 10 - 2.83 \times 10^{-2} S_f$  (N) 为由 BAM 摩擦感度试验法表示的摩擦危险性系数;  $\alpha_5 = 10 - 20 S_d$  为选用迭氮化铅最小起爆量表示的起爆危险性系数。

常见火炸药的  $\alpha$  值列于表 1 中<sup>[3-4]</sup>。

表 1 常用火炸药的各种感度性能参数

Table 1 The various sensitivity performance parameters of the common explosives

explosive names	$T_E/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_1$	$S_V/\text{cm}^3$	$\alpha_2$	$S_h/\text{cm}$	$\alpha_3$	$S_f/\text{N}$	$\alpha_4$	$S_d/\text{g}$	$\alpha_5$	sensitivity $\alpha$		
											BZA-1 method	radar graph method	modified radar graph method
mercury fulminate	210	8.02	>8.0	10	5.08	9.37	0	10	0	10	9.48	8.96	9.60
DDNP	195	8.44	7.60	9.5	4.00	9.50	0	10	0.30	4.0	8.29	6.78	7.91
lead styphenate	282	6.02	0.40	0.5	7.62	9.05	0	10	<0.01	10	7.11	5.17	6.66
LA	340	4.41	1.60	2.0	7.62	9.05	0.1	10	0	10	7.09	5.23	6.80
tetrazene	160	9.41	8.0	10	5.08	9.37	0	10	0.35	3.0	8.36	6.80	8.19
PETN	225	7.65	0.50	0.63	15.24	8.10	59	8.33	0.03	9.4	6.81	4.55	5.35
R Salt	220	7.75	9.17	10	38.10	5.24	353	0	0.10	8.0	6.20	3.84	4.63
RDX	260	6.63	0.70	0.88	20.32	7.46	118	6.66	0.05	9.0	6.13	3.63	4.16
HMX	327	4.77	0.37	0.46	22.86	7.14	118	6.66	0.30	4.0	4.61	1.98	2.50
CE	257	6.74	0.3	0.38	20.32	7.46	353	3.2	0.1	8.0	5.18	2.18	3.43
PA	320	4.97	0.20	0.25	33.02	5.87	353	0	0.24	5.2	3.26	0.57	1.41
TNT	475	0.68	0.10	0.13	35.56	5.56	353	0	0.27	4.6	2.19	0.08	0.72
DNT	310	5.2	0.04	0.05	66.00	1.75	353	0	0.45	1.0	1.61	0.11	0.26
AN	465	0.94	0.30	0.38	78.74	0.16	353	0	0.45	1.0	0.50	0.03	0.03
NC(N13.4%)	230	7.47	1.50	1.88	7.62	9.05	353	0	0.10	8.0	5.28	1.82	3.87
NG	222	7.72	11.0	10	1.30	9.84	118	6.66	0.10	8.0	8.44	7.12	8.03
EGDN	257	6.72	~10	10	5.00	9.38	353	0	0.10	8.0	6.82	4.30	5.73
DINA	200	8.30	10	10	17.78	7.78	353	0	0.26	4.8	6.18	3.88	4.75
NQ	275	6.22	0.37	0.46	66.04	1.75	353	0.20	6.0	2.89	2.89	0.82	1.25
AP	435	1.77	0.13	0.16	60.96	2.38	353	0	0.45	1.0	1.06	0.05	0.14
DEGDN	237	7.2	3.0	3.75	22.85	7.14	353	0	0.10	8.0	5.23	2.24	3.45

Note:  $T_E$  is explosion point,  $\alpha_1$  is thermal explosion hazards coefficient,  $S_V$  is vacuum stability,  $\alpha_2$  is thermal decomposition coefficient,  $S_h$  is drop hammer impact sensitivity,  $\alpha_3$  is impact hazard coefficient,  $S_f$  is friction sensitivity,  $\alpha_4$  is friction hazard coefficient,  $S_d$  is initiation sensitivity,  $\alpha_5$  is initiation hazard coefficient.

如图 1 所示,以圆心为感度最小值为“0”,圆的半径为感度最大值“10”。如果以图 1 中 A、B、C、D、E 分别表示 BZA-1 法的  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$  的最大值 10,由 ABCDE 组成的五边形的面积  $S_0$  为:

$$S_0 = \frac{n}{2} r^2 \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right), \text{其中 } r = 10, n = 5$$

将某一特定火炸药的  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$  标在图 1 中,由这五个特定点依次相连,则这个不规则的五边形所围成的面积  $S$  与  $S_0$  之比作为综合感度<sup>[9]</sup>。

$$S = \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) \cdot (ab + bc + cd + de + ea)$$

其中,  $n = 5$ ,  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  分别代表特定火炸药的  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$  值。

对于图 1 的综合感度为:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{(ab + bc + cd + de + ea)}{500} \quad (2)$$

当  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  都为最大值 10 时,式(2)为 1,为了与 BZA-1 法最大值一致,因此将式(2)扩大 10 倍,则综合感度为:

$$\alpha = \frac{S}{S_0} \times 10 = \frac{(ab + bc + cd + de + ea)}{50} \quad (3)$$

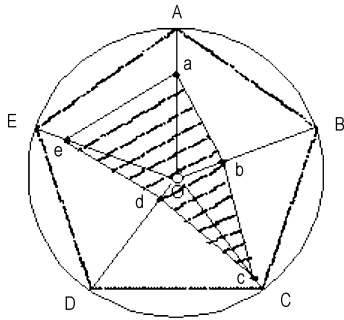


图1 各感度系统与综合感度(面积)的关系图

Fig. 1 The relationship between each sensitivity system and synthetic sensitivity (area)

从图1中可知,当ABCDE(abcde)的位置变化时,由abcde五点围成的不规则五边形的面积S也随之变化,从而使综合感度α不唯一。为了解决这个问题,首先将α<sub>1</sub>、α<sub>2</sub>、α<sub>3</sub>、α<sub>4</sub>、α<sub>5</sub>由大到小重新排序,重新记为a、b、c、d、e,这样,S就唯一了,综合感度α也就唯一确定了。

将表1中α<sub>1</sub>、α<sub>2</sub>、α<sub>3</sub>、α<sub>4</sub>、α<sub>5</sub>重新排序后,由式(3)计算得到雷达图法的综合感度,列于表1中的“雷达图法”一列中。

$$h = \frac{1}{3(ab + bc + cd + de + ea)} \left( (ab^2 \sin(\frac{2\pi}{5}) + b^2 c \sin(\frac{2\pi}{5}) + bc^2 \sin(\frac{4\pi}{5}) + c^2 d \sin(\frac{4\pi}{5}) + cd^2 \sin(\frac{6\pi}{5}) + d^2 e \sin(\frac{6\pi}{5}) + de^2 \sin(\frac{8\pi}{5}) + e^2 a \sin(\frac{8\pi}{5}))^2 + (a^2 b + ab^2 \cos(\frac{2\pi}{5}) + b^2 c \cos(\frac{2\pi}{5}) + bc^2 \cos(\frac{4\pi}{5}) + c^2 d \cos(\frac{4\pi}{5}) + cd^2 \cos(\frac{6\pi}{5}) + d^2 e \cos(\frac{6\pi}{5}) + de^2 \cos(\frac{8\pi}{5}) + e^2 a \cos(\frac{8\pi}{5}) + ea^2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

当a、b、c、d、e取相同的数时,偏心距h=0;当a、b(任两个感度)取最大值10,其它感度取0时,得最大偏心距h=5.39,如图3所示。

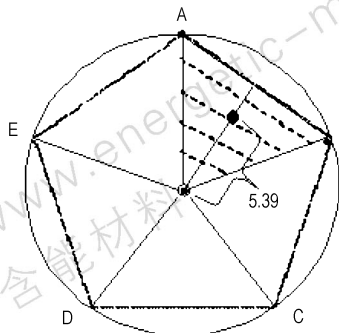


图3 最大偏心距与综合感度(面积)

Fig. 3 The maximum eccentricity and synthetic sensitivity (area)

从图3直观来看,相同面积的综合感度,偏心距越

### 3 修正的雷达图综合感度评价方法

以表1中火炸药BZA-1法的综合感度大小为序画出了BZA-1与雷达图法综合感度排列图(▲与●对比线),见图2,其中第12号点出现了较大的差异。经分析,是不规则五边形的重心与原点偏离较远。根据文献[4],可以用偏心距h(重心与原点的距离)对式(3)的综合感度进行修正。

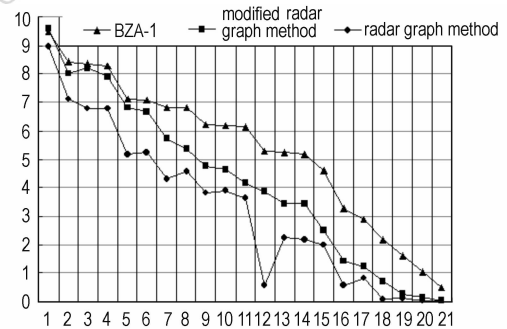


图2 BZA-1法与雷达图法综合感度对比图

Fig. 2 The comparison of synthetic sensitivity from BZA-1 method and radar graph method

由图1不难求得偏心距:

大,火炸药综合感度应越大。考虑到感度的最大值为10,因此,对式(3)进行如下的修正:

$$\alpha = \frac{S}{S_0} \times 10 \times \left( \frac{h}{10} + 1 \right) = \frac{(ab + bc + cd + de + ea)}{50} \times \left( \frac{h}{10} + 1 \right) \quad (5)$$

由式(5)对表1的数据进行计算,列于表1的“修正雷达图法”一列。BZA-1法、雷达图法和修正雷达图法的数据排列图见图2。从图2中可以看出,修正雷达图法优于雷达图法,数据梯度明显,分辨率比BZA-1法高。

### 4 结论

利用修正雷达图法进行火炸药综合感度评价,与BZA-1法和BMA法相比较,避免了火炸药各感度的简单相加,并提高了火炸药综合感度的分辨率,可更客观地区分和评估火炸药的安全性。

现有火炸药安全性(综合感度)是相对的,只有在相同的实验条件下才能得到可比综合感度。如何根据不同实验条件下的实验数据得出可比综合感度,是火炸药安全性研究面临的挑战。

#### 参考文献:

- [1] 刘天生,岳强. 新型钝感炸药组分配比对安全性影响的研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2008,29(3): 232-233.  
LIU Tian-sheng, YUE Qiang. Study on the influence of the ingredient proportions of one new insensitive explosive on its safety[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2008, 29(3): 232-233.
- [2] 王凤英,刘天生. 高钝感炸药组分配比对安全性影响的研究[J]. 火炸药学报,2002(3): 23-25.  
WANG Feng-ying, LIU Tian-sheng. Research on the affection of the formulation of desensitized RDX to security[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002(3): 23-25.
- [3] 刘荣海,胡毅亭,王婷,等. 自反应性物质固有危险度评价[J]. 安全与环境学报,2004,4(增刊): 179-181.  
LIU Rong-hai, HU Yi-ting, WANG Ting, et al. Self-reactive substances inherence criticality evaluation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(Suppl): 179-181.
- [4] 张国顺. 燃烧爆炸危险与安全技术[M]. 北京:中国电力出版社,2003: 180-181.  
ZHANG Guo-shun. *Combustion Explosion Risk and Security Technology* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 180-181.
- [5] 肖忠良,胡双启,吴晓青,等. 火炸药的安全与环保技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006: 133-135.  
XIAO Zhong-liang, HU Shuang-qi, WU Xiao-qing, et al. *Explosive Security and Environmental Protection Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 133-135.
- [6] 李军,赵孝彬,王晨雪,等. 固体推进剂综合感度模糊评价法[J]. 固体火箭技术,2007,30(4): 324-327.  
LI Jun, ZHAO Xiao-bin, WANG Chen-xue, et al. Fuzzy evaluation method for synthesis sensitivity of solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2007, 30(4): 324-327.
- [7] 张小平,李军,赵孝彬,等. 固体推进剂危险源的定量评估方法[J]. 火炸药学报,2007,30(3): 42-44.  
ZHANG Xiao-ping, LI Jun, ZHAO Xiao-bin, et al. Hazard source evaluation method of solid propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(3): 42-44.
- [8] 于秀林,任雪松. 多元统计分析[M]. 北京:中国统计出版社,1999: 54-55.  
YU Xiu-lin, REN Xue-song. *Multivariate Statistical Analysis* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1999: 54-55.
- [9] 李德毅,于全,江光杰. C<sup>3</sup>I系统可靠性、抗毁性和抗干扰的统一评测[J]. 系统工程理论与实践,1997(3): 23-26.  
LI De-yi, YU Quan, JIANG Guang-jie. A unified assessment of reliability, invulnerability and anti-countermeasure for C<sup>3</sup>I systems [J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 1997(3): 23-26.

## Evaluation Method of Synthetic Sensitivity of Explosive

ZHU Zheng-fu, LI Chang-fu, WU Kun, DONG Ming-shu

(North China System Engineering Institute, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The radar graph method was used to analyze the synthetic sensitivity of explosive. Based on eccentricity modification, a modified radar graph method was introduced, which was a new method to evaluate the synthetic sensitivity of explosive. The synthetic sensitivities of 21 kinds of explosives were evaluated by the modified radar graph method and compared with the data from BAZ-1 method. Analysis results show that the modified graph method has a higher resolution to evaluate the synthetic sensitivity of explosive.

**Key words:** risk assessment; explosive; security; synthetic sensitivity; evaluation