

凝胶推进剂雾化研究现状及问题

蔡锋娟, 张蒙正

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 简要介绍了凝胶推进剂的流变特性, 将其流动过程分为三个阶段, 列举出了适用于不同剪切速率下的本构方程。介绍了双股撞击式、三股撞击气动式、同轴离心式、脉动式喷注器凝胶推进剂雾化特性研究的现状, 指出了影响雾化模式的多种因素及目前研究中存在的问题。

关键词: 凝胶推进剂; 雾化; 流变特性

中图分类号: V513

文献标识码: A

文章编号: (2010) 04-0024-07

Status and problems of gelled propellants atomization research

Cai Fengjuan, Zhang Mengzheng

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The rheological characteristics of gelled propellants are introduced briefly. The flow behaviors are classified as three stages and the constitutive equations applied to different shear rates are described. The status of atomization research of gelled propellants with the doublet impinging jet injector, triplet air-blast atomizer, coaxial-swirl injector, pulsatile injector is summarized. Various factors which affect the atomization modes and some problems existing in present atomization research are pointed out.

Key words: gelled propellants; atomization; rheological characteristics

0 引言

凝胶推进剂是一种在液体推进剂中均匀加入

固体颗粒(金属或非金属), 再通过胶凝剂和助剂作用而生成的静态“有形”、但在一定剪切应力作用下又能恢复液态并与原推进剂有相近物理性质的混合物^[1]。从流体力学观点出发, 凝胶推

收稿日期: 2010-01-13; 修回日期: 2010-03-17。

作者简介: 蔡锋娟(1985—), 女, 硕士研究生, 研究领域为燃烧装置。

进剂属于非牛顿流体, 其与牛顿型液体推进剂的主要差异在于剪切粘度随剪切速率而变化, 一般呈现出剪切变稀特性, 即剪切粘度随着剪切速率的增加而降低。

凝胶推进剂具有高安全性、高性能、长期贮存、使用维护方便等一系列潜在优势^[2], 被看作是液体推进剂发展的新趋势, 为了使其在航天推进技术中得到发展和应用, 雾化问题是迫切需要解决的关键技术之一。鉴于此, 国内外采用了多种形式的喷注器对凝胶推进剂雾化特性进行了比较深入的探讨。本文以已经进行过研究的喷注器为主线, 将凝胶推进剂的雾化模式贯穿于其中, 简要介绍了目前凝胶推进剂雾化研究的现状、普遍存在的问题及前景。

1 凝胶推进剂的流变特性

影响凝胶推进剂雾化性能及模式的因素有很

多, 但其流动过程和流变特性无疑是一个关键的影响因素。添加了胶凝剂和金属或非金属颗粒的凝胶推进剂具有剪切变稀特性, 这决定了它有着与牛顿流体不同的流动特点和流变特性。通常, 凝胶推进剂的流动过程可以分为三个阶段^[3]: (1) 当剪切速率 $\dot{\gamma}$ 很小, 与其对应的剪切力 τ 小于凝胶体自身所具有的屈服应力 τ_0 时, 凝胶体保持半固体不流动状态, 剪切变形仅是由于凝胶结构自身的弹性变形所引起的; (2) 当剪切速率 $\dot{\gamma}$ 逐渐增大到其所对应的 τ 值大于 τ_0 时, 凝胶体开始流动, 并且, 在之后的流动过程中, 剪切变形 γ 随着剪切力 τ 的增加幅度, 相对于 (1) 过程而言更快 (图 1b); (3) 在 (1), (2) 过程中, 随着剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加, 剪切粘度 η 一直在减小, 但当 $\dot{\gamma}$ 增加到一定值时, η 将趋于一个恒定值 (图 1a), 即极限剪切粘度 η_∞ , 此时流体的流动类似于牛顿流体。

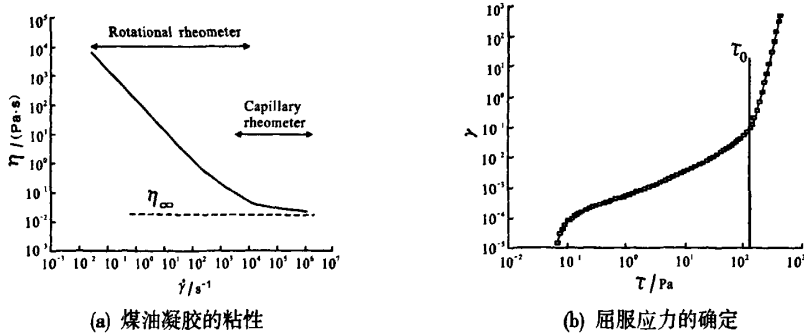


图 1 煤油凝胶的粘性和屈服应力的确定^[4]

Fig.1 Viscosity of paraffin-gel and determination of the yield stress^[3]

描述凝胶推进剂流变特性的物理模型是本构方程, 该方程反映了剪切粘度与剪切速率之间的关系, 不同类型的凝胶推进剂有着不同的本构方程。最初建立的是 The Power Law (简称 P-L) 模型, 即幂律型本构方程, 具体描述为

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \tag{1}$$

式中, k 为稠度系数; n 为流动指数。该方程与中等剪切速率下测量的剪切粘度值符合的很好,

且方程结构简单, 在对数坐标中, $\eta/\dot{\gamma}$ 的关系曲线呈直线。但其缺点在于并没有描述出凝胶结构非破坏性过程中的屈服应力 τ_0 和高剪切速率下的极限剪切粘度。Herschel Bulkley (简称 HB) 模型考虑了屈服应力的存在, 具体描述为

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \dot{\gamma}^{n-1} \tag{2}$$

但该方程也存在缺陷, 即若按此方程计算, 在剪

切速率 $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ 时, $\eta_\infty = 0$, 这在物理上是不可能存在的情况。由此, 又发展出了 Extended Herschel Bulkley (简称 HBE) 方程, 具体描述如下

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \dot{\gamma}^{n-1} + \eta_\infty \quad (3)$$

该方程在整个剪切速率范围内都能很好的描述剪切粘度值的变化。

在牛顿型流体的雾化研究中, 广泛使用无量纲特征参数 (如雷诺数 $Re = \rho u d / \eta$, 液体韦伯数 $We = \rho u^2 d / \sigma$, Ohnesorge 数 $Oh = \eta / \sqrt{d \rho \sigma}$, 三者关系为 $We = Re^2 \cdot Oh^2$) 表征流体自身所处的流动状态、自身所具有的特性力与环境气体作用力的相对大小等, 也表征雾化过程中的某种初始参数。对于非牛顿剪切变稀流体, 其剪切粘度随着剪切速率在变化, 上述参数能否适用或者沿用, 尚待研究。Reed, Metzner 等人引入了广义雷诺数的概念来描述幂律型非牛顿流体通过恒截面的流动特性^[4], 如下

$$Re_{gen} = \frac{\rho u_{rel}^2 d^n}{k \left(0.75 + \frac{0.25}{n} \right)^n 8^{n-1}} \quad (4)$$

当 $n=1$ 时, 广义雷诺数也可表征牛顿流体。

2 凝胶推进剂的雾化

众所周知, 喷射到燃烧室内的推进剂雾化性能直接影响到发动机的燃烧效率, 这对于凝胶推进剂也不例外。雾化研究, 不仅可提供燃烧室优化设计的依据, 提供高频或低频不稳定性分析的依据, 提供燃烧室壁面和喷注器面的回流热分析依据, 还可预测燃烧性能。喷雾的初始参数, 如液滴的尺寸分布、运动的速度及角度是燃烧室内流动模拟计算程序所必须的。雾化研究的重要性不言而喻, 因此, 在国内外凝胶发动机研究中, 喷注器及其雾化研究始终占据了很重要的地位。

2.1 双股撞击式喷注器

目前, 许多关于凝胶推进雾化探索研究的工作均是在传统的双股撞击式喷注器 (图 2) 基础上开展的。

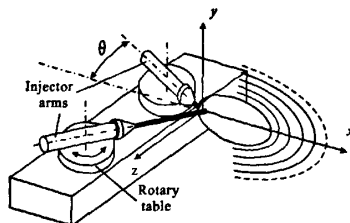


图 2 双股自击式喷注器示意图

Fig.2 Schematic of the doublet like-on-like impinging jet injector

文献 [3] 采用该喷注器研究了凝胶推进剂的雾化特性, 使用的凝胶推进剂为 50wt.-% Jet A-1, 35 wt.-% Al 颗粒 (平均直径为 10 微米), 7.5 wt.-% Thixatrol ST 和 7.5 wt.-% MIAK 组成的混合物。依据射流广义雷诺数 Re_{gen} 将其雾化分为三种典型的雾化模式 (图 3), 即射线型 (Rays-shaped pattern)、液丝型 (Ligament pattern)、完全发展型 (Fully developed pattern)。与每种雾化模式相关的 Re_{gen} 由方程 (4) 确定, 使用流变仪测量出凝胶推进剂的剪切速率、剪切应力和剪切粘度等参数值, 求得 P-L 方程, 确定 n, k 值。由图可看出, 在低 Re_{gen} 下, 射线型结构发生在液膜表面, 液膜起先以网状结构衰退, 在下游处形成小的液丝和较大的液滴, 在“射线”方向, 可清晰地看到辐射状的液丝结构; 在中等 Re_{gen} 下, 圆形波状结构发生在液膜表面, 圆形波边缘周期地分离出大的扇形液丝, 这些液丝在下游处衰退为更细更小的液丝和液滴; 在非常高的 Re_{gen} 下, 液膜形状变得小而规则, 液膜没有分段为液丝, 而是直接破碎成均匀的小液滴, 这些液滴周期地从液膜边缘随波分离。

液丝型和完全发展型雾化模式在牛顿流体的碰撞射流研究中很常见, 而射线型起初仅在凝胶燃料中观察到, 但后来的研究发现, 对于高粘性的牛顿流体也会表现出射线型雾化模式。

文献 [5] 也是采用双股撞击式喷注器, 研究雾化所用的凝胶基体溶液仍为 Jet A-1, 只是凝胶剂为精细二氧化硅, 其颗粒直径范围在亚微米级, 使用阴影技术, 所获得的雾化图像如图 4 所示。

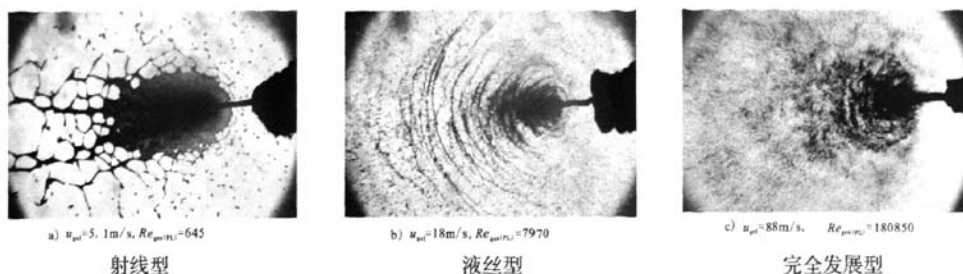


图 3 35%Al/Jet-1/ThixatrolST 凝胶在不同广义雷诺数下的阴影图, $2\theta=90^\circ$, $d=0.7\text{mm}^{[3]}$

Fig.3 Shadowgraph images of a 35%Al/Jet-1/ThixatrolST gel at different generalized Reynolds numbers, $2\theta=90^\circ$, $d=0.7\text{mm}^{[3]}$

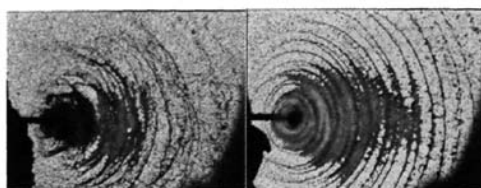


图 4 JetA-1/6%二氧化硅凝胶阴影图

$d=0.7\text{mm}$, $u=35\text{m/s}$, $2\theta=100^\circ$ ^[9]

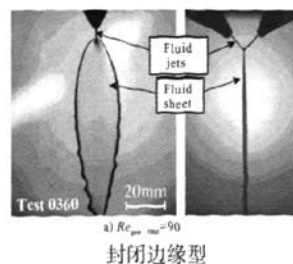
Fig.4 Shadowgraph images of JetA-1/6%Aerosil-gel

$d=0.7\text{mm}$, $u=35\text{m/s}$, $2\theta=100^\circ$ ^[9]

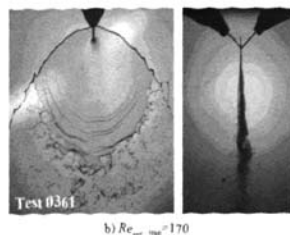
两股射流在撞击点处形成一个平面薄液膜, 在粘性力、表面张力、惯性力及压力的共同作用下扇形液丝从该液膜表面分离。随后在下游更远处衰退为更细、更小的液丝和液滴, 这种雾化破碎模式类似于上述的液丝型模式。从图 4 左可看出, 扇形液丝并不总是能彼此分离, 有时也会被联结在一起, 成为凝胶薄液膜的一部分。在图 4 右中, 凝胶薄液膜表现出波形面结构, 这种结构可解释为扇形液丝的初期形式。

文献 [6] 依旧采用双股撞击式喷注器, 研究雾化所用的凝胶基体溶液为煤油 (Paraffin), 胶凝剂为有机化合物 (ThixatrolST), 图 5 表示在不同射流速度, 不同广义雷诺数 $Re_{gm(HBE)}$ (用 HBE 型方程推导得到的广义雷诺数, 与前述由 P-L 模型推导出的 Re_{gm} 形式不同) 下所形成的不同雾化模式。从液膜的正视图中可看出, 在低 $Re_{gm(HBE)}$ 下, 液膜被封闭在一个清晰的厚边缘内, 因此, 这种破碎模式被形象地称为封闭边缘型 (Closed

rim pattern, 图 5 a); 随着 $Re_{gm(HBE)}$ 的增大, 液膜的末端部分不再封闭在厚边缘内, 液膜表面产生了波状结构, 并且液丝结构周期地从该液膜表面分离, 在下游更远处衰退为液滴或更小的液丝, 这种破碎模式被称为伴随有液滴分离的边缘型 (Rim with droplet separation, 图 5 b); 厚边缘完全消失, 液丝结构在一个较大范围内周期地从液膜表面分离、衰退, 该模式被称作无边分离型 (Rimless separation, 图 5 c); 随着 $Re_{gm(HBE)}$ 的进一步增加, 扇形液丝结构产生, 并在下游处衰退, 该模式被称为液丝型 (Ligament structures, 图 5 d)。此外, 从液膜的侧视图中, 也可很明显地看出, 随着 $Re_{gm(HBE)}$ 的增加, 雾化角随着分离液滴向下游的运动在增大。



封闭边缘型



伴随有液滴分离的边缘型

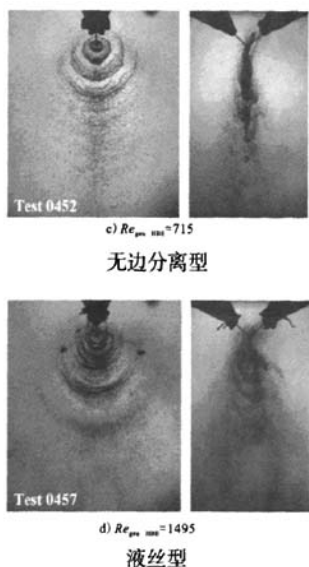


图 5 煤油/ThixatrolST 凝胶雾化阴影图, $2\theta=90^\circ$ [9]

Fig.5 Shadowgraph images of a paraffin/ThixatrolST gel, $2\theta=90^\circ$ [9]

可以看出,不同种类的凝胶体在同一量级的广义雷诺数 Re_{gm} 下,有着不同的雾化模式,而且即使是同一种凝胶体,在不同的 Re_{gm} 下的雾化模式也不尽相同,总的来说,上述凝胶体均可产生液滴,这对提高发动机燃烧效率是至关重要的,但遗憾的是,并不是所有的凝胶体都能在雾化后破碎成液滴,并达到期望的尺寸大小。文献 [3] 研究的以硝基甲烷 (NM) 为基体溶液,胶凝剂为 Byk 420 (小分子的有机物) 的凝胶体 (90wt.-% NM, 10 wt.-% Byk), 在射流速度 $u_{gm}=48.1\text{m/s}$, 广义雷诺数为 $Re_{gm\text{PL}}=86020$ 时,仍没有显现出液丝会更进一步破碎成液滴的趋势 (图 6), 产生的是清晰的纤维状结构,这种破碎模式被称为纤维型模式 (Fiber production pattern)。

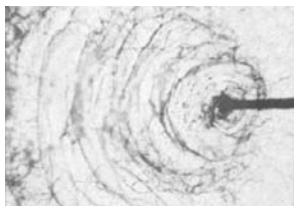


图 6 硝基甲烷/Byk 凝胶雾化阴影图 [9]

Fig.6 Shadowgraph images of NM/Byk-gel [9]

此外,对于双股撞击式喷注器,大量的研究也表明,在喷射压力恒定时,随着撞击角的增加,液膜展开更充分,雾化角增大;在撞击角一定时,增加喷射压力,撞击波强度增大,破碎长度减小 [7]; 在相同的撞击角和相近的射流速度条件下,喷嘴出口直径小的能产生更好的雾化效果,主要原因在于出口直径小,则形成的液丝直径较小,液丝更容易断裂,而且在同样的射流速度条件下,孔径小有利于提高剪切速率,降低凝胶体的剪切粘度 [1]; 喷嘴的长径比对破碎长度也有影响,两者成正比关系;喷嘴孔入口形状不管是直角边结构还是有一定角度的,对破碎长度影响不大 [8]; 在推进剂初始状态中引入不稳定 (爆炸性) 添加剂,加强微爆炸和二次雾化 [9]、或在凝胶推进剂管路中加入少量空气、又或是改用粗糙孔喷射射流 [10] 等方式,均可有效减小凝胶推进剂雾化射流的破碎长度,使液滴破碎更完全。

2.2 三股撞击气动式喷注器

由于直流式喷嘴需要高压才能达到好的雾化效果,因此研究指出,可通过增加雾化流体和周围气体的相对速度来解决该问题,由此便引出了三股撞击气动式雾化喷注器 (图 7)。该喷注器只需较低的压力便可达到与直流式喷注器相同的雾化效果。文献 [11] 利用该喷注器,中间喷射凝胶燃料,两边喷射气体,用氮气模拟氧化剂,研究了凝胶体的雾化特性。在其研究中,确立了 SMD (Sauter Mean Diameter) 与凝胶、气体质量流量和凝胶平均表观粘度值之间的关系,即 $SMD \propto m_{gas}^{-0.8} \cdot m_{gel}^{2.34} \cdot \eta_{gel}^{-0.92}$, 可用此式来估算 SMD 值。

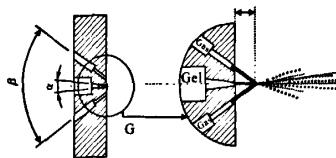


图 7 三股撞击气动式喷注器结构示意图

Fig.7 Configuration of the triplet air-blast atomizer

2.3 同轴涡旋式喷注器

图 8 为同轴涡旋式喷注器,是一种商用的气动雾化喷注器,该喷注器利用同轴收敛的外部高

速气流与内部凝胶射流撞击使其破碎。其结构由内管和外管两部分组成, 凝胶燃料在内管中流动, 高速气流在内管与外管之间的环形面内流动, 在气流和凝胶体的流动通道中均置有涡旋式喷嘴, 经过它之后, 凝胶体和气流以相同的旋转方向进入末端的圆锥形装置, 两者均被加速。

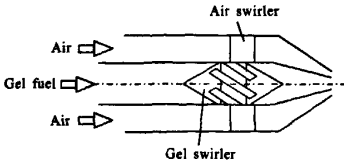


图 8 同轴旋涡式喷注器结构示意图

Fig.8 Sketch of coaxial-swirl injector (air blast atomizer)

文献 [5] 用该喷注器对凝胶燃料 (JetA-1/7.5%Thixatrol Plus/7.5% IMH) 的雾化特性进行了研究, 实验发现: 随着动量比 M ($M=\rho_{\text{air}} u_{\text{air}}^2 / \rho_{\text{gel}} u_{\text{gel}}^2$) 的增加, 观察到不同的雾化破碎区域; 如图 9 所示, 雾化过程中可以清晰地观察到液丝及其形成过程, 并且, 随着动量比 M 的增大, 雾化角减小, 雾化情况变好, 但是, 在 $M=2050$ 时却仍然看不到液滴的形成过程, 由此可判断出该破碎模式类似于上述的纤维型破碎模式。虽然采用的是不同的雾化器和不同种类的凝胶体, 但却得到了相似的雾化模式。因此, 决定雾化模式的因素有很多, 凝胶基体溶液的种类、采用何种凝胶剂、其含量多少、是否添加金属或非金属颗粒、射流速度、广义雷诺数、喷注器几何结构等都从不同方面、不同程度的影响着凝胶推进剂的雾化模式。

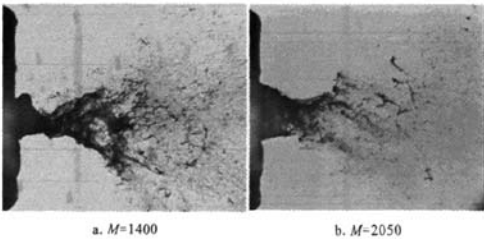


图 9 JetA-1/7.5%Thixatrol Plus/7.5% IMH

凝胶在不同动量比下的雾化阴影图^[5]

Fig.9 Shadowgraph images of a JetA-1/7.5%Thixatrol Plus/7.5% IMH gel at different momentum flux ratios, $u_{\text{gel}}=2.5\text{m/s}$, $d=0.7\text{mm}$ ^[5]

2.4 脉动式喷注器

目前大量研究已经证明, 在喷注器射流表面引入叠加的人为扰动后, 随着扰动量的增加, 雾化效果会更好, 且雾化角更宽, 由此提出了脉动式喷注器。文献 [12] 在三股撞击气动式雾化喷注器的基础上引入了两种扰动系统, 即低频高振幅扰动和高频低振幅扰动, 研究了这两种扰动在单独或同时引入时, 水凝胶的雾化特性与未扰动情况相比所发生的变化。实验结果表明, 在绝大多数情况下, 若在雾化前的射流中引入扰动, SMD 值会有一定的减小; 并且, 在绝大多数情况下, 随着扰动频率的增加, SMD 值在降低; 扰动能引起 SMD 值 25%~60%的减小量, 该减小的程度也依赖于胶凝剂含量, 质量流量和气液比 (oxidizer to fuel 或者 gas to liquid mass ratio, 简称 O/F); 但在某些情况下, 随着扰动频率的增加, SMD 值并没有太多的减小, 尤其是在低气液比 O/F 情况下; 在相同的 O/F 情况下, 扰动引起的 SMD 降低比液体质量流量引起的 SMD 降低更明显; 此外, 无扰动时的液滴尺寸分布图是双峰的, 而周期性扰动的引入能产生一个单峰分布图, 或至少能降低大尺寸液滴的数量。但对于高频低振幅扰动, 从实验中并没有获得可信服的结果, 这可能是由于凝胶体的高粘性使得低振幅不足以对雾化产生很大的影响, 作者认为, 高频高振幅扰动或许会使 SMD 值降低, 不过该结论还未被证实。

总之, 目前的雾化研究工作主要是获得凝胶推进剂雾化的实验数据, 包括流变参数, 喷注器几何形状和工作参数等对雾化特性的影响。实验使用的大多都是传统形式的喷注器, 而不是一种新型的、针对凝胶推进剂高粘性特点而专门设计的雾化喷注器^[13]。文献 [14] 表明, 针栓喷注器可以用于凝胶发动机, 并且表现出很多优势, 如, 解决了传统喷注器用于凝胶的堵塞问题, 可获得好的燃烧稳定性和高的燃烧效率, 而且成功实现了导弹的飞行。

3 凝胶推进剂雾化的表征问题

用于表征牛顿型流体雾化性能的参数有: 喷

雾角 (液流离开喷嘴后的扩散度)、喷嘴的破碎长度 L_p (液流或液膜离开喷注面到完全破碎成液滴所经历的长度)、喷雾细度 (表征雾化质量的重要指标, 常用于表征液滴平均直径的参数有 Sauter 平均直径 D_{32} , 即 SMD ; 体积平均直径 D_{30} ; 液滴质量中间直径 D_m)、雾化均匀性 (雾化后液滴尺寸大小的接近程度, 液滴最大直径与最小直径的差值越小, 则雾化均匀性越好)^[15]。从目前研究情况来看, 凝胶推进剂的雾化与牛顿型流体有相同之处, 如同样存在喷雾角、破碎长度等; 但也有很大的区别, 凝胶体的喷雾场主要是液膜和液丝, 很少看到有大量的、不同直径的圆形液滴产生。因此, 如何评估雾化后雾场的喷雾细度和均匀性、如何用量化参数表征凝胶推进剂的雾化特性, 将是雾化研究中的一个重要问题。

4 结束语

目前, 凝胶推进剂雾化研究主要是在开式环境下, 对不同的模拟液采用常规喷注器, 结合多种光学技术, 获得不同条件下的雾化图像, 从而研究喷嘴的几何结构和射流工作参数等对雾化特性的影响。

(1) 从得到的雾化图像中可明显地看出从液丝到液滴的破碎过程很困难, 用常规喷注器很难产生良好的雾化效果。新型的专门适用于雾化凝胶这种非牛顿流体的喷注器将是研究方向之一。

(2) 现有表征牛顿型流体的雾化参数也很难应用于凝胶推进剂, 如何表征凝胶推进剂的雾化特性是一个需要解决的问题。

(3) 在凝胶推进剂雾化过程中, 凝胶的平均表观粘度是影响雾化的重要参数。但在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尚需进行分析。

参考文献:

- [1] 张蒙正, 陈伟, 杨伟东, 等. 撞击式喷嘴凝胶推进剂雾化及表征[J]. 火箭推进, 2009, 30(1): 46-51.

- [2] Benveniste Natan, Shai Rahimi. The Status of Gel Propellants in Year 2000[C]. Combustion of Energetic Materials, Edited by K.K.Kuo and Luigi deLuca, Begel House, Boca Raton, USA, 2002, 172-194.
- [3] Jens von Kampen, Klaus Madlener, Helmut K. Ciezki. Characteristic Flow and Spray Properties of Gelled Fuels with Regard to the Impinging Jet Injector Type [R]. AIAA2006-4573.
- [4] Metzner, Reed. Flow of non-Newtonian Fluids—correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent—flow Regions[J]. American Institute of Chemical Engineers Journal, 1955, 1(4): 434-440.
- [5] Helmut K Ciezki, Ansgar Robers, Günter Schneider. Investigation of the Spray Behavior of Gelled Jet A-1 Fuels Using an Air Blast and an Impinging Jet Atomizer[R]. AIAA2002-3601.
- [6] Klaus Madlener, Helmut K Ciezki, Jens von Kampen, et al. Characterization of Various Properties of Gel Fuels with Regard to Propulsion Application [R]. AIAA 2008-4870.
- [7] Jayaprakash N, Chakravarthy S R. Impinging Atomization of Gel Fuels[R]. AIAA2003-316.
- [8] Syed Fakhri, Jong Guen Lee, Richard A Yetter. Atomization and Spray Characteristics of Gelled—propellant Simulants Formed by Two Impinging Jets[R]. AIAA 2009-5241.
- [9] Clausen L C, Li T X, Law C K. Effects of Additives in the Microexplosion of Carbon Slurry Droplets [J]. Journal of Propulsion and Power, 1988, 4(3): 217-221.
- [10] 张蒙正, 杨伟东, 王玫. 双股互击式喷嘴凝胶水雾化特性试验[J]. 火箭推进, 2008, 29(1): 22-24.
- [11] Shai Rahimi, Benveniste Natan. Air-blast Atomization of Gel Fuels[R]. AIAA2001-3276.
- [12] Victor Chernov, Benveniste Natan. Experimental Characterization of a Pulsatile Injection Gel Spray [R]. AIAA2005-4479.
- [13] 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.
- [14] Gordon A, Dressler J, Martin Bauer. TRW Pintle Engine Heritage and Performance Characteristics [R]. AIAA 2000-3871.
- [15] 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, 23(2): 16-32.

(编辑: 陈红霞)