

文章编号: 1006-9941(2009)02-0202-04

## 硝酸铵对发射药能量性能的影响

贺增弟, 刘幼平, 何利明, 肖忠良

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

**摘要:**研究了硝酸铵对发射药爆温、爆热、火药力、余容、比容的影响。采用最小自由能法,对发射药的能量参数进行计算;采用密闭爆发器法测定了硝酸铵发射药的火药力和余容;采用绝热法测定了硝酸铵发射药的爆热。计算结果表明:硝酸铵含量分别为 58.49%、50.07% 和 43.13% 时,发射药的爆热、爆温、火药力分别达到最大值 4743.2 kJ·kg<sup>-1</sup>、3075.9 K 和 1049.6 kJ·kg<sup>-1</sup>。试验结果表明:硝酸铵发射药与单基药相比,硝酸铵含量 50.0%,爆热增加了 23.6%,硝酸铵含量 40.0%,火药力增加 5.0%。随着硝酸铵含量增加,硝酸铵发射药的爆热、火药力符合理论计算的规律。

**关键词:**应用化学;硝酸铵;发射药;爆热;火药力

**中图分类号:**TJ55; O69; TQ562

**文献标识码:**A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.018

### 1 引言

随着身管武器系统向机械化、信息化方向发展,人们越来越关注身管武器射击时的有害现象。常见的火炮有害射击现象包括炮尾和炮口火焰、有毒排气、发射烟雾、发射噪声等<sup>[1-4]</sup>。有害射击现象对战场武器系统平台的生存、作战能力及战士的生存作战条件产生不良影响。以硝化棉为主体粘结剂的制式发射药均处于负氧平衡状态,发射药燃气中的 CO 通常占燃气总量的 50% 左右。提高发射药氧平衡,可以减少不良射击现象的影响<sup>[5-6]</sup>。

硝酸铵是一种廉价、来源广泛的氧化剂,具有化学安定性好、燃烧产物不含固体和氯化氢、火焰温度低、对环境友好的特点。硝酸铵在火药中的吸湿性和晶变问题,可以通过在硝酸铵中加入防吸湿添加剂或对硝酸铵进行包覆形成微胶囊的方法解决<sup>[7-10]</sup>。研究表明,在发射药中加入硝酸铵可以提高发射药的氧平衡,使发射药燃烧更充分,有效减弱炮口焰,降低 CO 的浓度<sup>[5-6]</sup>。

本实验研究了硝酸铵对发射药能量性能的影响,为硝酸铵在发射药中的应用奠定了基础。

### 2 理论计算

采用最小自由能法<sup>[11-12]</sup>计算发射药的爆温、爆

热、火药力、比容、余容,同时得到标准大气压、爆温条件下燃烧产物平衡组成。

发射药配方采用单基药配方:硝化棉(含氮量 13.1%) 94.7%,二苯胺 1.5%,石墨 0.2%,内挥 0.9%,外挥 1.2%,樟脑 1.5%。硝酸铵外加,硝酸铵含量从 0%~62% 按照 5% 递增。

#### 2.1 硝酸铵对爆热的影响

硝酸铵对发射药氧平衡和爆热的影响如图 1 所示。

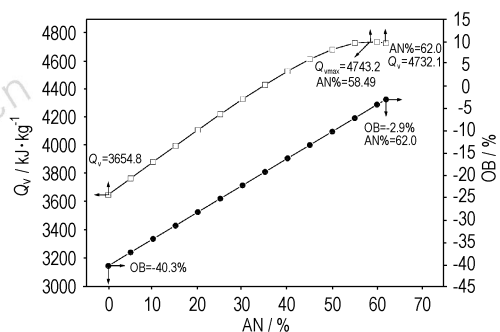


图 1 硝酸铵对发射药氧平衡和爆热的影响

Fig. 1 Effect of AN on oxygen balance and explosion heat of gun propellant at constant volume

图 1 表明,随着硝酸铵含量增加,发射药氧平衡(OB)增加,发射药燃烧更充分,爆热增加,存在最大值。这种现象可以通过爆热公式<sup>[12]</sup>解释。

$$Q_{P(g)} = (\Delta_f H_m^\ominus)_P - \sum n_i (\Delta_f H_m^\ominus)_i \quad (1)$$

$$Q_V = Q_{P(g)} + 41.536 \times n_{H_2O} + 2.478n^{\text{eff}} \quad (2)$$

爆热公式(1)中,第一项 $(\Delta_f H_m^\ominus)_P$ 为 1 kg 火药的生成焓(kJ·kg<sup>-1</sup>);第二项 $\sum n_i (\Delta_f H_m^\ominus)_i$ 为 1 kg 火药燃烧产物标准生成焓的和;爆热公式(2)中,第二项

收稿日期:2008-07-28;修回日期:2009-01-04

基金项目:国家基础产品创新项目(项目编号:A3320061374),火炸药专项  
作者简介:贺增弟(1970-),男,博士,副教授,主要从事发射药与装药研究工作。e-mail: hezhd20@sina.com.cn

41.536 ×  $n_{\text{H}_2\text{O}}$  为 1 kg 火药燃烧产生水的汽化热; 第三项  $2.478n^{\text{e}}$  为 1 kg 火药在标准条件下燃烧做的功。在该计算条件下, 燃烧气态产物物质的量在 40.0 ~ 42.4 mol 之间, 火药燃烧做功的改变量对结果影响较小, 所以公式 (2) 中第三项不考虑。由于硝酸铵的标准生成焓<sup>[12]</sup> ( $-4606.58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 小于硝化棉 (含氮量为 13.1% 时, 为  $-2468.56 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的标准生成焓, 随着发射药中硝酸铵含量增加, 火药的生成焓降低, 发射药内能降低, 爆热降低。另一方面, 发射药中硝酸铵含量增加, 发射药氧平衡提高, 可燃气体  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  燃烧产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 而  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  的生成焓<sup>[12]</sup> ( $-277.74 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $-148.00 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 小于  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  的生成焓 ( $-39.19 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $66.93 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 燃烧产物标准生成焓减少, 爆热增加; 同时硝酸铵含量增加, 产物中水含量增加, 水的汽化热增加, 爆热增加。所以随着硝酸铵含量增加, 火药的生成焓降低, 爆热降低; 同时, 燃烧产物标准生成焓减少、水的汽化热增加, 爆热增加。以上两方面对爆热的影响相反。当二者达到平衡时, 爆热最大。

对爆热曲线拟合、求导, 硝酸铵含量为 58.49% 时, 爆热达到最大值  $4743.2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 从起始爆热到最大值, 爆热增加  $1088.4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 增长率达到 29.8%。爆热达到最大值时, 发射药的氧平衡为  $-5.02\%$ , 即硝酸铵发射药爆热最大值在小于零氧平衡处实现。

## 2.2 硝酸铵对爆温的影响

硝酸铵对发射药爆温的影响如图 2 所示。

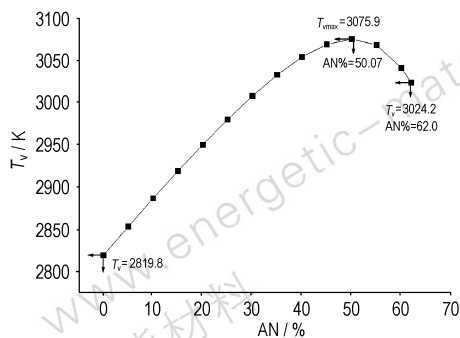


图 2 硝酸铵对发射药爆温的影响

Fig. 2 Effect of AN on isochoric adiabatic flame temperature of gun propellant

图 2 表明, 随着硝酸铵含量增加, 发射药爆温先增加后下降, 存在最大值。对爆温曲线拟合、求导, 硝酸铵含量为 50.07% 时, 爆温达到最大值 3075.9 K。但

是产生爆温、爆热最大值时硝酸铵含量并不相同。产生上述现象的原因可以通过爆温公式<sup>[12]</sup>解释:

$$T_v = \frac{Q_{V(g)}}{C_v} + 298 \quad (3)$$

爆温公式 (3) 表明, 爆温的变化与爆热和燃烧产物的平均定容热容有关。硝酸铵含量增加, 爆热增加, 有利于提高爆温; 另一方面, 可燃气体  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  燃烧产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 而  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  热容大于  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}$  的热容<sup>[12]</sup>, 燃烧产物平均热容增加, 不利于爆温提高。爆热和燃烧产物平均热容对爆温的影响相反, 二者达到平衡时, 爆温达到最大值点。达到最大值点时, 氧平衡为  $-10.14\%$ 。

硝酸铵发射药中, 从起始爆温 2819.8 K 到最大值 3075.9 K 增加了 256.1, 爆温增长率为 9.1%。增长率远小于爆热增长率。

## 2.3 硝酸铵对火药力的影响

硝酸铵对发射药火药力的影响如图 3 所示。

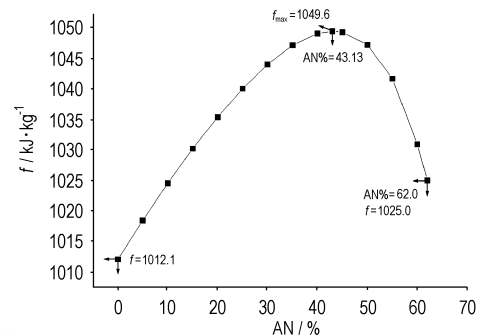


图 3 硝酸铵对发射药火药力的影响

Fig. 3 Effect of AN on specific energy of gun propellant

图 3 表明, 随着硝酸铵含量增加, 发射药火药力先增加后下降, 存在最大值点。对火药力曲线拟合、求导, 硝酸铵含量为 43.13%, 火药力达到最大值  $1049.6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由于火药力是标准大气压、火药比容、定容爆温的函数<sup>[12]</sup>,  $f = P_0 V_1 T_v / 273$ , 硝酸铵含量增加, 爆温增加, 火药力增加; 另一方面, 可燃气体  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  反应生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 而  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  分子量大于  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}$  的分子量, 比容减小, 火药力减小。当二者达到平衡时, 火药力达到最大值。火药力的最大值点与爆温、爆热最大值点硝酸铵含量不相同。

硝酸铵发射药中, 从起始火药力  $1012.1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  到最大值  $1049.6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 增加了  $37.5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 火药力增长率达到 3.7%。增长率远小于爆温、爆热增长率。

## 2.4 硝酸铵对火药比容和余容的影响

发射药的比容和余容与发射药燃烧产物组成有关,硝酸铵发射药燃烧产物  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$  的摩尔百分含量随硝酸铵含量的变化如图 4 所示。

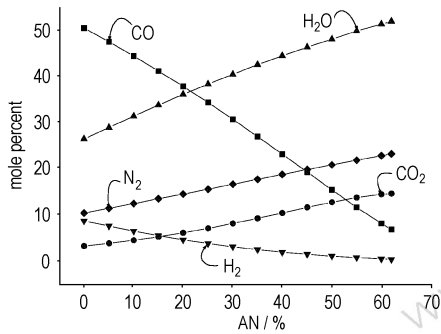


图 4 硝酸铵对发射药燃烧产物的影响

Fig. 4 Effect of AN on combustion products of gun propellant

图 4 表明,随着硝酸铵含量增加,燃烧产物中可燃气体  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  含量降低, $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$  含量增加。燃烧产物中可燃气体含量降低,可以减少炮尾和炮口火焰、炮尾排气毒性、发射烟雾等不良射击现象的影响<sup>[3,5-6]</sup>。

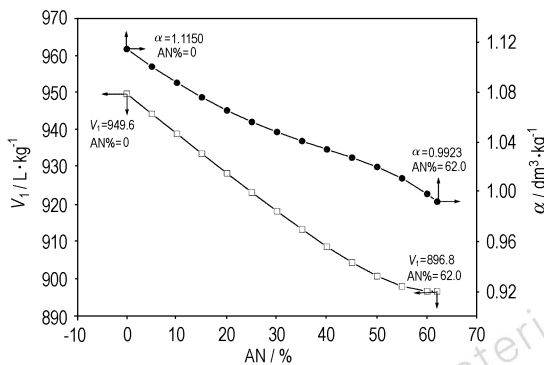


图 5 硝酸铵对发射药比容和余容的影响

Fig. 5 Effect of AN on specific volume and covolume of gun propellant

图 5 表明,随着硝酸铵含量增加,发射药的比容和余容降低。硝酸铵含量增加,可燃气体有利于反应生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,分子量增加,所以发射药比容( $V_1$ )减小。余容与燃烧产物中各组分的摩尔浓度和范德华常数  $b$  有关。发射药余容( $\alpha$ )随硝酸铵含量增加而减小。

单基药中加入硝酸铵,爆热、爆温、火药力,存在最大值点,三者的增长幅度不同,爆热增加最大,爆温次之,火药力增加幅度最小。硝酸铵含量增加,火药力首先达到最大值,爆热最后达到最大值。所以可根据需要,选择合适的硝酸铵含量,达到配方设计要求。

## 3 试验部分

### 3.1 试验方法、条件

计算结果表明,硝酸铵含量在 30% ~ 50% 之间时,火药力值在  $1044.0 \sim 1049.6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,变化较小,且最大值在此范围内。所以选定硝酸铵含量为 30%、40%、50% 的发射药进行试验。

样品制备:将 30% (质量分数) 硝酸铵、1% 二苯胺、1% 表面活性剂、68% 硝化棉四种组分,通过塑化、压伸、晾药、切药、筛选、烘干、包覆、光泽、混同工序,制备硝酸铵含量为 30% 的发射药 (No. 2)。采用同样方法可以制备硝酸铵含量为 40% (No. 3)、50% (No. 4) 的发射药。

火药力、余容测试:100 mL 密闭爆发器测试系统,爆发器实际容积 106 mL,装填密度  $0.20, 0.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,点火压力为 9.8 MPa,点火药为 2# 硝化棉。

爆热测试方法:采用国军标 GJB770A-97 火药试验方法 (701.1 爆热和燃烧热 绝热法) 进行爆热测定,试样量为 6 g。

### 3.2 结果讨论

测定某制式发射药单樟 6/7 (No. 1) 和硝酸铵发射药 (No. 2, No. 3, No. 4) 的火药力、余容和爆热,结果见表 1。

表 1 能量性能测试结果

Table 1 The testing results of energy parameters

No.	AN / %	$f / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\alpha / \text{dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$Q_v / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
1	0	1058.2	1.095	3883.0
2	30	1102.2	0.998	4426.8
3	40	1110.9	0.993	4629.5
4	50	1087.5	0.990	4799.3

表 1 表明,硝酸铵发射药试样的火药力均大于制式单基药 (No. 1),且试样 3 (40% AN) 火药力最大,与制式单基药相比火药力增加了 5.0%,符合硝酸铵含量 43.13% 达到最大值的计算结果。硝酸铵发射药试样的爆热均大于制式单基药,试样 4 (50% AN) 与制式单基药相比爆热增加了 23.6%。由于试样中硝酸铵含量小于最大值时 (58.48%) 含量,所以爆热呈上升趋势。

## 4 结 论

(1) 硝酸铵发射药中,硝酸铵含量增加,爆温、爆热、火药力先增加后降低,存在最大值点。

(2) 理论计算表明,硝酸铵含量为 58.49%、50.07% 和 43.13% 时,爆热、爆温、火药力达到最大值

点,最大值分别为  $4743.2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3075.9 \text{ K}$  和  $1049.6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 试验结果表明,硝酸铵发射药爆热、火药力均高于制式单基药,爆热、火药力的变化趋势和计算结果相同。

#### 参考文献:

- [1] 王宏,孙美,冯伟,等. 发射药枪口烟焰检测技术研究[J]. 火炸药学报,2002,25(2): 57-58.  
WANG Hong,SUN Mei,FENG Wei, et al. Study on the measurement technique for muzzle smoke and flash of deterred propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2002,25(2): 57-58.
- [2] 王琼林,刘少武,谭惠民,等. 具有洁净燃烧特征的高分子钝感枪药[J]. 火炸药学报,2003,26(4): 5-7.  
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, TAN Hui-min, et al. Study on the clear-burning gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2003,26(4): 5-7.
- [3] 王琼林,蒋树君,余斌,等. 炮射导弹发射药燃气中 CO 浓度的影响因素[J]. 火炸药学报,2006,29(6): 61-64.  
WANG Qiong-lin,JIANGShu-jun,YU Bin, et al. The factors affecting monoxide (CO) concentration in propellant combustion gas of a gun-propelled laser-guided missile propelling charge [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2006,29(6): 61-64.
- [4] 萧忠良. 武器信息化条件下火炸药发展策略分析[J]. 火炸药学报,2007,30(1): 1-3.  
Xiao Zhong-liang. The analysis about developed strategy of propellant an explosive in the circumstances of weapon informationization [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2007,30(1): 1-3.
- [5] 贺增弟,刘幼平,何利明,等. 硝酸铵对炮口焰的影响研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2008,29(6): 538-541.  
HE Zeng-di,LIU You-ping,HE Li-ming, et al. Impacts of ammonium nitrate on muzzle flash [J]. *Journal of North University of China* (Natural Science Edition),2008,29(6): 538-541.
- [6] 贺增弟,刘幼平,何利明,等. 发射药氧平衡对枪口焰的影响[J]. 火炸药学报,2008,31(6): 57-59.  
HE Zeng-di, LIU You-ping, HE Li-ming, et al. Effect of oxygen balance of propellant on muzzle flash [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2008,31(6): 57-59.
- [7] 岳金文,邓剑如. 沉淀聚合包覆硝酸铵的吸湿性研究[J]. 含能材料,2004,12(2): 82-84.  
YUE Jin-wen,DENG Jian-ru. Study on hygroscopicity of the coated ammonium nitrate by precipitation polymerization[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2004,12(2): 82-84.
- [8] 叶方青,曾贵玉,吕春绪,等. 聚合物对硝酸铵相转变的影响[J]. 含能材料,2008,16(1): 77-79.  
YE Fang-qing,ZENG Gui-yu,LüChun-xu, et al. Effects of polymers on phase transition of ammonium nitrate[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2008,16(1): 77-79.
- [9] 张杰,杨荣杰,刘云飞,等. 聚乙烯醇缩丁醛包覆硝酸铵的性能研究[J]. 火炸药学报,2001,24(1): 41-43.  
ZHANG Jie,YANG Rong-jie,LIU Yun-fei, et al. Study on properties of thecoated AN with polyvinyl butyral [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2001,24(1): 41-43.
- [10] 曾贵玉,周华,吕春绪,等. 无机物对硝酸铵相转变的影响[J]. 含能材料,2007,15(4): 400-403.  
ZENG Gui-yu,ZHOU Jian-hua,LüChun-xu, et al. Effect of inorganic additives on phase transition temperature of ammonium nitrate [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2007,15(4): 400-403.
- [11] 张续柱,肖忠良. 液体发射药[M]. 北京: 中国科学技术出版社,1993.
- [12] 刘继华. 火药物理化学性能[M]. 北京: 北京理工大学出版社,1997.

## Effects of Ammonium Nitrate on Energy Performance of Gun Propellant

HE Zeng-di, LIU You-ping, HE Li-ming, XIAO Zhong-liang

(Department of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The effects of ammonium nitrate on energy of gun propellant were studied. The explosion heat at constant volume, isochoric adiabatic flame temperature, specific energy, covolume and specific volume of propellant gas were calculated by the minimum free energy method. The specific energy and covolume were tested by closed-bomb method. The explosion heat was tested by heat insulation method. The calculated results show that when the contents of ammonium nitrate are 58.49%, 50.07% and 43.13%, the explosion heat, the flame temperature and the specific energy of gun propellant are  $4743.2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $3075.9 \text{ K}$  and  $1049.6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. The testing results show that when the contents of ammonium nitrate are 50.0% and 40.0%, the explosion heat and the specific energy of gun propellant are increased by 23.6% and 5.0% respectively comparing with that of single-base propellant. With the increasing of content of ammonium nitrate, changes of explosion heat and specific energy are consistent with the calculated results.

**Key words:** applied chemistry; ammonium nitrate; gun propellant; explosion heat at constant volume; specific energy