



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201906006

中图分类号 X964

文献标识码 A

张建平, 高鹏飞, 徐达成, 等. 不同烟气流速下线板式电除尘器中磁场效应验证[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3121-3127.

ZHANG Jianping, GAO Pengfei, XU Dacheng, et al. Verification of magnetic field effect in a wire-plate electrostatic precipitator at different flue gas velocities[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3121-3127.

不同烟气流速下线板式电除尘器中磁场效应验证

张建平^{1,*}, 高鹏飞², 徐达成², 田璐羽¹, 朱莹冰¹, 祝慧丰¹, 贾程毅¹

1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093

2. 上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 200090

第一作者: 张建平(1972—), 男, 博士, 教授。研究方向: 电磁除尘技术。E-mail: jpzhanglzu@163.com

*通信作者

摘要 为进一步提高线板式静电除尘器(ESP)的除尘效果、减少细微颗粒物随烟气的逃逸, 将磁场引入其中, 模拟了特征颗粒粒径 2.5 μm、工作电压 50 kV 条件下的除尘效率, 探究了不同烟气流速下磁场对细微颗粒物捕集性能的影响。结果表明: 磁场能有效改变带电颗粒的运动轨迹, 大幅度提高细微颗粒物的除尘性能; 颗粒在低烟气流速条件下, 偏向收尘板的趋势更明显, 更有利于颗粒物的捕集; 外加磁场在高烟气流速时对除尘效率提升作用更显著, 且这一提升幅度随着磁感应强度的增大而不断增大并趋于平缓; 随着磁感应强度不断减小, 烟气流速降低除尘效率的幅度逐步增大, 直至无磁场环境时达到最大。以上研究结果可为磁场在静电除尘器的应用提供参考, 对改善 ESP 的除尘性能具有重要意义。

关键词 烟气流速; 静电除尘器; 磁场效应; 细微颗粒物; 捕集性能

近年来, 由于世界范围内的工业发展, 人们越来越重视污染物排放^[1-2]。静电除尘器(ESP)作为一种能够有效地从干或湿空气流中去除细微颗粒物的装置^[3-4], 被广泛应用于各种工业领域生产设施中的尾气处理^[5-7], 其总体除尘效率超过 99%, 并且具有效率高、阻力小、适用性强等优点。然而, 由于细颗粒携带的电荷较低, 传统的静电除尘器对亚微米颗粒的去除率相对较低, 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, 这些细微颗粒物很可能被人体吸入肺部而引起各种呼吸道疾病, 特别是对儿童和老年人造成巨大的健康危害^[8-9]。因此, 提高静电除尘器对细微颗粒物的捕集性能, 使其满足更严格的排放标准, 已成为目前亟待解决的问题。

国内外学者对影响静电除尘器除尘效率的因素开展了较深入的研究, 而烟气流速作为影响其性能的主要参数一直被广泛关注^[10-11]。东明等^[12]分析了不同烟气流速下静电除尘器的捕集性能, 得出了烟气流速越大, 颗粒捕捉效果越差、除尘性能就越低的结论。周海军^[13]探究了烟气流速对除尘效率的影响, 并对引起烟气流速变化的原因及其最佳选取值进行了深入讨论。为了测试不同环境下烟气流速对 ESP 除尘性能的影响, 沈之昉等^[14]针对宽间距 ESP 内大流量高温烟气中的细微颗粒物进行了研究, 揭示了温度和烟气流速等关键因素对细微颗粒物静电捕捉的影响规律。

将磁场引入到 ESP 中, 因其具有良好的性能表现, 从而受到了广泛的重视^[15-20]。磁分离技术

收稿日期: 2019-06-01; 录用日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572187); 上海市科学技术委员会项目(18DZ1202105, 18DZ1202302)

最早应用于工业中金属粒子的分离^[21-22]，之后将其引入到 ESP^[17,20]，发现其可以有效地提高除尘效率。孙英浩^[23]分析了磁增强电晕放电的放电特性及其对细微颗粒物的荷电机理。米俊锋等^[24]比较了磁增强预荷电器和传统预荷电器的荷电效率，揭示了磁增强电晕放电的放电机理。毕业武等^[25]研究了磁增强负电晕放电特征，分析了这一过程的放电特性和磁场对极间不同区域的影响。ELABBAS^[26]的研究表明，放电电极附近磁场的增强对放电电流的增加有显著影响。ZHANG 等^[27]发现磁场对静电除尘器的捕集性能的提高具有促进作用。

鉴于上述研究成果，为了更好地展现磁场对 ESP 颗粒物除尘效率的影响，本研究建立了磁场环境下静电除尘器的多场耦合模型，基于不同的烟气流速，探究 ESP 中同种颗粒的运动特性和捕集性能，以期揭示磁场的贡献及其规律，并为设计新型 ESP 提供参考。

1 磁场理论模型的构建

1.1 气体流场

烟气流动满足质量守恒方程(连续性方程)和动量守恒方程^[28](Navier-Stokes 方程)，方程见式(1)和式(2)。

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu_{\text{eff}} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i^2} + S_j \quad (2)$$

式中： ρ_g 为烟气密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； u_i 和 u_j 为气体速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； p 为气体平均静压，Pa； μ_{eff} 为有效扩散系数， $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ ； μ 为气体动力黏性系数， $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ ； μ_t 为湍流动力黏性系数， $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ ； S_j 为广义源项； i 和 j 分别代表 x 和 y 方向。

1.2 电磁场

对于线板式静电除尘器，在电晕稳定放电的情况下，可由 Poisson 方程和电流连续性方程^[29]描述其计算过程，方程见式(3)和式(4)。

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\nabla^2 U = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (4)$$

式中： \vec{E} 为电场强度， $\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$ ； U 为电势，V； ϵ_0 为真空介电常数， $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ； ρ 为空间电荷密度， $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ ， \vec{J} 为电流密度矢量，可分为 x 和 y 方向的分量， $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

电流密度的计算方法可以简化为式(5)。

$$\vec{J} = \rho b_{\text{ion}} \vec{E} \quad (5)$$

式中： b_{ion} 为离子迁移率， $\text{m}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$ ； ρ 为空间电荷密度， $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

结合电场强度的表达式 $\vec{E} = -\nabla U$ ，式(5)可表示为式(6)。

$$\vec{J} = -\rho b_{\text{ion}} \nabla U \quad (6)$$

考虑离子迁移率为常数($\nabla b_{\text{ion}} = 0$)，结合式(3)和式(4)，可得电流连续性方程(式(7))。

$$\nabla U \cdot \nabla \rho = \rho^2 / \epsilon_0 \quad (7)$$

需要指出的是，本研究引入的线板式 ESP 中的磁场是稳恒的，在时间和空间上是不变的，不涉及方程组的求解。

1.3 颗粒动力场

细微颗粒物在外加磁场作用下， x - y 坐标下的动量方程包含颗粒惯性力、洛伦兹力、电场力和

拖曳力，由于细微颗粒物质量很小，重力被忽略，则具体颗粒动力场动量方程见式 (8)。

$$m_p \frac{du}{dt} = F_m + F_e + F_D \tag{8}$$

式中： m_p 为颗粒质量，kg； u 为运动速度， $m \cdot s^{-1}$ ； F_m 为洛伦兹力 ($F_m = Q_p v_p B$ ，其中 $Q_p = Q_{diff} + Q_{sat}$ ， Q_{diff} 为扩散荷电带电量， Q_{sat} 为电场荷电带电量， v_p 为颗粒作回转的运动速度， B 为磁感应强度)； F_e 为电场力 ($F_e = Q_p E$)； F_D 为拖曳力 ($F_D = m_p F_d$ ， F_d 指的是颗粒和黏性流体进行相对运动时，流体作用于颗粒上的阻碍物体相对运动的力， $F_d = \frac{1}{2} A_p \rho_g C_D (u_g - u_p) |u_g - u_p|$ ， A_p 为颗粒的迎风面积， u_g 和 u_p 分别为烟气平均流速 \bar{u}_g 和尘粒平均速度 \bar{u}_p 的标量值， C_D 是气流和颗粒间的阻力系数)。

2 结果与讨论

2.1 网格无关性验证

图 1 为二维线板式 ESP 的网格划分图。这里将计算区域分为 3 个电晕区和其他部分。由于电

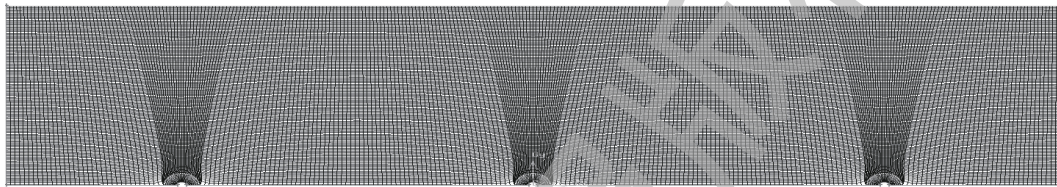


图 1 ESP 网格图

Fig. 1 Mesh diagram of ESP

晕区附近的电势梯度较高，因此，需要对这一区域的网格进行细化，以确保计算的准确性。

不同网格数量下线板式 ESP 的除尘效率及其相对误差结果如图 2 所示。可以看出，随着网格数量的增加，除尘效率的相对误差呈下降的趋势。当网格数量为 41 440 个时，相对误差达到最小，仅为 1.5%，可满足工程实际计算的要求，因此，选择此网格数进行计算。

2.2 可靠性验证

Deutsch-Anderson(D-A) 公式是目前计算分级除尘效率普遍采用的公式，能准确地反映实际工况。为了使数值结果更加可靠，这里计算了与已有研究^[30]相同结构和工况下的线板式 ESP 分级除尘效率，并与 D-A 公式的计算结果进行了对比，结果如图 3 所示。可以看出，相比 D-A 公式，本研究的数值模拟结果更加接近于文献实验数据，分级效率的计算精度更高，从而验证了本研究理论数值模型及计算方法的可靠性。

2.3 不同烟气流速下的磁场效应

为了直观地考察磁场效应对颗粒轨迹的影响情况，本研究给出了工作电压为 50 kV 时 2.5 μm 粒径颗粒在线板式 ESP 的运动轨迹，如图 4 所

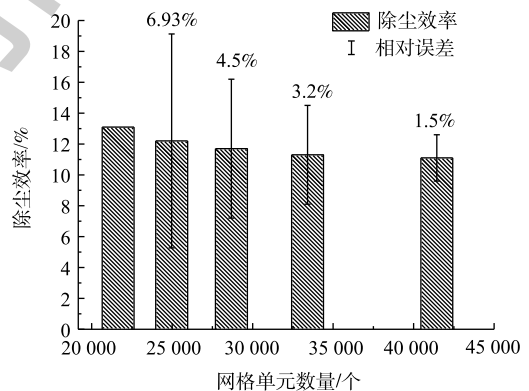


图 2 网格无关性验证

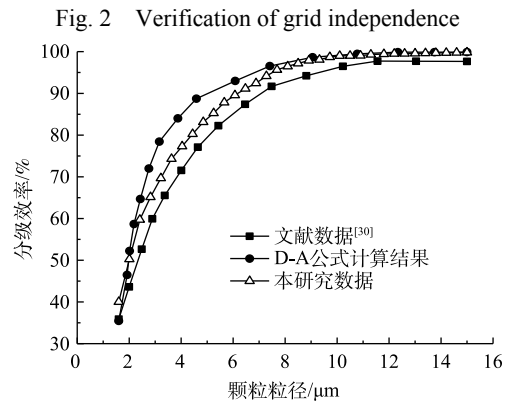


图 3 分级效率的对比

Fig. 3 Comparisons of grade efficiency

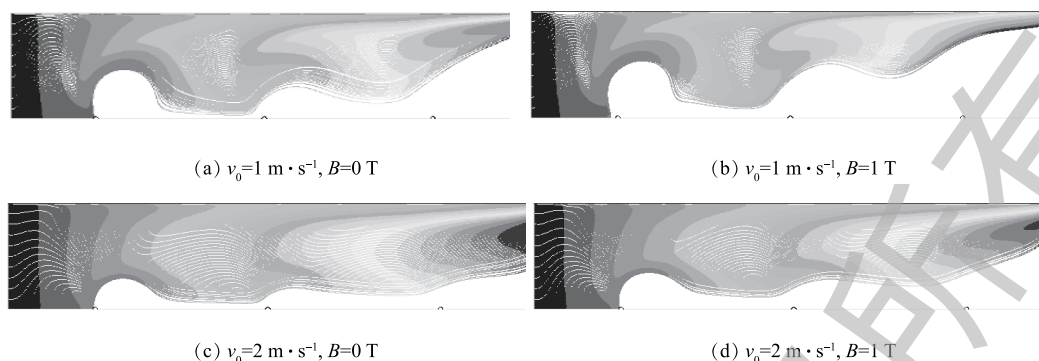


图4 有无外加磁场作用下的颗粒运动轨迹

Fig. 4 Particle trajectories with or without external magnetic field

示。可以发现：在同一烟气流速下，外加磁场作用时，颗粒的运动轨迹更偏向于收尘板，这是由于磁场产生的洛伦兹力使得颗粒在ESP中作螺旋运动，颗粒荷电更充分，促进了颗粒的捕集作用；在同一外加磁场环境中，随着烟气流速的变小，颗粒更易靠近收尘板，这是因为烟气流速越小，颗粒停留时间越长，扩散荷电作用更明显，有利于颗粒的捕获。

图5反映了不同烟气流速下磁感应强度对颗粒除尘效率的影响。可以发现：不论是否存在外加磁场，除尘效率均随着烟气流速的增大不断下降，且下降幅度逐步减小；在同一烟气流速下，相比无磁场环境，磁场效应能有效地提高除尘效率，并且随着磁感应强度的增大，除尘效率呈增大的趋势；随着烟气流速的增大，除尘效率随磁感应强度变化的上升曲线越陡峭，说明磁场作用在高烟气流速下对ESP除尘性能的提升幅度更大；相邻2条曲线的除尘效率差值逐渐减小，表明烟气流速削弱除尘效率的程度在低磁感应强度时更大，且在外加磁场时最大。

不同磁感应强度下除尘效率随速度的变化情况如图6所示。可以看出：随着烟气流速的增大，除尘效率均呈非线性下降的趋势，并逐渐趋于平缓，而相邻2条曲线的差值逐渐变大，也说明了低烟气流速下磁场对颗粒物除尘效率的贡献更小；磁感应强度越大，除尘效率随速度变化的下降曲线越缓慢，说明烟气流速降低除尘效率的幅度在高磁感应强度时更小；在同一烟气流速下，磁感应强度越大，颗粒的除尘效率越高，且随着磁感应强度等幅增大，除尘效率的增幅逐步减小，这表明磁场可有效地提高颗粒的捕集效果，但提高幅度随着磁感应强度的增大而降低。

为了进一步分析磁场对颗粒捕集性能的影响，根据图6中的数据，给出了不同烟气流速下贡献率，结果如图7所示。可以看出：随着烟气流速的增大，磁场对颗粒捕集的贡献率均呈增大且

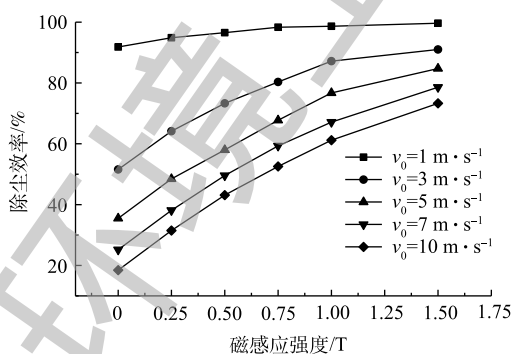


图5 除尘效率随磁感应强度的变化

Fig. 5 Change of collection efficiency with magnetic induction intensity

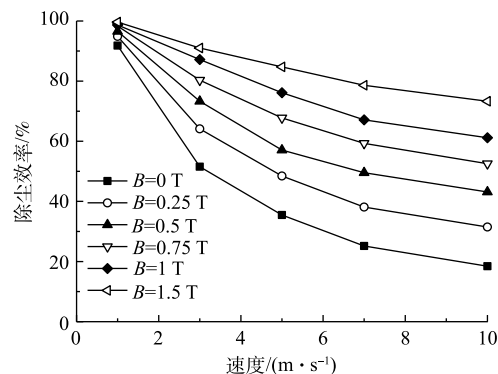


图6 除尘效率随烟气流速的变化

Fig. 6 Change of collection efficiency with flue gas flow rate

逐渐变缓的趋势, 相邻 2 条曲线的差值逐渐增大, 同样说明了高烟气流速下外加磁场的贡献率更显著; 在同一烟气流速下, 磁感应强度的增大使得 ESP 中同种颗粒除尘效率的贡献率不断增大, 而增幅逐步减小, 这也表明磁场对颗粒捕集的促进效果随着磁感应强度的增大而不断减小。

3 结论

1) 无论烟气流速为何值, 磁场环境下 ESP 的除尘效率均更高, 证明磁场的引入可有效提高高线板式 ESP 的除尘性能。

2) 随着烟气流速的增大, 颗粒的除尘效率逐渐下降, 而外加磁场对其贡献逐渐升高, 说明高烟气流速时磁场效应更明显。

3) 在磁感应强度不断增大时, 烟气流速对除尘效率的削弱程度逐步降低, 且同种颗粒的除尘效率逐渐增大, 但增长幅度不断较小, 表明磁场对除尘性能的贡献程度随着磁感应强度的减小而逐步增大。

参考文献

- [1] 李云燕, 殷晨曦. 京津冀地区PM_{2.5}减排实效与影响因素的门槛效应[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1223-1230.
- [2] 高捷, 陈浩, 杜乐. 燃煤电厂烟尘排放标准分析及超低排放技术探讨[J]. *环境与发展*, 2018, 30(10): 97-99.
- [3] LI S R, HUANG Y F, ZHENG Q Z, et al. A numerical model for predicting particle collection efficiency of electrostatic precipitators[J]. *Powder Technology*, 2019, 347: 170-178.
- [4] GAO M X, ZHU Y, YAO X, et al. Dust removal performance of two-stage electrostatic precipitators and its influencing factors[J]. *Powder Technology*, 2019, 348: 13-23.
- [5] HE Z, DASS E T M. Correlation of design parameters with performance for electrostatic precipitator. Part I. 3D model development and validation[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2018, 57: 633-655.
- [6] PARKER K R. *Applied Electrostatic Precipitation*[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [7] 杜振, 王丰吉, 刘强, 等. 湿式除尘器多种污染物协同脱除效果分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(5): 100-103.
- [8] SUN W, LIU X W, XU Y S, et al. Effects of the modified kaolin sorbents on the reduction of ultrafine particulate matter (PM_{0.5}) emissions during pulverized coal combustion[J]. *Fuel*, 2018, 215: 153-160.
- [9] GUTIERREZ O F J, NAVARRETE B, CANADAS L. Dimensional analysis for assessing the performance of electrostatic precipitators[J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91: 1783-1793.
- [10] DE OLIVEIRA A E, GUERRA V G. Effect of low gas velocity on the nanoparticle collection performance of an electrostatic precipitator[J]. *Separation Science and Technology*, 2018, 45: 1211-1220.
- [11] ISLAMOV R S. Influence of gas velocity on the particle collection and reentrainment in an air-cleaning electrostatic

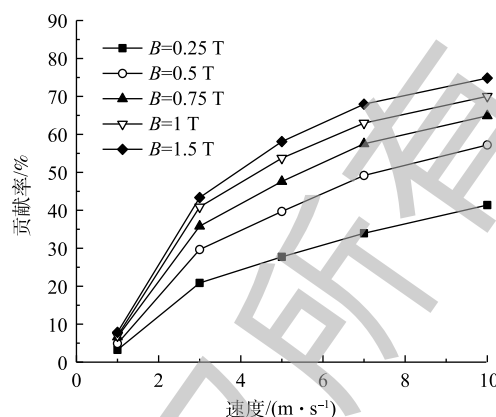


图 7 磁场贡献率随烟气流速的变化

Fig. 7 Change of magnetic field contribution rate with flue gas velocity

- precipitator[J]. *Aerosol Science & Technology*, 2018, 52: 1415-1428.
- [12] 东明, 张宇轩, 李素芬, 等. 烟气流速对不同极线结构下静电除尘器内微细颗粒脱除的影响[J]. *热科学与技术*, 2018, 17(1): 41-48.
- [13] 周海军. 浅谈烟气流速对电除尘器效率的影响[C]//中国环境保护产业协会. 第十三届中国电除尘学术会议. 青岛, 2009: 212-214.
- [14] 沈之吻, 郑成航, 刘昕涛, 等. 高温烟气静电除尘中试试验研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1637-1645.
- [15] MI J, DU S, YUAN G. Study on both discharge and charging of the earthed atomizing corona discharge and the influence of magnetic fields on them[J]. *Current Applied Physics*, 2012, 12(4): 1005-1010.
- [16] 赵子傑, 詹小平, 商成宇, 等. 磁增强正负电晕放电比较[J]. *科技导报*, 2008(7): 43-46.
- [17] 张建平, 车鹏, 徐达成, 等. 中位粒径对线管式静电除尘器内PM_{2.5}除尘性能影响的数值模拟[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2): 983-987.
- [18] 林山杉, 盛连喜, 李明非, 等. 磁增强电晕放电及其对颗粒荷电的研究[J]. *电工技术学报*, 2004, 19(9): 42-45.
- [19] 朱世文. 磁控电除尘技术的研究与应用[C]//中国环境保护产业协会. 第十一届全国电除尘学术会议. 郑州, 2008: 116-123.
- [20] ZHANG J P, ZHA Z T, CHE P, et al. Theoretical study on submicron particle escape reduced by magnetic confinement effect in low inlet speed electrostatic cyclone precipitators[J]. *Powder Technology*, 2018, 339: 1005-1011.
- [21] 林峰, 姜素华, 涂云鹏. 高压脉冲电絮凝+加载磁絮凝工艺处理电镀废水[J]. *广州化工*, 2013, 41(8): 149-150.
- [22] KAKIHARA Y. Superconducting high gradient magnetic separation for purification of wastewater from paper factory[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2006, 16(2): 1142-1145.
- [23] 孙英浩. 永久磁铁放电电极磁增强雾化电晕放电特性及对微细粉尘荷电的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [24] 米俊锋, 许德玄, 杜胜男, 等. 磁增强雾化电晕放电烟气净化器研究[J]. *科技导报*, 2007(21): 38-42.
- [25] 毕业武, 秦献礼, 贾凌寒. 磁增强负电晕放电特性和荷电方式研究[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2009, 41(1): 64-68.
- [26] ELABBAS K. Experimental study of magnetic field effect on DC corona discharge in low vacuum[J]. *Journal of the Institution of Engineers*, 2014, 95(3): 189-195.
- [27] ZHANG J P, ZHANG X, SHI F F, et al. Diffusion charging effects on PM₁₀ collection efficiency in a wire-pipe ESP under multi-field coupling[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2016, 15(11): 2367-2374.
- [28] BERNSTEIN S, CROWE C T. Interaction between electrostatics and fluid dynamics in electrostatic precipitators[J]. *Environment International*, 1981, 6(1): 181-189.
- [29] GOO J H, LEE J W. Stochastic simulation of particle charging and collection characteristics for a wire-plate electrostatic precipitator of short length[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28(5): 875-893.
- [30] 郝文阁, 裴莹莹, 侯亚平, 等. ESP电场粉尘非稳态收集过程数值仿真[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2008, 29(8): 1179-1182.

(本文编辑: 郑晓梅)

Verification of magnetic field effect in a wire-plate electrostatic precipitator at different flue gas velocities

ZHANG Jianping^{1,*}, GAO Pengfei², XU Dacheng², TIAN Luyu¹, ZHU Yingbing¹, ZHU Huifeng¹, JIA Chengyi¹

1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China

*Corresponding author, E-mail: jpzhanglzu@163.com

Abstract In order to further improve the dust removal effect of a wire-plate electrostatic precipitator (ESP) and reduce the escape of fine particles with flue gas, the magnetic field was introduced into ESP. The dust removal efficiency was numerically simulated with characteristic particle of 2.5 μm at the working voltage of 50 kV, and the influence of magnetic field on the trapping performance of fine particles at different flue gas velocities was explored. The results showed that the magnetic field could effectively change the trajectory of charged particles and greatly improve the dust removal performance of fine particles. The tendency of particles leaning towards dust collection plate was more obvious under the condition of low flue gas velocity, which is more conducive to the capture of particulate matter. The promotion effect of magnetic field on dust removal efficiency was more significant at high flue gas velocity, and with the increase of magnetic induction intensity, the promotion range continued to increase, then tended to be flat. As the magnetic induction intensity decreased, the decrease range of dust removal efficiency caused by flue gas velocity increased gradually and reached its maximum in the absence of magnetic field. The research results can provide guidance for the application of magnetic field in ESP and have important significance for improving ESP's dust removal performance.

Keywords flue gas velocity; electrostatic precipitator; magnetic field effect; fine particles; trapping performance