不同级数烧结电场除尘灰的理化特性分析

段 毅，包向军，徐俊超，黄静如
（安徽工业大学 能源与环境学院，安徽 马鞍山 243002）

摘要：本文以1～4级电场除尘灰作为研究对象，对水洗处理后原始灰样的粒度分布、元素组成、化学组分的晶体结构、可溶盐组分的存在形式等进行测试，并分析析晶形貌，讨论不同电场除尘灰化学成分、比电阻的变化规律。结果表明：除尘灰中的Fe主要以Fe_2O_3的形式存在、K主要以KCl形式存在，还有少量的NaCl存在；当电场级数从1级增加至4级时，除尘灰的+100 μm的粒级占比从37.58%降低至2.13%，比电阻从3.84 kΩ·cm增大至101.1 kΩ·cm；水洗去除了4级电场除尘灰中4.51%的K和2.05%的Na，粉尘比电阻从101.1 kΩ·cm降低至13.41 kΩ·cm。

关键词：烧结除尘灰；理化特性；可溶盐；比电阻
中图分类号：TF046.4；TF09 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0096－05
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.030

Analysis on physicochemical properties of sintered electric field fly ash with different stages

DUAN Yi，BAO Xiangjun，XU Junchao，HUANG Jingru
（*School of Energy and Environment，Anhui University of Technology，Ma'anshan* 243002，*Anhui*，*China*）

Abstract：The 1～4 grade electric field fly ash is taken as the research object in this paper，the particle size distribution，elemental composition，crystal structure of chemical components，and the presence form of soluble salt components of the original ash samples after water washing treatment are tested，and the crystallization morphology is analyzed to discuss the variation law of chemical composition and specific resistance of different electric field flash ash. The results show that the Fe in the fly ash is mainly in the form of Fe_2O_3，K is mainly in the form of KCl，and a small amount of NaCl is also present；when the number of electric field stages increases from 1 to 4，the percentage of +100 μm particle size in the fly ash decreases from 37.58% to 2.13%，and the specific resistance increases from 3.84 kΩ·cm to 101.1 kΩ·cm；when 4.51% K and 2.05% Na are removed by water washing from the 4-stage electric field fly ash，the specific resistance of dust decreases from 101.1 kΩ·cm to 13.41 kΩ·cm.

Key words：sintered fly ash；physicochemical properties；soluble salts；specific resistance

钢铁工业已经成为我国工业粉尘的第三大排放源[1]，其占全国粉尘排放总量的15%左右。其中，烧结作为钢铁生产流程中重要的一环，其粉尘排放量超过1 000万吨/年，占整个钢铁生产过程烟尘排放量的43%左右[2]。电除尘器因除尘效率高、阻力损失小、烟气处理量大、粉尘捕集粒径范围广、自动化运行等诸多优势被广泛应用于烧结除尘。数据表明，钢铁企业90%以上的烧结机都采用了电除尘器[3]。

烧结烟气粉尘特性对电除尘脱除效率具有重要影响。目前，部分学者已对烧结过程除尘系统中粉尘的物化特性进行了研究，如：赵亚

收稿日期：2021－03－23；**修回日期**：2021－04－26
基金项目：安徽省重点研究与开发计划资助项目(812233552051)；安徽高校自然科学研究项目(KJ2020A0267)
作者简介：段 毅(1996—)，男，硕士研究生，从事工业烟气污染物治理方面的研究。
通讯作者：包向军(1973—)，男，副教授，从事冶金过程节能环保方面的研究工作。

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

丽等[3]对不同烧结机 $PM_{2.5}$ 的化学组成进行分析，发现烧结机头 $PM_{2.5}$ 中主要成分的质量分数排序为 $K^+ > OC$（有机碳）$> Pb > Si > Fe > EC$（无机碳）$> Cl^- > SO_4^{2-}$，而烧结机尾 $PM_{2.5}$ 中主要成分的质量分数排序为 $Fe > SO_4^{2-} > Si > OC > K^+ > Cl > Ca^{2+} > EC$；马京华[2]通过荷电低压颗粒物撞击器（ELPI）对某烧结机头除尘器的除尘效率进行了测试，结果表明，PM_{10} 的除尘效率高于 $PM_{2.5}$ 的除尘效率，这是因为颗粒粒径越小，除尘器的除尘效率越差；刘道清等[4]研究了烧结机不同位置处粉尘粒径的分布情况，结果表明，距烧结机 1.5 m 和 15 m 位置处 PM_{10} 占比分别为 87% 和 56.60%，烧结过程产生 PM_{10} 较多；付本全等[5]对烧结机头除尘灰进行了形貌和物相研究，发现除尘灰主要包含 Fe_2O_3、KCl 等物质；刘超等[6]研究得出，在烟气循环烧结工艺条件下，烧结生产减碳量为 10% 时，可保证烧结矿的各项性能指标和实现节能减排。

上述研究并没有系统分析烧结机粉尘的元素构成、物相构成、粒径、颗粒形貌以及粉尘比电阻。同时，研究表明：可溶盐组分会对比电阻产生较大的影响，导致烧结粉尘中 K、Na 质量分数普遍偏高[7-8]；而此类碱金属元素所形成的化合物沸点低，在高温条件下容易以单质气体形式逸出[9-11]，经过反应后析出的氯化物晶体极易黏附在极板上，严重影响电除尘器性能。而可溶盐的成分与数量变化对比电阻产生的影响尚不清楚。

为了系统探究烧结除尘灰的理化特性，掌握除尘灰成分对烧结电除尘的影响规律，本文采用水洗脱盐工艺，研究不同级数烧结电场除尘灰的成分特性、粒径分布和比电阻随电场级数的变化规律，为烧结电除尘器参数调控、原料配比和除尘灰精细化处理提供理论依据和数据基础。

1　试验方法

试验样品为某钢铁厂烧结机头电除尘器1～4 级电场的除尘灰。本文对该除尘灰按图 1 所示流程进行水洗处理：取 1～4 级电场适量原始灰样与去离子水按 1∶3（质量分数）混合，搅拌 60 min 后将其过滤分离；将溶液和滤渣在 150 ℃下分别干燥获得干灰和析晶；针对原始灰、干灰及析晶的理化特性分别进行测试，分析除尘灰成分、粒径、比电阻随 1～4 级电场的变化规律。试验采用 ARL 3600 型 X 射线荧光光谱仪分析元素组成，D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪分析晶体结构，Malvern 3000 型激光粒度仪测试粒径分布，SEV8010 电子显微镜（SEM）分析灰样形貌，ST2722 半导体粉末电阻率测试仪（四端子法、四探针法）+ ST2742B 电动粉末电阻率测试仪 + ST2643 型超高阻微电流测试仪测试比电阻。



图 1　水洗试验流程

Fig. 1　Water washing experiment process

2　试验结果与讨论

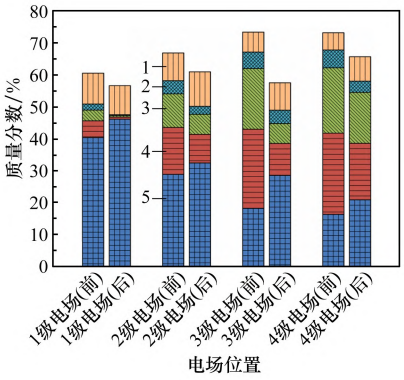
2.1　元素分析

除尘灰水洗前、后的主要元素种类及其占比如图 2 所示。由图 2 可看出，原始灰中主要元素为 Fe、Cl、K、Na 和 Ca。随着电场级数的增加，除尘灰中 Fe 的质量分数逐渐下降至 15% 左右。其中，在 1 级电场，Fe 的质量分数最大（40.35%），Cl、K 质量分数有明显的上升；在 3、4 级电场，Cl、K 的质量分数超过了 Fe，Na 和 Ca 的质量分数无较大变化。这主要是因为 1 级电场收集的除尘灰主要是由 Fe_2O_3、Fe_3O_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。而 Cl、K、Na 在烧结高温环境下由气态凝结成细小颗粒并附着在其他颗粒表面，其一般在 3～4 级电场才能被部分捕集。

将 Cl、K、Na 质量分数按相对原子质量计算后，可初步判断 Cl 和 K、Na 结合形成了 KCl、NaCl，这与范佳慧等[12]的研究结果相似。

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

水洗处理后，除尘灰的主要元素种类与原始灰相同，质量都有一定程度地减少。除 1 级电场外，Cl、K 的质量分数明显下降，而 Na 的质量分数变化不大，可以推断烧结灰中的可溶盐主要成分应为 KCl。



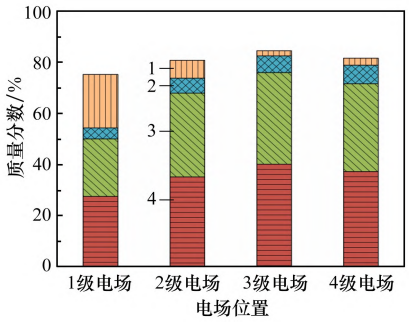
1—Ca；2—Na；3—K；4—Cl；5—Fe。

图 2 1～4 级电场除尘灰水洗前后元素质量分数变化

Fig. 2 Change of element mass content before and after water washing of the 1～4 level electric field fly ash

水洗析晶的主要元素及质量分数如图 3 所示。由图 3 可知：析晶中的主要元素为 Cl、K、Na 和 Ca，其中 Cl 的质量分数最高，达到 40.05%；其次为 K，达到 35.85%，Cl 和 K、Na 之间的比例关系与原始灰样及一次水洗后的干灰类似；Ca 主要在 1 级电场的析晶中比较多。

2.2 物相分析

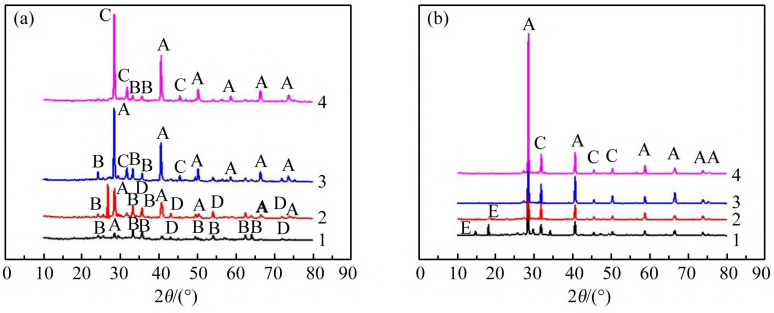


1—Ca；2—Na；3—K；4—Cl。

图 3 水洗析出物主要元素的质量分数

Fig. 3 Mass content of main elements in water-washed precipitates

1～4 级烧结机头电场除尘灰及洗涤后的析晶 XRD 分析如图 4 所示。从图 4(a)可以看出：原始电除尘灰主要成分为 Fe_2O_3、Fe_3O_4 和可溶性盐 KCl、NaCl，这与文献[13]研究结果一致；Fe_2O_3、Fe_3O_4 主要存在于 1～2 级电场，尤其是带有磁性的 Fe_3O_4 在 1～2 级电场几乎被完全捕集；3～4 级电场中只含有较少量的 Fe_2O_3；可溶性盐 KCl、NaCl 的分布恰恰相反，随着电场数的增加，捕集灰中的可溶盐质量分数逐渐增加，这与钱峰[14]的研究结果类似。从图 4(b)可知：各电场析晶中的主要物质为 KCl 和 NaCl，另外，1 级电场中还含有少量的$CaSO_4 \cdot H_2O$。同样也可以看出，随着电场数增加，可溶盐质量分数逐渐增加。



1～4—1～4 级电场；A—KCl；B—Fe_2O_3；C—NaCl；D—Fe_3O_4；E—$CaSO_4 \cdot H_2O$。

图 4 1～4 级烧结机头电场除尘灰及洗涤后的析晶 XRD 分析

Fig. 4 XRD pattern of 1～4 level electric field fly ash of machine head and crystallization after washing

2.3 析晶形貌分析

对 1～4 级电场除尘灰水浸后的析晶进行 SEM 扫描电镜分析，结果如图 5 所示。由图 5 可知：1 级电场中存在明显的单斜结晶为 $CaSO_4 \cdot H_2O$，2、3、4 级电场中的立方体颗粒为 KCl 颗粒，这和文献[15]中的研究结论吻合。结合 XRD 分析可知，有少量的 NaCl 存在于 1～4 级电场中。

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

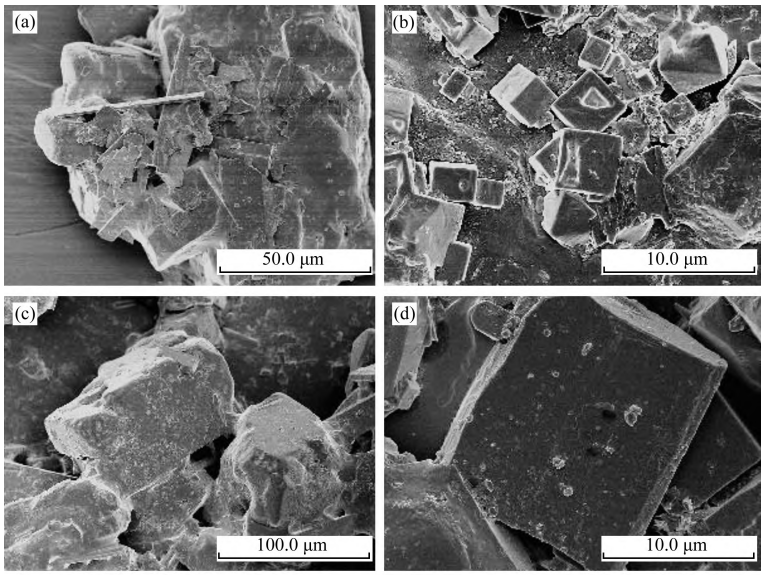
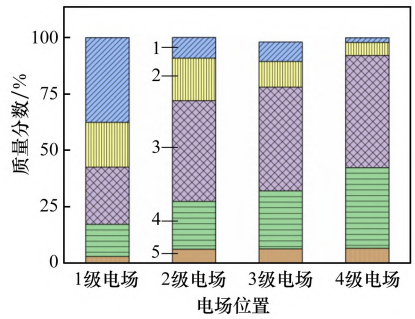


图 5　1 ~ 4 级烧结机头电场除尘灰洗涤后析晶的 SEM 分析结果

Fig. 5　SEM image of crystallization after ash washing of 1 ~ 4 level electric field of machine head

2.4　粒径分布

1 ~ 4 级电场灰样的粒径分布如图 6 所示。由图 6 可知：1 ~ 4 级电场原始灰粒径分布在 0 ~ 1 000 μm 范围。其中，粒径大于 50 μm 的灰主要在 1、2 级电场被捕集，0 ~ 50 μm 的灰样在 3、4 级电场中占比较大。随着电场级数的增加，0 ~ 10 μm 粒径范围的灰样占比增加，粒径大于 100 μm 的灰样占比减少。这主要是因为 1、2 级电场原始灰的 Fe 元素占比大于 Cl、K、Na、Ca，粒径相对较大、比电阻较小、荷电效果更好，故容易在前端电场被捕集。



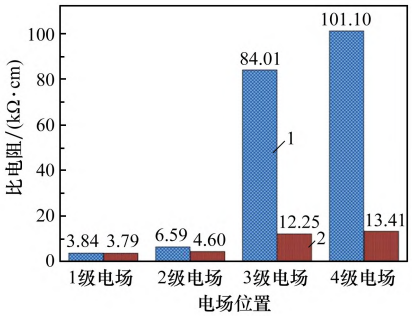
粒度/μm：1—100 ~ 1 000；2—50 ~ 100；3—10 ~ 50；4—2 ~ 10；5—0 ~ 2。

图 6　1 ~ 4 级电场灰样粒径分布

Fig. 6　The proportion of the particle size distribution of the 1 ~ 4 electric field ash sample

2.5　比电阻

1 ~ 4 级电场原始灰和水洗一次干灰的比电阻变化情况如图 7 所示。由图 7 可知：原始灰及一次水洗灰的比电阻均随电场数的增加而增大，且原始灰比电阻随电场数增加而上升的幅度大于一次水洗灰。如 4 级电场原始灰的比电阻约为 1 级电场原始灰比电阻的 26 倍。这主要是因为带电粉尘向收尘极板移动的速度与粉尘半径成正比[16]，随着电场数的增加，除尘灰的粒径越来越小，并且灰中 Fe 质量分数降低，导致比电阻上升。电场级数从 1 级增加至 4 级，取样得到的除尘灰粒径分布大于 100 μm 的体积占比从 37.58% 降至 2.13%，比电阻从 3.84 kΩ·cm增大至101.1 kΩ·cm。另外，任一电场中，原始灰的比电阻大于一次水洗灰的比电阻。这



1—原始灰；2——一次水洗灰。

图 7　1 ~ 4 电场原始灰及水洗后灰样比电阻

Fig. 7　Specific resistance of 1 ~ 4 electric field original ash and ash sample after washing

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

是由于水洗过程中大量的 Cl、K、Na 被脱除，所以水洗灰比电阻小于原始灰比电阻，且随着电场数的变化比电阻上升的幅度不明显。其中4级电场除尘灰中由于水洗降低灰了 4.51% 的 K 和 2.05% 的 Na，粉尘比电阻从 101.1 kΩ·cm 降至13.41 kΩ·cm。因此可以看出，烧结灰粒径越大、Na、K 可溶盐质量分数越少、Fe 质量分数越高，比电阻越小。

3 结 论

（1）烧结电场除尘灰的主要元素为 Fe、Cl、K、Na 和 Ca。Fe 元素主要以 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 形式存在，Fe 元素含量多的颗粒粒径较大；K、Na 等碱金属元素以 KCl、NaCl 形式存在，且这些颗粒粒径较小，可溶盐的存在使粉尘比电阻增大，降低了电除尘器的捕集效率。

（2）随着电场级数增加，捕集的烧结灰平均粒径减小，比电阻增大，末端电场粉尘的比电阻约为1级电场粉尘比电阻的26倍。

（3）电除尘的除尘效果主要取决于粉尘的比电阻，烧结灰粉尘粒径、Fe 和可溶盐的质量分数对比电阻具有重要的影响。电场级数从1级增加至4级，取样得到的除尘灰粒径分布大于 100 μm 的体积占比从 37.58% 降至 2.13%，比电阻从 3.84 kΩ·cm 增大至101.1 kΩ·cm。水洗去除4电场除尘灰中 4.51% 的 K 和 2.05% 的 Na，粉尘比电阻从 101.1 kΩ·cm 降至13.41 kΩ·cm。

参考文献：

[1] 王珲,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;101.
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):62-64,101.

[2] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究[D]. 重庆:西南大学,2009.
MA Jinghua. Emission characteristics of particulates from typical production process of iron and steel enterprises[D]. Chongqing:Southwest University,2009.

[3] 赵亚丽,赵浩宁,范真真,等. 烧结机细颗粒物 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ from sintering machine[J]. Chinese journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1369-1375.

[4] 刘道清,季学李. 钢铁企业典型污染源颗粒物污染特征研究[J]. 环境科学与管理,2006,31(4):53-55.
LIU Daoqing, JI Xueli. Study on particulate pollution characteristics of typical sources in iron and steel works[J]. Environmental Science and Management,2006,31(4):53-55.

[5] 付本全,黄建阳,吴英,等. 烧结机头除尘灰理化性能及磁性特征分析[J]. 武汉科技大学学报,2014,37(4):255-258.
FU Benquan, HUANG Jianyang, WU Ying, et al. Physicochemical properties and magnetic characteristics of electrical precipitator dust on the head of sintering machine[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology(Natural Science Edition),2014,37(4):255-258.

[6] 刘超,张玉柱,邢宏伟,等. 高污染物烟气循环烧结合理配碳研究[J]. 烧结球团,2017,42(5):51-56.
LIU Chao, ZHANG Yuzhu, XING Hongwei, et al. Study on reasonable carbon content in high pollutant concentration flue gas circulating sintering [J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(5):51-56.

[7] 黄星. 浅谈影响烧结机头电除尘器效率的主要因素[J]. 中国环保产业,2012(6):49-52.
HUANG Xing. Simple explain main factors that make impact on efficiency of electric precipitator of sintering machine head [J]. China Environmental Protection Industry,2012(6):49-52.

[8] 郭占成,彭翠,张福利,等. 利用钢铁企业烧结电除尘灰生产氯化钾的方法:101234766[P]. 2008-08-06.
GUO Zhancheng, PENG Cui, ZHANG Fuli, et al. Utilization of sintering dust of iron and steel enterprise for producing potassium chloride:101234766[P]. 2008-08-06.

[9] 闫俊萍,马燕生. 氟在烧结矿中的赋存状态及作用[J]. 烧结球团,1995,20(6):15-18.
YAN Junping, MA Yansheng. The existing state of fluoring and its effecting[J]. Sintering and Pelletizing,1995,20(6):15-18.

[10] 柏凌,张建良,郭豪,等. 炉内碱金属的富集循环[J]. 钢铁研究学报,2008,20(9):5-8.
BO Ling, ZHANG Jianliang, GUO Hao, et al. Circulation and enrichment of alkali metal in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research,2008,20(9):5-8.

[11] 王成立,吕庆,顾林娜,等. 碱金属在高炉内的反应及分配[J]. 钢铁研究学报,2008,18(6):6-10.
WANG Chengli, LU Qing, GU Linna, et al. Reaction and distribution of alkali metals in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research,2008,18(6):6-10.

（下转第 109 页）

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

法[J]. 天然气技术,2008(5):54 - 56;65;79 - 80.
ZHU Hong, PAN Guozheng, CUI Changhong, et al. Disposal method of waste desulfurizer in natural gas treatment station [J]. Natural gas technology,2008(5):54 - 56;65;79 - 80.

[9] PAN Jian, SHI Benjing, ZHU Deqing, et al. Improving sintering performance of specularite concentrates by pre-briquetting process[J]. ISIJ International,2016,56(5):777 - 785.

[10] 潘建,朱德庆,崔瑜,等. 铁矿烧结烟气中 SO_2 的排放规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(6):1495 - 1500.
PAN Jian,ZHU Deqing,CUI Yu,et al. Emission law of SO_2 in iron ore sintering flue gas[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition),2011,42(6):1495 - 1500.

(上接第 73 页)

[14] 邸航,何志军,闫丽娟,等. 基于大型铁矿石熔滴检测设备的综合炉料性能[J]. 钢铁,2018,53(10):90 - 94.
DI Hang,HE Zhijun,YAN Lijuan,et al. Metallurgical property of mixed burden based on a large scale iron ore droplet testing equipment[J]. Iron & Steel,2018,53(10):90 - 94.

[15] 陶伟平. 矿石筛分与粉碎系统工艺流程的优化和改进[J]. 烧结球团,2019,44(4):51 - 56.
TAO Weiping. Optimization and improvement of the process flow of ore screening and pulverizing system[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):51 - 56.

[16] DONSKOI E,SUTHERS S P,FRADD S B,et al. Utilization of optical image analysis and automatic texture classification for iron ore particle characterization[J]. Minerals Engineering,2007,20:461 - 471.

[17] 左海滨,于文涛,张建良. 温度对天然块矿爆裂的影响[J]. 钢铁,2015,50(5):7 - 12.
ZUO Haibin, YU Wentao, ZHANG Jianliang. Effects of temperature on the decrepitation performance of natural lump ores [J]. Iron & Steel,2015,50(5):7 - 12.

(上接第 100 页)

[12] 范佳慧,周莉莉,朱春要. 熔融制样 - X 射线荧光光谱法测定除尘灰中 10 种组分[J]. 冶金分析,2019(10):61 - 66.
FAN Jiahui, ZHOU Lili, ZHU Chunyao. Determination of ten components in dust ash by X-ray fluorescence spectrometry with fusion sample preparation[J]. Metallurgical Analysis, 2019(10):61 - 66.

[13] ZHAN Guang, GUO Zhancheng. Basic properties of sintering dust from iron and steel plant and potassium recovery[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,25(6):1226 - 1234.

[14] 钱峰,于淑娟,侯洪宇,等. 烧结机头电除尘灰资源化再利用[J]. 钢铁,2015,50(12):67 - 71.
QIAN Feng, YU Shujuan, HOU Hongyu, et al. Recycling of the electric dust in sintering machine head[J]. Iron and Steel, 2015,50(12):67 - 71.

[15] GAN Min, JI Zhiyun, FAN Xiaohui, et al. Emission behavior and physicochemical properties of aerosol particulate matter (PM_{10}/$PM_{2.5}$) from iron ore sintering process[J]. ISIJ International,2015,55(12):2582 - 2588.

[16] 黎在时. 电除尘器的选型安装与运行管理[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
LI Zaishi. Selection, installation and operation management of electrostatic precipitator[M]. Beijing: China Electric Power Press,2005.

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