doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.029

气液两相流喷头研究现状与展望

刘雪美[1]　马旻睿[1]　侯献伟[2]　陈月锋[3]　于世辉[1]　苑　进[1]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业机械技术推广站, 济南 250014;
3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司浙江分公司, 绍兴 312039)

摘要: 气液两相流喷头借助液相和气相间极大的速度差在两相界面上产生较高的切应力破碎、撕裂连续液相、实现小粒径雾滴的雾化过程,其所具有的雾化效率高、能耗低、药量调节范围广、粒径谱控制精确、不易堵塞、药剂适应性强和作业效率好等优势,使气液两相喷头成为精准施药装备中的关键部件之一。本文概述了气液两相流喷头工作原理、分类并与其他喷头进行性能比较,然后系统总结了气液两相流喷头的雾化基本理论、喷头结构设计、仿真模拟方法、试验研究手段,以及在农业植保上的应用等方面的研究进展。提出了气液两相流喷头研究中的开放性问题,如完善雾化过程物理模型、提高低压低能耗条件下的雾化性能、雾化粒径效益边界等问题。最后总结了气液两相流喷头在精准施药中的性能优势、面临的技术挑战以及未来需要解决的问题。

关键词: 气液两相流喷头; 精准施药; 喷头设计; 雾化仿真

中图分类号: S49　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0296-23　　**OSID**:

Research Progress and Trend Analysis of Gas-liquid Twin-fluid Nozzle

LIU Xuemei[1]　MA Minrui[1]　HOU Xianwei[2]　CHEN Yuefeng[3]　YU Shihui[1]　YUAN Jin[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
2. *Shandong Agricultural Machinery Technology Promotion Station, Ji'nan* 250014, *China*
3. *Zhejiang Branch of Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Shaoxing* 312039, *China*)

Abstract: The gas-liquid twin-fluid nozzle capitalizes on the substantial velocity difference between the liquid and gas phases to generate high shear stress at the interface, effectively breaking and tearing the continuous liquid phase to produce finely atomized droplets. This process offers numerous advantages, including high atomization efficiency, low energy consumption, a broad range of dosage adjustments, precise control of droplet size distribution, resistance to clogging, strong adaptability to various agents, and high operational efficiency. Consequently, the gas-liquid twin-fluid nozzle has become a crucial component in precision spraying equipment. Firstly, the working principles, classification, and comparative performance of the gas-liquid two-phase nozzle against other types were detailed. Then a comprehensive summary of the fundamental atomization theories, nozzle structural design, simulation methods, experimental research techniques, and performance evaluation metrics was provided. Additionally, the research progress in agricultural pest control applications was discussed. It highlighted open research questions, such as refining the physical model of the atomization process, enhancing atomization performance under low pressure and energy conditions, and determining the benefit boundaries of droplet size. In conclusion, it summarized the performance advantages, challenges, and future issues to be addressed in the application of gas-liquid two-phase nozzles for precision spraying.

Key words: gas-liquid twin-fluid nozzle; precise spraying; nozzle design; atomization simulation

0　引言

喷头在当今社会生产生活中有着广泛的应用场景,在农业领域中,喷头将农药、肥料或其他农业化学品均匀地喷洒在农田上,实现对植物的精准施肥和病虫害防治,提高农作物的产量和质量[1]。全球

收稿日期: 2024-07-15　修回日期: 2024-08-10

基金项目: 山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202326)、国家自然科学基金项目(52075308)、国家重点研发计划项目(2022YFD2300101)和山东省现代农业产业技术体系棉花机械岗位专家项目(SDAIT-03-09)

作者简介: 刘雪美(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事精准施药技术与智能植保装备研究,E-mail: lxmyjw@126.com

农药喷洒总量约在 2.5×10^7 t/a，平均年全球农药使用量约为 2.5×10^9 L，而喷雾对农作物增产的平均效果达 20% 以上。然而我国主粮作物的农药利用率仅为 40.6%[2]，直接沉积在靶标上的药量仅约 1%，只有不足 0.03% 的药剂能直接发挥杀虫作用[3]，其余农药以流失、挥发、飘移等各种形式散失到自然环境中，在产生巨大浪费的同时严重污染了生态环境[4-5]，喷头及其雾化技术亟待改进。

现代喷头始于 1783 年，美国工程师 JOSEPH 发明了蒸汽喷头用于热气球试验。1868 年，法国工程师 CLÉMENT 成功设计了一种可旋转喷头，用于水流控制。20 世纪初，随着化学农业发展，农业喷雾技术快速涌现出系列新型手持式和机械式喷雾装置。19 世纪 20～30 年代，随着空气动力学、流体力学等理论的应用，喷头设计更科学，提高了喷洒的效率和均匀性。20 世纪中叶，高压气体涂覆技术的发展推动了喷头技术的创新，提高了涂覆效率和质量。20 世纪 60 年代后，涡轮、旋流、空气雾化等喷头技术引入，进一步拓展了应用领域，提高了喷雾效果。进入 21 世纪，随着先进材料和制造技术的发展，微喷头、纳米喷头等精密喷头的研发应用逐渐增多，为各行业的生产和应用提供了重要支持[6]。

气液两相流喷头作为一种在科研、生产领域中有着广泛应用的先进喷头，在农业领域中相应的总结式研究却相对缺乏。所以本文从系统总结前人对两相流喷头的研究入手，厘清两相流喷头的研究脉络，找到气液两相流喷头的关键特性，提出对于两相流喷头未来研究方向的思考。

1　气液两相流雾化喷头概述

1.1　气液两相流雾化喷头特点

气液两相喷头相较于普通喷头具有显著性能优势。①雾化粒径精细：气液两相喷头通过将气体和液体混合后喷出，形成微小的气液颗粒，具有更加均匀、细腻的喷雾效果。相比之下，普通喷头可产生较大的雾滴，导致喷雾不均匀、浪费液体材料。②液相利用率高：由于气液两相喷头形成的颗粒更为细小，液体表面积相对较大，可有效提高液体利用率。这在农业喷洒、涂覆和药物喷雾等领域应用场景中尤为重要[7]，可以降低液体浪费，提高喷涂效果。③喷雾可控性增强：气液两相喷头能够通过调整气体和液体的流量比例，灵活控制喷雾的颗粒大小和分布，从而满足不同应用的需求。这种可调性远远超过了普通喷头，使得气液两相喷头更适用于复杂多变的工艺要求。④应用领域广泛：气液两相喷头更适用于多种领域，包括医疗、化工、食品加工、环保、农业等，能够在多种情况下完成多种任务[8]。各类气液两相流喷头结构如图 1 所示。



图 1　各类气液两相流喷头

Fig. 1　Different kinds of gas-liquid twin-fluid nozzle

一般来说，除了气液两相流雾化喷头，其他喷雾设备如风幕式喷杆喷雾机、风送式喷雾机的喷雾过程也存在着气液两相间的相互作用，对雾滴存在细化作用和定向作用，但与两相流雾化喷头的相间相互作用有着本质上的不同。首先，两相流喷头与其他喷头在气相速度、压力、特征尺寸等参数有着数量级上的差距，相间相互作用的强弱对雾滴破碎、运移有着显著的影响。此外，由于两相流喷头相间相对速度很大，除了常规的相间剪切作用外，还存在着由高速湍流气相主导的湍流破裂效应，会进一步破碎液相。而其他喷雾设备仅存在常规剪切效应而不存在湍流破裂效应。最后，两相间相互作用产生的破裂效应在两相流雾化喷头的雾化过程中占据了主导作用，而在其他雾化装置中仅仅起到了辅助雾化和引导雾滴的作用。两相流雾化过程中的相间相互作用以对雾滴的雾化作用为主，能够较容易的实现超细雾化，而其他雾化过程中的相间相互作用以对雾滴的定向作用为主。

气液两相流喷头在大田和果园植保中应用广泛，能够实现广域精准喷洒，适用于大田作物如小麦、玉米和大豆的病虫害防治、除草和施肥，以及果树如苹果、柑橘和葡萄的树冠深层喷雾、防治病虫害和叶面施肥。其雾化效率高、穿透力强和附着性好，提高了药液利用率，减少了漂移，提高了植保作业的时间效率。

1.2　气液两相流喷头分类

两相流雾化主要存在 2 种模式：气泡式雾化和射流式雾化。在气泡流模式下，连续液相的破碎和雾滴的雾化主要由气泡的膨胀和破裂作用所决定，在射流雾化模式下则主要由气液相速度差产生的剪切力促进射流破碎；段塞流时则同时存在上述两种模式，是两种雾化模式的组合，其基本分类模式如图 2 所示。

雾化模式间的差异是喷头内气液质量流量比（Gas liquid ratio，GLR）不同导致的，气液质量流量比定义为流入喷头的气体流量除以液体流量。随着

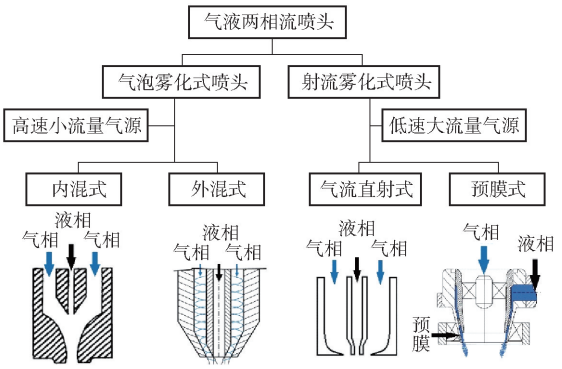

图 2 气液两相流喷头的分类方法

Fig. 2 Classification of gas-liquid twin-fluid nozzle

气液质量流量比的增大,喷头内会经历“气泡流-段塞流-射流”的模式转变。

1.3 气液两相流喷头工作原理

两相流雾化的基本原理是高速气流在两相界面上产生的高剪切应力来撕裂连续的液相形成细小的雾滴群[9]。由于雾化过程中存在随机现象,喷头会产生一定粒径大小谱系范围的雾滴群体,而非单一雾滴直径。

气泡式两相流喷头中,空气通过管路注入液体流道并在喷头内部混合后由喷孔喷出,在空气与表面张力的作用下,液相发生膨胀破碎,产生了许多微小的气泡,形成气液两相喷雾。气泡式两相流喷头的雾化效果相比传统喷头有着明显的改善,其雾滴粒径小,雾滴空间分布均匀,雾滴尺寸分布均匀。但气泡雾化技术也存在一些缺陷。首先,在高黏度液体的情况下,气泡形成可能变得困难,从而影响喷头的雾化效果。其次,气泡雾化会在液体中引入较大的气泡,这可能导致喷头的输出射流不够均匀,降低喷雾的均匀性和稳定性。此外,由于气泡雾化通常需要一定的气体压力来产生足够的气泡,对空气压缩装置提出了一定的性能要求。

射流雾化式两相喷头工作原理可以分为两阶段:掺混阶段和两相流喷射阶段。首先,在掺混阶段,气相和液相分别通过各自的通道进入喷头内部。在进入混合腔之前,气体会在流道内加速形成高速气流。混合腔的设计使得两相能够有效地接触和混合。在混合的过程中,气体的高速流动导致液体被剪切成小雾滴,并与气体混合均匀;接下来是两相流喷射阶段,在气液两相完成掺混形成含有雾滴的气流后,气液两相流通过喷头口被喷射出来。由于之前的混合,气相和液相的混合状态更为均匀,形成了一个稳定的射流。

1.4 各类喷头雾化性能比较

现代工农业生产中使用的雾化装置主要有 3 种类型:压力式喷头、离心式喷头、气液两相流雾化喷头。这 3 类喷头各具性能优势。

压力式喷头内部结构和供液供能装置简单,应用十分广泛。但压力式喷头的瓶颈在于:在液泵总功耗不变的情况下,雾滴粒径减小需要液体压力升高,导致液体流量变小无法满足喷雾流量需求;此外,压力式喷头的压力与流量存在耦合关系,无法对这两个参数进行独立调节;最后,压力式喷头在雾滴粒径接近 100 μm 继续细化雾滴所需要的成本会大幅增加以致无法承受,使其难以产生精细喷雾,存在被其他喷头取代的趋势。

随着近年来离心式喷头转盘设计的快速发展,离心式喷头实现了精细雾化和流量、粒径独立控制这两项关键喷雾技术。但由于离心式喷头在无外部气流影响下,喷头所产生的大量雾滴会沿着喷头转盘平面甩出,导致了此条件下的雾滴沉积效果并不好,此外由于雾滴粒径较小其悬浮效应比较明显,会进一步影响沉积效果。因此,离心式雾化喷头并不适合没有强制气流胁迫的雾化作业。

气液两相流喷头最早应用于燃料雾化,近年来逐步引入农业领域。气液两相流喷头依靠两相间的极大速度差在相界面上产生切应力破碎、撕裂液相,完成雾化过程。两相流雾化喷头除了具有雾化精细、粒径流量独立控制以外,还具有不易堵塞、可调节性强、液体消耗量少、雾化能耗低、工作范围宽等特点。尽管气液两相流喷头使用的空气压缩机存在重量大、体积大等缺点,无法在无人机、风幕式喷雾机等设备上使用,但对于使用管道供应流体、静态喷雾为主、环境相对封闭的设施植保作业则非常适合。设施植保喷洒药液的过程中普遍存在小流量、精细雾滴、索特雾滴直径(Sauter mean diameter, SMD)小于等于 100 μm[10]的要求,且飘失问题不再成为主要问题,因此提高药液雾化效率、细化雾滴粒径是当前设施植保的重要研究方向。气液两相喷头喷出的雾滴粒径较细,雾滴分布比较均匀,非常适合设施农业等封闭场景的植保作业,各类型喷头的性能特点如表 1 所示。

表 1 各类植保喷头特点

Tab. 1 Characteristic of different crop protection nozzle

喷头类型	优势	缺陷
压力喷头	技术成熟、结构简单、易于生产、应用范围广	无法独立控制粒径和流量、难以实现超细雾化
离心喷头	独立控制粒径和流量、流量和粒径可调节范围大	产生的雾滴横向速度较大,需要外部气流进行约束与引导
两相喷头	独立控制粒径和流量、雾化效率高、能够产生极细雾滴	需要空气压缩装置提供高压气体,体积质量大、液体流量较小

2　气液两相流喷头技术研究进展

2.1　两相流雾化理论

2.1.1　一般性雾化理论研究

影响两相流喷头雾化性能的因素有很多，无论是射流式喷头还是气泡式喷头，对雾滴粒径影响最明显的因素均是气液质量流量比。WU 等[11]针对气液质量流量比对内部的雾化过程和外部的雾滴碰撞过程的影响展开了研究，阐述了湍流两相流的雾化机理和雾滴碰撞模型。研究证实了气体速度与气液质量流量比呈现负相关，但不同气液质量流量比下雾滴在距出口 50 mm 处均达到局部气相速度极限，气流对雾滴的破碎作用大幅减少；气流雾滴速度差的区间边界与气液质量流量比有着明显的相关特征，输运特性受到气液质量流量比的影响较大。雾滴基本上不受剪切破裂的影响，但内部处于湍流的状态，可能会进一步发生湍流破裂。

两相流雾化喷嘴是由高压气相所驱动以进行雾化过程，由于产生高压强大流量气体的气源能耗和成本较高，所以需要研究并优化低压低气液质量流量比下的雾化过程，以探究低压雾化的可行性。ZAREMBA 等[12]针对低气压低气液质量流量比下混合过程对喷雾效果的影响展开了研究。研究结果表明，在低气液质量流量比条件下，喷雾形成过程主要取决于喷头的内部设计。气体流量会影响内部两相流特性、液体破碎机制、液滴动力学模式以及液滴大小及其分布。不同的雾化喷头之间喷雾性能差异与气液质量流量比呈负相关。射流式雾化器能够在低进口压力和低气液质量流量比条件下工作；而气泡式雾化器必须通过环形内流才能在给定的工作压力下产生稳定的喷雾，且液滴平均尺寸较小。

除了气液质量流量比，其他气相的工作条件也对两相流雾化喷头的雾化性能有影响。由于环境压力的存在，两相流喷头内的高压流体必须克服外界环境压力将流体喷出，因此外界环境压力的不同也会导致喷头雾化性能的变化。李若灿[13]针对不同出口环境压力下的气液两相流喷头雾化特性展开了研究。高环境压力雾化特性试验研究了 0.4 ~ 4.0 MPa 环境压力范围内喷头流量特性及各种因素对雾化锥角的影响规律。结果表明：环境压力的升高改变了气液两相流流型，且流动损失显著减小。高压条件下某一相的流量保持不变时，随着环境压力升高，另一相达到相同流量所需压差越来越小。此外，环境压力对雾化角的影响也非常大，在两相速度和气液质量流量比不变时，雾化角随着环境压力的升高先减小后增大，极值点处的环境压力大概为 1 MPa，在高环境压力时，可以用更低的气液质量流量比达到相同的雾化效果，较好地节约成本。

除了气体工作条件会对两相流雾化喷头的雾化性能产生影响，液体理化性质也会对喷头雾化性能产生影响。粘度是流体对流动所表现的阻力，液体粘度越高分子间内聚力就越大，抵抗气相破碎作用的能力就越强，因此研究液体粘度对两相流雾化喷头的性能影响尤其是高粘度下两相流雾化喷头的雾化性能十分重要，LI 等[14]在大液体粘度范围下对内混式两相流雾化喷头的雾化过程展开了试验研究。研究表明，其索特雾滴直径受气液质量流量比的支配且与粘度和压力无关。气液质量流量比的增加产生了更多的小雾滴，而压力和粘度对雾滴粒径及分布的影响较小。当液体粘度增加到 0.12 Pa·s 时，雾滴粒径分布中大雾滴的占比提高了很多，喷雾质量下降，但雾滴的中径变化不大。当喷头在高气压和大气液质量流量比下运行时，在轴向距离较远处雾滴索特雾滴直径与粘度呈正相关，且速度衰减与粘度呈正相关；径向方向上，粘度增加会使索特雾滴直径和速度分布变得更平缓。WACHTER 等[15]发现当气体压力和气体速度不变时液体粘度与雾滴粒径呈正相关；增加气体压力，采用合适的气体速度，可使雾滴尺寸最小化；雾化过程图像显示在系统压力较高时主射流的破碎形态从纤维型转变为纤维型和非轴对称瑞利型的混合态。并且在多种液体粘度下都观察到了这种效应。GARCÍA 等[16]发现在雾化高粘度液体时气液两相流喷头产生的雾滴平均直径与液体流速呈正相关。当气体流速增加时，雾滴平均直径会强烈减小。在特定的条件下，雾滴平均直径非常低，但雾滴粒径的分布范围则会相对较宽。在使用高粘液体的试验中，当气液质量流量比超过 10 时，可以成功产生雾滴中径低于 20 μm 的雾滴；在液体流量为 10 L/h、气液质量流量比为 17.3 时，26% 的甘油形成了小于 20 μm 的雾滴，超过一半的雾滴粒径小于 50 μm，雾化效果较好。这意味着使用两相流雾化喷头来雾化高粘度液体是可行的。

除了高粘度液体，两相流雾化喷嘴有时还需要雾化含有非均匀的、含有异质颗粒的悬浮液。其中固体颗粒的运动状态如流道内的流动轨迹、颗粒的出口速度、颗粒的分布等对悬浮液雾化过程的雾化效果影响很大，需要对其进行深入研究。MULHEM 等[17]针对悬浮液的两相流雾化特性开展了研究。为了描述悬浮液在两相流喷头中的雾化过程，对几种悬浮液及其破裂机理进行了研究并比较了雾滴大小。研究发现，悬浮液射流在气流中按 3 种破裂机制（瑞利破裂、膜破裂、纤维破裂）分解为纯液体射

流,再据现有的液体和标准悬浮液雾化数据,改进了纯液体和悬浮液雾化过程的雾化模型,给出了雾滴索特雾滴直径与喷头直径、气体韦伯数、气液质量流量比与奥内佐格数之间的关系以及固体颗粒的运动过程。

除了气体工作条件、液体物化性质的不同会对两相流雾化喷头的喷雾性能产生影响,喷头自身结构的不同也会对雾化性能产生影响,各种不同的喷头结构有着不同的喷雾性能,MLKVIK 等[18]对液相斜入式 Y 型喷头、内液外气喷头、内气外液喷头以及自行设计的 CFT 喷头展开了低压粘性液体雾化试验,对喷头结构与液体破碎过程、喷雾稳定性和雾滴尺寸之间的关系展开了研究。研究表明,外液内气雾化器和 Y 型雾化器在不同工作状态和雾化液体下都提供了稳定的喷雾效果,外液内气雾化器在低气液质量流量比时产生的雾滴最小,而 Y 型雾化器在低气液质量流量比时产生的雾滴尺寸则显著增加。对于外气内液雾化器,喷雾的稳定性受到气液质量流量比的影响,在气液质量流量比较高时,喷雾的稳定性最好,在低气液质量流量比下,大雾滴的存在导致了雾滴平均尺寸的增加,且调换雾化器的两相入口后会影响内部流动,即使在工作条件相同时雾化机制也是不同的。

而对于喷头结构相同但具体设计细节上有所不同的喷头,其雾化性能也会随着局部几何形状的不同而产生变化,因此 TSAI 等[19]使用不同喷头尺寸、狭缝角度和狭缝横截面的两相流雾化喷头对粘性牛顿液体进行了雾化试验。研究发现,无论喷嘴内部的流道结构如何,雾化雾滴尺寸都可以用气液质量流量比、韦伯数和奥内佐格数 3 个无量纲量描述,并使用最小二乘拟合确定具体的数量关系,因此确定了内部结构对这 3 个无量纲数的影响就确定了对雾滴粒径的影响。当气相入口的压力超过阈值压力时,雾化雾滴的尺寸会明显减小,并且形成平均直径为 6 ~ 20 μm 的小雾滴带。根据喷头尺寸和狭缝横截面的不同,压力阈值在 170 ~ 220 kPa 间。

此外,在两相流雾化喷头的生产制造过程中难以避免地会产生一些加工制造上的误差,在制造喷孔的过程中尤其容易产生误差,这些误差改变了喷头内部原有的结构,对雾化性能产生了影响。赖厚湖[20]将喷孔处的结构偏差归为 3 类:直径偏差、锥度偏差和倾斜偏差,并研究了以上偏差对索特雾滴直径、雾化锥角和稳定工作气液质量流量比的定量关系。研究结果显示,喷孔结构偏差对喷雾稳定性的影响最为明显。相同索特雾滴直径变化下变化最大的参数是稳定工作气液质量流量比,可以将其作为指标参数来构建喷孔结构偏差影响分析方法。分析表明,对雾化芯影响最明显的是倾斜偏差,收缩型锥度偏差次之,直径偏差影响最小。

有时在一些大型两相流雾化喷头中会使用多喷孔的结构,在雾化性能上与传统的单喷孔两相流雾化喷头有着较大的区别,KHALID 等[21]针对多喷孔两相流雾化喷头的雾化过程展开了研究。试验采用了 3 个有着不同喷孔大小、位置、形状的喷射盘进行试验。采用了直接摄影法采集了不同气液质量流量比下喷雾区域的图像并使用 ImageJ 软件分析了试验图像。结果显示,开口面积比最低的喷射盘相比其他喷射盘液体断裂长度最低,雾化效果相对较好。然而在高气液质量流量比的条件下,开孔面积比对断裂长度的影响逐渐减小。

综上所述,气体工作条件、液体物化性质、喷头自身结构等诸多因素会影响两相流喷头的雾化效果,但本质上是这些影响因素改变喷嘴内流状态,内流状态的改变导致了喷雾性能的变化。因此,李洪波[22]针对内混式气液两相流喷头内流对雾化效果的影响展开了试验研究。通过分别调整喷头的气液压力来改变气液质量流量比产生内流变化,以此来研究内流变化对雾化效果产生的影响。试验表明:随着气液质量流量比的增加,混合室内气体增多,喷孔内液膜变薄且易碎裂,出口处可以明显观察到液体碎裂形成的雾滴更细,雾化效果变好。而液压增加时,喷头混合室内部液体增多,喷嘴混合室内部液体增多,液膜变厚。此外,喷雾锥角还会随气液质量流量比的增大而先增加后减小,使雾滴索特雾滴直径和小特征直径雾滴占比增加;孔径、索特雾滴直径与特征直径随着气液质量流量比的增大呈先减小后增大的趋势。

现有研究一般将两相流雾化喷嘴的内流状态分为射流状态和气泡流状态两类,这两个内流状态存在着较大差异,孙春华等[23]总结了这两个状态的出口气液流动脉动间的差异。处于射流状态时,喷孔出口截面含气率脉动幅度及其变化较小,平均含气率较高;处于气泡流状态时,出口含气率脉动幅度较大且呈周期振荡衰减变化,平均含气率远低于射流。但不同流型的喷雾形态均存在脉动射流喷雾形态脉动较小,喷雾半锥角分布比较集中;气泡流喷雾形态变化明显,喷雾半锥角分布较为分散。在出口附近,射流模式的雾滴粒径分布更加集中,且喷雾分布范围增长率与出口下游位置呈正相关,雾滴平均粒径略小于气泡流模式。在出口附近,射流模式的雾滴粒径标准差明显小于气泡流模式;不同流型的雾滴粒径分布的差异随轴向距离的增加而减小。

由两相流雾化喷头的雾化原理所决定，雾化过程完成后雾滴会在流道内继续运动并受气动力作用破碎且相互碰撞。这两个效应会分别导致雾滴粒径减小和增大，使雾滴粒径随着轴向运动距离的增加产生复杂变化。针对这一现象 WU 等[24]针对两相流雾化过程中的液滴破裂和凝聚过程展开了研究。研究结果显示，液滴在流道中紧密跟随气流流动，因此可以使用雾滴速度来估算气流速度。通过将雾滴粒径与临界韦伯数比较发现，液滴不存在剪切破裂，但有些液滴可能会发生湍流破裂。考虑湍流耗散率对液滴破裂和凝聚的影响后发现，破裂和凝聚效应的临界平衡长度小于 3 mm，这表明雾滴粒径在整个流道内部几乎是一直在变化的。喷雾液滴碰撞动力学研究显示，雾滴湍流破裂效应和聚结效应的临界平衡位置位于出口处，凝聚效应在远场液滴碰撞结果中占主导地位，因此在雾滴离开喷头后其粒径与喷雾下游距离呈正相关。基于二元雾滴碰撞理论的量化碰撞结果表明，由于雾滴聚结效应占主导地位，导致雾滴的索特雾滴直径与雾滴在下游的位置呈正相关，随着雾滴远离出口其粒径相应增大。

2.1.2　射流雾化理论

一般的射流雾化过程是将液相垂直射入高速气流，连续液相受到高速气相的剪切力破碎成为液带、液块、液环，破碎形成的液带、液环、液块继续横向运动并受到气相破碎作用形成细小雾滴[25]，且随着气体韦伯数的增加气相对液相射流的扰动和剪切作用相应增强，其基本过程如图 3 所示。这一过程使雾滴充分细化、粒径降低。但当雾滴中径降到某阈值以下时，中径减小所产生的内聚力增加会导致气体韦伯数对雾滴中径的影响减小，而液体韦伯数在所有条件下都对雾滴中径无明显影响，这是因为液体韦伯数的增加在导致雾滴中径增大的同时也会导致液体横向运动距离增加，雾化区域的面积增大，雾滴中径减小，综合作用下使液体韦伯数对雾滴中径几乎没有影响。

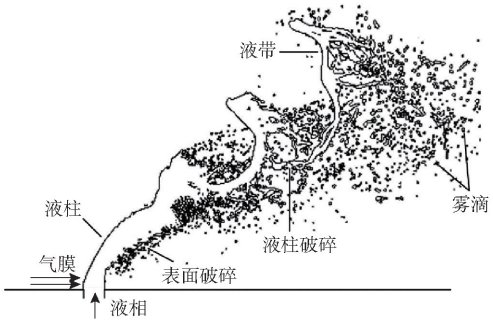

图 3　横向液体射流在高速气流冲击下的破碎效果图[25]

Fig. 3　Schematic of lateral liquid jet breaking process[25]

在不同工作条件下射流雾化过程有所区别，各个状态下的射流雾化机理和液体破碎机理遵循不同的模式，为了总结不同的雾化机理和破碎模式 HINZE[26]对稳定气流中雾滴破碎问题进行了研究，提出了雾滴破碎的 3 种基本类型（椭球型、雪茄型、凹凸型）。当雾滴表面受到平行气流、旋转气流或粘性剪切力作用时，雾滴被压扁为椭球型；当双曲气流、Couette 气流作用于雾滴表面时，雾滴被压缩为扁带形状、拉伸为长圆柱形状，形成雪茄型雾滴；当不规则的气流作用于雾滴表面时，雾滴表面会发生局部变形，并形成凹凸不平的雾滴。最常见的为椭球形变形，雾滴在稳定气流中会受到气体压力的作用，从而被压扁为椭球形、杯形和半水泡形。当雾滴与气流的相对速度超过了保持雾滴表面稳定的临界速度，半水泡形雾滴的中心部分最先碎裂，随后形成边缘厚度不相同的液环，其质量占整个雾滴总质量的 70% 左右。在气流的持续作用下，液环被撕裂为片状，连同中心部分，一起被碎裂为不同大小的细小雾滴。

在不同的工作条件下除了雾化机理和破碎模式不同，两相流的流态也有不同，尤其是大液块在气流作用下先形成液环再破碎形成细小雾滴这一过程有着较大区别，LIU 等[27]针对两相流雾化过程中的环形流态和雾化特性展开了研究。研究发现，喷雾锥角与气液质量流量比呈正比，雾滴凝聚和破裂效应的轴向平衡位置与气液质量流量比呈负相关。由于湍流破裂和雾滴凝聚之间的此消彼长，雾滴索特直径沿轴向先减小后增大，且粒径服从对数正态分布。径向速度在小气液质量流量比下是双峰形的空间分布，而在大气液质量流量比时，雾滴径向速度则呈远场方向的单调下降。

雾化机理的不同会导致喷头在不同的工作条件下雾化性能有所区别，气相液相工作条件、内部结构等都会影响射流式两相流雾化喷头的雾化性能，因此 FANG 等[28]针对各相入口处压力等工作条件对喷头各个参数的影响展开了研究。发现对于射流式两相流喷头，当气相压力增加时，喷头的耗气量指数级增加、耗水量指数级下降、雾滴粒径呈指数级降低、雾滴粒径的分布范围也随之大幅缩小。此外，KUFFERATH 等[29]针对几何结构对射流式两相流雾化喷头喷雾特性的影响开展了研究。研究结果显示，液相入口直径、喷头出口直径和出口长度对喷雾特性的影响最大。对于短出口口径（出口周长与直径之比小于 2），层流射流的最大索特雾滴直径总是出现在喷头轴线上，而湍流射流则产生了几乎均匀的剖面。对于长出口口径（出口周长与直径之比大于 4），两种流态都可以找到均匀的剖面。

由于气液两相流的复杂性,喷头的内流道结构不仅对两相流流型、流态有影响,也会对两相流的流速、压力、密度等宏观参数产生影响从而改变喷头的雾化性能。CHEN 等[30]在研究两相流雾化喷头的内流道结构对流动参数的影响时发现使用加速性能更好的流道和更大的气液质量流量比,两相流喷头会有更好的一次和二次雾化效果。当液相流量恒定时,更大的气液质量流量比会给雾滴带来更多的能量,明显改善喷头的雾化性能。当气液质量流量比较大时,雾滴的尺寸分布受喷头结构影响较小,当气液质量流量比较小时雾滴的尺寸分布则受喷头结构影响比较明显。较小的喉管直径、出口直径以及延长液相在流管中运动的长度可以使雾滴在空间中的分布更加均匀。

当气液两相喷头的工作条件不合适时,会出现喷雾不稳定现象,而且射流式雾化和气泡式雾化的不稳定现象和形成机理并不相同,需要当作两个现象来讨论。HAMMAD 等[31-32]对射流式两相流雾化喷头面临的喷雾不稳定问题进行了研究,并通过流动可视化技术和数字图像处理技术将射流式喷头内部的流动特性与雾化稳定性联系起来。研究表明:不均匀气泡流和段塞流会导致出口孔内出现不必要的间歇性流动和不稳定的大粒径喷雾,而流道内稳定环形流或波浪环形流则会形成环形稳定流动并产生细喷雾。出口孔内存在有利环形流态和不利间歇流态之间的过渡判据,且该判据与索特雾滴直径存在直接关系。同样的,LI 等[33]也针对内混式两相流雾化喷头的喷雾稳定性展开了研究。主要对喷嘴下游不同位置的液体破裂强度和雾滴尺寸波动进行了研究,并分析了工作条件对喷雾稳定性的影响。研究结果表明,在预定工作条件下雾化过程受各种破裂模式影响,特征雾滴直径出现不同程度的波动。在中等气液质量流量比下的雾化过程比大气液质量流量比和小气液质量流量比下的雾化过程更不稳定。且大雾滴稳定性明显低于小雾滴。与近喷头区域相比,远端完全喷射区域的喷雾稳定性更高。此外,对近喷头区域雾滴特征直径的时域数据进行频谱分析表明,频谱图中存在脉动频率,可用于评估气液质量流量比对喷雾稳定性的影响。

对于两相流雾化过程的分析,不仅可以从力学方面对雾化过程进行分析,也可从能量角度出发建立一套分析方法,LEFEBVRE 等[34]针对两相流雾化模式中的能量尺度展开了分析研究。对于雾化基本理论的研究表明:射流式两相流雾化喷头中存在一种雾化模式,高速气流的撞击阻止了液片破裂前形成波动,液体几乎在瞬间破碎成大小不一的雾滴。这种快速雾化过程相对于普通雾化过程,雾滴的直径范围广且雾滴平均直径对液体粘度、空气压力、初始液膜厚度等参数的变化不敏感。雾化过程的模式在很大程度上取决于高速气流撞击液面的角度。因此先假设决定雾化过程模式的主要因素是雾化所需的能量与高速气流的动能之比,并根据这一假设推导出了雾滴平均直径方程。这一方程可以很好地吻合水、油作为液相的试验数据,且工作条件范围较广,使这一公式有着较广的适用性。

2.1.3 气泡雾化理论

气泡雾化是一种两相流雾化方法,气相入口在液体进入混合腔后注入少量高速气体。气泡雾化装置与射流雾化装置、单相雾化装置有较大区别,可显著提高喷头喷雾性能,产生尺寸更小的雾滴,且所需的入口压力更低。与其他两相流雾化技术相比,该雾化方法所需气体流量要少得多。此类雾化器的基本结构如图 4 所示。

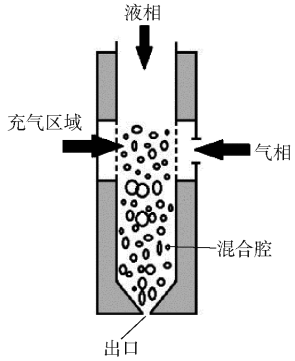

图 4 气泡雾化喷头基本结构图

Fig. 4 Structure of effervescent twin-fluid nozzle

SOVANI 等[35]系统总结了大量关于雾滴粒径、雾滴速度、雾滴加速度、挟带作用等喷雾性能参数和入口压力、气液质量流量比、液相类型、气液相物理参数、雾化装置几何参数、环境气体密度、时空位置等影响因素间的定量关系,得出结论:喷头的几何结构非常重要,混合腔的几何形状会影响两相流的演化,出口内壁处的轮廓会影响出口内的流态转换,混合腔内的一般流动状态如图 5 所示;出口孔径会影响喷雾特性、液相流量,喷头的长径比对平均雾滴大小有明显影响;喷头出口处的外缘可进行轮廓加工,以改善喷雾特性;如果多出口气泡雾化器内部的两相流不均匀,则各个出口产生的喷雾会表现出不同的喷雾特性;影响喷雾特性的其他影响因素包括气体分子量和环境气体密度、压力、时空坐标。研究进一步对气泡雾化过程模型进行修改,以预测气泡雾化的雾滴粒径分布。在气液相对速度和液体物理变化中以离散概率函数(DPF)的形式引入随机现象,最终呈现出以 DPF 形式表征的雾滴粒径分布。研

究结果表明,雾滴粒径分布的范围是气液相对速度平均值和波动程度的强非线性函数,且基本上不受液体理化性质变化的影响。

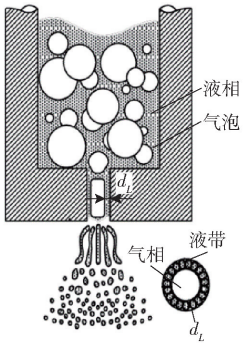

图 5　混合腔内部流动状态

Fig. 5　Flow condition inside nozzle mixing chamber

气泡雾化本质上是依靠气泡在连续液相中的生成与破裂来将液体破碎和雾化,因此研究气泡在液体中的的几何特征和动力学特征就变得尤为重要,毛宁[36]选择 3 种流动场景作为试验背景,研究了同向水流中的注气过程,采用了出口直径为 3.8 mm 的喷头在水洞测试段上游进行同向淹没注气,得到上游气腔的流向长度、夹断频率等。试验表明:气液流动模式受到气液速度比的显著影响。在气液速度比极低时,喷头出口不会形成典型的附着气腔,在气液速度比较低时,上游气腔不会发生夹断,气液速度比较高时,有可能发生气腔/气泡间的聚并现象,且水流速度越低,聚并现象越明显。气液速度比一定时,上游气腔的夹断频率与水流速度呈正相关,夹断频率与气液界面不稳定性呈正相关;其次,进行了圆柱绕流尾流中气泡分布试验,获取了气泡在尾流区的当量直径及速度分布,并与载体流场的对应参数进行对比。试验表明:未注气时,时均尾流场中具有对称的涡量和速度分布,在流向的垂直方向上,尾流中心线附近的速度低于尾流边缘的速度。注气后,尾流中心线附近存在低速气泡区,当雷诺数一定时,低速气泡区的纵向范围与注气流量呈正相关。低速区同一纵向截面上气泡当量直径相对较小,气泡速度的总体分布与载体流场一致。相同位置上气泡速度略低于载体流场,气泡速度的波动程度与注气流量、雷诺数均呈正相关,气相空隙率与雷诺数和注气流量呈正相关;最后对不同工况下的水平管内气液两相流流型进行了识别,将瞬时气液结构划分为 7 类,采用超声多普勒测速仪获取气液两相流中的速度信号,并转化为图像信号,借助神经网络模型建立了子流型实时识别模型。

如果气泡雾化喷头混合室内压力大于气体入口压力,就会产生回液现象,液体会回流进入气相管道产生严重破坏,回流时混合室内的压力就是临界压力。刘俊林等[37]针对结构对气泡雾化喷头临界压力的影响进行了研究。气泡雾化喷头临界点工况与喷头的压力以及结构有关;临界压比只与喷头的结构以及加工精度有关。临界压比与面积比呈正相关;当面积比大于 3.23 时,临界压比不再随着面积比的增加而增加。出口直径与临界压比呈负相关。通气方式对临界压比的影响比并不大。增加旋流芯,喷头临界压比增加。混合室收敛角对喷头临界压比的影响很小。此外,还对气泡雾化喷头的流量特性展开了研究[38],分析了液体入口的流量系数、工作状态气液质量流量比随两相压力的变化,并得出以下结论:气泡雾化喷头中,气液两相存在相互耦合,无法仅改变一相压力而另一相压力不变化;压力对喷头流量的影响很大,气体流量与气压呈正相关,与液压呈负相关;在喷头结构不变时,液压压降、液体流量系数、液气压力比与气液比呈负相关。液气压力比、气液质量流量比对雾化喷头的雾化效果有很大的影响,液体流量系数与液气压力比呈正相关;气压越高、液压越低,气泡雾化喷头的雾化效果越好。

毕江纯[39]详细讨论了喷头内部结构对雾化性能的影响。喷头混合室结构对气泡雾化喷头的流量特性影响不大,在相同工作条件下,各喷头的流量特性几乎一致;但喷头结构对气泡雾化喷头的雾滴直径分布和速度分布影响显著,适当拉长混合腔有助于降低雾滴平均直径。渐缩的混合室结构有助于提高雾滴速度分布的均匀性;喷头在特定工况下存在着主流平均速度不衰减的非典型速度分布;不同混合室结构对混合室内部气液两相分布的影响不大,但对雾滴速度分布有较大影响,不同喷头结构对喷头的雾化效果也有很大的影响。

2.2　两相流喷头设计

一般来说气液两相流喷嘴可以分为射流式和气泡式,但近年来兴起了一种结构可变的两相流喷嘴,这种喷嘴不仅能通过调整气、液两相的工作条件来控制喷嘴内的两相流态,还能通过改变喷嘴的内部结构来控制喷嘴的工作模式,这种喷头一般称为流动聚焦/模糊喷头。这种喷嘴通过调节内外管相对位置控制混合区内气液间的相互作用,使喷头在不同模式下工作,基本结构如图 6 所示。在流动聚焦模式下,喷头内管的液体被外管中高速流动的气体驱动,聚焦后形成稳定的锥型液块,锥尖的射流在两相流间的相互作用下破碎,形成微小的雾滴;在流动模糊模式下,气液两相会在混合区内剧烈掺混,经喷孔高速喷出。两相的剧烈掺混产生了强烈的扰动作

用,导致喷出的液相雾化效果较好。

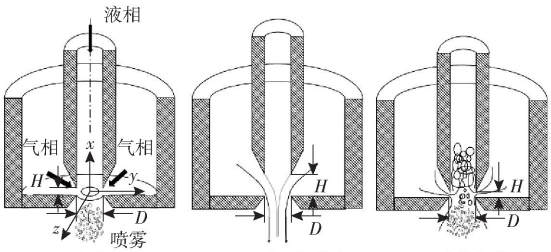

图 6 流动聚焦/模糊喷头结构示意图及其不同流动模式

Fig. 6 Structure of flow focusing/blurring nozzle and flow condition

赵晋[40]针对流动聚焦/模糊喷头进行了研究。首先对流动聚焦/模糊喷头内部的气液流形进行了研究。结果表明,两相的相互作用是导致不同流动模式下流形不同的主要原因;流动聚焦模式主要出现在气体流量较小的工况,流动模糊模式主要出现在气体流量较大的工况;通过试验和数值模拟方法对喷头气相的调控作用进行了研究,结果表明喷头气相流量可以对喷头内部液体射流形态以及液体射流破碎及气液混合模式进行有效调控;喷孔内气液间的粘性剪切力和液体射流表面压力是对液体射流破碎以及喷头流动模式转变具有重要影响的两种作用力,明确了喷孔内液体射流不稳定波动、射流破碎程度、出口流动参数的脉动特征与喷头气、液流量的关系。研究进一步聚焦于喷头的喷雾特性,对喷头的喷雾形态及喷雾特性、射流破碎特性以及喷雾形态与流动模式间相关性进行了试验研究,明确了气液混合一致性、喷雾半锥角和喷雾核心区长度以及雾滴粒径随气、液流量的变化规律以及雾滴粒径的空间变化规律。并进一步建立了基于出口流动脉动的流动聚焦/模糊喷头射流喷雾数值模型,在此基础上展开了对聚焦/模糊喷头雾化过程的数值研究。研究结果表明,射流喷雾中心轴向贯穿力减弱是射流喷雾头部呈“扁平型”主要原因;气相对液相的带动作用是射流喷雾贯穿距随液相流量减小而增大主要原因,并明确了射流喷雾半锥角和射流喷雾贯穿距随喷头出口气液脉动及气相流量和液相流量的变化规律,射流喷雾中气液混合程度和雾滴破碎程度随空间位置及喷头气相流量和液相流量的变化规律。

MURUGAN 等[41-42]则选择使用光学诊断工具对聚焦/模糊雾化喷头的喷雾模式展开了试验研究。研究结果表明,气、液工作条件在决定雾滴的大小和速度方面起着重要的作用。不论液体流量的大小,空气流量较低时均呈流动聚焦模式、空气流量较大时均呈流动模糊模式。流动模糊模式产生的雾滴相比流动聚焦模式更小,速度更高,雾滴大小和速度的联合概率分布函数在出口附近呈单峰分布;由于二次破裂过程,出口下游 50 mm 的分布函数呈现双峰分布,随后由于空气阻力而损失了速度。流动聚焦模式由于雾滴的凝聚,索特雾滴直径和质量中值直径与轴向距离呈先增大后减小的趋势。雾滴韦伯数和雾滴雷诺数的联合概率分布表明,流动模糊喷雾比流动聚焦喷雾产生的雾滴更小、更快。

2.2.1 射流雾化式气液两相喷头

组合设计是新型射流式两相流雾化喷头的设计方向,其中一个重要方向是将超声振荡结构与射流式两相流雾化喷头结合起来,CHEN 等[43-48]对带有自激振结构的射流式两相流喷头的喷雾特性开展了研究。喷头主要由自激振动腔、雾化芯和喷头外壳组成,自激振动腔置于喷头出口后接收喷头产生的雾滴,并通过震动对雾滴产生破碎作用。在雾化芯中完成气液两相雾化过程后,大量雾滴从雾化芯喷出,强烈撞击自激振动腔,从而再次细化雾滴,使雾化性能改善[45-47]。基本结构如图 7 所示。研究表明:自激振荡腔孔径、孔深与索特雾滴直径呈正相关,索特雾滴直径与声场频率呈负相关。较小的喷头直径、长度有利于平衡喷头出口周围的涡流并降低索特雾滴直径。随着喷头与自激振荡腔间距离的增加,索特雾滴直径呈先增后减的趋势,当间距为 5 mm 时,流场半数以上雾滴的索特雾滴直径小于 35 μm。随着轴向和径向距离的增加,喷头的索特雾滴直径和算术平均直径有增加的趋势。平均而言,喷头出口区附近的索特雾滴直径和算术平均直径小于其他区域的算术平均直径。声场频率增加会加剧雾滴的破裂,使雾滴直径的分布变得更广,从而造成索特雾滴直径和算术平均直径间的明显差异。

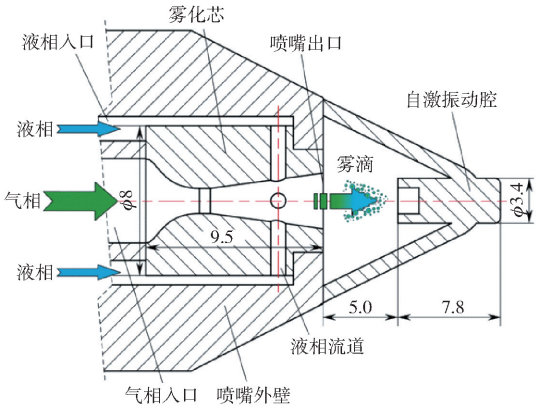

图 7 带有自激励振动结构的射流雾化式两相流喷头[43]

Fig. 7 Structure of jet breaking twin-fluid nozzle with self-excited vibrating cavity system[43]

魏超[49]也对现有超细两相流喷头增加了超声振荡结构并使用数值模拟方法模拟了喷头的雾化性

能。研究得到了两型喷头的雾化流场特性，结果表明改型喷头的雾滴粒径分布情况得到了明显改善，最大索特雾滴直径控制在 10 μm 以下，大部分雾滴索特雾滴直径在 2 μm 左右，极大改善了喷头的雾化性能，实现了超细雾化的目标。

除了与超声结构的组合设计，增加旋流装置也是新型射流式两相流喷头的重要研究方向之一，旋流装置一般有两种设计方式，一种是带动液体旋转比如气相导流叶片等设计，另一种是带动液体旋转如偏心式液相入口等设计。JEDELSKY 等[50]着重于修改雾化器出口部分的几何形状，设计了强旋流喷头，其通过旋转气液混合物来扩大喷头喷雾锥的角度。进一步测试了两相流雾化喷头的雾化性能，并总结了喷头的性能优缺点。并在冷试验台上对雾化过程进行了试验研究，试验结果表明，在低气液质量流量比下，旋流两相流使喷雾锥角显著增加。气体质量分数的增加抑制了旋流对喷雾锥膨胀的作用。当气液质量流量比达到 0.15 以上时，涡旋效应开始减弱。YOON 等[51]研究发现相比对心式液相入口，偏心式液相入口会在喷管内部产生旋流，能有效减少出口处雾滴索特雾滴直径。此外，喷头中心出口的湍流强度对雾滴在空间中分布的均匀性也有很大的影响。YOON 认为雾滴在空间中呈现空心锥式的分布，但靠近喷头处雾滴分布的空心特征不明显。这与 JEONG 等[52]认为的雾滴集中喷射在喷头周围，在空间中的分布更类似于实心圆锥有着明显的不同。对于雾滴的空间分布还需要进行试验研究。

目前射流式两相流喷头普遍采用了文丘里管作为内流道，这种管道先收缩再扩张，由于流体力的能量转化会使流管最细处的流体压力最低，液体可以在此处自发的吸入喷头内部，形成自吸效应，几乎不需要液体压力就能将液体泵入喷头。基于自吸效应，陆岱鹏等[53]基于文丘里阀芯的高气液两相速度差和负压吸水效应设计了一种两相流喷头，利用计算流体力学（Computational fluid dynamics，CFD）数值模拟分析了喷头内部的密度、压力、速度及喷头出口平面速度分布规律，并对雾化喷头的样机进行喷雾性能试验，测试喷头出气口风速和雾滴粒径大小与分布，探究不同气压对喷头雾化性能的影响规律。研究结果表明，喷头出口速度的实测值与仿真值的相对偏差在 5% 以内；Venturi 式雾化喷头的雾滴粒径细小，大部分雾滴分布在 3 ~ 65 μm 范围内，能达到烟雾级且分布均匀；在相同水压下，随着气压的增大，雾滴的 D10（第 10 百分位体积直径）、D50（体积中值直径）、D90（90% 累积体积直径）和平均粒径均呈现减小趋势。ZHANG 等[54]也设计了一种用于低压雾化，具有漩涡和自吸效应的两相流雾化喷头。该喷头能在混合室中产生气体旋流使液体在压差的作用下被吸入雾化腔。通过试验探究喷头的雾化性能，其中液相为过氧化氢。试验表明：雾滴索特雾滴直径随着轴向距离的增加呈现出先减后增的趋势。此外，研究者还对气相入口直径和气相压力对喷雾性能的影响展开了研究。索特雾滴直径先减后增的过程与气相入口直径和气相压力的变化无关，但总体索特雾滴直径与气相入口直径和气相压力成负相关。在喷头出口附近，截面速度分布呈现峰谷模式，在远离喷头的地方则是较均匀的速度分布，且不同气压下的横截面径向速度分布呈现出相似性。

此外，通过在流道内部设置挡板等方式可以控制喷头内部的流动状态，抑制不需要的流动状态，但是挡板的几何结构和相对位置难以通过流体力学理论进行直接计算，一般需要通过 CFD 方法来进行仿真分析。

张春阳[55]采用 FLUENT 模拟了射流式泡沫发生器喷头内部的两相流动规律，并在喉管前端设置圆形凸台挡板，研究不同挡板出口直径对泡沫发生器内部气液两相流流动规律及气相分布影响。数值模拟及试验结果表明：挡板可减小涡流影响范围，抑制喉管内气相在压差作用下的回流现象，使吸入室内的气相体积分数降低；而进入喉管内的气相与液相间的动压差减小，在喉管壁面剪切作用下，气液掺混区域缩小，可降低因相间扰动作用而产生的气泡破裂，使得喉管和扩散管内的气相体积分数增大。

2.2.2　气泡式气液两相流喷头

气泡雾化技术在精细喷雾方面有着广泛应用，但存在喷雾不稳定现象，且气泡式两相流喷头的不稳定机理与射流式两相流喷头的不稳定机理并不完全相同，为改善此现象，KOURMATZIS 等[56]在气泡式雾化喷头的雾化芯加入同轴射流雾化装置形成了一个组合设计，以改善喷雾分散特性，同时抑制不利的脉动现象，并测量了雾滴的轴向速度波动、波动频率、环状流尺寸和液体面积分数等与气泡流和射流质量比相关的参数。试验表明：气泡雾化系统在气泡雾化核心显示了周期性不稳定性。组合雾化过程的喷雾形态不同于气泡雾化系统，轴向波动是由气泡雾化喷芯不稳定和周围气流混合所导致的综合结果。轴向速度波动数据、速度时间序列和喷射面积分数的频谱分析证实了雾化模式的波动频率即使在增加了射流雾化装置后也不会改变，但同轴流大幅减弱了波动的强度。对典型不稳定脉动的频谱分析表明：气泡雾化的波动频率与液相邻近区域的环境混合频率间有密切的关系。面积分数分析表明：与

气泡雾化模式相比,组合设计的两个雾化核心区之间可以形成连续的气相区域,从而影响雾化性能以及雾滴分散程度。此外,当气液质量流量比低于2.7%时,射流雾化模式会显著影响出口处的液带尺寸。基本结构如图8所示。

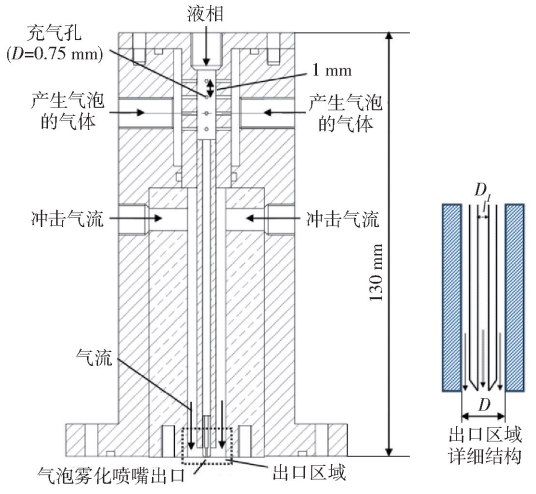

图8 气泡雾化与射流雾化结合的两相流喷头[56]

Fig. 8 Combination design of effervescent twin-fluid nozzle and jet breaking twin-fluid nozzle[56]

樊建广[57]对小流量、低能耗气泡雾化喷头的喷雾特性展开了研究。设计了3种内部结构不同的气泡雾化喷头并测量了喷头的流量特性、喷雾角、两相速度、雾滴直径等参数,对试验结果进行了理论分析。同时,对喷头内流状态进行了数值仿真,分析了内部结构对两相流混合过程的影响。分析发现喷头内部结构、气液质量流量比、工作压力等因素对喷头雾化特性具有较大的影响。喷头内部气液混合程度越高,混合越均匀,雾化质量越好。雾滴平均直径与气液质量流量比呈负相关。随着气液质量流量比的提高,雾滴平均直径减小的速度随之减缓。雾滴平均直径与工作压力呈负相关,但是减小趋势不明显。在特定的条件下喷雾存在中心速度不衰减的非典型速度分布。

2.3 两相流雾化仿真

两相流雾化仿真分析已经成为一种和试验研究同等地位的验证理论分析结果的研究方法。CFD仿真的流体理论、控制方程、数值求解方法可以应用于不同的两相流腔室内流动场景,而对特定的场景开发相应的控制方程和求解器也是一个重要的研究方向。

钱丽娟[58]对雾化射流场中的粒子运动规律进行了研究并建立了数值模拟方法。该研究建立了完整的射流雾化过程离散模型,考虑了一次雾化、二次雾化、雾滴碰撞等过程,且模拟结果和大量试验数据符合较好。首先对现有模型进行了改进完善,分析了现有模型的不足和适用范围。模型揭示出一次雾化中工况参数及液体物化性质对雾化效果的影响,得出了较大的气液质量流量比、工作压力和液体流量以及较小的喷头直径、液体表面张力和粘度有利于一次雾化效果的结论。对气泡雾化射流中的雾滴粒径沿轴向的变化趋势以及雾滴分布状况进行系统的离散建模,模拟过程揭示出粒径变化的根本原因是雾滴破碎和碰撞间的相互制约。进一步分析工况参数对二次雾化的影响,给出了韦伯数和奥内佐格数沿轴向的变化趋势,得出了气液质量流量比是其中最关键因素,喷头直径对雾滴粒径影响微弱的结论。最后针对液体物化性质对雾化效果的影响进行了研究,研究表明:气泡雾化喷头有利于雾化高粘度流体,低液体密度、表面张力和粘度有利于细化雾滴粒径、均匀粒径分布、获得较高的雾滴速度。

阿衍学等[59]利用一维漂移流气液两相模型建立了一维管道气液两相流控制方程,使用Lax-Wendroff方法求解方程组,并采用基于时间的限制器,依照上述思路开发了求解器。与传统的两相流数值模型相比,漂移模型的控制方程形式相对简单,所需的计算时间相对较少。将漂移两相流控制方程与HLL和两步Lax-Wendroff方程解法结合后能够在较少网格数量的情况下,获得较为满意的计算精度,特别是对于复杂的两相流仿真计算。

独立开发计算流体力学控制方程和求解方法对研究人员要求较高。通用计算流体力学仿真软件对精度要求不高的场合或者相对简单的问题可以直接使用通用软件中预设的模型和求解方法进行模拟仿真[60],使用最多的通用仿真软件有Fluent、CFX、COMSOL,大量的研究人员借助这些软件开展仿真分析研究。

李淑江等[61]利用Fluent对两相流喷头的雾化性能开展了仿真模拟与试验研究。研究者以空气和水为介质,采用Fluent模拟喷头雾化过程并以试验验证仿真结果。以流道扩张角为研究对象,通过调整气相压力、气液质量流量比来探究其对喷雾效果的影响。研究结果表明:随着流道扩张角的增大,雾化质量随之提高,但当流道扩张角过大时,也会影响雾化效果;此外,喷雾效果也受气压、气液质量流量比的影响,随着气压、气液质量流量比的增大,雾滴粒径变小,雾化性能更好。王亚峰[62]在一次雾化模型中,对液膜模型和一次碎裂模型进行了优化,并将两种模型的计算结果与试验值对比,发现优化后的表面波模型能够更准确预测液体一次碎裂后的雾滴索特雾滴直径。采用Fluent对二次雾化过程进行了数值模拟,得到了内混式两相流雾化喷头下游的雾

滴粒径、雾滴速度等参数的分布特点，后续试验结果与二次雾化的模拟结果吻合很好。仿真结果表明，气液质量流量比对射流场中速度的影响相比液体流量更加显著，雾滴粒径沿轴向距离的变化是一个先减后增的过程。后续试验中研究者以水和空气为介质，液体流量的范围为 10 ~ 20 L/h 的工作条件下对内混式两相流雾化喷头的流量特性、液相碎裂形态、喷雾锥角、喷雾粒径及尺寸分布等特性进行测量，证实了在相同气液质量流量比下增加液体流量或在相同液体流量下增大气液质量流量比均会加剧液体碎裂，雾滴粒径变小，雾化效果变好，与二次雾化过程的仿真结果吻合。

王耀荣[63]和杨瑄[64]选定了流体体积分数法(Volume of Fluid，VOF)多相流模型和剪应力传输 $k-\omega$ 湍流模型(Shear Stress Transport $k-\omega$，SST $k-\omega$)进行仿真研究。内部云图显示，液体流量不变时，气液质量流量比与喷头内部压力、速度、湍动能、湍流粘度梯度范围呈正相关，气体流量是影响喷头内部速度和湍动能的主要因素。气液质量流量比不变时，液体流量和液体出流面积、压力梯度范围和出口处湍流粘度呈正相关；此外，液体流量不变时，气液质量流量比和喷头中心轴线上的压力和速度呈正相关。气液质量流量比不变时，液体流量和混合室内中心轴线上的速度呈正相关。在小气液质量流量比时，液体流量和中心轴线上的速度呈正相关，而在大气液质量流量比时则呈负相关；液体流量不变时，气液质量流量比与各截面上的压强、气相体积分数、压力、速度、湍动能呈正相关。而气液质量流量比不变时，液体流量与各截面气相体积分数、压力和湍流粘度呈负相关，在出口处压力达到最小值，但仍略高于大气压。

宋连敏[65]针对两相流文丘里式喷头的节流特性以及流量测量展开了研究。从节流装置中的压降变化特性着手，应用 Fluent 进行数值模拟并结合相应试验对两相流文丘里式喷头的节流特性进行研究。使用 Mixture 混合物多相流模型对流动特性进行了模拟，模拟结果表明：两相流喷头的压降比单相流大的多，其中一相流量不变，增加另一相的流量，喷头的压降变大；喷头节流比越小，压降变化越明显；两相流流经喷头喉管时，流速激增，折算气速和折算液速在管道横截面上由外向内逐渐变大。开展了不同喉部直径、不同气液流量下的试验测试，试验发现表征两相流压降参数的分气相折算系数与洛-玛参数、气体弗劳德数、工作压力、喷头节流比有关，进一步给出了喷头静压降计算式，与经典文丘里压降相关式进行对比，分气相折算系数均方根误差最小为 0.103、0.073，并根据压降计算式，提出单节流装置压差波动计量和双压差计量两种计量方法，实现两相流的不分离在线计量。

一般来说，对于复杂的两相流喷嘴流道结构直接进行理论分析并得到定量结果是十分困难的，只能通过大致分析得到一个定性的结论。CFD 分析能够很好地辅助这种复杂结构的分析和设计，能够在一定精度上模拟出喷头内部的流动状态以供设计人员进行参考和优化设计。因此有大量的设计人员借助 CFD 方法来研究复杂流道结构内的两相流流动状态，陈文义等[66]在喷头上安装了螺旋叶片并利用 VOF 多相流模型进行了数值模拟计算，得到了速度、压力和湍流动能等流场分布规律，流道的基本结构如图 9 所示。研究结果表明：叶片导流作用导致喷头内的旋流加大，动能消耗增加，但避免了普通喷头在混合室内的漩涡现象，且提高了气体进入喉管的吸入量；有螺旋叶片的喷头在气泡发生喷头内部会形成比普通喷头更强的负压，吸入更多空气；带有螺旋叶片的喷头喷出的雾滴具有一定的角速度，散射程度较大，这对气液两相的能量交换、气泡的生成有利，提高了气液混合率；在喷头中段，螺旋喷头的气液混合效果要明显优于普通喷头，已经趋于均匀分布，因此可以适当地缩短喉管段的长度，减少不必要的能量和材料消耗。

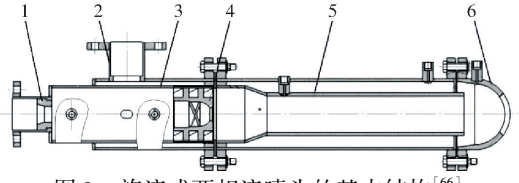

图 9　旋流式两相流喷头的基本结构[66]

Fig. 9　Structure of swirling flow twin-fluid nozzle[66]

1. 中心进液口　2. 测向进气口　3. 混合室　4. 旋流器　5. 稳定段　6. 喷头

黄启龙等[67]针对旋流式两相流喷头进行了试验研究和数值模拟。与传统旋流式两相流喷头不同的是，该喷头在旋流段后部通过一定数目的小孔引入气体形成二次进气过程，基本结构如图 9 所示。利用 VOF 方法对喷头内两相流动过程进行了数值模拟，描述了喷头中两相流的填充过程，得到了喷头的压力、速度分布和雾化角。进一步在试验中测量了不同工况下的雾滴粒径和喷头的雾化角，验证了各段的压降分配方案，并与仿真结果进行了比较，二者吻合较好。上述结果表明，该喷头产生的雾滴粒径在 53 ~ 60 μm，雾化角与气液质量流量比或流量呈正相关，此外特制的内外嵌套式旋流器可使射流厚度较为均匀。

程修月[68]对拉瓦尔式两相雾化喷头进行了数

值模拟研究。首先运用流体力学理论、喷雾学理论、雾滴破碎理论、雾滴表面波破碎机理,建立了三维拉瓦尔气液两相流喷头的模型,并运用该模型进行了喷头内、外流场的数值模拟计算,分析了不同流体参数和结构参数下喷头内、外流场的湍流动能、速度分布以及两相分布的规律。仿真结果表明,两相流喷头内部的喷头阀芯能够产生超音速气流,对增大两相速度差有显著效果,有利于雾化性能的提高,相同条件下两相流喷头在雾化性能和效果上优于单相喷头。进一步分析了不同气液流量对索特雾滴直径和分布情况的影响,试验结果表明,只改变单相流量,雾滴粒径与气相流量呈负相关,与液相流量呈正相关,且气液流量接近时雾滴粒径会增大。喷头内的流道截面对喷雾效果有一定影响,当截面为正六边形时雾化效果最好。郭涛等[69]采用 CFD 方法研究了气泡式曝气喷头,并在仿真模型中改变了喷头直径、混合腔最大直径、混合腔长度等模拟不同参数下喷头的两相流湍流混合效果,喷头基本结构如图 10 所示。模拟结果表明,影响湍流混合效果的因素从大到小依次为:气液混合出口直径、扩散段流道直径、后混合腔体长度、前混合腔出口直径、后混合腔出口直径、后混合腔体最大直径、前混合腔液相入口直径。对气泡式曝气喷头主要结构参数进行单因素模拟优化,结构优化后设备内部流体混合更加均匀,曝气效果更优。

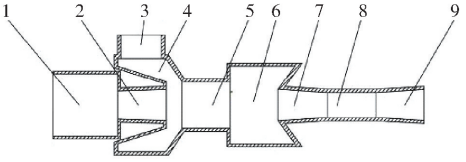

图 10 气泡式曝气喷头的基本结构[69]

Fig. 10 Structure of effervescent aeration nozzle[69]

1. 进水腔 2. 扩散腔 3. 进气腔 4. 吸气腔 5. 一级缓冲腔 6. 混合腔 7. 渐缩腔 8. 二级缓冲腔 9. 渐扩腔

单一窍[70]分别采用数值模拟和试验研究的方法对内混式两相流喷头进行了雾化特性研究。搭建了一套两相流试验平台,并设计了相应的喷雾试验测试系统,确定了需要测试的性能参数及试验工况。试验中通过数码相机拍摄了不同工况下的喷雾锥角、雾滴速度及粒径成像图,并通过图像处理软件对图像进行处理分析。数值模拟和试验研究得到了雾化锥角随流量、压力等物理量的变化规律,以及一定流量不同压力下雾滴速度及粒径的变化规律及均匀分布情况。

唐毅[71]对气液两相流喷头的数值模拟方法进行了研究。以柴油和空气为介质,通过数值模拟的方法,系统研究了雾化喷头内流动特性以及单个气泡在喷头内的运动行为。首先建立喷头下游的雾化模型,根据喷头截面液膜厚度和液膜速度计算得到一次雾化雾滴粒径,并与下游雾化模型进行耦合计算,获得了喷头下游场喷雾分布特征。仿真结果表明:液相离开喷头时滞留时间较短,但随着轴向距离的增大,液相与空气作用破碎为小雾滴悬浮在空气中,雾滴滞留时间变长,提高了雾化效果;随着轴向距离的增大,雾滴的平均粒径尺寸和雾滴碰撞率呈先增大后减小的趋势,而雾滴的轴向速度逐渐减小,径向速度逐渐增大。

2.4 雾化性能试验

对于两相流喷头的喷雾性能检测试验一般分为对两相流喷头内部流态的检测和对两相流外部喷雾形态的检测两方面。一般来说,有 3 类方法可用于对两相流喷头内部流态的检测:直接法、间接法、侵入法。按照检测基本原理划分则有超声式、电容式、光学式等检测方法。如今主流的各种检测方法各有其优劣,RAHMAN 等[72]对测量两相流的先进试验技术进行了总结。当两个关闭阀门可以保持同步时,机械式阀门控制技术是一种更可靠且易于实施的检测方法;在线电气过程层析成像法将成为未来评估多相流中空隙率的重要测量工具;高速视频和光学测量也是非常可靠的非侵入式体积分数和流动模式测量技术,尤其是在测量非封闭多相流流动状态时有较好的效果;不同类型的光学测量能够准确提供气液两相流的流动结构,从这些光学测量中获得的信息可以与一些研究人员提供的流动转换图和相关信息相协作。但是在使用各检测方法前应确定检测方法在被测喷头上的适用性。TAN 等[73]总结了超声多普勒技术在两相流参数检测中的应用。该技术以一种非侵入性的方式提供了多相流速的时空分布。其可通过测量流动结构、检测气液界面位置、测量多相流变学来揭示多相流体动力学,这些功能有助于流体动力学研究和建模,提高工业安全性和可靠性,协助生产估计以及过程控制和优化。

岳伟挺[74]提出了一种基于空隙率来测量气液两相流总流量和干度的双参数测量模型,并进行试验分别测量了水气两相流与油气两相流的总质量流量、干度和液相质量流量,分析了误差的原因并与其它流量测量模型做了对比;然后进一步将文丘里管与电容层析成像装置结合,开发了组合式两相流流量测量装置,实现了油气两相流的实时测量并与其他测量方法作了比较。梁法春等[75]对气液两相流喷头的流量计量问题展开研究。研究提出一种具有多个分流喷头可实时测量气液流量的新型取样器结构。取样器可以根据分流比和取样流体流量来确定

主管路气液流量。进一步在气液两相流试验环道上开展试验测试，试验中的流型包括波浪流、段塞流及环状流等多种流动状态。结果表明，在试验范围内气液相分流系数接近理论值 0.25，主要取决于分流喷头的数目，且不受流型、气液流速等参数波动的影响，流量测量误差在 ±6.0% 范围内。

两相流外部喷雾形态的检测主要是靠光学系统和图像处理技术相结合来完成的。光学系统可以利用多种原理来获取喷雾形态的光学图像，如激光、光学衍射、光电二极管等技术。杨立军等[76]利用马尔文激光粒度分析仪对两相旋流喷头的雾化特性展开了研究。分析了该型喷头的工作特点，研究了不同供水压力、供气压力及气液比对喷头雾化特性的影响。研究结果表明，喷头的雾化细度与气液比呈负相关；该型喷头的雾化细度、喷雾锥角与供水压呈正相关，供水压力与供水流量呈二次函数关系，雾化气压力增加，供水流量减小；该型喷头的雾化细度与气压呈正相关。MLKVIK 等[77]使用特殊的光学衍射系统（Malvern Spray tec）针对不同结构的内混式两相流喷头雾化性能展开了研究。对 Y 型雾化喷嘴、外气内液型喷嘴 OIG、外液内气型喷嘴 OIL 和连续流雾化器 CFT 进行了试验研究，基本结构如图 11 所示。试验研究发现，气泡雾化喷头的性能受进气口布局的影响很大。OIL 喷头有最佳的喷雾质量（索特雾滴直径约 72 μm）和最高的效率（0.16%），而 OIG 喷头工作不稳定且喷雾质量较差，但这两型喷头均对液体粘度很敏感。Y 型喷头在整个液体粘度范围内喷雾性能都比较稳定，但喷雾质量和效率都明显低于 OIL 型喷头。CFT 喷头在进气量较低时表现不佳，在粘性燃料雾化时使用潜力很低，但在需要精细雾化低粘度液体的情况下其应用潜力较大。

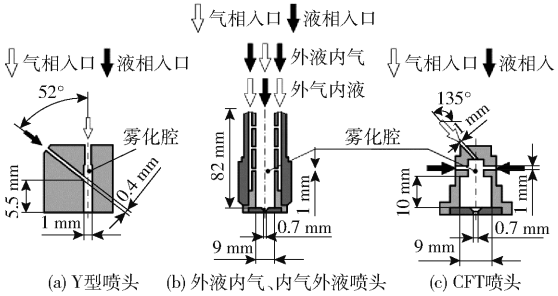

图 11　4 种内混式两相流喷头的基本结构[77]

Fig. 11　Four types of internal-mixing twin-fluid nozzle[77]

RHO 等[78]使用相位多普勒粒子分析仪 PDPA 研究了旋流对两相流射流喷雾特性的影响，并快速分析喷雾的全局和局部特性。PDPA 系统每次测量会在 30 s 内进行 1 万次数据采样，还可以同时测量雾滴尺寸和速度。此外还安装了三维自动遍历系统协助测量。通过比较所有情况下的喷雾半宽度、雾滴尺寸和湍流强度，旋流对于液体雾化效果有着较为明显的影响。在最大涡流的情况下，由于离心动量的作用喷雾的喷幅达到了最大值，这导致湍流强度显著增加 50% 以上，与非涡流喷雾相比，索特雾滴直径减少了 43% ~ 52%。因此，对于较大的涡流，由于其离心动量而产生的较高的径向分散现象往往会降低索特雾滴直径，并最终导致有利于雾化。

在获得了喷雾形态的光学图像后，需要借助图像处理技术对喷雾图像进行预处理，提取喷雾特征，并最后得到喷雾性能的各个参数，比如雾滴粒径、雾滴粒径分布、雾滴空间分布、喷雾角度等。但对于不同的喷头和不同的喷雾性能参数，图像处理过程选择的方法和程序不相同。潘志成[79]对使用数字图像处理技术提取气液两相流中气泡与雾滴尺寸的方法进行了研究。该方法采用中值滤波、图像线性变换增强、大津法二值化、Canny 算法边缘提取等步骤获得气泡形状特征参数。采用基于曲率计算的凹点匹配与圆周拟合的重叠气泡分割与轮廓重构算法减少了重叠气泡的测量误差。研究进一步设计开发了颗粒（气泡、雾滴）粒径分布图像测量程序，具备图像预处理、粒径分布统计测量、图像批量处理等功能。试验结果表明：该算法不仅能够有效地从图像中提取轮廓清晰完整的气泡，还能够进一步获得气泡尺寸分布。

喷头雾化试验获得的两相流特征的时间序列数据，单纯地从时域角度进行分析难以得出清晰的关系，将数据转化到频域能得到一些额外的信息。杨晓凯[80]针对气液两相射流雾化的特性展开了系统性的分析研究。在可视化监测平台上记录气液射流雾化喷头的雾化场宏观状态及过程。为探明雾化场形成过程中的演变规律，研究者通过声发射装置对雾化场传递到靶材的声发射信号进行采集，利用时域和频域的傅里叶变换得到雾化场冲击性能规律的表征。

为了适应气液两相流喷头同时需要气液两相且压力需求较高，气液流量要求较为精确的要求，王喃喃等[81]设计了一种喷雾系统试验台架，其基本结构如图 12 所示。

试验台架的喷杆喷头搭载装置由“Π”型结构支架、可调整高度的顶喷喷杆和可调整侧喷间距的侧喷喷杆以及喷头固定装置组成；液泵采用隔膜泵；风机选用罗茨鼓风机；流量阀选用高精度流量阀，并在该验台架气液供给系统中设置了稳压罐。该试验台架主要用于研究施药系统喷雾流场的空间分布规律和雾滴沉积分布规律；检测不同喷头类型组合与空间配置下靶标作物不同部位的雾滴沉积率，对比分

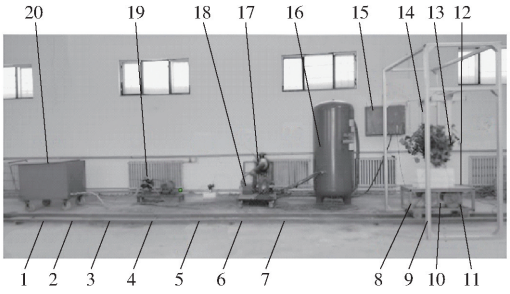

图 12 “Π”型喷雾系统试验台架[81]

Fig. 12 “Π” shape atomization test system[81]

1. 导轨 2. 输液管 3. 回水管 4. 电机 5. 高压隔膜泵 6. 罗茨风机 7. 输气管 8. 传送装置 9. 喷杆固定装置 10. 链传动 11. 电机 12. 载重板 13. 靶标作物 14. 喷头 15. 控制箱 16. 储气罐 17. 消声器 18. 变频器 19. 隔膜泵 20. 药箱

析不同配置状态下喷雾系统的雾滴穿透能力、沉积分布规律和雾化流场空间分布规律,为合理选取最佳的喷雾模式和喷头配置方案提供依据,通过加装高速摄像机以及图像处理工具,还可进一步拓展其功能。

在农业领域中,雾化喷头的飘失性能是另一个需要关注的方面,但现有两相流喷头的飘失性能都没有明确数据支持。如何测量喷头的飘失性能也是一个重要的问题。SZOBOSZLAY 等[82]针对喷头在风洞中的喷雾飘失测量方法,研究测试了两相流喷头的液滴产生情况,研究了风向与喷雾方向同向时喷头的液滴飘移情况。研究结果表明:喷头产生的雾滴 D_{10}值较低,尺寸小于 100 μm 的液滴所占比例相当大,各种工况下液滴尺寸差异较大,因此存在一定的飘移风险。根据风洞中的飘移测量结果,只有在风速为 2、4 m/s 时改变初始试验条件,以相对覆盖率表示的喷雾沉积量才会明显减少。在风速为 4、6 m/s 工况下,使用两相流喷头难能达到预期的减少飘移效果。

袁辉等[83]针对气液两相流喷头的特征结构对雾化性能影响展开了研究,其基本结构如图 13 所示。进行了不同特征结构参数下的雾化效果试验。试验结果表明,气孔数量、孔径和偏移角,液孔的孔径、出口形式均对两相流喷头的雾化性能有很大的影响。体积中值直径 D_{50}与气孔直径、气孔数量呈负相关,与液孔直径呈正相关;气孔偏移角对 D_{50}的影响最大,很大程度上改善了喷头的雾化特性,使喷头在低进气量下也能产生 D_{50}小于 10 μm 的雾滴;雾滴中值粒径与出口宽度呈正相关,宽度 D 小于 0.7 mm 时,粒径变化趋势不明显,且宽度太小易被颗粒杂质堵塞,在 D 大于 0.7 mm 后,D_{50}随着出口宽度迅速变化;角度的变化对 D_{50}的影响不明显,但对雾化宽度和射程有影响,角度、雾化角与喷射距离呈负相关。

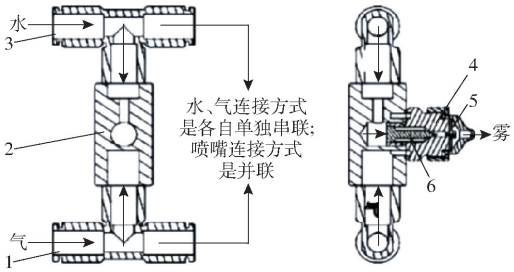

图 13 两相流雾化喷头结构示意图[83]

Fig. 13 Structure diagram of twin-fluid nozzl[83]

1. 进气快接头 2. 大型腔 3. 进水快接头 4. 小型腔 5. 混合室 6. 内置节流杆

NGUYEN 等[84]对使用两相流雾化技术产生细雾滴的方法展开了深入研究。研究者使用内混式雾化喷头和新型预膜式雾化喷头对喷头的精细雾化过程进行了试验研究。当气液质量流量比小于 1 时,内混式雾化喷头产生的雾滴体积中值直径低至 10 μm;预膜式雾化喷头在气压低于 1 MPa 的情况下也能达到与之相当的性能。针对这两种雾化喷头,研究者提出了雾滴 D_{50}与雾化器几何形状、工作条件的半经验公式。

2.5 雾滴粒径统计表征方法

当大量的雾滴组成了雾滴群时,就不仅需要考虑单个雾滴的粒径,还需要考虑雾滴粒径的分布情况。雾滴分布是指在一次喷雾中,雾滴直径的尺寸范围和分布情况。根据 ISO5681《植物保护设备词汇表》[85]规定,液力喷头的雾滴群采用体积累积分布曲线表示。曲线的 x 变量分别为雾滴直径,y 变量为雾滴体积累积值,该曲线对雾滴直径求导就可以得到体积分布密函数,表征了各直径雾滴在整个雾滴群中所占的比例。

此外,在研究雾滴群粒径指标时,也不能只考虑雾滴群的粒径分布情况,还需要对雾滴群整体的平均直径进行刻画,描述雾滴群粒径的平均状况[86]。

2.6 应用研究发展现状

两相流雾化喷头产生的雾滴粒径非常小,有效的提高了燃耗效率,因此在燃料雾化领域中有着广泛的应用。WATANAWANYOO 等[87]设计并开发了一种用于燃料雾化的两相流喷头并进行分析,分析结果显示:两相流雾化器产生的雾滴粒径范围在 17 ~ 200 μm 之间,可用于产生气溶胶。BARRERAS 等[88-90]设计了用于燃料雾化的大容量多孔两相流喷头并对雾化过程展开了试验研究。试验数据显示,喷头即使在气液质量流量比较低时也能产生细雾滴。此外,BARROSO 等[89]还对内混式两相喷头喷雾的分析与预测展开了研究。

此外，两相流雾化喷头也广泛应用于消防安全领域，由于两相流雾化喷涂产生的雾滴粒径较细，在接触到火源后会快速吸热蒸发，带走大量的热量，灭火效果较好。GUPTA 等[91]针对两相流雾化喷头灭火系统的灭火特性展开了试验研究。研究表明，氮气作为雾化气相其灭火效果更好；由于氧气的稀释和由水蒸气引起的惰化，薄雾吸收了 25% ~30% 的燃烧热量。马成臻[92]对使用气泡雾化喷头产生细水雾的灭火系统进行了研究。试验研究表明：气泡雾化细水雾灭火系统能够形成稳定的气液两相流，形成用于灭火的理想雾滴粒径尺寸分布。

两相流雾化喷头在除尘、颗粒沉降等领域也有着广泛的应用。李璞伟[93]对气液两相流喷头在矿井喷雾除尘领域中的应用进行了研究，结果显示气液两相流喷雾降尘系统的除尘率比高压喷雾降尘系统有显著提高。

两相流雾化喷头广泛应用在表面涂覆等领域中，两相流喷头产生的雾滴粒径较小、喷幅较宽等特性非常适合表面涂覆工作。江海[94]研制了单喷头内雾化喷涂阀用于选择性涂覆并进行了试验测试。结果显示，单喷头内雾化喷涂阀的涂覆一致性较高，喷涂一致性误差在 ±5% 范围内，喷涂效果较好。

两相流雾化喷头还可以应用于含尘液体的洗涤。RAJ 等[95]对使用两相流雾化喷头的喷雾柱颗粒收集器的收集效率进行了理论研究，并开展了试验验证。结果发现，颗粒收集效率在很大程度上取决于喷雾液滴大小、气体流速和液体流速。

两相流喷头也可以用于辅助沉积结晶制造高纯度、结构特殊的材料。WANG 等[96]针对预膜式两相流喷头辅助沉淀法制备纳米晶 HNS(2,2,4,4,6,6-己硝基苯乙烯)过程及其表征展开了研究，结果表明纳米晶体 HNS 对冲击和震动刺激的敏感性低于合成 HNS。

气液两相喷头在农业领域中的应用和其他领域有着诸多相同点和不同点，相同点在于其利用高速气流将液体雾化成细小均匀的雾滴，提高喷洒或涂覆的均匀性和效率。在农业中，它用于农药和肥料的精准喷洒，而在其他行业，如涂装、冷却和除尘中，它用于均匀分布涂料、冷却液或水，确保高效覆盖和减少浪费，同时提高整体作业的效果和效率；而在不同应用领域的具体区别详见表 2。

两相流雾化喷头在农业领域中有着广泛的应用前景，主要应用于植保领域中。其主要趋势是先应用于设施植保领域，再逐步扩展到其他农业植保领域中。欧鸣雄[97]发明了一种气液两相流雾化喷头。该喷头由喷头芯体、外部套筒和雾化体组成，具有流量小、喷雾压力低的特点，可以提高植保机械作业效率和农药利用率。喷头的雾滴体积中值直径可以由设计流量和喷头的部分几何尺寸参数决定，代入相应的拟合式后可以预测雾滴粒径。

表 2　两相流喷头在不同应用领域具体区别

Tab. 2　Different characteristic of twin-fluid nozzles in different areas

项目	农业应用	其他应用
功能和目的	主要用于病虫草害防治、施肥，生成细小、均匀的雾滴覆盖作物，有效提高药肥利用率	主要用于涂装、灭火和除尘等领域，需要产生均匀涂层；快速降温；有效捕捉粉尘
工作环境	多用于户外环境，需适应各种气候条件，具备较强的抗风能力，确保雾滴受风影响较小	多用于工业车间和特定生产环境中，强调喷雾稳定性，能够处理不同的工作条件和材料特性
喷洒物质	农药，肥料和除草剂	涂料、冷却液和水
环境影响	需考虑药剂对环境和人体的潜在影响、需最大程度减少药剂漂移	需符合环境保护和安全标准，减少有害物质排放
雾滴大小和均匀性	要求雾滴细小均匀，减少浪费和飘移，雾滴通常在 50 ~ 100 μm	需要极高的均匀性和精度，雾滴直径在 5 ~ 50 μm 之间
喷洒范围与覆盖率	需具备大面积喷洒能力，覆盖范围广	喷洒范围小，但覆盖率高、控制精准
喷洒压力和流量	需要较高的压力和流量，通常气相压力在 3 ~ 10 个大气压，以确保对作物的大面积均匀覆盖	要求压力和流量的精细控制，气相压力通常在 2 ~ 6 个大气压以确保均匀喷雾
调整能力	大范围调整工作参数以适应不同作物喷洒作业	精细调整工作参数以确保准确、一致的喷洒

李雪等[98]开发了一种应用于设施农业植保作业的气液两相喷头，并对喷头进行了喷雾特性仿真与试验验证，基本结构如图 14 所示。该喷头的雾滴粒径测试结果表明，在 0.05 MPa 的恒定水压下，雾滴粒径与气压呈负相关；在常用工作气压下，喷头喷射距离 1.6 m 处，粒径在 65 μm 以下的雾滴比例大于等于 85%，雾滴体积中值直径小于 50 μm。试验结果表明，该喷头雾化性能优异，可获得烟雾级雾滴，非常适用于在设施农业中进行植保作业。

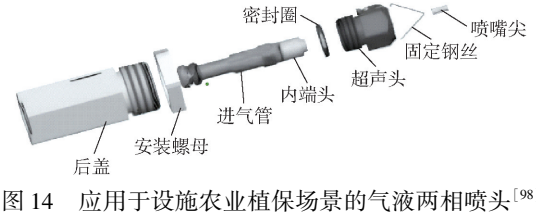

图 14　应用于设施农业植保场景的气液两相喷头[98]

Fig. 14　Twin-fluid nozzle used for installment corp protection[98]

COMBELLACK 等[99]针对加入助剂后气液两相

流喷头与普通扇形喷头的雾滴飘失特性差异展开了研究。首先在风洞中测量了一种新型两相流喷头和低压扇形喷头的喷雾飘失。试验结果显示,在风速为 4.2 m/s 的情况下,使用不同助剂的两相流喷头雾化飘失情况均随着流量的减少而增加。试验比较了各种不同助剂之间的飘失特性差异,结果显示乳化油佐剂比乙氧基化醇表面活性剂产生的飘失更少,这与雾滴的光谱数据基本一致。此外试验结果还显示空气中携带的夹杂物并不会影响飘移特性。

TAIWO[100]针对两相流喷头在精密空气辅助农药施用中的应用展开了研究。设计制造了两相流喷头并研究其雾滴分布模式,以实现精密空气辅助施药。试验中在保持气相压力不变的情况下研究了喷头在不同液相压力和流速下的雾滴分布模式,并进一步在保持液体流速和压力不变的情况下,测定了不同气压下的喷雾分布模式。上述试验表明,通过控制液体和空气压力的组合,可以实现液体流量和喷雾分布模式的独立控制。此外,两相流喷头还在固定空气压力的情况下实现了 1.414∶1的流量调节比,对应于液体流量为 35.34 ~49.98 L/min,即使在空气压力低于 0.5 MPa 的低气压状态时,研究者也观察到了均匀的喷雾分布模式。尽管分布模式的宽度不受气相压力变化的影响,喷雾宽度却与液体流量有着直接的关系。

在食品工业中两相流雾化喷头也可以用来进行液体喷涂,STÄHLE 等[101]针对喷射不同粘度食品液体时两相流喷头的喷雾性能和效率展开了研究,表明在使用能量密度 EV 表示索特雾滴直径时,呈多项式关系。

3 开放性问题与技术前景

两相流喷头通过同时引入气相和液相,使两者在喷头内部混合形成两相流,并从喷口喷出。与压力式和离心式喷头在液相离开喷头后才与气相混合的工作原理不同,两相流喷头在内部即完成了气液掺混。

射流式两相流喷头中,药液通过管路经过节流阀进入高速气流流道中,与气流混合形成气液两相流,并从喷头喷出。这样产生的喷雾雾滴粒径非常小,能够较好地满足受控条件下雾化作业的粒径需求。

3.1 气液两相喷头研究开放性问题

3.1.1 两相流雾化理论尚待完善

现阶段对气液两相流喷头雾化机理的研究以单一、宏观的研究某几个自变量与因变量之间的定量关系为主,而对于整体雾化过程的微观过程却鲜有系统、完整、深入的物理模型。此外,对两相流雾化过程微观机理的研究中,一般会将雾化过程分为一次和二次两个雾化过程分别进行研究,但是对两次雾化间物理过程却鲜有研究,且这种将雾化过程一分为二的研究方法本质上是对连续物理过程的一种近似,需要一种从整体上、在微观层面上对两相流雾化过程进行描述的物理模型。此外,绝大部分描述两相流雾化过程的物理模型都是使用连续性方程进行研究,很难使用基于非连续性方程的有限元方法进行分析,导致难以使用主流的计算流体力学研究方法对这些模型进行验证,对气液两相流雾化过程的模拟只能通过基本的离散的一般性流体方程来进行有限元分析,这与实际的雾化过程相差较大,只能作为一种近似计算参考,而建立基于离散性方程的两相流雾化过程模型则是需要解决的问题。

3.1.2 多相流雾化数值模拟改进

基于有限元分析的计算流体力学仿真已经成为两相流喷头雾化研究中的一个重要方向。基于 VOF 等多项流模型能够较好地对两相流雾化过程进行模拟,但这一仿真方法也具有一定的局限性。首先,各单元体的两相流仿真是基于两个单相流方程组的仿真过程,单次计算量相比单相流模型要大得多,显著延长了仿真时长,且两相流模型的计算残差相比单相流模型要大得多,仿真过程中非常容易出现计算发散的情况,导致计算结果的失真。此外,对雾滴粒径分布的仿真是通过两相流模型转换成离散相模型得到的,这种转换模型对液相破裂、雾滴形成的过程仿真效果不好,仿真方法亟待改进。

3.1.3 两相流喷头构型创新设计

在农业领域中用于施药的两相流喷头一般为文丘里式喷头,是射流式两相流雾化喷头的一种。气体在整个文丘里管内的流体总压(总机械能密度)保持不变,收缩通道内流体的压力能先转化为动能,通过喉管后动能再转化回压力能。高压气体的压力能并没有完全转化成气体的动能,能量利用率不高,导致喷头的喷雾性能受到影响;另一方面,由于气液两相流喷头需要高压高速气体才能驱动喷头雾化液体,但大功率、大流量的空气压缩系统有着体积重量大、系统复杂等特点,无法在移动、载重和空间有限的场景使用。目前有学者提出使用拉瓦尔喷管代替文丘里喷管,以优化两相流雾化喷头扩张段中的气体流动状态,提高压力能的转化效率,降低压力需求,减小供气系统的体积和成本,提升气液两相喷头在低压、低能耗下的雾化性能,更有利于在精准施药设备上使用,在未来可能成为一个重要的研究方向。

3.1.4 完善喷雾性能评价标准

在诸多对气液两相喷头的应用研究中,对喷头

性能主要评价依赖于喷头雾滴粒径谱的测试指标数据。但农业植保领域中，气流、雾滴、植株 3 个研究对象存在着复杂的相互作用与耦合效应。如果仅从喷头雾滴粒径分布的测试数据考虑植保气液两相流喷头的喷雾性能是片面的，因此对于气液两相流喷头在植保作业中的性能评价不应该只考虑喷头雾化性能的客观数据，还需要考虑雾滴在植株上叶片上的沉积效果。不仅需要在试验室中采集与雾滴相关的数据，更需要在实际作业环境中进行试验，采集雾滴在植株叶片上的沉积效果，才能完整的反映出气液两相喷头的喷雾性能。

3.2　气液两相喷头在精准施药中的应用前景

气液两相喷头的喷雾粒径细，药液附着力强，避免过量施药，节约农药成本，非常符合我国“双减”政策的减药增效药需求，实现“更少药量、更均匀覆盖、更少飘失、更佳防效”[102]，这些特点使得气液两相喷头在精准施药作业中具有重要价值。

两相流雾化喷头现在主要应用于设施植保领域，由于具有产生的喷雾粒径小、空间分布均匀、弥散性强等特点，非常适合于设施植保。随着未来低压两相流雾化技术的成熟，可以极大缩小两相流雾化喷头所需的空压系统的体积，使得两相喷头可在一些移动式植保装置上使用，如高地隙喷雾机、风幕式喷雾机等装置。进一步集成传感器和控制系统能够形成智能低压两相流雾化喷头，这种喷头进一步强化了喷头对雾化参数的控制能力。这种喷头通过传感器和控制系统的控制，可以根据不同的需求和条件对喷雾粒径、喷雾角度和喷雾流量等参数进行实时调整，以适应各种作物类型、病虫害种类和施药环境，确保药液精准喷洒。

气液两相喷头在精准施药中的应用前景在于可涵盖更多植保场景：①果树植保：果树由于树冠较高且郁闭，传统喷雾方式难以均匀覆盖。气液两相喷头通过高效雾化技术，可以均匀覆盖果树的叶片和果实，提高防治效果，减少农药浪费和环境污染。②设施植保：温室大棚内环境封闭，需精确控制施药量以避免过量使用农药。气液两相喷头能在有限空间内精准施药，提高农药利用率，减少温室内的药物残留和对工人的健康影响。③高价值经济作物施药：如花卉、草莓等高经济作物，对农药使用量和喷洒效果有较高要求。气液两相喷头可以精确控制农药用量，确保均匀施药，减少药物残留，提升作物质量和市场价值。④抗药性管理：气液两相喷头可以实现精确剂量控制，有助于科学管理和轮换使用不同农药，延缓抗药性的发展。

4　展望

（1）气液两相流雾化是一种借助气体来协助液体雾化的雾化方式，气液相间相互作用所产生的切应力是驱动液体破碎形成细小雾滴的根本原因。气液两相流雾化喷头的雾化性能都与气相参数如气液质量流量比气液质量流量比、气相压力高度相关，气液质量流量比、气相压力越大相应的雾滴粒径会越小。但提高气液质量流量比和气相压力会对空气压缩系统提出更高的要求，间接增加了两相流雾化喷头的使用成本。因此，优化两相流雾化喷嘴在低压工作条件下的雾化性能并扩展两相流雾化喷头的效益边界成为未来两相流雾化喷头研究的重要方向。

（2）两相流雾化喷嘴主要依靠混合腔对液相进行雾化，收缩扩张式混合腔和圆柱形混合腔是两种较为常用的混合腔结构。混合腔内部几何结构对雾化喷头喷雾性能有比较明显的影响，混合腔的长径比越大雾化性能越好；混合腔内部的几何结构越复杂，两相流态越紊乱，有利于减小雾滴粒径。除了混合腔结构外两相流喷头还会应用一些局部设计来优化雾化效果，如导流叶片、预掺混结构、旋流入口、气泡射流组合设计、变结构喷嘴等，形成新型两相流雾化喷嘴 。此外，两相流雾化喷头的结构相对复杂，加工难度较大，在设计喷头时需要对加工性进行考虑，对易加工性进行针对性优化。

（3）CFD 分析与试验验证是同等重要的研究方法，可有效协助两相流喷头雾化理论研究、喷头结构设计、喷雾性能模拟等研究工作。FLUENT、COMSOL 等软件有较为完善的多相流模型，可对喷头内部的两相流流动状态、参数进行模拟仿真验证喷雾效果，还能通过设置两相流模型转换为离散相模型完成对液相破裂、雾滴生成过的模拟，根据仿真结果改进喷头模型，对喷头进行优化设计。但多相流模型和离散相模型简化了流体动力学求解，未来开发专用于两相流雾化的精确数值模型和求解方法非常必要。

（4）在农业领域中，气液两相流雾化喷头目前主要应用于设施植保等作业环境受控的喷雾领域。设施植保是一种非常适合两相流雾化喷头的使用场景。但随着低压两相流雾化技术的逐渐成熟，空气压缩系统的体积、质量将大幅降低，使其能够应用于大田、果园等场景的植保装备上。气液两相雾化喷头可以通过独立控制气相和液相的工况，更好地解耦控制雾滴粒径谱和流量等参数，使其可根据不同的作业需求对喷雾粒径、喷雾角度和喷雾流量等参数进行实时调整，适应各种作物类型、病虫害种类和施药环境，使其具备更精准的施药能力。

参 考 文 献

[1] 傅泽田,祁力钧,王俊红. 精准施药技术研究进展与对策[J]. 农业机械学报,2007,38(1):189 - 192.
FU Zetian, QI Lijun, WANG Junhong. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(1):189 - 192. (in Chinese)

[2] 新华社. 利用率过 40%:化肥农药使用量零增长行动实现目标[EB/OL]. (2021 - 01 - 17). https://www.gov.cn/xinwen/2021 - 01/17/content_5580552.htm.

[3] 张京,宫帅,宋坚利,等. 气液两相感应式静电喷头性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(12):107 - 110,120.
ZHANG Jing, GONG Shuai, SONG Jianli, et al. Performance of two-phase gas-liquid electrostatic induction nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(12):107 - 110,120. (in Chinese)

[4] 杨学军,严荷荣,徐赛章,等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报,2002,33(6):129 - 131,137.
YANG Xuejun, YAN Herong, XU Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(6):129 - 131,137. (in Chinese)

[5] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文),2020,2(1):133 - 146.
HE Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China [J]. Smart Agriculture,2020,2(1):133 - 146. (in Chinese)

[6] LEFEBVRE A H, MCDONELL V G. Atomization and sprays[M]. CRC Press, 2017.

[7] 刘凌钊. 多功能选择性涂覆机的研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
LIU Lingzhao. Development of multi-function selective coating machine [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2018. (in Chinese)

[8] 陈斌,郭烈锦,张西民,等. 喷嘴雾化特性试验研究[J]. 工程热物理学报,2001,22(2):237 - 240.
CHEN Bin, GUO Liejin, ZHANG Ximin, et al. Experimental investigation of spray characteristics of different nozzles[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2001,22(2):237 - 240. (in Chinese)

[9] HEDE P D, BACH P, JENSEN A D. Two-fluid spray atomisation and pneumatic nozzles for fluid bed coating/agglomeration purposes: a review[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(14): 3821 - 3842.

[10] 李天华, 董广胜, 姚玉康,等. 连栋温室分段变距喷雾机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):170 - 179.
LI Tianhua, DONG Guangsheng, YAO Yukang, et al. Design andexperiment of segmented and variable distance spraying robot for multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):170 - 179. (in Chinese)

[11] WU H, ZHANG F, ZHANG Z, et al. Atomization and droplet dynamics of a gas-liquid two-phase jet under different mass loading ratios[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 151: 104043.

[12] ZAREMBA M, WEIB L, MALÝ M, et al. Low-pressure twin-fluid atomization: effect of mixing process on spray formation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 89: 277 - 289.

[13] 李若灿. 不同背压气水两相流喷嘴雾化特性的试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
LI Ruocan. Experimental study on atomization characteristics of gas-liquid two-phase flow nozzle under different ambient pressure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2016. (in Chinese)

[14] LI Z, WU Y, YANG H, et al. Effect of liquid viscosity on atomization in an internal-mixing twin-fluid atomizer[J]. Fuel, 2013, 103: 486 - 494.

[15] WACHTER S, JAKOBS T, KOLB T. Experimental investigation on the influence of system pressure on resulting spray quality and jet breakup applying pressure adapted twin-fluid nozzles[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 125: 103189.

[16] GARCÍA J A, LOZANO A, ALCONCHEL J, et al. Atomization of glycerin with a twin-fluid swirl nozzle[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 92: 150 - 160.

[17] MULHEM B, FRITSCHING U, SCHULTE G, et al. Characterisation of twin-fluid atomisation for suspensions[C]// Proceedings of ICLASS-03, Sorrento, Italy, 2003.

[18] MLKVIK M, STÄHLE P, SCHUCHMANN H P, et al. Twin-fluid atomization of viscous liquids: the effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 77: 19 - 31.

[19] TSAI S C, VIERS B. Airblast atomization of viscous newtonian liquids using twin-fluid jet atomizers of various designs[J]. Journal of Fluids Engineering, 1992, 114(1): 113 - 118.

[20] 赖厚湖. 喷孔结构偏差对喷燃部件雾化特性的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
LAI Houhu. Research on the influence of nozzle geometrical deviations on the atomization characteristics of fuel injectors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2018. (in Chinese)

[21] KHALID A, AMIRNORDIN S H, VASUTHAVAN U, et al. Spray formation in the multi-hole nozzle of twin-fluid atomizers [J]. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2020, 53(1): 75 - 81.

[22] 李洪波. 内混式空气雾化喷嘴内流对雾化效果影响试验研究[D]. 西安:长安大学,2018.
LI Hongbo. Experimental study on the influence of internal flow on atomization effects of an internal-mixing air-assisted atomizer[D]. Xi'an:Chang'an University,2018. (in Chinese)

[23] 孙春华, 宁智, 乔信起,等. 气泡雾化喷嘴泡状流喷雾特征试验与仿真[J]. 农业机械学报,2019,50(10):367 - 374,409.
SUN Chunhua, NING Zhi, QIAO Xinqi, et al. Experiment and simulation on spray characteristics of effervescent atomizer within bubbly flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):367 - 374,409. (in Chinese)

[24] WU H, ZHANG F, ZHANG Z. Droplet breakup and coalescence of an internal-mixing twin-fluid spray[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(1): 013317.

[25] ZHANG B, CHENG P, LI Q L, et al. Breakup process of liquid jet in gas film[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(5): 054702.

[26] HINZE J O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes[J]. AIChE Journal, 2004, 1(3): 289 - 295.

[27] LIU C, WU K, ZHANG Z, et al. Experimental study of the spray characteristics of twin-fluid atomization: focusing on the annular flow regime[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(12): 123309.

[28] FANG X, JIANG B, YUAN L, et al. Experimental study on atomization characteristics of gas-liquid two-phase flow nozzle and its dust removal effect[J]. Materials, 2022, 15(2): 565.

[29] KUFFERATH A, WENDE B, LEUCKEL W. Influence of liquid flow conditions on spray characteristics of internal-mixing twin-fluid atomizers[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(5): 513 - 519.

[30] CHEN B, GAO D, LI Y, et al. Experimental analysis of spray behavior and lubrication performance under twin-fluid atomization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61: 561 - 573.

[31] HAMMAD F A, SUN K, JEDELSKY J, et al. The effect of geometrical, operational, mixing methods, and rheological parameters on discharge coefficients of internal-mixing twin-fluid atomizers[J]. Processes, 2020, 8(5): 563.

[32] HAMMAD F A, SUN K, CHE Z, et al. Internal two-phase flow and spray characteristics of outside-in-liquid twin-fluid atomizers[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 187: 116555.

[33] LI G, LI C. Experimental study on the spray steadiness of an internal-mixing twin-fluid atomizer[J]. Energy, 2021, 226: 120394.

[34] LEFEBVRE A H. Energy considerations in twin-fluid atomization[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(1): 89 - 96.

[35] SOVANI S D, SOJKA P E, LEFEBVRE A H. Effervescent atomization[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2001, 27(4): 483 - 521.

[36] 毛宁. 气液多相流中气泡几何特征及动力学行为研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
MAO Ning. Investigation on geometric characteristics and dynamic behaviors of bubbles in gas-liquid multiphase flow[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2022. (in Chinese)

[37] 刘俊林, 贾首星. 结构对气泡雾化喷头临界压力的影响研究[J]. 节水灌溉,2017(8):49 - 52.
LIU Junlin,JIA Shouxing. Effect of effervescent nozzle structure on its critical pressure[J]. Water Saving Irrigation,2017(8): 49 - 52. (in Chinese)

[38] 刘俊林, 贾首星, 代亚猛. 气泡雾化喷头流量特性试验研究[J]. 液压与气动,2017(5):74 - 78.
LIU Junlin, JIA Shouxing, DAI Yameng. Discharge characteristics of effervescent nozzle[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2017(5):74 - 78. (in Chinese)

[39] 毕江纯. 气泡雾化喷嘴结构对喷雾特性的影响规律研究[D]. 天津:河北工业大学,2015.
BI Jiangchun. The influence of effervescent atomizer structure on spray characteristics[D]. Tianjin: Hebei University of Technology,2015. (in Chinese)

[40] 赵晋. 流动聚焦/模糊喷嘴气液两相流动及射流喷雾研究[D]. 北京:北京交通大学,2022.
ZHAO Jin. Study on gas liquid two phases flow and jet spray in flow focusing/blurring nozzle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2022. (in Chinese)

[41] MURUGAN R, BALUSAMY S, KOLHE P. Experimental study of liquid spray mode of twin fluid atomizer using optical diagnostic tool[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2020, 106(1): 261 - 289.

[42] MURUGAN R, KOLHE P S, SAHU K C. A combined experimental and computational study of flow-blurring atomization in a twin-fluid atomizer[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2020, 84: 528 - 541.

[43] CHEN B, GAO D, WU S, et al. Influence of self-excited vibrating cavity structure on droplet diameter characteristics of twin-fluid nozzle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 1 - 10.

[44] CHEN B, GAO D, LI Y, et al. Investigation of the droplet characteristics and size distribution during the collaborative atomization process of a twin-fluid nozzle[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3 - 4): 1625 - 1639.

[45] CHEN B, GAO D, LI Y, et al. Influence of atomizing core on droplet dynamic behavior and machining characteristics under synergistically enhanced twin-fluid spray[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(9-10): 2269-2282.
[46] CHEN B, LU Y, LI W, et al. DPM-LES investigation on flow field dynamic and acoustic characteristics of a twin-fluid nozzle by multi-field coupling method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 192: 122927.
[47] 陈波, 高殿荣, 杨超,等. 大功率远程射雾器结构参数多目标智能协同优化[J]. 机械工程学报,2017,53(6):166-175.
CHEN Bo, GAO Dianrong, YANG Chao, et al. Multi-objective intelligent collaborative optimization of structure parameters for high-power remote sprayer[J]. Journal of Mechanical Engineering,2017,53(6):166-175. (in Chinese)
[48] CHEN B, GAO D, LIANG Y, et al. Experimental investigation of atomization and droplet turbulence characteristics of a twin-fluid nozzle with different self-excited vibrating cavity structures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 99: 525-536.
[49] 魏超. 一种超细雾化喷嘴的数值模拟及结构优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
WEI Chao. Research on a kind of ultrafine atomizing nozzle by numerical simulating and optimizing in erection[D]. Beijing: North China Electric Power University,2015. (in Chinese)
[50] JEDELSKY J, JICHA M. Novel modifications of twin-fluid atomizers: performance, advantages and drawbacks[C]// Proceedings of the 23th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems ILASS-Europe, Brno, Czech Republic, 2010.
[51] YOON S H, KIM D Y, KIM D K, et al. Effect of nozzle geometry for swirl type twin-fluid water mist nozzle on the spray characteristic[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(7): 1761-1766.
[52] JEONG C S, LEE C Y. Experimental investigation on spray characteristics of twin-fluid nozzle for water mist and its heptane pool fire extinguishing performance[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148: 724-736.
[53] 陆岱鹏, 陶建平, 王珏,等. 基于 Venturi 效应的两相流雾化喷嘴设计与性能试验[J]. 江苏农业科学,2019,47(12):250-255.
[54] ZHANG Y, KANG C, GAO K, et al. Flow and atomization characteristics of a twin-fluid nozzle with internal swirling and self-priming effects[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020, 85: 108632.
[55] 张春阳. 射流式泡沫发生器气液两相流流动规律研究及结构优化[D]. 大庆:东北石油大学,2017.
ZHANG Chunyang. Research on jet foam generator gas-liquid two-phase flowing law and structure optimization[D]. Daqing: Northeast Petroleum University,2017. (in Chinese)
[56] KOURMATZIS A, LOWE A, MASRI A R. Combined effervescent and air blast atomization of a liquid jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 75: 66-76.
[57] 樊建广. 气泡雾化喷嘴的试验与模拟研究[D]. 天津:河北工业大学,2015.
FAN Jianguang. Experiments and simulation on the effervescent atomizer[D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
[58] 钱丽娟. 雾化射流场中粒子运动和传热特性的研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
QIAN Lijuan. Research on the particle movements and heat transfer in the atomization sprays[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2010. (in Chinese)
[59] 阿衍学, 李建东, 岳少博,等. 基于漂移流模型的管道一维气液两相流数值仿真与分析[J]. 机械工程师,2023(8):132-134,138.
A Yanxue, LI Jiandong, YUE Shaobo,et al. Numerical simulation and analysis of one-dimensional gas-liquid two-phase flow in pipelines based on drift flow model[J]. Mechanical Enginee,2023(8):132-134,138. (in Chinese)
[60] 李雪, 陆岱鹏, 王士林,等. 固定管道式常温烟雾系统雾滴沉积仿真与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊):261-267,315.
LI Xue, LU Daipeng, WANG Shilin, et al. Simulation andtest on droplet distribution and deposition of fixed-pipe cold fogging system in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.):261-267,315. (in Chinese)
[61] 李淑江, 李程前, 沈敏敏. 基于 FLUENT 的气液两相流喷嘴雾化性能研究[J]. 轻工机械,2021,39(6):81-85.
LI Shujiang, LI Chengqian, SHEN Minmin. Improvement of atomization performance of gas-liquid two-phase flow nozzle based on FLUENT[J]. Light Industry Machinery,2021,39(6):81-85. (in Chinese)
[62] 王亚峰. 内混式空气雾化过程试验及仿真研究[D]. 西安:长安大学,2021.
WANG Yafeng. Experimental and simulation research on the process of internal-mixing twin-fluid atomization[D]. Xi'an: Chang'an University,2021. (in Chinese)
[63] 王耀荣. 内混式空气雾化喷嘴内部两相流动特征试验与数值模拟研究[D]. 西安:长安大学,2021.
WANG Yaorong. Experimental and numerical simulation research on two-phase flow characteristics of an internal-mixing air-assisted atomizer[D]. Xi'an:Chang'an University, 2021. (in Chinese)
[64] 杨瑄. 内混式空气雾化喷嘴内部两相流特性数值模拟研究[D]. 西安:长安大学,2018.

YANG Xuan. Numerical simulation on the nozzle two-phase flow characteristics of an internal-mixing air-assisted atomizer[D]. Xi'an:Chang'an University, 2018. (in Chinese)

[65] 宋连敏. 气液两相流文丘利喷嘴节流特性研究及流量计量[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2016.
SONG Lianmin. Gas-liquid two phase flow throttling characteristics of venturi nozzles and its application in flow rate metering [D]. Qingdao:China University of Petroleum (East China),2016. (in Chinese)

[66] 陈文义, 汤凯, 孙兵,等. 气泡发生器喷嘴的改进及两相流数值模拟研究[J]. 选煤技术,2012(4):19 - 22,26.
CHEN Wenyi, TANG Kai, SUN Bing,et al. Research on improved nozzle of bubble generator and two-phase flow based on numerical simulation[J]. Goal Preparation Technology,2012(4):19 - 22,26. (in Chinese)

[67] 黄启龙, 李进贤, 郑亚,等. 旋流式进料喷嘴试验与流场结构数值模拟[J]. 西北工业大学学报,2015,33(3):388 - 394.
HUANG Qilong, LI Jinxian, ZHENG Ya,et al. Experiments on and numerical simulation of flow field of a swirl feed nozzle [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2015,33(3):388 - 394. (in Chinese)

[68] 程修月. 不同形状气液两相雾化喷嘴的数值模拟研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.
CHENG Xiuyue. Numerical simulation of gas-liquid two-phase atomizing nozzles with different shapes[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2020. (in Chinese)

[69] 郭涛, 王德喜, 宫泽. 两相流的供气式射流曝气喷嘴的分析模拟[J]. 辽宁化工,2021,50(12):1894 - 1899.
GUO Tao, WANG Dexi, GONG Ze. Analysis and simulation of two-phase flow jet aeration nozzle[J]. Liaoning Chemical Industry,2021,50(12):1894 - 1899. (in Chinese)

[70] 单一窍. 两相流喷嘴内外流场雾化特性的数值模拟及试验研究[D]. 济南:山东建筑大学,2017.
SHAN Yiqiao. Numerical simulation and experimental investigation of characteristics in two phase flow nozzle atomization inside and outside flow field[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University,2017. (in Chinese)

[71] 唐毅. 具有均匀化气液两相流气泡雾化喷嘴数值模拟研究[D]. 太原:太原理工大学,2022.
TANG Yi. Numerical simulation of bubble atomizing nozzle with homogenized gas-liquid two-phase flow[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2022. (in Chinese)

[72] RAHMAN M A, HEIDRICK T, FLECK B A. A critical review of advanced experimental techniques to measure two-phase gas/liquid flow[J]. The Open Fuels & Energy Science Journal, 2009, 2(1): 54 - 70.

[73] TAN C, MURAI Y, LIU W, et al. Ultrasonic doppler technique for application to multiphase flows: a review[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 144: 103811.

[74] 岳伟挺. 基于文丘里管的气液两相流参数检测方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
YUE Weiting. Research on gas-liquid two-phase flow parameters measurement with venturi tube[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2004. (in Chinese)

[75] 梁法春, 杨桂云, 王金龙,等. 气液两相流多喷嘴分流取样计量研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(4):143 - 147.
LIANG Fachun, YANG Guiyun, WANG Jinlong,et al. Gas-liquid two-phase flow metering using multi-nozzle sampler[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2014,38(4):143 - 147. (in Chinese)

[76] 杨立军, 王维, 胡泽保,等. 两相流乳化型细水雾喷嘴雾化特性研究[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(4):413 - 416.
YANG Lijun, WANG Wei, HU Zebao,et al. Study of atomizing characteristics of two-phase flow emulsification water mist nozzles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2002,28(4):413 - 416. (in Chinese)

[77] MLKVIK M, JEDELSKY J, KARBSTEIN H P, et al. Spraying of viscous liquids: influence of fluid-mixing mechanism on the performance of internal-mixing twin-fluid atomizers[J]. Applied Sciences, 2020, 10(15): 5249.

[78] RHO B J, KANG S J, OH J H, et al. Swirl effect on the spray characteristics of a twin-fluid jet[J]. KSME International Journal, 1998, 12(5): 899 - 906.

[79] 潘志成. 气液两相流气泡与液滴尺寸分布数字图像测量技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.
PAN Zhicheng. Measurement of bubble and droplet size distribution in gas liquid two-phase flow by digital imaging technique [D]. Nanjing:Southeast University,2019. (in Chinese)

[80] 杨晓凯. 气液两相射流雾化特性试验研究[D]. 太原:中北大学,2023.
YANG Xiaokai. Experimental study on atomization and impact characteristics of gas-liquid two-phase jets[D]. Taiyuan:North University of China,2023. (in Chinese)

[81] 王喃喃, 代亚猛, 贾首星,等. 棉花喷雾机"∏"型喷杆喷雾系统试验台架的研究与设计[J]. 新疆农机化,2019(1):5 - 9.
WANG Nannan, DAI Yameng, JIA Shouxing,et al. Study and design of "∏" type spray rod spray system test-bench of cotton sprayer[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization,2019(1):5 - 9. (in Chinese)

[82] SZOBOSZLAY S, FENYVESI L, GULYÁS Z. Liquid atomization and spray drift measurement in a wind tunnel for a twin fluid system with a deflector nozzle[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry,2012, 36(4): 469 - 475.

[83] 袁辉, 徐锐, 陈本良,等. 气水两相流喷嘴特征结构对雾化性能影响的试验研究[J]. 煤矿机械,2018,39(2):40 - 43.

YUAN Hui, XU Rui, CHEN Benliang, et al. Experimental study on influence of structure to atomization performance of gas-liquid two-phase flow nozzle[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(2): 40 - 43. (in Chinese)

[84] NGUYEN D A, RHODES M J. Producing fine drops of water by twin-fluid atomisation[J]. Powder Technology, 1998, 99(3): 285 - 292.

[85] International Organization for Standardization. Equipment for crop protection—Vocabulary: ISO 5681[S]. 2020.

[86] 魏南. 气液两相流喷嘴的射流雾化机理的研究[D]. 济南:山东建筑大学,2014.
WEI Nan. Research of jet atomization mechanism on gas-liquid two-phase flow nozzle[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2014. (in Chinese)

[87] WATANAWANYOO P, HIRAHARA H, MOCHIDA H, et al. Experimental investigations on spray characteristics in twin-fluid atomizer[J]. Procedia Engineering, 2011, 24: 866 - 872.

[88] BARRERAS F, LOZANO A, BARROSO J, et al. Experimental characterization of industrial twin-fluid atomizers[J]. Atomization and Sprays, 2006, 16(2): 127 - 146.

[89] BARROSO J, LOZANO A, BARRERAS F, et al. Analysis and prediction of the spray produced by an internal mixing chamber twin-fluid nozzle[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 128: 1 - 9.

[90] FERREIRA G, GARCÍA J A, BARRERAS F, et al. Design optimization of twin-fluid atomizers with an internal mixing chamber for heavy fuel oils[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(2): 270 - 278.

[91] GUPTA M, RAJORA R, SAHAI S, et al. Experimental evaluation of fire suppression characteristics of twin fluid water mist system[J]. Fire Safety Journal, 2012, 54: 130 - 142.

[92] 马成臻. 气泡雾化细水雾灭火系统研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2019.
MA Chengzhen. Research on bubble atomization water mist fire extinguishing system[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019. (in Chinese)

[93] 李璞伟. 气液两相流喷雾除尘技术影响因素研究及工程应用[D]. 湘潭:湘潭大学,2020.
LI Puwei. Study on dedusting technology by gas-liquid two-phase flow spray: crucial factors and their engineering application[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020. (in Chinese)

[94] 江海. 基于气液两相混合的雾化宽幅喷涂阀的设计及试验研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
JIANG Hai. Design and experimental study of atomization wide spray valve based on the gas-liquid two-phase mixing[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[95] RAJ MOHAN B, JAIN R K, MEIKAP B C. Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63(2): 269 - 277.

[96] WANG J, HUANG H, XU W Z, et al. Prefilming twin-fluid nozzle assisted precipitation method for preparing nanocrystalline HNS and its characterization[J]. J Hazard Mater, 2009, 162(2 - 3): 842 - 847.

[97] 欧鸣雄. 一种气液两相流雾化喷嘴及其设计方法:201811587903.9[P]. 2019 - 06 - 21.

[98] 李雪, 陆岱鹏, 王士林, 等. 一种农用气液两相喷头的设计与喷雾特性仿真[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 722 - 728.
LI Xue, LU Daipeng, WANG Shilin, et al. Design and simulation of an agricultural twin fluid nozzle[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(3): 722 - 728. (in Chinese)

[99] COMBELLACK J H, WESTEN N M, RICHARDSON R G. A comparison of the drift potential of a novel twin fluid nozzle with conventional low volume flat fan nozzles when using a range of adjuvants[J]. Crop Protection, 1996, 15(2): 147 - 152.

[100] TAIWO A. Evaluation of a twin-fluid nozzle for precision air-assisted agro-chemical application[J]. International Journal of Advanced Engineering, Management and Science, 2016, 2(5): 239468.

[101] STÄHLE P, SCHUCHMANN H P, GAUKEL V. Performance and efficiency of pressure-swirl and twin-fluid nozzles spraying food liquids with varying viscosity[J]. Journal of Food Process Engineering, 2015, 40(1): e12317.

[102] 刘雪美, 刘兴华, 崔慧媛, 等. 作物冠层雾滴沉积研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 1 - 20.
LIU Xuemei, LIU Xinghua, CUI Huiyuan, et al. Research progress and trend analysis of crop canopy droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 1 - 20. (in Chinese)