文章编号：1006-9941(2017)09-0745-05

表面活性剂的 HLB 值对 HMX/聚氨酯基炸药油墨流变性能的影响

徐传豪[1]，安崇伟[1,2]，王晶禹[1,2]，叶宝云[1]，宋长坤[1]，冀　威[3]

(1. 中北大学化工与环境学院，山西 太原 030051；2. 山西省超细粉体工程技术研究中心，山西 太原 030051；3. 四川省新型含能材料军民融合协同创新中心，四川 绵阳 621000)

摘　要：为研究表面活性剂的亲水疏水平衡值(HLB 值)对炸药油墨流变性能的影响，选取 Span-80 和 Tween-80 两种非离子表面活性剂，调节其质量比配制出 5 组不同 HLB 值的混合表面活性剂，采用 Brookfield(CPS)流变仪对添加表面活性剂的细化环四亚甲基四硝胺(HMX)/聚氨酯基炸药油墨进行粘度测试，并计算出非牛顿指数、屈服值及触变指数(TI 值)。结果表明，未添加表面活性剂的炸药油墨的非牛顿指数为 0.024，屈服值为 467.08 Pa，TI 值为 36.82；表面活性剂的加入能够有效改善炸药油墨的流变性能。随着 HLB 值的升高，炸药油墨表观粘度在剪切速率为 5 ~100 s^{-1}时先升高后降低，非牛顿指数和 TI 值呈波动变化，屈服值持续降低。当 HLB 值为 11 时，炸药油墨的非牛顿指数达到最大值 0.56，屈服值达到 5.38 Pa，TI 值达到最小，为 8.26，分别为未添加表面活性剂炸药油墨的 23.33 倍，1.15% 和 21.53%。HLB 值为 11 的表面活性剂更有利于改善炸药油墨的流变性能。

关键词：炸药油墨；亲水疏水平衡值(HLB 值)；粘度；非牛顿指数；屈服值；触变指数(TI 值)

中图分类号：TJ55　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11943/j.issn.1006-9941.2017.09.008

1　引　言

炸药油墨，是一种以炸药作为“颜料”，与粘结剂溶液或乳液组成悬浮体系，利用直写平台或喷墨打印机，实现含能材料的逐层堆积。与传统的压装和熔铸装药相比，这种装药方式更加准确和精确，有利于微机电系统(Micro Electro Mechanical System，MEMS)火工品及军用传感器中的微尺寸装药[1-2]。

目前，炸药油墨的研究主要集中在中美两国。2011 年，美国研制出了六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)为基的 EDF-11 炸药油墨，以直写形式实现了 MEMS 组件上的图形化，并且通过了美军传爆药资格认证[2]。同年，邢宗仁等[3]配制出了质量比为 1∶1 的斯蒂芬酸铅/紫外光固化树脂和质量比 95/5 的斯蒂芬酸铅/硝化棉炸药油墨，可用于 MEMS 微推进芯片装药。此外，Ihnen 等[4]探索了 RDX/乙酸丁酸纤维素基炸药油墨，形成的复合物中 RDX 颗粒的大小约为 300 nm。2013 年，朱自强等[5]设计了 CL-20/聚乙烯醇/乙基纤维素/水/异丙醇为主的炸药油墨，书写良好，最小线宽可达 80.2 μm。2014 年，Stec Ⅲ等[6]报道了可用于 MEMS 火工品中的 CL-20/聚乙烯醇/乙基纤维素油墨配方。2016 年，Wang 等[7]研制出了 CL-20/聚叠氮缩水甘油醚(GAP)基炸药油墨，可用于微尺度装药，临界爆轰尺寸小于 0.4 mm×0.4 mm。同年，姚艺龙等[8]对纳米 CL-20/硝化棉基炸药墨水的直写成型规律进行了研究，得出了压力、针头直径、喷头高度等对成型效果的影响。以上这些研究主要集中在配方的研制及加工成型工艺上，对炸药油墨流变性能的研究并不多见。

在炸药油墨加工过程中，流变性能起着非常重要的作用，具体表现为：粘度过大，会导致出油墨不畅或堵塞；粘度过小，有可能引起炸药油墨直写过程中出胶不稳[9-10]。而为保证炸药油墨足够的能量，往往固含量很高，粘度较大，通常需添加助剂改善流变性能[11]。表面活性剂具有亲水基团和亲油基团，能够改善溶液界面状态，作为一种助剂添加到油墨中，能起到降粘、降低表面张力、改善流变性等作用[12-13]；其亲水亲油性能可以用亲水疏水平衡值(HLB 值)表示，HLB 值越大，代表亲水性越好，反之，亲油性越好。研究表面活性剂的 HLB 值对炸药油墨流变性能的影响，探索出 HLB 值对炸药油墨的影响规律，一方面有助于

收稿日期：2016-10-08；**修回日期：**2017-06-09

基金项目：山西省研究生教育创新项目资助(2016BY119)；山西省优势学科攀升计划支持

作者简介：徐传豪(1991-)，男，在读博士，主要从事新型传爆药研究。e-mail：18434363821@126.com

通信联系人：安崇伟(1980-)，男，副教授，主要从事始发与中继能源技术研究。e-mail：anchongwei@yeah.com

表面活性剂的筛选，另一方面也可以对炸药油墨的加工起到一定的辅助作用。

基于此，本研究选取了目前综合性能最好的环四亚甲基四硝胺（HMX）为主体炸药，通过重结晶细化降低其临界爆轰尺寸[14]，并与水性聚氨酯乳液及其他添加剂混合，配制出细化 HMX/水性聚氨酯炸药油墨；调节 Span-80 和 Tween-80 的含量配制出不同 HLB 值的表面活性剂，添加到炸药油墨中。利用流变仪对配制的炸药油墨进行测试，根据表观粘度值计算出非牛顿指数、屈服值及触变指数（TI 值）等流变参数，分析 HLB 值对炸药油墨流变性能的影响。

2 实验

2.1 试剂与仪器

HMX 原料，中国兵器工业集团 805 厂；二甲基亚砜，分析纯，天津光复精细化工研究所；D-60A 型水性聚氨酯乳液，水性增稠剂，上海润道贸易有限公司；去离子水，山西漪汾饮料食品有限公司；Span-80，分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；Tween-80，分析纯，天津市申泰化学试剂有限公司。

仪器：Brookfield（CPS）流变仪，德国蔡司 evo18 扫描电镜（SEM）。

2.2 细化 HMX 的制备

采用溶剂-非溶剂法重结晶细化 HMX，以二甲基亚砜为溶剂，去离子水为非溶剂；将 30 g 原料 HMX 溶解到 80 mL 二甲基亚砜中；以 1 mL·s^{-1}速度，将 HMX 溶液滴加到 1200 mL 去离子水中，在 400 r·min^{-1}的搅拌速度下搅拌 5 ~10 min；经过过滤、洗涤、冷冻干燥 6 h、研磨，制得细化 HMX。

2.3 不同 HLB 值表面活性剂的配制

HLB 值的计算可以利用公式[15]：

$$HLB_{AB}=(HLB_A\times M_A+HLB_B\times M_B)/(M_A+M_B) \quad (1)$$

式中，M_A与 M_B表示 A、B 两种表面活性剂的质量。已知 Span-80 与 Tween-80 的 HLB 值分别为 4.3 与 15.0[16]，通过调整含量配制出 HLB 值为 5，7，9，11，13 等 5 组混合表面活性剂，如表 1 所示。

2.4 炸药油墨的配制

将去离子水（39.5%）添加到水性聚氨酯乳液（20%）中，超声混合均匀；依次加入细化 HMX（40%）及水性增稠剂（0.5%），以 100 r·min^{-1}的转速，搅拌 15 min，制得基础炸药油墨。以基础炸药油墨质量的 2%作为表面活性剂的含量，将表面活性剂加入到基础油墨中，在 60 r·min^{-1}的转速下搅拌 15 min，得到不同 HLB 值的炸药油墨。

表 1 混合表面活性剂中各组分质量分数

Table 1 Mass percentage of mixed surfactants components

number	HLB number	Span-80 /%	Tween-80 /%
KB	–	0	0
1#	5	88.65	11.35
2#	7	74.81	25.19
3#	9	56.06	43.94
4#	11	37.40	62.60
5#	13	18.65	81.35

Note: KB represents the formulation without surfactants.

2.5 粘度的测试

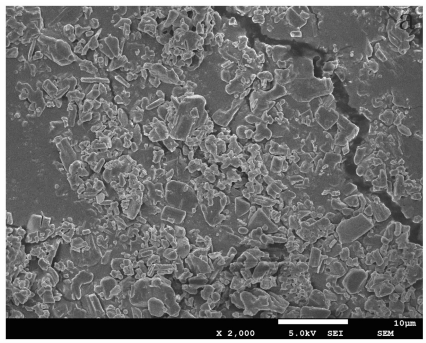
室温（25 ℃）下利用 Brookfield（CPS）中的旋转梯度模块，对炸药油墨的粘度进行测试，转速分别为 5 ~100 s^{-1}和 1 ~20 s^{-1}；采用恒定梯度模块，对炸药油墨在剪切速率为 0.1 s^{-1}及 1 s^{-1}时的粘度进行测试；测试时间为 60 s，测量点数 60 个。

3 结果与分析

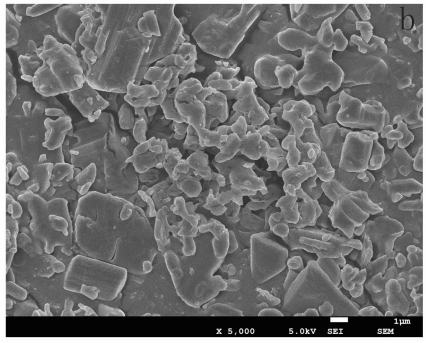
3.1 细化 HMX 的 SEM 图

细化 HMX 颗粒的 SEM 图见图 1。

由图 1 可知，细化 HMX 颗粒大小均处于 5 μm 以下，部分颗粒为亚微米，但颗粒形状不太规整，无明显团聚现象。



a. ×2000



b. ×5000

图 1 不同放大倍数下细化 HMX 的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photos of ultrafine HMX under different magnification times

3.2 炸药油墨的粘度

图 2 为不同 HLB 值下的炸药油墨的粘度随剪切速率的变化曲线,从图 2 可以看出,炸药油墨表观粘度值随剪切速率的升高而降低; KB 到 5#的表观粘度值历经升高、降低、再稍微升高三个过程; 1#的表观粘度大于 KB,4#时达到最小,这是由于 HLB 值为 5 时,混合表面活性剂中 Span-80 的含量较高,亲油基团数量高于亲水基团,在炸药油墨中形成的乳化剂膜更加厚实致密,溶剂化效应增强,粘度增大[17]。从 2#到 5#,亲水基团数量逐渐大于亲油基团,而炸药油墨体系中水含量较多,亲油基团指向炸药颗粒及聚氨酯,亲水基团指向水,体系中悬浮颗粒之间的相互作用力减小,表观粘度值降低[18]。在 4#样品中,即表面活性剂的 HLB 值为 11 时,表面活性剂与炸药油墨体系中亲水和亲油基团可能达到平衡,致使颗粒间相互作用力最小,从而表观粘度值最小 。

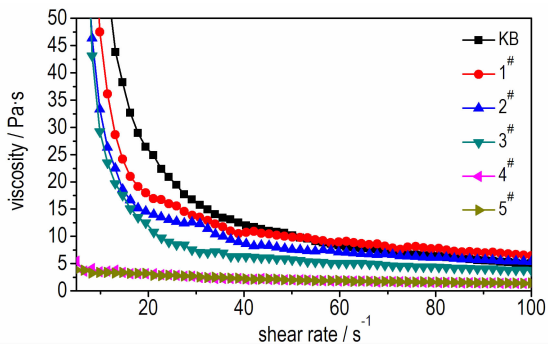


图 2 不同 HLB 值下的炸药油墨的粘度随剪切速率的变化曲线

Fig. 2 Viscosity curves of basic explosive ink along with shear rate under different HLB numbers

3.3 表面活性剂的 HLB 值对炸药油墨非牛顿指数的影响

从 3.2 中炸药油墨粘度剪切稀化现象可以得出炸药油墨属于假塑性流体[19]。对于假塑性流体而言,剪切速率对粘度的影响可以通过幂律模型[20]来表示:

$$\eta = K\times\gamma^{n-1} \tag{2}$$

式中,η 代表表观粘度,Pa·s; γ 为剪切速率,s^{-1},K 为相关系数,n 为非牛顿指数。非牛顿指数的大小反应的是油墨体系对剪切速率的敏感程度,n 值越大,表明悬浮体系对剪切速率的敏感程度较小,炸药油墨的稳定性越好; n 值过小,会导致炸药油墨在直写过程中受外界环境的影响较大,一个小的波动可能会使悬浮体系遭到破坏,致使堵塞针头,不利于直写成型。

将式(2)两边取对数,可得:

$$\lg\eta = \lg K + (n-1)\lg\gamma \tag{3}$$

表 2 不同 HLB 值下炸药油墨的幂律模型

Table 2 Powel law model of explosive inks under different HLB numbers

number	HLB number	non-newtonian index	correlation coefficent	fitting degree
KB	–	0.024	459.86	0.9817
1#	5	0.52	64.42	0.9799
2#	7	0.35	96.44	0.9856
3#	9	0.31	82.88	0.9821
4#	11	0.56	11.10	0.9800
5#	13	0.35	25.38	0.9847

选取剪切率为 50 s^{-1}左右的 7 个点作为代表,计算出不同 HLB 值下的非牛顿指数,具体数值如表 2 所示。从表中可以看出,1#、2#、3#、4#和 5#的非牛顿指数分别为 KB 的 21.67、14.58、12.92、23.33 和 14.58 倍,且 4#最大。说明表面活性剂的加入大大提高了炸药油墨体系在剪切过程中的稳定性,而 HLB 值为 11 的表面活性剂对于改善基础炸药油墨剪切过程中的稳定性效果最好。这是因为在剪切力作用下,悬浮体系会被剪切成一个个小的单元,且单元随着剪切力的增大而减小; 表面活性剂中的加入,致使小单元中的分子有序排列,防止剪切过程中的絮凝[21-22]。

3.4 表面活性剂的 HLB 值对炸药油墨屈服值的影响

屈服值的大小代表着炸药油墨由静止向流动转变的难易程度。屈服值越大,表明炸药油墨悬浮体系中炸药颗粒之间的相互作用越强,由静止向流动所需要的剪切力就越大。屈服值的大小一般可以用卡松模型[23]来计算:

$$\tau^{1/2} = \tau_y^{1/2} + c^{1/2}\times\gamma^{1/2} \tag{4}$$

式中,τ_y屈服值,τ 为剪切应力,Pa; γ 为剪切速率,s^{-1}; c 为系数。由式中可以看出,$\gamma^{1/2}$ 和 $\tau^{1/2}$ 呈线性关系。选取 15 s^{-1}剪切速率左右的 5 个点,通过对 $\gamma^{1/2}$ 和 $\tau^{1/2}$ 进行拟合,可以计算出 $\tau_y^{1/2}$,对 $\tau_y^{1/2}$取平方值得 τ_y。

表 3 为不同 HLB 值下炸药油墨的卡松模型值,由表 3 可以看出,1#到 5#炸药油墨的屈服值随着 HLB 值的升高而逐渐降低,4#和 5#最为明显,分别为基础炸药油墨的 1.15% 和 4.28×10^{-4}%,成几何倍数降低。主要原因在于,表面活性剂具有两亲性,HLB 值小于 7 时,表面活性剂起到油包水(W/O)乳化作用,而大于 7 时起到水包油乳化作用(W/O)[24],两种作用均有助于降低悬浮颗粒之间相互作用力。由于炸药油墨体系中水含量较多,表面活性剂中的亲水基团得以完全铺展,炸药颗粒间相互作用力更小,在剪切力作用下更容易由静止转向流动。但是,屈服值过小,并不利于炸

药油墨的加工，如5#的屈服值为0.0020 Pa，远远小于KB的467.08 Pa，外界一个很小的剪切应力就有可能改变油墨的状态。综合考虑，HLB为11时的表面活性剂更适合用来改善炸药油墨的流动性。

表3 不同HLB值下炸药油墨的卡松模型

Table 3 Casson Model of explosive inks under different HLB numbers

number	HLB number	yield value /Pa	correlation coefficent	fitting degree
KB	–	467.08	0.39	0.9816
1#	5	280.49	0.19	0.9864
2#	7	228.22	0.12	0.9893
3#	9	179.95	0.40	0.9817
4#	11	5.38	1.49	0.9799
5#	13	0.002	1.02	0.9973

3.5 表面活性剂的HLB值对炸药油墨触变性的影响

触变性是描述液体在一定剪切速率下粘度随时间变化的物理量。通常情况下，触变性较好的悬浮体系表现为高剪切力下粘度降低，低剪切力下粘度升高。触变性的好坏一般用触变指数（Thixotropic Index，TI值）来表示[25]。

$$TI=\eta_{0.1}/\eta_1 \quad (5)$$

式中，$\eta_{0.1}$和η_1分别表示0.1 s^{-1}及1 s^{-1}剪切速率下炸药油墨的表观粘度值，Pa·s。TI值的大小表示悬浮体系在剪切力破坏后恢复原有结构能力的强弱；TI值越高，恢复能力越强，悬浮体系的稳定性越好。

表4 不同HLB值下炸药油墨的TI值

Table 4 TI values of explosive inks under different HLB numbers

number	HLB number	$\eta_{0.1}$ /Pa·s	η_1 /Pa·s	TI value
KB	–	7502.63	203.75	36.82
1#	5	5502.58	143.43	38.37
2#	7	2298.78	30.04	76.53
3#	9	3497.31	149.75	23.36
4#	11	2723.95	329.88	8.26
5#	13	9909.66	448.78	22.08

表4为不同HLB值下炸药油墨的TI值，由表4中可以得出，1#和2#的TI值均大于KB，3#、4#和5#的TI值均小于KB，且4#达到最小，为KB的21.53%。原因可能在于当HLB值为7时，表面活性剂中亲水基团和亲油基团数目相等，表现出两亲性，对悬浮体系中分子间作用力的弱化影响最小，致使油墨体系受剪切后在力的作用下容易恢复；而HLB值为11时，炸药颗粒的分子间作用力最小，受到剪切力作用被切割成小的单元之后，颗粒之间的作用力不足以支持重新恢复到原有状态。但是对于炸药油墨的成型而言，由于直写成型技术采用的堆积/去除原理，炸药油墨在书写到基板上后需要将溶剂挥发出去，如果分子间作用力过大，不利于水分子的挥发，进而不利于加工成型，对比分析表4中的数据可以看出HLB值为11时，更有利于炸药油墨的直写成型。

4 结 论

（1）表面活性剂的加入有效降低了炸药油墨的粘度，随着HLB值的增大，表观粘度逐渐降低，当HLB值为11时，降粘效果最好。

（2）表面活性剂的加入使得油墨体系的非牛顿指数升高，且随着HLB值的增大出现了一些波动，表明表面活性剂的加入对于稳定油墨体系起到了促进作用，当HLB值为11时，效果最好。

（3）炸药油墨的屈服值，随着HLB值的增大而减小，在HLB值为11及13时效果特别明显，说明亲水性的表面活性剂有助于炸药油墨由静止转为流动，HLB为11时的表面活性剂更适合基础炸药油墨。

（4）TI值分别在HLB值为7和11时取得最大值和最小值，且HLB值为9、11、13时均小于基础油墨，说明HLB值为7左右时的表面活性剂有助于炸药油墨受剪切后的恢复，而11时的表面活性剂更有利于炸药油墨的直写成型。

（5）综合考虑，HLB值为11的表面活性剂为提高基础炸药油墨流变性的最佳选择。

参考文献：

[1] Zunino III J L, Schmidt D P, Petrock A M, et al. Inkjet printed devices for armament applications[J]. *Nanotechnology*, 2010: 542-545.

[2] Ihnen A, Lee W, Fuchs B, et al. Inkjet Printing of Nanocomposite High-Explosive Materials for Direct Write Fuzing[C]// 54th Fuze Conference, Kansas City, MO, May. 2010: 11-13.

[3] 邢宗仁. 含能材料三维打印快速成形技术研究[D]. 南京：南京理工大学，2012.
XING Zong-ren. Research of three-dimensional printing for energetic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.

[4] Ihnen A C, Petrock A M, Chou T, et al. Crystal morphology variation in inkjet-printed organic materials[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 258(2): 827-833.

[5] 朱自强，陈瑾，谯志强，等. CL-20基直写炸药油墨的制备与表征[J]. 含能材料，2013，21(2)：235-238.
ZHU Zi-qiang, CHEN Jin, QIAO Zhi-qiang, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*), 2013, 21(2): 235-238.

[6] Stec Ⅲ D, Wilson A, Fuchs B E, et al. High explosive fills for MEMS devices: U.S. Patent 8636861[P]. 2014-1-28.
[7] Wang D, Zheng B, Guo C, et al. Formulation and performance of functional sub-micro CL-20-based energetic polymer composite ink for direct-write assembly[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(113): 112325-112331.
[8] 姚艺龙, 吴立志, 唐乐, 等. 纳米 CL-20 炸药含能墨水的直写规律[J]. 火炸药学报, 2016, 39(1): 39-42.
YAO Yi-long, WU Li-zhi, TANG Yue, et al. Direct writing rule of nano-CL-20 explosive energetic ink[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(1): 39-42.
[9] 王小锋, 孙月花, 彭超群, 等. 直写成型用悬浮液的设计[J]. 无机材料学报, 2015, 30(11): 1139-1147.
[10] Lewis J A, Smay J E, Stuecker J, et al. Direct ink writing of three-dimensional ceramic structures[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(12): 3599-3609.
[11] 朱自强. 基于 CL-20 的直写炸药墨水的设计与性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2013.
ZHU Zi-qiang. Design and characterization of CL-20 based explosive ink for direct write[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2013.
[12] 张俊, 李忠平, 董川. 表面活性剂在墨水制造中的应用[J]. 日用化学工业, 2004, 34(6): 381-384.
ZHANG Jun, LI Zhong-ping, DONG Chuan. Application of surfactants in ink manufacture[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2004, 34(6): 381-384.
[13] 刘东亮. 表面活性剂溶液动态表面张力与印染加工应用的关系[D]. 上海: 东华大学, 2014.
LIU Dong-liang. The relationship between the dynamic surface tension of the surfactant solution and the application in printing and dyeing[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
[14] 李晓刚, 焦清介, 温玉全. 超细钝感 HMX 小尺寸沟槽装药爆轰波传播临界特性研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 428-431.
LI Xiao-gang, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan. Critical characteristic of detonation propagation of superfine desensitived HMX charge in channel[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (*Hanneng Cailiao*), 2008, 16(4): 428-431.
[15] 任俊, 沈健, 卢寿慈. 颗粒分散科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 250-257.
REN Jun, SHEN Jian, LU Shou-ci. Science and Technology of Particle Dispersion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 250-257.
[16] 颜肖慈, 罗明道. 界面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 44-45.
YAN Xiao-ci, LUO Ming-dao. Interface Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 44-45.
[17] 许晓鹏, 魏慧贤, 麻建国, 等. 乳化剂的复配对 w/o/w 型复乳稳定性影响的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2007, 23(3): 280-285.
XU Xiao-peng, WEI Hui-xian, MA Jian-guo, et al. Study on influence of buildup and concentration of emulsifiers on stability of w/o/w multiple emulsions[J]. *Journal of Harbin University of Commerce*(*Natural Sciences Edition*), 2007, 23(3): 280-285.
[18] 任俊, 沈健, 卢寿慈. 颗粒分散科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 116-118.
REN Jun, SHEN Jian, LU Shou-ci. Science and Technology of Particle Dispersion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 116-118.
[19] 沈娟, 黄敢良, 夏建波, 等. 分散剂及黄原胶对多菌灵悬浮剂流变性质的影响[J]. 农药学学报, 2008, 10(3): 354-360.
SHEN Juan, HUANG Qi-liang, XIA Jian-bo, et al. The effects of dispersant and Xanthan Gum to rheological property of carbendazim suspension[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2008, 10(3): 354-360.
[20] Handbook of plastic materials and technology[M]. New York: Wiley, 1990.
[21] Li H X, Wang J Y, An C W. Study on the rheological properties of CL-20/HTPB casting explosives[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2014, 11(2): 237-255.
[22] Liu D M. Rheology of aqueous suspensions containing highly concentrated nano-sized zirconia powders[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1998, 17(22): 1883-1885.
[23] Dash R K, Mehta K N, Jayaraman G. Casson fluid flow in a pipe filled with a homogeneous porous medium[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1996, 34(10): 1145-1156.
[24] 沈钟, 赵振国, 康万利. 胶体与表面化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 110-115.
SHEN Zhong, ZHAO Zhen-guo, KANG Wan-li. Colloid and Surface Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 114-115.
[25] 赵蓉旭, 赵举. 流变助剂对高极性溶剂型涂料性能影响研究[J]. 中国涂料, 2016, 31(2): 34-38.
ZHAO Rong-xu, ZHAO Ju. Study on influence of rheological additives on properties of high-polarity solvent-based coatings[J]. *China Coatings*, 2016, 31(2): 34-38.

Effect of HLB Numbers of Surfactants on the Rheological Property of HMX/Polyurethane Based Explosive Ink

XU Chuan-hao[1], **AN Chong-wei**[1,2], **WANG Jing-yu**[1,2], **YE Bao-yun**[1], **SONG Chang-kun**[1], **JI Wei**[3]
(1. *Chemical Industry and Ecology Institute, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*; 2. *Shanxi Engineering Technology Research Center for Ultrafine Powder, Taiyuan* 030051, *China*; 3. *Sichuan Co-Innovation Center for New Energetic Materials, Mianyang* 621000, *China*)

Abstract: In order to investigate the effect of hydrophile-lipophile balance (HLB) numbers on the rheological properties of explosive inks, two nonionic surfactants of Span-80 and Tween-80 were selected to obtain 5 kinds of mixed surfactants with different HLB number by adjusting mass percentage. Whereafter, the viscosity of explosive ink with mixed surfactants was tested by means of Brookfield (CPS) rheometer and non-Newtonian index, yield values and thixotropic index(TI) were calculated at same time. Results indicate that for the explosive ink without surfactant the non-ewtonian index is 0.024, yield value is 467.08 Pa and TI value is 36.82, respectively, and the rheological properties of explosive ink will be effectively improved with the addition of surfactants. With the increasing of HLB number, the apparent viscosity of explosive ink will keep up at first and then down with the shear rate ranging from 5 s^{-1} to 100 s^{-1}. Meanwhile, non-Newtonian index and TI values fluctuate while yield vales continuously decrease. When HLB number is 11, the non-Newtonian index reaches the maximum 0.56, while the yield value attains the optimum value 5.38 Pa with TI value being the minimum 8.26, which are 23.33 times, 1.15% and 21.53% respectively compared with those of the explosive ink without surfactants. The surfactant with whose HLB number is 11 performs best in improving rheological property of explosive ink.

Key words: explosive ink; hydrophile-lipophile balance(HLB) number; viscosity; non-Newtonian index, yield value; thixotropic index(TI)
CLC number: TJ55 **Document code**: A **DOI**: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.09.008