

# 凝胶推进剂流变及雾化特性研究与进展

杨伟东, 张蒙正

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 综述了凝胶推进剂流变及雾化特性研究状况与进展。对凝胶推进剂的流变学研究、雾化特性研究中的实验研究、理论研究及测量技术做了介绍, 并结合当前的研究提出了一些看法。

**关键词:** 凝胶推进剂; 流变; 雾化

**中图分类号:** V51

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2005)05-0037-06

## Research and development of rheological and atomization characteristics of gelled propellants

Yang Weidong, Zhang Mengzheng

(Shaanxi Power Machine Design and Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Research and development of rheological and atomization characteristics of gelled propellants were summarized. The rheological, experimental and theoretical investigations of atomization characteristics were introduced. Some proposals were given based on our research work.

**Key words:** gelled propellant; rheological characteristics; atomization.

### 1 引言

凝胶推进剂是一类新型推进剂, 它是时间依赖的非牛顿粘弹性流体, 是在液体推进剂中加入固体颗粒均匀混合、再添加凝胶剂使固相粒子悬浮于其中而形成的胶状物质。其特征是具有高密度、高燃烧能量、高安全性及长期贮存的能力, 在许多方面有诱人的应用前景。

凝胶推进剂的雏形可以追溯到 1933 年 Engene Saenger 等人提出在内燃机液体燃料中添加铝粉。凝胶推进剂的大规模研究始于 1958 年美国航空咨询委员会对烃类燃料含硼和含镁浆料的研究。美国、德国、以色列、印度等国历经多年研究, 并针对不同的应用目的, 研制了不同类型的凝胶推进剂, 取得了一些成果, 目前已经或即将达到实用化的程度<sup>[1,2]</sup>。

凝胶推进剂的流变及雾化问题是凝胶推进技

收稿日期: 2005-06-09; 修回日期: 2005-06-25。

作者简介: 杨伟东 (1979—), 男, 研究生, 研究领域为雾化特性研究。

术中的关键问题,国内外对此都进行了较为全面的研究。本文将简要介绍凝胶推进剂流变及雾化特性研究的状况与进展,并提出一些看法。

## 2 流变学研究

流变学作为一门研究物质流动与变形的学科,是由力学、化学及工程学的交叉和综合而产生的边缘学科。流变学的主要任务是通过实验或理论方法建立某些物质和材料的本构关系,并应用本构关系及动量、质量和能量守恒关系研究物质或材料的流动和变形规律。流变学的研究对象包括非牛顿流体,粘弹性固体和介于流体与固体之间的物质(如悬浮体)等。

当前研究中所使用的凝胶推进剂特别是水凝胶模拟液都具有假塑性、剪切变稀的特性,它们的流变学行为由幂定律模型控制。方程(1)和(2)描述了一维空间的幂定律本构关系。

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为剪切力;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率;  $k$  为稠度系数;  $n$  为流动指数;  $\tau_0$  为屈服应力(一般对于凝胶推进剂很小,可以忽略)。

可以看到,幂定律本构方程只含有两个物性常数  $k, n$ 。其中  $n < 1$  表示假塑性流体(剪切变稀),  $n = 1$  表示牛顿流体,  $n > 1$  表示胀塑性流体。显然幂定律模型不能用来描述低剪切速率域的流体性能,但是由于幂定律模型的简洁,还是被广泛的应用于非牛顿流体的流动分析。

文献[3]对非牛顿流体不同高聚物流体的流变性能进行了研究,着重对流变学的测量做了研究,包括剪切粘性的测量和表观粘性的测量。文献[4]对含有毫微粒硝基甲烷凝胶在稳定剪切流动下的流变特性进行了研究。文献[5]研究了偏二甲肼凝胶的流变学行为,认为偏二甲肼凝胶属于假塑性触变凝胶,表观粘性和触变特性随温度升高而降低。文献[6]对凝胶推进剂的流变学模型,流变学匹配及流变学分类都进行了分析。

凝胶推进剂的流变特性研究是雾化特性研究的基础和关键,喷雾特性的量化要求确定流体的

流变影响量级。如何把流体的流变特性和雾化特性关联起来,就成为我们考虑的一个重点。文献[7]提出了喷嘴出口面的平均表观粘性的表达式:

$$\bar{\eta} = 2k \cdot \int_0^1 \left( \frac{r}{R} \right) \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \cdot d \left( \frac{r}{R} \right) \quad (3)$$

由(3)式可知:知道了速度,我们就可以得到喷嘴内的速度梯度,进而知道剪切速率  $\dot{\gamma}$ , 就能计算出喷嘴出口面的平均表观粘性,毫无疑问,在凝胶推进剂雾化过程中,凝胶的平均表观粘性是一个非常重要的参数。而凝胶推进剂离开喷嘴以后,由于突然失去了剪切力,其粘性如何变化,对雾化的影响有多大,还不能确切的分析,实验也无法测量。

## 3 凝胶推进剂雾化特性研究

雾化是指射流或液膜破碎成液滴的物理现象。现用于表征雾化性能的参数有:喷雾角(液流离开喷嘴后的扩散度)、喷嘴的破碎长度(液流或液膜离开喷嘴面到完全破碎成液滴所经历的长度)、喷雾细度(是表征雾化质量的重要指标,常用的平均直径有  $D_{32}$  即  $SMD$ 、 $D_{30}$ 、 $D_m$ )、雾化均匀性(指雾化后液滴尺寸大小的接近程度,尺寸差别越小,雾化均匀性越好)。目前对凝胶推进剂雾化特性的研究基本上也是用这些参数来表征雾化性能<sup>[8]</sup>。

影响喷嘴雾化性能的因素主要有:喷嘴结构参数和工作参数决定的喷嘴内流特性;环境气体参数;流体本身物性参数,如粘性、表面张力。

### 3.1 实验研究

#### 3.1.1 撞击式喷嘴

文献[9]分别进行了水凝胶和水的双股自击式喷嘴雾化实验。喷嘴撞击角分别为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ , 孔径为 3mm, 长径比为 6。实验结果表明:高的撞击速度,大的撞击角可以产生较好的雾化;在相同的实验工况下,水凝胶雾化相对于水雾化要困难,凝胶液体雾化产生相对较长的液丝,原因在于凝胶中聚合体的影响,分子内聚力增大。文献[10]在文献[9]的基础上增加了  $45^\circ$  撞击角,进一步研究凝胶流体的雾化特性。实验发现,非牛顿射流撞击产生液膜,当射流为低速时,在撞击

点区域没有明显的不稳定出现；随着射流速度的增加，不稳定开始增加；经典韦伯数在 400~500 之间时，撞击点区域开始显现不稳定，此时出现心形线状的波；韦伯数继续增加时，圆形波开始从撞击点以短波形式开始向外传播，这种不稳定波使液膜破碎成液丝，但不能破碎成液滴，这是因为在液膜中剪切速率减小，粘性增大。作者研究了雾化过程中的几个重要的无量纲参数，如  $Re$  数、 $We$  数、 $Oh$  数。分析认为：(1) 液膜破碎主要取决于通过喷注器的速度分布和撞击角，它们决定了通过喷注器的动量分布。(2) 气动力和流体动力学波是产生不稳定的两个主要因素。(3) 凝胶流体相对于非凝胶流体雾化要困难，可能的原因是，(a) 凝胶液膜较高的粘性可以减弱掉不稳定波，直到获得更大的动量；(b) 湍流喷射与层流喷射之间速度分布的不同，可能对动量传递的总量有一个影响。(4) 可从经典韦伯数的角度论述不稳定波运动过程中液膜的破碎原理。

文献[11]对双股自击式雾化喷嘴(图1)Jet A-1 燃料的雾化进行了研究。实验显现，撞击角为  $100^\circ$ 、 $d=0.7\text{mm}$ 、 $u=35\text{m/s}$  时，弓形液丝从撞击点脱离，逐渐转变成小的液丝直到液滴(图2)。撞击角在  $80^\circ$  到  $100^\circ$  之间，喷射速度为  $35\text{m/s}$  时，弓形液丝间的距离大约在  $10\text{mm}$  左右。作者提到此种破碎过程在牛顿流体的雾化过程也可以看到。

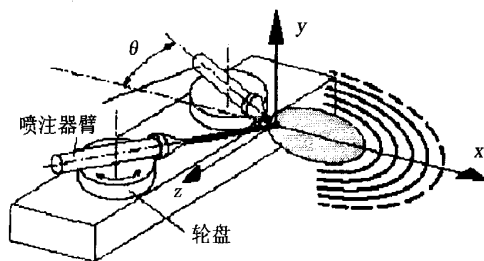


图1 撞击式雾化喷嘴示意图

Fig.1 Schematic of the doublet like-on-like impinging jet injector

文献[12]研究了双股自击式喷嘴对煤油凝胶推进剂的雾化特性，并与水进行了比较。雾化实验撞击角选用  $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ ，研究了喷射压力和撞击角对雾化角、雾化破碎长度、SMD、液

滴尺寸分布的影响，并对雾化过程进行了摄影，可观察到：(1) 撞击点传播出环形不稳定波，顺着液膜传播；(2) 撞击角为  $50^\circ$  时，轴向方向的动量要比横向方向的大，限制了流体向其他方向展开，因此雾化主要集中在轴向方向；随着撞击角增大，横向方向动量增加，液膜进一步展开；(3) 进一步增加喷射压力，撞击角为  $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时，轴向方向动量处于支配作用，此时整个雾化集中成一个小的柱状，导致雾化困难；撞击角为  $70^\circ$  时，比起前两个撞击角的情况，液膜展开充分，增加撞击角，雾化角增大；(4)  $50^\circ$  撞击角时，液滴尺寸分布范围比较广，液滴平均直径大；撞击角增大，液滴尺寸分布范围变小；(5) 喷射压力增加，撞击波强度增大，破碎长度减小，分析认为，破碎长度主要取决于撞击点产生的撞击波强度。



图2  $d=0.7\text{mm}$ ,  $u=35\text{m/s}$ ,  $2\theta=100^\circ$  凝胶的雾化图像

Fig.2 Shadowgraph images of the gel spray from a like-on-like doublet impinging jet atomizer,  $d=0.7\text{mm}$ ,  $u=35\text{m/s}$ ,  $2\theta=100^\circ$

为了研究剪切速率对雾化质量的影响，需要比较牛顿流体和非牛顿流体的雾化特性，作者对比了一个水的撞击式雾化 SMD 的拟合公式  $SMD = 4/(V^{0.79} \sin^{1.16} \theta)$ ，发现在不同的喷射压力下，增加撞击角，SMD 减小。大的撞击角，高的喷射压力下，煤油凝胶推进剂的雾化和水的雾化已经很接近，原因在于高的剪切速率下，凝胶的粘性变小。

文献[13]通过一个三股撞击式喷注单元(图3)对水凝胶与水的雾化进行了对比实验。研究结果表明，液体的质量流量最大时，雾化效果最好；

雾化的最优工作条件对应的是高雷诺数,最差工作条件对应的是低雷诺数。因此,液体质量流量低时雷诺数低,粘稠力大于惯性力,雾化效果差。水和水凝胶这种相似的趋势表明,影响两种流体雾化效果的因素是相同的。在工作条件不变的情况下,相对雾化性能取决于喷注器设计。当液体的质量流量不变,而气体质量流量变化时,没有发现类似的趋势。还需进行多种工作条件的试验以获得更多数据,便于定量分析液体及气体质量流量及气/液动量比对凝胶推进剂雾化性能的影响。

文献[14]认为伪塑性的、粘性非弹性的水凝胶雾化模式与牛顿流体是相似的,然而,它们的雾化过程相对要更困难一些。试验结果说明:雾化过程受到燃料中凝胶剂的含量和喷注器的几何形状的影响。由于凝胶剂含量的升高引起剪切粘度的增大,随之,雾化的 SMD 增加。大收敛角的喷注器需求较小一些的上游压力就可达到与三股撞击喷嘴相同的雾化性能。文献[7]在文献[14]分析的基础上采用了一个三股撞击式气动雾化喷嘴(图4)对凝胶燃料的雾化进行研究,包括:三股撞击式气动雾化形式的空间分布、气液比对液滴尺寸的影响、喷注器出口面平均表观粘性对液滴尺寸的影响。

得到的结论认为:假塑性、粘性非弹性的水凝胶显示出与牛顿流体相似的雾化特征;空间分布表明雾化特征分布是不对称的;小的气体撞击角可以形成更好的雾化;雾化受到凝胶剂的含量和喷注器几何形状结构的较大影响;随着凝胶剂含量的增加,也就是剪切粘性的增加,雾化的 SMD 增加;增加气液比, SMD 减小,并得到了 SMD 与气液比 (ALR) 之间的一个关系式  $SMD = K(1 + 1/ALR)^4$ ;喷嘴出口面的表观粘性对雾化液滴尺寸的影响应用一个数学模型进行研究;增加凝胶的质量流量减小了剪切粘性而总的增加了雾化的 SMD;随着喷嘴出口面凝胶粘性的降低, SMD 减小;确立了 SMD 与凝胶、气体质量流量和凝胶粘性的关系式  $SMD \propto \dot{m}_{gas}^{-0.8} \cdot \dot{m}_{gel}^{2.54} \cdot \eta_{gel}^{0.92}$ , 这个结果的意义是非常重要的,因为依靠剪切速率的流变特性在喷射点是无法测量的,而用此式来估算 SMD。

万方数据

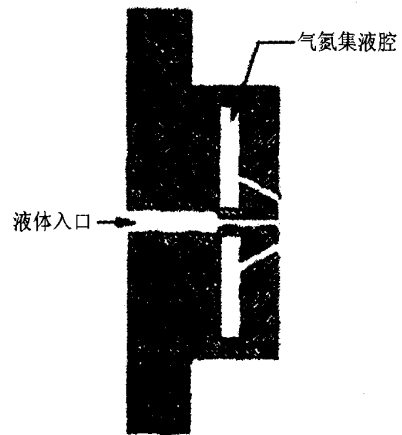


图 3 三股撞击喷嘴单元示意图

Fig.3 Schematic of triplet injector

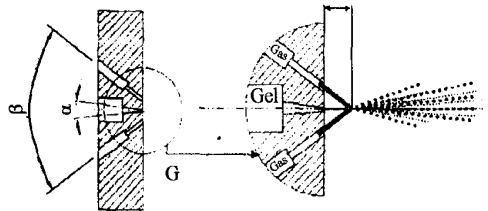


图 4 三股撞击气动雾化喷嘴结构图

Fig.4 Configuration of the triplet air-blast atomizer

### 3.1.2 同轴式喷嘴

文献[13]还进行了同轴喷注单元(图5)的水凝胶与水雾化对比实验。实验表明:同轴喷嘴在每种液体的整个工作条件区域都形成一个均匀的锥形雾区,工作条件不同,变化不大。由于这一均匀性,难以对同轴喷嘴的雾化情况进行定性分析,且为了确定最优工作条件和数据趋势需要获得液滴尺寸数据。尽管雾化数据中缺乏明确反映任何趋势的信息,但水和水凝胶的差异还是可以从图像中清晰地反映出来。

文献[11]同时还研究了同轴旋流式气动雾化喷嘴(图6)对 Jet A-1 燃料的雾化特性。实验发现:随着动量比  $M$  ( $M = \rho_{air} u_{air}^2 / \rho_{gel} u_{gel}^2$ ) 增加可以观察到气动雾化喷嘴不同的雾化破碎区域;雾化过程中可以清晰的观察到液丝和液丝的形成过程,但不能看到液滴的形成过程;动量比  $M$  增大,雾化角减小,雾化情况变好。作者认为,气动雾化过程中牛顿流体的破碎过程和雾化域与非牛顿

流体是不同的，牛顿流体可以用无因次量雷诺数  $Re = \frac{\rho_l u_l d_l}{\eta}$  和韦伯数  $We = \frac{\rho_{air} u^2_{air} d_l}{\sigma}$  来分析雾化过程。而对于非牛顿流体，喷嘴出口面的粘性分布取决于当地的剪切速率和以前流动情况的几何形状，由于受限的喷嘴尺寸，通过实验来确定这些粘性值是困难的。到目前为止，关于凝胶非牛顿流体的物质结构，涉及到喷嘴出口面的表观粘性和表面张力可用的数据很少，而无因次量  $Re$  数和  $We$  数又不能用来分析实验结果。所以关于流动特性和非牛顿流体的物质结构方面的资料是必须的。



图 5 气液同轴喷嘴单元示意图  
Fig.5 Schematic of a coaxial injector

析的结果与实验结果进行比较，发现比液丝脱离液膜的波长要大，认为可能的结果是（1）撞击点发射出短波长的撞击波控制了液膜破碎的过程；（2）线性稳定性分析忽视了对于非牛顿流明显的粘弹性的影响。作者在论文中定义了非牛顿流体的雷诺数  $Re_s = \frac{\rho_l h^n U^{2-n}}{K}$ （对于牛顿流体  $n=1, K=\mu$ ）。认为这种研究需要改进，线性稳定性分析必须扩展包括到粘弹性的影响，这是一个附加的，有时不能忽视内聚力。还有就是要考虑对实验技术的改进。

文献[16]建立了非定常、不可压缩、绝热、非牛顿凝胶推进剂层流流过锥形管的基本方程，主要是引用了幂定律（PL）流变基本方程模型。为进一步分析几种凝胶燃料的流动行为，采用了两个假定条件：定常运动和小半角度锥形。在不同的燃料和金属含量条件下进行了参数考察。对喷嘴几何形状和压力梯度对凝胶的流动速率和平均表观粘度进行了计算。结果表明流动速率随幂定律指数的减小或是喷嘴中压降的增高而大大增加。表观粘度在每个横截面上都不均匀且在中心轴上取最大值而在壁面上达到最小。平均表观粘度随喷管的收缩角度的增加而大大减小。这就意味着要获得较好的雾化效果就应加大收敛角度。同时还将 RP-1/Al 凝胶在不同铝质量含量情况的结果进行比较，发现存在某一个优化的金属含量值。

3.3 测量技术

在研究凝胶推进剂的雾化特性时，当前的研究主要是应用冷流实验及摄影技术。可以定性、定量研究喷注器性能，比较其不同设计状态或工作条件下的相对性能。因此测量技术还是主要集中在 CCD 技术、PDPA 技术、激光诱导荧光摄影技术及激光全息技术这些在雾化特性研究中常用的现代光学技术。

综上所述，凝胶推进剂的流变及雾化特性研究，作为凝胶推进技术中的一个关键技术，是研究中的一个热点，受到了越来越多的重视，国外的研究机构已经大量的开展了这一方面的研究工作。国内中国航天科技集团公司第六研究院第 11 研究所也正在开展凝胶推进剂模拟液流变及雾化特性的研究。

3.2 理论研究

文献[15]基于线性稳定性理论分析说明了撞击式雾化喷嘴液膜形成过程中非牛顿流体粘性的影响。应用此分析通过预测液膜表面最快传递波的波长来预测液丝脱离液膜的波长，并把这个分  
万方数据

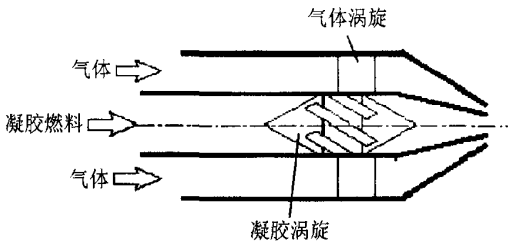


图 6 撞击式雾化喷嘴示意图  
Fig.6 Schematic of a coaxial injector(air blast atomizer)

## 4 结束语

(1) 当前的研究工作主要是提供凝胶推进剂雾化的基本实验数据, 尽量包括测量的流变参数, 研究喷注器几何形状和喷注系统的控制参数等对雾化特性的影响。实验中使用的喷嘴大多都是以前使用的形式, 而不是专门针对凝胶推进剂特性而设计的。采用一个能对高粘性流体产生良好雾化的喷嘴是未来推进系统中应用凝胶推进剂的关键之一, 喷嘴的设计应考虑凝胶推进剂的流变特性。

(2) 凝胶推进剂的流变特性是影响雾化特性的关键参数, 同时也明显的影响着雾化的模式。雾化特性研究的量化需要明确流体的流变影响量级, 了解流变性, 便可进一步评估流体的表面张力效应, 优化工作条件及喷注器设计, 使雾化的均匀性更好, 液滴尺寸更小。

(3) 在凝胶推进剂的雾化过程中, 我们可以清晰的看到液丝和液丝的的形成过程, 但液丝到液滴的破碎过程却很困难, 用常规的雾化特性的参数很难来分析, 因此大多数都是对凝胶推进剂的雾化特性进行定性的分析。如何用常规的雾化特性参数来研究凝胶推进剂的雾化就是一个关键问题。

(4) 针对牛顿流体雾化特性研究中的几个重要的无量纲参数如  $Re$  数、 $We$  数、 $Oh$  数能否来分析凝胶推进剂的雾化过程, 也值得考虑。因为对于非牛顿流体, 喷嘴出口面的粘性分布取决于当地的剪切速率和以前流动情况的几何形状, 由于受限的喷嘴尺寸, 通过实验来确定这些粘性值是困难的, 到目前为止关于凝胶非牛顿流体的物质结构, 涉及到喷嘴出口面的表观粘性和表面张力可用数据很少。

### 参考文献:

[1] 阎大庆, 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, (1).

- [2] 代玉东, 魏敬. 美国凝胶推进剂研究 [J]. 火箭推进, 2003, (6).
- [3] Ael Mansour, Norman Chigier. Air-blast atomization of non-Newtonian liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 58(1995)161-194.
- [4] Ulrich Teipel, Ulrich Forter-Barth. Rheological behavior of nitromethane gelled with nanoparticles. *Journal of Propulsion and Power* Vol.21.1, January-February 2005.
- [5] 禹天福. 偏二甲胍胶体流变学研究 [J]. 火箭推进, 2004, (3).
- [6] Shai Rahimi, Dov Hasan. Preparation and characterization of gell propellants and simulants. AIAA2001-3264.
- [7] Shai Rahimi, Benveniste Natan. Air-blast atomization of gel fuels. AIAA2001-3276.
- [8] 张蒙正. 液体火箭发动机喷注器雾化研究及进展 [J]. 火箭推进, 1997, (2).
- [9] Kent T Chojnacki, Douglas A Feikema. Atomization studies of gelled liquids. AIAA94-2773.
- [10] Kent T. Chojnacki and Douglas A. Feikema. Atomization Studies of Gelled Bipropellant Simulants Using Planar Laser Induced Fluorescence. AIAA95-2423.
- [11] Helmut K Ciezki, Ansgar Robers. Investigation of the spray behavior of gelled jet A-1 fuels using an air blast and an impinging jet atomizer. AIAA2002-3601.
- [12] N Jayaprakash, S R Chakravarthy. Impinging atomization of gel fuels. AIAA2003-316.
- [13] James M. Green, Douglas C. Rapp and James Roncace. Flow Visualization of a Rocket Injector Spray Using Gelled Propellant Simulants. AIAA91-2198.
- [14] Shai Rahimi, Benveniste Natan. Atomization characteristics of gel fuels. AIAA98-3830.
- [15] Kent T Chojnacki, Douglas A Feikema. Study of non-newtonian liquid sheets formed by impinging jets. AIAA97-3335.
- [16] Shai Rahimi, Benveniste Natan. The injection process of gel fuels. AIAA97-2973.

(编辑: 王建喜)