

基于最大熵原理的炸药能量和感度评价及应用

王宇, 冯顺山

北京理工大学机电学院; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 为对炸药的能量和感度进行准确把握, 以最大熵作为评价标准建立了炸药能量和感度的评价方法。结果显示, 不敏感单质炸药性能均衡性优于高能炸药, 由此推断出炸药能量和安全性之间存在相互转化关系。将此评价方法应用于混合炸药配方设计可获得能量和感度更加均衡的配方, 结果显示, 以 NQ 作为 RDX、HMX 的钝感剂可使能量和感度的均衡性获得明显改善。最后以 RDX/NQ/TNT-25.5/34.5/40 配方制备试样进行爆速和枪击感度测试, 实验结果显示试样相对国内现有梯黑炸药能量仅略微降低, 但安全性能明显改善, 证明本配方设计方法的可行性。

关键词 最大熵; 能量; 感度; 评价方法; 配方设计

中图分类号 TQ56

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.13.003

Energy and Sensitivity Evaluation of Explosives and Their Applications Based on Maximum Entropy Theory

WANG Yu, FENG Shunshan

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Energy and sensitivity are important performances of explosive which need to be carefully studied and accurately measured; therefore an energy and sensitivity evaluation method of explosives based on maximum entropy theory is created. The information related to energy and sensitivity of explosives is collected with statistical method and the entropy is calculated, the maximum entropy explosive is made as the most balanced one. The evaluation results indicate that the insensitive explosives are more balance than the energetic explosives in evaluation objects, the relationship between energy and safety of explosive is deduced from the evaluation results. The evaluation method is applied to formulation design in order to get the explosive formulation that is more balance in term of these two performances, the results show that NQ can become a good insensitizer for RDX and HMX. At last, a sample of RDX/NQ/TNT-25.5/34.5/40 formulation is prepared and the detonation velocity and rifle shooting sensitivity are tested, experimental results indicate that sample's detonation velocity only reduces a little bit however it is much more insensitive compared with TNT/RDX explosives, it is proved that the proposed formulation design method is feasible.

Keywords maximum entropy; energy; sensitivity; evaluation method; formulation design

0 引言

炸药作为含能材料, 在战斗部装药中负责驱动毁伤单元对目标实施有效打击, 需要具备足够高的能量; 同时作为敏感物质在受到外界刺激时可能意外发火误伤己方, 需要具备足够低的感度以确保安全, 因此, 能量和感度是炸药的两项

重要的性能指标, 需要进行深入的研究和准确的把握。基于这样的需要, 建立一套科学、全面的炸药能量和感度的评价方法是准确把握这两项性能的前提。很多科研工作者进行过相应的研究, Alouaamari 等^[1]采用了双重逻辑回归法, Licht^[2]采用了距离评估法, 胡庆贤^[3]采用了模糊数学方法等, 这些评价

收稿日期: 2011-01-19; 修回日期: 2011-04-08

作者简介: 王宇, 博士研究生, 研究方向为炸药装药技术, 电子信箱: billwang2002@163.com; 冯顺山 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E520000035L), 教授, 研究方向为毁伤理论与弹药工程, 电子信箱: ssfeng@bit.edu.cn

方法都可以作为掌握炸药性能的可靠依据。

本文在前述研究成果的基础上,参考熵理论在数学、物理等学科中的应用^[4-6],将最大熵原理引入炸药能量和感度的评价方法,着重分析了炸药能量和感度之间的优劣差异,能够更好地体现这两项性能的均衡性。本方法的特点是评价结果可应用于混合炸药配方设计以获得能量和安全性能更加均衡的混合炸药配方。

1 基本原理

熵用来表示任意一个系统分布的均匀程度,分布越均匀,熵越大。炸药的能量和感度通常很难平衡,往往高能炸药敏感,而钝感炸药能量偏低,很难找到一种单质炸药能量和安全性能俱佳。这种能量和感度之间的不均匀性会导致熵值降低,并且差异越大,熵值越低,因此可以用熵值作为炸药能量和感度的评价标准。

利用统计方法选取 m 个评价对象和体现炸药能量和感度的 n 个性能指标建立一个 m 行 n 列的评价矩阵 M :

$$M=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

采用极差变换法以 a_{ij}^j 和 a_{ij}^j 代表评价矩阵 M 中每列大于和小于所有数据的边界数值并用式(1)或式(2)计算无量纲化性能指标 $\overline{a_{ij}}$,从而得到 M 的无量纲化矩阵 N 。其中式(1)用于结果随数值增大而渐优的指标,式(2)用于结果随数值减小而渐优的指标。

$$\overline{a_{ij}}=\frac{a_{ij}-a_{\min}^j}{a_{\max}^j-a_{\min}^j} \quad (1)$$

$$\overline{a_{ij}}=\frac{a_{\max}^j-a_{ij}}{a_{\max}^j-a_{\min}^j} \quad (2)$$

$$N=\begin{bmatrix} \overline{a_{11}} & \overline{a_{12}} & \cdots & \overline{a_{1n}} \\ \overline{a_{21}} & \overline{a_{22}} & \cdots & \overline{a_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \overline{a_{m1}} & \overline{a_{m2}} & \cdots & \overline{a_{mn}} \end{bmatrix}$$

针对矩阵 N 中的 $\overline{a_{ij}}$,令

$$k_{ij}=\overline{a_{ij}}/\sum_{i=1}^m\overline{a_{ij}} \quad (3)$$

可得各评价对象的熵 s_i 为

$$s_i=-r\sum_{j=1}^nk_{ij}\ln k_{ij} \quad (4)$$

其中 $r=1/\ln n$ 。

2 炸药能量和感度的评价实例

2.1 数据采集与熵值计算

通过文献^[7-8]收集到的各项评价指标分别为代表炸药能量的爆速 D (m/s)、爆热 Q (kJ/kg)、爆压 P (GPa),以及代表感

度的特性落高 H_{50} (cm)、爆发点 T (℃)、隔板实验 50%爆炸隔板厚度 G_{50} (mm)。以上数据除 G_{50} 外均为结果随数值增大而渐优型指标,以这些性能指标建立如下评价矩阵 M :

$$M=\begin{matrix} & \begin{matrix} D & Q & P & H_{50} & T & G_{50} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{HMX} \\ \text{RDX} \\ \text{PETN} \\ \text{TATB} \\ \text{NQ} \\ \text{NTO} \\ \text{TNT} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 9110 & 6021 & 39.3 & 26 & 280 & 65.0 \\ 8640 & 5812 & 34.7 & 22 & 257 & 61.8 \\ 7980 & 6238 & 30.0 & 12 & 210 & 66.0 \\ 7660 & 5000 & 27.5 & 350 & 397 & 21.9 \\ 7650 & 3724 & 26.8 & 350 & 230 & 5.0 \\ 7955 & 4370 & 27.8 & 146 & 260 & 21.2 \\ 6940 & 4402 & 19.1 & 154 & 330 & 46.4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

采用极差变换法设定的边界数值为

$$x_{\max}^j=[10000 \quad 7000 \quad 40 \quad 400 \quad 400 \quad 70]$$

$$x_{\min}^j=[6000 \quad 3000 \quad 10 \quad 10 \quad 200 \quad 4]$$

通过式(1)、式(2)计算得无量纲化矩阵 N 为

$$N=\begin{bmatrix} 0.778 & 0.755 & 0.977 & 0.041 & 0.400 & 0.076 \\ 0.660 & 0.703 & 0.823 & 0.031 & 0.285 & 0.124 \\ 0.495 & 0.810 & 0.667 & 0.005 & 0.050 & 0.061 \\ 0.415 & 0.500 & 0.583 & 0.872 & 0.985 & 0.729 \\ 0.413 & 0.181 & 0.560 & 0.872 & 0.150 & 0.985 \\ 0.489 & 0.343 & 0.593 & 0.349 & 0.300 & 0.739 \\ 0.235 & 0.351 & 0.303 & 0.369 & 0.650 & 0.358 \end{bmatrix}$$

利用式(3)、式(4)可得各炸药熵值,其大小顺序为 TATB(1.042)>NTO(0.903)>NQ(0.864)>TNT(0.814)>HMX(0.797)>RDX(0.758)>PETN(0.589)。

2.2 计算结果分析

大多数情况下,能量高的炸药总是比较敏感,而钝感的炸药能量又偏低,由此推断出能量和安全性能之间存在着一个“此消彼长的相互转化”关系。各炸药熵值高低差异对应着能量和安全性能相互转化程度的差异,即转化效率不同。3 种不敏感炸药 TATB、NQ、NTO 的熵值比 3 种高能炸药 HMX、RDX、PETN 大,说明 3 种不敏感炸药性能更加均衡,且在能量和安全性能相互转化过程中,安全性的转化效率高于能量,即能量在转化过程中自身损耗更大,这也是高能炸药熵值偏低的原因。此规律可以用如下数学公式表达:

$$P^\alpha S^\beta=\text{const} \quad \alpha>\beta>1 \quad (5)$$

其中, P 为能量; S 为安全性; α, β 为常数。

由此可以推断出 $|dP|<|dS|$ 且符号相反,即说明能量与安全性相互转化且安全性的转化速率更高。

3 评价结果在混合炸药配方设计中的应用

基于上文得到的能量和感度之间的“相互转化”关系,将高能炸药与不敏感炸药相结合可以实现性能互补,通过式(6)计算混合炸药的熵值并以最大熵作为准则获得能量和感度优化的混合炸药配方。

$$s = -r \sum_{i=1}^m (t_i \sum_{j=1}^n k_{ij} \ln k_{ij}) \quad (6)$$

其中 $\sum_{i=1}^m t_i = 1$ 。

3.1 HMX 基混合炸药配方

将不同质量分数的 HMX 分别与 TATB、NQ、NTO 混合后各配方的熵值变化规律如图 1 所示。

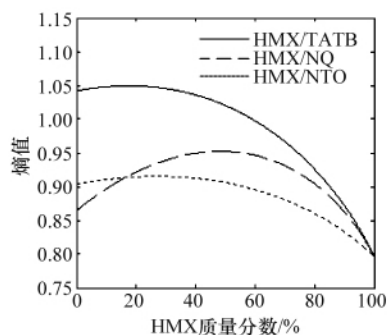


图 1 HMX 基混合炸药配方

Fig. 1 HMX based composite explosive formulations

图 1 中各曲线最高点(熵值最大)对应着系统均匀程度最高,以此为基准选取 TNT 作为液相组分进行混合炸药配方设计,如表 1 所示。

表 1 HMX 基混合炸药配方
Table 1 HMX based explosives' maximum
entropy formulations

序号	曲线	最大熵值	质量比	配方设计
1	HMX/TATB	1.049	17.7/82.3	12.4/57.6/30
2	HMX/NQ	0.952	48.4/51.6	33.9/36.1/30
3	HMX/NTO	0.915	27.2/72.8	19/51/30

注:配方设计组分为 HMX/钝感组分/TNT,固含量为 70%。

Notes: For HMX/desensitizer/TNT, solid content is 70%.

3.2 RDX 基混合炸药配方

将 RDX 分别与 TATB、NQ、NTO 混合后,各配方的熵值变化规律如图 2 所示。以最大熵值为基准,选取 TNT 做为液相组分进行混合炸药配方设计如表 2 所示。

3.3 配方设计结果分析

图 1 和图 2 中各曲线均为上凸形状,说明通过将高能炸药与不敏感炸药相混合可使熵值增加,且在熵值达最大时得到能量和感度最均衡配方,令炸药装药在足够安全的同时还能保持较高的毁伤威力,其中含 NQ 的配方熵增幅度最大,说明将 NQ 与高能炸药混合可以明显改善 NQ 能量的不足,同时仍然保持较低感度,所以表 1 和表 2 中的配方 2 为基于最大熵原理所获得的最佳配方。而 RDX/TATB 和 RDX/NTO

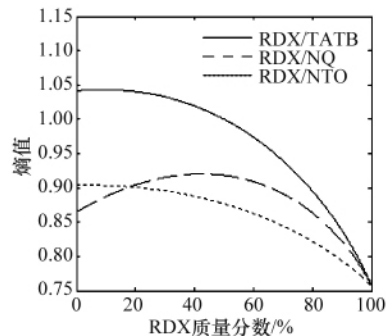


图 2 RDX 基混合炸药配方

Fig. 2 RDX based composite explosive formulations

表 2 RDX 基混合炸药最大熵配方
Table 2 For RDX based explosives' maximum
entropy formulations

序号	曲线	最大熵值	质量比	配方设计
1	RDX/TATB	1.043	8.8/91.2	5.3/54.7/40
2	RDX/NQ	0.920	42.6/57.4	25.5/34.5/40
3	RDX/NTO	0.904	4.6/95.4	2.8/57.2/40

注:配方设计组分为 RDX/钝感组分/TNT,固含量为 60%。

Notes: For RDX/desensitizer/TNT, solid content is 60%.

两条曲线无可见的上凸形状,两配方熵增幅度几乎为零,说明两项性能的均衡性改善不明显,基于最大熵原理未能得出 RDX/TATB、RDX/NTO 两种组合的合理配方。对比图 1 和图 2 中各配方曲线,以含 TATB 的配方熵值最大,但由于 TATB 本身熵值较高,混合炸药的熵增幅度相对较小,能量和感度的均衡性改善相对不明显。

4 实验验证

4.1 药柱试样制备

选取表 2 中的配方 2 制备试样对本文的评价理论和配方设计方法进行实验验证。普通的 NQ 由于晶形呈长针状导致装填系数过低而无法用于装药, 所以采用重结晶技术将 NQ 进行晶形改良, 制备出的 NQ 晶体长径比更小, 装填系数得到大幅度提高, 达到装药水平。采用 TNT 基熔铸炸药制备工艺, 制备出的药柱试样如图 3(a)所示, 试样的密度值如表 3 所示。

4.2 性能测试和结果分析

以爆速和枪击感度作为评价炸药能量和感度的判据。采用电测法进行爆速测试^[9],将试样切割、打磨并按图 3(b)所示安装双丝式电探极,采用 Tektronix TDS5000B 型数字示波器记录爆轰波间隔时间的记时信号。枪击感度测试遵照 GJB 772A—97^[10]中规定的实验方法,样本量为 10 发。测试结果如表 3 所示。

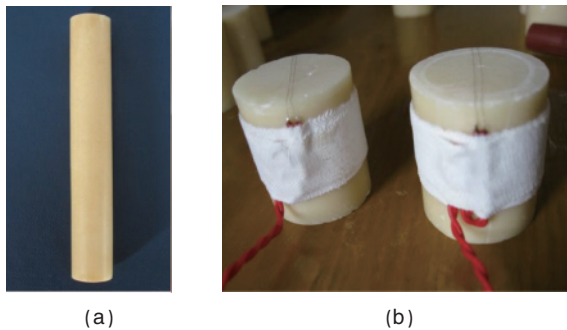


图 3 药柱试样 (a) 和爆速测试中双丝式电探极的安装 (b)
Fig. 3 Charge Sample (a) and installation of twin-string probe in a detonation velocity test (b)

表 3 爆速测试和枪击感度测试结果
Table 3 Results of detonation velocity and rifle shooting test

	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	爆速测试值 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	枪击测试反应 概率/%
试样	1.65	7750	0
梯黑 40/60 ^[8]	1.68	7888	20

实验试样相当于以 NQ 作为钝感剂对梯黑炸药进行降感。国内目前现有的梯黑炸药虽然能量较高,但安全性能不足,试样对枪击刺激无反应,说明相对于梯黑炸药,试样的安全性能明显提升,同时爆速仅相对梯黑炸药降低 138m/s,说明 NQ 的加入未造成过多的能量损失,因此试样相对于梯黑炸药在能量上仅略微降低,但安全性能明显提高,有效补充了梯黑炸药在安全性上的不足,获得了能量与感度更加均衡的配方,与本文提出的以最大熵为准则的炸药配方设计理论相符,验证了此方法的可行性。以此配方装填各种弹药战斗部可有效提高武器弹药的耐冲击、防殉爆能力,用于装填高初速炮弹可有效降低发生膛炸的概率,且毁伤能力仍较高。

5 结论

本文针对最大熵原理在炸药性能评价中的应用进行了研究,得到以下结论。

(1) 基于最大熵原理的炸药能量和感度的评价方法用于评价此两项性能的均衡性,可在混合炸药配方设计中发挥作用,获得能量和感度更加均衡的炸药配方,该方法经过理论分析和实验验证,证明可行。

(2) 选取 RDX/NQ/TNT-25.5/34.5/40 配方制备试样并进行性能测试,试样相对于国内现有的梯黑炸药能量仅略微降低,但安全性能大幅度提高。

参考文献 (References)

[1] Alouaamari M, Lefebvre M H, Perneel C, *et al.* Statistical assessment methods for the sensitivity of energetic materials [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33(1): 60–65.

[2] Licht H H. Performance and sensitivity of explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2000, 25(3): 126–132.

[3] 胡庆贤. 模糊数学在评价炸药性能中的应用 [J]. 含能材料, 1999, 7(2): 83–88.

Hu Qingxian. *Energetic Materials*, 1999, 7(2): 83–88.

[4] Hornann K, Sukumar N. Maximum entropy coordinates for arbitrary ploytopes[J]. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 2008, 27 (5): 1513–1520.

[5] Bruers S. A discussion on maximum entropy production and information theory [J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2007, 40 (27): 35–46.

[6] Samy A, Dinnebier R E, van Smaalen S, *et al.* Maximum entropy method and charge flipping, a powerful combination to visualize the true nature of structural disorder from in situ X-ray powder diffraction data [J]. *Acta Crystallographica*, 2010, 66(Pt2): 184–195.

[7] 钟一鹏, 胡雅达, 江宏志. 国外炸药性能手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.

Zhong Yipeng, Hu Yada, Jiang Hongzhi. Performance of overseas explosive's enchiridion[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1990.

[8] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.

Ou Yuxiang. Explosive[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.

[9] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

Huang Zhengping. Explosion and shock measuring technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[10] 国防科学技术工业委员会. GJB 772A—97 炸药试验方法 [S]. 北京: 兵器工业标准化研究所, 1997.

National Defense Science and Technology Industry Council. GJB 772A—97 Method of explosive testing [S]. Beijing: Institute of Weapon Industry Standardization, 1997.

(责任编辑 代丽)

第三届中国云计算大会

时间:2011.05.18—20
地点:北京

主办:中国电子学会

通信地址:北京海淀区玉渊潭南路普惠南里 13 号楼
电 话:010-68278214
电子信箱:luo_hong@ciccloud.org.cn