

# 丁羟推进剂药浆固化过程中触变性转变规律研究\*

江晓瑞<sup>1</sup>, 李卓<sup>1</sup>, 鲁荣<sup>2</sup>, 高波<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学 理学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;  
2. 内蒙古航天红峡化工有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010070)

**摘要:** 为研究固化反应对丁羟推进剂药浆触变性的影响, 对丁羟推进剂药浆在固化反应过程中触变性转变规律进行了实验研究和理论分析。结果表明, 推进剂药浆的触变性受到固化时间和剪切速率两个因素的显著影响: 剪切速率增高会促使药浆呈现触变性; 固化时间增长会促使药浆呈现反触变性。药浆触变性转变的剪切速率为 $0.2\text{s}^{-1}\sim 0.5\text{s}^{-1}$ , 剪切速率小于此范围时完全呈现反触变性; 大于此范围时药浆完全呈现触变性。当剪切速率进入转变区间后, 会先从低固化时间处由反触变性转变为触变性, 随着固化时间的增长触变性消失, 反触变性再次出现。剪切速率越高反触变性重新出现所需固化时间越长, 超出转变区间后反触变性不再出现, 药浆完全呈现触变性。

**关键词:** 复合推进剂; 流变学; 触变性; 剪切速率; 固化反应

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 05-1178-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190587

## Study on Transition Law of Thixotropic Characteristics of HTPB Propellant Slurry during Solidification

JIANG Xiao-rui<sup>1</sup>, LI Zhuo<sup>1</sup>, LU Rong<sup>2</sup>, GAO Bo<sup>1</sup>

(1. College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;  
2. Inner Mongolia Aerospace Hongxia Chemical Co. Ltd., Hohhot 010070, China)

**Abstract:** In order to study the effect of solidification reaction on the thixotropy of HTPB propellant slurry, the thixotropy transition law of HTPB propellant slurry during solidification reaction was studied experimentally and theoretically. The results show that the thixotropy of propellant slurry is significantly affected by solidification time and shear rate: the increase of shear rate will cause the slurry to exhibit thixotropy; the increase of solidification time will cause the slurry exhibit anti-thixotropy. The shear rate range of thixotropy transformation is  $0.2\text{s}^{-1}$  to  $0.5\text{s}^{-1}$ . When the shear rate is lower than this range, the slurry completely shows anti-thixotropy. Beyond this range, the slurry completely shows thixotropy. When the shear rate is in the range of transition, it will change from anti-thixotropy to thixotropy at low solidification time. With the increase of solidification time, the thixotropy disappears, and the anti-thixotropy appears again. The higher shear rate is, the longer solidification time is required for the anti-thixotropy to reappear. Beyond the transformation range, the anti-thixotropy no longer appears, and the slurry completely exhibit thixotropy.

**Key words:** Composite propellant; Rheological; Thixotropy; Shear rate; Solidification reaction

\* 收稿日期: 2019-08-27; 修订日期: 2019-10-30。

基金项目: 国家自然科学基金 (11262014)。

作者简介: 江晓瑞, 博士生, 研究领域为固体火箭发动机实验技术及数值仿真。E-mail: 415671185@qq.com

通讯作者: 李卓, 博士, 教授, 研究领域为固体火箭发动机设计。E-mail: 704028389@qq.com

引用格式: 江晓瑞, 李卓, 鲁荣, 等. 丁羟推进剂药浆固化过程中触变性转变规律研究[J]. 推进技术, 2020, 41(5): 1178-1184. (JIANG Xiao-rui, LI Zhuo, LU Rong, et al. Study on Transition Law of Thixotropic Characteristics of HTPB Propellant Slurry during Solidification[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(5): 1178-1184.)

## 1 引言

丁羟推进剂是一种典型的固体推进剂,在固体动力行业应用十分广泛。丁羟推进剂由分散相填料及黏合剂、增塑剂等混合后再经由固化而成。其药浆是一种高固含量悬浮液体,是一种流变特征十分复杂的非牛顿流体。在流变学中,表征推进剂药浆流变性能需要流动曲线、触变曲线、动态频率曲线、动态应变曲线及温度曲线共同进行表征<sup>[1]</sup>。触变性是推进剂药浆基础特征之一。

在流变学中,触变现象指在其它参数一定的情况下流体黏度随外力作用时间不断变化的现象:黏度变小时称为触变性,黏度变大时称为震凝性或反触变性。测定触变性有两种常用方法,一种是在定剪切速率下记录剪切应力或黏度随剪切时间的变化,并总结其变化规律;一种是在一定时间下、按照某一规律使剪切速率从小升至一定大值,之后再以同样的时间和规律逐渐减小至初始剪切速率,分别记录上升和下降的流动曲线后形成包络线,通过包络线所围成的面积和形状来判断触变性的大小和特点<sup>[2-4]</sup>。

丁羟推进剂药浆是一种高固含量的悬浮液,在混合完成后会发生固化反应,药浆分子间逐步发生黏合、交联等变化,使两个或多个分子相互键合、交联成结构更加稳定的网络状,并最终使推进剂固化成固体状态。由于固化反应改变了药浆的分子结构,使得药浆的流变特性发生显著改变。药浆的黏度、屈服值等特征量会在几小时内发生几倍乃至几十倍的变化,触变特征也会随着固化反应的进行不断变化。当推进剂配方不同时,如固化剂、黏合剂、增塑剂等配方的种类和配比存在差异时,固化过程中推进剂的流变性能演变规律也会存在较大的差异<sup>[5-11]</sup>。

浇注是推进剂成型的重要阶段。一般情况下,由于发动机大小、药柱形状及浇注工艺存在差异,浇注时间从几十分钟至几小时不等,而这一时间段也是固化反应进行的高峰时间。在此时间段内不同的固化阶段和不同的剪切速率下,药浆可能会呈现出截然不同的触变规律,触变性和反触变性会交替出现。触变性的变化会影响到药浆黏度,进而对浇注工艺以及成型结果产生重要影响<sup>[2-3]</sup>。合理利用触变性可以在一定程度上控制药浆黏度,改善药浆流动性,最大限度降低产生孔洞等不良浇注结果的风险。因此研究推进剂固化反应过程中触变性的变化在理论和工程上均具有重要的意义。

湖北红星化学研究所的唐汉祥<sup>[12]</sup>对固体推进剂药浆在不同剪切速率下的触变性特征进行了研究。结果显示推进剂药浆在不同剪切速率下呈现不同的触变特征,在低剪切速率下呈反触变性,高剪切速率下呈触变性。但该研究未能确定剪切速率的界限,未考虑固化时间的影响,由反触变性转换至触变性的过程也未做研究。

江晓瑞等<sup>[13]</sup>研究了丁羟推进剂药浆在不同固化时间、不同剪切速率下表现黏度的变化规律,将其总结为时间的函数,并在本构模型中引入时间变量,从而使模型能够表征不同固化时间下的黏度。对丁羟推进剂药浆的生产、浇注具有较好的指导意义。但重点在表现黏度的研究,未对触变性做精确研究。

朱宏春等<sup>[14]</sup>采用流变实验和红外光谱分析的手段对 NEPE 推进剂固化初期流变性能进行了研究。其研究主要针对推进剂初期的固化反应阶段,且重点在于推进剂的模量变化和不同组分间的化学反应,未对推进剂的触变性进行全面研究。

美俄等国对固体推进剂流变性能和浇注工艺的研究起步较早,采用理论分析、大型实验等方法进行了较深入的研究。如 NASA 自 20 世纪 60 年代起,对多种推进剂进行过大量缩比和原尺寸浇注工艺验证实验,同时对浇注过程中药浆的流变特性进行了大量研究。1978 年, NASA 对直径 6.6m (装药量 816.480t) 的固体发动机进行了缩比浇注实验和全尺寸浇注实验,对浇注过程中药浆流动性、触变性、浇注工艺对浇注结果的影响等方面进行了研究<sup>[15-17]</sup>。这些工作为其大直径、分段式和复杂翼型的装药设计奠定了坚实基础。

随着固体推进技术的发展,大直径、分段式、复杂翼型成为固体发动机的发展趋势。伴随着固体发动机性能的不不断提升,对浇注技术和工艺提出了更高的要求,因而需要对药浆流变性进行更深入的研究<sup>[18-20]</sup>。整体来看,在推进剂药浆触变性能研究,特别是国内对药浆触变性能的研究还相对较少。

本文对一种丁羟推进剂药浆在固化反应过程中触变性转变规律进行了研究,确定了推进剂由反触变性向触变性转变时的剪切速率范围和固化时间,并总结了转变过程的规律,对推进剂药浆浇注工艺的改进和提升具有指导意义。

## 2 实验及数据处理方法

### 2.1 实验方法

采用定剪切速率下连续测量推进剂药浆黏度的

方法研究药浆的触变性。所用的丁羟推进剂药浆组分及含量为:高氯酸铵约68%;铝粉约17%;端羟基聚丁二烯约11.3%;固化剂为2,4-甲苯二异氰酸酯和2,6-甲苯二异氰酸酯,总含量约为0.5%;防老化剂为二苯基对苯二胺,含量约0.1%;键合剂为三乙醇胺,含量约0.05%;弹道调节剂辛基二茂铁和卡托辛,总含量约1.5%;增塑剂为葵二酸二辛脂,含量约1%。此外还含有少量的工艺助剂等组分。在实际生产中,推进剂药浆在混合过程及整个浇注过程中处于保温状态,保温温度为50℃,为保证实验环境与实际生产环境一致,采用相同的保温措施,使实验所用推进剂药浆始终处于50℃恒温状态。

根据推进剂的生产流程,当药浆混合完成后需要经过0.5h~2h的时间进行转运、保温或等待浇注过程,因此实验时从推进剂药浆混合完成后开始计时,每隔半小时进行一次测量。由于推进剂药浆的浇注或其它加工过程持续时间一般在1h~5h,因此测量最大时间为混合结束后5h。每次实验时,药浆在施加剪切速率后开始计时,对约230s内药浆的表观黏度进行不少于10次的测量,在测量过程中始终保持剪切速率不变。测试结束后使药浆处于无剪切静止状态,并始终保持恒温,30min后开始下一次测试。

每次实验只针对一个相同的剪切速率进行测试,通过多次实验获取不同剪切速率下推进剂药浆的触变特性。所有测试均采用BROOKFIELD R/S Plus旋转黏度测试仪测量。

测量的剪切速率分别为 $0.1\text{s}^{-1}$ ,  $0.2\text{s}^{-1}$ ,  $0.3\text{s}^{-1}$ ,  $0.4\text{s}^{-1}$ ,  $0.5\text{s}^{-1}$ 和 $0.6\text{s}^{-1}$ 。在实验过程中数据采集频率、剪切持续时间等量会因安全性要求或实验室条件进行适当微调。

## 2.2 数据处理方法

为保证测试数据结果具有较高的可信度,对每个测试的剪切速率中不同固化时间下的黏度或切应力均进行多次测量。对测量结果采用格拉布斯法,在95%置信度下剔除异常数据,并保证最终得到的有效样本数 $\geq 20$ 。表1为剪切速率为 $0.5\text{s}^{-1}$ 时,固化时间为整小时数时切应力实验数值的检验结果,结果显示只有少数样本离群,整体测量结果可信度较高。

Table 1 Sample statistical list

Time/h	1	2	3	4	5
Number of sample	21	21	21	23	21
Number of outlier sample	1	0	1	2	1

在剔除离群样本后对相同实验情况下得到的不同组数据取平均值后作为最终测量结果,以此减小实验误差,最大程度保证实验结果的精确性。

其它剪切速率和固化时间下的实验数据均采用相同的处理方法,后文不再赘述。

## 3 结果分析

图1为剪切速率 $0.1\text{s}^{-1}$ 时不同固化时间下的触变曲线,在测试的5h内推进剂药浆始终呈反触变性,即随着剪切时间的增加药浆黏度逐渐上升,升至一定值后基本保持稳定。

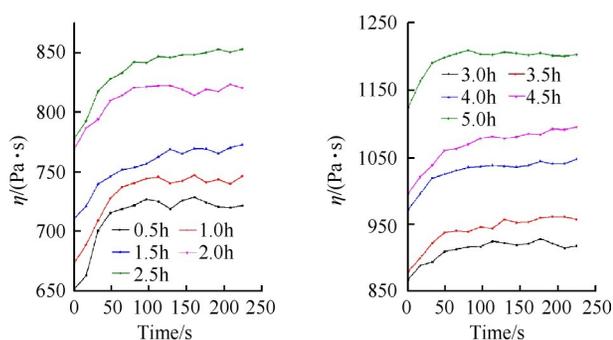


Fig.1 Thixotropic curves at different curing time when shear rate was  $0.1\text{s}^{-1}$

图2中分别为剪切速率 $0.2\text{s}^{-1}$ ,  $0.3\text{s}^{-1}$ ,  $0.4\text{s}^{-1}$ 和 $0.5\text{s}^{-1}$ 时的触变曲线。在此四种剪切速率下,随固化时间的增加推进剂药浆的触变特征发生明显改变。在固化时间较短时药浆均表现为触变性,随着固化时间的增加触变性消失,在一段时间内无明显的触变或反触变特征,即药浆黏度随剪切时间增加无明显的变化;固化时间较长后均转变为明显的反触变性。

当剪切速率增加至 $0.2\text{s}^{-1}$ 时,药浆首先从固化时间较短处由反触变性转换为触变性,随着固化时间的增加,药浆黏度增高,触变性又逐渐消失。固化时间达到一定时长后药浆又变回反触变性。剪切速率继续增加后,药浆触变性消失所需的固化时间增长,反触变性再次出现的时间也随之向后推移。从图中看出,当剪切速率由 $0.2\text{s}^{-1}$ 增至 $0.5\text{s}^{-1}$ 时,触变性消失时间由固化1h逐步增加到固化3.5h;剪切速率为 $0.2\text{s}^{-1}$ 时,反触变性再次出现时间为固化4h,随着剪切速率升高,反触变性再次出现所需固化时间逐步增加,剪切速率升至 $0.5\text{s}^{-1}$ 时在测量的时间内反触变性未再次出现。

结合图1分析可以明显发现,在推进剂药浆触

变-反触变转换过程中明显受到剪切速率和固化时间两个因素的影响。剪切速率增加会促使药浆由反触变性逐渐向触变性方向转变;固化时间增加则促使药浆由触变性向反触变性方向逐渐转变。

表2列出了在转变区间内各剪切速率下触变性特征结束时的固化时间、无明显触变特征的保持时

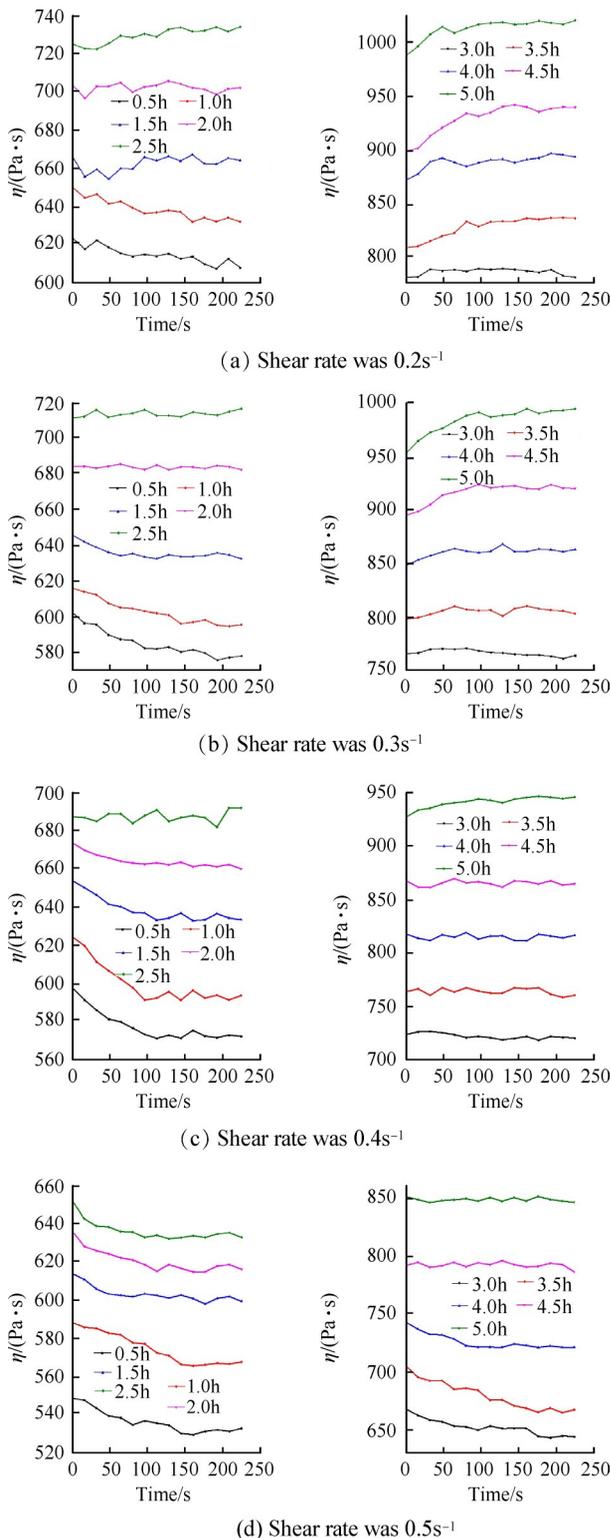


Fig. 2 Thixotropic curves at different solidification time

间和开始呈现反触变性时的固化时间三个参量的统计表。可以明显看出,剪切速率的增加会使触变性特征的消失时间向后推迟,反触变性的出现时间也向后推迟。

Table 2 Statistical table of results

Shear rate/s <sup>-1</sup>	Curing time at the end of thixotropy/h	No-thixotropic duration/h	Curing time at the beginning of antithixotropy/h
0.2	1.5	2.0	3.5
0.3	2.0	2.0	4.0
0.4	2.5	2.5	5.0
0.5	4.0	-	-

综合比较各图和表1可以发现,当剪切速率增加后药浆首先从低固化时间开始出现触变性,并经历触变性消失、无触变性、反触变三个阶段,随着剪切速率增高,三个阶段出现所需固化时间逐步增加,当剪切速率增加至0.5s<sup>-1</sup>时,已无反触变性,显示药浆的转化过程已基本完成。在转变过程中,总是存在约2h的转变时间,在此时间内药浆无明显的触变性或反触变性。

图3为剪切速率为0.6s<sup>-1</sup>时的触变曲线,可以看到此时药浆在整个测试时间内均呈现为触变性,说明该剪切速率已经超出丁羟推进剂药浆的转变区间。

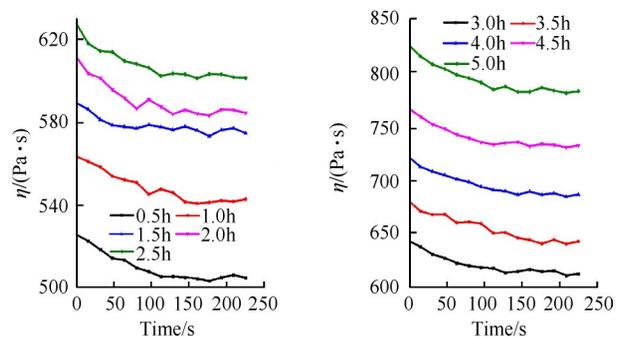


Fig. 3 Thixotropic curves at different curing time when shear rate was 0.6s<sup>-1</sup>

#### 4 触变本构模型分析

##### 4.1 本构模型和数据拟合方法

表征触变行为的本构模型有多种,其中一种常用的三参数指数型触变性本构方程的表达式<sup>[21-22]</sup>为

$$\tau = \tau_{\infty} - (\tau_{\infty} - \tau_0)e^{-kt}$$

式中 $\tau$ 为剪切应力; $\tau_{\infty}$ 为极限剪切应力; $\tau_0$ 为初始剪切应力; $k$ 为表征流体触变过程中黏度改变速度

的量; $t$ 为剪切时间。

这一本构模型数学形式简单,各参量物理定义明确,可以较好地表征流体的触变行为。为研究丁羟推进剂药浆的触变特性,使用该本构模型对实验数据进行了拟合,并对结果进行分析。

采用最小二乘法对实验数据进行曲线拟合,各曲线拟合时 $R^2$ 值为0.935~0.998,显示拟合结果良好,能够真实反应推进剂的触变特性。

#### 4.2 拟合结果与分析

通过曲线拟合,分别得到不同剪切速率、不同固化时间下 $\tau_\infty, \tau_0, \Delta\tau$ 和 $k$ 的数值。其中 $\Delta\tau$ 为极限切应力和初始切应力差值的绝对值,即 $\Delta\tau = |\tau_\infty - \tau_0|$ 。

图4为剪切速率 $0.1\text{s}^{-1}$ 时各参数随固化时间的变化曲线。随着固化时间增加,药浆的初始切应力 $\tau_0$ ,极限切应力 $\tau_\infty$ 均呈逐渐增大的趋势。应力差 $\Delta\tau$ 及特征量 $k$ 存在波动现象,但整体趋势也是逐渐增大。 $\Delta\tau$ 和 $k$ 存在波动的原因可能是因为这两个量是由 $\tau_0$ 和 $\tau_\infty$ 经计算得出,因此是两个数据误差的累积。各参数变化趋势表明,随着固化反应的进行,药浆黏度逐步增加,在相同剪切速率下切应力上升,并且初始切应力和极限切应力的差距不断增大。 $k$ 值增大显示药浆的响应速度变快,即药浆会在更短的剪切时间内完成由初始切应力向极限切应力的变化过程,弛豫时间降低。

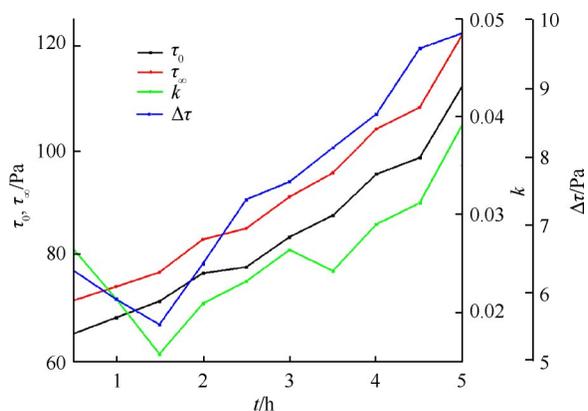
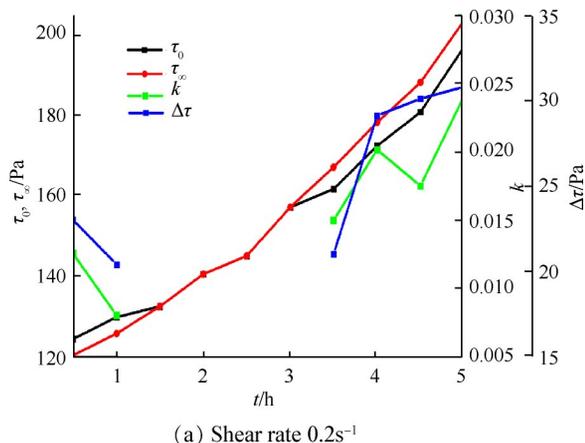


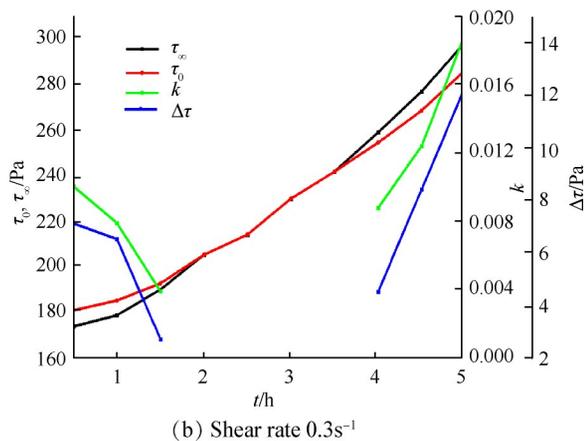
Fig. 4 Parametric curves at shear rate  $0.1\text{s}^{-1}$

图5为剪切速率为 $0.2\text{s}^{-1}\sim 0.5\text{s}^{-1}$ 时,各参数的变化曲线,此四种剪切速率下固化时间不同时药浆会分别呈现触变性、无明显触变特征和反触变性三种情况。当药浆无明显触变特征时 $\tau_\infty, \tau_0$ 不随剪切时间增加而变化,且两者相等。 $\Delta\tau$ 和 $k$ 未做拟合,可以认为均为零。

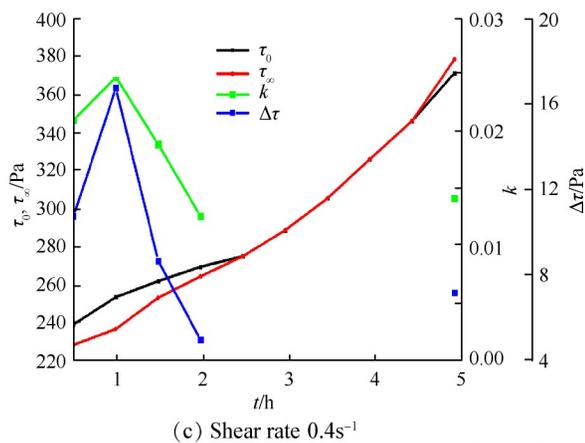
从各组曲线可以看出,无论在何种剪切速率下,



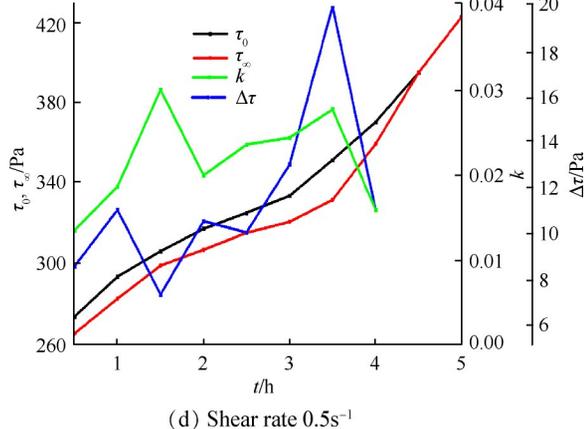
(a) Shear rate  $0.2\text{s}^{-1}$



(b) Shear rate  $0.3\text{s}^{-1}$



(c) Shear rate  $0.4\text{s}^{-1}$



(d) Shear rate  $0.5\text{s}^{-1}$

Fig. 5 Parametric curves at different shear rate

药浆的初始切应力和极限切应力均是随固化时间不断增加。但 $\tau_{\infty}$ 和 $\tau_0$ 的增速明显不同,初始阶段药浆呈触变性时, $\tau_0 > \tau_{\infty}$ ,但 $\tau_0$ 增速低于 $\tau_{\infty}$ ,因此两条曲线逐步相交,在一定时间内基本相等,之后 $\tau_{\infty} > \tau_0$ ,并且两者之差逐步扩大,药浆完成由触变性向反触变性的转变。

无论药浆完全呈现触变性还是反触变性时, $\Delta\tau$ 和 $k$ 整体变化趋势均是随固化时间逐渐增大。但进入转变过程后,随着 $\tau_{\infty}$ 和 $\tau_0$ 的逐渐接近,在 $\Delta\tau$ 变为零之前的一小段时间内, $\Delta\tau$ 和 $k$ 会逐渐变小。当转换完成后, $\tau_{\infty} > \tau_0$ , $\Delta\tau$ 和 $k$ 又会逐渐增大。即在转变过程中, $\Delta\tau$ 和 $k$ 会呈N字形变化。

图6是剪切速率 $0.6\text{s}^{-1}$ 时的各参数曲线,此时药浆已完全呈现触变性, $\tau_{\infty}$ 和 $\tau_0$ 呈单调增加趋势, $\Delta\tau$ 和 $k$ 受误差影响有一定波动,但也呈现随固化时间增长

而逐渐增加的整体变化趋势。

图7为初始切应力 $\tau_0$ 和极限切应力 $\tau_{\infty}$ 随剪切速率的变化曲线。在转变区间内切应力与剪切速率大体呈线性增加关系。

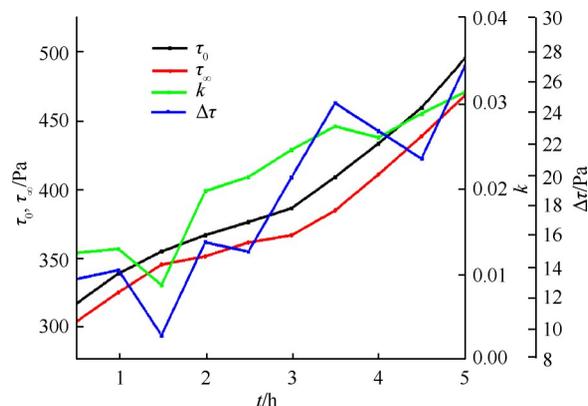
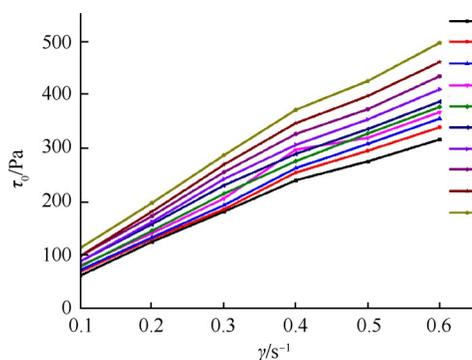
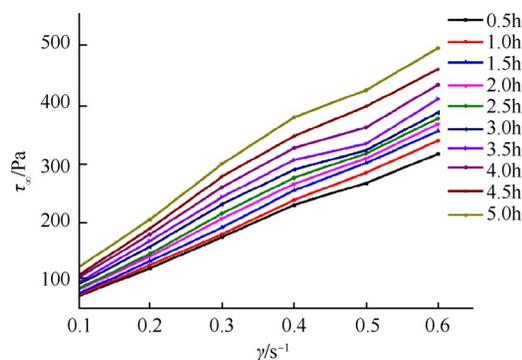


Fig. 6 Parametric curves at shear rate  $0.6\text{s}^{-1}$



(a) Initial shear stress



(b) Limit shear stress

Fig. 7 Curve of initial shear stress and limit shear stress with shear rate

## 5 结论

通过对丁羟推进剂在固化前期触变性演变过程的实验研究,得到如下几点结论:

(1)丁羟推进剂药浆由反触变性向触变性转变的剪切速率为 $0.2\text{s}^{-1}\sim 0.5\text{s}^{-1}$ ,剪切速率低于该区间时药浆完全呈现反触变性;高于该区间时药浆完全呈现触变性;期间存在约2h时间无明显触变特征。

(2)在转变区间内,反触变性首先从低剪切速率、低固化时间处开始消失,固化时间上升会使反触变性重新出现,而剪切速率的上升会使反触变性出现所需的固化时间增加。

(3)丁羟推进剂药浆呈反触变性时初始切应力 $\tau_0$ 小于极限剪切应力 $\tau_{\infty}$ ,两者均随固化时间逐渐上升,由反触变性转变为触变性的过程中两者出现交叉,之后 $\tau_0 > \tau_{\infty}$ ,药浆呈现触变性。

(4)在转变区间内,药浆的切应力与表观黏度呈

线性关系,切应力随剪切速率增加而增大。

**致谢:**感谢内蒙古航天红峡化工有限公司工艺所的员工在实验时提供的大力支持。感谢国家自然科学基金的资助。

## 参考文献

- [1] 吴其晔,巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
- [2] 郑剑. 高能固体推进剂性能及配方设计专家系统. [M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [3] 张永侠,贾小峰,苏昌银. 固体火箭发动机装药与总装工艺学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2017.
- [4] 江体乾. 化工流变学[M]. 上海:华东理工大学出版社,2004.
- [5] Landsem E, Jensen T L, Hansen F K, et al. Neutral Polymeric Bonding Agents (NPBA) and Their Use in Smokeless Composite Rocket Propellants Based on HMX-GAP-BuNENA [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(5): 581-589.

- [ 6 ] Abhay K Mahanta, Monika Goyal, Devendra D Pathak. Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry [J]. *E-Journal of Chemistry*, 2010, 7(1): 171-179.
- [ 7 ] 唐汉祥, 刘秀兰, 吴 倩. 推进剂药浆流平性研究 [J]. 推进技术, 2000, 21(3): 79-82. (TANG Han-xiang, LIU Xiu-lan, WU Qian. Leveling Properties of the Composite Propellants Slurry [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(3): 79-82.)
- [ 8 ] 唐汉祥, 吴 倩, 陈 江. 硝酸酯增塑聚醚推进剂药浆固化反应研究 [J]. 推进技术, 2003, 24(2): 175-178. (TANG Han-xiang, WU Qian, CHEN Jiang. Curing Characteristics of NEPE Composite Solid Propellant Slurry [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(2): 175-178.)
- [ 9 ] Cheng D C H. Yield Stress: A Time-Dependent Property and How to Measure It [J]. *Rheologica Acta*, 1986, 25(5): 542-554.
- [ 10 ] Botchu V S. Jyoti, Seung Wook Baek. Rheological Characterization of Metalized and Non-Metalized Ethanol Gel Propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(6).
- [ 11 ] Botch V S Jyoti, Seung Wook Baek. Rheological Characterization of Ethanolamine Gel Propellants [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2016, 34(3): 866-873.
- [ 12 ] 唐汉祥. 推进剂药浆流变特性研究 [J]. 固体火箭技术, 1994, 17(3): 28-34.
- [ 13 ] 江晓瑞, 李 卓, 韩秀洁, 等. 固体推进剂药浆改进 Herschel-Bukely 模型及其在仿真分析中的应用 [J]. 推进技术, 2019, 40(9): 2137-2143. (JIANG Xiaorui, LI Zhuo, HAN Xiu-jie, et al. Ameliorated Herschel-Bukely Model of Solid Propellant Slurry and Its Application in Simulation Analysis [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(9): 2137-2143.)
- [ 14 ] 朱宏春, 王吉强, 苗建波. NEPE 推进剂药浆固化初期特殊流变性能研究 [J]. 推进技术, 2013, 34(10): 1420-1425. (ZHU Hong-chun, WANG Ji-qiang, MIAO Jian-bo. Research of NEPE Propellant Slurry Rheological Characteristics in Curing Early Period [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(10): 1420-1425.)
- [ 15 ] Kiage K, Rogers C J, Smith P L, et al. 复合固体推进剂浇入发动机时的流变学 [J]. 固体火箭技术, 1980, (1): 44-57.
- [ 16 ] Muthiah R, Manjari R, Krishnamurthy V N, et al. Rheology of HTPB Propellant: Effect of Mixing Speed and Mixing Time [J]. *Defence Science Journal*, 1993, 43(2): 167-172.
- [ 17 ] Sakovich G V. Design Principle of Advanced Solid Propellant [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(4): 830-837.
- [ 18 ] 吕少一, 邵自强, 赵 明, 等. 基于硝基甲烷的两类凝胶推进剂流变性能研究 [J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 181-188.
- [ 19 ] 潘新洲, 郑 剑, 郭 翔, 等. RDX/PEG 悬浮液的流变性能 [J]. 火炸药学报, 2007, (2): 5-7.
- [ 20 ] 杨雪芹, 王江宁, 陈亚丽. 高固含量改性双基推进剂流变性能的影响因素 [J]. 爆破器材, 2017, 46(05): 33-37.
- [ 21 ] 刘 刚, 张国忠, 邓 燕. 胶凝原油的粘弹-触变方程 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, (6): 72-75.
- [ 22 ] 蔡 峰, 金日光. 触变动力学理论的提出及其触变方程的建立(1) [J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 1985, (2): 90-98.

(编辑: 史亚红)