

文章编号:1006-9941(2024)08-0787-08

含叠氮增塑剂 AZDEGDN 发射药的制备和燃烧性能

任家桐,崔鹏腾,张衡,丁峰,高宇晨,杨伟涛

(西安近代化学研究所,陕西西安710065)

摘要: 为了探索新型叠氮增塑剂 1,5-二叠氮基-3-氧杂戊烷(AZDEGDN)在发射药配方中的应用前景,采用半溶剂法制备了以 AZDEGDN 为增塑剂的双基和三基发射药,并对含 AZDEGDN 发射药的形貌、密度及在不同温度下的静态燃烧性能进行了研究。结果表明,使用半溶剂法挤出成型工艺能够制备得到外观无明显瑕疵的含 AZDEGDN 的双基发射药(ADG-2)和三基发射药(ADG-3)。SEM 观测显示,固体添加剂黑索今(RDX)和硝基胍(NGu)能够较为均匀地分布在 ADG-3 发射药内部。密度测试显示,ADG-2 和 ADG-3 发射药的密度分别为 $1.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,均接近理论密度,说明发射药内部结构较为致密。密闭爆发器试验表明,常温(20℃)下,ADG-2 和 ADG-3 发射药的静态燃烧性能均较为稳定,燃速随着压强增大而均匀上升,未出现明显的燃速-压强曲线(u - p 曲线)转折现象,燃烧最大压强分别为 237.71 MPa 和 263.80 MPa,燃速压强指数分别为 0.9098 和 0.9754;RDX 和 NGu 的添加使得含 AZDEGDN 发射药在低压段(50~100 MPa)和中压段(100~150 MPa)的燃速压强指数分别增大了 15.5% 和 10.9%,而在高压段(150~ p_{dpm} MPa)的燃速压强指数减小了 4.2%;高温(50℃)和低温(-40℃)下,ADG-3 发射药仍然能够保持稳定燃烧,燃烧最大压强由常温下的 263.80 MPa 分别变为 265.92 MPa 和 261.13 MPa,燃烧时间由 14.70 ms 分别变为 13.52 ms 和 16.40 ms,燃速压强指数由 0.9754 分别变为 0.9464 和 0.9938。可见含 AZDEGDN 发射药的制备方法简单成熟,结构致密无瑕疵,静态燃烧性能稳定,有望成为一种新型低烧蚀发射药。

关键词: 发射药;叠氮增塑剂;1,5-二叠氮基-3-氧杂戊烷(AZDEGDN);半溶剂法;燃烧性能

中图分类号: TJ55;O62

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024076

0 引言

含能增塑剂是发射药的重要功能材料组分,对发射药的能量性能、燃烧性能、烧蚀性能、力学性能、不敏感性能等影响显著。目前,硝化甘油(NG)、硝化二乙二醇(DEGDN)、硝化三乙二醇(TEGDN)等硝酸酯增塑剂是发射药普遍使用的含能增塑剂^[1-3],具有氧平衡高的优势,然而其含氮量较低且爆温较高,造成发射药烧蚀作用严重,影响武器身管寿命。相比而言,叠氮增塑剂含有叠氮基团,不但拥有生成焓高、热稳定性良好的优势,而且自身含氮量高,有利于降低发射药的燃烧

火焰温度,同时由于燃烧产物中 N_2 的比例大,能够进一步通过氮化反应提高身管材料的强度,从而有效减弱燃气对武器身管的烧蚀作用^[4-5],在低烧蚀发射药配方中具有一定应用前景。

近年来,国内外相继报道了双(1,3-二叠氮基-2-丙基)缩甲醛(BDPF)、1,3-二叠氮基-2-乙基-2-硝基丙烷(DAENP)、叠氮新戊醇乙酸酯(TAP-Ac)等多种新型叠氮增塑剂的合成与性能^[6-19]。例如,Wang 等^[9]以 3-溴-2,2-双(溴甲基)丙醇为原料,合成了叠氮增塑剂 2-叠氮乙酸-3-叠氮基-2,2-双(叠氮甲基)丙酯(ABAMPA),发现其含氮量高达 57.1%,生成焓高达 $1725\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,撞击感度和摩擦感度低,且与含能粘结剂聚叠氮缩水甘油醚(GAP)具有良好的相容性,是一种具有应用前景的高氮含量高能钝感叠氮增塑剂。上述研究不仅丰富了叠氮增塑剂大家族,也为含叠氮增塑剂的发射药配方研究提供了广泛的可选原材料。但截至目前,应用于发射药中的叠氮增塑剂仅有 20 世纪七八十年代发现的 1,5-二叠氮基-3-硝基氮杂戊烷

收稿日期:2024-03-07;修回日期:2024-04-10

网络出版日期:2024-04-18

作者简介:任家桐(1992-),男,副研究员,主要从事发射药配方及工艺技术研究。e-mail:renjiongku@163.com

通信联系人:张衡(1983-),男,研究员,主要从事发射药技术研究。e-mail:204rsbzhangheng@163.com

引用本文:任家桐,崔鹏腾,张衡,等.含叠氮增塑剂 AZDEGDN 发射药的制备和燃烧性能[J].含能材料,2024,32(8):787-794.

REN Jia-tong, CUI Peng-teng, ZHANG Heng, et al. Preparation and Combustion Performance of AZDEGDN-Containing Gun Propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(8):787-794.

(叠氮硝酸, DIANP)得到了深入研究^[20-25]。例如,杨建兴等^[22]研究了含RDX的叠氮硝酸发射药的燃烧性能,发现RDX的引入使得叠氮硝酸发射药在中、低压段(40~120 MPa)燃速压力指数升高,而在高压段(120 MPa以上)燃速压力指数减小,且降低了叠氮硝酸发射药的起始燃速和起始气体生成猛度,提高了燃烧渐增性,改善了均质叠氮硝酸发射药由于燃速过高、起始气体生成猛度过大导致的装药安全性差的缺陷。然而对于上述这些新型叠氮增塑剂,却鲜见其在发射药中的应用研究。不仅如此,由于增塑剂与粘结剂、高能固体填料等发射药其他组分间的相互作用复杂,使得含新型叠氮增塑剂的发射药可能会出现燃速压强指数过大、高低温燃速不稳定等燃烧性能方面的问题。上述现状导致人们难以评估这些增塑剂在发射药中的应用价值,阻碍了新型叠氮增塑剂在发射药中的应用进程。

在众多新型叠氮增塑剂中,1,5-二叠氨基-3-氧杂戊烷(AZDEGDN)具备玻璃化温度极低($< -100\text{ }^{\circ}\text{C}$)、生成焓较大($912.5\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)、含氮量较高(53.9%)、热稳定性良好(热分解温度 $249.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)、感度较低(撞击感度 $H_{50}=64.6\text{ cm}$,摩擦感度0%)等特点,综合性能优越^[11]。尤其是AZDEGDN拥有生成焓高、玻璃化温度极低的优点,应用于发射药配方中有望提升发射药的能量水平和低温力学性能。基于上述研究现状和AZDEGDN的性能优势,本研究开展了含AZDEGDN发射药的制备和燃烧性能研究,通过半溶剂法获得了以AZDEGDN为含能增塑剂的双基和三基发射药,进行了电镜观察和密度测试,并利用密闭爆发器法深入研究了含AZDEGDN发射药在常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高温($50\text{ }^{\circ}\text{C}$)和低温($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的静态燃烧性能,以期以AZDEGDN在发射药配方中的应用奠定基础,推动新型叠氮增塑剂在低烧蚀发射药中的应用。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

主要试剂:硝化棉(NC,含氮量12.6%),工业纯,泸州化工厂;AZDEGDN,纯度 $\geq 99\%$,西安近代化学研究所;黑索今(RDX,5类),工业纯,甘肃银光化学工业集团有限公司;硝基胍(NGu),工业纯,辽宁庆阳特种化工有限公司;*N,N'*-二甲基二苯脲(Ⅱ号中定剂, C_2),工业纯,重庆长风化学工业有限公司;无水乙醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;丙酮,分析纯,西陇化工股份有限公司。

主要仪器:2.5 L捏合机,大连橡胶塑料机械有限公司;THP99-63油压机,天津市天锻压力机有限公司;AHX-824安全烘箱,南京理工大学机电厂;SEM5000场发射扫描电子显微镜(SEM),国仪量子技术(合肥)股份有限公司;100 mL密闭爆发器,西安近代化学研究所。

1.2 含AZDEGDN发射药的制备

使用半溶剂法挤出成型工艺制备含AZDEGDN的双基和三基发射药^[2],工艺过程主要包括吸收、压延、胶化、压伸、切药、驱溶等工序^[22],所得发射药药型为18/1单孔管状药。其中,三基发射药中的固体添加剂组分在胶化过程加入,胶化工序中乙醇和丙酮溶剂的质量比为3:2。含AZDEGDN的双基发射药(ADG-2)的组成为NC、AZDEGDN和 C_2 ;含AZDEGDN的三基发射药(ADG-3)为在ADG-2配方的基础上添加一定质量分数的固体组分RDX和NGu后所得的发射药,组成为NC、AZDEGDN、RDX、NGu和 C_2 。在烘箱中通过先湿烘、后干烘的阶段式升温方式驱除发射药中的溶剂和水分后,进行后续性能测试。

1.3 发射药性能测试

微观形貌测试:使用SEM5000场发射扫描电子显微镜对所制备的单孔管状发射药的横断面进行观察。观察前对样品进行喷金处理。

密度测试:将所制备的单孔管状发射药剖开为长度2 cm左右的半圆柱形样品,根据《GJB 770B-2005方法401.2密度 液体静力称量法》进行测试^[26]。

静态燃烧性能测试:采用密闭爆发器法,使用上述制备的单孔管状发射药,根据《GJB 770B-2005方法703.1密闭爆发器试验 微分压力法》进行测试^[26]。所用密闭爆发器的容积为100 mL,装填密度为 $0.20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,点火压力为10 MPa,试验温度包括常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高温($50\text{ }^{\circ}\text{C}$)和低温($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)三种。进行高温和低温测试前,将样品在相应温度下保温6 h以上。对试验测得的压强-燃烧时间曲线($p-t$ 曲线)进行处理后得到燃速-压强曲线($u-p$ 曲线)和动态活度-相对压强曲线($L-B$ 曲线)。

2 结果与讨论

2.1 含AZDEGDN发射药的形貌和密度表征

使用半溶剂法挤出成型工艺,分别制备了主要组分为NC、AZDEGDN、 C_2 的双基发射药ADG-2以及主要组分为NC、AZDEGDN、RDX、NGu、 C_2 的三基发射药ADG-3,所得发射药的外观如图1所示。由图1可



a. ADG-2 propellant



b. ADG-3 propellant

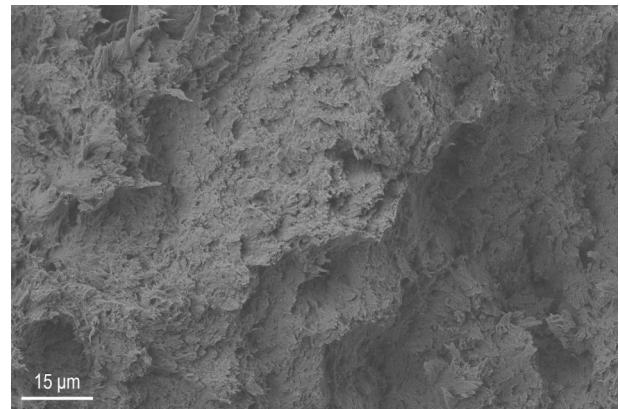
图1 含AZDEGDN发射药的外观

Fig.1 Appearance of AZDEGDN-containing gun propellants

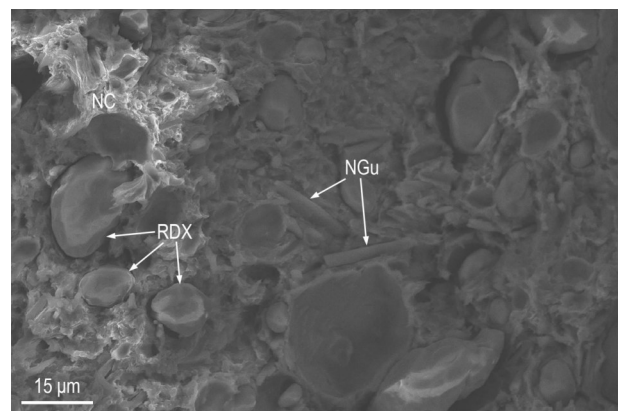
见,ADG-2和ADG-3单孔管状发射药的外观均没有出现明显瑕疵。其中,ADG-2发射药呈现半透明棕黄色(图1a),而ADG-3发射药由于加入了白色的RDX和NGu,呈现略微发黄的不透明灰白色(图1b)。

图2为含AZDEGDN发射药的SEM图像。由图2可见,ADG-2发射药的微观结构呈现较为均一的NC连续相,表明AZDEGDN对NC的塑化效果良好(图2a);ADG-3发射药的微观结构中出现了两种固体——呈不规则颗粒状的RDX^[27]以及呈长针状的NGu^[28](图2b),两种固体较为均匀地分布在发射药内部,没有出现明显的团聚现象,说明所采用的工艺条件能够实现固体颗粒的有效分散。

密度测试显示,ADG-2和ADG-3发射药的密度分别为 $1.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。根据发射药中各组分的理论密度(NC: $1.66\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;AZDEGDN: $1.135\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;RDX: $1.82\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;NGu: $1.71\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;



a. ADG-2 propellant



b. ADG-3 propellant

图2 含AZDEGDN发射药的SEM图像

Fig.2 SEM images of AZDEGDN-containing gun propellants

C_2 : $1.16\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)以及所占质量分数,可通过加权平均的计算方式获得ADG-2和ADG-3发射药的理论密度,分别为 $1.45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.54\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。两种发射药的测试密度均接近其理论密度,说明发射药的内部结构较为致密,没有明显的气孔等质量缺陷,这表明含AZDEGDN发射药的制备工艺条件较为合适。

上述这些观察和测试说明,采用简单成熟的半溶剂法挤出成型工艺即能够制备出外观无明显瑕疵、内部结构致密的含AZDEGDN的双基和三基发射药。

2.2 含AZDEGDN发射药的常温静态燃烧性能

一般而言,双基发射药的主体为硝化棉和增塑剂之间形成的均质体系,在工艺性能、力学性能等方面具有一定优势,但能量水平大多相对较低;而含RDX的三基发射药由于加入了与双基基体间存在界面的高能固体填料,虽然能量水平可以有所提升,但力学强度往往会有一定程度的下降。也就是说,二者在性能方面各有优劣,具有不同的应用场景。因此,有必要同时研究含AZDEGDN的双基和三基发射药的燃烧性能。

基于此,首先测试了ADG-2和ADG-3发射药在常温(20 °C)下的静态燃烧性能。图3a为ADG-2和ADG-3发射药的静态燃烧 $p-t$ 曲线。如图3a所示,ADG-2和ADG-3发射药燃烧时的压强在起始阶段均上升平缓,随后迅速上升。结合发射药静态燃烧过程中的特征数据(表1)可以看出,ADG-2发射药的燃烧最大压强为237.71 MPa,燃烧时间为13.72 ms;ADG-3发射药的燃烧最大压强为263.80 MPa,燃烧时间为14.70 ms。可见,当向含AZDEGDN的双基发射药中添加一定量的固体组分RDX和NGu后,发射药的燃烧时间延长而燃烧最大压强增大,这与RDX对

双基叠氮硝酸胺或混合酯发射药的影响相同^[22,27]。

图3b和3c分别为ADG-2和ADG-3发射药的静态燃烧 $u-p$ 和 $L-B$ 曲线。如图3b所示,ADG-2和ADG-3发射药的燃烧性能均较为稳定,燃速随着压强增大而均匀上升,没有出现明显的 $u-p$ 曲线转折现象。如图3c所示,ADG-2和ADG-3发射药的 $L-B$ 曲线变化趋势相同,表现为起始动态活度下降,而当相对压强 $B>0.2$ 后,动态活度 L 保持平稳,直到燃烧快结束时迅速下降。总体来看,ADG-3发射药的燃速和动态活度低于ADG-2发射药,这与RDX和NGu的作用相关。一方面,RDX在发射药初始燃烧阶段先熔融再分解燃烧,由于熔融过程吸热而损失了一部分能量,导致发射药在低压下的热分解速率降低,因此减缓了燃气生成,降低了发射药的低压燃速^[22,29];另一方面,NGu的能量较低,且在发射药燃烧过程中能够在燃烧表面形成熔融层,抑制燃烧火焰区向火药凝聚相的传热,因此也能够降低发射药的燃速^[28,30-31]。

根据燃速公式(1)对 $u-p$ 曲线进行分段拟合:

$$u = u_1 p^n \quad (1)$$

可获得不同压强区间内含AZDEGDN发射药的燃速压强指数 n 和燃速系数 u_1 ^[32]。如表2所示,ADG-2发射药在不同压强区间内的燃速压强指数均较低,且数值较为接近(均在0.9左右),整体的燃速压强指数为0.9098,说明ADG-2发射药的燃烧各阶段

表1 含AZDEGDN发射药静态燃烧过程中的特征数据

Table 1 Characteristic data of AZDEGDN-containing gun propellants during static combustion process

propellant	t / ms	p_m / MPa	$p_{\text{dpm}} / \text{MPa}$
ADG-2	13.72	237.71	198.19
ADG-3	14.70	263.80	223.91

Note: t is the combustion time. p_m is maximum pressure. p_{dpm} is the pressure corresponding with maximum dp/dt .

表2 含AZDEGDN发射药在不同压强区间内的燃速压强指数 n 和燃速系数 u_1

Table 2 n and u_1 of AZDEGDN-containing gun propellants in different pressure ranges

pressure / MPa	$u_1 / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-n}$		n	
	ADG-2	ADG-3	ADG-2	ADG-3
50–100	0.1573	0.0725	0.9243	1.0677
100–150	0.1840	0.1039	0.8919	0.9890
150– p_{dpm}	0.1510	0.1696	0.9299	0.8907
50– p_{dpm}	0.1679	0.1093	0.9098	0.9754

Note: u_1 is burning rate coefficient. n is burning rate pressure exponent. p_{dpm} is the pressure corresponding with maximum dp/dt .

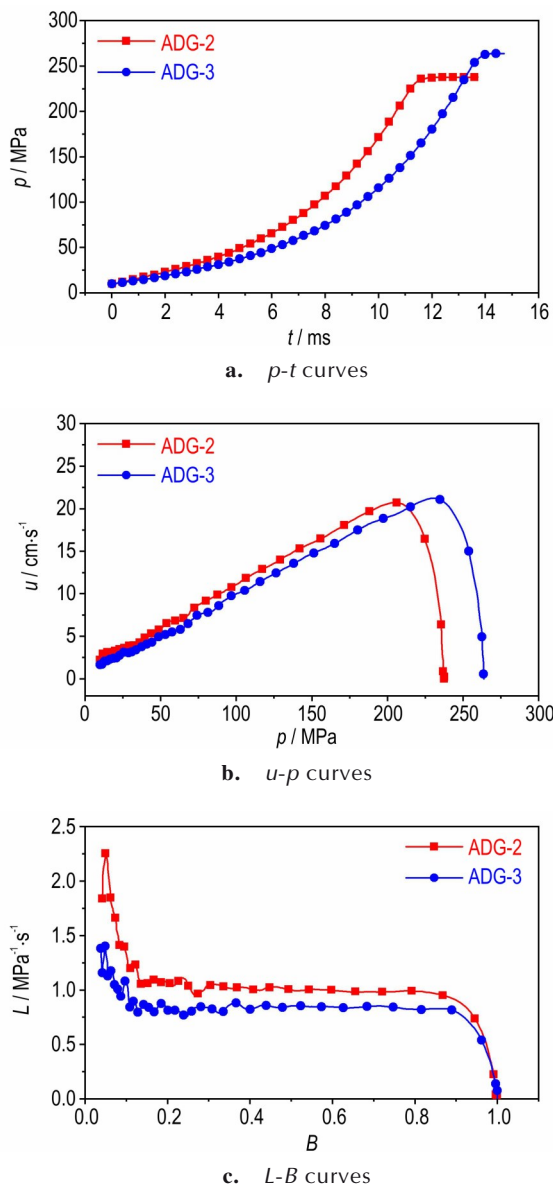


图3 含AZDEGDN发射药的 $p-t$ 、 $u-p$ 和 $L-B$ 曲线

Fig.3 $p-t$, $u-p$ and $L-B$ curves of AZDEGDN-containing gun propellants

过程均较为平稳。与 ADG-2 发射药不同,ADG-3 发射药在 50~100 MPa 内的燃速压强指数略微大于 1(1.0677),但随着压强增大,燃速压强指数也随之减小,尤其是高压段(150~ p_{dpm} MPa)的燃速压强指数仅为 0.8907。换句话说,两种固体组分的加入使得含 AZDEGDN 发射药在低压段(50~100 MPa)和中压段(100~150 MPa)的燃速压强指数分别增大了 15.5% 和 10.9%,而在高压段的燃速压强指数减小了 4.2%。这种燃速压强指数的变化规律与含 RDX 的叠氮硝酸发射药相同^[22]。不过,ADG-3 发射药的整体燃速压强指数仍然小于 1(0.9754),说明其燃烧过程总体也较为平稳,RDX 和 NGu 的添加并没有导致发射药燃烧不稳定。与不含高能固体组分的双基叠氮硝酸发射药相比,ADG-2 发射药的燃速压强指数更低(尤其是中、高压段的燃速压强指数)^[22];与固含量相近的含 RDX 的三基叠氮硝酸发射药相比,ADG-3 发射药的燃速压强指数同样更低(尤其是高压段的燃速压强指数)^[22]。因此,与传统叠氮硝酸发射药相比,含 AZDEGDN 发射药在静态燃烧性能方面可能具有一定优势,这在一定程度上印证了 AZDEGDN 作为一种新型叠氮增塑剂在发射药配方中的应用前景。总之,含 AZDEGDN 的双基和三基发射药在常温下的燃烧性能均较为稳定,说明新型叠氮增塑剂 AZDEGDN 的引入并未给发射药带来燃速压强指数过大等燃烧性能方面的问题。

2.3 含 AZDEGDN 发射药的高、低温静态燃烧性能

相比于双基发射药,三基发射药中由于添加了高能固体填料,固体与双基基体之间存在粘结界面,导致发射药的燃烧过程更为复杂,更容易出现高低温燃烧性能不稳定的问题。因此,本研究重点测试了含 AZDEGDN 的三基发射药(ADG-3)在高温(50 °C)和低温(-40 °C)下的静态燃烧性能,以评估含 AZDEGDN 发射药的高低温燃烧稳定性。图 4 为 ADG-3 发射药在不同温度下的静态燃烧 $p-t$ 、 $u-p$ 和 $L-B$ 曲线。如图 4a 和 4b 所示,ADG-3 发射药在高温和低温下的燃烧过程依然较为稳定, $u-p$ 曲线比较平缓,燃烧最大压强由常温下的 263.80 MPa 分别变为 265.92 MPa 和 261.13 MPa,变化幅度很小,而燃烧时间由 14.70 ms 分别变为 13.52 ms 和 16.40 ms。这种不同温度下发射药的燃速变化符合温度对发射药燃烧过程的一般影响规律,即随着温度升高,发射药的燃速增大^[2]。根据燃速公式对 $u-p$ 曲线进行分段拟合,可获得高低温条件下 ADG-3 发射药在不

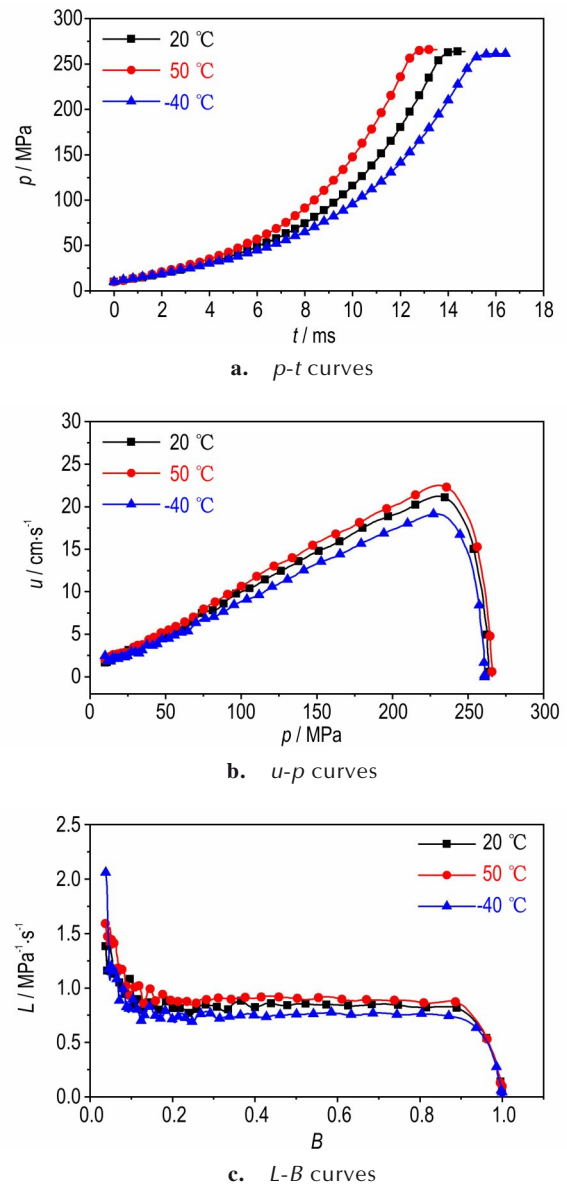


图 4 ADG-3 发射药在不同温度下的 $p-t$ 、 $u-p$ 和 $L-B$ 曲线

Fig. 4 $p-t$, $u-p$ and $L-B$ curves of ADG-3 gun propellant at different temperatures

同压强区间内的燃速压强指数 n 和燃速系数 u_1 。如表 3 所示,在高温下,ADG-3 发射药在不同压强区间内的燃速压强指数均比常温下更低,且随着压强增大,燃速压强指数也随之减小,整体的燃速压强指数为 0.9464,燃烧过程较为平稳;在低温下,虽然 ADG-3 发射药在 50~100 MPa 以及 100~150 MPa 内的燃速压强指数略微超过 1,但在高压段(150~ p_{dpm} MPa)的燃速压强指数较小(0.9214),而整体的燃速压强指数小于 1(0.9938),说明 ADG-3 发射药在低温下的燃烧过程总体较为平稳。此外,ADG-3 发射药在高温和低温下的 $L-B$ 曲线变化趋势

表3 不同温度下ADG-3发射药在不同压强区间内的燃速压强指数 n 和燃速系数 u_1

Table 3 n and u_1 of ADG-3 gun propellant in different pressure ranges at different temperatures

pressure / MPa	$u_1 / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-n}$			n		
	50 °C	20 °C	-40 °C	50 °C	20 °C	-40 °C
50-100	0.0855	0.0725	0.0767	1.0479	1.0677	1.0291
100-150	0.1524	0.1039	0.0636	0.9246	0.9890	1.0666
150- p_{dpm}	0.2138	0.1696	0.1309	0.8573	0.8907	0.9214
50- p_{dpm}	0.1346	0.1093	0.0898	0.9464	0.9754	0.9938

Note: u_1 is burning rate coefficient. n is burning rate pressure exponent. p_{dpm} is the pressure corresponding with maximum dp/dt .

与常温时相同(图4c)。总之,含AZDEGDN的三基发射药在高温和低温下的燃烧性能仍然较为稳定,说明新型叠氮增塑剂AZDEGDN的引入并未给发射药带来高低温燃烧不稳定的问题,对发射药的静态燃烧性能没有明显负面作用。

3 结论

(1)使用简单成熟的半溶剂法挤出成型工艺能够制备得到外观无明显瑕疵、内部结构较为致密的含AZDEGDN的双基和三基发射药,其中双基发射药主要组分为NC、AZDEGDN和 C_2 ,密度为 $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;三基发射药主要组分为NC、AZDEGDN、RDX、NGU和 C_2 ,密度为 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(2)新型叠氮增塑剂AZDEGDN的引入并未给发射药带来燃速压强指数过大等燃烧性能方面的问题,含AZDEGDN的双基和三基发射药在常温(20 °C)下的静态燃烧性能均较为稳定,未出现明显的 $u-p$ 曲线转折现象,燃烧最大压强分别为237.71 MPa和263.80 MPa,燃速压强指数分别为0.9098和0.9754;固体组分RDX和NGU的添加使得含AZDEGDN发射药在低压段(50~100 MPa)和中压段(100~150 MPa)的燃速压强指数分别增大了15.5%和10.9%,而在高压段的燃速压强指数减小了4.2%。

(3)新型叠氮增塑剂AZDEGDN的引入并未给发射药带来高低温燃烧不稳定的问题,含AZDEGDN的三基发射药在高温(50 °C)和低温(-40 °C)下仍然能够保持稳定燃烧,燃烧最大压强由常温下的263.80 MPa分别变为265.92 MPa和261.13 MPa,燃烧时间由14.70 ms分别变为13.52 ms和16.40 ms,燃速压强指数由0.9754分别变为0.9464和0.9938,且 $L-B$ 曲线变化趋势与常温时相同。

参考文献:

- [1] 蒋帅. 37孔等多孔大弧厚硝基胍发射药性能及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
JIANG Shuai. Study on performance and application of 37-well and other porous large arc-thickness nitroguanidine propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [2] 薛欢, 何卫东, 徐汉涛. 改性高能太根发射药热分解与燃烧性能研究[J]. 含能材料, 2015, 23(8): 791-795.
XUE Huan, HE Wei-dong, XU Han-tao. Thermal decomposition and combustion performance of modified high-energy TEGN propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(8): 791-795.
- [3] 苟江, 贺孝军, 赵良友, 等. DEGDN混合硝酸酯发射药的化学安定性[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(3): 33-34, 51.
GOU Jiang, HE Xiao-jun, ZHAO Liang-you, et al. Chemical stability of DEGDN gun propellants [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012, 33(3): 33-34, 51.
- [4] DAMSE R S, SIKDER A K. Suitability of nitrogen rich compounds for gun propellant formulations [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166(2): 967-971.
- [5] 韦丁, 王琼林, 严文荣, 等. 降低身管烧蚀性研究进展[J]. 火炸药学报, 2020, 43(4): 351-361.
WEI Ding, WANG Qiong-lin, YAN Wen-rong, et al. Research progress on reducing erosivity of gun barrel [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(4): 351-361.
- [6] 姬月萍, 汪伟, 丁峰, 等. 双(1,3-二叠氮基-2-丙基)缩甲醛的合成及表征[J]. 火炸药学报, 2008, 31(2): 86-88.
JI Yue-ping, WANG Wei, DING Feng, et al. Synthesis and characterization of bis(1,3-diazido-2-propyl) formal (BDPF) [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(2): 86-88.
- [7] GHOSH K, ATHAR J, PAWAR S, et al. Synthesis, characterization, and rheological evaluation of 1,3-diazido-2-ethyl-2-nitropropane as an energetic plasticizer [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2012, 30(2): 107-123.
- [8] SIZOV V A, TOPCHYI M A, AUNG Z N, et al. Physicochemical properties of 2-nitro-2-azidomethylene-1,3-diazidopropane [C]//The Proceedings of 21st Seminar of the New Trends in Research of Energetic Materials. Pardubice: University of Pardubice, 2018: 1031-1036.
- [9] WANG Y, LIU Y, LU T, et al. Synthesis and properties of 3-azido-2,2-bis(azidomethyl) propyl 2-azidoacetate: a potential azido ester plasticizer [J]. *ChemPlusChem*, 2019, 84(1): 107-111.
- [10] 刘亚静, 汪营磊, 刘卫孝, 等. 三叠氮新戊醇乙酸酯的合成、表征与性能研究[J]. 火炸药学报, 2019, 42(1): 32-36.
LIU Ya-jing, WANG Ying-lei, LIU Wei-xiao, et al. Study on synthesis, characterization and properties of triazidopentaerythrite-acetate [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(1): 32-36.
- [11] 丁峰, 汪伟, 赵宝东, 等. 双叠氮直链醚增塑剂的合成与性能[J]. 含能材料, 2019, 27(12): 1043-1049.
DING Feng, WANG Wei, ZHAO Bao-dong, et al. Synthesis and properties of diazido linear ether plasticizers [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(12): 1043-1049.
- [12] 丁峰, 汪伟, 汪营磊, 等. 1,3-二叠氮基-2-叠氮乙酸丙酯的合成

- 与性能[J]. 含能材料, 2018, 26(7): 633-636.
DING Feng, WANG Wei, WANG Ying-lei, et al. Synthesis and properties of 1, 3-diazido-2-azido-propylacetate [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(7): 633-636.
- [13] 丁峰, 刘亚静, 莫洪昌, 等. 1, 3-双(叠氮乙酰氧基)-2-乙基-2-硝基丙烷的合成与性能[J]. 爆破器材, 2017, 46(1): 13-16.
DING Feng, LIU Ya-jing, MO Hong-chang, et al. Synthesis and properties of 1, 3-di (azido-acetoxy)-2-ethyl-2-nitropropane[J]. *Explosives Materials*, 2017, 46(1): 13-16.
- [14] HAFNER S, HARTDEGEN V A, HOFMAYER M S, et al. Potential energetic plasticizers on the basis of 2, 2-dinitropropane-1, 3-diol and 2, 2-bis (azidomethyl) propane-1, 3-diol[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(5): 806-813.
- [15] 刘亚静, 莫洪昌, 汪莹磊, 等. 含能增塑剂 DAMNP 的合成与性能[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 712-714.
LIU Ya-jing, MO Hong-chang, WANG Ying-lei, et al. Synthesis and properties of energetic plasticizer DAMNP[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(7): 712-714.
- [16] 刘亚静, 莫洪昌, 陈斌, 等. 三(叠氮乙酰氧甲基)硝基甲烷的合成与性能[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(3): 392-395.
LIU Ya-jing, MO Hong-chang, CHEN Bin, et al. Synthesis and properties of tri (azido-acetoxymethyl) nitromethane [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(3): 392-395.
- [17] KUMARI D, SINGH H, PATIL M, et al. Synthesis, characterization, thermal and computational studies of novel tetra-azido esters as energetic plasticizers [J]. *Thermochimica Acta*, 2013, 562: 96-104.
- [18] KUMARI D, YAMAJALA K D B, SINGH H, et al. Application of azido esters as energetic plasticizers for LOVA propellant formulations [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(6): 805-809.
- [19] 姬月萍, 汪莹磊, 刘卫孝, 等. 1, 1, 1-三叠氮甲基乙烷合成与性能研究[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 388-390.
JI Yue-ping, WANG Ying-lei, LIU Wei-xiao, et al. Synthesis and properties of 1, 1, 1-tris (azidomethyl) ethane [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(4): 388-390.
- [20] 徐琰璐, 薛金强, 王勃, 等. 1, 5-二叠氮基-3-硝基氮杂戊烷含能增塑剂的合成与应用[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2018, 16(5): 32-36, 48.
XU Yan-lu, XUE Jin-qiang, WANG Bo, et al. Synthesis and application of 1, 5-diazido-3-nitrazapentane energetic plasticizer [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2018, 16(5): 32-36, 48.
- [21] DAMSE R S, SINGH A. Studies on the high-energy gun propellant formulations based on 1, 5-diazido-3-nitrazapentane [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172 (2-3): 1699-1702.
- [22] 杨建兴, 贾永杰, 刘毅, 等. 含 RDX 的叠氮硝胺发射药的热分解与燃烧性能[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 180-183.
YANG Jian-xing, JIA Yong-jie, LIU Yi, et al. Thermal decomposition and combustion performance of azidonitramine gun propellant containing RDX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2): 180-183.
- [23] 贾林, 陆洪林, 韩芳, 等. 叠氮硝胺对硝基胍发射药热行为的影
响[J]. 火炸药学报, 2015, 38(3): 90-93.
JIA Lin, LU Hong-lin, HAN Fang, et al. Influence of azidonitramine on the thermal behavior of the nitroguanidine-base gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(3): 90-93.
- [24] 黄振亚, 范建芳, 陈余谦. 叠氮硝胺发射药表面钝感新技术[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 182-187.
HUANG Zhen-ya, FAN Jian-fang, CHEN Yu-qian. A new deterring technique of azidonitramine propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(2): 182-187.
- [25] 杨建兴, 崔鹏腾, 贾永杰, 等. 1, 5-二叠氮基-3-硝基氮杂戊烷对硝化棉的溶塑作用[J]. 火炸药学报, 2011, 34(2): 84-90.
YANG Jian-xing, CUI Peng-teng, JIA Yong-jie, et al. Plastication of 1, 5-diazido-3-nitrazapentane on nitrocellulose [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(2): 84-90.
- [26] 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发行部, 2005.
China Commission of Science Technology and Industry for National Defense. GJB 770B-2005: Test method of propellant [S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of China Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 2005.
- [27] 豆松松, 曹永杰, 张明安, 等. RDX 粒度对某高能硝胺发射药燃烧性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 52-57.
DOU Song-song, CAO Yong-jie, ZHANG Ming-an, et al. RDX particle Size on combustion performance of a high-energy nitramine propellant [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(3): 52-57.
- [28] WANG B, LIAO X, WANG Z, et al. Effects of particle size and morphology of NQ on thermal and combustion properties of triple-base propellants [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 193:123-132.
- [29] 付有, 王彬彬, 徐滨, 等. RDX 对改性单基发射药燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 161-166.
FU You, WANG Bin-bin, XU Bin, et al. Effect of RDX on combustion performance of modified single base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(2): 161-166.
- [30] 张邹邗, 蒋树君, 张玉成, 等. NGu 对含 RDX 硝胺发射药燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2007, 30(3): 72-74.
ZHANG Zou-zou, JIANG Shu-jun, ZHANG Yu-cheng, et al. Effects of NGu on the combustion performance of nitramine propellants containing RDX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(3): 72-74.
- [31] 石先锐, 闫光虎, 贾永杰, 等. RDX 和 NGU 对叠氮硝胺发射药动态燃烧稳定性的影响[J]. 爆破器材, 2020, 49(5): 14-19.
SHI Xian-rui, YAN Guang-hu, JIA Yong-jie, et al. Influence of RDX and NGU on the dynamic combustion stability of azidonitramine gun propellants [J]. *Explosives Materials*, 2020, 49(5): 14-19.
- [32] 赵凤起, 徐司雨, 郑林, 等. 燃烧催化剂对太根发射药燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 38-42.
ZHAO Feng-qi, XU Si-yu, ZHENG Lin, et al. Effect of combustion catalysts on the combustion properties of TEGDN gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(4): 38-42.

Preparation and Combustion Performance of AZDEGDN-Containing Gun Propellants

REN Jia-tong, CUI Peng-teng, ZHANG Heng, DING Feng, GAO Yu-chen, YANG Wei-tao

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

Abstract: In order to explore the application prospect of a novel azido plasticizer 1,5-diazido-3-oxapentane (AZDEGDN) in gun propellant formulation, a semi-solvent method was adopted to prepare double- and triple-base gun propellants using AZDEGDN as the plasticizer, and the morphology, density as well as static combustion performance at different temperatures of AZDEGDN-containing propellants were studied. Results show that the AZDEGDN-containing double-base propellant (ADG-2) and triple-base propellant (ADG-3) without obvious defects in appearance can be prepared by semi-solvent extrusion process. SEM test shows that solid additives hexogen (RDX) and nitroguanidine (NGu) are uniformly distributed within ADG-3 propellant. The density of ADG-2 is $1.44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and ADG-3 is $1.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, both close to their theoretical density, indicating that the internal structures of AZDEGDN-containing propellants are relatively dense. The closed vessel tests demonstrate that the static combustion performances of both ADG-2 and ADG-3 propellants at room temperature ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) are stable. The burning rates increase evenly with the increase of pressure, without obvious turning phenomenon in burning rate-pressure curves (u - p curves). The maximum combustion pressure of ADG-2 and ADG-3 propellants is 237.71 MPa and 263.80 MPa, and the burning rate pressure index is 0.9098 and 0.9754, respectively. The addition of RDX and NGu results in an increase of 15.5% and 10.9% in the burning rate pressure index of AZDEGDN-containing propellants in the low pressure range (50–100 MPa) and medium pressure range (100–150 MPa) respectively, while the burning rate pressure index in the high pressure range (150 – p_{dpm} MPa) decreases by 4.2%. At high temperature ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) and low temperature ($-40 \text{ }^\circ\text{C}$), ADG-3 propellant can still keep stable combustion. The maximum combustion pressure changes from 263.80 MPa at room temperature to 265.92 MPa and 261.13 MPa, respectively. Besides, the combustion time changes from 14.70 ms to 13.52 ms and 16.40 ms respectively, and the burning rate pressure index changes from 0.9754 to 0.9464 and 0.9938 respectively. It is concluded that AZDEGDN-containing gun propellant is simple and mature in preparation method, dense and defect-free in structure, and also stable in static combustion performance, which is expected to become a kind of novel low-ablation gun propellant.

Key words: gun propellant; azido plasticizer; 1,5-diazido-3-oxopentane (AZDEGDN); semi-solvent method; combustion performance

CLC number: TJ55;O62

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024076

(责编: 姜梅)