

文章编号:1006-9941(XXXX)XX-0001-08

## 三基发射药热烧蚀特性及变化规律

邬睿,肖亦洁,李强,袁茂博,刘波,张玉成

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了研究三基发射药热烧蚀特性及变化规律,制备了组分含量不同的多种三基发射药,采用半密闭爆发器模拟烧蚀试验方法测定发射药样品的烧蚀性,分析了发射药高能组分含量、增塑剂含量对发射药爆温的影响规律,以及发射药爆温对烧蚀特性的影响规律。结果表明,环三亚甲基三硝胺(RDX)、硝基胍(NQ)、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)含量改变会引起发射药爆温的变化,进而影响烧蚀性能;RDX含量增加1%,爆温增加0.59%,发射药烧蚀率增加1.23%;与未加入RDX相比,加入2%RDX烧蚀率增加23.38%;NQ含量增加1%,爆温降低0.23%,发射药烧蚀率降低0.56%;DOP含量增加1%,爆温降低2.99%,发射药烧蚀率降低7.01%;针对爆温在2600-3100 K范围内的三基发射药,建立了质量烧蚀率与爆温的指数关系式,并分别给出了RDX、NQ、DOP体系的特征系数,为0.106、0.101、0.163。

**关键词:** 三基发射药;烧蚀特性;爆温;高能组分;增塑剂

**中图分类号:** TJ55;TQ562

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2024033

### 0 引言

发射药作为身管武器的能量来源,是身管武器发射的核心之一,对身管武器性能的发挥有着重要影响。近年来,随着身管武器的战斗力需求逐渐提升,身管武器弹药的性能要求也逐渐提高,对发射药提出了更高能量的要求<sup>[1-2]</sup>。三基发射药是目前能量最高的新型发射药,具有能量密度高、燃烧渐增性良好等特点,使得身管武器系统的炮口初速以及射程显著提升。采用能量更高的发射药是当前提高身管武器性能的主要发展趋势,但同时也使得发射药烧蚀性加剧<sup>[3-4]</sup>。

近年来国内外研究人员围绕烧蚀模拟试验、烧蚀抑制技术、烧蚀规律与机理等方面进行了研究。龚长红<sup>[5]</sup>和张喜发等<sup>[6]</sup>研究发现降低爆热能够大幅提升身管武器的使用寿命,例如某火炮使用的发射药爆热从5338 kJ·kg<sup>-1</sup>降低为3416 kJ·kg<sup>-1</sup>,寿命从1200发延长至3000发。Johnston等<sup>[7]</sup>对身管内表面组成进行研

究,研究烧蚀过程中身管材料的变化,获得不同物质的熔点及相变温度。刘靖等<sup>[8]</sup>对三基发射药在不同爆温条件下的烧蚀性进行了研究,表明烧蚀率与压力冲量呈指数关系,与爆温呈线性关系。Garima等<sup>[9]</sup>对引入环三亚甲基三硝胺(RDX)的三基发射药烧蚀性进行了研究,发现增加了火药力与膛压的同时加剧了烧蚀性,推测RDX的含量是影响烧蚀性的一个重要因素。Kimura等<sup>[10]</sup>对多种单基、双基、三基发射药的烧蚀性进行了研究,发现火焰温度与烧蚀量的对数成正比,且三基发射药的变化规律不同。Lawton等<sup>[11]</sup>对发射药烧蚀量与温度的关系进行了研究,发现烧蚀量与身管内表面温度及环境起始温度有关,推测身管内表面温度降低10%,则烧蚀可以降低300%。

当前已有研究对发射药烧蚀性影响研究较多,但存在发射药样品的单一变量控制难、单因素作用效果及规律掌握不清楚、不同体系发射药烧蚀行为与规律不完全相同的问题。研究单因素具体作用规律及过程是当前研究的一个重要的研究方向。基于目前对三基发射药烧蚀性影响研究存在的不足,针对现有三基发射药,采用半密闭爆发器通过烧蚀试验进行对比,研究了发射药组分含量通过爆温对烧蚀性的影响,初步探讨了发射药烧蚀性与爆温的规律。

收稿日期:2024-01-22;修回日期:2024-02-23

网络出版日期:2024-03-07

作者简介:邬睿(2000-),男,硕士研究生,主要从事发射装药技术研究。e-mail:pzhwuru@foxmail.com

通信联系人:张玉成(1976-),男,研究员,主要从事发射药技术研究。e-mail:zyc204@163.com

引用本文:邬睿,肖亦洁,李强,等.三基发射药热烧蚀特性及变化规律[J].含能材料,DOI:10.11943/CJEM2024033.

WU Rui, XIAO Yi-jie, LI Qiang, et al. Thermal Erosion Characteristics and Variation Law of Triple Base Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2024033.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂和仪器

硝化棉(NC,氮含量13%)、硝化甘油(NG)、叠氮硝胺(DIANP)、黑索今(RDX)、硝基胍(NQ)、点火药(2<sup>#</sup>NC)等,西安近代化学研究所;DOP,分析纯,国药集团化学试剂厂。试验通过吸收装置、压延机、立式胶化机、压伸机、切药机、电热恒温鼓风干燥箱制备了发射药样品,通过绝热式氧弹热量计测试了发射药样品的爆热,通过半密闭爆发器烧蚀模拟装置测试了发射药的烧蚀性能。

### 1.2 发射药样品

以NC、NG、NQ为基础组分,添加了适量的二硝基甲苯(DNT)与DIANP,改变了RDX、NQ等不同的含能物质以及增塑剂邻苯二甲酸二辛酯(Dioctyl phthalate, DOP)的含量,设计制备了在2600~3100K范围内爆温梯度分布的多种三基发射药样品,药型为七孔药。为了研究组分含量通过调控发射药爆温对烧蚀性能的影响,在两种制式发射药配方的基础上,将NC、NG按照一定比例制成药片后,再将需要调节的组分、增塑剂、中定剂等加入其中制得发射药药片。发射药样品采用半溶剂法挤压成型,包括吸收、压延、胶化、压伸、切药、烘干等工艺制备。

表1为基于某制式三基发射药设计的样品配方组成及热化学参数,其中1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>发射药样品中NC、NG、NQ各组分相对含量不变,2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>样品的RDX含量相对于1<sup>#</sup>样品分别增加了2%、4%、6%、8%。6<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>发射药样品中

表1 三基发射药样品配方组成

Table 1 Composition of the triple base propellant formula

| samples | content / % |    |     |     |       |     |       |
|---------|-------------|----|-----|-----|-------|-----|-------|
|         | NC+NG       | NQ | RDX | DOP | DIANP | DNT | other |
| 1       | 39.5        | 47 |     |     | 6     | 6   | 1.5   |
| 2       | 39.5        | 47 | 2   |     | 6     | 6   | 1.5   |
| 3       | 39.5        | 47 | 4   |     | 6     | 6   | 1.5   |
| 4       | 39.5        | 47 | 6   |     | 6     | 6   | 1.5   |
| 5       | 39.5        | 47 | 8   |     | 6     | 6   | 1.5   |
| 6       | 45.5        | 47 |     |     | 6     |     | 1.5   |
| 7       | 45.5        | 42 |     |     | 6     |     | 1.5   |
| 8       | 45.5        | 37 |     |     | 6     |     | 1.5   |
| 9       | 45.5        | 32 |     |     | 6     |     | 1.5   |
| 10      | 45.5        | 47 |     | 1   | 6     |     | 1.5   |
| 11      | 45.5        | 47 |     | 2   | 6     |     | 1.5   |
| 12      | 45.5        | 47 |     | 3   | 6     |     | 1.5   |

NC、NG各组分相对含量不变,7<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>样品的NQ含量相对于6<sup>#</sup>样品分别降低了5%、10%、15%,10<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>样品中增塑剂含量相对于6<sup>#</sup>样品分别增加了1%、2%、3%。

### 1.3 发射药样品爆热测试

发射药样品爆热测试按照GJB770B-2005标准<sup>[12]</sup>中方法701.1绝热式氧弹热量计相关要求进行了。

### 1.4 烧蚀模拟试验

试验采用的烧蚀管材料为身管武器常用炮钢材料(PCrNi<sub>3</sub>MoV)。试验采用半密闭爆发器法评定发射药烧蚀性的大小,装置如图1所示。采用多个烧蚀管进行平行试验,试验前后用酒精将烧蚀管清洗干净并烘干,称取三次燃气冲刷实验前后的烧蚀管质量变化得到每个烧蚀管失重量。取3个烧蚀管失重量的平均值作为该发射药样品的烧蚀量,并换算为每1g发射药的烧蚀率。半密闭爆发器容积为50 cm<sup>3</sup>,点火药为2<sup>#</sup>NC,点火压力为10 MPa,测压传感器为SYC-4000-0942,灵敏度系数为-20.05 PC·MPa<sup>-1</sup>,采样频率100 K,采样长度100 K,记录长度100 K,燃烧环境为恒压爆发器,试验环境温度为(20±2) °C。

$$E_i = m_1 - m_2 \quad (1)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (2)$$

$$m_i = \frac{E}{\omega} \quad (3)$$

式中, $E_i$ 为每个烧蚀管失重量,g; $m_1$ 和 $m_2$ 分别为每个烧蚀管试验前后的质量,g; $E$ 为每个发射药样品烧蚀量,g; $n$ 为每个试样所用烧蚀管数, $n=3$ ; $m_i$ 为试样烧蚀率,mg·g<sup>-1</sup>; $\omega$ 为每发试验的发射药装药量,g。

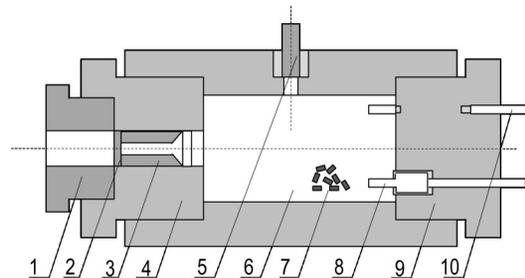


图1 半密闭爆发器烧蚀试验装置示意图

1—烧蚀压帽,2—控压片,3—烧蚀管,4—烧蚀塞头,5—压力传感器,6—燃烧室,7—发射药样品,8—点火电极,9—点火塞头,10—接线柱

Fig.1 Semi-closed bomb erosion test device schematic

1—erosion cap, 2—pressure control piece, 3—erosion tube, 4—erosion plug, 5—pressure transducer, 6—combustion chamber, 7—gun propellant, 8—ignition electrode, 9—ignition plug, 10—terminal

## 2 结果与讨论

### 2.1 烧蚀试验结果

发射药样品的热化学参数火药力  $f$  以及爆温  $T_v$  由西安近代化学研究所自研软件 EMatrix 计算获得, 爆热  $Q_v$  由绝热式氧弹热量计测试获得, 以液态水时的定容爆热计, 结果如表 2 所示。其中, EMatrix 软件采用内能法计算发射药的生成焓从而获得其火药力, 并根据气体状态方程计算得到发射药爆温。烧蚀试验数据处理采用 WJ/Z 259-2021 标准<sup>[13]</sup> 进行, 烧蚀试验具体结果如表 3 所示。

表 3 半密闭爆发器烧蚀试验结果

Table 3 Results of semi-closed bomb erosion test with charging density of  $0.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

| samples | $\omega / \text{g}$ | $p_{\max} / \text{MPa}$ | $E / \text{g}$ | $m_i / \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | samples | $\omega / \text{g}$ | $p_{\max} / \text{MPa}$ | $E / \text{g}$ | $m_i / \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ |
|---------|---------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|---------|---------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|
| 1       | 10.0268             | 272.7                   | 0.0701         | 6.988                               | 7       | 10.0265             | 272.1                   | 0.0967         | 9.640                               |
| 2       | 10.0265             | 272.6                   | 0.0865         | 8.620                               | 8       | 10.0269             | 273.1                   | 0.0988         | 9.849                               |
| 3       | 10.0266             | 272.3                   | 0.0890         | 8.882                               | 9       | 10.0268             | 273.2                   | 0.1016         | 10.128                              |
| 4       | 10.0268             | 280.8                   | 0.0907         | 9.048                               | 10      | 10.0265             | 276.7                   | 0.0877         | 8.746                               |
| 5       | 10.0269             | 276.9                   | 0.0930         | 9.273                               | 11      | 10.0264             | 276.4                   | 0.0815         | 8.128                               |
| 6       | 10.0268             | 271.5                   | 0.0939         | 9.360                               | 12      | 10.0268             | 276.8                   | 0.0718         | 7.152                               |

Note: 1)  $\omega$  is charges mass; 2)  $p_{\max}$  is maximum tube bore pressure; 3)  $E$  is tube erosion mass; 4)  $m_i$  is the rate of tube erosion mass.

### 2.2 通过调整组分含量改变爆温影响发射药烧蚀性

随着 NQ、RDX、增塑剂等组分的引入, 发射药能量性能逐渐改变, 影响发射药燃烧过程中的能量释放规律, 进而影响热与烧蚀管表面的作用, 导致发射药烧蚀性改变<sup>[9]</sup>。

#### 2.2.1 RDX 含量的影响

RDX, 化学式为  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$ , 为白色结晶性粉末, 生成焓为  $277.10 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 火药力、爆温较相同含量的 NC、NG 高, 在提高了发射药能量性能的同时加剧了烧蚀性。为了探索 RDX 含量对发射药爆温及烧蚀性的影响, 试验设计了不同 RDX 含量的 1#~5# 发射药样品, 并通过半密闭爆发器烧蚀模拟试验测试了各样品的烧蚀性。图 2 表明了 RDX 加入量对发射药热化学参数的影响规律。

随着 RDX 含量增加, 发射药的爆温和烧蚀性也逐渐上升, 发射药爆温  $T_v$  与 RDX 的加入量呈线性关系。通过拟合发射药爆温与烧蚀性的关系, 可以看出二者呈指数关系, 其相关系数为 0.983。同时, 发射药样品中 RDX 含量较低, 装药量少, RDX 含量改变引起的发射药燃气组成改变可忽略不计。研究 1#~5# 样品发现, RDX 的含量增加 2%, 发射药爆温  $T_v$  增加 1.18%, 烧蚀

表 2 三基发射药样品热化学参数

Table 2 thermochemical parameter of the triple base propellant formula

| samples | $f / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $T_v / \text{K}$ | $Q_v / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | samples | $f / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $T_v / \text{K}$ | $Q_v / \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
|---------|------------------------------------|------------------|--------------------------------------|---------|------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
| 1       | 1016.0                             | 2661             | 3352.4                               | 7       | 1087.2                             | 2971             | 3877.7                               |
| 2       | 1024.4                             | 2687             | 3390.8                               | 8       | 1094.6                             | 3004             | 3920.6                               |
| 3       | 1034.6                             | 2722             | 3442.5                               | 9       | 1103.2                             | 3045             | 3974.0                               |
| 4       | 1043.0                             | 2748             | 3480.7                               | 10      | 1062.3                             | 2848             | 3697.2                               |
| 5       | 1052.6                             | 2782             | 3531.3                               | 11      | 1045.4                             | 2768             | 3574.7                               |
| 6       | 1080.3                             | 2939             | 3836.3                               | 12      | 1025.2                             | 2678             | 3435.7                               |

Note: 1)  $f$  is gunpowder impetus; 2)  $T_v$  is explosion temperature; 3)  $Q_v$  is explosion heat.

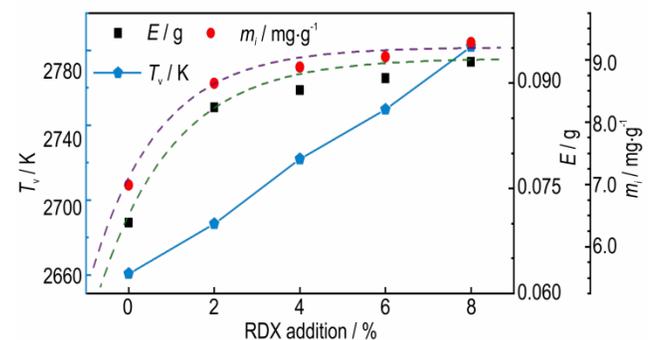


图 2 RDX 含量与发射药爆温  $T_v$ 、烧蚀量  $E$ 、质量烧蚀率  $m_i$  的关系

Fig. 2 The relationship between RDX component and explosion temperature, erosion and its rate

增加约 2.5%。

掺入少量 RDX 对发射药烧蚀试验的破孔时间、发射药燃气组成几乎无影响, 然而对比无 RDX 的样品, 发现含 2% RDX 的样品烧蚀率增加约 23%, 显然超出了发射药爆温的影响范畴。结合前人的研究, 推测可能与发射药燃气组成以及固体颗粒燃尽程度相关, 未来将进一步探索造成烧蚀性突变可能的原因。

#### 2.2.2 NQ 含量的影响

NQ, 化学式为  $\text{CH}_4\text{N}_4\text{O}_2$ , 为白色结晶性粉末, 含氮量 53.85%, 生成焓为  $-892.53 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 火药力较

NC、NG低。实验设计了不同NQ含量的6#~9#发射药样品,通过烧蚀管法获得了各样品的烧蚀性。

使用1%NQ代替NC,使得发射药的火药力降低 $1.38 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,爆温降低 $9.10 \text{ K}$ ;使用1%NQ代替NG,则使得火药力降低 $2.15 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,爆温降低 $16.57 \text{ K}$ 。通过计算发现,NQ含量增加5%,发射药燃气组成变化较小,燃气物质的量仅降低 $0.002 \text{ mol}$ ,显然可以忽略发射药燃气组成的影响。由图3可知,NQ含量的增加会使得发射药爆温降低,且呈现线性关系,同时NQ含量的增加会引起发射药烧蚀性的降低。不难发现发射药爆温与烧蚀性之间存在线性关系,相关系数 $>0.995$ 。结果表明,NQ含量增加5%,爆温降低约 $35 \text{ K}$ ,烧蚀降低约 $1.67\%$ 。

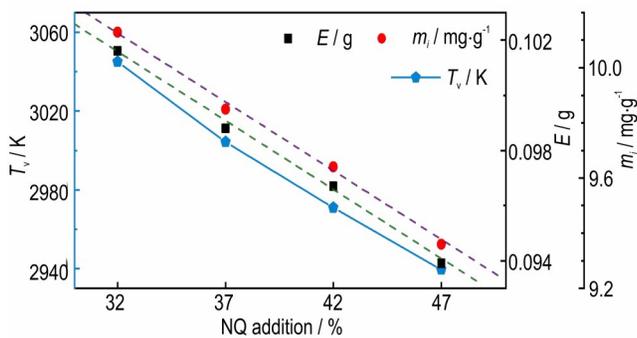


图3 NQ含量与发射药爆温 $T_v$ 、烧蚀量 $E$ 、质量烧蚀率 $m_i$ 的关系  
Fig.3 The relationship between NQ component and explosion temperature, erosion and its rate

### 2.2.3 DOP含量的影响

DOP,化学式为 $\text{C}_{24}\text{H}_{38}\text{O}_4$ ,为无色透明液体,氮含量0,生成焓为 $-2756.2 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。DOP的加入能够使得发射药容易成型,是发射药中常用的增塑剂。由于DOP生成焓为负值,加入少量DOP能够小幅降低发射药的爆温,进而实现降低发射药烧蚀性。为了更加清楚地掌握影响规律,对DOP含量不同的6#、10#~12#发射药样品的烧蚀性进行研究。

如图4所示,DOP含量增加,发射药爆温随之降低,同时发射药烧蚀性也随之降低。通过线性回归分析,发现DOP含量的增加与爆温的降低呈线性关系,与烧蚀量的降低的线性关系吻合良好。同时,由于DOP含量较低,对于发射药燃气组成影响较低,在此忽略不计。进一步分析发现,发射药爆温与烧蚀性间存在良好的线性关系,相关系数为 $0.988$ 。结果表明,DOP含量增加1%,爆温降低 $2.99\%$ ,烧蚀约降低 $7.01\%$ 。

### 2.3 爆温对发射药烧蚀性影响

目前国内外研究表明发射药爆温是影响烧蚀性的

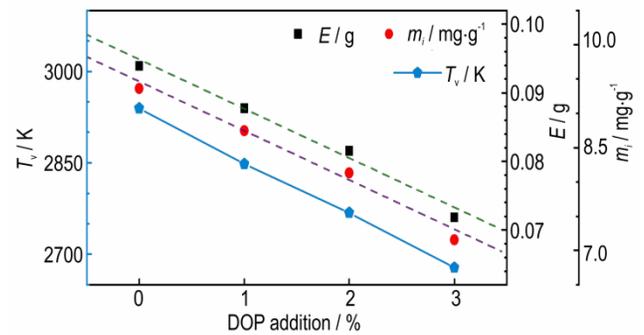


图4 DOP含量与发射药爆温 $T_v$ 、烧蚀量 $E$ 、质量烧蚀率 $m_i$ 的关系  
Fig.4 The relationship between DOP component and explosion temperature, erosion and its rate

主要因素<sup>[14]</sup>。发射药的爆温影响着身管内膛壁面的最高温度,而后者控制着烧蚀程度。研究表明,发射药燃烧过程中大约15%的热能被膛壁吸收,进而形成了热应力、热熔化、热相变等现象,导致身管烧蚀严重<sup>[15]</sup>。发射药爆温越高,其燃烧过程中释放的热量越大,烧蚀管内膛壁吸收热量加剧,表面温度升高,导致机械强度下降,进而在热作用下导致表层金属融化。同时发射药燃气在高温高压下与膛壁表层发生化学反应,在膛壁内层发生扩散过程,两个过程的反应速率均与温度呈正相关,因此加剧了烧蚀。

由于组分含量改变与发射药爆温、烧蚀性间存在良好的线性或指数关系,因此建立试验用发射药样品的爆温与烧蚀性间的关系。根据半密闭爆发器烧蚀试验数据绘制发射药烧蚀量 $E$ 、质量烧蚀率 $m_i$ 与爆温 $T_v$ 的关系曲线,对该曲线同时采用线性或非线性回归分析,发现均有极高的相关性( $R^2>0.995$ )。结合Lawton等<sup>[15]</sup>研究,针对研究体系的不同,引入体系常数作为修正因子,定义了一种烧蚀预测公式:

$$\ln m_i = \ln A + 0.5bT_v/B_0 \quad (4)$$

式中, $m_i$ 为质量烧蚀率, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $A$ 为与发射药燃气组成相关的烧蚀系数, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;  $T_v$ 是发射药爆温, $\text{K}$ ;  $B_0$ 为膛壁热硬度系数, $\text{K}^{-1}$ ;  $b$ 为与发射药组成相关的体系常数,无量纲;  $B_0=69 \text{ K}^{-1}$ 。

其中,对于膛壁热硬度系数 $B_0$ ,由于国内相关研究较少,且未针对某一炮钢进行具体分析。因此,本研究采用美国炮钢在 $109.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的硬度系数 $69 \text{ K}^{-1}$ ,若采用英国炮钢在 $104 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的硬度系数 $68 \text{ K}^{-1}$ 相差不大,对本研究无影响<sup>[15]</sup>。

国外研究发现身管内膛表面最高温度与发射药爆温相关,且大约为发射药爆温的 $1/3$ <sup>[16]</sup>,因此可以用发射药爆温代替内膛表面最高温度,在(1)式中进行讨

论。同时试验中装药量 $\omega$ 基本相同( $\Delta\omega=0.0008\text{ g}$ ),烧蚀量、质量烧蚀率随爆温变化趋势基本相同。建立烧蚀量的对数 $\ln E$ 、质量烧蚀率的对数 $\ln m_i$ 的对数与发射药爆温 $T_v$ 的关系,分别如图5a、5b所示, $\ln E$ 、 $\ln m_i$ 与 $T_v$ 呈线性关系。发现三基发射药样品的 $\ln E$ 、 $\ln m_i$ 与 $T_v$ 的线性相关性好,相关系数分别 $>0.977$ 、 $0.997$ 。因此,可以认为发射药爆温与烧蚀性呈指数关系。

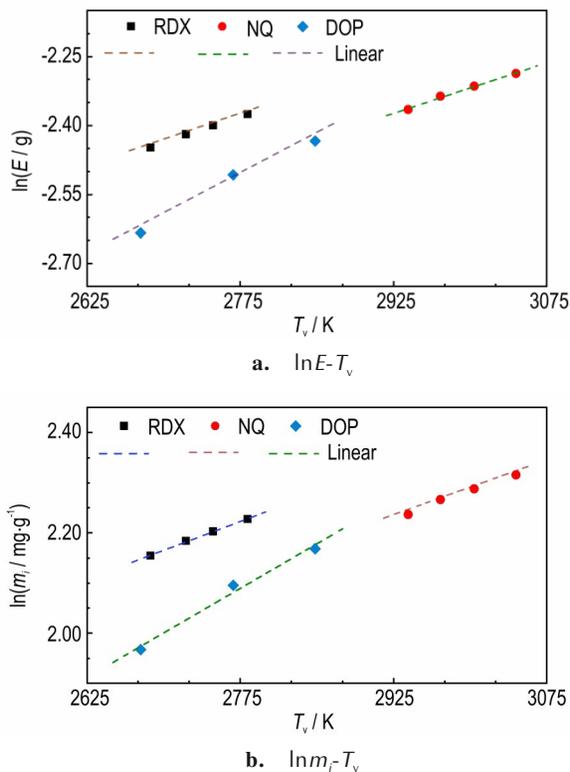


图5  $\ln E$ 、 $\ln m_i$ 与爆温 $T_v$ 的关系

Fig. 5 Relationship between the logarithm of the erosion mass, rate of erosion mass and explosion temperature

根据图5a、5b可以看出,1#~12#发射药样品烧蚀性的对数均随爆温变化呈现出良好的线性关系,其中增塑剂DOP的烧蚀性-爆温曲线斜率较高能组分RDX、NQ的曲线大,DOP的非高能及不含氮的特性使得其与添加高能组分的样品呈现出不完全相同的变化趋势。针对不同组分体系自身特性的不同,分别对图5b中的烧蚀-爆温曲线采取线性回归分析,并结合提出的预测公式(4)得到含有具体参数的关系式(5)~(7):

$$\ln m_i = 0.099 + 7.65 \times 10^{-4} T_v \quad (5)$$

$$\ln m_i = 0.078 + 7.35 \times 10^{-4} T_v \quad (6)$$

$$\ln m_i = -1.197 + 1.18 \times 10^{-3} T_v \quad (7)$$

式中, $m_i$ 为质量烧蚀率, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $T_v$ 是发射药爆温,K;式(5)~(7)依次为含RDX、不含RDX及NQ、含DOP发射药。

对RDX体系而言,其燃气相关系数 $A$ 为 $1.104\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,体系常数 $b$ 为 $0.106$ ;对NQ体系而言,其燃气相关系数 $A$ 为 $1.081\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,体系常数 $b$ 为 $0.101$ ;对DOP体系而言,其燃气相关系数 $A$ 为 $0.302\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,体系常数 $b$ 为 $0.163$ 。不难看出,RDX、NQ的燃气相关系数较为接近,与DOP相差较大,认为其与氮含量相关性较高,后续可进一步开展实验确定燃气组成的具体影响。而RDX、NQ的体系常数相对DOP较小,认为其在相同温度变化下烧蚀特性增加较小,说明添加RDX、NQ能够在保证能量特性不降低的同时,烧蚀性能增加幅度较小,对身管使用寿命影响较小。

将2700、2850、3000 K代入式(2)~(4),可以发现含RDX发射药的烧蚀性在同温度条件下最大,含NQ发射药的烧蚀性始终维持在较低水平。由于发射药能量输出特性间存在强正相关性,在相同爆温条件下,其能量特性维持于同一水平,故可以采用NQ代替部分RDX实现降低发射药烧蚀。由于烧蚀管采用炮钢材料,烧蚀管表面温度达到770 K时,会发生晶型转变,到达1000 K时会发生氧化、碳化等过程,对于不同体系其化学反应程度不同,烧蚀过程不完全相同,因而造成体系常数的差异。因此,对于发射药燃气对烧蚀性影响有待进一步深入研究,对于发射药烧蚀过程的检测技术有待进一步开发。

### 3 结论

本试验通过设计RDX、NQ以及DOP含量不同的三基发射药样品,并采用半密闭爆发器测试烧蚀性能,结合当前已有测试技术,分析了发射药组分含量改变引起的爆温改变对烧蚀性影响。

(1)高能组分含量增加1%,含RDX发射药爆温增加0.59%,烧蚀增加1.23%;含NQ发射药爆温降低0.23%,烧蚀降低0.56%;加入2%RDX与未加入RDX相比,发射药烧蚀增加23.38%。增塑剂DOP含量增加1%,发射药爆温降低2.99%,烧蚀降低7.01%。DOP的非高能特性实现了发射药烧蚀的降低,根源在于发射药爆温的降低。

(2)三基发射药的爆温与烧蚀的相关性强,质量烧蚀率的对数与发射药爆温成正比,对于RDX、NQ、DOP体系,其体系常数分别为0.106、0.101、0.163。

(3)发射药的烧蚀过程是一个多因素耦合作用,对任一因素调节,其余因素均会随之改变。同时,发射药燃气组成、燃气压力、颗粒燃尽程度等变化对烧蚀的

影响关系较为复杂,各因素作用关联性强,目前难以进行单独的定量讨论。后续研究中需要进一步开展燃气组成、压力等变化对发射药烧蚀特性的影响。

#### 参考文献:

- [1] 樊磊,刘恩锦,刘卫明,等. 大口径机枪枪管寿命趋势分析[J]. 弹道学报, 2009, 21(3): 39-43.  
FAN Lei, LIU En-jin, LIU Wei-ming. Performance decay analysis of a large caliber machine gun barrel in lifetime[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(3): 39-43.
- [2] 宋彦明,温钢柱,张杰. 大口径火炮身管寿命提升技术探讨[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 1-9.  
SONG Yan-ming, WEN Gang-zhu, ZHANG Jie. Technologies to increase barrel life of large-calibre gun[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(7): 1-9.
- [3] 李洪广,闫军,杜仕国,等. 火炮身管缓蚀剂技术研究进展[J]. 火炮发射与控制学报, 2012, (4): 103-106.  
LI Hong-guang, YAN Jun, DU Shi-guo. Research advance of erosion inhibitor technology in gun barrel[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2012, (4): 103-106.
- [4] JAISWAL G, SHAIKH M. RDX Based Enhanced energy propellant for tank gun ammunition[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(3): 472-479.
- [5] 龚长红,杨云飞,黄林昊. 现代火炮膛烧蚀磨损机理及控制措施[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(11): 127-129.  
GONG Chang-hong, YANG Yun-fei, HUANG Lin-hao. Modern artillery bore erosion wear mechanism and control measures[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(11): 127-129.
- [6] 张喜发,卢兴华. 火炮烧蚀内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 8-9.  
ZHANG Xi-fa, LU Xing-hua. Interior Ballistics of Erosion Guns [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 8-9.
- [7] JOHNSTON I A. Understanding and Predicting Gun Barrel Erosion [R]. DSTO-TR-1757: 2005.
- [8] 刘靖,黄振亚,汪俊杰,等. 三基发射药烧蚀性影响因素的实验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 392-396.  
LIU Jing, HUANG Zhen-ya, WANG Jun-jie. Experimental study on influence factors of triple base propellant erosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2014, 22(3): 392-396.
- [9] GARIMA J, MUNIS A. RDX based enhanced energy propellant for tank gun ammunition [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45: 472-479.
- [10] KIMURA J, ARISAWA H. Applicability of the Hydrogen Gas Erosion Theory to Conventional Gun Propellants [C]//19th International Symposium of Ballistics. Interlaken, Switzerland: American Defense Preparedness Association, 2001: 155-162.
- [11] LAWTON B. Simulation of Gun Barrel Erosion in a Vented Vessel [C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Ballistics. Brussels, Belgium: International Ballistics Society, 1989: 283-299.
- [12] 国防科学技术工业委员会. GJB 770B-2005: 火药试验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 2005.  
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. GJB 770B-2005: Propellant test method[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry Military Standard Publishing Department, 2005.
- [13] 国家国防科技工业局. WJ/Z 259-2021: 发射药烧蚀性试验[S]. Beijing: 中国标准出版社, 2021.  
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. WJ/Z 259-2021: Test method of erosion characteristics of propellant [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [14] 董悉倩. 火药燃气对身管材料化学烧蚀特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.  
DONG Xi-qian. Research on the Chemical Ablation Characteristics of the Gun Barrel Material by Propellant Gas[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [15] LAWTON B. Thermo-chemical erosion in gun barrels [J]. *Wear*, 2001, 251(1): 827-838.
- [16] JARAMAZ S, DEJAN M, ELEK P. Determination of gun propellants erosivity: Experimental and theoretical studies[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34: 760-765.

## Thermal Erosion Characteristics and Variation Law of Triple Base Propellant

WU Rui, XIAO Yi-jie, LI Qiang, YUAN Mao-bo, LIU Bo, ZHANG Yu-cheng

(Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to investigate the thermal erosion characteristics and variation law of triple base propellant, various kinds of gun propellants with different components content were prepared. The erosion characteristics were determined through simulated test in a semi-closed bomb. The analysis reveals the impact of energy component and plasticizer content on gun propellant explosion temperature, and the impact of explosion temperature on erosion characteristics. The results indicate that changes in the explosion temperature of gun propellant, attributed to variations in cyclotrimethylenetrinitramine (RDX), nitroguanidine (NQ) and dioctyl phthalate (DOP) content, significantly affect erosion characteristics. An increase of 1% in RDX content results in an increase in explosion temperature by 0.59% and an increase in erosion rate by 1.23%. Compared with the absence of RDX, the erosion rate of 2% RDX-containing propellant increase 23.38%. Notably, an increase of 1% in NQ content reduces the explosion temperature by 0.23% and the erosion rate by 0.56%. An increase of 1% in DOP content reduces the explosion temperature by 2.99% and the erosion rate by 7.01%. For the triple base propellants within the range of explosion temperature from 2600-3100 K, an exponential relationship between the rate of erosion mass and explosion temperature is established, and characteristic coefficients of RDX, NQ, DOP system is given respectively, which is 0.106, 0.101, 0.163.

**Key words:** triple base propellant; erosion characteristics; explosion temperature; energetic component; plasticizer

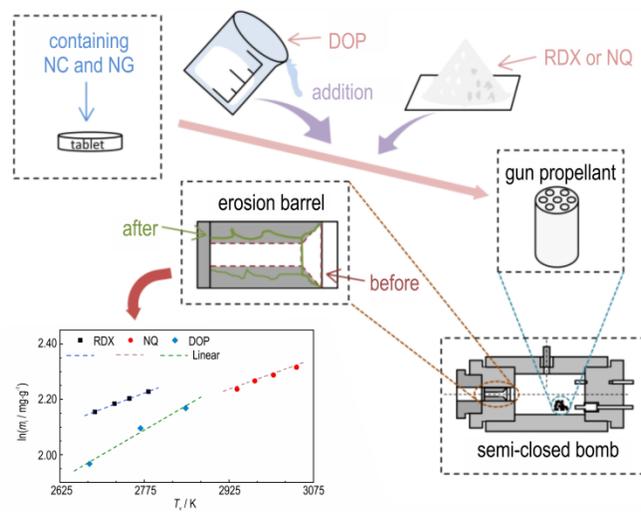
**CLC number:** TJ55;TQ562

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024033

(责编:姜梅)

图文摘要：



The erosion characteristic of gun propellant was tested by semi-closed bomb, the gun steel was selected as the material of barrel. The erosion changes caused by explosion temperature, attributed to different energetic components and plasticizer content, in triple base propellants were analyzed. The relationship between component content and explosion temperature of triple base propellant was studied. The relationship between erosion and explosion temperature of three systems was presented.