## 烟包新材料与数字化

# 双介质喷嘴雾化特性数值模拟研究

## 吴正人<sup>1</sup>,石祎炜<sup>1</sup>,彭子春<sup>1</sup>,杨小娜<sup>2</sup>,刘梅<sup>3</sup>

(1.华北电力大学 河北省低碳高效发电技术重点实验室,河北 保定 071003; 2.河北白沙烟草有限责任 公司保定卷烟厂,河北 保定 071000; 3.华北电力大学 经济管理系,河北 保定 071003)

摘要:目的 双介质喷嘴雾化效果直接影响烟卷加料工艺的进一步提升,通过对雾化过程进行数值模拟, 方便对雾化特性进行透彻的分析,提升雾化效果。方法 采用数值模拟方法构建两相流连续相流场与 DPM 离散态双向耦合的数值模型,研究蒸汽压力、液体流量以及双介质喷嘴结构对喷嘴雾化特性的影 响。结果 适当增加蒸汽压力,可以在不影响最大流速、颗粒粒径均匀度及颗粒中值粒径的情况下,减 小雾化扩散角,小幅度地增加喷射距离,雾化细度变好,进而提高雾化效果。随着有机液流量的增加, 雾化扩散角增大,喷射距离增加,雾化粒径均匀度变好,从而使雾化效果变好。液体路通流面积越大喷 雾的贯穿距离越小,气路通流面积越大喷雾的雾化扩散角度越大。若需要得到较好的雾化效果,需要保 证较小的蒸汽路通流面积,与此同时液路侧保持正常开度。结论 适当地提高有机液流量或者蒸汽压力, 以及采用较小蒸汽路通流面积,同时液路侧保持正常开度的结构,有利于提高料液喷洒的均匀性,减少 了料液的浪费,提高了烟丝制备的工艺水平。

关键词:双介质喷嘴;索特平均直径;雾化扩散角;颗粒均匀度;通流面积 中图分类号:TK221 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)15-0184-10 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.15.024

#### Numerical Simulation of Atomization Characteristics of Dual-medium Nozzle

WU Zheng-ren<sup>1</sup>, SHI Yi-wei<sup>1</sup>, PENG Zi-chun<sup>1</sup>, YANG Xiao-na<sup>2</sup>, LIU Mei<sup>3</sup>

 (1. Hebei Province Key Laboratory of Low-carbon High-efficiency Power Generation Technology, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. Baoding Cigarette Factory, Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd., Hebei Baoding 071000, China; 3. Department of Economic Management, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

**ABSTRACT:** The atomization effect of the double-medium nozzle directly affects the further improvement of the cigarette feeding process. The work aims to thoroughly analyze the atomization characteristics and improve the atomization effect through the numerical simulation of the atomization process. The numerical simulation method was used to build a two-way coupling numerical model of continuous two-phase flow field and DPM discrete state, and the effects of steam pressure, liquid flow rate and dual-medium nozzle structure on nozzle atomization characteristics were studied. Properly increasing the steam pressure could reduce the atomization diffusion angle, slightly increase the spray distance, improve the atomization fineness, and enhance the atomization effect without affecting the maximum flow rate, particle size uniformity and particle median size. With the increase of the organic liquid flow rate, the atomization diffusion angle increased, the spray distance increased, and the atomization particle size uniformity became better, thus making the atomi-

- 基金项目:国家自然科学基金项目(12172129)
- 作者简介:吴正人(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为流体动力学理论及应用。
- 通信作者:杨小娜(1979—),女,本科,工程师,主要研究方向为烟草生产工艺研究。

收稿日期: 2023-03-10

zation effect better. The larger the flow area of the liquid path was, the smaller the penetration distance of the spray was, and the larger the flow area of the gas path was, the larger the atomization diffusion angle of the spray was. If better atomization effect was required, it was necessary to ensure a small flow area of the steam path, and at the same time, the normal opening of the liquid path side was maintained. Properly increasing the flow rate or steam pressure of organic liquid, and adopting a structure with a small flow area of the steam path and a normal opening at the side of the liquid path are conducive to improving the uniformity of the spray of the liquid feed, reducing the waste of the liquid feed, and improving the technological level of cut tobacco preparation.

KEY WORDS: dual-medium nozzle; Sauter mean diameter; atomization diffusion angle; particle uniformity; flow area

目前,很多行业对雾化质量的要求越来越高,而 结构设计合理且运行参数适当的双介质雾化喷嘴的 雾化质量非常好,因此在生产中对双介质雾化喷嘴的 需求不断加大。在烟草行业中,加料工艺对生产高质 量的卷烟产品有着显著的影响,因此加料工艺在烟草 行业中占有重要的地位。由于雾化质量会影响加料、 加香的精度和有效利用率,因此烟草行业对雾化质量的 要求逐渐变高,双介质喷嘴雾得到广泛应用和推广。目 前,加料工艺中主要采用双介质喷嘴对料液进行雾化, 并以一定角度喷射至滚筒内旋转抛撒的烟叶上,完成料 液与烟叶的混合加料。通常是基于经验进行喷嘴雾化的 调整与控制来实现加料,而非通过了解加料过程中的雾 化情况进行分析,这使加料工艺的调控存在了一定局限 性,阻碍了卷烟工艺的进一步提升<sup>[1-2]</sup>。

王萍萍等<sup>[3]</sup>采用欧拉-拉格朗日耦合模型对双介质 雾化喷嘴进行了数值模拟研究。蒋仲安等<sup>[4]</sup>研究了双介 质喷嘴的雾化特性的影响因素。Chen 等<sup>[5]</sup>研究了不同 雾化芯的新型双介质喷嘴的液滴直径和粒径分布。关玉 明等<sup>[6]</sup>通过数值模拟研究了双介质雾化喷嘴的雾化特 性,并以聚氨酯胶和空气为介质。付文锋<sup>[7]</sup>通过构建离 散相模型,开展不同工况下的喷嘴雾化数值模拟计算, 研究不同蒸汽入口压力与不同针阀开度对喷嘴雾化特 性的影响。

Ferreira 等<sup>[8]</sup>发现对混合室内的气体和液体进行充分的混合有助于喷雾的雾化。Lorenzetto 等<sup>[9]</sup>研究表明液体黏度增加,雾化效果变差,对于黏度较小的液体,气液相对速度越大,液滴粒径越小。Jones 等<sup>[10]</sup>对双介质喷嘴进行了离散相模拟,并与实验数据进行对比,验证了模拟的准确性,得到了速度、液滴粒径的变化规律。Satapathy等<sup>[11]</sup>设计了不同结构的喷嘴模型,分别探究了雾化场中液滴粒径的分布,并得到了最佳气液比。

赵乾鹏等<sup>[12]</sup>采用双介质雾化喷嘴进行高原、高空 及地面工况下气动雾化场的数值研究。吴正人等<sup>[13]</sup> 为了研究在不同喷雾压力下喷嘴组的雾化特性利用 FLUENT 软件分别模拟了在不同喷雾压力下喷嘴组 的雾化情况。Mlkvik 等<sup>[14]</sup>使用了 4 种类型的双介质 喷嘴对黏性液体进行喷雾实验,重点比较了液气流 量、喷雾稳定性、液滴大小。Lilan 等<sup>[15]</sup>建立了液滴 粒径分布的实验平均数学模型,通过数值模拟研究了 喷嘴雾化场中液滴的粒径分布。Yu 等<sup>[16]</sup>在分析了双 介质喷嘴雾化机理的基础上,进行实验研究,考虑了 喷嘴结构参数对雾化特性的影响。Wang 等<sup>[17-18]</sup>探究 了不同出口直径喷嘴的喷雾性能和除尘效率。Li等<sup>[19]</sup> 对双介质雾化喷嘴抑尘装置进行了研究,以获得双介 质雾化喷嘴抑尘装置的合理安装角度。通过数值模拟 深入研究了喷嘴安装角度对空气辅助喷雾抑尘装置 雾化性能的影响。

李依潇<sup>[20]</sup>提到数值模拟方法可以突破搭建实验 台成本太高、部分参数测量不便、难度大、耗费时间 长等实验条件的限制,因此运用数值模拟对双介质喷 嘴雾化特性的研究更加贴合实际、更准确,数据处理 也变的更加完善。

综上所述,在现有的研究中针对双介质喷嘴雾化 特性的研究,尤其是雾化后液滴的分布规律与粒径等 特性的分析尚不透彻,这阻碍了烟卷加料工艺的进一 步提升。因此,有必要针对双介质喷嘴雾化特性的影 响因素进行研究。文中采用数值模拟方法,研究蒸汽 压力、液体流量以及喷嘴结构对喷嘴雾化特性的影 响,并得出规律性的结论。

## 1 数值方法

#### 1.1 控制方程

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

式中: $\rho$ 为连续相密度,kg/m<sup>3</sup>; u为速度,m/s。 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \vec{F}$$
(2)

式中: P 为静压, Pa;  $\vec{F}$  为其他体积力引起的动 量变化, kg·m/s;  $\tau$  为应力张量。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \left[ \left( \nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^{\mathrm{T}} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{u} \boldsymbol{I} \right]$$
(3)

式中: μ 为流体动力黏度, Pa·s; I 为单位张量。 组分运输方程:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho_m \vec{u}_j\right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_s D \frac{\partial Y_m}{\partial x_j}\right)$$
(4)

式中: $\rho_m$ 为连续相组分的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_s$ 为混 合气体的密度, kg/m<sup>3</sup>; D 为连续相组分扩散系数;  $Y_m$ 为连续相组分的质量分数。

$$\rho_{s} = \sum_{m} \rho_{m}$$
(5)  
$$Y_{m} = \rho_{m} / \rho$$
(6)

#### 1.2 网格划分及边界条件

喷嘴出口位于圆筒形计算域入口平面轴线位置,喷 嘴后的计算域长度设定为2m。利用 SpaceClaim3D 建 模软件对喷嘴进行建模,为简化模型,只保留喷嘴内流 动的主要结构,去除不影响内部流场的螺母、螺纹等几 何结构,并利用该软件保留流场计算模拟区域。

利用 Fluent Meshing 采用多面体网格对喷嘴与圆筒形计算域进行网格划分。首先设置全局最小网格尺寸为 0.206 69 mm,最大网格尺寸为 35 mm,网格增长率为 1.08。然后采用 Fluent 软件对双介质喷嘴雾化效果进行数值研究,喷嘴几何模型及网格划分结果如图 1 所示。



a 几何模型 b 双介质喷嘴网格 c 计算域网格

图 1 喷嘴几何模型及网格划分结果 Fig.1 Geometric model of nozzle and meshing results

在有机液入口、蒸汽入口和圆筒型计算域四周出口分别采用流量入口、压力入口及静压出口边界条件。为提高连续性方程的收敛性,仿真中采用 SIMPLE 算法,湍流模型选择 Realizable k-ε 湍流模型,液滴 破碎和聚合选择 TAB 破碎模型,液滴尺寸分布选取 Rosin-Rammler 分布函数,液滴追踪采用随机追踪模型,入射模型采用空气辅助雾化器模型。由于存在多种介质,因此在计算中调用组分输运模型。本文设定的工质分别为水蒸气和有机液(密度为 1 060 kg/m<sup>3</sup>、黏度为 2.415 mPa·s、表面张力为 30.701 mN/m )。

采用离散态数值模型对喷嘴出口液滴的初次雾 化与二次雾化过程进行建模与计算,在原先的基础上 开启 DPM 模型,设定粒子时间步长为 0.000 1,时间 步数为 10。射流源设置为空气辅助旋流喷射器,射 流粒子数为 50,粒子类型设置为 Droplet,将混合材 质定义为粒子工质,给定料液流量为 0.037 5 kg/s, 射流孔内直径为 3 mm、外直径为 5 mm,射流角度选 取 46°。由于蒸汽介质与有机液的相对速度对射流影 响较为明显,因此计算采用相对速度为 100 m/s。

#### 1.3 模型无关性和准确性验证

为了保证网格质量以及计算效率,分别使用网格数约为100万、150万、200万、230万、500万的计算域

进行网格无关性验证。最终选取整体网格数约 230 万, 网格平均扭曲度为 0.15, 如表 1 所示。

表 1 网格无关性验证 Tab.1 Mesh agnostic validation

网格 数/万	喷嘴出口蒸汽 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	相对误 差/%	液滴索特平均 直径/μm	相对误 差/%
100	702.6		1.236 0	
150	708.36	0.82	1.226 7	0.75
200	709.92	0.22	1.222 8	0.32
230	710.56	0.09	1.221 5	0.12
500	710.92	0.05	1.220 7	0.06

本实验将喷嘴调节为结构 2 的状态,有机液流量 为 0.037 5 kg/s,改变蒸汽压力(100、200、250、350、 450 kPa),观察雾化场中雾化扩散角的变化,并与模拟 结果进行分析对比。雾化扩散角是雾化效果的一个重要 特征,它指雾化喷嘴射出来的喷雾流场两边边界的夹 角。在雾化场稳定后,采用高速摄像机连续拍摄 5 s, 取其中明亮清晰的照片。

图 2 为蒸汽压力在 100 kPa下的雾化效果图与模拟 效果图进行对比。从图 2 中可以看出,实验雾化图与模 拟雾化图的雾化扩散角几乎一致。从表 2、图 3 中看出 模拟结果与实验结果比较接近,误差均在 10%以内。随 着蒸汽压力的增加,雾化扩散角逐渐减小。与模拟结果 进行对比显示,实验与模拟得到的变换规律保持一致, 验证了数学模型的可靠性。

表 2 数值模拟与实验结果对比 Tab.2 Comparison between numerical simulation and experimental results

	-		
蒸汽压力/kPa	扩散角 实验值/(°)	扩散角 模拟值/(°)	误差/%
100	38.2	37.5	1.8
200	30.8	29.4	4.5
250	27.8	28.2	1.4
350	24.5	25.6	4.5
450	21.2	22.3	5.6



图 2 蒸汽压力 100 kPa 下实验与模拟对比 Fig.2 Comparison of experiment and simulation at steam pressure of 100 kPa



Fig.3 Comparison of steam numerical simulation and experimental results

2 双介质喷嘴雾化特性的分析

## 2.1 不同蒸汽压力对双介质喷嘴雾化特性 的影响分析

结合实际工艺设置了 5 种蒸汽压力,研究蒸汽 压力的改变对流场产生的影响,并且采用离散态 DPM 模型对不同压力的雾化过程进行分析。蒸汽压 力分别设置为 100、200、250、350、450 kPa,有机 液流量保持为 0.037 5 kg/m。为了看到不同压力下流 场速度及液体质量分数分布的差异,对喷嘴出口处进行 取样。图 4 为喷嘴外流场出口平面 z=0 取样点示意图。



图 4 喷嘴外流场关键位置取样点 Fig.4 Sampling points at key locations of nozzle external flow field

图 5 展示了不同压力下喷嘴出口关键位置采样 点速度分布对比。在喷嘴出口 x 方向上,开始速度有 一个小幅度的增加,然后回落,在 0.002 m 处速度迅 速增加,在 0.01 m 左右处达到最大,然后逐渐降低 趋于平稳;在出口 z 方向上的速度变化不大。随着蒸 汽压力的增大,雾化扩散角略微变小。这是因为喷嘴 的蒸汽流道入射角较小,随着蒸汽压力增大,液体流 量不变,气液相对速度变大,高速的蒸汽作用在液体 上的剪切应力随之增加,使得雾化场更加集中,导致 雾化扩散角略微变小。





图 6 展示了不同压力下喷嘴出口关键位置采样 点上液体质量分数的对比。图 6a 中,沿喷嘴出口轴 向 x 方向液体质量分数逐渐降低,最后趋于平稳。从 图 6b 中喷嘴出口 z 方向液体质量分数可以看出,随 着蒸汽压力的增大,雾化扩散角逐渐变小,但改变的 程度不大。

图 7 展示了不同蒸汽压力在不同轴向位置索特 平均直径的变化趋势。在液体流量不变的情况下,随 着蒸汽压力的增加,作用在液体液束上的气动力增 大,液滴之间的破碎、撞击更剧烈,雾化后颗粒索特 平均直径逐渐变小,雾化细度变好。液体流量保持不变, 在相同蒸汽压力下,沿喷嘴出口轴向正方向 0.2~0.6 m, 液滴颗粒的索特平均直径有所增加。

图 8 为压力在 200、350 kPa 时液滴颗粒粒径分布 直方图。不同蒸汽压力下雾化颗粒粒径主要分布在 0.5~1.7 μm,其中蒸汽压力为 200 kPa 时,雾化颗粒粒 径分布在 0.5~1.7 μm 的占比最高,为 78.01%,相对来 说分布最为集中。随着蒸汽压力的改变,颗粒的中值粒 径变化不大,在 0.92~0.98 μm,其中蒸汽压力为 350 kPa 时颗粒中值粒径最小。



Fig.6 Liquid mass fraction at sampling points at nozzle outlet under different pressure



图 7 不同蒸汽压力下液滴索特平均直径趋势 Fig.7 Trend of Sauter average diameter of droplets under different vapor pressures



图 8 不同蒸汽压力液滴颗粒粒径分布 Fig.8 Particle size distribution of droplets under different vapor pressure

## 2.2 不同有机液流量下对双介质喷嘴雾化 特性的影响分析

结合实际工艺设置了 5 种有机液流量,研究有机液 流量的改变对其流场产生的影响,并且采用离散态 DPM 模型对不同流量下的雾化过程进行分析。有机液 流量分别设置为 0.01、0.02、0.037 5、0.04、0.05 kg/s, 蒸汽压力保持 200 kPa。

为了更清晰地展示随着液体流量的不同给速度 场带来的改变,同上小节一样对喷嘴出口处轴向与径 向方向进行取样。图9展示了不同有机液流量下喷嘴 出口处采样点速度分布对比,在喷嘴出口处,沿x方 向不同有机液流量达到最高速度的位置会有所不同。 随着有机液流量的增加,达到最高速度的位置更加偏 向喷嘴出口外侧,并且最大速度会有明显提升。在喷 嘴出口z方向上,流速在中心位置达到最高,沿径向 两侧流速逐渐减小。

图 10 为不同流量下喷嘴出口处采样点的液体质 量分数对比。图 10 中沿喷嘴出口轴向 x 方向液体质 量分数逐渐降低,最后趋于平稳。z 方向上液体组分 变化规律可以清晰地看出,随着有机液流量的增大, 雾化扩散角变大。





图 11 为不同有机液流量下不同轴向位置索特平 均直径的变化趋势。在有机液流量达到 0.037 5 kg/s 时,索特平均直径达到最小。此时,随着流量的增加 或减少,索特平均直径都有着不同幅度的增加。这是 由于当流量减小时,液路通流面积不变,液体流速降 低,前后压差减小,空气阻力减少,液滴的破碎情况 减少,导致索特平均直径增大。当流量增大时,液路 通流面积不变,液体流速过大,导致高速的蒸汽不能 与液体充分混合,对有机液的雾化不充分,导致索特 平均直径增大。所以对于该双介质喷嘴,有机液流量 应保持在 0.037 5 kg/s 左右。流量过小,雾化细度不 好;流量过大,雾化细度同样不佳,而且还可能造成 有机液的浪费。

图 12 是有机液流量为 0.01、0.02、0.037 5 kg/s 时 液滴颗粒粒径分布直方图。从图 12 可知,有机液流量 的改变对整个雾化场中颗粒粒径分布的集中度有较大 影响,其中有机液流量为 0.01 kg/s 时,液滴颗粒粒径 范围为 1~11 µm,粒径分布范围较大。有机液流量增加 为 0.02 kg/s 时,粒径范围为 0.5~6.5 µm,雾化粒径集中 度有较大改善。当有机液流量增加到 0.037 5 kg/s 时,







# 2.3 不同结构对双介质喷嘴雾化特性的影响分析

喷嘴结构的变化对雾化特性影响巨大。为了研究 不同结构时的雾化特性,以针阀和中心管移动到喷嘴 出口为起点,按照针阀及中心管的位置不同,确定了 5种喷嘴结构,分别称为结构 1(针阀向左移动4mm, 中心管向左移动 1.5 mm)、结构 2、结构 3、结构 4、 结构 5,如表 3 和图 13 所示(蒸汽压力为 200 kPa、 有机液流量为 0.037 5 kg/s)。按液体通流面积升序 排序:结构 1<结构 3<结构 5<结构 2<结构 4;按蒸汽 通流面积升序排序:结构 1<结构 2<结构 3<结构 5< 结构 4。最后开启 DPM 模型,探究液体颗粒在流场 的运动情况。

表 3 喷嘴结构 Tab.3 Nozzle structure

结构	中心管位/mm	针阀位置/mm
1	左移 1.5	左移 4
2	左移 2	左移 10
3	左移 3	左移 8
4	左移 6	左移 15
5	左移 4	左移 10



之后分别对 5 种结构重新简化模型、抽取流道、画 网格、进行网格无关性验证,最终确定网格数量在 230 万左右。

图 14 展示了不同结构下喷嘴出口 x 与 z 方向上 采样点速度大小的对比。从喷嘴出口 x 方向采样点速 度大小对比中可以看出,有机液喷雾沿轴向扩散贯穿 的能力排序从小到大为结构 4、结构 5、结构 3、结 构 2、结构 1,该规律正好与液体路通流面积的变化 规律基本吻合。仅有结构 2 的规律有所区别。因为结 构 2 的蒸汽流道通流面积相对较小,液体受到的高速 气流影响较大,所以贯穿距离较长。总的来说液体路 通流面积越大,液体喷雾沿轴向扩散贯穿能力越弱, 喷射距离越短。从喷嘴出口z方向采样点速度大小对 比中可以得到双介质喷嘴雾化扩散角从大到小排序 为结构4、结构5、结构3、结构2、结构1。该变化 规律与气体路通流面积的变化规律相吻合,即气路通 流面积越大,双介质喷嘴的雾化扩散角越大。



图 14 不同结构下喷嘴出口处采样点的 速度大小 Fig.14 Velocity of sampling points at the nozzle outlet under different structures

图 15 为不同结构下喷嘴出口处采样点的液体质 量分数。有机液在喷嘴出口 x 方向上的分布体现出了 喷嘴沿出口轴向方向的扩散贯穿能力,规律与速度流 场相吻合。有机液组分在喷嘴出口 z 方向上的变化, 间接反应了有机液雾化扩散角的变化。对比连续相流 场速度分布,扩散角的变化规律趋于一致。有机液喷 雾沿轴向扩散贯穿的能力从小到大排序为结构 4、结 构 5、结构 3、结构 2、结构 1。雾化扩散角从大到小 排序为结构 4、结构 5、结构 3、结构 2、结构 1。因 此喷雾沿轴向扩散贯穿能力的大小主要受液体路通 流面积的影响,液体通流面积越大其贯穿距离相应减 小。喷嘴的雾化扩散角主要受气路通流面积的影响, 通流面积越大,雾化扩散角度越大。



图 16 为不同喷嘴结构下不同轴向位置索特平均 直径的变化趋势。结构 2 下的索特平均直径最小,即 雾化细度最小,雾化效果出色。结构 4 下的索特平均 直径最大,即雾化细度最大,雾化效果最差。在蒸汽 压力和液体流量不变的情况下,要想通过改变喷嘴结 构达到较好的雾化细度。需保证喷嘴具有较小的蒸汽 路通流面积,这样可以使蒸汽达到更高的流速,更好 地作用在液体上,拥有更好的雾化效果。同时液路侧 需保持正常开度,液路侧开度过小则会使针阀过于突 出,无法使气液充分混合,从而使雾化细度较大,雾 化效果变差。

图 17 为结构 2、4 下液滴颗粒粒径分布直方图。 从图 17 中可以看出,双介质喷嘴结构的改变使雾化 场中颗粒粒径分布范围发生变化。在结构 2 下雾化场 中颗粒粒径多数都在 0.5~1.75 μm,其颗粒粒径范围 最小,雾化颗粒粒径分布最集中。这是由于此结构下 蒸汽流道通流面积较小,蒸汽流速较大,同时液相流







图 17 不同结构下液滴颗粒粒径分布 Fig.17 Particle size distribution of droplets under different structures

道的通流面积正常,针阀没有特别突出,不会影响到 气液混合,蒸汽能够更好地作用在有机液上,让雾化 颗粒粒径分布更加集中。在结构4下雾化场中颗粒粒 径多数在 0.25~4.25 μm,其颗粒粒径范围最大,雾化 颗粒粒径分布最分散。这是因为此结构下气液相流道 通流面积均较大,蒸汽和有机液流速都较小,使得混 合不均匀,导致雾化颗粒粒径分布更加分散。

随着双介质碰嘴结构的改变,雾化场中颗粒中值粒 径有较明显的改变,其变化范围为 0.93~1.49 μm。其中 在结构 2 中的雾化颗粒中值粒径最小值为 0.93 μm,在 结构 4 中的雾化颗粒中值粒径最大值为 1.49 μm。

### 3 结语

本文以双介质喷嘴为对象建立了双介质喷嘴数 值模型,通过数值计算研究了蒸汽压力、液体流量、 结构变化对其雾化特性影响,并对其产生的机理进行 分析,得出结论如下:

1)适当增加蒸汽压力,可以使雾化效果变好。随着蒸汽压力的增加,液滴受蒸汽的作用力加大,雾化扩散角减小,雾化液滴的喷射更加集中,可以提高雾化液滴喷射在烟叶表面的均匀性,减少液滴的扩散,喷射距离略微增加;液滴颗粒的索特平均直径整体上呈现出逐渐变小的趋势,雾化细度变好,更容易使得液滴被烟叶表面接触吸收,喷洒效果会更好。因此适当地提高蒸汽压力有利于提高料液喷洒的均匀性,同时可以使烟叶更好地吸收雾化液滴,提高烟丝制备的工艺水平。

2)有机液流量保持在 0.037 5 kg/s 左右,可以使雾 化效果最好。在有机液流量为 0.037 5 kg/s 时,液滴的 索特平均直径达到最小,为 0.65 μm。不论机液流量增 加或者减少,雾化液滴的索特平均直径都会增加,并且 此时雾化颗粒的粒径分布范围为 0.25~2.75 μm,雾化粒 径分布相对集中。有机液流量过小达不到雾化细度的 要求,有机液流量过大不仅雾化细度不佳,而且还有 可能造成有机液的浪费。因此,将料液流量保持在 0.037 5 kg/s 左右,可以使加料工艺达到较好的雾化 效果,并且在一定程度上减少料液的浪费。

3) 双介质喷嘴结构对雾化特性影响巨大。液体 路通流面积越大,喷雾的贯穿距离越小;气路通流面 积越大,喷雾的雾化扩散角度越大。若需要得到较好 的雾化细度,达到较好的雾化效果,需保证喷嘴具有 较小的蒸汽路通流面积,这样可以使得蒸汽达到更高 的流速,使其拥有更好的雾化效果。与此同时液路侧 需保持正常开度,开度过小则会使针阀过度突出,影 响了气液混合,无法实现充分混合引射,从而导致雾 化细度较大,雾化效果变差。因此,对于烟草滚筒内 部较远的烟叶墙,采用液体路通流面积和气路流通截 面积较小的喷嘴结构,有利于料液喷洒的均匀性以及 贯穿距离,反之亦然。

#### 参考文献:

[1] 刘伟华, 吴启东, 杨小娜, 等. 气液双介质喷嘴雾化 特性的影响因素研究[J]. 包装工程, 2022, 43(17):

#### 224-231.

LIU Wei-hua, WU Qi-dong, YANG Xiao-na, et al. Study on Influencing Factors of Atomization Characteristics of Gas-Liquid Dual-Medium Nozzle[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(17): 224-231.

- [2] 王宇,李晓,张明建,等.烟草加料过程中双流体喷嘴 雾化粒径的分布特性[J].烟草科技,2018,51(3):78-86.
   WANG Yu, LI Xiao, ZHANG Ming-jian, et al. Distribution Characteristics of Particle Size of Tobacco Casing Atomized by Two-Fluid Nozzle[J]. Tobacco Science & Technology, 2018, 51(3): 78-86.
- [3] 王萍萍, 沈凯, 张振东. 外混式喷嘴雾化特性计算机 模拟及实验验证[J]. 软件导刊, 2021, 20(6): 130-135.
   WANG Ping-ping, SHEN Kai, ZHANG Zhen-dong. Computer Simulation and Experimental Research on the Atomization Characteristics of an External Mixing Air-Blast Nozzle[J]. Software Guide, 2021, 20(6): 130-135.
- [4] 蒋仲安,许峰,王亚朋,等. 空气雾化喷嘴雾化机理 及影响因素实验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2360-2367.
  JIANG Zhong-an, XU Feng, WANG Ya-peng, et al. Experimental Analysis of Atomization Mechanism and Influencing Factors of Air Atomizing Nozzle[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10): 2360-2367.
- [5] 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): 1625-1639.
- [6] 关玉明,韩永静,黄思硕,等. 空气雾化喷嘴对胶雾 化效果的模拟研究[J]. 机械设计与制造,2022,372(2): 86-90.

GUAN Yu-ming, HAN Yong-jing, HUANG Si-shuo, et al. Simulation Study on the Effect of Air Atomizing Nozzle on Glue Atomization[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022, 372(2): 86-90.

 [7] 付文锋,许龙,吴启东等.可调节双介质外混式喷嘴 雾化特性的数值模拟[J].济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(1): 102-107.

FU Wen-feng, XU Long, WU Qi-dong, et al. Numerical Simulation on Atomization Characteristics of Adjustable Dual-medium External Mixing Nozzles[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2023, 37(1): 102-107.

- [8] FERREIRA G, GARCIA 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.
- [9] LORENZETTO G E, LEFEBVRE A H. Measurements of Drop Size on a Plain-Jet Airblast Atomizer[J]. AIAA Journal, 1977, 15(7): 1006-1010.
- [10] JONES W P, LETTIERI C. Large Eddy Simulation of Spray Atomization with Stochastic Modeling of Brea-

kup[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(11): 115106.

- [11] SATAPATHY M R, SOVANI S D, SOJKA P E, et al. The Effect of Ambient Density on the Performance of an Effervescent Atomizer Operating in the MPa Injection Pressure Range[C]// Proceeding of the Technical Meeting the Control Section of the Combustion Institut, 1998.
- [12] 赵乾鹏,杨金虎,刘存喜,等.多级旋流空气雾化喷 嘴高空气动雾化场的数值研究[J]. 航空动力学报, 2021,36(12):2555-2567.
  ZHAO Qian-peng, YANG Jin-hu, LIU Cun-xi, et al. Numerical Investigation of High Altitude Aerodynamic and Spray Fields for Multi-Swirl Airblast Atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(12): 2555-2567.
- [13] 吴正人,周鑫宇,张亚萌. 喷嘴组在变压力工况下雾 化特性数值模拟[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(8): 67-72.
  WU Zheng-ren, ZHOU Xin-yu, ZHANG Ya-meng. Numerical Simulation of Atomization Characteristics of Nozzle Group under Variable Pressure Condition[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(8): 67-72.
- [14] MLKVIK M, ST H-P, SCHUCHMANN H, 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] LILAN H, QIAN J, PAN N. Study on Atomization Particle Size Characteristics of Two-phase Flow Nozzle[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2021(7): 1-12.
- [16] YU Q L, QIU X Q, YAN G H. Experimental Investigation on Air-assist Atomization Feed Flow Injecting Nozzle for the Angles of the Gas/Liquid Interaction[J]. Petro-chemical Equipment, 2008, 236(1): 21-24.
- [17] WANG P, TAN X, LIU R, et al. Influence of Outlet Diameter on Atomization Characteristics and Dust Removal Properties of Internal-mixing Air Atomizing Nozzle[J]. Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society, 2018, 43(10): 2823-2831.
- [18] WANG P, SHI Y, ZHANG L, et al. Effect of Structural Parameters on Atomization Characteristics and Dust Reduction Performance of Internal-Mixing Airassisted Atomizer Nozzle[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 128: 316-328.
- [19] LI H J, WANG J X, WANG P F, et al. Effect of the Installation Angle of Nozzle on the Atomizing Performance of Air-Assisted Spraying Dust Suppression Device[J]. Atmosphere, 2022, 13(4): 520.
- [20] 李依潇,王生捷. Whipple 防护结构高速区弹道极限数 值 模 拟 研 究 [J]. 系 统 仿 真 学 报, 2020, 32(9): 1705-1710.
  LI Yi-xiao, WANG Sheng-jie. Numerical Research on

LI YI-XIAO, WANG Sheng-JIE. Numerical Research on Ballistic Limit of Whipple Shield in High-Velocity Range[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1705-1710.