

文章编号: 1006-9941(2017)11-0913-07

微/纳米 HMX 颗粒级配 PBX 性能的影响

靳承苏¹, 肖磊¹, 王庆华², 刘杰¹, 郝嘎子¹, 戎园波¹, 姜炜¹, 刘巧娥³, 徐子帅³

(1. 南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心, 江苏 南京 210094; 2. 中国人民解放军驻七六三厂军事代表室, 山西太原 030000; 3. 甘肃银光化学工业集团有限公司科研所, 甘肃 白银 730900)

摘要: 为了提升高聚物粘结炸药(PBX)的综合性能,通过颗粒级配的方式,将低感度的微米和纳米奥克托今(HMX)应用到压装型PBX中,采用溶液-水悬浮法制备了4种HMX基PBX造型粉,并压成药柱。对不同微纳米颗粒级配的JO-1、JO-2、JO-3和JO-4样品(粗颗粒/微米/纳米HMX的质量比分别为100/0/0、60/35/5、60/30/10、60/25/15),观测其表面微观结构,测量组分含量、撞击感度、摩擦感度、热分解特性、抗压性能和爆速等参数,并进行对比分析和讨论。结果表明,当粗颗粒($d_{50}=100\ \mu\text{m}$)/微米($d_{50}=1\ \mu\text{m}$)/纳米($d_{50}=100\ \text{nm}$)HMX的质量比为60/30/10时,所制备的JO-3样品有最好的性能。与单一粗颗粒HMX基PBX的JO-1样品相比,JO-3样品表面更光滑,撞击感度降低了38.3%,摩擦感度降低了22.7%,自发火温度提高了5.17℃,抗压强度提高了46%,爆速提高了 $55\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,HMX基PBX的综合性能显著提升。

关键词: 高聚物粘结炸药(PBX); 微/纳米奥克托今(HMX); 颗粒级配; 感度; 抗压强度; 爆速

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.005

1 引言

奥克托今(HMX)能量大,爆速高,在军事上应用广泛^[1]。在HMX中加入粘结剂和钝感剂,制成可压装的高聚物粘结炸药(PBX),在反坦克导弹、地对空导弹等常规和尖端武器中有广泛应用^[2-4]。然而,普通粗颗粒HMX晶体缺陷多,感度较高,使用安全性差,在研制、生产、使用等过程中易引发意外燃爆事故^[5],且以这类粗颗粒HMX为基的PBX往往力学性能、安全性能较差,不能满足实际使用要求,故使用中需要对PBX性能进行改善。

目前关于PBX性能改善的研究主要集中在提高力学性能和降低机械感度上。林聪妹^[6]探讨了粘结剂增强对TATB基PBX力学性能的影响,发现随着增强剂含量增加,PBX力学性能显著提高;李文祥^[7]将碳纤维加入高聚物粘结炸药中,增强了药柱的抗压和抗拉强度;肖磊^[8]制备出含纳米RDX的PBX,撞击感

度、摩擦感度降低明显,爆炸性能和力学性能也得到了提高。

改善PBX性能的常用方法是提高粘结剂含量或者加入增强剂,这样虽然可以降低PBX的感度、提高PBX的力学性能,但是会导致PBX爆炸性能的降低,而通过颗粒级配来改善PBX性能则不会降低炸药的能量。本研究利用了HMX细化后的降感特性^[9-10]和纳米化之后良好的爆轰特性^[11-15],使用南京理工大学国家特种超细粉体中心制备的微米HMX($d_{50}=1\ \mu\text{m}$)^[16]和纳米HMX($d_{50}=100\ \text{nm}$)^[17]结合粗颗粒HMX($d_{50}=100\ \mu\text{m}$)进行颗粒级配,采用溶液-水悬浮法,制备得到不同微纳米颗粒级配的HMX基PBX造型粉样品,并通过压装得到PBX药柱。研究了不同颗粒级配对PBX热分解特性、撞击感度、摩擦感度、抗压强度、爆速等性能的影响,为纳米HMX在PBX中的应用和PBX性能的提升提供技术支持。

2 实验部分

2.1 实验材料

粗颗粒HMX($d_{50}=100\ \mu\text{m}$),甘肃银光化学工业集团有限公司;微米HMX($d_{50}=1\ \mu\text{m}$)^[16],南京理工大学国家特种超细粉体中心制备;纳米HMX($d_{50}=100\ \text{nm}$)^[17],南京理工大学国家特种超细粉体中心制

收稿日期: 2017-06-22; 修回日期: 2017-08-23

基金项目: 基础产品创新科研项目资助,“十三五”086专项资助,国家自然科学基金资助(51606102)

作者简介: 靳承苏(1993-),男,硕士研究生,主要从事纳米含能材料应用基础研究。e-mail: njust-jcs@foxmail.com

通信联系人: 姜炜(1974-),男,教授,主要从事微纳米含能材料的制备及其应用研究。e-mail: superfine_jw@126.com

备; 氟橡胶(F₂₆), 东莞市聚氟新材料有限公司; 乙酸乙酯, 分析纯, 上海凌风化学试剂有限公司; 石墨, 分析纯, 西陇化工股份有限公司。

2.2 样品制备

本研究采用溶液-水悬浮法制备 HMX 基 PBX, PBX 各组分质量比为 HMX : 氟橡胶 : 石墨 = 94 : 5 : 1, HMX 级配比例见表 1。首先按照表 1 中所示配比称取不同粒度级别的 HMX, 总量为 94 g, 加入反应釜, 再加入 300 mL 的去离子水, 采用恒温水浴加热, 温度为 60 °C, 并启动搅拌装置, 转速为 400 ~ 500 r · min⁻¹, 搅拌 10 ~ 15 min 使 HMX 分散均匀。然后向反应釜中滴加已配制好的氟橡胶浓度为 5% 的乙酸乙酯溶液 100 mL, 滴加速度约 5 mL · min⁻¹, 滴加完毕后加入 1 g 的石墨, 继续恒温搅拌, 待观察到颗粒逐渐成型后, 升温至 80 °C 驱除乙酸乙酯, 乙酸乙酯挥发干净之后, 关闭水浴, 取出造型粉颗粒进行抽滤, 再放入 55 ~ 60 °C 的水浴烘箱干燥 5 h, 对干燥后的造型粉进行筛分, 选取 10 ~ 60 目的颗粒为合格产品。将制备的造型粉压制尺寸为 $\Phi 20$ mm × 20 mm 的药柱, 密度为 1.801 ~ 1.802 g · cm⁻³, 用于抗压性能和爆速的测试。

表 1 含不同微纳米 HMX 颗粒级配的 PBX 配方

sample	coarse HMX	micrometer HMX	nanometer HMX
JO-1	100	0	0
JO-2	60	35	5
JO-3	60	30	10
JO-4	60	25	15

2.3 性能测试

造型粉组分含量测试根据 GJB 772A-1997 方法 107.1 “溶剂萃取法”, 先使用乙酸乙酯溶解分离氟橡胶, 再使用丙酮溶解 HMX, 余下的组分即为石墨。

撞击感度测试根据 GJB 772A-1997 方法 601.2 “特性落高法”, 落锤质量 5 kg, 药量(50±1) mg, 测试温度(20±2) °C, 相对湿度(60±5)%; 摩擦感度测试根据 GJB 772A-1997 方法 602.1 “爆炸概率法”, 摆角 90°, 表压为 3.92 MPa, 药量(30±1) mg, 测试温度(20±2) °C, 相对湿度(60±5)%。

自发火温度测试根据 GJB 772A-1997 方法 505.1 “差示扫描量热法”, 采用 TG/DSC 同步热分析仪测试样品的 TG 曲线和不同升温速率的 DSC 曲线,

氮气氛围, 流速 30 mL · min⁻¹, Al₂O₃ 坩埚, 取样品 1~1.5 mg, 升温速率 5, 10, 15, 20 °C · min⁻¹。

根据 GJB 772A-1997 方法 416.1 “压缩法”对药柱的抗压性能进行测试, 采用的是 CTM8050 型微机控制电子万能材料试验机, 药柱尺寸为 $\Phi 20$ mm × 20 mm, 密度为 1.801 ~ 1.802 g · cm⁻³。

药柱的爆速测试根据 GJB 772A-1997 方法 702.1 “电测法”, 传爆药柱为 90% TMD 聚黑-14 药柱, 探针为铜箔电探针, 药柱尺寸为 $\Phi 20$ mm × 20 mm, 密度为 1.801 ~ 1.802 g · cm⁻³。

3 结果与讨论

3.1 造型粉的组分含量

造型粉的组分含量测定结果见表 2。本研究选取的 PBX 配方为 HMX : 氟橡胶 : 石墨 = 94 : 5 : 1, 由表 2 可知, 4 种造型粉样品的组分含量与配方组分含量基本是一致的, 说明制备造型粉的工艺条件选择合适, 各组分不存在流失的情况。

表 2 造型粉组分含量

sample	HMX	F ₂₆	graphite
JO-1	94.02	4.99	0.99
JO-2	93.98	5.01	1.01
JO-3	93.99	5.01	1.00
JO-4	94.01	4.97	1.02

3.2 造型粉的形貌

图 1 为不同造型粉样品光学显微镜照片。由图 1 可以看出, JO-1 样品形状不规则, 而微纳米级配后的样品(JO-2, JO-3, JO-4)表面更光滑, 颗粒为类球形, 但是 JO-4 样品均匀性比较差, 存在细小颗粒, 这是因为纳米材料的比表面积大, 极易团聚, 当纳米 HMX 含量过高时, 发生较严重的团聚, 使粘结剂不能均匀包覆在纳米 HMX 表面, 导致所制备的造型粉均匀性变差。

图 2 为不同造型粉样品的 SEM 照片。由图 2 可知, 不含微米 HMX 和纳米 HMX 的造型粉(JO-1), 颗粒感明显, 不够光滑, 可以明显看出不同大小的粗颗粒 HMX 在粘结剂作用下聚集在一起形成了大颗粒造型粉。而进行颗粒级配后的造型粉(JO-2, JO-3, JO-4), 表面光滑, 基本看不出晶粒的聚集, 这是因为所含的较细的 HMX 填补到了粗糙的大颗粒之间, 所以看起来更光滑。

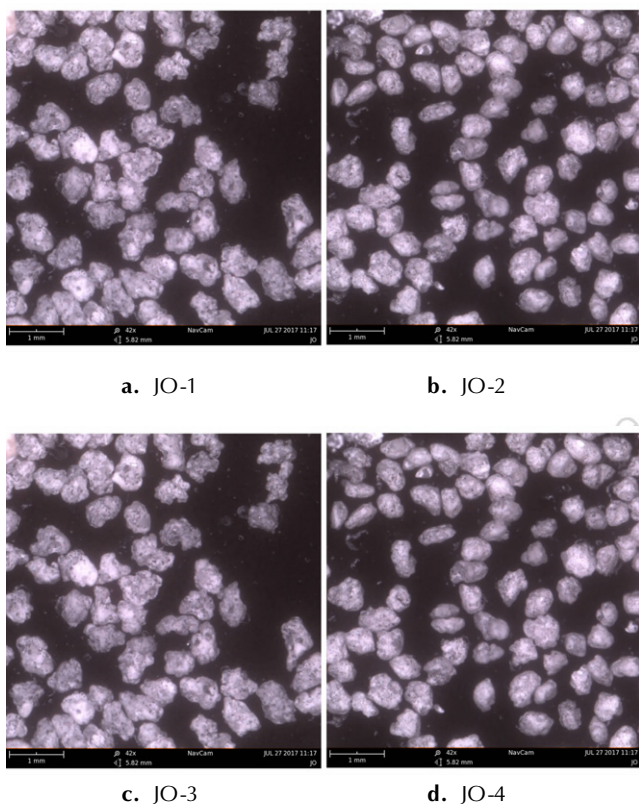


图 1 4 种造型粉的光学显微镜图像

Fig. 1 Optical microscope images of four molding powders

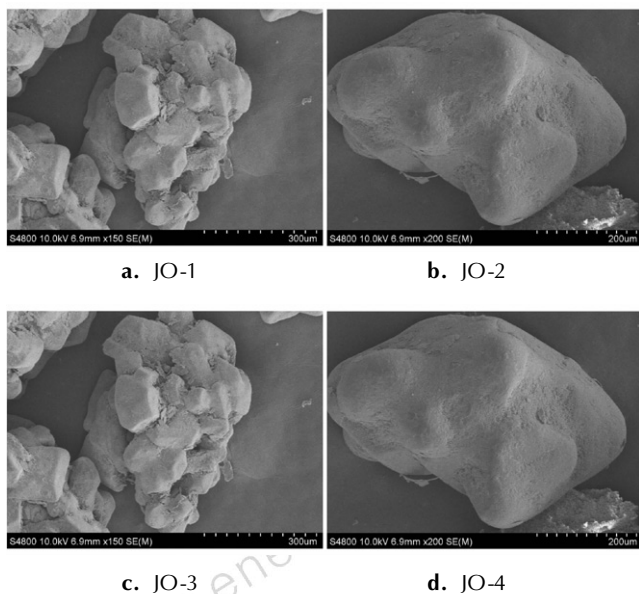


图 2 造型粉的扫描电镜图像

Fig. 2 SEM images of four molding powders

3.3 造型粉的感觉度

造型粉样品的撞击感度和摩擦感度测试结果见表 3。

由表 3 可知,加入纳米和微米的 HMX 之后,相比于粗颗粒 HMX 制备的造型粉,不论是撞击感度还是

摩擦感度均有明显的下降。这是因为当引入纳米和微米的 HMX 后,由于细颗粒 HMX 粒度小,形状规则,内部缺陷少,且细颗粒能有效填充在粗颗粒 HMX 之间的空隙中,使制备的造型粉更加密实,在遇到外力作用时不容易形成热点,所以比用单一粗颗粒 HMX 所制备的造型粉感度低。随着配方中纳米 HMX 含量升高,造型粉的撞击感度和摩擦感度逐渐降低,如 JO-3 样品(纳米 HMX 含量为 10%)比 JO-1 的撞击感度降低 38.3%,摩擦感度降低 22.7%。当纳米 HMX 含量增加到 15% 时,所制备的造型粉的撞击感度和摩擦感度相比 JO-3 样品有所升高。这是因为纳米材料的比表面积大,极易团聚,当纳米含量过高时,所制备的造型粉均匀性变差,且包覆完整性变差,引起感度升高。

表 3 样品的撞击感度和摩擦感度

Table 3 Impact sensitivities and friction sensitivities of four samples

sample	H_{50} /cm	P /%
JO-1	18.0	88
JO-2	23.2	76
JO-3	24.9	68
JO-4	22.8	72

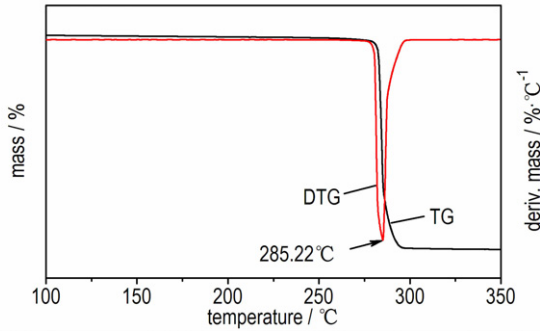
Note: H_{50} is characteristic drop height. P is percentage of explosion probability.

3.4 造型粉的热分解特性

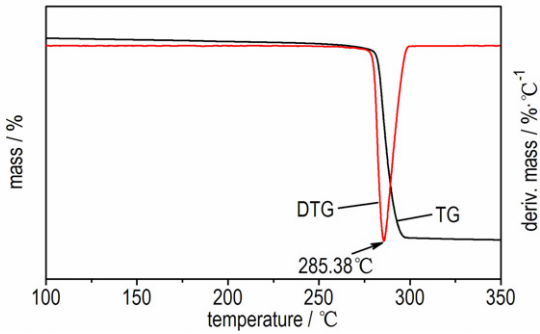
根据 TG/DSC 同步热分析仪测试结果,升温速率 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 TG 曲线如图 3 所示,不同升温速率的 DSC 曲线如图 4 所示。

由图 3 可知,升温速率 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,各样品的 TG 曲线相似,HMX 的熔点为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,是一个熔化分解过程,造型粉样品中 HMX 含量很高,在热分解过程中起主要作用,所以样品的 TG 曲线与 HMX 的 TG 曲线相似。四种样品 DTG 曲线的最大热失重温度均在 $285\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,最大热失重温度相似是因为 HMX 细化后,DTG 峰温变化并不大,纳米 HMX 的 DTG 峰温相比粗颗粒 HMX 的 DTG 峰温只降低了 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[11],所以成分相同的四种造型粉样品 DTG 峰温差别不大。由图 4 各样品不同升温速率的 DSC 曲线得出的样品起始融化温度 (T_m) 和热分解峰温 (T_p) 见表 4 和表 5。

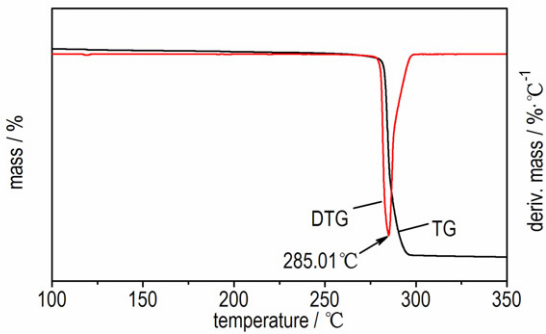
由表 4 可知,同一升温速率下,不同样品的起始融化温度差别不大;同一样品,升温速率越快起始融化温度越高。不同样品的成分基本是一致的,熔点大致相同,所以起始融化温度差别不大。



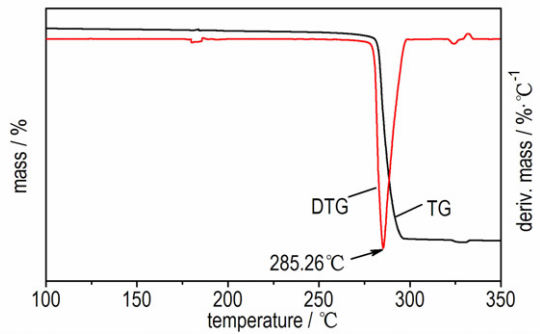
a. JO-1



b. JO-2



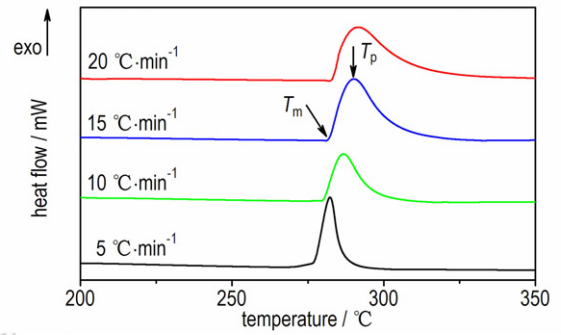
c. JO-3



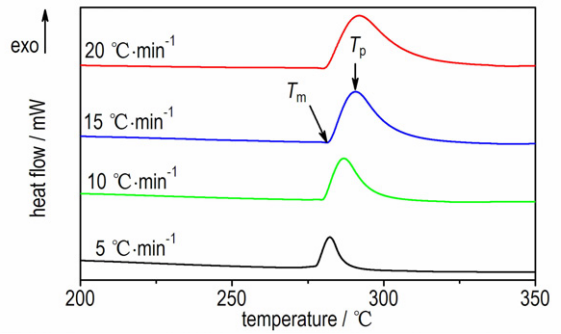
d. JO-4

图3 升温速率 20 °C·min⁻¹时样品的 TG 曲线

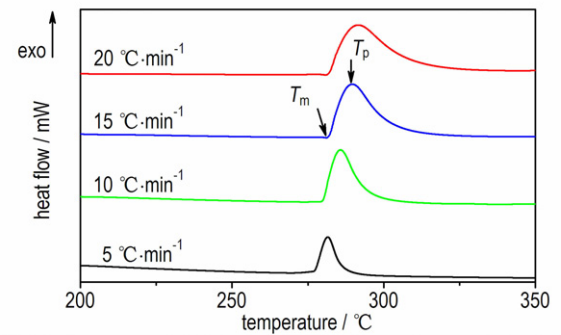
Fig.3 TG curves of four samples at heating rate of 20 °C·min⁻¹



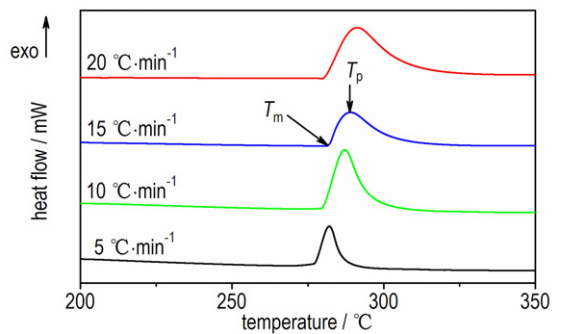
a. JO-1



b. JO-2



c. JO-3



d. JO-4

图4 样品不同升温速率的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of four samples at different heating rates

利用表 5 各样品不同升温速率的热分解峰温,采用 Kissinger 公式(1)计算各样品的表观活化能和指前因子^[12],结果见表 6。

$$\ln\left(\frac{\beta}{(T_p + 273.15)^2}\right) = \ln \frac{AR}{E_a} - \frac{E_a}{R(T_p + 273.15)} \quad (1)$$

式中, E_a 为表观活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; A 为指前因子; T_p 为热分解峰温, $^{\circ}\text{C}$; β 为升温速率, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$; R 为气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

利用公式(2)求解升温速率趋于零时试样的峰温,炸药样品的 T_0 越大,表明其安定性越高。

$$T_i = T_0 + b\beta_i + c\beta_i^2 + d\beta_i^3 \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中, T_i 为升温速率 β_i 时试样的峰温, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为升温速率趋于零时试样的峰温, $^{\circ}\text{C}$; β_i 为试样升温速率, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$; b, c, d 为常数。求得的 T_0 见表 6。

根据 GJB 772A-1997 方法 505.1, 利用公式(3)计算炸药的自发火温度(自加热着火的最低温度)。

$$T_b = \frac{E_a - \sqrt{E_a^2 - 4E_a R(T_0 + 273.15)}}{2R} - 273.15 \quad (3)$$

式中, T_b 为自发火温度, $^{\circ}\text{C}$ 。求得的自发火温度见表 6。

表 4 样品在不同升温速率下的起始融化温度

Table 4 Initial melting temperatures of four samples at different heating rates

sample	$T_m / ^{\circ}\text{C}$			
	$5 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$10 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$15 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$20 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$
JO-1	277.88	280.06	281.37	282.11
JO-2	277.71	279.89	281.23	282.41
JO-3	276.24	279.21	281.22	283.05
JO-4	276.34	279.05	280.97	282.34

表 5 样品在不同升温速率下的热分解峰温

Table 5 Thermal decomposition peak temperatures of four samples at different heating rates

sample	$T_p / ^{\circ}\text{C}$			
	$5 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$10 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$15 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$	$20 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$
JO-1	282.37	286.91	290.01	291.79
JO-2	282.32	286.75	290.65	291.96
JO-3	281.67	285.52	289.66	291.33
JO-4	281.28	285.32	289.05	291.09

由表 6 可知,与 JO-1 样品相比,加入纳米和微米 HMX 进行级配之后的 JO-2、JO-3、JO-4 样品,表观活化能和指前因子均有所降低,自发火温度有所提高,安定性得到提高。自发火温度最高的是 JO-3,比 JO-1 高 $5.17 ^{\circ}\text{C}$ 。这是因为纳米和微米 HMX 晶体缺陷少,稳定性比大颗粒 HMX 好,所以加入纳米和微米 HMX

之后,造型粉样品的自发火温度有所提高。

表 6 样品的动力学和热力学参数

Table 6 Kinetic and thermodynamic parameters of four samples

sample	$E_a / \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	A	$T_0 / ^{\circ}\text{C}$	$T_b / ^{\circ}\text{C}$
JO-1	370.5	5.01×10^{34}	276.27	283.21
JO-2	350.5	6.31×10^{32}	279.42	286.85
JO-3	348.7	4.96×10^{32}	280.87	288.38
JO-4	351.2	8.97×10^{32}	278.31	285.70

Note: T_0 is thermal decomposition peak temperature when the heating rate tends to $0 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$; T_b is self-ignition temperature.

3.5 药柱的抗压性能

药柱的抗压性能测试结果见表 7。

由表 7 可知,与 JO-1 样品相比,加入纳米和微米 HMX 的 JO-2、JO-3、JO-4 样品的抗压性能均得到了提高,抗压性能最好的是 JO-3,与 JO-1 相比提高了 46%。因为粗颗粒 HMX 粒径比较大,制备成造型粉压制成药柱之后,HMX 颗粒之间间隙比较大,研究表明这种空隙会导致力学性能降低^[18],而且粗颗粒 HMX 晶体缺陷多,晶体缺陷也会影响炸药的力学性能^[19],所以使用粗颗粒 HMX 制备的造型粉压制的药柱抗压性能比较差。加入纳米与微米的 HMX 之后,纳米与微米 HMX 会填充到大颗粒之间的空隙,药柱会更加密实,颗粒之间的空隙大大减少,而且纳米材料还具有高的比表面积,能提高 HMX 与粘结剂之间的作用力,所以加入微米、纳米 HMX 级配之后的药柱抗压性能大大提高。

表 7 药柱的抗压性能

Table 7 Compression properties of the explosive cylinders

sample	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	compressive load/N	d / mm	S / MPa
JO-1	1.801	2781.7	20.02	8.84
JO-2	1.801	3967.0	20.02	12.61
JO-3	1.802	4061.6	20.02	12.91
JO-4	1.802	4035.4	20.02	12.82

Note: d is explosive cylinder diameter; S is compression strength.

图 5 为药柱截面的 SEM 照片。由图 5 可知,用粗颗粒 HMX 制备的药柱(JO-1)的截面非常粗糙,不平整,有许多小缝隙,使药柱不够密实,这会导致药柱的力学性能下降。由表 7 可以看出,JO-1 的抗压性能最差。而加入纳米和微米 HMX 级配之后,药柱截面很平整,基本不存在缝隙,有助于改善药柱的力学性能,

由表 7 也可以证实加入纳米和微米 HMX 级配之后药柱抗压性能得到很大提升。加入纳米比较少的 JO-2 样品虽然表面平整, 但是不如加入纳米量较多的 JO-3 和 JO-4 样品表面光滑, 这是因为纳米粒度非常细, 可以填补极小的缝隙, 使截面更加光滑, 抗压性能更好。

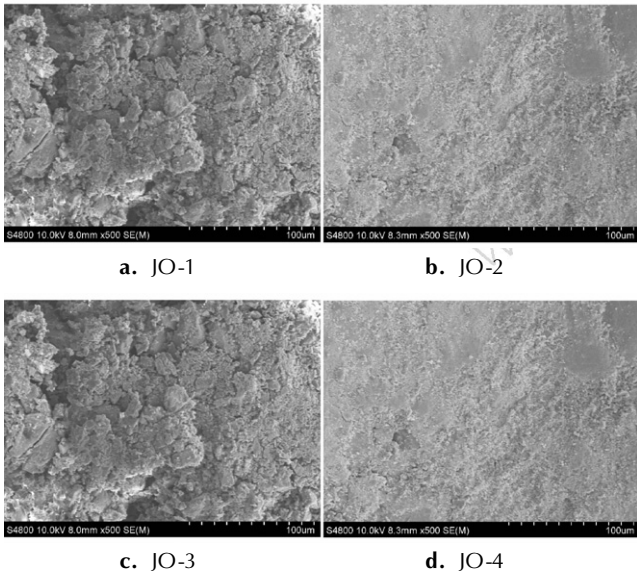


图 5 药柱截面扫描电镜图像

Fig. 5 SEM images of the explosive cylinder cross sections

3.6 药柱爆速

爆速测试, 一组样品使用 6 对探针, 测 5 组数据求得爆速平均值, 测得的药柱爆速 (D) 结果见表 8。

表 8 样品的爆速

Table 8 Detonation velocities of four samples

sample	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	sample	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
JO-1	8339	JO-3	8394
JO-2	8370	JO-4	8392

由表 8 可知, 在密度基本相同的情况下, 加入纳米和微米 HMX 级配之后的药柱 (JO-2, JO-3, JO-4) 爆速比单一粗颗粒 HMX 制备的药柱 (JO-1) 高, 爆速最大的是 JO-3 样品, 相比 JO-1 样品提高了 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。研究发现, 晶体缺陷会影响炸药的爆轰性能^[19], 粗颗粒 HMX 颗粒不规则, 晶体缺陷多, 微米 HMX 缺陷较少, 而纳米 HMX 晶体缺陷则更少, 而且因为纳米材料特有的表面效应、小尺寸效应, 使得纳米 HMX 具有爆轰反应速率快, 能量释放效率高的特性^[17], 所以将纳米和微米 HMX 应用于 PBX 中可以提高炸药的爆速。JO-4 样品纳米 HMX 含量高但爆速却比 JO-3 样品低, 是因为纳

米 HMX 含量过高时团聚严重, 失去了纳米材料特有的表面效应、小尺寸效应, 所以爆速有所降低。

4 结论

(1) 采用溶液-水悬浮法成功制备得到了含粗颗粒、微米和纳米三种粒度的 HMX 级配的 PBX 造型粉样品, 组分含量与投料量基本一致且表面光滑。

(2) 含粗颗粒、微米和纳米 HMX 的 PBX 造型粉样品形状规则, 呈类球形, 与单一粗颗粒 HMX 所制备的 PBX 相比, 压制成药柱更加的密实, 力学性能和爆炸性能得到提高, 但是当纳米含量过高时会导致造型粉均匀性变差。

(3) 与采用单一粗颗粒 HMX 所制备的 PBX 造型粉相比, 当纳米 HMX、微米 HMX、粗颗粒 HMX 的质量比为 10 : 30 : 60, 所制备的 PBX 撞击感度降低了 38.3%, 摩擦感度降低了 22.7%, 自发火温度提高 $5.17 \text{ }^\circ\text{C}$, 抗压强度提高了 46%, 爆速提高了 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 综合性能明显提高。

参考文献:

- [1] 彭浩梁. 醋酐法合成奥克托今工艺的热危险性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
PENG Hao-liang. Process safety assessment for the synthesis of HMX by acetic anhydride method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [2] 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: 204-218.
SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao. Military explosive mixture[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1995: 204-218.
- [3] 孙国祥. 高分子混合炸药[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 2-6.
SUN Guo-xiang. Polymer explosive mixture[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 2-6.
- [4] 尹俊婷, 袁宝慧, 石玮玮, 等. 压装 HMX 基 PBX 老化损伤及力学环境适应性[J]. 含能材料, 2016, 24(7): 674-677.
YIN Jun-ting, YUAN Bao-hui, SHI Wei-wei, et al. Aging damage and mechanical environment adaptability of pressed HMX-based PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(7): 674-677.
- [5] 花成, 黄明, 黄辉, 等. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷表征与冲击波感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 152-156.
HUA Cheng, HUANG Ming, HUANG Hui, et al. Intragranular defects and shock sensitivity of RDX/HMX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 152-156.
- [6] 林聪妹, 刘世俊, 张娟, 等. 粘结剂增强对 TATB 基 PBX 力学性能的影响[J]. 广州化工, 2012, 40(14): 77-79.
LIN Cong-mei, LIU Shi-jun, ZHANG Juan, et al. Influences of binder enhancement technology on mechanical properties of TATB-based polymer bonded explosives [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, 40(14): 77-79.

- [7] 李文祥, 赵省向, 邢晓玲, 等. 碳纤维对塑料粘结炸药力学性能的影响[J]. 火工品, 2014(3): 35-37.
LI Wen-xiang, ZHAO Sheng-yang, XING Xiao-ling, et al. The effects of carbon fiber on mechanical properties of plastic bonding explosives (PBXs) [J]. *Initiatoes & Pyrotechnics*, 2014(3): 35-37.
- [8] 肖磊, 刘杰, 郝嘎子, 等. 微纳米 RDX 颗粒级配对压装 PBX 性能影响[J]. 含能材料, 2016, 24(12): 1193-1197.
XIAO Lei, LIU Jie, HAO Ga-zi, et al. Effects of nano-/micrometer RDX particle gradation on the property of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(12): 1193-1197.
- [9] Song X, Yi W, An C, et al. Dependence of particle morphology and size on the mechanical sensitivity and thermal stability of octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159(2-3): 222.
- [10] 吕春玲, 张景林. 粒度对 HMX 撞击感度的影响[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 472-474.
LÜ Chun-ling, ZHANG Jing-lin. Influence of particle size on the impact sensitivity of HMX [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 472-474.
- [11] 刘杰, 姜伟, 李凤生, 等. 纳米级奥克托今的制备及性能研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 174-180.
LIU Jie, JIANG Wei, LI Feng-sheng, et al. Preparation and study of nano octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(2): 174-180.
- [12] 杨青, 刘杰, 曾江保, 等. 纳米 HMX 基 PBX 的热分解特性[J]. 火炸药学报, 2014(6): 16-19.
YANG Qing, LIU Jie, ZENG Jiang-bao, et al. Thermal decomposition characteristics of nano-HMX based PBX [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2014(6): 16-19.
- [13] 李凤生. 微米粉体技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
LIFeng-sheng. Superfine powder technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [14] 李凤生. 特种超细粉体制备技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
LI Feng-sheng. Preparation technology and application of Special superfine powder [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [15] 李小东, 王江, 冀威, 等. 喷雾干燥法制备球形 HMX 的正交实验[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 439-443.
LI Xiao-dong, WANG Jiang, JI Wei, et al. Orthogonal Experiments of the spraydrying process for spherical HMX micro power preparation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 439-443.
- [16] 冯蒙蒙. 微米 HMX 的制备及感度研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
FENG Meng-meng. Preparation and sensitivity study of ultrafine HMX[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [17] 刘杰. 具有降感特性纳米硝胺炸药的可控制备及应用基础研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
LIU Jie. Controlled preparation of lower sensitivity characterized nanometer nitramine explosives and their applying basic research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [18] 中国工程物理研究院化工材料研究所. 以纳米粒子增强力学性能的高聚物粘接炸药及其制备方法: 中国, CN201510068482.9[P]. 2015-5-27.
Institute of Chemical Materials, Chinese Academy of Engineering Physics. Polymer bonded explosive using nano particle reinforcing mechanical property and preparation method: China, CN201510068482.9[P]. 2015-5-27.
- [19] 马秀芳, 肖继军, 黄辉, 等. HMX 和 HMX/HTPB 的晶体缺陷理论研究[J]. 化学学报, 2008, 66(8): 897-901.
MA Xiu-fang, XIAO Ji-jun, HUANG Hui, et al. A theoretical study on crystal defect of HMX and HMX/HTPB PBX [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2008, 66(8): 897-901.

Effects of Nano/Micrometer HMX Particle Gradation on PBX Properties

JIN Cheng-su¹, XIAO Lei¹, WANG Qing-hua², LIU Jie¹, HAO Ga-zi¹, RONG Yuan-bo¹, JIANG Wei¹, LIU Qiao-e³, XU Zi-shuai³

(1. National Special Superfine Powder Engineering Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Military Representative Office of the 763 Factory of PLA, Taiyuan 030000, China; 3. Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co Ltd, Baiyin 730900, China)

Abstract: To improve the comprehensive performance of polymer bonded explosives (PBXs), low sensitivity nano-HMX and micrometer HMX were applied to PBX by particle gradation. Four molding powders were prepared by solution-water slurry method and pressed into explosive cylinders. The surface microstructures of JO-1, JO-2, JO-3 and JO-4 samples (coarse/micrometer/nano-HMX mass ratios with 100/0/0, 60/35/5, 60/30/10 and 60/25/15, respectively) were observed and the component contents, impact sensitivities, friction sensitivities, thermal decomposition characteristics, compression properties and detonation velocities were measured. Results show that JO-3 sample has the best properties. Compared to the JO-1 sample with single coarse HMX ($d_{50} = 100 \mu\text{m}$), JO-3 sample has the smoother surface, and the impact sensitivity is reduced by 38.3%, the friction sensitivity is reduced by 22.7%, the self-ignition temperature is increased by 5.17 °C, the compression strength is enhanced by 46%, and the detonation velocity is increased by 55 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. The HMX based PBX comprehensive performance is improved significantly.

Key words: polymer bonded explosive (PBX); nano/micrometer HMX; gradation; sensitivity; compression strength; detonation velocity

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.005