

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.14.023

基于气液比调控的新型两相流喷头设计与试验

陈立平^{1,2} 余晨斌^{1,2} 张瑞瑞² 李龙龙² 胡鹏² 刘全福²

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 空气诱导喷头是农业施药常用的雾化部件,通过文丘里效应吸入空气,使喷雾过程呈气液两相流特征,从而改变雾滴粒径分布。气液比(Air-to-liquid mass ratio, ALR)是影响喷头雾化特性的重要参数,但空气诱导喷头的ALR难以作为独立变量进行调控。为研究ALR对喷雾雾化特性的影响,本研究基于空气诱导喷头的结构特征,通过改变气体供给方式,设计了一种ALR可独立调节的两相流喷头,并采用激光粒度仪对不同ALR条件下喷头的雾滴体积中径(Volume median diameter, VMD)及粒径分布特性进行了测试与分析。结果表明,当ALR为0~0.005时,VMD随ALR增大而增大;当ALR为0.005~0.01时,VMD随ALR增大而快速减小;当ALR高于0.01时,VMD下降速率显著放缓并趋于稳定。基于ALR大于0.005试验数据,建立了VMD与ALR的关联模型,模型决定系数(R^2)不小于0.91,能够有效表征不同工况下雾滴粒径的变化趋势。粒径分布结果表明,ALR变化可显著影响雾滴粒径小于150 μm 的累积体积分数,从而改变喷雾潜在飘移风险。研究结果为农业施药两相流喷头雾化行为理解及喷头设计提供了理论依据。

关键词: 气液两相流; 气液比; 空气诱导喷头; 雾化特性; 雾滴粒径

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0247-08 OSID: 

Design and Experimental Investigation of Novel Air – Liquid Two-phase Nozzle with Independently Controlled Air-to-Liquid Ratio

Chen Liping^{1,2} Yu Chenbin^{1,2} Zhang Ruirui² Li Longlong² Hu Peng² Liu Quanfu²

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China
2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Air induction nozzles introduce air through the Venturi effect and generate air – liquid two-phase sprays, thereby altering droplet size distribution during agricultural applications. The air-to-liquid mass ratio (ALR) is a key parameter governing atomization characteristic; however, in conventional air induction nozzles, ALR is strongly coupled with structural parameters and cannot be independently controlled. To investigate the specific role of ALR in spray atomization, an ALR-adjustable air – liquid two-phase nozzle was developed by modifying the air supply mode while maintaining the original liquid flow structure. Droplet size distribution and volume median diameter (VMD) under different ALR conditions were measured by using a laser particle size analyzer. The results indicated that atomization characteristics exhibited distinct stage-dependent variations with increasing ALR. When ALR was below 0.005, VMD increased with ALR; when ALR ranged from 0.005 to 0.01, VMD decreased sharply; and when ALR exceeded 0.01, the decreasing rate of VMD slowed and gradually stabilized. Based on experimental data for ALR > 0.005, a correlation model between VMD and ALR was established, with coefficients of determination (R^2) no less than 0.91, demonstrating strong agreement with measured data. Furthermore, variations in ALR significantly influenced the cumulative volume fraction of droplets less than 150 μm , which was closely related to spray drift potential. These findings can provide theoretical support for understanding the atomization behavior of air – liquid two-phase nozzles and offer guidance for the design and optimization of spray systems in agricultural applications.

Key words: air – liquid two-phase flow; air-to-liquid mass ratio; air induction nozzle; atomization characteristics; droplet size

收稿日期: 2026-02-13 修回日期: 2026-02-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000204)和国家自然科学基金项目(32301706、U25A20659)

作者简介: 陈立平(1973—),女,研究员,博士生导师,主要从事农业智能装备技术与应用研究,E-mail: chenlp@nrcita.org.cn

0 引言

喷雾施药是农作物病虫害防控广泛采用的作业方式,喷雾雾化特性在很大程度上受喷头结构形式及工作参数的影响^[1-2]。雾滴粒径是表征喷雾雾化特性的核心指标之一,不同粒径雾滴在施药过程表现出明显不同的应用特征。已有研究表明,小粒径雾滴具有较好的沉积和覆盖效果,但易受蒸发和气流作用影响^[3-6],大粒径雾滴抗飘移但易产生地面损失。因此,研究喷头雾化过程的雾滴粒径分布规律,对提高喷雾质量和改善施药效果具有重要意义。

在农业植保作业中,空气诱导喷头已得到广泛应用^[7],喷头通过内部文丘里结构引入空气,使喷雾呈现气液两相流特征^[8-10]。作为一种两相流喷头,喷雾雾化特性不仅受喷头几何结构影响,还与气液比(Air-to-liquid mass ratio, ALR)密切相关^[11]。在气液两相流喷雾条件下,随着 ALR 变化,喷头内气液两相可能呈现泡状流、段塞流或环状流等不同流型特征,这种内部流动状态的变化会进一步反映在下游喷雾雾化特性上^[12-15]。

然而,空气诱导喷头依赖文丘里结构被动吸入环境空气,喷雾过程 ALR 主要由喷头内部结构参数与喷雾压力共同决定^[16-18]。现有研究多从喷头内部结构参数对雾化特性的影响展开^[19-22],喷头结构参数与 ALR 之间存在较强耦合关系,使 ALR 难以作为独立变量进行研究^[18-21]。

针对上述问题,本研究以空气诱导喷头结构为基础,通过改变气体供给方式,设计一种 ALR 可调的两相流喷头。在此基础上,搭建 ALR 可控的喷雾试验系统,采用激光粒度仪测定不同 ALR 条件下喷头的雾滴粒径分布特征,并建立 ALR 与雾滴体积中径(Volume median diameter, VMD)之间的关联模型,以揭示 ALR 变化对喷雾雾化特性的影响规律。本研究突破传统空气诱导喷头 ALR 受结构与压力耦合约束的限制,以期实现 ALR 作为独立控制变量的试验研究,为农业施药两相流喷头雾化行为认识及喷头设计提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 喷头结构设计

以 AIXR11002、AIXR11003 和 AIXR11004 3 款商用空气诱导喷头结构为参考,对喷头气体引入结构进行改进,构建一种 ALR 可调控的气液两相流喷头。在保持原喷头液路结构及喷孔几何形状不变的

前提下,对喷头气腔结构进行重新设计,设计方案为:封堵原喷头外壳上的进气通道,并在气腔外壳两侧分别设置独立的进气口,使气体由外部可控供气系统主动输入喷头内部,与液体在喷头内混合后完成雾化。通过上述结构调整,气体供给方式由原有的被动吸入转变为主动可控输入,从而使喷头喷雾过程 ALR 可通过调节外部气体流量实现独立调控。喷头结构及气路系统如图 1 所示,为便于区分,将改装后的喷头记为 AIXR11002*、AIXR11003* 和 AIXR11004*。

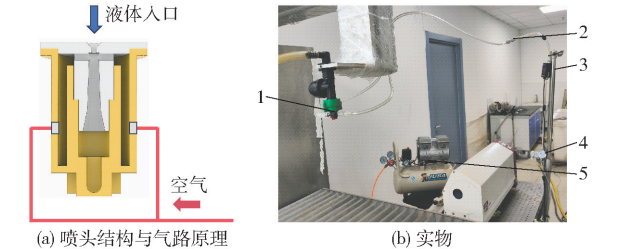


图 1 喷头结构及气路系统

Fig. 1 Nozzle structure and air-flow system

1. 喷头 2. 单向阀 3. 流量计 4. 压力表 5. 空气压缩机

1.1.2 喷雾试验系统

针对气液两相流喷头,搭建一套 ALR 可控的喷雾试验系统,如图 2 所示,主要由气液两相流喷头、空气压缩机、水泵、水箱及气液流量计与压力表等组成,整体系统在室内条件下搭建,实现气液流量独立控制。试验所用气体由空气压缩机提供,经独立气路通入喷头,在喷头上游通过气体流量传感器进行流量测量。气体流量传感器为 Siargo 公司 MS4008 型,量程为 0 ~ 30 L/min,测量精度为 $\pm (1.5\% \text{ RD} + 0.15\% \text{ FS})$ 。气体经流量传感器测量后进入喷头气腔,与液体在内部充分混合并完成雾化。气体压力通过压力表(量程 0 ~ 0.4 MPa)测定,测量精度为 $\pm 0.3\% \text{ FS}$ 。试验选用水作为喷雾介质,由水泵输送至喷头。液体压力采用压力表(0 ~ 0.6 MPa)测定,精度为 $\pm 0.2\% \text{ FS}$ 。液体流量通过流量计(量程 0 ~ 3 L/min)测量,精度为 $\pm 0.5\% \text{ FS}$ 。

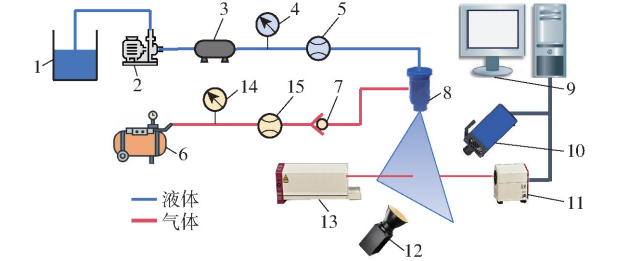


图 2 ALR 可控的喷雾系统组成

Fig. 2 Components of spray system with controllable ALR

1. 水箱 2. 水泵 3. 稳压罐 4、14. 压力表 5、15. 流量计 6. 空气压缩机 7. 单向阀 8. 喷头 9. 计算机 10. 高速摄影机 11. 激光粒度仪发射端 12. LED 光源 13. 激光粒度仪接收端

1.2 试验方法

在不同 ALR 工况下开展喷雾试验,试验以雾滴粒径分布作为喷雾化特性的主要表征参数,采用激光粒度仪进行测量。同时,为辅助阐释不同 ALR 条件下喷雾雾化过程气液相互作用特征,采用高速摄影机对喷头出口处液膜形态演化过程进行拍摄。各试验工况通过调节喷雾压力和气体压力获得不同 ALR 工况,并对试验结果进行重复测试,以保证数据的可比性和可重复性。

1.2.1 雾滴粒径测量试验

3 种喷头在不同 ALR 工况下的雾滴粒径分布采用 HELOS – VARIO 型激光粒度仪进行测量^[24]。试验中,将测量区域设置在喷头出口正下方 0.5 m 处,以获取喷雾在稳定阶段的雾滴粒径分布特征。单次测量的数据采集时长为 15 s,每个试验工况重复测量 5 次,并对测量结果取平均值,以确保数据的可靠性。

1.2.2 ALR 工况设置

试验通过调节水泵和气泵参数获取不同的 ALR 工况。喷雾压力由水泵调节并保持稳定,气体压力由气泵调节。在每个喷雾压力条件下,逐级改变气体压力,从而改变气体质量流量与液体质量流量比值,获得一系列不同的 ALR,如表 1 所示。ALR 为气体质量流量与液体质量流量比值,计算式为

$$ALR = \frac{m_a}{m_l} \tag{1}$$

式中 m_a ——空气质量流量,kg/h
 m_l ——液体质量流量,kg/h

空气质量流量由气路中气体流量传感器测量,气体流量传感器安装于外部刚性气路以降低喷雾振动影响;液体质量流量由液体流量计测得的体积流量结合液体密度换算得到。为保证不同喷雾压力条件下试验结果的可比性,在每个喷雾压力条件下均设置多级气体压力工况,使同一喷头在不同喷雾压力条件下的 ALR 变化区间保持相对一致。

1.2.3 液膜形态拍摄

为观察不同 ALR 条件下喷头出口处液膜形态的变化特征,采用高速摄像机对液膜演化过程进行拍摄。将高速摄像机分辨率设定为 775 像素×775 像素,帧率设为 10 000 f/s,曝光时间控制为 50 μs,以获取液膜在雾化过程的瞬态形态特征。试验中采用 LED 连续光源为拍摄区域提供稳定照明,并在光源与液膜之间增设高透光磨砂亚克力板,以形成均匀的漫反射光场,从而突出液膜主体结构^[25]。各试验工况下连续拍摄 1 000 幅图像,覆盖液膜从形成到破裂的完整过程。所得图像主要用于定性分析不

表 1 不同喷雾压力与气体压力下各喷头 ALR

Tab.1 ALR of each nozzle under different spray pressures and air pressures

喷雾压力/ MPa	气体压力/ MPa	ALR		
		AIXR11002 *	AIXR11003 *	AIXR11004 *
0.1	0	0	0	0
	0.010	0.000 2	0.001 9	0.001 1
	0.020	0.000 5	0.004 6	0.002 6
	0.030	0.003 0	0.008 9	0.003 7
	0.040	0.007 4	0.011 4	0.006 0
	0.060	0.015 7	0.016 2	0.010 6
	0.080	0.029 1	0.051 1	0.017 6
	0.100	0.068 7	0.086 7	0.026 8
0.2	0	0	0	0
	0.015	0.000 1	0.001 5	0.000 3
	0.030	0.000 4	0.002 5	0.000 6
	0.045	0.002 0	0.004 2	0.002 6
	0.060	0.005 4	0.007 9	0.004 5
	0.090	0.011 0	0.013 2	0.008 9
	0.120	0.020 7	0.019 2	0.014 2
	0.150	0.032 1	0.033 5	0.020 5
0.3	0	0	0	0
	0.020	0.000 2	0.001 4	0.000 3
	0.040	0.000 2	0.002 4	0.000 6
	0.060	0.001 8	0.003 9	0.002 0
	0.080	0.003 2	0.007 2	0.003 8
	0.120	0.009 4	0.012 6	0.007 5
	0.160	0.018 2	0.017 3	0.013 7
	0.200	0.029 2	0.026 7	0.020 1
0.4	0	0	0	0
	0.025	0.000 2	0.001 6	0.000 4
	0.050	0.000 6	0.002 5	0.000 7
	0.075	0.000 7	0.003 3	0.001 3
	0.100	0.001 0	0.006 0	0.003 6
	0.150	0.010 0	0.012 9	0.007 6
	0.200	0.019 0	0.018 5	0.013 2
	0.250	0.038 5	0.026 0	0.021 1

同 ALR 条件下液膜形态的变化特征,为雾滴粒径变化规律的探讨提供辅助参考。

2 结果与分析

2.1 ALR 对液体质量流量的影响

图 3 为 3 种喷头在不同喷雾压力条件下液体质量流量随 ALR 的变化。结果表明,在相同喷雾工况下,3 种喷头液体质量流量由大到小依次为 AIXR11004 *、AIXR11003 *、AIXR11002 *。同时随着 ALR 增大,3 种喷头液体质量流量均呈逐渐减小的趋势,这与气相参与程度提高有关。随着 ALR 增大,气液两相在喷头内部相互作用增强,液相流动条件发生改变,进而表现为液体质量流量的降低。喷雾压力对液体质量流量同样具有显著影响,随喷雾

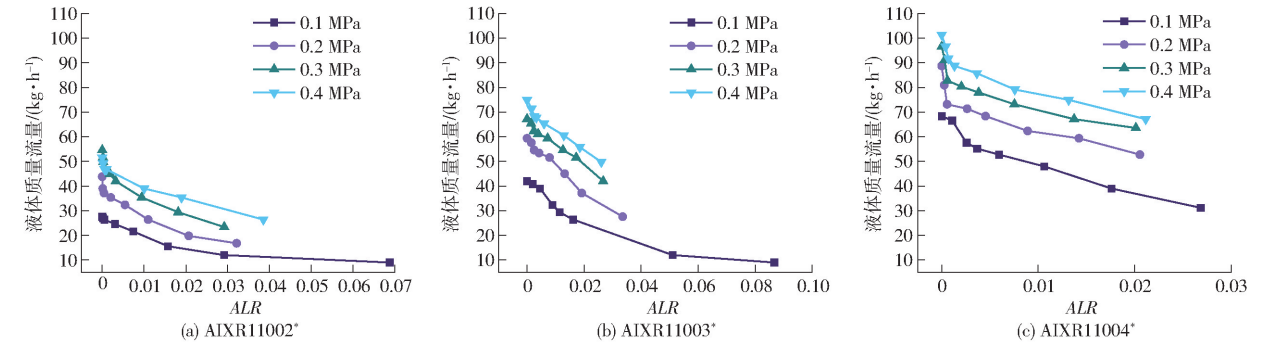


图3 不同喷雾压力下 ALR 对液体质量流量的影响

Fig.3 Effect of ALR on liquid mass flow rate under different spray pressures

压力增大,液体质量流量显著增大。

2.2 ALR 对雾滴粒径的影响

图4为 AIXR11002*、AIXR11003* 和 AIXR 11004* 在不同喷雾压力与 ALR 条件下的 VMD 变化曲线。在所测试喷雾压力范围内,3 种喷头的 VMD 随 ALR 变化呈现相似的阶段性特征,当 ALR 处于较低水平(0~0.005)时,VMD 随 ALR 增大而逐渐增大;当 ALR 为 0.005~0.01 时,VMD 随 ALR 增大快速减小;当 ALR 大于 0.01 时,VMD 下降速率显著减缓并趋于稳定。随喷雾压力由 0.1 MPa 增至 0.4 MPa,3 种喷头 VMD 均明显减小。不同喷头在相同 ALR 条件下 VMD 水平存在明显差异。AIXR11003* 的 VMD 整体高于另外 2 种喷头,当 ALR 为 0 时,VMD 均值达到 408.3 μm。相比之下,AIXR11002* 在 ALR 增大过程 VMD 表现更为显著的降低,在 ALR 较大条件时 VMD 平均值低至 138.7 μm。AIXR11004* VMD 变化趋势介于上述两者之间,在 ALR 较低时 VMD 变化幅度相对更为明显。

雾滴尺寸累积分数通常用于表征液滴尺寸特征^[26],图5为喷雾压力为 0.3 MPa 时,3 种喷头雾滴粒径累积体积分数曲线。随着粒径增大,不同 ALR 条件下累积体积分数均逐步上升,但曲线整体分布位置及偏移程度存在明显差异。ALR 从 0 增大到较低水平时,各喷头的累积分数曲线整体向大粒径方向偏移,表明低 ALR 条件下气液两相作用会增大

雾滴粒径;随着 ALR 进一步增大,曲线又逐渐向小粒径方向移动,说明 ALR 进一步增大会使雾滴粒径逐渐减小,与 VMD 随 ALR 的变化规律一致。为进一步分析 ALR 变化对小粒径雾滴累积体积分数的影响,提取雾滴粒径小于 150 μm 累积体积分数随 ALR 变化的结果,如图 6 所示。3 种喷头雾滴粒径小于 150 μm 累积体积分数随 ALR 增大同样呈先减小后增大的变化趋势。当 ALR 为 0~0.005 时,雾滴粒径小于 150 μm 累积体积分数随 ALR 增大而降低;当 ALR 为 0.005~0.01 时,累积体积分数显著增大;当 ALR 大于 0.01 时,变化幅度逐渐趋于平缓。

2.3 ALR 与 VMD 的关联模型建立

基于对 VMD 随 ALR 变化结果分析,选取 ALR 大于 0.005 试验数据,对 ALR 与 VMD 之间的关系进行拟合分析。为提高关联分析的稳定性,在不同喷雾压力条件下选取雾滴粒径变化趋势具有连续性的工况区间,并通过设置多级气压梯度,使 ALR 取值在所研究区间内保持较为均匀的分布,从而保证拟合分析所需的数据连续性与代表性。试验结果表明,在 ALR 大于 0.005 范围内,VMD 随 ALR 变化呈现出明显的指数衰减特征。因此,采用指数函数形式对 ALR 与 VMD 的关系进行拟合,表达式为

$$VMD = ae^{bALR} + c$$

(2)

式中 a 、 b 、 c ——拟合参数

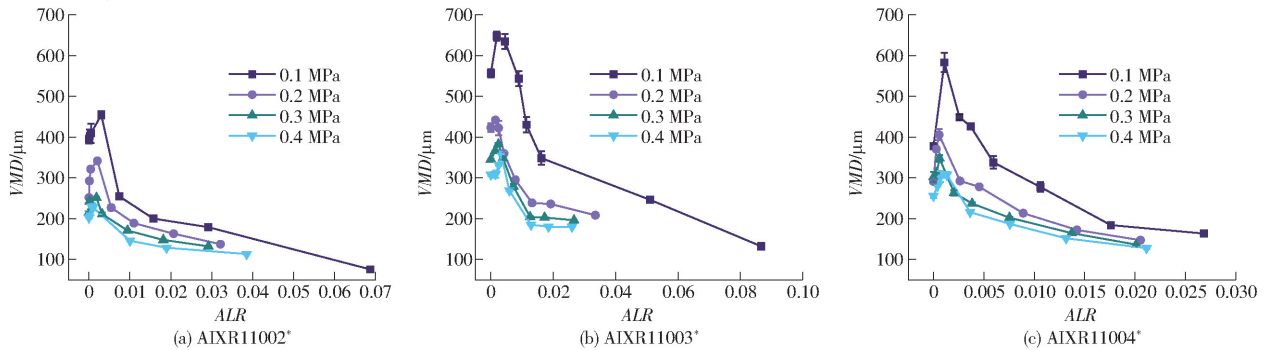


图4 不同喷雾压力下 ALR 对 VMD 的影响

Fig.4 Effect of ALR on VMD under different spray pressures

其中, a 表示初始衰减幅度, b 反映 VMD 随 ALR 增大的衰减速率, c 表示 ALR 较大时 VMD 趋近的稳定值。不同喷雾压力条件下 3 种喷头模型参数及拟合结果如图 7 和表 2 所示。拟合结果表明, 不同喷雾压力下模型决定系数 R^2 不小于 0.91, 表明所建立的指数关联模型能够较好地描述 ALR 大于 0.005 条件下 VMD 随 ALR 增大而减小并趋于稳

定的变化特征。关联模型能够较好地描述不同喷雾压力条件下, ALR 变化对 VMD 演化规律的影响, 可为两相流喷头雾化特性研究中 ALR 与雾滴粒径关系的定量分析提供参考。需要指出的是, 该模型适用于本研究喷头结构及水介质条件下 ALR 大于 0.005 区间, 其他结构或不同理化性质液体条件下仍需进一步验证其适用性。

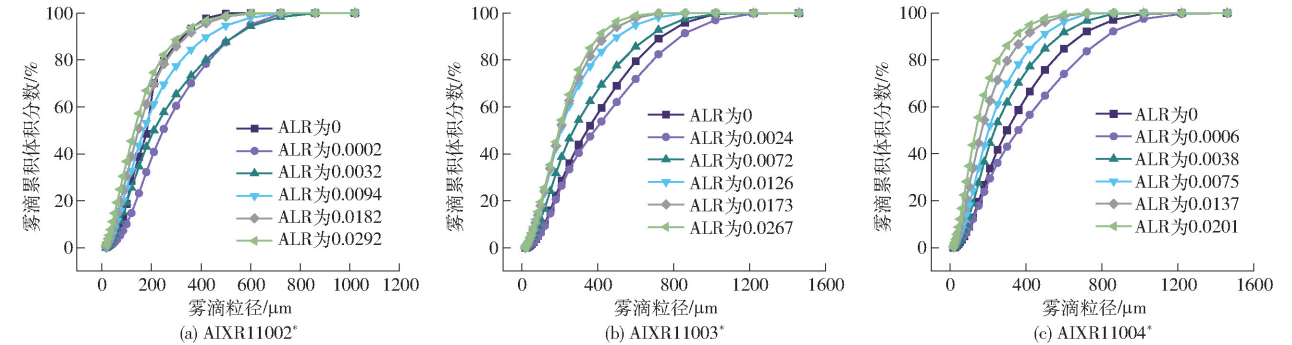


图 5 喷雾压力 0.3 MPa 下 ALR 对雾滴粒径累积体积分数的影响

Fig. 5 Effect of ALR on droplet size cumulative volume fraction distribution at a spray pressure of 0.3 MPa

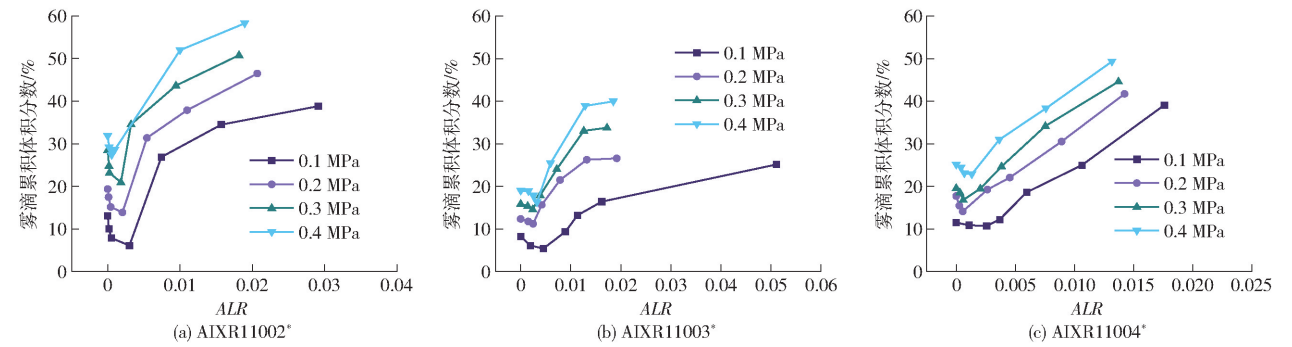


图 6 不同喷雾压力下 ALR 对粒径小于 150 μm 雾滴累积体积分数的影响

Fig. 6 Effect of ALR on cumulative volume fraction of droplets less than 150 μm under different spray pressures

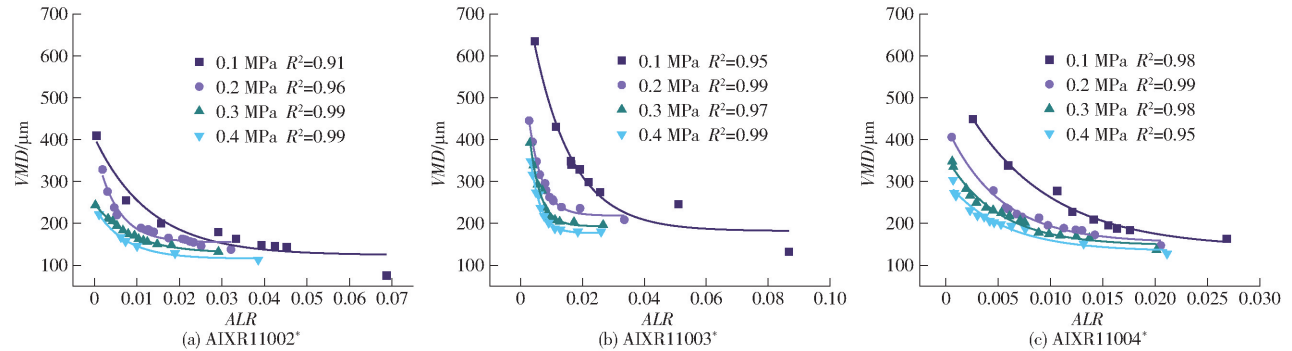


图 7 不同喷雾压力下 ALR 与 VMD 的指数衰减拟合

Fig. 7 Exponential decay fitting between ALR and VMD under different spray pressures

3 讨论

3.1 ALR 对雾滴粒径的影响机制

试验结果表明, 在所研究喷雾压力范围内, VMD 随 ALR 变化呈明显的阶段性特征。结合高速摄影获取的喷头出口液膜形态及雾滴粒径分布特征, 对不同 ALR 条件下的雾化行为进行分析。

当 ALR 小于 0.005 时, 喷头出口以夹带离散气泡的液膜结构为主, 如图 8a、8b 所示。当 ALR 为 0 与 0.002 4 时, 液膜表面存在明显的界面扰动与局部孔洞。气泡的膨胀与破裂促使液膜表面形成孔洞结构, 抑制进一步细化, 使液膜破碎后形成的雾滴尺寸偏大, 体积频率密度分布主峰向大粒径区间偏移, VMD 随 ALR 增大而呈上升趋势。该现象与 Gong

表 2 不同喷雾压力下 3 种喷头指数衰减模型参数及 R^2

Tab.2 Exponential decay model parameters and R^2 for three nozzles under different spray pressures

喷头型号	喷雾压力/ MPa	$a/\mu\text{m}$	b	$c/\mu\text{m}$	R^2
AIXR11002 *	0.1	281.27	-76.07	81.111	0.91
	0.2	232.76	-197.46	154.75	0.96
	0.3	118.88	-115.11	128.93	0.99
	0.4	122.85	-139.91	115.54	0.99
AIXR11003 *	0.1	637.76	-79.40	181.76	0.95
	0.2	429.43	-233.03	218.52	0.99
	0.3	490.40	-289.80	193.26	0.97
	0.4	472.78	-310.15	176.95	0.99
AIXR11004 *	0.1	426.18	-125.99	141.12	0.98
	0.2	279.87	-195.4	153.77	0.99
	0.3	211.79	-202.85	146.87	0.98
	0.4	167.34	-185.72	133.21	0.95

等^[23]观测结果一致。Huang 等^[27]通过内部可视化研究发现,低 ALR 下喷孔内流型以泡状流为主,雾滴粒径整体偏大。

当 ALR 为大于 0.005 时,液膜形态明显转变,如图 8c 所示,当 ALR 为 0.007 2 时,液膜表面气液扰动增强,局部破裂及间歇性射流特征更加明显。对应的体积频率密度分布呈现单峰特征,主峰向小粒径区间偏移,VMD 快速减小。说明该阶段气液相互作用增强,液膜破碎机制由气泡破裂主导的结构型破碎,向气液剪切作用主导的射流型破碎过渡。Li 等^[28]研究表明,随 ALR 提高,喷孔内部流动可由泡状流向段塞流过渡,进而显著提升雾化效率。Kaklar 等^[29]数值模拟研究亦表明,气液比范围内两相界面波动幅度增大、液膜稳定性降低,是雾滴尺寸快速减小的重要原因。

当 ALR 进一步增大至 0.01 以上时,液膜形态随 ALR 的变化趋于稳定,如图 8d - 8f 所示。当 ALR 为 0.017 3 与 0.026 7 时,液膜破碎过程更加充分,对应的体积频率密度分布呈典型的单峰分布,主峰集中于小粒径区间,VMD 随 ALR 增大下降速率显著减缓并趋于稳定。该规律与 Sovani 等^[30]提出的高气液比条件下喷孔内部形成环状流结构时雾化特征一致。

综合上述试验观测与已有文献分析可见,VMD 随 ALR 阶段性变化与喷头出口液膜形态演变具有对应关系,而液膜结构变化又与喷孔内部两相流动状态密切相关。随着 ALR 增大,喷孔内部流动形态经历由泡状流向段塞流再向环状流的演化过程^[30]。本研究观测到的液膜形态与雾滴粒径分布规律,可视为喷孔内部流型变化在外部雾化过程

的表现形式。基于上述文献结论与试验现象,绘制不同 ALR 条件下喷孔处可能对应的流型示意图(图 9),用以概括内部流型演化与下游雾化行为之间的关系。

3.2 ALR 对喷雾潜在飘移性的调控作用

喷雾过程粒径较小的雾滴更易受外界气流扰动影响,常被用作表征喷雾体系潜在飘移风险变化的重要粒径分布特征之一。结合图 6 可看出,雾滴粒径小于 150 μm 累积体积分数随 ALR 变化规律,与 VMD 随 ALR 阶段性演化特征保持一致。表明小粒径雾滴比例的变化并非独立现象,而是喷雾雾化状态变化在粒径分布结构层面的综合反映。随着 ALR 变化,喷雾雾化过程经历由较弱气液相互作用向较强气液相互作用的转变,液膜破碎方式和雾滴生成路径发生调整,从而同步影响整体粒径尺度及小粒径雾滴所占比例。

从雾化机理角度看,当 ALR 较小时,雾化过程以气泡雾化为主,液膜破碎后形成的雾滴尺寸相对较大,小粒径雾滴生成受到抑制;而当气液相互作用增强、液膜破碎强度提高后,更易产生数量较多的小尺度雾滴,使其在整体雾滴群中累积体积分数增加。随着雾化状态进一步稳定,小粒径雾滴比例变化幅度也随之减缓。该过程与基于液膜形态演化所揭示的雾化阶段性特征在物理机制上具有一致性。

本研究在固定喷雾介质和室内条件下开展,从粒径分布角度分析了 ALR 对喷雾潜在飘移的影响。风洞或田间飘移试验,喷雾液体理化性质(如黏度、表面张力)、环境气流条件及喷头结构差异等因素对喷雾飘移行为的综合作用仍有待进一步研究。

4 结论

(1)ALR 对喷雾雾化特性的影响呈明显的阶段性变化规律,随着 ALR 增大,VMD 先增大后显著减小。在 ALR 较低条件下,VMD 随 ALR 增大略有上升;当 ALR 增大至 0.005 ~ 0.01 时,VMD 出现快速下降;当 ALR 进一步增大后,VMD 变化幅度明显减缓并趋于稳定。

(2)针对 ALR 大于 0.005 情况,建立了 ALR 与 VMD 关联模型。拟合结果表明,各喷雾压力条件下拟合曲线决定系数 R^2 不小于 0.91,能够较好表征该区间内 ALR 对雾滴粒径变化趋势的影响。

(3)雾滴粒径小于 150 μm 累积体积分数随 ALR 变化呈与 VMD 相对应的阶段性特征,表明 ALR 通过调控雾化状态和雾滴粒径分布结构,改变

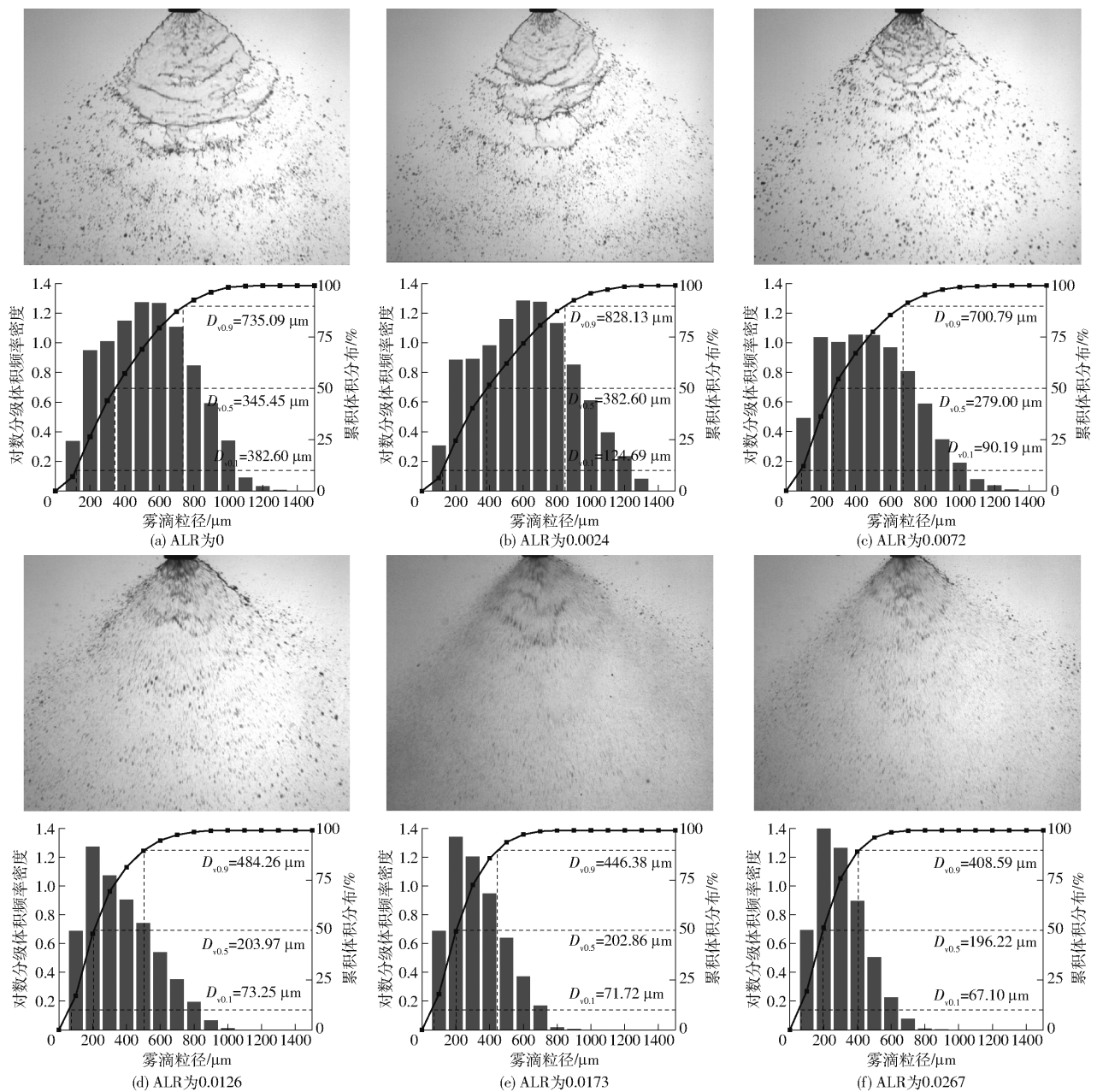


图 8 喷雾压力 0.3 MPa 条件下不同 ALR 对应的液膜形态及雾滴粒径分布特征

Fig. 8 Liquid film morphology and droplet size distribution characteristics under different ALR at a spray pressure of 0.3 MPa

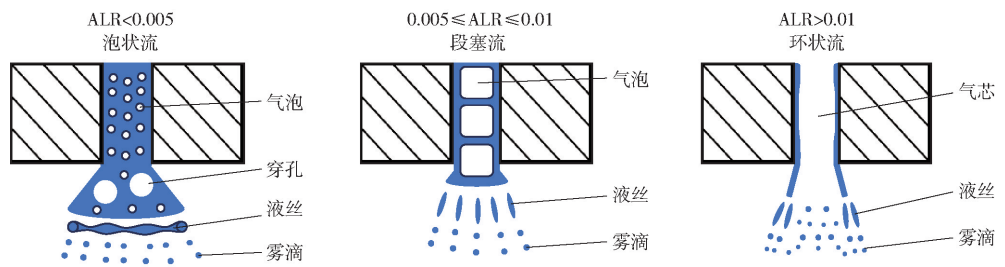


图 9 不同 ALR 下喷孔处流型示意图

Fig. 9 Flow patterns at nozzle orifice under different ALR conditions

小粒径雾滴在雾滴群中的相对比例,从粒径分布角 度反映了喷雾潜在飘移特征的变化趋势。

参 考 文 献

[1] 胡军, 封超, 刘昶希, 等. 基于多传感器同步采集的喷雾机喷嘴性能检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 305–313.
Hu Jun, Feng Chao, Liu Changxi, et al. Design and experiment of nozzle performance detector for sprayer based on multi-sensor

- synchronous acquisition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 305–313. (in Chinese)
- [2] 石复习, 蒋宗谨, 马驰, 等. 双流体喷嘴靶向授粉沉积量控制参数研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 115–124. Shi Fuxi, Jiang Zongjin, Ma Chi, et al. Control parameters of deposition amount for targeted pollination by twin-fluid nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 115–124. (in Chinese)
- [3] Hu P, Zhang R, Sun J, et al. A rapid method for qualitative evaluation of nozzle spraying potential drift based on phase doppler interferometer measurement[J]. Measurement, 2026, 259: 119593.
- [4] Huang Z, Wang Z, Wang C, et al. Dynamic surface tension at liquid sheet breakup governs spray droplet size: a unified model for reduced drift and improved targeting[J]. Environmental Research, 2025, 285: 122653.
- [5] Li L, Zhang R, Chen L, et al. Toward a remote sensing method based on commercial LiDAR sensors for the measurement of spray drift and potential drift reduction[J]. Science of the Total Environment, 2024, 918: 170819.
- [6] 李建平, 李绍波, 于少猛, 等. 伞形风场式防飘喷雾装置沉积特性研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 80–91. Li Jianping, Li Shaobo, Yu Shaomeng, et al. Deposition characteristics of umbrella-shaped air-assisted anti-drift spray device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 80–91. (in Chinese)
- [7] Wang S, Li X, Nuytens D, et al. Evaluation of compact air-induction flat fan nozzles for herbicide applications: spray drift and biological efficacy[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1018626.
- [8] Valeet A, Tinet C. Characteristics of droplets from single and twin jet air induction nozzles: a preliminary investigation[J]. Crop Protection, 2013, 48: 63–68.
- [9] Ellis M C B, Swan T, Miller P C H, et al. Design factors affecting spray characteristics and drift performance of air induction nozzles[J]. 2022, 82(3): 289–296.
- [10] Dafsari R A, Yu S, Yu S, et al. Drift potential and coverage ratio analysis of an air induction nozzle under an agricultural drone with various operating condition; an indoor test[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109171.
- [11] Lee J, Abdelmotalib H M. CFD-based evaluation of air induction nozzle performance: integration with AI for predictive modeling[J]. Results in Engineering, 2025, 28: 107116.
- [12] 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. Experimental and simulation study on spray characteristics of bubble flow in bubble atomization nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 367–374, 409. (in Chinese)
- [13] 刘雪美, 马旻睿, 侯献伟, 等. 气液两相流喷头研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 296–318. Liu Xuemei, Ma Minrui, Hou Xianwei, et al. Research status and prospect of gas–liquid two-phase flow nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 296–318. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] Hu Ju, Liu Changxi, Wang Zhi, et al. Motion model for describing the quantity of air in droplets through changing the structure of air induction nozzle[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(5): 35–40.
- [16] Sijs R, Kooij S, Bonn D. Droplet size from venturi air induction spray nozzles[J]. Experiments in Fluids, 2023, 64(2): 1–9.
- [17] Hilz E, Vermeert A W P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. Crop Protection, 2013, 44: 75–83.
- [18] Butler E M C, Swan T, Miller P C H, et al. PM:power and machinery[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(3): 289–296.
- [19] Kasbi M K, Dafsari R A, Charanandeh A, et al. Parametric study on the internal geometry affecting agricultural air induction nozzle performance[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(2): 1–19.
- [20] Gong C, Li D, Kang C. Visualization of the evolution of bubbles in the spray sheet discharged from the air-induction nozzle[J]. Pest Management Science, 2022, 78(5): 1850–1860.
- [21] Alidoost D R, Yu S, Choi Y, et al. Effect of geometrical parameters of air-induction nozzles on droplet characteristics and behaviour[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209: 14–29.
- [22] Liu Changxi, Hu Jun, Li Yufei, et al. Numerical simulation on Air-Liquid transient flow and regression model on Air-Liquid ratio of air induction nozzle[J]. Agronomy-Basel, 2023, 13: 248.
- [23] Gong C, Li D, Kang C. Effect of oil-based emulsion on air bubbles in the spray sheet produced through the air-induction nozzle[J]. Pest Manag. Sci., 2022, 78(12): 5347–5357.
- [24] Zhu F, Yan C, Liu A, et al. Droplet size of vertically upward annular flow in a narrow rectangular channel[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 174: 107–115.
- [25] Yan W, Li L, Song J, et al. Deep learning-assisted measurement of liquid sheet structure in the atomization of hydraulic nozzle spraying[J]. Agronomy, 2025, 15(2): 1–19.
- [26] Li G, Cao J, Li M, et al. Experimental study on the size distribution characteristics of spray droplets of DME/diesel blended fuels[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 352–355.
- [27] Huang X, Wang X, Liao G. Visualization of two phase flow inside an effervescent atomizer[J]. Journal of Visualization, 2008, 11(4): 299–308.
- [28] Li Z, Wu Y, Cai C, et al. Mixing and atomization characteristics in an internal-mixing twin-fluid atomizer[J]. Fuel, 2012, 97: 306–314.
- [29] Kaklar Z A, Ansari M R. Numerical investigation of the two-phase flow behavior inside the effervescent atomizer at high aeration ratios[J]. Discover Applied Sciences, 2025, 7(6): 502–522.
- [30] Sovani S D, Sojka P E, Lefebvre A H. Effervescent atomization[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2001, 27(4): 483–521.