doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.08.011

基于 CFD-DEM 的双流体喷嘴颗粒物去除特性及效率优化研究^①

陈 波②* 许尽欢* 李艳英** 卢英杰* 钟义龙* 张哲源* 李研彪③*

(*浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023) (** 贵州安大航空锻造有限责任公司 安顺 561005)

摘要 雾化除尘技术是有效防治大气灾害的重要手段,对于城市、矿山等场所的降尘具 有重要意义。双流体雾化喷嘴基于其良好的雾化表现,成为雾化除尘领域的热门研究对 象。雾化后雾滴与烟尘颗粒的粘附与沉降时性对于提升双流体喷嘴颗粒物去除效率具有重 要意义,需进一步深入研究。本文基于计算流体力学与离散单元耦合法(CFD-DEM),通 过3D设计软件和离散元仿真软件 ANSYS、EDEM 对双流体喷嘴进行耦合数值模拟仿真, 研究颗粒之间的相撞粘附与沉降,得到了不同气液压力比、不同雾滴粒径下雾滴颗粒的速 度分布规律,并利用正交数值模拟方法对双流体雾化喷嘴颗粒物去除效率进行研究,得到 了各运行参数对颗粒物去除效率的影响规律。结果表明,随着气液压力比的增大,雾滴颗 粒最大速度呈增大趋势;雾滴颗粒粒径越小,雾滴颗粒最大速度越大,且加速至最大速度 的时间越短;通过极差分析可知,运行参数中对颗粒物去除效率影响因素从大到小依次是 雾滴粒径 B、气液压力比 A、烟尘颗粒粒径 D、烟尘颗粒速度 C,其最优水平组合为 A,B₁C₃D₁。该研究可为双流体雾化喷嘴的颗粒物去除特性研究提供一定的参考。 **关键词** 雾化除尘;双流体喷嘴;去除特性;计算流体力学与离散单元耦合法(CFD-

DEM);耦合仿真

随着我国工业化与城市化进程的日益加快,车辆增多产生的尾气排放、工业发展产生的废气、建筑施工产生的烟尘等因素造成了大气污染增加,空气质量急剧恶化,大气环境问题日益严峻^[13]。大气环境的持续恶化引发连续的雾霾天气,对城市居民的身心健康造成极大危害^[45]。同时,粉尘爆炸等问题也给工地、矿井等施工场所带来安全隐患。雾化除尘是防治大气灾害的有效措施,也是我国目前广泛采用的主要措施,其基本原理是通过雾滴与烟尘颗粒的结合,使悬浮在空中的烟尘颗粒沉降,以实现降尘目的^[67]。

双流体雾化喷嘴基于其良好的雾化表现,成为 雾化除尘领域专家学者的研究对象。石宝宝^[8]搭 建了双流体喷雾实验平台,采用了扇形、圆形、广角 3种异形喷嘴,进行了不同气压下雾化流场的喷雾 实验,研究了气压的变化对雾化角、贯穿距、流量及 压力损失等雾化特性参数的影响,为气液双流式变 量喷雾的研究奠定了基础。苏雁和曹晓东^[9]研发 了一种单流体与双流体结合的综合除尘系统,克服 了现有技术的不足,在拓宽喷雾粒径范围的基础上, 通过多样化的喷雾形式,实现高效快速抑尘。李海 英等人^[10]对各种湿式除尘手段的抑尘特性以及工

 ③ 通信作者, E-mail: liybzjut@163.com。 (收稿日期:2023-02-06)

① 国家自然科学基金区域创新联合(U21A20122),国家自然科学基金(51905481),浙江省自然科学基金(LY22E050012)和浙江省大学 生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2023R403073)资助项目。

② 男,1990年生,博士,副研究员;研究方向:流体传动与控制;E-mail: chenb@zjut.edu.cn。

程特点进行评估,以从多种湿式除尘手段中总结并 揭示湿式除尘的核心机理。评估结果显示:拦截、碰 撞、布朗扩散和重力沉降是湿式除尘的主要作用机 理,小尺寸雾滴与烟尘之间产生的凝结核化是湿式 除尘的主要特点。马哲树等人^[11]设计了2种(内混 式和外混式)双流体喷嘴,并对内混式和外混式2 种喷嘴在不同的气体压力、液体流量、喷孔数量下的 雾化特性进行了大量的实验研究。结果表明,随着 气体压力的增大,雾化均匀性变差,随着被雾化液体 流量的增加,雾化的分布更加均匀。以上工作成果 为双流体雾化喷嘴后续研究提供了参考,但研究内 容主要集中在不同运行参数对雾化喷嘴的雾化性能 (如喷雾范围、雾滴粒径等)的影响上,对雾滴与烟 尘的结合机理与沉降效果研究还有待进一步加强。

李钟等人^[12]基于计算流体力学与离散单元耦 合 (computational fluid dynamics-discrete element method,CFD-DEM)的方法,分析了泵内颗粒运动规 律、颗粒在不同流域的分布情况以及颗粒与泵过流 部件的碰撞规律,研究了矿浆泵内过流部件尤其是 蜗壳的磨损特性。结果显示,随着流量增大,颗粒速 度增大,颗粒与壁面碰撞时动能增大,矿浆泵体磨损 情况增强。佟林全等人^[13]采用 CFD-DEM 耦合模拟 方法,构建煤炭转运风流分布仿真平台。通过结合 现场实验数据和计算结果,阐述风流对转运中烟尘 抑制的作用机制。研究发现,皮带机牵引风流和双 线加压风流的混合是造成转运点风流涡流和湍流现 象的根本原因。Yuan 等人^[14]设计了一种在传统料 斗中嵌入螺旋导板的新型抑尘料斗,用于料斗转移 过程的抑尘。采用 CFD-DEM 耦合数值方法研究料 斗传输过程中的颗粒运动和流场分布,并进行了实 验以确定抑尘性能。结果表明,与传统料斗相比,螺 旋料斗的最大颗粒速度下降了1.6 m · s⁻¹,这意味 着颗粒与螺旋料斗的碰撞被削弱了,该螺旋式料斗 在粉尘控制方面提供了一个有效的途径。Roberts 等人^[15]通过 CFD-DEM 耦合模拟来分析散货船货舱 内产生的诱导气流,包括典型的横风条件。根据 CFD-DEM 模拟预测的流动条件,粉尘颗粒的自由沉 降时间被用来评估粉尘云的形成和散布情况。综上 所述,目前诸多学者在运用 CFD-DEM 耦合方法进 行了多方面研究与应用,但尚未有文章针对双流体 雾化喷嘴的颗粒物去除特性展开相关分析,此方面 内容有待进一步研究^[16-17]。

当前学者们的研究主要针对双流体雾化喷嘴雾 化过程中的工况参数、喷嘴结构等方面进行研究,以 提高雾化性能。关于雾滴与烟尘颗粒粘附与沉降效 果过程的相关研究很少。然而在雾化除尘中,不仅 喷嘴的雾化过程至关重要,雾滴与烟尘的颗粒物去 除过程也是雾化除尘的重要步骤^[18]。所以,研究雾 滴与烟尘颗粒的粘附与沉降特性对于提升双流体喷 嘴颗粒物去除效率具有重要的理论研究意义^[19]。

本文通过 3D 设计软件对双流体雾化喷嘴内外 流场进行建模,利用 ANSYS 有限元分析软件对模型 进行网格划分,并基于欧拉-拉格朗日法,利用离散 元仿真软件 EDEM 与 ANSYS 有限元分析软件进行 耦合数值模拟仿真分析,研究颗粒之间的相互碰撞 与粘附,根据雾滴与烟尘颗粒的结合与沉降,对喷嘴 与烟尘颗粒的雾化去除特性进行研究。

1 双流体雾化喷嘴 CFD-DEM 耦合数 值模型

1.1 双流体雾化喷嘴物理模型

本文所采用的双流体雾化喷嘴的结构示意图如 图1所示,后文主要针对该双流体雾化喷嘴开展相 关研究。

双流体雾化喷嘴结构示意图如图 1(a) 所示,该 双流体雾化喷嘴主要包括喷嘴主体结构、连接套管 以及自激振荡腔。双流体雾化喷嘴的三维物理模型 如图 1(b) 所示,三维物理模型是通用计算机辅助设 计(computer aided design, CAD) 软件 Solidworks 建 立的。

1.2 双流体雾化喷嘴 CFD-DEM 耦合模型

根据研究需要,本文选用 FLUENT 软件进行 CFD 流场数值模拟。选用 DEM 仿真软件 EDEM 对 颗粒进行处理、仿真和分析。模拟双流体雾化喷嘴 颗粒物去除过程中的颗粒碰撞与沉降过程。

采用有限体积法对 FLUENT 软件中的控制方程 进行离散计算,从而获得气液流体的速度场分布。 随后,计算颗粒和流体之间的相互作用、流体对颗粒



1-空气入口, 2-空气导管, 3-法兰, 4-雾化芯进水孔, 5-超音速雾化芯, 6-自激振荡腔

图 1 双流体雾化喷嘴物理模型

体积力作用以影响颗粒运动向量,通过反复循环迭 代逐渐实现瞬态模拟。在 EDEM 软件中,采用颗粒 控制方程来评估颗粒之间以及颗粒与壁面之间的碰 撞,并计算碰撞产生的接触力,以模拟其移动位姿。 更新其在单位迭代步长中颗粒场中所有对象的加速 度与速度,同时获得计算域中颗粒的体积比,直到达 到预设的计算时间。最后,对耦合计算得到的结果 进行分析,包括颗粒位置分布、碰撞力分布、速度分 布等。具体模拟流程如图 2 所示,所采用的模拟参 数见表1。



图 2 FLUENT-EDEM 耦合数值模拟流程图

表1 数值模拟中材料参数取值

	取值
	2 770
医喉结构基氏描号 F/MD_{s}	2170
	/1
喷嘴结构泪松比 ν/(D・mm ⁻¹)	0.33
烟尘颗粒密度ρ/(kg・m ⁻³)	5 000
烟尘颗粒杨氏模量 E/MPa	52
烟尘颗粒泊松比 v / (H · mm ⁻¹)	0.30
雾滴颗粒密度ρ/(kg・m ⁻³)	1 000
雾滴颗粒杨氏模量 E/MPa	15
雾滴颗粒泊松比 v / (H・mm ⁻¹)	0.25

烟尘颗粒与雾滴颗粒之间的接触模型选用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型^[20]。将雾滴颗粒视 作柔性黏性固体颗粒加入仿真,雾滴颗粒设置为球状 颗粒,JKL 模型中的黏度系数设置为2000 N·m⁻³。

双流体雾化喷嘴结构所有组成部件的材质均匀 连续,并统一假定为铝合金。

1.3 网格划分及网格无关性验证

本文构建了双流体雾化喷嘴的 CFD 模型,为了 更加准确地反映实际喷嘴工作情况,喷嘴外部流场 区域需要构建的比较大,避免发生流场边界的干 扰^[21-22]。所以本文将双流体雾化喷嘴外流场简化 为直径为376 mm、长380 mm 的圆柱体流体区域,所 建立的双流体雾化喷嘴的具体 CFD 模型如图3所 示,气液入口边界具体如图4所示。整个双流体雾 化喷嘴模型的网格共有网格单元数量3145521个, 网格节点数量404786个。



图 3 双流体雾化喷嘴整体网格划分



图 4 双流体雾化喷嘴内部流场网格划分

本文仅改变网格密度,基于不同网格总数的网 格模型,以同等设置的边界条件与工况参数进行3 组平行仿真,并选取双流体喷嘴内外流道中心轴线 上的最大速度作为评价指标,网格无关性验证结果 见表2。

表 2 网格无关性验证结果

网格总数	流场最大速度/(m・s ⁻¹)	偏差/%
1 885 674	489	21.9
2 334 512	718	0.0
3 145 521	729	1.5

通过对比网格总数在180万左右和网格总数为 253万级别的计算结果,可发现流场最大速度偏差 达到21.9%,最大速度变化有较大偏差,其主要原 因在于双流体雾化喷嘴中心轴线附近区域网格数量

— 898 —

过少,计算精度较差,使得计算结果有较大的偏差, 因此需要对网格进行加密。

当对网格进行加密处理之后,观察网格总数为 233 万和网格总数为314 万的数值计算结果可以发现,当对网格进行进一步加密处理,求解结果偏差并 不大,流场最大速度的偏差在1.5%左右。因此,可 以认为当网格总体数量达到314 万级别时,已经获 得网格无关解,后续的计算分析可采用此网格数进 行网格划分。

2 双流体雾化喷嘴颗粒物去除特性数 值模拟研究

雾滴在流场中的运动速度不仅影响颗粒间的接触与碰撞,还与雾滴在流场中的运动时间相关,是影 响雾滴与烟尘颗粒结合特性与颗粒物去除效率的关 键因素^[23]。因此,本文选取雾滴速度为主要研究参 数之一,探究不同运行参数下雾滴在流场中的速度 变化规律。

2.1 气液两相流速度场分析

本文所研究的双流体雾化喷嘴实际供气压力在 0.2~0.5 MPa之间,供水压力在0.1~0.3 MPa之间。 由于2个输入参数取值范围较为宽泛,若利用数值 模拟计算进行逐一调整参数并求解,存在计算量大、 耗时长等问题,严重影响研究效率。故本文引入气 液压力比作为考量指标,以此定义不同的工况,并针 对不同的喷嘴工况进行边界条件设定。具体工况见 表3。

表3 各工况下供气和供水压力值

气液压力比	供气压力值/MPa	供水压力值/MPa
1.0	0.10	0.1
1.2	0.12	0.1
1.5	0.15	0.1
2.0	0.20	0.1
2.5	0.25	0.1

图 5 是气液压力比分别为 1.0、1.2、1.5、2.0、 2.5 时所得到的喷嘴流场速度云图。从流场速度云 图中可以观察到,内流场的射流速度和出口附近的 射流速度随着气液压力比的提高相应提升。此外, 易观察到,各个工况下,当液体射流进入喷嘴雾化芯 位置与气体射流相接触时,内流场中双流体的运动 被液体射流所阻碍,内流场速度有明显下降现象发 生。

从各工况流场速度云图中对比分析得出,当气 液压力比处于较小值时,这种阻碍现象更加明显。 尤其当气液压力比为1.0、2.0、1.5时,雾化芯壁面 附近有明显相对射流中心速度较低区域,减速现象





非常明显。经分析,这一阻碍现象的出现原因如下。

(1)液相射流方向和气体射流方向在雾化核心内水孔出口位置相互垂直,阻碍了气体射流的轴向流动。在雾化芯的壁面附近,气体流动受到的阻碍最大,因为该区域的气体直接与液体碰撞,导致混合后的两相流体射流速度明显下降。

(2)由于液体粘度的存在,使靠近壁面高速流动的液体和雾化芯体的内壁产生摩擦,阻碍了射流,







图 5 不同气液压力比下的流场速度云图

降低了其在靠近雾化芯体壁面区域的速度。这种现 象被称为壁面效应,导致了回流现象的形成和射流 速度的降低。

2.2 运行参数对雾滴速度的影响

2.2.1 气液压力比对雾滴速度的影响

将气液压力比工况设置为1.0、1.2、1.5、2.0、 2.5 共5组,雾滴粒径均设置为1.0 mm。图6为各 气液压力比下雾滴最大速度的变化曲线图。

雾滴产生总时间设置为3s,颗粒工厂产生颗粒 速率为每秒1000个,共计产生3000个雾滴。烟尘 颗粒产生总时间设置为3s,颗粒工厂产生颗粒速率 为每秒1000个,共计产生3000个烟尘颗粒。

观察图中各工况下雾滴的速度变化,可以发现, 各工况下雾滴速度随着气液压力比的增大而上升, 随后在一个相对稳定区间内浮动,且均在1.5~2.0s 之间达到最大值,气液压力比越大,越快达到稳定区 间。这是因为雾滴在喷嘴内部受流场作用加速,随 后冲出喷嘴口进入外流场,且在1.5~2.0 s区间之 内达到最高速度,气液压力比与流场牵引力呈正相 关,所以高气液压力比工况下的雾滴加速度更大。 气液压力比为1.0时,雾滴速度最小,最大速度为 156.3 m·s⁻¹;气液压力比为1.2、1.5、2.0 时,雾滴速度 增大,速度最大值分别为 222.9 m · s⁻¹、306.8 m · s⁻¹、 406.3 m · s⁻¹;气液压力比为 2.5 时,雾滴速度最大, 速度最大值达609.8 m·s⁻¹。据此曲线分析可得不 同气液压力比下雾滴速度的变化规律:气液压力比 越大,雾滴速度越大,目气液压力比越大达到最大速 度稳定区间的时间越短。

2.2.2 雾滴颗粒粒径对雾滴速度的影响



图 6 不同气液压力比下的雾滴颗粒最大速度曲线

将雾滴粒径设置为0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm 共5组,气液压力比统一设置为2.0。 图 7 为各雾滴粒径下雾滴最大速度的变化曲线图。

通过观察曲线图可以发现,各工况下雾滴的速 度随时间逐渐增大,且在1.5~2.0 s区间内达到最 大值,随后在一个相对稳定区间内浮动。且易观察 到,雾滴粒径越小,其最大速度越大,其到达稳定区 间的时间越短。雾滴粒径为2.5 mm 时,雾滴速度 最小,其雾滴速度最大值为156.3 m·s⁻¹;雾滴粒径为 2.0 mm、1.5 mm、1.0 mm 时,雾滴速度逐渐增大,其雾 滴速度最大值分别为243.8 m·s⁻¹、325.0 m·s⁻¹、 406.3 m·s⁻¹;雾滴粒径为0.5 mm 时,雾滴速度最 大,雾滴速度最大值可达到731.3 m·s⁻¹。经分析, 出现这种情况的原因如下:雾滴粒径越大,其总质量 就相应越大,雾滴在喷嘴流场中受牵引力进行加速 运动,总质量越大,加速度相应就越小,到达最大速 度稳定区间的时间就越长。



综上所述,气液压力比与雾滴粒径均对雾滴速 度产生影响:气液压力比越大,雾滴速度越大,且气 液压力比越大达到最大速度稳定区间的时间越短, 气液压力比为2.5时,雾滴速度达到最大;雾滴粒径 越大,加速度相应就越小,到达最大速度稳定区间的 时间就越长,且雾滴粒径与烟尘颗粒粒径接近时,雾 滴速度最大,这与湿式除尘基本机理相符合。

- 3 双流体雾化喷嘴颗粒物去除效率及 优化研究
- **3.1 颗粒物去除效率数值模拟方案设计** 双流体喷嘴颗粒物去除性能的评价有许多衡量

指标,在此数值模拟中,将 EDEM 中的监测面颗粒 数量作为衡量喷雾颗粒物去除性能的重要参考指 标,图 8 为监测面示意图,式(1)为颗粒物去除效率 与监测面颗粒数量关系。

$$c = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{1}$$

其中, c 表示颗粒物去除效率, m_1 表示颗粒物去除 前的监测面颗粒数量, m_2 表示颗粒物去除后的监测 面颗粒数量。



图8 监测面示意图

烟尘颗粒发射源在一定时间内产生总数固定的 烟尘颗粒,当雾滴颗粒与烟尘颗粒相遇产生粘附效 应后,由于雾滴颗粒速度远大于烟尘颗粒,导致被粘 附的烟尘颗粒与雾滴颗粒一同飞出仿真边界。故监 测面所捕捉颗粒即未被雾滴颗粒粘附的烟尘颗粒。 因此,认定监测面颗粒数量越少,其综合颗粒物去除 效果越好。

图 9 为不同烟尘颗粒粒径下监测面颗粒数量曲 线图。从图 9 中易知,随着烟尘颗粒粒径的增大,监 测面颗粒数量呈下降趋势,即颗粒物去除效率提高。



3.2 正交数值模拟方案设计

雾化喷嘴的工况参数变化对颗粒物去除效率产 生重要影响,对其进行优化以实现优异的颗粒物去 除性能是很有必要的。如果采用全部数据对工况参 数进行数值模拟将耗费大量时间,一些影响不大的 参数也会被反复使用而导致不合理的方案出现;各 参数不能有效结合起来进行综合分析,也往往会导 致最终目标偏离最优结果。

因此,采用正交数值模拟方案进行雾化喷嘴的 工况参数优化能很好避免上述现象的出现。正交法 通过正交方案对多因素、多水平的参数进行研究,仅 需要少部分实验就能均衡地代替全部实验,大幅减 少实验次数的同时实现多参数快速优化,不仅极大 地节省了计算资源和成本,还大幅地提高了工作效 率,可准确快速地找出最优参数组合,完成高效寻优 过程^[24-25]。

根据上文研究内容,本文选择了双流体喷嘴颗 粒物去除过程中的代表性关键参数建立正交数值模 拟方案,主要包括气液压力比、雾滴粒径、烟尘颗粒 速度、烟尘颗粒粒径,正交实验方案的因素水平如 表4所示。

表4 关键参数的正交因素水平表

		水平号	
四系 -	1	2	3
A 气液压力比 a	1.2	1.5	2.0
B雾滴粒径 r ₁ /mm	0.5	1.0	2.0
C 烟尘颗粒速度 v/(m・s ⁻¹)	5.0	10.0	15.0
D 烟尘颗粒粒径 r ₂ /mm	0.5	1.0	2.0

正交数值模拟结果方案及结果如表 5 所示。由 表 5 可知,通过正交模拟仿真方案计算出的监测面 颗粒数量变化明显。不同参数的不同水平下的计算 结果还需通过正交极差分析以确定因素的主次影响 顺序以及各因素水平的最优组合。

3.3 正交数值模拟极差分析

通过各参数的极差分析,能较为直观、形象地对 计算结果指标进行对比,找出各参考指标的主要影 响因素,以确定各因素的最优水平组合^[26-27]。通过 比较某因素极差 *Ri* 的大小,以确定该因素对结果的 影响程度,极差 Ri 的值越大,表明该因素对结果指标的影响越大。

根据表5中的因素、水平和结果,对监测面颗粒 数量进行极差分析。极差分析表如表6所示,其中, K_i 表示某一因素在该水平下的指标值之和, k_i 表示 某一因素的指标平均值,通过判断 k_i 的大小,确定 某一水平值对指标的影响程度,通过判断 R_i 的大 小,确定某一因素对指标的影响程度。

			实验因素		防测声瓶粉
实验号	A气液	B雾滴粒径	C 烟尘颗粒	D 烟尘颗粒	-
	压力比	r_1 /mm	速度 v/(m・s ⁻¹)	粒径 r_2 /mm	<u> </u>
1	1.2	0.5	5	0.5	1 253
2	1.2	1.0	10	1.0	1 956
3	1.2	2.0	15	2.0	2 357
4	1.5	0.5	10	2.0	987
5	1.5	1.0	15	0.5	1 789
6	1.5	2.0	5	1.0	2242
7	2.0	0.5	15	1.0	832
8	2.0	1.0	5	2.0	1 521
9	2.0	2.0	10	0.5	2 149

表 5 正交数值模拟方案及结果

	表6	监测面颗粒数量极差分析	表
--	----	-------------	---

	A 气液	B雾滴	C 烟尘	D 烟尘
	压力比	粒径	颗粒速度	颗粒粒径
K_1	5 566	3 072	5 016	5 191
K_2	5 018	5 266	5 092	5 030
K_3	4 502	6 748	4 978	4 865
k_1	1 855	1 024	1 672	1 730
k_1	1 673	1 755	1 697	1 677
k_1	1 501	2 249	1 659	1 622

通过对比不同因素的极差值可以得出不同因素 对监测面颗粒数量影响的主次顺序。由表6的极差 分析可知,运行参数中对颗粒物去除效率的影响因 素从大到小依次是雾滴粒径 B、气液压力比 A、烟尘 颗粒粒径 D、烟尘颗粒速度 C。为了具体分析每一 个因素的不同水平对雾滴粒径的影响规律,以监测 面颗粒数量为目标,根据不同水平的检测面颗粒数 量平均值 k_i,绘制各因素对监测面颗粒数量影响趋 势图,如图 10 所示。

如图所示,各因素、各水平对监测面颗粒数量影 响存在差别,随着气液压力比、烟尘颗粒粒径的增 大,监测面颗粒数量呈现出逐渐减小的趋势;而随着 - 902 -- 雾滴粒径的增大,监测面颗粒数量表现出了明显增 大的趋势,即颗粒物去除效率下降。烟尘颗粒速度 对监测面颗粒数量的影响不明显,监测面颗粒数量 大致相同。



气液压力比和雾滴粒径对监测面颗粒数量的影 响比较明显,这表明气液压力比和雾滴粒径是影响 颗粒物去除效率的关键因素,气液压力比和雾滴粒 径的优选水平值分别为2.0和0.05 mm,烟尘颗粒速度 和烟尘颗粒粒径的优选水平值分别为15 m · s⁻¹和 2.00 mm。通过上述分析得出气液压力比A、雾滴粒 径 B、烟尘颗粒速度C、烟尘颗粒粒径D4个因素的 最优水平组合为A₃B₁C₃D₁。

4 结论

通过双流体雾化喷嘴 CFD-DEM 耦合数值模 拟,得到了不同气液压力比、雾滴粒径下雾滴速度的 变化规律,并利用正交数值模拟方法对双流体雾化 喷嘴颗粒物去除效率进行研究,得到了各运行参数 对颗粒物去除效率的影响规律,具体结论如下。

(1)各工况下雾滴速度随着气液压力比的增大 而上升,随后在一个相对稳定区间内浮动,且气液压 力比越大,越快达到稳定区间。气液压力比为2.5 时,雾滴速度最大,速度最大值达609.8 m·s⁻¹。

(2)雾滴粒径越小,雾滴速度越大,且达到最大 速度稳定区间的时间越短。雾滴粒径为0.5 mm 时, 雾滴速度最大,雾滴速度最大值可达到731.3 m·s⁻¹。

(3)气液压力比和雾滴粒径对监测面颗粒数量 的影响比较明显,这表明气液压力比和雾滴粒径是 影响颗粒物去除效率的关键因素。随着气液压力 比、烟尘颗粒粒径的增大,监测面颗粒数量呈现出逐 渐减小的趋势;随着雾滴粒径的增大,监测面颗粒数 量表现出了明显增大的趋势;烟尘颗粒速度对监测 面颗粒数量的影响不明显。

(4)通过极差分析可知,运行参数中对颗粒物 去除效率影响因素从大到小依次是雾滴粒径 B、气 液压力比 A、烟尘颗粒粒径 D 和烟尘颗粒速度 C,其 最优水平组合为 A₃B₁C₃D₁。

参考文献

- [1]高明,陈丽.工业化国家大气污染治理政策比较及启示[J].华北电力大学学报(社会科学版),2018,113
 (3):11-16.
- [2] 张永合,吕敬文,南文瑄.大气环境挥发性有机物的污染特性分析[J].科技创新与应用,2023,13(10):59-62.
- [3] 李明,张永勇,侯立安. 我国室内空气细颗粒物污染现状与防控对策[J].环境工程技术学报,2018,8(2): 117-128.
- [4]黄燕,卓明,张雍,等.浙江省生态环境保护"十三 五"规划中期评估与展望[J].环境与可持续发展,

2020, 45(3): 90-92.

- [5] 王海凤,刘晴,郝永江,等.综放工作面转载破碎点
 PM5及PM10粉尘分布规律[J].安全与环境学报,
 2023,23(4):1139-1146.
- [6] 孟君. 综采工作面气水喷雾粉尘防治技术及管理研究 [D]. 北京:中国矿业大学, 2013.
- [7]周刚.综放工作面喷雾降尘理论及工艺技术研究[D].济南:山东科技大学, 2009.
- [8] 石宝宝. 气液双流式雾化控制优化及猕猴桃施药机研制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- [9] 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.
- [10] 李海英, 董格伦, 张军亚, 等. 基于湿式除尘的扬尘 抑制技术研究进展[J]. 节能, 2022, 41(2): 77-80.
- [11] 马哲树,刘吉财,刘少俊,等.船用柴油机 Urea-SCR 系 统喷雾特性试验研究[J]. 江苏科技大学学报(自然 科学版), 2015,29(6):536-539.
- [12] 李钟,金伟,王予琪,等. 基于 CFD-DEM 方法的矿浆泵 磨损特性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):16-20.
- [13] 佟林全,徐洋,王雪涛,等. 煤矿井下输煤转载点煤尘
 污染规律的 CFD-DEM 数值研究[J]. 煤矿安全, 2021,52(5):188-192
- [14] YUAN J, JIN C, YE F, et al. Dust suppression analysis of a new spiral hopper using CFD-DEM simulations and experiments[J]. Processes, 2020,8(7):783.
- [15] ROBERTS J, ANDREWS L, WYPYCH P. Analysis of dust dispersion in the loading of a bulk carrier ship using CFD and DEM[J]. Particulate Science and Technology, 2022,40(3):346-354.
- [16] 申浩翰,张海,范俊锴,等.离散单元法软件 EDEM 中接触半径对岩石力学特性的影响及其应用[J].岩 土力学,2022,43(S1):580-590.
- [17] 钟英杰,都晋燕,张雪梅. CFD 技术及在现代工业中的 应用[J]. 浙江工业大学学报, 2003,31(3):50-55.
- [18] 张政,谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化 工学报, 2001,52(1):1-12.
- [19] 刘凯欣,高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展, 2003,33(4):483-490.
- [20] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1971,324(1558):301-313.
- [21] 杨睿, 胡赟, 单浩栋, 等. 适用于任意几何的特征线 — 903 —

边界条件处理方法[J]. 原子能科学技术, 2020,54 (11):2145-2152.

- [22] 王博文. 复杂地质模型高质量四面体网格划分方法研 究[D]. 武汉:中国地质大学, 2021.
- [23] 杨超. 一种新型喷嘴雾化性能及抑尘性能理论与试验 研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2017.
- [24] 吴敬宇,虞斌,江超,等. SCC 型湿式除尘器除尘区域 流场分析及结构优化[J]. 化工机械, 2023,50(2):

244-248.

- [25] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析 方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
- [26] 尹曰建,段涛,张雁鹏.基于极差分析法对柴油机喷 嘴参数进行优化设计[J].内燃机与配件,2017(7): 12-14.
- [27] 杨俊磊, 庄学安. 基于多指标正交实验的高压雾化喷 嘴优选[J]. 煤矿安全, 2016,47(4):52-55.

Optimization of particle removal characteristics and efficiency of two-fluid nozzle based on CFD-DEM

CHEN Bo*, XU Jinhuan*, LI Yanying**, LU Yingjie*, ZHONG Yilong*, ZHANG Zheyuan*, LI Yanbiao*

(*College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(** Guizhou Anda Aviation Forging Co. , Ltd. , Anshun 561005)

Abstract

Fogging dust removal technology is an important means to effectively prevent and control atmospheric disasters, and is important for dust reduction in cities, mines and other places. Two-fluid atomization nozzles have become a popular research object in the field of atomization and dust removal based on their good atomization performance. In two-fluid atomization nozzle dust removal, the adhesion of the droplets to the soot particles after atomization and the dust reduction process are important steps. Therefore, it is of great theoretical significance to study the adhesion and settling characteristics of fog droplets and soot particles for improving the dust removal efficiency of two-fluid nozzles, and further research is needed. In this paper, the computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM) is used to compute the coupling of two-fluid nozzles by using 3D design software and discrete element simulation software ANSYS and EDEM, to study the mutual collision and adhesion between particles and obtains the velocity distribution law of droplet particles under different gas-liquid pressure ratios and different droplet particle sizes, and uses orthogonal numerical simulation method to study the dust reduction efficiency of two-fluid atomization nozzle, and obtains the influence law of each operating parameter on dust reduction efficiency. The results show that the maximum velocity of droplet particles tends to increase with the increase of gas-liquid pressure ratio; the smaller the particle size of droplet particles, the larger the maximum velocity of droplet particles, and the shorter the acceleration time to the maximum velocity. The extreme difference analysis shows that the factors affecting the dust reduction efficiency among the operating parameters are droplet particle size B, gas-liquid pressure ratio A, soot particle size D, and soot particle velocity C in descending order, and the optimal level combination is A₃B₁C₃D₁. This study can provide some reference for the study of dust reduction characteristics of two-fluid atomizing nozzles.

Key words: atomized dust removal, two-fluid nozzle, removal characteristic, computational fluid dynamicsdiscrete element method(CFD-DEM), coupling simulation