

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.04.002

DNTF 应用技术研究进展*

邹政平 赵凤起 张 明 田 杰 王晓飞
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 从3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)的能量特性出发,系统综述了DNTF在混合炸药、复合改性双基推进剂(CMDB)和发射药中的应用研究。DNTF优异的熔铸性能使其可作为新型熔铸载体用于熔铸混合炸药中,以提升炸药的能源特性。此外,高能量密度材料DNTF的引入,不仅可显著提升改性双基推进剂和发射药的能源特性,还可有效改善CMDB的燃烧和力学性能。对DNTF在含能材料领域中的应用技术研究进行了梳理,指出以下几点可作为今后研究的方向:DNTF的制备工艺优化,以满足工程化应用需求;基于安全性考虑的DNTF基混合炸药配方优化设计;DNTF在改性双基推进剂中的晶析现象研究。

[关键词] 3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF);力学性能;高能量密度材料;复合改性双基推进剂

[分类号] V512.2

Research Progress of 3,4-Dinitrofurazanfuroxan Performances and Its Applications

ZOU Zhengping, ZHAO Fengqi, ZHANG Ming, TIAN Jie, WANG Xiaofei
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Energy characteristics of 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) were introduced, and the applications of DNTF in the field of propellant, explosive and composite modified double-base (CMDB) propellant were systematically reviewed. The excellent melting and casting properties of DNTF are beneficial for its application in the field of melt-cast explosives, and the energy performances of explosives are significantly enhanced after the addition of DNTF. Based on the related simulation and experimental studies, the potential application of DNTF for energy and mechanical properties enhancing in the field of CMDB propellant was explored. The results show that DNTF not only improves the energy performance of propellant, but also plays an important role in combustion and mechanical properties of solid propellant. To sum up, DNTF have wide application prospective in the field of energetic material. However, in order to meet the needs of engineering applications, it is necessary to optimize the preparation process of DNTF. Besides, the safety formulation of DNTF-based composite explosives and the crystallization of CMDB containing DNTF need to be studied.

[KEYWORDS] 3,4-dinitrofurazanfuroxan; mechanical property; high energy density compound; composite modified double-base propellant

引言

高能量密度材料是近年来含能材料领域中学者争相研究的热点。高能量密度材料的设计、合成及应用是提高推进剂、火炸药配方能源特性的有效手段。从20世纪中期以来,相继合成了许多高能量密度材料,其中,呋咱化合物由于拥有高能量密度、高标准生成焓(ΔH_f)、高氮含量等优势,在高能量密度材料中备受关注^[1-2]。

3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF, $C_6N_6O_8$)具有能量密度高、爆速高、稳定性好、感度适中等性能,综合考虑,整体性能优于黑索今(RDX)和奥克托今(HMX),与六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)接近^[3-5],具有较好的应用前景。此外,DNTF分子中不含卤族元素(如图1所示),可将其作为氧化剂或增塑剂应用于低特征信号推进剂^[6-7]。

基于DNTF众多的优异特性,作者系统地综述了DNTF在炸药、推进剂和发射药等方面的应用研究进展。

* 收稿日期:2019-03-22

第一作者:邹政平(1992-),女,助理工程师,主要从事固体推进剂的研究。E-mail:ping920828@126.com

通信作者:赵凤起(1963-),男,研究员,主要从事固体推进剂的研究。E-mail:zhaofqi@163.com

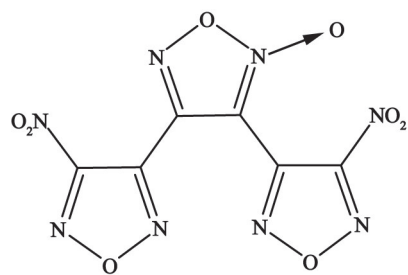


图 1 DNTF 结构式
Fig. 1 Formula of DNTF

1 DNTF 在炸药中的应用

如表 1 所示, DNTF 作为一种高能量密度化合物, 晶体密度为 1.937 g/cm³, 最大理论爆速为 9 250 m/s, 爆热为 5 799 kJ/kg, 与多种含能组分具有优异的相容性, 在炸药领域具有较好的应用前景^[8-13]。

表 1 几种含能材料的性能比较

Tab. 1 Performance comparison among different energetic materials

名称	密度/ (g · cm ⁻³)	熔点/ ℃	爆速/(m · s ⁻¹)		爆热/ (kJ · kg ⁻¹)
			理论	实测	
RDX	1.820	203	8 800	8 712	5 736
HMX	1.900	278	9 100	8 917	5 715
DNTF	1.937	110	9 250	8 930	5 799

1.1 DNTF 的熔融作用

三硝基甲苯(TNT)熔点低, 且价格便宜, 是熔铸炸药中应用得最为广泛的一种液相载体, 然而, 其较低的能量限制着熔铸炸药的整体威力。DNTF 的熔点较低(110 ℃), 且在熔融态时的黏度、流动性与 TNT 相似, 较适合熔铸工艺, 也可通过与其他化合物形成低共熔物的方式进一步降低熔点。研究表明, 通过向 TNT 中混合一定量 DNTF(TNT、DNTF 质量比为 62.14 : 37.86) 所形成的低共熔物, 熔点比 TNT 更低, 且可有效增加压制密度, 降低熔铸温度, 使得改善工艺条件成为可能^[14-15]。但是, DNTF 较高的制备成本及较低的产率限制着其工程化应用, 仍需进行相关研究, 以满足 DNTF 的工程化应用。

此外, 低熔点的 DNTF 用于炸药中时, 其他含能组分在 DNTF 中的溶解性对炸药的综合性能也具有较大的影响。王伟等^[16]采用液相色谱法研究了不同因素对 HMX 在 DNTF 中的溶解度所造成的影响。研究表明, 由于 DNTF 熔融液黏度较小的原因, HMX 在 DNTF 熔融液中的溶解速度较快, 时间及 HMX 粒度对其溶解度的影响均较小。在一定温度范围内测

定 HMX 在 DNTF 中的溶解度, 拟合相应的温度-溶解度关系曲线(图 2)。从图 2 中可以发现, HMX 在 DNTF 熔融液中的溶解度伴随温度的攀升而增加, 在 115 ℃ 时溶解度为 0.27 g。这表明, HMX 在 DNTF 基炸药中并不能造成该炸药不可逆增稠现象, 即 HMX 在 DNTF 中的溶解度所受影响较小。

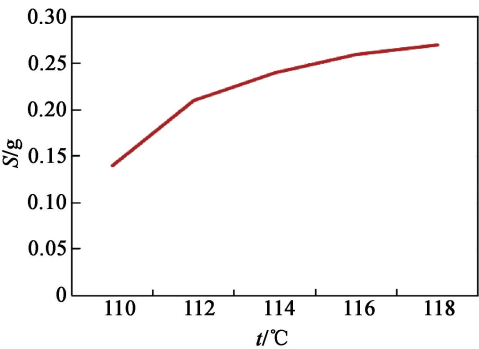


图 2 HMX 在 DNTF 中的溶解度随温度变化曲线^[10]
Fig. 2 Solubility changing with temperature of HMX in DNTF^[10]

1.2 DNTF 在混合炸药中的应用

DNTF 在熔点(110 ℃)下长时间加热而不分解, 仅有微量挥发, 这使得 DNTF 有望替代 TNT 作为熔铸炸药载体, 使熔铸炸药的爆炸能量和爆炸威力大幅度提高。王亲会等^[17]的研究表明, DNTF 在室温至熔点的温度范围内不发生相变, 且凝固过程体积变化较小, 药柱具有较高的密度, 常规铸装药柱相对密度可达 91% (理论密度) 以上。周文静等^[18]研究了 DNTF、TNT 及 TNT-DNTF 低共熔物的结晶过程, 理论层面为 TNT-DNTF 低共熔物在熔铸混合炸药中的应用提供参考依据。

基于 DNTF 基混合炸药的配方设计及性能研究, DNTF 在提升混合炸药能量及威力方面的优势已被证实^[19-20]。然而, 由于 DNTF 本身具有较高的热感度和爆轰增长速率, 保证 DNTF 基混合炸药的安全性成为其配方优化设计和应用的难点。冯晓军等^[21]研究发现了 DNTF 基混合炸药燃烧到爆轰转变(DDT)过程的有效调控技术, 通过同轴电离探针测量技术明确了 DNTF 基混合炸药 DDT 性能会受到点火药量、DDT 管壁厚约束、成型方式等不同层面的影响(图 3)。其中, DDT 管壁厚约束对 DNTF 基混合炸药 DDT 的诱导爆轰距离不会产生显著影响, 都在 375 mm 上下波动; 然而, 壁厚减小将会增加爆燃阶段的持续时间, 并且爆轰的初始速度降低至 5 515 m/s; 点火药量的增加没有造成对 DNTF 基混合炸药 DDT 反应剧烈性的显著影响, 却会缩短初始燃烧的持续时间和诱导爆轰距离; 压制成型试样

DDT 的初始燃烧持续时间、爆燃持续时间以及诱导爆轰距离全部大于熔铸成型的试样,然而却没有对反应的剧烈程度造成任何影响。

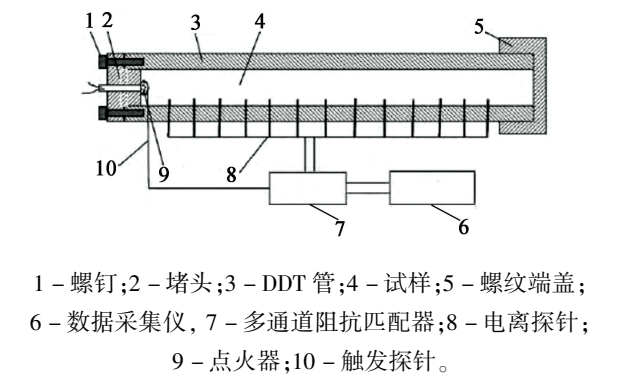


图3 DDT 试验系统示意图^[21]

Fig. 3 Schematic diagram of DDT test system^[21]

1.3 DNTF 在小尺寸传爆药中的应用

由于具有较小的临界传爆尺寸,DNTF 也被用作小临界尺寸传爆药的含能组分。封雪松等^[22]对 DNTF 基熔铸型传爆药配方进行了研究,并将该配方用于爆炸网络。研究表明,DNTF 虽然能够在小尺寸装药下传爆,但它具有较高的冲击波感度,不能满足传爆药冲击波的安全性要求。安崇伟等^[23]以 DNTF 和 HMX 为主体的炸药,以聚叠氮基缩水甘油醚(GAP)为黏结剂,设计出一种适用于微小尺寸爆炸网络的传爆药配方,这种配方体系可在实现高爆速、高安全性和小临界尺寸传爆的同时满足装药均匀性好、爆速极差小的需求。

综上所述,DNTF 在混合炸药和小尺寸传爆药中具有较好的应用性能,可有效提升能量特性。并且,DNTF 优异的熔铸性能使其具有替代 TNT 用作熔铸载体的潜质。但是,DNTF 较高的热感度和爆轰增长速率对其应用具有一定的限制,如何保证应用安全性是目前 DNTF 在炸药应用领域中亟待解决的问题。

2 DNTF 在改性双基推进剂中的应用

DNTF 的能量比 RDX 和 HMX 高,应用于 CMDB 推进剂中可提高推进剂的能量,且 DNTF 分子中不含卤素,在 CMDB 推进剂中具有良好的应用前景。

2.1 DNTF 对 CMDB 推进剂能量性能的影响

近年来,学者们研究了 DNTF 对 CMDB 推进剂能量性能的影响。研究表明,使用 DNTF 取代硝胺改性双基推进剂中的 RDX 及吉纳(DINA),可使推进剂的理论比冲、特征速度和火焰温度提高,33%

(质量分数)的 DNTF 取代 28% (质量分数)的 RDX 和 5% (质量分数)的 DINA 后,推进剂的理论比冲提高了 34.27 N·s/kg,特征速度增加了 10.6 m/s^[24]。这些研究证实了 DNTF 的引入有助于提升 CMDB 推进剂的能量特性。

2.2 DNTF 对 CMDB 推进剂力学性能的影响

DNTF 对硝化棉(NC)具有增塑作用,在改善 CMDB 推进剂能量特性的同时,还对其力学性能具有较好的改进作用。刘所恩等^[25]在螺压高能硝胺 CMDB 推进剂中,通过用 DNTF 逐步取代 RDX,研究分析了 DNTF 对 CMDB 推进剂工艺性能、力学性能的影响。结果表明,DNTF 的引入对推进剂的加工工艺性能及安全性能无不良影响,但可显著提高能量,对提高推进剂力学性能具有较好的效果。他们还通过螺旋压伸工艺设计了含 HMX 和 DNTF 的推进剂配方,有效改善了推进剂的能量、燃烧和力学性能。王江宁等^[26-29]通过拉伸试验和动态机械法研究了 DNTF 对 CMDB 推进剂力学性能的影响,试验表明,DNTF 对 DNTF-CMDB 推进剂有一定的增塑效果,可以使低温脆化参数降低、韧性提高,但对相关机理缺乏深入的了解,需加强此方面的基础研究。

孟玲玲等^[30]利用分子动力学模拟方法分别构建了 NC 以及 NC-DNTF 的分子模型,就 DNTF 对 NC 塑化过程中微观结构的影响进行了研究。此外,他们还通过拉伸试验研究了 DNTF 对 CMDB 推进剂力学性能的影响。通过试验结果发现,DNTF 的引入有助于 DNTF-CMDB 推进剂抗拉强度、延伸率的增加,对 CMDB 推进剂力学性能的改善具有一定的作用。肖玮等^[31]通过单轴抗拉试验、动态力学分析仪和简支梁抗冲试验,研究了不同 DNTF-RDX 对比对 CMDB 推进剂力学性能的影响。结果表明,DNTF-RDX-CMDB 推进剂的低温抗拉强度、断裂延伸率均随增塑剂硝化甘油(NG)相对含量的减少而减弱;由于增塑剂起到类似“交联点”的作用,也会让抗冲强度随 DNTF 含量的增多而增强。

2.3 含 DNTF 改性双基推进剂的燃烧性能调节

DNTF 的引入可有效提升 CMDB 推进剂的燃速和比冲,但是也会使 CMDB 推进剂的压强指数增加,探究可有效降低含 DNTF 改性双基推进剂压强指数的催化体系,是实现 DNTF 在 CMDB 推进剂中应用的前提。研究表明,铅铜碳催化体系对低含量 DNTF(质量分数 30%)的 CMDB 推进剂的压强指数具有一定的降低作用,而当 DNTF 质量分数达到 50%时,铅铜碳催化体系失去作用,需探究更好的催化体系^[32]。在质量分数 30% 的 DNTF 体系中,NC

与 NG 配比、内弹道稳定剂均会对 CMDB 推进剂的燃烧性能产生不同的影响。与三氧化二铝相比,氧化镁 (MgO) 作为弹道稳定剂可显著降低压强指数^[33]。如图 4 所示,曹鹏等^[34]通过使用铋铜复盐 (Gal-BiCu) 催化剂,在提升燃烧速率的同时使 DNTF-HMX-CMDB 推进剂的压强指数降低 (见表 2),与炭黑等碳材料复配后,催化性能更佳,金属燃烧功能助剂质量分数为 0.5% 时,推进剂在 8 ~ 20 MPa 压强下出现平台燃烧。

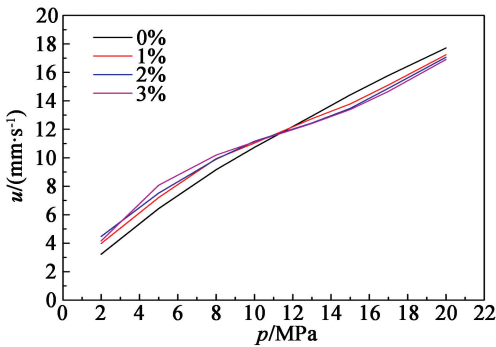


图 4 Gal-BiCu 含量对 DNTF-HMX-CMDB 推进剂燃速的影响

Fig. 4 Effects of Gal-BiCu content on combustion rate of DNTF-HMX-CMDB propellant

表 2 Gal-BiCu 含量对 DNTF-HMX-CMDB 推进剂压强指数的影响

Tab. 2 Effects of Gal-BiCu content on pressure index of DNTF-HMX-CMDB propellant

序号	Gal-BiCu 质量分数/%	n		
		2 ~ 8 MPa	8 ~ 15 MPa	15 ~ 20 MPa
1 [#]	0	0.75	0.72	0.71
2 [#]	1	0.66	0.52	0.78
3 [#]	2	0.57	0.48	0.82
4 [#]	3	0.66	0.43	0.81

含 DNTF 改性双基推进剂的研究表明,DNTF 的标准生成焓高于 CL-20 和 HMX,但撞击和摩擦敏感度均低于 CL-20 和 HMX,且对 NG 具有增塑能力,但大量添加会产生晶析现象,且使压强指数增加,不利于 DNTF 在 CMDB 推进剂中的应用。目前,在实际应用中添加少量 (质量分数 6% ~ 10%) 的 DNTF 作为高能增塑剂,不发生晶析现象,且可有效提升推进剂的能量、燃烧和力学性能。

3 DNTF 在发射药中的应用

俄罗斯有机化学研究所多年来研究了呋咱化合物,发现呋咱环本身就是一个爆炸性基团,即使是最简单地取代呋咱,其分子量也会增加;如果使用一个氧化呋咱基替换一个硝基,密度能提高 0.06 ~ 0.08 g/cm³。DNTF 作为呋咱化合物的代表,其高能量密度成为了多层高能发射药研究的重点^[35-38]。

魏伦等^[39]通过密闭爆发器、真空安定性试验,分别研究了 3 种高能量密度化合物 CL-20、DNTF 和 ADN 对高能硝胺发射药 RGD7A 能量、相容性、燃烧行为所造成的影响。结果表明,CL-20、DNTF 与 RGD7A 发射药的相容性较好,而 ADN 与 RGD7A 不相容。此外,添加 CL-20 和 DNTF 后,RGD7A 发射药的能量水平和密度均有较大幅度的提升。在 40 ~ 240 MPa 下,含 CL-20、DNTF 的硝胺发射药的燃速增加,压力指数也会随之增加,如表 3 所示。

4 结论

作为一种新型的高能量密度材料,DNTF在火炸药领域中的应用前景不可小觑,但是实际应用中

表 3 含 DNTF、CL-20 的 RGD7A 发射药的能量示性数测试结果

Tab. 3 Energy testing results of RGD7A propellant containing DNTF and CL-20

高能添加剂		能量示性数					
种类	质量分数/ %	RGD7A 质量分数/%	火药力/ (J · g ⁻¹)	爆热/ (J · g ⁻¹)	余容/ (cm ³ · g ⁻¹)	密度/ (g · cm ⁻³)	密度火药力/ (J · cm ³)
DNTF	9.1	90.9	1 223.15	4 897	1.007	1.664	2 035.32
	13.0	87.0	1 241.39	4 942	1.012	1.682	2 088.02
	16.7	83.3	1 266.26	5 041	1.031	1.696	2 147.58
CL-20	9.1	90.9	1 235.47	4 934	1.040	1.701	2 101.53
	13.0	87.0	1 246.52	4 942	1.080	1.713	2 135.28
	16.7	83.3	1 258.93	5 016	1.098	1.722	2 166.28
		100.0	1 202.33	4 730	1.074	1.652	1 986.25

也表现出了诸多问题,仍需相关的研究者们付诸努力,主要体现在以下方面。

1) DNTF 替代 RDX、HMX 等硝胺使用,可有效提升炸药、推进剂以及发射药的能量特性;但仍需优化制备工艺,使得制备成本降低、产率提高,以满足工程化应用需求。

2) DNTF 的熔点较低,且在室温至熔点范围内不发生相变,可替代 TNT 作为新型熔铸载体以提升熔铸混合炸药的能量特性。但是,DNTF 较高的热感度和爆轰增长速率,使得 DNTF 基混合炸药的安全性成为其配方优化设计和应用的难点。

3) DNTF 作为含能增塑剂,少量添加(质量分数 6%~10%)可有效地提升固体推进剂的燃烧速率和力学性能,并且可通过常用的铅铜碳、铋铜碳复配催化体系调节推进剂的压强指数。但是,当 DNTF 的添加量较大时会出现晶析现象,压强指数增加,铅铜碳等催化体系失去作用。

参考文献

- [1] ZHENG W, WANG J N, REN X N, et al. An investigation on thermal decomposition of DNTF-CMDB propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010, 32(6):520-524.
- [2] ZHAO F Q, CHEN P, HU R Z, et al. Thermochemical properties and non-isothermal decomposition reaction kinetics of 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 113(1):67-71.
- [3] 黄人骏,宋洪昌. 火药设计基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997.
- [4] 张柏生,李云娥. 火炮与火箭内弹道原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [5] 郑伟,王江宁,韩芳,等. DNTF-CMDB 推进剂的化学安定性[J]. *火炸药学报*, 2010, 33(4):10-13.
ZHENG W, WANG J N, HAN F, et al. Chemical stability of CMDB propellants containing DNTF [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(4):10-13.
- [6] 姚李娜,王彩玲,赵省向,等. 重结晶对 DNTF 形貌和含铝炸药爆轰性能的影响[J]. *爆破器材*, 2015, 44(6):25-28,33.
YAO L N, WANG C L, ZHAO S X, et al. Influences of recrystallization on the morphology of DNTF [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(6):25-28,33.
- [7] 刘锦春. 155 mm 底排火箭复合增程弹研究[C]//总装枪炮弹箭专业组中国兵工学会弹药专业委员会三十一学术年会论文集. 北京:中国兵工学会,2003.
- [8] 周彦水,王伯周,李建康,等. 3,4-双(4'-硝基呋咱-3'-基)氧化呋咱合成、表征与性能研究[J]. *化学学报*, 2011, 69(14):1673-1680.
ZHOU Y S, WANG B Z, LI J K, et al. Study on synthesis, characterization and properties of 3,4-bis(4'-nitrofurazano-3'-yl) furoxan [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2011, 69(14):1673-1680.
- [9] 王军,周小清,张晓玉,等. 一种高能量密度材料 DNTF 的低成本制备技术[J]. *含能材料*, 2011, 19(6):747-748.
- [10] LI X, WANG B L, LIN Q H, et al. Compatibility study of DNTF with some insensitive energetic materials and inert materials [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2016, 34(4):409-415.
- [11] 马海霞,宋纪蓉,肖鹤鸣,等. 3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)的密度泛函理论研究[J]. *火炸药学报*, 2006, 29(3):43-46,61.
MA H X, SONG J R, XIAO H M, et al. Density functional theoretical investigation on 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(3):43-46,61.
- [12] 王彬,周彦水,吴敏杰,等. 3-氨基-4-偕氨基基呋咱及其含能衍生物合成研究进展[J]. *火炸药学报*, 2018, 41(3):213-222.
WANG B, ZHOU Y S, WU M J, et al. Research progress on synthesis of 3-amino-4-aminoximiofurazan and its energetic derivatives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(3):213-222.
- [13] SINDITSKII V P, BURZHAV A V, SHEREMETEV A B, et al. Thermal and combustion properties of 3,4-bis(3-nitrofurazan-4-yl) furoxan (DNTF) [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(5):575-580.
- [14] 王亲会. DNTF 基熔铸炸药的性能研究[J]. *火炸药学报*, 2003, 26(3):57-59.
WANG Q H. Properties of DNTF-based melt-cast explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(3):57-59.
- [15] 熊贤锋,王浩,高杰,等. DNTF 基熔铸炸药的金属加速作功能力[J]. *火炸药学报*, 2011, 34(3):32-34.
XIONG X F, WANG H, GAO J, et al. Metal accelerating ability of DNTF-based melt-cast explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(3):32-34.
- [16] 王玮,罗一鸣,王红星,等. HMX 在 DNTF 中的溶解度研究[J]. *火工品*, 2017(4):50-52.
WANG W, LUO Y M, WANG H X, et al. Study on the solubility of HMX in DNTF [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017(4):50-52.
- [17] 王亲会,张亦安,金大勇. DNTF 炸药的能量及可熔铸

- 性[J]. 火炸药学报, 2004, 27(4): 14-16.
- WANG Q H, ZHANG Y A, JIN D Y. Energy and castibility of DNTF explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004, 27(4): 14-16.
- [18] 周文静, 张皋, 刘子如. DNTF、TNT 和 DNTF-TNT 低共熔物在 RDX 中的结晶动力学研究[J]. 含能材料, 2008, 16(3): 267-271.
- ZHOU W J, ZHANG G, LIU Z R. Kinetics of non-isothermal crystallizations of DNTF, TNT and DNTF-TNT eutectics system crystallization in RDX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(3): 267-271.
- [19] 赵省向, 戴致鑫, 张成伟, 等. DNTF 及其低共熔物对 PBX 可压性的影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 39-42.
- ZHAO S X, DAI Z X, ZHANG C W, et al. The effect of DNTF and its eutectics on the mouldability of PBX[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(3): 39-42.
- [20] 杨斐, 王建灵, 罗一鸣, 等. DNTF/AP/Al 体系炸药的能量特性分析[J]. 爆破器材, 2014, 43(5): 11-14.
- YANG F, WANG J L, LUO Y M, et al. Explosion energy characteristics of DNTF/AP/Al explosive [J]. Explosive Materials, 2014, 43(5): 11-14.
- [21] 冯晓军, 田轩, 赵娟, 等. DNTF 基炸药燃烧转爆轰影响因素实验研究[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 255-259.
- FENG X J, TIAN X, ZHAO J, et al. Experiment study on the influence factors of the deflagration to detonation transition for DNTF-based explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(3): 255-259.
- [22] 封雪松, 王浩, 刁小强, 等. DNTF 基钝感传爆药冲击波感度与小尺寸传爆性能研究[J]. 火工品, 2011(6): 22-25.
- FENG X S, WANG H, DIAO X Q, et al. Study on shock-wave sensitivity and small-size detonation propagation of DNTF booster [J]. Initiator & Pyrotechnics, 2011(6): 22-25.
- [23] 安崇伟, 李文玺, 温晓沐, 等. 微型爆炸网络用 DNTF/HMX 基传爆药研究[J]. 含能材料, 2017, 25(2): 132-137.
- AN C W, LI W X, WEN X M, et al. Research on the DNTF/HMX based booster explosive employed in the microscale explosion network [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(2): 132-137.
- [24] 赵凤起, 徐司雨, 李猛, 等. 改性双基推进剂性能计算模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- ZHAO F Q, XU S Y, LI M, et al. Performance calculation and simulation of composite modified double base propellant [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [25] 刘所恩, 郑启龙, 邹伟伟, 等. DNTF 在螺压高能硝胺改性双基推进剂中的应用[J]. 弹道学报, 2015, 27(3): 62-65, 75.
- LIU S E, ZHENG Q L, ZOU W W, et al. Application of DNTF in screw extruded nitramine modified double-base propellant [J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(3): 62-65, 75.
- [26] 王江宁, 李亮亮, 刘子如. DNTF-CMDB 推进剂的力学性能[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 23-27.
- WANG J N, LI L L, LIU Z R. Mechanical performance of composite modified double-base propellant with DNTF [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4): 23-27.
- [27] 李亮亮, 王江宁, 刘子如. DNTF 含量对改性双基推进剂动态力学性能的影响[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 174-179.
- LI L L, WANG J N, LU Z R. Effects of DNTF contents on dynamic mechanical properties of modified double-base propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(2): 174-179.
- [28] 王江宁. 双基和改性双基推进剂催化燃烧规律研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
- [29] 王江宁, 冯长根, 田长华. 含 CL-20、DNTF 和 FOX-12 的 CMDB 推进剂的热分解[J]. 火炸药学报, 2005, 28(3): 17-19.
- WANG J N, FENG C G, TIAN C H. Thermal decomposition of CL-20/DNTF/FOX-12-CMDB propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 28(3): 17-19.
- [30] 孟玲玲, 齐晓飞, 王江宁, 等. DNTF 对 NC 塑化特性的分子动力学模拟及实验研究[J]. 火炸药学报, 2015, 38(3): 86-89.
- MENG L L, QI X F, WANG J N, et al. Molecular dynamics simulation and experimental study of DNTF on plasticizing properties of NC [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(3): 86-89.
- [31] 肖玮, 李亮亮, 王江宁, 等. DNTF/RDX-CMDB 推进剂低温力学性能[J]. 含能材料, 2013, 21(4): 495-499.
- XIAO W, LI L L, WANG J N, et al. Mechanical properties for DNTF /RDX-CMDB propellants at low temperature [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(4): 495-499.
- [32] 郑伟, 王江宁, 周彦水. 含 DNTF 的改性双基推进剂燃烧性能[J]. 推进技术, 2006, 27(5): 469-472.
- ZHENG W, WANG J N, ZHOU Y S. Combustion performance of DNTF-CMDB propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(5): 469-472.

- [illegible]