

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.002

炸药与黏结剂溶液的黏附功对 PBX 水悬浮 制备工艺的影响^{*}

赵 凯 黄亚峰 杨 雄 杨 渤 姚逸伦 陈 鸿

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 能否采用水悬浮工艺制备聚合物黏结炸药(PBX),一般需要多次试验后对炸药/黏结剂体系进行判断。测试了不同浓度的氟橡胶(F2603)溶液与奥克托今(HMX)、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)的接触角,计算了 HMX、FOX-7 与不同浓度的 F2603 溶液、7% 乙酸乙酯@水的黏附功,分析了黏结剂溶液浓度变化对成粒的影响。结果表明:HMX 与质量分数 14% 的 F2603 溶液的黏附功大于 HMX 与 7% 乙酸乙酯@水之间的黏附功,HMX 可以黏结成粒;FOX-7 与不同浓度 F2603 溶液的黏附功均小于 FOX-7 与 7% 乙酸乙酯@水之间的黏附功,FOX-7 无法黏结成粒。经试验验证,计算结果与实际成粒情况一致。

[关键词] 造粒;接触角;黏附功;水悬浮工艺;浓度

[分类号] TQ560.6

Effect of Adhesion Work between Explosive and Adhesive Solution on the Water Suspension Preparation Process of PBX

ZHAO Kai, HUANG Yafeng, YANG Xiong, YANG Bo, YAO Yilun, CHEN Hong

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

[ABSTRACT] It is generally necessary to conduct multiple experiments before determining whether a polymer bonded explosive (PBX) can be prepared using a water suspension process for an explosive/binder system. The contact angles between different concentrations of fluororubber (F2603) solution and HMX or FOX-7 were tested. The adhesion work of HMX or FOX-7 to different concentrations of F2603 solution and 7% ethyl acetate@water was calculated, and the effect of binder solution concentration variation on particle formation was also analyzed. The results show that the adhesion work between HMX and F2603 solution with mass fraction of 14% is greater than that between HMX and 7% ethyl acetate@water, and HMX can bond into granules. The adhesion work between FOX-7 and different concentrations of F2603 solution is smaller than that between FOX-7 and 7% ethyl acetate@water, and FOX-7 cannot bond into granules. It is verified by test that the calculated results are consistent with the actual granulation.

[KEYWORDS] granulation; contact angle; adhesion work; water suspension process; concentration

0 引言

目前,水悬浮工艺研究主要聚焦于工艺参数调节对造型粉性能的影响^[1-4],或者是对水悬浮成粒过程的定性分析^[5],未见关于水悬浮制备工艺过程的定量计算。可以利用黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)采用水悬浮工艺制备聚合物黏结炸药(PBX),而 5,5'-联四唑-1,1'-二氧二羟胺(HATO)、1,2-苯二甲酸二烯丙酯(DAP)等无法采用水悬浮工

艺制备 PBX。判断一个炸药/黏结剂体系能否采用水悬浮工艺制备 PBX,往往需要尝试调节不同的真空度、温度、黏结剂溶液的加入速度等参数,进行多次试验。进行有限次的试验时,只能根据试验结果推测某些炸药能否用于水悬浮工艺制备 PBX。

Fernández-Toledano 等^[6-9]通过分子动力学模拟分析了液滴在固体表面及两个运动平板间的接触角与液滴及平板运动速度之间的关系,接触线位置波动与固液作用之间的关系。Semal 等^[10]采用分子动力学理论分析了粗糙度对润湿过程的影响。Borma-

* 收稿日期:2023-03-14

第一作者:赵凯(1984-),男,副研究员,主要从事混合炸药的制备工艺研究。E-mail: wuwukai@126.com

shenko^[11]研究了光滑和粗糙曲面的润湿情况及适用的公式。Blake^[12]介绍了有关润湿的多种理论。在表面间作用力计算与测试方面, Israelachvili 等^[13-14]研究了粒子和表面间作用力的计算公式。Chaudhury 等^[15]测量了采用聚二甲基硅氧烷制成的 1~2 mm 的半球形透镜和平板接触时的变形量,分析了空气和液体中表面间的黏附力。上述相关研究只涉及水悬浮工艺过程的一部分,均不能直接用于水悬浮工艺过程的量化计算。

通过量化计算来评价炸药与黏结剂能否采用水悬浮工艺制备 PBX,可以避免多次试验。同时,研究一条量化表征水悬浮工艺过程的技术途径,可以据此开展固、液两相间作用力、成粒浓度等的研究。

1 试验部分

水悬浮造粒过程中,溶剂挥发,造成造粒釜中黏结剂溶液浓度发生变化。配制不同浓度的黏结剂溶液,表征造粒过程的不同时刻。以乙酸乙酯为溶剂,配制质量分数为 2%、5%、12%、14% 和 16% 的氟橡胶(F2603)溶液,分别标记为样品 1[#]~样品 5[#]。在采用乙酸乙酯作为溶剂的黏结剂造粒时,当黏结剂溶液加入造粒釜中时,部分乙酸乙酯迅速与水互溶(经测试,常温下,乙酸乙酯在 100 mL 水中的最大溶解体积为 8 mL),成为乙酸乙酯溶液,命名为 7% 乙酸乙酯@水。

采用 Washburn 法测出探针液体与炸药、炸药与黏结剂溶液的接触角,进而计算出炸药、黏结剂溶液的表面张力分量。然后,根据张力分量,计算出不同相之间的黏附功。

1.1 试剂

HMX, 120 目,甘肃银光化学工业集团有限公司;FOX-7,西安近代化学研究所;F2603,中昊晨光化工研究院有限公司;溶剂为分析纯。

1.2 物性表征

采用英国马尔文 Master Sizer 2000 型激光粒度仪测试 HMX 与 FOX-7 的粒径。采用日本电子 JSM 5800 型扫描电镜(SEM)测试表面形貌。分别采用黏度计、表面张力计、密度测试仪测试 F2603 溶液的黏度、表面张力、密度。

实际浓度采用称量法测试:取一定质量的 F2603 溶液,根据已测密度计算体积;溶剂挥发完全后,再次称量溶液质量,计算出实际浓度。

1.3 接触角测试

采用德国德飞 DCAT21 型接触角测量仪测试样

品的接触角。先将黏结剂制备成片状,然后采用光学法测出黏结剂与探针液体的接触角,测试装置和样品见图 1。

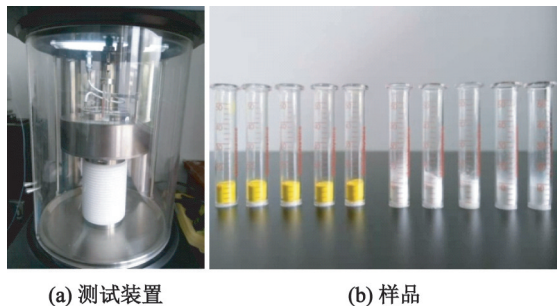


图 1 接触角测试装置及样品管

Fig. 1 Contact angle testing device and samples

Washburn 方程:

$$w^2 = c \frac{\rho^2 \sigma \cos \theta}{2\eta} t. \quad (1)$$

式中: w 为探针液体在炸药填充床中的润湿质量; c 为填充床的几何因子; ρ 为液体密度; σ 为液体表面张力; η 为液体黏度; t 为润湿时间; θ 为接触角。

可通过式(1)中 w^2-t 拟合直线的斜率 k ,求得该探针液体与炸药的接触角。

1.4 造粒工艺试验

分别称量 980 g 的 HMX(或 FOX-7)和 20 g 的 F2603。F2603 溶解在 400 mL 的乙酸乙酯中,配制成黏结剂溶液,采用水悬浮工艺进行造粒。

水与炸药的质量比为 1.5 : 1.0。搅拌桨转速 200~400 r/min。造粒工艺温度 65~70 ℃。真空度为 -0.090~-0.092 MPa。黏结剂溶液滴加速度为 0.5~2.0 L/min。造粒总时间为 15~40 min。转速、黏结剂溶液滴加速度、造粒时间的范围较大,主要是由于 FOX-7 无法成粒,通过调节工艺参数进行试验,看是否能够成粒。

2 结果与分析

2.1 物理性质表征结果

水悬浮造粒与原材料的粒径及粒径分布有较大的关系,所以先对原材料粒径进行表征。

不同浓度的 F2603 溶液的密度、黏度、表面张力的测试数据见表 1。

HMX 和 FOX-7 的粒径分布见图 2;颗粒形貌见图 3。粒径 D_{50} (HMX) = 16.70 μm; D_{50} (FOX-7) = 58.19 μm。

20 ℃时,探针液体的表面张力及分量见表 2。

表 1 不同浓度 F2603 溶液的物理参数

Tab.1 Physical parameters of F2603 solutions with different concentrations

样品	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
1 [#]	0.905	3.80	22.80
2 [#]	0.920	13.30	22.91
3 [#]	0.925	262.40	23.60
4 [#]	0.953	530.90	23.67
5 [#]	0.958	1 386.00	23.53
7% 乙酸乙酯 @ 水	0.965	1.75	37.63

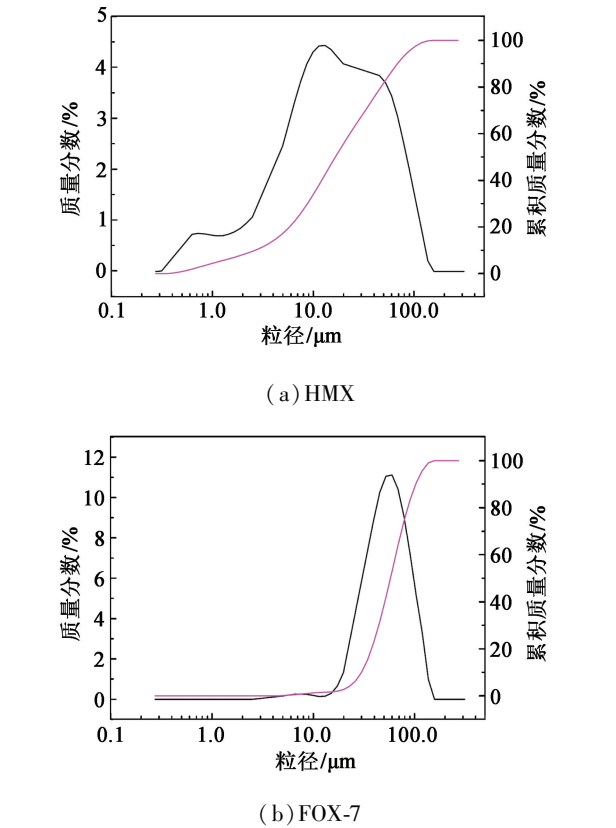


图 2 HMX 与 FOX-7 的粒径分布

Fig.2 Particle size distributions of HMX and FOX-7

表 2 常用探针液体的表面张力及分量

Tab.2 Surface tension and component of commonly used probe liquids

探针液体	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\sigma_{\text{d}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\sigma_{\text{p}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$
水	72.80	21.8	51.00	0.998 0	1.002
乙酸乙酯	23.52	19.6	3.92	0.900 3	0.443
乙二醇	48.30	29.3	19.00	1.108 8	21.800
甘油	63.40	37.0	26.40	1.261 3	1 412.000
正己烷	18.40	18.4	0	0.660 3	0.308

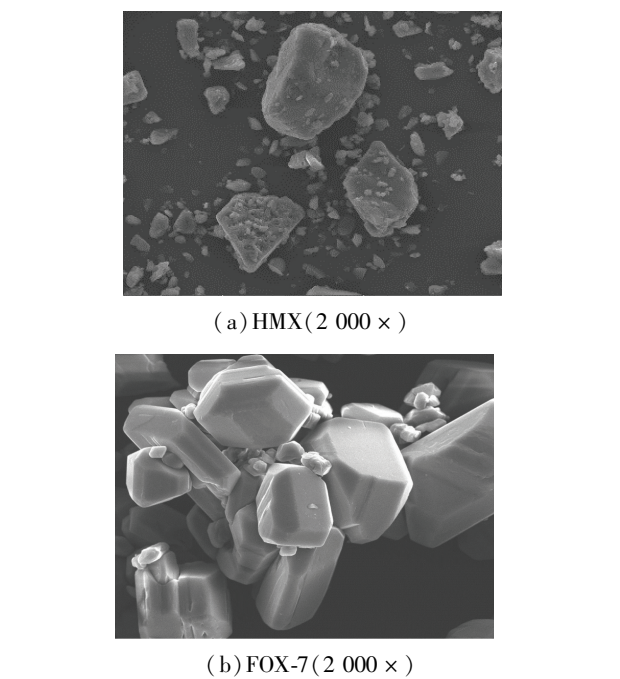


图 3 HMX 与 FOX-7 的 SEM 图

Fig.3 SEM images of HMX and FOX-7

表 2 中: σ_{d} 表示色散分量; σ_{p} 表示极性分量。

2.2 炸药表面张力分量计算

2.2.1 填充床几何因子及接触角计算

根据正己烷在 HMX 和 FOX-7 中的测试曲线 (图 4), 计算出填充床几何因子 c , 测试 3 次, 取平均值, 见表 3。计算出的接触角见表 4。

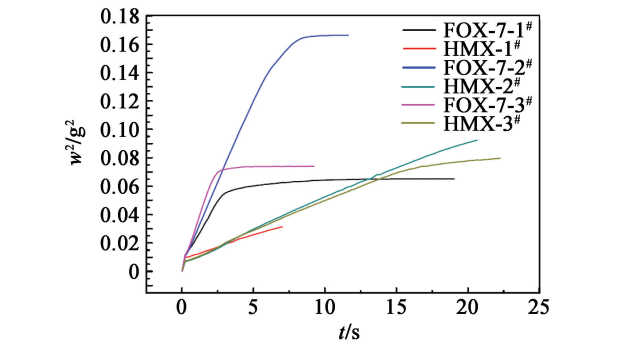


图 4 正己烷在 HMX 和 FOX-7 中的上升曲线

Fig.4 Rise curves of n-hexane in HMX and FOX-7

表 3 HMX 和 FOX-7 的 c 值

Tab. 3 c Values of HMX and FOX-7

测试序号	c	
	FOX-7	HMX
1	0.674 5	0.131 8
2	0.831 1	0.199 3
3	1.096 0	0.171 5
平均值	0.860 0	0.170 0

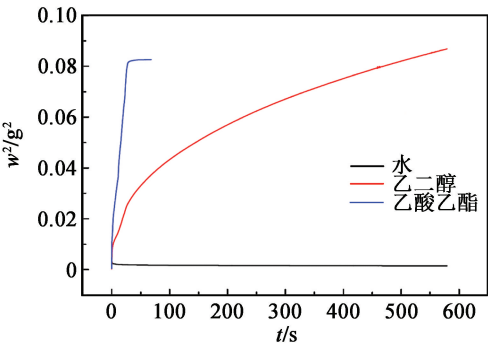
表 4 HMX、FOX-7 和探针液体的接触角

Tab. 4 Contact angles between HMX or FOX-7 and probe liquids

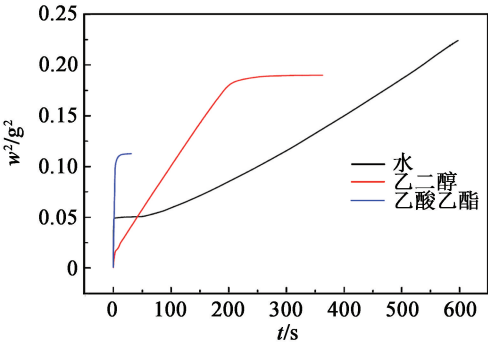
样品	$\theta/(^{\circ})$		
	水	乙二醇	乙酸乙酯
FOX-7	89.70	68.88	34.46
HMX	>90.00	79.79	70.46

2.2.2 HMX 和 FOX-7 的表面张力分量

根据水、乙二醇、乙酸乙酯在 HMX、FOX-7 中的测试数据(图 5),分别计算出 HMX、FOX-7 的表面张力分量。



(a) HMX



(b) FOX-7

图 5 探针液体在 HMX、FOX-7 中的上升曲线

Fig. 5 Rise curves of probe liquids in HMX and FOX-7

Young 方程

$$\sigma_s = \sigma_{sL} + \sigma_L \cos \theta。$$
 (2)

式中: σ_s 为固体表面张力; σ_L 为液体表面张力; σ_{sL}

为固、液两相的界面张力。

几何平均方程

$$\sigma_{sL} = \sigma_s + \sigma_L - 2\sqrt{\sigma_{sL}\sigma_{Ld}} - 2\sqrt{\sigma_{Sp}\sigma_{Lp}}。$$
 (3)

式中: σ_{sL} 为固体表面张力的色散分量; σ_{Sp} 为固体表面张力的极性分量; σ_{Ld} 为液体表面张力的色散分量; σ_{Lp} 为液体表面张力的极性分量。

从式(2)和式(3)可得:

$$1 + \cos \theta = 2 \left(\frac{\sqrt{\sigma_{sL}\sigma_{Ld}}}{\sigma_L} + \frac{\sqrt{\sigma_{Sp}\sigma_{Lp}}}{\sigma_L} \right)。$$
 (4)

令 $y = \frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot \frac{\sigma_L}{\sqrt{\sigma_{Ld}}}$, $x = \sqrt{\frac{\sigma_{Lp}}{\sigma_{Ld}}}$, $a = \sqrt{\sigma_{Sp}}$, $b = \sqrt{\sigma_{sL}}$, 则式(4)可以转化为

$$y = ax + b。$$
 (5)

根据式(5),拟合 FOX-7 的表面张力分量曲线,可以求出 $a = 2.723\ 36$ 、 $b = 3.726\ 39$,即 FOX-7 的表面张力分量 $\sigma_{Sp} = 7.42\ \text{mN/m}$ 、 $\sigma_{sL} = 13.89\ \text{mN/m}$ 。从而,FOX-7 的 $\sigma = 21.31\ \text{mN/m}$ 。

拟合 HMX 的表面张力分量曲线,可以求出 $a = 4.768\ 83$ 、 $b = 1.411\ 90$,即 HMX 的表面张力分量 $\sigma_{Sp} = 22.74\ \text{mN/m}$ 、 $\sigma_{sL} = 2.00\ \text{mN/m}$ 。从而,HMX 的 $\sigma = 24.74\ \text{mN/m}$ 。

通过测试探针液体与炸药的接触角,计算出了炸药的表面张力分量。接触角测试与粒度、粗糙度、填充床的几何因子等关系均较大。为保持 HMX 或 FOX-7 的测试分析与工艺试验条件一致,HMX 或 FOX-7 取样为同批、同箱内材料,且接触角测试时,为保证 c 相同,采用相同的药量、相同的高度。

2.3 F2603 的表面张力分量

F2603 制备成片状后,分别与甘油、水、乙二醇的接触角为 99.7° 、 98.4° 和 84.4° 。

根据接触角数据进行线性拟合,可得 F2603 的 $a = 2.855\ 9$ 、 $b = 2.270\ 7$ 。所以,F2603 的表面张力分量 $\sigma_{Sp} = 8.16\ \text{mN/m}$ 、 $\sigma_{sL} = 5.16\ \text{mN/m}$ 。

2.4 F2603 溶液的表面张力分量

2.4.1 炸药与 F2603 溶液的接触角

样品管高度一致。每个管中,FOX-7 或 HMX 质量 $0.5\ \text{g}$,振动 40 次。

FOX-7、HMX 与不同浓度 F2603 溶液的接触角测试曲线见图 6。由图 6 可计算出不同浓度 F2603 溶液与 HMX、FOX-7 的接触角,见表 5。

2.4.2 F2603 溶液的表面张力分量

HMX 和 FOX-7 的表面张力分量计算采用几何平均方程,主要是因为方程可以变换成线性关系进行曲线拟合,减少误差。F2603 溶液为低能物质,表

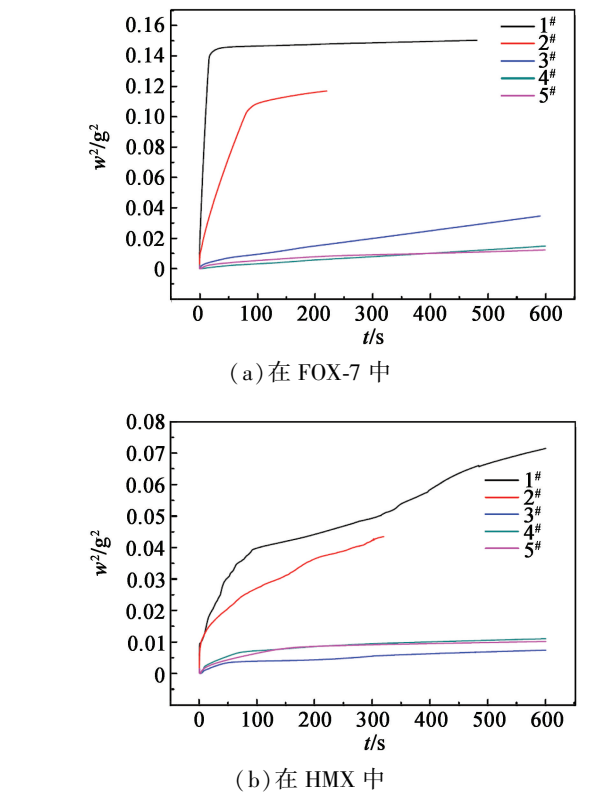


图 6 F2603 溶液的上升曲线

Fig. 6 Rise curves of F2603 solutions

表 5 炸药与 F2603 溶液的接触角

Tab. 5 Contact angles between explosives and F2603 solutions

样品	$\theta/(^{\circ})$				
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
FOX-7	0	27.35	40.36	49.11	40.38
HMX	85.06	71.30	53.47	42.11	0

面张力分量计算采用调和平均方程。

$$\sigma_{SL} = \sigma_S + \sigma_L - \frac{4\sigma_{Sd} \sigma_{Ld}}{\sigma_{Sd} + \sigma_{Ld}} - \frac{4\sigma_{Sp} \sigma_{Lp}}{\sigma_{Sp} + \sigma_{Lp}} \quad (6)$$

由式(2)和式(6)可得,

$$\sigma_L(1 + \cos \theta) = \frac{4\sigma_{Sd} \sigma_{Ld}}{\sigma_{Ld} + \sigma_{Sd}} + \frac{4\sigma_{Sp} \sigma_{Lp}}{\sigma_{Lp} + \sigma_{Sp}} \quad (7)$$

通过测试不同浓度的 F2603 溶液和 HMX、FOX-7 的接触角,计算出了不同浓度 F2603 溶液的表面张力分量,见表 6。

表 6 不同浓度 F2603 溶液的表面张力分量

Tab. 6 Surface tension components of F2603 solutions with different concentrations

表面张力及分量/(mN · m ⁻¹)	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	7% 乙酸乙酯@ 水
σ_d	15.94	15.50	12.05	9.22	6.17	27.00
σ_p	4.54	8.34	13.46	16.56	14.73	13.91
σ	20.48	23.84	25.51	25.78	20.90	40.91

从表 6 中可以看出:F2603 溶液的色散分量随着 F2603 浓度的升高呈下降趋势,说明 F2603 溶液的色散分量主要取决于乙酸乙酯的色散分量;F2603 溶液的极性分量随着 F2603 浓度的升高呈先升高、后下降的趋势,说明 F2603 溶液的极性分量取决于 F2603 和乙酸乙酯两种材料及材料之间的作用关系。根据 F2603 表面张力分量可知,F2603 的极性分量在表面张力中的占比较大(61.0%),高于乙酸乙酯的极性分量在表面张力中的占比(16.7%)。所以,F2603 含量增加时,F2603 溶液的极性增加。同时,F2603 分子和乙酸乙酯分子间可以在诱导作用下形成诱导偶极,分子经过运动,诱导偶极排列有序,产生附加的极性分量。所以,随着 F2603 浓度升高,黏结剂溶液的极性分量呈升高趋势。当 F2603 含量增加到一定程度时,黏度较高,分子运动较为困难,诱导偶极排列逐渐变得无序,产生附加的极性分量减少。所以,随着 F2603 浓度的继续升高,黏结剂溶液的极性分量呈下降趋势。

2.5 多相体系中炸药与黏结剂溶液的黏附功

水悬浮造粒为多相体系。该体系中存在多个界面。把黏结剂溶液看作一相时,则存在炸药晶体、7% 乙酸乙酯@ 水、黏结剂溶液共三相,三相间的界面关系见图 7。图 7 中: γ_{AB} 为炸药晶体与黏结剂溶液的界面张力; γ_{AC} 为炸药晶体与 7% 乙酸乙酯@ 水的界面张力; γ_{BC} 为黏结剂溶液与 7% 乙酸乙酯@ 水的界面张力。

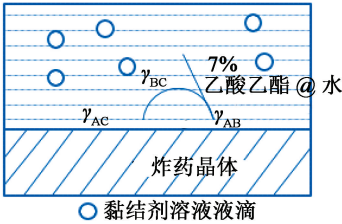


图 7 炸药-黏结剂溶液-水三相间的关系

Fig. 7 Interfacial relationship of three phases of explosives, adhesive solutions, and water

$$W = \sigma_S + \sigma_L - \sigma_{SL} = \frac{4\sigma_{Sd} \sigma_{Ld}}{\sigma_{Sd} + \sigma_{Ld}} + \frac{4\sigma_{Sp} \sigma_{Lp}}{\sigma_{Sp} + \sigma_{Lp}} \quad (8)$$

表 7 为由式(8)计算出的 HMX、FOX-7 与不同

表 7 HMX、FOX-7 与 F2603 溶液的黏附功
Tab. 7 Adhesion work between HMX or FOX-7 and F2603 solutions

炸药	$W/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$					
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	7% 乙酸乙酯@ 水
HMX	22.25	31.49	40.68	44.90	41.80	41.97
FOX-7	40.96	45.01	44.94	42.66	36.83	56.04

浓度的 F2603 溶液、7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功。

由表 7 可以得出,FOX-7 与 7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功大于 FOX-7 与 F2603 溶液的黏附功。所以,无法采用 F2603 对 FOX-7 ($D_{50}=58.19\text{ }\mu\text{m}$) 进行水悬浮造粒;HMX 与 7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功小于 HMX 与 4[#] F2603 溶液的黏附功,因此 HMX 采用 F2603 进行水悬浮造粒时,随着溶剂的挥发,造粒釜中 F2603 溶液质量分数达到 14% 时,可以成粒。

HMX/F2603、FOX-7/F2603 水悬浮造粒试验结果见图 8。粉状 HMX 黏结成明显的类球体颗粒。而 FOX-7 无法形成颗粒状,仍然呈粉状或散絮状。



(a) HMX/F2603



(b) FOX-7/F2603

图 8 水悬浮造粒效果

Fig. 8 Outcomes of water suspension granulation

2.6 黏结剂浓度对 HMX/F2603 体系造粒过程的影响

水悬浮工艺中,黏结剂浓度太高或太低时,均不易成粒。通过黏附功分析成粒时的黏结剂浓度。不同浓度的黏结剂的表面张力分量不同。分析黏结剂溶液的色散分量和极性分量对造粒过程的影响。

$$z = W(\text{HMX-7\% 乙酸乙酯@ 水}) - W(\text{HMX-F2603 溶液})。$$
 (9)

式中: $W(\text{HMX-7\% 乙酸乙酯@ 水})$ 表示 HMX 与 7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功; $W(\text{HMX-F2603 溶液})$ 表示 HMX 与 F2603 溶液的黏附功。

令 x 为 F2603 溶液的色散分量, y 为 F2603 溶液的极性分量。根据已测数据,拟合出 z 与 x 和 y 的关系,函数曲线详见图 9。

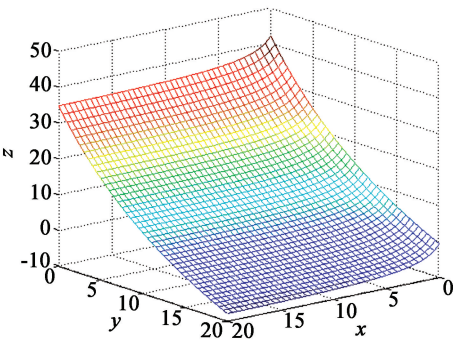


图 9 F2603 溶液的表面张力分量对成粒的影响
Fig. 9 Effect of surface tension component of F2603 solution on granulation

采用 Matlab 求出函数的极小值。当极性分量为 15 mN/m 时,函数出现极小值,根据 F2603 溶液的极性分量变化规律,4[#] F2603 溶液样品时,函数具有极小值(极小值小于 0)。表明用水悬浮法造粒时,造粒釜中 F2603 溶液在质量分数 14% 附近时,HMX 成粒。

3 结论

将水悬浮制备工艺多个参数的影响化解为黏结剂溶液浓度的影响。通过测试不同浓度的黏结剂溶液与炸药的接触角,计算了 FOX-7、HMX 与 F2603 溶液及 7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功,从而研究水悬浮成粒过程。

1) FOX-7 与 7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功(56.04 mN/m)大于 FOX-7 与 F2603 溶液的黏附功(最大为 45.01 mN/m),无法采用 F2603 对 FOX-7 ($D_{50}=58.19\text{ }\mu\text{m}$) 进行水悬浮造粒;HMX 与 7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功(41.97 mN/m)小于 HMX 与 F2603 溶液的黏附功(与 4[#] F2603 溶液为 44.90 mN/m),

可以成粒。

2)从计算及试验结果可以看出:当炸药与黏结剂溶液的黏附功小于炸药与 7% 乙酸乙酯@ 水的黏附功时,炸药不能被黏结剂溶液黏结成粒,即该炸药与黏结剂无法采用水悬浮工艺制备 PBX。

参 考 文 献

[1] 孙晓乐, 万力伦, 刘海伦, 等. 某型高聚物粘结炸药制备工艺研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(1): 76-78.
SUN X L, WAN L L, LIU H L, et al. Study on certain type PBX technique [J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(1): 76-78.

[2] 陈建元. 新型聚黑炸药制备技术的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
CHEN J Y. Study on technology of preparing RDX mould-making powder [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[3] 侯会生, 王卫星, 刘波, 等. 延期药造型粉制备工艺研究[C]//第二届全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集. 成都, 2013.

[4] 雷英春, 王晶禹. TATB/HMX 基 PBX 的水悬浮包覆工艺研究[J]. 火炸药学报, 2015, 38(4): 59-62.
LEI Y C, WANG J Y. Study on slurry coating technique for preparation of TATB/HMX based PBX [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(4): 59-62.

[5] 张树海, 张景林. PBX 传爆药制造中的界面化学问题[J]. 火工品, 2001(2): 21-23.
ZHANG S H, ZHANG J L. Interface problems in PBX booster explosives preparation [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2001(2): 21-23.

[6] FERNÁNDEZ-TOLEDANO J-C, BLAKE T D, LIMAT L, et al. A molecular-dynamics study of sliding liquid nano-

[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 548: 66-76.

[7] FERNÁNDEZ-TOLEDANO J-C, BLAKE T D, CONINCK J D. Moving contact lines and Langevin formalism [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 562: 287-292.

[8] FERNÁNDEZ-TOLEDANO J-C, BLAKE T D, CONINCK J D. Taking a closer look: a molecular-dynamics investigation of microscopic and apparent dynamic contact angles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 587: 311-323.

[9] FERNÁNDEZ-TOLEDANO J-C, BLAKE T D, CONINCK J D. Contact-line fluctuations and dynamic wetting [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 540: 322-329.

[10] SEMAL S, BLAKE T D, GESKIN V, et al. Influence of surface roughness on wetting dynamics [J]. Langmuir, 1999, 15(25): 8765-8770.

[11] BORMASHENKO E. Wetting of flat and rough curved surfaces [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2009, 113(40): 17275-17277.

[12] BLAKE T D. The physics of moving wetting lines [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 299(1): 1-13.

[13] ISRAELACHVILI J N, TABOR D. The calculation of van der Waals dispersion forces between macroscopic bodies [J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1972, 331(1584): 39-55.

[14] ISRAELACHVILI J N. Intermolecular and surface forces [M]. Academic Press, 1982.

[15] CHAUDHURY M K, WHITESIDES G M. Direct measurement of interfacial interactions between semispherical lenses and flat sheets of poly(dimethylsiloxane) and their chemical derivatives [J]. Langmuir, 1991, 7(5): 1013-1025.