

文章编号: 1006-9941(2011)04-0415-05

# 推进剂模拟液的室温快速胶凝化及其流变学性能

刘凯强, 赵珂如, 陈香李, 张荷兰, 房喻

(应用表面与胶体化学教育部重点实验室, 陕西师范大学, 陕西 西安 710062)

**摘要:** 添加羧酸盐调制表面活性剂在极性混合溶剂中的簇集行为, 实现了推进剂模拟液的室温快速胶凝。采用 3 因素 4 水平正交实验系统考察了混合溶剂组成、胶凝剂组分(表面活性剂/羧酸盐)比例、凝胶形成温度等三种因素对推进剂模拟液凝胶力学强度、高剪切速率下粘度的影响。极差分析表明影响模拟液凝胶力学强度的因素主要是胶凝剂组成, 其次是混合溶剂组成, 影响最小的是凝胶形成的温度。而影响高剪切速率下凝胶体系粘度的因素依次为混合溶剂组成、凝胶形成温度和胶凝剂组成。结合频率扫描结果, 筛选出了一种稳定性高、高剪切速率下粘度低的比较理想的推进剂模拟液凝胶体系: 表面活性剂与羧酸盐的物质的量之比为 2:1, 二者的质量之和占体系质量的 2.4%, 溶剂水与乙二胺的体积比为 1:3。该凝胶屈服应力为 794.3 Pa, 极限剪切速率下粘度 13.7 mPa·s。

**关键词:** 流变学; 凝胶推进剂; 胶凝剂; 模拟液**中图分类号:** TJ5; V512.2; TQ38**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.014

## 1 引言

推进剂凝胶是传统推进剂液体被适当化合物(胶凝剂, gelators)胶凝的结果。真正具有应用价值的推进剂凝胶多为以小分子化合物或者颗粒状物质为胶凝剂的超分子凝胶(supramolecular gels)。在本质上, 超分子凝胶属于物理凝胶(physical gels), 即在推进剂液体中, 通过胶凝剂与胶凝剂, 以及胶凝剂与推进剂分子间的氢键、 $\pi$ - $\pi$  堆积、范德华力、疏溶剂作用、静电作用、偶极作用等弱相互作用形成三维网络结构, 使包含于其中的溶剂因毛细作用和表面张力等作用失去流动性, 从而形成软固态物质——凝胶<sup>[1]</sup>。理论上, 凝胶推进剂集固、液推进剂优点于一身, 可以有效克服固体推进剂预编程式, 液体推进剂加注耗时费力, 安全性不高, 飞行稳定性不好等问题, 从而有可能满足高性能火箭或导弹对飞行精确控制和飞行稳定性的要求。因此, 自 20 世纪 60 年代以来, 推进剂的胶凝化受到人们的特别关注<sup>[1-6]</sup>。

虽然凝胶推进剂研究已经有半个多世纪的历史, 但真正的技术突破和应用是近十年的事情<sup>[7]</sup>。研究

表明, 制约凝胶推进剂应用的关键是推进剂凝胶的雾化燃烧效率问题<sup>[6]</sup>。已有的工作已经证明, 以高聚物或者无机微纳米颗粒作为胶凝剂所得到的推进剂凝胶在使用时存在雾化困难, 燃烧效率不高, 乃至堵塞发动机喷雾系统等问题, 很难获得实际应用<sup>[8-12]</sup>。为此, 研制能够满足凝胶推进剂使用要求的新型胶凝剂已经成为凝胶推进剂研究领域迫切需要解决的问题。

在实际研究过程中, 由于某些推进剂液体的化学不稳定性 and 剧毒性, 人们很难利用真实推进剂液体开展规模研究, 因此, 发展推进剂模拟液凝胶, 考察影响模拟液凝胶性质, 特别是影响其流变学性质的关键因素, 对于发展新型凝胶推进剂, 深入理解凝胶推进剂性能具有十分重要的意义。基于这些考虑, 本实验室研制了一种新型推进剂模拟液, 实现了对它的室温快速胶凝, 研究了影响推进剂模拟液凝胶流变学性质的主要因素。

## 2 实验部分

### 2.1 试剂与仪器

表面活性剂(X)和羧酸盐(Y)均为分析纯, 国药集团生产, 重结晶后使用; 溶剂分别为水(M)和乙二胺(N)。AR-G2 型流变仪(美国 TA 公司)。

### 2.2 实验过程

#### 2.2.1 模拟凝胶制备

在大小适中的密封式样品管中盛放一定量的复配

收稿日期: 2010-10-08; 修回日期: 2011-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(重大研究计划项目 91027017)

作者简介: 刘凯强(1974-), 男, 博士, 主要从事凝胶物理化学研究。e-mail: kaiqiangliu@snnu.edu.cn

通讯联系人: 房喻(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光物理技术应用和胶体与界面化学研究。e-mail: yfang@snnu.edu.cn

胶凝剂( $X + Y$ , 其质量含量小于 3%), 再加入成比例的混合溶剂( $M + N$ ), 充分振荡至胶凝剂完全溶解后, 快速倾倒入流变仪的样品池内(自行设计, 主要用于凝胶类软物质的流变学性能测定), 在正交实验设定的温度下静置半小时, 待凝胶形成后, 再放置 20 min, 然后进行流变学测量。

### 2.2.2 流变学测量方法

凝胶动态屈服应力测量: 设定角频率(angle frequency)为 6.28 rad/s, 动态剪切应力(oscillation stress)测量范围为 0.01 ~ 2000 Pa, 采用 20.0 mm 防打滑密封平行板夹具进行测试。

凝胶剪切相变后体系粘度(viscosity)的测量: 剪切速率(shear rate)测量范围为 0.01 ~ 4355  $s^{-1}$ , 采用 14.0 mm 桨式转子进行测量。

频率扫描测量: 角频率扫描范围为 0.0628 ~ 628.0 rad/s (0.01 ~ 100.0 Hz), 恒定动态剪切应力 10.0 Pa, 采用 20.0 mm 防打滑密封平行板夹具进行测量。

全部测量均在设定温度下进行, 温度控制精度  $\pm 0.1$   $^{\circ}C$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 正交实验设计

从实际使用出发, 推进剂的胶凝化方法应尽可能简单快捷。一般来讲, 推进剂凝胶制备和所得凝胶性能应至少满足以下四个要求: ① 室温快速胶凝; ② 所得凝胶足以耐受颠簸、振动和碰撞等作用, 且具有良好的储存稳定性; ③ 具备良好的剪切触变性, 即在高剪切作用下, 凝胶快速转变为溶胶, 且粘度随剪切速率增加快速降低, 最终粘度接近推进剂液体本身; ④ 触变可逆, 即剪切作用去除后, 溶胶快速恢复为凝胶态。

根据上述要求, 本工作以推进剂模拟液为介质, 以复配胶凝剂实现了模拟液的室温快速胶凝。利用正交实验, 系统考察了影响凝胶强度和剪切相变后体系粘度的主要因素。初步研究表明: ① 复配胶凝剂组成、混合溶剂组成、以及凝胶形成温度等是影响凝胶力学强度和流变学性能的主要因素; ② 由于化合物 X 和 Y 同时存在是实现水物理胶凝化的前提, 溶剂乙二胺的引入主要是为了调节凝胶的性质, 特别是调节凝胶剪切变稀后溶胶的雾化性能。基于这些认识, 采用 3 因素 4 水平表安排实验, 以期明确影响凝胶力学性能和流变性能的主次因素, 获得理想凝胶配方, 具体方案见表 1。

表 1 因素水平表

Table 1 Table of factors and levels

| experimental levels | factors          |                  |                |
|---------------------|------------------|------------------|----------------|
|                     | A( $n_X : n_Y$ ) | B( $V_M : V_N$ ) | C/ $^{\circ}C$ |
| 1                   | A1(3 : 1)        | B1(4 : 0)        | 5              |
| 2                   | A2(2 : 1)        | B2(3 : 1)        | 15             |
| 3                   | A3(1 : 2)        | B3(2 : 2)        | 25             |
| 4                   | A4(1 : 3)        | B4(1 : 3)        | 35             |

Note: 1) A ( $n_X : n_Y$ ) refers to the molar ratio of gelator X and gelator Y in the complex gelators; 2) B ( $V_M : V_N$ ) refers to the volume of solvent M and solvent N in the mixture solvents; 3) C refers to the gelation temperature; 4) n and V stand for the mole of selected gelators and the volum of selected solvents in the gelation test, respectively.

表 1 中 A、B、C 分别表示所要考察的 3 个因素。A 代表复合胶凝剂中 X 与 Y 的物质的量比( $n_X : n_Y$ ), B 代表混合溶剂中 M 与 N 的体积比( $V_M : V_N$ ), C 代表凝胶形成温度,  $^{\circ}C$ 。凝胶的动态屈服值( $\gamma$ )和极限剪切速率(4355.0  $s^{-1}$ )下体系粘度( $\nu$ )作为正交实验考核指标。而频率扫描结果作为参考, 其意义在于能够定性地反映凝胶粘弹性(储能模量)在恒剪切作用下对频率变化的敏感性, 在此, 不作为凝胶性能考察的具体指标。

### 3.2 结果和讨论

正交实验方案和结果列于表 2。给出的实验结果包括凝胶的动态屈服应力值、高剪切速率(4355.0  $s^{-1}$ )下的粘度值, 以及凝胶储能模量对频率变化的依赖性。图 1 和图 2 反映了屈服应力和粘度实验的具体结果。从图 1 可以看出, 不同配方凝胶的储能模量随剪切应力增加的变化规律有所不同。在 16 组配方中, 凝胶的屈服值在 6.0 ~ 2000.0 Pa 之间变化。图 2 反映了凝胶剪切相变后体系粘度随剪切速率的变化。可以看出在仪器极限剪切速率(4355  $s^{-1}$ )下, 15 号体系的极限粘度降至 9.8 mPa · s, 而 3 号体系则高达 257.3 mPa · s。类似的, 恒剪切应力作用下, 储能模量对频率变化的敏感性也因凝胶配方的不同而很不相同。其中配方 5, 6, 8, 10, 15 的储能模量在整个频率扫描范围内(0.0628 ~ 628.0 rad/s)基本不变, 而 3, 4, 9, 11, 14 的储能模量对频率变化极其敏感, 16 号体系只在 300 rad/s 范围内稳定, 其余体系的稳定范围更小。

需要说明的是, 推进剂的流动性可以采用粘度-剪切速率曲线(图 2)表达。其中图 2 给出了高剪切速率下不同体系粘度对剪切速率的依赖性。不难看出, 胶凝剂配方确实显著影响体系粘度的剪切速率的依赖性。

表 2 模拟凝胶流变学性能研究的正交实验顺序

Table 2 Orthogonal experimental orders of rheological behaviors of simulated gels

| No. | factors |    |    | state | $\gamma/Pa$ | $\nu/mPa \cdot s$ | experimental results  |
|-----|---------|----|----|-------|-------------|-------------------|---|
|     | A       | B  | C  |       |             |                   |   |
| 1   | A1      | B1 | C1 | Gw    | 500.1       | 95.1              | stabilities of storage modulus ( $G^*$ ) at frequency sweep |
| 2   | A1      | B2 | C2 | Gt    | 630.9       | 121.4             | stable within 100 rad/s                                     |
| 3   | A1      | B3 | C3 | Gt    | 1585.0      | 257.3             | stable within 100 rad/s                                     |
| 4   | A1      | B4 | C4 | Gw    | 1995.0      | 13.2              | unstable within whole frequency sweep                       |
| 5   | A2      | B1 | C4 | Gt    | 794.3       | 77.1              | unstable within whole frequency sweep                       |
| 6   | A2      | B2 | C3 | Gt    | 630.7       | 130.1             | steadily changing within whole frequency sweep              |
| 7   | A2      | B3 | C2 | Gw    | 1585.0      | 176.0             | steadily changing within whole frequency sweep              |
| 8   | A2      | B4 | C1 | Gw    | 794.3       | 13.7              | increasing within whole frequency sweep                     |
| 9   | A3      | B1 | C2 | Gt    | 501.2       | 74.5              | stable within whole frequency sweep                         |
| 10  | A3      | B2 | C1 | Gw    | 316.2       | 61.8              | unstable within whole frequency sweep                       |
| 11  | A3      | B3 | C4 | Gt    | 19.8        | 101.9             | stable within whole frequency sweep                         |
| 12  | A3      | B4 | C3 | Gw    | 199.5       | 22.3              | increasing sharply within whole frequency sweep             |
| 13  | A4      | B1 | C3 | Gt    | 500.9       | 60.6              | increasing within whole frequency sweep                     |
| 14  | A4      | B2 | C4 | Gt    | 6.3         | 119.5             | steadily changing within 50 rad/s                           |
| 15  | A4      | B3 | C1 | Gw    | 501.2       | 9.8               | increasing sharply within whole frequency sweep             |
| 16  | A4      | B4 | C2 | Gw    | 125.9       | 13.3              | stable within whole frequency sweep                         |

Note: 1)  $\gamma$  refers to the yield value of a gel; 2)  $\nu$  refers to the viscosity of a gel at  $4355 s^{-1}$ ; 3) Gw and Gt stand for white gel and transparent gel, respectively. The results of rheological measurements were shown clearly in Figure 1 and Figure 2.

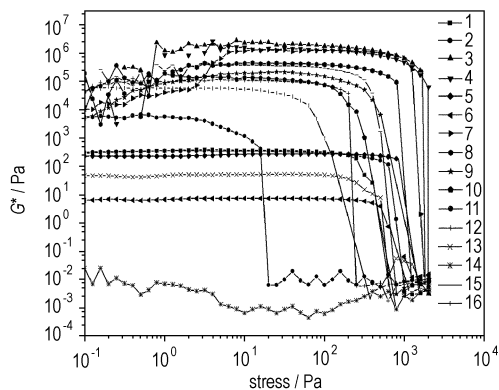


图 1 模拟凝胶储能模量随动态屈服应力的变化曲线  
Fig.1 Plots of the storage modulus of simulated gels against dynamic shear stress

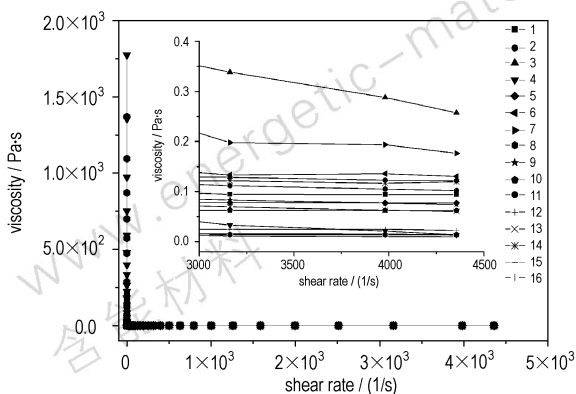


图 2 模拟凝胶的粘度随剪切速率的变化曲线  
Fig.2 Plots of viscosity of simulated gels against shear rate

对表 2 所列屈服应力与粘度值进行正交实验的极差分析,结果分别列于表 3 和表 4。其中  $K_i^{(j)}$  与  $H_i^{(j)}$  表示第  $j$  列的  $i$  水平的实验水平和,  $k_i^{(j)}$ 、 $h_i^{(j)}$  表示第  $j$  列的  $i$  水平均值,  $R_a^{(n)}$  与  $R_b^{(n)}$  表示正交实验中各评价指标所对应的极差值。很显然,屈服应力极差:  $R_a^{(1)} > R_a^{(2)} > R_a^{(3)}$ ; 粘度极差:  $R_b^{(2)} > R_b^{(3)} \sim R_b^{(1)}$ 。这一结果表明:就凝胶的屈服应力而言,复合胶凝剂的组成影响最大,其次为混合溶剂的组成,再其次才是凝胶的制备温度;然而就体系的极限粘度而言,混合溶剂组成则是最大的影响因素,温度与复合胶凝剂的组成影响相当。

上述实验结果也可以通过凝胶化学原理来理解<sup>[1,5,13-14]</sup>。众所周知,超分子凝胶赖以稳定存在的三维网络结构是由含量较低的胶凝剂通过分子间的相互作用而形成。凝胶的力学强度实际上是胶凝剂分子所形成网络结构强度的反映。这种聚集结构不仅会影响凝胶的强度,还会影响剪切相变后凝胶的极限粘度。这是由于凝胶的剪切相变实际上是凝胶中胶凝剂网络结构被破坏的外部表现。但这种破坏往往是相对的,不彻底的。也就是说,贯穿整个体系的胶凝剂网络因剪切而变成大小不一,结构不同,可以自由运动的众多簇集体。很显然,这种包含簇集体的溶胶态如同高分子溶液一样,粘度一定会大于纯溶剂的粘度。这就解释了为什么包含相同溶剂和溶剂组成的凝胶体系因胶

凝胶组成不同而极限粘度不同这一实验事实。

表 3 正交实验分析表(屈服应力)

Table 3 Analysis of orthogonal experimental results(yield value)

| No.         | $K_i^{(j)}$          |                      |                      |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| K1          | $K_1^{(1)}$ , 4711.0 | $K_1^{(2)}$ , 2296.5 | $K_1^{(3)}$ , 2111.8 |
| K2          | $K_2^{(1)}$ , 3804.3 | $K_2^{(2)}$ , 1584.1 | $K_2^{(3)}$ , 2843.0 |
| K3          | $K_3^{(1)}$ , 1036.7 | $K_3^{(2)}$ , 3691.0 | $K_3^{(3)}$ , 2916.1 |
| K4          | $K_4^{(1)}$ , 1134.3 | $K_4^{(2)}$ , 3114.7 | $K_4^{(3)}$ , 2815.4 |
| k1          | $k_1^{(1)}$ , 1177.8 | $k_1^{(2)}$ , 574.1  | $k_1^{(3)}$ , 527.9  |
| k2          | $k_2^{(1)}$ , 951.1  | $k_2^{(2)}$ , 396.0  | $k_2^{(3)}$ , 710.8  |
| k3          | $k_3^{(1)}$ , 259.2  | $k_3^{(2)}$ , 922.8  | $k_3^{(3)}$ , 729.0  |
| k4          | $k_4^{(1)}$ , 283.6  | $k_4^{(2)}$ , 778.7  | $k_4^{(3)}$ , 703.9  |
| $R_a^{(n)}$ | $R_a^{(1)}$ , 918.6  | $R_a^{(2)}$ , 526.8  | $R_a^{(3)}$ , 201.1  |

表 4 正交实验分析表(粘度)

Table 4 Analysis of orthogonal experimental results (viscosity)

| No.         | $H_i^{(j)}$         |                     |                     |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| H1          | $H_1^{(1)}$ , 487.0 | $H_1^{(2)}$ , 307.4 | $H_1^{(3)}$ , 180.4 |
| H2          | $H_2^{(1)}$ , 396.9 | $H_2^{(2)}$ , 432.8 | $H_2^{(3)}$ , 385.2 |
| H3          | $H_3^{(1)}$ , 260.5 | $H_3^{(2)}$ , 545.0 | $H_3^{(3)}$ , 470.3 |
| H4          | $H_4^{(1)}$ , 203.2 | $H_4^{(2)}$ , 62.5  | $H_4^{(3)}$ , 311.7 |
| h1          | $h_1^{(1)}$ , 121.8 | $h_1^{(2)}$ , 76.9  | $h_1^{(3)}$ , 45.1  |
| h2          | $h_2^{(1)}$ , 99.2  | $h_2^{(2)}$ , 108.2 | $h_2^{(3)}$ , 96.3  |
| h3          | $h_3^{(1)}$ , 65.1  | $h_3^{(2)}$ , 136.3 | $h_3^{(3)}$ , 117.6 |
| h4          | $h_4^{(1)}$ , 50.8  | $h_4^{(2)}$ , 15.6  | $h_4^{(3)}$ , 77.9  |
| $R_b^{(n)}$ | $R_b^{(1)}$ , 71.0  | $R_b^{(2)}$ , 120.7 | $R_b^{(3)}$ , 72.5  |

从本质上讲,凝胶网络结构的强度主要取决于胶凝剂-胶凝剂之间,以及胶凝剂-溶剂分子之间相互作用的强弱和胶凝剂的溶解-沉淀平衡的稳定性<sup>[13-14]</sup>。本模拟凝胶所用胶凝剂为复合胶凝剂,其中包含两种结构完全不同的小分子化合物,前一种为脂肪链状化合物,另一种为有机羧酸盐。溶剂也是混合溶剂,具体由极性相近,可以互溶,但质子亲和性差异显著的两种廉价溶剂混合而成。可以预期这一凝胶体系组成的复杂性决定了其中胶凝剂-胶凝剂,胶凝剂-溶剂作用的复杂性。毫无疑问,这种复杂性一定会带来凝胶制备方法和凝胶性能优化途径的多样性。此外,还要注意:超分子凝胶能够形成和稳定存在是众多动力学与热力学因素共同作用的结果。除胶凝剂、溶剂等组成和结构因素外,凝胶制备时的温度、压力、搅拌速率、搅拌方式,乃至制备工艺等都会影响所得凝胶的性能。因此,在凝胶制备时还要充分考虑这些因素。表 2 所列温度因素对凝胶性能的影响就充分说明了这一点。

### 3.3 配方筛选

从应用角度考虑,凝胶推进剂应具有一定的力学

强度,以保证储存、运输时不被破坏(破碎或离浆)。同时,在剪切相变后,溶胶的粘度应尽可能低,最好接近纯溶剂的粘度。基于这些标准,可以看出 4、8、15、16 等体系比较理想,基本可以满足这些要求。不过考虑频率扫描实验结果,可以发现只有 8 和 16 的储能模量对频率变化不敏感(表 2 与图 3),换言之,这两种凝胶对震动的耐受性比较突出。进一步分析,可以发现 8 号凝胶的储能模量显著大于 16 号凝胶,且耐受频率范围更宽,因此,在所考察的因素水平范围内,8 号凝胶具有最为突出的性能。相应的凝胶组成和性能参数为:

- (1) X : Y(物质的量比) = 2 : 1, M : N(体积比) = 1 : 3, X + Y 质量分数为 2.4%; 凝胶制备温度为 5 °C;
- (2) 屈服应力 794.3 Pa, 极限剪切速率下粘度 13.7 mPa · s。

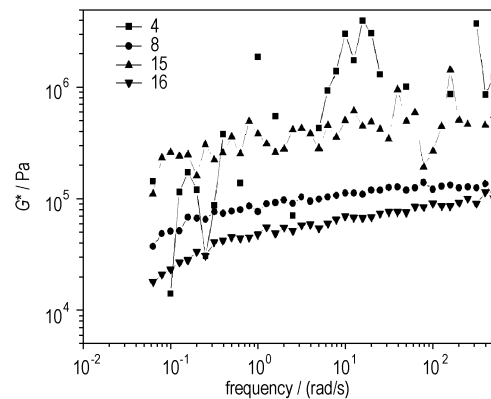


图 3 四种液体推进剂模拟凝胶储能模量对剪切频率的响应性  
Fig.3 Response of the storage modulus ( $G^*$ ) of four simulated gels for liquid propellants to the shear frequency

## 4 结论

通过优化配方,实现了液体推进剂模拟液(一种表面活性剂与一种羧酸盐复配)——水/乙二胺混合溶剂的室温快速胶凝,明确了影响模拟液凝胶力学强度和流变学性能的主要因素。结合频率扫描,优化了模拟液凝胶配方,相应凝胶屈服应力为 794.3 Pa,仪器极限剪切速率下粘度降至水的约 13 倍。此外,在一定的剪切应力和扫描频率范围内,该凝胶的储能模量几乎不因扫描频率的变化而变化。

### 参考文献:

- [1] Liu J, He P L, Yan J L, et al. An organometallic super-gelator with multiple-stimulus responsive properties [J]. *Advanced Materials*, 2008, 20: 2508 - 2511.
- [2] 王宁飞, 莫红军, 樊学忠. 凝胶推进剂的发展及应用[J]. 含能材料,

- 1998,6(3): 139-144.  
WANG Ning-fei, MO Hong-jun, FAN Xue-zhong. Review of development and application of gelled propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1998,6(3): 139-144.
- [3] 陈世武. 凝胶推进剂的由来与发展[J]. 火炸药学报, 1996(1): 47-52.  
CHEN Shi-wu. Source and development of gel propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1996(1): 47-52.
- [4] 闫大庆, 周宏民, 单建胜. 凝胶/膏状推进剂研究发展状况[J]. 火箭推进, 2003,29(1): 38-46, 29.  
YAN Da-qing, ZHOU Hong-min, SHAN Jian-shen. Development of gel- and pasty-propellants[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2003,29(1): 38-46, 29.
- [5] 刘凯强, 屈育龙, 王明珍, 等. 小分子有机胶凝剂和凝胶推进剂研究进展[J]. 火炸药学报, 2003,26: 23-26.  
LIU Kai-qiang, QU Yu-long, WANG Ming-zhen, et al. Overview of low molecular mass organic gelators and gel propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003,26: 23-26.
- [6] 杨伟东, 张蒙正. 凝胶推进剂流变及雾化特性研究与进展[J]. 火箭推进, 2005,31(5): 37-42.  
YANG Wei-dong, ZHANG Meng-zheng. Research and development of rheological and atomization characteristics of gelled propellants[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2005,31(5): 37-42.
- [7] Space and Electronic News Releases. TRW-built gel propulsion system is successfully cold-fire tested [OL]. <http://www.pnewswire.com/micro/TRW4>.
- [8] Munjal N L, Gupta B L, Varma M. Preparative and mechanistic studies on unsymmetrical dimethyl hydrazine-red fuming nitric acid liquid propellant gels[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1985,10(4): 111-117.
- [9] Allan B D. Thixotropic inhibited red fuming nitric acid gel: US 61652932[P]. 2000.
- [10] 刘凯强, 陈钊, 王宁飞, 等. 航空煤油的羟丙基纤维素凝胶化研究[J]. 含能材料, 2005,13(1): 58-60.  
LIU Kai-qiang, CHEN Tian, WANG Ning-fei, et al. The gelation of aviation kerosene by hydroxypropyl cellulose[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005,13(1): 58-60.
- [11] 刘凯强, 陈钊, 王宁飞, 等. 航空煤油的羟丙基纤维素凝胶力学性能研究[J]. 含能材料, 2005,13(3): 169-172.  
LIU Kai-qiang, CHEN Tian, WANG Ning-fei, et al. Mechanical properties of aviation kerosene gels with hydroxypropyl cellulose as a gelator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005,13(3): 169-172.
- [12] 刘凯强, 陈钊, 张颖, 等. 刺激响应型过氧化氢凝胶的制备与性能[J]. 火炸药学报, 2006,29(3): 1-4.  
LIU Kai-qiang, CHEN Tian, ZHANG Ying, et al. Preparation and properties of responsive hydrogen peroxide gel with silicon dioxide as gelator[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006,29(3): 1-4.
- [13] Terech P, Weiss R G. Low molecular mass gelators of organic liquids and the properties of their gels[J]. *Chemical Reviews*, 1997, 97: 3133-3160.
- [14] Estroff L A, Hamilton A D. Water gelation by small organic molecules[J]. *Chemical Reviews*, 2004,104: 1201-1218.

## Instant Gelation of a Simulated Agent for Liquid Propellants at Room Temperature and Rheological Property Studies of Relevant Gels

LIU Kai-qiang, ZHAO Ke-ru, CHEN Xiang-li, ZHANG He-lan, FANG Yu

(Key Laboratory of Applied Surface and Colloid Chemistry, Shaanxi Normal University, Ministry of Education, School of Chemistry and Materials Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** A simulated agent for liquid propellants was gelled efficiently and instantly at room temperature by modulating aggregate behaviors of a typical surfactant with the addition of a carboxylic salt in two polar solvent mixtures. An orthogonal test (three factors and four levels) was employed to investigate the factors affecting the rheological properties of the gels of the simulated agent. Results show that the significance of the factors affecting the mechanical strength of the gels follows the order of (1) the composition of the composite gelators (a surfactant and a carboxylic salt), (2) the composition of the mixture solvents, and (3) the temperature at which the gel had been prepared. However, the factors affecting the viscosity of the gel systems at higher shear rate ( $4355.0 \text{ s}^{-1}$ ) follows another order, that is (1) the composition of the mixture solvents, (2) the gel preparation temperature, and (3) the composition of composite gelators. Considering the results from frequency scan and those from orthogonal test, a gel from the simulated agent having high stabilities and low-viscosity at a high shear rate was obtained. In the gel formula, the molar ratio of the composite gelators, and the volume ratio of the mixture solvents are 2 : 1 and 1 : 3, respectively, and the total mass percentage of the composite gelators is 2.4%. Moreover, the dynamic yield value and the viscosity of the gel at higher shear rate are 794.3 Pa and 13.7  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ , respectively.

**Key words:** rheology; gel propellant; supramolecular gel; simulated agent

**CLC number:** T15; V512.2; TQ38

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.014