DOI: 10.11883/bzycj-2018-0264

药量和升温速率对 DNAN 基熔铸炸药烤燃特性的影响*

刘子德,智小琦,周 捷,王 帅
(中北大学地下目标毁伤技术国防重点实验室,山西 太原 030051)

摘要: 为了研究不同药量和升温速率条件下 DNAN 基熔铸炸药的慢速烤燃特性,自行设计了烤燃实验装置,采用多点测温烤燃实验方法,分别在 1 和 0.055 ℃/min 两种升温速率下进行了不同状态装药量的烤燃实验,分析了熔铸混合炸药的热反应特征。结果表明,装药量和升温速率共同影响烤燃弹的响应特性。相同烤燃弹在 0.055 ℃/min 升温速率下比在 1 ℃/min 升温速率下加热响应会更剧烈;烤燃弹的放置姿态及端盖厚度会影响烤燃弹的响应剧烈程度。

关键词: 装药量;DNAN 基熔铸混合炸药;烤燃;升温速率
中图分类号: O389;TJ55 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

弹药的烤燃实验是用来检验弹药对意外热刺激的敏感程度和发生反应时剧烈程度的一种重要方法[1]。针对弹药的热易损性能,已有了大量的烤燃实验及数值模拟,并得出了许多有价值的结论。Tringe 等[2]通过烤燃实验,分析比较了以 HMX 为基的 LX-10 和 PBX9501 两种炸药的响应剧烈程度,结果表明,黏结剂差异导致点火位置不同,最终导致响应剧烈程度的差异。McClelland 等[3]对 B 炸药进行烤燃加热,并基于 ALE3D 程序构建了 RDX-TNT 混合悬浮液的热-流耦合可溶性和黏性模型,结果表明,炸药自然对流使得点火位置出现在炸药上方。陈朗等[4]进行了 DNAN 炸药的烤燃实验,分析了炸药熔化和反应情况,并计算了 6 种不同升温速率下的 DNAN 炸药的烤燃特征,研究发现,炸药熔化成液态后,对流作用会使炸药内部温度分布趋于均匀,使炸药点火区域扩大,进而增强炸药点火后的反应激烈程度。此外,还有关于装药密度、约束条件、装药尺寸等因素对烤燃响应特性影响的报道[5-7]。然而,装药量对弹药热安全性及其响应特性的影响研究尚不完善,考虑到全尺寸烤燃实验成本高且对实验场所的要求相对苛刻,很多时候需要对弹药进行缩比,因此研究小尺寸装药量变化对弹药的烤燃响应特性的影响对弹药的热安全性具有重要的实际意义。

2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)具有撞击感度低和摩擦感度低的特点,添加少量高氯酸铵(AP)后,能弥补其能量上的不足,与常规熔铸载体炸药 TNT 相比具有良好的热安定性[8]。在我国,对 DNAN 基熔铸混合炸药的烤燃特征研究较少。为了深入认识 DNAN 基混合炸药中的热反应情况,获得药量和升温速率对热反应规律的影响,本文中以 DNAN 基 RDX 熔铸混合炸药为研究对象,以 1 ℃/min 和 0.055 ℃/min (3.3 ℃/h)升温速率进行不同状态药量下的烤燃实验,观测响应结果,并对烤燃过程及实验结果进行分析。

1 实 验

1.1 装置

烤燃实验装置主要由烤燃炉、计算机、Fluke 温控仪(调节精度 0.1 ℃)、KX 温度补偿线以及 K 型热电偶组成。温控仪通过监测壳体外壁的温度以反馈调节输出电压,控制壳体外壁以一定的升温速率升温。利用自行设计的 SFO 计算机软件实时采集烤燃实验过程中温度曲线。

* **收稿日期**: 2018-07-16; **修回日期**: 2018-08-17
第一作者: 刘子德(1994—),男,硕士研究生; **通信作者**: 智小琦,zxq4060@sina.com。

1.2　试样

烤燃弹由壳体、上下端盖、药柱 3 部分组成，壳体与端盖之间采用螺纹连接，壳体材料为 45 钢，壳体厚度为 3 mm，端盖厚度分别为 1 和 3 mm。炸药配方质量分数为：w(RDX)＝41%，w(DNAN)＝31.6%，w(Al)＝25%，w(添加剂)＝2.4%，药柱装填密度为 1.80 g/cm^3。烤燃弹尺寸规格见表 1。

表 1 不同装药量下的烤燃实验结果

Table 1 Results of roasting experiment with different explosive masses

实验	药柱尺寸		药柱质量	端盖厚度	放置	升温速率/	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃	响应
	d/mm	h/mm	m/g	δ/mm	方式	$\dot{T}$/(℃·min^{-1})				等级
1	19	38	19.0	1	横放	1	200.0	205.0	204.7	燃烧
2	19	38	19.0	1	竖放	1	198.0	203.2	200.0	燃烧
3	19	38	19.1	3	横放	1	201.1	207.2	203.8	燃烧
4	19	38	19.1	3	横放	0.055	194.5	200.0	199.0	燃烧
5	19	76	38.7	1	横放	1	199.5	204.9	201.0	燃烧
6	19	76	38.7	1	横放	0.055	190.0	196.0	195.0	爆炸
7	30	30	38.1	3	横放	0.055	187.5	197.0	194.0	爆轰
8	30	120	150.0	3	横放	0.055	184.2	193.0	191.5	爆轰

1.3　方法

预加热烤燃弹至 30 ℃，保温 1 h 以确保每发烤燃弹的初始状态相同。0.055 ℃/min 升温速率烤燃实验分两个阶段进行，第 1 阶段将烤燃弹以 0.2 ℃/min 升温速率加热至 120 ℃，第 2 阶段从 120 ℃开始以 0.055 ℃/min 升温速率对烤燃弹加热，直至发生响应。

为了解炸药内部温度分布情况，每发烤燃弹使用 3 支 K 装微型热电偶监测温度变化。其中监测点 1 为烤燃弹壳体圆柱部中点(T_1)；监测点 2 为药柱几何中心(T_2)；监测点 3 为与监测点 2 径向距离 6 mm 处(T_3)，烤燃弹放置时均保证 3 个监测点处于同一水平面。当药柱监测点温度骤然上升时，认为药柱发生点火反应。回收破片并通过壳体变形及破碎程度判断响应剧烈程度。烤燃弹示意图如图 1 所示。

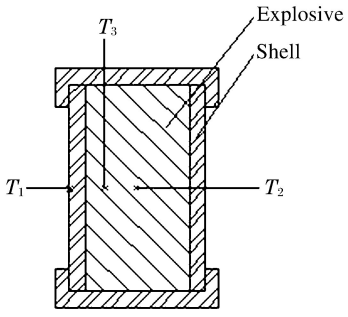


图 1 烤燃弹结构图

Fig. 1 Structure of cook-off bomb

2　结果与讨论

2.1　结果

表 1 为不同状态装药量下的烤燃实验结果。由表 1 可见，实验状态相同的情况下，随着装药量的增加，实验 1 与 5、4 与 8、7 与 8 响应时刻 3 个测点温度均呈下降趋势，且 $T_2>T_3>T_1$，即响应时刻烤燃弹由内到外温度下降，点火发生在药柱中心区域。

图 2 展示了烤燃弹在不同状态下的反应结果。在 1 ℃/min 升温速率下，实验 1 与 2 仅存在放置方式的区别，实验 1 中烤燃弹水平放置，两端 1 mm 端盖均被冲开，实验 2 中烤燃弹竖直放置，一端端盖被冲开，另一端有轻微鼓包。这是由于 DNAN 基 RDX 熔铸混合炸药达到相变温度以后，DNAN 炸药完全融化并且黏度较小，RDX 颗粒度大小对在 DNAN 溶液中的溶解度几乎没有影响且溶解度最大仅为 10.28 g[9]，所以少量 RDX 颗粒会溶解在 DNAN 炸药中，RDX 颗粒密度高于 DNAN 密度，大部分未溶解的 RDX 颗粒会由于重力作用产生下沉。烤燃弹水平横放时，RDX 颗粒会沉积在圆柱部，当炸药产生自热反应以后，两端盖所承受的压力大致相等，端盖厚度仅为 1 mm，所能承受的强度极限较低，当炸药并未反应完全时，两端盖即被剪切；烤燃弹竖直放置时，大量 RDX 颗粒会沉积在底部端盖上，RDX 反应猛度高于 DNAN，所以底部端盖被剪切，顶部端盖轻微鼓包。

由图 2 可知,实验 3 中烤燃弹仅有一端端盖被冲开,实验 4 中烤燃弹两端端盖均被冲开,螺纹连接失效。实验 3 和 4 中烤燃弹装药量相同,实验 4 相较于实验 3 响应剧烈程度有所增加,说明升温速率是影响响应剧烈程度的重要因素。由表 1 可知,响应时刻实验 3 的 3 个监测点的温度均高于实验 4 的 3 个监测点的温度,结合实验 3 和 4 的响应剧烈程度,表明在 0.055 ℃/min 升温速率下检验弹药的热易损性更为有意义。

实验 5 中烤燃弹两端端盖被剪切,为燃烧反应。实验 6 中收集到两个大破片和几个残存小破片,与壳体原有质量相差较多,表明壳体大部分被炸碎,为爆炸反应。由于端盖厚度仅为 1 mm,端盖所能承受的应力较小,两者响应剧烈程度的差异进一步说明了升温速率对响应剧烈程度的影响。由表 1 可知,0.055 ℃/min 升温速率相较于 1 ℃/min 升温速率,相同烤燃弹响应剧烈程度会有所增加,并且响应时刻外壁温度较低,这与实验 3 和 4 所得监测点温度变化趋势相同。

实验 7 中烤燃弹装药质量为 38.1 g(略低于实验 5 和 6 中烤燃弹的质量),烤燃弹两个端盖被剪切,收集到数个小破片,表明烤燃弹发生爆轰反应。实验 6 和 7 中,由于端盖厚度的差异,并不能直接得出装药量一定时,烤燃弹的尺寸设计对响应剧烈程度存在影响。但是与实验 5 相比较,可以反映装药量相同时,升温速率是影响响应剧烈程度的重要因素。

实验 8 中烤燃弹装药质量为 150.0 g,壳体破碎为数个均匀破片,为爆轰反应。实验 4、6、8 和 4、7、8 升温速率均为 0.055 ℃/min,响应结果表明随着装药量的升高,烤燃弹的响应剧烈程度逐渐增加,并且响应时刻外壁温度呈下降趋势,表明装药量对炸药慢速烤燃的响应等级存在重要影响。

实验结果表明,在一定的约束条件下,装药量和升温速率是影响烤燃响应剧烈程度的重要因素。但在本研究条件下,对应两种升温速率发生剧烈反应的临界药量还有待做深入的研究。

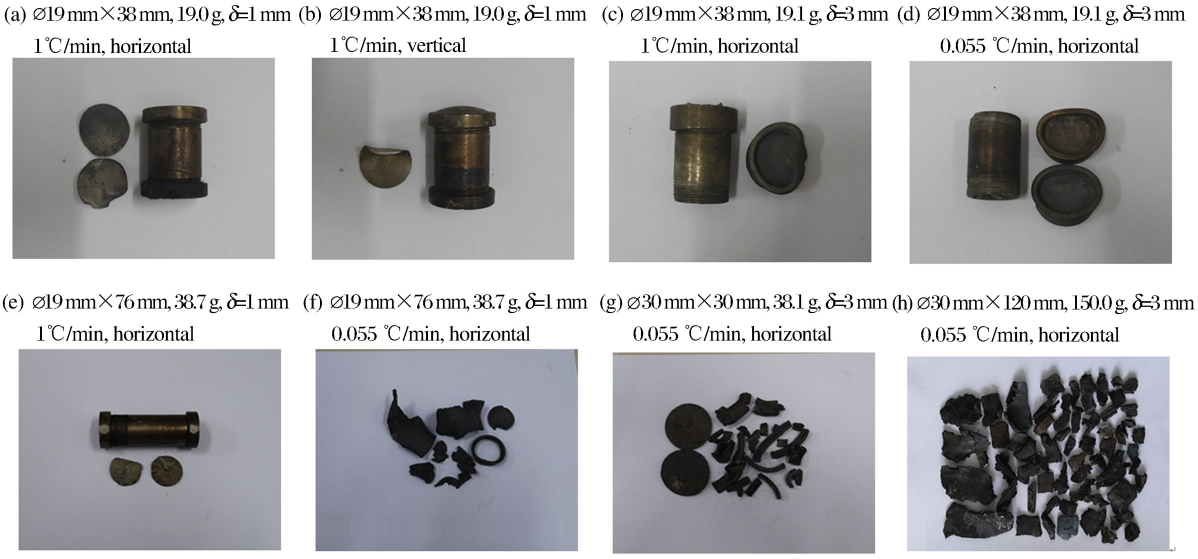


图 2　烤燃弹的反应结果

Fig. 2　Reaction results of roasting bombs

2.2　实验过程热特征

图 3 为实验 3 中烤燃弹相变过程及自热反应过程实验曲线。纯净的 DNAN 在 94 ℃左右达到熔点[10]。

由图 3(a)可知:监测点 T_2 和 T_3 在 77 ℃左右升温速率即变缓慢,这是由于 DNAN 基 RDX 熔铸混合炸药融化吸热引起的;两个监测点温度升高到 80 ℃左右时,升温速率迅速升高,表明药柱中心温度升高到 80 ℃时,炸药内部相变阶段完成,药柱中心最后融化,与周围已经融化的炸药存在较大的温度差,会发生短暂的强制对流换热,直至达到一个由导热系数决定的稳定的温度梯度。

由图 3(b)可知,监测点 T_2 和 T_3 达到 174 ℃时,升温速率会发生明显改变,表明 DNAN 基 RDX 混合炸药在 174 ℃时即发生自热反应,在响应发生前 120 s 内,两个监测点温度变化产生趋势完全相同。在固体炸药温度烤燃实验中,监测点温度会一直保持平滑直至热爆炸,因此推测在热爆炸反应前的最后阶段,炸药分解产生的气体会在液态炸药中产生气泡,此时炸药内部温度分布不均匀,对流传热起主导作用,且 T_2 和 T_3 两个测点相距较近,所以有相同波动的情况。

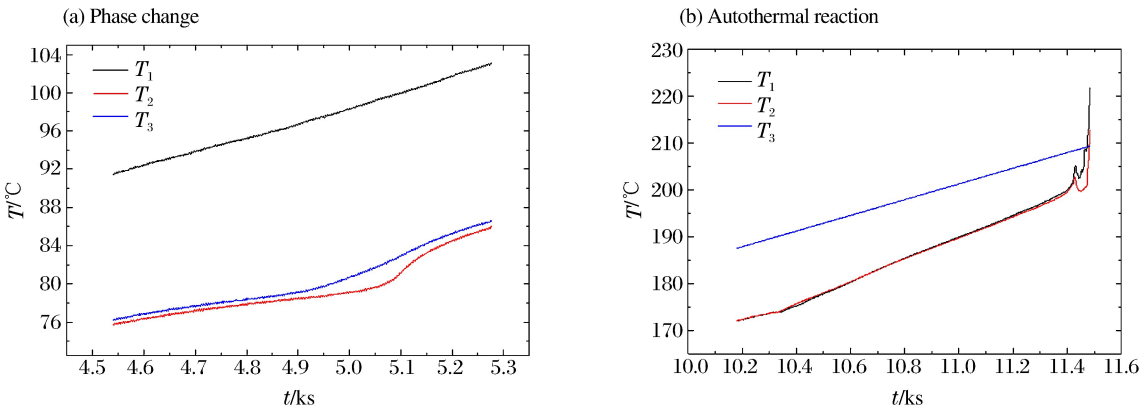


图 3 相变过程和自热反应过程的实验曲线

Fig. 3 Experimental curves of phase transition and aotothermal reaction processes

3 结　论

通过实验研究了不同状态装药量对 DNAN 基 RDX 熔铸炸药的烤燃响应特性,得到如下结论。

(1) 1 ℃/min 升温速率下,3 种药量的烤燃弹均发生燃烧反应,同种药量在烤燃弹升温速率为 0.055 ℃/min(3.3 ℃/h)时,响应剧烈程度更高;同种药量烤燃弹放置姿态不同,响应剧烈程度不同;相同升温速率下烤燃弹药量增加时响应剧烈程度提高;表明装药量、升温速率、烤燃弹放置姿态是影响响应剧烈程度的重要因素,0.055 ℃/min 升温速率下检验弹药的热易损性能通过标准更为苛刻。

(2) DNAN 基 RDX 混合炸药产生自热反应的温度与 RDX 分解的温度很接近,表明此种混合炸药的响应温度主要受配方中的 RDX 影响。在 0.055 ℃/min 升温速率下,当装药量增加到一定值时,炸药达到自热反应温度即有可能发生点火反应。

参考文献:

[1] 向梅,黄毅民,饶国宁,等. 不同升温速率下复合药柱烤燃实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2013,33(4):394-400. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.04.010.
XIANG Mei, HUANG Yimin, RAO Guoning, et al. Cook-off test and numerical simulation for composite charge at different heating rates[J]. Explosives and Shock Waves, 2013,33(4):394-400. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.04.010.

[2] TRINGE J W, GLASCOE E A, MCCLELLAND M A, et al. Pre-ignition confinement and deflagration violence in LX-10 and PBX 9501[J]. Journal of Applied Physics, 2014,116(5):054903. DOI:10.1063/1.4891994.

[3] MCCLELLAND M A, GLASCOE E A. ALE3D simulation of incompressible flow, heat transfer, and chemical decomposition of Comp B in slow cookoff experiments[C]// 15th International Detonation Symposium. San Francisco, CA, 2014.

[4] 陈朗,李贝贝,马欣. DNAN 炸药烤燃特征[J]. 含能材料,2016,24(1):27-32. DOI:10.11943/j.issn.1006-9941.2016.01.004.
CHEN Lang, LI Beibei, MA Xin. Research on the cook-off characteristics of DNAN explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016,24(1):27-32. DOI:10.11943/j.issn.1006-9941.2016.01.004.

[5] 智小琦,胡双启. 炸药装药密度对慢速烤燃响应特性的影响[J]. 爆炸与冲击,2013,33(2):221-224. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.02.018.
ZHI Xiaoqi, HU Shuangqi. Influences of charge densities on responses of explosives to slow cook-off[J]. Explosives and Shock Waves, 2013,33(2):221-224. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.02.018.

[6] 高峰. 物理界面对炸药烤燃特性影响的研究[D]. 太原:中北大学,2015:19-27.

[7] 冯晓军,王晓峰,韩助龙. 炸药装药尺寸对慢速烤燃响应的研究[J]. 爆炸与冲击,2005,25(3):285-288. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2005.03.017.
FENG Xiaojun, WANG Xiaofeng, HAN Zhulong. The study of charging size influence on the response of explosives in slow cook-off test[J]. Explosives and Shock Waves, 2005,25(3):285-288. DOI:10.3321/j.issn:1001-1455.2005.03.017.

[8] 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. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.013.
WANG Hongxing, WANG Xiaofeng, LUO Yiming, et al. Cook-off test of DNAN explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009,17(2):183-186. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.013.

[9] 罗观,黄辉,张帅,等. RDX 在 2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)低共熔体系中的溶解度[J]. 含能材料,2012,20(4):437-440. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.012.
LUO Guan, HUANG Hui, ZHANG Shuai, et al. Solubility of RDX in melting DNAN/MNA[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012,20(4):437-440. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.012.

[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. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.027.
ZHANG Guangquan, DONG Haishan. Review on melt castable explosives based on 2,4-dinitroanisole[J]. ChineseJournal of Energetic Materials, 2010,18(5):604-609. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.027.

Influence of explosive mass and heating rate on cook-off response characteristics of DNAN based casting explosive

LIU Zide, ZHI Xiaoqi, ZHOU Jie, WANG Shuai

(*National Defense Key Subject Laboratory of Underground Target Damage Technology, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*)

Abstract: We studied the effect of the explosive mass and the heating rate on the slow cook-off characteristics of DNAN based casting explosive by designing a new roasting test device, and examined the thermal reaction characteristics of the mixed explosive by performing a multipoint temperature experiment at two heating rates, 1 ℃/min and 0.055 ℃/min, respectively. The results showed that the explosive mass and the heating rate jointly affected the response characteristics of the roasting bombs. The same roasting bombs at the heating rate of 0.055 ℃/min was more intense than that at the heating rate of 1 ℃/min. The placement posture and the thickness of the end cover also affected the intensity of the response of the roasting bombs.

Keywords: explosive mass; DNAN based casting explosive; cook-off ; heating rate

(责任编辑　丁　峰)