

doi: 10.7690/bgzd.2013.08.014

## 基于燃烧产物的硝胺类发射药的燃速预估模型

周媛丽, 张江波, 张玉成, 李强, 刘毅  
(西安近代化学研究所第六研究部, 西安 710065)

**摘要:** 针对探讨硝胺类发射药的燃速预估模型, 在分析硝胺炸药在燃烧分解产物热分解规律的基础上, 运用近年来提出的火药燃速预估方法, 推导硝胺发射药的燃速公式及压力指数公式。编写硝胺发射药燃速计算软件。在 0~400 MPa 压力范围内, 对硝胺类发射药的燃速进行理论预估, 并对 3 种硝胺发射药的燃烧计算值与相应的试验数据进行比较。分析结果表明, 本模型是可行的, 适合硝胺发射药的燃速预估。

**关键词:** 硝胺; 燃烧性能; 燃烧模型; 数值模拟; 硝胺发射药

**中图分类号:** TJ450.3 **文献标志码:** A

Nitramine Propellant Burning Rate Predication Model  
Based on Combustion ProductZhou Yuanli, Zhang Jiangbo, Zhang Yucheng, Li Qiang, Liu Yi  
(No. 6 Research Department, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** For analyzing nitramine propellant burning rate predication model, on the basis of analysis of thermal decomposition rule of nitramine explosives combustion decomposition products, use propellant burning rate which was proposed in recent years to derive burning rate formula and the pressure index formula of propellant. Compile burning rate calculation software. Predicate nitramine propellant burning rate in the pressure range of 0~400 MPa, then compare 3 nitramine propellant burning calculation rate with corresponding test data. The analysis result shows that the model is effective which can be used in nitramine propellant burning rate predication.

**Key words:** nitramine; combustion performance; combustion model; numerical simulation; nitramine propellant

## 0 引言

硝胺发射药由于能量高、比容大、爆温适中和化学安定性好, 受到人们的高度重视。其燃烧产物  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $N_2$ 、 $CO$  占到产物含量的 99%, 硝胺发射药通过燃烧化学反应生成气体产物和将化学潜能转变热能做功。已知燃烧产物的组成, 可以判断发射药的燃烧完全程度<sup>[1]</sup>, 对了解硝胺发射药的燃速有着非常重要的意义。

笔者从燃烧产物来分析硝胺发射药的燃速, 分析了硝胺炸药的燃烧特征, 依据近年来提出的火药燃速预估理论<sup>[2-6]</sup>, 推导硝胺发射药的燃速和压力指数公式, 通过对发射药的燃烧性能进行数值模拟。

## 1 多基发射药燃烧模型的主要内容

1) 发射药燃烧表面附近的气相分解物可分为  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $N_2$ 、 $CO$  等 5 大类。分别代表氧化剂、还原剂、可裂解自由基, 后 2 类为中性自由基。其燃烧产物的千克分子式分别表示为 a、b、c、d、e, 其数值可根据发射药各组分的化学结构和热分解

规律计算得知。

2) 硝胺 (RDX, HMX) 发射药热分解产物中的  $H_2O$  的氧化性随着压力的变化而变化, 其变化规律用  $\xi(p)$  函数表示:

$$\xi(p) = 1 - \exp\left(-\frac{p}{p^*}\right) \quad (1)$$

其中:  $p^*=9.81$  MPa;  $p$  为燃烧室压力, MPa;  $p^*$  为  $H_2O$  氧化活性变化的特征压力, MPa。

3) 将发射药燃烧产物中氧化性气体的摩尔分数记为  $Q_0(p)$ 。若令  $\alpha_N$  表示硝胺发射药中的摩尔数, 并令  $\alpha=e/a$ ,  $\beta=d/a$ ,  $q=c/a$ ,  $\gamma=b/a$ ,  $\alpha_N=c/a$ ; 则有

$$Q_0(p) = \frac{1 + \alpha_N \cdot \xi(p)}{\alpha + \beta + q\eta(p) + \gamma + 1} \quad (2)$$

$\eta(p)$  为可裂解自由基的自然裂解程度随压力变化规律的函数表达式:

$$\eta(p) = 2 - \exp\left[0.6931\left(1 - \frac{p}{p^*}\right)\right] \quad (3)$$

4) 多基发射药的燃速是燃烧室压力和发射药化学组成的函数, 在 20 °C 条件下, 燃速公式为:

收稿日期: 2013-03-12; 修回日期: 2013-04-17

作者简介: 周媛丽(1986—), 女, 陕西人, 硕士, 助理工程师, 从事发射药技术研究。

$$\mu(p) = 1.709 p Q_0^2 (P) h_H / \rho_p \quad (4)$$

其中：
$$h_H = 1 + 11.73(\rho_p / \rho_H)^{1/3} (\alpha_H) dH \quad (5)$$

式中： $\rho_p$ 、 $\rho_H$  分别为发射药和硝胺的密度， $g/cm^3$ ； $dH$  为硝胺粒度； $\alpha_H$  为发射药中硝胺含量。

将  $h_H$  代入即可求出  $u=ap^n$ 。

5) 将  $u=ap^n$  两边取对数，得到燃速和压力间的函数关系：

$$\lg u = \lg a + n \lg p \quad (6)$$

令  $x=\lg u$ ,  $r=\lg a$ ,  $y=\lg p$

则式 (6) 变为  $x=r+ny$ , 求解得：

$$r = x_1 - \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} y_1, \quad n = \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2}$$

故求得  $a=e^r$ ,  $n = \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2}$ , 其中  $r = x_1 - \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} y_1$ 。


## 2 硝胺发射药燃速计算软件

硝胺发射药燃速计算软件基于近年提出的火药燃速预估方法的基本理论，加入了发射药燃烧产物数据库，数学模型方面，在 400 MPa 范围内，采用了循环逼近求解的基于真实试验数据的方法，计算精度较高。可以实现以下功能：

- 1) 可以读取和保存硝胺发射药材料参数文件 (.txt 格式文件)；
- 2) 可以读取和保存计算参数文件 (.txt 格式文件)；
- 3) 能够实现燃烧产物的自动录入；
- 4) 增加对发射药燃烧产物组份数据库的支持；
- 5) 可以直接给出燃速系数和压力指数的数值；
- 6) 能够对硝胺发射药的  $u-p$  曲线进行绘图；

7) 文件名自动命名功能；

8) 计算结果直接查看和保存。

双击  运行硝胺发射药燃速计算软件，会出现如图 1 所示界面。

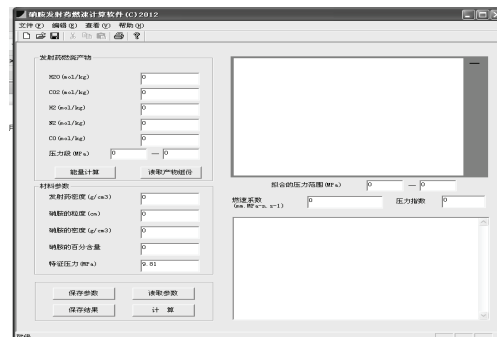


图 1 硝胺发射药燃速计算软件运行界面

以上界面的发射药燃烧产物组份可以通过计算进而读取产物组份。点击发射药燃烧产物文本框下方的 **能量计算** 按钮，会出现如图 2 所示界面。



图 2 能量计算界面

然后点击此界面左上方  的发射药配方计算，会出现如图 3 所示界面。



图 3 发射药配方计算界面

在此进行配方的选取和燃烧性能的模拟计算。然后点击 **保存计算结果** 保存计算结果，在开始的主界

面中点击 **读取产物组份** 就可以读取选取发射药配方的产物组份。

如图 4 所示，在程序主界面中输入计算参数，然后点击 **计算** 按钮，则得出发射药的  $u-p$  曲

线，直接给出发射药的燃速系数，压力指数以及得到计算结果。该例的计算结果如图 5 所示界面。

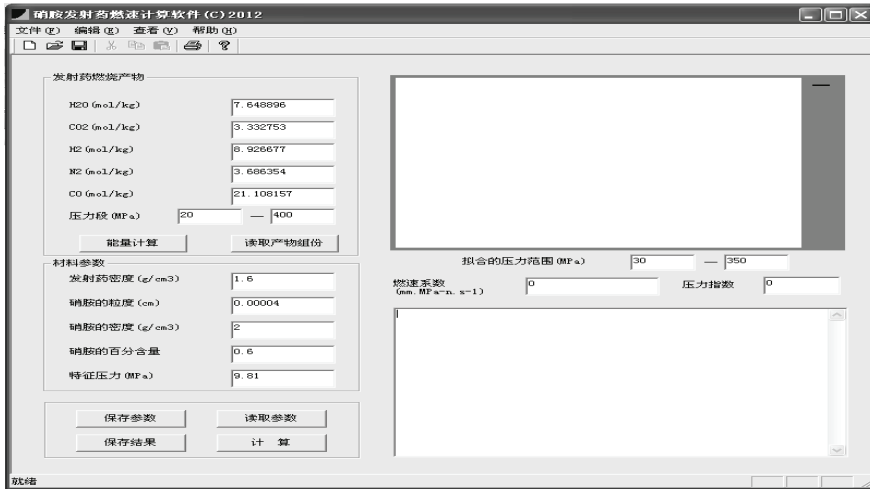


图 4 计算参数界面

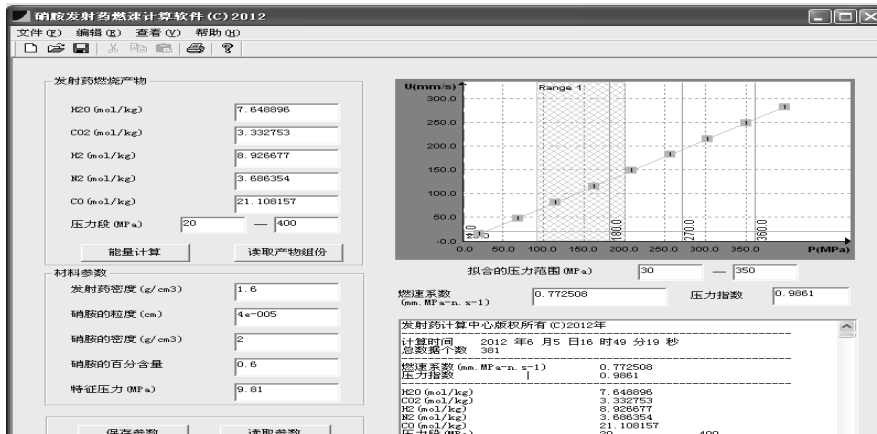


图 5 计算结果界面

### 3 模型的试验验证

用于计算的硝酸发射药组成如表 1。

表 1 样品配方组成

序列号	NC/%	NG/%	RDX/%	NGu/%	其他/%	RDX/NGu
RZ-1	30.0	25.2	26.6	15.4	2.8	1.73
RZ-2	36.0	27.2	17.0	17.0	2.8	1.00
RZ-3	35.0	30.2	12.0	20.0	2.8	0.60

3 种发射药的燃速-压力曲线经过拟合后，RZ-1、RA-2、RA-3 的  $u-p$  曲线实测值和计算值见图 6~图 8。

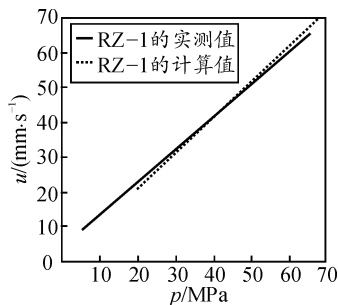


图 6 RZ-1 发射药的  $u-p$  曲线

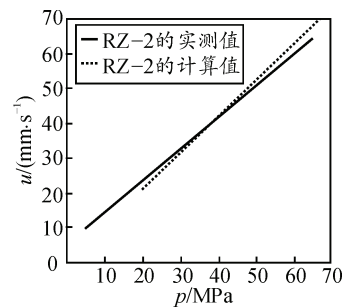


图 7 RZ-2 发射药的  $u-p$  曲线

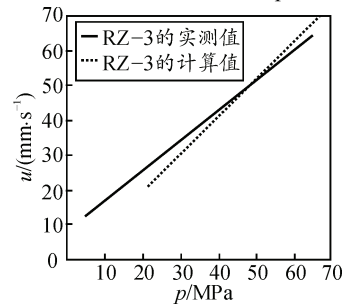


图 8 RZ-3 发射药的  $u-p$  曲线

从计算结果和试验数据比较结果来看，它们有

相同的变化规律，其平均相对偏差小于 10%。可见，笔者提出的硝胺发射药燃速预估模型及其计算软件是可行的。

### 4 结论

笔者通过分析硝胺炸药在燃烧分解产物热分解规律的基础上，提出了火药燃速预估方法，推导了硝胺发射药的燃速公式及压力指数公式，编写了硝胺发射药燃速计算软件。笔者对 3 种硝胺发射药的燃烧性能进行了数值模拟，计算结果与实测结果相符，证明该模型适合硝胺发射药的燃速预估。

\*\*\*\*\*

(上接第 45 页)

步骤 1：决策者根据自己的知识、经验以及统

### 参考文献：

[1] 刘继华. 火药物理化学性能[M]. 北京：北京理工大学出版社, 1997: 34.

[2] 宋洪昌. 火药燃烧模型和燃速预估方法的研究[D]. 南京：南京华东工学院, 1986.

[3] 杨栋, 赵宝昌, 宋洪昌. 硝胺(RDX, HMX)发射药燃烧性能的模拟[J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(5).

[4] 何秀英, 赵保昌. 硝胺发射药热分解中间产物对燃烧的影响[J]. 华东工学院学报, 1992(1).

[5] 杨栋, 赵宝昌, 付洪波, 等. 多基发射药燃烧性能的调整与优化[J]. 兵工学报：火化工分册, 1997(1).

[6] 杨栋, 赵宝昌, 宋洪昌, 等. 硝基胍发射药燃烧性能的模拟[J]. 含能材料, 1998, 9(1).

计数据的等确定每个爆破方案指标体系的直觉模糊集的评价矩阵如表 1 所示。

表 1 各设计方案的多属性指标决策

备选方案	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
M <sub>1</sub>	(0.2,0.3,0.5)	(0.1,0.4,0.5)	(0.3,0.5,0.2)	(0.6,0.1,0.3)	(0.3,0.2,0.5)	(0.2,0.2,0.6)	(0.1,0.5,0.4)	(0.5,0.3,0.2)
M <sub>2</sub>	(0.3,0.1,0.6)	(0.2,0.2,0.6)	(0.1,0.4,0.5)	(0.6,0.3,0.1)	(0.8,0.1,0.1)	(0.7,0.2,0.1)	(0.5,0.2,0.3)	(0.4,0.4,0.2)
M <sub>3</sub>	(0.6,0.2,0.2)	(0.3,0.4,0.3)	(0.2,0.4,0.4)	(0.6,0.1,0.3)	(0.2,0.1,0.7)	(0.2,0.7,0.1)	(0.1,0.4,0.5)	(0.5,0.2,0.3)
M <sub>4</sub>	(0.7,0.1,0.2)	(0.4,0.5,0.1)	(0.2,0.4,0.4)	(0.3,0.4,0.3)	(0.3,0.3,0.4)	(0.5,0.2,0.3)	(0.4,0.1,0.5)	(0.8,0.1,0.1)
M <sub>5</sub>	(0.1,0.2,0.7)	(0.2,0.5,0.3)	(0.4,0.2,0.4)	(0.6,0.2,0.2)	(0.7,0.1,0.2)	(0.4,0.1,0.5)	(0.6,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.2)

步骤 2：根据直觉模糊集解的定义，构造直觉

模糊理想方案的最优解 M<sup>+</sup>和最劣解 M<sup>-</sup>，如表 2。

表 2 直觉模糊最优解和最劣解

备选方案	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
M <sup>+</sup>	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)	(1,0,0)
M <sup>-</sup>	(0,1,0)	(0,1,0)	(0,1,0)	(0,1,0)	(0,1,0)	(0,1,0)	(0,1,0)	(0,1,0)

步骤 3：计算各设计方案与直觉模糊最优解和最劣解的距离 D<sub>i</sub>(M<sub>i</sub>, M<sup>+</sup>)和 D<sub>i</sub>(M<sub>i</sub>, M<sup>-</sup>)，以及各爆破方案的综合评价指数 C(M<sub>i</sub>)，计算结果如表 3。

表 3 各设计方案到理想解的距离及其综合评价指数

备选方案	D <sub>i</sub> (M <sub>i</sub> , M <sup>+</sup> )	D <sub>i</sub> (M <sub>i</sub> , M <sup>-</sup> )	C(M <sub>i</sub> )
M <sub>1</sub>	0.232 97	0.219 81	0.485 47
M <sub>2</sub>	0.179 41	0.255 32	0.587 31
M <sub>3</sub>	0.260 35	0.231 30	0.470 46
M <sub>4</sub>	0.183 71	0.238 75	0.565 14
M <sub>5</sub>	0.199 84	0.287 28	0.589 75

步骤 4：根据爆破评估方案的综合评价指数的大小可得预案的优劣次序为：M<sub>5</sub>>M<sub>2</sub>>M<sub>4</sub>>M<sub>1</sub>>M<sub>3</sub>。

结果表明：在考虑作战意图、力避敌人破坏、满足技术要求以及降低工程投入等客观条件的情况下，爆破方案 M<sub>5</sub> 效果做好，符合实际情况，证明了模型的可行性与有效性。

### 5 结论

笔者通过引入直觉模糊最优解和最劣解的概

念，把传统的 TOPSIS 方法应用于直觉模糊<sup>[6]</sup>，给出了基于直觉模糊集和 TOPSIS 法的军用道路选线评估方案评估方法，并通过实例运算证明了评估模型具有较强的可用性和有效性。

### 参考文献：

[1] 总后勤部. 军用道路工程技术标准[M]. 北京：解放军出版社, 1999.

[2] 张志清. 道路勘测设计[M]. 北京：科学出版社, 2005.

[3] 徐泽水. 直觉模糊信息集成理论及应用[M]. 北京：科学出版社, 2007.

[4] 苏杭, 等. 基于 TOPSIS 的模糊数直觉模糊多属性决策法[J]. 渤海大学学报, 2012, 1(4): 51-54.

[5] 王天虹, 宋业新, 戴明强. 基于修正熵权 TOPSIS 的应急军事物流效益评估[J]. 兵工自动化, 2012, 31(8): 31-33.

[6] 赵纪华, 吴勇, 唐丙文, 等. 基于模糊层次分析法的装备性能评估[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(11): 53.