

气液同轴旋流式喷嘴喷雾特性实验研究

刘金田^{1, 2}, 宋姗姗^{1, 2}, 李文斐¹, 奚溪¹, 刘红^{1, 2}

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

Experimental Study on Spray Characteristics of Gas-liquid Coaxial Swirl Injector

LIU Jin-tian^{1, 2}, SONG Shan-shan^{1, 2}, LI Wen-fei¹, XI Xi¹, LIU Hong^{1, 2}

(1. School of Energy and Power, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An experimental study was carried out on a gas-liquid coaxial swirl nozzle with softened water as the working fluid. Firstly, the macroscopic atomization characteristics were analyzed, and the variation of spray flow rate and atomization cone angle with water supply pressure and air supply pressure was discussed. Then, the characteristics of secondary atomization particles are analyzed, and the distribution of particle size distribution and droplet velocity is discussed. The results show that the nozzle flow rate increases with the increase of water pressure, and the pressure change of the gas path does not significantly affect the nozzle flow rate. With the increase of gas supply pressure, the atomization cone angle begins to shrink. When the gas pressure is constant, the atomization liquid cone expands outward with the increase of water supply pressure. When the water supply pressure reaches a certain value, the atomization cone angle increases slowly with the increase of water supply pressure. After a certain distance from the nozzle outlet, the spray is broken into secondary atomized particles. The distribution of particle size in the radial direction is bimodal distribution. The droplet velocity at the axial position of 50 mm is in a three-peak distribution in the radial direction, and the droplet velocity at the axial position of 100 mm gradually increases along the radial direction.

摘要: 以软化水为工质, 对一种气液同轴旋流式喷嘴开展了实验研究, 首先分析宏观雾化特性, 探讨喷雾流量和雾化锥角随供水压力和供气压力的变化规律; 然后分析二次雾化粒子特性, 探讨粒径分布和液滴速度的分布规律。结果表明, 喷嘴流量随水压上升而上升, 而气路的压力变化不会明显影响喷嘴的流量; 随供气压力的上升, 雾化锥角开始收缩, 气体压力不变时, 随着供水压力的上升, 雾化液锥向外扩张, 当供水压力达到一定值后, 随着供水压力的上升, 雾化锥角增长缓慢。距离喷嘴出口一定距离后, 喷雾破碎成二次雾化粒子, 粒径在径向上的分布规律为双峰分布, 在轴向 50mm 位置的液滴速度在径向上呈三峰分布, 轴向 100mm 位置的液滴速度沿径向逐渐增加。

关键词: 喷雾特性; 气液同轴式喷嘴; 径向分布

Key words: Spray characteristics; Gas-liquid coaxial nozzle; Radial distribution

中图分类号: V231.1 文献标识码: A

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52206077)

作者简介: 刘金田 (1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为燃油雾化, E-mail: liujintian2023@163.com;

刘红 (联系人), E-mail: hongliu@dlut.edu.cn。

0 概述

对于液体燃料燃烧系统，燃油雾化是燃烧的先决条件，高质量的燃油雾化能够避免燃烧室局部出现贫油或者富油现象，直接改善燃烧室的点火性能，有效提高燃烧稳定性以及温度均匀性，提高燃油效率，还能够减少燃烧室内积碳的产生，缓解燃烧室烧蚀，并降低污染物的排放。不仅可以

目前已有多种类型的喷嘴结构，其雾化方式主要分为两种，一种是通过高压将燃料喷射到燃烧室内（如直喷式喷嘴、离心式喷嘴等），另一种是通过高速气流的气动力作为雾化的主要动力（如气液同轴旋流式喷嘴），其主要特点是工作油压低，雾化质量高。

Anand 等人^[1]研究了气体中心式喷嘴不同漩涡数，不同凹槽比的喷嘴雾化特性，结果表明 Sauter 平均直径几乎与凹槽比无关，锥角与凹槽比成反比，对于高漩涡数的喷嘴，雾化会更为精细，但压降也会随之增加。Im 等人^[2]利用图像处理方法获得了气体中心式与液体中心式两种喷嘴的 Sauter 平均直径数据。结果表明，以液体为中心的漩涡同轴喷射器的 Sauter 平均直径分布呈实心锥形，而以气体为中心的漩涡同轴喷射器则表现出两种截然不同的 Sauter 平均直径分布状态。气体中心漩涡同轴喷射器沿中心线呈实心锥形，而在外围呈空心锥形。Siddharth 等人^[3]针对气体中心式旋流喷嘴研究了液相雷诺数与气相雷诺数以及漩涡数对液膜厚度以及完整液膜层长度的影响，结果表明随液相雷诺数的减小或者气相雷诺数的增加，其平均液膜厚度和完整长度都会减小。Liu 等人^[4]使用 VOF 方法对气体中心式旋流喷嘴进行了数值模拟，在有漩涡以及没有漩涡的液流情况下，获得了液膜、雾化和气液两相流场，结果表明随着轴向气液动量比的增加，喷雾液滴尺寸和液膜长度都会减小，并且有漩涡时可以实现更高的气液轴向动量比。

尽管这种空气中心式雾化方式已被证明是高效可靠的^[5]，但对于气液同轴旋流式喷嘴在不同工况下，雾化液滴在空间上的分布规律具体是如何分布的仍没有具体的研究，为了在宽广的燃油流量范围内，喷嘴的雾化性能都能满足清洁燃烧的要求，需要加深对于多工况下的气液同轴旋流式喷嘴雾化性能的变化规律，探明喷嘴在空间上的雾化特性，分析气液两相间的相互作用机理，从而对于设计与优化此类型喷嘴提供一定的参考意义。

1 研究对象与实验系统

1.1 研究对象

研究了一种空气辅助雾化喷嘴，如图 1 所示，主要由中心轴高压空气流道，环形燃油流道（蓝色）组成，气体与环形液膜为相同旋流方向。

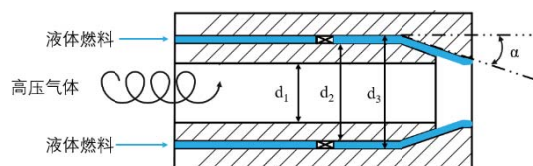


图 1 气液同轴旋流式喷嘴结构

液体通过环形流道与旋流结构在出口预膜段形成环形液膜，在离心力的作用下以锥形液膜离开喷嘴，中心气体通过切向孔接入，在压力作用下形成高速旋转气流并在出口预膜段直接作用于液膜，通过剪切力带动环形液膜加速变薄^[6]，从而获得更好的雾化效果。气液同轴旋流式喷嘴的结构参数如表 1 所示。

表 1 气液同轴旋流式喷嘴结构参数

空气流道直径 d_1/mm	5.5
燃油流道内径 d_2/mm	7.3
燃油流道外径 d_3/mm	8.2
$\alpha/(\circ)$	36.3
旋流器槽道数/个	8
旋流器旋流角/ $(\circ)$	60

1.2 实验系统

实验中以水为喷雾介质，图 2 展示了实验所使用的装置，主要包括喷雾系统和数据采集系统。喷雾系统包括供液系统、供气系统、喷嘴和喷雾腔，供液系统和供气系统均由各自的压力调节阀进行压力调节，可以实现液体和气体的平稳流量供应，采用高压氮气对液体贮箱增压，喷射压力范围为 0.1-4.0MPa，供气系统供应压力范围为 0.1-0.6MPa。

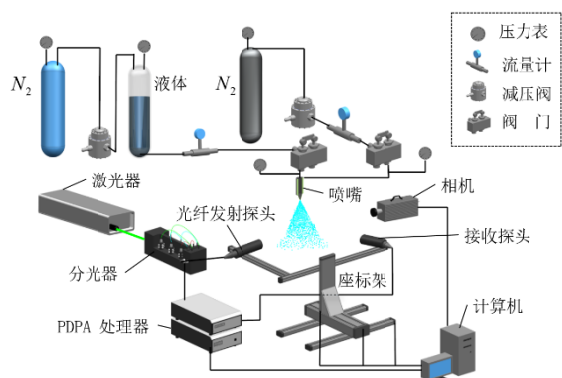


图2 实验装置示意图

数据采集系统包括单反相机、相位多普勒粒子分析仪 (PDPA) 以及计算机数据采集系统, 喷射压力稳定时, 应用 PDPA 开始采集喷雾液滴的粒径与轴向速度的信息, 通过流量计 (1.5 级精度) 记录水路流量变化, 应用单反相机拍摄同时刻的喷雾图像, 通过多次实验验证实验的可重复性, 从而获得气液同轴旋流式喷嘴的喷雾特性。

实验对 0.5、1.0 以及 1.5MPa 供液压力, 0.2MPa 供气压力下的液滴粒径、速度进行了测量, 图 3 显示了 PDPA 实验的测量点位, 采集 10s 的液滴数据得到统计平均的雾化特性参数。

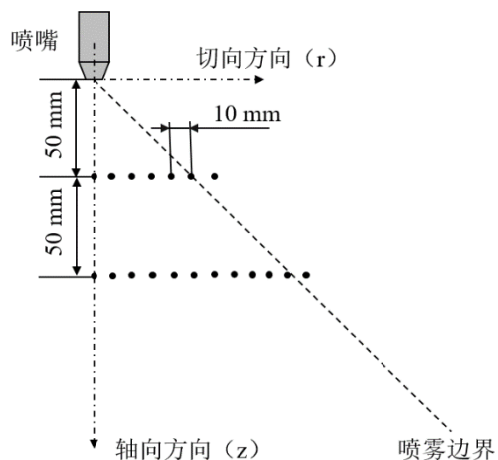


图3 PDPA 实验的测量位置

此外, 还测量了在不同供气供液压力下喷嘴的流量与锥角的变化规律, 采用 Canon EOS 5D Mark IV 单反相机拍摄喷雾图像, 并使用 Matlab 将喷雾场图片进行二值化处理并检测边界, 从而获取喷雾图像的雾化锥角。

2 喷雾宏观特性分析

将实验喷嘴固定于实验台上, 在不同的水路供给压力和气路供给压力下开展喷雾特性实验。水路供给压力从 0.1 MPa 至 3.0 MPa, 气路供给压力从 0.1 MPa 至 0.3 MPa。测量喷嘴的流量特性曲线以及不同工况下的雾化锥角变化规律, 每个实验工况重复三次, 流量及锥角数据取三次测量的平均值。

2.1 喷嘴流量特性讨论

图 4 为喷嘴流量与喷射压力关系的曲线, 由图可知, 水路流量随水路的供给压力的升高而快速上升, 供水压力从 0.1MPa 上升至 0.5MPa 时, 水路流量由 0.1132m³/h 上升至 0.2510m³/h; 但是当供水压力从 2.5MPa 上升到 3.0MPa 时, 水路流量增加趋势明显变得更为缓慢, 流量增量明显低于供水压力由 0.1MPa 增加到 0.5MPa 时的流量增量, 符合流量压力的 $Q \sim \sqrt{P}$ 的变化规律。图中还可知, 气路的供给压力变化对于水路的流量变化规律的影响可忽略不计。

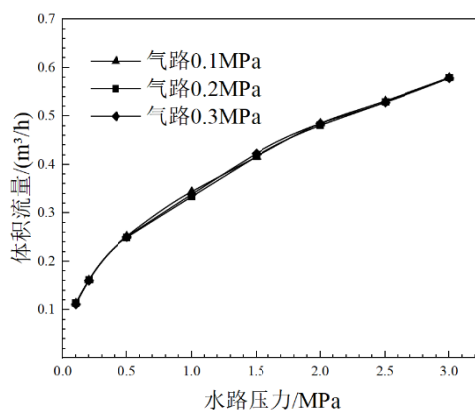


图4 喷嘴水路流量特性曲线

2.2 喷雾宏观特性分析

在压力与流量均稳定在一个值附近后, 对喷雾发展形态进行拍摄。图 5 为部分工况下准稳态喷雾形态, 当水压为 0.1 MPa, 气压为 0.1 MPa 时, 喷嘴出口的水以液膜形式存在, 表面波波动对液膜的破碎起主导作用, 气体起辅助作用, 随气压的上升, 气旋对液膜的影响进一步增加, 出口的液膜在高速

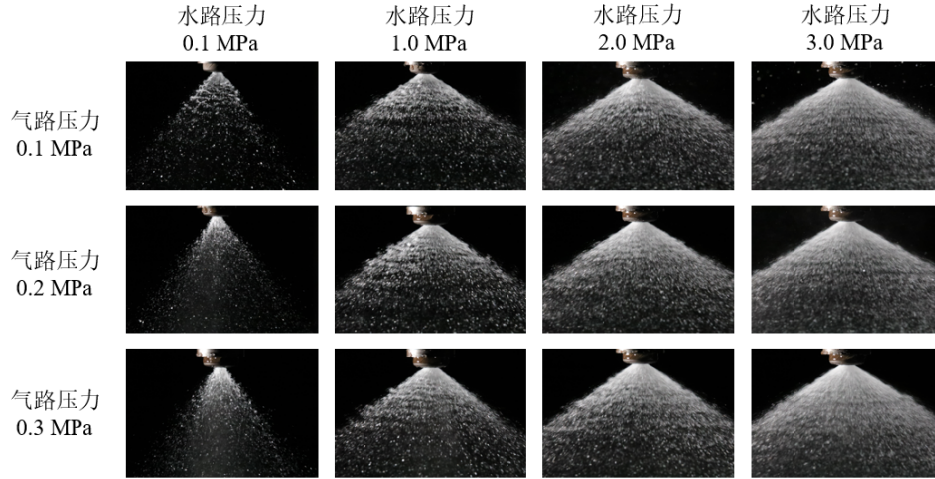


图5 工作压力对雾化锥角影响

旋流气体的气动力作用之下加速破碎，液膜的不稳定增加，此时的破碎主要表现为气动雾化，出口液膜开始变粗糙，并且喷雾场的分布更加弥散，细小的雾化液滴开始充斥在喷雾锥中心，这一现象在水压 0.1 MPa，气压 0.3 MPa 这一工况下最为明显，从图 5 中可清晰的观察到这一现象。并且随着气压的上升，雾化锥角会随之减小。水压的上升同样会加速出口液膜的破碎，在水压高于 1.0 MPa 以后，喷嘴出口液膜湍动强度增加，从而促进了 R-T 波造成的液膜破碎^[7]，从而使液膜在十分接近出口的位置就开始撕裂为液带或液丝。

每次拍摄三张喷雾图像，在对喷雾图像进行后处理后取得雾化锥角平均值作为该工况下的雾化锥角，雾化锥角根据为 Rizk 和 Lefebvre 提出的定义确定，喷嘴中心线与液膜边界的夹角为半锥角。图 6 给出喷雾全锥角（2 倍的半锥角）与供水压力和供气压力的关系，如图 6 所示，当供水压力在 0-1.0MPa 范围内时，雾化全锥角随着供水压力的增加快速上升，当供气压力为 0.1MPa，供水压力由 0.1MPa 升高到 1.0MPa 时，雾化锥角由 77.95° 增加到了 115.03°，共增加了 37.08°，在这个范围内，可认为供水压力对雾化锥角的影响占主导作用；当供水压力大于 1MPa 之后，随着供水压力的增加，雾化锥角的增加趋势变缓，；水路压力由 1.0MPa 上升到 3.0MPa 时，雾化锥角由 115.03° 增加至 120.78°，仅增加 5.75°，此时供水压力对雾化锥角的影响明

显减弱，这与 Kang 等人^[8]对于雾化锥角的研究具有相似性。

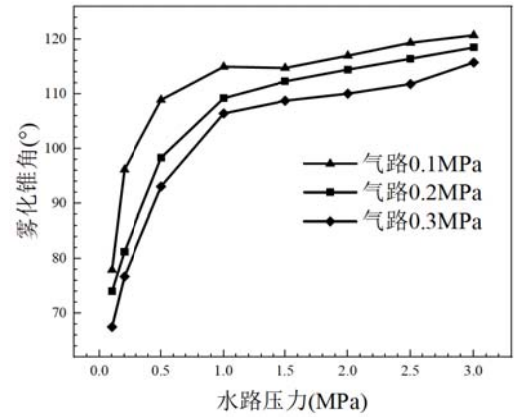


图6 雾化锥角随供给压力的变化

除此之外，由图 6 可知，气路供气压力对雾化锥角也有一定的影响，当气路压力增加时，雾化锥角将会减小，这是由于随着气路压力增加，喷嘴出口中心的空气速度也随之增加，由于出口中心气体为旋流空气，在从喷嘴中心轴线附近会形成一个低压区，喷雾外侧气压大于中心气压，使得喷雾中心与喷雾外围形成一个压差，随着气路压力的上升，喷嘴中心压力将进一步减小，内外压差增加，将喷雾向中心挤压，从而使得雾化锥角减小。

3 喷雾微观特性分析

将气压固定为 0.2MPa，分别在 1.0MPa 与 1.5MPa 水压下测量了轴向距喷嘴出口 50mm 和

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52206077)

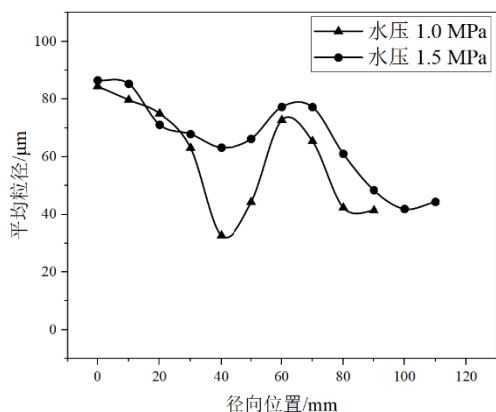
作者简介: 刘金田 (1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为燃油雾化, E-mail:liujintian2023@163.com;

刘红 (联系人), E-mail:hongliu@dlut.edu.cn。

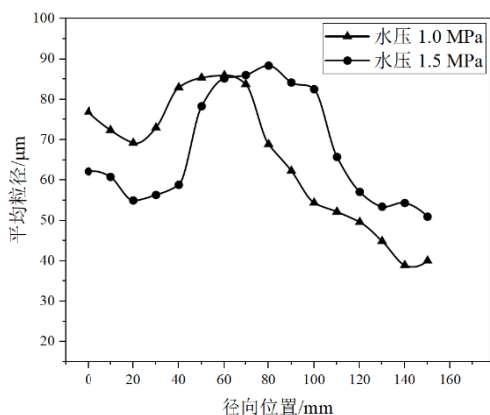
100mm 两个位置的液滴直径和液滴速度的径向分布特性, 分析二次雾化液滴粒径和速度径向分布规律与影响因素。

3. 1 喷雾粒径径向分布规律

当气压固定为 0.2 MPa 时, 不同的水压对于喷雾的粒径径向分布规律如图 7 所示, 此时粒径在径向上的分布呈现两个峰值, 从沿喷嘴中心轴线开始, 向径向方向上, 粒径随着径向尺寸的增大先减小后增大, 达到最大值后将持续下降, 此



(a) Z 轴方向 50 mm 位置



(b) Z 轴方向 100 mm 位置

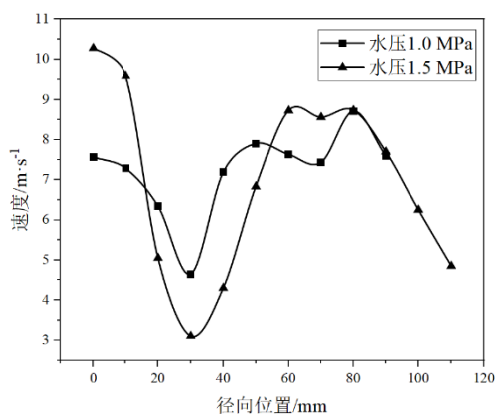
图 7 平均粒径沿径向的分布规律

时可认为喷雾的雾化分为气相主导区与液膜波动主导区两个区域, 在液膜与中心气流接触的一侧, 在高速气流的带动下, 部分液膜被快速剥离, 并在气动力的作用下快速雾化成为细小的液滴, 但在气流的夹带作用下, 小液滴被带到内部的高速气流中, 并发生聚合, 从而导致液锥中心轴线的粒径偏高, 随州径向距离的增加, 液滴聚合的作用减弱, 气动力增强, 粒径减小; 随着径向距离的进一步增加, 未被剥离的这一部分液膜在离开喷嘴出口后受到气流的影响将被削弱, 对这部分液膜的雾化来说气动力作用已不再占主导作用, 液膜的破碎主要以液膜

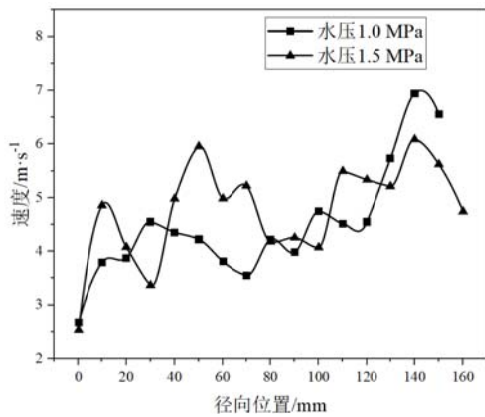
表面波动破碎为主, 气相主要起辅助作用, 因此这个区域的粒径分布与压力旋流喷嘴的粒径分布相似, 在径向上粒径分布呈现为单峰形式。由图 7-b 可看出, 在气相主导区, 随着水压的上升, 雾化锥角的增加导致了液膜波动主导区的粒径峰值点在径向外移动, 这就使得雾化液锥中心区域变大, 因此在中心气动力作用下雾化的小液滴的聚合减弱, 因此 1.5 MPa 水压下的中心区域的液滴直径明显低于 1.0 MPa 水压下的液滴直径。但在液膜波动主导区, 水压的增加反而会导致粒径的增加, 这是由于水压增加使得喷雾流量增大, 初始液膜变厚, 表面波动破碎后产生的二次雾化液滴直径变大。

3. 2 喷雾速度分布规律

液滴的轴向速度在径向上的分布如图 8 所示, 在轴向 50mm 位置时, 液锥中心的液滴在高速气流的夹带作用下具有较高的轴向速度, 当水压增加时, 出口液膜的初始速度上升, 液膜破碎的初始动能增加, 因此液滴能够获得更高的速度; 随着径向位置的增加, 液滴速度开始减小, 这是因为此处的液滴受到气流的影响开始减弱, 并由于喷雾锥角增加, 中心的液滴集聚现象的减弱, 使得 1.5MPa 水压条件下, 液滴速度的最小值低于 1.0MPa 水压时的液滴速度最小值。在径向位置 70mm 左右, 液滴的速度会出现一个凹陷位置, 这是由于凹陷位置的两侧峰值位置的正好处于气液交界面位置, 液滴受到两侧气流的夹带, 因而速度较高, 而凹陷位置气流对液滴的夹带作用小, 所以液滴的速度将有所下降。在轴向 100 mm 位置时, 经过雾化液锥经过充分的发展, 中心旋流气体在轴向上的速度逐渐消散, 由于内部气流的复杂流动, 在径向呈现出不规则的轴向速度分布, 但液滴的速度在整体上表现为随径向位置的增加而增加。



(a) Z 轴方向 50 mm 位置



(b) Z 轴方向 100 mm 位置

图 8 液滴轴向速度沿径向的分布规律

4 结论

本文实验研究了空气辅助雾化喷嘴的宏观和微观雾化特性, 主要结论有:

1) 喷雾流量随水路的供给压力的升高而快速上升, 符合流量压力的 $Q \sim \sqrt{P}$ 的变化规律, 空气流道的压力变化不会显著影响喷雾流量。

2) 供水压力低于 1.0 MPa 时雾化锥角随着供水压力的增加快速上升, 大于 1.0 MPa 时, 雾化锥角随着压力的上升增加缓慢; 随着气路压力的增大, 锥形喷雾中心形成的低压区与喷雾外侧的压差逐渐增加, 将喷雾向内挤压, 导致雾化锥角减小。

3) 空气雾化喷嘴的雾化可分为气相主导区与液膜波动区, 喷雾液锥中心为气相主导区, 高速气流将内部液膜剥离, 并在气动力的作用下快速破碎为较小的液滴, 但在喷雾中心位置, 在气流的夹带作用下, 小液滴发生集聚效应, 使喷嘴轴线上的液滴较大; 水压的升高会减弱集聚效应, 从而使得中心区域的粒径减小; 外围区域为液膜波动区, 此处的破碎方式与压力旋流喷嘴类似, 粒径分布在径向上呈单峰分布。

4) 液滴的轴向速度分布呈现不规则分布, 这可能与多旋流槽产生液膜强旋作用, 造成周向非均匀分布有关。

参考文献:

[1] ANAND R, AJAYALAL P R, KUMAR V, et al. Spray and atomization characteristics of gas-centered swirl coaxial injectors [J]. Int J Spray Combust Dyn, 2017, 9(2): 127-40.

[2] IM J H, CHO S, YOON Y, et al. Comparative Study of Spray Characteristics of Gas-Centered and Liquid-Centered Swirl Coaxial Injectors [J]. J Propul Power, 2010, 26(6): 1196-204.

[3] SIDDHARTH K S, PANCHAGNULA M V, THARAKAN T J. EFFECT OF GAS SWIRL ON THE PERFORMANCE OF A GAS-CENTERED SWIRL CO-AXIAL INJECTOR [J]. Atomization and Sprays, 2017, 27(8): 741-57.

[4] LIU Y, ZHANG Q, ZHANG H Q, et al. Numerical investigation on the performance of internal flow and atomization in the recessed gas-centered swirl coaxial injectors [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 129: 11.

[5] JEON J, HONG M, HAN Y M, et al. Experimental Study on Spray Characteristics of Gas-Centered Swirl Coaxial Injectors [J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 2011, 133(12).

[6] DATTA A, SOM S K. Numerical prediction of air core diameter, coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl spray pressure nozzle [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21(4): 412-9.

[7] DHIVYARAJA K, JEGAN M, VADIVUKKARASAN M. On the Rayleigh-Taylor instability induced atomization [J]. Int J Multiph Flow, 2021, 142: 9.

[8] KANG Z T, LI Q L, ZHANG J Q, et al. Effects of gas liquid ratio on the atomization characteristics of gas-liquid swirl coaxial injectors [J]. Acta Astronaut, 2018, 146: 24-32.