

文章编号:1006-9941(2023)11-1134-07

## 某中小口径武器用梯度硝基发射装药效应

李世影<sup>1,2</sup>,肖忠良<sup>1,2</sup>,李宇<sup>1,2</sup>,丁亚军<sup>1,2</sup>,石玉东<sup>3</sup>,赵剑春<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学 特种能源材料教育部重点实验室, 江苏 南京 210094; 3. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646003)

**摘要:** 针对某中小口径武器发射烟焰大、刺激性气味强等问题,采用化学脱硝法,制备了不同脱硝程度的梯度硝基七孔发射药,对其理化性能、静态燃烧性能、内弹道性能、发射有害现象进行了研究,并基于最小自由能法,研究了樟脑钝感剂用量与脱硝程度对发射药可燃气体(CO、H<sub>2</sub>)含量、未氧化碳值的影响规律。结果表明:随着脱硝程度的增加,发射药的爆热从4001 J·g<sup>-1</sup>降低至3517 J·g<sup>-1</sup>,弧厚从0.92 mm降低至0.89 mm、安定剂含量从2.60%降低至1.95%、安定性未发生变化,最大动态活度对应的相对压力 $B_m$ 增加至0.66,燃烧渐增性逐渐提升;在相当膛压下,发射药燃烧渐增性越好,弹丸初速越高,并建立了装药量、膛压、初速之间的对映耦合关系,获得了梯度硝基发射药内弹道性能的数字表达与控制方法;当爆热值相当时,与樟脑钝感发射药相比,梯度硝基发射药燃气中可燃气体含量低、未氧化碳含量少;射击试验中发现,梯度硝基发射药火焰小、刺激性气味小,具有较少的发射有害现象。

**关键词:** 中小口径武器;梯度硝基发射药;理化性能;燃烧性能;内弹道性能;发射有害现象

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2022243

## 0 引言

中小口径武器是巷战的火力核心和近程防空系统的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。目前,中小口径武器用发射药普遍采用小尺寸的粒状发射药,如球形、单孔、七孔粒状发射药等,其起始燃面和起始燃速均较大,燃烧渐增性较差,难以实现低膛压、高初速的内弹道性能<sup>[3-5]</sup>。为此,研究者将钝感剂渗入发射药表层,降低表面燃速,实现了渐增性燃烧,有效提升了武器系统内弹道性能<sup>[6-7]</sup>。然而,钝感剂氧平衡低、难分解,发射药中因添加了大量的钝感剂,使其在射击过程中伴随明显炮口焰、浓炮口烟及强刺激性气味,不仅暴露了己方阵地、降低瞄准精度,而且影响射手身心健康,破坏生态环境<sup>[8-9]</sup>。

针对身管武器用钝感发射药上述发射有害现象,

研究人员开展了大量的研究工作。Liang等<sup>[7]</sup>设计并开发了含能复合钝感发射药,利用含能复合钝感剂氧平衡高、易于分解等优势,缓解了邻苯二甲酸二丁酯(DBP)钝感发射药发射烟雾浓度高、火焰强度大等问题。贺增弟等<sup>[10]</sup>开展了发射药氧平衡对枪口焰的影响规律研究,揭示了提高发射药体系氧平衡对降低枪口火焰的作用机制。王琼林等<sup>[11]</sup>研究了钝感剂种类和用量对枪口烟雾的影响,采用分子含氧量高、不含苯环的新型钝感剂,显著降低枪口烟雾。从上述研究中可以看出,提升发射药氧平衡可以有效减少发射有害现象。近年来,肖忠良等<sup>[12-16]</sup>将发射药表层中的硝酸酯基梯度水解脱除,实现表层燃速的渐进增加和渐增性燃烧。梯度硝基发射药因未添加易迁移、难分解及氧平衡低的钝感剂,具有贮存寿命长、发射有害现象少等特征,在某轻武器平台上,与DBP钝感发射药相比,枪口烟雾浓度低、火焰强度小,是一类具有广阔应用前景的新型发射药。但未见梯度硝基发射药在中小口径武器平台上的内弹道性能、发射有害现象等装药效应的相关研究。

在保证该武器内弹道性能的前提下,解决或缓解现有发射药发射有害现象具有一定的研究意义。本研究

收稿日期:2022-09-22;修回日期:2022-10-31

网络出版日期:2023-07-14

作者简介:李世影(1991-),男,博士后,主要从事发射药及装药研究。e-mail:lisy0613@njjust.edu.cn

通信联系人:肖忠良(1957-),男,教授,主要从事发射药及装药研究。e-mail:xzl@njjust.edu.cn

引用本文:李世影,肖忠良,李宇,等.某中小口径武器用梯度硝基发射装药效应[J].含能材料,2023,31(11):1134-1140.

Li Shi-ying, XIAO Zhong-liang, LI Yu, et al. Study on the Effect of Nitro Gradiantly Distributed Propellant Charge for a Small and Medium Caliber Weapon[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(11):1134-1140.

基于梯度硝基发射药技术,制备了适用于该武器平台的梯度硝基发射药,研究了脱硝程度、理化性能、静态燃烧性能、内弹道性能、发射有害现象(可燃气体、游离碳、刺激性气味等)之间的内在关系,建立了装药量、膛压、初速之间的对映耦合关系,获得了梯度硝基发射药内弹道性能的数字表达与控制方法,证实了梯度硝基发射药具有较少的发射有害现象。本研究有望为中小口径武器用梯度硝基发射药的制备及性能研究提供思路。

## 1 实验与理论计算

### 1.1 试剂与仪器

试剂:单基七孔发射药,泸州北方化学工业有限公司;水合肼,成都市科隆化学品有限公司;去离子水,自制;石墨,青岛天和达石墨有限公司。

仪器:JT-20型尺寸测试仪,贵州新天地光电科技有限公司;RF-C7000型氧弹量热仪,长沙瑞方能源科技有限公司;LC-100型液相色谱,上海伍丰科学仪器有限公司;JJZ20型安定性试验仪,太原先导自动控制设备有限公司;50 mL密闭爆发器,江西鑫源传感器有限责任公司;dimax S4型高速摄影仪,德国PCO公司。

### 1.2 样品制备

梯度硝基发射药采用化学脱硝法将发射药表层中硝化纤维素上的部分硝酸酯基水解为羟基,即将高氮量的硝化纤维素转变为低氮量的硝化纤维素,在发射药表层形成硝酸酯基含量由表及里梯度增加的结构,以获得燃速由慢到快的渐增性燃烧<sup>[12-15]</sup>。研究按照文献的方法<sup>[13]</sup>,称取单基七孔发射药置于反应釜内,配制不同浓度的水合肼反应液,反应液的质量为发射药质量的2倍,加入反应釜内。采用水浴循环系统对反应釜进行加热,搅拌,反应结束后,用70℃热水洗涤发射药后过滤,置于60℃水浴烘箱中干燥。通过调控反应液浓度、反应温度与反应时间获得不同脱硝程度的梯度硝基发射药。对干燥后的梯度硝基发射药进行光泽处理:称取发射药质量0.15%的石墨光泽发射药,光泽时间为30 min。不同脱硝程度的梯度硝基发射药依次命名为1#、2#、3#和4#。未脱硝发射药命名为0#。

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 理化性能测试

根据国家军用标准GJB770B-2005测试发射药的理化性能<sup>[17]</sup>。利用尺寸测试仪测试发射药弧厚;利用氧弹量热仪测试发射药爆热;利用液相色谱测试发射药中安定剂含量;利用安定性试验仪测试发射药安定性。

#### 1.3.2 燃烧性能测试

根据国家军用标准GJB770B-2005测试发射药燃烧性能<sup>[17]</sup>。利用50 mL密闭爆发器获取压力 $p$ 与燃烧时间 $t$ 的关系,通过公式(1)、公式(2)计算得到动态活度 $L$ 与相对压力 $B$ 。

$$L = \frac{1}{p \cdot p_m} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

$$B = \frac{p}{p_m} \quad (2)$$

式中, $p_m$ 为密闭爆发器实验最大压力,MPa。

#### 1.3.3 内弹道性能测试

根据国家军用标准GJB2179-94测试发射药的内弹道性能<sup>[18]</sup>。将发射药置于15℃恒温环境下保温24 h,以某中小口径武器弹道炮为试验平台,利用测压、测速系统分别获取不同装药量下的最大膛压 $p$ 与弹丸初速 $v$ 。

#### 1.3.4 炮口火焰测试

利用高速摄影仪对炮口火焰进行拍摄,高速摄像机的帧率调节为2000 fsp·s<sup>-1</sup>,通过图像像素尺寸标定获得最大火焰面积的图像。

### 1.4 理论计算方法

本研究的理论计算部分是根据最小自由能算法获得的<sup>[19]</sup>。基于硝化纤维素的含氮量与其爆热一一对应关系,利用梯度硝基发射药实测爆热值,反推发射药中硝化纤维素的平均含氮量,进而获得梯度硝基发射药的理论配方(1#-TC~4#-TC)。同样的,根据不同爆热值,反推樟脑钝感发射药中的樟脑用量,进而获得樟脑钝感发射药的理论配方(1#-C-TC~4#-C-TC)。根据理论配方计算可燃气体含量(CO和H<sub>2</sub>)、未氧化碳值含量及爆温。

## 2 结果与讨论

### 2.1 理化性能

对发射药0#、1#、2#、3#和4#的弧厚、安定剂含量、安定性、爆热和外挥发分进行了测试,结果见表1。从表1可以看出,随着脱硝程度的增加,梯度硝基发射药1#~4#的弧厚由0.91 mm减小到0.89 mm,这可能是因为发射药表层中硝酸酯基转变为羟基,氢键作用力增强,使得表层更加密实<sup>[13,15]</sup>。此外,发射药的爆热逐渐降低,因为随着脱硝程度增大,发射药表层硝化纤维素中能量基团(硝酸酯基)含量逐渐降低。脱硝后,梯度硝基发射药1#~4#的安定剂含量略有降低,但

表1 梯度硝基发射药理化性能

Table 1 The physicochemical properties of nitro gradiently distributed propellants

samples	mean web thickness / mm	content of stabilizer / %	discoloration time / min	explosion heat / $J \cdot g^{-1}$	content of volatile / %
0#	0.92	2.06	>70	4001	-
1#	0.91	2.01	>70	3858	1.13
2#	0.89	1.98	>70	3773	1.20
3#	0.90	1.96	>70	3624	1.17
4#	0.89	1.95	>70	3517	1.38

安定性未发生变化。从外挥发分结果来看,烘干后发射药外挥发分在1.13%~1.38%之间。

## 2.2 静态燃烧性能

利用密闭爆发器评估发射药的静态燃烧性能是考察发射药燃烧渐增性及是否适合武器平台的重要手段<sup>[17, 20]</sup>。发射药0#、1#、2#、3#和4#的动态活度-相对压力( $L-B$ )曲线及相关参数如图1所示。从图1a中可以看出,对于未脱硝发射药0#而言,虽然七孔药是燃面渐增型发射药,但是在端面燃烧、弧厚偏差和尺寸不

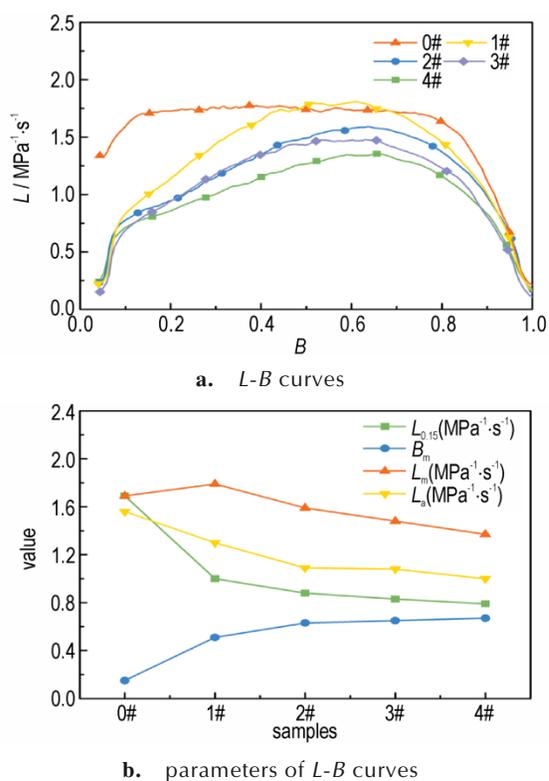


图1 发射药静态燃烧性能

Fig.1 The static combustion properties of propellants

$L_{0.15}$  is initial dynamic activity;  $B_m$  is relative pressure corresponding to maximum dynamic activity;  $L_m$  is maximum dynamic activity;  $L_a$  is an average dynamic activity

一致的影响下未表现出燃烧渐增性;对于梯度硝基发射药1#~4#而言,脱硝降低了发射药表层中硝酸酯基的含量,降低了表层燃速,起始燃气生成量较少,前期动态活度 $L$ 值均较低,随着燃烧层向内推进,相对压力 $B$ 值逐渐增大,燃速与燃面逐渐增大,燃气生成量逐渐增多,动态活度 $L$ 值逐渐提升,表现出较好的燃烧渐增性。图1b为 $L-B$ 曲线的相关参数,从图1b中可以看出,随着脱硝程度的增加,起始动态活度 $L_{0.15}$ 、最大动态活度 $L_m$ 、平均动态活度 $L_a$ 逐渐降低,最大动态活度对应的相对压力 $B_m$ 逐渐增大, $B_m$ 越大,燃烧渐增性越好。

## 2.3 常温内弹道性能

由内弹道学原理<sup>[21]</sup>可知,内弹道性能是考察发射药综合性能的重要手段,是发射药应用研究的重要环节,内弹道性能调控是实现武器内弹道性能要求的核心与关键<sup>[22]</sup>。在该中小口径武器平台上对发射药1#、2#、3#和4#进行常温内弹道试验,发射药1#、2#、3#和4#的装药量( $m$ )、膛压( $p$ )和弹丸初速( $v$ )如图2所示。从图2可以看出,梯度硝基发射药1#~4#样品随着装药量的增加,膛压与初速均逐渐提升,对于燃速调控渐增性发射药而言,燃烧渐增性的提升往往是通过降低发射药表层能量实现的,所以在相同压力下,脱硝程度越大的发射药所需装药量越大。

结合发射药的静态燃烧性能,当膛压相当时,随着梯度硝基发射药燃烧渐增性的提升,弹丸初速呈逐渐升高的趋势,符合燃烧渐增性发射药的设计原则:在燃烧前期,初始动态活度较低,这种压力增长特性有利于降低弹丸运动前火炮膛内的压力增长速率,降低火炮最大膛压;随着燃烧的进行,动态活度逐渐提升,压力持续增加,这在一定程度上可以抑制弹后压力的过快降低,有利于提高弹丸初速<sup>[23]</sup>。射击实验结束后,观察身管和炮口附近,均未发现剩药,这表明梯度硝基发

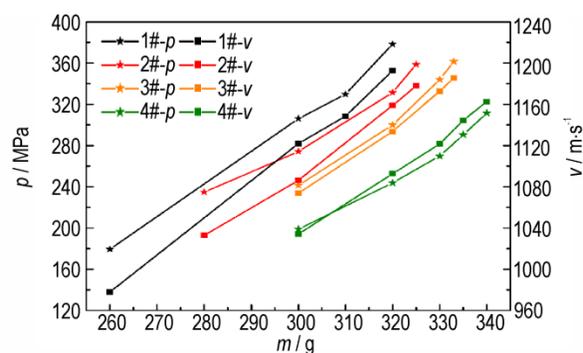


图2 梯度硝基发射药的装药量、膛压与初速

Fig.2 The mass of charge, bore pressure and muzzle velocity of nitro gradiently distributed propellants

射药尺寸设计满足该中小口径武器的设计需求。

为了进一步研究梯度硝基发射药装药量与膛压、膛压与初速的内在关系,分别选择二次函数、一元线性回归模型对装药量-膛压、膛压-初速数据进行分析,如图3和图4所示,拟合结果列于表2,从图3和表2可以看出,在实验范围内,发射药1#、2#、3#和4#的装药量与膛压均符合 $p=a^2m+bm+c$ 二次函数拟合方程,拟合相关系数 $R^2$ 均大于0.99,两者具有显著的相关性,此

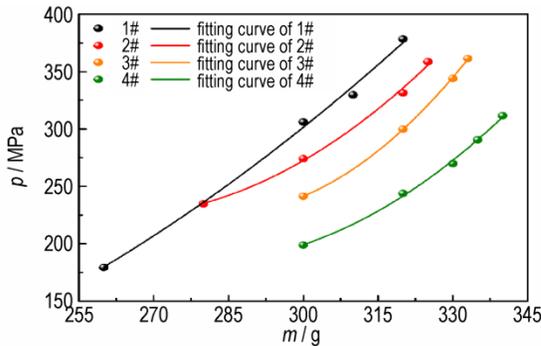


图3 梯度硝基发射药装药量与膛压拟合曲线

Fig.3 The fitting curves of bore pressure with respect to mass of charge for nitro gradiently distributed propellants

模型的建立为梯度硝基发射药在该武器平台上装药量优选、安全膛压下射击提供理论与实践支撑。从图4和表2可以看出,在实验范围内,发射药1#、2#、3#和4#的膛压与初速均符合 $v=ap+b$ 一元线性拟合方程,拟合相关系数 $R^2$ 均大于0.99,两者具有显著的相关性,此模型的建立为梯度硝基发射药在该武器平台上弹丸初速优选提供理论与实践支撑。上述两模型的建立为梯度硝基发射药内弹道性能的调控奠定了基础。

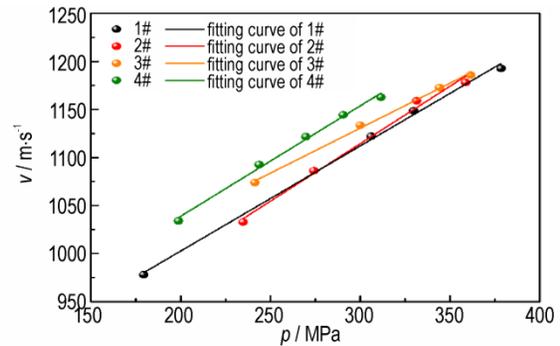


图4 梯度硝基发射药膛压与初速拟合曲线

Fig.4 The fitting curves of initial velocity with respect to bore pressure for nitro gradiently distributed propellants

表2 内弹道性能相关参数拟合结果

Table 2 The fitting results of internal ballistic performance parameters

samples	fitting curve equation of $p$ and $m$	$R^2$	fitting curve equation of $v$ and $p$	$R^2$
1#	$p=0.0108m^2-3.023m+233.45$	0.996	$v=1.09p+783.7$	0.998
2#	$p=0.0326m^2-17.046m+2452.65$	0.997	$v=1.20p+755.5$	0.992
3#	$p=0.0547m^2-31.029m+4624.03$	0.999	$v=0.94p+849.5$	0.997
4#	$p=0.0331m^2-18.379m+2737.41$	0.998	$v=1.15p+808.8$	0.995

Note:  $p$  is bore pressure.  $v$  is initial velocity.

### 2.4 炮口烟雾、火焰及刺激性气味分析

发射药燃气中一氧化碳和氢气是形成炮口焰的主要原因之一<sup>[24]</sup>,未氧化碳是形成炮口烟的主要原因之一<sup>[19]</sup>。针对该武器平台发射有害现象严重的问题,基于前期研究工作可知,发射药的脱硝是将表层高氮量硝化纤维素转变为低氮量硝化纤维素<sup>[12-14]</sup>,由于硝化纤维素的含氮量与其爆热一一对应,根据不同脱硝程度梯度硝基发射药实测爆热值反推理论计算样品的配方(1#-TC~4#-TC),反推爆热值相当的樟脑钝感样品配方(1#-C-TC~4#-C-TC),列于表3。

基于最小自由能算法,研究了不同脱硝程度、樟脑含量对发射药可燃气体(CO、H<sub>2</sub>)含量、未氧化碳含量、爆温( $T_v$ )的影响规律,理论计算结果如图5所示。从图5a~图5c中可以看出,随着樟脑含量和脱硝程度的增加,CO、H<sub>2</sub>和未氧化碳值逐渐增加,这是因为钝

表3 不同配方梯度硝基发射药和樟脑钝感发射药爆热的理论计算数值

Table 3 Theoretical calculation on explosion heat of nitro gradiently distributed propellants and camphor-deterred propellants with different formulations

samples	NC /%	N /%	diphenylamine /%	camphor /%	$Q_v$ /J·g <sup>-1</sup>
0#-TC	98.00	13.15	2	-	3996.67
1#-TC	98.00	12.91	2	-	3857.56
1#-C-TC	96.74	13.15	2	1.26	3858.08
2#-TC	98.00	12.76	2	-	3773.07
2#-C-TC	95.97	13.15	2	2.03	3773.38
3#-TC	98.00	12.50	2	-	3622.50
3#-C-TC	94.60	13.15	2	3.40	3622.69
4#-TC	98.00	12.31	2	-	3515.64
4#-C-TC	93.63	13.15	2	4.37	3516.00

Note: NC is content of nitrocellulose. N is nitrogen content of nitrocellulose.  $Q_v$  is explosion heat.

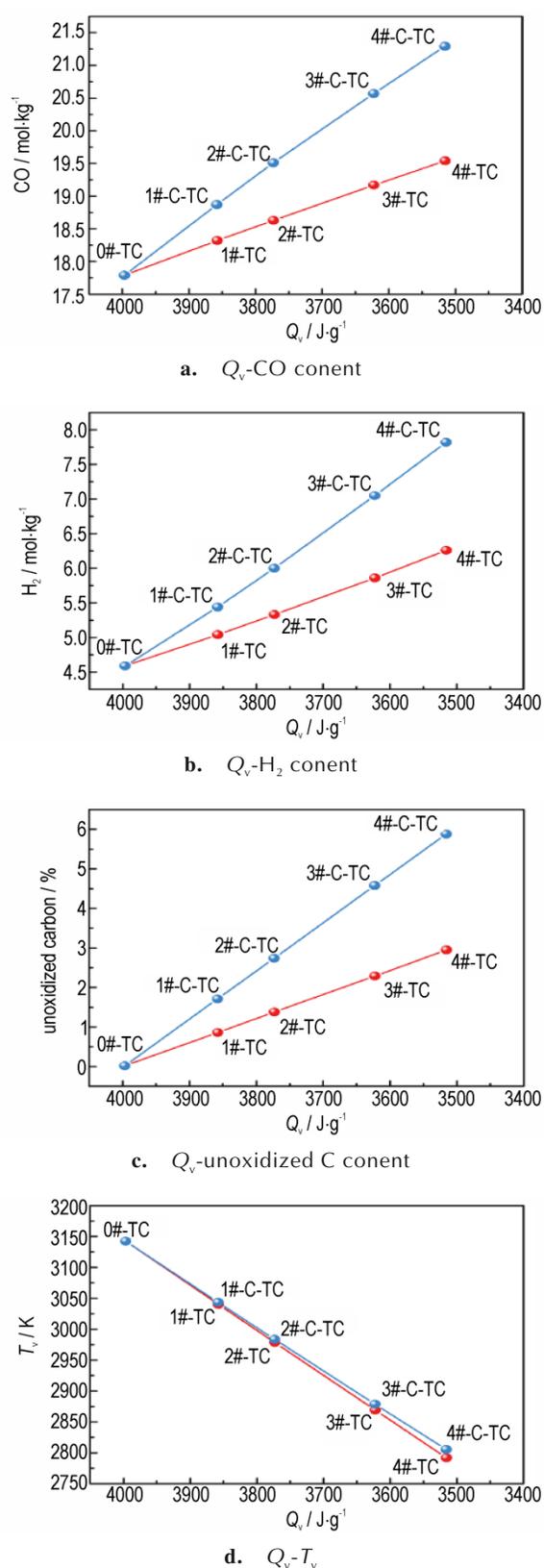
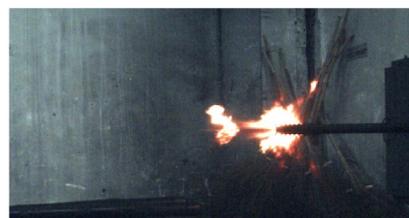


图5 不同发射药燃气中CO, H<sub>2</sub>, 未氧化碳值和爆温  
Fig.5 The content of CO, H<sub>2</sub>, unoxidized carbon in gaseous products and detonation temperature for different propellants

感和脱硝都是采用降低发射药表层能量的方式来实现发射药的燃烧渐增性,进而实现“高初速、低膛压”内弹道性能,这些方法无疑降低了发射药的氧平衡,随着钝感剂含量和脱硝程度的增加,发射药在燃烧过程中不能被完全氧化的碳、氢元素物质量增大,生成一氧化碳、氢气和未氧化碳的含量增加。但需要指出的是,与爆热值相当的樟脑钝感发射药相比,梯度硝基发射药的可燃气体含量及未氧化碳值大幅降低,当爆热约为3515 J·g<sup>-1</sup>时,一氧化碳含量降低8.2%,氢气含量降低19.9%,未氧化碳值降低49.8%。图5d为不同样品的爆温曲线,梯度硝基发射药与钝感发射药的爆温相当,不会增大身管的烧蚀。与此同时,对炮口火焰和射击完的刺激性气味进行评估,樟脑钝感发射药、梯度硝基发射药的炮口火焰如图6a和图6b所示,梯度硝基发射药炮口火焰较小,这与理论计算结果一致;樟脑钝感发射药具有强烈的刺激性气味,梯度硝基发射药无强烈的刺激性气味。通过上述分析可知,基于该武器平台设计的梯度硝基发射药具有发射低有害现象特征。



a. the muzzle flame of camphor-deterred propellant



b. the muzzle flame of nitro gradiently distributed propellant

图6 两类发射药的炮口火焰

Fig.6 The muzzle flame captured for two kinds of propellants

### 3 结论

(1) 随着脱硝程度的增加,发射药的爆热从4001 J·g<sup>-1</sup>降低至3517 J·g<sup>-1</sup>,弧厚从0.92 mm降低至0.89 mm、安定剂含量从2.60%降低至1.95%、安定性未发生变化,最大动态活度对应的相对压力 $B_m$ 增加至0.66,燃烧渐增性逐渐提升。

(2) 分别利用二次函数、一元线性回归模型对装

药量-膛压、膛压-初速数据进行分析,建立了装药量-膛压( $p=a^2m+bm+c$ )和膛压-初速( $v=ap+b$ )控制模型,拟合度相关系数 $R^2$ 均大于0.99,具有显著的相关性,为梯度硝基发射药内弹道性能研究建立了数字表达与控制方法。

(3) 基于最小自由能算法,与樟脑钝感发射药相比,梯度硝基发射药燃气中可燃气体含量低、未氧化碳值低,当爆热为 $3515\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,一氧化碳含量降低8.2%,氢气含量降低19.9%,未氧化碳值降低49.8%;从射击试验中可以看出,梯度硝基发射药炮口火焰小、刺激性气味弱,具有明显发射低有害现象的特征。

#### 参考文献:

- [1] 王泽山,何卫东,徐复铭.火药装药设计原理与技术[M].北京:北京理工大学出版社,2006.  
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. Theory and technology of propellant charge design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [2] 肖忠良.火炸药导论[M].北京:国防工业出版社,2019.  
XIAO Zhong-liang. The introduction of propellants and explosives [M]. Beijing: National Defense Industry, 2019.
- [3] 刘佳,马忠亮,代淑兰,等.弹药因素对5.8 mm步枪射击精度影响的因素及试验研究[J].兵工学报,2015,36(8):1569-1573.  
LIU Jia, MA Zhong-liang, DAI Shu-lan, et al. Theoretical and experimental study on the influence of ammunition on firing accuracy of 5.8 mm rifle [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(8): 1569-1573.
- [4] DEĞIRMENCI E. Effects of grain size and temperature of double base solid propellants on internal ballistics performance [J]. *Fuel*, 2015, 146: 95-102.
- [5] DEĞIRMENCI E, EVCİ C, İŞİK H, et al. Thermo-mechanical analysis of double base propellant combustion in a barrel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 1287-1299.
- [6] 梁昊,丁亚军,李世影,等.钝感双基发射药老化迁移机理及动力学过程[J].含能材料,2021,29(11):1080-1088.  
LIANG Hao, DING Ya-jun, LI Shi-ying, et al. Aging migration mechanism and kinetic process of deterred DB propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(11): 1080-1088.
- [7] LIANG H, DING Y, LI S, et al. Combustion performance of spherical propellants deterred by energetic composite deterring agents [J]. *ACS Omega*, 2021, 6(20): 13024-13032.
- [8] BROŽEK-MUCHA Z. A study of gunshot residue distribution for close-range shots with a silenced gun using optical and scanning electron microscopy, X-ray microanalysis and infrared spectroscopy [J]. *Science & Justice*, 2017, 57(2): 87-94.
- [9] AURELL J, HOLDER A L, GULLETT B K, et al. Characterization of M4 carbine rifle emissions with three ammunition types [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 112982-112991.
- [10] 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 and Propellants*, 2008, 31(6): 57-59.
- [11] 王琼林,刘少武,吴建军.钝感剂对发射药枪口烟雾特性影响的研究[J].火炸药学报,1998,21(3):18-20.  
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, WU Jian-jun. Study on effect of deterrents on gun muzzle smoke [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 1998, 21(3): 18-20.
- [12] 肖忠良,丁亚军,李世影,等.发射药表层梯度硝基裁剪方法与效应[J].中国材料进展,2022,41(2):92-97+139.  
XIAO Zhong-liang, DING Ya-jun, LI Shi-ying, et al. Gradient tailoring method and effect of nitro gradiently distributed propellant [J]. *Materials China*, 2022, 41(2): 92-97+139.
- [13] LI S, LI Y, DING Y, et al. One-step green method to prepare progressive burning gun propellant through gradient denitration strategy [J]. *Defence Technology*, 2023, 22: 135-143.
- [14] LI S, TAO Z, DING Y, et al. Gradient denitration strategy eliminates phthalates associated potential hazards during gun propellant production and application [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(7): 1156-1167.
- [15] 李世影,丁亚军,梁昊,等.梯度硝基发射药的设计原理与实现方法[J].兵工学报,2020,41(11):2198-2205.  
LI Shi-ying, DING Ya-jun, LAING Hao, et al. Design principle and realizable approach of nitro gradiently distributed propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(11): 2198-2205.
- [16] 史莹,范红蕾,任欣,等.梯度硝基球扁药中NG的扩散及对燃烧性能的影响[J].火工品,2022,44(2):43-47.  
SHI Ying, FAN Hong-lei, REN Xin, et al. Diffusion of NG in nitro gradiently distributed spherical pellets and its influence on combustion performance [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022, 44(2): 43-47.
- [17] 中国兵器工业集团.GJB 770B-2005:火药试验方法[S].国防科学技术工业委员会,2005.  
China North Industries Group Corporation Limited. GJB 770B-2005: Test method of propellant [S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defence. PRC, 2005.
- [18] 中国兵器工业集团.GJB 2179-94:炮用发射药与装药内弹道试验方法[S].国防科学技术工业委员会,1994.  
China North Industries Group Corporation Limited. GJB 2179-94: Interior ballistic test methods for solid propellant and charge for cannon [S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defence. PRC, 1994.
- [19] 王泽山,徐复铭,张豪侠.火药装药设计原理[M].北京:兵器工业出版社,1995.  
WANG Ze-shan, XU Fu-ming, ZHANG Hao-xia. Design principle of gunpowder charge [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1995.
- [20] TIRAK E, MONIRUZZAMAN M, DEĞIRMENCI E, et al. Closed vessel burning behavior and ballistic properties of artificially-degraded spherical double-base propellants stabilized with diphenylamine [J]. *Thermochimica Acta*, 2019, 680: 178347-178355.
- [21] 金志明.枪炮内弹道学[M].北京:北京理工大学出版社,2004.  
JIN Zhi-ming. Interior ballistics of guns [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [22] 王泽山.火炸药科学技术[M].北京:北京理工大学出版社,2002.  
WANG Ze-shan. Science and technology of explosives [M]. Beijing: Beijing Institute of technology Press, 2002.
- [23] 郑启龙,田书春,周伟良,等.GAP基聚氨酯包覆单基发射药能

量与燃烧性能[J]. 含能材料, 2016, 24(8): 787-792.  
ZHENG Qi-long, TIAN Shu-chun, ZHOU Wei-liang, et al. Energy and combustion properties of the GAP-base polyurethane coated single-base propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(8): 787-792.

[24] 郑文芳, 郭长平, 蔺向阳, 等. DBP对发射药燃烧可燃气体产物

影响的理论研究[J]. 火炸药学报, 2011, 34(4): 78-82.

ZHENG Wen-fang, GUO Chnag-ping, LIN Xiang-yang, et al. Theoretical study on the effect of dibutyl phthalate on the generation of combustible gas in the combustion of propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011, 34(4): 78-82.

## Study on the Effect of Nitro Gradiently Distributed Propellant Charge for a Small and Medium Caliber Weapon

LI Shi-ying<sup>1,2</sup>, XIAO Zhong-liang<sup>1,2</sup>, LI Yu<sup>1,2</sup>, DING Ya-jun<sup>1,2</sup>, SHI Yu-dong<sup>3</sup>, ZHAO Jian-chun<sup>3</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Special Energy Materials (Nanjing University of Science and Technology), Ministry of Education, Nanjing 210094, China; 3. Lu Zhou North Chemical Industries Co., Ltd., Luzhou 646003, China)

**Abstract:** In response to the serious problems involving large smoke, flame and pungent smell known for a small and medium caliber weapon, the single base seven holes propellants were treated by chemical denitration method to prepare nitro gradiently distributed propellants with different denitration degrees. Their physicochemical, static burning properties, interior ballistic performance and emission hazard phenomenon were investigated. Based on the minimum free energy method, the influence of amount of camphor agent and the denitration degree on the combustion gases (CO, H<sub>2</sub>) produced and unoxidized carbon were studied. The results show that with the increase of denitration degree, the explosion heat of propellants decreases from 4001 J·g<sup>-1</sup> to 3517 J·g<sup>-1</sup>, the web thickness reduces from 0.92 mm to 0.89 mm, the content of stabilizer declines from 2.60% to 1.95%, the stability remains unchanged,  $B_m$  value increases to 0.66, and the progressive burning property enhances gradually; the better progressive burning of propellants, the higher initial velocity of the projectile under the same bore pressure condition was observed, the numerical expression and control method of ballistic performance for this investigated propellant were obtained based on the enantiomorphic coupling relationship established between the mass of charge, bore pressure and initial velocity; in comparison with the camphor-deterred propellants, the nitro gradiently distributed propellants demonstrated the promising characteristics of lower concentration of combustible gas, and less unoxidized carbon; in addition, the small flame, less irritating odour and low emission harmful phenomena are found for nitro gradiently distributed propellants during the firing test.

**Key words:** small and medium calibre weapon; nitro gradiently distributed propellants; physicochemical properties; combustion performances; internal ballistic performance; emission harmful phenomena

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022243

(责编: 王馨逸)