



## 烧结烟气粉尘特性分析

李海英, 薛海瑞, 李国良, 刘吉恺  
(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 针对烧结烟气中微细颗粒去除效率较低的难题, 本文选取烧结机头1~4级电场和机尾粉尘灰为研究对象, 对原始灰样的粒度分布、元素组成、物相组成、颗粒形貌等进行测试, 分析不同位置粉尘灰孔隙结构、润湿性的变化规律, 并考察了云式除尘方法对烧结微细粉尘的脱除效果。结果表明: 随着烧结烟气静电除尘电场级数增加, 较大粉尘颗粒逐渐减少而细粉尘颗粒逐渐增多, 表明大颗粒粉尘优先被捕集, 而小颗粒粉尘由于受到的电场力较小而不易被捕集, 从而造成微细颗粒的除尘效率较低; 烧结电除尘灰接触角均小于 $60^\circ$ , 属于可润湿性粉尘, 具备较好地采用云式除尘方法去除微细粉尘的适应性; 采用云式除尘器对细颗粒物进行了脱除, 其 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的去除效率大于80%以上。该研究结果可为烧结烟气的微细颗粒高效去除提供有效方法和技术支撑。

**关键词:** 烧结粉尘; 理化特性; 粒度分布; 润湿性; 除尘效率

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0095-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.030

## Analysis on characteristics of sintering gas dust

LI Haiying, XUE Hairui, LI Guoliang, LIU Jikai

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan, 063000, Hebei, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low removal efficiency of fine particles in sintering gas, the 1~4 electric field of the sintering head and the dust ash at the tail are selected as the research objects, and the particle size distribution, element composition, phase composition and particle morphology of the original ash sample are tested, the change law of the pore structure and wettability of the dust ash at different positions is analyzed, and the removal effect of the cloud dust removal method on the sintering fine dust is investigated. The results show that with the increase of the electric field stage of electric precipitator of sintering gas, the larger dust particles gradually decrease and the fine dust particles gradually increase, indicating that the large particles of dust are preferentially accumulated, while the small particles of dust are not easy to be captured due to the small electric field force, resulting in the low dust removal efficiency of fine particles. The results of contact angle measurement show that the contact angle of sintering electric precipitator ash is less than  $60^\circ$ , which is a wettable dust, and has good adaptability to remove fine dust by cloud dust removal method. Through the test of the removal effect of fine particulate matter by cloud dust collector, the removal efficiency of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  is greater than 80%. The results can provide an effective method and technical support for the efficient removal of fine particles in sintering gas.

**Key words:** sintering dust; physicochemical properties; particle size distribution; wettability; dust removal efficiency

目前, 我国钢铁工业生产产生的粉尘占全国钢铁生产流程中的重要一环, 每年粉尘排放量超过1500万t, 占整个钢铁生产过程烟尘排放量的15%左右。其中, 烧结工序作为

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-01-13

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2022209138); 唐山市重点研发项目(21130231C)

作者简介: 李海英(1971—), 女, 博士, 教授, 从事工业节能与环境保护研究。

通信作者: 薛海瑞(1997—), 男, 硕士研究生, 从事工业节能与环境保护研究。

43%左右<sup>[1-2]</sup>，因此对烧结工序粉尘减排治理工作刻不容缓。

当前，钢铁工业超过 90% 以上采用电除尘器去除烧结工序产生的粉尘<sup>[3]</sup>。影响电除尘设备性能的因素可归纳为烟尘特性、设备状况和操作条件三个方面<sup>[4]</sup>。其中，烧结粉尘特性对电除尘脱除效率具有重要影响。部分学者对烧结粉尘特性进行了相关研究。为回收利用烧结除尘灰中高碱金属，秦立浩等<sup>[2]</sup>对烧结粉尘物相组成进行分析，发现烧结除尘灰中 K、Na 等碱金属元素主要以氯化物形式存在且主要出现在 3、4 级电场中。研究者们对烧结粉尘的颗粒形貌<sup>[3]</sup>、比电阻<sup>[5]</sup>进行研究并讨论其变化规律，发现烧结机机头灰颗粒形貌以球形颗粒和不规则颗粒为主，而比电阻随粒度变化较大且随着电场级数增加比电阻逐渐增大。

程滕等<sup>[6]</sup>提出云式除尘技术，并已成功用于电厂转运站烟尘处理、水泥厂窑头粉尘治理、选煤厂烟尘治理等领域，取得了良好的效果。为更好地将云式除尘技术应用在烧结微细粉尘治理上，分析烧结粉尘特性以及润湿性行为对影响云式除尘效率至关重要<sup>[7]</sup>。为提高对细颗粒物脱除效率，黄宇<sup>[8]</sup>对喷水后的粉尘特性进行分析，发现细颗粒物质量浓度明显降低且团聚现象明显，电除尘器总除尘效率从 99.77% 提高到 99.86%。为继续评估粉尘特性，研究者们对粉尘颗粒聚积、润湿性行为进行研究。MASAGUER 等<sup>[9]</sup>发现粉尘颗粒间空腔且存在较大的孔隙率。TANG 等<sup>[10]</sup>通过动态接触角分析研究烧结粉尘疏水性的来源，发现其主要是由具有正烷基链和或芳香基团的有机物组成的疏水壳和亲水性官能团键合而成。

综合上述研究，为了高效清除烧结粉尘，本文通过系统分析烧结粉尘粒径、元素状态、物相构成、颗粒形貌以及粉尘润湿性对其理化特征进行研究，并在此基础上研究云式除尘方法除灰效率，为后期的精细除尘技术奠定理论依据与数据基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验样品

试验原料采用河北某钢铁 360 m<sup>2</sup> 烧结机上粉

尘。该烧结机烟气流动过程如图 1 所示。烧结生产工艺主要在机头和机尾产生较多粉尘，故采样点选择机头和机尾电除尘器的除尘灰。检测取样采用网格取样法且检测均保持在 25 ℃ 条件下进行。每个样品分别测试三次，将三次测定数据结果计算得出平均值后作为最终的测定结果。

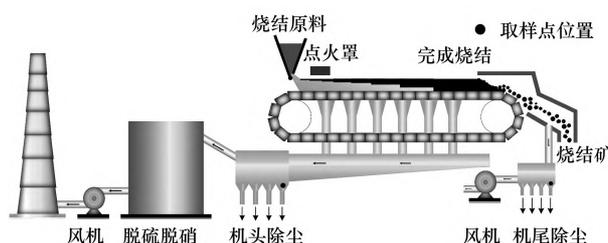


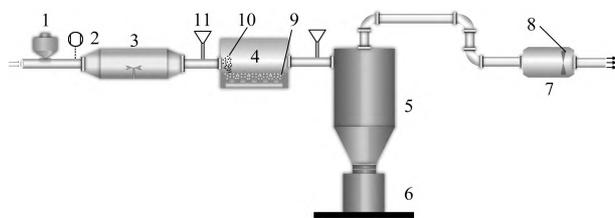
图 1 烧结烟气流动过程及取样点位置

Fig. 1 Sintering exhaust gas flow path and sampling port location

### 1.2 试验方法

试验采用激光粒度分析仪对粉尘进行粒度分析，射线荧光光谱仪对粉尘元素定性、定量分析，X 射线衍射仪 (XRD) 分析物相组成，扫描电子显微镜 (SEM) 观察粉尘形貌，接触角测量仪分析粉尘润湿性，氮吸附仪测试粉尘比表面积、孔隙率和孔体积，手持式空气质量检测仪检测粉尘质量浓度。

试验采用云式雾化方案，设计并搭建了云式除尘装置<sup>[11]</sup>，如图 2 所示。该试验装置主要由给料系统、云式雾化系统、气固分离系统、固废收集系统和引风机组成。试验过程中，给料机振动粉尘落下与空气一同进入预混室充分混合，使粉尘质量浓度在空间上均匀分布。随后含尘空气在引风机作用下进入雾化箱与雾气混合，同时监测雾化箱进出口质量浓度。采用手持空气质量测试



1—给料机；2—风速计；3—预混室；4—雾化箱；5—气固分离；6—排污槽；7—引风机；8—风扇；9—雾化器；10—粉尘颗粒；11—测量点。

图 2 云式除尘试验装置

Fig. 2 Experimental device of cloud dust removal

仪实时检测空气中 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 的质量浓度,得出云式除尘效率。为了保证数据的准确性,应保证试验台的密封性,避免因外界环境干扰产生试验误差。

### 1.3 样品制备

将烧结粉尘在恒温箱以 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干 $2\text{ h}$ 后,用压样机将粉尘在 $10\text{ MPa}$ 的压力下压制 $2\text{ min}$ ,制成可用圆柱状压片样品,如图3所示。随后将压得的样品放于接触角测量装置,装有去离子水的注射器在样品表面滴下液滴。当液滴滴在压片上时,摄像机会瞬间将图像拍摄并储存,以防液滴渗入压片或蒸发。最后拍摄图片在计算机的自动影像分析系统中分析、标注得出接触角。



图3 烧结除尘灰压片样品

Fig. 3 Tablet sample of sintering dust removal ash

## 2 云式除尘技术

### 2.1 云式除尘概述

我国兰州大学王博教授结合“云”物理学原理和旋风分离原理首次提出了“云式除尘”的概念。其利用超声波雾化营造过饱和环境,使水蒸气凝结在颗粒物表面增大粉尘粒径并在气流扰动下使粉尘间发生碰撞、拦截、捕捉、润湿以及凝聚等作用,使之进一步长大增重被捕集。研究表明<sup>[6]</sup>,云式除尘系统结构简单、设备紧凑、占地面积小且投资费用低,对微细粉尘去除效率较高。

### 2.2 云式除尘研究现状

目前以兰州大学为核心的研究团队已经将云式除尘的除尘机理、影响因素、结构优化等做了较为详尽的研究。研究者将该技术应用到分子筛、催化剂以及柴油机尾气等粉尘处理中,除尘效果有明显改善<sup>[11]</sup>。此外,由于云式除尘属于湿法除尘,结合荷电、化学团聚等技术对提高云式除尘效率、增强粉尘与雾滴间的碰撞效果有重要作用。由于不同行业粉尘差别较大,未来需要研究不同领域粉尘特性并对云式除尘系统进行较为详尽的

探索,使之更好地服务于钢铁、电力、石化、建材以及其他工业领域。

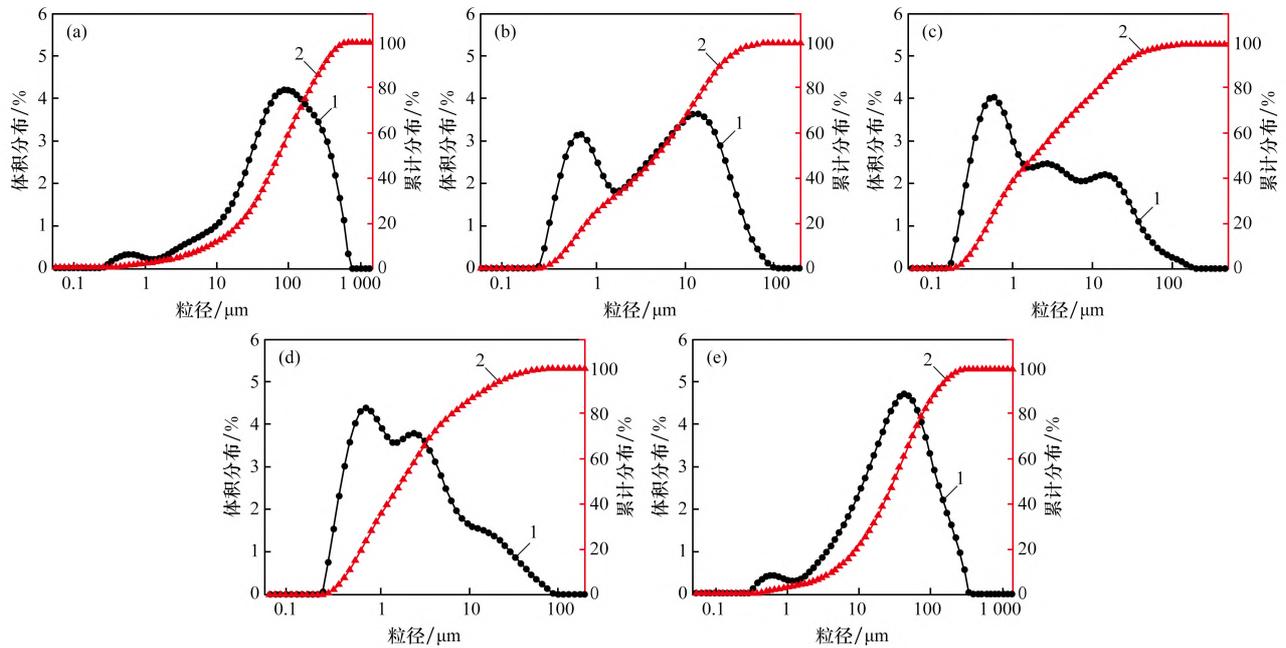
## 3 结果与讨论

### 3.1 粒度分析

烧结机机头1~4级和机尾电除尘灰粒径分布如图4所示。从图4可以看出,烧结电除尘灰粒径呈双峰或三峰分布且趋势一致,粉尘粒径范围在 $0.1\sim 1\ 000.0\ \mu\text{m}$ 之间。随着电场级数增加,粉尘粒径的体积分布向粒度更小的方向移动,而累计分布越来越平缓。这说明随着电场级数的增加,较大粉尘颗粒逐渐减少而微细粉尘颗粒逐渐增大。这主要是因为随着电场级数的增加,烧结机机头电除尘灰中Fe元素含量逐渐减少,K、Cl元素含量逐渐增加。尤其是1、2级电场粒度差距巨大,这是因为1级电除尘灰由 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 等组成,颗粒粒径相对较大而优先被捕集。为了更好地比较烧结电除尘灰粒径分布情况,整理出烧结电除尘灰粒度累积分布10%、50%、90%所对应的粒径,如表1所示。由表1可看出,3、4级电除尘灰粒度累积分布10%时,粒径差别不是很明显,但随后观察粒度累积分布在50%、90%对应粒径时,可以明显看出电除尘灰4级粒径小于3级。

### 3.2 元素分析

烧结机机头1~4级和机尾电除尘灰中主要元素分析结果如表2所示。由表2可知,该钢铁企业烧结电除尘灰中主要元素为Fe、K、Cl和S,但同时含少量Ca、Na、Mg、Al、Si元素以及Cu、Mn、Zn等微量元素。烧结机机头1~4级电除尘灰中的K元素含量随电场收集先后顺序依次升高,表现出富集效应,而Na、Mg、Al、Si、Ca等元素含量随各电场收集先后顺序依次下降。其中,1级电场Fe元素质量分数最高,达43.14%;K元素含量有明显的上升,在2、3、4级电场K元素含量超过了Fe元素。这主要是因为烧结机机头1级电除尘灰主要是由 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 等组成,这类颗粒粒径相对较大,比电阻较小,使粉尘优先在1级电场被捕集,随着电场级数的增加,Fe元素质量分数逐渐下降至1.83%。K在烧结高温环境下由气态凝结成细小颗粒而在2、3、4级电场捕



(a) 机头 1 级; (b) 机头 2 级; (c) 机头 3 级; (d) 机头 4 级; (e) 机尾  
1—体积分布; 2—累计分布。

图 4 烧结电除尘灰粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of sinter ESP dust

表 1 不同粒度累积分布烧结电除尘灰的平均粒度

Table 1 Average particle size of ESP ash with cumulate distribution at different particlesizes  $\mu\text{m}$

电场灰	不同粒度颗粒累积分布/%		
	10	50	90
机头 1 级	8.071	78.145	330.435
机头 2 级	0.524	5.079	26.805
机头 3 级	0.366	1.998	23.690
机头 4 级	0.456	1.840	15.041
机尾	4.638	32.877	128.294

集,随着电场级数的增加, K 元素质量分数逐渐提高至 48.35%。机尾电除尘灰中含有大量的铁元素,可重复利用价值高,为提高利用效率,常与机头 1 级除尘灰一起用于烧结配料。

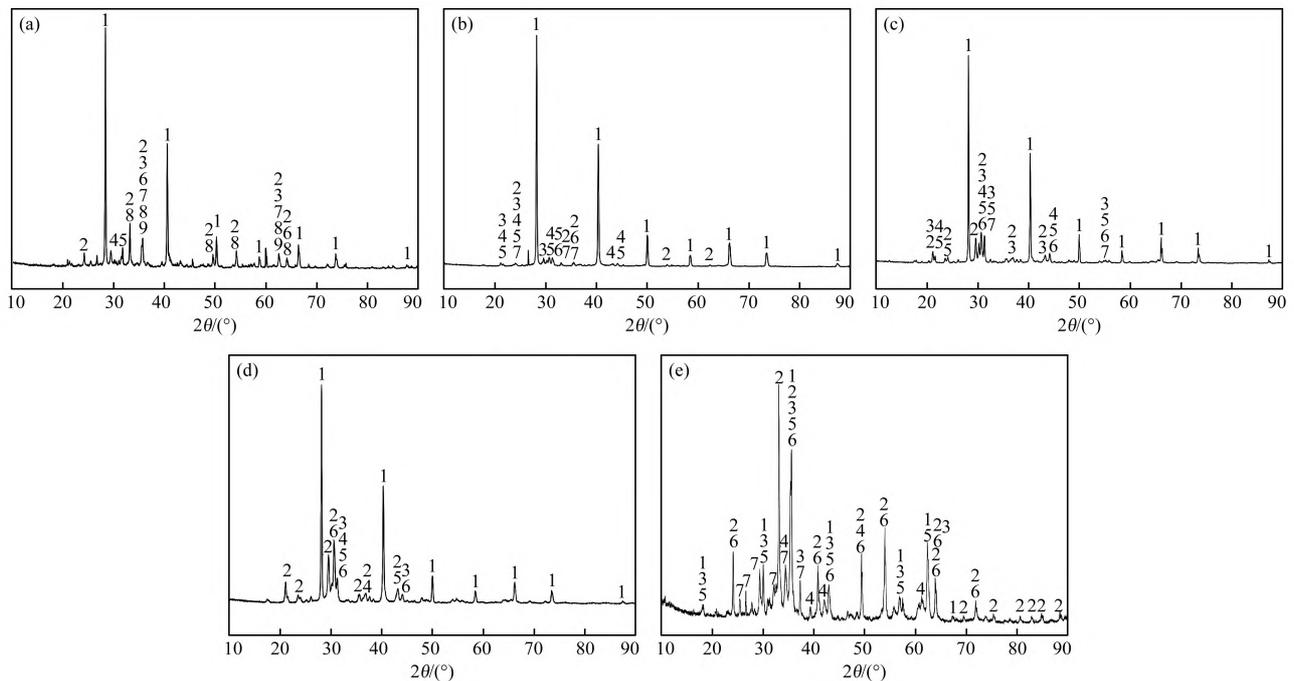
表 2 烧结电除尘灰元素组成(质量分数)

Table 2 Element composition of sinter ESP dust

电场灰	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	其他
机头 1 级	3.70	0.96	1.88	3.21	5.13	15.68	16.41	8.93	43.14	0.94
机头 2 级	2.29	0.18	0.36	0.53	12.32	26.18	43.17	3.14	9.00	2.84
机头 3 级	2.08	0.11	0.10	0.19	29.80	13.36	47.53	0.91	3.10	2.82
机头 4 级	2.11	—	0.09	0.14	27.70	15.69	48.35	0.66	1.83	3.42
机尾	—	3.87	4.49	7.61	1.68	0.35	0.71	17.27	63.43	0.60

### 3.3 物相分析

烧结机机头 1~4 级和机尾电除尘灰 XRD 如图 5 所示。从图 5 中可以看出,烧结电除尘灰组成成分较为复杂且稍有不同,主要包括  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、KCl 以及含有 Ca、Na、Mg、Al、Si、Cu、Mn、Zn 组成的复杂化合物,与秦立浩等<sup>[2]</sup>研究结果一致。其中,机头 1 级和机尾电除尘灰 XRD 较为复杂,化合物组成更为复杂。烧结机机头 1~4 级电除尘灰 XRD 图与元素分析结合发现,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  主要在 1 级电场捕集, 2~4 级电场越来越少; KCl 在烧结机机头 1~4 级电场均有分布。另外,烧结机机头 1~4 级电场灰 XRD 图谱中  $2\theta$  在  $28.4^\circ$ 、 $40.5^\circ$ 、 $50.2^\circ$ 、 $58.6^\circ$ 、 $66.4^\circ$  和  $73.71^\circ$  等处衍射峰均显示了特别明显的 KCl 峰。经分析可知,在烧



(a) 机头 1 级; (b) 机头 2 级; (c) 机头 3 级; (d) 机头 4 级; (e) 机尾

- (a): 1—KCl; 2—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; 4—CaCO<sub>3</sub>; 5—Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 6—MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; 7—Fe<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>; 8—CaAl<sub>4</sub>Fe<sub>8</sub>O<sub>19</sub>; 9—Fe<sub>2.95</sub>Si<sub>0.05</sub>O<sub>4</sub>。  
 (b): 1—KCl; 2—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3—Cu<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>S<sub>7</sub>; 4—CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>; 5—K<sub>3</sub>Na(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; 6—Mg<sub>4</sub>Ca<sub>8</sub>Ge<sub>2</sub>O<sub>20</sub>; 7—Fe<sub>1.874</sub>Sn<sub>0.096</sub>O<sub>3</sub>。  
 (c): 1—KCl; 2—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 3—KCuF<sub>3</sub>; 4—Ba<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; 5—K<sub>3</sub>Na(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; 6—Ba<sub>10</sub>Fe<sub>10</sub>O<sub>28</sub>; 7—CaBSiO<sub>4</sub>(OH)。  
 (d): 1—KCl; 2—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 3—K<sub>3</sub>Na(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; 4—Al<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>; 5—K<sub>3</sub>CaH(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; 6—BaFe<sub>0.72</sub>Fe<sub>0.28</sub>O<sub>2.64</sub>。  
 (e): 1—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; 2—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3—MgFeO<sub>4</sub>; 4—Ca<sub>2</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 5—Fe<sub>2.95</sub>Si<sub>0.05</sub>O<sub>4</sub>; 6—CaAl<sub>4</sub>Fe<sub>8</sub>O<sub>19</sub>; 7—Ca<sub>5</sub>Si<sub>2</sub>(FeAl)O<sub>36</sub>。

图 5 烧结电除尘灰 XRD

Fig. 5 XRD of sinter ESP dust

结机机头电除尘器中,随着电场数的增加,KCl 质量分数逐渐增加。

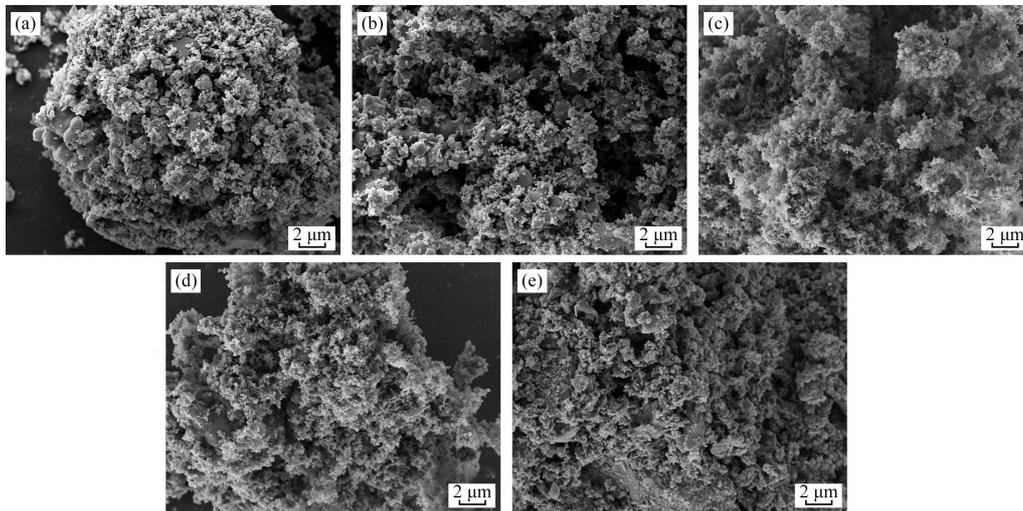
### 3.4 形貌分析

烧结机机头 1~4 级和机尾电除尘灰扫描电镜 SEM 结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,电除尘灰颗粒物形貌类型包括表面粗糙的球形和不规则状<sup>[12]</sup>。球形颗粒主要是燃料中矿物经熔融形成的颗粒物,球形颗粒表面不光滑主要是烧结过程破碎、气化-凝结产生细微颗粒物粘附在较大颗粒上;燃烧过程中熔点高的矿物不容易熔化,就以不规则的形状存在,而熔点低的矿物熔化,使得不规则颗粒物变得圆滑,棱角不突出。烧结机机头 1~4 级电除尘灰粒径越来越小,颗粒形貌也明显变化。在烧结 1 电场中,粉尘小颗粒吸附大颗粒表面;而在 3、4 电场中,粉尘小颗粒相互粘附连接形成复杂多孔的结构。随着粒径的减小,小颗粒团聚现象越发严重,颗粒表面粘附不规则、

球形小颗粒或是颗粒通过团聚形成絮状大颗粒。根据异质核化理论<sup>[13]</sup>,可推测出球形细灰颗粒的润湿性优于非球形的颗粒。

### 3.5 润湿性

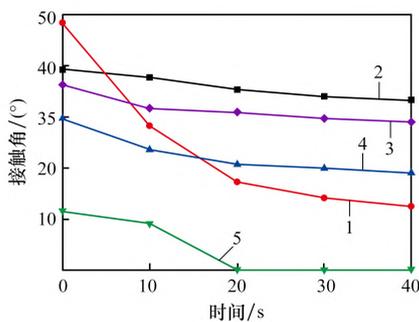
烧结电除尘灰接触角如图 7 所示。接触角是指在固、液、气三相交界处,自固液界面经过液体内部到气液界面之间的夹角。若夹角  $\theta < 90^\circ$ ,则固体表面是亲水性的,即液体较易润湿固体,其角越小,表示润湿性越好。由图 7 能够看出,随时间的变化,液滴越来越小,甚至有的消失不见。这是因为液滴渗透进烧结灰压片中而逐渐变小。粉尘接触角均小于  $90^\circ$ ,即能被水有效润湿。其中机尾电场灰接触角最小,润湿效果最好。可以得出,烧结粉尘在纯水中的润湿性大小顺序为机尾 > 机头 4 级 > 机头 3 级 > 机头 2 级 > 机头 1 级。另外,烧结机机头 1 级和机尾电除尘灰随时间从 0 s 到 40 s 变化时,接触角的变化幅度最大。



(a) 机头 1 级; (b) 机头 2 级; (c) 机头 3 级; (d) 机头 4 级; (e) 机尾

图 6 烧结电除尘灰颗粒形貌

Fig. 6 Morphology of sinter ESP dust



1—机头 1 级; 2—机头 2 级; 3—机头 3 级;

4—机头 4 级; 5—机尾。

图 7 烧结电除尘灰接触角

Fig. 7 Contact angle of sinter ESP dust

这主要是因为机头 1 级、机尾电场灰与机头其他级数除尘灰组成成分以及粒度分布存在较大差异所致。有研究表明,随着粉尘粒径增大,接触角呈下降趋势且粉尘润湿性得到提高<sup>[14]</sup>。粉尘粒径越大,压片内部孔隙空间越大,液滴越容易渗透到压片中。

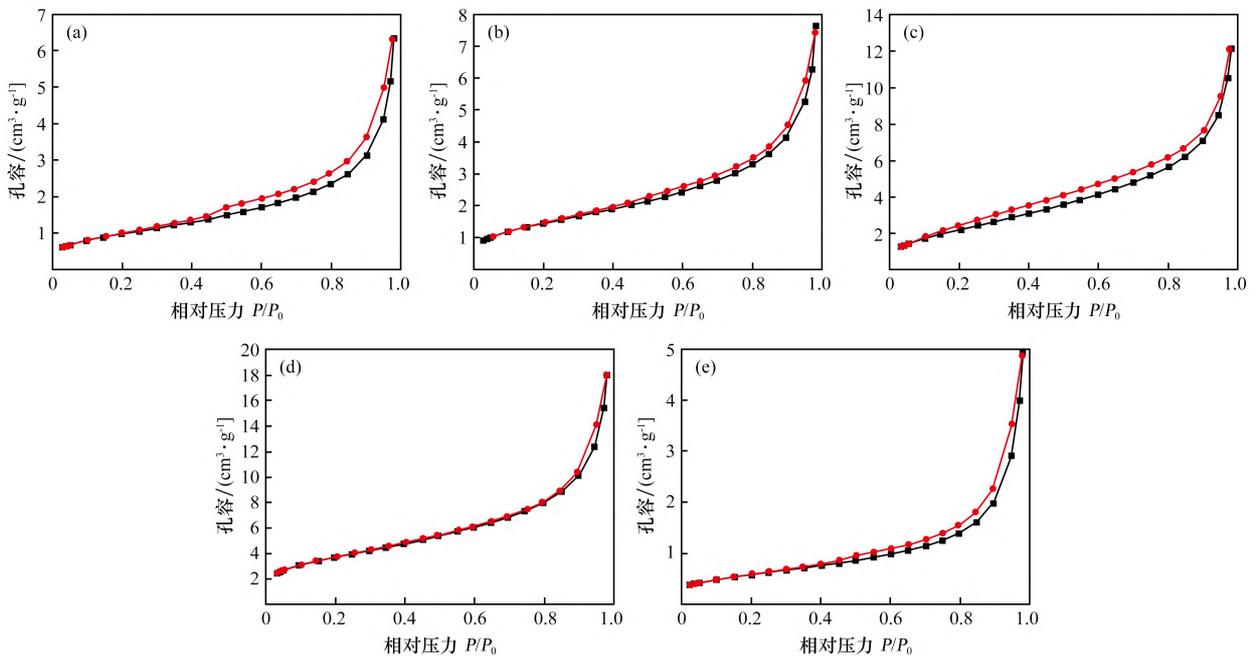
### 3.6 孔隙结构

孔隙结构是烧结粉尘的物性特征,影响着粉尘吸附容积、储存性能、自身渗透性的强弱,与其润湿特性密切相关。在 77 K 饱和温度下对粉尘进行等温吸-脱附测试,得到粉尘的氮气吸附等温线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,随着  $P/P_0$  增大,氮气吸附量在前半段增加较为缓慢,后半段急剧上升而且在接近饱和蒸汽压处也没有出现

吸附饱和现象。说明该粉尘的吸附等温线呈现上升且上凸趋势,属于第 II 类吸附等温线。另外,吸附回线也能反映孔隙结构的情况,通过相对压力点的氮气吸附量来确定样品的比表面积、总孔容、平均孔径,具体数据见表 3。另外,不同位置粉尘粒径不同,则比表面积、总孔容和平均孔径也有所不同,同样也会对粉尘润湿性能产生影响。结合烧结机机头 1~4 级除尘灰粒径和接触角数据发现:随着粉尘粒径变小,比表面积和总孔容逐渐增大,平均孔径则相应减小;同时接触角越小,润湿性越好,比表面积与润湿性能呈正相关。这是因为比表面积越大,水在粉尘压片孔隙中的扩散运动越快。而观察烧结机机尾除尘灰比表面积与发现润湿性能并不符合,这可能是由于烧结机机头和机尾除尘灰在粒径、形状、成分以及含孔量存在较大差异。

### 3.7 除尘试验

云式除尘器对  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的脱除效率结果如图 9 所示。试验过程中,试验台处于最佳运行状态,采用两个雾化片雾化,雾化量为 1 L/h,风速为 1.4 m/s。由图 9 可以看出,云式除尘对细颗粒物的脱除效率显著提高,均在 80% 以上。相比其他除尘器,云式除尘器能够显著增强对细颗粒物的去除效果。这是因为在云式除尘器里,细颗粒物碰撞长大,大幅降低了颗粒物的流体曳力,随后进入气固分离装置中,长大后的颗粒物受离心力的作用被捕集沉降。



(a) 机头 1 级; (b) 机头 2 级; (c) 机头 3 级; (d) 机头 4 级; (e) 机尾

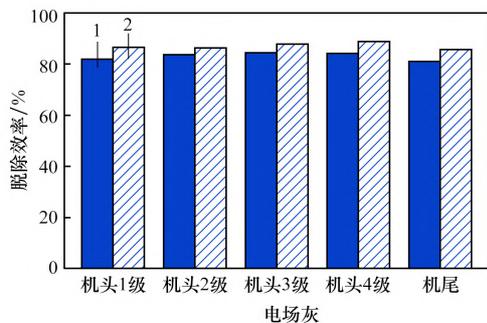
图 8 烧结粉尘低温氮吸附曲线 ( $T = 77\text{ K}$ )

Fig. 8 Low-temperature nitrogen adsorption curve of sintering dust ( $T = 77\text{ K}$ )

表 3 烧结电除尘灰孔隙特征

Table 3 Pore characteristics of sinter ESP dust

电场灰	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/ nm	总孔容/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )
机头 1 级	3.600	10.901	$9.810 \times 10^{-3}$
机头 2 级	5.253	8.990	$1.181 \times 10^{-2}$
机头 3 级	8.489	8.848	$1.878 \times 10^{-2}$
机头 4 级	13.253	8.390	$2.780 \times 10^{-2}$
机尾	2.050	14.904	$0.764 \times 10^{-2}$



1— $\text{PM}_{2.5}$ ; 2— $\text{PM}_{10}$ 。

图 9 云式除尘对  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  的脱除效率

Fig. 9 Removal efficiency of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  by cloud dust removal

## 4 结论

(1) 烧结电除尘灰的粒径呈双峰或三峰值分布, 粉尘粒度分布不均匀。当烧结机机头烟气依次流经静电除尘器 1~4 级电场时, 大颗粒粉尘优先被捕集, 而小颗粒粉尘由于受到的电场力较小而不易被捕集。

(2) 烧结电除尘灰接触角均小于  $60^\circ$ , 属于易润湿性粉尘, 能被水有效润湿且润湿性较好。其中, 机头 1 级和机尾电除尘灰润湿性效果最好, 两者接触角随时间变化幅度最大, 直至最后消失不见。

(3) 云式除尘装置对高效细颗粒物的脱除有很好的作用, 可对烧结烟气中微细颗粒物后续处理提供支持。

## 参考文献:

[1] 王琿, 安登飞, 张六零. 钢铁企业烟粉尘重点排放源分析[J]. 环境工程, 2016, 34(3): 62-64.  
WANG Hui, AN Dengfei, ZHANG Liuling. Analysis on major smoke and dust emission sources in iron and steel enterprise[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(3): 62-64.

- [2] 秦立浩, 墙蕃, 阳红辉, 等. 烧结机头电除尘灰的分级利用[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(9): 802-808.  
QIN Lihao, QIANG Qiang, YANG Honghui, et al. Classified utilization of sintering EAF dust[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(9): 802-808.
- [3] 赵亚丽, 赵浩宁, 范真真, 等. 烧结机细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 排放特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1369-1375.  
ZHAO Yali, ZHAO Haoning, FAN Zhenzhen, et al. Emission characteristics of PM<sub>2.5</sub> from sintering machine[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1369-1375.
- [4] 马修元, 解标, 申智勇, 等. 垂直气流电除尘深度提效技术研究[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 726-731.  
MA Xiuyuan, XIE Biao, SHEN Zhiyong, et al. Research on efficiency deep improvement technologies of vertical airflow electrostatic precipitator[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 726-731.
- [5] 段毅, 包向军, 徐俊超, 等. 不同级数烧结电场除尘灰的理化特性分析[J]. 烧结球团, 2022, 47(2): 96-100.  
DUAN Yi, BAO Xiangjun, XU Junchao, et al. Analysis on physicochemical properties of sintered electric field fly ash with different stages[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(2): 96-100.
- [6] 程滕, 陶明清, 向羿, 等. 云式除尘技术对细颗粒物的脱除研究[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(5): 345-350.  
CHENG Teng, TAO Mingqing, XIANG Yi, et al. Study on removal of fine particles by Cloud-Air-Purifying technology[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(5): 345-350.
- [7] 吴胜利, 常凤, 张建良, 等. 机械活化烧结粉尘和高炉粉尘的物理化学性质[J]. 钢铁, 2017, 52(4): 84-93.  
WU Shengli, CHANG Feng, ZHANG Jianliang, et al. Changes in physical chemical properties of sintering dust and blast furnace dust by mechanical activation[J]. Iron & Steel, 2017, 52(4): 84-93.
- [8] 黄宇. 烟气增湿对粉尘特性及电除尘性能的影响规律[J]. 烧结球团, 2019, 44(4): 61-66.  
HUANG Yu. Law of influence of flue gas humidification on dust characteristics and electric dust removal performance[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4): 61-66.
- [9] MASAGUER V, OULEGO P, COLLADO S, et al. Characterization of sinter flue dust to enhance alternative recycling and environmental impact at disposal[J]. Waste Management, 2018, 79: 251-259.
- [10] TANG H H, ZHAO L H, SUN W, et al. Surface characteristics and wettability enhancement of respirable sintering dust by nonionic surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 509: 323-333.
- [11] 马坚, 许德坤, 汤云雷, 等. 炼油催化剂生产过程尾气的深度净化[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(1): 101-104.  
MA Jian, XU Dekun, TANG Yunlei, et al. Deep purification of exhaust gas in refining catalyst production process[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2020, 51(1): 101-104.
- [12] 李海英, 张春奇, 张宇擎, 等. 烧结烟气半干法脱硫微细颗粒物特征分析[J]. 化工进展, 2019, 38(4): 2022-2029.  
LI Haiying, ZHANG Chunqi, ZHANG Yuqing, et al. Characteristic analysis of fine particles in semi-dry desulfurization of sintering flue gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(4): 2022-2029.
- [13] YIN Y M, LI T S, ZUO K C, et al. Which surface is more scaling resistant? A closer look at nucleation theories for heterogeneous gypsum nucleation in aqueous solutions[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(22): 16315-16324.
- [14] 张洋, 崔豫楠, 闫晶晶, 等. 粒径对褐煤粉尘润湿性的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(2): 35-39.  
ZHANG Yang, CUI Yunan, YAN Jingjing, et al. Study on the influence of particle size on wettability of lignite dust[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(2): 35-39.
- [15] 李海英, 多鹏, 滕军华, 等. 转炉粉尘静电除尘器数值模拟[J]. 过程工程学报, 2016, 16(5): 833-839.  
LI Haiying, DUO Peng, TENG Junhua, et al. Numerical simulation on electrostatic precipitator of dust from steel converter[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(5): 833-839.