



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202104050

中图分类号 X513

文献标识码 A

崔晓慧, 侯雪超, 张文婷, 等. 新型错位板对静电除尘器流场影响的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2022, 16(1): 200-207. [CUI Xiaohui, HOU Xuechao, ZHANG Wenting, et al. Numerical simulation of the influence of a new type of dislocation plate on the flow field of the electrostatic precipitator[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(1): 200-207.]

## 新型错位板对静电除尘器流场影响的数值模拟

崔晓慧<sup>1</sup>, 侯雪超<sup>1</sup>, 张文婷<sup>1</sup>, 陈旭东<sup>1</sup>, 张晓军<sup>1</sup>, 李庆<sup>1,2,✉</sup>

1. 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002; 2. 河北大学静电技术研究所, 保定 071002

**摘要** 为降低现有除尘器的改造成本, 提高微细粉尘的收集效率, 在现有除尘器的基础上, 对阳极板排布方式进行调整, 设计错位排布方式, 最大化地利用原有除尘器的资源, 以最小的改造成本, 达到较满意的除尘效果。利用目前应用广泛的 FLUENT 仿真软件进行数值模拟, 观察分析了其电势分布和气流分布。数值模拟结果表明: 当主流风速小于  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 离子风对流场的影响较大; 当主流风速达到  $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 主流风成为影响空间流场分布的主要因素, 离子风的影响被削弱, 但此时的离子风团仍会促进气流流入错位板背部达到收集目的。错位板间隙设计可以削弱离子风对阳极板的冲刷作用, 证明了错位板排布有利于改善离子风对粉尘收集的负面影响, 有效提高对微细粉尘的收集效率。数值模拟的结果对静电除尘器的设计与改进有一定的参考意义。

**关键词** 离子风; 流场; 一次气流; 错位板间隙; 微细粉尘

静电除尘器 (ESP) 是一种能够有效去除颗粒物的装置, 是集除尘效率高、运行阻力小和较强的适用性等多种优点于一身的处理装置, 并在发电、水泥、冶金等行业生产过程中的颗粒物处理阶段得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>, 其总体除尘效率可达 99%<sup>[6-8]</sup>。但是, 传统静电除尘器对荷电量低、受离子风流场影响强烈的微细颗粒物的收集效果远不如大粒径颗粒物, 而且尺寸较小的颗粒更倾向于与烟气一起运动而被排放到空气中, 这些细微颗粒物极可能被人体吸入肺部而引发各种呼吸道疾病<sup>[9-11]</sup>。

目前, 已有大量研究以对传统静电除尘器的电极设计改造为出发点<sup>[12-14]</sup>, 设计了网电极板、孔电极板、C 型板、S 型板、H 型板等异型收尘极板以及芒刺线、星型线、十字针刺线等新型高压电极<sup>[15-19]</sup>, 使微细颗粒物去除效率有所提高, 排放浓度得以降低。但是, 许多成果<sup>[20-27]</sup>均须重新设计收尘极板或者高压电极, 存在改造工程量, 投入成本高等不足之处。

针对上述问题, 本研究在传统线-板除尘装置的基础上, 结合课题组所研制的新型除尘结构 (发明专利: ZL201510238547.X) 并利用本课题组发明的流体模拟手段 (发明专利: ZL201310263782.3), 重新设计极板排布方式——错位板排布, 以求用最小的改造成本, 获得更大的应用价值, 达到令人满意的除尘效果; 利用 FLUENT 软件探究了错位板结构下, 电晕放电空间产生的离子风流场对微细颗粒物在放电空间运动的影响, 从而更好地体现错位板的改造优势; 主要针对低浓度、超微

收稿日期: 2021-04-09; 录用日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51777051); 河北省自然科学基金资助项目 (E2016201184, A2016201025)

第一作者: 崔晓慧 (1997—), 女, 硕士研究生, [cuixiaohuihui@qq.com](mailto:cuixiaohuihui@qq.com); ✉通信作者: 李庆 (1968—), 男, 博士, 研究员, [liqing@hbu.cn](mailto:liqing@hbu.cn)

细粉尘在电流体场中的运动规律，通过对空间电场分布、流速以及主流风速与离子风流场之间的相互作用的分析，证明了极板错位排布的可行性，为除尘器的进一步改造提供参考。

## 1 电除尘器流场的数值计算

### 1.1 几何模型的建立

现有的大型静电除尘器 90% 以上为线-板结构，其结构形式见图 1(a)。本文在此结构基础上，对收尘极板进行错位排布，结构见图 1(b)。

如图 1(b) 所示，进风口与出风口相对，除尘器外壳由直筒段体、壳体侧壁和锥口段体构成。除尘器内部，除尘部分由电晕线和 H 型收尘极板组成，均风部分由临近进风口的锥口段体中设的多层多孔均风板组成。

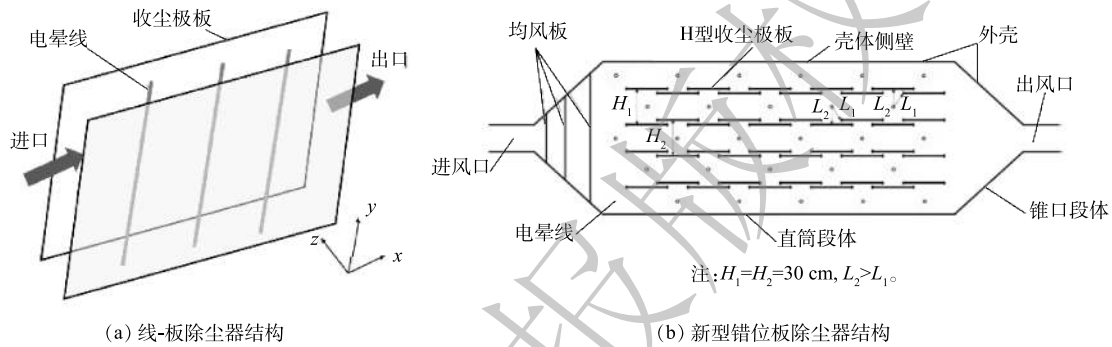


图 1 除尘器电极结构

Fig. 1 Electrode structure of the dust collector

收尘极板成行设置在除尘器中，各行收尘极板的板面相互平行，并与进、出风口之间的中心线相平行。在除尘器中，每行收尘极板交错排布，在两列极板中同列相邻的 2 个收尘极板之间保留有间距小于单个收尘极板幅宽的极板空当，且每列极板上的极板空当被同行另一列极板中紧邻该极板空当的一个收尘极板所遮挡，电晕线直立成行，分布在极板空当的中垂线上。根据所设计除尘器结构特征，选取部分区域作为研究对象，按照 1:1 的比例建立如图 2 所示的计算域模型，并进行二维数值模拟。

相关参数如下：极线直径 1.2 mm，极板长 46 cm，H 型凸起高 1 cm，极板纵向间隔 5 cm，极板横向间隔 23 cm，电极距 15 cm，流场通道长 184 cm。

放电过程中，在放电结构一定的情况下，放电电压的高低决定了电晕强度。图 3 为负高压 20、30、40 和 50 kV 时放电电极电晕区发光强度图，因此，在研究电流体时，首先需要确定离子风射流源的尺度。

通过 MATLAB 模拟线板电晕放电，图 4 为外加电压 40 kV 时的电场强度变化情况。可以看出，在离开电晕线很短的距离内，场强出现陡降，约下降一个数量级(由  $10^7$  量级变为  $10^6$  量级)。

陡降区的变化距离为 0~5 mm，因此，将电晕线外缘至外边缘 5 mm 的范围内定义为射流源范围，即离电晕线中心距离为 0.75~5.75 mm，确定半径 2.1 mm 区域为 40 kV 时电晕放电边缘，也就是离子风射流源的边缘。

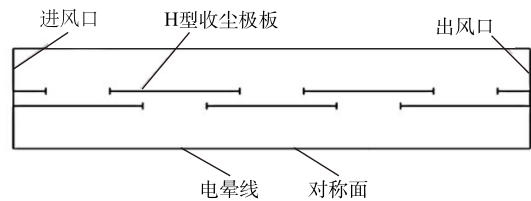


图 2 计算域模型

Fig. 2 Calculation domain model

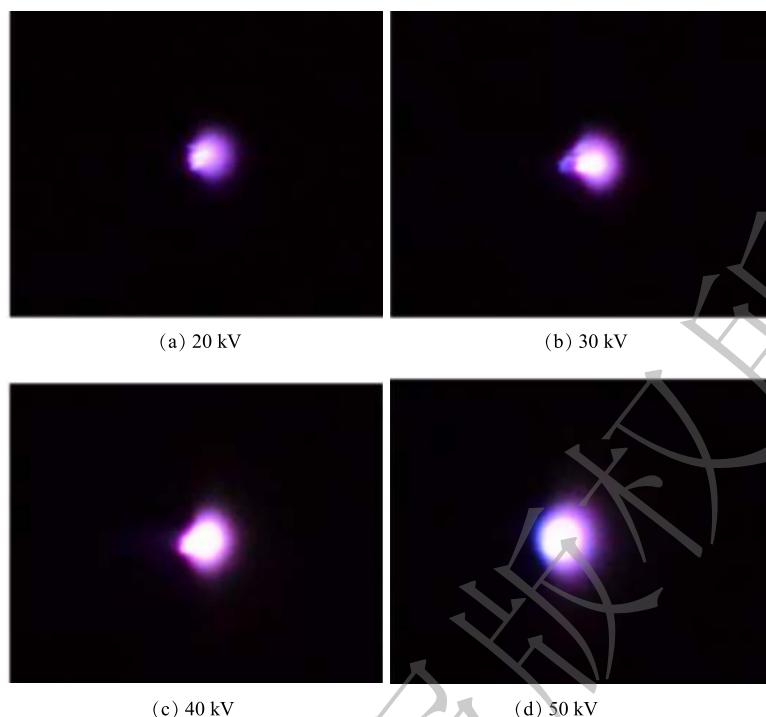


图3 20、30、40、50 kV时的电晕放电发光强度

Fig. 3 Corona discharge luminous intensity at 20, 30, 40, 50 kV

## 1.2 边界条件的设置

本课题组的前期研究结果<sup>[28-29]</sup>表明,在高压除尘电场中,较大粒径的粉尘颗粒受到的电场力和离子风力几乎处于同一数量级;但较小粒径的粉尘颗粒受到的离子风力远远大于其所受电场力,大致为所受电场力的10~100倍,即微细颗粒物在除尘器中的运动状态受离子风影响较电场力大得多。而本模拟也主要是针对末级电场中粒径微小、形状不规则、荷电量低、受电场力极小、受离子风力大的微细颗粒物,故在本研究中不考虑微细颗粒物所受到的电场力作用,仅考虑引风流与离子风流对其的影响,电场控制方程只用于对错位板空间电场分布分析。同时,鉴于末级电场中颗粒物粒径微小、占空比低的特点,故将含尘气流假定为单相气流,忽略颗粒相。

根据电晕线附近的离子风速与电晕极电压满足的关系式<sup>[28]</sup>,可得电晕放电射流源初始风速,计算方法见式(1)。

$$v = (0.126 - 0.0217U + 9.418 \times 10^{-4}U^2) \times 23.3 \quad (1)$$

式中:  $v$  为离子风速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $U$  为电晕电压,  $\text{V}$ 。

当外加电压为40 kV时,各边界条件设置如下:电晕线处离子风速度设置  $15.61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;出口边界为自由出口;流体域上下边界为对称面;其他默认流体域边界为墙壁面,且为光滑、无滑移的墙壁。

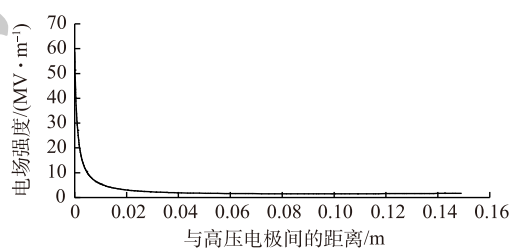


图4 40 kV极线附近电场变化图

Fig. 4 Electric field variation diagram near 40 kV pole line

## 2 数值计算结果及分析

### 2.1 电势等值线分布

电晕线外加电压 20、30、40、50 kV 时, 错位板放电空间的电势分布如图 5 所示。随着外加电压的升高, 空间电势不断提高。观察 2 000 V 电势等值线位置可以发现, 随着外加电压的升高, 此等值线离收尘极板的距离越来越远。

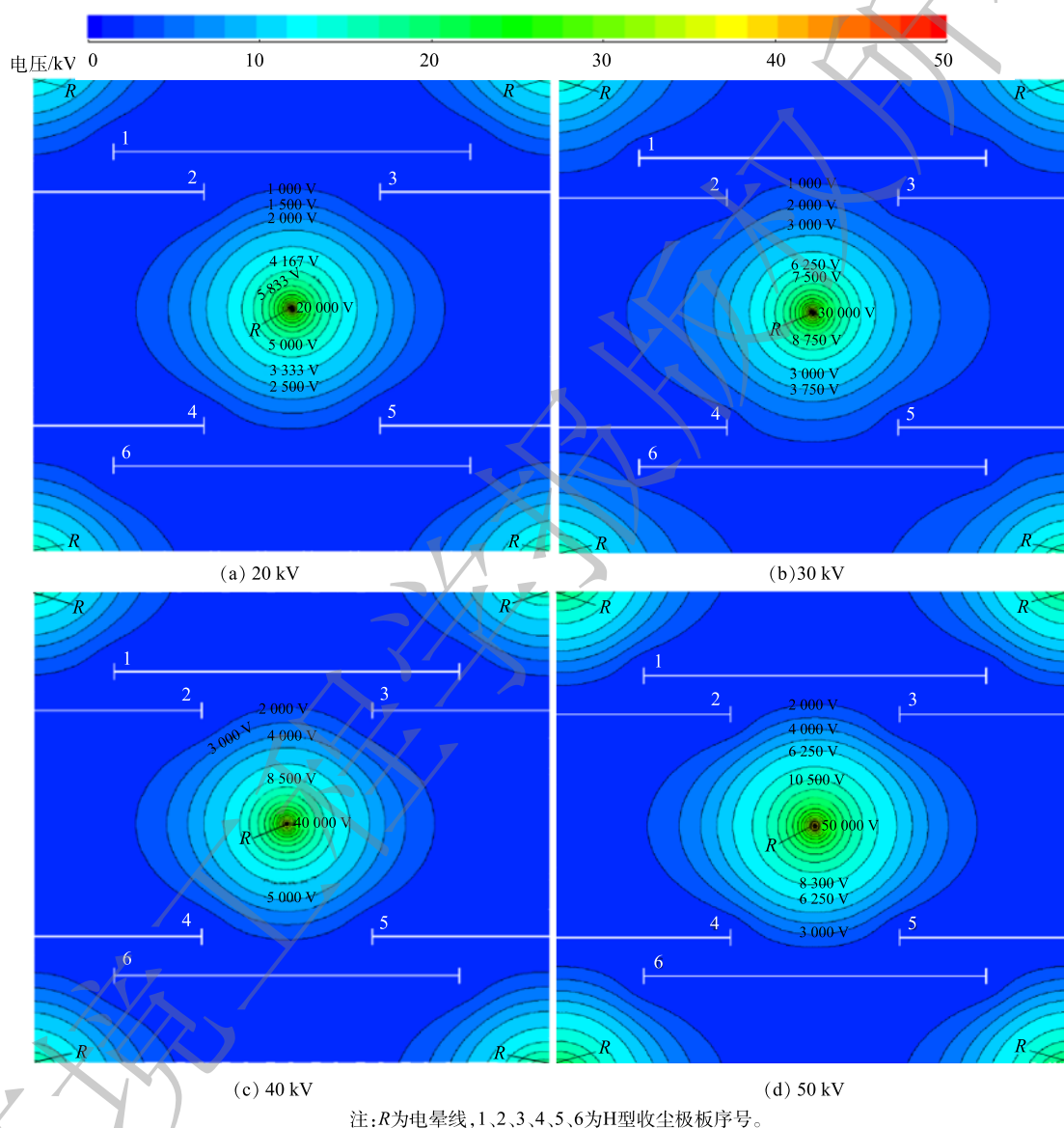


图 5 20、30、40、50 kV 时的电势等值线分布

Fig. 5 Potential contour distribution at 20, 30, 40, 50 kV

整体而言, 各外加电压下电势等值线分布并无太大差异, 电晕线表面电势等值线密度很大, 且电晕线较近范围内的分布近似呈圆形。随着向通道边缘的扩散, 电势逐渐减小, 电势等值线密度变小。由于边缘放电效应在 2 个极板间隙处形成凸起, 整体状态等值线分布呈不规则椭圆形, 电势由电晕电极中心位置向极板方向衰减速度大于横向通道方向。

## 2.2 流场分布状态

在外加电压为 40 kV 时, 以各电晕区为射流源, 研究了主流风速分别为 0、0.3、0.5、0.8、1.2 和 1.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 其对离子风流场的影响以及整个流场的变化。仿真模拟得出的速度云图见图 6, 速度矢量图见图 7。

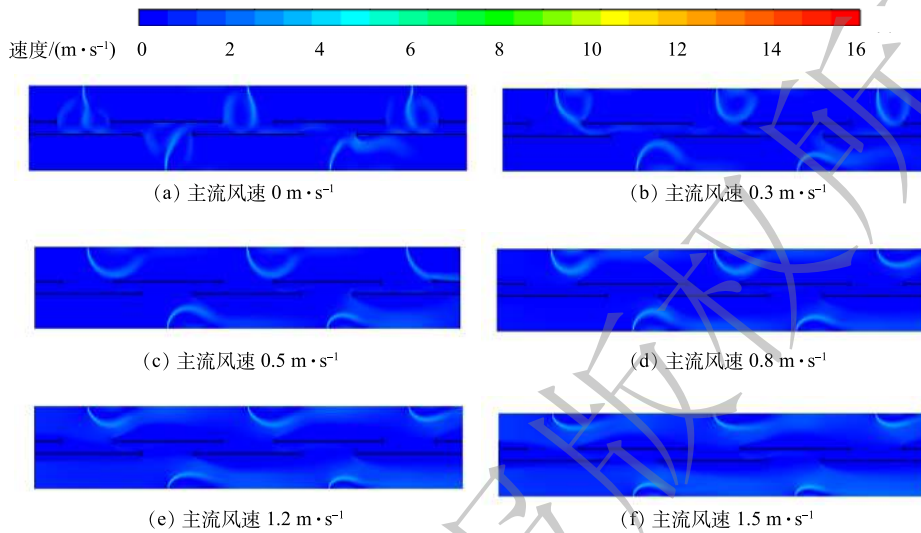


图 6 速度分布云图

Fig. 6 Cloud map of velocity distribution

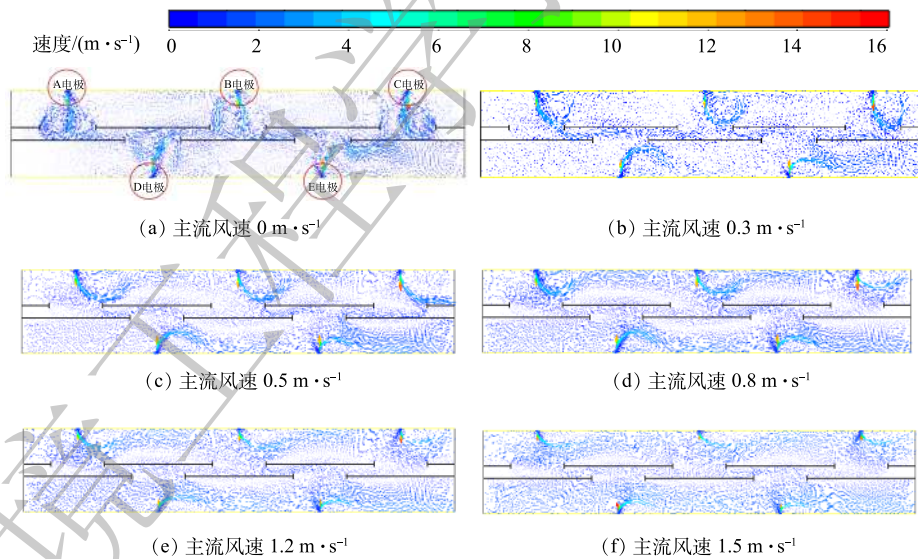


图 7 速度分布矢量图

Fig. 7 Vector diagram of velocity distribution

电晕极附近风速较收尘极背部区域高, 由于主流风速与离子风速相互作用, 因此, 在放电极附近形成湍流区, 这一区域的形成不仅可以增加颗粒物在电场中的停留时间, 更可大大增加粉尘颗粒的荷电率, 从而有利于收尘。

当主流风速为  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 离子风流场呈现典型的双螺旋结构, 从入射源入射到达收尘极板形成回旋, 形成 2 个方向相反的螺旋结构。为便于说明情况, 在上部电极线从左到右分别记作 A、B、C, 下部电极线从左到右分别记作 D、E, 可以发现 E 电极处的离子风出现明显偏转, 这是由

B 电极处的离子风通过错位板空当流入 E 电极处造成的。随着主流风速的从  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增加到  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，离子风流场也随之发生了变化。以 A 处电极为例，可以观察到，当主流风速为  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时，离子风流场受主流风速水平方向力影响，原本呈双螺旋结构的离子风，在主流风速的影响下发生偏转，部分主流风速及离子风流入板背区域，在 2 种流场的作用下，颗粒物便到达湍流强度和风速较低的极板背部区域，从而被捕集到。另外，采用 H 型收尘极板，观察到 H 形凸起可以有效阻挡主流风速以及偏转离子风对收尘极板的冲刷作用，减小了二次扬尘发生的概率。当主流风速增加到  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，可以观察到离子风受主流风速影响增大，从而使偏转度加大。离子风流进入电极板背部的量很小，离子风主流可到达较近极板位置，并被 H 形凸起阻挡，从而避免对收尘极板的冲刷。随着主流风速的继续增加，离子风流的偏转角度增大，当主流风速达到  $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时，上半区的离子风流受主流风速影响偏转量很大，已经不足以流入错位板空当；当主流风速达到  $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时，离子风流受到主流风速的极大影响，只有部分离子风流可以到达极板；当主流风速达到  $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时，已无法到达收尘极板，此时主流风速已成为影响除尘效率的首要因素，颗粒物将随主流风速一同进入大气环境中。

### 2.3 错位板空当中心线速度分析

每行收尘极板上形成交替分布的容纳仓和低风速区，并使得原来对微细粉尘的捕集起干扰和阻碍作用的离子风变成对微细粉尘的捕集起主导和促进作用的“动力源”。这就使得静电除尘器中高压放电产生的离子风变害为利，使静电除尘器对低比电阻颗粒的有效去除成为可能，本设计的关键也在于此。当提取主流风速  $0\sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时，错位板空当中心线  $y=0.125 \text{ m}$  上的速度分布如图 8 所示。

由图 8 可知，在此平面不同区域速度变化相对复杂，但整体而言，变化基数却很小，基本在  $0.5\sim 1.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，变化值限于  $0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。极板错位形成的背部交叉区域较主流道窄小，内部气流流速较小，该区域不仅可以减少气流对微细粉尘的扰动，还可提高带电粉尘的碰撞概率，提高流入此处的超微细颗粒的荷电凝并概率，继而达到较高的凝并效果，以保证对超微细粉尘的捕集效率。

由图 6 和图 7 可知，当主流风速较高时，离子风流受主流风速的影响较大，发生了大角度的偏转，流入错位板间隙离子风流减少，此时极板间隙速度减小，吹入基板背部的颗粒物也会减少。但是，不论主流风速是大是小，都可以发现极板背部的各容纳仓均存在部分低风速区，这也使流入此区域的颗粒物可以较大限度地被收集。

错位板空当中心线上的平均速度如图 9 所示，随着主流风速的增大，呈先降后升的趋势。下降的原因是，随着主流风速的增大，对离子风流的吹动作用增大，离子风团会像烛焰随气流偏转。可以看出，当主流风速为  $0.5\sim$

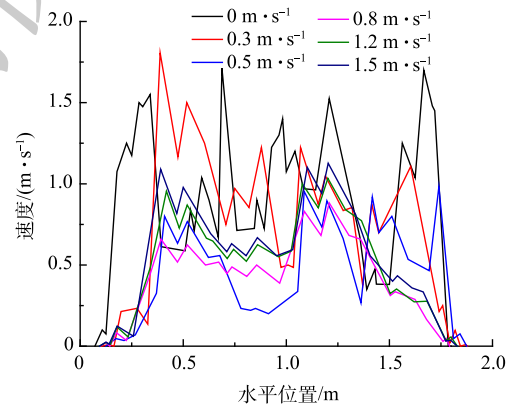


图 8 错位板空当中心线上的速度

Fig. 8 Speed on center line of mismatch plate

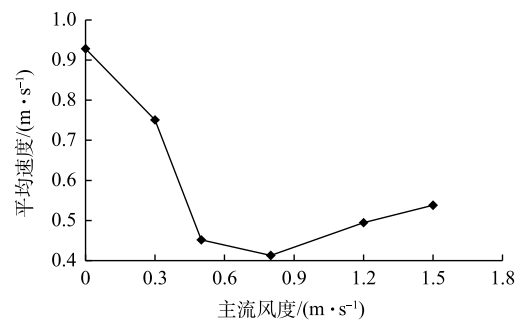


图 9 错位板空当中心线上的平均速度

Fig. 9 Average velocity on empty center line of dislocation plate

$0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 平均速度变化不足  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 此时主流风速与离子风处于相互制衡阶段, 主流风刚好使得离子风不能流入错位板间隙, 但反过来离子风的阻挡作用却会使主流风携带颗粒物流入错位板空当从而被捕集。上升的原因是, 虽然离子风气流发生大角度偏转已不足以进入错位板间隙, 但离子风团会对主流风产生一定的阻流作用, 从而使部分主流风气流流入错位板空当。此时在总气流的影响下, 仍然会使颗粒物进入错位板空当, 从而达到收尘效果。

总之, 无论主流风速是大是小, 离子风团都可以通过影响主流风流向, 使气流流入错位板空当, 并在该区域进行粉尘捕集。

### 3 结论

1) 电极结构、极配方式、放电强度是影响离子风气流分布的主要因素。

2) 当主流风速小于  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 离子风影响较为明显地增加了对流场的扰动; 当主流风速达到  $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上时, 主流风成为影响空间流场分布的主要因素, 离子风的影响被削弱, 但此时的离子风团仍然会促进气流流入错位极板背部, 从而达到收集目的。

3) 新型错位板电极排布形式, 不仅可以削弱离子风, 还可以利用离子风流作为“动力源”进行除尘, 并且可对原有线-板除尘器直接进行改造, 因而可大大节约经济成本。

4) 从气流分布的角度分析, 新型错位板电极排布形式可有效提高对微细粉尘、低比电阻粉尘的收集效率, 并可以实现超低排放。

### 参考文献

- [1] 张文. 中国大范围雾霾期间空气污染空间分布特征研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- [2] 沈欣军. 除尘器内细颗粒物的运动规律及其除尘效率研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [3] 段璐. 电袋除尘器颗粒物脱除理论和实验研究进展[J]. *粉煤灰综合利用*, 2019(4): 97-101.
- [4] 孙振龙, 顾珊, 刘茂省, 等. 针刺电晕线在线-管式静电除尘器中的放电特性应用研究[J]. *电力学报*, 2018, 33(4): 353-358.
- [5] KOHEI A, RYOTA T, AKINORI Z, et al. Simulation and measurement of charged particle trajectory with ionic flow in a wire-to-plate type electrostatic precipitator-ScienceDirect[J]. *Journal of Electrostatics*, 2020, 107: 103488-103497.
- [6] OHENOJA K, WIGREN V, VALTER W, et al. Fly ash classification efficiency of electrostatic precipitators in fluidized bed combustion of peat, wood, and forest residues[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 607-614.
- [7] 张建平, 高鹏飞, 徐达成, 等. 不同烟气流速下线板式静电除尘器中磁场效应验证[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(11): 3121-3127.
- [8] 方梦祥, 柳佳佳, 岑建孟, 等. 高温静电除尘技术研究进展及应用前景[J]. *高电压技术*, 2019, 45(4): 1108-1117.
- [9] 陈熙动, 张皓旻, 顾万清, 等. 我国PM<sub>2.5</sub>主要成分及对人体健康危害研究进展[J]. *中华保健医学杂志*, 2019, 21(1): 83-85.
- [10] 郝毅仁, 孟超, 刘坤坤. 工业大气污染治理技术发展分析[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(6): 132-134.
- [11] 柴发合. 我国大气污染治理历程回顾与展望[J]. *环境与可持续发展*, 2020, 45(3): 5-15.
- [12] 冯启琨, 黄磊, 刘获帆, 等. 针-板与棒-板电极结构在不同温度下的负电晕放电特性[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1847-1856.
- [13] 李庆, 刘晓娃, 剧晓晨, 等. 针-板电极负电晕放电下离子分布状态的影响因素[J]. *高电压技术*, 2017, 43(5): 1700-1706.
- [14] ZHU J B, ZHAO Q X, YAO Y P, et al. Effects of high-voltage power sources on fine particle collection efficiency with an industrial electrostatic precipitator[J]. *Journal of Electrostatics*, 2012, 70(3): 285-291.
- [15] ANATOL J, ANDRZEJ K, TADEUSZ C. Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review[J]. *Journal of Electrostatics*, 2006, 65(3): 133-155.
- [16] 邓云峰, 刘功智, 张国权. 宽间距长芒刺静电除尘技术的应用[J]. *中国安全科学学报*, 2003, 13(10): 45-48.
- [17] 常玉锋, 李梦玲, 叶罗威, 等. 线-管式双极预荷电器的极间电场分布模型[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 507-513.
- [18] 王翔, 常景彩, 徐纯燕, 等. 线-板式静电除尘器芒刺电晕线放电特性[J]. *高电压技术*, 2017, 43(2): 533-540.
- [19] WANG X, CHANG J C, XU C Y, et al. Discharge characteristic of barbed electrodes in wire-plate electrostatic precipitator[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 533-540.
- [20] 吴华, 杨春振, 董力, 等. 空气环境下线板电除尘器RS芒刺的放电特性[J]. *能源科技*, 2020, 18(3): 42-48.
- [21] 曾宇翔, 沈欣军, 章旭明, 等. 电除尘器中离子风的实验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(12): 2208-2211.

- [22] 龙正伟, 冯壮波, 姚强. 静电除尘器数值模拟[J]. *化工学报*, 2012, 63(11): 3393-3401.
- [23] 李海英, 多鹏, 王茹. 离子风对ESP气流分布和除尘效率影响的数值模拟[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(9): 136-142.
- [24] 胡建华, 潘洋洋. 电除尘器中离子风对除尘效果的影响[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(3): 76-80.
- [25] PODLINSKI J, NIEWULIS A. Electrohydrodynamic flow and particle collection efficiency of a spike-plate type electrostatic precipitator[J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67(2/3): 99-104.
- [26] DEKOWSKI J, KOCIK M. Measurement of the flow velocity field in multi-field wire-plate electrostatic precipitator[J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2004, 54: 922-930.
- [27] YAMAMOTO T, VELKOFF H R. Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 108: 1-18.
- [28] 李庆, 王利, 杨青, 等. 板-袋收尘极板对微细粉尘收集效果的影响分析[J]. *高电压技术*, 2016, 42(2): 361-367.
- [29] 李庆, 李海凤, 孙晓荣, 等. 电晕放电电流体状态实验研究与数值模拟[J]. *高电压技术*, 2010, 36(11): 2739-2744.

## Numerical simulation of the influence of a new type of dislocation plate on the flow field of the electrostatic precipitator

CUI Xiaohui<sup>1</sup>, HOU Xuechao<sup>1</sup>, ZHANG Wenting<sup>1</sup>, CHEN Xudong<sup>1</sup>, ZHANG Xiaojun<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1,2,\*</sup>

1. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Institute of Electrostatic Technology, Hebei University, Baoding 071002, China

\*Corresponding author, E-mail: liqing@hbu.cn

**Abstract** In order to reduce the upgrading cost of the existing precipitator and improve its collection efficiency of fine dust, on the basis of the existing precipitator, the arrangement of the anode plates was adjusted. The dislocation arrangement was designed to maximize the use of the original precipitator resources, minimize upgrading cost, and achieve a satisfactory dust removal effect. The widely used FLUENT simulation software at present was used to perform numerical simulation, and the electric potential distribution and airflow distribution were observed and analyzed. Numerical simulation results showed that when the mainstream wind speed was lower than  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the ion wind had a greater impact on the flow field; when the mainstream wind speed was over  $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the mainstream wind became the main factor affecting the spatial flow field distribution. The impact of ion wind was weakened, but the ion wind group at this time still promoted the airflow to flow into the back of the misplaced plate and completed the collection. The gap design of the dislocation plate could weaken the scouring effect of the ion wind on the anode plate, which proved that the arrangement of the dislocation plate was beneficial to counteract the negative influence of the ion wind on the dust collection and effectively improved the collection efficiency of fine dust. The result of numerical simulation has a certain reference significance for the design and improvement of electrostatic precipitator.

**Keywords** ionic wind; flow field; primary air flow; dislocation plate gap; fine dust