中位粒径对磁约束线板式ESP捕集性能的影响

张建平[1]，任保栋[2]，徐达成[2]
(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)

摘要： 针对静电除尘器(Electrostatic Precipitator，ESP)对细颗粒物捕集性能欠佳的现状，本文建立线板式ESP理论模型和结构模型，利用GAMBIT和FLUENT软件对不同中位粒径下的$PM_{2.5}$除尘效率进行数值仿真，并比较有无磁约束和离子风作用对$PM_{2.5}$捕集性能的差异。研究结果表明：线板式ESP对$PM_{2.5}$的捕集效率随中位粒径的增大而逐渐降低；磁约束和离子风作用均能不同程度地提升$PM_{2.5}$的捕集性能，且它们联合作用时效果更优；随中位粒径的增大，磁约束作用变强，而离子风的作用变弱。本文研究结论可对ESP的优化设计起到一定指导作用。

关键词： 中位粒径；磁约束；离子风；线板式ESP；$PM_{2.5}$
中图分类号： X701.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0015－05
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.079

Influence of median particle diameter on capture performance of a wire-plate ESP subjected to magnetic confinement

ZHANG Jianping[1]，REN Baodong[2]，XU Dacheng[2]
(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*)

Abstract: Aiming at the present situation of the poor performance of an Electrostatic Precipitator(ESP) for fine particle capturing，the theory model and the structure model of a wire-plate ESP are established，$PM_{2.5}$ dust removal efficiency under different median particle diameters are numerically simulated using GAMBIT and FLUENT software，and the differences of $PM_{2.5}$ capture performance with or without magnetic confinement and ionic wind are compared. The results show that the capture efficiency of the wire-plate ESP for $PM_{2.5}$ decreases gradually with the increase of median particle diameter. Both magnetic confinement effect and ionic wind effect can improve the $PM_{2.5}$ capture performance to varying degrees，and the combined effect is better. With the increase of median particle diameter，magnetic confinement effect becomes stronger，while ion wind effect becomes weaker. The results can guide the optimization design of ESP in some degree.

Key words: median particle diameter; magnetic confinement; ionic wind; wire-plate ESP; $PM_{2.5}$

$PM_{2.5}$是指环境空气中空气动力学当量直径小于或等于2.5 μm的颗粒物，其易附带病毒等有毒、有害物质，对人体危害极大，也是导致雾霾现象愈演愈烈的罪魁祸首之一[1-3]。随着人们环保意识的不断提高，同时也顺应实现可持续发展的国情需要，如何高效脱除细微颗粒物成为了近几年的研究热点[4]。常用的除尘设备有很多，其中的静电除尘器(Electrostatic Precipitator，ESP)由于除尘效率高、操作简单等优点而广泛应用于火力发电厂和大部分钢铁企业烧结烟气的颗粒污染物减排中，但是ESP对粒径在250 nm左右颗粒的脱除效率很低，且

收稿日期： 2020－07－29；**修回日期：** 2020－09－23
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(12172228&11572187)
作者简介： 张建平(1972—)，男，教授，从事$PM_{2.5}$电磁除尘技术、海上风力发电技术等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

细颗粒物的逃逸比超过了90%[5-7]。

烧结工序是第二大毒性污染物排放源，仅次于城市垃圾焚烧炉，而细颗粒物在很大程度上充当了这些有毒物质的载体。针对如何提高ESP的尘粒捕集效率以减少烧结烟气中有害细微颗粒的排放，国内外学者已取得了一些成果。潘晓慧[8]分析了多场耦合作用下微细颗粒物的力学行为，建立了相应的受力模型。孙英浩[9]利用接地极附近雾化电晕放电的磁场特性将静电捕集器的效率提高了7.1%。LI等[10]发现高温引起的温度效应会降低表面电场强度、削弱空间充电。在宽静电除尘器的改良研究中，NING等[11]证实了具有并置的电极几何形状可在收集效率和运行成本方面拓宽ESP最佳性能。ALI等[12]提出的半导体新型横流静电除尘器具有更高的颗粒收集效率，优于传统金属电极。TIMOSHKIN等[13]获得了颗粒表面上瞬态非补偿电荷的解析表达式，得出了μ-ESP工艺可为小至250 nm颗粒提供高去除效率的结论。

带电尘粒的运动会受到磁场的影响，而通过磁约束作用来改善ESP对尘粒的除尘性能，是一个很有前景的ESP优化策略[14]。虽然人们对ESP除尘性能改进的尝试从未停止，但是其对细微颗粒物的捕集效率还有待进一步提高。因此，本文在考虑磁场效应和离子风效应的情况下，对ESP捕集性能受到中位粒径分布的影响进行数值模拟和讨论，以期可为线板式ESP除尘性能优化提供可行的思路，并减少工业化石燃料燃烧带来的尘粒排放。

1 理论模型

1.1 电磁场

线板式静电除尘器两极间的电场不但产生收集粉尘、尘粒所需要的电场力，而且起到通过产生电晕现象来激发大量的荷电离子，同时提供荷电离子驱动力使电荷传递给尘粒的作用[15-16]。对于电晕稳定放电的情况，线板式ESP内部电场的数学模型可由以下泊松方程和电流连续性方程来描述。

$$\nabla \cdot E = -\nabla^2 U = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

$$\nabla U \cdot \nabla \rho = \frac{\rho^2}{\varepsilon_0} \tag{2}$$

式中：U为空间电势，V；ρ为空间电荷密度，C/m^3；ε_0为真空介电常数，F/m。

当在线板式ESP内施加均匀分布且不随时间变化的磁场时，受到电场力和洛伦兹力联合作用的带电粉尘颗粒会作螺旋运动，这延长了荷电颗粒在ESP中的停留时间，改变了荷电颗粒与收尘板的碰撞方向，使得收尘极更易捕获颗粒物。这里的磁场是稳恒的，因此不涉及麦克斯韦方程组。

1.2 流场

静电除尘器内的烟气流动满足质量守恒方程和动量守恒方程[17-18]，可分别写为

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g u_i) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu_{eff}\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i^2} + S_j \tag{4}$$

式中：ρ_g为烟气密度，kg/m^3；u_j和u_i为气体流速，m/s；P为平均气体压强，Pa；μ_{eff}为有效扩散系数，$\mu_{eff}=\mu+\mu_t$；μ为气体动力黏性系数，kg/(m·s)；μ_t为湍流动力黏性系数，kg/(m·s)；S_j为广义源项；下注“i”和“j”分别代表x，y方向。

1.3 颗粒动力场

对尘粒在ESP中运动所受的力进行简化处理，可以忽略细微尘粒的重力、压差力等作用力，只考虑起主要作用的电场力$Q_P E_j$、离子风力F_j、磁场力$Q_P V_P B$和拖曳力F_{Dj}的平衡[19-20]，则尘粒的运动方程简化为

$$m_p \frac{\mathrm{d}u_j}{\mathrm{d}t} = Q_P E_j + Q_P V_P B + F_{Dj} + F_j,\ j = 1,2 \tag{5}$$

式中：m_P为尘粒质量，kg；Q_P为尘粒的表面荷电量，C；E_j为j方向上的电场强度，N/C；V_P为尘粒的回旋运动速度，m/s；B为磁感应密度，T。

尘粒受到的离子风力[21]：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$F_j = \frac{1}{8}\pi\rho_g v_j^2 D_j^2 \tag{6}$$

式中：v_j 为离子风速，m/s；D_j 为尘粒直径，μm。

尘粒在 j 方向上受到的拖曳力 F_{Dj} 表示如下。

$$F_{Dj} = m_P \times 0.5\,\frac{\pi\rho_g D_j^2 C_D(u_g - u_p)\,|u_g - u_p|}{4} \tag{7}$$

式中：C_D 为气体－尘粒阻力系数；u_g 和 u_p 是气体和颗粒的速度，m/s。

2　数值模型

2.1　结构模型

采用的线板式 ESP 二维结构如图 1 所示，包括平行的收尘极板和位于其中心的 1 组 3 个等间距的电晕极，电晕线与收尘极板间距 a = 114.3 mm，电晕线间距 b = 152.4 mm，电晕极半径 r = 2.032 mm。

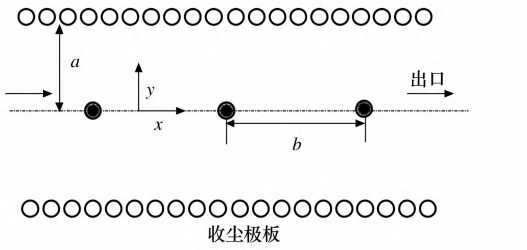


图 1　线板式静电除尘器二维结构简化模型

Fig. 1　Simplified two－dimensional structure model of wire-plate electrostatic precipitator

2.2　网格无关性验证

利用 GAMBIT 软件对结构模型进行网格剖分，得到除尘效率的相对误差随划分网格单元数的变化情况如图2所示。由图2可知：相对误差随着网格单元数的增加急剧下降；在网格单元数达到 41 440 时，相对误差已经减小到 1.5%，能较好地满足工程需要。因此本文在此网格单元数下进行数值计算。

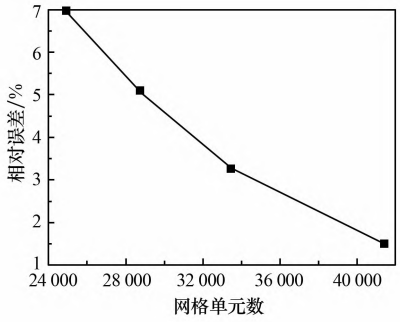


图 2　不同网格单元数下除尘效率的相对误差

Fig. 2　Relative error of dust removal efficiency under different grid units

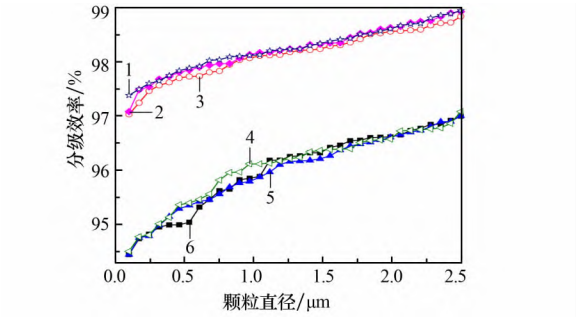
3　数值结果与讨论

为了考察中位粒径对 $PM_{2.5}$ 捕集性能的影响，这里分别对磁约束作用、离子风作用及其联合作用下线板式 ESP 的除尘效率进行数值模拟。

3.1　有无磁约束时中位粒径的影响

设定工作电压 U_0 = 30 kV 和气流速度 v = 1 m/s，考察在有无外加磁场 B = 0.25 T 时，$PM_{2.5}$ 除尘效率随中位粒径的变化。

不同中位粒径下的 ESP 的分级效率如图 3 所示，由图 3 可以看出：不论磁约束作用是否存在，$PM_{2.5}$ 分级效率随中位粒径的减小而不断降低；在磁约束作用下，不论中位粒径大小，线板式 ESP 内 $PM_{2.5}$ 的分级效率均有显著提高。



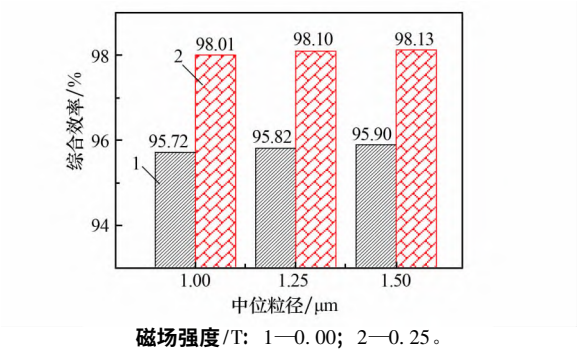
磁场强度/T、中位粒径/μm：1—0.25、1.50；2—0.25、1.25；3—0.25、1.50；4—0.00、1.50；5—0.00、1.25；6—0.00、1.00。

图 3　有无磁约束作用时 $PM_{2.5}$ 的分级效率

Fig. 3　Grade Efficiency of $PM_{2.5}$ with and without magnetic confinement effect

不同中位粒径下的 $PM_{2.5}$ 综合效率如图 4 所示。由图 4 可知：随中位粒径的增大，有磁约束时 $PM_{2.5}$ 综合效率的增幅分别为 0.09% 和 0.03%，而无磁约束的增幅分别为 0.10% 和 0.08%，均呈减小的趋势，这表明无磁约束效应时 $PM_{2.5}$ 综合效率增加幅度更大一些；同一中位粒径下有无磁约束时 $PM_{2.5}$ 综合效率的差值分别为 2.29%、2.28% 和 2.23%，这说明了中位粒径越小，磁约束所产生的促进效果越明显。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



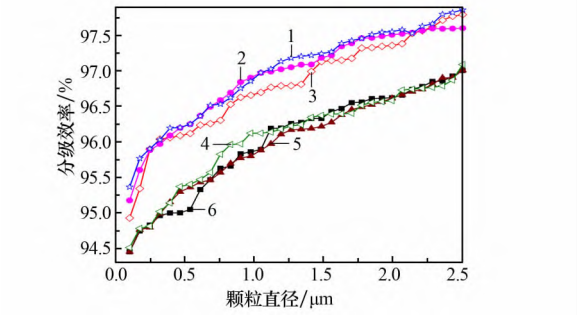
磁场强度/T：1—0.00；2—0.25。

图 4 有无磁约束作用时 $PM_{2.5}$ 综合效率

Fig. 4 Overall efficiency of $PM_{2.5}$ with or without magnetic confinement effect

3.2 有无离子风时中位粒径的影响

在同一工作电压和气流速度下，仅考虑离子风作用时中位粒径变化对 $PM_{2.5}$ 捕集效率的影响，得到不同中位粒径下有无离子风时的 $PM_{2.5}$ 分级效率如图 5 所示。由图 5 可知：在同一中位粒径下，考虑离子风效应时的除尘性能更优；无论是否考虑离子风效应，在绝大部分粒径范围内，$PM_{2.5}$ 分级效率随着中位粒径的增大均呈增大的趋势，这是因为粉尘的中位粒径越大，细微粉尘占比越小，使得颗粒物的捕集性能提高。

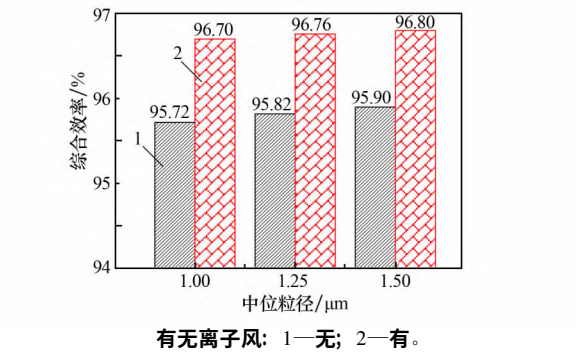


有无离子风、中位粒径/μm：1—有、1.5；2—有、1.25；3—有、1.5；4—无离子风、1.5 μm；5—无、1.25；6—无、1。

图 5 有无离子风时 $PM_{2.5}$ 分级效率

Fig. 5 $PM_{2.5}$ grade efficiency with or without ionic wind

不同中位粒径下有无离子风时 $PM_{2.5}$ 综合效率如图 6 所示。由图 6 可知：不考虑离子风效应时，随着中位粒径的增大，$PM_{2.5}$ 综合效率分别增加了 0.10%，0.08%；而考虑离子风效应时，综合效率的增幅仅有 0.06% 和 0.04%，这说明无离子风作用时中位粒径对 $PM_{2.5}$ 捕集性能的影响更大；同一中位粒径下有无离子风效应的差值分别为 0.98%，0.94% 和 0.90%，随着中位粒径的增大其呈下降的趋势，这表明离子风效应所产生的贡献随中位粒径增大逐渐降低。



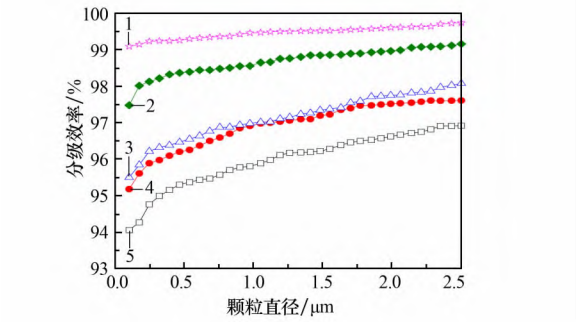
有无离子风：1—无；2—有。

图 6 有无离子风时 $PM_{2.5}$ 综合效率

Fig. 6 Overall efficiency of $PM_{2.5}$ with and without ion wind

3.3 同一中位粒径下的联合作用

选用分布参数 $n = 1.65$、$D_m = 1.25$ μm 进行分析计算。设定工作电压 $U_0 = 50$ kV 和含尘气流流速 $v = 1$ m/s，有无离子风、磁约束作用下 $PM_{2.5}$ 分级效率如图 7 所示。



有无离子风、中位粒径/μm：1—有、0.25；2—有、0.125；3—无、0.125；4—有、0.00；5—无、0.00。

图 7 不同情形下的 $PM_{2.5}$ 分级效率

Fig. 7 $PM_{2.5}$ grade efficiency in different situations

由图 7 可知：在相同或无磁约束作用下，考虑离子风作用时颗粒的分级效率更高，同时随着颗粒粒径的增大，离子风对 $PM_{2.5}$ 颗粒捕集的影响效果稍加变弱，这表明离子风可提高细微颗粒的捕集性能；磁约束作用有效提高了线板式 ESP 中 $PM_{2.5}$ 的分级效率，磁场感应强度 $B = 0.125$ T 时与仅考虑离子风时的影响效果基本相当；离子风和磁约束的联合作用比单独考

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

虑其中一种对提升 $PM_{2.5}$ 捕集性能的效果更好，且这一联合作用对分级效率的影响随着磁感应强度的增大而不断增大。因此，在考虑离子风的基础上引入磁约束效应可显著提升线板式 ESP 对 $PM_{2.5}$ 的捕集性能，这可为新型 ESP 的设计提供思路。

4　结　论

本文研究了磁约束和离子风作用下线板式 ESP 内 $PM_{2.5}$ 捕集性能与中位粒径之间的关系，得出结论:

(1) 不论中位粒径大小，磁约束作用均可大幅提升线板式 ESP 中 $PM_{2.5}$ 捕集性能，且这一提升作用随中位粒径的增大而逐渐变小。

(2) 离子风可提高细微颗粒的捕集性能，且对 $PM_{2.5}$ 颗粒捕集的影响效果随中位粒径的减小而变强。

(3) 同一中位粒径下磁约束和离子风均能提高 $PM_{2.5}$ 捕集性能，但提高的幅度及规律各有不同，两者联合作用效果要强于各自单独作用，且磁感应强度越大，联合作用下的提高幅度越大。

本文研究结果可为工程师在设计和制造新型 ESP 中提供理论和技术参考，从而改善大气环境质量，减少大气污染对人类健康的危害。

参考文献:

[1] 刘含笑，姚宇平，郦建国，等. 低温电除尘技术适用性及污染物减排特性研究 [J]. 动力工程学报，2018，38(8)：650－657.
LIU H X，YAO Y P，LI J G，et al. Research on applicability and pollutant emission characteristics of a LLT-ESP [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2018，38(8)：650－657.

[2] MURNIRA O，MOHD T L，YUTAKA M. The exposure of children to $PM_{2.5}$ and dust in indoor and outdoor school classrooms in Kuala Lumpur city centre [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety，2019，170：739－749.

[3] CHENG T，ZHENG C，YANG L J，et al. Effect of selective catalytic reduction denitrification on fine particulate matter emission characteristics [J]. Fuel，2019，238：18－25.

[4] 李良，张相，刘茂省，等. 高温旋风除尘器单体气固分离性能的冷态试验研究 [J]. 烧结球团，2018，43(4)：64－68.
LI L，ZHANG X，LIU M S，et al. Cold-state experimental study on gas-solid separation performance of single tube for high temperature cyclone separator [J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(4)：64－68.

[5] 姚志伟，任建宇，杨国华，等. 电场力强化 $PM_{2.5}$ 过滤技术研究进展 [J]. 热能动力工程，2019，34(8)：1－9.
YAO Z W，REN J Y，YANG G H，et al. Research progress on electric field enhanced $PM_{2.5}$ filtering technologies [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2019，34(8)：1－9.

[6] CHANG Y F，JIA P，SHI L，et al. Corona discharging and particle collection of bipolar transverse plate ESP [J]. Journal of Electrostatics，2018，96：104－110.

[7] 李菁川，孙晖. 不同电控技术的电除尘提效特性研究及应用 [J]. 烧结球团，2020，45(2)：67－72.
LI J C，SUN H. Study and application of effect-raising characteristics of the electrostatic precipitator using different electric control technology [J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(2)：67－72.

[8] 潘晓慧. 静电除尘器内微细颗粒的多场协同作用研究 [D]. 济南：山东大学，2017.
PAN X H. Study on multi field synergy effect of fine particles in electrostaic precipitator [D]. Jinan：Shandong University，2017.

[9] 孙英浩. 永久磁铁放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.
SUN Y H. Study on permanent magnets discharge electrode magnetically enhanced discharge characteristics and the effects on charging fine particles [D]. Changchun：Dongbei Normal University，2015.

[10] LI Y，ZHENG C H，LUO K，et al. CFD simulation of high-temperature effect on EHD characteristics in a wire-plate electrostatic precipitator [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering，2015，23(4)：633－640.

[11] NING Z Y，JANUSE P，SHEN X J，et al. Electrode geometry optimization in wire-plate electrostatic precipitator and its impact on collection efficiency [J]. Journal of Electrostatics，2016，80：76－84.

[12] ALI M，ALMAJALI Y T A，KENNEDY M，et al. Integration of novel hybrid composite discharge electrode with semi-pilot novel cross flow electrostatic precipitator [J]. Journal of the Air & Waste Management Association，2018，68(12)：1346－1356.

[13] TIMOSHKIN I V，MERMIGKAS A C，MACGREGOR S J，et al. Analysis of particle charging mechanism for optimisation of precipitation efficiency [C]//2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). Glasgow：IEEE，2013：114－117.

(下转第 42 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and Steel,2014,49(9):21 – 28.

[9] 李孟土,李晓波,朱德庆,等. 高配比镜铁矿粉混合料烧结性能改善[J]. 钢铁研究学报,2018,30(1):14 – 20.
LI Mengtu,LI Xiaobo,ZHU Deqing,et al. Improvement of sintering performance of sinter mixtures containing high ratio of specularite fines [J]. Journal of Iron and Steel Research,2018,30(1):14 – 20.

[10] 陈伟,高丙寅,杨玉兵,等. 镜铁矿烧结性能试验研究[J]. 河南冶金,2012,20(3):6 – 8;21.
CHEN Wei,GAO Bingyin,YANG Yubing,et al. Improvement of sintering performance of high proportion Specularite powder mixture [J]. Henan Metallurgy,2012,20(3):6 – 8;21.

[11] 黄伟青,胡启晨,胡宾生,等. 烧结矿 FeO 含量的研究[J]. 矿冶,2017,26(2):46 – 51.
HUANG Weiqing,HU Qichen,HU Binsheng,et al. Research on FeO content of sinter [J]. Mining and Metallurgy,2017,26(2):46 – 51.

[12] LIU X,QIU G,CAI R,et al. Effects of Al_2O_3/SiO_2 ratio on mineralizing laws for low-temperature sintering [J]. Iron and Steel,2001,36(3):5 – 8.

[13] CLOUT J M F,MANUEL J R. Fundamental investigations of differences in bonding mechanisms in iron ore sinter formed from magnetite concentrates and hematite ores [J]. Powder Technology,2003,130(1 – 3):393 – 399.

[14] 傅菊英,姜涛,朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1996:38;130 – 135.
FU Juyin,JIANG Tao,ZHU Deqin. Sintering and pelletizing [M]. Changsha:Central South University of Technology Press,1996:38;130 – 135.

[15] 刘东辉,吕庆,孙艳芹,等. 铁矿粉基础特性对烧结矿性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2013,25(11):29 – 34.
LIU Donghui,LÜ Qing,SUN Yanqin,et al. Effect of basic characteristics of iron ores on properties of sinter [J]. Journal of Iron and Steel Research,2013,25(11):29 – 34.

[16] YANG Songtao,ZHOU Mi,JIANG Tao,et al. Effect of basicity on sintering behavior of low-titanium vanadium-titanium magnetite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25(6):2087 – 2094.

[17] 陈耀铭,陈锐. 烧结球团微观结构[M]. 长沙:中南大学出版社,2011:69 – 95.
CHEN Yaoming,CHEN Rui. Microstructure of sintered pellets [M]. Changsha:Central South University Press,2011:69 – 95.

(上接第19页)

[14] 李海英,张春奇,刘东. 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 团聚除尘技术的研究进展[J]. 环境工程,2018,36(9):93 – 98;143.
LI H Y,ZHANG C Q,LIU D. Research progress of $PM_{2.5}$ agglomeration and removal technology [J]. Environmental Engineering,2018,36(9):93 – 98;143.

[15] ZHANG J P,XU D C,REN J X. Modeling and simulation of $PM_{2.5}$ collection efficiency in a wire-plate ESP subjected to magnetic field and diffusion charging [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy,2015,34(3):697 – 702.

[16] 李永兵,曾珠,李兵磊. 线板式静电除尘器数学模型的建立及数值仿真[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2017,29(1):28 – 32.
LI Y B,ZENG Z,LI B L. Establishment and numerical simulation of mathematical model of wire-plate electrostatic precipitator [J]. Journal of Henan University of Engineering(Natural Science Edition),2017,29(1):28 – 32.

[17] 张玉才,李咸伟,俞勇梅,等. 静电除尘灰及脱硫灰对烧结烟气中二噁英的吸附作用[J]. 烧结球团,2017,42(1):50 – 53.
ZHANG Y C,LI X W,YU Y M,et al. Absorbability of sintering dust and desulphurized ash on the dioxins in the sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(1):50 – 53.

[18] 温祖文,田蒙奎,陶文亮. 无机陶瓷膜除尘器内部流场的数值模拟[J]. 环境科学与技术,2018,41(3):193 – 197.
WEN Z W,TIAN M K,TAO W L. Numerical simulation of internal flow field in inorganic ceramic membrane dust collector [J]. Environmental Science & Technology,2018,41(3):193 – 197.

[19] ISLAMOV R S. Influence of gas velocity on the particle collection and reentrainment in an air-cleaning electrostatic precipitator [J]. Aerosol Science & Technology,2018,52(12):1415 – 1428.

[20] 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.

[21] 王利. 新型极板对微细粉尘收集效果的实验研究[D]. 保定:河北大学,2016.
WANG L. The experimental study on collection effect of fine dust for a novel plate [D]. Baoding:Hebei University,2016.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net