



移动扫码阅读

王佳豪,黄超,杨振民,等.板型对电除尘器内部流场和除尘效率的影响[J].能源环境保护,2020,34(6):40-46.

WANG Jiahao, HUANG Chao, YANG Zhenmin, et al. Influence of plate shape on flow field and efficiency of electrostatic precipitator[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(6): 40-46.

板型对电除尘器内部流场和除尘效率的影响

王佳豪,黄超,杨振民,耿婉婷,王美艳

(河北工业大学 能源与环境工程学院,天津 300401)

摘要:基于 COMSOL Multiphysics 对电除尘器的二维模型进行了数值模拟,建立了以静电场、湍流场和流体粒子为追踪模块的耦合物理场,在有 EHD 流的情况下分析了收尘极板形状(P 型板、BE 型板、CW 型板和 M 型板)、风速、电压、粒径和温度对静电除尘器内静电场、湍流场和除尘效率的影响。结果表明:收尘极板形状对电势分布有影响,BE 板电势不均匀程度最高;不同极板的除尘效率与放电电极电压和颗粒物粒径正相关,与一次风速和温度负相关;在不同工况下,BE 板除尘效率最佳;增强离子风有助于提高除尘效率。

关键词:数值模拟;电除尘器;EHD 流;收尘极板形状;除尘效率

中图分类号:X701.2

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)06-0040-07

Influence of plate shape on flow field and efficiency of electrostatic precipitator

WANG Jiahao, HUANG Chao, YANG Zhenmin, GENG Wanting, WANG Meiyuan

(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Based on COMSOL Multiphysics, a two-dimensional model of electrostatic precipitator is numerically simulated. A coupled physical field was established taking electrostatic field, turbulent flow field and fluid particles as tracking modules. With EHD flow, the influences of collector plate shape (P-type plate, BE-type plate, CW-type plate and M-type plate), wind speed, voltage, particle size and temperature on electrostatic field, turbulent flow field and dust removal efficiency were analyzed. The results show that the shape of the dust collecting plate affects the electric potential distribution, and electric potential on BE-type plate is the most uneven. The dust removal efficiency of different plates is positively correlated with discharge electrode voltage and particle size, and negatively correlated with primary wind speed and temperature. Under different working conditions, BE-type plate has the highest dust removal efficiency. Enhancing the ion wind is helpful to improve the dust removal efficiency.

Key Words: Numerical simulation; Electrostatic precipitator; EHD flow; Dust collecting plate shape; Dust removal efficiency

0 引言

根据世界能源统计年鉴,在 2019 年我国一次能源的消耗量达到了 141.7 EJ,可以占到全球总消耗量的 24.3%,是世界第一。而煤炭是我国的第一大能源,2019 年我国对于煤炭的消耗在我国能源消费结构中 can 占到 57.7%。而火力发电是

我国主要的发电方式,据国家统计局数据,2019 年我国的总发电量为 75 034.28 亿千瓦时,火力发电量达到 52 201.48 亿千瓦时,而火力发电量占我国总发电量的比例为 69.6%。静电除尘器是我国燃煤电厂广泛使用的燃煤烟气处理设施,占比能够达到 90%~95%,它具有能耗低、烟气处理量大、效率高优点^[1]。

在近年来人们对于静电除尘器的流场和提高除尘效率的因素进行了研究,而在静电除尘器中会产生离子风,它会对电除尘器中流场和颗粒物运动规律产生一定的影响。离子风(Ionic wind)也称为电风或电晕风(Corona wind),它是指在电晕放电的过程中由电晕放电产生的离子推动离子周围的气流而产生的一种现象。对于离子风的研究最早可以追溯到十八世纪,1709 年, Hauksbee 发现把带电的圆管靠近脸就会感受到轻微的风^[2-4];1922 年, Deutsch^[5]在不考虑离子风引起粒子驱进速度变化的情况下,提出了著名的多依奇公式,这个公式表明:电除尘效率与粒子驱进速度和收尘极板的面积成正比,与气流量成反比。而在近年来国内外在离子风方面取得了很多成果, Shimamoto^[6]在 2004 年发现电除尘器中离子风增强了湍流强度,而且离子风在气流速度低的时候作用明显;Chun 等人^[7]使用 SIMPLEST 算法研究了线板 ESP 中 $k-\varepsilon$ 湍流模型的二维电流体动力学流动(EHD)模式;Feng 等^[8]采用有限元与有限体积混合方法(FEM-FVM)分析了电除尘器中涡流对 EHD 流的影响,并且验证了几种经典的 EHD 模型。近年来国内外很多学者利用数值模拟软件对电除尘器进行了数值模拟,王晓华^[9]对不同直径的电晕线进行了数值模拟发现随着电晕线直径的减小收尘板处的电荷密度和电场强度增大,电晕线处的空间电荷密度增大;沈恒^[10]对星形线进行了数值模拟发现星形线电除尘通道内二次流动对流动形态和粒子浓度分布存在显著作用;裴艺凯^[11]利用数值模拟发现主流速度的增大减弱了 EHD 流对电除尘器内流场的干扰;张哲^[12]当电场断面风速越小、粒径越大、施加电压越大时,除尘效率越高,对粒径为 $6.9\ \mu\text{m}$ 的粉尘最大捕集效率可以达到 99.4%;高韬深^[13]对湿式电除尘器进行了数值模拟,发现与干式状态相对比,得出以下结

论:湿式工作状态下粒子的分段浓度减少率、沿程沉积效率、除尘总效率的变化趋势与干式时相同,但数值上更大,除尘效果更好;刘凯^[14]对湿式电除尘器进行了数值模拟,发现添加气流均布板有利于电除尘器内部流场分布的优化。但是国内外学者们对收尘极板的研究很少。

本文利用 COMSOL Multiphysics 数值软件模拟了不同板型电除尘器模型在不同风速、不同电压、不同粒径和不同温度下的电势分布、流场分布和除尘效率,旨在探究板型对离子风和电除尘器性能的影响因素,优化电除尘器的配置。

1 数值模型

高压静电除尘过程是电场、流场、颗粒荷电及运动场的多物理耦合过程。

1.1 静电场模型

电场模型所涉及到的参数主要包括电势与空间电荷密度等。其中电场分布由泊松方程和电流连续方程共同控制,已在文献^[15]有了充分介绍。

1.2 气流流动模型

本文用 $k-\varepsilon$ 模型来描述湍流场,在有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 中进行求解。其中 Navier-Stokes 方程^[15]中的质量守恒方程和动量守恒方程求解流速 u 和压力 p ,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[15]求解湍动能和耗散率。

1.3 粒子荷电模型

粒子的荷电方式有两种分为电场荷电和扩散荷电对于直径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒,电场荷电通常大于扩散荷电。粒子荷电量与粒子直径、电场强度等因素有关,粒子荷电方程由文献^[15]给出。

1.4 几何模型

本文建立了四种收尘极板板型的除尘器并对其进行了二维数值计算,其几何尺寸如图 1 所示。图 1(a)、(b)、(c)、(d) 分别为平行板收尘极板

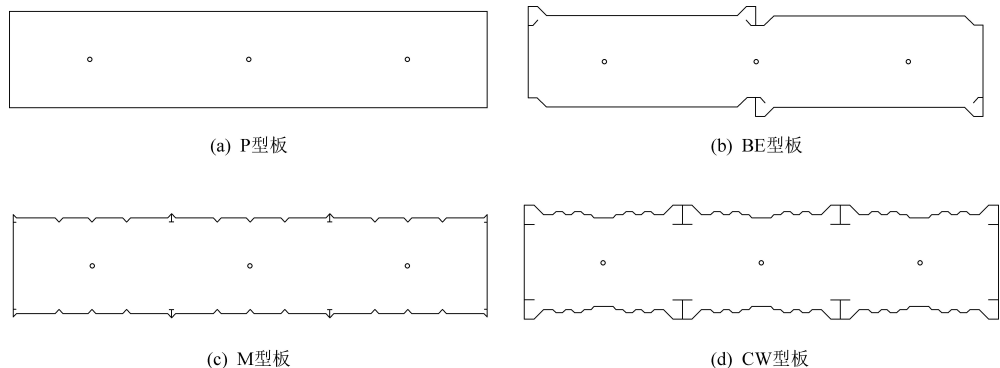


图 1 几何模型

(后续简称 P 型板)、BE 型板、M 型板、CW 型板几种电除尘器几何模型。三种模型尺寸均为 $500\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 电极线采用半径 2 mm 的圆柱形电极, 均为三线式布置。三根电极线在图中坐标 (X, Y) 分别为: $(83.3\text{ mm}, 0)$ 、 $(250\text{ mm}, 0)$ 、 $(416.6\text{ mm}, 0)$ 。相较于平行板, 其它类型的极板的板面场强分布和板面电流分布比较均匀, 能够在流场内使气流紧缩和气流扩大, 进而影响离子风涡旋对流场扰动的强弱, 同时其它极板内的凹槽较 P 型板更容易捕集一些沿气流方向运动的粉尘, 从而提高电除尘器的除尘效率。本文数值计算选取的参数值为: 空气粘度 $\mu = 1.789 \times 10^{-5}\text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; 空气中离子迁移率 $K = 2.2 \times 10^{-4}\text{ m}^2/(\text{v} \cdot \text{s})$; 离子扩散系数 $D = 5.3 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

2 模拟结果

不同收尘极板与电极线构成了多种形式极板, 收尘极板形状对离子风涡旋和除尘器内流场具有不同的作用, 进而对颗粒物的捕获有着不同的影响。本章建立了二维线板电除尘器的数值模型, 引入 BE 型板、CW 型板和 M 型板与 P 型板对

比, 详细研究了在三种板型下除尘器内部的静电场分布和离子风湍流场及颗粒物荷电的规律, 进一步探寻在电流体动力作用下颗粒运动及捕获过程。

2.1 电势分布

图 2 电压 50 kV 时, 三种板型电除尘器内的电势分布, 通过在从电极线位置开始 Y 方向 $Y=0$ 、 10 、 20 、 30 、 40 mm 提取数据点, 绘制分布图。在图 2 中可以看出, 除尘器内部电势分布不均匀, 但三种板型下的等势线均以电极线为中心呈椭圆状向外扩散, 电势向收尘极板方向变化速度更大。在入口到出口过程中电势分布在电极线处达到峰值, 电极线与电极线之间有一低谷。由于收尘极板形状不同, 内部电势分布略有差异; 由图 2 可以看出电势波动变化最为明显的是 BE 型板, 然后是 CW 型板、M 型板和 P 型板。因为不均匀的电场分布更有利于除尘效率的提高, 而由图 4 可以对不同极板不均匀程度作比较, 可以看出 $\text{BE 板} > \text{CW 型板} > \text{M 型板} > \text{P 型板}$ 。电势分布有差异说明了收尘极板形状对电势分布有影响, 但随着趋近电极线, 不同收尘极板板型对电势分布的影响减弱。

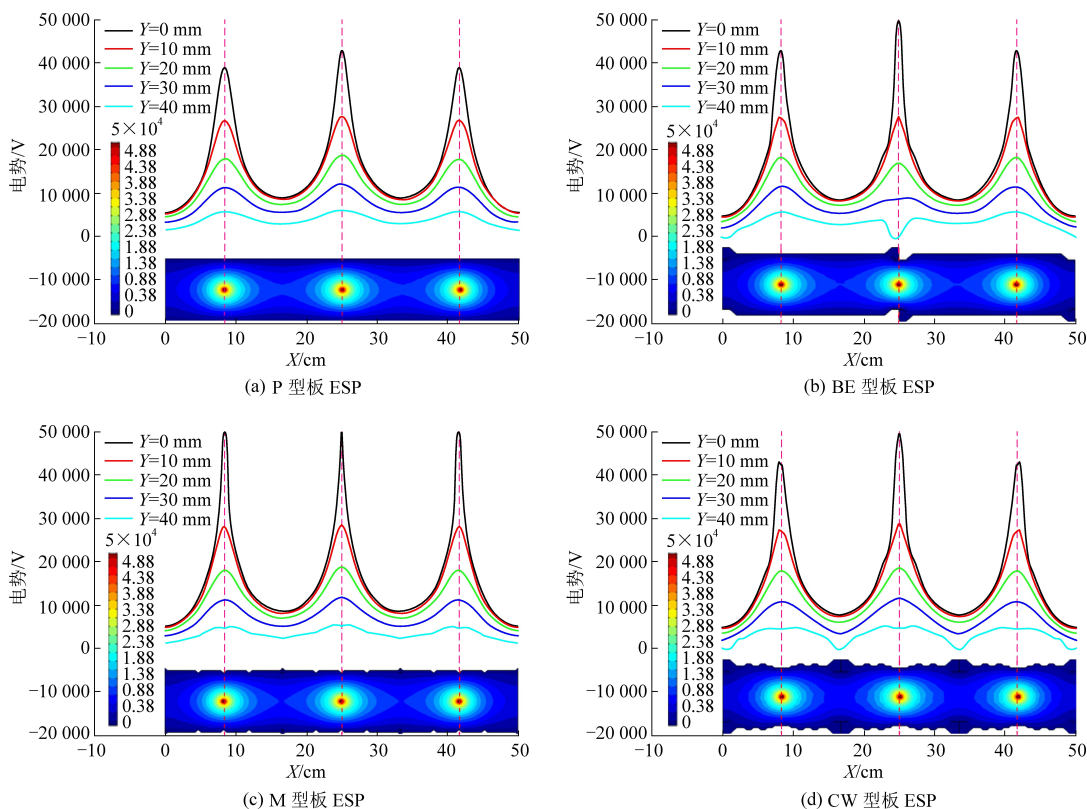


图 2 电势分布

2.2 湍流场分布

静电除尘器的离子风作用于流场产生更复杂

的湍流, 会影响到荷电颗粒的捕集, 离子风对提高颗粒收集效率方面起着重要的作用。

以 P 型板电除尘器为例进行分析。由图 3 (a) 可以看到电力线是以电极线为中心指向收尘极板并垂直于电势等值线(电势等值线以电极为中心呈椭圆状向外延展)。电力线与电力线之间并不会相交,所以可以看到在相邻电极线之间存在着一由电力线之间相互隔离出来的隐形壁面,离子风的产生原因是离子与空气分子碰撞的动量传递,进而带动空气流动。

把空气中的分子或离子、单个细颗粒假设为一个球体,在无主气流流动时,流体中与电极线极性相同的带电离子或荷电细颗粒物,在电极线附近受到 X 方向和垂直指向收尘极板 Y 方向的电场力 F_x 和 F_y ,不同的力协同作用下产生位移进而带动空气分子运动。在电极线前 X 方向球体运动与主气流流动方向相反,在电极线后 X 方向球体运动与主气流流动方向相同,而 Y 方向受到的力使其撞击到收尘极板面,由于空气流体不可压缩,最终在 F_x 和 F_y 和壁面共同作用下在电极线前(面向入口)产生逆时针涡旋,电极线后(面向出口)产生顺时针涡旋。随着主气流速度不断的增大,流动气体相对运动阻力 F_d 会逐渐抵消部分与气流方向相反的力,在电极线后的 F_x 、 F_y 与 F_d 形成向上向前的合力,最终导致离子风涡旋的逐渐减弱。这也说明主气流风速决定了离子风减弱速度,更高的风速有更强的流体阻力,涡旋减弱越快。

图 3(b) 绘制了假设球点的受力运动轨迹与离子风涡旋形成与消散示意图,图 3(c) 为在电压 20 kV,入口风速 0.05 m/s 时 P 型板电除尘器内湍流流线图,并标出了涡旋流线方向,以旋转箭头表示。

线板式静电除尘器中一定数量的收尘极板相互之间排列组成除尘通道,板型的变化会对通道离子风涡旋产生影响。图 4 是 P 型板、BE 型板、M 型板、CW 型板几种板型下电除尘器在电压为 50 kV,粒子直径为 2.5 μm ,风速为 0、0.2 和 0.5 m/s 流速下的湍流场的流线图。由图 4 可以看出,在风速为 0 时,大部分除尘器流场内以除尘器中心线为中心分布着 12 个涡旋,每个电极线周围分布着 4 个涡旋,而且上下分布的涡旋流线方向相反,最中心电极产生的离子风对两边电极有一定的抑制作用;而 BE 型板则只有 11 个涡旋,M 型板和 CW 板的离子风旋涡分布不规则,这说明除尘器板型对于除尘器内流场分布有着很大的影

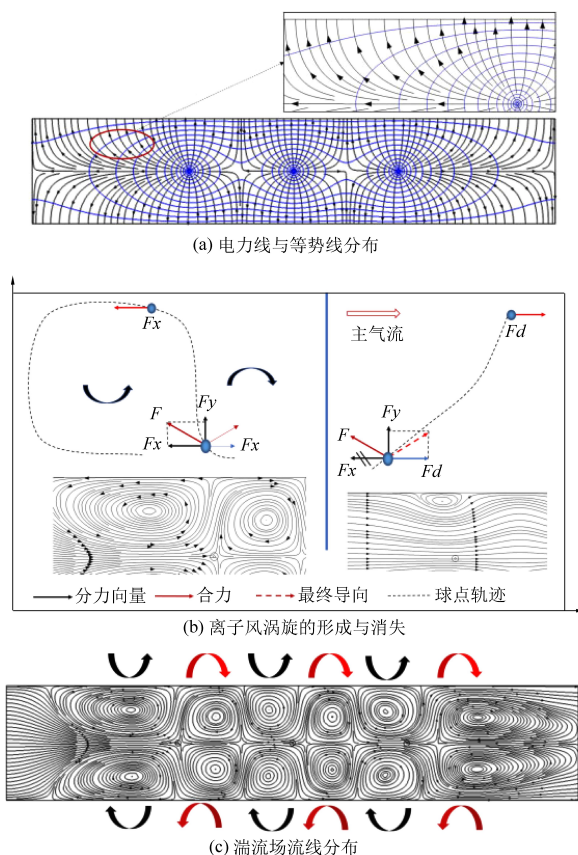


图 3 离子风产生原理

响,同时电势分布的不均匀对除尘器湍流场也造成了影响。随着风速的增大,当主气流风速为 0.2 m/s 时,由于流体相对运动阻力增大,涡旋与主气流相互作用逐渐消失,一部分涡旋消失。由图 4 可以看出,这五个除尘器模型的湍流场流线分布比较类似,由于主气流风速的影响,流场中靠近进口处的电极线右侧的两个涡旋被主气流冲散,而且其它涡旋也都因为主气流的作用形状和面积发生了改变。当主气流风速达到 0.5 m/s 时,主气流在流场中起主要作用,所有板型的除尘器模型流场中的涡旋都被主气流冲散。

图 5 为相同条件下,四种板型在 $Y=0$ mm 处沿 X 方向的速度分布对比。由图 5 可以看出,在 $Y=0$ mm,主气流速度为 0.2 m/s 时沿气流方向从入口到出口过程中四种板型除尘器内速度变化幅度规律基本相似,速度变化均呈波浪状曲线分布,在两根电极线之间存在速度低谷。而各极板速度的峰值都在极线处,四种极板在电极线附近最大值分布的规律是:第一根>第二根>第三根。可以看出速度大小随 X 轴波动变化大小的排序是:BE 型板>CW 型板>M 型板>P 型板,另外三种板型波动大于 P 型板的原因是,它们的形状不规则,有些

地方通道窄,有些地方通道宽,这样更有利于颗粒物的捕集。由图中第二根和第三根极线之间的波动和第三根后的波动可以看出,这两个波动的最高点都是处于上下两个离子风旋涡的交汇处,波

动大小总体上 BE 板>CW 型板>M 型板>P 型板,这也代表了离子风的强弱,波动大的板型离子风效应更强,主气流对其的影响更弱。

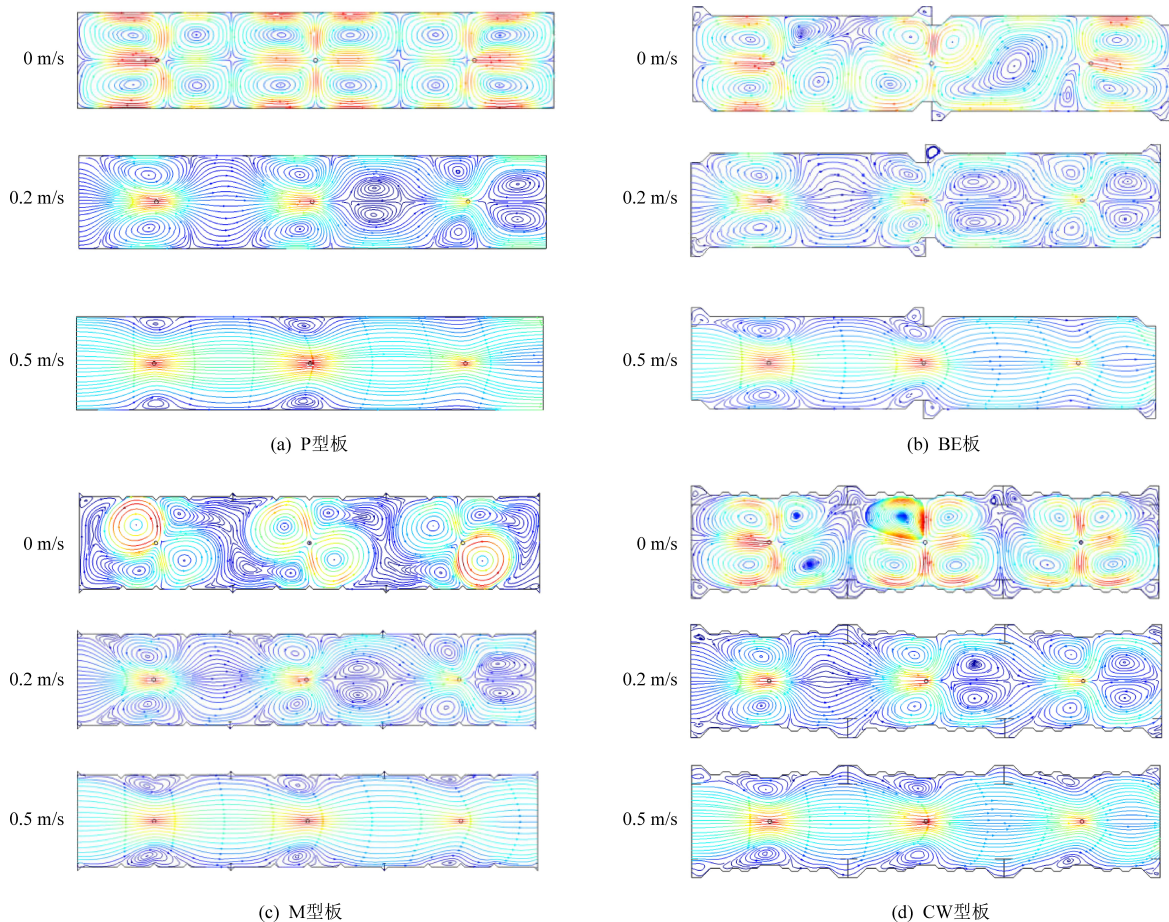


图4 不同极板在不同风速下的湍流场流线图

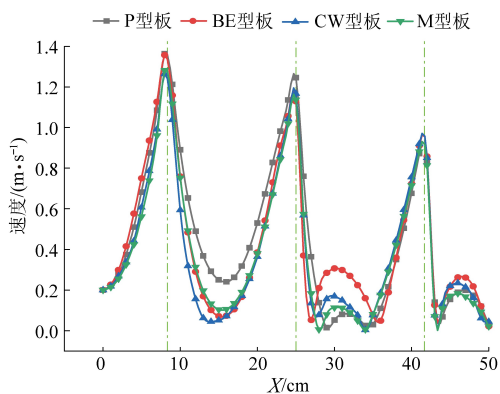


图5 沿X轴速度分布对比

2.3 除尘效率

除尘效率是判断一个电除尘器性能优劣的主要标准,电除尘器的颗粒物捕集效率受到很多因素的影响。图6是利用数值软件 COMSOL Multiphysics 和控制变量法模拟的 P 型板、BE 型板、CW 型板和 M 型板在不同一次风速、不同电压、不

同粒径和不同温度下的除尘效率的对比。

图6表明不同极板随着一次风速的降低、放电极电压的升高、颗粒物粒径的增大和温度的降低,它们的除尘效率随之升高,同时它们的增长率也是随之升高。不同工况下不同极板的除尘效率作比较:BE 型板>CW 型板>M 型板>P 型板,根据前文总结,这是因为不均匀的电场分布、速度大小随 X 轴波动变化大以及较强的离子风涡旋更有利于粒子的捕集。

3 结论

本文对三种板型的静电除尘器进行数值计算,对不同板型条件下除尘器内离子风产生的湍流场和颗粒物的荷电与捕获过程及其颗粒运动轨迹进行了研究,并给出了通过改善离子风提高对颗粒捕获的理论分析,主要结论如下:

收尘极板板型的研究一直以来受到国内外学

者的青睐,研究者发现通过极板形状的改变可以提高电除尘器的除尘效率。所以本文分析比较了 P 型板、BE 型板、CW 型板和 M 型板在有 EHD 流情况下的电势分布、流场分布和除尘效率,来探究板型对除尘器性能的影响。由不同板型除尘器的电势分布可以看出,收尘极板形状对电势分布有

影响,电势不均匀程度:BE 型板>CW 型板>M 型板>P 型板,且随着趋近电极线,不同极板板型对电势分布的影响减弱;而从湍流场可以看出,流场内的主气流决定了离子风的减弱速度,更高的流速有更强的流体阻力,涡旋减弱的更快,同时当主气流风速为 0 时,最中心电极产生的离子风对两

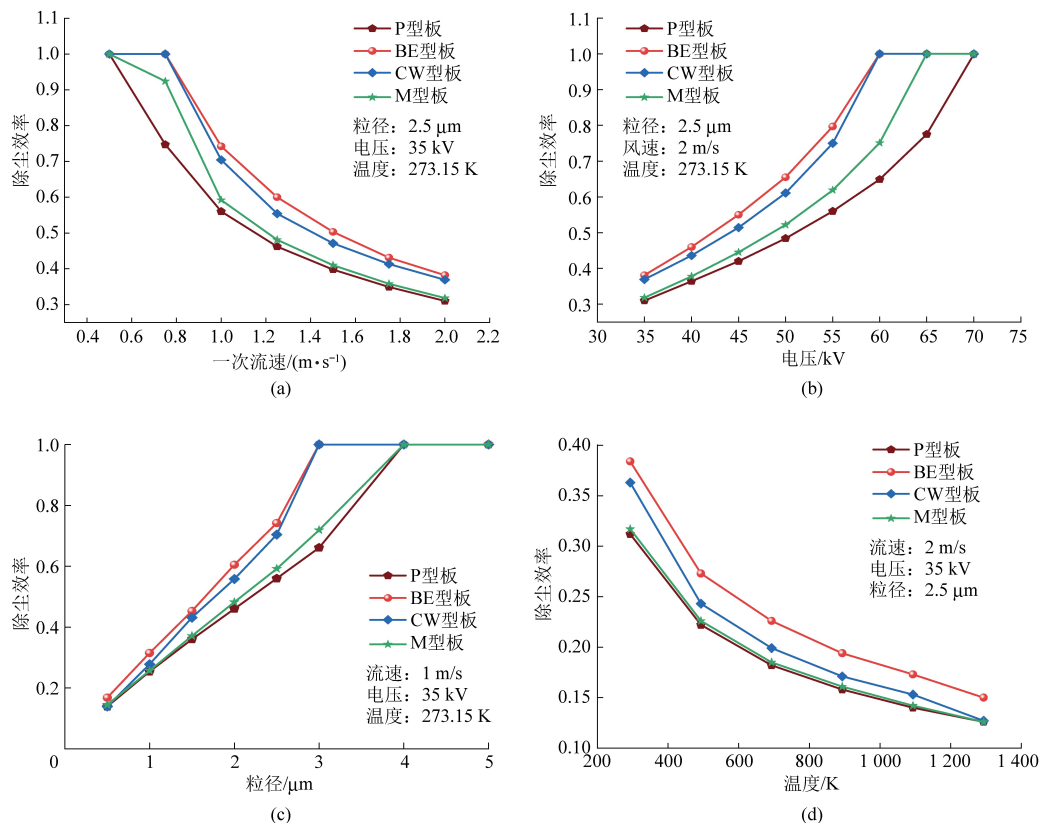


图 6 不同极板在不同一次风速、不同电压、不同粒径和不同温度下的除尘效率

边电极有一定的抑制作用,当主气流速度为 0.2 m/s 时,速度大小随着 X 轴波动变化大小的排序是:BE 板>CW 型板>M 型板>P 型板,不均匀的电场会产生更强的离子风,波动大的离子风效应更强,主气流对其的影响更弱。最后对不同板型除尘器的除尘效率进行了比较,发现不同极板随着一次风速的降低,放电极电压的升高、颗粒物粒径的增大和温度的降低其除尘效率随之升高,而在不同工况下除尘效率:BE 板>CW 型板>M 型板>P 型板。从不同板型电势不均匀程度、湍流场速度分布、沿 X 轴速度大小和除尘效率的比较可以发现,不均匀的电势分布会产生更强的离子风,而更强的离子风会使除尘器的除尘效率提高。

参考文献

[1] 锥飞. 湿式电除尘增强 $\text{PM}_{2.5}/\text{SO}_3$ 酸雾脱除的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017: 1.

[2] Loeb, Leonard B, Brown, Sanborn C. Electrical coronas; Their basic physical mechanisms [J]. Physics Today, 19 (1): 109-111.

[3] Robinson M. The early history of the electrode position and separation of particles [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1968, 115 (5): 131C-137C.

[4] Shaughnessy E. J, Solomon G. S. Electrohydrodynamic pressure of the point-to-plane corona discharge [J]. Aerosol Science & Technology, 1988, 14 (2): 193-200.

[5] Deutsch W. Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator [J]. Annalen der Physik, 1922, 373 (12): 335-344.

[6] Shimamoto S, Kanazawa S, Ohkubo T, et al. Flow visualization and current distributions for a corona radical shower reactor [J]. Journal of Electrostatics, 2004, 61 (3-4): 223-230.

[7] 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.

[8] Feng Z, Long Z, Cao S, et al. Characterization of electrohydro-

dynamic (EHD) flow in electrostatic precipitators (ESP) by numerical simulation and quantitative vortex analysis [J]. Journal of Electrostatics, 2018, 91: 70-80.

[9] 王晓华. 电晕线直径对静电除尘器性能影响的模拟研究 [J]. 环境保护科学, 2020, 46 (2): 76-80.

[10] 沈恒, 余婉璇, 贾洪伟, 等. 星形线电除尘器内 EHD 流动与粒子行为数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2020, 40 (3): 1030-1037.

[11] 裴艺凯, 杨振民, 黄超, 等. 电除尘器内部流动特性的数值模拟 [J]. 应用能源技术, 2019 (11): 21-26.

[12] 张哲, 李彩亭, 李珊红. 板式电除尘器多物理场耦合数值分析 [J]. 环境科学与技术, 2019, 42 (11): 187-192.

[13] 高韬深. 湿式电除尘器的数值模拟研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 4-5.

[14] 刘凯, 陈盛建, 李宁. 湿式电除尘器流场数值模拟及验证 [J]. 工业安全与环保, 2017, 43 (9): 20-22+66.

[15] 龙正伟, 冯壮波, 姚强. 静电除尘器数值模拟 [J]. 化工学报, 2012 (11): 26-34.