



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\) 在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

刘鹏,饶俊,顾晓滨. 电厂磨煤燃前干法净化提质研究进展[J]. 能源环境保护, 2020, 34(4): 7-11.

LIU Peng, RAO Jun, GU Xiaobin. Research progress of pre-combustion dry purification and upgrading of grinding pulverized coal used in a thermal power plant[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(4): 7-11.

电厂磨煤燃前干法净化提质研究进展

刘鹏, 饶俊, 顾晓滨

(河北地质大学 宝石与材料工艺学院, 河北 石家庄 050031)

摘要:针对燃煤电厂-0.5 mm 磨制煤粉,分析了干法磁选、稀相气固流化床分选、摩擦电选等干法净化提质方法的研究进展。当前研究已经掌握操作参数和物料性质等因素对实验室阶段净化提质效果的影响规律,仍缺乏对物性与设备的耦合研究,对结构参数及其与操作参数的协同研究也较少,缺少稳定可靠的连续性放大设备。建议在设备大型化和连续性探索、参数协同、物性的适应性分析、工艺联合等方面,进一步加强研究工作。

关键词:电厂煤粉;燃前;干法净化提质

中图分类号:X51

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)04-0007-05

Research progress of pre-combustion dry purification and upgrading of grinding pulverized coal used in a thermal power plant

LIU Peng, RAO Jun, GU Xiaobin

(School of Gems and Materials Technology, Hebei Geo University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: For -0.5 mm pulverized coal in a coal-fired power plant, the research progress of dry purification and quality improvement methods such as dry magnetic separation, dilute phase gas-solid fluidized bed separation, and triboelectric separation were analyzed. Current research has studied the influence of operating parameters and material properties on the purification and quality improvement in the laboratory stage, but still lacks coupling research on physical properties and equipment, collaborative studies on structural parameters and their operating parameters, or stable and reliable continuous amplification equipment. Thus, it is recommended to further strengthen the research in the aspects of exploring large-scale and continuous equipment, parameter coordination, physical property adaptability analysis, and process combination.

Key Words: Fine coal of thermal power plant; Pre-combustion; Dry purification and upgrading

0 引言

2018年煤炭在我国一次能源消费中占比58.5%左右,是我国能源供应的压舱石和稳定器,但其不清洁利用造成了严重的大气污染,而这些污染物主要来自消耗煤炭总量达53.9%的燃煤电厂。减少燃煤对环境污染的重要一环在于燃煤电厂对煤的清洁高效利用。目前,降低电厂燃煤污染的技术主要有燃前净化、燃中固硫、燃后烟气净

化等,其中燃前净化是源头技术,被认为是煤炭高效清洁利用、节能减排最经济有效的方法,是煤炭加工利用、转化为洁净煤基产品的基础和前提^[1-2]。煤炭资源和水资源地理空间分布极度失衡使高效干法净化成为理想的煤炭清洁利用途径^[3-4]。此外,为提高燃烧效率,电厂均设有干法磨煤制粉作业,不仅便于和干法净化技术耦合,还可使煤中有机质与有害物质解离,客观上为燃前净化提供了有利条件^[5-6]。燃前高效干法净化技

收稿日期:2020-05-20

基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目-青年基金(项目编号:QN2018124)

第一作者简介:刘鹏(1983-),男,河南商丘人,博士,副教授,主要从事矿物加工、矿物材料、机械设计等工作。E-mail:llp080@126.com

术可将电厂用煤加工成低灰、低硫、高热值煤炭,降低磨机能耗,对保护环境和降低电厂运行成本具有重要意义,无疑是缓解燃煤造成大气污染的最佳途径^[7]。为此,综述了近年来燃前干法净化提质技术的研究进展,指出了存在的问题和趋势,为减少电厂燃煤对环境的污染提供些参考。

1 研究现状

-0.5 mm 煤粉燃前干法净化提质技术主要包括干法磁选、稀相气固流化床(Gas-solid Fluidized Bed,简称 G-SFB)分选、摩擦电选等。

1.1 干法磁选

磁选基本原理主要是利用煤中逆磁性煤基质与顺磁性 FeS_2 及其它成灰矿物质间的磁性差异而实现分离^[8-9]。

1.1.1 普通磁选

崔静媛研究了煤粉的磁性质,并进行了磁选实验:煤是处于顺磁性和逆磁性间的弱磁性矿物,其比磁化率受粒度、密度、磁场强度影响;精煤产率 59.53% 时, -0.074 mm 煤粉的脱硫率、降灰率分别为 41.85%、43.23%^[10]。史长亮等对平煤二矿磨机回粉采用干式磁选机进行了脱硫实验:精煤产率 87.88% 时,脱硫率为 27.98%^[8]。张义顺等利用 PFC^{2D} 软件分析了煤粉在磁场中的干式磁选行为^[11]。研究已证实普通干法磁选具有一定净化效果,但效果易受无机硫赋存形态及煤种的影响;目前研究所用干法磁选机基本为间歇式设备,且处理量较小;设备对物性变化的适应性较差,物性与磁选设备耦合相关的研究不足。

1.1.2 选前强化磁选

研究表明选前热处理强化可改善磁选^[7]。刘振环采用干法磁选机对宏鑫、前进高硫煤在 400~550 °C 热处理后磁选:精煤硫分均可降至约 1%,灰分分别降至 13.74%、11.01%^[12]。 FeS_2 转化为磁黄铁矿的温度为 400~550 °C 时,比文献[8]报道的转化温度低约 200~300 °C。夏文成等将 -0.074 mm 煤粉与 Fe 粉以质量比为 4:1 共热解后进行干式磁选降硫:有机硫从共热解前的 2% 降至 700 °C 时的 0.33%;未加 Fe 粉时,700 °C 热解后有机硫仅降至 1.28%^[13-14]。研究证实仅热处理时有机硫脱除效果不佳,加入 Fe 等催化剂并进行热处理是脱除有机硫的一种有效方式,Fe 粉可促进有机硫分解,分解的硫与 Fe 粉形成 FeS 、 FeS_2 被脱除;因适宜温度能使 FeS_2 尽可能转化为磁黄铁矿,

热处理强化无机硫 FeS_2 存在最佳温度,煤种不同转化成磁黄铁矿温度亦不同。

微波亦能起到选前强化的作用^[15]。赵爱武在场强 0.5 T,微波功率 1 200 W,频率 2.45 GHz 时,考察了辐照时间强化 FeS_2 对磁选 0.125~0.074 mm 煤样脱硫的影响:在 2~10 min 区间脱硫率随照射时间增加而增大,趋势变缓拐点 8 min 时脱硫率为 80%^[16]。张博等利用微波强化 FeS_2 磁性表明:-0.5 mm 渭南和孝义煤磁化率随加热时间延长而增加,在 240 s 时最佳,最大磁化率比 FeS_2 提高了一个数量级^[17]。张博还采用微波选前强化 -0.5 mm 潞安煤中 FeS_2 :最佳时间为 180 s;强磁选精煤产率为 92.10% 时,硫分为 2.15%,脱硫率为 45.37%^[18-19]。其加入 5% 磁介质形成高梯度磁选时亦取得了类似结果^[20]。张博还利用神经网络建立了粉煤微波介电增强过程中电磁参数的预测模型^[21]。研究证实微波强化 FeS_2 可改善净化提质效果,脱除煤中 FeS_2 硫,辐照存在最佳时间,温度过低,未生成磁黄铁矿,不利于脱硫;温度过高,磁黄铁矿又转化为无磁性陨硫铁,影响磁选效果;且与微波使用气氛、煤粉粒度等有关。

1.2 稀相 G-SFB 分选

稀相 G-SFB 分选的原理是利用煤粉为自生介质,在流化的流化床层中,按煤基质与 FeS_2 及其它成灰矿物质的密度差异进行分层而分离。

1.2.1 普通稀相 G-SFB 分选

王帅等利用 300 mm×200 mm×500 mm 稀相 G-SFB 对大唐某电厂磨机返料的 0.5~0.125 mm 和 -0.5 mm 两煤样进行了间歇分选:其起始流化速度均为 0.41 cm/s;0.5~0.125 mm 重、轻产物硫分分别为 6.97%、1.09%,灰分分别为 77.58%、38.9%,可燃体回收率 94.11%;-0.5 mm 重、轻产物硫分分别为 6.99%、1.62%,灰分分别为 74.55%、44.64%,可燃体回收率 91.16%^[6,22]。刘振华等利用 G-SFB 对华电某电厂磨机返料进行了间歇分选:重产物产率 15.4% 时,重产物 -0.22 mm 粒级中全硫为 15.5%,灰分为 72.3%, FeS_2 在重产物中富集^[23]。Oshitani 等采用 $\Phi 100$ mm 圆柱 G-SFB 对 0.5~0.15 mm 煤粉分选表明:在流化数 2,分选 30 min,精煤产率 70% 时,灰分从 34% 降至 22.4%^[24]。研究表明虽然存在粒度效应,间歇式稀相 G-SFB 可实现按密度分层,可脱除无机硫及成灰物质,可对磨机返料实现净化,但其不能脱除有机硫;且宽粒级返料形成床层的稳定性和分选

效果更好。由于G-SFB利用返料为自生介质,流化特性及分选效果受返料粒度、煤种及床体结构等影响;操作参数可调范围窄。

1.2.2 强化稀相G-SFB分选

为强化稀相普通G-SFB分选引入了振动能量,王帅等还利用超声振动G-SFB对0.5~0.125 mm煤粉进行了间歇分选;振频35 kHz,流化数1.8时,轻产物和重产物间灰分差异47.30%,可燃体回收率89.59%,重产物中硫分最大为6.78%^[25]。张亚恒利用数值方法分析了机械振动G-SFB分选中床层特征参数的变化,并对磨机返料进行间歇分选;振幅0.75 mm、振频10 Hz,重产物产率为20.25%时,灰分脱除率为75.47%,可燃体回收率为90.33%^[26]。引入振动能量证实可强化按密度分选,可改善分选效果,还需深入研究结构参数、操作参数和物料适应性及其相互协同性等,完善对物性变化的适应性,并在实验室研究的基础上逐步进行放大实验。

1.3 摩擦电选

摩擦电选主要是利用颗粒相互碰撞摩擦产生电荷量不同而符号相反的电荷(煤颗粒带正电,其它颗粒带负电),带有异号电荷的颗粒在高压电场中产生不同运动轨迹而分离。

1.3.1 普通摩擦电选

电极对在分选时固定不动,梅雄等对36.48%灰分白庙矿-0.074 mm煤样进行了参数研究,电压50 kV,风量为75 m³/h时,精煤产率约为47.5%,相应灰分为16.88%^[27]。杨啸等考察了给料物性对摩擦电选的影响;分选效果随煤化程度降低而变差,空气相对湿度应低于80%, -0.074 mm粒度应占给料粒度70%以上,分选效果才稳定^[28]。李超永等考察了粒度对摩擦电选-0.175 mm双鸭山煤的影响;脱灰率随粒度减小而增大,0.083~0.058 mm粒度之后趋势变缓^[29]。Dwari等研究了板角、颗粒温度对灰分53%的-1 mm印度高灰煤摩擦电选的影响;最佳板倾角为5°,精煤产率约49%时,精煤灰分降至33%;进料温度105℃,分选效果较好^[30]。李海生等则研究了摩擦器内颗粒的碰撞特性^[31]。普通摩擦电选对磨制煤粉中细粒级的净化效果较好,但存在设备处理能力小、易堵塞、工艺效率低、受煤样影响而带电不稳定等问题。此外,对相关带电机理及稳定性还需要深入探索和对物性变化的适应性有待提高。

1.3.2 旋转摩擦电选

为提高分选效果让电极对在分选时转动形成

旋转摩擦电选,Tao等确定了摩擦电选-0.15 mm煤粉的最优条件:进料速度2 000 g/h,电极转速5 000 rpm,电极电位5 kV,喷射空气速率和顺流速率约为2.5~3 m/s^[32]。Chen亦考察了摩擦电选1~0.15 mm煤与硅质矿物的最佳条件:进料速度9.1 kg/h,电极转速4 000 rpm,电极电压5 kV,喷射空气速率0.6 m/s,顺流速率2.1 m/s^[33]。宋傲等分析了表面改性-0.074 mm汶南煤对分选的影响;煤油改性剂改性时间5 s及改性剂用量10 169 g/t时,脱硫率73.43%、脱灰率83.28%、可燃体回收率38.09%,证实煤粉表面改性可提高摩擦电选效果^[34]。张卫驰等采用与文献[34]相同设备及同产地未改性煤样,亦进行了条件优化研究^[35]。研究证实,旋转摩擦电选效果优于普通摩擦电选,但其存在与摩擦静电选相似的问题,同时设备变得复杂,操作因素增多,运行和维护成本亦增加;还需进一步优化操作参数范围及提高各因素间的协同性。

2 问题与展望

2.1 关键问题分析

(1)工艺和设备简单的煤粉干法磁选并未得到规模化工业应用,主要原因在于煤粉中矿物杂质与煤有机质间磁性差异小,缺乏燃前高效经济的磁性强化技术和处理量大的干法高效连续性磁选设备。

(2)稀相G-SFB分选操作参数可调范围窄、系统复杂、耗能较高、噪声大;流化床实验室设备处理量小,缺少对结构参数的研究,缺乏稳定性好且能连续性的放大设备。此外,返料中粒度分布对流化特性影响较大,操作流化速度的范围有待进一步拓宽。

(3)摩擦电选技术具有其独特的优势,但目前干法摩擦电选存在设备处理能力小、磨损快、易堵塞、工艺效率低、耗能大,矿物带电不稳定等问题,是其推广应用的主要障碍。

此外,每种净化提质方法都有其相应的适宜粒度范围,而对几种干法净化燃煤煤粉方法的耦合研究和工艺联合研究,还鲜有报道,有待尝试和探索。

2.2 发展趋势分析

这几种典型的燃前干法净化提质方法各有特点和优势,针对上述关键问题,应加强各种存在问题研究的基础上,尝试进行将煤粉进行分级提质

的协同研究:

(1)继续探索高效、经济的燃前磁性强化技术,强化机理研究和条件优化;加强颗粒易团聚问题研究,基于物料物性,与磁性强化和热处理强化等技术相耦合,强化设计研发处理量大的高效干法磁选设备。

(2)优化稀相 G-SFB 分选操作参数和结构参数,加强因素协同研究,研发稳定性、连续性好的放大设备,并进行相关理论研究;提高流化特性对返料粒度的适应性,并进行放大实验的探索。

(3)加强矿物表面结构及改性对分选过程的影响,改善带电稳定性,强化矿物在分选过程中的行为和参数协同研究;基于物料带电性质,设计高效、处理量大的新型设备是干法摩擦电选的主要方向。

(4)在优化各净化提质方法操作参数范围的基础上,基于燃煤煤粉主要干法净化提质方法各自相适宜的物料特性,探索进行这几种净化提质方法的协同提质和工艺联合,进而实现精准分选。

3 结语

研究表明采用干法磁选、稀相气固流化床分选、摩擦电选可实现对燃煤电厂磨制煤粉的净化提质。目前的研究已经掌握了操作参数和物料性质等因素对实验室阶段净化提质效果的影响规律,但仍存在缺乏物性与设备的耦合研究、对结构参数及其与操作参数的协同研究亦较少、缺少稳定可靠的连续性放大设备等问题。下一步应进行设备大型化和连续性探索、强化相关参数协同、提高对物性的适应性及工艺联合等方面的研究工作。

参考文献

- [1] Meshram P, Purohit B K, Sinha M K, et al. Demineralization of low grade coal—a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41 (1): 745-761.
- [2] Chen Y, Cao M, Ma C. Review of coal-fired electrification and magnetic separation desulfurization technology [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9: 1158-1171.
- [3] Zhao Y M, Yang X L, Luo Z F, et al. Progress in developments of dry coal beneficiation [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2014, 1 (1): 103-112.
- [4] 韦鲁滨, 刘鹏, 李凌月, 等. 空气重介质振动流化床入料特性与操作参数的协同研究 [J]. *煤炭学报*, 2016, 41 (2): 458-463.
- [5] 焦红光, 刘鹏, 陈清如. 高炉喷吹煤粉质量分布和组分特性关系的研究 [J]. *钢铁*, 2009, 44 (8): 20-23+28.
- [6] 王帅, 何亚群, 王海锋, 等. 稀相气固流化床分选电厂磨煤机返料的研究 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38 (3): 480-485.
- [7] 焦红光, 李沙, 王灿, 等. 热处理强化煤系黄铁矿磁性的研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40 (3): 459-463.
- [8] 史长亮, 焦红光, 张义顺. 磨煤机回粉干式永磁强磁选脱硫技术探讨 [J]. *河南理工大学学报 (自然科学版)*, 2010, 29 (1): 97-100.
- [9] 崔静媛. 煤粉磁性质及磁选可选性的研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2008: 22-51.
- [10] 刘鹏, 李大虎, 程相锋, 等. 干法磁选净化磁铁矿粉的应用研究 [J]. *中国矿业*, 2015, 24 (4): 121-124.
- [11] 张义顺, 史长亮, 田瑞霞. 基于 PFC^{2D} 高梯度磁场下煤粉干式磁选行为模拟 [J]. *煤炭学报*, 2013, 39 (8): 1668-1674.
- [12] 刘振环. 低温干燥/热解预处理强化低阶煤干法磁选研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016: 19-42.
- [13] Xia W C. A novel and effective method for removing organic sulfur from low rank coal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 2708-2710.
- [14] Xia W, Li Y, He W, et al. Desulfurization of low rank coal co-pyrolysis with reduced iron powder followed by dry magnetic separation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204: 525-531.
- [15] Zhang B, Zhu G, Sun Z, et al. Fine coal desulfurization and modeling based on high-gradient magnetic separation by microwave energy [J]. *Fuel*, 2018, 217: 434-443.
- [16] 赵爱武. 煤的微波辅助脱硫试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2002, 30 (3): 45-46.
- [17] Zhang B, Zhao Y, Zhou C, et al. Fine coal desulfurization by magnetic separation and the behavior of sulfur component response in microwave energy pretreatment [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29: 1243-1248.
- [18] 张博. 基于微波能量与介质协同作用的细粒煤磁选脱硫机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 42-67.
- [19] Zhang B, Fan X, Zhao Y, et al. Desulfurization of microwave pretreated fine coal by magnetic separation [J]. *Particulate Science & Technology*, 2018, 36: 600-608.
- [20] Zhang B, Zhu G, Lv B, et al. A novel high-sulfur fine coal clean desulfurization pretreatment: microwave magnetic separation, high-gradient effect and magnetic strengthen [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 697-709.
- [21] Zhu G, Zhang B, Lv B, et al. Clean desulphurization of high-sulfur coal based on synergy effect between microwave pretreatment and magnetic separation [J]. *ACS Omega*, 2018, 3 (8): 10374-10382.
- [22] 王帅. 电厂磨煤返料在稀相振动气固流化床中的颗粒分离行为 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013: 64-113.
- [23] 刘振华, 吕太, 张力夫, 等. 利用气-固流化床对磨煤机返料中硫铁矿的分选实验 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18 (15): 265-269.
- [24] Oshitani J, Teramoto K, Yoshida M, et al. Dry beneficiation of fine coal using density-segregation in a gas-solid fluidized

- bed [J]. *Advanced Powder Technology*, 2016, 4 (27): 1689-1693.
- [25] Wang S, He Y, Wei H, et al. Separation process of fine coals by ultrasonic vibration gas-solid fluidized bed [J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 2017: 1-8.
- [26] 张亚恒. 电厂磨煤机返料振动流化床分选的床层特性研究及数值模拟 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016: 27-60.
- [27] 梅雄, 章新喜, 陈锋, 等. 微粉煤的摩擦电选脱灰试验研究 [J]. *煤炭技术*, 2012, 31 (1): 140-142.
- [28] 杨啸, 章新喜, 李鑫, 等. 基于摩擦电选的微粉煤提质试验研究 [J]. *矿山机械*, 2012, 40 (12): 77-80.
- [29] 李超永, 章新喜, 何鑫, 等. 粒度对微粉煤的摩擦电选分选过程的影响 [J]. *煤炭技术*, 2015, 34 (6): 277-279.
- [30] Dwari R K, Mohanta S K, Rout B, et al. Studies on the effect of electrode plate position and feed temperature on the tribo-electrostatic separation of high ash Indian coking coal [J]. *Advanced Powder Technology*, 2015, 26 (1): 31-41.
- [31] 李海生, 章新喜, 陈英华. 摩擦电选中摩擦器内颗粒的碰撞特性 [J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41 (4): 607-612.
- [32] Tao D, Sobhy A, Li Q, et al. Dry cleaning of pulverized coal using a novel rotary triboelectrostatic separator (RTS) [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2011, 31 (3-4): 187-202.
- [33] Chen J, Honaker R. Dry separation on coal-silica mixture using rotary triboelectrostatic separator [J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 131: 317-324.
- [34] 宋傲, 陶有俊, 羨宇帅, 等. 微粉煤表面改性强化旋转摩擦电选脱硫降灰试验研究 [J]. *中国煤炭*, 2015, 41 (12): 79-85.
- [35] 张卫驰, 陶有俊, 宋傲, 等. 微粉煤旋转摩擦电选降灰试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45 (3): 196-200+110.