

文章编号: 1006-9941(2015)08-0760-06

卵磷脂对 HTPB-苯乙烯溶液流变特性的影响

谢虢, 鲁洪, 王云, 罗观

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 采用黏度法考察卵磷脂对端羟基聚丁二烯(HTPB)-苯乙烯溶液流变特性的影响。以黏度变化因子 $|C|$ 为指标, 表征卵磷脂与 HTPB 分子间相互作用大小, 通过这一方法, 探讨了混合溶液体系中卵磷脂与 HTPB 的共混行为, 同时比较了两者相对含量变化对其相互作用的影响。结果表明: 随着卵磷脂含量增加, 溶液的黏度随之增大, 呈现出更加显著的非牛顿流体特性; 而混合溶液的流动活化能(E)呈现先减小后增大的趋势, HTPB 与卵磷脂分子间相互作用呈现先增大后减小的趋势。当卵磷脂质量分数增加至 0.053 时, $|C|$ 增至最大值 0.165, E/R 降至最小值, 1004.9。

关键词: 端羟基聚丁二烯(HTPB); 卵磷脂; 聚合物溶液; 流变特性

中图分类号: TJ55; O63

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.08.010

1 引言

在浇注固化高聚物粘结炸药的生产中, 通常需要在物料混合阶段加入润湿剂以改善液体组分对固体物料的润湿、包覆效果。卵磷脂(磷脂酰胆碱, Phosphatidylcholine)是动植物细胞膜、核膜、质体膜等生物膜的基本成分, 是生命的基础物质之一, 其分子结构中的两个脂肪酸链为疏水基, 磷酸和胆碱等基团为亲水基^[1-3], 具有一系列表面活性剂性质, 具有润湿效果好、体系相容性好等优势, 应用较为广泛。

现有研究关注的是卵磷脂作为表面活性剂, 改善液体浸润效果或形成胶束、双分子层的能力^[4-6]。在浇注固化炸药成型的物料混合阶段, 卵磷脂可改善液体聚合物对固体颗粒的浸润性能, 但表面活性剂/聚合物体系本身就具有某些特殊性质, 如聚合物溶液的流变性质会随表面活性剂浓度改变而显著变化, 这种变化将直接影响浇注固化炸药物料体系的流变特性。

端羟基聚丁二烯(HTPB)是混合物料中的液体聚合物组分, 苯乙烯(ST)是常被用于改善物料流动性能的一种稀释剂。目前还未见 HTPB 与 ST 的混合体系流变性能研究的报道。

为此, 本研究选取 ST 作为溶剂, 以卵磷脂-HTPB-ST 三元体系作为研究对象, 采用旋转黏度计测定体系在不同条件下的流变参数, 讨论卵磷脂对 HTPB 的 ST 溶液流变性能的影响, 以及体系中卵磷脂与 HTPB 的共混行为, 以期揭示卵磷脂、HTPB 分子间相互作用的规律, 为物料体系的流变性能预估、控制其流变行为提供依据。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

HTPB, 工业品, 羟值 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$, 黎明化工研究院, $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 减压蒸馏 3 h 后使用; 卵磷脂, 生化试剂, 国药集团化学试剂有限公司; ST, 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司; Brookfield 旋转黏度计 DV-III ultra, Brookfield Engineering Laboratories 公司。

2.2 实验过程

2.2.1 HTPB 与 ST 的共混相容性测试

采用稀溶液黏度法^[7], 通过测定不同比例 ST 稀释的 HTPB 溶液黏度研究体系共混相容性。若混合溶液黏度与 HTPB 浓度线性相关系数越大, 则 HTPB 与溶剂 ST 共混相容性越好。首先将 HTPB 溶于 ST 中, 搅拌均匀, 制备不同质量分数的 HTPB 的 ST 溶液, 将溶液倒入盛样容器中, 选择 21 号转子, 测定相同温度 ($30 \text{ }^\circ\text{C}$)、剪切速率 (233 s^{-1}) 下, 不同 HTPB 的 ST 溶液黏度(以读数稳定后的数据为准)。

收稿日期: 2014-07-08; 修回日期: 2014-12-14

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2012B0302038)和中国工程物理研究院-国家自然科学基金委联合基金资助重点课题(11076002)

作者简介: 谢虢(1986-), 男, 研究实习员, 主要从事含能材料应用等研究。e-mail: xiex05@163.com

2.2.2 HTPB 的 ST 溶液流变特性测试

使用旋转黏度计测定不同剪切速率(149 ~ 233 s⁻¹)下 HTPB 的 ST 溶液的剪切应力。

2.2.3 不同卵磷脂含量的卵磷脂-HTPB-ST 体系样品制备

称量卵磷脂充分溶解于 ST 中,再加入 HTPB 并将混合溶液搅拌均匀,制备成编号为 1[#] ~ 12[#] 的样品,各样品的卵磷脂含量(Φ)不完全相同,而其他制备条件完全相同。

2.2.4 卵磷脂-HTPB-ST 体系的流变特性测试

使用旋转黏度计测定在不同剪切速率、不同卵磷脂含量条件下,HTPB 的 ST 溶液的剪切应力。

2.2.5 不同温度下卵磷脂-HTPB-ST 体系的流变特性测试

使用旋转黏度计测定在不同温度条件下(50 ~ 55 °C, 每间隔 1 °C 测定一次,即每个混合溶液样品共有 6 个测量点),卵磷脂-HTPB-ST 体系的剪切应力。

3 结果与讨论

3.1 HTPB 与 ST 的共混相容性

为检验 HTPB 能否溶于 ST 中形成稳定的聚合物溶液,首先需要判定两者的共混相容性。一般采用 Hildebrand 溶解度参数(δ)判断聚合物与溶剂的共混相容性^[8],聚合物与溶剂的 δ 差值越小,两者的共混相容性越好,当其差值不大于 3.07 J^{0.5} · cm^{-1.5} 时,该聚合物是能够溶于溶剂的^[9]。聚合物的溶解度参数可由重复单元中各基团的摩尔引力常数直接相加得到。

将 HTPB 重复单元中各基团的摩尔引力常数相加可得 $\delta_{\text{HTPB}} = 15.78 \text{ J}^{0.5} \cdot \text{cm}^{-1.5}$,而 ST 的溶解度参数 $\delta_{\text{ST}} = 17.75 \text{ J}^{0.5} \cdot \text{cm}^{-1.5}$,所以 $\delta_{\text{ST}} - \delta_{\text{HTPB}} = 1.97 \text{ J}^{0.5} \cdot \text{cm}^{-1.5}$,两者共混相容性较好,HTPB 可溶于 ST 中。为了进一步验证 HTPB 与 ST 的共混相容性,采用稀溶液黏度法,测定了不同比例 ST 稀释的 HTPB 溶液的黏度。结果如表 1 和图 1 所示。

表 1 不同质量分数 HTPB 的 ST 溶液的黏度

Table 1 Viscosities of HTPB-ST solutions with different mass fraction of HTPB

mass fraction of HTPB	viscosity/Pa · s
0.3636	0.0236
0.4000	0.0332
0.4324	0.0426
0.4615	0.0508
0.5000	0.0660

从图 1 可以看出,HTPB 质量分数与溶液黏度两者线性相关性良好,证实 HTPB 与 ST 良好的共混相容性,即 HTPB 可溶解于 ST 中形成稳定的聚合物溶液。

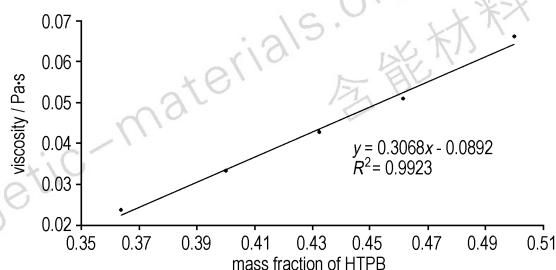


图 1 HTPB 质量分数与溶液黏度的关系

Fig. 1 Relationship between HTPB mass fraction and solution viscosity

3.2 HTPB-ST 体系流变特性

为与卵磷脂-HTPB-ST 体系流变特性进行对比,首先探讨不同剪切速率下 HTPB 的 ST 溶液流变特性。剪切速率 γ 与剪切应力 σ 满足幂律公式^[10]:

$$\sigma = K \cdot \gamma^n \quad (1)$$

式中, γ 为剪切速率, s⁻¹; σ 剪切应力, N · m⁻²; K 为常数; n 为流动指数,用以表征体系流变性能偏离牛顿流体的程度。

写成对数形式为:

$$\lg \sigma = \lg K + n \lg \gamma \quad (2)$$

不同剪切速率下 HTPB 的 ST 溶液的剪切应力见表 2,体系的流动曲线($\lg \sigma - \lg \gamma$)见图 2。

表 2 不同剪切速率下 HTPB 的 ST 溶液的剪切应力

Table 2 Viscosities of HTPB-ST solution at different shear rates

γ/s^{-1}	$\sigma/\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$\lg(\gamma/\text{s}^{-1})$	$\lg(\sigma/\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$
149	4.93	2.17	0.70
158	5.25	2.20	0.72
167	5.58	2.22	0.75
177	5.86	2.25	0.77
186	6.09	2.27	0.78
195	6.51	2.30	0.81
205	6.79	2.31	0.83
214	7.16	2.33	0.85
223	7.44	2.35	0.87
233	7.72	2.37	0.89

Note: γ is shear rate; σ is shear stress.

由图 2 可知,所得流动曲线是一条斜率为 0.9982

的直线,因此,HTPB 溶液的牛顿流体流动指数为 1。说明在此剪切速率范围内,HTPB 溶液处于第一牛顿区。将此直线外推与 $\lg\gamma = 0$ 的直线相交,可得 $K = 0.0318$,即 HTPB 溶液的零切黏度 $\eta_0 = 0.0318 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。作 σ 对 γ 的曲线,取截距为 0,可得此溶液的表现黏度 $\eta = 0.0332 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

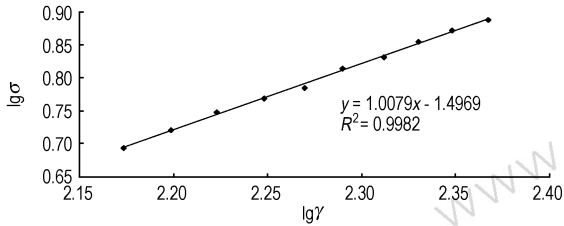


图 2 HTPB-ST 溶液流动曲线

Fig. 2 Flow curve of HTPB-ST solution

3.3 卵磷脂对 HTPB 的 ST 溶液流变性能的影响规律

测定 3 种不同卵磷脂质量分数 (ϕ) 的 HTPB-ST 溶液在不同剪切速率下的剪切应力,并按照 3.2 节中的方法对其进行处理,相应地得到 3 条流动曲线(图 3)。

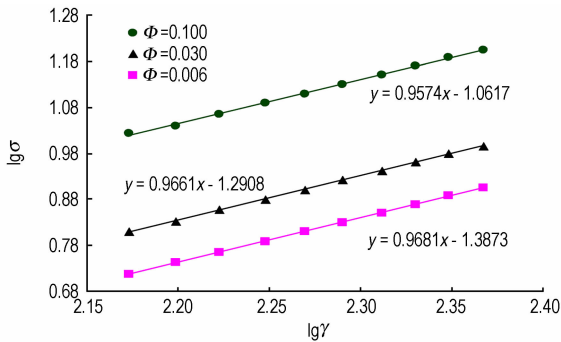


图 3 不同卵磷脂含量的 HTPB-ST 溶液流动曲线

Fig. 3 Flow curves of HTPB-ST solutions with various mass fraction of phosphatidylcholine

表 3 为不同卵磷脂含量的 HTPB 的 ST 溶液流变特性数据,由表 3 可知,随着卵磷脂含量增加,溶液的表现黏度 η 与零切黏度 η_0 都随之增大。此外,溶液的流动特性指数 n 随着卵磷脂含量的增加也更加偏离 1,非牛顿特性更加显著。

聚合物/表面活性剂体系的研究一般建立在简化模型的基础上^[11-13]:在聚合物的主链上分布着吸附表面活性剂的位点,表面活性剂分子在这些位点发生

簇化而形成复合物。这种复合物的结构看作是在聚合物链上联结或包绕着几个类似胶束的簇,具有“串珠”结构。对于卵磷脂-HTPB-ST 体系,可将遥踞于 HTPB 分子链两端的两个活性羟基视为活性位点。卵磷脂分子发生簇化,聚集在 HTPB 链端,形成呈哑铃状结构的复合物。哑铃模型是常用的聚合物溶液分子模型之一,它由两个质量为 m 的小球和一条无质量的非线性弹簧组成。分子在溶剂中运动时,受到 Stokes 阻力作用^[14],流动的阻力系数取决于小球自身受到的阻力系数,也与两球之间的位形有关。随着卵磷脂含量增加,团簇体积增大,相对应的模型中小球所受阻力增加,这可能是随卵磷脂含量增加,溶液黏度增加、流动特性指数更加偏离 1 的原因所在。

表 3 不同卵磷脂含量的 HTPB 的 ST 溶液的流变特性

Table 3 Rheological properties of HTPB-ST solutions with various mass fraction of phosphatidylcholine

sample	ϕ	$\eta/\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\eta_0/\text{Pa} \cdot \text{s}$	n
1 [#]	0	0.033	0.032	1.0079
2 [#]	0.006	0.035	0.041	0.9681
3 [#]	0.030	0.043	0.051	0.9661
4 [#]	0.100	0.070	0.087	0.9574

Note: ϕ is mass fraction of phosphatidylcholine. η is apparent viscosity. η_0 is zero shear viscosity. n is flow behaviour index.

3.4 温度对卵磷脂-HTPB-ST 混合溶液流变特性影响

聚合物流体的黏度 η 对温度 T 的依赖性可以用 Arrhenius 方程表示^[10]:

$$\eta = A \exp(E/RT) \quad (3)$$

式中, η 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; A 为指前因子, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R 为摩尔气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$, T 为热力学温度, K ; E 为流动活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

对方程两边取自然对数:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{E}{RT} \quad (4)$$

对温度 T 求导:

$$\frac{d \ln \eta}{dT} = \frac{1}{\eta} \times \frac{d \eta}{dT} = -\frac{E}{RT^2} \quad (5)$$

以 $-1/T^2$ 为横坐标, $1/\eta$ 为纵坐标进行线性拟合,斜率 E/R 越大,流动活化能 E 越高,黏度对温度变化越敏感。在 $50 \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$, 每间隔 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 测定不同卵磷脂质量分数 (ϕ) 的 HTPB-ST 溶液黏度,按照公式 (5) 计算 E/R ,结果见表 4。

从表 4 可知,随着卵磷脂含量的增加,HTPB 的 ST

溶液流动活化能 E 呈现先减小后增大的趋势。流动活化能依赖于分子间作用力的大小^[10], 上述实验结果表明, 卵磷脂与 HTPB 分子间作用力也是先减小后增大。此处所述的分子间相互作用规律是一种宏观效应, 而微观层面具体机理还需进一步深入研究。

表 4 不同卵磷脂质量分数的 HTPB-ST 溶液 E/R 值

Table 4 E/R values of HTPB-ST solutions with various mass fraction of phosphatidylcholine

sample	ϕ	E/R
5 [#]	0	2119.4
6 [#]	0.030	1901.0
7 [#]	0.053	1004.9
8 [#]	0.100	2641.9

Note: E/R is slope of the linear fitted line.

3.5 卵磷脂含量对共混行为的影响规律

一般对于不存在相互作用的聚合物共混体系, 其理想黏度是其共混组分重均加和值^[15]:

$$\eta_{ia} = \omega_1 \eta_{a1} + \omega_2 \eta_{a2} \quad (6)$$

式中, η_{ia} 为假定不存在相互作用时体系黏度的理想值。 η_{a1} 与 η_{a2} 为相同质量分数的单一聚合物溶液 1 和 2 的黏度, ω_1 与 ω_2 分别是两种聚合物在共混溶液中占聚合物总量的质量分数。一般可采用黏度增长因子 C 表示共混体系中聚合物之间的相互作用^[16-18]:

$$C = \frac{(\eta_a - \eta_{ia})}{\eta_{ia}} \quad (7)$$

表 5 各样品黏度变化因子 $|C|$ 值

Table 5 The viscosity variation factor of all the samples

sample	ϕ	ω_1	ω_2	$\eta_{ia}/\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\eta_a/\text{Pa} \cdot \text{s}$	$ C $
9 [#]	0.006	0.01	0.99	0.0346	0.0354	0.023
10 [#]	0.027	0.06	0.94	0.0426	0.0459	0.077
11 [#]	0.053	0.11	0.89	0.0484	0.0564	0.165
12 [#]	0.100	0.20	0.80	0.0690	0.0753	0.091

Note: ω_1 is relative content of phosphatidylcholine; ω_2 is relative content of HTPB; η_{ia} is ideal value of apparent viscosity; η_a is measured value of apparent viscosity; $|C|$ is viscosity changing factor.

从表 5 中可以看出, 黏度变化因子 $|C|$ 随卵磷脂含量的增加呈现先增大后减小的趋势, 即溶液中卵磷脂与 HTPB 分子之间的相互作用呈现先增强后减弱的趋势。而 3.4 节所述实验结果表明, 随卵磷脂含量的增加, 混合溶液流动活化能 E 呈现先减小后增大的趋势。实验测定的编号为 9[#] ~ 12[#] 的样品中卵磷脂质量

式中, η_a 为混合体系表观黏度的实测值。 C 值越大, 说明两种聚合物的相互作用力越大。对于存在分子间相互作用的共混体系, 其实测值将偏离理想值 η_{ia} 。虽然黏度增长因子 C 一般用于表示聚合物之间的相互作用, 但卵磷脂不仅会与 HTPB 相互作用使体系表观黏度升高, 而且还会起到与表面活性剂共有的降黏作用, 是一种综合效应, 因此不能将 C 值简单的归纳为黏度的增长因子。

本研究拟将卵磷脂与 HTPB 分别视作溶质 1 和 2, 将两者溶于 ST 后形成的混合溶液视作共混体系, 用 C 的绝对值 $|C|$ 表征共混体系中两种溶质分子的相互作用大小, 称为黏度变化因子, 其表达式为:

$$|C| = \frac{|\eta_a - \eta_{ia}|}{\eta_{ia}} \quad (8)$$

无论是实际应用还是实验测定过程中, 卵磷脂含量都较低且溶解度有限, 难以在旋转黏度计量程范围内精确测量单一卵磷脂的 ST 溶液黏度值 η_{a1} 。因此研究选取卵磷脂质量分数最小 (即 $\phi = 0.006$) 的 HTPB、卵磷脂的 ST 共混溶液 (即 ω_1 极小情况下), 在同一温度下测定其表观黏度 η_{a1} , 将这一测定值作为基准, 视作理想值 η_{ia} , 通过式 (6) 以及 ω_1 、 ω_2 、 η_{a2} (HTPB 质量分数为 44.4% 的 ST 溶液表观黏度实测值) 来反推 η_{a1} , 将单一卵磷脂的 ST 溶液黏度值 η_{a1} 作为定值。再测定其他不同卵磷脂含量的共混溶液表观黏度值 η_a , 计算并比较 $|C|$ 。各编号样品的实测及计算结果如表 5 所示。

分数与 3.4 节所述 5[#] ~ 8[#] 号样品并不完全一致, 但是当卵磷脂质量分数 $\phi = 0.053$ 时, E/R 取得最小值, $|C|$ 同时取得最大值。

因此, 可以得出: 随着溶液中卵磷脂质量分数增加, HTPB 与卵磷脂分子间相互作用逐渐增强, 溶液流动活化能逐渐降低。当卵磷脂质量分数增加至 0.053

时,两种分子间相互作用增至最大,而此时溶液流动活化能降至最小值。若继续增加溶液中的卵磷脂质量分数,HTPB与卵磷脂的相互作用开始减弱,溶液的流动活化能开始逐渐增加。溶液流动活化能的大小与两种分子间相互作用密切相关。

4 结 论

(1) 随着卵磷脂含量增加,HTPB的ST溶液表观黏度 η 与零切黏度 η_0 都随之增大,流动特性指数 n 也更加偏离1,呈现更加显著的非牛顿流体特性。此现象可由聚合物-表面活性剂溶液哑铃模型来解释。

(2) 随着卵磷脂含量的增加,卵磷脂-HTPB-ST体系的流动活化能 E 呈现先减小后增大的趋势,其原因是HTPB与卵磷脂分子间作用发生了变化。

(3) 随着溶液中卵磷脂质量分数增加,HTPB与卵磷脂分子间相互作用逐渐增强,溶液流动活化能逐渐降低。当卵磷脂质量分数增加至0.053时, $|C|$ 增至最大值0.165,而同时 E/R 降至最小值1004.9,若继续增加卵磷脂含量,HTPB与卵磷脂的相互作用开始减弱,溶液的流动活化能开始逐渐增加。这表明采用黏度变化因子 $|C|$ 可以较好地表征共混体系中卵磷脂与HTPB分子间相互作用大小。

参考文献:

- [1] Keisuke S, Minoru N, Tomoari K. Interaction of an amphipathic peptide with phosphatidylcholine phosphatidylethanolamine mixed membranes [J]. *Biophysical Journal*, 2007, 93: 3900–3906.
- [2] 迟玉杰, 林淑英. 卵黄卵磷脂提取与应用的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2002(5): 50–53.
CHI Yu-jie, LIN Shu-ying. Research advance in the extraction and application of egg yolk lecithin [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2002(5): 50–53.
- [3] Susruta S, Samira H, Giuseppe M, et al. Diffusion of 1,2-dimethoxyethane and 1,2-dimethoxypropane through phosphatidylcholine bilayers; a molecular dynamics study[J]. *The Journal of Chemical Physics B*, 2012, 116: 5141–5151.
- [4] 洪广言, 张吉林, 高倩. 在卵磷脂体系中合成 EuF_3 纳米线[J]. 物理化学学报, 2010, 26(3): 695–700.
HONG Guang-yan, ZHANG Ji-lin, GAO Qian. Synthesis of EuF_3 nanowires in soybean lecithin [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2010, 26(3): 695–700.
- [5] 童华, 姚松年, 牛菲, 等. 卵磷脂与 CCl_4 、 CHCl_3 的反胶束中水增溶机制的研究[J]. 分析测试学报, 1999, 18(1): 1–4.
TONG Hua, YAO Song-nian, NIU Fei, et al. Study on solubilization mechanism of water in phosphatidylcholine (PC)- CCl_4 , PC-CH(D) Cl_3 reverse micelle[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 1999, 18(1): 1–4.
- [6] Gerelli Y, Barbieri S, Di Bari, et al. Structure of self-organized multilayer nanoparticles for drug delivery [J]. *Langmuir*, 2008, 24(20): 11378–11384.
- [7] Folaranmi F M, Mamza P A A P. Compatibility studies on solution of polystyrene and polyvinyl acetate blend by density and viscometric methods [J]. *European Polymer Journal*, 1996, 32(7): 909–912.
- [8] Hildebrand J H, Scott R L. The Solubility of None-Electrolytes [M]. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1950: 258–261.
- [9] 石万聪, 石志博, 蒋平平. 增塑剂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 541–542.
- [10] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理(修订版)[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990: 186–188.
- [11] 沈崇棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 45–46.
- [12] 方建农, 范西俊. 哑铃式聚合物分子模型流变性质的Brown动力学模拟[J]. 力学学报, 1997, 29(3): 349–354.
FANG Jian-nong, FAN Xi-jun. Brownian dynamics simulation of Fene-Dumbbell models with configuration dependent friction coefficients [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, 29(3): 349–354.
- [13] 苑世领, 刘成卜, 徐桂英, 等. 聚合物PVP与表面活性剂AOT相互作用的介观模拟[J]. 高等学校化学学报, 2003, 24(6): 1408–1051.
YUAN Shi-ling, LIU Cheng-bu, XU Gui-ying, et al. Mesoscopic simulation on the interaction between polymer PVP and surfactant AOT [J]. *Chemical Research In Chinese Universities*, 2003, 24(6): 1408–1051.
- [14] Rouse P E. A theory of the linear viscoelastic properties of dilute solutions of coiling polymers [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, 21: 1272.
- [15] 黄建花, 朱超英, 罗孟波. 表面活性剂与高分子链混合体系的模拟[J]. 物理化学学报, 2004, 20(7): 690–695.
HUANG Jian-hua, ZHU Chao-ying, LUO Meng-bo. Monte carlo simulation on surfactant-polymer mixed system [J]. *Acta Physico-chimica Sinica*, 2004, 20(7): 690–695.
- [16] 张秀真, 沈玉华, 谢安建, 等. 稀溶液黏度法研究醋酸纤维素/聚乙烯吡咯烷酮共混物的相容性[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(1): 124–127.
ZHANG Xiu-zhen, SHEN Yu-hua, XIE An-jian et al. Miscibility studies on blends of cellulose acetate and polyvinylpyrrolidone by dilute solution viscometry [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2012, 28(1): 124–127.
- [17] 吕挺, 单国荣. 黏度法研究聚丙烯酰胺与聚乙二醇在水中的相互作用[J]. 高分子学报, 2010, (2): 156–159.
LV Ting, SHAN Guo-rong. Viscometric studies on the interaction between polyacrylamide and poly(ethylene glycol) in water [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2010, (2): 156–159.
- [18] 朱平平, 杨海洋, 王世强. 稀溶液黏度法研究聚合物之间混溶性[J]. 功能高分子学报, 1997, (10): 436–442.
ZHU Ping-ping, YANG Hai-yang, WANG Shi-qiang. Polymer-polymer miscibility determined by dilute solution viscometry [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 1997, (10): 436–442.

Effect of Phosphatidylcholine on the Rheological Properties of HTPB-Styrene Solution

XIE Xiao, LU Hong, WANG Yun, LUO Guan

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

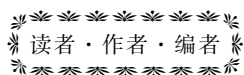
Abstract: For further understanding of interaction between phosphatidylcholine and hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) in styrene solution, the effect of phosphatidylcholine on the rheological properties of HTPB-styrene solution was studied by viscometric method. The viscosity changing factor ($|C|$) was used to characterize the degree of molecular interaction between phosphatidylcholine and HTPB. In this approach, the blending behavior of phosphatidylcholine and HTPB in mixed solution system was further discussed. Meanwhile, the effect of the relative contents of phosphatidylcholine and HTPB on the interaction degree was researched. Results show that the solution viscosity increases with the increasing of phosphatidylcholine. And the solution exhibits a more remarkable non-Newtonian behavior. The flow activation energy (E) first increases and then decreases, while the interaction degree between phosphatidylcholine and HTPB first decreases and then increases. $|C|$ increases to the maximum value of 0.165 and E/R decreases to the minimum value of 1004.9 as phosphatidylcholine content reaches to 0.053.

Keywords: hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB), phosphatidylcholine, polymer solution, rheological properties

CLC number: TJ55; O63

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.08.010



《含能材料》高效毁伤弹药专栏征稿

高效毁伤弹药以“利用最小化成本获得最大化效果”为目标,对含能材料的性能和能量提出了更高的要求。为进一步促进高效毁伤弹药及其技术的研究,本刊将于2015年增设高效毁伤弹药专栏,内容涉及(1)传统含能材料的优化和改进以及先进含能材料的开发和应用,包括:传统含能材料合成、制造、处理和应用的新技术,新的CHON含能材料的开发和应用,金属化炸药,非传统概念炸药(如燃料空气炸药、温压炸药),高能量密度材料;(2)含能材料能量的控制输出研究,包括:能量输出增强(如组合装药),能量输出聚焦/定向,能量输出模式可控(如多模装药),能量输出范围可控(如低附带毁伤炸药)。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部