

• 化学工程与技术 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300915



本刊网刊

## 撞击流除尘阵列惯性除尘机理强化

何 舸, 胡显峰, 刘泽坤, 陈科宏, 魏文韞, 余 徽\*

(四川大学 化学工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**惯性除尘是工业上常用除尘器的主要除尘机理之一,可通过提高气速对其进行强化,但由此将带来较大的阻力损失。针对撞击流除尘器的结构特征,提出多层撞击流除尘阵列的排布方式以平衡颗粒脱除率和压降之间的矛盾关系。首先,通过数值模拟获得了除尘阵列在不同排列间距条件下的颗粒脱除率和气路压降,引入过滤质量因子( $Q$ 因子)对颗粒脱除率和气路压降进行综合评价,结果表明,工业除尘中气速 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下 $6\text{ mm}$ 等间距的排列方式为较优排布方式。然后,通过除尘实验(雷诺数 $Re=2\ 131\sim 2\ 787$ )得出 $6\text{ mm}$ 等间距除尘阵列的单元排颗粒脱除率随斯托克斯数( $S_{tk}$ 数)的变化趋势,实验数据拟合得到了 $S_{tk}=5.2\times 10^{-4}\sim 1.0$ 范围内单元排颗粒脱除率与 $S_{tk}$ 数的经验公式。最后,为适应含尘气的宽粒径范围,开发了级联式撞击流排布方式的除尘阵列,此种除尘阵列通过逐渐收窄流道、提高阵列间气速,从而强化惯性碰撞,可有效提升分级颗粒粒径脱除率。级联式撞击流除尘阵列的实验表明,该排布方式较 $6\text{ mm}$ 等间距撞击流除尘阵列颗粒脱除率有较大提升,15个单元排的级联式除尘阵列与同单元排数的 $6\text{ mm}$ 等间距排布的除尘阵列相比,在气速为 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时颗粒脱除率提升了126%,且脱除率与 $S_{tk}$ 数的关联关系与前述经验公式预测值一致,表明此经验公式可适用于多种排列方式的除尘阵列。

**关键词:**撞击器;惯性碰撞机理;除尘阵列;气溶胶;过程强化

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)04-0350-09

大气中的气溶胶颗粒聚集可引发雾霾<sup>[1-2]</sup>,对人体健康有较严重的危害,尤以亚微米颗粒为甚<sup>[3-4]</sup>。工业源排放是大气中气溶胶颗粒的主要来源之一<sup>[5]</sup>,对其进行源头治理是控制 $\text{PM}_{2.5}$ 一次排放的工程共识。

惯性碰撞机理是工业生产中尾气颗粒脱除和健康防护时气溶胶收集检测的主要机理之一。过滤层除尘装置和袋式除尘装置主要依靠惯性碰撞机理除尘,具体过程为使含尘气体通过致密编制的纤维层或者粒状物料组成的填料层,气体中的颗粒会因为惯性碰撞而被拦截。上述装置有较高的颗粒脱除率,但长时间运行积灰会造成气路能耗陡增;且由于其需要定期清灰,因此此类除尘器无法连续稳定工作;同时,用于过滤的纤维无法在高温下正常发挥作用<sup>[6-7]</sup>。湿式除尘装置,如文丘里洗涤器是一种常见的利用液滴通过惯性碰撞机理去除颗粒物的设备,但其运行能耗高,小颗粒的收集效率不高<sup>[8-9]</sup>。湿式静电除尘技术利用电晕放电先使颗粒荷电,然后通过电场力作用将颗粒收集在极板上,最后

用水冲刷极板除去颗粒,虽工作效率高且克服了一般电除尘器二次扬尘的问题,但设备易腐蚀且固定投资和运行成本都较高,无法应对高粉尘浓度条件<sup>[10-11]</sup>。因此,开发一种能够兼顾压降与脱除率的惯性碰撞除尘设备具有显著工程价值。

撞击器<sup>[12-13]</sup>是一类利用惯性碰撞机理收集气溶胶颗粒进行检测的设备,如图1所示。主要包括常规冲击式采样器<sup>[14-15]</sup>、虚拟冲击式采样器<sup>[16]</sup>和旋风分离器<sup>[17]</sup>等,其中,常规冲击式采样器结构包括一个喷嘴以及一块挡板;虚拟冲击式采样器由喷嘴和收集探头组成;旋风分离器由进气口、出气口和内外筒体构成。虽然它们具体结构不尽相同,但核心机理均与惯性碰撞有关。

衡量撞击器性能的参数主要有两个<sup>[18]</sup>: $S_{tk}$ 数(斯托克斯数)和切割粒径 $d_{50}$ 。对于撞击器而言,只有临界 $S_{tk}$ 数以上的颗粒才能被撞击器捕获<sup>[19]</sup>,且 $S_{tk}$ 数越大,颗粒被挡板所捕获的几率越大。 $S_{tk}$ 数与撞击器尺寸以及颗粒相关性质有关<sup>[12]</sup>。切割粒径 $d_{50}$ 指脱除率50%

收稿日期:2023-11-15 修回日期:2024-01-21 网络出版日期:2024-06-05

作者简介:何 舸(1998—),男,硕士生.研究方向:多相流传质与分离. E-mail:1484813854@qq.com

\*通信作者:余 徽,教授, E-mail:yuhui@scu.edu.cn

对应的颗粒粒径,在一个结构确定的撞击器中,切割粒径只与流动状况有关,改变气流速度即可改变切割粒径。

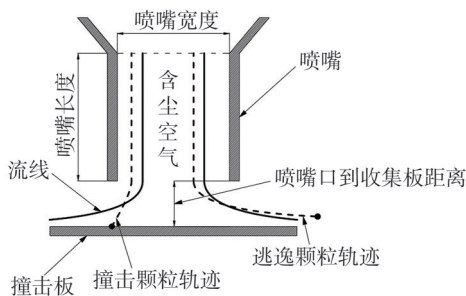


图1 撞击器示意图

Fig. 1 Impactor diagram

在颗粒粒径分布确定的情况下,可通过提高进气速度来增大 $S_{tk}$ 数、减小切割粒径从而提高颗粒被捕获的数量。但在如撞击器此类只有一层挡板的结构中,提高气速将使压降剧增。另外,某些气流通道为微孔的撞击器长期在高气溶胶浓度条件下收集颗粒,极易造成堵塞。

因此,将撞击器的结构运用到工业除尘中时,可

通过设置多层撞击流除尘柱的阵列以提升颗粒的总脱除率,同时能够兼顾气路能耗。也可通过逐渐收窄除尘柱间距使气体流速加快,逐渐降低颗粒切割粒径,达到进一步增强小颗粒脱除率的目的。本文分别研究了等间距排列与级联排列两种类型的“X”形槽湿式撞击流阵列(X-shaped wet impingement flow arrays, X-WIFA)除尘系统,研究其惯性除尘特性,并在结构尺寸与系统压降的限域条件下探讨其较优的工作条件。

### 1 X-WIFA 除尘系统

#### 1.1 除尘系统实验装置

X-WIFA 除尘系统运行流程如图2所示,主要由3个部分构成:气溶胶发生器、气溶胶检测仪和气溶胶脱除系统。气溶胶检测仪和气溶胶发生器分别为 Welas Digital 2000 (Palas GmbH) 和 RBG 2000 (Palas GmbH)。在本实验中,气溶胶发生器所用颗粒为 Pural NF (SASOL GmbH),其主要成分为  $Al_2O_3$ ,密度为  $2\ 837\ kg\cdot m^{-3}$ ,其颗粒粒径分布如图3所示。

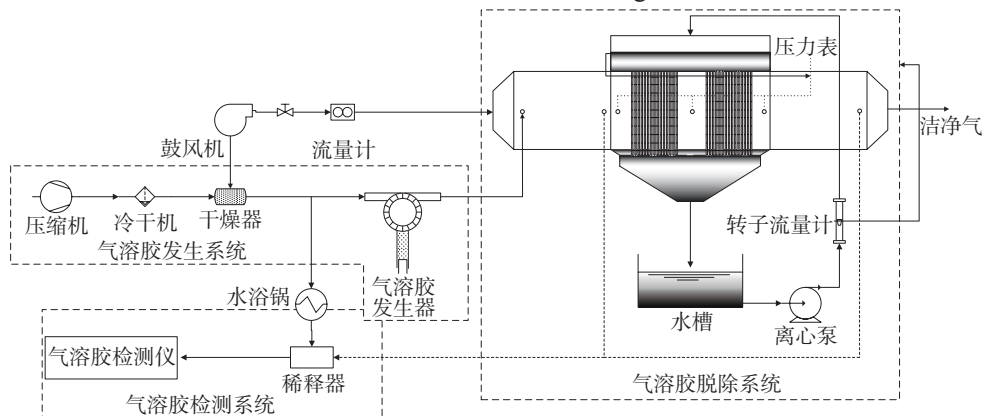


图2 X-WIFA 除尘系统运行流程图

Fig. 2 X-WIFA dust removal system operation flow chart

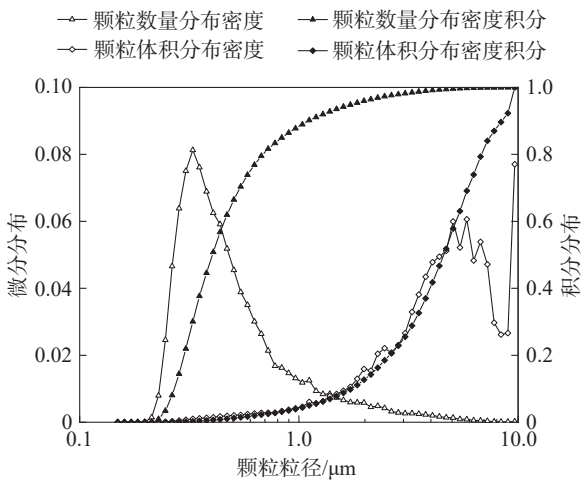


图3 Pural NF 颗粒粒径分布

Fig. 3 Pural NF particle size distribution

气溶胶脱除系统主要由主体除尘室和前后稳流段组成。除尘阵列置于主体除尘室中,根据其排列的周期性,定义分布板上相邻两个物理排为一个单元排,如图4所示。图4中, $W$ 为除尘柱间距。循环水间歇性从单元排顶部导入并在“X”形槽内流动用以降膜清灰。

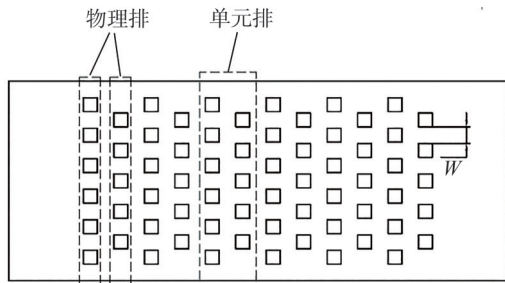


图4 单元排定义示意图

Fig. 4 Unit row definition diagram

## 1.2 除尘阵列

为尽可能减小切割粒径(即增大颗粒脱除率),需要提升风速,但将导致单层撞击器结构压降急剧增大,不符合工业上对于低阻力除尘器 500 Pa 的压降限制条件<sup>[20]</sup>。因此,为平衡压降与脱除率,可设置多层撞击结构,此结构由除尘柱组成,含尘气体通过除尘柱对颗粒进行层层脱除。为方便降膜清灰,将除尘柱设置为“X”形。

“X”形除尘柱截面形状和尺寸如图 5 所示,其结构保证了稳定降膜条件的实现<sup>[21]</sup>。后续撞击流除尘阵列的研究均以此除尘柱尺寸为基础。

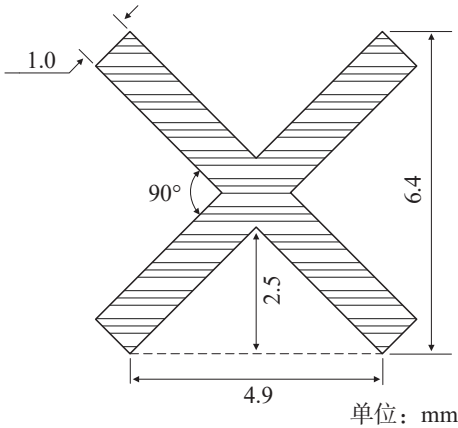


图 5 “X”形除尘柱截面图

Fig. 5 Cross-section of X-shaped dust removal column

上述多根除尘柱在除尘空间中均匀排布形成除尘阵列,以如图 4 所示的上下分布板进行固定并放置于主体除尘室中用于除尘实验。除尘柱之间的间距通过分布板上孔洞间的间距进行约束。

$S_{tk}$  数是衡量颗粒在除尘阵列中惯性大小的无量纲数,其值越大,颗粒越容易被除尘阵列所捕获。颗粒在除尘阵列中的  $S_{tk}$  数可由式(1)计算得到<sup>[22]</sup>。

$$S_{tk} = \frac{\rho_p u_0 C_c d_p^2 / 18 \mu_g}{W/2} \quad (1)$$

式中: $\rho_p$ 为颗粒密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $u_0$ 为阵列间的真实风速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $C_c$ 为肯宁汉修正系数;  $d_p$ 为颗粒粒径,  $\text{m}$ ;  $\mu_g$ 为气体黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

实验时测得的气速为表观气速,除尘柱阵列间的真实气速可由式(2)计算得到。

$$u_0 = \frac{W+L}{W} u \quad (2)$$

式中: $u$ 为管道中气体的表观气速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $L$ 为除尘柱宽度,  $\text{m}$ ,本文中为 0.006 4 m(图 5)。

## 2 等间距排布的 X-WIFA 除尘特性

### 2.1 等间距除尘阵列数值模拟寻优

为确定等间距排列的最佳方式,首先采用计算流体力学(CFD)方法对不同间距的撞击流除尘阵列的除尘过程进行模拟。

等间距错列排布的 X-WIFA 具有周期性,可视各单元排脱除率相同<sup>[23]</sup>。除尘阵列总脱除率可由单元排脱除率计算:

$$1 - \eta'_{\text{total}} = \prod_{i=1}^n (1 - \eta'_i) \quad (3)$$

式中, $\eta'_{\text{total}}$ 为除尘阵列总脱除率, $n$ 为单元排数量, $\eta'_i$ 为第  $i$  个单元排的脱除率。由于等间距排列的除尘阵列各单元排脱除率相同,取为  $\eta'$ ,可得:

$$1 - \eta'_{\text{total}} = (1 - \eta')^n \quad (4)$$

选取除尘阵列前 1.5 个单元排的中间对称区域作为计算域。液体在降膜槽内稳定流动时,忽略液膜波动,同时考虑到计算成本和计算精度,将 3 维模型进一步简化为 2 维模型,得到简化的 X-WIFA 除尘系统计算几何模型,如图 6 所示。

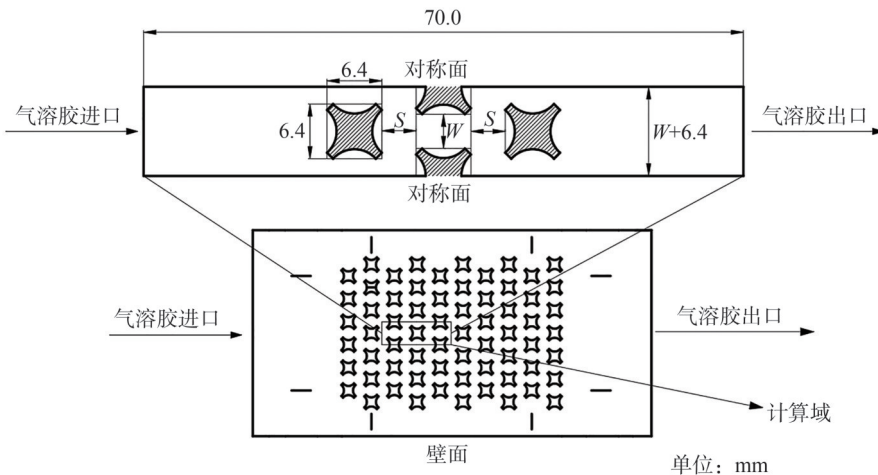


图 6 X-WIFA 计算几何模型

Fig. 6 X-WIFA computational geometry model

如图6所示,X-WIFA除尘阵列计算区域总长度为70 mm,除尘阵列的前后各设置有稳流段;降膜槽边长为8 mm,壁厚为1 mm,位于6.4 mm×6.4 mm的方形区域中。将降膜槽中的液膜简化为与壁面相切的圆弧面,如图6中弧面所示。以气溶胶流动方向为主流方向,降膜槽横向间距 $W$ 与轴向间距 $S$ 相同,对比计算 $W$ 和 $S$ 均为2、3、4、5、6、7 mm的分布条件。计算时假设:

1) 第1个物理排仅作为导流排,其降膜槽壁面为颗粒反射面;

2) 第2、3个物理排的液膜以均一速度下降且无波动,其表面为颗粒捕获面;

利用ICEM CFD划分网格后导入到流场模拟软件FLUENT中进行数值计算,运用时均的RNG  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[24-25]</sup>求解气相 Navier-Stokes 方程,用离散相模型<sup>[26]</sup>(Discrete Phase Model, DPM)追踪颗粒轨迹,并使用Stokes-Cunningham公式<sup>[27]</sup>对气固曳力系数进行修正,不考虑颗粒对流体相的反馈。

边界条件的设置中,气溶胶进口为速度进口,出口设置为压力出口,“X”形槽表面液膜被简化为刚性无滑移壁面(即捕获面),计算域两侧设置为对称面。颗粒物只要接触到捕获面即被捕获,不考虑颗粒的反弹。具体边界条件设置如表1所示。

表1 边界条件及DPM类型设置

位置	边界名称	边界条件	DPM类型
气溶胶进口	Inlet	速度进口, 1.5 m·s <sup>-1</sup>	逃逸
气溶胶出口	Outlet	压力出口, 101 325 Pa	逃逸
液膜面	Liquid wall 001 <sup>b</sup>	无滑移壁面	反弹
液膜面	Liquid wall 002 <sup>b</sup>	无滑移壁面	捕获
液膜面	Liquid wall 003 <sup>b</sup>	无滑移壁面	捕获

注:<sup>b</sup>中数字代表沿着系统主体气流方向的物理排编号。

引入过滤质量因子<sup>[28]</sup>( $Q$ 因子)对X-WIFA的除尘性能进行评价, $Q$ 因子定义为:

$$Q_{dp} = \frac{-\ln(1-\eta'_{dp})}{\Delta p'} \quad (5)$$

式中: $\eta'_{dp}$ 为颗粒粒径 $d_p$ 的单元排脱除率; $\Delta p'$ 为系统单元排气路压降,Pa。

模拟计算得到等间距X-WIFA中,当入口气速为典型工业除尘操作气速1.5 m·s<sup>-1</sup>时,除尘阵列对颗粒的单元排脱除率和压降如图7所示。

从图7可以看出,单元排压降以及颗粒脱除率均随除尘柱间距的增大而减小,这是由于除尘柱间距 $W$ 越大,除尘阵列越稀疏,因而压降越小;再根据式(1), $W$ 越大, $S_{rk}$ 数越小,因此单元排脱除率越小。压降与单元排脱除率的上述矛盾关系可通过 $Q$ 因子进行综合评价。

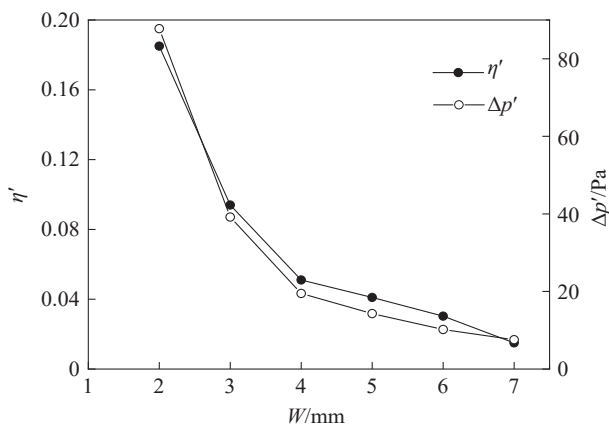


图7 单元排脱除率及压降计算值随“X”形降膜槽间距的变化

Fig. 7 Calculated values of the unit row removal efficiency and pressure drop vary with the spacing of X-shaped falling film slots

图8给出了X-WIFA除尘系统中降膜槽间距对单元排 $Q$ 因子的影响。

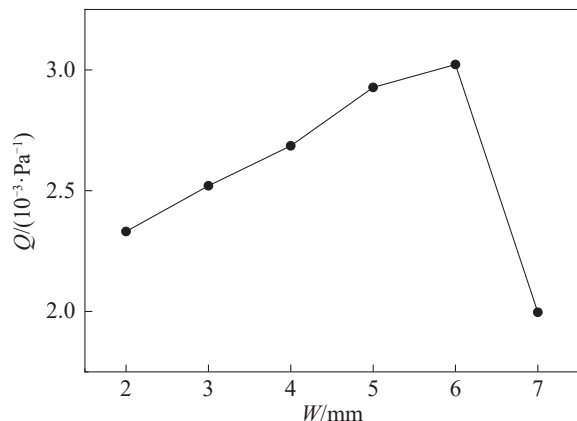


图8 单元排 $Q$ 因子随“X”形降膜槽间距的变化

Fig. 8 Variation of unit row  $Q$  factor with the spacing of X-shaped falling film slots

如图8所示,模拟条件下 $Q$ 因子随阵列间距 $W$ 增大呈现先增加后减小的趋势,在间距为6 mm时 $Q$ 因子取最大值,为 $3.02 \times 10^{-3} Pa^{-1}$ 。因此除尘实验等间距X-WIFA除尘系统采用排列间距为6 mm的除尘阵列,共计12排。需要指出的是,模拟时为快速比选除尘阵列布置条件,设置了较多简化条件,实际颗粒脱除率仍需实验予以确认。

为验证模拟结果,选取间距分别为2和6 mm的除尘阵列单元排压降模拟计算结果和实验数据进行对比,结果如图9所示。

从图9可以看出,单元排的压降模拟值与实验值吻合较好,说明模拟所采用的模型以及相关设置所得出的结果能够比较准确地反映出实验现象。因此,将模拟结果通过 $Q$ 因子进行综合评价,得到间距为6 mm的排布方式较优,能够用于进一步的实验。

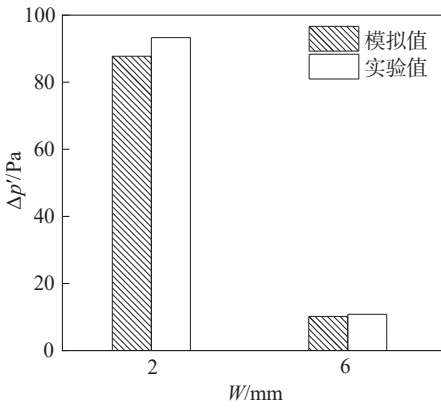


图9 模拟结果与实验结果对比

Fig. 9 Comparison of experiment and simulation results

2.2 等间距X-WIFA除尘实验研究

以雷诺数来更准确描述除尘柱间气体流动状态<sup>[12]</sup>, 其计算公式如下:

$$Re = \frac{2\rho_g u_0 W}{\mu_g} \quad (6)$$

式中,  $\rho_g$  为气体密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

以 6 mm 等间距除尘阵列进行除尘实验, 表观气速  $u$  取值为 1.3、1.4、1.5、1.6 和 1.7  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结合式(2)、(6), 得到不同雷诺数下脱除率随粒径变化如图 10 所示。从图 10 可以看出, 单元排脱除率随粒径增大而增大。

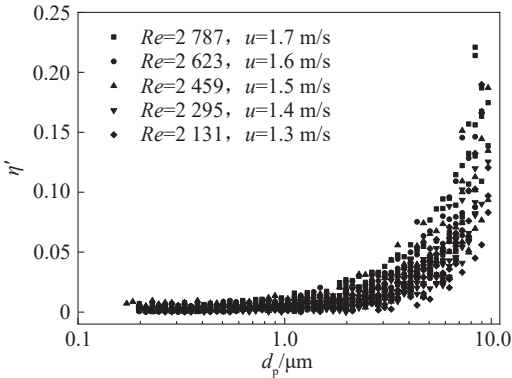


图 10 单元排脱除率随粒径变化散点图

Fig. 10 Scatter plot of unit removal rate with particle size

$S_{tk}$  数为研究惯性碰撞机理时常用特征参数, 将图 10 中颗粒粒径转换为  $S_{tk}$  数, 得到脱除率散点图。考虑到脱除率拟合公式的简洁性以及适用范围的广泛性, 采用 Regtuit 等<sup>[29]</sup> 推荐的惯性除尘经验公式对散点图进行拟合, 得到的脱除率实验数据及拟合曲线如图 11 所示。在  $S_{tk}=5.2\times 10^{-4}\sim 1.0$  范围的脱除率( $\eta'$ )经验公式如下:

$$\eta' = \frac{3S_{tk}^{0.9}}{3S_{tk}^{0.9} + 20} \quad (7)$$

为验证所得脱除率经验公式的适用性, 另选择一组不同的气流雷诺数进行除尘实验, 取  $Re$  分别为 2 049、2 213、2 377、2 541、2 705、2 869, 得到的脱除率散点如图 12 所示。

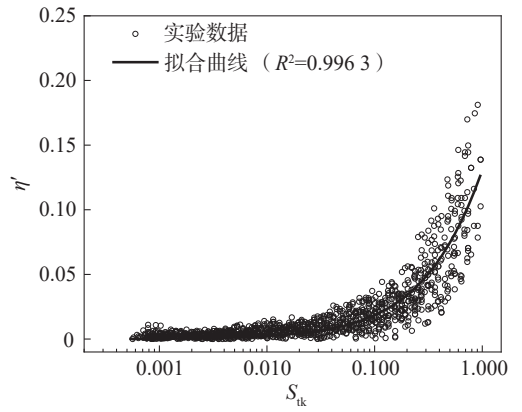


图 11 单元排脱除率实验数据散点及拟合曲线

Fig. 11 Experiment data scatter and fitting curve of unit row removal rate

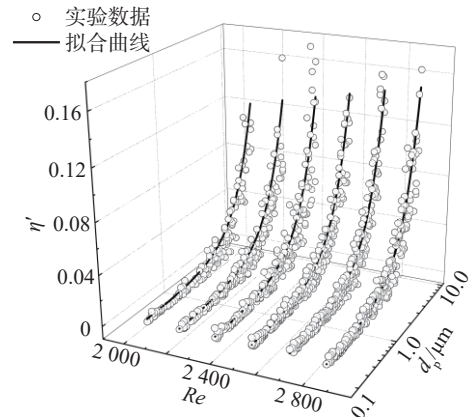


图 12 系统单元排脱除率经验公式验证

Fig. 12 Empirical formula verification of system unit ejection efficiency

如图 12 所示, 散点为实验数据点, 曲线为由式(7)所得的脱除率计算值, 与实验值吻合度良好, 表明本公式可以较好地预测单元排脱除率。

实验所用 12 个单元排除尘阵列的  $S_{tk50}$  (脱除率 50% 对应的  $S_{tk}$  数) 可由式(4)和(7)联立计算得出, 不同真实气速下的切割粒径  $d_{50}$  可由  $S_{tk50}$  根据式(1)计算得出, 结果如图 13 所示。

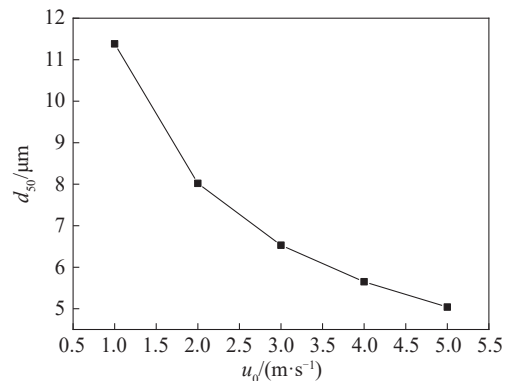


图 13 切割粒径随真实气速变化图(12 个单元排)

Fig. 13 Diagram of cutting particle size variation with true gas velocity(12 unit rows)

图13进一步定量说明,可以通过逐渐收窄流道的方式提高气速,减小除尘阵列的切割粒径从而增大总脱除率。工业上旋风分离器能够有效脱除粒径 $5\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒<sup>[30]</sup>,而本除尘阵列12个单元排在气速 $5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时切割粒径可达 $5\ \mu\text{m}$ ,相应的压降仅为 $315\ \text{Pa}$ 。

类似地,联立式(1)、(4)、(7)可以得到切割粒径随单元排数的变化曲线,如图14所示。图14中真实阵列间气速为 $3.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,对应表观气速为 $1.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

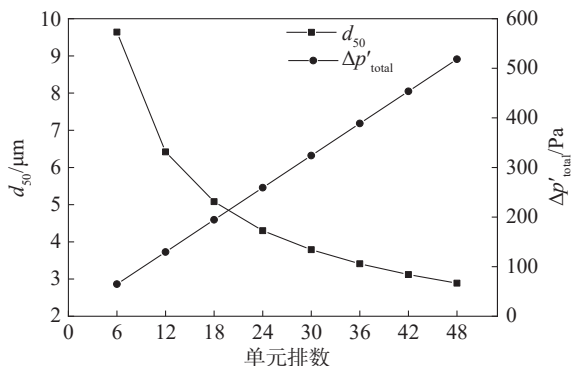


图14 切割粒径和除尘阵列总压降 $\Delta p'_{\text{total}}$ 随单元排数变化曲线

Fig. 14 Cutting particle sizes and the total pressure drop of the dust removal array vary with the number of unit rows

从图14可以看出,切割粒径随着单元排数增加而逐渐减小,在总压降 $\Delta p'_{\text{total}}$ 为 $500\ \text{Pa}$ (工业低阻力除尘器压降限值条件)的限制条件下, $6\ \text{mm}$ 等间距的除尘阵列约可在48个单元排时取得 $2.89\ \mu\text{m}$ 的切割粒径。若采用级联式排布方法,将会在更少的单元排下取得相同的脱除效果,从而减少除尘系统占用的空间。

### 3 级联式排布的X-WIFA除尘特性

#### 3.1 级联式除尘阵列排布方式寻优

根据装置脱除率和压降限制条件所确定的目标任务,等间距是除尘阵列常用的排列方式, $S_{ik}$ 数的提升则可通过气速变化予以调节。考虑到实际工业装置表观气速相对固定,综合考虑脱除率、压降、装置空间限制性要求,级联式排布则是一个可选的设计方案。通过前疏后密的排布,其不但能实现大小颗粒的分级脱除,同时能有效控制系统压降。

由前述CFD模拟,得到了 $2\sim 7\ \text{mm}$ 单元排间距下,单元排压降与表观气速 $u$ 的函数关系式。其中,单元排间距为 $6\ \text{mm}$ 时的关系式如式(8)所示,单元排压降随表观气速变化拟合曲线如图15所示。

$$\Delta p'_6 = -0.19u + 4.52u^2 \quad (8)$$

由式(8)可以得到粒径 $1\ \mu\text{m}$ 、特征速度 $1.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时每个间距下单元排压降的参考图像,如图16所示。

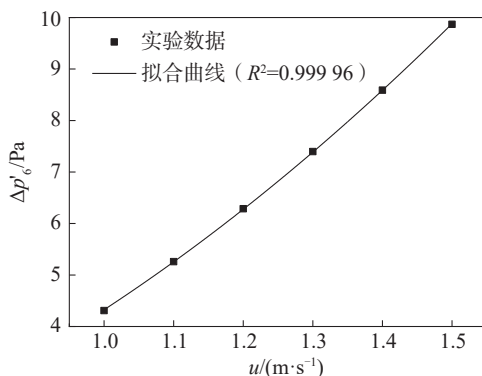


图15  $6\ \text{mm}$ 间距下单元排压降随表观气速变化拟合曲线  
Fig. 15 Variation of unit exhaust pressure drop with apparent gas velocity at  $6\ \text{mm}$  spacing scatter and fitting curves

再考虑脱除率,联立式(1)、(2)与(7),可以得到粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 、表观气速为 $1.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不同间距下单元排分级脱除率的参考图像。最终将单元排脱除率及压降随单元排间距变化趋势绘制成图,如图16所示。

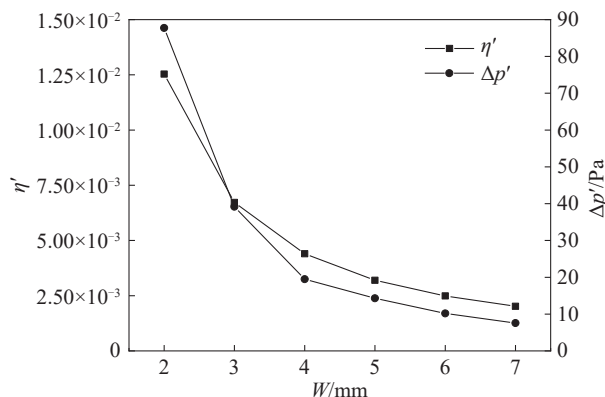


图16 单元排脱除率及压降随单元排间距变化趋势  
Fig. 16 Trend diagram of unit row removal efficiency and pressure drop with unit row spacing

由图16可得,单元排脱除率和压降均随单元排间距的增大而减小。在保证总脱除率不变的情况下,除尘系统占用空间却随着单元排间距的增大而增大。窄间距的除尘阵列单元虽然有着较高的脱除率且占用空间更小,但其压降也相对较高;而宽间距的除尘阵列单元虽然压降更低,但为了达到相同的脱除率目标需采用多排串联,需占用更多的空间。因此,在同时考虑压降、脱除率、占用空间三者的情况下,级联式排布的除尘阵列显然更具优势。

结合单元排脱除率、单元排压降、单元排长度,在满足 $\Delta p'_{\text{total}} < 500\ \text{Pa}$ ,实验室装置限域总长 $L < 300\ \text{mm}$ 的排布方式的条件下,使用穷举法对排布方式进行寻优。选择脱除率在所设定条件下最优(所选粒径与表观气速下,总脱除率最大)的排布方式。所得最优排布方式为1个 $W=5\ \text{mm}$ 的单元排、4个 $W=4\ \text{mm}$ 的单元排、10个 $W=3\ \text{mm}$ 的单元排,采用先疏后密的排布方

式,且级联式除尘阵列理论总压降为 497.311 Pa,总长度为 294 mm。

### 3.2 级联式 X-WIFA 除尘实验研究

将此级联式除尘阵列用于除尘实验,实验表观气速为  $1.0\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最终得到的除尘率结果如图 17 所示。

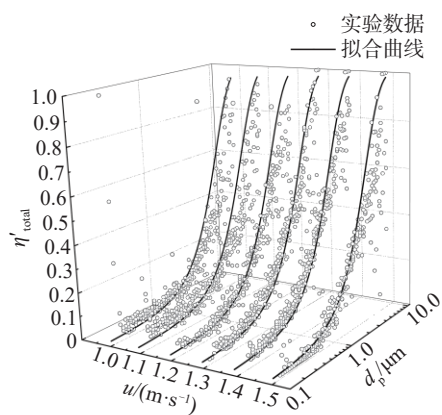


图 17 级联式除尘阵列脱除率结果

Fig. 17 Removal rate results of cascaded dust removal array

图 17 中曲线为级联式阵列除尘率计算值,散点为脱除率实验数据。其中级联式阵列中每一单元排脱除率由式(7)计算;总脱除率可由式(3)计算, $n$ 取为 15。

从图 17 中可以看出,拟合曲线与散点的变化趋势吻合较好,表明经验公式(7)在应用于级联式阵列除尘率的计算时仍表现出较高的预测精度。

在相同单元排数(15个)且表观气速  $u_g=1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的实验条件下,以粒径  $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒为例,等间距和级联排布的 X-WIFA 阵列脱除率  $\eta'_{\text{total}}$  如图 18 所示。

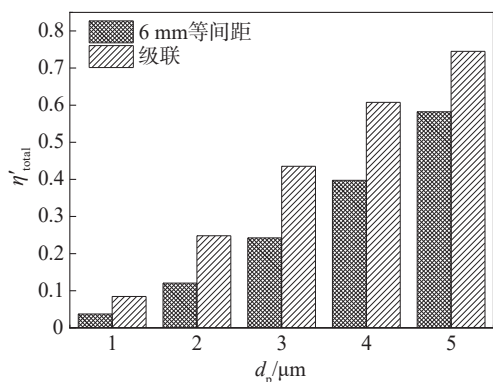


图 18 等间距与级联排布除尘阵列脱除率对比

Fig. 18 Comparison of removal rate between equal-spacing and cascade array

从图 18 可以看出,级联式除尘阵列的颗粒脱除率要高于 6 mm 等间距的除尘阵列,高出 126%。6 mm 等间距排布的除尘阵列实验压降为 148 Pa;级联排布的除尘阵列实验压降为 540 Pa;相较于等间距的排布方式,级联式压降增加了 265%。

## 4 结 论

1) 本文提出了一种“X”形槽湿式撞击流阵列用于强化惯性碰撞除尘。通过 CFD 数值模拟寻优,引入  $Q$  因子对颗粒脱除率和气路压降进行综合评价,结果表明,工业除尘常用气速  $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  条件下 6 mm 等间距的排列方式为较优排布方式。

2) 除尘实验 ( $Re=2\ 131\sim 2\ 787$ ) 得出 6 mm 等间距除尘阵列的单元排颗粒脱除率随  $S_{tk}$  数的变化趋势,实验数据拟合得到在  $S_{tk}=5.2\times 10^{-4}\sim 1.0$  范围内适用本“X”形槽湿式撞击流阵列的脱除率计算经验公式。

3) 设计出了级联式撞击流排布方式的除尘阵列。级联式撞击流除尘阵列的实验表明,该排布方式与等间距撞击流除尘阵列相比,颗粒脱除率有较大提升,15 个单元排的级联式除尘阵列相较于同单元排数的 6 mm 等间距排布的除尘阵列,在气速为  $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时颗粒脱除率提升了 126%,且脱除率与  $S_{tk}$  数的关联关系与前述经验公式预测值一致,验证了公式的适用性。相比于均匀排布,级联式撞击流除尘单元具有更高的脱除率且除尘设备占用空间更小。

### 参考文献:

- [1] Wang Jikang, Zhang Hengde, Gui Hailin, et al. Relationship between atmospheric visibility and  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations and distributions[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 2985–2993. [王继康,张恒德,桂海林,等.能见度与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度关系及其分布特征[J].环境科学,2019,40(7):2985–2993.]
- [2] Han Rui, Wang Shuxiao, Shen Wenhai, et al. Spatial and temporal variation of haze in China from 1961 to 2012[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 46: 134–146.
- [3] Nie Dongyang, Chen Mindong, Wu Yun, et al. Characterization of fine particulate matter and associated health burden in Nanjing[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(4): 602.
- [4] Combes A, Franchineau G. Fine particle environmental pollution and cardiovascular diseases[J]. Metabolism, 2019, 100S: 153944.
- [5] Khan J Z, Sun Long, Tian Yingze, et al. Chemical characterization and source apportionment of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  in Tianjin, China: Impacts of biomass burning and primary biogenic sources[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 99: 196–209.
- [6] Prabhansu, Karmakar M K, Chandra P, et al. A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(2): 689–702.
- [7] Yang Chuanfang. Aerosol filtration application using fibrous media—An industrial perspective[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(1): 1–9.
- [8] Yang Jie, Hu Shengyong, Liu Pai, et al. Research status and development trend of wet dust collector for mine[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(8): 186–194 [杨洁,胡胜勇,

- 刘湃,等. 矿用湿式除尘器研发现状与发展趋势[J]. 煤矿安全,2023,54(8):186–194.]
- [9] Mi T, Yu X M. Dust removal and desulphurization in a novel venturi scrubber[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2012, 62: 159–167.
- [10] He Jianhua. Development and application of wet electrostatic dust removal technology[J]. Low Carbon World, 2020, 10(7): 30. [贺建华. 湿式静电除尘技术的发展及应用探讨[J]. 低碳世界, 2020, 10(7): 30.]
- [11] Wang Bo. Analysis on primary problems in operation of wet electrostatic precipitator[J]. China Environmental Protection Industry, 2016(11): 44–50. [汪波. 湿式电除尘器运行中常见问题浅析[J]. 中国环保产业, 2016(11): 44–50.]
- [12] Marple V A, Willeke K. Impactor design[J]. Atmospheric Environment, 1976, 10(10): 891–896.
- [13] May K R. The cascade impactor: An instrument for sampling coarse aerosols[J]. Journal of Scientific Instruments, 1945, 22(10): 187–195.
- [14] Le T C, Tsai C J. Inertial impaction technique for the classification of particulate matters and nanoparticles: A review [J]. KONA Powder and Particle Journal, 2021, 38: 42–63.
- [15] Zhang Xiaowei, Zhang Wei, Yi Mingqiang, et al. High-performance inertial impaction filters for particulate matter removal[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4757.
- [16] Eilts S M, Tamadate T, Relling M E, et al. Virtual impaction in compressible flows with pressure recovery[J]. Journal of Aerosol Science, 2023, 167: 106076.
- [17] Misiulia D, Lidén G, Antonyuk S. Performance characteristics of a small scale cyclone separator operated in different flow regimes[J]. Journal of Aerosol Science, 2022, 163: 105980.
- [18] Baron Paul A, Willeke Klaus. Aerosol measurement: Principles, techniques, and applications[M]. Second Edition. New York: Wiley–Interscience publication, 2001.
- [19] Marple V A, Liu B Y H. Characteristics of laminar jet impactors[J]. Environmental Science & Technology, 1974, 8(7): 648–654.
- [20] 张殿印, 申丽. 工业除尘设备设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [21] 余徽, 胡显峰, 刘泽坤, 等. 一种用于交叉流除尘的级联式降膜柱及装置: CN113797690B[P]. 2021–12–17.
- [22] García–Ruiz E, Romay F J, García J A, et al. Effect of nozzle spacing in the formation of primary and secondary deposits in multi-nozzle inertial impactors part I: Experimental study[J]. Journal of Aerosol Science, 2019, 136: 61–81.
- [23] Liu Lingling, Wei Wenyun, Xu Ting, et al. Separation efficiency analysis and numerical simulation of gas–liquid cross-flow array system[J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3663–3671. [刘玲玲, 魏文云, 徐挺, 等. 气液交叉流系统除尘效率分析及其数值模拟[J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3663–3671.]
- [24] Zhou Ye. Renormalization group theory for fluid and plasma turbulence[J]. Physics Reports, 2010, 488(1): 1–49.
- [25] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3–51.
- [26] Bian Wei. Multi-scale simulation of gas–solid two-phase flow with coarse particles[D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2020. [边伟. 粗糙颗粒气固两相流多尺度模拟[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2020.]
- [27] Yu Tingfang, Chen Runguo, Xiong Guilong. Analysis of drag force model of gas–solid phase flow in impinging stream[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(15): 353–359. [余廷芳, 陈润果, 熊桂龙. 撞击流气固两相流动中曳力模型的分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(15): 353–359.]
- [28] Hinds W C. Aerosol Technology Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles[M]. Second Edition. New York: Wiley–Interscience publication, 1998.
- [29] Regtuit H E, de Ruiter C J, Vrins E L M, et al. The tunnel impactor. A multiple inertial impactor for coarse aerosol[J]. Journal of Aerosol Science, 1990, 21(7): 919–933.
- [30] Ning Zhuangzhuang, Wang Xiaofeng, Hou Guoming, et al. Effect of connection pipe diameter on cyclone separator performance[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(10): 1599–1606. [宁壮壮, 王晓峰, 侯国明, 等. 连接管道直径等参数对旋风分离器性能的影响[J]. 机电工程, 2023, 40(10): 1599–1606.]

## Strengthening of Inertial Dust Removal in Impingement Flow Dust Removal Array

HE Ge, HU Xianfeng, LIU Zekun, CHEN Kehong, WEI Wenyun, YU Hui\*

(School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Aerosol particles released into the atmosphere in industrial production cause significant harm to the environment and human health, and it is necessary to use a series of dust removal equipment at the source of aerosol emissions to control them effectively. The dust removal mechanism of inertial collision is one of the main mechanisms used in dust removal equipment commonly applied in modern industrial production. When the particle size distribution characteristics of aerosol particles to be removed are determined, this mechanism can be directionally strengthened by continuously increasing the gas velocity to improve the removal rate of both large and small particles. However, this approach results in considerable resistance loss (gas path pressure drop), and the higher the gas velocity, the greater the resistance loss becomes. After fully understanding the structural characteristics of the impingement flow dust collector, the research group proposes the arrangement of a multi-layer impingement flow dust collector array to balance the contradictory relationship between particle removal rate and pressure drop. The impingement flow dust removal array consists of dust removal columns, specifically composed of several dust removal columns uniformly arranged in three-dimensional space based on certain rules, with spacing between columns to allow the passage of dust-bearing gas. The computational fluid dynamics (CFD) method is utilized to simulate the particle removal process of the array to obtain a relatively better arrangement of the equidistant impingement flow dust collection array for subsequent experiments. The aim is to obtain the particle removal rate and gas path pressure drop

under different arrangement spacing through simulation. The smaller the dust column spacing, the higher the particle removal rate, but the gas path pressure drop also increases. Therefore, to balance this contradiction, a more comprehensive evaluation of removal rate and gas path pressure drop under different spacing is conducted by introducing a filter quality factor ( $Q$  factor) to determine a better arrangement of the impingement flow dust collection array. After evaluating the final numerical simulation results using the  $Q$  factor, the arrangement mode with equal spacing of 6 mm is optimal under a gas velocity of 1.5 m/s, commonly used in industrial dust removal. Based on the numerical simulation results, the research group designs and produces a physical model of a 6 mm equidistant dust removal array for experiments. Based on the above steps, further dust removal experiments are conducted at  $Re = 2\ 131 \sim 2\ 787$  to obtain the trend of unit discharge particle removal rate of the 6 mm equidistant array with the  $S_{ik}$  number. Finally, the empirical formula between the removal rate of unit discharge particles and the  $S_{ik}$  number in the range of  $S_{ik} = 5.2 \times 10^{-4} \sim 1.0$  is obtained using a numerical fitting method, and the applicability of this empirical formula is preliminarily verified by another set of removal experiments under different  $Re$  values. At present, in the actual process of industrial dust removal, not only the removal rate and energy consumption of the gas path are considered, but also the space occupied by the equipment is a critical factor. Therefore, to adapt to the wide particle size range of dust-containing gas while considering removal rate, energy consumption, and occupied space, the research group further develops a dust collection array with cascaded impingement flow arrangement based on the previous simulation and experimental results. The main feature of this dust removal array is the uneven spacing between unit rows formed by the dust removal columns. Specifically, along the direction of the dust-laden airflow, the spacing between the unit rows gradually decreases, which narrows the flow channel, increases gas velocity between arrays, and strengthens the inertial collision mechanism, improving the overall removal rate of graded particle sizes. After preliminary optimization and design, the cascaded impingement flow dust collection array is tested in a dust collection experiment. Experimental results showed that, compared to the impingement flow dust collection array with equal spacing of 6 mm, the particle removal rate of the cascaded array is significantly improved. Taking 1  $\mu\text{m}$  particles at a gas velocity of 1.5 m/s as an example, the removal rate of the cascaded impingement flow dust collection array with 15 unit rows increases by 126% compared to the 6 mm equispaced array with the same number of rows, and the correlation between removal rate and  $S_{ik}$  number aligns with the predicted value of the previously mentioned empirical formula. The applicability of the empirical formula is further confirmed. Accordingly, the research group successively designs the equidistant and cascaded impingement flow dust removal arrays and derives the empirical formula of the removal rate through experiments. This work provides guidance for further development of dust removal arrays.

**Key words:** impactor; inertial collision mechanism; dust removal array; aerosol; process intensification

(编辑 陈 雪)

引用格式: He Ge, Hu Xianfeng, Liu Zekun, et al. Strengthening of inertial dust removal mechanism of impingement flow dust removal array[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(4): 350–358. [何舸, 胡显峰, 刘泽坤, 等. 撞击流除尘阵列惯性除尘机理强化[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(4): 350–358.]