

基于 PDPA 的双流体撞击式喷嘴雾化特性研究

陈波¹ 高殿荣¹ 杨超^{1,2} 毋少峰¹ 王明哲¹

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 秦皇岛首创思泰意达环保科技有限公司, 秦皇岛 066004)

摘要: 使用自主搭建的一套基于相位多普勒粒子分析仪 (PDPA) 的开放式雾化试验台, 开展了不同工况下双流体雾化流场的测试试验, 研究了气体流量和水流量对雾化特性 (包括喷雾锥角、有效射程以及雾滴粒径、速度、个数的分布) 的影响。结果表明: 随着气体流量的增大以及水流量的减小, 喷雾锥角呈增大趋势, 雾滴的索特平均直径 (SMD)、速度以及个数均呈减小趋势, 而有效射程随着气体流量以及水流量的增大而增大; 随着轴向距离的增大, 雾滴的 SMD、速度以及个数均呈现增大的分布规律; 随着径向距离的增大, 雾滴的 SMD 呈增大的分布规律, 而雾滴速度以及个数呈现先增大后减小的分布规律。气体流量和水流量对喷嘴出口与振动头之间区域的湍流程度、对冲现象有明显影响, 进而显著影响雾化特性。当气体流量为 0.8 m³/h、水流量为 35 L/h 时, 与优化前 (气体流量为 0.95 m³/h、水流量为 40 L/h) 相比, SMD 减小了 21.50%, 有效射程、雾滴速度、雾滴个数分别增加了 10.26%、39.08%、61.54%, 喷嘴雾化能耗降低的同时综合雾化效果得到了提升。

关键词: 雾化喷嘴; 双流体; 相位多普勒粒子分析仪; 雾化特性

中图分类号: S491; TQ027.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0362-08

Atomizing Characteristics of Twin-fluid Impact Nozzle Based on PDPA

CHEN Bo¹ GAO Dianrong¹ YANG Chao^{1,2} WU Shaofeng¹ WANG Mingzhe¹

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. Qinhuangdao Capital Starlight Environmental Technology Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the atomizing performance and decrease the consumption, the effect of air flow and water flow on the atomizing characteristics of twin-fluid impact nozzle was researched, the twin-fluid atomizing flow field was tested under different working conditions by an open atomizing test bench which was based on phase Doppler particle analyzer (PDPA). The atomizing characteristics which included spray cone angle, atomizing range, droplets diameter distribution, droplets velocity distribution and droplets numbers distribution were analyzed systematically according to the test results. It could be concluded from the test results, with the increase of air flow and decrease of water flow, the spray cone angle was increased remarkably, the droplets Sauter mean diameter (SMD), droplets velocity and droplets numbers were decreased, but the atomizing range showed an increasing trend with the increase of air flow and water flow. The distributions of droplets SMD, droplets velocity and droplets numbers were increased along the axial direction. Moreover, the distribution of droplets SMD was increased while the droplets velocity and droplets numbers were increased firstly and then decreased along the radial direction. Furthermore, the turbulence and hedging in the region between the nozzle exit and vibrating head were affected obviously by the air flow and water flow, and then the atomizing characteristics was markedly influenced. The air flow and water flow were decreased by 15.79% and 12.50%, respectively, after optimization when they were 0.8 m³/h and 35 L/h, meanwhile, the SMD was decreased by 21.50%, the atomizing range was increased by 10.26%, the droplets velocity and droplets numbers were increased by 39.08% and 61.54%, and it can be concluded that the atomizing performance was improved and the consumption of the nozzle was decreased.

Key words: atomizing nozzle; twin-fluid; phase Doppler particle analyzer; atomizing characteristics

收稿日期: 2016-08-08 修回日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51375421)、国家重点研发计划项目 (2016YFC0206000) 和河北省研究生创新项目 (2016JSBS008)

作者简介: 陈波 (1990—), 男, 博士生, 主要从事流体机械设计和数值模拟与优化研究, E-mail: flygo230@163.com

通信作者: 高殿荣 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 CFD、PIV 与新型流体元件研究, E-mail: gaodr@ysu.edu.cn

引言

双流体雾化喷嘴作为超细水雾技术的载体之一,是众多农机、环保等装备的关键零部件,因具有适用范围广、雾化粒径小、结构简单可靠等优点越来越受到人们的重视^[1-5]。由于双流体之间存在着相互作用,使得雾化喷嘴在药液喷洒、喷雾降尘的应用中面临着诸多问题,如喷雾覆盖范围小、雾化量不稳定、雾化能耗高等。为了解决这些问题,目前国内外学者对双流体雾化喷嘴展开了多方面的研究^[6-15]。从目前的文献资料分析,国内外对于双流体喷嘴雾化特性方面的研究多围绕直喷式和外混对喷式结构展开,关于撞击式结构方面的研究较少。而双流体撞击式喷嘴在实际应用中也同样存在着上述问题,掌握其雾化特性是提升雾化效果和降低能耗的一个关键所在。由于 PDPA 是目前世界上非接触测量最先进的设备之一,已成为喷雾试验的标准工具^[16-17],因此,笔者借助此先进设备自主搭建一套基于 PDPA 的开放式雾化试验台,进行关于双流体撞击式喷嘴雾化特性(包括喷雾锥角、有效射程以及雾滴粒径、速度、个数的分布)的试验,以期得到气体流量和水流量对雾化特性的影响规律。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备

搭建的双流体撞击式喷嘴雾化测试系统主要由喷雾控制系统和 PDPA 测量系统组成,如图 1 所示。

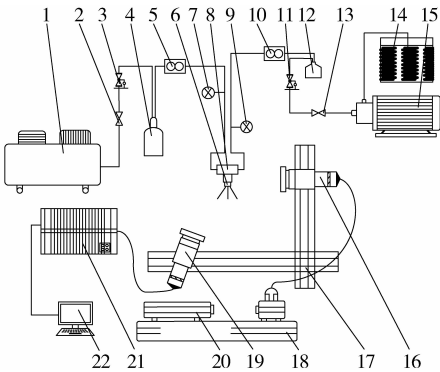


图 1 雾化测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of atomizing test system

1.空气压缩机 2,13.截止阀 3,11.减压阀 4.蓄能器 5,10.流量计 6.双流体喷嘴 7,9.压力表 8.喷嘴固定座 12.稳压罐 14.储水箱 15.水泵 16.发射探头 17.三维位移系统 18.氩离子激光器 19.接收探头 20.分光器 21.PDPA 信号处理器 22.计算机

喷雾控制系统主要用于双流雾化试验过程中工况的调节和监测。空气压缩机和水泵是系统的动力源,由截止阀控制管路通断、减压阀控制管路中的压

力,由压力表和流量计监测管路中的压力和流量。蓄能器和稳压罐起吸收管路流体波动的作用。喷嘴固定座的两侧分别连接气体管路和水管路并与双流体雾化喷嘴连接。喷雾控制系统主要参数如表 1 所示。

表 1 喷雾控制系统主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of spray control system

装置	参数	数值
FB-0.36 型空气压缩机	额定压力/MPa	0.8
	容积流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	21.6
YK-LLQ-16 型气体流量计	测量范围/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.03 ~ 16
	测量精度/%	± 1.5
TRD320-4 型液体流量计	测量范围/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	15 ~ 450
	测量精度/%	± 0.5
XKJ-804S 型水泵	额定压力/MPa	0.5
	流量/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	3 600
K50L 型储水箱	容积/L	50
Y60 型压力表	测量范围/MPa	0 ~ 1
	测量精度/%	± 1

PDPA 测量系统为丹麦 Dantec 公司的三维光纤型相位多普勒系统,主要包括 6 W 的水冷氩离子激光器、BSA P80 型的 PDPA 处理器、HiDense 接收探头、发射探头、分光器、三维位移系统、光电转换器以及计算机。其中,发射探头与接收探头轴线之间的夹角为 73° ,粒径和速度的测量范围分别为 $0.5 \sim 13\,000\,\mu\text{m}$ 和 $0 \sim 500\,\text{m/s}$,两者的测量精度均为 0.5%,三维位移系统的移动精度为 0.1 mm。

在封闭实验室中,搭建的双流体雾化试验台如图 2 所示。试验主要研究气体流量和水流量对喷嘴雾化特性的影响,试验相关参数如表 2 所示。

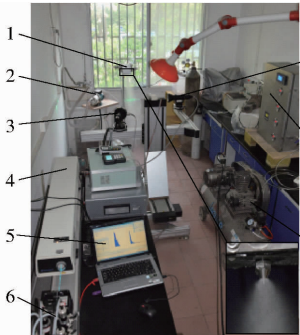


图 2 双流体雾化试验台

Fig. 2 Experimental bench of twin-fluid atomizing test

1.喷嘴固定座 2.水泵 3.接收探头 4.激光器 5.计算机 6.分光器 7.空气压缩机 8.喷雾控制柜 9.发射探头

表 2 试验相关参数

Tab. 2 Parameters of experiment

参数	气体流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	水流量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/ %	压力
数值	0.65 ~ 1.00	25 ~ 40	25 ± 1	60 ~ 65	常压

1.2 试验方法

以空气和自来水作为工作介质进行双流体雾化试验,对不同工况下的雾化有效射程和喷雾锥角进行测试,同时对不同工况、不同空间测点上的雾滴粒径、速度以及个数分布进行测试,每个测点持续测量时间为 30 s。试验中所采用的双流体撞击式喷嘴如图 3 所示,压缩空气和自来水分别通过气体通道和水流通道进入阀芯混合雾化,大量雾滴从双流体出口喷出并撞击出口前端的振动头,实现二次雾化以提高雾化效果。试验时每个测点均进行 3 次数据采集并以这 3 次数据的平均值作为试验结果,以确保试验的可重复性以及数据精度。

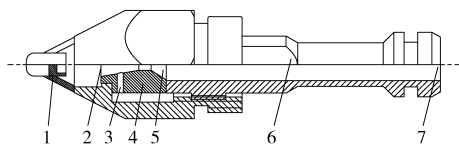


图 3 双流体喷嘴示意图

Fig. 3 Schematic of twin-fluid atomizing nozzle

1. 振动头 2. 双流体出口 3. 水流通道 4. 阀芯结构 5. 气体通道 6. 水进口 7. 气体进口

2 测量结果及分析

2.1 双流体喷雾锥角

喷雾锥角指雾化流场外边界间的夹角^[18],可作为雾化流场覆盖范围的衡量指标之一。选取与喷嘴距离 400 mm 的平面作为测试基准面,定义 30 s 采样时间内采集到的雾滴个数低于 30 时为雾化流场外边界上的点^[19],将此点与喷嘴出口中心的连线作为雾化流场外边界线,通过计算过喷嘴中心轴线的平面上两条外边界线的夹角以确定喷雾锥角。

不同气体流量和水流量对喷雾锥角的影响规律如图 4 所示。不同的水流量下,喷雾锥角随气体流量变化的规律基本相似,随着气体流量的增大,喷雾锥角呈先缓慢增大,随后迅速增大,最后趋于稳定的规律。当气体流量在 $0.7 \sim 0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,喷雾锥角呈增大趋势,并且增大迅速,变化幅度达 $38.3\% \sim 50.1\%$,可见在此范围内气体流量的增大能极大地增加喷雾锥角,原因为气体流量的增大引起了气流速度的增大,使得气流携带的雾滴速度增大,当高速雾滴撞击振动头时反弹,并与前进的雾滴高速对冲,导致了雾滴径向速度的增加,从而引起了喷雾锥角的增大。而当气体流量在 $0.65 \sim 0.7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,喷雾锥角表现出缓慢增加的现象,这是因为此时的气流速度相对较小,喷嘴出口与振动头之间的对冲程度较弱,对雾滴径向速度的影响也较弱,故喷雾锥角变化较缓慢。当气体流量在 $0.9 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,喷雾

锥角表现出逐渐稳定甚至有所减小的现象,这是由于此时的气体流量较大,喷嘴雾化能力较强,雾滴粒径较小,雾滴径向速度虽然有所增加,但由于雾滴粒径的减小导致了气体流量对雾滴动量的影响减弱,同时雾滴粒径的减小还导致了雾化锥形容易出现坍塌、飘散等现象,各因素的综合作用导致了喷雾锥角不再增大,甚至在水流量较低时,喷雾锥角出现了减小的现象。

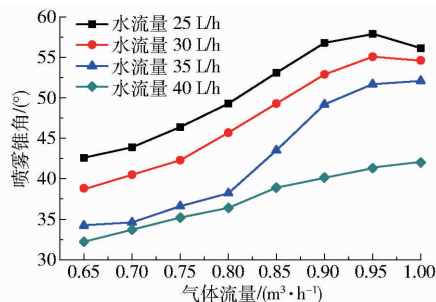


图 4 流量对喷雾锥角的影响

Fig. 4 Effect of flow on spray cone angle

此外,当水流量在 $25 \sim 40 \text{ L/h}$ 范围内时,喷雾锥角随着水流量的减小而增大,其原因为同等气体流量下,水流量的减小使得雾化所消耗的气流动能减少,导致喷嘴出口与振动头之间的反弹对冲更剧烈,引起了雾滴径向速度的增加,从而表现出喷雾锥角增大的现象。

2.2 双流体雾化有效射程

根据 2.1 节中流场边界的测量方法确定雾滴沿喷嘴轴线运动的最远边界,将此边界与喷嘴出口的距离定义为雾化有效射程。不同气体流量和水流量对雾化有效射程的影响规律如图 5 所示。在不同的水流量下,气体流量对雾化有效射程的影响规律基本相似,当气体流量小于 $0.85 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,有效射程随气体流量增大而增大,当气体流量大于 $0.85 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,其反而随着气体流量的增大而减小。由前面分析可知,气体流量较大时,雾滴粒径较小,导致雾滴轴向冲量不足,另一方面,由于粒径较小,远离喷嘴的雾滴冲量不足,更容易受空气阻力的影响而沿径向发散,从而导致轴向距离的减小。

另外,随着水流量的增大,有效射程表现了增大的趋势。假设水流量的增大能引起雾滴粒径的增大,从而导致雾滴质量的增大,则在同等气体流量的作用下,大粒径雾滴所具有的动能更大,雾化的有效距离更远。

喷雾锥角和有效射程均可作为流场覆盖范围的衡量指标,喷雾锥角越大,有效射程越远,其雾化流场覆盖范围越大。综合两者考虑认为,气体流量在 $0.85 \sim 0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 、水流量在 $30 \sim 35 \text{ L/h}$ 时,喷嘴的雾

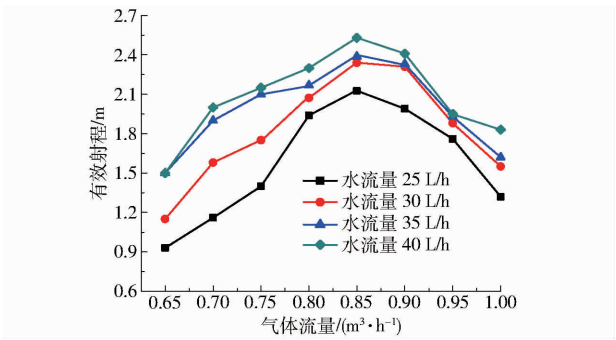


图 5 流量对雾化有效射程的影响
Fig. 5 Effect of flow on atomizing range

化流场覆盖范围较大,额外增加气体流量不仅对其影响不大,反而会导致喷雾系统的功耗以及维护成本增加。

2.3 双流体雾化流场粒径特性

雾化后,喷嘴喷出的雾呈圆锥形,为了更好地捕捉雾化空间中的雾滴,提高流场的空间测试效率,采用平面测点的信息近似替代空间信息的测量方法。根据所测不同工况下的喷雾锥角的最大值设定平面测量点,如图 6 所示。为了更直观地呈现雾化特性的空间分布情况,采用二维等高线形式表示雾化特性的分布^[20-21]。其中采用索特平均直径(SMD)作为喷雾持续期内测量点的雾滴平均粒径测量值。

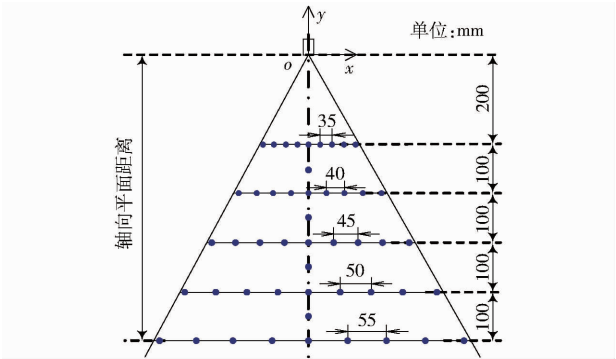


图 6 测量点布置示意图
Fig. 6 Schematic of measurement points arrangement

以水流量 35 L/h 为例,研究了气体流量分别为 0.8、0.9、1.0 m³/h 时 SMD 空间分布的规律,如图 7

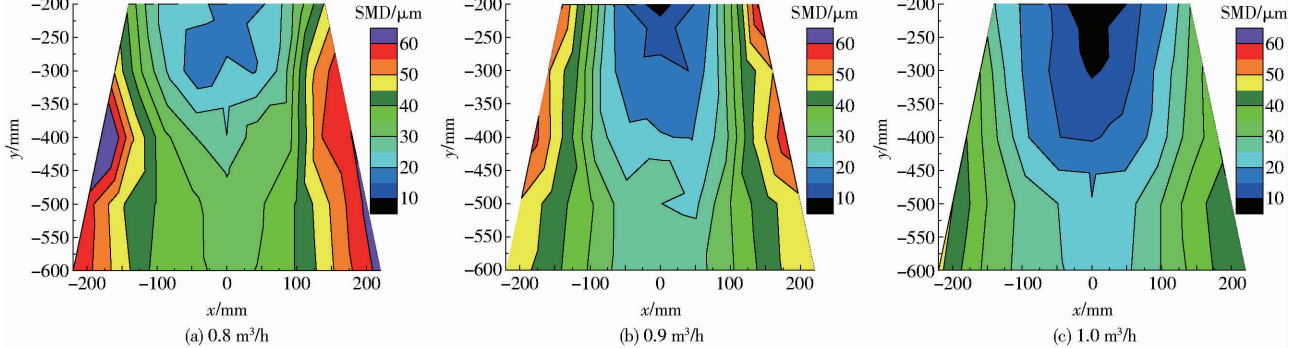


图 7 气体流量对雾化粒径空间分布的影响
Fig. 7 Effect of air flow on atomizing droplets diameter distribution

所示。

图 7 中的 x 、 y 分别对应于喷嘴的径向和轴向。不同气体流量下,SMD 空间分布规律基本一致,以图 7b 为例进行分析可知,靠近喷嘴出口处的 SMD 最小,随着轴向距离的增大(对应图 6 中 y 的减小),SMD 呈增大趋势,同时随着径向距离的增大(对应图 6 中 x 方向),SMD 也呈增大趋势,尤其是边缘区域的 SMD 较大,沿喷嘴中轴线两侧 SMD 的变化规律较一致。出现这一现象的原因为靠近喷嘴处双流体湍流极其剧烈,雾化作用强烈,表现为 SMD 较小,而雾滴远离喷嘴的过程中会与自身和环境发生传热、传质现象并同时伴随着碰并、凝聚等物理过程,导致了 SMD 的增大。另外,靠近喷嘴处的小雾滴由于动量较小,难以到达两侧边缘,因此也会导致出现喷雾边缘 SMD 增大的现象。图 7a 与图 7c 也呈现了同样的规律。

随着气体流量的增加,流场中的 SMD 分布总体呈现出减小的趋势,小粒径的区域在向着远离喷嘴的方向扩散,SMD 为 10 μm 以下的区域面积逐渐增大,表明喷嘴的整体雾化效果在提升,粒径分布得到一定程度的改善。这是因为气体流量的增大引起了喷嘴内部双流体湍流加剧,同时也加剧了喷嘴出口与振动头之间的雾滴对冲现象,两者共同促进了雾滴的破碎,提高了雾化效果。可见气体流量的增大,在一定程度内有利于 SMD 的减小,对雾化效果的提升具有积极作用。

以气体流量 0.8 m³/h 为例,研究了水流量为 30、35、40 L/h 时 SMD 空间分布的规律,如图 8 所示。不同水流量下,SMD 空间分布规律类似,表现出靠近喷嘴出口的 SMD 小,而远离喷嘴出口的 SMD 大的现象。另外,从图中还能看出大粒径的雾滴更容易向径向偏移,径向粒径变化梯度大,而轴向的粒径变化梯度相对较小,这是由喷嘴出口与震动头之间区域的对冲现象造成的,水流量较大时,SMD 较大,对冲使得雾滴碰撞后的径向速度增大,呈“挤压

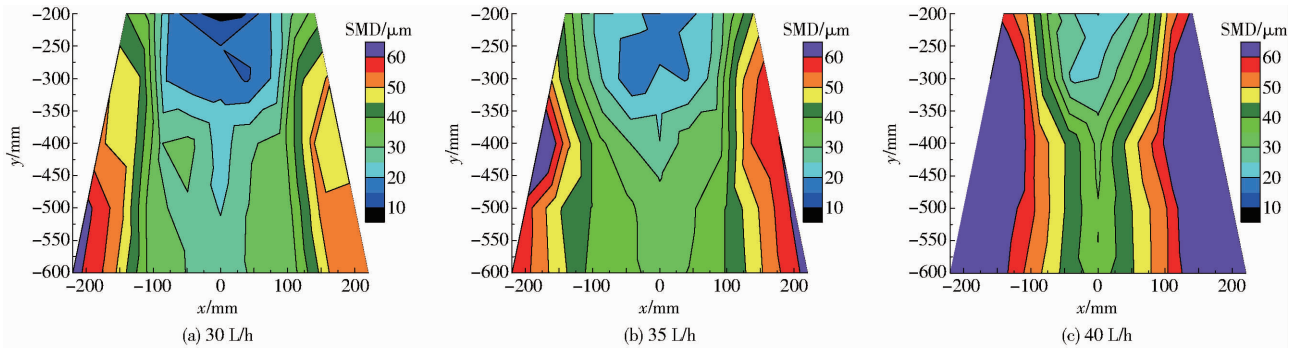


图 8 水流量对雾化粒径空间分布的影响

Fig. 8 Effect of water flow on atomizing droplets diameter distribution

扩散”状,从而引起大粒径雾滴的动能增加,更容易运动到外侧,由此出现上述现象。

对比图 8a、8b、8c 可以看出,随水流量的增大,流场中的 SMD 分布总体呈现增大的趋势,喷嘴的雾化效果在恶化,尤其是当水流量为 40 L/h 时,空间中接近一半区域的 SMD 均超过了 60 μm。这与 2.1 节关于喷雾锥角随水流量变化的分析一致,证明了上述假设的正确性。造成这一现象的原因为气流动能一定时,水流量的增大造成了雾化能力的不足,雾滴破碎、分裂变得困难,雾化速度变得缓慢,从而导致了雾化粒径的增大。

2.4 双流体雾化流场速度特性

由于双流体喷嘴结构中的振动头对轴向速度影响较大,因此本节重点分析流场中雾滴的轴向速度在空间中的变化规律,以下分析中的速度均指轴向速度。以水流量 35 L/h 为例,研究了气体流量分别为 0.8、0.9、1.0 m³/h 时雾滴轴向速度空间分布的规律,如图 9 所示。可以看出速度沿中心轴线远离喷嘴的方向逐渐减小。两侧的速度分布规律较明显,从中心到外侧的径向方向上的雾滴速度呈现出

先增大后减小的变化规律,在喷雾的边缘和远离喷嘴的下游,轴向速度衰减较大。综合以上现象分析其原因为,虽然喷嘴出口处的振动头对雾化具有积极作用,但同时也对雾滴的轴向速度造成一定的影响,引起了中轴线附近区域的雾滴轴向速度受阻减小,从而表现出中轴线附近速度小的现象。由于喷雾过程中,边缘处的雾滴所受空气阻力最大,速度的衰减也最快,而介于中轴线与边缘之间的区域由于只受到雾滴之间的相互阻碍,因此速度衰减较缓,另外,越靠近边缘的雾滴所受到的影响越大,故形成了从中心到边缘的梯度减小的变化。

对比图 9a、9b 和图 9c 可以看出,随气体流量的增加,流场中的雾滴速度分布总体呈现减小的趋势,结合 SMD 随气体流量变化的规律分析可知,气体流量的增大会引起 SMD 的减小,同时,气体流量的增大也会加剧喷嘴出口与振动头之间的雾滴对冲现象,造成雾滴流场的湍流更加剧烈,雾滴之间的掺混现象严重,加之雾滴粒径较小,极容易受到流场波动的影响,雾滴的速度衰减更快,因此造成气体流量大雾滴速度小的现象。

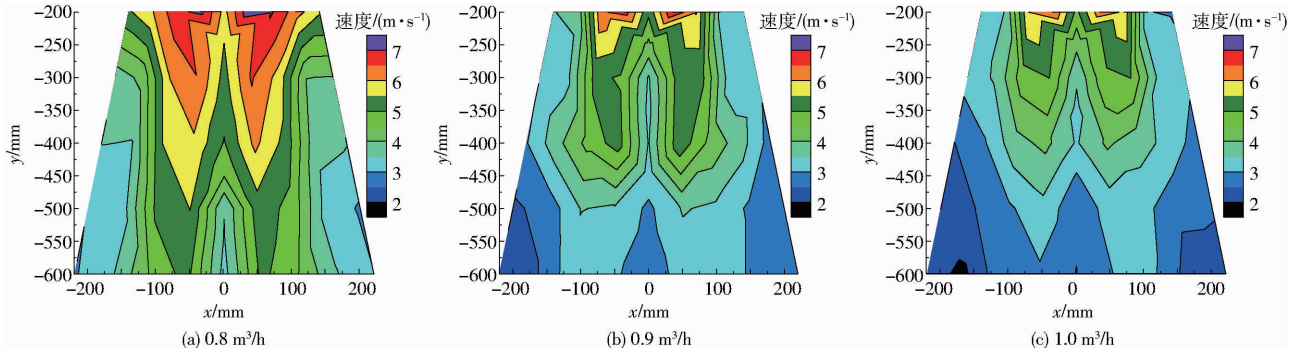


图 9 气体流量对雾滴速度空间分布的影响

Fig. 9 Effect of air flow on droplets velocity distribution

以气体流量 0.8 m³/h 为例,研究了水流量分别为 30、35、40 L/h 时雾滴轴向速度空间分布的规律,如图 10 所示。不同水流量下,雾滴速度的空间分布规律类似,呈现出沿中心轴线远离喷嘴的方向逐渐减小且沿径向先增大后减小的变化规律,此现象的

原因已在前面进行了分析。

对比不同的水流量可以明显看出,水流量的增大引起了流场中雾滴速度总体的增大。此现象的原因可能是雾滴移动所需要的能量较雾滴破碎、分裂的低,在此工况下,喷嘴雾化能力的不足导致了雾滴

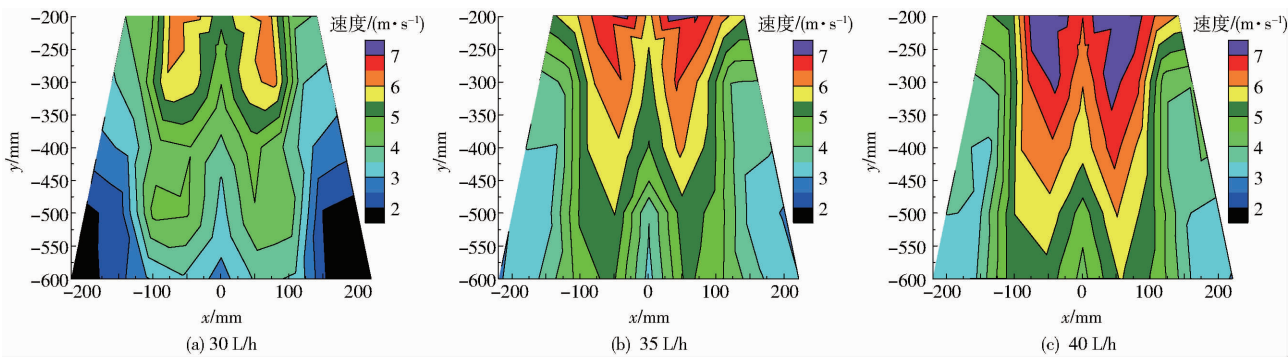


图 10 水流量对雾滴速度空间分布的影响

Fig. 10 Effect of water flow on droplets velocity distribution

更倾向于移动而非破碎,从而出现了水流量增大,雾滴速度和 SMD 均增大的现象。

2.5 双流体雾化流场雾滴个数特性

雾滴个数是指雾化的雾滴在采样时间内通过采样点的个数,能反映雾滴破碎、分裂的能力,可以此作为雾化量的衡量指标。以水流量 35 L/h 为例,研究了气体流量分别为 0.8、0.9、1.0 m³/h 时雾滴个数空间分布的规律,如图 11 所示。图中沿中心轴线两侧的雾滴个数分布规律明显,与上述雾滴速度变化规律类似,沿中心轴线的雾滴个数逐渐减少,而从中心到外侧的径向方向上的雾滴个数也呈现出先增大后减小的变化规律,这一现象的出现再次说明喷嘴出口处的振动头对雾滴空间分布造成了一定的影响,引起中轴线附近区域的雾滴运动受阻,导致采样点通过的雾滴个数减少,同时也验证了前面分析的正确性。除了中心轴线附近区域的雾滴个数出现减

少的现象,其他区域的雾滴个数在径向方向上也表现出依次减小的趋势,在喷雾边缘处雾滴个数大幅减小,这与边缘处的空气卷吸现象有很大关系。对比 3 种不同的空气流量可以看出,随着气体流量的增加,流场中的雾滴个数分布总体呈现出减小的趋势,结合前面速度分析可知,气体流量的增大引起了雾滴速度的减小,导致了单位时间内通过采样点的雾滴个数减少,雾化效率有所降低。

以气体流量 0.8 m³/h 为例,研究了水流量分别为 30、35、40 L/h 时雾滴个数空间分布的规律,如图 12 所示。图中沿中心轴线两侧的雾滴个数分布规律较明显,从中心到外侧的径向方向上的雾滴个数也同样出现先增大后减小的变化规律。对比不同的水流量可以看出,水流量的增大引起了流场中雾滴个数分布总体的增大,说明水流量的增大对雾化量的提升具有显著影响。

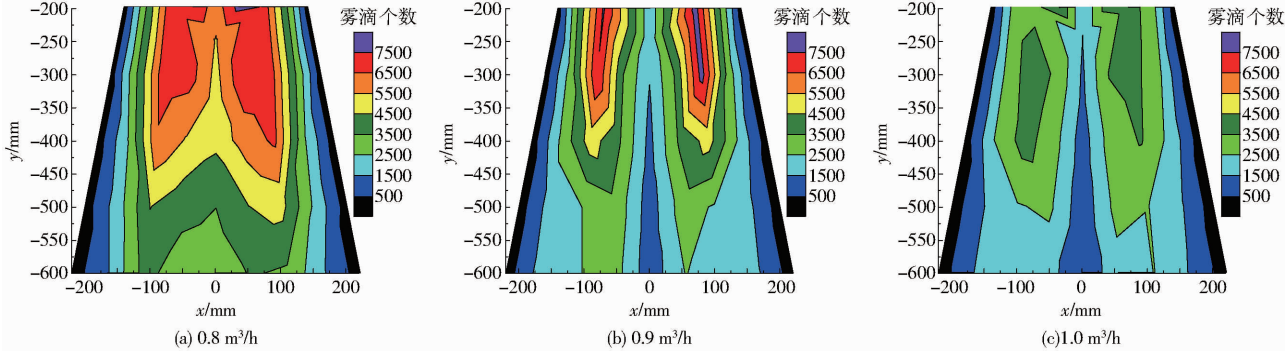


图 11 气体流量对雾滴个数空间分布的影响

Fig. 11 Effect of air flow on droplets numbers distribution

2.6 双流体雾化特性综合分析

通过以上分析可以看出,气体流量和水流量对双流体撞击式喷嘴的雾化特性有明显的影响,结合整体雾化特性考虑认为,当气体流量为 0.8 m³/h、水流量为 35 L/h 时,喷嘴的综合雾化效果较好。由上述雾化特性分布规律可知,流场中间区域的雾化特性较其他区域稳定,故以沿喷嘴中心轴线、距离喷嘴出口 400 mm 处的测点为例,在优化前后的 2 种不同工况下,对比雾滴 SMD、速度以及个数的变化,并结

合喷雾锥角和有效射程进行对比分析,雾化特性对比结果如表 3 所示。其中,优化前的气体流量为 0.95 m³/h、水流量为 40 L/h。

通过优化后,气体流量和水流量分别减小了 15.79% 和 12.50%,雾化能耗降低。由表 3 可以看出,除了喷雾锥角减小了 7.28% 而变差外,其他特性参数均得到了不同程度的优化,有效射程增加了 10.26%,SMD 减小了 21.50%,雾滴速度和雾滴个数分别增加了 39.08% 和 61.54%,喷嘴的综合雾化

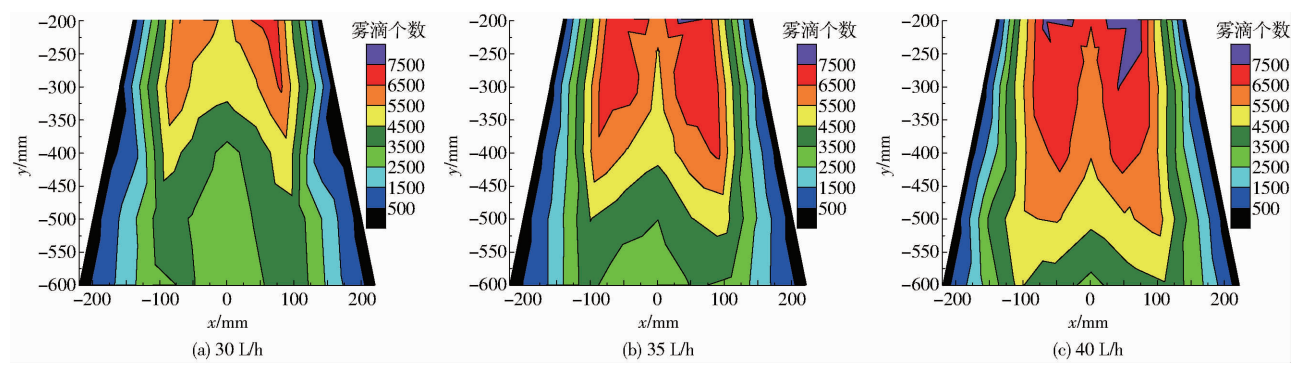


图 12 水流量对雾滴个数空间分布的影响

Fig. 12 Effect of water flow on droplets numbers distribution

表 3 雾化特性对比

Tab. 3 Comparison of atomizing characteristics					
特性 参数	雾化 锥角/ (°)	有效 射程/ m	雾滴		
			SMD/ μm	速度/ (m·s ⁻¹)	个数
优化前	41. 2	1. 95	32. 1	4. 12	3 032
优化后	38. 2	2. 15	25. 2	5. 73	4 898
变化率/%	-7. 28	10. 26	-21. 50	39. 08	61. 54

效果得到了提升。

3 结论

- (1)气体流量的增大有利于喷雾锥角和有效射程的增大,但当气流量大于 0. 85 m³/h 时,有效射程反而减小;水流量的增大有利于有效射程的增大但不利于喷雾锥角的增大。
- (2)SMD 随着轴向、径向距离的增大呈增大的趋势,喷嘴出口处 SMD 最小,边缘区域 SMD 较大;气体流量的增大以及水流量的减小均有利于 SMD 减小,引起了小粒径区域面积的增大,喷雾效果得

- 到提升。
- (3)雾滴速度和雾滴个数分布规律较一致,沿中心轴线呈现出逐渐减小的趋势,而沿径向呈现出先增大后减小的趋势;水流量的增加有利于雾滴速度和雾滴个数的增大,而气体流量的增加却有相反的效果。
- (4)气体流量和水流量对喷嘴出口与振动头之间区域的湍流程度、对冲现象有明显的影响,进而显著影响了喷嘴的雾化特性。
- (5)在所研究工况范围内,当气体流量为 0. 85 ~ 0. 9 m³/h、水流量为 30 ~ 35 L/h 时,喷嘴雾化场覆盖范围较大;结合整体雾化特性进一步考虑,当气体流量为 0. 8 m³/h、水流量为 35 L/h 时,较优化前(气体流量为 0. 95 m³/h、水流量为 40 L/h),气体流量和水流量分别减小了 15. 79% 和 12. 50%,而 SMD 减小了 21. 50%,有效射程、雾滴速度以及雾滴个数分别增加了 10. 26%、39. 08% 和 61. 54%,喷嘴雾化能耗降低的同时综合雾化效果得以提升。

参 考 文 献

1 王军,王兴华,季亮,等. SCR 系统尿素水溶液喷雾分解影响因素数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 372 – 375. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161048&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 10. 048.

WANG Jun, WANG Xinghua, JI Liang, et al. Numerical simulation on influential factors on urea solution spray and decomposition of SCR system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 372 – 375. (in Chinese)

2 苏雁,曹晓东. 单流体与双流体综合除尘系统研发与应用[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(8): 39 – 42.

SU Yan, CAO Xiaodong. Research and application on single fluid and double fluid integrated dedusting system[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(8): 39 – 42. (in Chinese)

3 黄鑫,王喜世,廖光焯,等. 双流体细水雾对木垛火的灭火特性研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(5): 131 – 135.

HUANG Xin, WANG Xishi, LIAO Guangxuan, et al. Study on wood crib fire suppression characteristics of twin-fluid water mist [J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(5): 131 – 135. (in Chinese)

4 于勇,张夏,陈维. 用双流体模型模拟超声速气固两相流动[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 800 – 807.

YU Yong, ZHANG Xia, CHEN Wei. Simulation of supersonic gas – particle two-phase flow with two-fluid model[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 800 – 807. (in Chinese)

5 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53 – 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141009&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 10. 009.

ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in

- China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53–59. (in Chinese)
- 6 SANDER A, PENOVIC T. Droplet size distribution obtained by atomization with two-fluid nozzles in a spray dryer[J]. Chemical Engineering & Technology, 2014, 37(12): 2073–2084.
- 7 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.
- 8 EJIM C E, RAHMAN M A, AMIRFAZLI A, et al. Effects of liquid viscosity and surface tension on atomization in two-phase, gas/liquid fluid coker nozzles[J]. Fuel, 2010, 89(8): 1872–1882.
- 9 王贞涛, 岑旗钢, 宋晓宁, 等. 双流体荷电雾化的 PDA 实验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 80–84.
WANG Zhentao, CEN Qigang, SONG Xiaoning, et al. Experiment of twin-fluid charged spray by PDA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 80–84. (in Chinese)
- 10 王军锋, 王贞涛, 毛惠敏, 等. 双流体荷电喷雾结构的 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 107–111.
WANG Junfeng, WANG Zhentao, MAO Huimin, et al. Measurement of twin-fluid electrostatic spray structure by using PIV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 107–111. (in Chinese)
- 11 王晓英, 王贞涛, 顾维锴. 双流体雾化液滴荷电特性分析[J]. 实验力学, 2015, 30(1): 87–93.
WANG Xiaoying, WANG Zhentao, GU Weikai. Analysis of droplet charged characteristics for twin-fluid atomization[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(1): 87–93. (in Chinese)
- 12 孙春华, 宁智, 吕明, 等. 气泡雾化喷嘴气体溢出过程声波信号的时频特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 315–322. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150144&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.044.
SUN Chunhua, NING Zhi, LÜ Ming, et al. Time-frequency characteristics of acoustic signal in gas flowing process of effervescent spray nozzle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 315–322. (in Chinese)
- 13 LÜ M, NING Z, YAN K, et al. Instability and breakup of cavitation bubbles within diesel drops[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(1): 262–267.
- 14 吕明, 宁智, 阎凯, 等. 基于作用力分析的分裂液滴内空泡时间稳定性研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14):162–169.
LÜ Ming, NING Zhi, YAN Kai, et al. Study on the temporal stability of cavitation bubble growth within the droplet based on acting force analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 162–169. (in Chinese)
- 15 岳朴杰, 张忠孝, 毕德贵, 等. 双流体气流式喷嘴加压雾化特性研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1):74–77.
YUE Pujie, ZHANG Zhongxiao, BI Degui, et al. Twin fluid air-blast nozzle atomization characteristics under high ambient pressure[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(1): 74–77. (in Chinese)
- 16 吴珣, 焦晶晶, 杨彪, 等. 基于激光的多相流测试技术应用研究进展[J]. 激光与红外, 2016, 46(2):132–138.
WU Xuan, JIAO Jingjing, YANG Biao, et al. Application research progress of the multiphase flow measurement technology based on laser[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(2): 132–138. (in Chinese)
- 17 郭恒杰, 李雁飞, 徐宏明, 等. 基于三维 PDPA 的旋流式 GDI 喷油器喷雾特性[J]. 内燃机学报, 2015, 33(4): 335–341.
GUO Hengjie, LI Yanfei, XU Hongming, et al. Spray characteristics of swirl-type GDI injector using 3D-PDPA[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(4): 335–341. (in Chinese)
- 18 杨超, 陈波, 姜万录, 等. 基于拉瓦尔效应的超音速喷嘴雾化性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 57–64.
YANG Chao, CHEN Bo, JIANG Wanlu, et al. Analysis and experiment on atomizing characteristics of supersonic nozzle based on Laval effect[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 57–64. (in Chinese)
- 19 贾卫东, 李萍萍, 邱白晶, 等. PDPA 在喷嘴雾化特性试验研究中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2008(9): 70–72.
JIA Weidong, LI Pingping, QIU Baijing, et al. Application of phase Doppler particle analyzer in reek spray nozzle's characteristic experiment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(9): 70–72. (in Chinese)
- 20 LEE S, PARK S. Spray atomization characteristics of a GDI injector equipped with a group-hole nozzle[J]. Fuel, 2014, 137: 50–59.
- 21 姚春德, 陈志方, 吴涛阳, 等. 甲醇温度和压力对喷雾特性的影响试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 377–382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151151&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.051.
YAO Chunde, CHEN Zhifang, WU Taoyang, et al. Experiment on effects of methanol temperature and pressure on spray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 377–382. (in Chinese)