



文章栏目: 大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202004085

中图分类号 X701.2

文献标识码 A

袁惠新, 姜水林, 付双成, 等. 利用数值模拟方法分析静电-旋流耦合除雾器的分离性能[J]. 环境工程学报, 2021, 15(2): 643-649.

YUAN Huixin, JIANG Shuilin, FU Shuangcheng, et al. Analyze the separation performance of electrostatic-cyclonic coupling demister by numerical simulation method[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(2): 643-649.

利用数值模拟方法分析静电-旋流耦合除雾器的分离性能

袁惠新^{1,2,*}, 姜水林^{1,2}, 付双成^{1,2}, 周发威^{1,2}, 朱星苒^{1,2}

1. 常州大学机械工程学院, 常州 213000

2. 江苏省绿色过程装备重点实验室, 常州 213164

第一作者: 袁惠新(1957—), 男, 博士, 教授。研究方向: 多相流与机械分离净化技术与设备。

E-mail: yuanhuixin2000@126.com

*通信作者

摘要 化工、冶金、电镀、纺织、机械制造和建材等行业均存在不同程度水雾、酸雾或油雾等污染。因此, 除雾是一个必不可少的过程。为克服旋流除雾器对 5 μm 粒径以下颗粒去除效率低的问题, 提升分离效率, 将离心分离和静电分离有机结合, 耦合静电除雾器与旋流除雾器形成直径为 100 mm 的静电-旋流除雾器。利用 Fluent 流体仿真软件对静电-旋流除雾器进行数值模拟, 在用压力降实验验证了数值模拟可靠性的基础上, 研究了入口速度、电压及雾滴粒径对除雾性能的影响。结果表明, 静电-旋流除雾器的最佳入口速度为 8~12 m·s⁻¹, 最佳工作电压为 60 kV; 静电-旋流除雾器的除雾效率显著高于普通旋流除雾器, 且对于 3 μm 以下雾滴的分离效率提升明显。

关键词 旋流分离; 静电除雾; 数值模拟; 压力降

化工、电厂、石油、冶金、机械、轻纺、食品等工业生产过程中易产生水雾、酸雾或油雾等气态污染物。雾气本身所含污染物质与空气中杂质混合后, 密度增大, 很难扩散, 会对大气环境造成极大影响。上述污染物若与二氧化硫混合形成酸雾、与氯气水解形成盐酸烟雾, 还会对人群健康造成更大危害^[1]。因此, 应在工业生产中, 选择性能和运行皆可靠的除雾设备, 以减少此类气态污染物的排放^[2]。

旋流器因结构简单、操作方便、分离效率高等优点广泛地应用于各个工业部门, 一般可以分离粒径为 1~10 μm 的颗粒。其中, 对于 5~10 μm 以上的颗粒, 其分离效率较高^[3-4]; 当液滴粒径小于 5 μm 时, 其分离效率较低。而静电除雾器则利用静电作用实现带电荷的颗粒分离, 对于 5 μm 以下的颗粒也有很好的捕捉效果。因此, 若将旋流除雾与静电除雾结合起来, 可形成静电-旋流耦合分离器并应用到除雾中。与静电除雾器相比, 耦合设备占地面积小、成本更低、效率更高; 与旋流除雾器相比, 耦合设备中有高压静电场, 解决了旋流除雾器不利于捕集微细粉尘(粒径小于

收稿日期: 2020-04-16; 录用日期: 2020-10-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21676031); 江苏省高等学校自然科学基金项目(19KJB530003)

5 μm) 的弊端, 除雾效率更高。因此, 静电-旋流耦合除雾器适用于中小型工业及民用锅炉、建材、冶金、化工等行业的污染治理和物料回收。

旋流除雾器的入口风速越大, 产生离心力越大, 分离效率则更高, 一般为 $12\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 然而, 为保证雾滴有足够时间停留以获得足量电荷, 提高静电力的作用, 故静电除雾器的风速选择较低, 一般在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下; 另外, 雾滴荷电量还与雾滴粒径、电压大小有关。因此, 选择合适的入口风速及工作电压是保证静电-旋流耦合除雾器高效工作的关键。本研究通过选择不同粒径的雾滴及不同的工作电压, 考察不同入口风速下的除雾效率, 以期获得对不同粒径雾气的最优入口风速和工作电压, 为静电-旋流耦合除雾器的优化设计提供参考。

1 静电-旋流耦合除雾器的结构和工作原理

静电-旋流耦合除雾器中的电场是在电极棒(阴极)和雾滴收集面(阳极)之间。当放电极接入高压电源, 收集面接地, 两极之间会形成强大电场。当雾气进入静电除雾器内后, 大量空气分子被电离, 产生负离子, 这些负离子向收集面运动^[5]。

静电-旋流耦合除雾器的结构及主要尺寸如图1所示。其中, 筒体直径 D 为 100 mm ; 溢流口直径 D_0 为 50 mm ; 底流口直径 D_u 为 20 mm ; 旋流器高度 L 为 488 mm ; 筒体长度 L_s 为 200 mm ; 溢流口插入深度 L_0 为 122 mm ; 物料入口为 $50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的长方形。

静电-旋流耦合除雾器的除雾原理是: 首先, 雾滴在运动过程中会带上电荷, 并在电场力作用下向收集面运动^[6], 形成液膜, 最后在重力作用下从底流口排出; 同时, 根据旋流器的工作原理, 当雾滴从入口切向进入旋流器后, 在里面形成旋转流场, 在旋流离心力的作用下向壁面运动; 由于该离心力的方向与前述电场力的方向一致, 故雾状颗粒同时受到双重力的作用, 从而加速向收集面的迁移。

2 数学模型以及数值模拟方法

2.1 流场模型

本模拟采用的 Fluent 流体仿真软件, 应用范围极广, 但该软件没有静电场模块。为准确描述静电场和流场耦合对颗粒分离的影响, 使模拟更加完整, 用文献 [7] 给出部分代码编写 UDF 来模拟静电场^[8]。流体流动遵守能量守恒方程、热力学第二定律、动量守恒定律和质量守恒定律等物理学规律。电除雾器内流体中含有大量电荷, 流体本身也会受到电场力的作用, 故电除雾器内的流场也被称为电流场, 可用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行有效求解^[9-10]。RNG $k-\varepsilon$ 模型由瞬态 N-S 方程推导而来, 与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比, RNG $k-\varepsilon$ 模型更适用于存在强流线弯、漩涡和旋转的流场计算^[11]。 k 方程和 ε 方程分别见式 (1) 和式 (2)。通过修改湍流黏度来修正湍流受主流场旋转和漩涡的影响, 如式 (3) 所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

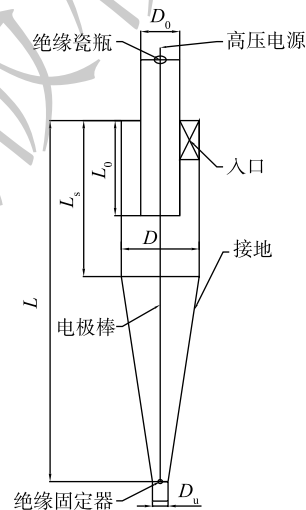


图1 静电-旋流除雾器结构

Fig. 1 Sketch of an electrostatic-cyclone demister

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中： $C_{1\varepsilon}$ 为默认常量， $C_{1\varepsilon}=1.42$ ； $C_{2\varepsilon}$ 为默认常量， $C_{2\varepsilon}=1.68$ ； $C_{3\varepsilon}$ 为默认常量， $C_{3\varepsilon} = \tanh \frac{v_s}{u_s}$ ， v_s 为流体与重力方向平行的速度分量， u_s 为流体与重力方向垂直的速度分量； α_k 为 k 方程的湍流 Pr 数 $\alpha_k \approx 1.393$ ； α_ε 为 ε 方程的湍流 Pr 数 $\alpha_\varepsilon \approx 1.393$ ； μ_{eff} 为有效动力黏度， $\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ， $C_\mu = 0.0845 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ； R_ε 为 ε 方程中的附议项， $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^2)^{-1}$ ； G_k 为由平均速度梯度产生的湍流动能， $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^2)^{-1}$ ； Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率贡献； G_b 为由浮力产生的湍流动能， $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^2)^{-1}$ ， S_k 、 S_ε 为自定义量。

$$\mu_t = \mu_{t0} f \left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon} \right) \quad (3)$$

式中： Ω 为特征旋转量； μ_{t0} 为未修正湍流黏度， $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ； α_s 为常数， $\alpha_s = 0.07$ 。

采用 DPM 模型双向耦合计算静电-旋流除雾器内的两相流动：用近壁面函数考虑雾滴和壁面作用；用随机游走模型考虑液滴在湍流中的扩散现象；用动态曳力模型考虑雾滴在流场中的变形而引起的曳力变化。

2.2 电晕电场模型

空间电荷影响下的电场分布可由泊松方程(式(4))和电流连续性方程^[12](式(5))来描述。

$$\nabla E = \frac{\rho_i}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

式中： E 为电场强度， $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ； ρ_i 为空间电荷密度， $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$ ； ε_0 为气体介电常数， $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot (\text{N} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 。

$$\nabla j = \nabla(j_p + j_i) = 0 \quad (5)$$

式中： j 为总电流密度， $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ； j_p 为带电尘粒电流密度， $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ； j_i 为离子电流密度， $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

假设电晕放电稳定，电流连续性方程见式(6)。联立式(4)和式(6)求解电场强度分布。而 Fluent 中没有电场物理模型，故必须通过用户自定义函数加载电场的作用。

$$\nabla j_i = 0 \quad (6)$$

2.3 颗粒运动模型

在静电旋流除雾过程中，由于电晕放电系统中分布了大量荷电离子，雾滴进入后在电场作用及扩散作用下会荷电，因此，除了电场力，雾滴还会受到流体曳力及重力的作用^[13]。由牛顿第二定律求得颗粒的运动方程见式(7)。

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} C_D \frac{Re_p}{24} (u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + Eq \quad (7)$$

式中： C_D 为曳力系数； μ 为气体黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； ρ_p 为雾滴密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； d_p 为雾滴直径， m ； Re_p 为相对雷诺数； u_p 为雾滴速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； u 为流体运动速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； ρ 为流体密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； q 为带电离子单位荷电量， C ； E 为电场强度， $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2.4 颗粒荷电模型

雾滴荷电分为电场荷电和扩散荷电 2 种方式。其中，电场荷电指离子在电场力作用下和雾滴碰撞，使得雾滴荷电；扩散荷电指离子的扩散使得雾滴荷电。直径小于 $0.15 \mu\text{m}$ 的雾滴荷电以扩散荷电为主；大于 $0.5 \mu\text{m}$ 的雾滴主要为电场荷电。本研究中涉及的雾滴粒径大都大于 $1 \mu\text{m}$ ，故仅考虑电场荷电^[14]。雾滴荷电方程见式(8)。模型中的电场力通过电场强度与颗粒带电量的乘积计算得到，算式将通过自定义 UDF 来实现。

$$q = 3\pi\varepsilon_0 d_p^2 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} E_0 \quad (8)$$

式中： d_p 为雾滴直径，m； ε_r 为相对介电常数， $\varepsilon_r=1.000\ 590$ ； ε_0 为真空介电常数， $\varepsilon_0=8.85\times 10^{-12}\text{C}^2\cdot(\text{N}\cdot\text{m}^2)^{-1}$ ； E_0 为荷电电场强度， $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

3.1 处理量对压力降的影响及流场模拟的验证

压力降又称压力损失，是衡量旋流器消耗能量大小的技术经济指标。旋流器本身没有动力设备，流体通过入口速度在旋流器中获得离心力，然后通过消耗流体压力获得能量以实现分离。在其他条件一定的情况下，压力降越低，旋流器能量损失就越低。实验中溢流口的压力等于大气压，故压力降即为入口压力表压。通过对比实验与模拟计算分别得到的压力降，可间接验证模拟的可靠性。由图2可知，压力降会随着处理量的增大而增大，且模拟曲线与实验曲线变化趋势一致，说明模拟具有一定可靠性。

3.2 入口速度对雾滴去除率的影响

由图3可知，在不同电压下，入口速度对除雾效率的影响不同，主要分为2个阶段。当电场电压小于20 kV时，静电旋流器除雾效率会随着入口速度的增加而增加。这是由于当施加电场电压小于20 kV时，电晕极未达到电晕电压、或是由于电压较小导致电场力较小，故静电力的影响很小，此时主要的分离作用为离心分离，与普通旋流器的入口速度对除雾效率的影响规律一致。金向红等^[15]对气液旋流分离器的研究中发现，当入口风速达到一定值后，分离效率会下降。其主要原因包括以下3个方面：1)随着进口流速的增加，进口与气体出口间的短路流不断增强，部分未被分离的液滴随短路流进入溢流管，使得分离效率下降；2)随着流速的增加，旋流强度也会增强，原旋流器内壁面的液体表面会出现一定的湍流扩散，产生气雾夹带现象，部分雾滴进入旋流器内旋流，会随着溢流口排出，使得分离效率降低；3)随着流速的增大，旋流器内的湍流强度增加，在强旋湍流作用下液滴发生破碎现象，使分离难度增加。

当电场电压大于20 kV时(见图3)，除雾效率随入口速度的增大呈先增大后减小的趋势，在入口速度为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时呈现“拐点”。与普通旋流器不同的是，这个“拐点”是由静电力的影响所造成。当入口风速较低时，离心力的除雾作用较小，静电力的除雾作用较大，但两种力综合作用下的总除雾效率仍然较低；当入口风速达到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，2种作用的综合效果达到最佳，能保持较高的除雾效率；而当入口风速继续增大时，离心力增强，但雾滴在旋流器内停留时间减少，荷电效果不佳，此时主要作用为离心分离，静电除雾作用减小，两者综

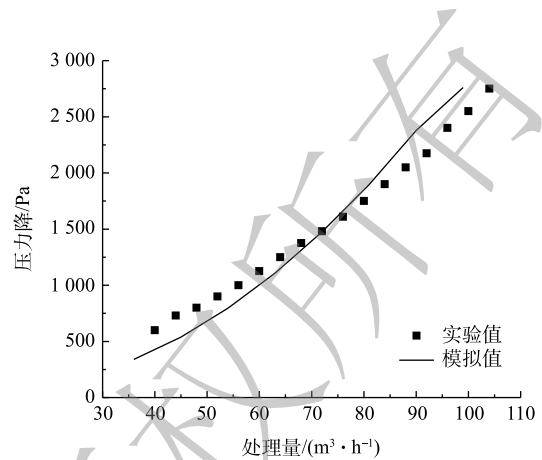


图2 处理量与压力降关系图

Fig. 2 Relationship between processing volume and pressure drop

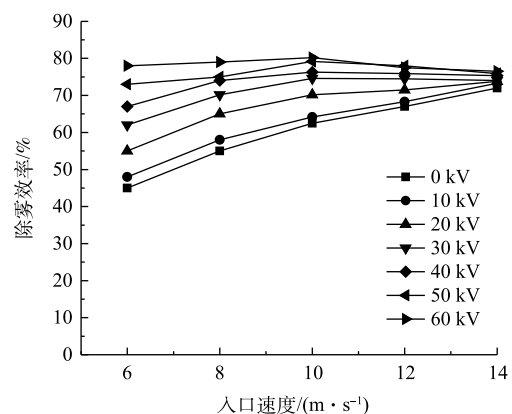


图3 不同入口速度在各电压下的除雾效率
(雾滴粒径为 $5\ \mu\text{m}$)

Fig. 3 Demisting efficiency of different inlet speeds at various voltages (fog droplet size $5\ \mu\text{m}$)

合作用下的除雾效率有所下降。因此，入口速度的大小决定了雾滴所受离心力的大小，也决定了雾滴在旋流器中的停留时间，从而决定了雾滴所受电场力的大小。

综上所述，为了获得较高的除雾效率，应保证离心力与电场力对除雾效果的综合作用，选择合适的入口速度。从模拟结果看，本静电-旋流耦合除雾器的最佳入口速度为 $8\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.3 电压大小对雾滴去除效率的影响

在静电-旋流耦合除雾器中，影响电场力最主要的因素是电压。由图 4 可知，电场电压越高，电场强度越大，荷电粒子受到的电场力越大，分离效率也就越好^[16]。因此，提高电场电压，有利于提高静电-旋流耦合除雾器的效率。当施加的电场电压较低时(如小于 20 kV)，电晕极起晕放电的程度太弱，电场强度也较低(见图 4(a))，雾滴的荷电量和电场力都较小，故受到静电力作用较小，对除雾起主要作用的仍是离心力；当电压大于等于 20 kV 时，电晕极附近电场强度增大(见图 4(b)~(d))，场强梯度很大，电晕极起晕放电程度增强，雾滴的荷电量和电场力较大，此时起主要作用的是离心力和静电力的共同作用，所以，静电-旋流耦合除雾器的除雾效率比不加电压时有明显的提升。

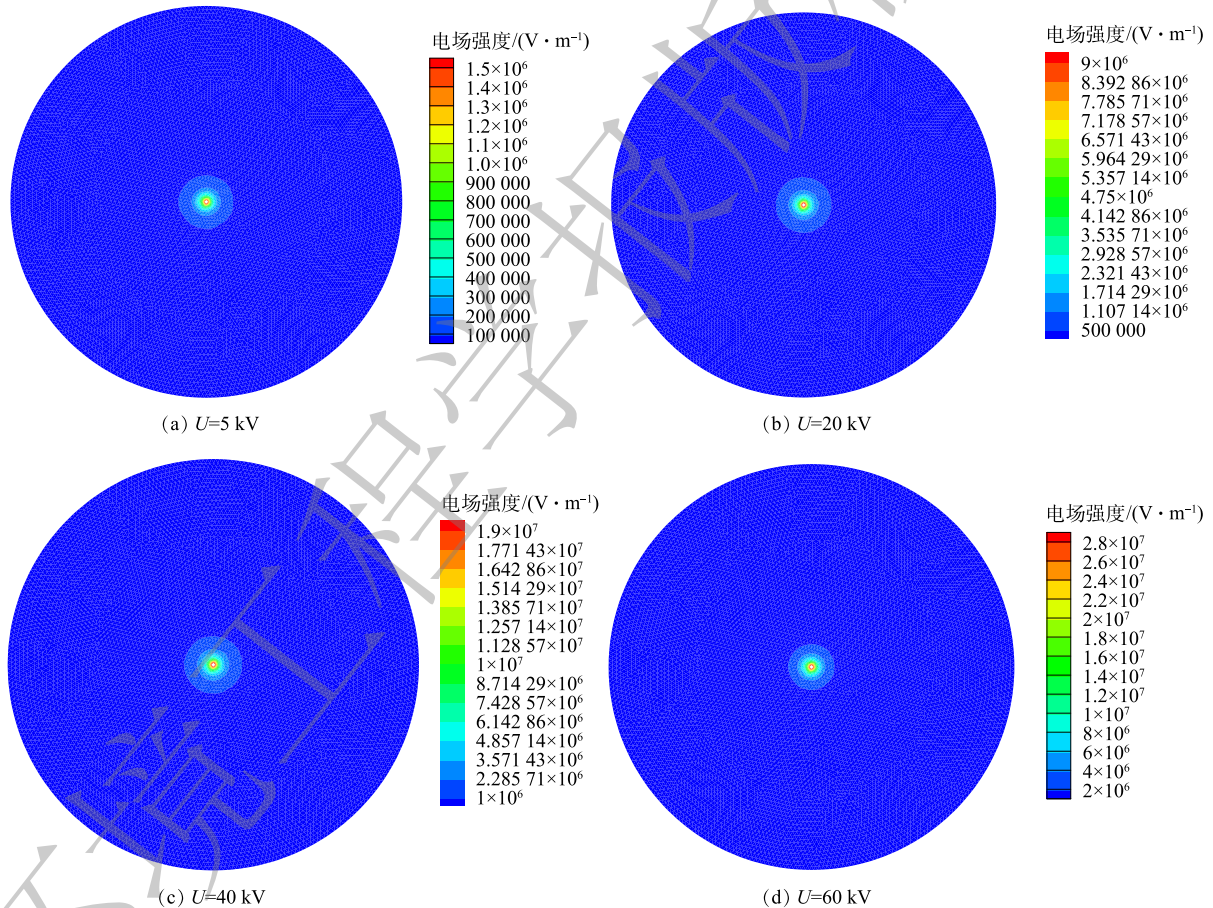


图 4 不同电压下电场强度分布图

Fig. 4 Electric field intensity distribution of different voltages

3.4 不同粒径雾滴在电场作用下的去除率

加上电场后的静电-旋流耦合除雾器的分离效率提升明显，其除雾性能优于普通的旋流除雾器；且施加的电压越高，除雾效率也越高。然而，电场电压不能无限度地提高，受电晕极与集尘极间距等条件的限制，两极间电压过高时，会发生电场击穿，使静电-旋流耦合除雾器不能正常工作。因此，本设备最高工作电压设置为 60 kV。图 5 为入口速度 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、电压为 $0\sim 60\text{ kV}$ 时各粒度

雾滴的去除效率。由图5可知,随电压的增加,对1 μm 雾滴的去除效率从5.3%增加到45.6%;对3 μm 雾滴的去除率从43.7%增加到67.6%;对8 μm 雾滴的去除率从68.2%增加到89.3%;对10 μm 雾滴的去除率从78.1%增加到96.1%。上述结果说明,电场作用对于粒径大于5 μm 的(尤其是8 μm 以上)雾滴去除率影响较小,而对于5 μm 以下(尤其是3 μm 以下)雾滴的去除率影响更明显。这是由于小粒径的雾滴受离心力较小,仅靠离心力捕集分离效率很低;施加电压后,小粒径雾滴比大粒径雾滴更容易荷电,雾滴同时受到旋流离心力和电场力的作用,故除雾效率大幅提高。因此,静电-旋流耦合除雾器能更好地分离小粒径雾滴。

4 结论

1) 在旋流器内添加稳定工作电压,形成静电-旋流耦合除雾器。在模拟的入口风速和雾滴粒径范围内,静电-旋流耦合除雾器的除雾效率与不加电压相比,有明显提升。

2) 当入口风速为8~12 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,静电-旋流除雾器除雾效率达到最高,表明此时装置的离心分离和静电分离的综合作用最强,且随着电压的升高除雾效率亦升高。

3) 利用该耦合装置分离3 μm 以下雾滴的提升效果明显高于分离5 μm 以上的雾滴。雾滴粒径越大,除雾效率提升却越小。这说明,静电-旋流耦合除雾器能更好地分离小粒径雾滴,对于粒径3 μm 以下雾滴的分离效率提升明显。

参考文献

- [1] 周广强,陈敏,彭丽. 雾霾科学监测及其健康影响[J]. 科学, 2013, 65(4): 56-59.
- [2] 林祖涵. 静电除雾技术在燃煤电厂的应用[J]. 华电技术, 2011, 33(1): 65-68.
- [3] 蒯继玺. 脱硫塔高效除雾技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [4] 赵东. 水力旋流器发展概况及趋势[J]. 矿业工程, 2007, 5(4): 15-16.
- [5] 孙士勇. 湿式静电除雾器在催化裂化装置上的应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2019, 35(1): 47-51.
- [6] 卢林杰. 静电除雾器[J]. 日用化学工业, 2001, 31(4): 49-51.
- [7] 李艳. 高温静电除尘过程的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [9] CHUN Y N, CHANG J S, BEREZIN A A, et al. Numerical modeling of near corona wire electrohydrodynamic flow in a wire-plate electrostatic precipitator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 119-124.
- [10] SCHMID H J, STOLZ S, BUGGISCH H. On the modelling of the electro-hydrodynamic flow field in electrostatic precipitators[J]. Flow Turbulence & Combustion, 2002, 68(1): 63-89.
- [11] 宋振宇. 核电站汽水分离器分离特性的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [12] LEONARD G L, MITCHNER M, SELF S A. Experimental study of the effect of turbulent diffusion on precipitator efficiency[J]. Journal of Aerosol Science, 1982, 13(4): 271-284.
- [13] 顾亚川. 新型双涡旋极板电除尘器数值模拟及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.

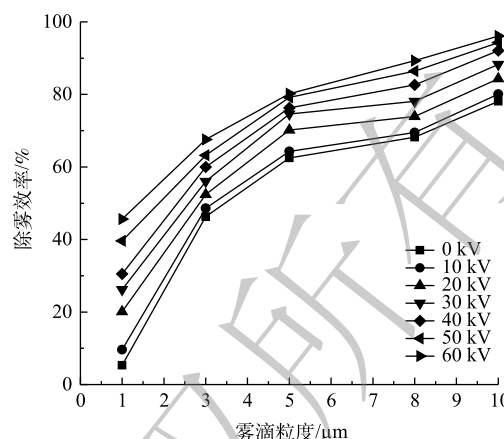


图5 不同粒径雾滴在各电压下的去除率

Fig. 5 Removal rates of droplets of different particle sizes at various voltages

- [14] 李海英, 多鹏, 王茹, 等. 静电除尘器内细微尘涡流现象的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7): 4140-4148.
- [15] 金向红, 金有海, 王振波, 等. 气液旋流分离器排气管结构试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(2): 114-119.
- [16] 钱付平. 静电旋风分离器结构优化[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2003.

(本文编辑: 靳炜, 郑晓梅)

Analyze the separation performance of electrostatic-cyclonic coupling demister by numerical simulation method

YUAN Huixin^{1,2,*}, JIANG Shuilin^{1,2}, FU Shuangcheng^{1,2}, ZHOU Faqi^{1,2}, ZHU Xingtong^{1,2}

1. School of mechanical engineering, Changzhou University, Changzhou 213000, China

2. Key Laboratory of Green Process Equipment in Jiangsu Province, Changzhou 213164, China

*Corresponding author, E-mail: yuanhuixin2000@126.com

Abstract There are varying degrees of water, acid or oil mist pollution in the chemical, metallurgy, electroplating, textile, machinery manufacturing and building materials industries, thus demisting is an essential process. To overcome the low efficiency of cyclone demisters in remove particles smaller than 5 μm in diameter, this work establishes an electrostatic-cyclone demister with a diameter of 100 mm by combining an electrostatic demister with a cyclone demister. The effects of inlet velocity, voltage and droplet size on the mist removal performance are studied based on numerical simulations performed on the Fluent software platform and verified by a pressure drop test. Results show that the optimal inlet speed of the electrostatic-cyclone demister is 8~12 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, the optimal operating voltage is 60 kV, and the defogging efficiency is significantly higher than that of the ordinary cyclone demister, especially for mists smaller than 3 μm in diameter.

Keywords swirl separation; electrostatic defogging; numerical simulation; pressure drop