

文章编号: 1006-9941(2013)01-0121-05

TNT 替代物含能三唑盐的合成及性能研究进展

华文龙, 叶志文

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 综述了含能三唑盐类中几种新型 TNT 替代物的合成及性能研究进展; 指出 4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐(4-ATP)、1-甲基-4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐(MATP)和 1-氨基-3-甲基-1,2,3-三唑硝酸盐(1-AMTN)是替代 TNT 的最佳候选物质; 展望了这类新型 TNT 替代物的研究方向。

关键词: 有机化学; TNT 替代物; 熔铸炸药; 载体; 合成; 性能

中图分类号: TJ55; O62

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.025

1 引言

熔铸炸药是指能以熔融状态进行铸装的混合炸药。20 世纪以来,以 TNT 为基的熔铸炸药已广泛应用于工业炸药和军用炸药中。但是 TNT 在精制过程中会产生“红水”,“红水”的成分十分复杂,除含有主要成分二硝基甲苯磺酸盐外,还含有硝基苯类等其他杂质^[1]。“红水”的毒性很大,且处理困难,目前企业多采用浓缩焚烧法进行处理^[2],但是此方法成本高,且会产生大量废渣和废气,给环境带来危害。此外,TNT 基熔铸炸药在装药过程中会出现渗油现象,这使得弹药的敏感度、安全性都受到影响。由于这些弊端,人们一直在寻找新型高能钝感熔铸炸药载体来代替 TNT。作为 TNT 替代物的炸药需具备以下几个特点:(1)炸药的爆炸性能应接近或优于 TNT;(2)炸药熔点应符合熔铸炸药对载体熔点的要求,最高不超过 110 °C;(3)炸药的敏感性和安全性应优于 TNT;(4)炸药的热稳定性好,在较高的熔铸温度下保持数小时不分解;(5)炸药能与熔铸炸药中的其他组分相容。

含能三唑盐类化合物是一类新型的高含氮含能材料。此类化合物属于含能离子盐的范畴,是结合了离子盐优点的新型含能材料^[3]。这些含能化合物具有密度高、熔点低、热稳定性好、挥发性低、分解产物对环境友

好^[4]等特点。研究发现含能三唑盐类中的一些典型化合物的能量密度与 TNT 相近,熔点相当,且有些物质具有正的生成焓(TNT 的生成焓为负值),同时这些化合物在液态时无毒,操作成本和危险性低,符合 TNT 替代物所需具备的特点,这些化合物单体或它们之间的复合共熔物可以作为熔铸炸药载体的候选物质。

查阅大量关于熔铸炸药载体的文献,发现,目前还未有对含能三唑盐这类新型 TNT 替代物的综合报道。本文对 2000~2010 年间一些适合作为熔铸炸药载体的含能三唑盐的合成、性能进行综述,并展望了这类新型 TNT 替代物的发展趋势。

2 新型 TNT 替代物的合成

2.1 1,2,4-三唑硝酸盐(TN)的合成

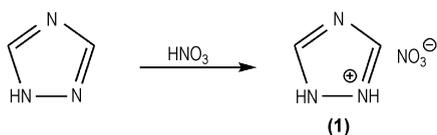
1967 年,Bagal 等^[5]就已经合成出了 1,2,4-三唑硝酸盐(TN),指出此化合物呈弱碱性,但并未从含能材料的角度对此化合物进行研究。2003 年,Drake^[6]提出了 1,2,4-三唑有弱碱性,在室温条件下就可以与强酸形成离子盐,并且指出此类盐可以作为推进剂和熔铸炸药的添加成分,其中 1,2,4-三唑可以与浓硝酸反应生成 1,2,4-三唑硝酸盐(1)^[7],反应路线见 Scheme 1,反应的产率和产品纯度都很高。2010 年,西安近代化学研究所的赵凤起等^[8]与北京理工大学的周智明共同合成了 1,2,4-三唑硝酸盐,并研究了它的热化学性质和热动力学行为。1,2,4-三唑可以通过甲酰胺-水合肼法、甲酸-水合肼-甲酰胺法和甲酸-氨-水合肼法等方法合成^[9]。目前工业上多采用甲酸-氨-

收稿日期: 2011-11-11; 修回日期: 2012-01-06

作者简介: 华文龙(1988-),男,硕士研究生,主要从事含能离子盐的合成研究。e-mail: loren19881012@yahoo.com.cn

通讯联系人: 叶志文(1968-),男,教授,主要从事药物中间体的合成及其含能材料方面的研究。e-mail: yezw@mail.njust.edu.cn

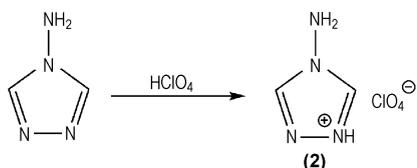
水合肼法制备 1,2,4-三唑。



Scheme 1

2.2 4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐 (4-ATP) 的合成

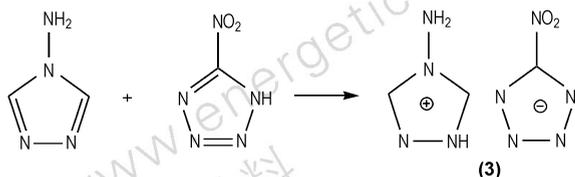
在 1,2,4-三唑环中引入氨基能提高化合物的热稳定性^[10],这使得 4-氨基-1,2,4-三唑盐作为熔铸炸药载体更有优势。2003 年,Drake^[6]在专利中指出,4-氨基-1,2,4-三唑盐的合成方法与 1,2,4-三唑盐相类似,由 4-氨基-1,2,4-三唑与高氯酸反应可以生成 4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐 (2)。反应路线见 Scheme 2。2004 年,Xue 等^[11]也以同样方法合成了这种含能盐,并研究了它的热性能。2006 年,Singh 等^[12]在富氮含能盐的综述文章中详细归纳了包括 4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐在内的多种三唑盐的合成方法,同时对它们的性质进行了比较研究。



Scheme 2

2.3 4-氨基-1,2,4-三唑-5-硝基四唑盐的合成

4-氨基-1,2,4-三唑也可以和唑类阴离子结合为含能盐,2005 年,Shreeve^[13]领导的研究小组合成了以 4-氨基-1,2,4-三唑为阳离子,5-硝基四唑为阴离子的富氮含能盐,其结构如下 (3)。合成路线见 Scheme 3。该化合物是一个富氮的化合物,5-硝基四唑的引入使得此化合物的氮含量达 63%。同时引入一个硝基后改善了此化合物的氧平衡,从而使得其燃烧焓更高。

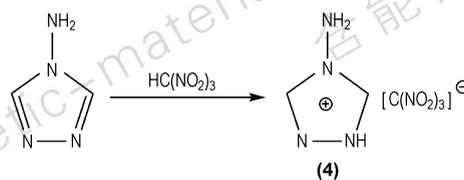


Scheme 3

2.4 4-氨基-1,2,4-三唑硝仿盐 (4-ATNF) 的合成

2007 年,Huang 等^[14]在合成一些新型含能硝仿盐的研究中发现 4-氨基-1,2,4-三唑硝仿盐的性能优于

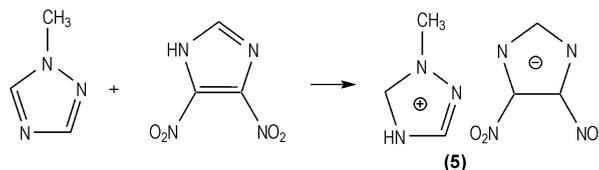
TNT。由于硝仿与传统的无机酸相比是一种强酸,很容易与 4-氨基-1,2,4-三唑形成成盐。他们采用 Borgardt^[15]和 Shechter^[16]的方法首先合成了硝仿,然后将硝仿与 4-氨基-1,2,4-三唑反应,经重结晶后得到 4-氨基-1,2,4-三唑硝仿盐 (4)。合成路线见 Scheme 4。



Scheme 4

2.5 1-甲基-1,2,4-三唑-4,5-二硝基咪唑盐的合成

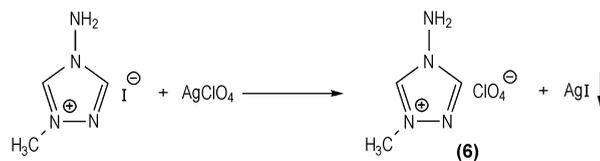
2005 年,Xue 等^[13]报道了甲基取代的 1,2,4-三唑和唑类阴离子制备的系列含能盐,其中以 1-甲基-1,2,4-三唑为阳离子,4,5-二硝基咪唑为阴离子制备的含能盐的合成路线见 Scheme 5。环上甲基的引入使得此化合物形成氢键的机会较少,因此此化合物的熔点较低。两个硝基的引入提高了此化合物的氧平衡,使得其爆轰性能更好。



Scheme 5

2.6 1-甲基-4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐 (MATP) 的合成

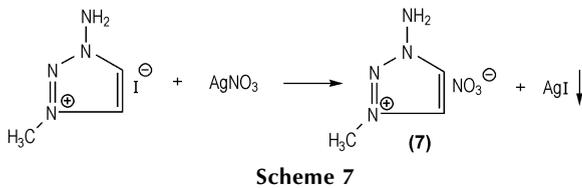
2005 年 Shreeve^[17]的课题组在 Yoshiro 等^[18]研究的基础上合成出了一种甲基和氨基共同取代的 1,2,4-三唑含能盐,即 1-甲基-4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐 (MATP),其合成路线见 Scheme 6。2010 年,Hawkins 等^[19]也以 4-氨基-1,2,4-三唑为原料,经甲基化和复分解两步反应后合成了 MATP。由于甲基的存在,使得此化合物的熔点与 TNT 相近,同时氨基的存在使得其具有更好的热稳定性,从下述表 1 和表 3 的性能比较发现 MATP 与 TNT 的各项性能相近,因此,通过进一步研究,MATP 有望成为 TNT 的替代物。



Scheme 6

2.7 1-氨基-3-甲基-1,2,3-三唑硝酸盐(1-AMTN)的合成

2003年, Drake等^[7]合成了一系列1,2,3-三唑含能盐, 包括1,2,3-三唑硝酸盐、1,2,3-三唑高氯酸盐和1,2,3-三唑二硝酰胺酸盐。2007年, Drake等^[20]在原先研究的基础上, 优化了合成工艺, 制备了一类新型含能盐, 即1-氨基-3-烷基-1,2,3-三唑硝酸盐, 其中的烷基有甲基、乙基、丙基、烯丙基和丁基。研究表明1-氨基-3-甲基-1,2,3-三唑硝酸盐(1-AMTN)具有优越的性能, 在替代TNT作为新型熔铸炸药载体方面存在巨大的潜力。Drake等^[20-21]公开的合成路线中, 1-AMTN的总收率为60.6%, 但此法存在耗时长, 操作复杂, 溶剂用量大等缺点。南京理工大学叶志文课题组优化了1-AMTN的合成路线及工艺, 最终得率可达71.8%。由1-氨基-3-甲基-1,2,3-三唑碘化氢盐与硝酸银合成1-AMTN(7)的方法见Scheme 7。



2.8 其他 TNT 替代物的合成

2007年, Katritzky^[22]等以4-氨基-1,2,4-三唑和浓硝酸为原料合成了4-氨基-1,2,4-三唑硝酸盐, 测得其熔点为67~68℃, 并且热稳定性好。2010年, Matulková等^[23]也以同样的方法合成了4-氨基-1,2,4-三唑硝酸盐, 并利用X射线衍射分析了其内部结构。同时, Brand等^[24]通过研究发现4-氨基-1,2,4-三唑硝酸盐的撞击感度低, 生成焓高于TNT, 它与4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐的共熔物的理论爆炸性能优于TNT。

2010年, 李娜等^[25]指出1-氨基-1,2,3-三唑和3-甲基-1-氨基-1,2,3-三唑分别与5-硝基四唑形成的三唑盐熔点分别为70~71℃和79~81℃, 其爆速爆压均高于TNT, 由于此类盐熔点低, 容易浇注, 适合作为熔铸炸药载体。

3 含能三唑盐类与 TNT 的性能比较

3.1 密度

炸药密度与炸药的许多爆炸性能有密切的关系, 如爆速、爆压、爆热及猛度等, 是衡量含能材料的一个重要指标。含能离子盐的密度与阴阳离子所含的键和基团以及分子间作用力和分子的对称性有关^[27]。三唑含能

离子盐分子中富含C—N, C=N, N—N, N=N等化学键, 并且离子盐中阳离子和阴离子的氢键作用使得其具有较高的密度。表1中7种三唑盐密度都大于 $1.58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 这主要是由于三唑阳离子与阴离子之间氢键的作用。与TNT相比只有4-氨基-1,2,4-三唑-5-硝基四唑盐(3)密度较低, 其他三唑盐的密度都与TNT接近甚至高于TNT。有研究表明, 在熔铸炸药配方中加入氧化剂可以提高载体炸药与氧化剂的混合密度和能量^[28], 因此可以在4-氨基-1,2,4-三唑-5-硝基四唑盐中添加适量氧化剂, 使其密度与TNT接近, 符合熔铸炸药对载体密度的要求。

表1 含能三唑盐类与 TNT 的物化性能比较^[24,26]

Table 1 Comparison of physical and chemical properties of energetic triazolium salts

compounds	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	melt point / $^{\circ}\text{C}$	decomposition onset / $^{\circ}\text{C}$	heat of formation / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
TNT	1.65	81	160	-62.76
(1)	1.64	137	182	-142.26
(2)	1.82	83	242	20.92
(3)	1.58	102	190	466.93 ¹⁾
(4)	1.69	92	167	108.78 ¹⁾
(5)	1.66	102	150	131.80 ¹⁾
(6)	1.62	85	259	12.13 ¹⁾
(7)	1.63	88	257	83.68 ¹⁾

Note: 1) There are theoretical values.

3.2 熔点

对于一种新型的含能材料而言, 其熔点和分解温度是决定其能否成为熔铸炸药载体的重要因素。对于熔铸炸药载体熔点的基本要求是低于110℃。表1中列出了三唑盐与TNT的熔点, 除了1,2,4-三唑硝酸盐(1)以外, 其他的三唑盐的熔点都低于110℃。从理论上讲, 1,2,4-三唑硝酸盐(TN)不能单独作为熔铸炸药的载体。然而计算研究表明, 1,2,4-三唑硝酸盐(TN)与4-氨基-1,2,4-三唑高氯酸盐(4-ATP)以质量比为50%:50%混合组成的共熔物的爆轰性能优于TNT(见表2)。因此可以研究将1,2,4-三唑硝酸盐(TN)与其他含能三唑盐混合组成低共熔物应用到熔铸炸药中。与TNT相比, 4-氨基-1,2,4-三唑-5-硝基四唑盐(3)和1-甲基-1,2,4-三唑-4,5-二硝基咪唑盐(5)的熔点相对偏高, 为了适当地降低熔点而更加易于炸药的铸装, 可以在熔铸炸药中加入适量的硝基胍、胍的硝酸盐、氨基胍的硝酸盐、脒、高氯酸铵和硝酸钾等熔点消溶剂^[29], 这样这两种三唑盐就可以更好地应用到熔铸炸药中。

表 2 TN/4-ATP 低共熔物与 TNT 爆炸性能的比较^[26]

Table 2 Comparison of detonation properties of TN/4-ATP eutectic mixtures and TNT

ingredients	shock velocity /km · s ⁻¹	C-J pressure /GPa	total detonation energy /kJ · cm ⁻³
TNT	6.886	19.57	7.716
TN/4-ATP(50/50) ¹⁾	7.915	25.10	7.720

Note: 1) Mass percent of TN and 4-ATP is 50/50.

3.3 生成焓

生成焓是含能材料的重要性质,是评估含能材料潜在性能的重要依据^[30]。炸药生成焓的高低直接影响爆热,进而影响到炸药的爆温、爆速、爆压、作功能力等。表 1 中除 1,2,4-三唑硝酸盐(1)外,其他三唑盐均具有比 TNT 高的正生成焓,这主要是由于这几三唑盐中含有大量的 C—N 和 N—N 以及整个环状体系的紧凑结构^[21]。因为有比 TNT 高的正生成焓,我们从下述研

表 3 几种含能三唑盐与 TNT 的安全性能和爆炸性能比较^[26]

Table 3 Comparison of safety and detonation performance between several energetic triazolium salts and TNT

compounds	gas evolution ¹⁾ /mL · g ⁻¹	impact sensitivity / (kg · cm)	shock velocity ²⁾ /km · s ⁻¹	C-J pressure ²⁾ /GPa	total detonation energy ²⁾ /kJ · cm ⁻³
TNT	<0.01	>200	6.886	19.57	7.716
(2)	0.02	30	8.368	29.94	9.032
(6)	<0.01	80	7.300	—	—
(7)	<0.01	>200	8.115	23.58	7.923

Note: 1) thermal stability for 48 hrs at 100 °C. 2) theoretical values.

4 展 望

TNT 作为目前使用最为广泛的熔铸炸药载体存在着一些缺陷,人们寻找 TNT 替代物的努力从未间断过。文中提到的几种含能三唑盐是一类新型的 TNT 替代物,目前对它们的研究还处在初级阶段,今后可进一步开展下述研究:

(1) 实验完善这些含能盐的爆炸性能数据,继续研究 4-ATP、MATP 和 1-AMTN 这三种最具潜力的 TNT 替代物,以期能真正地作为液相载体应用到熔铸炸药中。

(2) 研究复合型熔铸炸药载体,可以将文中提到的两种或多种含能三唑盐形成共熔物,并加入其它添加剂作为新型熔铸炸药载体。

(3) 继续探索能够替代 TNT 的性能优越的含能离子盐。

本课题组正在对 1-氨基-3-甲基-1,2,3-三唑硝酸盐(1-AMTN)进行研究,目前已经完成了此含能三唑盐的合成、结构表征和初步的性能测试及工艺优化,下

究中发现它们具有比 TNT 更加优越的爆轰性能。

3.4 安全性能和爆炸性能

上述含能盐的密度、熔点和生成焓的比较研究表明,(4-ATP)(2)、(MATP)(6)和(1-AMTN)(7)与 TNT 的物化性能相近甚至优于 TNT。为了更全面地了解这三种含能三唑盐的性能,表 3 列出了它们与 TNT 的安全性能和爆炸性能的比较。炸药的安全性能对于炸药的加工、制造、储存、运输和使用具有重要的实际意义,是决定炸药能否安全使用的关键因素^[31]。表 3 数据表明,这三种含能三唑盐安定性都很高。从撞击感度来看,4-ATP(2)的撞击感度偏高,研究表明在 4-ATP 中加入一些氧化剂可以降低它的撞击感度而自身仍然保持着较高的爆炸性能^[24]。炸药的爆炸性能是综合评价炸药能量的特性参数,是炸药得以应用的根本依据。从表 3 中可以看出,4-ATP(2)、MATP(6)和 1-AMTN(7)的爆速、爆压和能量密度都高于 TNT,说明这三种含能盐的能量可以满足熔铸炸药对载体炸药的性能要求。

一步将对 1-AMTN 的合成进行放大,并对它的生成焓、爆炸性能进行测试研究。

参考文献:

- [1] 张秋越,孟子晖,肖小兵,等. 用分子烙印聚合物吸附溶液中的 TNT[J]. 火炸药学报,2007,30(1): 64-66.
ZHANG Qiu-yue, MENG Zi-hui, XIAO Xiao-bing, et al. Absorption of TNT by molecularly imprinted polymer[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2007, 30(1): 64-66.
- [2] Wentz J A, Spessard J E, Hessling J, et al. Technology evaluation for treatment/disposal of TNT red water. A378442[R], 1990.
- [3] 黄海丰,孟子晖,周智明,等. 含能盐和含能离子液体[J]. 化学进展,2009,21(1): 152-163.
HUANG Hai-feng, MENG Zi-hui, ZHOU Zhi-ming, et al. Energetic salts and energetic ionic liquids[J]. *Progress in Chemistry*, 2009, 21(1): 152-163.
- [4] Sivabalan R, Talawar M B, Senthilkumar N, et al. Studies on azotetrazolate based high nitrogen content high energy material potential additives for rocket propellants[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2004, 78(3): 781-792.
- [5] Bagal I I. Basicity and structure of 1,2,4-triazole derivatives[J]. *Chemistry of Heterocyclic Compounds*, 1967, 2(3): 323.

- [6] Drake G. Energetic triazolium salts: US 6509473 [P]. 2003.
- [7] Drake G, Hawkins T, Brand A, et al. Energetic, low melting salts of simple heterocycles[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, 28(4): 174–180.
- [8] 赵凤起, 薛亮, 邢晓玲, 等. 三唑含能离子盐的热化学性质和热动力学行为[J]. *中国科学: 化学*, 2010, 40(9): 1430–1443.
ZHAO Feng-qi, XUE Liang, XING Xiao-ling, et al. Thermochemical properties and thermokinetic behavior of energetic triazole ionic salts[J]. *Science China Chemistry*, 2010, 40(9): 1430–1443.
- [9] 李德江, 马文展. 1,2,4-三氮唑及三氮唑农用化学品[J]. *天津化工*, 2002(1): 8–9.
LI De-jiang, MA Wen-zhan. 1,2,4-Triazole and agricultural chemicals of triazol derivatives[J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2002(1): 8–9.
- [10] Agrawal J P. Recent trends in high-energy materials[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1998, 24(1): 1–30.
- [11] Xue H, Arritt SW, Twamley B, et al. Energetic salts from *N*-aminoazoles[J]. *Inorganic Chemistry*, 2004, 43(25): 7972–7977.
- [12] Singh R P, Verma R D, Meshri D T, et al. Energetic nitrogen-rich salts and ionic liquids[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2006, 45(22): 3584–3601.
- [13] Xue H, Gao Y, Twamley B, et al. Energetic azolium azolate salts[J]. *Inorganic Chemistry*, 2005, 44(14): 5068–5072.
- [14] Huang Y, Gao H, Twamley B, et al. Synthesis and characterization of new energetic nitroformate salts[J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2007(14): 2025–2030.
- [15] Borgardt F, Seeler A, Noble P. Aliphatic polynitro compounds. I. Synthesis of 1,1,1-trinitrochloroethane and its rearrangement to dipotassium tetranitroethane [J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 1966, 31(9): 2806–2811.
- [16] Shechtewr H, Cates H L. Addition reactions of trinitromethane and α, β -unsaturated ethers[J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 1961, 26(1): 51–53.
- [17] Xue H, Gao Y, Twamley B, et al. New energetic salts based on nitrogen-containing heterocycles [J]. *Chemistry of Materials*, 2005, 17(1): 191–198.
- [18] Yoshiro M, Yasusige C, Kazuki F, et al. Reaction of 4-amino-1,2,4-triazolium salts with polarized olefins[J]. *Heterocycles*, 1995, 41(12): 2777–2785.
- [19] Hawkins T, Drake G, Brand A. Energetic ionic liquids: US 7645883 [P]. 2010.
- [20] Drake G, Kaplan G, Hall L, et al. A new family of energetic ionic liquids 1-amino-3-alkyl-1,2,3-triazolium nitrates[J]. *Journal of Chemical Crystallography*, 2007, 37: 15–23.
- [21] Drake G, Kaplan G. Synthesis, characterization, and structural investigations of 1-amino-3-substituted-1,2,3-triazolium salts, and a new route to 1-substituted-1,2,3-triazoles [J]. *J Heterocyclic Chem*, 2005, 42(19): 19–27.
- [22] Katritzky A R, Rogers J W, Witek R M, et al. Synthesis and characterization of blowing agents and hypergolics[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2007, 25(2): 79–109.
- [23] Matulková I, Cisarova I, Nemeč I. 4-Amino-1H-1,2,4-triazol-1-ium nitrate[J]. *Acta Crystallographica Section E: Structure Reports Online*, 2010, 67(1): 18–25.
- [24] Brand A. Energetic ionic liquids as TNT replacements [R]. AFRL-PR-ED-TP-2006-008: 2006.
- [25] 李娜, 柴春鹏, 甘志勇, 等. 含能离子化合物的分子设计与性能研究进展[J]. *含能材料*, 2010, 18(4): 467–475.
LI Na, CHAI Chun-peng, GAN Zhi-yong, et al. Review on molecular design and performance of energetic ionic compounds[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(4): 467–475.
- [26] Gutowski K E, Rogers R D, Dixon D A. Accurate thermochemical properties for energetic materials applications. II. Heats of formation of imidazolium-1,2,4-triazolium-, and tetrazolium-based energetic salts from isodesmic and lattice energy calculations[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2007, 111(18): 4788–4800.
- [27] Cadena C, Maginn E J. Molecular simulation study of some thermophysical and transport properties of triazolium-based ionic liquids[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(36): 18026–18039.
- [28] 张光全, 董海山. 2,4-二硝基苯甲醚为基熔铸炸药的研究进展[J]. *含能材料*, 2010, 18(5): 604–609.
ZHANG Guang-quan, DONG Hai-shan. Review on melt-castable explosives based on 2,4-dinitroanisole[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 604–609.
- [29] 张光全, 董海山. MeNQ 的合成进展及其在熔铸炸药中的应用[J]. *含能材料*, 2008, 16(3): 353–355.
ZHANG Guang-quan, DONG Hai-shan. Synthesis progress and application of *N*-methyl-*N'*-nitroguanidine in melt/cast explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(3): 353–355.
- [30] Gao H, Shreeve J M. Azole-based energetic salts[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(11): 7377–7436.
- [31] 金韶华, 松全才. 炸药理论[M]. 第1版. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 317–325.

Progress in Synthesis and Performance of Energetic Triazolium Salts as TNT Replacements

HUA Wen-long, YE Zhi-wen

(College of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Progress of synthesis and performance of several energetic triazolium salts as new TNT replacements is systematically reviewed, 4-amino-1,2,4-triazolium perchlorate (4-ATP), 1-methyl-4-amino-1,2,4-triazolium perchlorate (MATP) and 1-amino-3-methyl-1,2,3-triazolium nitrate (1-AMTN) are the best candidates to replace TNT, and the research field in the future for these energetic triazolium salts have been prospected.

Key words: organic chemistry; TNT replacement; melt-cast explosive; carrier; synthesis; performance

CLC number: TJ55; O62

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.01.025