

#### Environmental Protection Science

# 电晕线直径对静电除尘器性能影响的模拟研究

王晓华

(天津大学环境科学与工程学院,天津 300350)

摘 要:采用数值模拟方法研究了电晕线直径对静电除尘器性能的影响,分析了电压、风速对不同直径电晕线的除尘 效率的影响规律。结果表明,随电晕线直径减小,收尘板处的电荷密度和电场强度都逐渐增大;电晕线附近的电荷密度显 著增大,由 272 增大到 778 μC/m<sup>3</sup>;而电场强度逐渐减小,且场强最低点的位置逐渐靠近电晕线。随电晕线直径减小,大颗 粒和小颗粒的除尘效率都逐渐增大。电晕线直径较小时,随着电压增大,大颗粒和小颗粒的除尘效率都逐渐增大;电晕线 直径较大时,大颗粒除尘效率的提高程度更显著。随着风速减小,不同电晕线直径的除尘效率都逐渐增大,且小颗粒除尘 效率的提高程度相对较显著,0.1 μm 颗粒的除尘效率提高 12.3%。

关键词: 电晕线直径; 静电除尘; 数值模拟; 颗粒物

中图分类号: X51 文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004 - 6216.2020.02.015

## Numerical Simulation of Effects of Corona Wire Diameter on Electrostatic Precipitator Performance

#### WANG Xiaohua

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The effects of the corona wire diameter on the performance of the electrostatic precipitator were numerically studied. The influences of the voltage and the gas velocity on the removal efficiency for the corona wires with different diameters were analyzed. The results showed that, with the decreasing of the diameter of the corona wire, the charge density and the electric field strength at the collecting plate increased gradually. The charge density around the corona wire increased from  $272 \,\mu$ C/m<sup>3</sup> to  $778 \,\mu$ C/m<sup>3</sup>, while the electric field strength decreased gradually. The lowest strength position was closed to the corona wire. With the decreasing of the corona wire diameter, the removal efficiency of the large and small particles gradually increased. As for the corona wire with small diameter, the removal efficiency of large and small particles increased with the increasing of the voltage. For the large diameter wire, the removal efficiency of large particles increased obviously. As the gas velocity decreased, the removal efficiency with different corona wire diameters gradually increased. The removal efficiency of the small particles improved significantly. The removal efficiency of 0.1 µm particle improved by 12.3%.

Keywords: Corona Wire Diameter; Electrostatic Precipitation; Numerical Simulation; Particulate Matter CLC number: X51

静电除尘器广泛应用于各种工业烟气的除尘 工艺,其整体除尘效率可达到 99% 以上,但对细颗 粒物的脱除效率相对较低<sup>[1-4]</sup>。细颗粒物直径小, 比表面积大,容易富集各种有毒有害物质,对环境 和人体健康危害大<sup>[5-7]</sup>。为了提高静电除尘器对细 颗粒物的脱除效率,人们做了大量的研究工作。

静电除尘是多种过程共同作用的复杂结果,包括电晕放电、气体流动、颗粒荷电和颗粒运动等<sup>[8-10]</sup>。 ZHUANG et al<sup>[10]</sup>采用实验的方法研究了细颗粒物 的静电除尘效率,并讨论了电压和风速对除尘效率 的影响。WANG et al<sup>[11]</sup>和 HIROTAKA et al<sup>[12]</sup>利 用 PIV 技术测量了静电除尘器内的气体流动情况, 其研究表明电压对气体流动有重要影响。HENG et al<sup>[13]</sup> 采用数值模拟的方法,研究了收尘板结构对流场的 影响,发现收尘板结构对电晕放电和流场分布有显 著影响。FENG et al<sup>[14-15]</sup>采用有限元与有限体积 混合格式,模拟研究了静电除尘器内的流场分布并 与实验数据进行对比,结果表明标准 k-c 湍流模型

收稿日期: 2019-06-11

作者简介: 王晓华(1978-), 男, 博士、讲师。研究方向: 颗粒物控制。E-mail: wtju13@163.com

引用格式: 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.

能够较好地模拟静电除尘器内的流体运动。颗粒 荷电是一个复杂的过程,包括电场荷电和扩散荷 电<sup>[8,16]</sup>。LONG et al<sup>[8]</sup> 对 9 种荷电模型进行了研究, 并与实验结果进行对比,结果表明综合考虑了电场 荷电与扩散荷电的 Lawless 模型能够更好地预测颗 粒在静电除尘器内的运动情况。LU et al<sup>[17]</sup> 模拟研 究了线板式静电除尘器内的颗粒运动情况,结果表 明电压和电流对颗粒物的脱除效率有重要影响。

上述研究主要针对固定电晕线直径的静电除 尘器的性能特点,对电晕线直径的影响规律研究相 对较少。本文采用数值模拟的方法研究电晕线直 径对电晕电场和除尘特性的影响,同时分析电压、 风速等参数对不同电晕线直径除尘特性的影响规律。

### 1 计算模型

静电除尘器内的气体运动为稳定的湍流流动, 文章采用标准 *k-e* 湍流模型进行模拟。通过编写用 户程序(UDF),气体流动模型考虑了电晕放电引起 的电晕风的影响。电晕放电模型包括电压泊松方 程和电荷守恒方程。

$$\nabla^2 \phi = -\rho_i / \varepsilon_0 \tag{1}$$

 $\nabla \cdot J = 0 \tag{2}$ 

 $E = -\nabla\phi \tag{3}$ 

$$J = (u + bE)\rho_i$$

式(1~4)中, $\varphi$ 为电压,V; $\rho_i$ 为电荷密度, C/m<sup>3</sup>; $\varepsilon_0$ 为空气介电常数,F/m;J为电流密度,A/m<sup>2</sup>; E 为电场强度,V/m;b 为离子迁移率,m<sup>2</sup>/(Vs);u为 流体速度,m/s。由于离子速度远高于流体速度<sup>[2,4]</sup>, 实际模拟中忽略了气体风速的影响。

颗粒荷电采用了 Lawless 模型, 该模型综合包 括了电场荷电和扩散荷电的影响。颗粒运动采用 拉格朗日法进行模拟, 主要考虑了电场力和流体曳 力作用。对亚微米颗粒, 计算中考虑了 Cunningham 修正因子。流体对颗粒的湍流作用则通过离散相 的随机轨道模型进行模拟。颗粒粒径分别为 0.1、 0.25、0.5、0.75、1.0、2.5、5.0 和 10 μm, 颗粒密度为 2 100 kg/m<sup>3</sup>, 颗粒浓度为 200 mg/m<sup>3</sup>。由于颗粒浓 度很低, 因此模拟计算中不考虑颗粒之间的相互作 用以及颗粒对气体的影响。模拟计算时每种粒径 颗粒的初始跟踪数均为 3 000 个, 不同粒径颗粒的 除尘效率见式(5)。

$$\eta_i = N_i / N_{0i} \tag{5}$$

式(5)中, $\eta_i$ 为不同粒径颗粒的除尘效率, $N_i$ 为 该粒径颗粒的补集个数, $N_{0i}$ 为该粒径颗粒的初始 跟踪数。

线板式除尘器由收尘板和电晕线组成,其中收 尘板间距 150 mm,长 600 mm,电晕线位于除尘器 的中心,直径分别为 1.5、1.0 和 0.5 mm。静电除尘 器的结构见图 1。坐标原点与电晕线重合,*x* 轴方 向与收尘板平行。



图 1 静电除尘器结构示意图

计算中采用的边界条件见表1。

表 1 模拟计算采用的边界条件

位置	流场	电压	电荷密度	颗粒
入口	$1.0$ , $0.8$ , $0.6 \mathrm{m \cdot s^{-1}}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial \rho_i / \partial n = 0$	逃逸
出口	压力出口	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial \rho_i/\partial n=0$	逃逸
电晕线	壁面	45、40、35 kV	$\rho_i = \rho_w$	反弹
收尘板	壁面	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial \rho_i / \partial n = 0$	捕集

电场的计算采用 Kaptzov 假设,认为在电晕放 电过程中,电晕线表面的电场强度保持不变,其值 由 Peek 公式计算得出。在模拟计算过程中,需及 时调整电晕线表面的电荷密度(ρ<sub>w</sub>),从而使模拟得 到的电晕线表面电场强度与 Peek 公式计算结果—致。

### 2 结果与讨论

(4)

#### 2.1 电晕线直径对电晕电场的影响

电晕线直径为 1.5 mm 时的电压和电荷密度分 布见图 2。



图 2 可见,电压在除尘器内呈椭圆形分布,电晕 线处电压最高,向四周逐渐减小。电荷密度也呈椭圆 形分布,电晕线周围电荷密度高,向四周则快速减小。 收尘板附近的电场分布对除尘器的性能有重 要影响。电晕线直径对收尘板处电荷密度和电场 强度分布的影响见图 3。



图 3 电晕线直径对电荷密度、电场强度分布影响(收尘板)

图 3 可见, 电荷密度和电场强度在收尘板处 的分布很不均匀, 在垂直电晕线的位置电荷密度 和电场强度最大, 向两侧则快速减小。随着电晕 线直径减小, 电荷密度和电场强度都逐渐增大, 在垂直电晕线的位置提高程度比较显著。电荷 密度和电场强度的增大,都有利于颗粒除尘效率的提高。

不同电晕线直径时,电荷密度和电场强度沿 x=0 直线处的分布(由于对称性,只显示了一半位置 的分布)见图 4。





当电晕线直径从 1.5 mm 减小到 0.5 mm 时,电 晕线附近的电荷密度从 272 μC/m<sup>3</sup>迅速增大到 778 μC/m<sup>3</sup>,且增长幅度逐渐增大,这有利于小颗粒 的脱除,见图 4a。电场强度在电晕线处最大,随着 远离电晕线,电场强度迅速减小,然后再逐渐增 大。随着电晕线直径减小,电晕线附近的电场强度 逐渐减小,且取得最小值的位置逐渐靠近电晕线, 如图 4b 中向下箭头所示,这不利于颗粒的脱除。 在收尘板附近较大区域的电场强度随电晕线直径 的减小而增大,如图 4b 中向上箭头所示,这有利于 颗粒的脱除。

#### 2.2 电晕线直径对除尘效率的影响

电晕线直径对颗粒除尘效率的影响见图 5。

随着电晕线直径的减小,不同粒径颗粒的除尘 效率都逐渐增大(图 5a 中 10 µm 颗粒除外)。颗粒 荷电包括电场荷电和扩散荷电。大颗粒主要以电 场荷电为主,荷电量主要受电场强度影响。电晕线 直径减小时,收尘板附近较大区域的电场强度增大 (图 4b),这有利于大颗粒的荷电和脱除。小颗粒以 扩散荷电为主,荷电量主要受电荷密度和荷电时间 的影响。电晕线直径减小时,电荷密度增大(图 4a), 这有利于小颗粒的荷电和脱除。图 5a 中 10 µm 颗 粒除尘效率随电晕线直径减小而减小,这是由于 45 kV时 10 µm 颗粒的除尘效率已达到 90% 以上, 颗粒主要从电晕线附近最低电场强度的位置 (图 4b 向下箭头)经过逃逸。电晕线直径减小时, 最低电场强度的位置逐渐向电晕线靠近,这更不利 于颗粒的脱除,所以除尘效率反而会降低。当 35 kV 时 10 µm 颗粒的除尘效率相对较低(60.1%),



电晕线直径减小时,从其它位置逃逸的更多颗粒在 增大的电场强度作用下被捕集,从而使除尘效率增 大,见图 5b。



#### 图 5 电晕线直径对除尘效率影响

#### 2.3 电压和风速对不同电晕线直径的影响

电晕线直径不同时,电压对除尘效率的影响见 图 6。

图 6 可见,当电晕线直径较小时,电压增大,小 颗粒和大颗粒的除尘效率都增大,而电晕线直径较大 时,大颗粒除尘效率的增加更显著。这是由于随着电 压增大,静电除尘器内的电荷密度和电场强度都逐渐 增大,从而使颗粒的除尘效率逐渐增大。当电晕线直 径较小时,电压增大可显著提高电荷密度,而电晕线 直径较大时,电荷密度提高相对较少。如电晕线直 径 0.5 mm 时, 电压从 35 增大到 45 kV, 电晕线表面 电荷密度从 419 增大到 778 uC/m<sup>3</sup>, 提高 359 uC/m<sup>3</sup>, 而电晕线直径 1.5 mm 时, 电荷密度从 121 增大到 272 μC/m<sup>3</sup>, 只提高 151 μC/m<sup>3</sup>。

2.5 5 10





电晕线直径为 0.5 mm 时,风速对除尘效率的 影响见图 7。

随着入口风速的减小,颗粒在除尘器内的停留 时间增长,有利于颗粒在电场力作用下向收尘板运 动,从而提高颗粒的除尘效率。同时,停留时间增 长有利于小颗粒的扩散荷电,从而使小颗粒除尘效 率的提高程度相对更显著。模拟表明,风速对不同 电晕线直径的除尘特性影响规律相似,故图7只给 出了电晕线直径 0.5 mm 时的风速对除尘效率影响 规律。



风速对除尘效率影响(电晕线直径 0.5 mm) 图 7

#### 3 结论

1)随着电晕线直径的减小,收尘板的电荷密度 和电场强度都逐渐增大;电晕线附近的电荷密度显 著增大,电场强度逐渐减小,且最低电场强度位置 逐渐向电晕线靠近。电晕线附近电荷密度从 272 增大到 778 μC/m<sup>3</sup>。

2)随着电晕线直径的减小,不同粒径颗粒的除 尘效率都逐渐增大。

3)电晕线直径较小时,电压增大,不同粒径颗 粒的除尘效率都逐渐增大;电晕线直径较大时,大 颗粒除尘效率的提高更显著。

4)随着人口风速减小,不同电晕线直径的除尘 效率都逐渐增大,小颗粒除尘效率的提高程度相对 较显著,0.1 μm 颗粒的除尘效率提高 12.3%。

### 参考文献

- [1] JAWOREK A, MARCHEWICZ A, SOBCZYK A T, et al. Twostage electrostatic precipitators for the reduction of PM2.5 particle emission[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2018, 67: 206 – 233.
- [2] DONG M, ZHOU F, ZHANG Y X, et al. Numerical study on fineparticle charging and transport behaviour in electrostatic precipitators [J]. Powder Technology, 2018, 330: 210 – 218.
- [3] TU G M, SONG Q, YAO Q. Experimental and numerical study of particle deposition on perforated plates in a hybrid electrostatic filter precipitator[J]. Powder Technology, 2017, 321: 143 – 153.
- [4] ADAMIAK K. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review [J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(4): 673 – 680.
- [5] ZHANG L, NINOMIYA Y, WANG Q, et al. Influence of woody biomass (cedar chip) addition on the emissions of PM10 from pulverised coal combustion[J]. Fuel, 2011, 90(1): 77 – 86.
- [6] SIPPULA O, HOKKINEN J, PUUSTINEN H, et al. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(32) :

4855 - 4864.

- [7] MAYNARD A D, KUEMPEL E D. Airborne Nanostructured Particles and Occupational Health[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2005, 7(6): 587 – 614.
- [8] LONG Z W, YAO Q. Evaluation of various particle charging models for simulating particle dynamics in electrostatic precipitators[J]. Journal of Aerosol Science, 2010, 41(7) : 702 – 718.
- [9] JAWOREK A, SOBCZYK A T, KRUPA A, et al. Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 213: 283 – 302.
- [10] ZHUANG Y, KIM Y J, LEE T G, et al. Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators[J]. Journal of Electrostatics, 2000, 48(3/4) : 245 – 260.
- [11] WANG C, XIE Z Q, XU B G, et al. Experimental Study on EHD Flow Transition in a Small Scale Wire-plate ESP[J].
  Measurement Science Review, 2016, 16(3): 134 – 141.
- [12] MIYASHITA H, EHARA Y, INUI T, et al. Particle Behavior Analysis in Hole-type Electrostatic Precipitator using PIV[J].
  IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4857 – 4863.
- [13] SHEN H, YU W X, JIA H W, et al. Electrohydrodynamic flows in electrostatic precipitator of five shaped collecting electrodes[J]. Journal of Electrostatics, 2018, 95: 61 – 70.
- [14] FENG Z B, LONG Z W, CAO S Q, et al. Characterization of electrohydrodynamic (EHD) flow in electrostatic precitators (ESP) by numerical simulation and quantitative vortex analysis[J]. Journal of Electrostatics, 2018, 91: 70 – 80.
- [15] FENG Z B, LONG Z W, ADAMIAK K. Numerical simulation of electrohydrodynamic flow and vortex analysis in electrostatic precipitators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 404 – 412.
- [16] ARIF S, BRANKEN D J, EVERSON R C, et al. CFD modeling of particle charging and collection in electrostatic precipitators[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 84: 10 – 22.
- [17] LU Q Y, YANG Z D, ZHENG C H, et al. Numerical simulation on the fine particle charging and transport behaviors in a wireplate electrostatic precipitator[J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(5): 1905 – 1911.