

文章编号: 1001-1455(2001)03-0210-05

# 粉状工业炸药配方设计的数学模型

陆明, 吕春绪

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 论述了含 C、H、O、N、Al 元素的工业炸药配方设计数学模型的建构方法, 研究了无梯硝铵炸药、铵梯油炸药和含铝铵梯油炸药配方设计及最优化的数学模型, 给出了上述几种粉状工业炸药配方设计及最优化的数学模型的计算结果。对用理论配方所制工业炸药的爆炸性能也进行了研究, 以证实数学模型的可靠性。

关键词: 工业炸药; 配方设计; 数学模型; 爆炸性能

\* 中图分类号: O643.2 文献标识码: A

## 1 引言

目前有关工业炸药的配方设计方法的主要特点有: 一是氧平衡是配方设计考虑的唯一原则; 二是多元混合炸药的设计, 配方设计过程是一个反复试验过程。工业炸药配方设计的现状, 与目前我国工业炸药技术的发展极不适应, 亟待从理论上加以解决, 即需要建构既有科学依据、又被实践证明为正确的理论模型, 进而解决配方设计方法问题。

唐健军等<sup>[1]</sup>研究了乳胶炸药体系配方设计的数学模型, 本文中我们针对粉状工业炸药组成的元素特征, 研究了含有 C、H、O、N、Al 元素的粉状工业炸药体系配方设计的数学模型, 并将该数学模型运用于几种粉状工业炸药的配方设计中<sup>[2]</sup>。

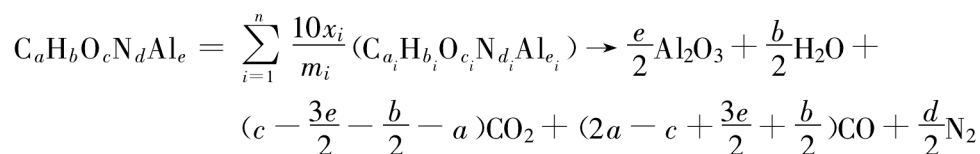
## 2 含 C、H、O、N、Al 元素的工业炸药配方设计数学模型的建构

### 2.1 目标函数

工业炸药配方设计应综合考虑炸药性能和成本。建立目标函数时, 既可以选择性能, 也可以选择成本, 这里针对炸药的性能建立目标函数。又因炸药的作功能力、爆压、爆温、爆速等均与爆热成正比, 因此, 选择爆热  $Q_v$  这一最基本示标量作为最优化目标。

选择  $n$  种含 C、H、O、N、Al 元素的物质构成集合, 这些物质为  $C_{a_i}H_{b_i}O_{c_i}N_{d_i}Al_{e_i}$ , 摩尔质量为  $m_i$ , 1kg 所设计的炸药中  $i$  物质的摩尔数为  $10x_i/m_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 。  $x_i$  为  $i$  组分的百分含量。

对于粉状硝铵炸药, 其爆速约为 4000m/s。爆轰时其反应区厚度较宽, 约为高能炸药的百倍, 这时铝粉有可能在爆轰反应区内参与化学反应而放热<sup>[3]</sup>。因此, 这里只考虑铝粉爆炸反应生成  $Al_2O_3$ 。在微弱负氧平衡和铝粉用量不大的情况下, 工业混合炸药的爆炸反应方程式为



$$\text{式中: } a = \sum_{i=1}^n \frac{10a_i}{m_i} x_i, b = \sum_{i=1}^n \frac{10b_i}{m_i} x_i, c = \sum_{i=1}^n \frac{10c_i}{m_i} x_i, d = \sum_{i=1}^n \frac{10d_i}{m_i} x_i, e = \sum_{i=1}^n \frac{10e_i}{m_i} x_i$$

\* 收稿日期: 2000-04-03; 修回日期: 2000-12-23  
作者简介: 陆明(1963—), 男, 博士, 副教授。

则有

$$Q_v = \Delta H_{H_2O} \cdot \frac{b}{2} + \Delta H_{N_2} \cdot \frac{d}{2} + \Delta H_{CO_2} \cdot (c - \frac{3e}{2} - \frac{b}{2} - a) + \Delta H_{CO} \cdot (2a - c + \frac{3e}{2} + \frac{d}{2}) + \Delta H_{Al_2O_3} \cdot \frac{e}{2} - \sum_{i=1}^n \frac{10x_i}{m_i} \cdot \Delta H_i$$

式中： $\Delta H_i$  为  $i$  种物质的定容生成焓。

### 2.2 约束条件

一般工业炸药配方设计数学模型的约束条件为氧平衡、变量和、原材料成本和变量上下界。

#### 2.2.1 氧平衡

设所选择的  $i$  种物质的氧平衡为  $\alpha_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 则氧平衡约束为

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i = 100 \eta$$

式中： $\eta$  为炸药整体氧平衡，一般取  $\eta \leq 0$ 。

#### 2.2.2 变量和

变量的取值应满足

$$\sum_{i=1}^n x_i = 100$$

#### 2.2.3 原材料成本

若  $i$  组分的价格为  $p_i$  (元 / kg), 则原材料成本约束为

$$\sum_{i=1}^n p_i x_i \leq p / 10$$

式中： $p$  为所设计炸药的吨原材料成本，在配方设计时设定。

#### 2.2.4 变量上下界

$$s_i \leq x_i \leq t_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中： $s_i, t_i$  是变量合理取值范围的上下限，通常由经验和实验确定。

## 3 含 C、H、O、N、Al 元素工业炸药配方设计及最优化的数学模型

含 C、H、O、N、Al 元素工业炸药的主要氧化剂为硝酸铵，可燃剂是木粉、石蜡、柴油，为提高炸药的起爆感度和爆炸性能，有时在工业炸药中加入梯恩梯 (TNT) 和铝粉，这些组分的分子式、摩尔质量、生成焓、氧平衡和原材料成本见表 1<sup>[4]</sup>。

表 1 粉状工业炸药原材料及其物化参数

Table 1 The raw material of powdery commercial explosive and their physical chemistry parameters

序号	组 份	分子式	摩尔质量 /g	生成焓 /(kJ/mol)	氧平衡 /(%)	原材料成本 /(元/kg)
1	硝酸铵	H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	80	353.46	+20	1.4
2	木 粉	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>10</sub>	362	1649.43	-137	0.4
3	柴 油	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>	224	660.44	-342	2.0
4	石 蜡	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254	558.03	-346	4.0
5	梯恩梯	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> O <sub>6</sub> N <sub>3</sub>	227	41.93	-74	7.25
6	铝 粉	Al	27	0	-89	20.0

设硝酸铵、木粉、柴油、石蜡、TNT、铝粉的百分含量分别为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ , 将表 1 中的有关数据代入含 C、H、O、N、Al 元素的工业混合炸药的配方设计数学模型，可得数学模型的具体表达式

目标函数  $\text{Max } Q_v = 51.084x_1 - 50.653x_2 - 180.317x_3 - 173.169x_4 + 15.759x_5 + 151.445x_6$

约束条件

$$\begin{cases} 20x_1 - 137x_2 - 342x_3 - 346x_4 - 74x_5 - 89x_6 = 100\eta \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 100 \\ 1.4x_1 + 0.4x_2 + 2.0x_3 + 4.0x_4 + 7.25x_5 + 20.0x_6 < p/10 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \text{ 和 } x_6 \text{ 的取值范围, 根据不同炸药品种和实践经验确定} \end{cases}$$

本数学模型的意义是: 在约束条件下, 求使  $Q_v$  达到最大值时的  $x_1, x_2, \dots, x_6$  的值。

#### 4 几种粉状工业炸药配方设计的数学模型和计算结果

##### 4.1 无梯硝铵炸药

无梯硝铵炸药由自敏化改性硝酸铵<sup>[5]</sup>、木粉、柴油和石蜡组成, 其配方设计的数学模型为

$$\text{目标函数 } \text{Max } Q_v = 51.084x_1 - 50.653x_2 - 180.317x_3 - 173.169x_4$$

约束条件

$$\begin{cases} 20x_1 - 137x_2 - 342x_3 - 346x_4 = 100\eta \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 100 \\ 1.4x_1 + 0.4x_2 + 2.0x_3 + 4.0x_4 < p/10 \\ 90.0 \leq x_1 \leq 95.0, 3.0 \leq x_2 \leq 5.0, 2.0 \leq x_3 \leq 3.0, 1.0 \leq x_4 \leq 2.0 \end{cases}$$

将上述数学模型进行规化求解, 得到不同条件下的无梯硝铵炸药的配方, 见表 2。

表 2 无梯硝铵炸药配方设计数学模型的计算结果

Table 2 The calculated result of mathematical model for prescription design of AN explosive without TNT

序号	条件	配方/(%)				原材料成本 /(元/t)	Max $Q_v$ /(kJ/kg)	氧平衡/(%)
		硝酸铵	木粉	柴油	石蜡			
1	$\eta \leq 0, p \leq 1450$	92.80	3.00	2.20	2.00	1435.20	3846.18	0
2	$\eta \leq 0, p \leq 1400$	91.74	4.85	2.00	1.41	1400.00	3836.86	0
3	$\eta \leq 0, p \leq 1350$	91.65	5.00	2.35	1.00	1390.20	3832.73	$4.56 \times 10^{-11}$ 1)

1)  $\eta \leq 0, p \leq 1350$  时, 数学模型无解, 此解为近似解。

##### 4.2 铵梯(油)炸药

粉状铵梯油炸药是我国工业炸药的主要品种, 年产量为 100 万吨, 由硝酸铵、木粉、柴油、石蜡和 TNT 组成, 配方设计的数学模型为

$$\text{目标函数 } \text{Max } Q_v = 51.084x_1 - 50.653x_2 - 180.317x_3 - 173.169x_4 + 15.759x_5$$

约束条件

$$\begin{cases} 20x_1 - 137x_2 - 342x_3 - 346x_4 - 74x_5 = 100\eta \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 100 \\ 1.4x_1 + 0.4x_2 + 2.0x_3 + 4.0x_4 + 7.25x_5 < p/10 \\ 85.0 \leq x_1 \leq 90.0, 2.0 \leq x_2 \leq 5.0, 1.0 \leq x_3 \leq 2.0, 0.5 \leq x_4 \leq 1.0, 3.0 \leq x_5 \leq 11.0 \end{cases}$$

上述数学模型在不同条件下的铵梯油炸药的理论配方, 见表 3。

表 3 铵梯油炸药配方设计数学模型的计算结果

Table 3 The calculated result of mathematical model for prescription design of AN-TNT-FO explosive

序号	硝酸铵	木粉+柴油+石蜡	TNT	原材料成本 <sup>1)</sup> /(元/t)	Max $Q_v$ /(kJ/kg)	氧平衡 /(%)
	/(%)	/(%)	/%			
1	85.0	4.5	10.5	2003.50	4090.5	0
2	87.2	6.0	6.8	1788.50	4001.9	$-5.68 \times 10^{-11}$
3	90.0	7.0	3.0	1573.50	3908.3	0

1) 表 3 中的原材料成本分别与 2 号岩石铵梯炸药、新 2 号岩石铵梯油炸药和 4 号铵梯油炸药的原材料成本相当。

### 4.3 含铝铵梯油炸药

含铝铵梯油炸药是一种高威力粉状工业炸药,用于特别坚硬场合的岩石爆破,由硝酸铵、木粉、石蜡、TNT 和铝粉组成,配方设计的数学模型为

$$\text{目标函数 } \text{Max } Q_v = 51.084x_1 - 50.653x_2 - 173.169x_4 + 15.759x_5 + 151.445x_6$$

约束条件

$$\begin{cases} 20x_1 - 137x_2 - 346x_4 - 74x_5 - 89x_6 = 100 \eta \\ x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 = 100 \\ 1.4x_1 + 0.4x_2 + 4.0x_4 + 7.25x_5 + 20.0x_6 < p/10 \\ 70.0 \leq x_1 \leq 85.0, 1.0 \leq x_2 \leq 2.0, 1.5 \leq x_4 \leq 2.0, 3.0 \leq x_5 \leq 11.0, 3.0 \leq x_6 \leq 8.0 \end{cases}$$

此数学模型在不同条件下的含铝铵梯油炸药配方,见表 4。

表 4 含铝铵梯油炸药配方设计数学模型的计算结果

**Table 4 The calculated result of mathematical model for prescription desing of AN-TNT-FO explosive containing aluminium powder**

序号	硝酸铵 /(%)	木粉 /(%)	石蜡 /(%)	TNT /(%)	Al /(%)	原材料成本 /(元/t)	Max $Q_v$ /(kJ/kg)	氧平衡 /(%)
1	85.00	2.00	1.50	7.51	3.99	2600	4703.17	-0.038
2	85.00	2.00	1.50	5.95	5.55	2800	4916.01	-0.273
3	85.00	2.00	1.50	4.38	7.12	3000	5128.86	-0.509
4	85.00	1.00	1.50	4.50	8.00	3180.25	5314.20	-0.010

## 5 数学模型的计算配方与现有生产的炸药配方的对比

为证实粉状工业炸药配方设计数学模型的优越性和可靠性,下面以铵梯油炸药为例,将数学模型计算配方的爆热与目前国内炸药生产厂家的实际配方的爆热,计算配方所制炸药和实际生产炸药的爆炸性能进行比较。

目前国内正在大量生产的几种粉状铵梯油炸药的配方和有关参数见表 5。

表 5 国内粉状铵梯油炸药配方和有关参数

**Table 5 The prescriptions of powder AN-TNT-FO explosives and some parameters**

炸药品种	硝酸铵 /(%)	木粉 /(%)	柴油 /(%)	石蜡 /(%)	TNT /(%)	原材料成本 /(元/t)	$Q_v$ /(kJ/kg)	氧平衡 /(%)
2 号岩石铵梯油炸药	85.0	4.0	0	0	11.0	2003.50	3718.1	+3.38
新 2 号岩石铵梯油炸药	87.5	4.0	1.0	0.5	7.0	1788.50	3818.5	+1.68
4 号岩石铵梯油炸药	91.3	4.0	1.7	1+0.3 <sup>1)</sup>	2.0	1573.50	3780.5	+0.96

1)为外加添加剂。

将表 3 和表 5 进行比较可知,目前国内正在生产的几种铵梯油炸药的理论爆热普遍较小。如 2 号岩石铵梯炸药的理論爆热为 3718.1kJ/kg,而原材料成本相当的表 3 中的配方 1 的理論爆热达到 4090.5kJ/kg;新 2 号岩石铵梯油炸药的理論爆热为 3815.5kJ/kg,而原材料成本的表 3 中配方 2 的理論爆热为 4001.9kJ/kg;分析产生爆热差异的原因,主要是配方设计问题,从表 5 中炸药的氧平衡可知,国内目前生产的几种铵梯油炸药在配方设计时,忽视了炸药配方设计的最大放热原理——零氧平衡原理。而采用最优化配方设计方法,在相同的原材料成本下,炸药的理論爆热分别提高了 10.0%和 4.9%,显然将显著改变炸药的爆炸性能和使用效果。

用计算配方生产的炸药的爆炸性能和目前正在生产的炸药的爆炸性能,见表 6。从表 6 中可知,用计算配方生产的炸药的爆炸性能有明显的提高。

表 6 理论配方和实际配方的爆炸性能

Table 6 The explosion properties of theoretical and practical prescriptions

炸药品种	爆速/(m/s)	猛度/mm	殉爆距离/cm	作功能力/ml
2 号岩石铵梯炸药	3200 ~ 3400	13.00 ~ 14.00	8 ~ 10	320 ~ 340
表 3 中配方 1 炸药	3300 ~ 3550	13.50 ~ 14.60	8 ~ 11	330 ~ 355
新 2 号岩石铵梯油炸药	3200 ~ 3300	12.50 ~ 13.50	6 ~ 8	310 ~ 330
表 3 中配方 2 炸药	3250 ~ 3400	13.00 ~ 14.80	7 ~ 9	325 ~ 345

## 6 结 论

(1) 通过建立含 C、H、O、N、Al 元素工业炸药配方设计及最优化数学模型,得到了无梯硝铵炸药、铵梯油炸药和含铝铵梯油炸药的配方设计数学模型的具体表达式。

(2) 将数学模型用计算机进行规化求解,得到了不同条件下的几种粉状工业炸药的理論配方和配方的最大理論爆热。

(3) 以粉状铵梯油炸药为例,通过理論配方与原材料成本相同的現有生产配方的理論爆热和实测爆炸性能的对比,论证了文中配方设计及最优化数学模型的优越性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] 唐健军,白文娟.多元混合炸药的配方设计问题[J].爆破器材,1992,21(5):1—5.
- [2] 陆明.膨化硝铵炸药研究[D].南京:南京理工大学,1999.
- [3] 孙业斌,惠君明.军用混合炸药[M].北京:兵器工业出版社,1995.364—494.
- [4] 云主惠.浆状炸药的热化学计算[J].爆破器材,1980,9(2):1—6.
- [5] LU Chun-xu. Research on Expansion Technology of Ammonium Nitrate[A]. Proceedings of the 26th IPS[C]. Akron university, 1999. 344—352.

## The Mathematical Model for the Prescription Design of Powdery Commercial Explosives

LU Ming, LÜ Chun-xu

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** In this paper, a mathematical model for prescription design for powdery commercial explosives which contain chemical elements such as C, H, O, N, Al is studied. The mathematical model for prescription design and optimization of ammonium nitrate explosive without TNT, ammonium nitrate explosive containing TNT and fuel oil, ammonium nitrate explosive containing aluminum powder and TNT is researched. The calculated results of the mathematical model for prescription design of mentioned-above explosives are given. The explosion properties of explosives which are made with theoretical calculated prescription are also presented, which confirm the reliability of the mathematical model.

**Key words:** commercial explosive; prescription design; mathematical model; explosion property