

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.05.001

3,4-二硝基吡唑 (DNP) 的研究进展*

雷 伟 罗一鸣 张蒙蒙 杨 斐 李秉擘 杨 勃
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 随着武器装备的不断发展,对弹药能量和安全性的要求也越来越高,传统 TNT 基熔铸炸药存在易损性差、长期储存渗油、爆轰性能不理想等缺点,已不能满足当前不敏感弹药的发展要求;因此,研究炸药的新型载体是当前熔铸炸药发展的一个重要方向。3,4-二硝基吡唑(DNP)是一种新型的熔铸炸药载体。根据国内外的相关报道,阐述了 DNP 的合成方法、基本性能、机械感度、热安全性、相容性、应用性等研究发展现状。研究结果表明:目前,经 N-硝化、热重排、C-硝化三步法合成 DNP 的工艺更加稳定,得率较高;DNP 的熔点为 86.5 ℃,理论密度为 1.87 g/cm³,实测爆速为 7 633 m/s($\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$),爆热为 4 326 kJ/kg,理论爆压为 28.7 GPa;DNP 的机械感度与 TNT 相当,具有较好的机械安全性;DNP 热分解分两个阶段,第一阶段分解放热峰为 319.8 ℃,第二阶段分解放热峰为 407.2 ℃,与 TNT 和 DNTF 相比,DNP 的热分解峰温高,热安定性好;DNP 与 RDX、HMX、CL-20、Al、AP、微晶蜡具有较好的相容性,可以与这些组分组成混合炸药,具有广泛的适用性。DNP 是一种具有巨大潜力的熔铸炸药载体,应对其进行更深入的研究。最后展望分析了 DNP 后续的研究发展方向。

[关键词] 3,4-二硝基吡唑;熔铸炸药;爆速;机械感度;热安全性

[分类号] TQ560.1

Research Progress of 3,4-Dinitropyrazole (DNP)

LEI Wei, LUO Yiming, ZHANG Mengmeng, YANG Fei, LI Bingbo, YANG Bo
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] With the continuous development of weapons and equipment, the energy efficiency and safety for ammunition are also highly required. Traditional TNT based melt cast explosives have some disadvantages, such as poor vulnerability, oil leakage over long-term storage, and unsatisfactory detonation performance, which cannot meet the development requirements of current insensitive ammunition. Development of melt casting explosives is an important objective in new carrier explosives research. 3,4-Dinitropyrazole (DNP) is a new type of explosive carrier, according to the related reports at home and abroad, the synthesis method, basic properties, mechanical sensitivity, thermal safety, compatibility and application of DNP were reviewed. The results show that the synthesis process of DNP by N-nitrication, thermal rearrangement and C-nitrication is more reliant and the yield is higher. Melting point of DNP is 86.5 ℃, theoretical density is 1.87 g/cm³, actual explosion speed is 7 633 m/s ($\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$), explosion heat is 4 326 kJ/kg, and the theoretical explosion pressure is 28.7 GPa. Mechanical sensitivity of DNP is equal to that of TNT, but with better mechanical safety. Thermal decomposition of DNP can be divided into two stages. The first stage is 319.8 ℃, and the second stage is 407.2 ℃. Compared with TNT and DNTF, thermal decomposition peak temperature of DNP is higher, thus its thermal stability is superior. DNP has good compatibility with RDX, HMX, CL-20, Al, AP and microcrystalline wax. It can be mixed with these components that results in a variety of applicability. It shows that DNP is a kind of melting and casting carrier explosive with great application potential, which should be further studied. Finally, the future research direction of DNP is prospected and analyzed.

[KEYWORDS] 3,4-dinitropyrazole (DNP); cast explosive; detonation velocity; mechanical sensitivity; thermal safety

* 收稿日期:2020-03-23
第一作者:雷伟(1993 -),男,助理工程师,主要从事混合炸药配方及工艺研究。E-mail:997343585@qq.com

引言

熔铸炸药是以炸药载体为基,在熔融态中加入高能固相炸药颗粒进行铸装的混合炸药,是目前应用最广泛的军用混合炸药。2,4,6-三硝基甲苯(TNT)自被合成出以来,一直在军事领域受到青睐,被大量用于装填破甲弹、杀破弹、航弹、导弹战斗部等武器装备^[1]。TNT 虽然具有制备工艺成熟、成本较低等优点,但存在爆轰性能不理想、渗油、装药质量差等问题,已不能满足当前武器装备的战略需要^[2-4]。因此,科学家们积极探索研发出新型熔铸炸药载体,如 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)、3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)、1,3,3-三硝基氮杂环丁烷(TNAZ)、3,4-二硝基吡唑(DNP)等。其中, DNAN 的钝感性能较好,但其能量较 TNT 低,其爆轰性能较差;DNTF 能量较高,但是其机械感度较差,熔点温度基本接近熔铸炸药上限,且具有一定的挥发性;TNAZ 稳定性好、爆轰性能好,但是成本太高,难以实现量产。

DNP 是一种新型的熔铸炸药载体,分子结构如图 1 所示。DNP 首次被合成出来是在 20 世纪 70 年代初,当时对其相关性能研究工作做得很少^[5];直到 2009 年,美国 Price 等^[6]发现,DNP 是一种低熔点的单质炸药,其能量和感度均优于 TNT,有望代替 TNT 作为一种熔铸炸药载体。

本文中,根据国内外相关文献,介绍了 DNP 单质炸药的合成,同时对 DNP 相关性能的研究现状进行了总结分析,与 TNT 进行对比,研究其作为新型熔铸炸药载体的优越性。

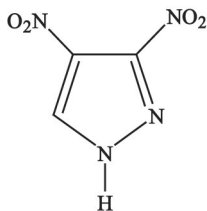


图 1 DNP 的分子结构

Fig.1 Molecular structure of DNP

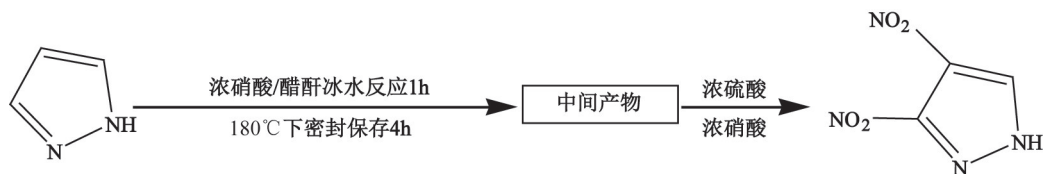


图 3 DNP 的两步法合成路线

Fig.3 Two-step synthetic route of DNP

1 DNP 的合成

相关研究表明,DNP 可通过一步法、两步法、三步法等不同的方法合成。目前常用的方法是三步法合成 DNP。

早期国外科研工作者对一步法和两步法合成 DNP 做过相关研究。Katritzky 等^[7]直接将吡唑在硝酸和三氟乙酸酐(TFAA)混合体系中进行硝化,一步合成了 DNP,合成路线如图 2 所示。

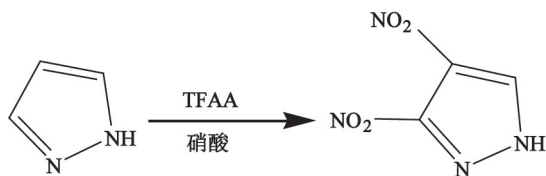


图 2 DNP 的一步法合成路线

Fig.2 One-step synthetic route of DNP

Stefan 等^[8]以吡唑为原料,第一步先将其在浓硝酸和醋酐混合液中冰水浴下反应 1 h,然后在 180 °C 的温度下反应 4 h;第二步将第一步得到的产物在硝硫混酸中进行硝化,得到 DNP,合成路线如图 3 所示。Ravi 等^[9]先将吡唑在碘和碘化钾的氨水溶液中反应,然后将中间反应产物在硝酸和四氢呋喃(THF)混合体系中硝化,得到 DNP。

三步法具体的合成步骤见图 4。将吡唑作为原材料,首先在发烟硝酸和冰醋酸中进行 N-硝化,然后在苯腈中进行热重排,最后在硝硫混酸中再进行 C-硝化,得到 DNP。三步法合成 DNP,合成原理简单,工艺也相对成熟,是国内科研工作者研究合成 DNP 最常用的方法。

汪营磊等^[10]以吡唑为原料,经 N-硝化、热重排、C-硝化等合成方法合成了 DNP,并且研究了反应温度、物料比、反应时间等对硝化反应收率的影响,确定了较佳反应条件:反应温度为 55 ~ 60 °C,3-硝基吡唑与浓硝酸的摩尔比为 1 : 2,反应时间为 1 h,总收率为 55%。杜闪^[11]以吡唑为原料,在硝酸和 P₂O₅ 混合硝化体系中进行 N-硝化,然后再进

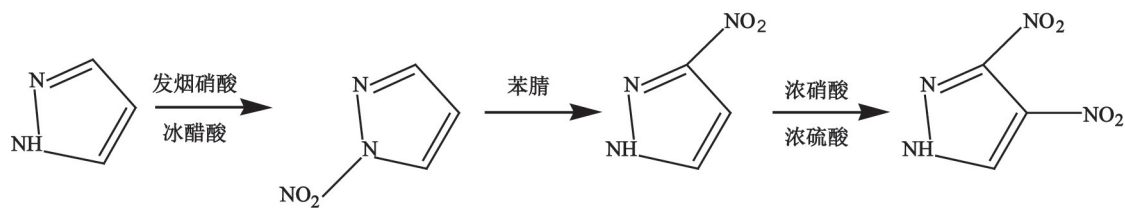


图 4 DNP 的三步法合成路线
Fig. 4 Three-step synthetic route of DNP

行热重排、C-硝化,合成了 DNP;详细研究了该工艺的合成路线以及最高产率的工艺制备条件。李永祥等^[12]以吡唑为原料,通过硝化、重排、再硝化三步法合成了 DNP,并对 DNP 的性能进行了表征。汪营磊等^[13]对 DNP 合成进行了放大工艺研究,优化了硝化工艺条件;DNP 较佳反应温度为55~57℃,反应时间为45 min,收率为86.8%;研究表明,重结晶溶剂能够循环利用5次以上,重结晶纯度达到99%以上,DNP 的放大硝化工艺稳定性较好,有望在混合炸药的研制中得到应用。

综合国内外合成 DNP 的方法来看,三步法的合成工艺更加稳定、得率高。与 TNT 的合成相比较,工艺操作步骤的复杂性相当;从合成成本来考虑,TNT 已应用多年,其原材料等价格低廉,成本较低,而 DNP 目前还处于推广应用阶段,其合成成本较 TNT 高。应继续优化 DNP 的合成路线,简化合成步骤,提高得率,从而降低其成本,拓宽其应用范围。

2 DNP 的性能

2.1 单质 DNP 基本物化性能

DNP 和 TNT 的基本性能见表 1。

表 1 DNP 和 TNT 的性能^[10]

Tab. 1 Performances of DNP and TNT^[10]

性能	DNP	TNT
氮质量分数/%	35.44	14.09
氧平衡/%	-30.33	-73.96
熔点/℃	86.5	80.9
密度/(g·cm ⁻³)	1.81	1.66
爆速/(m·s ⁻¹)	8 104	6 856
收缩率/%	10.2 [*]	12.7
黏度/(mPa·s)	26.6(88℃) [*]	9.5(85℃)

注: * 为笔者测试得到。

从表 1 中可知,DNP 的氮含量、氧平衡、熔点、理论密度和爆速均高于 TNT。DNP 属于负氧平衡炸药,需氧量为-30.33%,可以通过加入高氯酸钾

(KP)、高氯酸铵(AP)等氧化剂来调节氧平衡,不仅可以增加装药密度,也能够提高体系的总能量。DNP 的熔点为 86.5℃,作为熔铸炸药载体更有利于对工艺过程中温度的控制。DNP 的理论密度为 1.81 g/cm³,爆速为 8 104 m/s,爆轰性能较 TNT 好。DNP 的收缩率为 10.2%,较 TNT 低,但是其黏度比 TNT 高。

2.2 DNP 的机械感度

按照 GJB 772A—1997 爆炸概率法,测试了 DNP、TNT 单质以及 DNP/RDX、TNT/RDX 混合炸药的撞击感度与摩擦感度,结果如表 2 所示。

表 2 DNP 与其他炸药的机械感度

Tab. 2 Mechanical sensitivity of DNP and other explosives

样品	撞击感度/ cm	摩擦感度/ %
DNP	146	4
$m(\text{DNP}):m(\text{RDX})=40:60$	105	10
TNT	157	16
$m(\text{TNT}):m(\text{RDX})=40:60$	124	8

撞击感度试验条件:10 kg 落锤,25 cm 落高,50 mg 药量;摩擦感度试验条件:3.92 MPa,90°摆角,20 mg 药量。

从试验结果可以看出,DNP 的撞击感度略高于 TNT,摩擦感度低于 TNT。表明 DNP 具有较好的机械安定性;和 B 炸药(TNT/RDX)相同配比的混合炸药的机械感度也和 B 炸药相当。

2.3 DNP 的热安全性

李永祥等^[12]通过红外技术对 DNP 的性能进行表征。红外分析显示,N—H 的红外吸收为 3 435 cm⁻¹和 3 152 cm⁻¹;C—H 的红外吸收为 2 928 cm⁻¹;C—NO₂ 的红外吸收为 1 555、1 382 cm⁻¹和 1 348 cm⁻¹。核磁共振光谱表明,在 δ=8.71 处的单重峰(¹H)为吡唑环上的 C(3)位质子化学位移。

DSC 曲线表明,吸热峰的峰值为 86.5 ℃,表明 DNP 在 86.5 ℃ 开始融化(升温速率 10 ℃/min,样品量 2.5 mg)。

田新等^[14]采用 TG-DSC 综合热分析的技术手段对 DNP 的热分解和非等温动力学进行了测试研究。曲线分析表明,DNP 的热分解分为两个阶段:在升温速率较低时,两个热分解阶段连续进行,在热分解曲线上难以区分;当升温速率较高时,DNP 的热分解明显分为两个阶段。非等温动力学分析表明,DNP 第一阶段热分解最可能机理为随机成核和随后生长机理,符合动力学机理函数 Avrami-Erofeev 方程, $n=3$ 。采用 Archar 微分法和 Coats-Redfen 积分法计算得到的分解活化能平均值为 91.61 kJ/mol,指前因子 $\ln A=42.7$ 。

蒋秋黎等^[15]对 DNP 的热行为及与其他组分的相容性进行了研究。结果表明:DNP 的受热分解分两个阶段,第一阶段分解放热峰为 319.8 ℃,此过程质量损失 83.05%;第二阶段分解放热峰为 407.2 ℃。与 TNT 和 DNTF 相比,DNP 的热分解峰温高,热安定性好。

2.4 DNP 的相容性

采用真空安定性试验考察了 DNP 与常用炸药组分 RDX、HMX、CL-20、AP、Al 和钝感剂微晶蜡的相容性,结果如表 3 所示。

表 3 DNP 与 RDX、HMX、CL-20、AP、Al 和微晶蜡的相容性

Tab.3 Compatibility of DNP with RDX, HMX, CL-20, AP, Al and microcrystalline wax			
样品组成	试验温度/ ℃	净增放 气量/mL	评价
DNP、RDX	100	2.1	相容
DNP、HMX	100	0	相容
DNP、CL-20	100	0	相容
DNP、Al	100	2.4	相容
DNP、AP	100	-2.5	相容
DNP、微晶蜡	100	2.2	相容

从表 3 中可以看出,DNP 与 AP 混合后,加热时放气量减少。这可能是因为试验温度(100.0 ℃)已超过 DNP 的熔点(86.5 ℃),在长时间加热熔化后,包覆了 AP 的固体颗粒起到稳定作用;从而减少了放气量。表明 DNP 与 AP 相互作用小,具有良好的相容性,AP 可以作为 DNP 基混合炸药的氧化剂使用。DNP 与 RDX、HMX、CL-20、Al、微晶蜡混合后,加热时放气量没有变化或者略有增加,但净放气量均小于 3 mL。根据判断标准,可以判断 DNP 与

RDX、HMX、CL-20、Al、微晶蜡相容,表明 DNP 作为熔铸炸药载体可以与这些组分组成混合炸药,具有广泛的适用性。

2.5 DNP 的应用性

郭俊玲等^[16]的研究表明,DNP 与 MTNP(1-甲基-3,4,5-三硝基吡唑)作为优良的熔铸炸药载体,是能够替代 TNT 的较具潜力的候选物质,其物化性能的研究及与其他高能化合物的组合配方(如与 RDX 或 HMX 等的混合)将会成为以后含能化合物的研究热点。

部分硝基吡唑炸药与常规单质炸药的性能对比见表 4。

表 4 硝基吡唑炸药与常规单质炸药的性能^[16]
Tab.4 Properties of nitropyrazole explosive and conventional simple explosive^[16]

样品	熔点/ ℃	密度/ (g·cm ⁻³)	爆速/ (m·s ⁻¹)	爆压/ GPa
MTNP	91.5	1.83	8 650	33.7
3,5-MDNP	60.0	1.68	7 700	25.7
3,4-MDNP	20.0 ~ 23.0	1.67	7 760	25.6
TNP	188.0 ~ 190.0	1.89	9 000	37.1
3,4-DNP	86.5	1.87	7 956	28.7
3,5-DNP	173.0 ~ 174.0	1.80	8 340	30.7
TNT	81.0	1.66	6 856	21.0
HMX	273.0	1.90	8 917	39.0
RDX	202.0	1.82	8 712	33.8

从表 4 中可以看出,TNP(3,4,5-三硝基吡唑)的爆速和爆压最大,但其熔点在 188 ~ 190 ℃ 之间,已超出熔铸炸药的熔点上限;3,5-DNP 的熔点为 173 ~ 174 ℃,也超出了熔铸炸药的熔点上限;3,4-MDNP(1-甲基-3,4-三硝基吡唑)和 3,5-MDNP(1-甲基-3,5-三硝基吡唑)的熔点较低,不适合作为熔铸炸药载体。MTNP 的熔点为 91.5 ℃,理论密度为 1.83 g/cm³,爆速为 8 650 m/s,爆压为 33.7 GPa,它的能量基本与 RDX 相当。3,4-DNP 的熔点为 86.5 ℃,理论密度为 1.87 g/cm³,爆速为 7 956 m/s,爆压为 28.7 GPa,能量远超 TNT。

综上分析,硝基吡唑类炸药中的 MTNP 和 3,4-DNP 是两种具有巨大潜力的熔铸炸药载体,应对其进行更为深入的研究。

尹磊等^[17]对 DNP 的晶体结构进行研究,结果表明:DNP 的晶体结构属于单斜晶系,空间点群为 P2₁/c;同时,DNP 存在大量的分子间氢键作用以及 π - π 堆积作用,使得 DNP 分子能够稳定地存在。

唐伟强等^[18]采用毛细管法获知,DNP 的熔点

为 86.5 °C, 试验测试得到 DNP($\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$) 的爆速为 7 633 m/s, 爆热为 4 326 kJ/kg。理论计算表明, DNP/CL-20 混合熔铸炸药在能量输出方面具有明显的优势, DNP 是熔铸炸药 TNT 的理想替代物。

朱双飞等^[19]基于密度泛函理论, 对 DNP/CL-20 分子间的作用进行了理论研究。结果表明: DNP/CL-20 复合物中存在分子间氢键和范德华力作用, 通过自然键轨道(NBO)理论、AIM 拓扑分析、约化密度梯度(RDG)等方面分析了复合物中分子间的相互作用, 其感度下降是因为这些分子间的作用影响了CL-20分子的电荷分布和电子密度分布, 导致引发键的稳定性改变。理论研究说明, DNP 可以降低CL-20 的高感度且爆轰性能较好, 应进行更深层次的研究。

姚如意等^[20]采用物理分离法对 RDX、HMX、CL-20 在 DNP 中的溶解度进行了研究, 并采用拉曼光谱法对溶解后回收的硝铵类炸药进行了表征。结果表明: RDX、HMX 和 CL-20 在 DNP 中的溶解度分别为 12.28、2.64 g 和 7.03 g。RDX 和 HMX 在 DNP 中溶解前后晶型一致, 未发生变化, 而 CL-20 在 DNP 中溶解后回收的晶型由 ε 型变为 β 型, 发生了转晶。

3 展望

新型的低感度高能量熔铸炸药载体是熔铸炸药研究的重要方向, DNP 的合成对于熔铸炸药载体而言具有重要的意义。目前, DNP 的合成工艺已基本成熟, 虽然国内外科研工作者对其理化性质也进行了一定的探索和研究, 取得了一定的成果, 但对 DNP 的应用性研究还远远不够。根据以上综述, 对 DNP 的研究进行了展望分析, 希望为后续的科学提供研究提供参考。

1) 应对 DNP 进行更全面的了解, 对其基本物化性能按照国军标测试方法进行全面的探索研究, 如冲击波感度、不同密度下的能量参数等。

2) 对 DNP 和目前常用的高能量炸药(如 RDX、HMX 等)组成的熔铸混合炸药进行小剂量配方试制研究, 拓宽 DNP 的适用范围。

3) CL-20 是目前能量最高的单质炸药, 因感度较高, 限制了它的广泛应用。理论研究表明, DNP/CL-20 混合熔铸炸药在能量输出方面具有明显的优势; 而相关试验研究表明, CL-20 在 DNP 熔融液中会发生转晶。建议科研人员采用红外和 XRD 衍射对 DNP 熔融液中的 CL-20 进行表征, 对 DNP/CL-20 熔铸混合炸药进行更深层次的研究。

4 结论

1) 采用经 N-硝化、热重排、C-硝化三步法合成 DNP 的制备工艺基本成熟。

2) DNP 的熔点为 86.5 °C, 分解峰温较高, 热安定性好, 机械感度与 TNT 相当。

3) DNP 的爆轰性能较好, DNP($\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$) 的爆速为 7 633 m/s, 远高于 TNT, 可作为金属加速炸药的候选物。

综上所述, DNP 是一种具有很大潜力的熔铸炸药载体, 应加大对 DNP 的研究力度。

参考文献

- [1] 蒙君熨, 周霖, 曹同堂, 等. 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基熔铸炸药研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(1): 13-24.
MENG J J, ZHOU L, CAO T T, et al. Research progress of 2,4-dinitrobenzylether (DNAN) based melt cast explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(1): 13-24.
- [2] DOLL D W, HANKS J M, ALLRED A G, et al. Reduced sensitivity, melt-pourable TNT replacements: US 7067024 B2 [P/OL]. 2003-01-09 [2011-10-16]. <http://WWW.google.com/patents/US20030005988>.
- [3] DOLL D W, HANKS J M, ALLRED A G, et al. Reduced sensitivity, melt-pourable Tritonal replacements: US 20080099112 A1 [P/OL]. 2003-07-31 [2011-10-16]. <http://books.google.com/patents/US200301040993.pdf>.
- [4] DOLL D W, HANKS J M, HIGHS-MITH T K, et al. Reduced sensitivity melt-cast explosives: US 20050230019 A1 [P/OL]. 2001-06-28 [2011-10-16]. <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2001046091>.
- [5] JANSSEN J W A M, KOENERS H J, KRUSE C G, et al. Pyrazides XII. Preparation of 3(5)-nitropyrazoles by thermal rearrangement of N-nitropyrazoles[J]. The Journal of Organic Chemistry, 1973, 38(10): 1777-1782.
- [6] PRICE D, MORRIS J. Synthesis of new energetic melt-pour candidates[C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. 2009.
- [7] KATRITZKY A R, SCRIVEN E F V, MAJUMDER S, et al. Direct nitration of five membered heterocycles [J]. Archive for Organic Chemistry, 2005(3): 179-191.
- [8] STEFAN E, LARISA Y WAHLSTRÖMN, et al. Derivatives of 3(5), 4-dinitropyrazole as potential energetic plasticisers[J]. Journal of Chemistry and Chemical Engi-

- neering, 2011(10):929-935.
- [9] RAVI P, REDDY C K, SAIKIA A, et al. Nitrodeiodination of polyiodopyrazoles[J]. Propellants, Explosives, pyrotechnics, 2012, 37(2):167-171.
- [10] 汪营磊, 姬月萍, 陈斌, 等. 3,4-二硝基吡唑合成与性能研究[J]. 含能材料, 2011, 19(4):377-379.
WANG Y L, JI Y P, CHEN B. Improved synthesis of 3,4-dinitropyrazole[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4):377-379.
- [11] 杜闪. 3,4-二硝基吡唑的合成及其性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2012:27-38.
- [12] 李永祥, 曹端林, 王建龙. 三种新型低熔点炸药的合成及表征[J]. 兵工学报, 2013, 34(1):36-40.
LI Y X, CAO D L, WANG J L. Synthesis and characterization studies on novel three explosives with low melting point[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1):36-40.
- [13] 汪营磊, 高福磊, 丁峰, 等. 3,4-二硝基吡唑合成放大工艺研究[J]. 爆破器材, 2018, 47(5):35-38, 43.
WANG Y L, GAO F L, DING F, et al. Study on the up-sizing synthesis technology of 3,4-dinitropyrazole[J]. Explosive Materials, 2018, 47(5):35-38, 43.
- [14] 田新, 李金山. 3,4-二硝基吡唑热分解及非等温动力学[J]. 化学研究与应用, 2013, 25(2):206-209.
TIAN X, LI J S. Thermal decomposition and non-isothermal kinetics of 3,4-dinitropyrazole[J]. Chemical Research and Application, 2013, 25(2):206-209.
- [15] 蒋秋黎, 王浩, 罗一鸣, 等. 3,4-二硝基吡唑的热行为及其与某些炸药组分的相容性[J]. 含能材料, 2013, 21(3):297-300.
JIANG Q L, WANG H, LUO Y M, et al. Thermal behavior of 3,4-dinitropyrazole and its compatibility with some explosive component materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(3):297-300.
- [16] 郭俊玲, 曹端林, 王建龙, 等. 硝基吡唑类化合物的合成研究进展[J]. 含能材料, 2014, 22(6):872-879.
GUO J L, CAO D L, WANG J L, et al. Review on synthesis of nitropyrazoles[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(6):872-879.
- [17] 尹磊, 张至斌, 张建国, 等. 3,4-二硝基吡唑的晶体结构[J]. 含能材料, 2016, 24(10):965-968.
YIN L, ZHANG Z B, ZHANG J G, et al. Crystal structure of 3,4-dinitropyrazole[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(10):965-968.
- [18] 唐伟强, 任慧, 焦清介, 等. 3,4-二硝基吡唑的性能表征及应用[J]. 含能材料, 2017, 25(1):44-48.
TANG W Q, REN H, JIAO Q J, et al. Property characterization of 3,4-dinitropyrazole and its application[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(1):44-48.
- [19] 朱双飞, 张树海, 苟瑞君, 等. 3,4-二硝基吡唑与六硝基六氮杂异伍兹烷分子间相互作用的理论研究[J]. 含能材料, 2018, 26(3):201-209.
ZHU S F, ZHANG S H, GOU R J, et al. Theoretical investigation on the intermolecular interactions of 3,4-dinitropyrazole/hexaazaisowurtzitane[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(3):201-209.
- [20] 姚如意, 苟瑞君, 张树海, 等. 几种硝胺炸药在熔态 TNT 和 DNP 中的溶解性及其结晶晶型[J]. 火炸药学报, 2019, 42(1):89-93.
YAO R Y, GOU R J, ZHANG S H, et al. Solubility and crystal form of several nitramine explosives in molten TNT and DNP[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(1):89-93.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部