

含能材料能量评价准则的讨论

吴雄

(西安近代化学研究所)

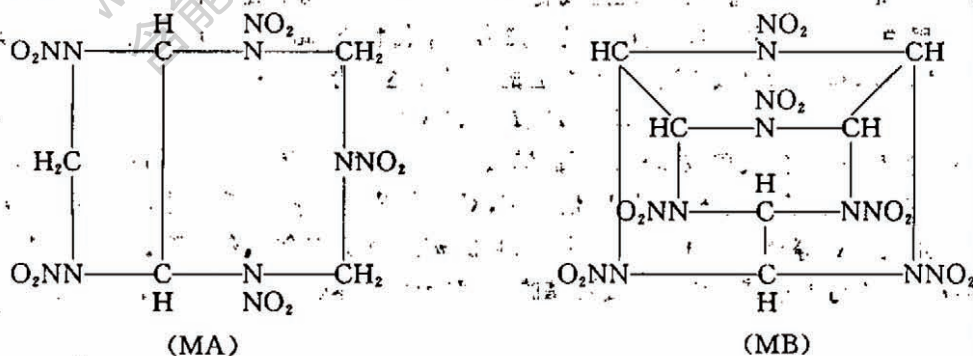
摘要 应用理论与实例相结合的论证途径,阐述了含能材料作为炸药、推进剂与发射药的能特性全面评价的准则分别是:体积比动能 $\rho_0 u^2/2$ 、体积比冲量 $\rho_0 I$ 与体积比火药力 $\rho_0 f_v$ 。

关键词 含能材料 炸药 火药

引言

火药与炸药均系含能材料,在化学结构上,二者并无本质区别,只是在化学反应过程中,其能量若以燃烧形式释放时为火药,以爆轰形式释放时则为炸药。高能化合物的进展,对火炸药甚至所有战略与战术武器的能量体系都会带来重大影响。未来火炸药能否取得重大突破,关键在于高能量密度化合物的合成上能否取得重大进展。

高能化合物是火炸药的关键技术,也是所有战略与战术武器能量体系的核心所在。高能目标化合物的正确选择,有赖于正确的计算预报。当前的发展趋势是:燃烧与爆轰并举,火药与炸药性能联合计算,全面预估;以便在最短的时间内,以最小的代价,获得最佳的成果。如何正确认识习惯了的三高(即:对炸药,高爆速;对推进剂,高比冲;对枪炮发射药,高火药力),如何正确评价高能量密度材料的性能,对于高能量密度材料的合成方向,甚为重要。为抛砖引玉起见,现以高能化合物 2,4,6,8,10-五硝基-2,4,6,8,10-五氮杂双环-[5,3,0]癸烷(记为 MA)和双层 RDX(记为 MB)为例讨论如下:



1 炸药爆轰性能评价

1.1 理论基础

质量守恒

$$\rho_0 D = \rho (D - u) \quad (1)$$

动量守恒

$$(p - p_0) = \rho_0 D u \quad (2)$$

能量守恒

$$p u = \frac{1}{2} \rho_0 D u^2 + D \rho_0 (E - E_0) \quad (3)$$

联立(1)、(2)和(3)式,有:

$$E - E_0 = \frac{1}{2} (p + p_0) (V_0 - V) \quad (4)$$

(4)式称为 Hugoniot 能量方程式,推导过程中,未作任何限制,因此它在爆轰中是普遍实用的。

由于: $p \gg p_0$,

故有

$$E - E_0 = \frac{1}{2} p (V_0 - V) \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{D}{k+1} \right)^2 \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2} u^2 \quad (7)$$

式中: E 为爆轰产物的比内能, E_0 为原始炸药的比内能, p_0 为初始压力, V 为 C-J 体积, V_0 为初始体积, ρ 为 C-J 密度, ρ_0 为初始密度, k 为绝热指数, D 为爆速。

注意到,无论爆轰产物是否已经达成化学平衡,上面三个守恒定律都是适用的。但是在实际应用中,往往需要假定爆轰产物处于热力学平衡状态。此时爆轰产物的比内能应是温度 T , 体积 V , 和平衡组成 ΣX_i 的函数,它的一般表达式为:

$$E = E(T, V, \Sigma X_i) \quad (8)$$

不难看出: $u^2/2$ 代表单位质量炸药的爆轰产物的动能,它不仅描述了内能增量 $E - E_0$,而且还综合反映了爆压 p , 爆速 D , 爆温 T , C-J 体积 V , 产物粒子速度 u , 绝热指数 k , 以及产物组成 ΣX_i 等全部 C-J 参数。因此采用的 $u^2/2$ 作为综合评价炸药爆轰性能,比采用的 p, D, T, V 与 k 中某一个参数要可靠的多。对于单位体积炸药爆轰产物性能而言,则为 $\rho_0 u^2/2$ [1,2]。

定义: $\omega = \rho_0 u^2/2$ 为体积比动能,即炸药的能量密度,它全面表达了炸药的能量特性。

1.2 实例

表1 单质炸药 MA, MB 与 HMX 爆轰性能参数的 VLW 计算值

Table 1 Detonation parameters of VLW results of single explosive MA, MB and HMX

参数	MA	MB	HMX
ρ_0 (g/cm ³)	2.0	2.0	1.90
D (km/s)	9.525	9.543	9.107(实测 9.100)
p (GPa)	45.8	46.7	39.6(实测 39.3)
T (K)	5067	5352	4840
$\frac{1}{2} u^2$ (kJ/g)	2.887	2.999	2.64
ω (kJ/cm ³)	5.774	5.999	5.0

表2 混合炸药 159-MA, 159-MB 与 159-HMX 爆轰性能参数的 VLW 计算值之比较

Table 2 Comparison of the detonation parameters of VLW results of composite explosive 159-MA and 159-MB with those of 159-HMX

参数	159-MA	159-MB	159-HMX
ρ_0 (g/cm ³)	1.935	1.935	1.862
D (km/s)	9.128	9.138	8.850
p (GPa)	42.2	43.4	36.1
T (K)	4976	5245	4738
$\frac{1}{2} u^2$ (kJ/g)	2.85	2.95	2.395
ω (kJ/cm ³)	5.51	5.71	4.459

注: 159-HMX 为 HMX 95/其它 5, 159-MA 为 MA 95/其它 5,

159-MB 为 MB 95/其它 5。

1.3 小结

由表 1 得出: MA 的能量密度比 HMX 高 15.5%; MB 的能量密度比 HMX 高 20%。

由表 2 得出: 159-MA 的能量密度比 159-HMX 高 23.5%; 159-MB 的能量密度比 159-HMX 高 28%。也就是说, 84kg 的 159-MA 的爆轰能量, 或 81.2kg 的 159-MB 相当于 100kg 的 159-HMX 的爆轰能量。显然, 这对于推进核武器的小型化; 对于提高诸军兵种武器的杀伤与破坏能力与加速弹药的现代化是有贡献的。

2 推进剂能量的综合评价

2.1 理论基础

由推进剂原理可知：对于火箭的最大射程 X_{\max} 有：

$$X_{\max} = 2S_0 + K(I_s g \ln(1 + W_p/W_k))^2 \quad (9)$$

式中： I_s 为比冲量， S_0 为主动段射程， W_p 为推进剂的重量， W_k 为未装火药的火箭推进剂重量， K 为常数。

由(9)式可知，增大射程 X_{\max} 的途径有两种：

第一、增大推进剂的比冲量 I_s ；

第二、增大 W_p/W_k 之值，而这要靠增大推进剂的密度 ρ_0 获得。

然而上述二者可以通过单位体积推进剂的冲量，即 ρ_0 与 I_s 之乘积统一表征。

定义： $I = I_s \rho_0$ 为体积比冲量，即推进剂的能量密度，它全面表达了推进剂的能量特性。

2.2 实例

表 3 推进剂 MA, TNA 与 HMX 的性能参数的 VLW

计算值(平衡流, 燃烧室压力为 7MPa 的条件下)

Table 3 Combustion parameters of VLW results of rocket propellant MA, TNA and HMX (conditions: equilibrium flow and the combustion chamber pressure 7MPa)

参数	MA	TNA	HMX
ρ_0 (g/cm ³)	2.05	1.82	1.90
T_c (K)	3568.8	3706	3413.8
T_e (K)	1699	1935	1540
I_s (N·s/g)	2.684	2.745	2.660
I (N·s/cm ³)	5.502	4.996	5.054

注: 1) TNA 为 1,3,3-三硝基-1-氮杂-环丁烷。

2) I_s 为理论比冲量, I 为体积比冲量, T_c 为燃烧室温度, T_e 为出口温度。

2.3 小结

由表 3 得出: 虽然 MA 的比冲量 I_s 比 TNA 低, 但它的能量密度仍比 TNA 高。

3 枪炮发射药能量的综合评价

3.1 理论基础

由发射药原理可知: 火炮的射程与弹丸的穿透力取决于弹丸在出炮口时所具有的动力能 $\beta mv^2/2$, 即:

$$\frac{1}{2} \beta mv^2 = \frac{1}{\gamma - 1} W_p f_v \eta \quad (10)$$

式中: v 为弹丸初速, m 为弹丸质量, β 为次要功系数, f_v 为火药力, γ 为绝热指数, W_p 为装药量, η 为能量利用系数。

由(10)式可知,提高弹丸出口动能的途径有三:

第一、提高火药力 f_v ;

第二、提高装药量 W_p , 而 W_p 取决于发射药的密度 ρ_0 ;

第三、提高为能量利用系数 η , 而 η 只与火炮的结构有关。因此上述三个方面,对发射药而言,可以通过单位体积枪炮发射药的火药力,即 ρ_0 与 f_v 之乘积统一表征。

定义: $F_v = \rho_0 f_v$ 为体积比火药力,即枪炮发射药的能量密度。它全面表达了枪炮发射药的能量特征。

3.2 实例

表4 双基发射药-RDX,与双基发射药-MA

性能参数的VLW计算值之比较

Table 4 Comparison of the combustion parameters of VLW result
Double base-RDX with those of Double base-HMX

参 数	双基发射药-MA	双基发射药-RDX
$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	1.694	1.636
$T_v / (\text{K})$	3541	3465
$p_v / (\text{MPa})$	313.6	313.1
$f_v / (\text{J}/\text{g})$	1223.7	1220(实验值 1222)
$F_v / (\text{J}/\text{cm}^3)$	2073	1995
$W_p / (\text{kg})$	8.69	8.40

注: f_v 为火药力, F_v 为体积比火药力, W_p 为装药量, T_v 为火焰温度, p_v 为定容压力。

3.3 小 结

由表4得出:虽然双基发射药-MA与双基发射药-RDX的火药力 f_v 大致相同,但双基发射药-MA的体积比火药力 F_v 比双基发射药-RDX增加4%,从而明显增大了火炮的威力。换言之,同体积下,双基发射药-MA的装药量比双基发射药-RDX多装0.29 kg,按100 mm滑膛炮,每增加0.1 kg发射药,射程增加20 m的规则估算,如采用双基-MA发射药,则射程增加58 m,这与文献报导CL-20发射药使射程增加50 m的数据相符^[3]。

4 建 议

能量密度对炸药而言为体积比动能 $\rho_0 u^2 / 2$, 对火箭推进剂为体积比冲量 $\rho_0 I_s$, 对枪炮发射药为体积比火药力 $\rho_0 f_v$ 。建议用它们分别作为全面评价炸药爆轰性能、火箭推进剂与枪炮发射药的能量特性的准则。

参 考 文 献

1. Wu Xiong. Proceeding of the International Symposium on Pyrotechnics and Explosives. 1987. 707~712
2. UCRL-21042 DE88 009067. 1988.
3. 中国国防科技信息中心编. 90-017-01-09 专题: 美国国防部关键技术. 1990.

A STUDY ON THE ENERGY CRITERIA OF ENERGETIC MATERIALS

Wu Xiong

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute)

ABSTRACT The energy criteria of energetic materials, such as explosives, rocket and gun propellants are volume specific kinetic energy ω , volume specific impulse I , and volume specific impetus F_v respectively. Those are discussed by means of the way combining theory with practice.

KEY WORDS energetic materials, explosives, propellants.