

文章编号: 1001-1455(2010)01-0075-05

纳米 TATB 微结构与复合物 冲击起爆阈值间的关系^{*}

譙志强, 聂福德, 杨光成, 张 娟

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用电爆炸箔驱动飞片加载方式, 测试了纳米 TATB 与某敏感炸药复合体系的 50% 冲击起爆电压缩值, 讨论了 TATB 微观结构参数与复合物冲击起爆阈值之间关系的几种观点。采用造型粉数学建模-表面形貌表征-冲击起爆阈值实验验证的方法, 探讨了复合体系的起爆机制。结果表明: 复合体系中各组分的分布方式与纳米网格 TATB 聚集体尺寸大小密切相关, 决定了复合物中敏感炸药所受短脉冲作用的压力大小和时间长短, 这可能是导致 50% 起爆阈值变化的关键因素。

关键词: 爆炸力学; 起爆阈值; 造型粉模型; 纳米 TATB; 微观结构; 短脉冲

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引 言

超细炸药与常规炸药相比, 具有对低压长脉冲刺激更加钝感、而对高压短脉冲刺激更加敏感的特点, 这一特性可在冲击片雷管始发药中得到应用。从 20 世纪 80 年代起, 对超细 HNS、超细 TATB 的研究逐渐深入, 其中 HNS-IV 作为始发药在高性能武器系统中应用范围正在不断扩大, TATB 由于高度的钝感特性, 其超细粉体也有望用于对安全性要求较高的冲击片雷管。R. Lee 等^[1]采用超细单质 TATB 作为始发药, 但压制密度低、输出能量较低、起爆所需能量高。如在 TATB 中添加一定含量的高能敏感炸药组分, 如 HMX、CL20、BTF 等, 则可以在保持配方适当安全性的同时, 进一步降低起爆能、提高输出能量。

对于超细炸药对高压短脉冲刺激更加敏感这一现象, 目前有 2 种观点^[2]: 第 1 种为表面活性中心说, 认为超细炸药与常规炸药相比, 比表面积显著增大, 位于炸药颗粒表面的分子数更多, 粒子表面能更大, 对高压刺激更加敏感, 容易形成活性中心而起爆; 具体实验表现为超细炸药的比表面积越大, 起爆阈值越低。第 2 种为热点说, 认为超细炸药配方中含有更多的孔洞和缺陷, 在遇短脉冲刺激时由于绝热压缩更加容易形成热点而起爆; 具体实验表现为超细炸药的孔径越大, 密度越低, 起爆阈值越低。上述 2 种观点分别在 HNS-IV 单质始发药和超细 TATB 单质始发药的研制过程中都经历了实践的检验。

杨光成等^[3]、曾贵玉等^[4]制备了亚微米 TATB(sub-micron TATB)、纳米网格 TATB(nano-gridding TATB)、高分散性纳米 TATB(nano-dispersive TATB)等超细 TATB, 并将这些超细 TATB 与某种敏感炸药按一定比例进行混合、造粒和压制, 形成复合物药柱后, 采用电爆炸箔驱动飞片加载方式, 研究复合体系的短脉冲冲击起爆阈值, 但发现测试结果与上述 2 种观点几乎完全相反。因此在本文中, 试图从复合含能材料的角度, 通过数值模型模拟与实验验证, 探讨复合体系的冲击起爆机制, 并寻找影响起爆阈值的关键因素。

2 实 验

2.1 样品制备

亚微米 TATB、纳米网格 TATB 自制, 其中纳米网格 TATB 可通过工艺控制实现团聚体尺寸可调, 当团聚体尺寸控制在 $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围时, 所得产品为高分散性纳米 TATB。采用高效液相色谱测量纯度; 采用液氮吸附脱附方法及 BET 理论计算比表面积; 采用扫描电镜观测样品微观形貌, 并结合激光粒度仪测量样品粒径。

将超细 TATB、某敏感炸药、少量粘结剂按一定比例, 采用水悬浮法进行造粒, 然后压制成相同密度的 $\varnothing 10 \text{ mm}$ 药

^{*} 收稿日期: 2008-09-22; 修回日期: 2009-05-17

作者简介: 譙志强(1979—), 男, 硕士。

柱,压制密度误差控制在 $\pm 5\text{ mg/cm}^3$,采用压汞仪方法测量造型粉和药柱的孔径分布。

2.2 冲击起爆阈值测量

药柱起爆采用电爆炸箔驱动飞片方式加载,利用金属箔在电爆炸瞬间形成的高温高压等离子气体膨胀,推动置于金属箔上的聚酯薄膜经过加速腔剪切形成飞片,加速飞行一定距离后,以一定的速度冲击上述复合物药柱。通过 DRM 实验程序^[5]或升降法实验程序,采用起爆电压值表征材料的 50% 冲击起爆阈值,起爆组件参数除充电电容前后有变化外,其余均保持一致。

3 结果与讨论

3.1 TATB 比表面积与起爆阈值的关系

不同种类超细 TATB 具有不同的比表面积 s 和纯度 w ,与某敏感炸药复合物的冲击起爆试验结果,如表 1 所示。表中, U_i 为 50% 冲击起爆电压阈值。

表 1 显示,对于复合体系,并不是 TATB 纯度越高比表面积越高,起爆阈值越低。比表面积和纯度更高的高分散性纳米 TATB 反而比亚微米 TATB 的复合物更加不易起爆,同时纳米网格 TATB 复合物的起爆阈值比亚微米 TATB 复合物更低。

表 1 不同种类超细 TATB 基复合物的冲击起爆实验结果

Table 1 Shock initiation threshold data of ultrafine TATB based compsites

类别	编号	$s/(\text{m}^2/\text{g})$	$w/\%$	U_i/kV
高分散性纳米 TATB	05018-1	26.28	97.0	3.8~3.9
纳米网格 TATB	05013	22.05	95.1	3.3~3.4
高分散性纳米 TATB	05026	34.00	99.0	>4.5
亚微米 TATB		10.00~12.00	87.0~92.0	3.6~3.8

注:采用 DRM 实验程序测试,起爆组件中充电电容为 $0.33\text{ }\mu\text{F}$ 。

3.2 纳米 TATB 网孔直径与起爆阈值的关系

通过工艺控制得到几种不同聚集体尺寸和平均孔径的纳米网格 TATB,测定纳米网格 TATB 样品的 50% 起爆阈值,对其中 50% 起爆阈值差值较大的配方样品,采用压汞仪测定其造型粉和药柱的平均孔径及孔径分布,结果如表 2 和图 1 所示。表中, D_{50} 为聚集体尺寸, d_m 为造型粉平均孔径, d_c 为药柱平均孔径, I_i 为 50% 冲击起爆电流阈值。

可以看出,表 2 中几种比表面积和纯度非常接近但聚集体尺寸不同的纳米网格 TATB,50% 起爆阈值相差可达近 8%。压药过程将 0606-H 的平均孔径从 236.7 nm 压缩为 14.6 nm,0608-2 的平均孔径从 156.6 nm 压缩为 13.8 nm。0608-2 药柱孔径比 0606-H 小,但 50% 起爆电压阈值低约 8%。可见,复合物药柱的起爆特性与文献[1]对单质炸药的描述相反,呈现了药柱的孔径越小、起爆阈值越低的现象。

表 2 纳米网格 TATB 基复合物的冲击起爆实验结果

Table 2 Shock initiation threshold data of nano-gridding TATB based compsites

类别	编号	$D_{50}/\mu\text{m}$	$s/(\text{m}^2/\text{g})$	$w/\%$	d_m/nm	d_c/nm	U_i/kV	I_i/kA
纳米网格 TATB	0606-H	200~300	17.82	95.42	236.7	14.6	4.73	3.32
纳米网格 TATB	0608-2	400~500	17.45	96.32	156.6	13.8	4.33	3.00
纳米网格 TATB	0607-2	350~400	17.02	96.19			4.35	3.08

注:采用升降法实验程序测试,起爆组件中充电电容为 $0.22\text{ }\mu\text{F}$ 。

3.3 从复合含能材料的角度分析 TATB 与敏感组分的复合体系

上述 2 种观点分别在 HNS-IV 和 LLNL 单质 TATB 始发药的研制过程中经历了实践的检验的观点,为何在本文复合体系中,却得到了截然相反的结果? 对于这个由某敏感炸药组分和超细 TATB 等 2 种炸药构成的体系而言,本身是

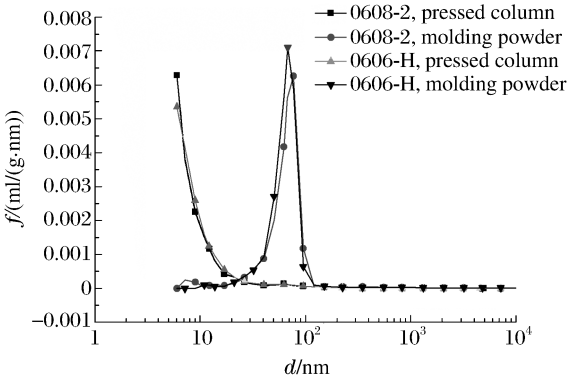


图 1 纳米网格 TATB 复合物造型粉与药柱的孔径分布
Fig. 1 Pore diameter distribution of nano-gridding TATB based compsites

1 个复合含能材料,因此必须从复合含能材料的角度来分析它。

TATB 是对冲击波非常钝感的炸药,根据文献[1],当纯 TATB 药柱压制密度增加、药柱平均孔径接近于 10 nm 时,即使直径 3.18 mm、厚度 250 μm 的飞片速度达到 3.6 km/s,也无法起爆超细 TATB。而本文中飞片直径、厚度更小,速度更低,且药柱压制密度更高,显然这种条件下飞片不足以直接起爆 TATB。在实验中也多次发现,相同压制密度条件下,采用相同起爆组件无法成功起爆不含敏感组分的单质纳米 TATB 炸药。而另 1 种炸药组分对冲击波非常敏感,因此,该体系起爆的机制应该是敏感组分作为起爆热点的源头,在敏感组分起爆后,引发超细 TATB 爆轰,从而形成药柱整体爆轰。

在这种起爆机制下,仅考虑该体系中 TATB 的状态是不够的。敏感炸药组分作为起爆热点的源头,它与 TATB 的复合情况,在造型粉和药柱中的分布方式,直接决定了飞片冲击过程中敏感组分所受到的刺激程度,即短脉冲压力的大小和作用时间的长短。

3.4 超细 TATB-敏感炸药复合体系起爆机制探讨

针对聚集体尺寸不同的纳米网格 TATB 基复合物的起爆阈值出现规律性差别这一现象,根据造型粉团聚生长机理,建立不同尺寸聚集体的纳米网格 TATB 与该敏感炸药所形成造型粉的数学模型,并进行相应的估算。

为了验证模型是否符合实际情况,采用低倍率扫描电镜观察相应造型粉表面敏感组分的分布情况。由于压制过程对造型粉中 TATB 与敏感组分间的相对位置破坏较小,故造型粉表面敏感组分的分布情况可以同起爆过程中药柱内敏感组分被飞片刺激的难易程度进行关联,从而对应到起爆阈值测量结果。反过来还可以通过 TATB 制备工艺控制得到模型假设类型的产品,测定 50%起爆阈值,验证该模型的正确性。

3.4.1 造粒模型分析

不同尺寸的纳米网格 TATB 聚集体与平均粒径 20 μm 的敏感组分造粒形成的造型粉数学模型如图 2 所示。图 2(a)~(b)分别为直径 500 μm 和 300 μm 纳米网格 TATB 聚集体造粒数学模型。假定敏感组分分布均匀,可以看出,大聚集体造型粉表面的敏感组分分布更均匀,造型粉表面单位面积内分布的敏感组分数量更多。因此,由大聚集体形成的造型粉压制后表面有更多的敏感炸药组分分布,起爆过程中敏感组分直接接触飞片的几率更大,所受的脉冲压力可能更大,脉冲作用时间可能更长,形成起爆源的几率也更大,从而表现出 50%起爆阈值更低。图 2(c)是团聚体尺寸为 1 μm 的高分散性纳米 TATB 的造粒数学模型。可以看出,对于高分散性纳米 TATB 造型粉,敏感组分周围被大量细小的 TATB 包裹,几乎不可能处于造型粉表面。因此这种造型粉压制后,其中的敏感组分几乎不可能直接接受飞片冲击。冲击片在击穿 TATB 后能量必然出现损失,然后再冲击敏感组分时,敏感组分所受的脉冲压力降低、脉冲宽度减小,因此形成起爆源的可能性很低,从而表现出 50%起爆阈值很高或者不起爆。对于亚微米 TATB,由于分散性类似于高分散性高比表面积的纳米 TATB,因此造粒模型类似,50%起爆阈值较高。

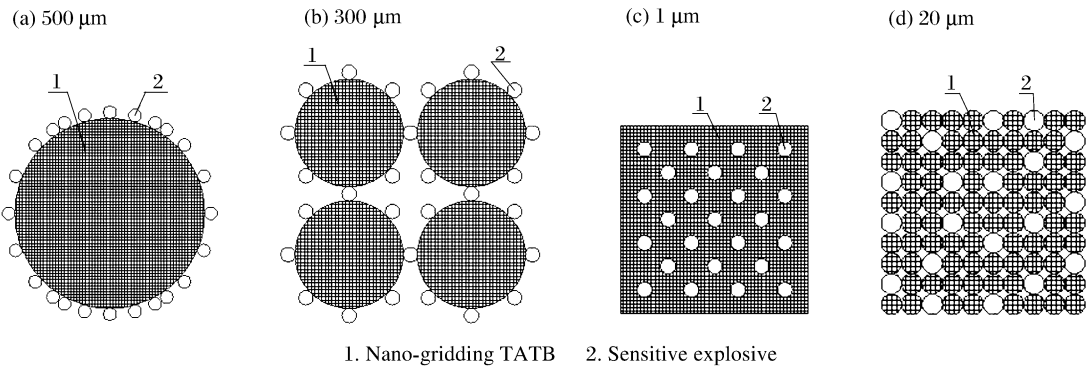


图 2 不同尺寸纳米网格 TATB 聚集体造粒模型示意图

Fig. 2 Molding powder modeling of different size nano-gridding TATB based compsites

3.4.2 造型粉微观形貌分析

为了评估造粒模型与实际情况的相符程度,采取低倍率扫描电镜对各种状态的造型粉进行表面形貌分析,结果如图 3 所示。

对于大聚集体造型粉 0608-2(见图 3(a)),大团聚体在粘结剂作用下与敏感组分形成共混物,造型粉表面敏感组分的分布比图 3(b)~(c)更均匀,单位面积内敏感组分分布的数量更多;对于亚微米 TATB 造型粉(见图 3(c)),表面绝大部分是亚微米 TATB;对于中等聚集体造型粉 0606-H(见图 3(b)),表面敏感组分分布很不均匀,表面单位面积内敏感组分数量较少。

因此,上述 3 种造型粉表面的敏感组分分布情况基本上与对应的造型粉模型一致,50%起爆阈值的测试结果与模型假设也相同。

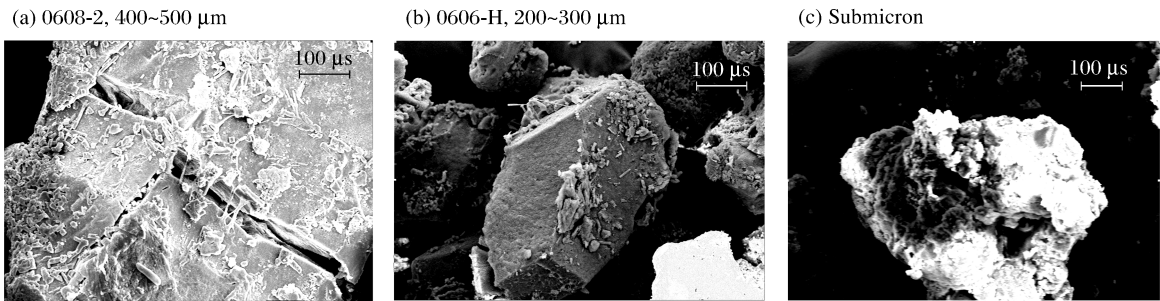


图 3 TATB/敏感炸药组分复合造型粉 SEM 图像
Fig. 3 Molding powder SEM images of TATB/sensitive explosive compsites

3.4.3 起爆机制猜想和模型假设的进一步验证

虽然上述 3 种模型中,造型粉表面的敏感组分分布假设、冲击起爆阈值预测与实际实验结果具有一致性。但由于试验次数较少,而且仅有 3 种状态,难以排除偶然符合的可能性,因此需更多的实验验证。

另外,对于图 2(d)中的纳米网格 TATB 小聚集体的造型粉模型,表面敏感组分分布密度很低,按照本文中起爆机制假设,它的其复合物 50%起爆阈值也应该高于纳米网格 TATB 大聚集体复合物。

通过工艺控制进一步实现了纳米 TATB 聚集体尺寸可调,并平行测试了同批纳米网格 TATB 大聚集体和小聚集体复合物的 50%起爆阈值,如表 3 所示。

结果显示,纳米网格 TATB 大聚集体分散成小聚集体后,所得复合物的 50%起爆电压阈值升高近 30%。实验结果体现了聚集体尺寸对于纳米网格 TATB 复合物 50%起爆阈值的决定性影响,这也是本文中提出的起爆机制猜想和模型假设的佐证。

表 3 不同尺寸纳米网格 TATB 聚集体复合物的冲击起爆实验结果

Table 3 Shock initiation threshold data of different size nano-gridding TATB conglomeration compsites					
类别	编号	$D_{50}/\mu\text{m}$	$s/(\text{m}^2/\text{g})$	$w/\%$	U_i/kV
纳米网格 TATB 大聚集体	0701	~450.00	26.61	99.3	~3.30
纳米网格 TATB 分散体	0701-D	31.07	26.60	99.3	4.12

注:采用升降法实验程序测试,起爆组件的充电电容为 0.22 μF 。

4 结 论

通过电爆炸箔驱动飞片加载方式,对超细 TATB 与某敏感炸药复合体系的冲击起爆阈值进行测试,结果表明:超细 TATB 比表面积、孔径值与 50%起爆阈值之间的关系同过去单质炸药相关研究报道存在较大差异。

根据该复合体系组成特点,提出了该体系短脉冲冲击起爆机制的假设,即该复合体系中只有对敏感组分的冲击才能作为起爆热点产生的源头。

对上述假设,采用造型粉数学建模-表面形貌表征-冲击起爆阈值测量的方法进行进一步验证。初步结果表明:造型粉表面敏感组分的分布方式与纳米网格 TATB 团聚体尺寸密切相关,并可能最终决定了在飞片冲击起爆过程中敏感组分所受的短脉冲压力大小和作用时间长短,从而导致该复合体系的 50%起爆阈值测量结果表现出与单质炸药完全不同的特征。

工作中得到了黄辉、汤业朋、李金山、曾贵玉、王平、王桂吉、李艺、只永发等的指导和帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] Lee R, Bloom G, Holle W V, et al. The relationship between the shock sensitivity and the solid pore sizes of TATB powders pressed to various densities[C]//Eighth Symposium (International) on Detonation. Naval Weapons Surface Center, 1985:3-14.

[2] Khasainov B A, Ermolaev B S, Presles H N, et al. On the effect of grain size on shock sensitivity of heterogeneous

- high explosives[J]. *Shock Waves*, 1997,7(2):89-105.
- [3] YANG Guang-cheng, NIE Fu-de, HUANG Hui, et al. Preparation and characterization of nano-TATB explosive [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006,31(5):390-394.
- [4] 曾贵玉, 聂福德, 伊丽莎, 等. 冲击结晶技术制备亚微米 TATB 粒子的研究[J]. *火炸药学报*, 2001,24(4):12-14. ZENG Gui-yu, NIE Fu-de, YIN Li-sha, et al. Study on the preparation of sub-micron TATB particles using the crystal technology[J]. *Chinese Journal of Explosive and Propellant*, 2001,24(4):12-14.
- [5] Bloom G, Chau H, Glaser R, et al. Improvements in thin pulse shock initiation threshold measurements[C]// Asary J R, Graham R A, Straub G K. *Shock Waves in Condensed Matter*. Elsevier Science, 1984:535-538.

Relationship between microstructures of nano-TATB and shock initiation thresholds of its composites^{*}

QIAO Zhi-qiang, NIE Fu-de, YANG Guang-cheng, ZHANG Juan
(*Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The shock initiation threshold under the condition of 50% initiation probability was measured for the composites, which were composed of nano-TATB and one sensitive explosive, under the impact of a thin plastic flayer plate accelerated by electrically exploding foils. Several viewpoints were discussed on the relationship between the microstructural parameters of nano-TATB and the shock initiation threshold of its composites. Numerical modeling of granulating processes, topography characterization of molding powder surfaces and shock initiation threshold tests were carried out to explore the detonation process of the composite explosive. Researched results indicate that the distribution of sensitive explosive particles on the surface of composites molding powder and the size of nano-grid-ding-TATB conglomeration may be the most important factor of determining the short-pulse press and time acting on the sensitive explosive particles.

Key words: mechanics of explosion; shock threshold; numerical modeling of graulating process; nano-TATB; microstructure; short-pulse shock

^{*} Received 22 September 2008; Revised 17 May 2009

Corresponding author: QIAO Zhi-qiang, qzq_zju@163.com