

大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201711058

中图分类号 X513

文献标识码 A

向晓东, 朱青松, 常玉锋, 等. 侧流电除尘增效机理与检验 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(6): 1720-1724.

XIANG Xiaodong, ZHU Qingsong, CHANG Yufeng, et al. Collection enhancement mechanism and test of side flow electrostatic precipitation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(6): 1720-1724.

侧流电除尘增效机理与检验

向晓东^{1,*}, 朱青松¹, 常玉锋¹, 石零²

1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081

2. 江汉大学工业烟尘污染控制湖北省重点实验室, 武汉 430056

第一作者: 向晓东 (1958—), 男, 博士, 教授, 博导, 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 针对现有许多电除尘器难以满足日益严苛的颗粒物排放要求而面临提效改造的现状, 根据经典电除尘理论, 降低电场风速是电除尘器提效的一个有效途径, 进而提出一种通过改变烟气流向成倍降低电场风速的侧流电除尘器。首先, 为阐明侧流电除尘器的增效机理, 基于已有的关于紊流情况下流速对颗粒悬浮作用的研究结果, 通过受力分析给出了在有悬浮升力影响下带电颗粒的电除尘效率理论表达式, 证明了降低电场风速的增效作用比增加电场长度更有效。然后, 在极配结构和处理流量相同、平均入口含尘浓度约 $1400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和场强在 $2.5\sim 4.5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的情况下, 采用中位径为 $3.5 \mu\text{m}$ 的硅微粉进行了侧流电除尘器和常规电除尘器的减排效果对比实验研究。结果表明, 侧流电除尘器的平均排放浓度比常规电除尘器降低 45%, 减排作用突出。

关键词 电除尘器; 除尘效率; 透过率

电除尘器因具有耐温、低阻、高效、运行费用低等特点而在颗粒物排放控制中得到广泛应用^[1]。虽然电除尘器对烟气中粗颗粒的收集效率超过 99%, 但对细颗粒的捕集效率较低^[2-3]。随着环保标准日益严格^[4], 现有电除尘器往往很难实现达标排放^[5]。因此, 电除尘器提效已成为目前除尘技术领域亟待解决的热点问题之一。

电除尘技术研究进展表明, 电极结构改进是电除尘器提效的主要方法之一, 其主导思想是: 改善电场和流场分布、发挥电力与空气动力耦合作用、增强粉尘荷电、减少二次扬尘、利用静电凝并效应等。于是, 先后出现了横向极板电除尘器^[6]、宽极距电除尘器^[7]、静电凝并电除尘器^[8]、辅助电极电除尘器^[9]、移动电极电除尘器^[10]、横向双极电除尘器^[11]等。然而, 到目前为止, 无论何种电除尘器, 都没有改变烟气直进直出的主流向, 如图 1 所示。

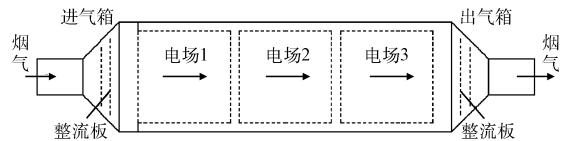


图1 常规电除尘器的烟气流向示意图

Fig. 1 Gas flow direction in conventional ESP

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega L}{vb}\right), \quad \omega = \frac{Eq}{3\pi\mu d_p} \quad (1)$$

式中: ω 为电场风速分布均匀情况下带电颗粒的驱进速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; L 为电场长度, m ; v 为平均电场风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; b 为线板距 (异极距), m ; E 为电场强度, $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$; q 为颗粒荷电量, C ; μ 为空气动力黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; d_p 为颗粒直径, m 。

根据式(1),增加电场数量(即增加电场总长度)是一种简单的提效方法^[12],降低电场风速,同样也能提高除尘效率。然而,工业电除尘器的电场风速通常是按 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右设计的,降低风速意味着减少烟气处理量,这有可能无法满足原有除尘系统的运行要求。但是,如果把常规电除尘器的直进直出的烟气主流向改为侧进侧出的侧流式,降低电场风速将成为可能,如图2所示。

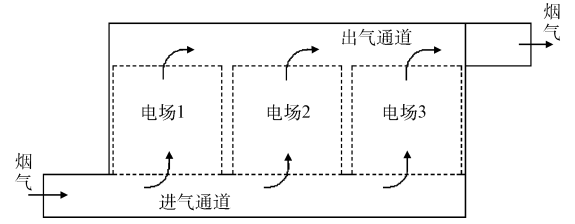


图2 侧流电除尘器的烟气流向示意图

Fig. 2 Gas flow direction in side flow ESP

常规电除尘器(图1)和侧流电除尘器(图2)相比,处理烟气量和烟气在电场中的停留时间相同,但图2的电场风速降低3倍,这样就能充分发挥每个电场对微尘的捕尘作用。

显然,在侧流电除尘器的电场中存在流场分布不均匀问题,但如果能通过实验证明侧流电除尘器的除尘效果有明显提升,那么,侧流电除尘器的创新是有颠覆性的。

1 机理分析

多依奇公式(1)是在电场风速分布均匀、无二次扬尘的假设下建立的。为阐明侧流电除尘器增效机理,探讨流速对颗粒静电沉降的影响是有意义的。

电除尘器中的流态为紊流,极板间的气流可近似看作在“长通道”中的流动。在紊流中,颗粒所受悬浮作用力包括压差升力、紊流脉动、黏性剪切力等^[13]。王光谦等^[14]给出紊流对颗粒综合升力为:

$$L_a = \alpha v^2 \quad (2)$$

式中: α 为系数,与流体和颗粒的密度、颗粒质量、颗粒与边壁的距离有关。

由静电学原理,带电颗粒在电场中受力为:

$$F_E = qE \quad (3)$$

带电颗粒向极板运动的阻力服从著名的斯托克斯阻力公式^[15]:

$$f = 3\pi\mu d_p \omega_e \quad (4)$$

式中: ω_e 为有紊流悬浮作用影响下的带电颗粒的驱进速度。

于是可建立受力平衡方程:

$$F_E - L - f = 0 \quad (5)$$

将式(2)、(3)、(4)代入方程(5),解得在有空气动力悬浮作用影响下带电颗粒的驱进速度为:

$$\omega_e = \frac{Eq}{3\pi\mu d_p} - \frac{\alpha}{3\pi\mu d_p} v^2 = \omega - kv^2 \quad (6)$$

式中: $k = \frac{\alpha}{3\pi\mu d_p}$ 。

式(6)表明,带电颗粒的实际驱进速度与风速呈平方衰减。于是,有风速影响下的电除尘效率理论式为:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{(\omega - kv^2)L}{vb}\right] \quad (7)$$

式(7)表明降低电场风速的增效手段比增加电场长度更有效。

2 实验部分

2.1 实验装置

图 3 和图 4 分别为侧流电除尘和常规电除尘实验装置，二者极配完全相同。收尘极板采用 3 块 620 mm×300 mm 的不锈钢板，电晕线为 6 根直径为 1 mm 不锈钢丝，线板距 100 mm。

高压电源为 BGG 型负高压电源 (60 kV/5 mA)。实验选取外加电压 25~45 kV。常温下，侧流电除尘和常规电除尘实验装置的伏安特性几乎完全重合，见图 5。图 5 表明，在 25~45 kV 范围内，伏安特性曲线单调稳定，能充分起晕，对应的平均场强为 2.5~4.5 kV·cm⁻¹。

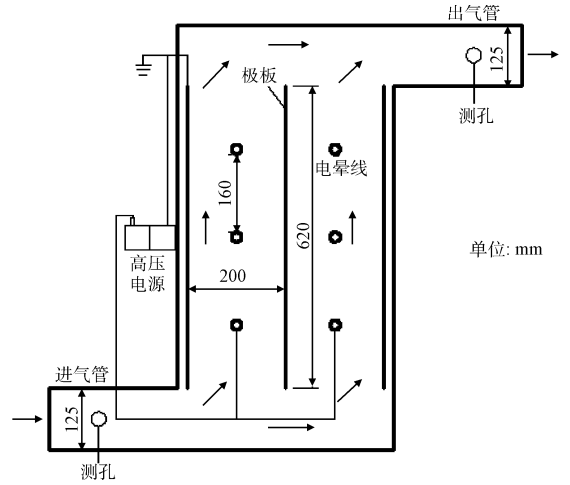


图 3 侧流电除尘实验装置

Fig. 3 Test device of side flow ESP

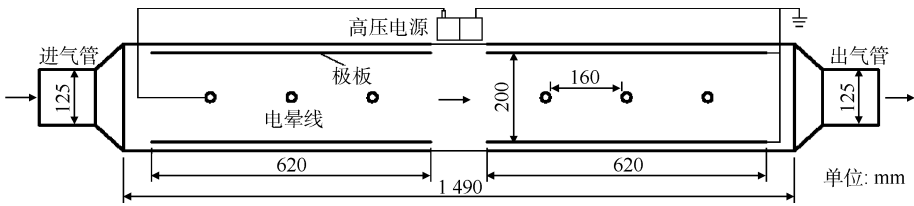


图 4 常规电除尘器实验装置

Fig. 4 Test device of conventional ESP

2.2 除尘实验

实验采用中位径为 3.5 μm 的硅微粉，粒度分布如图 6 所示。

粉尘浓度测定采用 CCD-304 动压平衡烟尘采样仪，滤筒称重采用 AL204 电子天平 (精度 0.1 mg)，风速测定采用 KA23 风速仪。实验流量定为 216 m³·h⁻¹，此时对应的常规电除尘的电场风速为 1 m·s⁻¹，侧流电除尘的电场风速为 0.5 m·s⁻¹。入口粉尘浓度控制在 1 400 mg·m⁻³ 左右，采样时间 5 min。

在场强 2.5~4.5 kV·cm⁻¹ 范围内对比实验分 5 组，每组实验重复 3 次，实验结果列于表 1 中。

结果表明，侧流电除尘效率平均值优于常规电除尘器。如果引入减排比的概念能更好地定量评价电除尘器的减排效果：

$$\lambda = \frac{P_A - P_B}{P_A} \times 100\% \quad (8)$$

式中：λ 为减排比，%；P_A 为常规电除尘透过率，%；P_B 为侧流电除尘透过率，%。

透过率的定义为：

$$P = (1 - \eta) \times 100\% \quad (9)$$

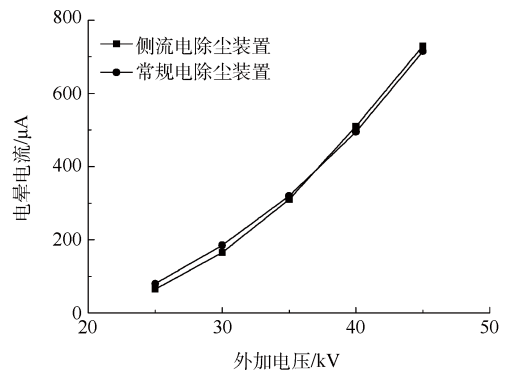


图 5 侧流电除尘和常规电除尘实验装置的伏安特性

Fig. 5 V-I characteristics of side flow ESP and conventional ESP

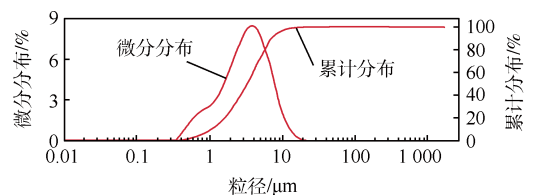


图 6 硅微粉的粒度分布

Fig. 6 Particle size distribution of silica powder

根据表1中的效率平均值,由式(9)可分别计算出常规电除尘透过率和侧流电除尘透过率。然后由式(8)得出减排比 λ 。5组实验的减排比 λ 在41%~49%之间,平均值为45%。也就是说,在同等条件下,侧流电除尘的排放浓度下降幅度约45%。

表1 常规电除尘和侧流电除尘的除尘效率
Table 1 Collection efficiency of conventional ESP and side flow ESP

| 电场强度/ (kV·cm ⁻¹) | 电除尘 | 入口浓度/ (g·m ⁻³) | 出口浓度/ (g·m ⁻³) | 效率/ % | 透过率/ % | 平均效率/ % | 平均透过率/ % | 减排比/ % |
|---------------------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|----------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 2.5 | 常规 | 1.316 | 0.187 | 85.79 | 14.21 | 86.61 | 13.39 | 49 |
| | | 1.328 | 0.171 | 87.12 | 12.88 | | | |
| | | 1.315 | 0.172 | 86.92 | 13.08 | | | |
| | 侧流 | 1.298 | 0.107 | 91.76 | 8.24 | 93.20 | 6.80 | |
| | | 1.349 | 0.074 | 94.51 | 5.49 | | | |
| | | 1.426 | 0.095 | 93.34 | 6.66 | | | |
| 3 | 常规 | 1.357 | 0.119 | 91.23 | 8.77 | 91.55 | 8.45 | 42 |
| | | 1.324 | 0.105 | 92.07 | 7.93 | | | |
| | | 1.354 | 0.117 | 91.36 | 8.64 | | | |
| | 侧流 | 1.418 | 0.077 | 94.57 | 5.43 | 95.13 | 4.87 | |
| | | 1.364 | 0.062 | 95.45 | 4.55 | | | |
| | | 1.297 | 0.060 | 95.37 | 4.63 | | | |
| 3.5 | 常规 | 1.378 | 0.083 | 93.98 | 6.02 | 94.03 | 5.97 | 41 |
| | | 1.354 | 0.089 | 93.43 | 6.57 | | | |
| | | 1.301 | 0.069 | 94.70 | 5.30 | | | |
| | 侧流 | 1.422 | 0.048 | 96.62 | 3.38 | 96.48 | 3.52 | |
| | | 1.376 | 0.055 | 96.00 | 4.00 | | | |
| | | 1.381 | 0.044 | 96.81 | 3.19 | | | |
| 4 | 常规 | 1.427 | 0.071 | 95.02 | 4.98 | 95.03 | 4.97 | 45 |
| | | 1.321 | 0.064 | 95.16 | 4.84 | | | |
| | | 1.319 | 0.067 | 94.92 | 5.08 | | | |
| | 侧流 | 1.457 | 0.029 | 98.01 | 1.99 | 97.26 | 2.74 | |
| | | 1.439 | 0.044 | 96.94 | 3.06 | | | |
| | | 1.319 | 0.042 | 96.82 | 3.18 | | | |
| 4.5 | 常规 | 1.347 | 0.049 | 96.36 | 3.64 | 96.83 | 3.17 | 46 |
| | | 1.416 | 0.039 | 97.25 | 2.75 | | | |
| | | 1.417 | 0.044 | 96.89 | 3.11 | | | |
| | 侧流 | 1.348 | 0.032 | 97.63 | 2.37 | 98.29 | 1.71 | |
| | | 1.399 | 0.011 | 99.21 | 0.79 | | | |
| | | 1.417 | 0.028 | 98.02 | 1.98 | | | |

3 结论

1) 侧流电除尘器在不改变烟气处理量的情况下能实现电场风速的成倍降低。通过电除尘机理分析发现,降低电场风速的提效作用不仅是因为增加了颗粒物在电场中的停留时间,更重要的是能大幅度消减空气动力对带电颗粒静电沉降的阻碍作用。因此,采取降低电场风速的增效方法比增加电场长度更有效。

2) 具有2个电场的侧流电除尘和常规电除尘对比实验表明,采用中位径为3.5 μm的硅微粉,在实验条件完全同等情况下,侧流电除尘的颗粒物平均排放浓度比常规电除尘下降约45%。

3) 侧流式电除尘器只是改变了流向,并没有改变电极结构,也没有增加占地面积,有利于现有

电除尘器的升级改造。

参考文献

- [1] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 电除尘行业 2015 年发展综述 [J]. 中国环保产业, 2016, 22(7): 16-25.
 - [2] HE Z J, MOHAN E T, KARTHIK G. Design of electrostatic precipitator to remove suspended micro particulate matter from gas turbine inlet airflow: Part I. Experimental study[J]. Journal of Aerosol Science, 2017, 108(6): 14-28. DOI:10.1016/j.jaerosci.2017.03.003.
 - [3] 胡志光, 贾博强. 中国电除尘器与袋式除尘器的现状比较与分析 [J]. 环境科学与管理, 2012, 28(12): 60-68.
 - [4] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 钢铁烧结, 球团工业大气污染物排放标准: GB 28664-2012[S]. 北京: 中国环境出版社, 2012.
 - [5] 张滨渭. 燃煤电厂烟尘排放状况及分析 [C]//中国环境保护产业协会电除尘委员会. 第 15 届中国电除尘学会会议论文集, 2013: 237-245.
 - [6] MASUDA S. Handbook of Electrostatic Process (Electrostatic Precipitation)[M]. New York: Marcel Dekker, 1997.
 - [7] GOLKOWSKI C, CHOJNOWSKI M. The role of electrode spacing in the performance of the electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 1983, 14(3): 339-348. DOI:10.1016/0304-3886(83)90030-X.
 - [8] KOIZUMI Y, KAWAMURA M, TOCHIKUBO F, et al. Estimation of the agglomeration coefficient of bipolar-charged aerosol particles[J]. Journal of Electrostatics, 2000, 48(2): 93-101. DOI:10.5194/aep-12-11767-2012.
 - [9] 潘大光. 带辅助电极的三电极电除尘器的基本工作原理及其应用 [J]. 电力环境保护, 1990, 6(1): 49-53.
 - [10] MASUDA S, MOON J. Electrostatic precipitation of carbon soot from diesel engine exhaust[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1983, 19(6): 1104-1111. DOI:10.1109/TIA.1983.4504342.
 - [11] XIANG X D, CHANG Y F, NIE Y T. Investigation of the performance of bipolar transverse plate ESP in the sintering flue control[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 76(4): 18-23. DOI:10.1016/j.elstat.2015.04.003.
 - [12] OGLESBY S, NICHOLS G B. 电除尘器 [M]. 谭天祐, 译. 北京: 水利电力出版社, 1983.
 - [13] 邵学军, 夏震寰. 紊动流场中悬浮颗粒分布的随机理论 [J]. 力学学报, 1991, 33(1): 28-35.
 - [14] 王光谦, 倪普仁. 再论悬移质浓度垂线分布的两种类型其产生的原因 [J]. 水动力学研究与进展, 1991, 6(4): 60-71.
 - [15] MERCER T T. Aerosol technology[J]. Journal of Aerosol Science, 1983, 14(2): 175-176. DOI:10.1016/0021-8502(83)90049-6.
- (本文责任编辑: 郑晓梅)

Collection enhancement mechanism and test of side flow electrostatic precipitation

XIANG Xiaodong^{1,*}, ZHU Qingsong¹, CHANG Yufeng¹, SHI Ling²

1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China
2. Hubei Key Laboratory of Industrial Fume & Dust Pollution Control, Jiangnan University, Wuhan 430056, China

Abstract Nearly all electrostatic precipitators (ESPs) have to be reformed to improve the collection performance nowadays since the particulate emission standard is becoming more and more rigorous. According to the classical collection theory, it is noticed obviously that to reduce the gas velocity in the electric field is one of the most effective ways of the collection efficiency enhancement. Thus, a side flow ESP is proposed. The gas velocity in the electric field of this ESP can be greatly reduced while the gas flow rate keeps no change. Firstly, based on the results of other researchers about the relation of the lift force and gas velocity in turbulent flow, a theoretical expression of the collection efficiency is derived from the balance equation of the lift force and the electric force acting upon the charged particles. It is proved that the efficiency enhancement effect of decreasing the gas velocity in the electric field is more effective than that of increasing the field length. And then, the comparison experiment of the collection efficiency is carried out. The silica powder with 3.5 μm medium diameter is used in the experiment. The average inlet dust concentration is about 1 400 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. The electric field strength is in the range from 2.5 to 4.5 $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. The experimental results have shown that the emission concentration of side flow ESP is 45% lower than that of the conventional ESP under the same electrode configuration and gas flow rate.

Key words electrostatic precipitator (ESP); collection efficiency; particle penetration