

文章编号: 1006-9941(2016)06-0592-07

# 时间与温度依赖的 RP-1 煤油凝胶本构方程建模

曹琪, 封锋, 武晓松

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 根据凝胶特殊的固-液形态, 研究了无机和有机凝胶剂与 RP-1 煤油的成胶机理, 通过 Brookfield 流变仪测量流变参数, 并构建出煤油凝胶的非时间依赖、时间依赖和温度依赖的本构方程。结果表明: 加入无水乙醇有利于凝胶剂 A(一种干性油衍生物) 对煤油的凝胶化; 无机煤油凝胶的稠度系数  $k$  和凝胶剂含量  $Y_{\text{amout}}$  具有幂律函数关系; 由于幂律指数  $n$  为负, 制备的煤油凝胶比典型的剪切变稀流体 ( $0 < n < 1$ ) 的稀化能力更强; 无机和有机煤油凝胶的复凝性很弱且不受凝胶剂含量和类型的影响; 随剪切速率的增大, 凝胶从完整结构到完全破坏结构状态所需的时间缩短, 中间过程曲线的振幅减小; 随温度的增加, 无机煤油凝胶的粘度先减小后增大, 有机煤油凝胶的粘度逐渐减小并在 90 °C 接近煤油的粘度。

**关键词:** 煤油凝胶; 成胶机理; 流变表征; 时间依赖本构; 温度依赖本构; 复凝性

**中图分类号:** TJ55; V421.4+2

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.06.014

## 1 引言

20 世纪 90 年代初, 火箭和冲压推进系统对高性能和安全推进剂的需求持续增加, 凝胶推进剂可以很好的满足此类需求<sup>[1]</sup>。凝胶推进剂是通过凝胶剂、表面活性剂及助剂使液体燃料或氧化剂凝胶化的胶体分散体系。其特殊的固-液形态, 使其同时具有固体和液体推进系统的优势, 主要表现在安全、性能以及贮存等方面, 因此凝胶推进剂具有广阔的应用前景。现有研究主要集中在典型的凝胶燃料如甲基胍 (MMH)、偏二甲胍 (UDMH) 和叠氮乙胺 (DMAZ), 以及不同类型的碳氢化合物如 JP-5、JP-8、JP-10 和 RP-1 和典型的氧化剂白色发烟硝酸 (WFNA)、抑制红色发烟硝酸 (IRFNA) 和四氧化二氮 (NTO)<sup>[2]</sup>。

流变特性是凝胶推进剂的一个重要性能, 国内外学者对其进行了若干研究。张蒙正<sup>[3]</sup>等通过对凝胶推进剂的直圆管流实验得到其流变系数, 并得到剪切速率在  $10^4 \text{ s}^{-1}$  量级的粘度变化规律。刘凯强等<sup>[4-5]</sup>研究了航空煤油的羟丙基纤维素凝胶化过程及力学性能, 发现凝胶的热稳定性良好,  $-20 \sim$

95 °C 内不分相。谢洪涛等<sup>[6-7]</sup>对凝胶单推-3 的流变性进行了研究, 发现稠度系数和假塑性系数与凝胶剂质量分数和温度有关, 胶体无触变性, 屈服应力较小。Madlener 等<sup>[8]</sup>采用旋转流变仪和毛细管流变仪测量凝胶推进剂的流变特性, 在忽略壁面滑移效应的条件下, 用 HBE (extended Herschel-Bulkley) 本构方程可以精确表示凝胶的流变特性。Rahimi 等<sup>[9-10]</sup>对凝胶推进剂和模拟液流变表征、归类和流变匹配进行了研究, 表明通过调整凝胶剂含量, 可使燃料和氧化剂凝胶及其模拟液实现流变匹配。Arnold 等<sup>[11-12]</sup>研究了 JP-8 和 RP-1 凝胶的流变性能和热力特性, 采用 HBE 本构进行了建模, 表明未剪切凝胶的储存模量和损耗模量表现出固体特性, 凝胶和液体燃料相比蒸发热较低。Roberto Di Salvo 等<sup>[13]</sup>将流变本构乘以时间依赖函数来追踪结构参数的实际变化, 得出 12.5%  $\text{SiO}_2$ /水凝胶在  $7.3 \text{ s}^{-1}$  条件下时间依赖本构方程。Butler 等<sup>[14]</sup>使用落球法对脱脂乳在 5 °C 下的粘度和剪切速率进行测量, 认为结构参数仅与时间有关, 所得到的时间依赖本构方程有一定的误差。

尽管国内外很多学者对凝胶推进剂的流变特性进行了研究, 但其所针对的凝胶燃料不尽相同, 且考虑时间和温度依赖的流变本构建模的研究较少。基于此, 本研究根据凝胶特殊的固-液形态, 对无机、有机凝胶剂分别与 RP-1 煤油的成胶机理和本构建模进行了研

收稿日期: 2015-09-14; 修回日期: 2015-12-04

基金项目: 航天科技创新基金 (CASC03-02), 南京理工大学自主科研专项计划项目 (30920140112001)

作者简介: 曹琪 (1988-), 男, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。e-mail: caoqi\_njust@163.com

究,在流变测量数据的基础上构建幂律本构方程、时间依赖本构方程和温度依赖本构方程,为凝胶推进剂的流变机理和本构建模打下理论基础。

## 2 实验组成与方法

### 2.1 试剂与仪器

凝胶剂可分为无机凝胶剂和有机凝胶剂两种类型。本实验采用的有机凝胶剂(凝胶剂 A),为一种干性油衍生物;无机凝胶剂为纳米  $\text{SiO}_2$ ;助剂为无水乙醇(分析纯)。纳米  $\text{SiO}_2$ 为瓦克生产的气相二氧化硅,其比表面积为  $360 \sim 440 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,平均粒径为  $7 \text{ nm}$ 。

仪器:AD200L-P 实验室分散均质机,HH-1 数显恒温水浴加热器,2XZ-1 型旋片式真空泵,Brookfield DV3THB 锥板型旋转流变仪,DC0506N 低温恒温槽。

### 2.2 制备方法

#### 2.2.1 无机凝胶剂的成胶机理及煤油凝胶的制备

采用的无机凝胶剂为纳米  $\text{SiO}_2$ ,物理形态为蓬松白色粉末,二氧化硅附聚链表面具有孤立羟基(亲水性),氢键羟基基团(亲水性)以及硅氧烷基团,当同液体混合时能够建立氢键并形成凝胶。在分散的液体体系中,二氧化硅附聚链会被分散为中间链,中间链之间产生氢键导致粘度增加,并具有触变性。若施加剪切应力会破坏凝胶的网状结构,导致粘度减小,如图 1 所示。

将  $6 \text{ g}$  纳米  $\text{SiO}_2$ 加入到  $94 \text{ g}$  的煤油中,适当搅拌后,采用高速剪切分散  $3 \sim 5 \text{ min}$  即可形成透明凝胶,且分散均匀。所得的煤油凝胶如图 2 所示。采用同样方法制备含量为  $4\%$ 、 $5\%$  和  $7\%$  的煤油凝胶。

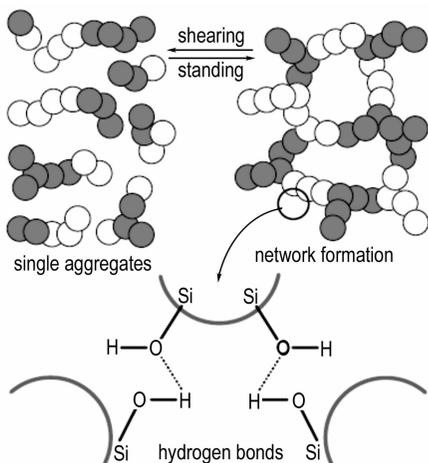


图 1 二氧化硅聚合链、氢键和网络结构的形成

Fig.1 Formation of silica aggregates, hydrogen bonds, and network



图 2 煤油/6%  $\text{SiO}_2$  凝胶(高速剪切)

Fig.2 Kerosene/6%  $\text{SiO}_2$  gel (high-speed dispersion)

#### 2.2.2 有机凝胶剂成胶机理及煤油凝胶的制备

凝胶剂 A 具有一定的亲油性,同时具有三个羟基,在溶胀前沉于容器底部,对体系整体流变行为没有显著影响,随着高速剪切以及加热的作用,凝胶剂 A 在无水乙醇中逐渐溶胀,构象由团聚状转变为伸展状,形成三维网络结构,与煤油形成凝胶体系。

将  $7.5 \text{ g}$  无水乙醇(助剂)和  $7.5 \text{ g}$  凝胶剂 A 加入到  $85 \text{ g}$  的煤油中,用高速分散机分散  $3 \text{ min}$ ,采用水浴加热到  $67 \text{ }^\circ\text{C}$  保持  $20 \text{ min}$ ,再用高速分散机分散  $3 \text{ min}$  即可得到乳白色凝胶,如图 3 所示,采用类似方法制备出仅含凝胶剂 A 的有机煤油凝胶。实验发现,含无水乙醇与不含无水乙醇凝胶的区别在于倒置后不发生流动现象。



图 3 煤油/7.5% 凝胶剂 A/7.5% 无水乙醇凝胶

Fig.3 Kerosene/7.5% gellant A/7.5% anhydrous alcohol gel

### 2.3 航空煤油凝胶流变性能测试

本实验采用 Brookfield DV3THB 锥板型旋转流变仪对煤油凝胶进行流变性能测试,流变仪的剪切速率可控。转子型号为:CPE-40 和 CPE-52,剪切速率范围为  $0.02 \sim 1875 \text{ s}^{-1}$ 。采用锥板型流变仪是因为它能提供均匀的应变分布。图 4 给出了锥板型流变仪的结

构, 剪切速率  $\dot{\gamma}$  和粘度  $\eta$  表达式如下:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{rd\xi}{dt(r\tan\theta_0)} = \frac{2\pi n_r}{\tan\theta_0} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \frac{3T_r \tan\theta_0}{4\pi^2 n_r R^3} \quad (2)$$

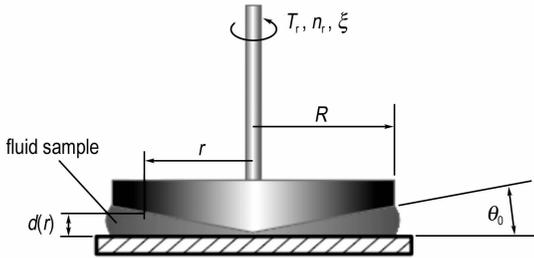


图4 锥/板型旋转流变仪结构

Fig.4 Cone/plate rotational rheometer configuration

流变仪的扭矩常数 TK 为 8, 转子 CPE-40 的转子常数 SMC 为 0.327, 剪切速率常数 SRC 为 7.5; 转子 CPE-52 的 SMC 为 9.922, SRC 为 2。采用温度控制系统保证测量凝胶的温度为恒定值, 温度控制系统的范围为 -10 ~ 100 °C。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 非时间依赖的本构方程

测量无机和有机煤油凝胶粘度-剪切速率, 以用于构建其本构方程。对于每一个剪切速率对应的粘度值, 采集的时间足够长 (120 s) 以达到稳态。测量结果如图 5 所示。

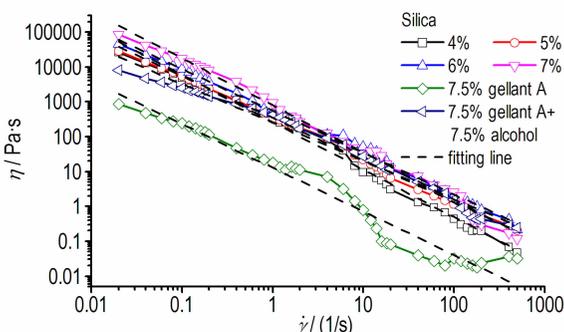


图5 煤油凝胶粘度对应的剪切速率

Fig.5 Viscosity of kerosene gel vs. shear rate

由图 5 可见, 无机凝胶剂含量对粘度的影响在低剪切和高剪切速率下都是显著的。煤油凝胶的粘度显著大于液态煤油的粘度, 并具有非牛顿流体特性。对于无机煤油凝胶, 凝胶粘度随凝胶剂的含量增大而增

大; 对于有机煤油凝胶, 加入助剂无水乙醇的凝胶粘度远大于未加入助剂的凝胶粘度, 说明加入助剂之后可以显著提高凝胶质量。

采用幂律型本构方程<sup>[15]</sup>进行拟合, 将幂律本构两边取对数, 可得到线性拟合方程:

$$\log(\eta) = \log(k) + (n-1) \log \dot{\gamma} \quad (3)$$

得到的无机和有机煤油凝胶的幂律本构方程参数如表 1 所示。

表 1 无机和有机煤油凝胶幂律本构方程参数

Table 1 Constitutive equation (Power-Law) parameters of kerosene gel

parameters	4% SiO <sub>2</sub>	5% SiO <sub>2</sub>	6% SiO <sub>2</sub>	7% SiO <sub>2</sub>	7.5% gellant A+7.5% alcohol	7.5% gellant A
$k/\text{Pa} \cdot \text{s}^n$	257.04	341.2	548.28	781.63	257.04	12.8
$n$	-0.36	-0.207	-0.20	-0.352	-0.101	-0.252

由表 1 可知, 对于无机煤油凝胶,  $k$  值随凝胶剂含量的增大而增大, 对  $k$  值和凝胶剂含量  $Y_{\text{amount}}$  的函数关系可通过拟合得到, 如图 6 和式 (4) 所示。

$$k = 1.144 Y_{\text{amount}}^{3.251} + 145.477 \quad (4)$$

幂律指数  $n$  值为负, 为 -0.2 ~ -0.4, 负值表示制备的煤油凝胶剪切稀化能力更强。

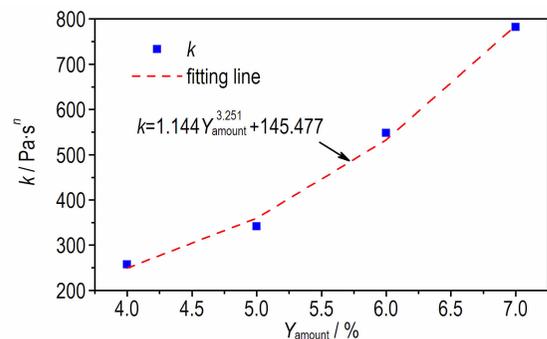


图 6 无机煤油凝胶的  $k$  和凝胶剂含量  $Y_{\text{amount}}$  的关系

Fig.6 Relationship of gellant amount  $Y_{\text{amount}}$  and  $k$  of inorganic kerosene gel

#### 3.2 触变性与复凝性

一般而言, 本构方程如幂律、HBE 仅仅描述剪切速率对凝胶粘度的影响, 忽视了时间因素。然而所研究的凝胶具有时间依赖性。因此, 需对凝胶的触变性进行研究。在  $100 \text{ s}^{-1}$  的剪切速率持续作用 3 min 之后, 间隔 480 s 不施加剪切, 然后重新施加  $100 \text{ s}^{-1}$  剪切速率, 得到的结果如图 7 所示。

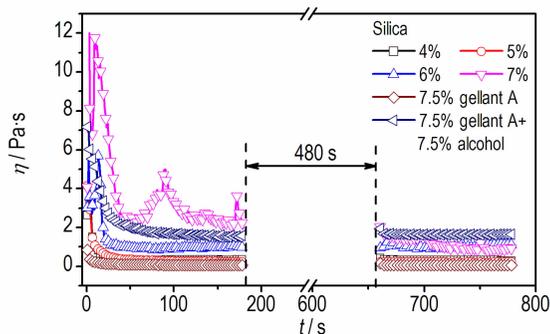


图7 煤油凝胶的触变性和复凝性

Fig.7 Thixotropy and resilience of kerosene gel

由图7可见,在间隔时间前后,无论是无机煤油凝胶还是有机煤油凝胶的粘度几乎相等,没有显著的粘度恢复,可见凝胶的复凝性很弱,且不受凝胶剂含量与类型的影响。由于氢键的重新建立将会增加粘度和整个系统的压力损失,凝胶的复凝性在凝胶发动机应用中可能会加以限制。图中出现的7% SiO<sub>2</sub>煤油凝胶在200 s前的凸起,是材料从完整结构到完全破坏的中间状态的波动现象。

### 3.3 时间依赖本构方程建立

在流变模型中有不同的方法考虑时间因素,一般可分为三类:连续介质力学模型、结构动力学模型和微观结构模型<sup>[16]</sup>。本研究采用结构动力学模型,此模型剪切时间作用和材料最终破坏结果通过材料结构参数λ进行耦合。在初始时刻t=0时,λ<sub>0</sub>表示材料结构是完整的结构参数,在平衡时刻,λ<sub>e</sub>表示材料结构完全破坏的结构参数。

在时间依赖本构方程中,使用Brookfield流变仪所测的凝胶流动曲线作为参考曲线,即表2中的幂律本构,将参考本构乘以结构参数λ即得到时间依赖本构方程:

$$\eta = \lambda k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (5)$$

结构参数λ可采用二阶动力学方程描述:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -k_1 (\lambda - \lambda_e)^2 \quad (6)$$

这里λ>λ<sub>e</sub>,k<sub>1</sub>为速率常数,积分方程(6)可得

$$\lambda = \lambda_e + \frac{1}{k_1 t + C} \quad (7)$$

在初始时刻t=0,式(7)简化为

$$\lambda_0 = \lambda_e + \frac{1}{C} \quad (8)$$

这里C为积分常数,λ从初始值λ<sub>0</sub>到一个渐进值

λ<sub>e</sub>。参数λ<sub>0</sub>通过在非常低的剪切速率的粘度曲线外推得到,λ<sub>e</sub>通过实验测得的η<sub>e</sub>和流动曲线对应粘度的比率得到。得到的时间依赖本构方程如下:

$$\eta = \left( \lambda_e + \frac{1}{k_1 t + C} \right) k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

用Brookfield流变仪对无机和有机煤油凝胶在5,10,50,100 s<sup>-1</sup>和500 s<sup>-1</sup>剪切速率下进行20~30 min的固定剪切速率测量,温度为25℃。对得到的粘度-时间曲线,采用方程(9)进行拟合。所得的λ<sub>e</sub>,k<sub>1</sub>和C参数如表2~表6所示。

表2 4% SiO<sub>2</sub>煤油凝胶的时间依赖参数

Table 2 Time dependent parameters of 4% SiO<sub>2</sub> kerosene gel

shearing rate/s <sup>-1</sup>	λ <sub>e</sub>	k <sub>1</sub>	C
5	1.25	0.0124	0.38
10	1.284	0.00439	0.289
50	0.707	0.0495	0.189
100	0.274	0.0244	0.0856
500	0.714	0.01	0.0549

Note: λ<sub>e</sub>, k<sub>1</sub> and C are the parameters of time dependent constitutive equation.

表3 5% SiO<sub>2</sub>煤油凝胶的时间依赖参数

Table 3 Time dependent parameters of 5% SiO<sub>2</sub> kerosene gel

shearing rate/s <sup>-1</sup>	λ <sub>e</sub>	k <sub>1</sub>	C
5	1.014	0.0156	0.791
10	0.885	0.00733	0.556
50	0.235	0.00901	0.33
100	0.135	0.0474	0.359
500	0.228	0.0387	0.17

表4 6% SiO<sub>2</sub>煤油凝胶的时间依赖参数

Table 4 Time dependent parameters of 6% SiO<sub>2</sub> kerosene gel

shearing rate/s <sup>-1</sup>	λ <sub>e</sub>	k <sub>1</sub>	C
5	0.488	0.0072	0.259
10	0.696	0.0131	0.448
50	0.123	0.008	0.252
100	0.222	0.0477	0.2386
500	0.177	0.06875	0.0775

表5 7% SiO<sub>2</sub>煤油凝胶的时间依赖参数

Table 5 Time dependent parameters of 7% SiO<sub>2</sub> kerosene gel

shearing rate/s <sup>-1</sup>	λ <sub>e</sub>	k <sub>1</sub>	C
5	0.495	0.00665	0.22
10	0.335	0.00724	0.284
50	0.705	0.0897	0.0157
100	0.226	0.0142	0.115
500	0.308	0.0246	0.0648

表 6 有机煤油凝胶的时间依赖参数(7.5%凝胶剂 A+7.5%无水乙醇)

Table 6 Time dependent parameters of organic kerosene gel (7.5% gellant A +7.5% alcohol)

shearing rate/ $s^{-1}$	$\lambda_e$	$k_1$	C
5	0.542	0.00615	0.158
10	0.496	0.00712	0.151
50	0.0332	0.0094	0.0813
100	0.788	0.0219	0.107
500	0.372	0.0152	0.0992

由表 2~表 6 可见,在不同凝胶剂含量下, $\lambda_e$  随剪切速率的增大先迅速减小然后在  $100 s^{-1}$  之后缓慢增大; $k_1$  的波动幅度较大,变化没有规律; $C$  随剪切速率的增大逐渐减小。本研究未得到在不同凝胶剂含量下, $\lambda_e$ 、 $k_1$  和  $C$  三者对剪切速率一致的函数关系。这可能是误差所致:测量流变数据的误差;所拟合本构方程与实际流动曲线的误差(在低剪切速率处误差较大,中等剪切速率处误差较小);时间依赖本构模型与实际值有一定的差异。其具体原因还有待研究。下面给出无机 6%  $SiO_2$  煤油凝胶和有机煤油凝胶测量与拟合的时间本构方程曲线,如图 8、图 9 所示。

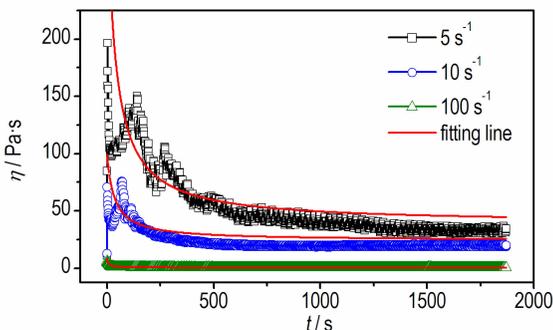


图 8 6%  $SiO_2$  煤油凝胶时间依赖本构曲线拟合

Fig. 8 Time dependent constitutive equation fitting line of 6%  $SiO_2$  kerosene gel

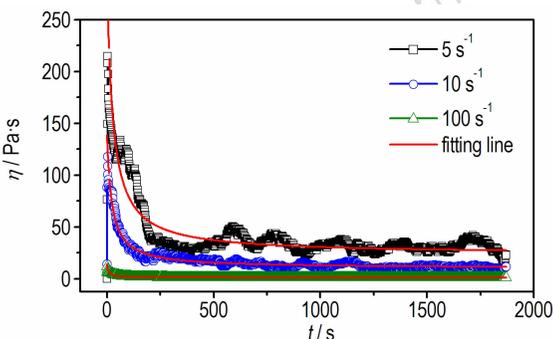


图 9 有机煤油凝胶时间依赖本构曲线拟合

Fig. 9 Time dependent constitutive equation fitting line of organic kerosene gel

从图 8、图 9 可见,随剪切速率的增大,粘度-时间曲线的振幅越小,粘度趋于定常值的时间越短。可以认为,随剪切速率的增大,凝胶材料从完整结构到完全破坏结构状态所需经历的时间缩短,中间过程的振幅减小。

### 3.4 温度依赖的本构方程建立

测试数据表明,煤油凝胶受温度影响很大,需要在本构方程中得到体现。本实验拟合出无机和有机煤油凝胶在  $-8, 10, 30, 60$  °C 和  $90$  °C 条件下的  $\eta = k \dot{\gamma}^{n-1}$ , 发现  $k$  和  $n$  值与温度  $T$  的关系可表示为:

$$y = a(x-b)^2 + c \quad (10)$$

式中, $y$  代表  $k$  或  $n$ ,  $x$  代表温度  $T$ 。可得温度依赖的本构方程为:

$$\eta = [a_1(T-b_1)^2 + c_1] \dot{\gamma}^{a_2(T-b_2)^2 + c_2 - 1} \quad (11)$$

对于所得的无机和有机煤油凝胶温度依赖本构的各参数列于表 7。并给出测量的无机 4%  $SiO_2$  煤油凝胶和有机煤油凝胶的粘度-时间曲线,如图 10、图 11 所示。

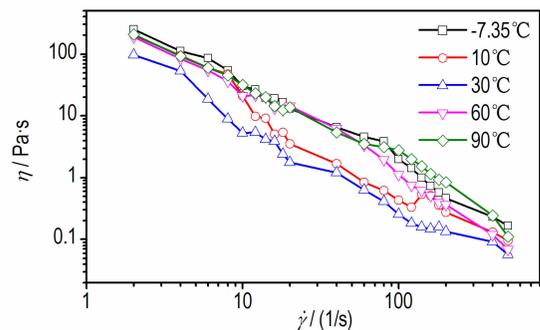


图 10 4%  $SiO_2$  煤油凝胶在不同温度下的流变曲线

Fig. 10 Flow curves under different temperatures of 4%  $SiO_2$  kerosene gel

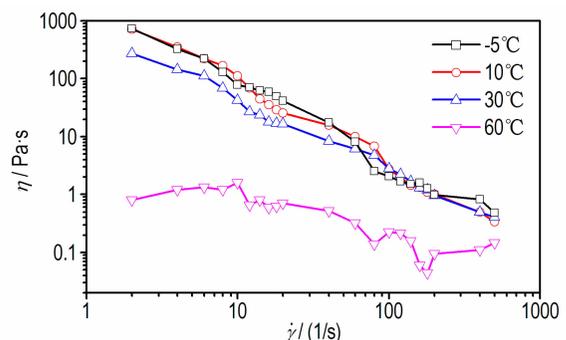


图 11 有机煤油凝胶在不同温度下的流变曲线

Fig. 11 Flow curves under different temperatures of organic kerosene gel

表 7 无机和有机煤油凝胶温度依赖本构方程参数

Table 7 Parameters of temperature dependent constitutive equations of inorganic and organic kerosene gel

parameter	4% SiO <sub>2</sub>	5% SiO <sub>2</sub>	6% SiO <sub>2</sub>	7% SiO <sub>2</sub>	7.5% gellant A +7.5% alcohol
a <sub>1</sub>	0.123	-0.246	-0.0648	1.091	0.127
b <sub>1</sub>	42.885	44.227	129.004	47.217	197.3
c <sub>1</sub>	381.876	1370.1	2878.481	1856.789	-2471.05
a <sub>2</sub>	4.662E-5	9.777E-5	1.121E-4	3.781E-7	2.263E-4
b <sub>2</sub>	31.299	37.551	36.542	-8560.288	-1.313
c <sub>2</sub>	-0.416	-0.542	-0.784	-28.637	-0.453

从图 10、图 11 可见,在 2 ~ 500 s<sup>-1</sup> 剪切速率范围内,对于无机煤油凝胶来说,粘度随温度的增加呈先减小后增大的趋势;对于有机煤油凝胶来说,粘度是逐渐减小,并且在 90 °C 下的粘度很小,接近于煤油的粘度,流变仪已经无法测得。对于煤油凝胶,低温条件下粘度总体比较大,由文献[17]可知,液体的粘性来自分子的引力,当温度降低,分子间的距离减小,分子引力增大,内摩擦增大,所以粘度增大。而对于无机煤油凝胶在温度升高时,粘度增大,凝胶与液体唯一的不同是,具有三维网络结构,因此,主要原因是温度升高提高了无机煤油凝胶的网络结构质量,从而提高了凝胶的粘度。

## 4 结 论

在 RP-1 煤油凝胶制备的基础上,对其流变特性和不同本构方程建模进行了研究,所得的结论如下:

(1) 添加助剂无水乙醇会改善有机凝胶剂的成胶质量,并显著提高煤油凝胶的粘度。

(2) 对于无机煤油凝胶,稠度系数  $k$  和凝胶剂含量  $Y_{\text{amout}}$  的函数关系为  $k = 1.144 Y_{\text{amout}}^{3.251} + 145.477$ 。幂律指数  $n$  为负值,表示制备的煤油凝胶剪切稀化能力更强。

(3) 无机和有机煤油凝胶的复凝性很弱且不受凝胶剂含量和类型的影响,这有利于降低凝胶供给系统的压力损失。

(4) 采用结构动力学模型构建煤油凝胶的时间依赖本构方程,随剪切速率的增大:  $\lambda_0$  先迅速减小然后在 100 s<sup>-1</sup> 之后缓慢增大;  $k_1$  的波动幅度较大,变化规律性不强;  $C$  逐渐减小;凝胶从完整结构到完全破坏结构状态所经历的时间缩短,中间过程曲线的振幅减小。

(5) 凝胶温度依赖本构方程可表示为:

$\eta = [a_1 (T - b_1)^2 + c_1] \dot{\gamma}^{a_2 (T - b_2)^2 + c_2 - 1}$ 。表明,随温度的增加,无机煤油凝胶的粘度先减小后增大;有机煤油凝胶的粘度逐渐减小,并且在 90 °C 下的粘度接近于煤油的粘度。

## 参考文献:

- [1] Natan Benveniste, Rahimi Shai. The status of gel propellants in year 2000 [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2001, 5(1-6): 172-194.
- [2] Pein R. Gel propellants and gel propulsion [C] // 5<sup>th</sup> International High Energy Materials Conference and Exhibit DRDL, 2005.
- [3] 左博, 张蒙正. 凝胶推进剂直圆管中剪切速率与表观粘性实验研究 [J]. *火箭推进*, 2007, 33(4): 12-15.  
ZUO Bo, ZHANG Meng-zheng. Experimental investigation of the apparent viscosity and the shear rate of gelled propellant in straight round pipe [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2007, 33(4): 12-15.
- [4] 刘凯强, 陈钿, 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.
- [5] 刘凯强, 陈钿, 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 the aviation kerosene gels with hydroxypropyl cellulose as a gelator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 169-172.
- [6] 谢洪涛, 袁伟, 肖小兵, 等. 凝胶单推-3 流变性研究 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2011, 9(5): 76-78.  
XIE Hong-tao, YUAN Wei, XIAO Xiao-bing, et al. Researches on rheological property of gelled DT-3 [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2011, 9(5): 76-78.
- [7] 赵岩, 谢洪涛, 袁伟, 等. 凝胶单推-3 制备及性能研究 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2010, 8(2): 49-51.  
ZHAO Yan, XIE Hong-tao, YUAN Wei, et al. Research on preparation and properties of gel propellant DT-3 [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2010, 8(2): 49-51.
- [8] Madlener K, Ciekisid H K. Estimation of flow properties of gelled fuels with regard to propulsion systems [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 28(1): 113-121.
- [9] Rahimi Shai, Hasan Dov, Peretz Arie. Preparation and characterization of gel propellants and simulants [R]. AIAA paper, 2001-3264.
- [10] Rahimi Shai, Peretz Arie. Rheological matching of gel propellants [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(2): 376-378.
- [11] Arnold Richard, Santos P H S. Investigation of gelled JP-8 and RP-1 fuels [C] // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2009.
- [12] Arnold R, Santos P H S, Campanella O H. Rheological and thermal behavior of gelled hydrocarbon fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(1): 151-161.
- [13] Salvo Roberto Di, Deaconu Stelu. Development and implementation of Non-Newtonian rheology into the generalized fluid sys-

- tem simulation program(GFSSP)[R]. AIAA paper 2006-4869.
- [14] Butler F, O'Donnell H J. Modelling the flow of a time-dependent viscous product (cultured buttermilk) in a tube viscometer at 5 °C[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999, 42(1999): 199-206.
- [15] Ferguson J, Kembrowski Z. Applied fluid rheology[M]. Elsevier, New York, 1991.
- [16] Henrique Paulo. Mechanical characterization and computational modeling of gels[D]. West Lafayette: Purdue University. 2012.
- [17] 陈惠利. 粘度测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1994: 20-27.

## Time and Temperature Dependent Constitutive Equations Modeling of RP-1 Jet Fuel Gel

CAO Qi, FENG Feng, WU Xiao-song

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** According to the special solid-liquid state of gel, the gelation mechanism of gel agents (inorganic(B) and organic(A)) for gelation aviation kerosene RP-1 were studied. The rheological parameters were measured by Brookfield rotational rheometer. Finally, the time independent, time dependent, and temperature dependent constitutive equations were built. Results show that the anhydrous ethanol is advantageous for the gelation of kerosene by gel agent A. The consistency coefficient  $k$  and gallant amount  $Y_{\text{amout}}$  have a relationship of power law dependence. The thinning ability of the kerosene gel prepared is stronger than that of typical shear thinned fluid( $0 < n < 1$ ). The resilience of inorganic and organic kerosene gel is very weak and not affected by the gel content and type. When shear rate increases, the time needed from intact structure to completely destroyed structure of the gel decreases, and the amplitude of the process curve decreases. When the temperature increases, the viscosity of inorganic kerosene gel decreases first and then increases, while the viscosity of organic kerosene gel decreases gradually and get close to the viscosity of kerosene at 90 °C.

**Key words:** jet fuel gel; gelation mechanism; rheological characterization; time dependent constitutive equation; temperature dependent constitutive equation; resilience

**CLC number:** TJ55; V421.4+2

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.06.014