

文章编号: 1006-9941(2007)03-0240-04

发射药能量与做功能力之间的关系

黄振亚, 力小安

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了更加准确和客观地评价发射药的能量参数, 采用内能法计算了不同组分发射药配方的热力学参数, 研究了发射药燃烧气体在身管武器中的膨胀做功能力与热力学参数的相互关系。结果表明, 发射药燃气产物的热力学性质对其膨胀做功具有较大的影响, 传统的火药力或潜能能量参数与做功能力之间的关系并非完全一致。发射药在气体膨胀比大的武器上应用时, 做功能力与潜能较为一致; 在气体膨胀比小的武器上应用时, 做功能力与火药力较为一致。

关键词: 材料学; 发射药; 能量; 做功能力; 热力学性质

中图分类号: TQ562

文献标识码: A

1 引言

能量是发射药的关键性指标, 直接影响到身管武器的发射威力。由于提高能量与烧蚀性等综合性能之间存在矛盾, 进一步大幅度提高发射药的能量目前还有较大的困难。近十年来国外在相关的基础理论方面开展了大量研究, 并取得了不少研究成果, 对新型高能发射药的发展具有重要的理论指导意义^[1-4]。

能量指标是发射药配方设计的重要依据, 长期以来一直采用火药力作为发射药能量评价的主要指标。针对火药力指标的局限性, 国内也有学者提出了采用潜能或内能作为新的能量评价指标, 并分析了燃气产物的绝热指数 k 值对武器弹道性能的影响^[5,6], 对发射药的能量指标也有了新的认识。

本文以内能法为基础, 采用 VB 计算程序, 对不同组分发射药配方的热力学参数进行了大量的计算, 研究了发射药燃气产物的热力学参数与其在身管武器中膨胀做功的关系, 对发射药的能量评价指标进行了讨论和分析, 提出了以做功能力评价发射药能量的方法。

2 发射药在身管武器中做功过程及其影响因素

在身管武器发射过程中, 发射药燃烧将化学能转化为燃气的内能, 高温高压的燃气膨胀做功, 将内能转化为以弹丸动能为标志的机械能, 获得弹丸初速是发射药做功的根本目的。根据内弹道理论, 上述过程中弹丸获得的初速表达式为:

$$v_g = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \omega}{\varphi \cdot m}\right) \cdot \gamma_g' \cdot \frac{f_v}{k-1}} \quad (1)$$

式中, v_g 和 m 分别为弹丸初速和弹丸质量; ω 、 f_v 和 k 分别为发射药装药量、火药力和燃气的比热比; φ 为次要功系数; γ_g' 为内弹道效率。

通常发射药在火炮膛内燃完, 燃气绝热膨胀做功的内弹道效率表达式为:

$$\gamma_g' = 1 - \frac{T_g}{T_v} = 1 - \left(\frac{V_0}{V_0 + V_g}\right)^{k-1} = 1 - \left(\frac{l_0}{l_0 + l_g}\right)^{k-1} = 1 - L_r^{k-1} \quad (2)$$

式中, T_g 、 T_v 分别为发射药的爆温和弹丸出炮口时的燃气温度; V_0 、 V_g 为药室容积和炮膛工作容积; l_0 、 l_g 为药室容积缩径长和弹丸全行程长; $L_r = l_0 / (l_0 + l_g)$ 是反映火炮身管结构特征的参数, 物理意义为膛内发射药气体膨胀比的倒数, 即 L_r 值愈小, 气体膨胀比愈大。

公式(1)和(2)表明, 弹丸初速除了与发射药的火药力或潜能($f_v / (k-1)$)有关以外, 还与发射药燃气的膨胀做功过程有关, 燃气的比热比对膨胀做功过程有直接影响, 并且其影响程度与武器的结构参数有关。

3 发射药热力学性质与做功能力的关系

3.1 火药力和潜能对弹丸初速的影响关系

火药力和潜能是发射药能量的标志, 随着发射药配方组分和配方体系的变化, 燃气产物的热力学性质与传统的单基药和双基药已发生了较大的变化, 尤其是燃气比热比对膨胀做功过程的影响已明显加大。

根据常用的发射药组分, 对不同配方按某125 mm 火炮的身管参数和装药参数进行计算的结果如图1和图2所示。可以看出, 火药力和潜能与弹丸初速的关系都存在着明显的离散性。这一现象表明: 火药力或潜能相同时, 并不一定能够获得相同的弹丸初速, 或者

收稿日期: 2006-08-25; 修回日期: 2006-11-20

基金项目: 火炸药燃烧国防科技重点实验室基金(51455020204BQ0202)

作者简介: 黄振亚(1958-), 男, 博士, 研究员, 从事含能材料研究工作。e-mail: hzy331@sohu.com

说,相同的火药力或潜能不一定具有相同的做功能力。另外,潜能与火药力相比,弹丸初速的散布更大一些。因此,采用火药力或潜能作为发射药的参数,在评价做功能力或获得弹丸初速的能力方面将带来一定的偏差。

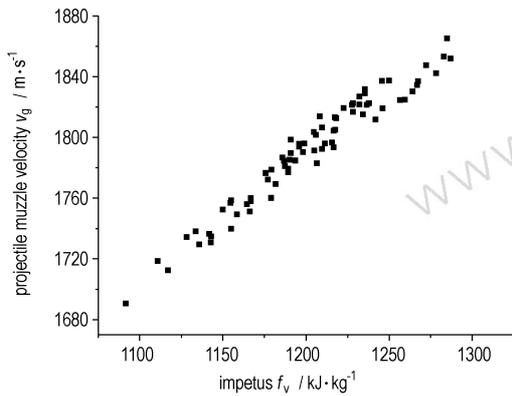


图 1 f_v 对 v_g 贡献的分布情况

Fig. 1 Distribution curves of v_g vs f_v

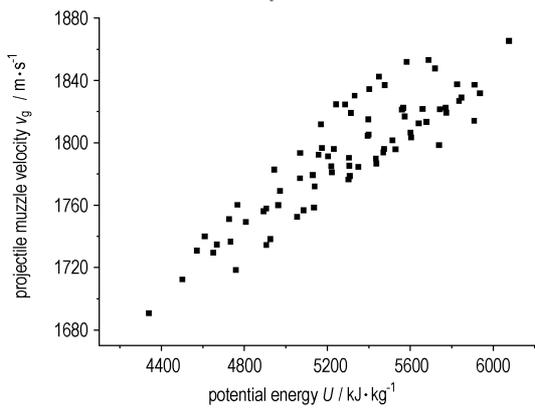


图 2 潜能对 v_g 贡献的分布情况

Fig. 2 Distribution curves of v_g vs U

3.2 燃气热力学参数对内弹道效率的影响

大多数火炮武器的 L_r 值在 0.1 ~ 0.2 范围内,最大不超过 0.2,部分小口径火炮的 L_r 值小于 0.1,个别在 0.05 左右。因此,计算内弹道效率时,在 $L_r = 0.05 \sim 0.2$ 之间取值来考虑武器结构对膨胀做功的影响。 γ_g' 和 $\gamma_g'/(k-1)$ 随比热比 k 的变化关系如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出:在不同武器的 L_r 条件下, k 值越大,对内弹道效率的影响越大。 k 值在 1.22 附近变化 0.01 时, γ_g' 的变化大于 3%。因此,内弹道效率对弹丸初速的贡献不容忽视,用火药力和潜能作为能量参数有一定的局限性。

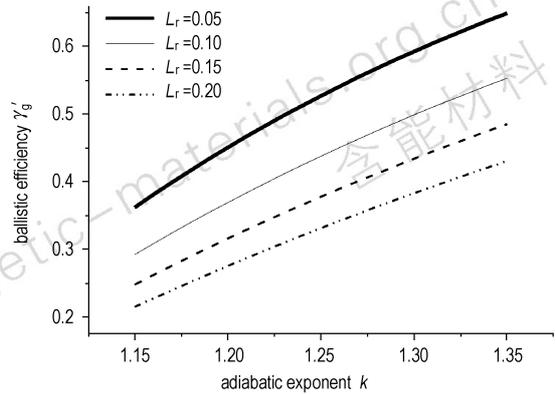


图 3 γ_g' 随 k 的变化关系

Fig. 3 Relationship between γ_g' and k

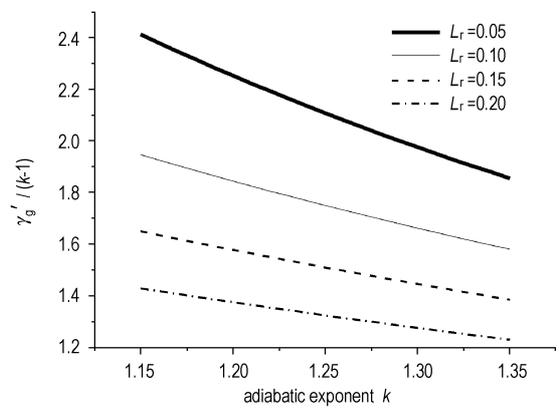


图 4 $\gamma_g'/(k-1)$ 随 k 的变化关系

Fig. 4 Relationship between $\gamma_g'/(k-1)$ and k

从图 4 可以看出:随着 k 的增加, $\gamma_g'/(k-1)$ 降低,并且在不同武器的 L_r 条件下, k 值越小,对 $\gamma_g'/(k-1)$ 的影响越大。 k 值在 1.22 附近变化 0.01 时, $\gamma_g'/(k-1)$ 值变化 1% 左右。由于 $\gamma_g'/(k-1)$ 随 k 值的变化率小于 γ_g' 随 k 值的变化率,所以火药力与弹丸初速关系的离散性小于潜能与弹丸初速关系的离散性。

3.3 发射药热力学参数与化学式的关系

根据内能法的基本原理,发射药的热力学参数(用 R_e 表示)都是其化学式和生成热的函数,即 $R_e = f(K_c, K_H, K_O, K_N, H_f, \dots)$,发射药的热力学参数(如 f_v 和 k)之间是相互关联的。图 5 和图 6 是发射药的热力学参数和弹丸初速随化学式中 H/C 比的变化关系。

由图 5 和图 6 可以看出,火药力 f_v 和燃气比热比 k 随 H/C 比的增加而增大,潜能 U 随 H/C 比的增加而减小。如果以潜能作为评价标准,则增加 H/C 比是不利的,但是弹丸初速的计算结果却刚好相反(见图 6)。产生这种现象的原因是随着 H/C 比的增加, $1/(k-1)$

的下降速度比火药力的增加速度快而导致潜能下降, 而 $\gamma_g'/(k-1)$ 的下降速度比火药力的增加速度慢, 最终使弹丸的初速增加。

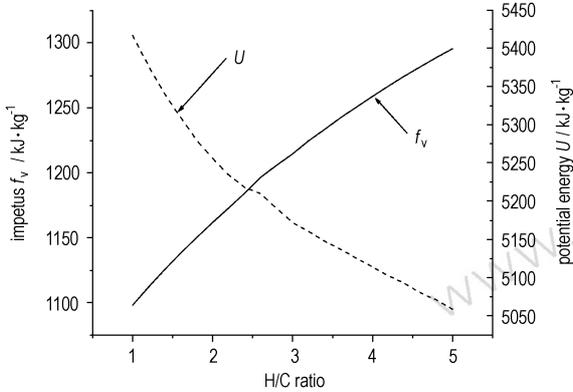


图 5 f_v 和 U 随 H/C 比的变化关系
Fig. 5 Curves of f_v and U vs H/C ratio

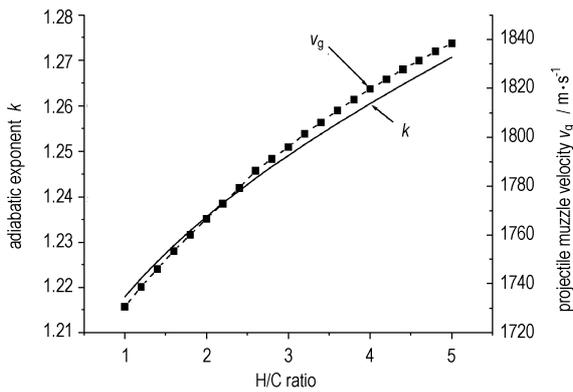


图 6 k 和 v_g 随 H/C 比的变化关系
Fig. 6 Curves of k and v_g vs H/C ratio

4 以做功能力参数评价发射药能量

发射药的应用目标是获得尽可能高的弹丸初速, 弹丸初速是评价发射药能量的根本标准。但由于弹丸初速不仅与武器结构有关, 而且还与装药参数有关, 不能作为发射药的参数评价参数。为此, 本文引入了“做功能力”参数 E_b , 定义为:

$$E_b = \gamma_g' \cdot \frac{f_v}{k-1} \quad (3)$$

根据弹丸初速公式(1), 做功能力参数 E_b 与弹丸初速的平方成正比, 即 $E_b \propto v_g^2$ 。在一定的装药条件(装药量和弹丸质量)下, E_b 越大则弹丸初速越高。

在做功能力参数 E_b 的计算公式中, 包含了与武器结构有关的参量 L_r , 需要研究分析不同 L_r 值对 E_b 的影响关系。根据现有身管武器 L_r 值的变化范围, 在 $L_r = 0.05 \sim$

0.2 之间研究分析不同配方体系的 $E_b \sim L_r$ 变化规律。

图 7 是 6 种不同代表性配方的 $E_b \sim L_r$ 变化规律, 其中, 配方 1、2 是单基发射药, 配方 3 是叠氮硝胺发射药, 配方 4 是混合酯发射药, 配方 5 是高能硝胺发射药, 配方 6 是以 RDX-AMMO/BAMO 为主体的新配方。

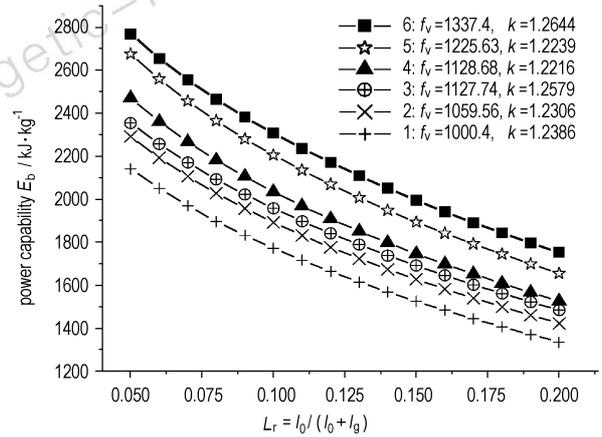


图 7 发射药典型配方的 $E_b \sim L_r$ 曲线
Fig. 7 $E_b - L_r$ curves of typical propellants

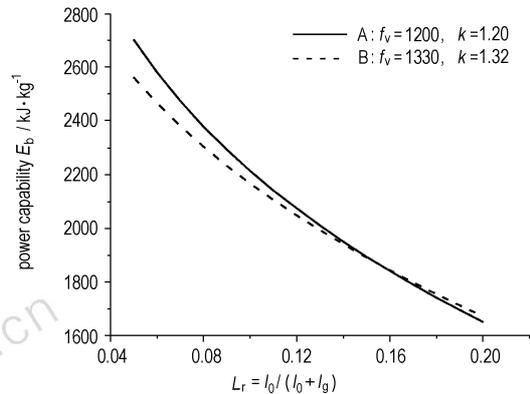


图 8 相交的 $E_b \sim L_r$ 曲线

Fig. 8 Intersectant $E_b - L_r$ curves

由图 7 可以看出, E_b 随着 L_r 的增大而有规律的减小, k 值的大小对 E_b 的变化率有影响。在 k 值相近情况下(如配方 4 和 5), E_b 的变化仅与火药力 f_v 有关; 在火药力相近情况下(如配方 3 和 4), k 值大的配方在 L_r 值较小时 E_b 值较小, 在 L_r 值较大时 E_b 值差别小一些, 即 k 值小的配方, E_b 随 L_r 增大而下降的速度较快一些。

如果两个配方的 f_v 和 k 值相差较大, 它们的 $E_b \sim L_r$ 曲线将可能出现相交的情况(见图 8)。两条曲线相交的情况及其交点位置, 主要受 f_v 和 k 值大小的影响。图 8 中配方 A 的 f_v, k 和配方 B 的 k 不变, 增大 B 的 f_v , 交点将向左移动。图中配方 A 的潜能($f_v/(k-1)$)为

6000 kJ · kg⁻¹, 配方 B 的潜能为 4156.2 kJ · kg⁻¹, 两配方在交点 ($L_r = L_{r0}$) 处的做功能力相同。在 $L_r < L_{r0}$ 的武器上应用时, $E_b(A) > E_b(B)$, 做功能力与潜能较为一致, 应选择配方 A, 即选择潜能大的配方; 在 $L_r > L_{r0}$ 的武器上应用时, $E_b(A) < E_b(B)$, 做功能力与火药力较为一致, 应选择配方 B, 即选择火药力较大的配方。

综上所述, 采用 E_b 评价发射药的能量时, 可避免火药力和潜能与弹丸初速之间关系的离散性。为客观地评价发射药的能量, 并对其在不同武器结构条件下应用的做功效率作出准确的评价, 可采用下面方法:

(1) 采用与武器应用条件相对应的评价标准。表 1 为代表性发射药在 $L_r = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$ 条件下做功能力参数 E_b 的计算结果。叠氮硝酸发射药与混合酯发射药相比, 火药力基本接近, 但叠氮硝酸发射药的燃气比热比明显大于混合酯发射药, 在 $L_r = 0.05$ 时, 混合酯发射药的做功能力 E_b 明显大于叠氮硝酸药; $L_r = 0.20$ 时, 两者的做功能力趋于接近。

表 1 代表性发射药的做功能力参数

Table 1 Power capability parameters of representative propellants

propellants	f_v / kJ · kg ⁻¹	k	E_b / kJ · kg ⁻¹			
			$L_r = 0.05$	$L_r = 0.10$	$L_r = 0.15$	$L_r = 0.20$
high N% single base propellant	1059.56	1.2306	2292.0	1892.9	1628.1	1424.6
azide-nitramine propellant	1127.74	1.2579	2353.4	1958.1	1691.9	1485.5
TEGN propellant	1128.68	1.2215	2471.3	2035.8	1748.3	1528.0
high-energy nitramine propellant	1225.63	1.2239	2675.0	2205.1	1894.4	1656.3

Note: f_v is impetus, k is adiabatic exponent, E_b is power capability, $L_r = l_0 / (l_0 + l_g)$ (l_0 is chamber volume-to-bore area ratio, l_g is projectile full travel).

(2) 针对特定的武器应用背景, L_r 为某一定值, 做

功能力参数 E_b 有明确的评价标准。根据国外高膛压坦克炮穿甲弹要求炮口动能达 18 MJ 的目标, 可计算出某 125 mm 火炮 ($L_r = 0.166$) 穿甲弹所需要 E_b 值大约为 2500 kJ · kg⁻¹, 并以此作为高能发射药的发展目标。

5 结论

(1) 发射药在身管武器中的做功能力除了与火药力或潜能有关以外, 还与其燃气比热比在膨胀做功过程中的影响有关, 火药力或潜能相同时, 并不一定具有相同的做功能力。

(2) 发射药的做功能力与武器的身管结构参数 L_r 有关。在 L_r 较小的武器上应用时, 做功能力与潜能较为一致, 应选择潜能大的配方; 在 L_r 较大的武器上应用时, 做功能力与火药力较为一致, 应选择火药力较大的配方。

参考文献:

- [1] Simmons R L. Guidelines to higher energy gun propellants[A]. 27th International Annual Conference of ICT[C], Karlsruhe, Germany, 1996.
- [2] Volk F, Bathelt H. Influence of energetic materials on the energy-output of gun propellants[A]. 28th International Annual Conference of ICT[C], Karlsruhe, Germany, June, 1997.
- [3] Simmons R L. Optimizing chemical energy output for hypersonic applications[A]. 37th JANNAF Combustion Meeting[C], Maryland, USA, Vol. 1, November, 2000.
- [4] Clive R Woodley. The roles of gun propellant properties in attaining high velocities[A]. 21st International Symposium on Ballistics[C], Adelaide, Australia, April, 2004.
- [5] 赵宝昌. 关于火药能量概念的探讨[J]. 火炸药, 1995, 18(4): 15-18. ZHAO Bao-chang. Discussion about energy concept of propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1995, 18(4): 15-18.
- [6] 萧忠良. 也谈火药的能源概念[J]. 火炸药, 1996, 19(3): 33-35. XIAO Zhong-liang. Talking again on energy concept of propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1996, 19(3): 33-35.

Relationship between Energy and Power Capability of Propellant

HUANG Zhen-ya, LI Xiao-an

(Chemical Engineering College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to evaluate energy parameters of propellant accurately and impersonally, thermodynamic parameters of different propellant formulations were computed by potential energy method, and the correlations between the thermodynamic parameters and expanding power capability of propellant combustion gas in barrel weapon were researched. The results show that the thermodynamic properties of propellant combustion gas products have an important effect on its expanding power, and the correlation between conventional energy parameters such as impetus, potential energy and its power capability is not identical. When propellant is used in weapons with larger gas expanding ratio, the power capability accords with potential energy, and the power capability accords with impetus when gas expanding ratio is small.

Key words: materials science; propellant; energy; power capability; thermodynamic property