

文章编号: 1006-9941(2016)03-0295-05

# 喷雾干燥工艺条件对 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粒度的影响

冀威, 李小东, 王晶禹

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 采用悬浮喷雾干燥法将偏氟乙烯和六氟丙烯共聚物(F<sub>2602</sub>)包覆于 HMX 颗粒表面, 制备了 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球。采用共混溶液喷雾干燥法制备了 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球。探讨了进口温度、进料速率和料液浓度等悬浮喷雾干燥工艺条件对 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粒度的影响。利用扫描电子显微镜(SEM)、激光粒度分析仪和撞击感度仪表征了两个样品的形貌、粒度和撞击感度。结果表明, 悬浮喷雾干燥法的优化工艺条件为: 入口温度 85 °C, 进料速率 3 mL·min<sup>-1</sup>, 料液浓度 2%。HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球有内部缺陷, 中值粒径为 4.75 μm。HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球为实心球状, 中值粒径 1.23 μm。HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球和 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球的撞击特性落高分别为 31.23 cm 和 41.37 cm, 显示 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球有更好的性能。

**关键词:** 喷雾干燥; HMX/F<sub>2602</sub> (偏氟乙烯和六氟丙烯共聚物) 核壳复合微球; 形貌; 粒度

中图分类号: TJ55; O62

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.015

## 1 引言

超细粒子通常包括微米级(1~30 μm)、亚微米级(0.1~1 μm)和纳米级(1~100 nm)<sup>[1]</sup>, 其粒径很小, 表面能高, 容易团聚, 形成二次粒子, 无法表现出良好的表面积效应、体积效应及量子尺寸效应等<sup>[2-3]</sup>。因此, 提高超细粒子的实际使用效果, 关键是要对这些活性很高的微细颗粒进行改性处理。

奥克托今(环四亚甲基四硝铵, HMX)是军事应用中用最广泛的猛炸药之一, 它具有较高的爆速和爆压, 从而使相应弹药具有较高的能量性能。但 HMX 的机械感度较高, 影响了其应用, 需采取适宜方法降低其机械感度。研究表明超细粒子的颗粒形貌、粒度及分布、缺陷等会对炸药性能产生不同程度的影响, 因此, 设计和改进产品制造过程、提高超细粒子晶体质量, 控制颗粒的形貌和粒度具有十分重要的理论和实际应用价值<sup>[4-6]</sup>。如李玉斌<sup>[7]</sup>等采用石蜡(W)、热塑性聚氨酯(TPU)等材料为钝感包覆剂, 对高品质 HMX 进行了表面包覆, 发现 W 及 W 与 TPU 的复合可对

HMX 进行完整的包覆, 使 HMX 的撞击感度由 80% 降低 16%, 而摩擦感度由 72% 降低到 4%。曾贵玉<sup>[8]</sup>等采用聚氨酯与 HMX 原位结晶的方法对 HMX 进行包覆改性处理, 原位结晶包覆处理后的 HMX 晶体质量得到明显改善, 晶体形貌更规整、颗粒表面缺陷显著减少, β-晶型没有改变, 改性处理后 HMX 的撞击感度和摩擦感度分别从 90% 和 70% 降低到 12% 和 36%。

核壳型复合材料能有效地解决含能材料混合物各组分间混合不均匀、粒子形状不规则、粒度大、分布不均以及高安全性等问题, 其制备方法主要有机械法、异相凝聚法、包埋法、气溶胶法和沉积法等, 是降低炸药感度提高其应用范围的有效措施。目前核-壳型复合材料发展快速, 但喷雾干燥技术制备核-壳型钝感高能材料的研究国内外报道很少。鉴于此, 本研究利用 F<sub>2602</sub> (偏氟乙烯和六氟丙烯共聚物) 在含有超细 HMX 粒子的悬浮液中经过喷雾干燥结晶形成超细粒子并沉积在超细 HMX 粒子表面形成核-壳型复合微球, 解决其成分间混合不均匀以及超细粒子容易团聚的问题; 并与共混溶液喷雾制备的 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球(形貌、粒度和撞击感度)进行了对比; 讨论了进口温度、进料速率和料液浓度等悬浮喷雾干燥工艺条件对 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粒度的影响。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与仪器

HMX 原料, 甘肃银光化学工业集团有限公司; 乙

收稿日期: 2015-03-23; 修回日期: 2015-06-08

基金项目: 武器装备预先研究项目(51305120201)

作者简介: 冀威(1987-) 博士生, 主要从事新型火工药剂技术。

e-mail: JIWEI7327@163.com

通信联系人: 王晶禹(1967-) 教授, 主要从事超细粉体制备技术、火工药剂技术及安全技术及工程研究。e-mail: wjywjy67@163.com

酸乙酯,分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;纯净水,山西漪汾饮料食品有限公司;二甲基亚砷,分析纯,国药集团化学溶剂有限公司。

气流式喷雾干燥仪(BUCHI Spray Dryer B-290);采用SU8020型冷场扫描电子显微镜(日本日立公司)观察颗粒的表面形貌以及分散情况;用TecnaiG2F20型场发射透射电子显微镜(美国FEI公司)观测样品的微观结构;采用Hydro2000Mu激光粒度分析仪分析颗粒的粒度分布;用WL-1型撞击感度仪测试样品的撞击感度。

## 2.2 悬浮喷雾干燥法制备 HMX/ $F_{2602}$ 核壳复合微球

称取 HMX 原料(10 g)溶解于二甲基亚砷溶剂(25 mL)中得到炸药溶液,其次将炸药溶液通过高压压缩气体带动,经过二流体雾化喷嘴加速,在反溶剂(纯净水)中将炸药溶液雾化成小液滴,利用溶剂/非溶剂重结晶法<sup>[9]</sup>将 HMX 结晶析出,最后经过过滤、真空冷冻干燥过程得到细化的 HMX。室温下,将  $F_{2602}$ (0.1579 g)溶解在乙酸乙酯溶剂(172 mL)中配成溶液,然后将细化 HMX(3 g)倒入乙酸乙酯溶液中配制稳定的悬浮液,通过蠕动管吸入到 Mini Btichi290 小型喷雾干燥器中进行喷雾干燥,得到 HMX/ $F_{2602}$  核壳复合微球样品。HMX 在许多溶剂中溶解度较低,25 °C 下在二甲基亚砷的溶解度为 57 g/100 g,故实验选取二甲基亚砷作为溶剂。由于乙酸乙酯沸点(77 °C)低,可溶解  $F_{2602}$ ,HMX 在乙酸乙酯溶剂中溶解度较低,故选择乙酸乙酯溶解  $F_{2602}$ 。

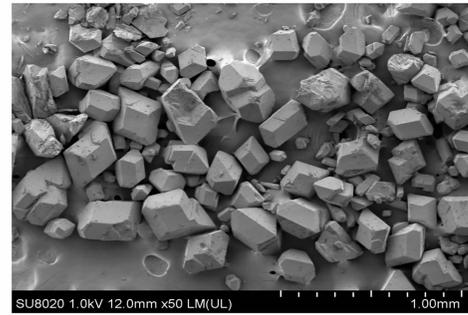
## 2.3 共混溶液喷雾制备 HMX/ $F_{2602}$ 复合微球

按 2.2 中的步骤过程细化 HMX,在室温下将细化 HMX(3 g)和  $F_{2602}$ (0.1579 g)溶于丙酮溶剂(172 mL)中配制成共混溶液,通过蠕动管吸入到 Mini Btichi290 小型喷雾干燥器中进行喷雾干燥,制备得到 HMX/ $F_{2602}$  复合微球。

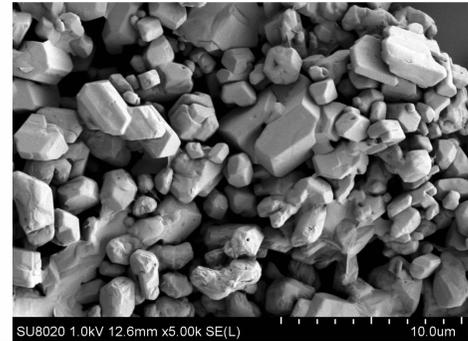
# 3 结果与讨论

## 3.1 形貌和粒度分布表征

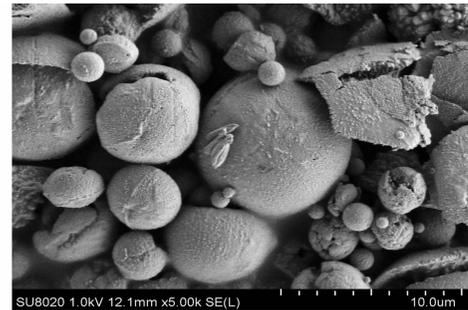
图 1 为不同 HMX 样品的 SEM 照片,其中图 1a 为原料 HMX,图 1b,图 1c 和图 1d 分别为细化 HMX、HMX/ $F_{2602}$  复合微球、HMX/ $F_{2602}$  核壳复合微球。由图 1a 可以看出,HMX 原料为不规则的多面体,大小极不均匀,大部分颗粒大于 200  $\mu\text{m}$ ;细化 HMX 颗粒(图 1b)晶体尖锐棱角减少,颗粒尺寸范围为 1~3  $\mu\text{m}$ 。由图 1c 可以看出,HMX/ $F_{2602}$  复合微球的形貌为球形,部分球体破碎,球体尺寸不均匀,表明球体内部缺陷较



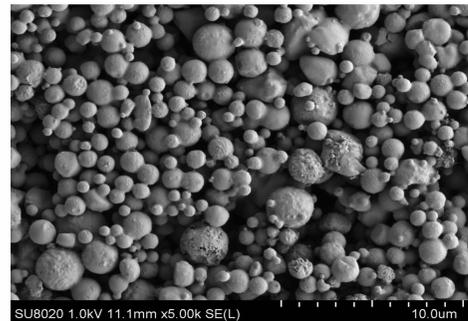
a. raw HMX



b. fine HMX



c. HMX/ $F_{2602}$  composite microspheres



d. HMX/ $F_{2602}$  core-shell composite microspheres

图 1 不同 HMX 样品的 SEM 照片

Fig. 1 SEM images of different HMX samples

多。造成这一现象的原因是喷雾干燥过程中,热氮气的喷入形成涡流气旋,使共溶液形成大小不同的球雾滴,雾滴在高温气体的作用下,表面溶剂快速蒸发,在 HMX 雾滴形成透气性不良的硬壳,壳内的溶剂持续蒸发膨胀成空心球体,并在表面产生裂纹或导致球

体破损。悬浮喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球其形状比较规则(图 1d)。图 2 为 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球的透射照片,从图 2 可以看出,微球为实心结构。对 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球和 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球的粒度进行测量,得到粒度分布曲线,结果分别为如图 3 所示,从图 3 可以看出 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球和 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球的中值粒径分别为为 4.78 μm 和 1.23 μm。由此可得,悬浮喷雾干燥工艺获得的 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球形貌和尺寸更均匀,粒度更小,且在喷雾过程中很好的保持了其核壳结构的完整性。

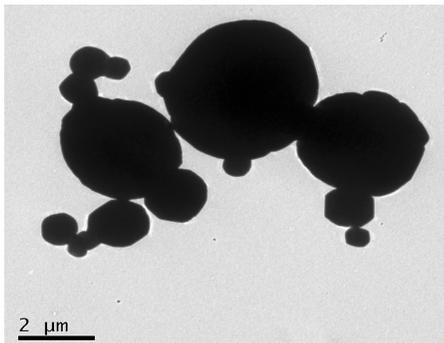
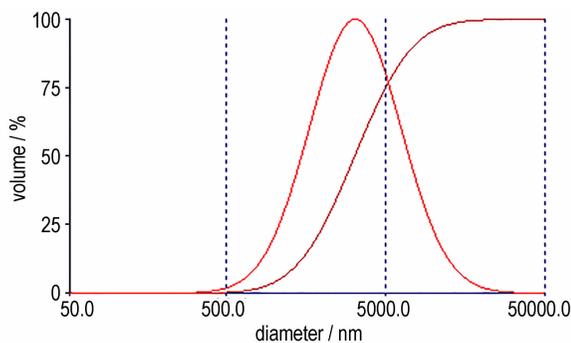
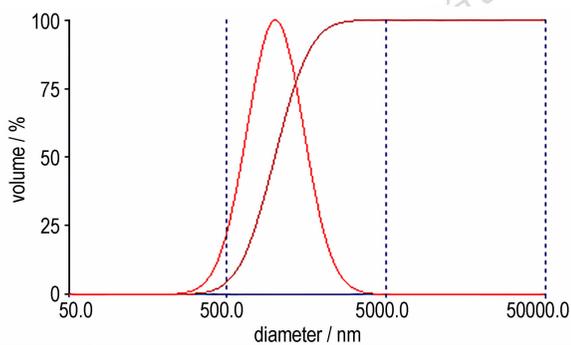


图 2 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球的透射电镜照片

Fig.2 TEM image of HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres



a. HMX/F<sub>2602</sub> composite microspheres



b. HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres

图 3 不同 HMX 样品的粒度分布

Fig.3 Particle size distribution of different HMX samples

### 3.2 撞击感度

对共混溶液喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球样品和悬浮喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球样品进行了撞击感度实验,实验按照 GJB772A-1997《炸药实验方法》12 型工具法进行。实验条件:药量为(35±1) mg,室温 20 ℃,相对湿度 91%,落锤质量 5 kg。共混溶液喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球和悬浮喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球撞击感度的特性落高分别为 31.23 cm 和 43.37 cm,这说明悬浮喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球撞击感度较共混溶液喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球撞击感度降低了 39%,表明核壳结构是一种能有效降低炸药机械感度的有效途径。该现象可用热点理论来解释:在机械作用下,炸药分子或晶体间的运动导致了炸药的局部加热,形成热点。而后热点在炸药体相中不断地扩大、传播,终于引起全部炸药的爆炸。悬浮喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球结构稳定,表面完整性良好、缺陷少、均匀性好使得在其内部不易形成热点,而共混溶液喷雾干燥制得的 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球表面和内部缺陷较大,易在其内部形成热点;另外 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粒径比 HMX/F<sub>2602</sub> 复合微球粒径更小,当受到外界冲击载荷作用时,由于小晶粒间相对运动的可能性越小,运动速率更低。撞击感度是被认为是炸药安全性和可靠性的重要指标,因此研究工艺条件对 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粒度的影响,以获得具有高品质、低感度的炸药是一项十分重要的工作。

### 3.3 工艺优化

#### 3.3.1 入口温度对 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粒度的影响

研究表明,气流的速度增大,提供给雾化的能量就越大,雾滴粒径就越小;但气流速度过大,雾滴在干燥器内停留时间缩短,干燥效果较差,而且制备的粉体通常粒径分布很宽<sup>[10]</sup>。所以在本实验中,选择 347 L·h<sup>-1</sup> 作为适宜气体流速,分别研究入口温度、进料速率和料液浓度对微球粒度的影响。

在细化 HMX 和乙酸乙酯的质量比为 2:98,细化 HMX 和 F<sub>2602</sub> 质量比为 95:5,进料速度为 3 mL·min<sup>-1</sup> 的条件下,考察入口温度对 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粒度的影响。不同温度对应粒径如图 4 所示(其中图中 d<sub>10</sub>, d<sub>50</sub>, d<sub>90</sub> 分别表示颗粒的体积分布达到 10%, 50%, 90% 时的粒度)。从图 4 可以看出,在 70~85 ℃,粒径(d<sub>10</sub>, d<sub>50</sub>)变化不明显,这是由于乙酸乙酯的沸点为

77 °C, 当入口温度接近溶剂沸点时, 溶剂挥发速度较慢, 大部分微球成型较好, 对粒径尺寸影响较小; 粒径( $d_{90}$ )随着温度的升高而减小, 变化比较明显, 这是由于料液表面张力随着温度的升高而降低, 而液滴的直径随着料液的表面张力的减小而降低; 当温度超过 85 °C 后, 由于温度较高, 喷雾液滴蒸发速度加快, 液滴表面的溶剂迅速蒸发形成壳层, 壳内的溶剂在后期的蒸发过程中发生破壳现象, 导致微球的粒径增大。故实验较佳的进口温度为 85 °C。

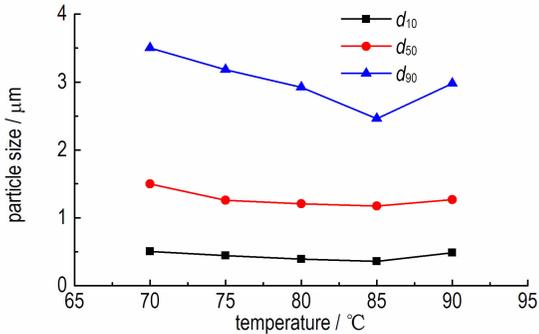


图 4 HMX/ $F_{2602}$  核壳复合微球的入口温度与粒径之间的关系  
Fig. 4 Relationship between inlet temperature and particle size of the HMX/ $F_{2602}$  core-shell composite microspheres

### 3.3.2 进料速率对 HMX/ $F_{2602}$ 核壳复合微球粒径的影响

在细化 HMX 和溶剂的质量比为 2 : 98, 细化 HMX 和  $F_{2602}$  质量比为 95 : 5, 入口温度为 85 °C 的条件下, 研究了不同进料速率对微球的粒径影响, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在进料速度为 1 ~ 8  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$  之间, 粒径( $d_{50}$ ,  $d_{90}$ )均随进料速度的降低而减小, 粒径( $d_{10}$ )变化不明显,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  均在进料速度为 6  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$  时迅速减小, 并在 3  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$  以下变化

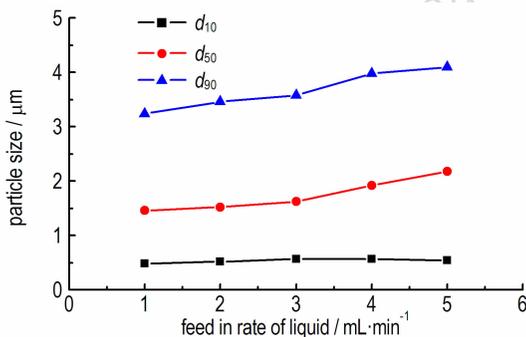


图 5 HMX/ $F_{2602}$  核壳复合微球的进料速率与粒径之间的关系  
Fig. 5 Relationship between the feed-in rate and particle size of the HMX/ $F_{2602}$  core-shell composite microspheres

趋于稳定。研究表明, 雾滴的直径与进料速率的 0.2 ~ 0.3 次方成正比<sup>[11]</sup>。这是由于当进料速率加快时, 在喷雾干燥室中产生的液滴浓度大, 干燥时溶剂来不及挥发, 液滴聚合凝结变成大液珠, 干燥后变成大颗粒; 当进料速率较低时, 在干燥室内, 喷入料液和溶剂蒸发速度达到平衡, 液滴少, 难再聚成液珠, 因而能得到的微球颗粒较细。但当进料速率过低时, 干燥过程消耗的能量较大, 而能量消耗是直接关系到操作经济性的一个重要指标。因此在雾化条件额定范围内, 控制合适的进料速率十分必要, 故实验较佳的进料速度为 3  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 3.3.3 料液浓度对 HMX/ $F_{2602}$ 核壳复合微球粒度的影响

从经济角度来看, 料液浓度要尽可能高, 因为这样可以减少用于蒸发溶剂的热氮气的用量; 另外, 浓度高的溶液在同样质量的溶质的情况下, 体积小, 可以降低泵的输送量, 降低能耗。但从技术要求分析, 浓度过高将使得溶质的分散性变差, 喷雾效果差, 其结果可能导致产品的粒径的增大。

在细化 HMX 和  $F_{2602}$  质量比为 95 : 5, 入口温度为 85 °C, 进料速度为 3  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$  的条件下, 考察料液浓度对粒径的影响结果, 如图 6 所示。从图 6 可以看出,  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  随浓度的变化趋势大致相同。以  $d_{50}$  为例, 从 1% ~ 20%, 微球的粒径从 1.34  $\mu\text{m}$  增加到 3.12  $\mu\text{m}$ , 增长率较大, 说明料液浓度对制备的微球粒径影响显著。这可由以下原因来解释: (1) 由于 HMX 微溶于乙酸乙酯(粒径 5  $\mu\text{m}$  的 HMX 在 20, 40 °C 和 60 °C 下的溶解度分别为 0.2767, 0.3851, 0.5038)<sup>[12]</sup>, 乙酸乙酯将 HMX 部分棱角消除, 使得 HMX 的粒径变小; (2) 料液浓度的降低有利于溶质的分散, 并在随后的喷雾干燥过程中达到较好的雾化效

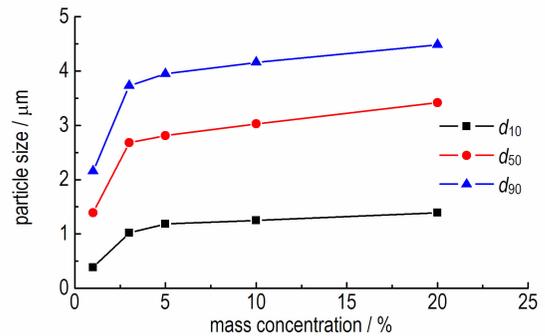


图 6 HMX/ $F_{2602}$  核壳复合微球的质量料液浓度与粒径的关系  
Fig. 6 Relationship between mass concentration and particle size of the HMX/ $F_{2602}$  core-shell composite microspheres

果。所以在实验中料液浓度应尽可能控制在较低的范围内,但从实验操作来看,浓度太低,会使干燥效果不佳而产生粘壁现象。故实验选择较佳的料液浓度为 2%。

## 4 结 论

(1) 采用悬浮喷雾干燥工艺制备出 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球,其形貌为实心球形,中值粒径为 1.23 μm。和共混溶液喷雾工艺相比,HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球撞击感度的特性落高由 31.23 cm 提高到 41.37 cm。

(2) 各种参数的选择与 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球粉体粒径密切相关,其中以料液浓度对微球粒径影响最大。悬浮喷雾干燥制备 HMX/F<sub>2602</sub> 核壳复合微球的实验优化工艺条件为:入口温度为 85 °C,进料速率为 3 mL·min<sup>-1</sup>,料液浓度为 2%。

### 参考文献:

- [1] 尹强,付廷明,杨毅,等. 超细粒子的表面改性研究[J]. 江苏化工, 2002, 30(2): 33-36.  
YIN Qiang, FU Ting-ming, YANG Yi, et al. Study on surface modification of superfine powder[J]. *Jiangsu Chemical Industry*, 2002, 30(2): 33-36.
- [2] 付廷明,李凤生. 包覆式超细复合粒子的制备[J]. 火炸药学报, 2002, 25(1): 33-36.  
FU Ting-ming, LI Feng-sheng. Preparation of core-shell superfine composite powders[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(1): 33-36.
- [3] 张汝冰,刘宏英,李凤生. 复合纳米材料制备研究(II)[J]. 火炸药学报, 2000, 23(1): 59-62.  
ZHANG Ru-bing, LIU Hong-yin, LI Feng-heng. Preparation of composite nanometer-sized particle(II)[J]. *Chinese Journal of*

- Explosives & Propellants*, 2000, 23(1): 59-62.
- [4] 宋小兰,安崇伟,郭效德,等. 制备工艺对 HMX 机械感和热分解特性的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 688-702.  
SONG Xiao-lan, AN Chong-wei, GUO Hong-de et al. Effect of preparation methods on mechanical sensitivity and thermal decomposition of HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(6): 688-702.
- [5] 刘云飞,杨荣杰,谭惠民,等. 聚丙烯酸乙酯包覆奥克托金(HMX)的研究[J]. 北京理工大学学报, 1998, 18(3): 370-374.  
LIU Yun-fei, YANG Rong-jie, TAN Hui-min, et al. Study on HMX coating with polyethyl acrylate[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1998, 18(3): 370-374.
- [6] 韵胜,刘玉村,于雁武,等. 超细微球形低感度 HMX 的制备[J]. 含能材料, 2011, 19(3): 305-309.  
YUN Sheng, LIU Yu-cun, YU Yan-wu, et al. Preparation of micro spherical and desensitized HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(3): 305-309.
- [7] 李玉斌,黄亨建,黄辉,等. 高品质 HMX 的包覆降感技术[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 680-684.  
LI Yu-bing, HUANG Heng-jian, HUANG Hui, et al. Desensitizing technology of high quality HMX by coating[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 680-684.
- [8] 曾贵玉,聂福德,刘兰,等. 聚氨酯原位结晶包覆 HMX 的研究[J]. 含能材料, 2011, 19(2): 138-141.  
ZENG Gui-yu, NIE Fu-de, LIU Lan, et al. In situ crystallization coating HMX by polyurethane[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 138-141.
- [9] 李凤生. 超细粉体技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 306-318.
- [10] 盛江峰,马淳安,张诚,等. 喷雾干燥法制备偏钨酸铵微球时的形貌与粒度[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(1): 122-127.  
SHENG Jiang-feng, MA Chun-an, ZHANG Cheng, et al. Morphology and size of ammonium metatungstate microsphere prepared by spray drying method[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2008, 22(1): 122-127.
- [11] 刘杰,曾江保,杨青,等. 粒度和温度对 HMX 溶解度的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(4): 25-29.  
LIU Jie, ZENG Jiang-bao, YANG Qing, et al. Effect of particle size and temperature on the solubility of HMX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(4): 25-29.

## Effect of the Spray Drying Technological Conditions on the Particle Size of HMX/F<sub>2602</sub> Core-shell Composite Microspheres

Ji Wei, Li Xiao-dong, WANG Jing-yu

(Chemical Industry and Ecology Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres were prepared via coat of F<sub>2602</sub> on HMX particle surface using the suspension spray drying method, and HMX/F<sub>2602</sub> composite microspheres were prepared by the blended solution spray drying method. The effects of the suspension spray drying technological conditions including the inlet temperature, feed rate and solution concentration on the particle size of HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres were investigated. The particle morphology, particle size and impact sensitivity of two samples were characterized by scanning electron microscopy (SEM), laser particle size analyzer and impact sensitivity test. Results show that the optimal conditions of suspension spray drying method are the inlet temperature of 85 °C, the feed rate of 3 mL·min<sup>-1</sup> and the solution concentration of 2%. The HMX/F<sub>2602</sub> composite microspheres have internal defects, and its median particle size is 4.75 μm. The morphology of HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres is solid sphere with median particle size of 1.23 μm. The drop height of impact sensitivity for HMX/F<sub>2602</sub> composite microspheres and HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres is 31.23 cm and 41.37 cm, respectively, revealing that the HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres have better properties.

**Key words:** spray drying; HMX/F<sub>2602</sub> core-shell composite microspheres; morphology; particle size

**CLC number:** TJ55; O62

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.015