

文章编号:1006-9941(2019)11-0923-08

DNAN 及 TNT 基熔铸炸药综合性能比较

朱道理^{1,2},周霖¹,张向荣¹,杏若婷³

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081; 2. 安徽神剑科技股份有限公司,安徽 合肥 230022;

3. 甘肃银光化学工业集团有限公司,甘肃 白银 730900)

摘要: 为了对比载体炸药 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)和 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)、以及以它们为基的熔铸炸药的综合性性能,系统研究了 DNAN 和 TNT、以及 DNAN/HMX(20/80)和 TNT/HMX(25/75)熔铸炸药的流变、能量、安全、以及力学等性能。结果表明:载体炸药 DNAN(6.87 mPa·s)的粘度低于 TNT(9.05 mPa·s),DNAN/HMX 熔铸体系的极限固含量(约 80%)高于 TNT/HMX 熔铸体系(约 75%);DNAN/HMX(20/80)和 TNT/HMX(25/75)熔铸炸药的爆速分别为 8336 m·s⁻¹ 和 8452 m·s⁻¹,爆压分别为 31.03 GPa 和 31.44 GPa;在 1 K·min⁻¹ 的慢速烤燃条件下, DNAN/HMX(20/80)和 TNT/HMX(25/75)熔铸炸药的响应等级分别为燃烧反应和爆炸反应;在 4.51 GPa 的冲击波入射压力条件下, TNT/HMX(25/75)在 8~12 mm 内达到完全爆轰,而 DNAN/HMX(20/80)在 12 mm 内未能达到完全爆轰;DNAN/HMX(20/80)的抗拉和抗压强度均大于 TNT/HMX(25/75)。因此可以得出结论,在能量性能基本持平的情况下, DNAN/HMX(20/80)熔铸炸药的安全及力学性能优于 TNT/HMX(25/75)熔铸炸药。

关键词: 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基熔铸炸药;2,4,6-三硝基甲苯(TNT)基熔铸炸药;流变;慢速烤燃;冲击起爆;力学性能

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019170

1 引言

炸药是武器装备的核心部件,是实现毁伤的动力能源。熔铸炸药以其爆炸威力高、易于成型、成本低廉等优点被广泛应用在各种战斗部的装药上,约占军用混合炸药的 90% 以上^[1]。20 世纪初,以 TNT 为载体的熔铸炸药取代苦味酸成为应用最广泛的一类熔铸炸药。然而由于 TNT 感度高、毒性大、易渗油等缺陷^[2-3],所以以其为基的熔铸炸药不能满足现代武器装药的高能钝感要求。21 世纪初,北京理工大学^[4-6]、西安近代化学研究所^[7]等单位对以 DNAN 为载体的熔铸炸药开展了大量的研究工作,逐步形成了 DNAN 基熔铸炸药技术。

收稿日期:2019-06-16;修回日期:2019-07-31

网络出版日期:2019-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11772060)

作者简介:朱道理(1989-),男,博士,主要从事熔铸炸药配方与性能测试研究。e-mail:zhudaoli_cxx@sina.com

通信联系人:周霖(1962-),男,博士,研究员,主要从事熔铸炸药配方设计及产品研制工作。e-mail:zhoulin@bit.edu.cn

张向荣(1975-),男,博士,副教授,主要从事熔铸炸药装药技术研究。e-mail:zhangxr@bit.cn

引用本文:朱道理,周霖,张向荣,等. DNAN 及 TNT 基熔铸炸药综合性能比较[J]. 含能材料,2019,27(11):923-930.

ZHU Dao-li, ZHOU Lin, ZHANG Xiang-rong, et al. Comparison of Comprehensive Properties for DNAN and TNT-Based Melt-cast Explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(11):923-930.

国内外学者对 DNAN 和 TNT 基熔铸炸药性能展开了广泛的研究。罗一鸣^[8]等研究了 TNT 和 DNAN 在相同工况下由熔融态冷却凝固成固态的体积收缩率;Davies^[9-10]等对 DNAN 作为熔铸炸药载体替代 TNT 进行了初步研究,并对 ARX-4027(DNAN/MNA/RDX 39.75/0.25/60)炸药从悬浮液粘度、药柱力学、感度和爆轰等方面进行了性能表征;王浩^[11]通过 X 射线和扫描电镜探讨了载体炸药 TNT 和 DNAN 在高低温冲击(-54~71 °C)条件下不可逆膨胀的特性及其机理;王红星^[12-13]等通过烤燃实验研究了 DNAN 和 TNT 自发火温度、热爆炸延滞期和临界温度热等安全性参数,结果表明 DNAN 在热安全性方面具有一定优势;Trzciński^[14]计算并测试了 DNAN/RDX/NTD(40/20/40)和 TNT/RDX/NTD(40/20/40)铸炸药格尼能和爆轰性能,测量了冲击波感度,结果表明 DNAN 基炸药能量及冲击波感度均较低。

然而,上述工作都只是从某个方面对 DNAN 和 TNT 基熔铸炸药性能进行研究,未能系统地对两类炸药的装药性能进行比较,无法确定某类炸药是否具有综合性优势(若仅对比能量性能和安全性,综合性

能优势是指在能量性能基本持平的情况下,安全性能占优;或者在安全性能基本持平的情况下,能量性能占优)。因此,本研究采用流变仪测量 DNAN/HMX 和 TNT/HMX 熔铸炸药悬浮液的流变性能、采用电测法测试二者的爆速和爆压、采用慢速烤燃和一维拉格朗日分析试验研究二者在热和冲击波作用下的安全性、采用准静态实验和分离式霍普金森压杆研究炸药的准静态和动态力学性能,综合比较了 DNAN/HMX 和 TNT/HMX 熔铸炸药的流变、能量、安全和力学等性能,为战斗部装药的选择提供技术支持。

2 实验部分

2.1 样品准备

2.1.1 原材料来源与规格

DNAN,湖北东方化工有限公司,熔点为 94~96 °C,晶体密度为 1.54 g·cm⁻³,纯度为 99.6%±0.3%; TNT,湖北东方化工有限公司,熔点为 81~82 °C,晶体密度为 1.651 g·cm⁻³,纯度为 98.6%; 奥克托今(HMX),甘肃银光化学工业集团有限公司,三种 HMX 的粒度分布如图 1 所示,中位径分别为 50.6(S₁)、100.7(S₂)、785.3(S₃) μm。

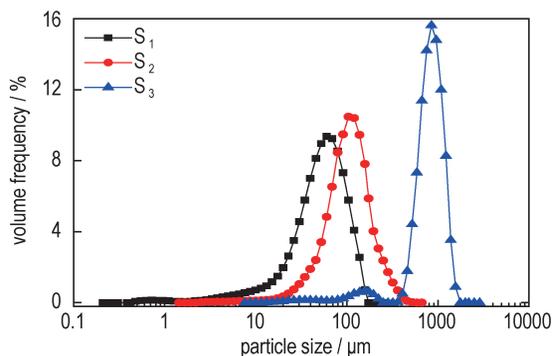
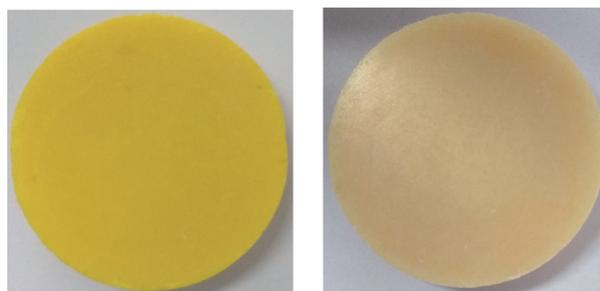


图1 HMX 粒度分布

Fig.1 Particle size distribution of HMX

2.1.2 样品制备

分别按照配方 DNAN/HMX(20/80)和 TNT/HMX(25/75)称取 DNAN 或 TNT 置于双层不锈钢反应釜中,通过循环油浴进行控温加热熔化,温度为 (105±0.5) °C,待载体炸药熔化后按照相应配方中的质量比例称取 HMX,并在搅拌的情况下缓慢加入,HMX 完全加入后继续搅拌 20~30 min,然后浇注到相应的模具中冷却成型,成型后的药柱如图 2 所示。其中,一维拉格朗日分析试验、准静态力学试验、以及分离式霍普金森压杆(SHPB)试验中各药柱样品具体尺寸参见 2.2 节。



a. DNAN/HMX

b. TNT/HMX

图2 DNAN/HMX(20/80)和TNT/HMX(25/75)药柱

Fig.2 Charge of DNAN/HMX(20/80) and TNT/HMX(25/75)

2.2 测试法方与装置

熔铸炸药熔融状态下的流变特性采用表观粘度进行表征。表观粘度使用 Haake Mars III 型旋转流变仪进行测量,流变仪配有控温循环油浴以便对炸药悬浮液进行加热与保温。表观粘度测试时,按照炸药成分比例称量后置于测量筒中,熔化混合并搅拌均匀,温度控制在 (100±0.1) °C,使用同心圆筒测量系统进行测试。

炸药的能量采用爆速和爆压进行表征。爆速和爆压的测量参照 GJB772A-1997 炸药试验方法^[15]。待测载体炸药 TNT 和 DNAN 药柱尺寸为 $\Phi 80$ mm×40 mm,待测 TNT 基和 DNAN 基熔铸炸药尺寸为 $\Phi 60$ mm×40 mm。

炸药热感度采用慢速烤燃进行表征,通过美军标 MIL-STD-2105D^[16]判断慢速烤燃条件下的炸药响应的等级。烤燃装置实物图如图 3 所示,其壳体材料采用 45# 钢,壁厚为 3 mm,炸药的浇注尺寸为 $\Phi 40$ mm×80 mm。控制升温速率为 1 K·min⁻¹。



图3 慢速烤燃装置实物图

1—壳体,2—控温加热装置

Fig.3 Device of slow cook-off bomb

1—shell, 2—temperature control heating device

从冲击波起爆到发展为爆轰所经过的距离即为到爆轰的距离,是炸药在冲击波作用下安全性评估的重要参数。炸药的冲击波感度采用到爆轰的距离进行表

征。炸药到爆轰的距离采用一维拉格朗日分析试验^[17]进行测试,测试示意图如图4所示,测试装置主要由平面冲击波加载系统(炸药透镜和组合衰减板)、压力测试系统(触发探针、锰铜压阻传感器、脉冲恒流源和示波器)以及待测炸药组成,其中待测载体炸药薄片尺寸为 $\Phi 80\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,厚片尺寸为 $\Phi 80\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,待测混合炸药薄片尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,厚片尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,透镜的尺寸与待测炸药匹配。测试时入射波的压力通过控制空气环和衰减板的高度进行调整。

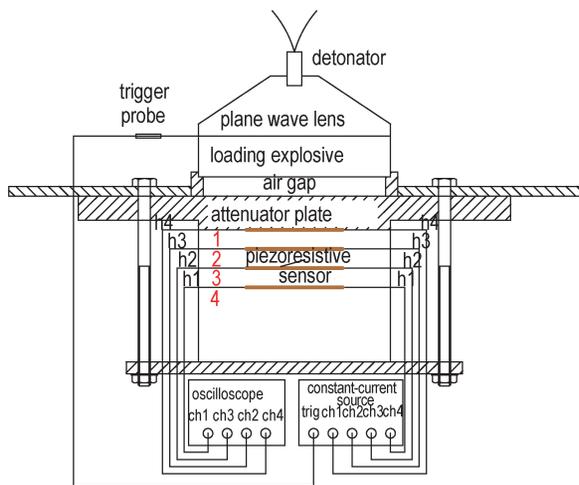


图4 一维拉格朗日分析试验示意图

Fig.4 One-dimensional Lagrangian analysis sketch

炸药的力学性能采用抗压强度和抗拉强度进行表征,在常温(20 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 下通过准静态力学实验和SHPB试验进行测试,而后分别在低温(0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、高温(40 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、高低温循环条件下对炸药进行准静态测试,高低温循环试验温度范围参照《军用设备环境试验方法》GJB150.5A-2009确定,高低温循环温度范围为 $+70\sim -40$ $^{\circ}\text{C}$,升降温速率为 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,并在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 和 70 $^{\circ}\text{C}$ 恒温 2 h 使样品温度均匀稳定,试验周期数分别为3个周期。准静态抗压强度测试时测量头的加载速度为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,待测炸药的尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$;准静态抗拉强度通过巴西试验法^[6]进行测试,测试时测量头的加载速度为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,待测炸药的尺寸为 $\Phi 40\text{ mm}\times 10\text{ mm}$;SHPB测试时应变速率控制在 150 s^{-1} 左右,待测炸药尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。

3 结果与讨论

3.1 流变性能

100 $^{\circ}\text{C}$ 时载体炸药TNT和DNAN在 $0\sim 500\text{ s}^{-1}$ 剪

切速率范围内的粘度曲线如图5所示。由图5可以看出,在测试的剪切速率范围内TNT和DNAN的粘度没有随剪切速率的变化而发生变化,均呈现出牛顿流体的特性;比较发现,TNT的粘度(9.05 ± 0.27) $\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 比DNAN(6.87 ± 0.25) $\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 高 31.73% 。

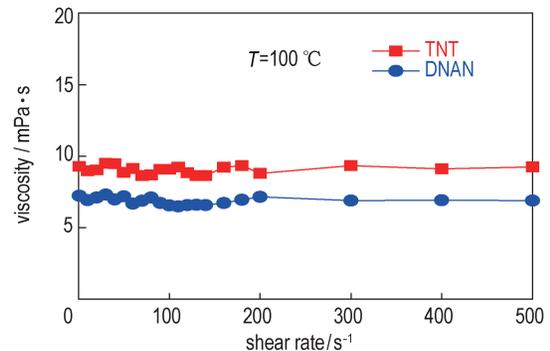


图5 载体炸药的粘度曲线

Fig.5 Viscosity curves of explosive matrix

图6为HMX(S_1)粒度($d_{50}=50.6\text{ }\mu\text{m}$)条件下DNAN/HMX和TNT/HMX炸药悬浮液的表现粘度,其中图6a为60%固相含量下两种炸药的粘度曲线,图6b为不同固相含量下DNAN/HMX和TNT/HMX的粘度曲线。由图6a可以发现, DNAN/HMX和TNT/HMX炸药的表现粘度均随着剪切速率的增加而不断减小,呈现出剪切变稀的特性,分析原因可能是实际HMX颗粒多为非球形,在剪切流动的过程颗粒会沿着流动方向取向排列^[18],剪切速率越大,取向排列程度越高,粘度越小;由图6b可以发现,在相同的固相条件下,TNT/HMX炸药的表现粘度均比DNAN/HMX高。

对 S_3 ($d_{50}=785.3\text{ }\mu\text{m}$)和 S_2 ($d_{50}=100.7\text{ }\mu\text{m}$)两种粒度的HMX进行颗粒级配,级配后测试得到悬浮液的粘度如图7所示,测试时温度保持在(100 ± 0.1) $^{\circ}\text{C}$,剪切速率为 100 s^{-1} 。

由图7a可以发现,在相同固相含量下,颗粒级配后的悬浮液粘度比单一粒度分布的剪切粘度小,最合适的粒度级配为 $2:1$ 。分析原因可能是颗粒级配拓宽了颗粒的尺寸分布,使得更多的小颗粒能够填充到大颗粒之间,从而有助于提高固相含量和降低粘度;此外,悬浮液粘度受颗粒尺寸和大小颗粒质量比影响^[19]。

由图7b可见,在最佳级配 $S_3:S_2=2:1$ 条件下,当相同固相含量时, DNAN/HMX炸药的悬浮液粘度均小于TNT/HMX炸药。在适宜的装药质量条件下,TNT/HMX的最大固相含量约为 75% ,DNAN/HMX的最大固相含量约为 80% 。

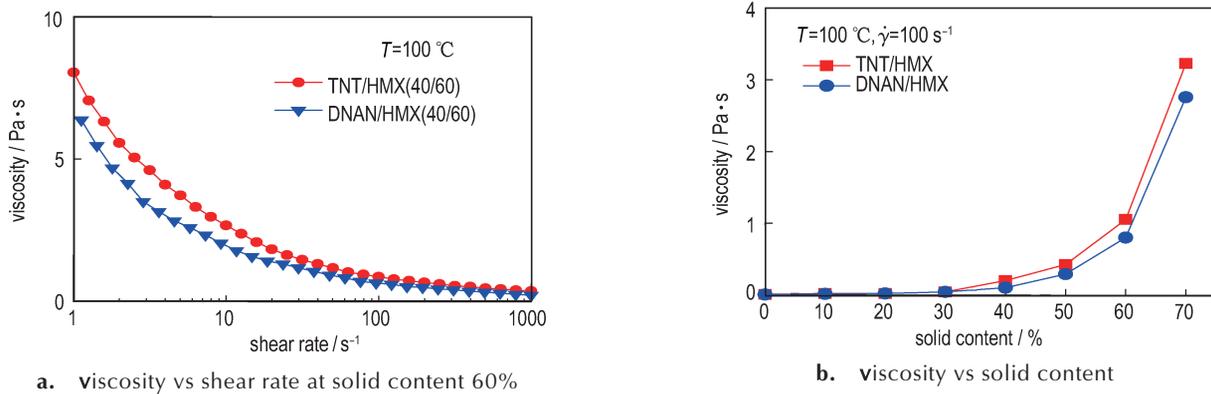


图6 100 °C下DNAN/HMX和TNT/HMX的粘度
Fig.6 Viscosity of DNAN/HMX and TNT/HMX at 100 °C

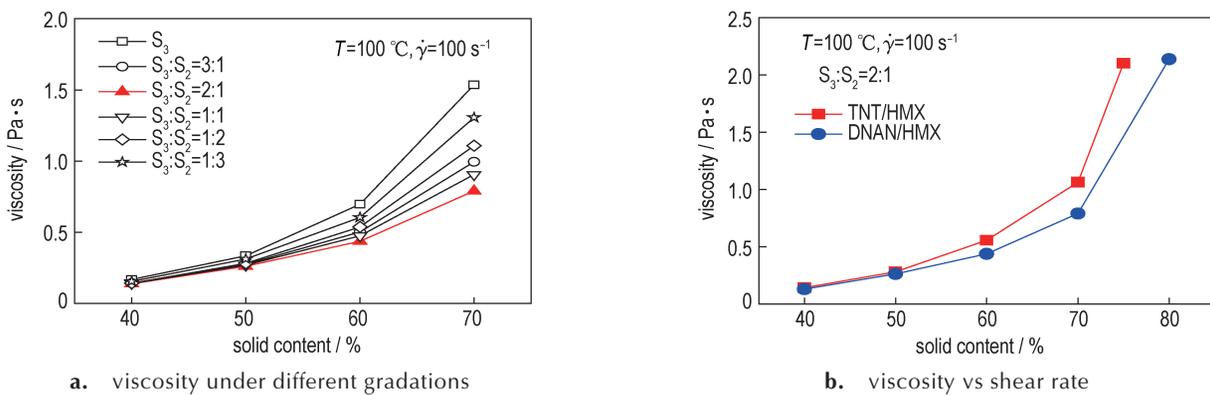


图7 HMX颗粒级配对TNT/HMX和DNAN/HMX粘度影响
Fig.7 Effect of HMX particle gradation on the viscosity of TNT/HMX and DNAN/HMX

3.2 能量性能

选择TNT/HMX(25/75)和DNAN/HMX(20/80)为研究对象,测试二者的爆速、爆压,测试结果如表1所示。由表1可以发现,载体炸药DNAN的爆速和爆压均比TNT低,这是因为硝基(-NO₂)是炸药的致爆基团,TNT和DNAN分子结构式相似,TNT含有三个硝基,而DNAN仅含有两个硝基;DNAN/HMX(20/80)熔铸炸药的爆速和爆压则与TNT/HMX(25/75)熔铸炸药相当(爆速、爆压仅相差1%左右),这是因为DNAN/HMX基熔铸炸药较高的固相含量弥

表1 TNT和DNAN及其熔铸炸药的爆速和爆压
Table 1 Detonation velocity and pressure of TNT, DNAN, and the melt-cast explosives

item	explosives	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p_{C1} / GPa
carrier explosives	TNT	6811	19.20
	DNAN	5895	14.15
mixed explosive	TNT/HMX (25/75)	8452	31.44
	DNAN/HMX (20/80)	8336	31.03

补了DNAN能量的不足。

3.3 安全性能

3.3.1 慢速烤燃

对载体炸药TNT和DNAN、混合熔铸炸药TNT/HMX(25/75)和DNAN/HMX(20/80)进行慢速烤燃试验,控制升温速率为 $1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$,试验后烤燃弹的状态如图8所示。试验中,TNT和DNAN发生响应的的时间分别为242.5, 270.9 min,TNT/HMX(25/75)和DNAN/HMX(20/80)发生响应的的时间分别为222.7, 226.3 min。

对比图8a和图8b可以发现,装有TNT的烤燃弹试验后壳体完全破碎,碎片较大,按照美军标MIL-STD-2105D可以判定其响应等级为爆炸反应(类型Ⅲ);装有DNAN的烤燃弹试验后没有产生碎片,壳体仍然较为完整,没有显著的变形,炸药有灼烧的现象,但弹体内有大量的残药,可以判定其响应等级为燃烧反应(类型Ⅴ)。

对比图8c和图8d可以发现,装有TNT/HMX(25/75)炸药的烤燃弹试验后壳体完全破碎,碎片较



图8 试验后烤燃弹的状态

Fig.8 Photos of cook-off bomb after experiments

大,壳体底部有少量残药,可以判定其响应等级为爆炸反应(类型Ⅲ);装有DNAN/HMX(20/80)的烤燃弹试验后壳体仍然较为完整,有一侧端盖被撕裂开,弹体内和试验台周围有部分残药,可以判定其响应等级为爆燃反应(类型Ⅳ)。

通过慢速烤燃试验可以得出结论,与载体炸药TNT相比, DNAN具有更高的烤燃安全性;与TNT/HMX(25/75)能量相当的DNAN/HMX(20/80)具有更高的烤燃安全性。

3.3.2 一维拉格朗日分析试验

对载体炸药TNT和DNAN进行一维拉格朗日分析试验时,调整空气环和衰减板得到入射波压力为5.72 GPa;对TNT/HMX(25/75)和DNAN/HMX(20/80)进行一维拉格朗日分析试验时,调整得到入射波压力为4.51 GPa。测试得到炸药不同拉格朗日位置处的压力时程曲线如图9所示。

对比图9a和图9b可以看出,在5.72 GPa的加载压力作用下,载体炸药TNT炸药在4, 8, 12 mm位置处前导冲击波阵面压力均升高明显,而且冲击波阵面后由于快速的化学反应导致压力上升很快,压缩波峰值的到达时间与前导冲击波阵面到达时间很近,炸药在8, 12 mm位置处压缩峰值的到达时间和前导冲击波到达时间基本相同,在12 mm处炸药达到了完全爆轰,波

阵面压力达到19.41 GPa;而DNAN炸药在5.72 GPa的加载压力作用下各位置处前导冲击波到达后压缩峰值均有较小幅度的增加,但各位置处前导冲击波波阵面压力没有明显升高,在12 mm位置处未能达到完全爆轰。因此,在5.72 GPa的加载压力作用下,TNT到爆轰的距离为8~12 mm, DNAN到爆轰的距离大于12 mm,即载体炸药DNAN冲击波感度低于TNT。

对比图9c和图9d,可以看出,TNT/HMX(25/75)炸药前导冲击波波阵面压力随着拉格朗日位置增加而快速增加,在12 mm位置处达到完全爆轰,波阵面压力达到26.07 GPa,而DNAN/HMX(20/80)炸药中各拉格朗日位置前导冲击波波阵面压力增长较为缓慢,在12 mm位置处未能达到完全爆轰,波阵面压力仅为16.16 GPa。因此,在4.51 GPa的加载压力作用下,TNT/HMX(25/75)到爆轰的距离为8~12 mm, DNAN/HMX(20/80)到爆轰的距离大于12 mm,即DNAN/HMX(20/80)的冲击波感度低于TNT/HMX(25/75)。

3.4 力学性能

在常温下(20±0.5)℃下,通过准静态单轴压缩、巴西试验和动态SHPB试验测试TNT和DNAN基熔铸炸药的力学性能,测试结果见表2。

比较表2的数据,可以发现,载体炸药TNT的静态

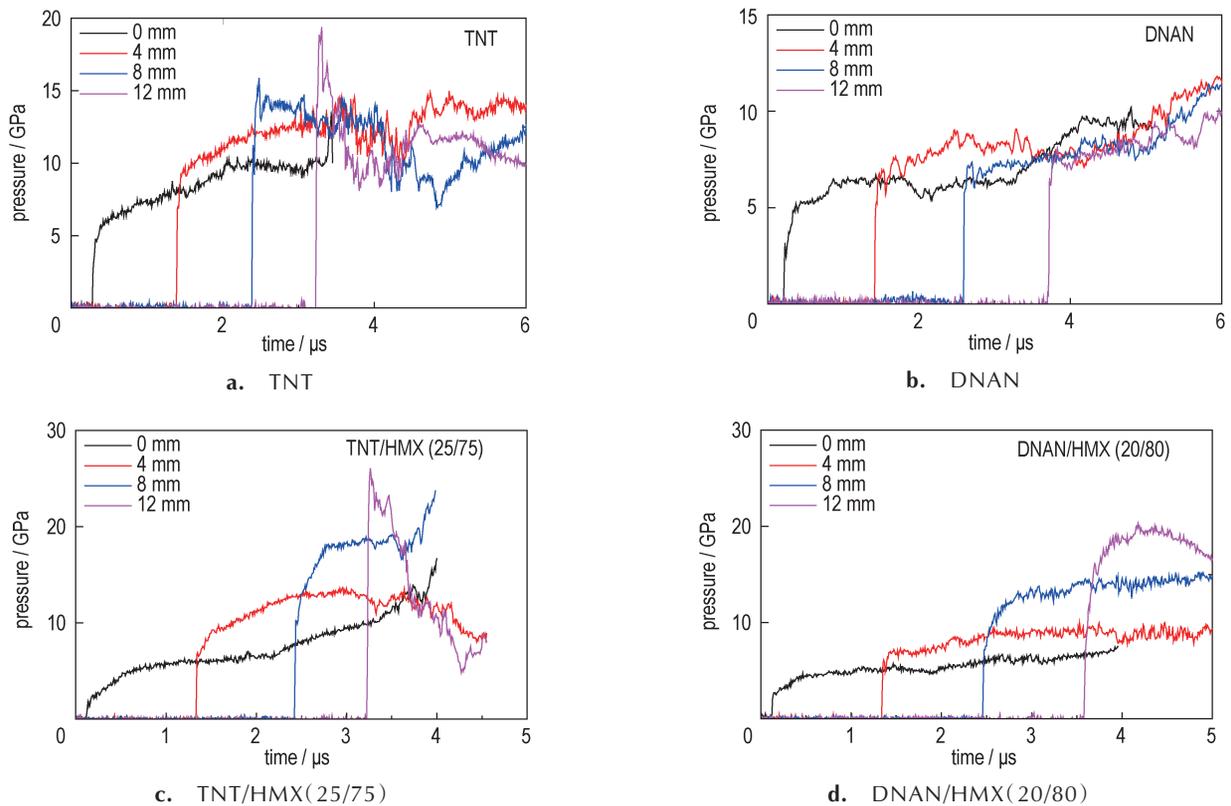


图9 DNAN/HMX(20/80)和TNT/HMX(25/75)炸药各拉格朗日位置的压力历史

Fig.9 Measured pressure histories of explosive at various Lagrangian positions of DNAN/HMX(20/80) and TNT/HMX(25/75)

和动态抗压强度和压缩模量均显著大于DNAN, 而DNAN的静态抗拉强度比TNT高28.9%。混合炸药DNAN/HMX(20/80)炸药的相对密度与TNT/HMX(25/75)几乎一致, 其静态和动态抗压强度和模量均比TNT/HMX(25/75)高, 特别是DNAN/HMX(20/80)炸药的静态抗拉强度比TNT/HMX(25/75)高21.3%。这可能是因为DNAN/HMX的分子间结合能大于TNT/HMX^[20]所致。熔铸炸药属于脆性材料, 一般其抗拉强度远小于抗压强度, 在复杂的受力环境中往往是受拉破坏而非受压破坏。因此可以得出结论: 常温下, DNAN基熔铸炸药的力学性能优于TNT基熔铸炸药。

在低温(0 ± 0.5) °C、高温(40 ± 0.5) °C、高低温循环条件下测试得到TNT、DNAN及其基熔铸炸药的静态抗压强度、抗拉强度见表3。

由表2及表3的数据可知, 除DNAN外, TNT、TNT/HMX(25/75)、以及DNAN/HMX(20/80)的抗拉和抗压强度都是在0 °C下最高, 20 °C下次之, 40 °C下最低, 呈现出低温硬化高温软化的现象; 0 °C下DNAN的抗拉及抗压强度均低于20 °C下的相应值, 可能是低温条件下DNAN药柱产生了裂纹所致; 与常温条件下相比, 经过高低温循环后所有药柱的抗拉和抗压强度均减小, 也可能是高低温循环使得药柱内部产生了裂

表2 TNT和DNAN及其熔铸炸药的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TNT, DNAN, and the melt-cast explosives based on them

item	explosives	density $\rho/g \cdot cm^{-3}$	quasi-static compression		quasi-static tension		SHPB	
			strength σ_c/MPa	modulus E/GPa	strength σ_t/MPa	modulus E/GPa	strength σ/MPa	modulus E/GPa
carrier explosives	TNT	1.612	19.732	1.737	0.567	1.506	20.734	2.692
	DNAN	1.485	10.888	1.195	0.731	1.151	13.085	1.456
mixed explosive	TNT/HMX(25/75)	1.803	12.823	6.719	1.441	6.659	18.562	7.571
	DNAN/HMX(20/80)	1.796	15.642	7.612	1.748	7.405	19.830	8.486

表 3 不同温度条件下 TNT 和 DNAN 及其熔铸炸药的强度

item	T/°C	carrier explosives		mixed explosives	
		TNT/	DNAN	TNT/HMX(25/75)	DNAN/HMX(20/80)
compression	0±0.5	21.779	10.719	15.116	17.652
	40±0.5	15.436	9.226	10.615	13.019
	circulation	16.128	10.058	9.510	14.633
tension	0±0.5	0.681	0.362	1.618	1.891
	40±0.5	0.366	0.318	1.192	1.544
	circulation	0.411	0.330	1.232	1.433

纹。此外,除 20 °C 下 DNAN 的抗拉强度大于 TNT (表 2)外,其余情况下 DNAN 的力学性能都不如 TNT。但是,对于以它们为基的熔铸炸药来说,情况大不相同。在所有温度条件下, DNAN/HMX(20/80)的抗拉及抗压强度都优于 TNT/HMX(25/75)。

4 结论

(1)载体炸药 DNAN 的粘度比 TNT 约低 24%,使得 DNAN 基熔铸体系的极限固含量比 TNT 基熔铸体系高 5% 左右。DNAN/HMX 与 TNT/HMX 熔铸体系的极限固含量大致分别为 80% 和 75%。

(2)熔铸炸药 DNAN/HMX(20/80)与 TNT/HMX(25/75)的爆速分别为 $8336 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $8452 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,爆压分别为 31.03GPa 和 31.44GPa,两者的能量性能基本相当。

(3)在慢烤实验中, DNAN/HMX(20/80)的响应等级为爆燃反应, TNT/HMX(25/75)则为爆炸反应;在一维拉格朗日分析试验中, DNAN/HMX(20/80)在 12 mm 内未达到完全爆轰, TNT/HMX(25/75)在 8 ~ 12 mm 内达到完全爆轰,前者的到爆轰距离远大于后者。熔铸炸药 DNAN/HMX(20/80)的安全性能优于 TNT/HMX(25/75)。

(4)DNAN/HMX(20/80)熔铸炸药在 0, 20, 40 °C 条件下的抗拉和抗压强度均大于 TNT/HMX(25/75),熔铸炸药 DNAN/HMX(20/80)的力学性能优于 TNT/HMX(25/75)。

上述结果表明,在能量性能基本持平的情况下, DNAN/HMX 熔铸炸药的安全及力学性能优于 TNT/HMX 熔铸炸药,即 DNAN/HMX 熔铸炸药具有相对于 TNT/HMX 熔铸炸药的综合性性能优势。

参考文献:

[1] 孙业斌, 惠君明 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出

版社, 1995:119.

SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao. Military composite explosives [M]. Beijing: Weapons Industry Publishing House, 1995:119.

- [2] 曹端林, 李雅津, 杜耀, 等. 熔铸炸药载体的研究评述[J]. 含能材料. 2013, 21(2): 157-165.
CAO Duan-lin, LI Ya-jin, DU Yao, et al. Review on carriers for melt-cast explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 157-165.
- [3] 王亲会. 熔铸混合炸药用载体炸药评述[J]. 火炸药学报. 2011, 34(5): 25-28.
WANG Qin-hui. Overview of carrier explosive for melt-cast composite explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*. 2011, 34(5): 25-28.
- [4] 蒙君熨, 姜振明, 张向荣, 等. 功能助剂对 2,4-二硝基苯甲醚基熔铸炸药性能的影响[J]. 兵工学报. 2016, 37(3): 424-430.
MENG Jun-jiong, JIANG Zhen-ming, ZHANG Xiang-rong, et al. Effect of functional agents on the performance of 2,4-dinitroanisole-based melt-cast explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(3): 424-430.
- [5] CAO Tong-tang, Zhou Lin, Zhang Xiang-rong, et al. Shock initiation characteristics of aluminized DNAN/RDX melt-cast explosives [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 35 (4) : 430-442.
- [6] ZHU Dao-li, Zhou Lin, Zhang Xiang-rong, et al. Simultaneous determination of multiple mechanical parameters for a DNAN/HMX melt-cast explosive by Brazilian disc test combined with digital image correlation method [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(8):864-872.
- [7] 高杰, 焦建设, 王浩, 等. DNAN 基熔铸复合炸药的爆轰性能[J]. 火炸药学报, 2014, 37(3):26-32
GAO Jie, JIAO Jian-she, WANG Hao, et al. Detonation properties of DNAN-based melt-cast composition explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(3):26-32
- [8] 罗一鸣, 蒋秋黎, 赵凯, 等. 2,4-二硝基苯甲醚与 TNT 凝固行为的差异性分析[J]. 火炸药学报. 2015, 38(5): 37-40.
LUO Yi-ming, JIANG Qiu-li, ZHAO Kai, et al. Analysis on differences of solidification behavior of DNAN and TNT[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38 (5) : 37-40.
- [9] Provatas A, Davies P J. Australian melt-cast explosives R&D DNAN - a replacement for TNT in melt-cast formulations[R]. Weapons Systems Division, 2005.
- [10] Davies P J, Provatas A. Characterization of 2,4-dinitroanisole an ingredient for use in low sensitivity melt cast formulations,

- Edinburgh south Australia [R]. Weapons Systems Division of Defense Science and Technology Organization, 2006.
- [11] 王浩,高杰,罗一鸣,等. TNT、DNAN、TNAZ、DNTF不可逆膨胀特性[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(32): 229-232.
WANG Hao, Gao Jie, LUO Yi-ming, et al. Irreversible growth characteristics of TNT, DNAN, TNAZ and DNTF [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(32): 229-232.
- [12] 王红星,罗一鸣,王晓峰. DNAN作为熔铸炸药载体的可行性分析[C]. 北京: 2008年火炸新技术研讨会论文集, 2008.
WANG Hong-xing, Luo Yi-ming, WANG Xiao-feng. Feasibility analysis of DNAN as carrier of melt-cast explosives [C]. *Beijing: 2008 Symposium on New Technology of Propellants and Explosives*, 2008.
- [13] 王红星,王晓峰,罗一鸣,等. DNAN炸药的烤燃实验[J]. 含能材料. 2009, 17(2): 183-186.
WANG Hong-xing, WANG Xiao-feng, LUO Yi-ming, et al. Cook-off Test of DNAN explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 183-186.
- [14] Trzcinski W A, Cudziło S, Dyjak S, et al. A comparison of the sensitivity and performance characteristics of melt-pour explosives with TNT and DNAN binder [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2014, 11(3): 443-455.
- [15] GJB772A-97, 炸药试验方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
GJB772A-97, Explosive Test Method [S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 1997.
- [16] MIL-STD-2105D, Hazard assessment tests for non-unclear munitions [S]. US: Department of Defense, 2011.
- [17] 张宝铎,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001:259-260.
ZHANG Bao-ping, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei. Detonation Physics [M]. Beijing: Weapons Industry Publishing House, 2001:259-260.
- [18] Chinesta F, Ausias G. Rheology of non-spherical particle suspensions [M]. UK: ISTE Press, 2015:20.
- [19] Chong J S, Christiansen E B, Baer A D. Rheology of concentrated suspensions [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1971, 15: 2007-2021.
- [20] 蒙君熹. DNAN基熔铸炸药成型过程若干问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
MENG Jun - jiong. Research on forming process of DNAN based melt - cast explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.

Comparison of Comprehensive Properties for DNAN and TNT-Based Melt-cast Explosives

ZHU Dao-li^{1,2}, ZHOU Lin¹, ZHANG Xiang-rong¹, XING Ruo-ting³

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Anhui Shenjian Polytron Technologies Inc., Hefei 230000, China; 3. Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co., Ltd, Baiyin 930900, China)

Abstract: In order to compare the comprehensive properties of 2, 4-dinitroanisole (DNAN)-based and 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT)-based melt-cast explosives, the suspension rheology, performance, safety and mechanical properties of typical TNT-based and DNAN-based explosives were systematically investigated by experiment tests. The viscosity of DNAN (6.87 mPa·s) was lower than that of TNT (9.05 mPa·s), which made the limit solid content of the DNAN/HMX melt-cast system (about 80%) higher than that of the TNT/HMX melt-cast system (about 75%). The detonation velocity and detonation pressure was 8336 m·s⁻¹ and 31.03 GPa, 8452 m·s⁻¹ and 31.44 GPa, for DNAN/HMX (20/80) and TNT/HMX (25/75), respectively. The response level of DNAN/HMX (20/80) and TNT/HMX (25/75) was burning and explosion, respectively under 1 K·min⁻¹ slow cook-off. Under 4.51 GPa incident shock wave pressure, TNT/HMX (25/75) achieved complete detonation within 8-12 mm, whereas DNAN/HMX (20/80) failed to achieve complete detonation within 12 mm; tensile and compressive strength of DNAN/HMX (20/80) was higher than that of TNT/HMX (25/75). With basically equal energy performance, DNAN/HMX (20/80) melt-cast explosives have better safety and mechanical properties than TNT/HMX (25/75) melt-cast explosives.

Key words: 2, 4-dinitroanisole (DNAN) based melt-cast explosives; 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) based melt-cast explosives; rheology; slow cook-off; shock initiation; mechanical property

CLC number: TJ55;O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019170

(责编: 王艳秀)