



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202009207

中图分类号 X701.7

文献标识码 A

向晓东, 詹旻钧, 钟杰, 等. 旋线除雾技术的理论建立与应用检验[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2668-2677.

XIANG Xiaodong, ZHAN Minjun, ZHONG Jie, et al. Demisting theory development and its validation of rotary thread demister[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2668-2677.

旋线除雾技术的理论建立与应用检验

向晓东^{1,2,*}, 詹旻钧¹, 钟杰¹, 刘涛²

1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081

2. 国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室, 武汉 430081

第一作者: 向晓东(1958—), 男, 博士, 教授。研究方向: 烟尘污染控制理论与应用技术。E-mail: drxxd@163.com

*通信作者

摘要 基于孤立圆柱状纤维对颗粒捕集机理和颗粒运动方程, 分别建立了拦截、惯性碰撞以及离心分离除雾效率及其复合机理除雾效率理论表达式。为验证其合理性, 实验中采用筒径 500 mm 双层旋线除雾器, 旋线采用直径 3 mm 聚酯纤维, 每层分别布置 100 根和 200 根旋线, 旋线转速 250~800 r·min⁻¹, 在水雾中位径 20.1 μm、水雾入口浓度约 4 100 mg·m⁻³、除雾器断面风速 2.5 m·s⁻¹ 的条件下, 当转速 500 r·min⁻¹ 时, 每层 100 根旋线的除雾器总效率约 95%, 每层 200 根旋线的除雾器总效率超过 98%, 表明增加旋线层根数的提效作用显著。根据总捕集效率与分级效率的经验关系式, 得出旋线除雾器的分级效率经验预估值, 并与所建立的旋线除雾器复合机理分级效率理论值比较, 结果表明, 旋线除雾器复合机理分级效率理论值与分级效率经验预估值相当吻合, 在雾径 0~40 μm 范围内, 双层旋线除雾器分级效率理论值和实验预估值的平均误差小于 1.4%。对不同机理的除雾作用进行比较, 发现旋线的惯性碰撞效应起主导作用, 旋流分离次之, 拦截效率极低, 当每层 200 根旋线时, 对 20 μm 雾滴的拦截效率仅 2.5% 左右, 旋流离心分离除雾效率服从指数规律, 且是雾径的平方和转速的平方的函数, 对较大雾滴的提效作用明显。

关键词 旋线除雾器; 拦截; 惯性碰撞; 离心分离; 除雾效率

烟气经湿法脱硫后会产生大量含可溶性物质的白色水雾^[1], 导致环境污染^[2]。除雾方法主要是加装除雾器^[3], 如折流板除雾器^[4]、丝网除雾器^[5]、静电除雾器等^[6]。为提高除雾器的气液分离作用, NARIMANI 等^[7]运用 CFD 的方法优化了带倒钩的折流板除雾器结构; EL-DESSOUKY 等^[8]研究了不同网层厚度下丝网除雾器的最佳过滤风速; 袁惠新等^[9]研究了旋风除雾器在引入静电场后对细水雾的脱除效果。然而, 目前水雾排放浓度依然难以达到相关标准规定的排放限值^[10]。因此, 白色烟羽排放的有效控制已成为湿烟气深度净化的一个研究热点^[11-12]。

烟气“脱白”技术鲜有突破, 其原因是除雾工程应用限制了 2 个高效技术路径: 要求成本低、能耗少、占地小, 不宜采用湿电; 要求压损小、无堵塞, 不能采用过滤。因此, 近年来利用空气动力分离的技术方法倍受关注^[13-15]。然而, 采用空气动力分离除雾, 需要在细而长的螺旋管中带动整个气流高速旋转, 导致能耗过高, 而且细水雾易被高速气流带出除雾器。

为实现高湿烟气的高效除雾, 笔者提出了自由旋线除雾方法^[16-17], 并开展了单层自由旋线除

收稿日期: 2020-09-29; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0210404)

雾实验研究^[18]。结果表明,自由旋线除雾器的压损小、效率高,并且发现在控制能耗情况下增加旋线根数比增加旋线转速的提效作用更显著。然而,关于自由旋线除雾器的除雾性能还缺乏基础理论研究。本研究将基于经典的单根柱状纤维捕集和旋流离心分离机理,建立自由旋线除雾器的除雾效率理论,并通过实验加以验证,进而揭示旋线根数和转速对自由旋线除雾作用的影响规律,以期为自由旋线除雾技术的发展及应用提供参考。

1 旋线除雾理论

1.1 旋线除雾器的工作原理

在旋线除雾器中布置有数以百计的纤维线(见图1)。纤维线的一端固定在电机的连接轴上,纤维线的另一端自由。电机启动前,纤维线在自重作用下自然下垂。电机启动后,高速旋转的纤维线(简称旋线)在离心力作用下呈伞形张开,并覆盖整个除雾器筒体过流断面。

当含雾气流进入除雾器,在通过旋线层时,柱状纤维旋线与液滴间产生拦截、惯性碰撞和扩散作用^[19]。由于纤维线具有吸湿性,液滴会附着旋线表面或浸入旋线中,然后在离心力作用下甩向筒壁。筒壁上的液体在重力作用下最后流入除雾器底部的液斗中。另外,由于高速旋转的纤维线搅拌作用,使旋线层下方的气体形成旋流,进而对未被捕集的液雾产生离心分离作用,使旋线除雾器的净化效果得到进一步提升。所以,旋线除雾器的工作原理是旋线层过滤和旋流离心分离的协同作用。

1.2 旋线层的除雾效率

当圆柱状纤维与垂直于来流方向颗粒物之间的相对速度相同时,基于孤立圆柱状捕集体对颗粒物的捕集机理来探索纤维层的捕集效率更容易^[20]。但由于旋线与雾滴的相对速度是变化的,需先根据不同的捕集机理确定单根旋线的捕集量,然后由效率定义分别建立旋线层的拦截、惯性碰撞和扩散效率理论表达式。

1.2.1 拦截

分析纤维对颗粒物的拦截捕集作用首先要考虑绕捕集体流动的介质的流态。对于绕流问题,分为黏性流和势流。判断流态的依据是雷诺数(Re),具体见式(1)。

$$Re = \frac{\rho v d_f}{\mu} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v 为空气流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; d_f 为旋线直径, m ; μ 为气体动力黏性系数, 常温常压下, $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

当 $Re \leq 1$ 时,柱状捕集体周围的流动可视为黏性流;而当 $Re > 1$ 时,可近似为势流^[21]。在自由旋线除雾器中,旋线的切向速度可超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且旋线较粗(直径通常 $2 \sim 4 \text{ mm}$)。由此得出,气流绕旋线流动的雷诺数 Re 超过 100,属势流。在势流情况下,单位长度孤立圆柱状捕集体对球形雾滴的拦截效率计算公式^[22]见式(2)。

$$\eta_r = 1 + G - \frac{1}{1 + G} \quad (2)$$

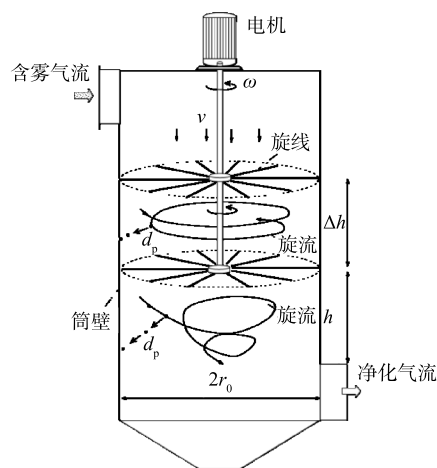


图1 双层旋线除雾器除雾原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a rotary thread demister with two layers

式中: η_r 为单位长度孤立圆柱状捕集体对球形雾滴的拦截效率; G 为拦截参数, 计算式为式 (3)。

$$G = d_p/d_t \quad (3)$$

式中: d_p 表示雾滴直径, m; d_t 为旋线直径, m。

然而, 沿旋线上的切向速度 u 是不均匀的, 切向速度分布如图 2 所示。于是, 旋线上任意点 r 与颗粒的相对运动速度见式 (4)。

$$u = \omega r \quad (4)$$

式中: u 为旋线与颗粒的相对速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ω 为旋线旋转角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; r 为旋线半径, m。

设气体中的颗粒初始浓度为 c_0 , 在图 2 所示的旋线微元长度 dr 上拦截的雾滴质量计算式见式 (5)。

$$dm_R = c_0 \eta_r d_t u dr = c_0 \eta_r d_t \omega r dr \quad (5)$$

式中: dm_R 为微元 dr 上拦截的雾滴质量, kg; c_0 为气体颗粒浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

对式 (5) 从 0 到旋线长度 r_0 进行积分 (见式 (6)), 得到单根旋线拦截作用捕集的雾滴质量。

$$m_R = \int_0^{r_0} c_0 \eta_r d_t \omega r dr = \frac{1}{2} c_0 \eta_r d_t \omega r_0^2 \quad (6)$$

因流向孤立旋线的雾滴总质量的计算式见式 (7)。于是, 单根旋线拦截作用的捕集效率可通过式 (8) 进行计算。

$$M = Q c_0 = \pi r_0^2 v c_0 \quad (7)$$

$$\eta_R = \frac{m_R}{M} = \frac{\omega d_t}{2\pi v} \eta_r \quad (8)$$

式中: M 为来流雾滴总质量, kg; Q 为气流流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; c_0 为气体颗粒浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; v 为通过旋线除雾器筒体断面的平均轴向速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; η_R 为单根旋线拦截作用的捕集效率; m_R 为单根旋线捕集雾滴质量, kg。

对于气流中有 N 个捕集体时 (见图 3), 由计算式 (9)^[23], 得到旋线层的拦截效率。

$$\eta_{RN} = 1 - (1 - \eta_R)^N \quad (9)$$

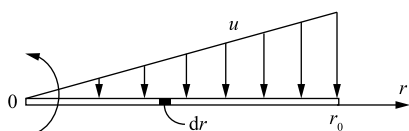


图 2 单根旋线切向速度分布与捕集效率建模示意图

Fig. 2 Development model of tangential velocity distribution and collection efficiency of an isolated rotary thread

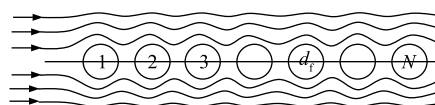


图 3 气流中 N 根捕集体的捕集作用

Fig. 3 Capture effects of a series cylindrical targets

1.2.2 惯性碰撞

当颗粒直径 $d_p > 1 \mu\text{m}$, 柱状捕集体的惯性碰撞效应是重要的。惯性碰撞效率是 Stokes 数 St 的函数, 其表达式见式 (10)。

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 u}{18\mu d_t} \quad (10)$$

式中: ρ_p 为雾滴密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; d_p 为雾滴直径, m; u 为捕集体与颗粒的相对速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; μ 为气体动力黏性系数, 取 $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; d_t 为旋线直径, m。

由于绕孤立柱状纤维流动的颗粒运动方程求解非常困难, 至今没有分析解。虽然 LANDAHL 和 HERMAN 给出了惯性碰撞效率经验式^[22], 但在高雷诺数的势流情况下缺乏适用性论据。已有研

究结果表明, 在对数概率坐标纸上, 单位长度孤立柱状捕集体的惯性碰撞效率随 $\sqrt{St}$ 的变化呈一条直线^[24], 如图4所示。

而能在对数概率坐标纸上具有直线分布特征的数学模型为对数正态分布。于是, 惯性碰撞效率与 $\sqrt{St}$ 的函数关系可用式(11)表示。

$$\eta_i = \frac{1}{\ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{St}} \exp \left[-\frac{(\ln \sqrt{St} - \ln \sqrt{St}_{50})^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right] d(\ln \sqrt{St}) \quad (11)$$

式中: η_i 为单位长度孤立圆柱状捕集体的惯性碰撞效率; σ_g 为几何标准偏差; $(\sqrt{St})_{50}$ 为方根斯托克斯数中位值。

对于旋线, 符合 $Re \geq 150$, 满足曲线 A, 于是由图4可确定 $(\sqrt{St})_{50} = 0.7$ 。几何标准偏差计算式为式(12)。由此可推算孤立柱状捕集体的惯性碰撞效率计算式为式(13)。

$$\sigma_g = \frac{\sqrt{St}(\eta_i = 84.1\%)}{(\sqrt{St})_{50}} = \frac{1.35}{0.7} \approx 1.9 \quad (12)$$

$$\eta_i = \frac{1}{\ln 1.9 \sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{St}} \exp \left[-\frac{(\ln \sqrt{St} - \ln 0.7)^2}{2(\ln 1.9)^2} \right] d(\ln \sqrt{St}) \quad (13)$$

来流颗粒与旋线的相对运动速度是变化的, 故单根旋线上惯性碰撞捕集的液滴质量可由积分(见式(14))来计算。单根旋线的惯性碰撞捕集效率计算见式(15), 而气流中有 N 根捕集体的惯性碰撞效率计算式见式(16)。

$$m_1 = \int_0^{r_0} c_0 \eta_i d_f \omega r dr \quad (14)$$

$$\eta_1 = \frac{m_1}{M} = \frac{\omega d_f}{\pi r_0^2 v} \int_0^{r_0} \eta_i r dr \quad (15)$$

$$\eta_{1N} = 1 - (1 - \eta_1)^N \quad (16)$$

式中: m_1 为单根旋线惯性碰撞作用捕集的液滴质量, kg; η_1 为单根旋线的惯性碰撞捕集效率; η_{1N} 为旋线层惯性碰撞捕集效率; N 为旋线根数。

1.2.3 扩散效应

扩散效应适合于颗粒直径 $d_p < 1 \mu\text{m}$ 的情况。但在水雾中, $d_p < 1 \mu\text{m}$ 液滴所占质量百分比极小, 对总捕集效率的贡献很小, 可忽略。

对于多机理同时存在的复合捕集效率, 普遍采用 RICHARD 和 SEINFELD 给出的算式^[25] (见式(17))。于是, N 根旋线的旋线层的拦截和惯性碰撞复合除雾效率计算式见式(18)。

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_n) \quad (17)$$

$$\eta_N = 1 - (1 - \eta_{RN})(1 - \eta_{1N}) \quad (18)$$

上述研究表明, 降低气流速度、增加转速, 均有助于增强拦截和惯性碰撞的捕集作用, 但增加旋线根数的提效作用更突出。

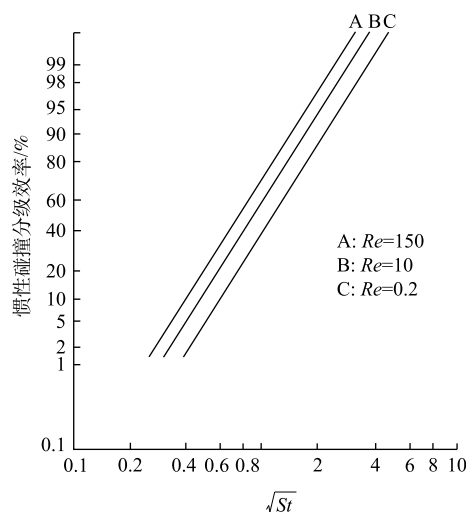


图4 孤立圆柱体惯性碰撞效率与 $\sqrt{St}$ 的关系

Fig. 4 Relationship of the inertial impact efficiency of an isolated cylinder and $\sqrt{St}$

Fig. 5 Development model of centrifugal separation efficiency of a rotary thread demister

$$\eta_{\omega} = 1 - \frac{r_{\theta}}{r_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\tau \Delta h \omega^2}{\nu}\right) \quad (30)$$

可见旋流离心分离除雾效率服从指数变化规律, 且是雾径和转速平方的函数。在图1所示的第二层旋线下面仍有呈锥状收缩的旋流流动, 但因接近气流出口, 旋流衰减较快, 故忽略其离心分离作用。

于是, 双层旋线捕集和旋流离心分离协同除雾效率计算式为式(31)。

$$\eta_C = 1 - (1 - \eta_N)^2 (1 - \eta_{\omega}) = 1 - [(1 - \eta_{RN})(1 - \eta_{LN})]^2 (1 - \eta_{\omega}) \quad (31)$$

2 旋线除雾理论的验证

2.1 实验系统

双层旋线除雾实验系统如图6所示。由除雾器本体、水泵、电机、旋线、风机、水箱构成。入口管均布4个雾化喷嘴, 壳体采用8 mm厚有机玻璃, 旋线长250 mm, 材质采用3 mm聚酯纤维线。风机最大风量 $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 全压300 Pa。

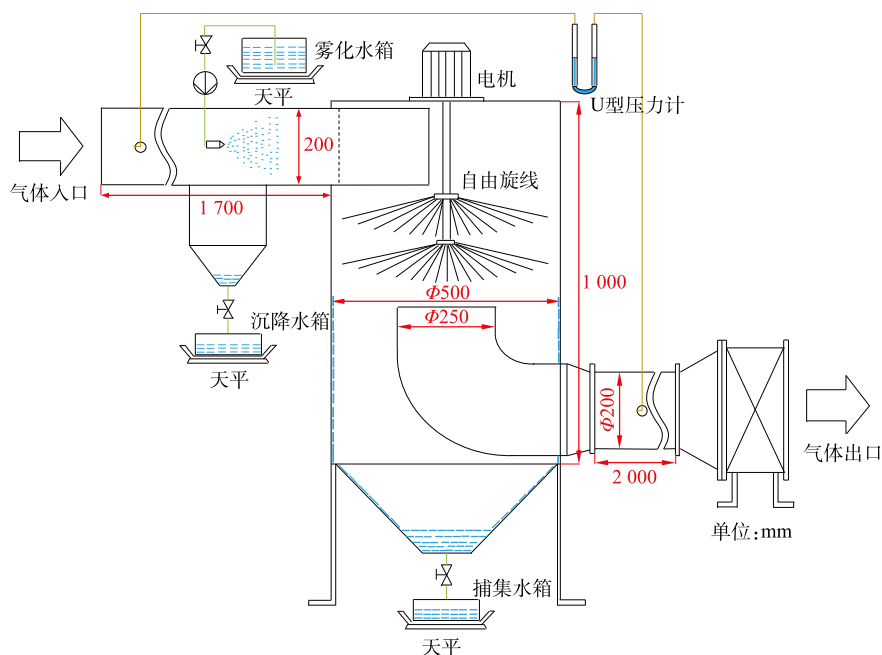


图6 实验系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental setup

2.2 实验方法

风量和旋线转速均采用变频器控制。通过调节水压改变水雾直径, 采用Winner 318激光粒度分析仪测定实验水雾的粒径分布如图7所示。水雾中位径为 $20.1\text{ }\mu\text{m}$, 实验雾滴大小接近工业脱硫塔烟气夹带液滴的粒径范围^[26]。

除雾效率的测定采用水平衡法^[27]。在图6中, 雾化水箱的失水量为喷嘴总喷水量 m_1 , 喷头喷出的雾化水雾随气流运动, 喷到进气管壁上的雾滴汇入沉降水箱中, 水量为 m_2 。实际进

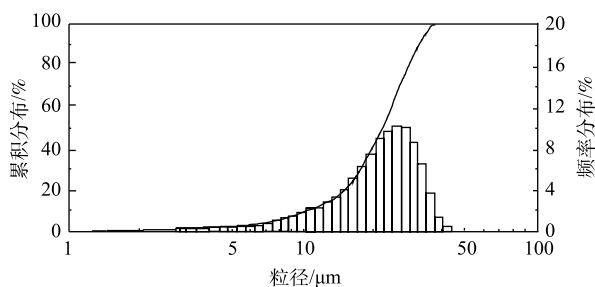


图7 雾滴粒径分布

Fig. 7 Distribution of water droplet sizes

入旋线除雾器筒体的总水雾量 $m_0=m_1-m_2$ ，被旋线旋线捕集的雾滴流入捕集水箱中，水量为 m_c ，则除雾效率见式 (32)。

$$\eta_T = m_c/m_0 \quad (32)$$

2.3 实验条件

实验在常温常压下进行，双层旋线除雾器每层旋线根数分别取 100 根和 200 根。考虑到现有静电除雾器的处理风速通常不超过 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[28]，为体现旋线除雾器的优势，实验风速取 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。喷嘴的喷液量为 $1355 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ，水雾浓度为 $4100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.4 检验结果与讨论

2.4.1 效率理论的检验

当每层旋线分别为 100 根和 200 根时，测得双层旋线除雾器的除雾效率与旋线转速的关系如图 8 所示。

结果表明，增加旋线根数的提效作用非常显著。采用直径 3 mm 旋线捕集中位径 $20.1 \mu\text{m}$ 的水雾，当旋线转速 $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时，每层旋线为 100 根时除雾总效率约 95%，当旋线增至每层 200 根时，除雾总效率为 98.1%。

由于实验所测得的除雾效率是总除雾效率，所建立除雾效率理论式 (31) 是分级效率，二者无法比较。为将实验所得总效率与分级效率相联系以便于评价除雾器的性能，ZHAO 等^[29]通过大量实验数据和试错研究发现，颗粒群的总捕集效率和颗粒群中位径近似存在的关系如式 (33) 所示。

$$\eta_T = 1 - \exp(-k_0 d_{p50}) \quad (33)$$

式中： η_T 为总效率实验值； k_0 为待定系数； d_{p50} 为颗粒群中位径。

根据已知总效率实验值 η_T 和颗粒群中位径 d_{p50} ，由式 (33) 可确定系数 k_0 。于是，基于分级效率服从指数规律，ZHAO 等^[29]得出预估分级效率经验式 (34)。

$$\eta_e = 1 - \exp(-k_0 d_p) \quad (34)$$

式中： η_e 为预估分级效率。

作为验证性研究，仅讨论旋线转速 $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 情况下分级效率理论值与分级效率经验预估值的吻合度。

由总效率实验结果图 8 和式 (33) 得出的 k_0 值 (见表 1)。由式 (34) 分别得出每层 100 根和 200 根时的分级效率经验值 η_e ，然后由式 (31) 得出双层旋线除雾器分级效率理论值 η_c ，将计算结果绘于图 9 中。

实验结果表明，当雾径小于 $5 \mu\text{m}$ ，旋线除雾器分级效率理论值低于经验值；当雾径为 $5\sim 20 \mu\text{m}$ 时，理论值高于经验值，随后二者相互逼近。上述现象的原因是，当雾径小于 $5 \mu\text{m}$ ，惯性碰撞效应较弱，而当雾径大于 $5 \mu\text{m}$ ，惯性碰撞作用明显增强。总体看，旋线除雾器分级

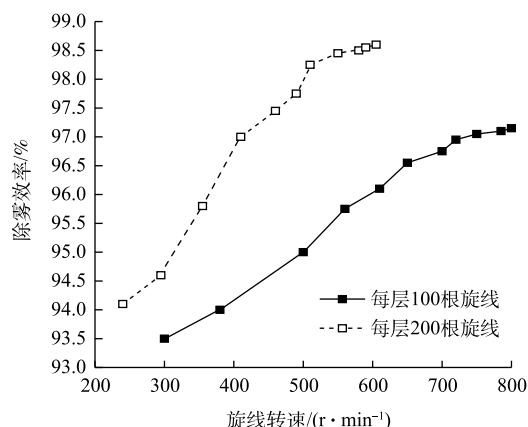


图 8 双层旋线除雾总效率与旋线转速的关系 (旋线直径 3 mm，长度 250 mm)

Fig. 8 Relationship between the demisting efficiency and the rotating speed of rotary thread with two rotary thread layers (diameter: 3 mm, length: 250 mm)

表 1 k_0 值计算表

Table 1 Calculation value of k_0

转速 n / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	角速度 ω / ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	每层旋 线根数	总效率 实验值/%	k_0
500	16.7π	100	95.0	0.149
		200	98.1	0.197

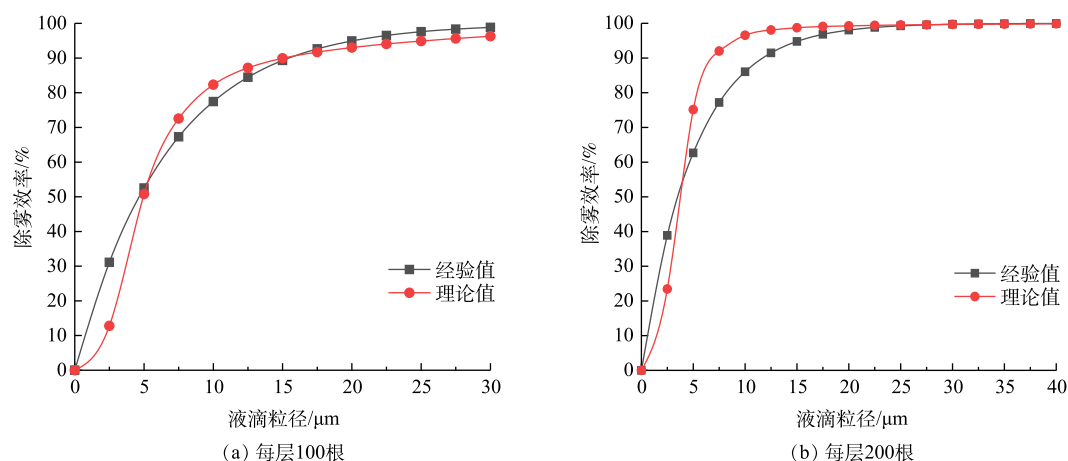


图9 双层旋线分级除雾效率理论值与经验值对比 ($500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 9 Comparison of theoretical and empirical fractional demisting efficiency values in a demister with two rotary thread layers ($500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

效率理论值与经验值相当吻合, 在雾径为 $0 \sim 40 \mu\text{m}$ 时, 平均误差约 1.4%, 说明双层旋线的拦截、惯性碰撞与旋流离心分离复合除雾效率理论是比较准确的。

2.4.2 不同机理的提效作用

为明确各捕集机理在旋线除雾中的作用, 取旋线转速 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 将单层拦截 η_{RN} 、惯性碰撞 η_{IN} 、旋流离心分离 η_{O} 和双层复合除雾效率 η_{C} 的计算结果绘于图 10 中。由图 10 可看出, 惯性碰撞效应起主导作用, 旋流分离次之, 拦截效率对旋线除雾器效率的贡献很小。如对 $20 \mu\text{m}$ 雾滴, 在每层旋线 $N=200$ 根时, 双层复合除雾效率已达 98%, 单层旋线惯性碰撞效率为 89%, 旋流离心分离效率为 33%, 而拦截效率仅 2.5% 左右。因此, 拦截效率可忽略不计。在小雾径情况下, 虽然离心分离作用小于惯性碰撞, 但离心分离效率随雾径增加较快, 对旋线除雾器具有明显提效作用。

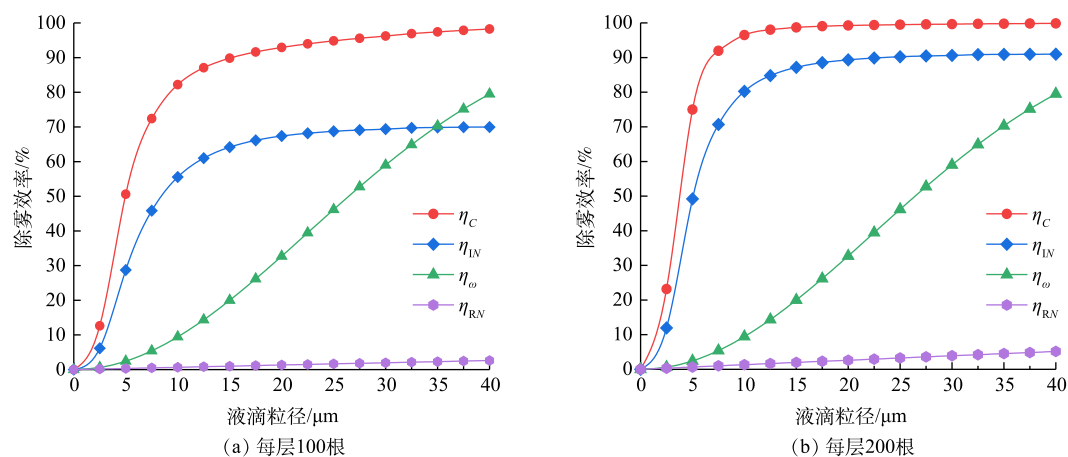


图10 双层旋线除雾器拦截、惯性碰撞、离心分离和复合机理除雾效率的比较 ($500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 10 Demisting efficiency comparison of interception, inertial impact, centrifugal separation, and combination mechanism in a demister with two rotary thread layers ($500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)

3 结论

1) 旋线除雾器的除雾机理主要是拦截、惯性碰撞和旋线的高速旋转产生的旋流离心分离。理论研究表明, 拦截和惯性碰撞随旋线转速和旋线根数的增加而提高, 但增加旋线根数的提效作用

更有效;旋流离心分离效率是雾径和转速的平方的函数,且服从指数规律。

2) 双层旋线除雾器的理论分级效率的验证结果表明,在旋线转速 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、旋线直径 3 mm 、每层旋线分别为 100 根和 200 根的情况下,在 $0 \sim 40 \mu\text{m}$ 雾径范围内,旋线除雾器分级效率理论值与经验值基本吻合,平均误差约 1.4%,说明双层旋线器的复合除雾效率理论是比较准确的。

3) 对比各机理在旋线除雾器中的提效作用可看出,旋线的惯性碰撞效应起主导作用,特别是对小粒径的雾滴有较高的捕集效率;旋流离心分离作用次之,对于小粒径雾滴分离效率不高,但随着雾滴粒径的增加效率提升较快;旋线的拦截除雾效率较低,几乎可以忽略不计。

参考文献

- [1] 欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 等. 燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 1975-1982.
- [2] MA S, CHAI J, JIAO K, et al. Environmental influence and countermeasures for high humidity flue gas discharging from power plants[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 225-235.
- [3] 叶毅科, 惠润堂, 杨爱勇, 等. 燃煤电厂湿烟羽治理技术研究[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(4): 32-35.
- [4] 蒋海涛, 田绍钢, 付玉玲, 等. 湿式静电除雾技术及在燃煤电厂的应用[J]. 发电设备, 2014, 28(1): 61-64.
- [5] 杨治中, 郭士义. 火电厂石灰石-石膏湿法脱硫除雾器的研究及应用进展[J]. 能源环境保护, 2014, 28(6): 11-14.
- [6] ELDESSOUKY H T, MARSHAD O A A. New material for the wire mesh demister[J]. Desalination & Water Treatment, 2016, 57: 21665-21673.
- [7] NARIMANI E, SHAHHOSEINI S. Optimization of vane mist eliminators[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(2/3): 188-193.
- [8] EL-DESSOUKY H T, ALATIQUI I M, ETTOUNEY H M, et al. Performance of wire mesh mist eliminator[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2000, 39(2): 129-139.
- [9] 袁惠新, 朱星苘, 付双成, 等. 静电-旋流除雾器性能的研究[J]. 流体机械, 2020, 48(5): 1-6.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部机械工业环境保护机械标准化技术委员会. 湿法烟气脱硫装置专用设备除雾器: JB/T 10989-2010[S]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [11] 林德生, 林立东, 施和谦. 湿法除尘脱硫后的烟气除湿[J]. 硫酸工业, 2017(1): 44-46.
- [12] 洪文鹏, 雷鉴琦. 加装钩片对除雾器性能影响的数值研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(1): 59-64.
- [13] EHTEHAM M A, TABRIZI H B, MESBAH M, et al. Experimental study on the effect of connecting ducts on demisting cyclone efficiency[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2012, 39(5): 26-36.
- [14] 程志良, 全学军, 李硕, 等. 操作参数对水力喷射空气旋流器脱出细颗粒物的影响[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1120-1126.
- [15] 周琪. 高效微旋流除尘除雾装置: 201520594074.2[P]. 2016-01-20.
- [16] 向晓东, 常玉峰, 秦显显. 一种顺流式无缠绕旋线除雾装置: 201410744558.0[P]. 2015-04-08.
- [17] XIANG X D, ZHANG Y M, ZHONG J, et al. Multi-tube parallel free rotary thread demisting device: US 10639573 B2[P]. 2020-05-05.
- [18] 向晓东, 钟杰, 石格, 等. 自由旋线除雾器除雾效率和压力损失变化规律探讨[J]. 动力工程学报, 2019, 39(4): 313-318.
- [19] MATTESON M J, ORR C. Filtration-Principles and Practices[M]. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc., 1987: 3-5.
- [20] 向晓东. 气溶胶科学技术基础[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 136-138.
- [21] LIU Z G, WANG P K. Pressure drop and interception efficiency of multifiber filters[J]. Aerosol Science and Technology, 1997, 26(4): 313-325.
- [22] DONOVAN R P. Fabric Filtration for Combustion Sources Fundamentals and Basic Technology[M]. New York and Basel:

Marcel Dekker, Inc., 1985: 181-185.

[23] MARTIN C. Air Pollution Control Theory[M]. New York: McGraw-Hill, 1976: 384-385.

[24] 郝吉明, 马广大, 王书肖. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 177-182.

[25] RICHARD C F, SEINFELD J H. Fundamentals of Air Pollution Engineering[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1987: 436-451.

[26] LIU Y, YU D, JIANG J, et al. Experimental and numerical evaluation of the performance of a novel compound demister[J]. Desalination, 2017, 409: 115-127.

[27] 杨柳, 王世和, 王小明. 脱硫除雾器除雾特性的研究[J]. 动力工程学报, 2005, 25(2): 289-292.

[28] 邹彦平. 影响静电除尘器运行效果的因素[J]. 中国井矿盐, 2015, 46(5): 37-40.

[29] ZHAO Z M, PFEFFER R. A semi-empirical approach to predict the total collection efficiency of electrostatic precipitator[J]. Chemical Engineering Communications, 1996, 148-150(1): 315-331.

(责任编辑: 靳炜)

Demisting theory development and its validation of rotary thread demister

XIANG Xiaodong^{1,2,*}, ZHAN Minjun¹, ZHONG Jie¹, LIU Tao²

1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Mineral Metallurgical Resources Utilization and Pollution Control, Wuhan 430081, China

*Corresponding author, E-mail: drxxd@163.com

Abstract Based on the particle capture mechanisms of an isolated cylinder normal to the gas flow and the particle motion equations in vortex flow, the theoretical demisting efficiencies of the interception, the inertial impaction, the centrifugal separation, and the combination demisting efficiency of the independent mechanisms of a rotary thread demister were developed. To test the theoretical demisting efficiencies, a rotary thread demister with diameter of 500 mm was used in this experiment. Two rotary thread layers were arranged in the rotary thread demister. The threads were made from polyester with diameter of 3 mm. The rotary speed of the threads ranges from 250 to 800 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$. The medium diameter of the droplets is 20.1 μm . The inlet concentration of water sprary is about 4 100 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The gas velocity in the rotary thread demister is 2.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Experimental results indicated that the overall separation efficiency could be greatly enhanced by increasing the thread number. For instance, when the rotary speed was 500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, the overall efficiencies of the double rotary thread layer demister with 100 threads per layer and with 200 threads per layer were 95% and 98% respectively. According to the empirical equation of the relation between the overall collection efficiency and the fractional efficiency, the approximate prediction of the fractional efficiency of the rotary thread demister can be found from the experimental value of overall collection efficiency. The comparison results show that the theoretical fractional efficiency of the combination mechanism fitted well with the empirical prediction values. In the range of droplet diameters from zero to 40 μm , the mean deviation was less than 1.4%. From the comparison of the independent mechanisms, it was found that the inertial impaction was predominant, the centrifugal separation was lesser, while the interception was negligible since the interception efficiency was only about 2.5% for 20 μm droplet collection at 200 threads per layer. The centrifugal separation efficiency of the vortex flow created by the fast spinning threads followed the exponential mode which was the function of the square of drop diameter and rotary speed. Thus, the centrifugal separation effect is distinct for larger water droplets.

Keywords rotary thread demister; interception; inertial impaction; centrifugal separation; demisting efficiency