

液液同轴离心式喷嘴喷雾过程研究进展

盛立勇^{1,2}, 李清廉^{1,2}, 白晓^{1,2}, 康忠涛³, 成鹏^{1,2}

- (1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073;
2. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 中国空气动力研究与发展中心 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要:内部流动主要研究了流量系数、液膜厚度和气核半径, 分析了内部流场, 少量研究涉及内外喷嘴液膜互击、液膜表面波振幅和频率等方面。液液喷嘴外部液膜流动及喷雾特性的研究开展较多, 观测了不同工况、结构参数下内外液膜流动形态, 少数学者使用理论方法分析了液膜破碎机理。对喷雾特性的研究主要是获得了喷雾锥角、破碎长度、液膜振荡频率等的变化规律, 并进一步研究了 SMD、液滴速度、混合特性等的变化规律。

关键词:液液同轴离心式喷嘴; 内部流动; 喷雾特性; 雾化

中图分类号: V434.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2020)03-0001-10

Review on spray process of liquid-liquid coaxial swirl injector

SHENG Liyong^{1,2}, LI Qinglian^{1,2}, BAI Xiao^{1,2}, KANG Zhongtao³, CHENG Peng^{1,2}

- (1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense
Technology, Changsha 410073, China;
2. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Science and Technology on Scramjet Laboratory, CARDC, Mianyang 621000, China)

Abstract: The internal flow mainly studied the flow coefficient, liquid film thickness and gas core radius, and analyzed the internal flow field. A small amount of research has involved the impingement of internal and external nozzles, the amplitude and frequency of the liquid film surface wave. There have been many researches on the external liquid film flow and spray characteristics of liquid-liquid injector. The flow patterns of the internal and external liquid films under different working conditions and structural parameters were observed. A few scholars used theoretical methods to analyze the mechanism of liquid film breaking. The research on the spray characteristics is mainly to obtain the variation of spray cone angle, breaking length, liquid film oscillation frequency, etc., and further study the variation of SMD, droplet velocity and mixing characteristics and so on.

Keywords: liquid-liquid coaxial swirl injector; internal flow; spray characteristic; atomization

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(11472303)

作者简介: 盛立勇(1994—), 男, 硕士, 研究领域为火箭及其组合推进技术

通信作者: 李清廉(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为液体火箭发动机技术

0 引言

液体火箭发动机一直是人类进入太空,开展航天事业的主要动力。发动机工作时,喷嘴起着重要作用。推进剂经过喷嘴雾化成细小液滴以快速蒸发、混合和燃烧^[1]。

在某些型号的燃气发生器中,煤油和液氧均以液态形式喷入燃烧室,常采用液液同轴离心式喷嘴^[2],如我国多个型号的双组元液体火箭发动机以及俄罗斯的 RD-120、RD-180 等。燃料和氧化剂均由切向孔进入喷嘴,两股推进剂在喷嘴内部形成两股旋转锥形液膜并从喷嘴出口喷出后,内外旋转液膜相互作用,从而加剧液膜破碎雾化成细小液滴。液液同轴离心式喷嘴结构上比较简单,但在火箭发动机上的工作过程非常复杂,其雾化过程受到结构参数、工况参数等多种因素影响,因此还有很多问题有待解决。

目前国内外众多学者对液液同轴离心式喷嘴开展了很多研究,但还没有进行深入总结,本文从液膜的流动特性、破碎雾化过程、喷雾特性角度综述了国内外关于液液同轴离心式喷嘴的研究进展,以加深对其工作过程的认识。

1 液液同轴离心式喷嘴液膜流动特性

1.1 内部流动

液液同轴离心式喷嘴可以看做是两个离心式喷嘴组合而成,如图 1 所示^[3]。离心式喷嘴内流动的相关研究工作一般都是针对单个离心式喷嘴进行的,因此对于单离心式喷嘴,其内部流动特性研究非常深入,发表的相关文献很多^[4-12],有学者对其进行了深入细致的总结^[1, 13],本文不再赘述。对于拥有环形流道的外路离心式喷嘴的内部流动,学界关注较少,受喷嘴空间和试验观测手段限制,内部流动特性的研究以仿真居多。Vasque^[14]基于 Open-FOAM 和层流 VOF 模型分别开展了收口型的内喷嘴以及外喷嘴三维仿真,给定恒定的入口和出口压力,将仿真与实验结果进行对比,发现数值仿真能很好地预测内、外喷雾锥角,然而得到的流量系数与实验值存在一定误差。Ronceros Rivas^[7]等人则用 VOF 方法和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对收口型内喷嘴和敞口型外喷嘴组成的液液喷嘴开展不同工况的

数值仿真,结果表明仿真流场和试验吻合较好,而敞口型喷嘴和收口型喷嘴因为旋流室结构差异,导致内流场压力、速度上存在较大差异。汪凤山^[15]使用大涡模拟 (LES) 研究液液喷嘴流量系数、喷雾锥角以及外部液膜的雾化过程,给定入口和出口压力边界条件,发现旋转方向相同的内外两路同时喷射时,两路相互影响,雾化锥角较两路均有所增加,随着喷嘴等直段长度的增加,内、外喷嘴的液膜速度和流量系数均逐渐减小,喷嘴流量系数、喷雾锥角和出口液膜速度随着喷注压降的增加而增加。宋大亮^[16]采用 VOF 方法,将内喷嘴替换为堵头,改变堵头长度及直径。研究内喷嘴对收口型外喷嘴流动特性的影响,仿真得到的锥角和压降与试验吻合较好,显示了仿真的准确性,通过仿真得出内喷嘴对于外喷嘴流场有干扰,内喷嘴直径过大情况下,外喷嘴液膜流动并不会出现气核,应控制内喷嘴直径不大于外喷嘴出口气涡直径,这样设计出的喷嘴更优。吴宝元^[17]则研究了喷嘴几何特性和结构参数对敞口型喷嘴流量系数的影响,并对基于动量原理的流量系数进行了修正,提高了其精度。

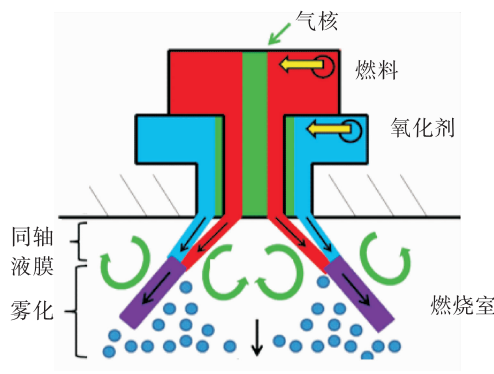


图 1 液液同轴离心式喷嘴示意图

Fig. 1 Diagram of liquid-liquid coaxial swirl injector

对于液液同轴离心式喷嘴,根据喷嘴缩进长度的不同,整个喷嘴内外流动可以分为外混流动、临界流动和内混流动 3 种,如图 2 所示^[18]。喷嘴内部流动主要研究临界流动和内混流动两种状态下液膜在喷嘴内部的流动特性。内喷嘴缩进的液液同轴离心式喷嘴内部流动特性主要包括内喷嘴液膜撞击外喷嘴液膜、喷嘴内部液膜表面波的发展、液膜厚度的变化以及燃料与氧化剂的混合特性等。也有部分学者研究了内外喷嘴液膜互击、液膜厚度、

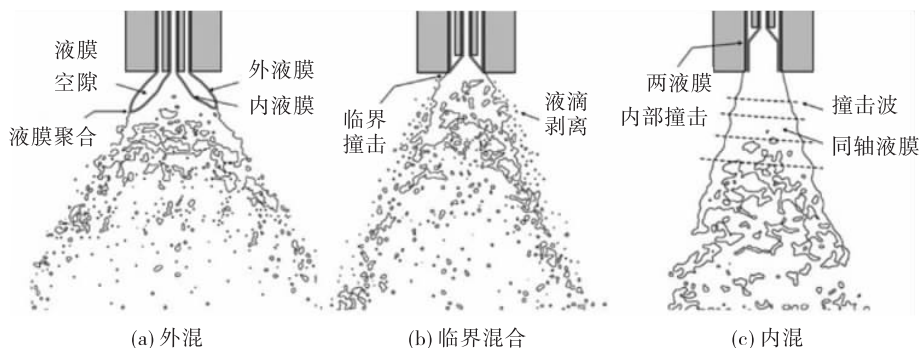


图2 不同缩进长度下液液同轴离心式喷嘴液膜流动状态

Fig. 2 Liquid film flow state of a liquid-liquid coaxial swirl injector under different indentation lengths

液膜表面波波长和频率等方面。随着喷嘴缩进长度的增加,内喷嘴产生的液膜会撞击外喷嘴液膜。Kim^[18]指出喷嘴缩进主要影响喷嘴内部液膜撞击点位置,有缩进时液膜在喷嘴内部混合,当内喷嘴液膜撞击外喷嘴壁面时会产生一种“撞击波”,由于黏性的存在,波的振幅随着缩进长度的增加呈指数递减,缩进越大,喷嘴出口这种波的振幅就越小。关于缩进室内部流场,受试验测量手段限制,目前试验研究较少,而仿真研究更多关注内外喷嘴单独喷注时的流场状况。Kim^[19]使用电导率法测量了8个不同缩进长度的组合喷雾出口液膜厚度,其中内喷嘴为收口型,外喷嘴为敞口型,他指出缩进会增加喷嘴的内混程度,缩进室内部液膜厚度存在低频振荡,这种低频振荡与质量流量的时空振荡以及缩进室内的混合过程有关,燃气发生器和燃烧室内的低频振荡和液膜之间的相互作用以及推进剂供应系统的振荡有关。反向旋转的液膜与同向旋转的液膜相比,内部混合增强(缩进增加)都使得液膜表面波频率增加,但是液膜表面波振幅却表现出相反的趋势。

1.2 外部流动

液液同轴离心式喷嘴的外部流动主要包括内外液膜的相互作用(聚合与分离)、液膜的形态与破碎机理等。

理论分析是研究液膜破碎机理的重要手段,但由于其复杂性,当前的研究较少。丁佳伟^[20]在其博士论文中基于线性稳定性理论建立了描述液液同轴圆环旋转射流表面波稳定性的色散方程,实现了时间模式下该色散方程的数值求解,结果表明近反

对称波形的扰动对液膜破碎过程起到支配作用,此外,作者还研究了流速比、气液密度比、表面张力以及液膜曲率等对射流稳定性的影响规律,为三维扰动下的液液同轴圆环旋转射流表面波稳定性研究奠定了基础。

不少学者研究了不同条件下的同轴射流喷雾形态,其中 Sivakumar 做了开创性的工作。研究者们使用高速相机拍摄得到瞬态喷雾图像,典型的内外喷嘴液膜聚合和分离的喷雾如图3所示。Ramamurthi^[21]采用试验研究了不同压降下的喷雾形态和破碎特性,发现郁金香形的喷雾形态对环境和喷注工况微小改变非常敏感,当喷嘴出口的离心力超过表面张力两个数量级,喷雾从郁金香形转变为分散的锥形。Sivakumar^[22]根据内外喷嘴液膜韦伯数的不同,将两液膜的流动状态分为聚合状态(状态I)、分离状态(状态II)、滞后状态(状态III)以及自激振荡状态(状态IV),如图4所示,对于状态IV, Sivakumar 指出该状态存在于外喷嘴韦伯数小于50的工况条件下,且振荡频率随内喷嘴韦伯数的增加而增大。

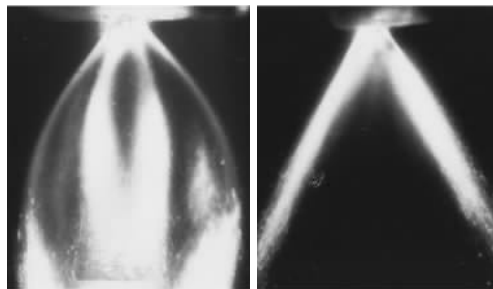
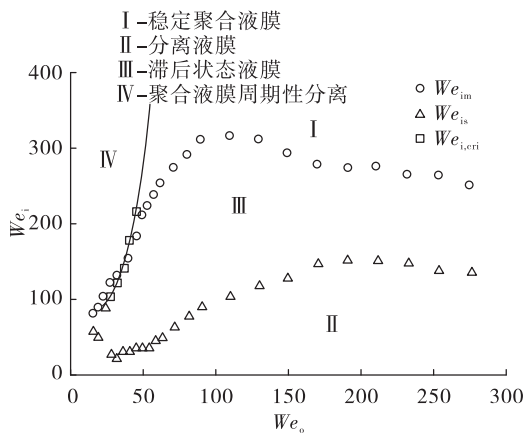


图3 聚合液膜的形成和分离

Fig. 3 Formation and separation of merged liquid film



注: We_{im} - 外喷嘴韦伯数恒定时, 内外液膜发生稳定聚合的内喷嘴临界流动韦伯数; We_{is} - 外喷嘴韦伯数恒定时, 内外液膜发生稳定分离的内喷嘴临界流动韦伯数; $We_{i,cri}$ - 外喷嘴韦伯数恒定时, 内外液膜从稳定聚合到周期性聚合分离的内喷嘴临界流动韦伯数。

图 4 不同外喷嘴 We_o 和内喷嘴 We_i 典型液液同轴离心式喷嘴流动模式

Fig. 4 Flow regimes of liquid-liquid coaxial swirling injector under different outer injector We_o and inner injector We_i

Kim^[18]通过改变缩进长度从而导致 3 种不同的液膜混合方式: 外混、临界混合和内混, 他研究了不同缩进状态下工况参数对液膜流动形态的影响, 如图 5 所示。其中, 对于无缩进的外混流动, 可以明显看到同轴喷雾从分离到聚合的状态。而对于有缩进的内混流动, 同样的韦伯数下, 液膜始终处于聚合状态。

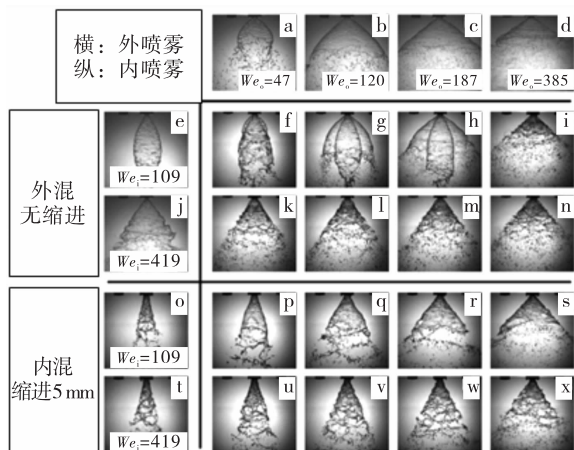


图 5 不同内、外喷嘴韦伯数下同轴喷雾形态

Fig. 5 Coaxial spray shapes under different Weber numbers of inner and outer injectors

值得注意的是, 液液喷嘴的自激振荡现象鲜有学者研究, 而一般认为自激振荡与燃烧不稳定关系密切, 因此值得深入探讨。对于内外液膜的聚合和分离过程, Sivakumar^[23-24]指出即使没有发生聚合, 内、外锥形液膜之间也存在明显的相互作用, 推测两个液膜之间的压力波动是造成这种现象的主要原因, 液膜的聚合是由于内、外液膜间负压区的存在而形成, 这一点在其他学者的仿真研究中得到证实。此外, 液膜的聚合与分离过程存在滞后性, 该滞后现象会强烈影响燃烧效率。

2 液液同轴离心式喷嘴喷雾特性

2.1 分布特性

喷雾锥角是液液同轴离心式喷嘴外部最直观的流动特性, 锥形液膜的聚合和分离对喷嘴整体的喷雾锥角具有重要影响。内外两个喷雾相互作用形成聚合喷雾, 聚合喷雾的喷雾锥角介于内喷嘴和外喷嘴的喷雾锥角之间, 锥角的大小与内外路射流的动量比有关^[25]。而国内外众多学者的仿真和理论分析表明, 理论与仿真得到的喷嘴整体的喷雾锥角, 与实验结果吻合较好^[13, 25-28], 研究表明液体物性和几何参数对于喷雾锥角有重要影响。当忽略了黏性影响, 理论喷雾锥角值与试验值往往有较大误差。

同离心式喷嘴一样, 液液同轴离心式喷嘴的喷雾锥角受工况和结构参数的影响显著。工况参数方面, Rashid^[29]发现喷注压降相同时, 外喷嘴喷雾锥角比内喷嘴的喷雾锥角更大。徐顺^[30]、王尧^[31-32]发现内外喷嘴单独工作时, 喷雾锥角随喷注压降增加而增加; 内外喷嘴同时工作时, 喷雾锥角随内喷嘴喷注压降的增加而减小, 随外喷嘴喷注压降的增加而增加, 如图 6 所示。Eberhart^[33]用冷流实验研究了不同反压对喷雾锥角的影响, 结果表明, 喷雾锥角随室压增加而减小, 当燃烧室压力增大时, 测量得到的喷雾锥角明显偏离理论值。结构参数方面, Kim^[18]分析了喷嘴缩进对喷雾锥角的影响, 发现随着缩进长度的增大, 喷雾锥角减小 (图 7)。Alves^[34]研究了切向孔数量对液液喷嘴的雾化和混合特性的影响。发现切向孔增多, 喷雾分布更加均匀, 而混合效率和喷雾锥角基本不变。

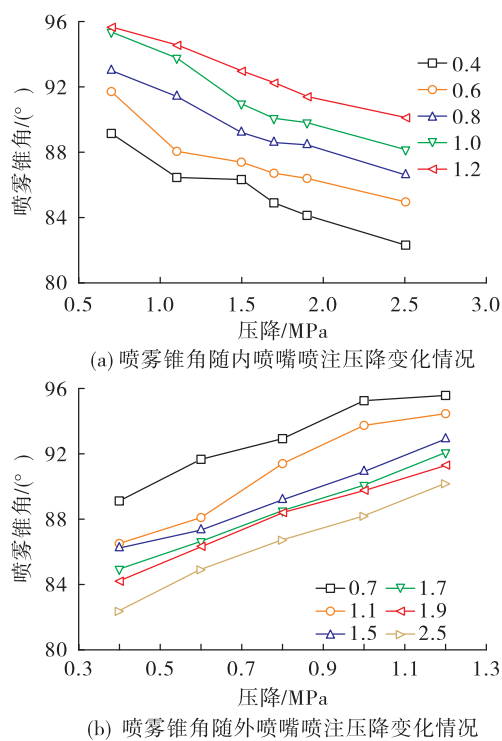


图6 试验中喷雾锥角变化

Fig. 6 Variation of spray cone angle in experiment

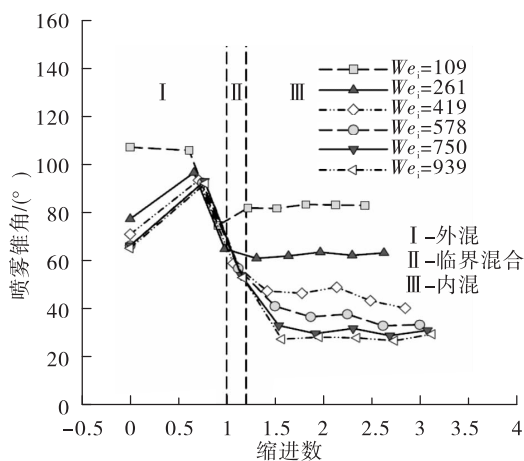


图7 喷雾锥角随缩进数变化

Fig. 7 Variation of spray cone angle with the recess number

液膜破碎是液液同轴离心式喷嘴外部流动特性的重要方面,而破碎长度是液膜破碎最重要的特征参数。在工况参数的影响方面,Rashid^[29]研究了喷注压降对液液同轴离心式喷嘴破碎长度的影响,指出随着喷注压力的增加,液膜破碎长度变小。Eberhart^[33]用冷流实验研究反压影响,结果表明液

膜破碎长度与室压成反比。Ahn^[35]发现对于同轴喷嘴,反压越大,破碎长度越小,喷注压降越大,破碎长度也越小。Kim^[18,36-37]指出液膜撞击点离喷嘴出口越远,破碎长度也就越大。对于内混状态下的喷嘴,因为黏性的存在,使得撞击波的能量随着缩进的增加逐渐减小,造成撞击波的振幅减小,液膜受到的扰动减小(图8)。Kim还发现随着内喷嘴韦伯数增加,无论是否存在缩进,内喷嘴破碎长度均减小,而随着外喷嘴韦伯数增加,破碎长度先迅速增加,到一个最大值后又逐渐减小。丁佳伟^[38]研究了喷嘴直径及长度等结构参数对液液同轴离心式喷嘴雾化特性的影响,发现增大外喷嘴直径,减小外喷嘴及内喷嘴长度可以减小射流破碎长度。

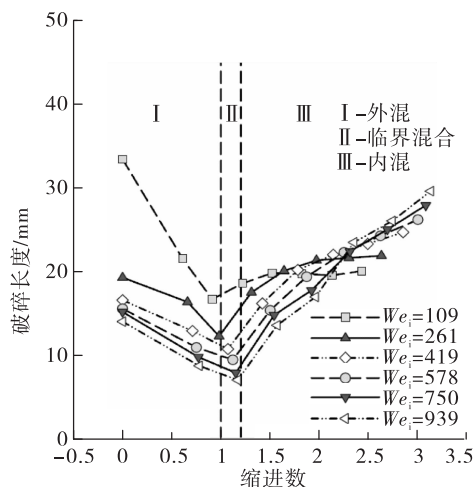


图8 破碎长度随缩进数变化

Fig. 8 Variation of breakup length with the recess number

2.2 雾化特性

雾化特征包括SMD和速度等,均是评价喷嘴性能的重要标准。

SMD(式中简记为 S)常被用来反映喷雾场的平均粒径,其定义为: $S = \sum D_i^3 N_i / (\sum D_i^2 N_i)$, 式中: D_i 为液滴直径; N_i 为直径为 D_i 的液滴数量。内外锥形液膜的聚合和分离会显著影响喷嘴的SMD。Sivakumar^[39]发现液膜聚合与分离过程将导致喷雾参数的急剧变化。聚合后的液膜将比分离状态下平均粒径大40%~50%,内部流速恒定时,组合喷雾的SMD随外部液膜喷射速度的增加先增大后逐渐降低。SMD受喷嘴结构、工况参数影响很大。

Kim^[37]使用不同流体分析喷嘴缩进对喷雾特性的影响,如图9所示。指出随着缩进长度的增大,SMD先增加后减小,不同介质得到的最大SMD差异明显。丁佳伟^[38,40]使用VOF耦合大涡模拟对液膜破碎过程进行数值仿真研究,仿真结果表明,增大外喷嘴直径,减小外喷嘴及内喷嘴长度有利于增强雾化,而减小内喷嘴直径SMD增加。同轴射流的平均直径在内喷嘴射流和外喷嘴射流之间。和单独的离心式喷嘴相比,同轴射流液滴尺寸分布更广泛。

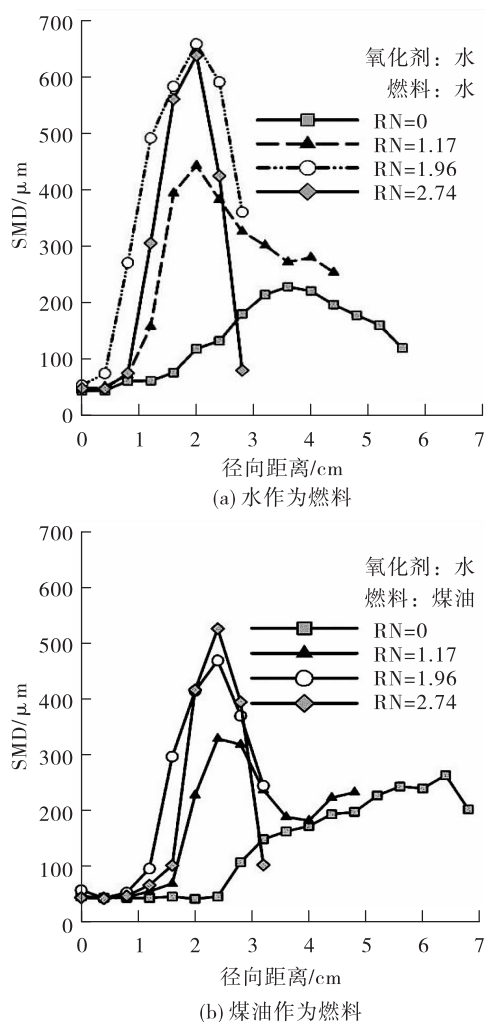


图9 液液同轴离心式喷嘴出口5 cm处液滴直径
Fig. 9 Droplet diameter at the outlet 5 cm of liquid-liquid coaxial swirl injector

由于内外锥形液膜的聚合和分离与喷嘴的喷注压降等工况参数密切相关,因此工况参数对喷嘴雾化特性的影响规律尤为重要。Soltani^[41]研究了不同质量流量下喷嘴的喷雾特性,指出内喷嘴流量

对SMD具有显著影响,随着喷雾远离喷口,最大SMD向外周移动并不断增大。丁佳伟^[42]研究了喷注压降对喷雾的影响,发现表面波频率随着喷注压降增加而增加。单独的内喷嘴表面波频率比同轴喷雾更高,说明更不稳定,因此更容易破碎,而单独的外喷嘴喷雾是最稳定的,更进一步指出SMD随着内喷嘴压降增加而减小。内喷嘴对同轴喷雾SMD的影响更大。对于内喷嘴压降较低时的同轴喷雾,液膜厚度是SMD的主导因素。郭志辉^[43]对比了脉冲和稳态喷雾,发现脉冲的存在导致雾化恶化,其喷雾中心区域直径分布不均,SMD在某个值附近脉动。脉冲时间减小,粒径的不均匀性增加(图10)。Eberhart^[33]用冷流实验研究了不同反压对喷雾特性的影响。结果表明,当燃烧室压力增大时,一次雾化区域内的液滴直径与室压成反比,如图11所示。

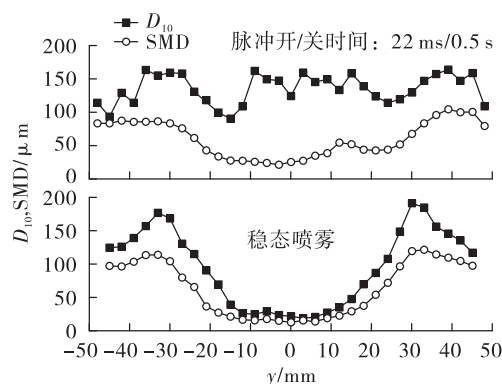


图10 $z=30$ mm处脉冲喷雾和稳态喷雾液滴平均直径对比
Fig. 10 Average diameter comparison of droplets for stable spray and pulse spray at $z=30$ mm

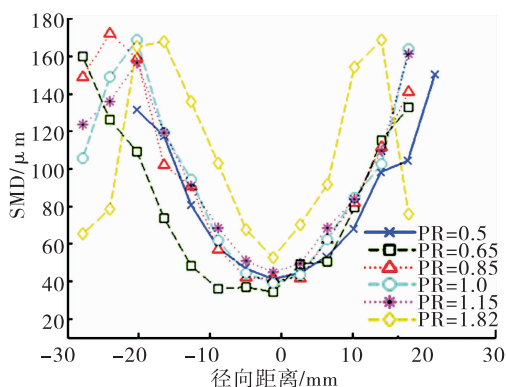


图11 一次雾化区PDPA在所有PR下测量的SMD
Fig. 11 Measured SMD of the primary atomization zone PDPA under all PR conditions

也有一些学者使用理论公式、仿真等方法对 SMD 进行研究, Han^[44] 将 Lefebvre 和 Jone 的 SMD 经验公式结合得到的 SMD 与测量值很接近。Ghorbanian^[45] 采用广义回归神经网络来预测喷嘴任何轴向或径向位置处的 SMD, 结果表明, 神经网络预测的结果与实验数据吻合较好。

速度分布也是雾化特性的重要方面, Soltani^[41] 研究了不同质量流量下喷嘴的喷雾特性, 内喷嘴流量对速度具有显著影响, 随着喷雾远离喷口, 液滴最大速度减小。脉动速度的分布特点是相同的, 但脉冲喷雾中心区域液滴脉动速度大于平均速度。Eberhart^[33] 用冷流实验研究了不同反压对喷雾特性的影响。结果表明, 当燃烧室压力增大时, 一次雾化区域内液滴的平均速度与室压成反比。Ghorbanian^[46] 采用广义回归神经网络来预测喷嘴任何轴向或径向位置处的液滴速度, 结果表明, 神经网络预测的结果与实验数据吻合较好。郭志辉^[43] 发现稳态喷雾切向速度小, 轴向为典型的双峰分布, 如图 12 所示。

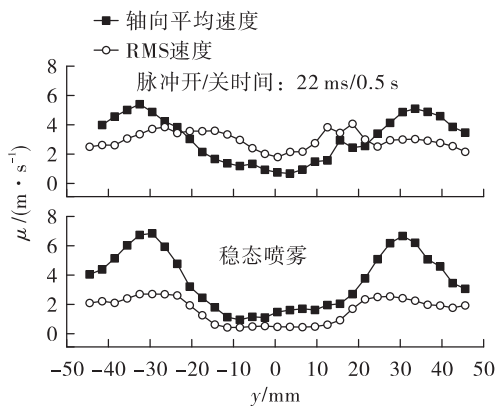


图 12 $z = 30$ mm 处脉冲喷雾和稳态喷雾液滴速度对比

Fig. 12 Velocity comparison of droplets for stable spray and pulse spray at $z = 30$ mm

2.3 混合特性

混合特性也是喷雾特性的重要方面, 对燃烧过程有重要影响。Radke^[47] 向水里添加碘化钾配成溶液, 用 CT 进行喷雾质量分布研究, 发现喷雾锥明显不均匀, 由几个质量浓度随喷注压力变化的小块组成。Kim^[48] 研究了缩进对混合和雾化的影响, 如图 13 所示, 发现在轴向位置超过 3 cm 后, 内混的混合效率比临界混合和外混的效率 10%, 而外混有

更好的雾化, 因此在混合效率和雾化性能上存在一个折中方案。他认为实际用于火箭发动机的喷嘴, 混合效率比雾化质量重要, 因为如果雾化不好, 大液滴可以在高温和高压环境下燃烧掉, 因此内混是最优的, 但也有学者认为临界混合是最优的。Han^[44] 发现质量分布和混合效率对缩进比 SMD 更敏感, 缩进 5.25 mm 时, 有最大混合效率; 同时也指出存在一个最佳的喷嘴缩进, 它就是使混合效率最高的时候。Woodward^[49] 指出采用喷嘴缩进形成的缩进室作为混合室是解决液氧性能不好的合理方式。大缩进的喷注器由于混合良好使得喷注器性能显著提高并且没有造成结构损失和较大的压力损失。Seol^[50] 研究了缩进对雾化和混合的影响。混合效率达到最大时的缩进对 SMD 的影响不大, 然而, 质量分布和混合效率改变了很多。因此可以推论, 最佳缩进数存在, 就是当混合效率达到最大的时候。除缩进外, Alves^[34], Long^[51] 研究了切向孔个数对推进剂混合比的影响, 发现切向孔数量增加, 提高了喷雾周向质量分布均匀性, 而混合效率没有随着切向通道数量的增加呈现出显著的变化。

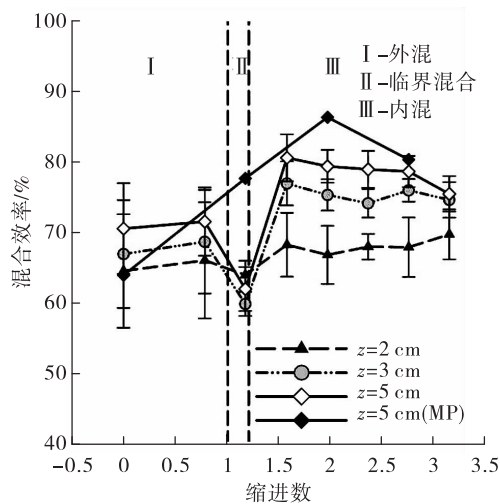


图 13 使用目前光学方法和测量装置得到的液液同轴离心式喷嘴混合效率

Fig. 13 Mixing efficiencies of liquid-liquid coaxial swirl injectors using present optical method and measuring equipment (MP)

3 结束语

本文从液液同轴离心式喷嘴内部流动过程、液

膜流动与破碎雾化过程、喷雾特性等几个方面对国内外研究现状进行了综述。受喷嘴内部狭小空间的限制,试验技术手段有限,内部流动过程的研究较少,以仿真为主,主要研究了流量系数、液膜厚度和气核半径,少量研究涉及内外喷嘴液膜互击、液膜表面波振幅和频率等方面。液膜流动与破碎雾化过程的研究主要观测了不同工况、结构参数下内外液膜聚散模态,极少数学者使用理论方法分析液膜破碎机理。对喷雾特性的研究主要是获得了特定喷嘴喷雾锥角、破碎长度、液膜振荡频率等的变化规律,以及特定喷嘴的 SMD、速度、混合特性等的变化规律。

从当前的研究来看,对于液液喷嘴的研究集中在宏观规律的获取上,对于液膜破碎机理,喷雾参数的经验关系式、预测模型等的研究相当不足。内部流动过程中,对于内外喷嘴气核的非定常运动特性、缩进室内部流场结构等还不明确,需要通过高精度仿真和透明喷嘴试验展开研究。外部流动及雾化特性的研究主要集中在对雾化性能参数的测量分析上,而对射流破碎前的喷雾模态转换、表面波发展和液膜破碎机理的理论研究较少,对液液同轴离心式喷嘴液膜模态及转换机制还不明确。另一方面,当前的研究大多关注液膜的稳态雾化过程,对液膜的非稳态雾化过程的研究不够,仅初步研究了液膜的聚合与分离现象,而对液液同轴离心式喷嘴自激振荡产生机理、关键结构和工况参数对液液同轴离心式喷嘴自激振荡的影响研究很少,还有待深入研究。

参考文献:

- [1] 康忠涛. 气液同轴离心式喷嘴非定常雾化机理和燃烧特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [2] SEO S, KIM S K, CHOI H S. Combustion dynamics and stability of a fuel-rich gas generator[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(2): 259-266.
- [3] BOSTWICK C, GIBBS T, PRABHAKAR A. LOX/methane engine utilizing liquid/liquid Co-axial swirl injector [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida. Reston, Virginia: AIAA, 2011.
- [4] 于亮, 周红梅. 离心式喷嘴内部流动的 LES/VOF 数值模拟[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(1): 154-160.
- [5] 陈慧源, 康忠涛, 成鹏, 等. 离心式喷嘴充填过程内部流动特性仿真[J]. 航空动力学报, 2018, 33(4): 944-951.
- [6] 杨刚, 范华, 李万山. 基于 Fluent 的压力旋流喷嘴内外流场数值模拟[J]. 工业炉, 2018, 40(2): 15-18.
- [7] RIVAS J R R, PIMENTA A P, SALCEDO S G, et al. Study of internal flow of a bipropellant swirl injector of a rocket engine[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(6): 289.
- [8] MALY M, JEDELSKY J, SLAMA J, et al. Internal flow and air core dynamics in simplex and spill-return pressure-swirl atomizers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 123: 805-814.
- [9] LIU Z L, HUANG Y, SUN L. Studies on air core size in a simplex pressure-swirl atomizer[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(29): 18649-18657.
- [10] CUI J W, LAI H H, LI J Y, et al. Visualization of internal flow and the effect of orifice geometry on the characteristics of spray and flow field in pressure-swirl atomizers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 127: 812-822.
- [11] 高涌东, 汪建兴, 王海民, 等. 管道中旋流喷嘴雾化流场的速度分布特性[J]. 热能动力工程, 2018, 33(3): 57-63.
- [12] 陈晨, 杨样, 高宏力, 等. 敞口式离心喷嘴液膜动态填充及打开过程研究[J]. 推进技术, 2017, 38(6): 1352-1358.
- [13] KANG Z T, WANG Z G, LI Q L, et al. Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 145: 174-198.
- [14] VASQUES B B, MENDON A M T D, DOURADO W M D C. Numerical and experimental study of swirl atomizers for liquid propellant rocket engines [C]//ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S. l.]: ASME, 2011.
- [15] 汪凤山, 毛晓芳, 虞育松, 等. 双组元离心式喷注器雾化性能的大涡模拟数值研究[J]. 空间控制技术与应用, 2012, 38(6): 13-17.
- [16] 宋大亮, 凌前程, 章荣军. 双组元离心式喷嘴外喷嘴流动数值模拟分析[J]. 火箭推进, 2018, 44(4): 10-15.
- SONG D L, LING Q C, ZHANG R J. Numerical analysis on flow characteristics of outer nozzle of bipropellant pres-

- sure-swirl injector [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(4): 10-15.
- [17] 吴宝元, 张民庆, 葛李虎. 具有二次喷注孔带缩进长度离心式喷注单元流量特性的试验研究[J]. *推进技术*, 1996, 17(5): 39-42.
- [18] KIM D, HAN P, IM J H, et al. Effect of recess on the spray characteristics of liquid-liquid swirl coaxial injectors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(6): 1194-1203.
- [19] KIM S, YOON J, YOON Y. Experimental study on the internal flow characteristics for recess length in a swirl coaxial injector [C]//46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville, TN. Reston, Virginia: AIAA, 2010.
- [20] 丁佳伟. 液/液同轴旋转射流稳定性及液膜破碎机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [21] RAMAMURTHI K, THARAKAN T J. Experimental study of liquid sheets formed in coaxial swirl injectors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(6): 1103-1109.
- [22] SIVAKUMAR D, RAGHUNANDAN B N. Formation and separation of merged liquid sheets developed from the mixing of coaxial swirling liquid sheets [J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(11): 3443-3451.
- [23] SIVAKUMAR D, RAGHUNANDAN B N. Jet interaction in liquid-liquid coaxial injectors [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1996, 118(2): 329-334.
- [24] SIVAKUMAR D, RAGHUNANDAN B N. Hysteretic interaction of conical liquid sheets from coaxial atomizers; Influence on the spray characteristics [J]. *Physics of Fluids*, 1998, 10(6): 1384-1397.
- [25] RAMEZANI A R, GHAFOURIAN A. Sprays angle variation of liquid-liquid swirl coaxial injectors [C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona. Reston, Virginia: AIAA, 2005.
- [26] MORAD M R, ESLAMI E. Numerical and experimental study on air core formation in a liquid-liquid coaxial swirl injector [Z]. 2006.
- [27] FISCHER G A A, COSTA F. Spray cone angles by a jet swirl injector for atomization of gelled ethanol [C]//17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. [S.l.]: ABCM, 2018.
- [28] INAMURA T, TAMURA H, SAKAMOTO H. Characteristics of liquid film and spray injected from swirl coaxial injector [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(4): 632-639.
- [29] RASHID M S F M, HAMID A H A, GHAFFAR Z A, et al. An experimental investigation on spray characteristics emanating from liquid-liquid coaxial swirl atomizer [C]//AIP Conference Proceedings. Melaka, Malaysia: AIP, 2012.
- [30] 徐顺, 康忠涛, 成鹏, 等. 喷注压降对液液同轴离心式喷嘴喷雾锥角的影响研究 [J]. *推进技术*, 2017, 38(7): 1556-1562.
- [31] 王尧. 液体同轴旋转射流破碎与雾化特性的实验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [32] 王尧, 李国岫, 虞育松, 等. 喷射压力对同轴旋转射流喷雾锥角影响的实验研究 [J]. *推进技术*, 2017, 38(4): 903-908.
- [33] EBERHART C, LINEBERRY D, MOSER M. Effects of variable chamber pressure on swirl coaxial injection; a cold flow study [C]//46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville, TN. Reston, Virginia: AIAA, 2010.
- [34] ALVES A, LACAVA P T, MARTINS C A. Effects of the number of tangential passages on spray characteristics of a bipropellant atomizer [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2014, 36(3): 583-590.
- [35] AHN K, HAN Y M, SEO S, et al. Effects of injector recess and chamber pressure on combustion characteristics of liquid-liquid swirl coaxial injectors [J]. *Combustion Science and Technology*, 2010, 183(3): 252-270.
- [36] KIM D J, IM J H, HAN P G, et al. Spray characteristics of a liquid-liquid swirl coaxial injector (Part I): effect of injection condition [Z]. 2006.
- [37] KIM D, JEONG W, IM J, et al. The characteristics of swirl coaxial injector under varying geometric and environmental conditions [C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida. Reston, Virginia: AIAA, 2004.
- [38] 丁佳伟, 李国岫, 虞育松. 结构参数对双组元推力器喷注器雾化性能影响规律的数值模拟研究 [J]. *载人航天*, 2015, 21(6): 635-641.
- [39] SIVAKUMAR D, RAGHUNANDAN B N. Role of geometric parameters on the drop size characteristics of liquid-liquid coaxial swirl atomizers [J]. *Atomization and Sprays*, 1998, 8(5): 547-563.
- [40] DING J W, LI G X, YU Y S. Numerical investigation on liquid sheets interaction characteristics of liquid-liquid co-

- axial swirling jets in bipropellant thruster[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016, 62: 129-137.
- [41] SOLTANI M R, GHORBANIAN K, ASHJAEI M, et al. Spray characteristics of a liquid-liquid coaxial swirl atomizer at different mass flow rates[J]. Aerospace Science and Technology, 2005, 9(7): 592-604.
- [42] DING J W, LI G X, YU Y S. The instability and droplet size distribution of liquid-liquid coaxial swirling spray: an experimental investigation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 82: 166-173.
- [43] 郭志辉, 许浩, 毛晓芳. 双组元离心式喷注器的喷雾特性初步研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(4): 51-55.
- [44] HAN P G, SEOL J H, HWANG S H, et al. The spray characteristics of swirl coaxial injectors[C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2003.
- [45] GHORBANIAN K, SOLTANI M R, ASHJAEI M, et al. Liquid-liquid coaxial swirl injector performance prediction using general regression neural network[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2008, 25(5/6): 454-464.
- [46] GHORBANIAN K, SOLTANI M, MORAD M, et al. Neural network prediction of a liquid-liquid coaxial swirl injector performance map[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2005.
- [47] RADKE C D, MEYER T R, HEINDEL T. Effect of injector exit geometry on atomization of a liquid-liquid double swirl coaxial injector using non-invasive laser, optical and X-ray techniques[C]//50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Cleveland, OH. Reston, Virginia: AIAA, 2014.
- [48] KIM D, KIM S, HAN P, et al. Effect of recess on mixing and atomization characteristics of liquid-liquid swirl coaxial injectors[J]. Atomization and Sprays, 2010, 20(1): 41-55.
- [49] WOODWARD R, MILLER K, BAZAROV V, et al. Injector research for Shuttle OMS upgrade using LOX/ethanol propellants[C]//34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland, OH, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1998.
- [50] SEOL J H, HAN P G, JEONG W H, et al. Recess effects on spray characteristics of swirl coaxial injectors[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2003, 4(1): 26-33.
- [51] LONG M, ANDERSON W, HUMBLE R. Bicentrifugal swirl injector development for hydrogen peroxide and non-toxic hypergolic miscible fuels[C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis, Indiana. Reston, Virginia: AIAA, 2002.