



CSTAM 2012-B03-0034

液体火箭发动机推进剂雾化过程中的力学问题

杨立军，富庆飞，佟明羲，杜明龙，王辰，张伟

北京航空航天大学宇航学院宇航推进系

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

液体火箭发动机推进剂雾化过程中的力学问题

1)

杨立军^{*, 2)}, 富庆飞^{*}, 佟明羲^{*}, 杜明龙^{*}, 王辰^{*}, 张伟^{*}

^{*}(北京航空航天大学宇航学院宇航推进系, 北京 100191)

摘要 全面综述了液体自由射流雾化、破裂及稳定性分析理论研究的历史、现状。根据液体火箭发动机推进剂喷雾燃烧技术对基础研究的需求, 归纳总结了液体火箭发动机推进剂雾化过程研究中的一些流体力学的问题, 介绍了近年来课题组针对液体火箭发动机喷嘴特殊边界下的牛顿流体自由射流破裂、非牛顿流体射流破裂、波动在喷嘴特殊通道流体中传播等流体力学问题的理论和实验研究状况, 为进一步开展的液体雾化机理研究解决工程重大需求提供了新的探索方向。

关键词 牛顿流体; 非牛顿流体; 射流; 破裂; 喷嘴; 动力学

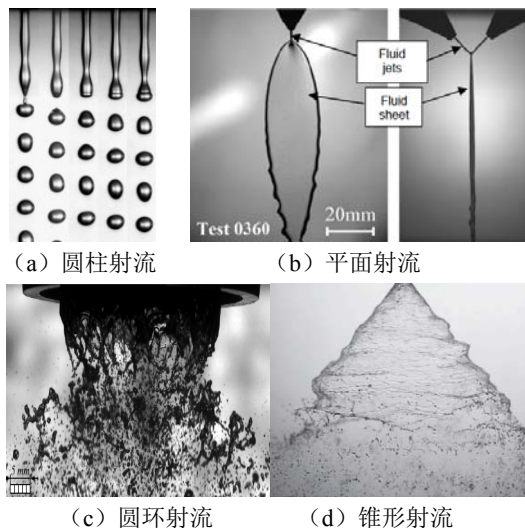
引言

众所周知, 雾化是液体高效利用(燃烧、蒸发等)的主要手段, 雾化过程的实质是液体破裂, 因此, 液体雾化的本质是一个流动不稳定性问题。对液体火箭发动机而言, 液体推进剂的雾化过程不仅对燃烧效率产生影响, 而且在很大程度上还决定了燃烧过程的稳定性。因此, 研究液体破裂、波动在喷嘴内流体中传播等问题对解决燃烧稳定性、完全性问题具有更为特殊的意义。此外, 由于高性能发动机的需求, 液体推进剂的研究已远超出肼类、液氢和煤油等牛顿流体的范围。在常规推进剂中添加金属、高分子材料等物质研制出新型高性能非牛顿流体推进剂。这些新型推进剂的出现, 使对雾化机理认识的需求扩展到非牛顿流体领域。本文主要从液体射流不稳定性及波动在喷嘴内流体中传播问题两个方面对液体火箭发动机推进剂雾化过程中的力学问题进行综述。

1. 液体射流不稳定的线性分析

喷嘴喷出的自由射流在液体内部或外界扰动的作用下, 失去流动稳定性, 在局部出现破裂并在进一步的流动中雾化成细小液滴。大量的实验表明, 自由射流表面产生扰动波的不断增长是造成射流失稳的主要原因。根据这一机理可以采用小扰动理论来分析射流失稳破裂过程, 进而确定射流破裂长度、扰动波长和液滴

的初级雾化尺度。液体射流稳定性不仅是流体力学领域的一个经典问题, 而且与现代喷雾、燃烧技术的发展紧密相关。因此, 射流不稳定性研究主要围绕不同的射流形式, 在液体种类、不同射流边界条件等方向展开。液体火箭发动机的推进剂雾化过程由喷嘴来组织, 不同结构形式的喷嘴喷出不同截面形状的自由射流, 自由射流在扰动或外力作用下发生断裂, 并进一步破碎成更细的液滴完成雾化。如直流式喷嘴的喷孔为圆形, 所喷出的射流截面形状为圆形, 称为圆柱射流, 见图1(a); 撞击式喷嘴所形成的射流横截面可近似看成大长宽比的矩形, 称为平面液膜见图1(b); 内气外液同轴喷嘴的射流形状为圆环形, 称为环形液膜, 见图1(c); 离心喷嘴的射流形状为圆锥形, 称为锥形射流, 见图1(d)。



1) 基金资助项目: 国家自然科学基金 11272036

2) Email: yanglijun@buaa.edu.cn

图1 自由射流型式

1.1 圆柱射流不稳定的线性分析

1.1.1 牛顿流体圆柱射流

Rayleigh^[1]考虑不可压缩无粘液体射流在空气中的破碎时,提出由表面张力引起的流体动力不稳定性是射流破碎的原因,并首次发展了这样的想法,由于所有模态初始时的振幅是差不多的,所以增长最快的模态成为占优势的模态(或最危险的模态),并为实际上能观察到的模态。如果射流不太粗以至在喷嘴附近有剪切的作用,同时流体不太粘,则Rayleigh的理论和实验符合的较好。Tomotika^[2]指出对于有限波长的扰动要获得最大的增长率,则需一最佳的气液粘性比。Chandrasekar^[3]考虑了流体的粘性和密度对射流的破碎进行了研究,发现流体粘性增大会降低破碎速度,增大液滴直径,他还发现真空环境下的射流破碎是表面张力作用的结果,其理论结果与实验结果是一致的。Weber^[4]考虑了流体的粘性和气体的密度,但他的理论结果与实验数据吻合的不太好。Sterling和Sleicher^[5]发展了Weber的理论,取得了部分成功,并对瑞利(Rayleigh)型破裂和第一类风生破裂的形状做了很好的预测。

Kelle^[6]等发现Chandrasekar, Rayleigh, Weber的研究都是假设气液界面上的扰动沿时间方向增长为前提的,实际上气液界面上的扰动在空间上也存在增长,特别在喷嘴出口处扰动不随时间增长。他们把Rayleigh的分析方法推广到空间增长的扰动分析上,发现Rayleigh的结论仅当Weber数很小时才正确。对于一阶或更高阶的Weber数, Rayleigh的结论不再成立,为此他们建立了比Rayleigh模型的扰动波波长更短、增长更快的新的液体射流模型。将Keller等的射流破裂模型同Leib和Goldstein^[7]关于射流自由表面扰动的绝对不稳定性分析联系起来,可以发现, Rayleigh, Keller, Weber, Chandrasekar等人关于射流破裂的理论都忽略了周围气体介质的影响,而且用理论预测的液滴直径与射流直径同阶,因而都不能用于解释和分析射流的雾化。

基于空气动力干扰说, Taylor^[8]用线性稳定性理论分析考察了粘性液体自由面上风生小波的生成,讨论了低密度气体介质中沿时间方向

增长的小扰动的发展,即时间模式下的射流稳定性分析。Bracco^[9]为首的研究组以自己的理论研究、实验观测和数值计算为基础,对前人提出的各种雾化机理进行了深入分析比较后得出结论:上述5种假说中任何一种都不能单独地圆满解释雾化现象,但其中空气动力干扰说是最有发展前途的,只是须对其加以修正和补充。他们认为,高速射流与周围气体之间的气动相互作用导致液面不稳定波迅速而有选择性地增长,这是雾化的基本动因。与此同时喷嘴的几何结构对表面波的初始振幅也有着重要影响。Bracco等人把此理论称为附加的气动干扰机理(Supplemented aerodynamic interaction mechanism)。由此出发,他们导出了初始直径和破裂长度的半经验计算公式。

尽管附加的气动干扰理论已得到不少实验结果的支持,但Lin^[10]指出,它在理论上存在严重缺陷,即假定射流表面所受扰动在各处以相同速度增长。事实上,扰动在空间上并非均匀,而是沿着射流方向增大的。这一特性对流动稳定性有重要影响,因为一个在随时间变化的扰动下是稳定的流动在随空间变化的扰动下可能成为不稳定。为此,他们采用线性稳定性分析方法对雾化机理进行了研究。其结论是,雾化的主要起因是空气压力脉动在气液界面上引起的薄膜波的共振,最后导致了射流的不稳定。但只有当喷嘴出口处初始扰动的振幅超过某一临界值时,雾化才会立即在喷嘴出口处发生,否则就存在一个破裂长度。雾化的第二位原因是气体的粘性效应。气体与高速液体射流的摩擦作用会在其界面上形成薄边界层,由于不稳定性,此边界层会产生剪切波,最后导致射流破裂破碎。Lin及其合作者将Bracco等人的理论发展成为射流破裂雾化的统一理论。

前面介绍的液体射流雾化机理的线性分析方法虽然能对某些射流,特别是低速射流破裂能给出满意的解释,但对高速射流的破裂雾化过程却无法给出与实验观测吻合的理论解释。因为他们的雾化模型是建立在轴对称模式下的,即假定液柱表面在圆周方向受到大小相同的扰动,其不稳定波的增长率在角向完全相同。然而,对高速射流喷雾的观测均表明,液柱发生破裂时,除了直接产生液滴外,首先主

要是在液面沿纵向形成纤细的条带，这些条带进一步破裂而产生雾滴。事实表明，雾化并非是一种轴对称现象。

长期以来，人们注意力集中于液体射流在轴对称扰动下的不稳定性。这是因为除了理论和数值处理上的简便之外，实践中易于观测到的低速射流的破裂确实表现出轴对称的特征，基于轴对称理论的Rayleigh型破裂机理圆满地分析和预测了表面张力所引起的低速射流的不稳定性，但随着射流速度的增加，液柱的破裂显示出越来越明显的非轴对称性。Levich^[11]在60年代初曾研究过液体射流的非轴对称的不稳定性，但他只是在表面张力中考虑了非轴对称性而忽略了气液界面的气动相互作用的非轴对称特点，片面得出结论：各种波长的扰动模式中，轴对称模式最不稳定。而表面张力所产生的各种模式的扰动中，轴对称模式是最不稳定的，其他各种非轴对称模式尽管也可能成为不稳定，但均不起主导作用，因而Levich未能揭示出非轴对称不稳定性对雾化过程的作用，并且使人们继续忽视这一课题的研究。直到1992年，Yang^[12]才重新对此问题进行了比较严格的理论分析。Yang对射流非轴对称稳定性的分析虽然具有一定的开拓意义，但他为简化计算，完全忽略了液体的粘性，同时他研究的对象是时间模式，即只考虑了扰动在时间上的增长，而工程上常见的扰动形式均为时间上扰动空间上增长。Lin^[10]等对射流的空间稳定性问题采用线性稳定性分析方法进行了研究，但其模型是二维的，因而不能准确描述高速射流时非轴对称扰动起作用的雾化过程。易世君^[13]等从这两方面改进了Yang和Lin的工作，用数值分析方法详细考察了粘性液体射流在空间模式下稳定性及其雾化机理，并得到了一个新的无量参数 $Je > We/Q$ （其中韦伯数 We ，气液密度比 Q ）用来作为区分破裂模式与雾化模式的判据。在 $Je > 1$ 的范围内，射流自由表面轴对称扰动占据绝对优势，为最不稳定的扰动模式； Je 从1开始减小时，非轴对称扰动逐渐出现而且其扰动最大增长率随 Je 的减小也从远小于轴对称扰动最大增长率发展到小于、相当于直至发展到超过轴对称扰动最大增长率；与此同时，还出现了几种不同角向模数的非轴对称扰

动模式同时并存的情况。

史绍熙^[4]，周哲玮^[15]等人采用线性稳定性分析方法对液体射流稳定性进行了详细的研究，同时还对时间模式和空间模式进行了比较。

1.1.2 非牛顿流体圆柱射流

对于非牛顿流体圆柱射流的研究可以追溯到上世纪六十年代，Middleman和Kroesser^[16]等人从实验出发研究非牛顿流体的液流的不稳定性。在接下的近十年中，Paul^[17]、Goldin等人^[18]、Rubin^[19]、Sagiv等人^[20]、Gordon等人^[21]和Lee等人^[22]等先后对非牛顿射流的破裂破碎进行了理论分析。1977年，Middleman^[23]对他们的非牛顿液流不稳定性研究进行了总结。1976年，Person^[24]和Petrie等人^[25]分别对之前的非牛顿射流不稳定性研究文献进行了回顾。总的来说，他们提出的非牛顿射流不稳定性理论有以下几个共同点：

(1) 射流直径和速度的扰动都与周向无关，即只考虑轴对称扰动；

(2) 将牛顿流体中的广义牛顿摩擦定律换成粘弹性本构方程式，再利用设定的初始条件将本构方程简化为：

$$\tau = -\frac{\eta_0(1+\omega\lambda_2)}{(1+\omega\lambda_1)}\dot{\gamma} \quad (1)$$

式(1)中， η_0 是零剪切粘度， λ_1 、 λ_2 分别是应力松弛时间常数和应变松弛时间常数， ω 是扰动振幅增长率。在(1)式中可另 $\eta(\omega) = \eta_0(1+\omega\lambda_2)/(1+\omega\lambda_1)$ ，则(1)式本构方程与牛顿流体形式一致。 $\eta(\omega)$ 相当于牛顿流体中的粘性系数，在这种情况下，非牛顿流体可以看作是广义的牛顿流体。对于剪切流体来说 $\lambda_2 < \lambda_1$ ，在扰动不稳定情况下 ($\omega > 0$)， $\eta(\omega)$ 广义粘性系数小于相应零剪切粘度牛顿流体的粘性系数。因此得出结论，非牛顿流体比牛顿流体更不稳定。

在非牛顿射流破裂破碎试验中发现，有的高分子聚合物溶液比相应粘度的牛顿流体更加稳定。这与上面提到的结论矛盾，为了解释这一矛盾，1982年Goren和Gottlieb^[26]提出非牛顿射流存在未完全松弛的轴向拉应力的作用。他们采用了线性稳定性分析法理论上研究了这个问题，计算结果表明在适当的流体性质条件下

非牛顿射流具有更高的稳定性。Brenn等人^[27]和Liu等人^[28]使用线性分析法分别研究了非牛顿射流在轴对称扰动和非轴对称扰动下的瞬时稳定性。在他们的研究中，都考虑了粘弹性性质和气液表面的相互作用，比较完善的分析了没有轴向拉应力情况下非牛顿流体的破裂破碎过程。黄沐辉^[29]对二阶非牛顿流体圆柱射流不稳定性进行了理论分析，得到了与国外研究相近的结果。

Yang^[30]等人采用动量积分法对幂律型流体圆柱射流研究发现了较大的表面张力，气液间边界层厚度以及射流半径会阻碍射流破碎使其变得更加稳定，而较大的环境气体粘度以及气液相对速度会使射流更加容易破碎。对于幂律型流体的稠度系数，存在一个临界稠度系数。当稠度系数小于临界值时，较大的稠度系数会令射流更加稳定，而当稠度系数大于临界值时，较大的稠度系数会令射流更加容易碎裂。对于幂律指数，具有较小幂律指数的圆柱射流更加容易碎裂。Yang^[31,32]应用线性不稳定性分析方法对静止和旋转气流中的粘弹性射流进行探索。研究发现，在静止气流中，气体密度对于粘弹性射流破碎的作用最大，其次为射流速度和零剪切粘度。引入气体旋转后，能加强粘弹性射流的稳定性。并且，在足够大的旋转强度下，轴对称模式主导着射流的破碎过程。

1.2 平面液膜不稳定的线性分析

1.2.1 牛顿流体平面液膜

最早的平面液膜研究可以追溯到1833年，Savart^[33]研究了喇叭口状和平面液膜的形成。1959年，Taylor^[16]进一步的研究了液膜相关的流体力学，并且研究了液膜表面波的发展。Squire^[34]、Hagerty和Shea^[35]以及Fraser等人^[36]最先研究了液膜的稳定性，他们主要分析了等厚度的平面液膜射入周围介质气体中的破裂破碎过程。与圆柱射流不同，平面液膜有上、下表面，上、下表面扰动方向的变化存在两种完全不同的破裂模式即：正弦模式（sinuous mode）和曲张模式（varicose mode or dilational mode），如图2所示。他们的研究结果均表明，正弦模式比曲张模式更不稳定。然而，后来Mehring^[37]和Rangel等人^[38]的研究结果显示的

情况并不是那么简单，只有在韦伯数较大时，上述结论才成立；在韦伯数较小时，曲张模式更加不稳定。事实上，后续的研究表明，一般来说在 $We < 1$ 时，正弦模式是相对稳定的，只有曲张模式在气动干扰作用下呈现出不稳定性。

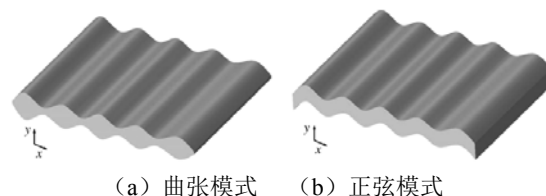


图2 平面液膜破裂破碎的两种模式

另外，Squire^[34]的瞬时不稳定性研究中还指出当 $We < 1$ 时，液膜不可能是稳定的；当 $We > 1$ 时，液膜处处是不稳定的。1975年，Crapper、Dombrowski和Pyott^[39]通过试验观察到在 $We > 1$ 时液膜的瞬时不稳定性是向液流下游传递的。1961年，Brown^[40]观察到在 $We < 1$ 时液膜上的扰动向上游传播，并且液膜破裂。这两点试验现象均与Squire的研究结论相矛盾。矛盾的源头在于瞬时不稳定性分析中假设空间各处的扰动波随时间一致的增长。而实际上，扰动波既随时间增长也随空间变化而增长。Brown^[40]和Lin^[41]以幕层（curtain coating）为基础研究了平面液膜的空间不稳定性。同时，Lin^[42-43]将Leib和Goldstein^[15]关于圆柱射流的对流不稳定性引入到平面液膜稳定性分析当中，并且成功的解释了上述两个矛盾。Lin等人的研究成果表明：当 $We > 1$ 时，对于正弦模式，如果气液密度比等于零，液膜稳定，否则是对流不稳定；当 $We < 1$ 时，存在特殊情况使得正弦模式是不稳定的，这种不稳定性是由表面张力的作用导致的。在这种情况下，不稳定性既不属于绝对不稳定也不属于对流不稳定，Lin称之为“pseudo-absolute instability”。

在上面提到的关于平面液膜稳定性分析的文献中，大部分都包含了液体粘性对平面液膜破裂破碎的影响。总的来说，时间和空间不稳定性分析都表明，粘性对于平面液膜稳定性的影响具有两面性：在韦伯数较小时，粘性的加入使得平面液膜更加不稳定，甚至在某些条件下粘性的影响，大于气动作用的影响；在韦伯

数较大时，气液间的相互作用才是不稳定的主导因素，粘性将会增强液膜的稳定性，同时使最大增长率对应的波长增大。在实际工程应用中，等厚度液膜比较少或者通常是理想情况，出现更多的是不等厚度液膜。Crapper等人^[44]在1975年研究了扩张液膜（Expanding liquid sheet）的不稳定性。Lin和Jiang^[45]在2003年研究了快速扩张液膜的绝对不稳定性和对流不稳定性。Finnicum等人^[46]研究了重力作用下平面液膜的不稳定性。

1.2.2 非牛顿流体平面液膜

对于非牛顿流体平面液膜的不稳定性研究到目前为止还比较少。Crapper等人^[47]在1975年研究了非牛顿流体薄液膜上的表面波增长。1998年，Liu等人^[48]成功的将牛顿平面液膜中的分析方法移植到非牛顿流体平面液膜，分析了正弦模式和曲张模式下液膜的破裂破碎情况，及粘弹性流体各参数对不稳定性的影响。将非牛顿流体平面液膜的分析结果同非牛顿射流比较可以发现，粘弹性对平面液膜的影响与射流类似，例如粘弹性的引入使得液膜变得更加的不稳定。

Yang^[49]等人对幂律型流体平面液膜的破裂模式进行了实验研究，提出了幂律流体平面液膜破碎长度的理论预测模型，并通过实验进行了验证。Yang^[50]等人对两侧气流速度不一致的粘弹性流体平面液膜进行了线性稳定性分析。他们的研究表明，气液界面速度差越大液膜越不稳定。但是对不同模式的扰动波，速度差对稳定性的影响程度不一样。在类正弦模式下，液膜的稳定性主要由两侧气液速度差中较大的速度差决定；而在类曲张模式下，液膜的稳定性主要由两侧气液速度差中较小的速度差决定。尤其是，主导波数和液膜不稳定区域在另一个速度差变化时几乎保持不变。流体粘度、弹性、表面张力、气液密度比等参数对两侧气流速度不相同粘弹性流体液膜稳定性的影响与液膜射入静止气流中的影响相类似。Yang^[51]提出了用三参数流变模型代替牛顿流体黏度的分析思路，采用线性稳定性分析方法对黏弹性平面液膜的雾化破碎机理进行了研究，得到了扰动波最大增长率与波数的色散关系。韩式方^[52]提出了“准衰退记忆”新概

念，研究了粘弹性流体拉伸薄板的不稳定准则。阳倦成^[53]等人对粘弹性流体稳定性进行了全面系统地综述。

1.3 圆环液膜不稳定的线性分析

1.3.1 牛顿流体圆环液膜

与平面液膜相比，环形液膜的研究价值毫不逊色。首先，环形液膜在工程应用中广泛使用，是喷嘴喷射液流经常出现的几种形式之一；其次，环形是几种基本二维几何形状之一，极具理论研究价值；最后，环形液膜的研究是锥形液膜分析的基础，为以后锥形液膜的破裂破碎过程分析打下坚实的基础。

Crapper等人^[54]在1975年研究了被喷入静止介质气体的无粘环形射流的不稳定性。他们得到了扰动波数和扰动振幅增长率之间的色散方程，并数值求解了不同液膜速度、液膜厚度、环形直径条件下扰动波传播速度和扰动增长率相应关系。在他们的研究中只是提到了扰动增长率存在两个解，分别对应平面液膜的正弦模式和曲张模式；但却没有详细的分析环形液膜中两种模式与平面液膜的区别。

实际上，观察平面液膜和环形液膜的形式，很容易发现平面液膜的上、下表面关于喷嘴出口轴对称，均与周围介质气体有相交面，因此两个表面上扰动振幅的大小相等是合理的。但环形液膜不是这样，外表面与外部气体相接触，内表面与内部气体接触。内外部气体可以是相同气体，也可以是不同气体；内外部气体的速度可以相同，也可以不相同，因此环形液膜内外表面的扰动波振幅大小一般是不相同的。Shen和Li^[55]正是基于这个与平面液膜的区别，在研究环形液膜的不稳定性时，对应平面液膜的正弦模式和曲张模式，提出了“类正弦模式（para-sinuuous mode）”和“类曲张模式（para-varicose mode）”。在数值求解扰动波波数和扰动波增长率的色散方程式，同时得到内外表面扰动初始振幅比。与扰动波增长率一样，每给定一个扰动波波数将会得到扰动初始振幅比的两个解，分别对应两个模式。需要特别指出的是，他们分析了内外部气体不同速度下的情况，数值计算结果表明，同向流动的高速气流有助于环形液膜的雾化进程，并且内

部气流的高速度比外部气流高时，速度对液膜雾化的作用更加明显。

2001年，Liao等人^[56]在研究压力旋转启动喷嘴时，进一步扩充了Shen和Li的研究，加入了内外部气流、环形液膜的旋转速度。同时扰动波、扰动速度均加上了随周向的变化不再是轴对称的，从二维扰动模型进化到了三维扰动模型。他们的研究表明，旋转的引入不仅增大了扰动的最大增长率及其对应波数，而且使主要的破裂模式从轴对称模式变成螺旋状模式。另外，液膜的旋转速度可以大大增加液膜的雾化进程。其他对环形液膜不稳定性进行研究的还有Meyer^[57]、Dumbleton等人^[58]、Radev等人^[59]、Chauhan等人^[60]等等。

1.3.2 非牛顿流体圆环液膜

Alleborn等人^[61]将牛顿流体环形液膜的结果推广到了非牛顿流体中，并做了一定的分析验证。他们通过线性不稳定性分析推导出描述粘弹性流体圆环液膜的色散方程。并且，在考虑几何尺寸的极限情况下，将其分别演化成表征平面液膜和圆柱射流的色散关系。但是，他们并没有比较完整的分析各参数对液膜稳定性的影响。此外在他们的分析中，采用的是随流坐标系，从而略去了非牛顿流体粘弹性模型中的非线性项。

1.4 锥形液膜不稳定的线性分析

在前面环形液膜的回顾中曾提到液膜的旋转速度，众所周知，当存在旋转时必定存在离心力，液膜将很难维持环形的形状，这时出现的就是锥形液膜。锥形液膜在柱坐标系下不再具有固定的边界条件，分离变量法不再适用。另外，锥形液膜的半径越来越大，液膜的厚度也会越来越薄，这会加快液膜的破裂破碎的过程，却也给理论分析带来了更多的麻烦。正是因为上面提到的几点原因，目前对于锥形液膜的分析大多数都是采用直接数值模拟的方法。2000年，Mehring和Sirignano^[62]直接将环形液膜的分析移植到锥形液膜，分析了锥形液膜的空间不稳定性。但是因为缺少与试验的对比，这种方法的合理性和误差不得而知。

岳明^[63]分析了无粘锥形液膜在介质气体中的空间不稳定性，并且加入了锥形液膜厚度随轴向距离变化对液膜不稳定性的影响。王中伟

^[64]研究了粘性锥形液膜射入气体中的不稳定性。值得注意的是，岳明和王中伟都是直接采用了分离变量法求解，忽略了分离变量法不适用的事实，而由此产生的误差也并没有进行分析和说明。Fu^[65]从理论上分析了理想流体锥形液膜的破裂过程，提出了液膜破裂距离和时间的修正公式，并得到了实验验证。

1.5 射流不稳定的线性分析的总结

以上分别针对圆柱射流、平面液膜、环形液膜、锥形液膜四种基本液流形态的线性不稳定性研究进行了回顾。可以看出，虽然射流线性稳定性的研究已经有了一个多世纪，但仍然还有许多的空白等待研究，特别是对于非广义牛顿流体和环形、锥形液膜而言。此外，上述综述中未包括与热交换、电场、磁场等外部作用相关的射流不稳定性研究状况。对于未扰动前流动状况的分类，这同样是未来液流破裂研究的重点。射流内部速度分布、平面液膜厚度变化、射流是否旋转、周围气流是否旋转或振荡、液膜两个表面气流速度不相同等等这些更为复杂的情况，目前所做的研究还相对较少。由此看出，射流雾化机理还有更多的问题有待于探索。

2. 液体射流不稳定的非线性分析

众所周知，使用线性方法分析射流不稳定的缺点在于：基本假设是建立在射流的表面振幅是极其微小，研究范围是从射流开始不稳定的一段极短的时间间隔内。事实上，射流从不稳定发展，表面振幅增加乃至碎裂、雾化这一过程中，扰动振幅在有限的时间内将会增加很大，扰动振幅和射流半径属于同一个量级，尽管线性理论能够解释不稳定的出现，但却无法描述射流破裂成液滴的过程。当扰动发展的非线性阶段起实质作用时，射流的破裂在很大程度上由非线性过程决定，如射流发生碎裂时的形状及形成液滴的不均匀性等，这时应用线性理论处理这一问题的准确性受到了限制。为了克服线性理论的这一缺点，人们探索了射流稳定性的非线性理论分析方法。

目前所采用的非线性方法主要是应用摄动理论建立射流表面波扰动振幅解的1-3阶模型。Yuen^[66]，Nayfeh^[67]，Rutland^[68]，Lafrance^[69]应

用非线性摄动方法分析了无粘圆柱射流在没有周围环境气体影响下的毛细现象。随后 Mansour 和 Lundgren^[70] 应用边界元方法 (BEM) 建立非线性模型发展了 Rayleigh 的破裂过程。Spangler^[71] 拓展了 Mansour 和 Lundgren 的模型, 分析了表面张力和周围气体对射流的不稳定性影响。Clark 和 Dombrowski^[72] 首先应用摄动理论建立了无粘平面液膜射流表面波的二阶非线性模型, 结果表明射流上下表面厚度最小并随后断裂的地方发生在基波波长的 3/8 和 7/8 处。随后 Jazayeri 和 Li^[73] 将无粘液膜的非线性稳定性模型发展到了三阶, 发现在射流表面波开始增长的过程中, 正弦模式占主导地位。Panchagnula^[74] 建立无粘环形液膜的一维非线性模型, 该模型忽略了环形液膜内外气相的影响。Mehring 和 Sirignano^[75,76,77] 发展了这一非线性模型, 在无粘环形液膜的两侧考虑了气相周期性压力扰动的影响。Ibrahim^[78] 应用摄动分析方法研究了环形液膜在空气介质流动的不稳定性, 考虑了外界气体轴向以及旋转速度对液膜不稳定的影响。Yang^[79] 应用摄动分析方法研究了粘性平面液膜的不稳定性, 发现了增加雷诺数会增大时间或空间增长率, 但会减小二阶振幅。它们的共同效果随韦伯数改变。在韦伯数较大时, 增大雷诺数会增大液膜的不稳定性, 在韦伯数较小时, 结论相反。

由于射流稳定性非线性分析在数学上过于复杂和困难, 研究者更倾向于通过数值模拟方法开展工作, 关于数值模拟方法的研究很多, 在此不作过多的综述。众所周知, 解析表达式便于人们更为清晰地认识物理现象本质和规律, 因此, 探求解析解一直以来是射流稳定性研究的一个主要方向, 通过解析方法破解射流不稳定、破裂及雾化之谜, 对认识射流破裂的机理具有重要意义。

3. 波动在喷嘴特殊通道内的传播

波动在喷嘴特殊通道内的传播问题 (也称喷嘴动力学) 的研究意义在于液体火箭发动机燃烧稳定性的工程需求。众所周知, 液体火箭发动机是一个复杂的动态工作系统, 喷嘴在发动机中控制推进剂流量, 发动机整个系统中的任何微小振荡或扰动, 都会直接或间接的影响

喷嘴的流量变化, 进而影响发动机整体稳定性, 因此喷嘴在发动机动态系统中起到非常重要的作用。与认为“喷嘴仅仅是燃烧过程的组织者”的传统观点不同, 在液体火箭发动机中, 喷嘴同时也是燃烧室和供应系统及燃气发生器之间的各种扰动的重要传递环节, 喷嘴动力学特性对燃烧过程稳定性起到非常重要的作用。

3.1 喷嘴动力学研究

Базаров^[80] 开创了喷嘴动力学的研究工作, 采用对喷嘴内部无粘流动的控制方程进行拉普拉斯变换的办法, 推导出了喷嘴动态特性传递函数。对液体喷嘴动力学进行了详细的系统研究, 得出了液体直流、离心式喷嘴各输入、输出参数振幅和相位角的关系, 得到了这些喷嘴动态特性的工程算法。其中离心喷嘴的频率特性较为复杂, 包括进口通道、旋流室及喷口三部分组成, 离心喷嘴频率特性由各部分频率特性的矢量复合而成。

Fu^[81] 针对敞口型离心喷嘴的动态特性进行了分析, 考虑了旋流腔内轴向分速对流量振荡的影响, 推导出敞口型喷嘴动态特性的计算公式。计算了敞口型和收口型离心喷嘴的动态特性, 见图4。结果表明: 敞口型喷嘴动态的流量相对振幅约为收口型喷嘴的 1/8 到 1/10, 而且其幅频特性和相频特性变化稳定。

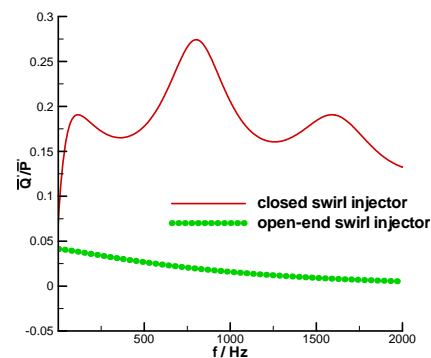


图4 收口和敞口型离心喷嘴幅频特性曲线

针对离心喷嘴动力学研究中高频脉动流量难以测量的困难, Fu^[82] 根据离心喷嘴内部流动的特点, 以多孔钛材料为电极并结合锁相放大电路研制了一种基于电导法的高频脉动流量的测量装置, 并对敞口型模型离心喷嘴进行了实验测量, 见图5。实验结果表明此方法及测量传感器可用于离心喷嘴内部脉动流量测量, 对离心

喷嘴动力学的实验研究具有重要意义。Fu^[82]在此测量装置的基础上,对离心喷嘴结构参数对喷嘴动态特性的影响进行了实验研究。

杨立军^[83]从理论上对具有多排切向通道的敞口型离心喷嘴的动态特性进行了分析,推导出具有多排切向通道的敞口型离心喷嘴动态特性的计算公式。计算结果表明,调整切向通道之间的轴向距离,可以使喷嘴滤除一定频率的扰动波。

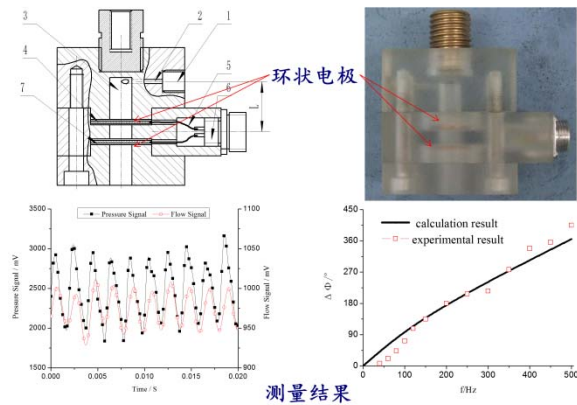


图5 高频脉动液膜厚度测量传感器

Fu^[84]采用频率法对气液同轴喷嘴缩进室内气液两相流动态特性进行了分析。采用均相流模型,在把液相介质参数看作集中参数的条件下讨论了缩进室边界压降振荡对液相质量流量振荡的动态响应。在此基础上,得到了气液同轴喷嘴整体的传递函数。计算结果表明,气液同轴喷嘴的质量流量、混合比、缩进长度等都对喷嘴的动态特性有影响。在某些扰动频率下,传递函数的振幅有峰值出现,见图6,被认为是在气液同轴喷嘴内发生了自激振荡。

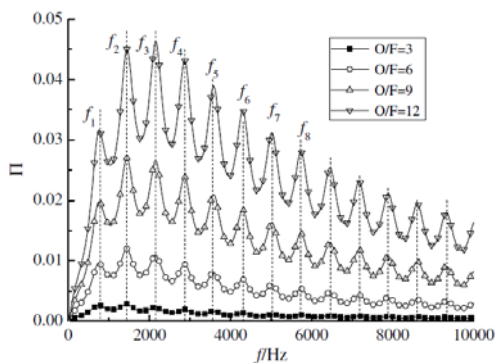


图6 混合比对气液同轴喷嘴动态特性的影响

3.2 喷嘴内扰动发展的时空稳定性

在应用线性不稳定性理论对扰动在喷嘴内传播的机理进行的研究中,对喷嘴内扰动波

(如离心喷嘴环形液膜的表面波以及气液同轴喷嘴中液体射流表面的扰动波)发展模式的假设分为时间模式与空间模式两种。时间模式和空间模式都属于正常模式的范畴,但两者具有截然不同的特点。在时间模式下,扰动的幅值随时间的增加而增加,扰动本身是在空间上波动的。在空间模式下,扰动的幅值随空间位置的改变而增加,扰动本身是在时间上波动的。严格地说,不论时间模式和空间模式都不能完全真实地反映液体射流的实际情况,实际上,扰动的幅值可能同时随时间和空间变化,这种情况下扰动的波数和频率都应是复数,称之为时空模式。绝对和对流不稳定性是时空模式下的两种性质不同的不稳定性,当扰动仅向扰动源位置的下游或上游一个方向传播,使得在充分长的时间后扰动“逸”出了所研究的流动区域,流场最后恢复到未扰动的状态,则称流动是对流不稳定的;如果增长的扰动既向下游传播又向上游传播,在充分长的时间后扰动“污染”了整个流场,使之无法恢复到未扰动的状态,则称流动是绝对不稳定的。Fu^[85-86]对离心喷嘴、内气外液以及外气内液的气液同轴喷嘴内扰动的时空稳定性进行了分析。结果表明,喷嘴结构参数和流动参数等的变化会使得喷嘴内的扰动从对流不稳定转变为绝对不稳定,由于扰动同时向上游和下游传播,形成自持的振荡(self-sustained oscillations),会对进一步的雾化和燃烧产生不利影响。

4. 结束语

航空航天动力装置尽管是很窄的技术领域,但毋庸置疑,其需求一直是引导力学及燃烧学发展的主要动力之一。应该承认,传统喷雾燃烧领域的一些基本流体力学问题并没有得到完美的解决,但人们已经做出了非常出色的结果。对于液体火箭发动机而言,燃烧稳定性问题一直像“魔鬼”一样伴随着每一个新型号的诞生,认识波动在喷嘴特殊通道内传播规律被美、俄学者认为是解决这一问题最有前景的研究方向之一。此外,追求高性能及一些特殊的军事应用所催生出来了一些呈现非牛顿流体性质的液体推进剂,这些推进剂尽管能够满足工程需求,但是人们对其流动机理认识的并不

深入。非牛顿流体推进剂除了给我们带来一些奇异美妙的物理现象的同时,还给流体力学控制方程组带来了非线性粘性项,增加了方程的求解难度。结合流体内部物理机制流变学的自由射流不稳定、破裂及雾化等问题给研究者带

来了更大的挑战。因此,复杂流体性质推进剂在喷嘴特殊结构中的波动传播及其自由射流不稳定性等问题的研究不但具有强大的应用背景需求,而且具有重要的科学价值。

参考文献

- 1 Rayleigh JWS., On the instability of jets. Proc. London Math. Soc., 1878, 10: 4~13
- 2 Tomotika S. Breaking-up of a drop of viscous liquid immersed in another viscous liquid which is extending at a uniform rate. Proc. R. Soc. Lond. A, 1936, 153: 302
- 3 Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Clarendon Press, 1961
- 4 Weber C. Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Z. Angew Math. Mech., 1931, 11: 136~154
- 5 Sterling AM, Sleicher CA. The Instability of capillary jets. J Fluid Mech., 1975, 68(3).
- 6 Keller JB, Rubinow SI, Tu YO. Spatial instability of a jet. Phys. Fluids, 1973, 16: 2052~2055
- 7 Leib SJ, Goldstein ME. Convective and absolute instability of a viscous liquid jet. Phys Fluids, 1986, 29(4): 952~954.
- 8 Taylor GI. In the scientific papers of G. I. Taylor. Vol. 3. Cambridge University Press, 1963
- 9 Reitz RD, Bracco FV. Mechanism of atomization of a liquid jet. Phys. Fluids, 1982, 25: 1730~1742
- 10 Lin SP, Kang DJ. Atomization of a liquid jet. Phys. Fluids, 1987, 30: 2000
- 11 Levich VG. Physicochemical Hydrodynamics. Prentice-Hall, 1962, 631
- 12 Yang HQ. Asymmetric instability of a liquid jet. Phys. Fluid A, 1992, 4: 681~689
- 13 易世君. 粘性液体射流分裂雾化机理及喷雾特性研究. 大连理工大学, 大连, 辽宁, 1996
- 14 史绍熙, 杜青, 秦建荣, 郝大光. 液体燃料射流破碎机理研究中的时间模式与空间模式. 内燃机学报, 1999, 17(3)
- 15 苏海容, 胡国辉, 周哲玮. 自由射流不同速度剖面下界面稳定性的伪谱分析. 应用数学和力学, 2004, 25(12)
- 16 Kroesser FW, Middleman S. Viscoelastic jet stability. AIChE J., 1969, 15: 383~386
- 17 Paul DR. A study of spinnability in the wet spinning of acrylic fibers. J. Appl. Polymer Sci., 1968, 12: 2273
- 18 Goldin M, Yerushalmji, Pfeffer R, Shinnar R. Stability of viscoelastic capillary jets. J. Fluid Mech., 1969, 38: 689
- 19 Rubin H. Breakup of viscoelastic liquid jets. Israel J. Tech., 1971, 9: 579
- 20 Sagiv A, Rubin H, Takserman-Krozre R. On the breakup of cylindrical liquid jets. Israel J. Tech., 1973, 11: 349
- 21 Gordon M, Yerushalmji, Shinnarr. Instability of jets of non-Newtonian fluids. Trans. SOCR. heol., 1973, 17: 303
- 22 Lee JC, Rubin H. On the breakup of molten polymer threads. Rheol. Acta, 1975, 14: 427
- 23 Middleman S. Fundamentals of Polymer Processing. McGraw-Hill, 1977.
- 24 Pearsojn RA. Instability in non-Newtonian flow. Ann. Rev. Fluid Mech., 1976, 8: 163
- 25 Petrie CJS, Denn MM. Instabilities in polymer processing. A.I.Ch.E. J, 1976, 22: 209
- 26 Goren S, Gottlieb M. Surface-tension-driven breakup of viscoelastic liquid threads. J. Fluid Mech., 1982, 120
- 27 Brenn G, Liu Z, Durst F. Linear analysis of the temporal instability of axisymmetrical non-Newtonian liquid jets. Int. J. Multiphase Flow, 2000, 26
- 28 Liu Z, Liu Z. Linear analysis of three-dimensional instability of non-Newtonian liquid jets. J. Fluid Mech., 2006, 559
- 29 黄沐辉. 非牛顿二阶流体的射流不稳定性. 中山大学学报, 1991, 30(4)
- 30 Yang LJ, Du ML, Fu QF, Zhang W. Linear Stability Analysis of a Power-law Liquid Jet. Atomization and Spray, 2012, 22(2): 123~141
- 31 Yang LJ, Tong MX, Fu QF. Linear stability analysis of a three-dimensional viscoelastic liquid jet surrounded by a swirling air stream. J. Non-Newtonian Fluid Mech., Submitted
- 32 Yang LJ, Qu YY, Fu QF, Gu B. Linear stability analysis of a non-newtonian liquid jet. Aerospace Science and Technology, Accepted
- 33 Savart F. Suite du memoire sur le choc d' une veine liquide lancee contre un plan circulaire. Annl de Chimie et de Physique, 1833, 54: 56
- 34 Squire HB. Investigation of the instability of a moving liquid film. Brit J Appl Phys., 1953, 4: 167~169
- 35 Hagerty WW, Shea JF. A study of the stability of plane fluid sheets. J Appl Mech., 1955, 22(4): 509~514
- 36 Fraser RP, Eisenklam P. Research into the performance of atomizers of liquids. Imp Colloid Chem Eng Soc J., 1953, 7: 52~68
- 37 Mehring C. Nonlinear distortion of thin liquid sheets. [PhD Thesis]. University of California, Irvine, 1999
- 38 Rangel RH, Sirignano WA. The linear and nonlinear shear instability of a fluid sheet. Phys Fluids A, 1991, 3(10): 2392~2400
- 39 Crapper GD, Dombrowski N. A note on the effect of forced disturbances on the stability of thin liquid sheets and on the resulting drop size. Int J Multiphase Flow, 1984, 10(6): 731-736

- 40 Brown DR. A study of the behaviour of a thin sheet of moving liquid. *J Fluid Mech.*, 1961, 10: 297~305
- 41 Lin SP. Stability of a viscous liquid curtain. *J Fluid Mech.*, 1981, 104
- 42 Lin SP, Lian ZW, Creighton BJ. Absolute and convective instability of a liquid sheet. *J Fluid Mech.*, 1990, 220: 673~689
- 43 Lin SP, Lian ZW. Absolute instability of a liquid jet in a gas. *Phys Fluids A (Fluid Dyn)*, 1989, 19(3)
- 44 Crapper GD, Dombrowski N, Pyott GAD. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1975, 342: 209~224
- 45 Lin SP, Jiang WY. Absolute and convective instability of a radially expanding liquid sheet. *Phys. Fluids*, 2003, 15
- 46 Finnicum DS, Weinstein SJ, Ruschak KJ. The effect of applied pressure on the shape of a two-dimensional liquid curtain falling under the influence of gravity. *J. Fluid Mech.*, 1993, 255: 647~665
- 47 Crapper GD, Dombrowski N, Jepson WP. Wave growth on thin sheets of non-Newtonian liquids. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1975, 342: 225~236
- 48 Liu Z, Brenn G, Durst F. Linear analysis of the instability of two-dimensional non-Newtonian liquid sheets. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 1998, 78: 133~166
- 49 Yang LJ, Fu QF, Qu YY, Gu B, Zhang MZ. Break-up of Power-law Liquid Sheet formed by an Impinging Injector. *International Journal Of Multiphase Flow*, 2012, 39(1): 37~44
- 50 Yang LJ, Xu BR, Fu QF. Linear instability analysis of planar non-Newtonian liquid sheets in two gas streams of unequal velocities. *J. of Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2012, 167~168(1): 50~58
- 51 Yang LJ, Qu YY, Fu QF, Gu B. Linear Stability Analysis of a Non-Newtonian Liquid Sheet. *J. of Propulsion and Power*, 2010, 26(6): 1212~1224
- 52 韩式方. 扰动本构方程及粘弹流体拉伸流动不稳定性. *力学学报*, 1993, 25: 213~217
- 53 阳倦成, 张红娜, 李小斌, 蔡伟华, 张彦, 李凤臣. 黏弹性流体纯弹性不稳定现象研究综述. *力学进展*, 2010, 40: 495~516
- 54 Crapper GD, Dombrowski N, Pyott GAD. Kelvin-Helmholtz wave growth on cylindrical sheets. *J Fluid Mech.*, 1975, 68(3): 497~502
- 55 Shen J, Li X. Instability of an annular viscous liquid jet. *Acta Mechanica*, 1996, 114: 167~183
- 56 Liao Y, Jeng SM, Jog MA. On the mechanism of pressure-swirl airblast atomization. *AIAA paper*, 2001-3571
- 57 Meyer J. Investigation of the instability of an annular hollow jet. [MSc Thesis]. Technion-Israel Institute of Technology, 1983
- 58 Dumbleton JH, Hermans JJ. Capillary stability of a hollow inviscid cylinder. *Phys Fluids*, 1970, 13(1): 12~17
- 59 Radev S, Gospodinov P. Numerical treatment of the steady flow of a liquid compound jet. *Int J Multiphase Flow*, 1986, 12(6): 997 - 1007
- 60 Chauhan A, Maldarelli C, Rumschitzki DS, Papageorgiou DT. Temporal and Spatial instability of an inviscid compound jet. *Rheol Acta*, 1996, 35(6): 567~583
- 61 Alleborn N, Raszillier H, Durst F. Linear stability of non-Newtonian annular liquid sheets. *Acta Mechanica*, 1999, 137: 33~42
- 62 Mehring C, Sirignano WA. Nonlinear capillary waves on swirling, axisymmetric liquid films. *AIAA paper*, 2000-0432
- 63 岳明, 杨茂林. 锥形液膜空间稳定性分析. *航空动力学报*, 18(6)
- 64 王中伟. 锥形液膜的 Kelvin-Helmholtz 扰动波. *国防科技大学学报*, 2008, 30(3)
- 65 Fu QF, Yang LJ. Linear Stability Analysis of a Conical Liquid Sheet. *J. of Propulsion and Power*, 2010, 26(5): 955~968
- 66 Yuen MC. Non-Linear Capillary Instability of a Liquid Jet. *J. Fluid Mech.*, 1968, 33: 151~163
- 67 Nayfeh AH. Nonlinear Stability of a Liquid Jet. *Phys. Fluids*, 1970, 13: 841
- 68 Rutland DF, Jameson GJ. A non-linear Effect in the Capillary Instability of Liquid Jets. *J. Fluid Mech.*, 1971, 46: 267~275
- 69 Lafrance P. Nonlinear Break up of a Laminar Liquid Jet. *Physics of Fluids*, 1975, 18: 428~432
- 70 Mansour NN, Lundgren TS. Satellite Formation in Capillary Jet Breakup. *Phys. Fluids*, 1990, A2: 1141
- 71 Spangler CA, Hilbing JH, Heister SD. Nonlinear Modeling of Jet Atomization in the Wind-induced Regime. *Phys. Fluids*, 1995, 7: 964~971
- 72 Clarck CJ, Dombrowski N. Aerodynamic instability and disintegration of inviscid liquid sheets. *Proc. R. Soc. Lond. A* 1972, 329: 467~478
- 73 Jazayeri SA, Li X. Nonlinear instability of plane liquid sheets. *J. Fluid Mech.*, 2000, 406: 281~308
- 74 Panchagnula MV, Sojka PE, Bajaj AK. The non-linear breakup of annular liquid sheets. *Proc. 11th Ann. Conf. Liquid Atom. Spray Systems*, 1998, 170~174
- 75 Mehring C, Sirignano WA. Axisymmetric Capillary Waves on Thin Annular Liquid Sheets Part I: Temporal Stability. *Physics of Fluids*, 1999, 12: 1417~1439
- 76 Mehring C, Sirignano WA. Axisymmetric Capillary Waves on Thin Annular Liquid Sheets Part II: Spatial Stability. *Physics of Fluids*, 1999, 12: 1440~1460
- 77 Mehring C, Sirignano WA. Non-linear Capillary Waves on Swirling, Axisymmetric Free Liquid Films. *Int. J. Multiphase Flow*, 2001, 27: 1707~1734
- 78 Ibrahim AA, Jog MA. Nonlinear instability of an annular liquid sheet exposed to gas flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 2008, 34: 647~664
- 79 Yang LJ, Wang C, Fu QF, Tong MX. Nonlinear instability of planar viscous liquid sheets. *J. Fluid Mech.*, Submitted
- 80 В.Г.Базаров, Динамика жидкост-ных форсунок. *Машиностроение, Москва, Россия*, 1979. г
- 81 Fu QF, Yang LJ, Wang XD. Theoretical and Experimental Study of the Dynamics of a Liquid Swirl Injector. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26 (1): 94~101

82 Fu QF, Yang LJ, Qu YY, Gu B, Geometrical Effects on the Fluid Dynamics of an Open-End Swirl Injector. Journal of Propulsion and Power, 2011, 27 (5): 929~936

83 杨立军, 富庆飞, 王永涛, 张向阳, 多排切向通道敞口型离心喷嘴的动态特性研究, 宇航学报, 2006, 27(5)

84 Fu QF, Yang LJ, Theoretical Investigation of the Dynamics of a Gas-Liquid Coaxial Swirl Injector. Journal of Propulsion and Power, 2011, 27 (1): 144~150

85 Fu QF, Yang LJ, Tong MX, Wang C, Spatial-Temporal Stability Analysis of a Confined Swirling Annular Liquid Sheet. International Journal of Heat and Fluid Flow, Submitted

86 Fu QF, Yang LJ, Linear Stability of a Confined Gas-Liquid Interfacial Layer in a Recessed Shear Coaxial Injector. Journal of Propulsion and Power, Accepted

THE MECHANICS PROBLEMS IN PROPELLANTS ATOMIZATION FOR LIQUID ROCKET ENGINES

Yang Lijun¹, Fu Qingfei¹, Tong Mingxi¹, Du Minglong¹, Wang Chen¹, Zhang Wei¹

(¹ School of Astronautic, Beihang University, Beijing, 100191, China)

Abstract The theoretical study of atomization, breakup and stability analysis of liquid jets was reviewed comprehensively. Based on the requirement of spray and combustion technology in liquid rocket engine (LRE) to fundamental study, some fluid mechanics problems encountered in atomization process of LRE propellant were summarized. The theoretical and experimental studies conducted by authors on the fluid mechanics problems such as breakup of Newtonian fluid free jet with special boundary conditions, breakup of non-Newtonian fluid jet and the propagation of disturbances in fluids within particular passages like injectors, were introduced. It provides the new visions for the study of liquid atomization mechanism to meet the engineering requirements.

Key words Newtonian fluid, non-Newtonian fluid, jet, breakup, injector, dynamics