

文章编号:1006-9941(2021)04-0345-07

固相颗粒和聚合物对DNAN微观凝固及力学性能的影响

张蒙蒙,罗一鸣,李秉肇,方学谦,杨 惠

(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究常用组分黑索今、铝粉、高氯酸铵、聚3,3-二(硝酸酯基甲基)氧丁环(PBNMO)对2,4-二硝基苯甲醚微观凝固过程和宏观性能影响规律,从微观结构角度设计、改进2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基熔铸炸药配方组成以解决宏观性能的不足,在光学显微镜下观测了含不同添加物的薄层DNAN样品动态结晶过程及起始凝固温度的变化;根据结晶距离及时间计算了不同样品的晶体生长线速度;通过对 $\Phi 20$ mm药柱的外观形貌及药柱相对密度研究了添加物对样品成型性的影响规律;测试了 $\Phi 20$ mm \times 20 mm药柱的抗拉、抗压性能,研究了不同添加物对样品力学性能影响。结果表明,黑索今、铝粉、高氯酸铵、PBNMO可改善DNAN凝固过程中晶体形态、DNAN起始凝固温度影响因添加物的不同而不同、降低DNAN凝固线速率、提高药柱相对密度;聚合物的加入使得样品抗拉强度、抗压强度显著提高,力学各向异性得到改善;多种添加物共同作用使得DNAN的成型性得到改善,抗拉强度达到6 MPa以上。表明,在黑索今、铝粉、高氯酸铵、PBNMO的协同作用下,可获得微观结晶细密、缺陷少、力学性能较佳的DNAN基混合炸药样品。

关键词: 含能材料;熔铸炸药;2,4-二硝基苯甲醚(DNAN);结晶;添加物;聚3,3-二(硝酸酯基甲基)氧丁环(PBNMO)

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020076

1 引言

随着对低易损弹药重视程度的提高,2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基混合炸药因其优异的不敏感性获得了青睐。国内外研究者开展了广泛的研究,并先后形成了PAX系列炸药^[1-2]、IMX系列炸药^[3]、ARX-4027^[4-6]、RBUL-2^[7]、RD-1^[8]等炸药配方。装填DNAN基混合炸药的战斗部安全性得以提高,进一步扩大该类炸药使用范围成为了未来熔铸类炸药战斗部发展的趋势。

随着研究的深入及使用范围扩大,DNAN基混合炸药的不足逐渐显现,尤其是装药力学性能方面的缺陷。DNAN力学性能呈现硬而脆的特点^[9],在传统小口径装药中,DNAN基熔铸炸药表现出较好的装药性能^[8],而在大型战斗部装药、运输、贮存、使用等过程中

存在脆裂的风险,产生的裂纹等缺陷易因意外刺激而点火,使武器系统存在安全隐患,限制了DNAN基混合炸药在大口径战斗部中的使用。

国内外对DNAN熔铸炸药力学性能研究,一方面集中在添加N-甲基-4-硝基苯胺(MNA)等作为晶核^[6,10-11]、形成多元载体或者改变工艺条件^[12-13],改善载体炸药结晶性能;另一方面是在混合炸药配方中添加表面活性剂^[14]或聚合物^[15],增强载体与炸药颗粒的亲合力或使炸药形成类似“钢筋混凝土”的结构。研究主要集中在配方、装药及应用性能等宏观的工程化层面,通过不断的“试错”调整配方组成、工艺条件进而获得力学性能提高的DNAN基熔铸炸药。微观结构状态决定宏观性能的外在表现。不同组分对DNAN凝固过程中微观层面影响一直处于“黑匣子”状态,而该研究是熔铸炸药配方微观结构设计的基础。

为打开熔铸炸药微观凝固过程的“黑匣子”,本项目组搭建了可以在毫米级水平观测熔铸炸药微观动态凝固过程及参数测量装置,开展了在黑索今(RDX)、铝粉(Al)、高氯酸铵(AP)和聚3,3-二(硝酸酯基甲基)氧丁环(PBNMO)等添加物参与下DNAN凝固微观过程

收稿日期:2020-04-04;修回日期:2020-05-21

网络出版日期:2021-01-20

作者简介:张蒙蒙(1986-),男,助理研究员,主要从事混合炸药制备与表征研究。e-mail:XSKY2000@163.com

通信联系人:罗一鸣(1980-),男,研究员,主要从事混合炸药制备与表征研究。e-mail:iamlrlym@126.com

引用本文:张蒙蒙,罗一鸣,李秉肇,等.固相颗粒和聚合物对DNAN微观凝固及力学性能的影响[J].含能材料,2021,29(4):345-351.

ZHANG Meng-meng, LUO Yi-ming, LI Bing-bo, et al. Influence on Mechanical and Micro Solidification of DNAN by Solid Additives and Polymer[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(4):345-351.

中凝固温度、凝固线速率、晶体动态生长过程的研究, 结合形貌及力学性能特点对以上添加物对 DNAN 微观凝固及宏观性能的联系进行了分析, 以期为 DNAN 基熔铸炸药配方设计及性能改进提供技术积累。

2 实验部分

2.1 试剂和仪器

2,4-二硝基苯甲醚, 工业品, 湖北东方化工有限公司; 黑索今, II 类, 甘肃银光化学工业集团有限公司; 铝粉 (粒径 13 μm), FLQT-3, 鞍钢实业微细铝粉有限公司; 高氯酸铵, 大连高佳化工有限公司; 聚 3,3-二(硝酸酯甲基)氧丁环 (PBNMO), 数均相对分子质量 5315, 西安近代化学研究所。

BX51 显微镜, 日本奥林巴斯公司; K2800 热台, 广州市明美光电技术有限公司; AG-IC100KN 材料试验机, 日本岛津公司。

2.2 样品制备

按照表 1 中试样组成称取 100 g 试样投入到油浴熔药锅内, 控制温度不超过 110 $^{\circ}\text{C}$ 搅拌至物料全部熔化, 将料浆注入预热至 60 $^{\circ}\text{C}$ 的 $\Phi 20$ mm 铜开合模具中, 自然冷却至室温, 打开开合模具获得试样药柱, 用车床将药柱截断获取 $\Phi 20$ mm \times 20 mm 规格试样, 收集车削药粉。其中加入 PBNMO 时, 需先用乙酸乙酯配置成溶质溶剂质量比为 1:5 的溶液, 之后缓慢加入熔化的 DNAN 样品中, 直至乙酸乙酯挥发殆尽。

2.3 测试方法

2.3.1 样品凝固过程观测

称取 1 mg 待测试样粉末于 $\Phi 15$ mm 盖玻片上, 放置于 K280 热台上加热至 100 $^{\circ}\text{C}$ 熔化后小心的盖上 $\Phi 8$ mm 盖玻片, 通过 BX51 显微镜观测、调整样品至视场中无显著气泡。待试样熔化保温 5 min 后关闭热

表 1 含不同添加物的 DNAN 样品组成

Table 1 Components of the DNAN samples with different additive

sample	the components of the samples/%
0#	100DNAN
1#	10RDX/90DNAN
2#	10Al/90DNAN
3#	10AP/90DNAN
4#	10PBNMO /90DNAN
5#	10RDX/10Al/10AP/10PBNMO /60DNAN

台自然降温、开启显微镜录像功能。

2.3.2 样品起始凝固温度测量

在视频采集过程中, 当料浆开始凝固时记录热台对应时刻的温度, 作为样品凝固温度。

2.3.3 凝固线速率测量

DNAN 样品凝固结束后, 通过显微镜工作站采集试样最终凝固状态照片, 利用显微镜工作站经标定的虚拟标尺测量照片中试样凝固始末点之间的距离 (L), 将其与 2.3.1 中所录视频中凝固始末点之间的时间差 ($\Delta t=t_s-t_0$) 之比, 即为试样凝固速率, 测量原理如图 1 所示。

2.3.4 试样力学性能测试

力学性能采用材料试验机进行常温下抗压强度、抗拉强度测试, 抗压强度按 GJB772A-1997 方法 416.1 进行试验, 抗拉强度按照 Q/AY91-1990 (劈裂法) 进行试验。

3 结果与讨论

3.1 添加物对 DNAN 凝固温度的影响

为了研究添加物对 DNAN 微观结晶过程中凝固温度的影响, 记录了薄层中样品开始凝固时热台的实

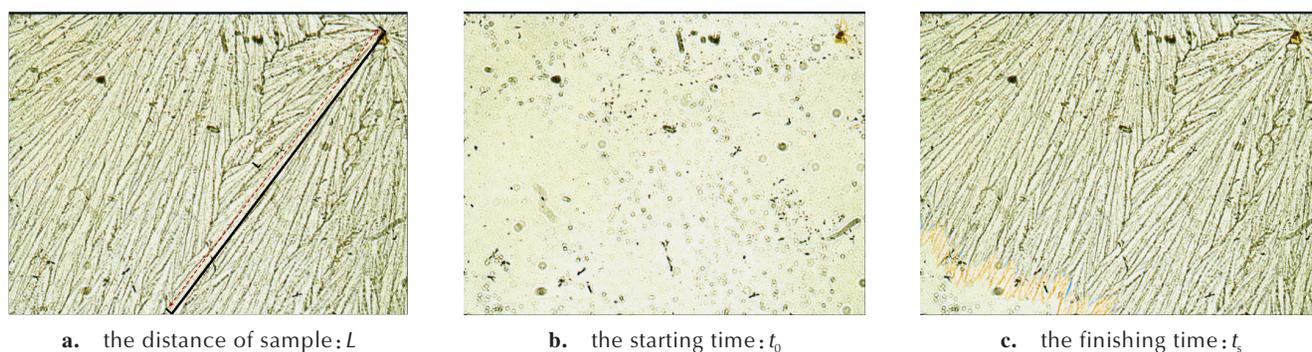


图 1 凝固速率测试原理

Fig.1 The theory of solidification rate testing

时温度,以此作为凝固温度,结果如表2所示。

表2 含不同添加物DNAN样品的凝固温度

Table 2 Solidification temperatures of DNAN samples with different additives $^{\circ}\text{C}$

sample	this work	in the literature
0 [#]	49	49.6–53.5 ^[16]
1 [#]	40	44.8–48.4 ^[16] , 43.1–48.5 ^[17]
2 [#]	51	
3 [#]	80	70–85.2 ^[16]
4 [#]	48	
5 [#]	68	

Note: The solid-to-liquid ratio was 1:9 in this experiment, as well as was 4:1 in literatures.

表2结果表明,与纯DNAN(0[#])相比,含添加物Al(2[#])、聚合物PBNMO(4[#])样品的凝固温度变化在2 $^{\circ}\text{C}$ 以内,含RDX(1[#])样品凝固温度降低9 $^{\circ}\text{C}$,含AP(3[#])样品提高31 $^{\circ}\text{C}$,同时含以上添加物(5[#])试样提高19 $^{\circ}\text{C}$,可见不同添加物对DNAN凝固温度影响显著。根据均匀形核理论^[18],当温度降低至熔点以下,在液相中存在的短程有序原子集团可能发展成为形核“胚芽”,进一步发展成为晶核引发凝固。据文献^[19]报道,RDX、AP在DNAN中具有一定的溶解度,分析认为溶解的RDX阻隔作用导致融态DNAN形成短程有序晶簇相对困难,须在更大过冷度下才能形成晶核,而AP与DNAN分子间具有氢键作用力,有利于短程有序集团的稳定,DNAN在过冷14.6 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下即可形成晶核开始结晶。聚合物PBNMO呈网络状分布于DNAN中,对于DNAN短程有序集团形成无显著影响对晶核的形成无明显影响。Al粉不溶于DNAN,对DNAN形核过程无显著影响。以上添加物共同作用时,其凝固形态及凝固温度是以上因素的共同作用的结果。

另外,表2中含RDX(1[#])、AP(3[#])样品的凝固温度,与文献^[16–17]中组分相同而固液含量不同的样品相当,可以推测添加物的含量对DNAN凝固温度影响较小,而受添加物种类影响显著。

3.2 添加物对DNAN凝固线速率的影响

为表征添加物对DNAN凝固线速率的影响,以6种样品的车削粉为对象,5倍放大条件下,采集动态凝固过程视频,并用显微镜工作站对凝固距离进行分析,计算样品凝固的线速度,结果如表3所示。

表3结果表明,添加物对DNAN凝固线速率影响效果为Al<PBNMO<RDX<AP。分析认为,Al与

DNAN无强分子间作用力,对DNAN凝固仅体现出颗粒物的阻碍、“切割”作用,使DNAN凝固速率下降7.9%(见样品2[#]所示);RDX在DNAN中有一定的溶解度,一方面溶解的RDX分子阻碍了DNAN分子或晶簇向结晶面扩散,另一方面,含RDX样品(1[#])起始凝固温度下降导致DNAN分子扩散减缓,在以上两方面的作用下样品1[#]相比纯DNAN样品(0[#])的凝固线速率下降84.7%;根据晶体长大理论^[18],有机物等材料其凝固速率随过冷度增大先增大后减小,添加AP引起DNAN凝固过冷度降低,导致样品3[#]的凝固速率下降97.5%;聚合物PBNMO加入导致融态DNAN粘度增大,DNAN分子扩散受阻,晶界推进变缓,导致样品4[#]凝固速率降低60%;多种添加物共同作用下,样品5[#]凝固速率受综合影响下降93.1%,与作用最明显的含AP样品(3[#])接近。

表3 含不同添加物DNAN样品的凝固线速率

Table 3 Solidification rate of DNAN samples with different additives

sample	solidification rate / $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	relative solidification rate / %
0 [#]	0.9033	100
1 [#]	0.1378	15.3
2 [#]	0.8319	92.1
3 [#]	0.0231	2.5
4 [#]	0.3611	40.0
5 [#]	0.0627	6.9

3.3 添加物对DNAN结晶形态的影响

通过5倍放大下薄层中样品凝固过程视频,分析添加物对DNAN结晶形态的影响研究,6种样品凝固过程的特征照片如图2所示。

由图2可知,含不同添加物的DNAN凝固过程中晶体生长形态差异显著。其中,图2a中纯DNAN样品0[#]结晶呈树枝状结晶生长,结晶前沿呈锯齿状;图2b中样品1[#]由于受RDX分子或颗粒的阻碍、切割作用,晶体前沿相比单独DNAN样品0[#]更细密,结晶前沿呈齐头并进的细针状;图2c中样品2[#]受Al粉阻碍、切割作用,晶体生长呈细小针状、结晶前沿相对平滑;图2d中样品3[#]中AP使DNAN凝固速率下降,试样结晶呈粗大柱状;图2e中样品4[#]中受聚合物PBNMO形成网状结构形成类似“绳索”阻拦影响,结晶前沿呈细密针状,结晶前沿平滑;图2f中样品5[#]受多种添加物共同影响,由最初的凝固点向四周结晶,固体颗粒分布密的方向凝固相对快。

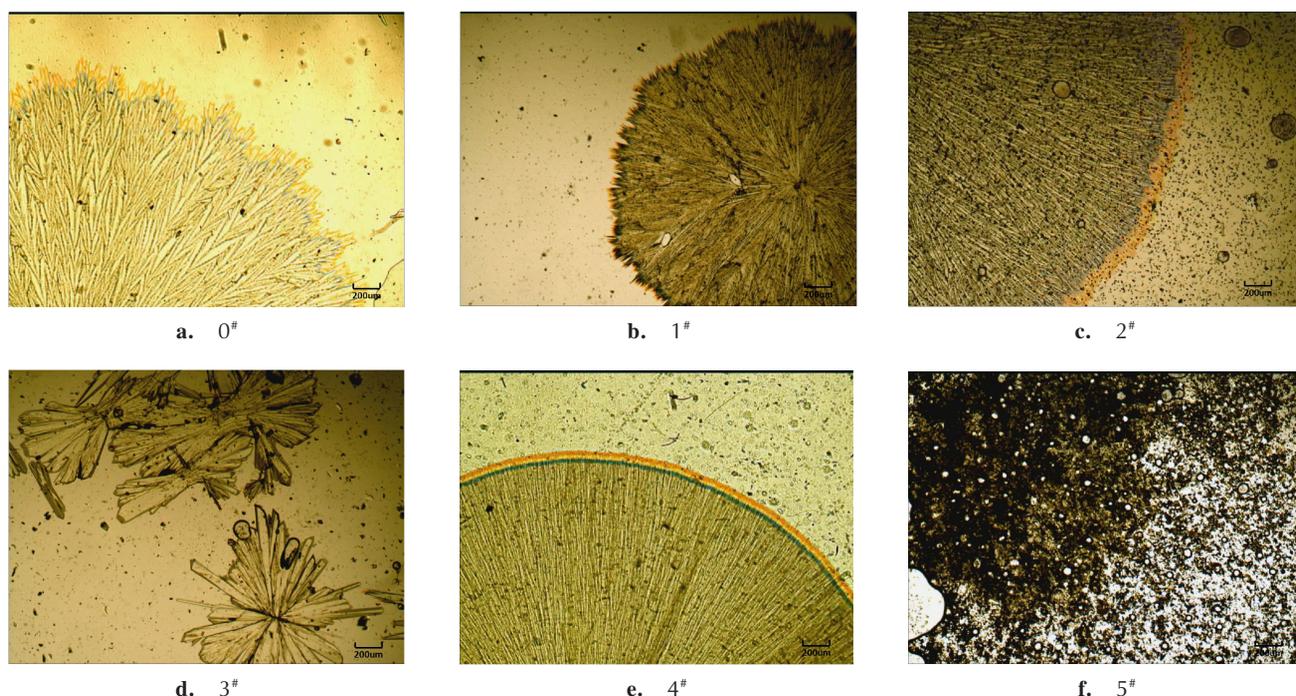


图2 添加物对DNAN结晶形态的影响

Fig.2 Effects of the additives on the crystal morphology of DNAN

以上研究表明, RDX、Al、聚合物PBNMO均可使DNAN结晶更加细密; AP显著降低了DNAN结晶线速率, 但粗大树枝晶使样品各项异性更加明显; 同时使用以上添加物, 可综合以上优点、克服单独使用的不足, 预计可使样品综合性力学能得以明显提高。

3.4 添加物对DNAN药柱成型性的影响

为了研究添加物对DNAN药柱成型性的影响, 制备了 $\Phi 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的药柱, 并在相同车削速率下对其进行截断, 图3为成型药柱侧面及车削面的照片, 所得药柱密度如表4所示。

图3a~f结果表明, 含添加物的1#~5#药柱表面光洁、冒口呈漏斗状, 与DNAN样品0#无明显差异。另外, 药柱在车削时图3e、f中含聚合物的样品4#、5#未出现脆性断裂而图3a~d中样品0#~3#发生脆性断裂, 说明含聚合物PBNMO的样品表现出良好的力学性能。分析认为, DNAN为脆性材料, 少量粉体材料不能改变其力学性能本质, 而具有长链结构PBNMO的加入则可显著改善药柱力学性能。

表4结果表明, 添加物的加入使得样品的相对密度获得提高, 且相对密度随表3中样品的相对结晶速率降低呈升高趋势, 随图2中样品结晶前沿平滑程度提高相对密度越高。分析认为, 当结晶速率

下降时, 树枝晶之间的区域可以得到更充分的补缩, 样品相对密度提高; 当结晶前沿越平滑, 滞后区域越少, 结晶缺陷越少, 则能得到相对密度更高的样品。样品4#、5#在未真空处理的情况下, 相对密度达到98%以上, 说明聚合物PBNMO对DNAN结晶缺陷抑制作用显著。

3.5 添加物对DNAN力学性能的影响

炸药力学性能通常采用抗拉强度、抗压强度及抗剪强度三项指标进行表征。对于熔铸炸药力学性能而言, 限制其应用的力学薄弱点在于抗拉强度和抗剪强度, 尤其是抗拉强度。本研究以试样抗拉强度作为力学性能改善判定依据, 抗压强度作为辅助判定依据, 在常温下对样品的抗压、抗拉性能进行了表征, 结果如表5所示。

由表5可知, RDX、Al、AP或PBNMO的加入, 使得DNAN抗压由3.68 MPa(样品0#)提高至最高17.7 MPa(样品4#), 抗拉强度由0.3 MPa(样品0#)提高至最高6.37 MPa(样品5#), 力学性能获得了明显的提高, 聚合物PBNMO的加入使试样4#抗压强度达到DNAN的4.8倍, 抗拉强度达到9.7倍。结合以上添加物对DNAN结晶线速率及结晶形态的影响规律, 含添加物的DNAN结晶缺陷减少, 力学性能增强。聚合物PBNMO与DNAN含有相同硝基官能团互溶性良好,

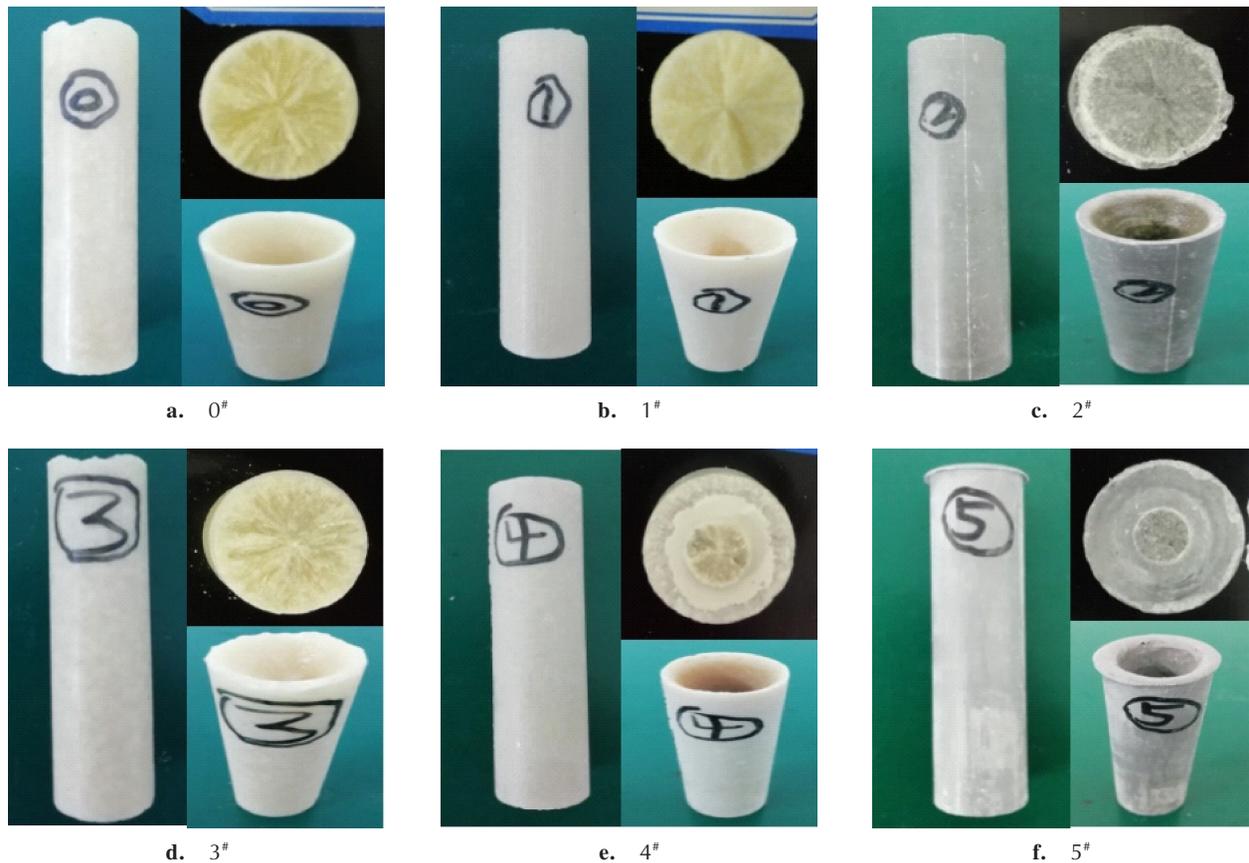


图3 含不同添加物的DNAN药柱及截断面照片

Fig.3 The grain and section of DNAN samples with different additives

表4 含不同添加物的DNAN药柱密度及密度相对标准偏差

Table 4 The density and relative standard deviation of grain for DNAN samples with different additives

sample	theoretical density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	average density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	relative density / %	RSD* / %
0#	1.560	1.468	94.1	1.26
1#	1.582	1.526	96.5	0.27
2#	1.629	1.550	95.1	3.87
3#	1.592	1.529	96.0	4.40
4#	1.522	1.506	98.9	0.36
5#	1.645	1.618	98.4	0.45

Note: RSD is relative standard deviation.

且聚合物PBNMO具有较长的分子链阻止了试样裂纹的出现及生长,显著提高了样品的力学性能。同时使用以上添加物时,一方面减少结晶过程中的缺陷提高晶粒自身力学强度,同时通过聚合物增强形成“钢筋混凝土”结构进一步增强样品力学强度,所得混合样品的抗拉强度达到6.37 MPa。4#、5#试样中聚合物含量为10%,而载体DNAN含量60%以上,与实际配方组成比例差异较大,为进一步验证聚合物对炸药配方力学

表5 含不同添加物的DNAN样品抗压抗拉强度

Table 5 Tensile strength and compressive strength of DNAN samples with different additives

sample	compressive strength / MPa	tensile strength / MPa
0#	3.68	0.30
1#	9.27	1.30
2#	9.58	0.62
3#	6.67	0.51
4#	17.7	2.91
5#	9.29	6.37
25DNAN/53RDX/10Al/10AP/2PBNMO	16.76	6.80

性能的影响,项目组设计了固相含量接近实际的配方25DNAN/53RDX/10AL/10AP/2PBNMO,该样品抗拉强度达到6.8 MPa,进一步证明了以上提高熔铸炸药力学性能的可行性。传统DNAN基熔铸炸药力学性能短板抗拉强度维持在2 MPa左右^[15],而聚合物PBNMO的加入可使DNAN基熔铸炸药力学性能显著提高。

4 结论

(1)通过开展在线观测RDX、AI、AP、PBNMO对DNAN起始凝固温度的影响研究,结果表明DNAN起始凝固温度受添加物的种类影响较大而添加量影响微弱,其中RDX使得DNAN凝固温度下降9℃,AP使凝固温度提高31℃,而AI与PBNMO聚合物影响微弱。

(2)通过添加物对DNAN凝固过程中晶体生长速率分析,结果表明RDX、AI、AP、聚合物PBNMO均使DNAN结晶线速率降低、药柱相对密度提高,其中AP可使样品结晶线速率降低93.1%以上、聚合物PBNMO使样品相对密度达到98%以上。

(3)研究了添加物对DNAN力学性能的影响,结果表明RDX、AI、AP、聚合物PBNMO均可使DNAN试样的抗压抗拉性能得到改善,其中聚合物PBNMO可使DNAN基混合炸药配方抗拉强度显著提高到6MPa以上。

参考文献:

- [1] John N, Daniel D. Development of a practical reduced sensitivity composition B replacement[C]//32th international annual conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2001:28:1-28-8.
- [2] Ravi P, Badgajar D M, Gore G M, et al. Review on melt cast explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, 36(5): 393-403.
- [3] Taylor S, Park E, Bullion K, et al. Dissolution of three insensitive munitions formulations [J]. *Chemosphere*, 2015, 119: 342-348.
- [4] Davies P J, Provas A. Characterization of 2,4-dinitroanisole: an ingredient for use in low sensitivity melt cast formulations [R]. Defence Science and Technology Organisation: DS-TO-TR-1904, 2006.
- [5] Davies P J, Provas A. DNAN: a replacement for TNT in melt-cast formulations[C]//DNIA Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Orlando, Bristol, United Kingdom, 2006.
- [6] Provas A, Wall C. Thermal testing of 2,4-dinitroanisole (DNAN) as a TNT replacement for melt-cast explosive[C]//International annual conference Fraunhofer Institut Chemische Technologie, Karlsruhe, Germany, 2011.
- [7] 王春光,魏敏,刘学柱,等. DNAN基高威力钝感熔铸炸药装药工艺应用[J]. *兵工自动化*, 2013, 32(1):42-45. WANG Chun-guang, WEI Min, LIU Xue-zhu, et al. Charging technology application of high power insensitive melt-pour explosive based on DNAN [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2013, 32(1):42-45.
- [8] 牛国涛,金大勇,王亲会,等. 装药结构对大尺寸熔铸炸药裂纹的影响[J]. *火工品*, 2015, 4:30-33. NIU Guo-tao, JIN Da-yong, WANG Qin-hui, et al. Technical characteristics of DNAN based melt-casting explosives[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015, (4):30-33.
- [9] 赵凯,王浩,王玮. DNAN力学性能分析[J]. *火炸药学报*, 2016, 9(4):68-72. ZHAO Kai, WANG Hao, WANG Wei, et al. Analysis of the mechanical properties of DNAN[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2016, 9(4): 68-72.
- [10] 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.
- [11] Ferlazzo P, Nicolich S, Niles J, et al. Insensitive munitions explosive development for melt pour munitions[C]//DNIA insensitive munitions and energetic materials technology symposium, Orlando, FL, USA. 2003.
- [12] 赵凯,罗一鸣,谢中元,等. 工艺温度对DNTF/DNAN二元共熔物传爆性能影响[J]. *火工品*, 2013, 6: 45-47. ZHAO Kai, LUO Yi-ming, XIE Zhong-yuan, et al. The effect of process temperature on the booster performance of DNTF/DNAN eutectic mixture [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013, 6: 45-47.
- [13] 蒙君熨,周霖,金大勇,等. 成型工艺对2,4-二硝基苯甲醚基熔铸炸药装药质量的影响[J]. *兵工学报*, 2018, 39(9): 1719-1726. MENG Jun-jiong, ZHOU Lin, JIN Da-yong, et al. Effect of forming process on casting quality of 2,4-dinitroanisole-based casting explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(9): 1719-1726.
- [14] Qian W, Chen X Z, Luo G. Polymer reinforced DNAN/RDX energetic composites: interfacial interactions and mechanical properties [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2017, 14(3): 726-741.
- [15] 蒙君熨,周霖,金大勇,等. 功能助剂对DNAN/RDX熔铸炸药界面黏结强度的影响[J]. *含能材料*, 2018, 26(9): 765-771. MENG Jun-jiong, ZHOU Lin, JIN Da-yong, et al. Effect of functional additives on interface bonding strength of DNAN/RDX melt-cast explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(9):765-771
- [16] 邵颖惠,任晓宁,刘子如,等. 2,4-二硝基苯甲醚熔体及其在介质中的非等温结晶[J]. *化学分析计量*, 2011, 20(1): 22-26. SHAO Ying-hui, REN Xiao-ning, LIU Zi-ru, et al. DNAN and its non-isothermal crystallizations in RDX and AP [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2011, 20(1): 22-26.
- [17] 王红星,蒋芳芳,王浩,等. DNAN在RDX中的非等温结晶动力学[J]. *含能材料*, 2012, 20(4): 423-426. WANG Hong-xing, JIANG Fang-fang, WANG HaO, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of DNAN in RDX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(4): 423-426.
- [18] 胡庚祥,蔡洵,戎咏华. 材料科学基础[M]. 第三版. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 231-239. HU Geng-xiang, CAI Xun, RONG Yong-hua. Fundamentals of materials science [M]. The third edition. Shang hai: Shang hai jiao tong university press, 2010: 231-239.
- [19] Henry G, Aleksander G, Philip S. Solubility determination of raw energetic materials in molten 2,4-dinitroanisole [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(4):604-608.

Influence on Mechanical and Micro Solidification of DNAN by Solid Additives and Polymer

ZHANG Meng-meng, LUO Yi-ming^{*}, LI Bing-bo, FANG Xue-qian, YANG Hui

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

Abstract: To research the influence of the additives such as RDX, Al, AP and polymer PBNMO on the moulding and mechanical characteristics of DNAN, the crystallization process of different intermixtures and the initial solidification temperature were observed mainly by photic microscope. The solidification rate was calculated by measuring the solidification time and the distance change. The effects of additives on the molding process were studied by testing the relative density of the $\Phi 20$ mm samples. The effects of additives on the mechanical properties were studied by testing the tensile strength and the compressive strength. Results show that those additives could improve the crystallization process, increase the relative density and decrease the solidification rate of DNAN. The mechanical properties such as the tensile strength, compressive strength and the anisotropy of the DNAN were improved by adding polymer PBNMO. The tensile strength was over 6 MPa. It indicated that, DNAN based explosives with fine crystals, less defects and better mechanical properties could be got by the synergistic effects of RDX, Al, AP and PBNMO.

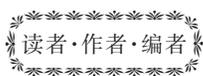
Key words: energetic materials; Melt/Cast explosives; DNAN; crystallization; additives; PBNMO

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020076

(责编:姜梅)



更正

1 《含能材料》2021年29卷第3期论文《含能材料感度评估的空间位阻指数算法和程序设计》(182页)摘要与引言中的奥克托今(RDX)应为黑索今(RDX)。

2 《含能材料》2021年29卷第3期论文《炸药压制工艺参数对空心装药质量影响的仿真研究》(202页)基金项目“国家自然科学基金资助(XJJ201806)”应为“中北大学自然科学基金资助(XJJ201806)”;书眉中的“刘恒”应为“刘恒著”;图6c的图题“relative density change curve at the female mold”中的“mold”应为“mould”。

《含能材料》编辑部