

文章编号:1006-9941(2024)08-0871-14

DIANP 合成及其在发射药中的应用研究进展

岳春晖,刘波,李曼曼,王锋,魏伦,王琼林

(西安近代化学研究所,陕西西安 710065)

摘要: DIANP 发射药作为一种新型发射药,具有能量高,爆温低,燃烧洁净性好,烟焰残渣少等特点。研究介绍了 DIANP 合成与材料特性,DIANP 发射药配方及性能,DIANP 发射药制备工艺、表面处理、装药应用和测试方法等方面的研究进展。指出了 DIANP 发射药在燃烧分解机理和相互作用机制等基础理论研究方面存在的不足;提出了应开展适用于 DIANP 发射药的温度系数控制技术、环境适应性研究和 DIANP 合成的绿色工艺研究;并认为 DIANP 发射药的改进需将理论研究和实际应用相结合,以此推进高能低烧蚀特征材料在行业内的发展。

关键词: 发射药;叠氮酰胺;应用;DIANP

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024173

0 引言

发射药是一类具有特殊用途的复合含能材料,是身管武器进行打击的主要能量来源。随着武器装备的不断发展,高能低烧蚀成为发射药主要发展趋势之一^[1-4]。大量研究及应用表明,采用在配方中添加含能增塑剂、含能粘结剂、高能固体化合物等方式是提高发射药综合性能,减少射击不良现象的有效途径。含能增塑剂不仅可以改善发射药的加工性、柔韧性、力学强度,还能够有效提高发射药的能量水平^[5-7]。

叠氮增塑剂因具有高氮含量、低凝固点和与粘接剂良好的相容性而受到国内外研究者的广泛关注^[8-10]。其中,具有较好热稳定性和高能低爆温特性的 1,5-二叠氨基-3-硝基氮杂戊烷(DIANP)被认为在发射药和固体推进剂当中具有广阔的应用前景^[8,11]。

DIANP 具有高能、高燃速、低爆温、低感度、产气量大和燃气分子量小等特点^[8]。在发射药中的应用研究显示,DIANP 与发射药的常用组份,尤其是与硝化

棉具有良好的相容性和优异的塑化效果。并且,因硝胺基的存在,增强了 DIANP 与 1,3,5-三硝基-1,3,5-三氮杂环己烷(RDX),1,3,5,7-四硝基-1,3,5,7-四氮杂环辛烷(HMX)等高能化合物的相容性^[12]。据报道^[13],DIANP 还可作为增塑剂用于低易损性(LOVA)发射药配方。

DIANP 发射药的火药力高,范围可调,爆温比同能量水平的其他发射药低 200~300 K。并且,叠氮基燃烧分解产物为无毒无害气体^[14-16],有研究表明,DIANP 发射药能够在射击过程中对膛内表面进行氮化,抑制表面侵蚀反应,减少火炮磨损^[17]。DIANP 发射药具备典型的高能低烧蚀特性,具有良好的应用前景。因此,本研究对 DIANP 近年来在发射药中的研究进展进行了综述。并提出了存在的不足和作者的见解。以期从事发射药配方、工艺、表征及测试的研究者提供参考。

1 研究进展

1.1 DIANP 材料合成与应用基础

1.1.1 材料合成

1983 年,Flanagaw 等^[18-19]首次报道了 1,5-二叠氨基-3-硝基氮杂戊烷(DIANP)的合成。DIANP 最初是以二乙醇胺(DEA)为原料,经两个步骤合成的^[20]。

收稿日期:2024-07-02;修回日期:2024-07-22

网络出版日期:2024-07-25

作者简介:岳春晖(1994-),男,在读博士生,主要从事发射药及装药技术研究。e-mail:yuech1107@126.com

通信联系人:王琼林(1966-),男,博士,博导,研究员,主要从事发射药及装药技术研究。e-mail:wangqionglin369@126.com

引用本文:岳春晖,刘波,李曼曼,等. DIANP 合成及其在发射药中的应用研究进展[J]. 含能材料,2024,32(8):871-884.

YUE Chun-hui, LIU Bo, LI Man-man, et al. Progress in the Synthesis of DIANP and Its Applications in Propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(8):871-884.

后来, 研究人员^[21-22]通过优化合成条件, 如在 1, 5-二叠氮-3-硝基氮杂戊烷 (DINA) 的叠氮化反应中使用相转移催化剂四丁基溴化铵 (TATB) 等, 将 DIANP 的产率提高到 90% 以上。

姬月萍等^[23]在国外专利^[24]的基础上引进和改良, 综合考察了料比、溶媒、温度和时间等对反应的影响, 得出物料质量比 1:0.59, 反应温度 80~85 °C, 反应时间 7~8 h 为最佳反应条件。成功合成了纯度 98% 以上的 DIANP。主要反应如图 1 所示。

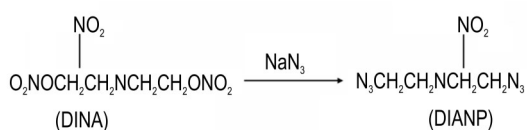


图 1 DIANP 合成原理^[23]

Fig.1 Synthesis principle of DIANP^[23]

2010 年, 国内科研人员开展了 DIANP 高效纯化技术研究, 汪伟等^[25]在姬月萍^[23]报道的工艺路线基础之上, 研究了反应介质、反应时间、反应温度及脱色方式对产物纯度的影响。作者采用动态热回流方式替代了原工艺的静置脱色, 加强了纯化过程的热传递, 使脱色时间由原来的 4 d 缩短为 30 min。并且联合预先管式蒸发和减压蒸馏工艺, 提高了蒸馏效率, 浓缩时间缩短为 4~5 h。经验证, 优化后的工艺路线成功合成出纯度为 99.6% 的纯度标准物质。

为了进一步对 DIANP 合成路线进行优化, 高福磊等^[26]报道了一种 DIANP 合成改进的方法, 该方法选取含 DMSO 的极性复合溶剂作为反应介质, 可将反应时间缩短为 6 h, 并且无需进行脱色处理, 产物收率在 90% 以上。同时, 肖凯等^[27]研究了反应杂质对产物的影响, 在以吉纳 (DINA) 和叠氮化钠 (NaN₃) 为原材料合成 DIANP 的制备工艺中, 产物的主要杂质为单叠氮硝胺 (PNAN) 和 DINA。该杂质对 DIANP 的贮存稳定性没有显著影响, 但杂质含量增加会导致 DIANP 的感度下降, 热分解温度降低。

随后, 薛金强等^[28]报道了另一种合成 DIANP 的方法 (图 2), 该方法以二(2-氯乙基)胺盐酸盐为原料, 经 HNO₃ 和 Ac₂O 硝化合成中间体 1, 5-二氯乙基-3-硝基氮杂戊烷 (BCENA), 再将 BCENA 与 NaN₃ 反应, 制得 DIANP, 收率在 80% 以上。此工艺路线的叠氮化反应在水相中进行, 其特点是安全性较好。

发展至今, DIANP 的合成工艺取得了较大的进步, 产物得率和反应效率均有大幅提升。但是反应涉及的废液处理, 循环利用等问题并未引起广泛关注。

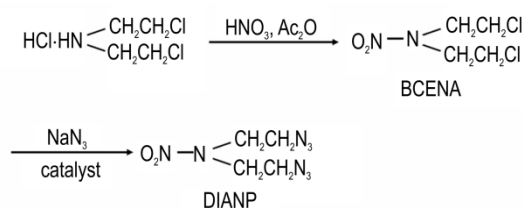


图 2 DIANP 合成路线图^[28]

Fig.2 DIANP synthetic method^[28]

1.1.2 应用基础

DIANP 为淡黄色透明油状液体, 可溶于二氯甲烷、丙酮、乙酸乙酯、二甲基亚砷 (DMSO)、N, N-二甲基甲酰胺 (DMF) 等溶剂中, 不溶于水、乙醇等溶剂, 理化性能和安全性能见表 1 和表 2。DIANP 的撞击感度为 20.28 cm (5 kg, GJB772A-1997), 摩擦感度为 26% (3.92 MPa, 90°, GJB772A-1997)、热感度的极限孔径为 20 mm^[29-30]。

表 1 DIANP 物化性能参数^[29]

Table 1 Physical and chemical properties of DIANP^[29]

parameters	value
refraction index	1.5275±0.0005
density / g·cm ⁻³	1.3370±0.002
viscosity / mPa·s	19.5 (rotary viscosity, 25 °C)
freezing point / °C	-7
alkalinity / %	0-0.003% (by Na ₂ CO ₃)
volatility / %	0.08 (4 h), 0.12 (16 h), 0.15 (24 h); condition: 0.8 g, (50±1) °C

表 2 DIANP 的安全及能量特性参数^[29]

Table 2 Safety and energy characteristics for DIANP^[29]

parameters	remark
deflation volume (vacuum invariability) / mL	2.80 (sample (5 g) heated at 100 °C uninterruptedly for 48 h)
break out point / °C	283
temperature of the most exothermic peak (DSC) / °C	245.68
enthalpy of formation / kJ·mol ⁻¹	1419.41
combustion heat / kJ·kg ⁻¹	16585.2
detonation heat / J·g ⁻¹	3549 (according to GJB772A-97-701.1)
detonator sensitivity	detonation (sample was encased in Φ50 mm×65 mm glass beaker and initiated by electricity detonator)
flame sensitivity	no reaction (according to GJB772A-97-604.1)
time / pressure	no reaction (according to reference ^[31])

在含能材料领域中,材料之间的相容性是一个十分重要的指标。研究表明,DIANP与发射药常用含能组份(如硝化棉、硝化甘油、硝基胍(NGU)、黑索今等),安定剂,钝感剂(如NA等)均有较好的相容性(表3),适于用作发射药组份。

表3 相容性试验结果

Table 3 Compatibility test results

component	net increase in reaction gas release	result
DIANP/NC/NG/DGU/C2	$R < 3.0$ mL	compatible
DIANP/NC/NG/RDX/NA	$R < 3.0$ mL	compatible

Note: according to GJB772A-97-501.1. 1) $R < 3.0$ mL: compatibility: compatible. 2) $R = 3.0 - 5.0$ mL: moderate response. 3) $R > 5.0$ mL: incompatible. 4) R is the net increase in gas release from the reaction.

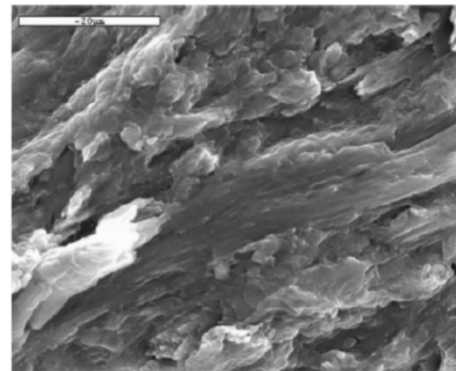
含能增塑剂的增塑性能,也是关键特性之一。增塑性好的体系有利于应力的传递,表现出更好的力学性能,并且增塑效率高,不产生离析、渗出现象,使用寿命长^[32]。杨建兴等^[33]的研究表明,DIANP对含氮量分别为12.6%和13.0%的硝化棉均有较好的溶塑作用,相对比于NG药团,DIANP发射药药团的表观粘度小,药料流动性好。这是由于增塑性好的物质,能够减弱硝化棉分子间的作用力,有利于分子间产生滑动,直观表现为在相同增塑剂含量的情况下成型压力更小。如图3所示,含DIANP的硝化棉微观结构更均匀平顺(图3a和图3b),含NG增塑剂的对比样则呈现出凹凸的沟壑状(图3c),表明DIANP对硝化棉的溶塑效果比NG要好。

杨俊清等^[34]使用MD模拟工具研究了DIANP和NG对不同含氮量NC的溶塑作用,根据Greenhalgh^[35]等提出的溶解度参数理论标准: $\Delta\delta < 7.0$ MPa^{0.5},体系是可混溶的; $\Delta\delta > 10.0$ MPa^{0.5},体系是不可混溶的。因此,从表4可以看出,DIANP和NG均能与NC混溶。并且,两种物质溶解度参数差越小,体系的相容性越好^[36-37]。DIANP与NC的相容性优于NG与NC的相容性。

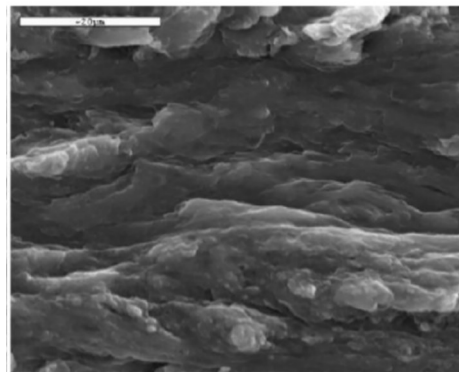
可见,DIANP与硝化棉和发射药常用含能组份具有良好的相容性,并且DIANP对硝化棉的塑化效果优于NG。可以推断,DIANP在以硝化棉为粘结剂的体系中是非常有竞争力的含能增塑剂。

1.2 发射药配方及性能

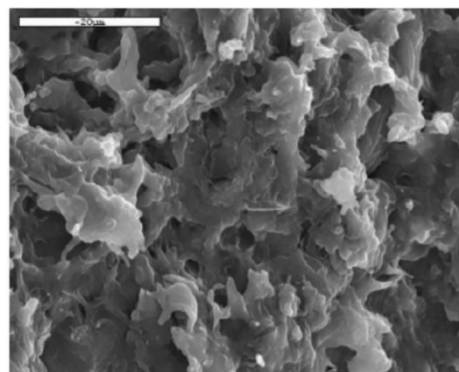
硝化棉基发射药具有综合性能好,力学性能强,被广泛应用于弹药系统,与现有系统和制造工艺具有良好的兼容性与适配性^[38]。硝化棉与NG,DIANP,



a. NC(13.0%N)+DIANP



b. NC(12.6%N)+DIANP



c. NC(12.6%N)+NG

图3 发射药的SEM图^[33]

Fig.3 SEM photographs of gun propellants^[33]

表4 NC、NG和DIANP的溶解度参数(δ)以及溶解度参数差($\Delta\delta$)^[34]

Table 4 solubility parameter (δ) and solubility parameter difference ($\Delta\delta$) for NC, NG and DIANP^[34]

	N %	δ / MPa ^{0.5}	$\Delta\delta$ (NG-NC)	$\Delta\delta$ (DIANP-NC)
NC1	7.22	23.03	2.39	0.01
NC2	9.50	22.86	2.56	0.18
NC3	10.46	22.32	3.10	0.72
NC4	12.04	20.06	5.36	2.98
NG		25.42		
DIANP		23.04		

RDX, HMX 等含能材料具有良好的相容性, 通过复合改性方式是提高化棉基发射药性能和稳定性的有效途径^[39-40]。为探索 DIANP 在发射药中的应用潜力, 发射药研究人员对此开展了研究。

1.2.1 双基 DIANP 发射药

根据国外专利的报道^[41], 如表 5 和表 6 所示, 含有 DIANP 的发射药配方相比不含 DIANP 的参比样具有燃速高, 燃气平均相对分子质量小, 做功能力强等特点。加入 DIANP 使得配方的燃烧温度和燃烧热下降, 这有助于降低发射药对炮管的烧蚀性, 减少磨损, 延长武器使用寿命^[42]。

国内现役常规双基药配方的主要含能组分为硝化棉和硝化甘油, 特点是威力高, 烧蚀大。为提升常规双基药的综合性能, 胡睿等^[43]使用 DIANP 取代双基发射药中的部分硝化甘油(NG)制得了改性双基发射药样

表 5 DIANP 发射药配方与参比配方的能量参数^[41]

Table 5 Energy parameters of DIANP propellant formulations and control formulations^[41]

composition	burning rate / mm·s ⁻¹	burn temperature / K	heat of combustion / J·g ⁻¹
NC+1% stabilizer	126	3053	3977
NC+1% stab+40% DIANP	298	2854	3475
NC+1% stab+40% NG	257	3850	5234
NC+40% DINA	208	3334	4534
NC+20% DINA+20% DIANP	244	3108	4007
NC+40% Me-NENA	186	3087	4157
NC+20% Me-NENA+20% DIANP	234	2971	3818
NC+40% RDX	181	3436	4576
NC+20%RDX+20% DIANP	249	3162	4028

表 6 发射药配方能量参数^[41]

Table 6 Energy parameters of propellant formulations^[41]

composition	gas / MW	burn temperature / K	impetus / kJ·kg ⁻¹
(60:40) NG/NC	27.2	3774	1154
(50:50) RDX/NC	24.7	3621	1218
(50:50) Me-NENA/NC	22.5	3162	1166
(50:50) TAGN/RDX	21.2	3330	1304
(60:40) TAGN/NC	20.6	2771	1114
(50:50) DIANP/RDX	19.9	3442	1434
(60:40) DIANP/NC	19.5	3853	1215
(50:50) DIANP/Me-NENA	18.5	2983	1336
(30:70) DIANP/Et-NENA	17.8	2523	1175
(50:50) DIANP/TAGN	17.7	2665	1250

品。DIANP 加入量为 12.5% 时, 相比不含 DIANP 的双基药配方, 爆温由 3789 K 降到 3531 K, 火药力由 1168 增加至 1185 kJ·kg⁻¹, 表明 DIANP 具有高能低烧蚀特性。并且, DIANP 的加入可以有效减小一次焰, 抑制二次焰(图 4a 和图 4b)。原因在于 DIANP 可以有效降低配方的燃气温度。但 DIANP 加入量过多对于系统的氧平衡是不利的, DIANP 的氧平衡为 -80%, 当配方氧平衡降低时, 气体中可燃气体质量摩尔浓度增大, 有可能产生强烈的二次火焰(图 4c)。

崔鹏腾等^[44]通过热加速老化试验评估了双基叠氮胺发射药的长贮性能, 发射药(质量分数为 NC 66%, DIANP 22.5%, NG 10%, 安定剂 1.5%) 经 23 年贮存后, 理化性能变化率基本在 3% 以内(表 7), 贮存前后的内弹道性能基本相当, 无显著差距(表 8)。并且经

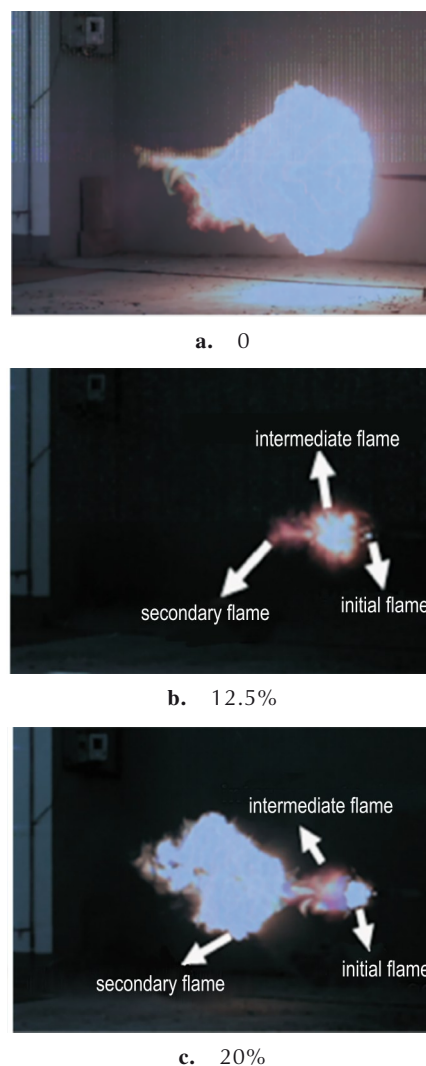


图 4 枪口焰叠加照片^[43]

Fig. 4 Superposed graphs of the muzzle flash of different gun propellant samples^[43]

表 7 贮存前后理化性能^[44]Table 7 The physical chemistry performance before and after storage^[44]

item	density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\text{C}(\text{H}_2\text{O})$ / %	internal volatile matter / %	detonation heat / $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	2e / mm
before storage	1.55	0.35	0.64	3658	0.64
after storage	1.55	0.36	0.53	3672	0.64
rate / %	0	2.8	-17	0.3	0

Note: C is the mass ratio. e is half of web size.

表 8 叠氮硝胺发射药长贮前后的内弹道性能^[44]Table 8 Interior ballistic performance of azidonitramine gun propellant before and after storage^[44]

item	p / MPa			v / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		
	20 °C	-40 °C	50 °C	20 °C	-40 °C	50 °C
before storage	277.3	235.2	322.8	967.6	894.3	1014.1
after storage	277.6	241.4	318.7	964.1	874.1	988.4
rate / %	0.1	2.6	-1.3	-0.4	-2.2	-2.5

加速老化试验推算,在小于 30 °C 的环境下,安全贮存寿命为 63 年。

用 DIANP 替代配方中的部分 NG,能够在保持能量水平的情况下有效降低燃气温度,抑制枪口火焰,并且均质 DIANP 发射药具有较好的贮存稳定性,能够满足实际中的应用需求。然而,DIANP 为负氧平衡材料,含量太多会导致燃气中的可燃气体含能升高。因此,DIANP 在配方中存在最佳含量,在特定的配方中需要进一步研究。

1.2.2 三基 DIANP 发射药配方

常规三基发射药的含能组份主要由硝化棉,硝化甘油和硝基胍组成,是成熟度较高的一类配方。Joshi M M 等^[45]报道了一种使用 DIANP 取代三基发射药中

部分硝基胍的配方(表 9)。当 DIANP 的加入量为 20% 时,火药力由 1073 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增长到 1142 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,爆温仅增长 21 K,并且提高了配方的线性燃烧速度和燃速压力指数。

表 9 配方组成^[45]Table 9 Formulation composition^[45]

NC	NG	DIANP	RDX	NGU	ref.
60	5-40	5-40	-	-	[43]
28	22.5	5-20	-	28-48	[45]
30-50	-	10-18	-	30-40	[49]
35-45	8-12	6-8	-	25-40	[54]
35-45	8-12	10-20	0-25	-	[61]

R S Damse^[46]的研究表明,用含能增塑剂 DIANP 代替 NC/RDX/DOP(邻苯二甲酸二辛脂)体系中的部分 DOP 后,配方的能量增加了,这是由于 DIANP 含有叠氮基和硝胺基等含能基团,并且其冲击感度更高。然而,能量较高的 DIANP 配方显示出了更低的摩擦感度,因为影响摩擦感度有多种因素,不仅仅与配方能量有关,而且与分子对称性、摩擦剪切和热行为等有关^[47]。加入 DIANP 后,发射药的热分解温度在 200~206 °C,较 DOP 配方具有更好的热稳定性。并且 DIANP 的五元线性链结构有助于提升产品的机械性能^[48]。

魏学涛等^[49]报道了一种名为 DANQ 的发射药配方,含能组份主要为硝化棉,硝基胍和 DIANP(表 9)。该配方的设计思路参照 M30,其能量特性和力学性能见表 10 和表 11。DANQ 与 M30 的火药力相近,烧蚀量仅为 M30 的 85% 左右,并且力学性能有较大幅度提高,这是因为 DIANP 能够有效提高聚合物的韧性^[50]。30 mm 高压模拟实验装置燃烧试验表明^[51],含 DIANP

表 10 DANQ 和 M30 的能量特性^[49]Table 10 Energy property of DANQ and M30^[49]

propellant	powder impetus / $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	explosive heat / $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	explosive temperature / K	specific volume / $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$	heat capacity ratio	average gas molecular weight
DANQ	1080	3668.9	2850	1015.1	1.2522	22.07
M30 ^[53]	1088	4082	3040	965.9	1.2385	23.2

表 11 DANQ 与 M30 的力学性能参数^[49]Table 11 DANQ and M30 mechanics performance parameter^[49]

propellant	compressive strength / MPa			compression rate / %			impact strength / $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$		
	50 °C	20 °C	-40 °C	50 °C	20 °C	-40 °C	50 °C	20 °C	-40 °C
DANQ	23.2	35.5	150.3	51.8	44.3	23.2	no broken	34.6	8.31
M30 ^[53]	18.85	40.5	137.9	19.0	14.9	8.2	10.6	8.46	5.39

的发射药在膛内燃烧稳定, 膛底和坡膛压力曲线光滑, NGU 能够降低起始燃气生成速度^[52], DIANP 又具有燃速快的特点, 在两者的协同下, 一定程度上增加了中压段的燃烧一致性, 减小了压力波动。

贾林等^[54]采用 DIANP 替代了三基发射药中的一部分 NG (配方组成见表 9), 添加 DIANP 后, 发射药的热分解峰温为 195.5 °C, 高于原三基药的 189.9 °C, 理论上热安定性更好, 甲基紫试验也验证了这一点。这是因为 DIANP 中的—N₃ 比 N—NO₂ 先分解^[55-56], —N₃ 的分解产物 N₂ 为惰性物质, 没有自催化作用, 不被安定剂 (C2) 吸收, 而 NG 中的 O—NO₂ 分解产生 NO₂ 会被 C2 吸收。经温度系数法预估, 含 DIANP 的 NGU 发射药 30 °C 下安全贮存寿命为 31 年, 比原三基药的贮存寿命增长 0.34 倍。

力学性能是发射药的一项重要指标^[57-58]。郑林等^[59]研究了硝化棉含氮量对三基 DIANP 发射药力学性能的影响, 试验结果见表 12。可以看出, 硝化棉含氮量为 12.6% 的 DIANP 发射药力学性能更好, 原因在于, 硝化度提升意味着氢键减少, 导致分子间作用力变弱。在外力的作用下, 易产生分子间滑动, 宏观表现为断裂。

表 12 DA 发射药样品的抗压强度、压缩率和冲击强度^[59]

Table 12 Pressive strength, compression rate and shock strength for DA propellant powder sample^[59]

sample	compressive strength / MPa		compression ratio / %		impact strength / kJ·m ⁻²	
	20 °C	-40 °C	20 °C	-40 °C	20 °C	-40 °C
	DA(13.0 N%)	58.7	157.6	64.2	57.4	no broken
DA(12.6 N%)	72.9	178.5	63.7	54.9	no broken	18.1

另外, 因为同为硝化棉基发射药, 影响三基 DIANP 发射药贮存稳定性的因素与常规三基发射药类似^[60], 湿度大和温度高是促使安定剂分解的主要因素。空气中 H₂O 含量增多, 易与硝酸酯分解产生的 NO₂ 发生反应, 生成 HNO₃ 和 HNO₂, H 离子对硝酸酯的分解有催化作用。同理, 温度升高有利于反应进行, 导致安定剂消耗速度变快, 贮存寿命缩短。并且发射药的抗压强度随着老化时间延长而下降, 老化时间对燃烧性能的影响主要表现为含能组份分解影响发射药的能量水平, 对其燃烧渐增性无显著影响。

可以发现, 加入 DIANP 有助于提高配方的力学性能、热稳定性、线性燃烧速率和贮存寿命, 并且降低配方摩擦感度。同时, DIANP 与配方中的 NGU 存在协

同效应, 能够减小膛内的压力波动。但是, 发射药燃速提升所带来的优劣势需要进一步研究。

1.2.3 高能三基 DIANP 发射药配方

均质 DIANP 发射药 (主要成分为 NC/NG/DIANP) 有力学性能好, 燃烧稳定等特点, 但是由于 DIANP 燃速高, 空白药初始燃气生成速率大, 容易产生轴向压力波, 严重时甚至导致低温膛压异常。为解决这一问题, 研究人员^[61]在均质 DIANP 发射药配方中引入了高能固体组分 RDX, 形成了一种以 NC 为粘结剂, NG 和 DIANP 为复合含能增塑剂, RDX 为能量添加剂的高能三基配方, 配方组成见表 9。据报道^[62], 该配方在低压 (≤ 100 MPa) 条件下, 由于 RDX 存在熔融吸热, 发射药表面升温速率较低, 高能三基 DIANP 发射药的燃速低于常规单基发射药, RDX 熔融分解过程结束后, 在中高压段 (≥ 100 MPa), 发射药的燃气生成速率大于单基发射药。RDX 的引入改善了均质 DIANP 发射药由于燃速高, 起始燃气生成猛度大而带来的装药安全性差的缺陷, 提高了装药安全性。

石先锐等^[63]的研究表明, ADR (NC/NG/DIANP/RDX) 发射药在高压条件下 (最大压力大于 500 MPa) 燃烧稳定性良好, 在相同装药密度条件下, 相比于 RGD7 (NC/NG/RDX/NGU) 发射药, ADR 发射药压力波衰减速度小于 RGD7 发射药, 但药床冲击和挤压作用稍大于 RGD7 发射药, 这可能与 DIANP 燃速较快, 在燃烧中期具有更高的燃气释放速率有关。经石墨光泽处理后, 常温下膛底压力 (10~30 MPa 范围内) 的平均压力陡度降低了约 10% 以上, 表明表面光泽能够对药体产生一定的起始缓燃效果。并且, 高能三基 DIANP 发射药在静态高压 ($P_{\max} \geq 500$ MPa, $T = -40 \sim +50$ °C) 条件下均能够稳定燃烧。

高能三基 DIANP 发射药的摩擦静电起电特性主要与 RDX 含量有关^[64]。当 RDX 含量不高时, RDX 颗粒被其他均质组份充分包裹, 摩擦静电起电特性与常规均质发射药类似。当 RDX 含能较高时, 部分 RDX 颗粒裸露在药体表面, 由于材料的质荷比增大, 电阻率变高, 在相同条件下更易产生静电累积。经验证, 在表面涂覆石墨是减少静电累积的有效方式。

由上可以看出, 含 DIANP 的发射药力学性能好、点火正常、燃烧稳定、爆温低。DIANP 在双基药配方、三基药配方和高能药配方中均有较好的适配性, 涵盖范围广泛。并且 RDX 的熔融吸热特性能够改善均质 DIANP 发射药配方起始燃速快的特点, 提高了配方的燃烧渐增性和装药安全性。

1.3 DIANP 发射药制备工艺

工艺是使原材料转变为成品的关键,发射药的质量可靠性与工艺过程息息相关。新配方研究往往也伴随着工艺适配性研究和工艺流程优化。主要包括球形药制备工艺和粒状药制备工艺。

1.3.1 球形药

DIANP 双基球形药制备工艺主要采用内溶法。内溶法是指在搅拌的作用下,利用物质自身的表面张力收缩成球,再通过脱水、蒸溶等流程制成成品的过程^[65]。通过 DIANP 替代双基药中的部分 NG 组成混合含能增塑剂形成的改性双基发射药,能够在保持高能量的同时有效降低烧蚀。因此,为探索一条适用于

DIANP 球形药的制备工艺,杨建兴等^[66]对比研究了 DIANP 发射药和传统双基球形药的内溶法成球工艺。由于 DIANP 对硝化棉的溶塑能力较强,形成的混合液体表面张力更小,为了提高成球率,需要降低成球温度,延长成球时间。为了防止药粒发软变形,需要增加预驱量。并且确定了 DIANP 球形药的最佳条件为成球时间为 60 min,成球温度为 58~64 °C,预驱量约为 50%。

随后,冯昌林等^[67]研究了球形 DIANP 发射药的能量示性数及感度,表 13 可以看出,DIANP 发射药配方具有显著的高能低烧蚀特性。综合文献^[67-68],得到表 14,由表 14 的感度结果表明,球形 DIANP 发射药的工艺安全性与球形双基发射药基本相当。

表 13 配方及能量示性数^[67]

Table 13 Formulation and energy-parameter^[67]

item	mass / %				force constant / J·g ⁻¹	explosive heat / J·g ⁻¹	explosive temperature / K
	NC	NG	DIANP	C2			
1	58.5	27	13	1.5	1188	4541	3494
2	58.5	40	0	1.5	1175	4992	3777
3	63.5	35	0	1.5	1165	4895	3712

表 14 感度测试结果^[67-68]

Table 14 Sensitivity test^[67-68]

number	electrostatic spark sensitivity				mechanical sensitivity		shockwave sensitivity		
	U / kV		Q / J		H ₅₀ / cm	P / %	D / mm	Δ / g·cm ⁻³	L / mm
	P	N	P	N					
1	3.27	3.10	1.18	1.06	14.8	4	0.52	0.96	37.0
2	2.30	2.00	0.68	0.64	14.1	20	0.48	1.02	43.0
3	2.71	2.70	0.81	0.80	14.8	8	0.56	0.98	32.8

Note: U is 50 % ignition voltage, Q is 50 % of the firing energy, D is the particle size of spherical propellant, Δ is packing density, L is the thickness of the partition board

球形发射药装药密度高且易于钝感,广泛应用于轻武器装药。DIANP 球形药比常规双基球形药具有更高的线性燃速,能够解决短管武器存在的燃尽性问题,十分具有应用潜力。

1.3.2 粒状药

吸收是三基药常用的一种药料混合方式,具有均一性好、安全度高、可控性强等特点。由于 DIANP 对硝化棉具有较好的溶塑性,因此,采用吸收的方式对物料进行预混合是一种有效的途径。为了保证吸收药料在贮存和运输过程中的安全性,需要提高吸收药的含水量。在样品试制前,需将药料中的大部分水分驱除出来。吸收药的烘干驱水效果是影响后续工艺质量的重要环节。

DIANP 具有较高的热分解温度,能够提升 NC/NG

吸收药体系的热稳定性。基于这一特点,贾林等^[69]采用压延烘干法制备了 DIANP 吸收药样品,对比常规的过筛烘干法,压延烘干法制备样品需要 1.2 h,少于过筛烘干法的 4.5 h。通过多批次多部位取样分析,压延烘干法的水分分析极差为 0.3%~0.4%,明显小于过筛烘干法的 2.7%~4.4%。经检测,样品未发生明显的热分解,解决了 DIANP 吸收药存在的烘干时间长,驱水效率低等问题。但压延温度为 95 °C,高于过筛烘干法的 55 °C,其工艺安全性能有待进一步验证。

三基 DIANP 发射药和高能三基 DIANP 发射药使用 DIANP 和 NG 作为混合增塑剂,可采用半溶剂法进行制备,具有工艺助剂加入量少,驱溶工艺相对简单的特点。半溶剂法成型工艺包括油压成型、螺杆挤出成型等工艺类型。目前小粒和大粒三基、高能三基

DIANP 发射药半溶剂法试制广泛采用油压成型工艺, 工艺过程^[65]如下: 造粒→塑化→压伸→晾药→切药→筛选→驱溶→混同包装。

总的来说, DIANP 发射药的球形药制备工艺和粒状药制备工艺与现有成熟工艺的适配性较好, 可以通过借鉴、优化等方法实现工业化生产。

1.4 DIANP 发射药表面钝感

为改善发射药的燃烧特性和内弹道性能, 一般需要对发射药进行表面钝感处理, 通过在发射药表层渗入一定浓度梯度分布的阻燃性或低燃性物质, 达到提高燃烧渐增性, 降低温度系数等目的。或采用与发射药基体同质的材料进行表面包覆, 以此提升发射药增面燃烧的比例, 提高能量利用率; DIANP 发射药表面钝感形式主要包括湿法钝感、干法钝感和组合钝感等。湿法钝感是将发射药和钝感剂溶液在水介质中进行吸附和渗透, 具有均一性好, 安全性高, 可控性强等特点; 干法钝感一般采用专用的转鼓式设备进行, 具有适用范围广, 工艺周期短等特点; 组合钝感则是对现有技术的整合, 能够发挥各自优势, 提高发射药的综合性能。部分研究者对适用于 DIANP 发射药的表面钝感技术进行了研究。

包覆技术是通过包覆层的作用控制火药基药内控燃面的起始燃烧时间, 从而改变装药的燃面变化规律, 达到降低装药内弹道温度系数, 提高弹丸初速的目的^[70]。为降低 DIANP 发射药的初始燃气生成速率, 魏学涛等^[71]通过包覆技术的原理, 采用具有高熔点、低燃速的含能物质配置包覆液, 采用转鼓式设备对 DIANP 发射药进行钝感包覆, 取得了良好的燃烧渐增性。赵强等^[72]使用高分子复合材料和含能复合材料分别对 DIANP 发射药进行堵孔和钝感。相比空白样, 发射药经堵孔钝感后, 燃烧渐增性因子由 0.471 增长到 0.552~0.576, 高温相对活度温度系数由 5.83% 下降为 2.87%。刘波等^[73]将表面钝感阻燃技术和含能物质堵孔包覆技术综合起来, 对三基 DIANP 发射药表面进行处理, 由于表面钝感降低了发射药的起始燃速, 堵孔减小了起始燃烧面, 发射药的燃烧渐增性显著提

高。并且高温下的低温感效应十分显著, 接近于零梯度。但是低温温度系数较差, 或可通过混合装药的方式加以改善。

特种聚合物钝感剂 NA, 作为一种新型的高分子钝感剂, 具有含氧量高、燃烧烟雾小, 抗迁移性强等特点^[74]。刘少武等^[75]以 NA 聚酯作为钝感剂, 采用湿法钝感工艺对 DIANP 发射药进行表面处理。在某炮上进行实测, 高温 (+80 °C) 膛压升为 0.97%, 低温 (-60 °C) 速度降为 3.1%, 具有较好的低温感特性。经 NA 聚酯钝感的 DIANP 发射药贮存前和经 70 °C 条件下贮存 130 d 后的燃烧性能如表 15 所示, NA 聚酯钝感的 DIANP 发射药贮存后的速度下降约 0.8%, 膛压下降约 1.9%。表明, 经 NA 聚酯钝感的 DIANP 发射药具有较好的贮存稳定性。

1963 年, Huisgen 等^[76]提出了有机叠氮化合物和炔基化合物之间的 1,3-偶极 Huisgen 环加成反应。根据该反应的原理, 可根据前驱体中的端炔基与发射药中的叠氮基进行反应, 实现对发射药的钝感^[77]。有研究表明, 一个 DIANP 分子中含有两个叠氮基, 与端炔基的交互反应可生成网状大分子结构(图 5), 有潜力成为一种抗迁移性和阻燃性均较好的钝感剂^[78-80]。据此, 黄振亚等^[81]报道了一种采用均苯三甲酸三炔丙酯(TPTM)作为 DIANP 发射药钝感剂的方法, 使用小分子多炔基化合物作为预聚物前驱体涂覆在发射药表面, 该物质可与 DIANP 发射药中的叠氮基发生交联反应, 生成大分子结构, 并且在 50 °C 条件下可实现光固化, 稳定性较好, 通常在 200 °C 以下不发生变化^[82-85]。密闭爆发器实验表明, 此钝感方式处理后的发射药具有良好的燃烧渐增性, 并且在 50 °C 加速老化 6 个月以后燃烧性能基本不发生变化。

并且, 宋亚苹等^[86]研究对比了邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、聚己二酸丙二醇酯(PPA)和均苯三甲酸三炔丙酯(TPTM)3 种钝感剂在 DIANP 发射药中的贮存稳定性, 如表 16 所示, 在钝感初期, 三种钝感剂均能有效提高发射药的燃烧渐增性。随着贮存时间延长, DBP 迁移较大, TPTM 抗迁移稳定性最好, 这与分子量水平

表 15 DIANP 发射药长贮前后爆热及内弹道性能^[75]

Table 15 Interior ballistic of DIANP propellants before and after long-term storage^[75]

sample	explosive heat / J·g ⁻¹	charge weight / g	maximum pressure / MPa	pressure difference / MPa	muzzle velocity / m·s ⁻¹	speed difference / m·s ⁻¹	remarks
before storage	3891	1.72	274.2	7.4	916.4	8.7	
after storage	3868	1.72	268.9	7.5	909.1	7.8	storage conditions: 70 °C, 130 d

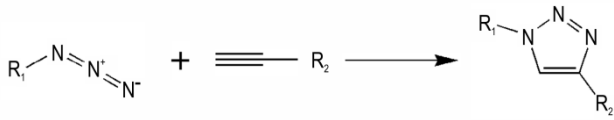
图5 叠氮基和端炔基化合物的反应通式^[78]

Fig.5 azido- and reaction general formula for terminal acetylenyl compound^[78]

表16 钝感发射药燃烧渐增性特征值^[86]

Table 16 Characteristic values of burning progressivity of de-terred gun propellant^[86]

Sample	$L_a / \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$	$L_m / \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$	B_m	L_m / L_a	P_i
DA-DBP	2.795	3.328	0.639	1.191	0.761
DA-DBP-2	4.086	3.625	0.100	0.887	0.089
DA-PPA	2.288	3.631	0.604	1.587	0.959
DA-PPA-6	3.514	3.402	0.100	0.968	0.097
DA-TPTM	2.597	3.789	0.550	1.459	0.802
DA-TPTM-6	2.368	3.594	0.582	1.518	0.883

相对应,验证了分子量大的钝感剂抗迁移性能较好。表中样品的数字代表老化时间(单位:月); L_a 为初始燃烧活度值,取 B 在0~0.1区域内的 L 平均值; L_m 为 B 在大于0.1区域内 L 的最大值; B_m 为对应于 L_m 的 B 值, B_m 值越大,表明钝感剂渗透深度越大; L_m/L_a 值越大,表面的阻燃效果越好; P_i 值越大,表明燃烧渐增性越好。

可见,行业内较为成熟的包覆、阻燃、堵孔技术在DIANP发射药上有良好的适配性。并且,NA,TPTM等高分子钝感材料的抗迁移性能较好,适用于增塑剂含量较高的DIANP发射药体系。但是,钝感材料的可靠性、工艺性、环保性等方面仍需进一步验证。

1.5 DIANP发射药装药性能验证

为解决某警用转轮手枪在降低弹丸初速后存在的烟焰大,初速跳动大、有剩药等问题,并满足穿透余能小的要求。在弹道诸元不改变的情况下,某研究所针对该武器平台研制了一种小弧厚、低堆积密度且燃速较高的新型发射药^[87],有效满足了警用转轮手枪的使用需求。

随后,魏学涛等^[88]对DIANP发射药在榴弹发射器应用的可行性进行了研究,试验结果(表17)表明DIANP发射药可以有效改善原发射药存在的烧蚀严重,烟焰大等问题,并且提高了发射药在低温条件下的燃尽性,降低了因燃烧产生的残渣。

同时,陈洪等^[89]通过势平衡理论建立了DIANP球扁药装药在35 mm自动榴弹发射器上的内弹道求解模型,克服了经典内弹道理论计算对于自动榴弹发射器的局限性,计算结果与实际的内弹道数据十分接近,

表17 20 mm和35 mm榴弹DIANP发射装药内弹道试验结果^[88]

Table 17 Ballistic test Results within 20 mm and 35 mm explosive ammunition DIANP launching loading^[88]

weapon	sample	charge weight / g	pressure / MPa	muzzle velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	muzzle velocity probable error / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
	reference sample	2.62	98.0	190.0	1.50
35 mm	DA-11	2.85	66.8	207.9	1.63
	DA-11	3.50	67.0	236.0	/
	DA-11	4.00	109.4	263.0	/
20 mm	DA-15	1.6	86.5	212.6	2.5
	QDA8-45	1.4	82.7	196.6	/
	QDA8-45	1.5	89.5	211.3	/

可靠程度较好。

在警用转轮手枪上的成功应用凸显了DIANP作为含能增塑剂所带来的优势,并且在中小口径武器上的模拟验证也显示出了DIANP作为含能增塑剂的潜在应用价值。

1.6 测试方法

1.6.1 DIANP测试方法

2011年,为了解决叠氮基与硝基共存时干扰滴定的问题,梁忆等^[90]提出了一种测定DIANP纯度的电位滴定法。该方法以二甲基亚砜(DMSO)作为溶剂,在NaOH提供的碱性环境中,使DIANP的 N_3^- 与 AgNO_3 的 Ag^+ 反应,生成 AgN_3 沉淀。记录电位滴定曲线,根据标准 AgNO_3 溶液的消耗量计算出样品中DIANP含量,扩展不确定度为0.3%。

同年,樊永惠等^[91]报道了一种毛细管气相色谱法,可用于测量DIANP纯度标准物质中微量二氯甲烷、DMSO及1-羟基-5-叠氮基-3-硝基-3-氮杂戊烷等有机物的含量,具有准确性好,重现性高,快速测量等优点。

1.6.2 DIANP发射药测试方法

快速溶剂萃取(ASE)方法是一种在提高温度和压力的条件下,用有机溶剂萃取的自动化方法,具有有机溶剂用量少、快速、基质影响小、回收率高和重现性好等优点。贾林等^[92]在该方法的基础上准确检测出某型号球形发射药中的DIANP、硝化甘油、II号中定剂含量,验证了该方法在检测发射药组份含量领域应用的可行性。杨彩宁等^[93]报道了一种以反相高效液相色谱法测定叠氮硝胺发射药中NG、RDX、DIANP和

C2含量的方法,该方法具有重复性好,回收率高,可靠性强等特点。

1.6.3 表面处理相关测试方法

聚酯NA已验证是一种与DIANP发射药具有良好适配性的钝感材料,并被用于许多关于DIANP发射药的研究当中。在实验室中,NA含量检测主要采用气相色谱法^[94],该方法需使用碱溶液对NA钝感发射药进行皂化处理,然后通过气相色谱进行分析。优点是可靠性强,准确度高,但样品前处理程序较为复杂^[95]。

显微红外光谱技术也能够用于测量钝感剂浓度分布^[96]。显微红外光谱技术的基本原理是朗伯特-比尔(Lambert-Beer)定律^[97-98]:

$$A = K \cdot L \cdot c$$

式中, A 为吸光度, K 为吸光度系数, L 为光程长, c 为样品中某组分的含量。

在显微扫描前,需要先用切片器对发射药进行切片,然后以连续移动的方式对切片进行扫描,采集红外光谱图数据,数据处理后可得到钝感剂浓度分布曲线。

显微红外光谱技术的优点是非破坏性,灵敏度高,可进行微区分析;但要求被测样品的透光性要好,对于痕量物质的灵敏度有所限制^[99]。

以上可以看出,DIANP合成与DIANP发射药具备了较为完善的测试系统。同时,先进分析技术在钝感剂浓度分布测试中的成功应用也为其他表面处理研究提供了一些参考。

2 结论与展望

DIANP发射药作为一种新型发射药,具有能量高,爆温低,燃烧洁净性好,烟焰残渣少等特点。DIANP与常规发射药配方体系具有良好的相容性,能够改善发射药的加工性,柔韧性。与硝化甘油相比,在能量水平相差不大的情况下,DIANP发射药的感度更低,凝固点更低,热稳定性更好。在目前火炸药行业的高能量低烧蚀发展趋势下,DIANP是最有希望替代硝化甘油的含能增塑剂之一。为促进DIANP发射药进一步的开发与应用,仍有一部分研究有待开展。

(1)深入研究DIANP燃烧分解机理和膛内作用机制,揭示DIANP高能低烧蚀特征的本质原因;研究DIANP发射药组分特点,结构特点与应用性能间的关系,如线性燃速变化,组分之间的协同效应和燃气释放规律等,提升现有DIANP发射药的性能,实现发射药能量、烧蚀、力学性能、感度、氧平衡之间的平衡;探索

DIANP发射药体系中增塑剂,粘结剂,氧化剂在制造,贮存,燃烧等不同过程中的相互作用理论模型,提高DIANP发射药设计能力和应用水平。

(2)开展DIANP发射药温度系数控制技术研究,如正文中提到的NA,TPTM等高分子钝感技术的应用潜力开发和堵孔钝感工艺优化。加强极端环境条件下DIANP发射药适应性研究,针对高温、高湿和超低温等特殊应用场景,探索DIANP发射药的适用范围。

(3)借鉴国内外优秀合成案例与经验,开发绿色、安全环保、低成本的DIANP合成方法及工艺。对于现有较成熟的工艺,应开展DIANP合成工艺放大技术研究、尺寸效应研究。并且,需要关注到反应涉及的废液处理,循环利用等问题,这是实现降本增效,推进工业化应用的重要方面之一。

参考文献:

- [1] 王泽山,何卫东,徐复铭. 火炮发射装药设计原理与技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. Principle and technique for gun propellant charge design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [2] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.
WANG Ze-shan. Introduction to energetic materials [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006.
- [3] 蒯向阳,郑文芳. 火药学[M]. 北京:化学工业出版社,2020.
LIN Xiang-yang, ZHENG Wen-fang. HUO YAO XUE [M]. Beijing: Chemical Industry, 2020.
- [4] 彭翠枝,范夕萍,任晓雪,等. 国外火炸药技术发展新动向分析[J]. 火炸药学报,2013, 36(3): 1-5.
PENG Cui-zhi, FAN Xi-ping, REN Xiao-xue, et al. Analysis on recent trends of foreign propellants and explosives technology development [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013, 36(3): 1-5.
- [5] ANNIYAPPAN M, TALAWAR M B, SINHA R K. et al. Review on advanced energetic materials for insensitive munition formulations [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2020, 56(5): 495-519.
- [6] 薛金强,尚丙坤,王连心,等. 含能增塑剂的研究新进展[J]. 化学推进剂与高分子材料,2012, 10(6): 7-13.
XUE Jin-qiang, SHANG Bing-kun, WANG Lian-xin, et al. New advance in research of energetic plasticizers [J]. Chemical Propellants and Polymeric Materials, 2012, 10(6): 7-13.
- [7] 曹晓雪. 增塑剂/硝化棉性能的分子动力学模拟[D]. 太原:中北大学,2022.
CAO Xiao-xue. Molecular dynamics simulation of plasticizer/nitrocellulose properties [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [8] 赵宝东,高福磊,汪营磊,等. 火药用叠氮含能增塑剂[J]. 化学进展,2019, 31(2/3): 475-490.
ZHAO Bao-dong, GAO Fu-lei, WANG Ying-lei, et al. Azido energetic plasticizers for gun and rocket propellants [J]. Progress in Chemistry, 2019, 31(2/3): 475-490.
- [9] BODAGHI A, SHAHIDZADEH M. Synthesis and characteriza-

- tion of new PGN based reactive oligomeric plasticizers for glycidyl azide polymer [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43(4): 364-370.
- [10] JAROSZ T, STOLARCZYK, A, WAWRZKIEWICZ-JALOWIECKA, A. Glycidyl azide polymer and its derivatives-versatile binders for explosives and pyrotechnics: Tutorial review of recent progress[J]. *Molecules*, 2019, 24: 4475.
- [11] ZHANG Heng, WANG Yong, REN Xiao-ning, et al. Study on thermodynamic properties of several innovative azide plasticizers[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2021, 44(5): 589-594.
- [12] SCHOCK M, BRÅSE S. Reactive & efficient: organic azides as cross-linkers in material sciences [J]. *Molecules*, 2020, 25(4): 1009.
- [13] LU A, LIAO X. Investigation of the properties of LOVA gun propellants: in the proceedings of the 24th international conference of ICT[C]//Karlsruhe, Germany, 1993.
- [14] SHEIBANI N, ZOHARI N, FAREGHI-ALAMDARI R. Rational design, synthesis and evaluation of new azido-ester structures as green energetic plasticizers[J]. *Dalton Transactions*, 2020, 49(36): 12695-12706.
- [15] ZOHARI N, SHEIBANI N. Link between density and molecular structures of energetic azido compounds as green plasticizers[J]. *Z. Anorg. Allg. Chem*, 2016, 642(24): 1472-1479.
- [16] TURKER L. Azo-bridged triazoles: Green energetic materials [J]. *Defence Technology*, 2016, 12(1): 1-15.
- [17] CONROY P J, LEVERITT C S, HIRVONEN J K, et al. The role of nitrogen in gun tube wear and erosion[R]. US Report, Army research laboratory, Weapons and materials research Directorate, Aberdeen proving ground, M.D.21005, Dec 2004.
- [18] FLANAGAN J E. 1,5-Diazido-3-nitrazapentane and method of preparation thereof: US, 5013856[P]. 1991.
- [19] FLANAGAN J E. 1,3-Diazido-2-nitrazapropane: US, 4085123 [P]. 1978.
- [20] FRANKEL M B, WITUCKI E F. Process for preparing 1,5-diazido-3-nitrazapentane, US, 4761250[P]. 1988.
- [21] 高福磊,姬月萍,汪伟,等. 1,5-二叠氮基-3-硝基氮杂戊烷合成反应动力学[J]. 火炸药学报, 2011, 34: 12-14.
GAO Fu-lei, JI Yue-ping, WANG Wei, and et al. Synthesis reaction kinetics of 1,5-diazido-3-nitrazapentane [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011, 34: 12-14.
- [22] 肖凯,汪营磊,高福磊,等. DIANP 合成工艺优化及杂质对其性能的影响[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2022, 20: 58-61.
XIAO Kai, WANG Ying-lei, GAO Fu-lei, et al. Optimization of synthesis process of DIANP and influence of impurities on its performance[J]. *Chemical Propellant and Polymeric Materials*, 2022, 20: 58-61.
- [23] 姬月萍,兰英,李普瑞,等. 1,5-二叠氮基-3-硝基氮杂戊烷的合成与表征[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 44-46.
JI Yue-ping, LAN Ying, LI Pu-rui, et al. Synthesis and characterization of 1,5-diazido-3-nitrazapentane (DIANP) [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2008, 31(3): 44-46.
- [24] SIMMONS R L. Azidonitramine: US, 4450110[P], 1984.
- [25] 汪伟,丁峰,梁忆,等. DIANP 纯度标准物质的制备及表征[J]. 火炸药学报, 2010, 33(5): 52-55.
WANG Wei, DING Feng, LIANG Yi, et al. Preparation and characterization of DIANP certified reference material [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2010, 33(5): 52-55.
- [26] 高福磊,姬月萍,刘卫孝. 1,5-二叠氮基-3-硝基氮杂戊烷合成方法改进[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2014, 12(6): 79-80.
GAO Fu-lei, JI Yue-ping, LIU Wei-xiao. Improvement on synthesis methods of 1,5-diazido-3-nitrazapentane [J]. *Chemical Propellant and Polymeric Materials*, 2014, 12(6): 79-80.
- [27] 肖凯. 叠氮硝胺的合成及杂质对其性能的影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
XIAO Kai. Study on synthesis of DIANP and effect of impurities on its properties [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [28] 薛金强,徐琰璐,韩世民,等. 1,5-二叠氮基-3-硝基氮杂戊烷的合成新方法[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2018, 16(3): 55-58.
XUE Jin-qiang, XU Yan-lu, HAN Shi-min, et al. New method for synthesis of 1,5-diazido-3-nitrazapentane [J]. *Chemical Propellant and Polymeric Materials*, 2018, 16(3): 55-58.
- [29] 王建灵,姬月萍,高福磊,等. 叠氮硝胺安全性能参数的实验测定[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 693-696.
WANG Jian-ling, JI Yue-ping, GAO Fu-lei, et al. Experimental measurement of safety parameters of DIANP [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 693-696.
- [30] 徐琰璐,薛金强,王勃. 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.
XU Yan-lu, XUE Jin-qiang, WANG Bo. Synthesis and application of 1,5-diazido-3-nitrazapentane energetic plasticizer [J]. *Chemical Propellant and Polymeric Materials*, 2018, 16(5): 32-36.
- [31] United Nations. Recommendations on the transport of dangerous goods-Tests and criteria, ST/SG/AC. 10/11. United Nations Publication, New York, New York 10017.
- [32] 杨钊飞,赵凤起,李鑫. 含能材料相容性评定方法研究进展[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(3): 141-146.
YANG Zhao-fei, ZHAO Feng-qi, LI Xin. Research progress on methods of evaluating of energetic materials compatibility [J]. *Sichuan Bingong Xuebao*. 2015, 36(3): 141-146.
- [33] 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 and Propellants*, 2011, 34(2): 84-90.
- [34] 杨俊清. 高能有机叠氮增塑剂的设计与计算研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
YANG Jun-qing. Design and computational study of energetic organic azidoplasticizers [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [35] GREENHALGH D J, WILLIAMS A C, TIMMINS P, et al. Solubility parameters as predictors of miscibility in solid dispersions [J]. *Journal of Pharmaceutical Science*, 1999, 88(11): 1182-1190.
- [36] YANG J, GONG X, WANG G, et al. Theoretical studies on the plasticizing effect of DIANP on NC with various esterification degrees [J]. *Computational Materials Science*, 2014, 95: 129-135.
- [37] LEE J N, PARK C, WHITESIDES G M. Solvent compatibility of poly (dimethylsiloxane) - based microfluidic devices [J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 75(23): 6544-6554.
- [38] PARASCHIV T, TIGANESCU T V, OVIDIU IORGA G, et al. Experimental and theoretical study on three combustion models for the determination of the performance parameters of nitrocellulose-based propellants [J]. *Revista de Chimie*, 2020,

- 71(9): 87-97.
- [39] 杜泽林. HMX与粘结剂界面作用力定性表征[D]. 太原:中北大学, 2023.
DU Ze-lin. Qualitative characterization of interface forces between HMX and binder[D]. Taiyuan:North University of China, 2023.
- [40] 秦伟华. 叠氮含能增塑剂/硝化纤维素的分子动力学研究[D]. 太原:中北大学, 2023.
QIN Wei-hua. Molecular dynamics simulation on the performance of azido energetic plasticizers/nitrocellulose[D]. Taiyuan:North University of China, 2023.
- [41] SIMMONS R L, YONG H L. Azido nitramine: US, 4450110 [P]. 1984
- [42] LIU Y, WANG W, LI D. The research progress of the azidonitramine plasticizers: Synthesis, properties and applications[J]. *FirePhysChem*, 2024, 4(1): 10-20.
- [43] 胡睿,杨伟涛,石先锐,等. 叠氮硝胺对发射药枪口焰的影响[J]. 火炸药学报, 2017, 40(4): 102-106.
HU Rui, YANG Wei-tao, SHI Xian-rui, et al. Effect of 1,5-diazido-3-nitrazapent on the muzzle flash of gun propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2017, 40(4): 102-106.
- [44] 崔鹏腾,焦旭英,贾永杰,等. 叠氮硝胺发射药的贮存性能研究[J]. 火工品, 2018, 3: 35-37.
CUI Peng-teng, JIAO Xu-ying, JIA Yong-jie, et al. Study on the storage performance of azidonitramine gun propellant [J]. *INITIATORS AND PYROTECHNICS*, 2018, 3: 35-37.
- [45] JOSHI M M, DAYANANDAN C R, KOHADKAR M J. Study of energetic plasticizer DANPE in triple base gun propellant [C]// 29th Intl Pyrotechnics Seminar. 2002, 14(19): 643-647.
- [46] DAMSE R S, AMARJIT Singh. Studies on the high-energy gun propellant formulations based on 1,5-diazido-3-nitrazapentane [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172: 1699-1702.
- [47] MULLAY John. Relationship between sensitivity and molecular electronic structure [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 1987, 12: 121-124.
- [48] DAMSE RS, SINGH A. Evaluation of energetic plasticisers for solid gun propellant [J]. *Defence Science Journal*, 2008, 58, 86-93.
- [49] 魏学涛,赵颖,李乃琴,等. 新型硝基胍发射药研究[J]. 火炸药学报, 2001, 4: 34-38.
WEI Xue-tao, ZHAO Ying, LI Nai-qin, et al. The study on a new kind of nitroguanidine propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 4: 34-38.
- [50] PEI J, WU Z, HU Y. Molecular dynamic simulations and experimental study on pBAMO-b-GAP copolymer/energetic plasticizer mixed systems [J]. *FirePhysChem*, 2022, 2(1): 67-71.
- [51] 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]. *Explosive Materials*, 2020, 49(5): 14-19.
- [52] 赵宝昌,马桂兰,何秀英,等. 硝基胍火药的中止燃烧研究[J]. 火炸药学报, 1983, 1: 3-9.
ZHAO Bao-chang, MA Gui-lan, HE Xiu-ying, et al. Study on stopping combustion of nitroguanidine powder [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 1983, 1: 3-9.
- [53] 陆安舫,等. 国外火药性能手册[M]. 北京:兵器工业出版社, 1991.
LU An-fang et al. Foreign gunpowder properties manual [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1991.
- [54] 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 and Propellants*, 2015, 38(3): 90-93.
- [55] 刘继华. 火药物理化学性能[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1997.
LIU Ji-hua. Physical and chemical properties of gunpowder [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [56] 贾林,张林军,常海. 热应力下1,5-二叠氮-3-硝基胍杂戊烷对发射药中硝化棉热行为的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(4): 414-419.
JIA Lin, ZHANG Lin-jun, CHANG Hai. Influence of 1,5-diazido-3-nitrazapentane (DIANP) on the thermal behavior of NC in gun propellant under heat stress [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2018, 41(4): 414-419.
- [57] LI Jing, JIN Shao-hua, LAN Guan-chao, et al. Molecular dynamics simulations on miscibility, glass transition temperature and mechanical properties of PMMA/DBP binary system [J]. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2018, 84: 182-188.
- [58] LU Y, SHU Y, LIU N, et al. Theoretical simulations on the glass transition temperatures and mechanical properties of modified glycidyl azide polymer [J]. *Computational Materials Science*, 2017, 139: 132-139.
- [59] 郑林,李生惠,魏学涛,等. 硝化棉含氮量对叠氮硝胺发射药力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 47-50.
ZHENG Lin, LI Sheng-hui, WEI Xue-tao, et al. The influence of nitrogen content of nitrocellulose on the mechanical properties of the diazidonitrazapentane propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2003, 26(3): 47-50.
- [60] 宋力骞,刘大斌,钱华,等. 某三基发射药的老化寿命评估[J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 627-631.
SONG Li-qian, LIU Da-bin, QIAN Hua, et al. Aging life evaluation of a tri-base gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2018, 41(6): 627-631.
- [61] 杨建兴,贾永杰,刘毅,等. 含RDX的叠氮硝胺发射药热分解与燃烧性能[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*, 2012, 20(2): 180-183.
- [62] 杨建兴,贾永杰,刘国权,等. DAGR125发射药的燃烧特征[J]. 火炸药学报, 2010, 33(5): 69-72.
YANG Jian-xing, JIA Yong-jie, LIU Guo-quan, et al. Combustion characteristics of DAGR125 gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2010, 33(5): 69-72.
- [63] 石先锐,闫光虎,王勇,等. 新型高能叠氮硝胺发射药高压燃烧稳定性研究[J]. 火炸药学报, 2019, 44(2): 245-251.
SHI Xian-rui, YAN Guang-hu, WANG Yong, et al. Study on high pressure combustion stability of a new type of high energy azidonitramine gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2019, 44(2): 245-251.
- [64] 石先锐,许灿啟,贾永杰,等. 典型高能硝胺发射药的摩擦静电起电特性[J]. 火炸药学报, 2022, 45(1): 109-114.
SHI Xian-rui, XU Can-qi, JIA Yong-jie, et al. Frictional static

- electricity characteristics of typical high energy nitramine gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2022, 45(1): 109-114.
- [65] 黄振亚,罗运军,赵省向. 火炸药成型加工工艺学[M]. 国防工业出版社, 2020.
HUANG Zhen-ya, LUO Yun-jun, ZHAO Sheng-xiang. Processing technology of explosive forming [M]. National Defence Industry Press, 2020.
- [66] 杨建兴,舒安民,张阔,等. 叠氮硝胺发射药内溶法成球工艺研究[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 87-90.
YANG Jian-xing, SHU An-min, ZHANG Kuo, et al. Study on the inner dissolution manufacture process for conglobating of azidonitramine gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(3): 87-90.
- [67] 冯昌林,李小元,杨建兴,等. 球形叠氮硝胺发射药工艺安全性的实验研究[J]. 火炸药学报, 2015, 38(5): 95-98.
FENG Chang-lin, LI Xiao-yuan, YANG Jian-xing, et al. Experimental study on the processing safety of spherical azidonitramine gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2015, 38(5): 95-98.
- [68] 丁锋,兰英,汪伟,等. 1,5-二叠氮基-3-硝基-3-氮杂戊烷(DIANP)的性能及应用[C]//2005年中国兵工学会青年学术年会暨陕西省兵工学会第八届青年学术交流会. 西安:陕西省兵工学会, 2005: 129-131.
DING Feng, LAN Ying, WANG Wei, et al. Performance and application of 1, 5-diazido-3-nitrazapentane (DIANP) [C]//The 8th Youth Academic Exchange meeting of Shaanxi Ordnance Engineering Society. Xi'an: Shaanxi Ordnance Engineering Society. 2005: 129-131.
- [69] 贾林,张泉,张林军,等. 压延烘干法制备用于定量分析的叠氮硝胺吸收药[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6): 94-97.
JIA Lin, ZHANG Gao, ZHANG Lin-jun, et al. Azidonitramine intermediate sample preparation for quantitative analysis by calendring-drying method [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2016, 39(6): 94-97.
- [70] 芮久后,黄辉,王泽山. 硝胺包覆火药工艺及弹道性能研究[J]. 含能材料, 2004, 21(12): 147-149.
RUI Jiu-hou, HUANG Hui, WANG Ze-shan. Study on the coating technology and ballistic performance of the coated nitramine propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 21(12): 147-149.
- [71] 魏学涛,卿辉,崔鹏腾,等. 叠氮硝胺发射药燃烧性能调控技术[J]. 火炸药学报, 2004, 27(4): 46-49.
WEI Xue-tao, QING Hui, CUI Peng-teng, et al. Adjustment on the burning behaviors of the propellant containing diazidopentane [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004, 27(4): 46-49.
- [72] 赵强,刘波,刘少武,等. 堵孔钝感高能叠氮硝胺发射药的性能[J]. 含能材料, 2020, 28(3): 242-247.
ZHAO Qiang, LIU Bo, LIU Shao-wu, et al. Performance of plugged and insensitive high-energy azidonitramine gun propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(3): 242-247.
- [73] LIU Bo, MA Fang-sheng, BIAN Xiao-yu. Research on the performance of deterred-coating DIANP gun propellant [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2478, 032006.
- [74] 张勇. 钝感剂在贮存过程中的扩散行为及其对球扁药性能的影响[D]. 南京理工大学, 2020.
ZHANG Yong. Migration phenomenon of deterrent during stor-
- age and their influence on the performance of double-based oblate spherical propellant [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [75] 刘少武,刘波,郑双,等. 高分子钝感剂在两种发射药中的迁移性能[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 635-638.
LIU Shao-wu, LIU Bo, ZHENG Shuang, et al. Migration of polymer deterrent in two kinds of propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(6): 635-638.
- [76] HUISGEN R. Kinetics and mechanism of 1,3-dipolar cycloadditions [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 1963, 2(11): 633-645.
- [77] 力小安. 高增塑剂含量发射药表面处理技术[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
LI Xiao-an. Surface modification technology of high-plasticizer-concentration gun propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [78] 潘胜. 叠氮硝胺发射药表面钝感剂研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
PAN Sheng. Research on surface deterrents of azidonitramine gun propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [79] 侯果文. 高能发射药新型表面钝感剂研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.
HOU Guo-wen. New surface deterrents of high-energy gun propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [80] 范建芳. 高能发射药湿法钝感技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
FAN Jian-fang. Study on wet insensitive technology of high energy propellant [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [81] 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.
- [82] 扈艳红,全钦宇,刘世领,等. 叠氮化合物与炔烃环加成聚合反应研究[C]//2003年全国高分子学术论文报告会. 杭州:中国化学会, 2003: B45-B46.
HU Yan-hong, TONG Qin-yu, LIU Shi-ling, et al. Study on cycloaddition polymerization of azides and alkynes [C]//2003 National polymer academic paper report. Hangzhou: Chinese Chemical Society, 2003: B45-B46.
- [83] 凌剑,冯增国. 叠氮化物的固化反应特征研究[J]. 火炸药学报, 1999, 22(1): 19-21.
LING Jian, FENG Zeng-guo. Study on curing reaction of azide [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 1999, 22(1): 19-21.
- [84] 黄建智,万里强,田建军,等. 1,3-二(炔丙基氧)苯与4,4'-二叠氮甲基联苯的聚合反应及聚合物性能的研究[J]. 化学学报, 2007, 65(22): 2629-2634.
HUANG Jian-zhi, WAN Li-qiang, TIAN Jian-jun, et al. Polymerization of 1, 3-di (propargyloxy) benzene with 4, 4'-diazido-methylbiphenyl and properties of the formed polytriazole [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2007, 65(22): 2629-2634.
- [85] 扈艳红,刘世领,全钦宇,等. 1,3-偶极环加成反应合成1-(取代苯基)-1,2,3-三唑类化合物[J]. 有机化学, 2004, 24(10): 1228-1232.

- HU Yan-hong, LIU Shi-ling, TONG Qin-yu, et al. Synthesis of 1-(substituted benzyl)-1,2,3-triazoles by 1,3-dipolar cycloaddition reaction [J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2004, 24(10): 1228-1232.
- [86] 宋亚苹, 黄振亚, 解德富, 等. 钝感剂种类对叠氮硝胺发射药贮存稳定性的影响[J]. 火炸药学报, 2020, 43(5): 553-557.
- SONG Ya-ping, HUANG Zhen-ya, XIE De-fu, et al. Effect of deterrents on storage stability of azidonitramine gun propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2020, 45(5): 553-557.
- [87] 余斌. 9 mm 警用转轮手枪采用的新型发射药——叠氮硝胺[N]. 轻兵器, 2006, 6: 29.
- YU Bin. New propellant powder for 9mm police wheel pistol [N]. *Small Arms*, 2006, 6: 29.
- [88] 魏学涛, 卿辉. DIANP 发射药用于榴弹发射器装药的内弹道性能分析[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 47-49.
- WEI Xue-tao, QING Hui. Feasibility analysis of DIANP propellant in bomb throwing gun charge[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2003, 26(1): 47-49.
- [89] 陈洪. DIANP 发射装药的势平衡理论模拟[C]//2009 年湖南国防科技论坛. 湖南: 湖南省兵工学会, 2009: 182-185.
- CHEN Hong. DIANP launching loading potential equilibrium theory simulation[C]//2009 Hunan National Defense Science and Technology Forum. Hunan: Hunan Society of Military Industry, 2009: 182-185.
- [90] 梁忆, 汪伟, 王景荣, 等. 电位滴定法测定标准物质 DIANP 的纯度[J]. 火炸药学报, 2011, 34(3): 76-79.
- LIANG Yi, WANG Wei, WANG Jing-rong, et al. Determination of standard substance DIANP purity by electrode potential titration [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2011, 34(3): 76-79.
- [91] 樊永惠, 赵铁柱, 杨彩宁, 等. 气相色谱法测定 DIANP 纯度标准物质中有机杂质[J]. 化学分析计量, 2011, 20(6): 68-70.
- FAN Yong-hui, ZHAO Tie-zhu, YANG Caining, et al. Determination of organic impurities in purity standard material dianp by GC [J]. *Chemical Analysis and Meterage*. 2011, 20(6): 68-70.
- [92] 贾林, 张皋, 胡玲, 等. ASE-HPLC 检测某型号球形发射药中的叠氮硝胺、硝化甘油、II 号中定剂含量的研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2008, 14(4): 222-225.
- JIA Lin, ZHANG Gao, HU Ling, et al. Determination of the components in the globule gun-propellant using accelerated solvent extraction (ASE) followed by HPLC [J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2008, 14(4): 222-225.
- [93] 杨彩宁, 赵娟, 陈曼, 等. 反相高效液相色谱法测定含 RDX 的叠氮硝胺发射药中 4 种组份含量[J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 617-620.
- YANG Cai-ning, ZHAO Juan, CHEN Man, et al. Determination of four components in azidonitramine gun propellant containing RDX by RP-HPLC [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2018, 41(6): 617-620.
- [94] 刘波, 王琼林, 刘少武, 等. 发射药钝感剂分布及迁移的研究进展[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 447-452.
- LIU Bo, WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, et al. Review on distribution and diffusion of deterrents in gun propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(4): 447-452.
- [95] 王雅婷, 赵家有. 气相色谱法在化工分析中的技术应用[J]. 低温与特气, 2024, 42(2): 41-43.
- WANG Ya-ting, ZHAO Jia-you. Technical application of gas chromatography in chemical analysis [J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 2024, 42(2): 41-43.
- [96] 刘波, 刘少武, 郑双, 等. 叠氮硝胺药中高分子钝感剂的迁移性能研究[C]//2010 年火炸药技术学术研讨会.
- LIU Bo, LIU Shao-wu, ZHENG Shuang, et al. Transport performance study of polymericdeterrent in azidonitramine based propellant[C]//2010 Symposium on Explosive Technology.
- [97] VARRIANO-MARSTON E. An infrared microspectroscopy method for determining deterrent penetration in nitrocellulose-based propellant grains [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1987, 33: 107-116.
- [98] Ossola B, Vogelsanger B, Bronnimann E. Fourier-transformations-infrarot-spektroskopie-eine vielseitige methode zur analytische von nitrocellulose und treibladungspulvern [C]//25th International Annual Conference of ICT, 1994: 38/1-38-16.
- [99] 杨秀兰, 睢贺良, 郝晓飞. 显微红外光谱成像技术研究 BTF 炸药老化中的组分迁移[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(10): 55-56.
- YANG Xiu-lan, SUI He-liang, HAO Xiao-fei. Drift behavior of BTF during aging by FTIR microspectroscopy imaging [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(10): 55-56.

Progress in the Synthesis of DIANP and Its Applications in Propellants

YUE Chun-hui, LIU Bo, LI Man-man, WANG Feng, WEI Lun, WANG Qiong-lin

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

Abstract: DA-propellant is a high-energy and low erosion propellant independently developed in China. It has the characteristics of high energy, low detonation temperature, good combustion cleanliness, and low smoke residue. This article summarizes the research on the synthesis and application azidenitroamine, formulation and performance of DA-propellant, manufacturing process, surface treatment, charge application, and testing methods. It also highlights that there are deficiencies in certain basic theoretical aspects and limited research on environmental adaptability of DA-propellant. Developing green, low-cost synthesis methods and mastering DIANP process amplification technology are effective ways to enhance competitiveness. It is also believed that the development of DA-propellant requires a combination of basic research and practical applications to promote the development of high-energy and low ablation characteristic materials in the industry.

Key words: gun propellant; nitrosamine; application; DIANP

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024173