

凝胶燃料的雾化特性表征

编译: 代予东

中国航天科技集团公司第六研究院一六五所

摘 要: 在当前凝胶燃料研究中, 重点是研究凝胶推进剂雾化过程的流变特性。实验证明假塑性的、有粘性但无弹性的水凝胶具有同牛顿液体一样的雾化模式, 只是它们的雾化过程难度较大。实验结果说明雾化过程深受燃料中凝胶含量和喷注器几何形状的影响。由于凝胶组分含量升高引起剪切粘度升高, 索太尔平均直径 (SMD) 也随之增加。宽角度的收敛流喷注器需要较小上游压力来达到与三个一组对称喷嘴相同的雾化性能。本研究还验证了通过凝胶剂融合来达到理想的流变特性。

关键词: 凝胶燃料; 雾化; 模拟; 特性

中图分类号: V513

文献标识码: A

文章编号: (2004)03-0057-06

符号说明:

d	—— 出口直径	SMD	—— 索太尔平均直径
D	—— 液滴直径	α	—— 收敛角
f	—— A 类凝胶质量比	β	—— 撞击角
F	—— 燃料	η	—— 非牛顿粘度
FN	—— 流量值	$\dot{\gamma}$	—— 剪切速率
K	—— 幂定律粘度因子	τ	—— 剪切应力
\dot{m}	—— 质量流量	τ_{HB}	—— Herschel-Bulkley 屈服应力
n	—— 幂定律速率因子	O	—— 氧化剂
Ni	—— 液滴数	p	—— 压力

下标:

g	—— 气体	l	—— 液体
-----	-------	-----	-------

1 引言

凝胶推进剂即液体燃料和氧化剂的流变特性

因受到添加凝胶剂和金属填料添加剂的影响而变化, 呈现出非牛顿粘弹性或有粘性但无弹性的流体。这些推进剂比常规液体和固体推进剂具有优

收稿日期: 2004-03-01; 修回日期: 2004-03-29。

作者简介: 代予东 (1962—), 男, 翻译, 研究领域为液体火箭发动机试验技术情报分析。

越的安全性和理论性能。它们的表观特性和使用特性与液体推进剂相同，但高密度、高燃烧能量和贮藏时间长等特点吸引业界开发其诸多用途，尤其是在容积有限的推进系统应用上。

添加凝胶剂能防止贮藏期间燃料中的金属固相发生凝聚、团块和分离，形成新的微型结构。但添加凝胶剂也造成凝胶粘度增高，导致燃料在火箭发动机中难以雾化，难以达到较高的燃烧效果。凝胶最重要的特性之一是它的粘度具有剪切速率依赖性或非牛顿粘弹性。考虑到凝胶推进剂这种流变特性，在喷注过程中应用高剪切速率来降低流体粘度，尽可能地使凝胶接近喷注器出口液化。

在流变学观点上来说，理想的金属化推进剂在高剪切速率下是一种近似牛顿性能的、能再生

利用的流性假塑性体的触变胶（剪切稀释）。这种观点极为准确。

事实上，凝胶作为推进剂的性能是图 1 中三角形的三边的结果：燃烧、雾化和流变，流变是其它两边的基础，如图 1 所示，流变性能影响燃烧和雾化。喷注器的流量域依赖于流体的流变特性，喷注器出口的流体粘度张量由雾化域确定。然而，依赖于凝胶剂类型和含量的流变特性对凝胶液滴汽化热量产生极其重要的影响，从而影响液滴的燃烧率。雾化特性和燃烧率之间的相互影响制约液滴的燃烧时间，其结果必然决定着凝胶推进剂的能量性能。结论就是采用一个能产生良好的、低粘滞度流体雾化的雾化器是未来推进系统中应用凝胶的关键。该雾化器的设计应考虑凝胶推进剂的流变特性。

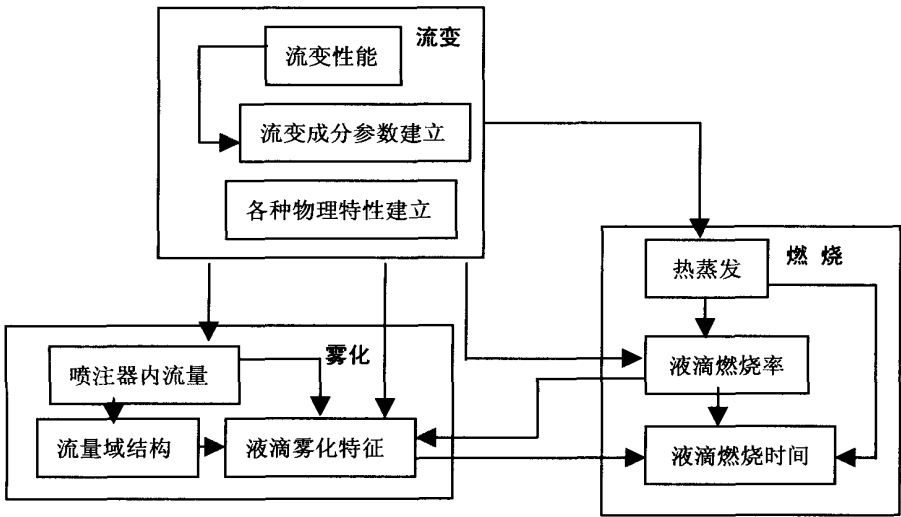


图 1 参数影响简图

利用一个双流的雾化器对非牛顿物质进行雾化特性试验，得到一组包括剪切应力、扩张粘度测量和模型膨胀测量的流体的流变特性数据。将流变性能和雾化特性联系在一起，得出对于剪切稀释的、有粘性但无弹性的物质来说，其 *SMD* 取决于剪切速率的结论。研究发现对于粘弹性物质，要比有粘性但无弹性的物质更难雾化，扩张粘度比表观（剪切）粘度更难雾化，且认为阻碍衰减范围的最重要的原因是流变机理。

利用幂定律结构模拟，对含有铝、镁的

UDMH-MC 凝胶进行了各组分和温度下的流变性能试验，并对它们的特性做了表征：假塑性体的触变性物质。观察了含有金属添加剂的 UDMH 和煤油在各种剪切应力和温度下的性能。在剪切应力下，凝胶燃料的特性表征为易流动热稳定、假塑性体的触变性物质。幂定律结构参数符合所得的限定剪切速率曲线。

有研究小组利用商用雾化器对冲压式喷气发动机用的金属化凝胶燃料的雾化进行研究。又有研究者利用三个一组同轴喷注器提供了凝胶模拟

剂的流量目测试验。用喷注器出口的流体的表现粘性计算出稳定的应变率。还有研究者利用同组分射流互击的双流组喷注器,进行了水凝胶雾化研究。将流体喷射系统转换为表面张力粘度计对非牛顿凝胶的粘度进行测量。然后,通过对撞击喷嘴的几种撞击角度所形成的非牛顿液体膜进行研究,发现衰减范围呈现出一个普遍趋势:衰减范围随着韦伯数的增加而增加。利用能计算非牛顿影响的线形稳态分析法,尝试着对源自液体膜的线流波长进行预测,但预测结果超过了波长。

然而,在所有研究中使用的是标准雾化器,而非设计用于非牛顿流量。有研究者指出一种具备增大剪切速率的改进型喷注器设计是当前所必需的。对适用于各种几何形状喷注器的凝胶推进剂和燃料的流量进行进一步的分析,是预测表现粘度和以后的雾化研究最有用的工具。研究出了一个用于锥形管状喷注器中非牛顿流体的简单理论模拟方法。其模拟结果表明增大收敛角度能明显地降低流量出口截面平均表现粘性。

当前研究的主要工作是提供凝胶推进剂雾化的基本试验数据,并尽量含括所测量的流变参数的影响、喷注器几何形状、喷注系统的控制参数等。

2 试验设施

试验系统分三大部分:推进剂供应系统(凝胶燃料和氧化剂模拟气);喷注系统和液滴尺寸测量及数据采集系统。

凝胶供应系统设计成无需改变流体的流变特性,并能使凝胶燃料变成理想的连续不断的流质进入喷注器入口。凝胶燃料贮存在 4.6lt、活塞直径为 100mm 的、液压操纵的活塞泵内。泵的下流端通过一个挠性管与喷注器泵体连接。位于活塞后的上流端装有液体,用于凝胶燃料质量流量的必要测量。由于凝胶表现出非牛顿流体依赖于流量状态的物理特性和易随着时间变化的特点,使用对凝胶质量流量进行直接测量的难度很大。所以采用两种方法建立凝胶燃料质量流量的测量。第一,使用一个线性电位计测量活塞运动;第二,使用涡轮流量计测量液体流量。液体贮放在一个 6 lt、用氮气增压的贮箱内。凝胶供应系统设计承受压力高达 180atm。

为避免推进剂燃烧,使用氮气作为氧化剂模拟剂,并用标准声速测流孔测量氮气质量流量。喷注系统设计适用于各类型雾化器,能产生连续不断的凝胶燃料/氮气雾化,并能进行温度和雾化器压降测量。喷注器泵体安装在一个三维(X-Y-Z型)的固定装置上,能进行高达 40-50-15cm 的 30kg 质量移动(图 2)。喷注器泵将凝胶燃料和氮气流喷入喷注器产生雾化。

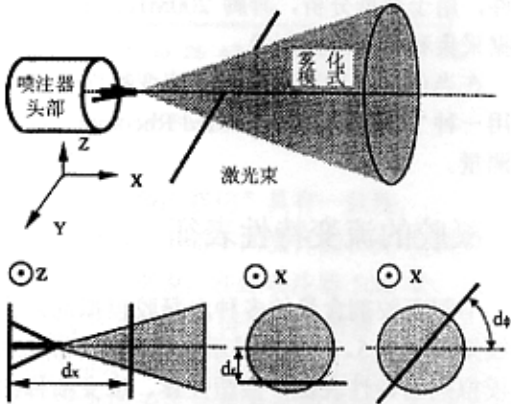


图 2 液滴尺寸测量定位

当前研究中,采用多种几何形状的空气喷注器。喷注器几何形状见图 3。氮气流通过 2 个直径 2mm、相隔撞击角度 $\beta=70^\circ$ 的圆柱形通道。凝胶燃料通过一个具有多收敛角度 (α) 的长度为 8mm、出口直径为 0.42 或 1.6mm 的收敛通道。对距喷嘴平面下流中心线距离 (d_x) 为 5 或 6cm 处进行测量。

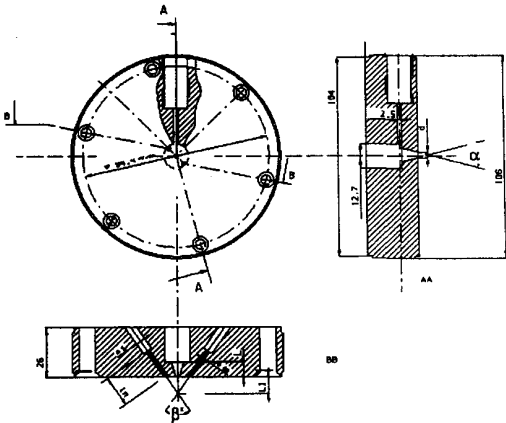


图 3 喷注器几何形状

采用一个 Malvern Mastersize X 对液滴尺寸进行测量。Mastersize X 能对介于 1.2~600μm 多模态液滴尺寸分布进行测量。一个 2mW He-Ne 激光产生一种照准的、直径 18mm 的、0.633μm 波长光束，来照明液滴。入射光被液滴衍射产生一种独立于颗粒位置和速度的静态衍射模式。散射光被 Fourier 变焦镜头聚焦为一个 31 像素、圆形光电二极管阵列。采用基于 Mie 激光衍射理论的 Windows 软件，用于数据分析，奔腾 200MHz 计算机作为数据采集和分析的控制器。

在当前对各种凝胶燃料的流变特性研究中均采用一种 TA CSL²₁₀₀ Carri-Med Rheometer 设备进行测量。

3 凝胶的流变特性表征

不同凝胶剂含量的多种水凝胶模拟剂的流量曲线见图 4 和 5。从曲线显示来看，可以得出水凝胶模拟剂的特性表征：假塑性体、应变渐稀的物质。幂定律和 Herschel-Bulkey 模型分别用公式 (1) 和 (2) 进行的一维模拟的吻合曲线见图 4

的剪切应力与剪切速率。图中十分清晰地显示出幂定律模拟并不能适当地描述在低剪切速率下的流体特性。

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$
 (1)

$$\tau = \tau_{HB} + K\dot{\gamma}^n$$
 (2)

切变粘滞表达为

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$$
 (3)

此外，这些凝胶还表现为触变性物质特性（见图 6 的触变曲线）。

流变参数是在宽剪切速率（ $8 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ）的范围内获得的。对本次试验中所用凝胶来说，凝胶剂含量对幂定律速率因子（n）的影响并不明显，图 4 和 5 以四个单独的、明显的平行线显示试验结果。凝胶含量对幂定律粘度因子（K）的影响明显，但它的值随着剪切速率的作用范围的变化而变化。当用于流体的剪应率接近屈服点时，Herschel-Bulkey 模型表现充分，而幂定律则施加到较大的剪应率。幂定律粘度因子对凝胶含量的依赖性见图 7。

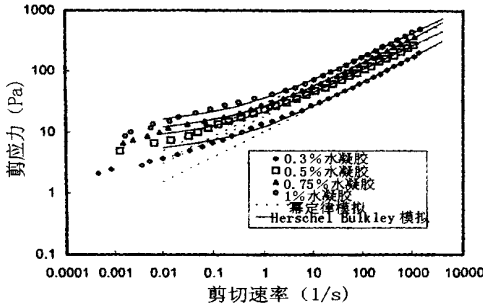


图 4 各种凝胶剪应力和剪切速率曲线

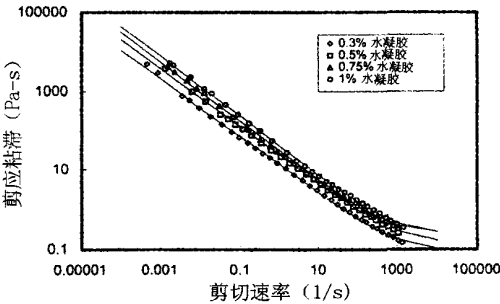


图 5 各种凝胶粘度和剪切速率曲线

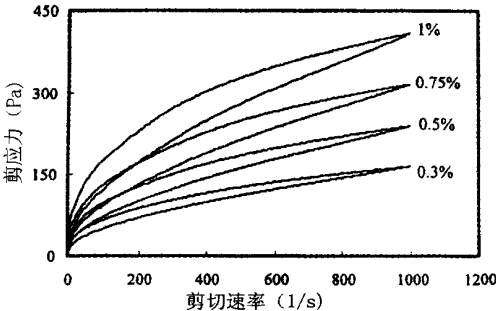


图 6 各种凝胶的触变曲线

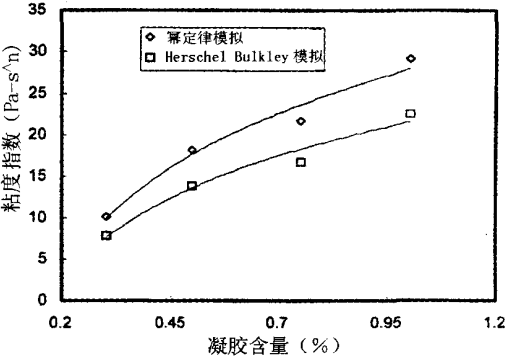


图 7 各种凝胶的粘度指数

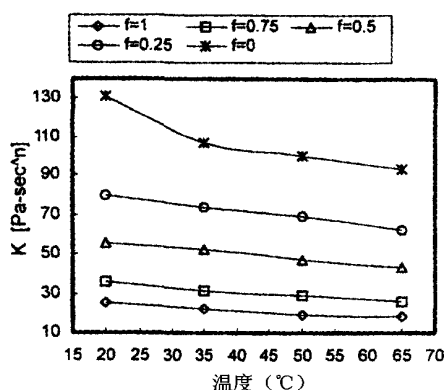


图8 各种凝胶的幂定律粘度因子

凝胶含量为凝胶推进剂的流变特性的“设计”提供了“自由度”。为获得流变表征(K, n)的两个理想值,对凝胶剂采取了“熬炼”方法。使用两种凝胶剂制备5份总含量1%的水凝胶,在全部凝胶(A+B)成分中,每份含一个A类凝胶的质量系数(f)。这种添加剂的自由度的效果见图8和9显示的温度函数。对这些凝胶而言,温度影响并不重要,但对其它凝胶类型和凝胶添加剂并非如此。所以,仍有对流变特性进行“设计”的能力,这或许在推进剂系统选择上将起到重要作用。

4 雾化特性

雾化特性的参数研究包括凝胶燃料质量流量、O/F比、凝胶剂含量及在多种喷注点的下游位置的SMD雾化的喷注器几何形状等方面的影响。SMD表达式为:

$$SMD = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2} \quad (4)$$

氧化剂模拟剂(氮气)和凝胶燃料的(O/F)比例对雾化的影响比率见图10。在这种情况下,所用喷注器是一个三个一组的、凝胶通道的收敛角度为 6° 的喷嘴。SMD显示出随着O/F的增高而降低的趋势。这与所测的轴向喷注器的非牛顿流体相符。但必须牢记当前进行的研究中所用的水凝胶是有弹性无粘性的、假塑性体的流体,其增高的O/F比形态与牛顿流体相似。然而,水凝胶要比非水凝胶难以雾化,这与流行观点“非牛

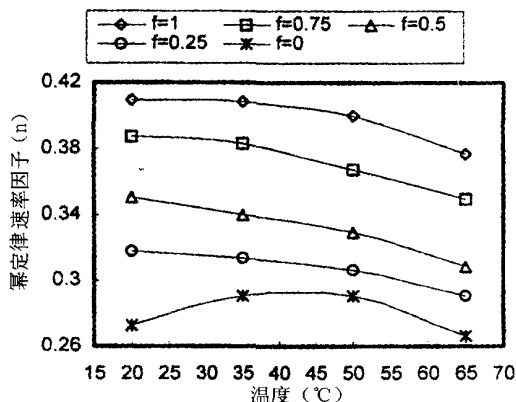


图9 各种凝胶的幂定律因子

顿形态具有妨碍精细雾化”具有一致性。

喷注器轴向位下游不同流体的SMD变化见图11。对所有流体来说,在距喷注器5cm处,SMD随着雾化向下游移动而降低,同时液滴衰减范围产生。对于非水凝胶而言,SMD在3cm之后几乎未变化,这表明无流体蒸发过程发生。通常就凝胶而言,必须牢记热蒸发是随着凝胶剂的添加而增高的。这也意味着如果在纯水中不产生蒸发,那么在当前情况下的水凝胶也一定不会出现。SMD的降低应考虑为液滴破碎的原因。然而,就凝胶来说,SMD在5cm之后增高现象引起了是否与液滴的凝聚有关的疑问。

在恒定氮气流量下的液体质量流量的升高导致SMD如所预测的增高(图12)。另一方面,液体中凝胶剂含量的增加,增大了流体的表观粘度,其结果造成不太精细的雾化。进一步地说,通过对公式(5)流量值(FN)观察得出,对于相同的液体质量流量来说,喷注器所需的压降较低($FN \propto 1/\sqrt{\Delta P}$),见图13。

$$FN = \frac{\dot{m}_l}{\sqrt{\Delta p}} \quad (5)$$

欲了解和认识喷注器几何形状对SMD的影响有较大的难度。对凝胶通道收敛角度影响的观察,需要使用随着收敛角度的变化,并在同样压降下能提供同样流体质量流量的雾化器。这就意味着每个雾化器的入口和出口直径不同,而且生产大量的雾化器也显得不切实际。在这种情况下,对

收敛角度影响的研究也就采用一种不同的方法。
30° 和 2° 两种收敛角度的 *SMD* 在同样燃料质量流量是相同的。然而，在 2° 收敛角度状态时的

FN 明显低于 30°，即当使用宽角度时，所需压降大约降低 40%。

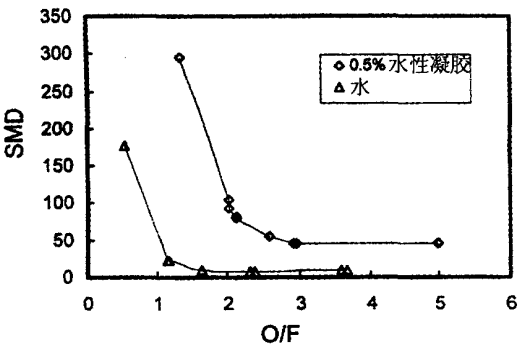


图 10 *SMD* 和 *O/F* 曲线
 $m = 4\text{g/s}$, $d = 0.42\text{mm}$, $d_x = 5\text{cm}$

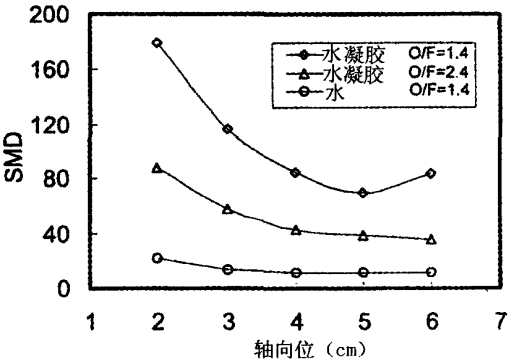


图 11 *SMD* 和轴向位曲线
 $m_1 = 4.6\text{g/s}$, $d = 0.42\text{mm}$, $d_x = 5\text{cm}$

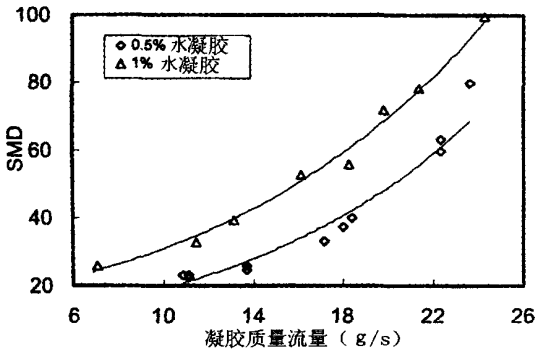


图 12 *SMD* 和凝胶质量流量曲线
 $m_g = 8.7\text{g/s}$, $d = 0.42\text{mm}$, $\alpha = 30^\circ$, $d_x = 6\text{cm}$

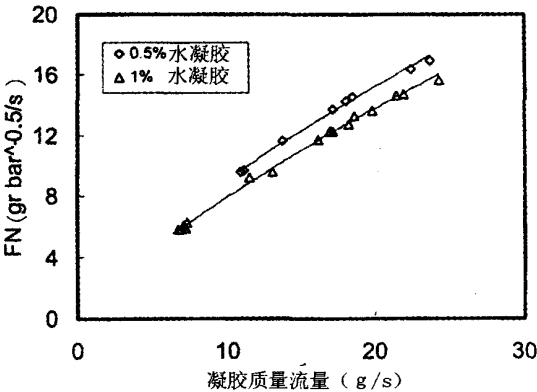


图 13 *FN* 和凝胶质量流量曲线
 $d = 0.42\text{cm}$, $\alpha = 30^\circ$

5 结论

凝胶推进剂的流变特性的关键是它们的雾化特性，而且明显地影响着它的雾化模式。经试验证明凝胶剂类型的融合能达到所需的流变特性。
试验证明弹性无粘性的、假塑性体的水凝胶具备同牛顿液体一样的雾化特性，只是它们较难雾化而已。试验结果指出雾化受燃料中凝胶剂百分比和喷注器几何形状影响十分明显。由于各自剪切粘性的增高，*SMD* 随着凝胶剂含量的增加而增大。在常规的三个一组雾化器的情况下，宽收

敛角度的流量喷注器需要较低压降来达到同样的雾化性能。

参考文献：

[1] Rapp D C , Zurawski R L. Characterization of Aluminum/RP-1 Gel Propellant Properties . AIAA paper88-2821, NASA TM-100951, 1988.
[2] Nahamoni G, Naatan B. Combustion Characteristics of Gel Fuels . AIAA/ASME/SAE/ASEE 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, WA, July 1997, AIAA paper97-2973.

本期责任编辑：陈红霞