

述 评

烟煤热解全流程脱硫技术应用及研究进展

王之正^{1,2,3}, 裴贤丰^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

摘要:为实现烟煤热解提质增效,从脱硫角度,调研了各工段脱硫技术的应用及研究现状,试图厘清烟煤热解全流程脱硫的思路。烟煤热解全流程脱硫包括炉前煤炭脱硫、炉中热解脱硫和炉后煤气脱硫3部分。炉前煤炭脱硫方面,重介质洗选和浮选工业应用成熟,电选、磁选、微生物及各类化学脱硫方法仍处于研究阶段;热解脱硫方面,不同气氛下热解脱硫和与添加剂共热解脱硫均处于实验室研究阶段;炉后煤气脱硫以湿法氧化法应用最为广泛。为实现全流程有效脱硫,现阶段应重点加强以下几方面工作:①加大炉前脱硫技术的应用范围和研究力度;②加强针对有机硫脱除技术的研发;③研发配套环保技术,减少过程污染。

关键词:烟煤热解;技术耦合;全流程脱硫;清洁高效

中图分类号:TQ530.2 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)04-0101-06

Research and application of desulfurization technology in bituminous coal pyrolysis

Wang Zhizheng^{1,2,3}, Pei Xianfeng^{1,2,3}

(1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;

3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to improve the quality and efficiency of pyrolysis production, from the viewpoint of desulfurization, the application and research status of desulfurization technology in various sections were reviewed for sorting out the whole process desulfurization of pyrolysis. The whole process of desulfurization of pyrolysis includes three parts: coal desulfurization, pyrolysis desulfurization and gas desulfurization. Some coal desulfurization technologies, such as heavy medium washing and flotation have been commercialized application; while others such as electric separation, magnetic separation, microbial and chemical desulfurization methods are still under development; Pyrolysis desulfurization technologies, including those in different atmospheres and those with different additives, are in the research stage; in contrast, wet oxidation methods are the most widely used gas desulfurization technology. In order to achieve the effective desulfurization of the whole process, the following aspects should be further strengthened, ① increasing the application scope and research of pre-coking desulfurization technology; ② strengthening the research and development of organic sulfur removal technology; ③ researching and developing the environment friendly technologies to reduce process pollution.

Key words: Bituminous coal pyrolysis; Technology coupling; Whole Process Desulfurization; Clean and efficient

收稿日期:2017-04-17;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.016

基金项目:国家国际科技合作专项项目(2015DFA60320)

作者简介:王之正(1989—),男,山西高平人,从事煤炭热解等方面的研究工作。E-mail:wangzhizheng1223@126.com

引用格式:王之正,裴贤丰.烟煤热解全流程脱硫技术应用及研究进展[J].洁净煤技术,2017,23(4):101-106.

Wang Zhizheng, Pei Xianfeng. Research and application of desulfurization technology in bituminous coal pyrolysis[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 101-106.

0 引言

我国是焦炭生产和使用大国,近几年焦炭产量虽有所降低,但仍维持在一定水平。据统计,仅2016年,我国焦炭产量就达4.49亿t。炼焦产生的污染,特别是含硫化合物超标排放一直饱受诟病。随着埋藏深度的增加,国内用于炼焦的烟煤硫含量逐渐增高,而我国对于炼焦行业含硫污染物的排放要求日益趋严,因此“如何利用高硫烟煤获得低硫焦炭,同时含硫化合物达标排放”成为亟需解决的难题。

根据所处工段,现有烟煤热解脱硫技术可分为炉前煤炭脱硫、炉中热解脱硫以及炉后煤气脱硫3类。炉前煤炭脱硫方面,除已工业应用的重介质洗选、浮选等物理洗选脱硫技术外,微波脱硫、电磁选脱硫、电化学脱硫、萃取脱硫、微生物联合物理洗选脱硫等物理、化学、生物脱硫方法也被广泛研究;炉中热解脱硫方面,不同气氛下热解脱硫和与添加剂共热解脱硫是当前研究的主要方向;炉后煤气脱硫方面,有已被广泛应用的改良A. D. A法、HPF法等成熟技术,也有络合氧化铁法等在研技术。

尽管脱硫技术众多,但仍未能解决“如何利用高硫烟煤获得低硫焦炭,同时含硫化合物达标排放”的问题。笔者认为,应从烟煤热解全流程角度着手,使各工段脱硫技术相互配合,并在协作中最大限度地发挥各自优势。鉴于目前“脱硫技术众多但不同工段耦合研究少”的境况,笔者对炉前脱硫、炉中脱硫和炉后脱硫等不同工段的各类脱硫技术进行了调研,试图厘清烟煤热解全流程有效脱硫的思路。

1 炉前脱硫

炉前脱硫技术种类很多,其中有已工业化的重介质洗选、浮选脱硫,也有在研的萃取、微生物脱硫等,根据原理可分为物理洗选、化学脱硫和微生物脱硫3类。

1.1 物理法

1) 重介质洗选脱硫

重介质洗选为当前主流选煤技术,在我国煤炭洗选领域占比超过30%。重介质液多用磁铁矿粉与水的混合物,根据入选煤特点,有重介质分选机和重介质旋流器两类设备可供选择,其中重介质旋流器可分选细粒极难选煤料,脱硫效果明显。张军华^[1]将利用三产品重介质旋流器洗选25~0.4mm粒级

煤,全硫脱除率为55.2%,其中无机硫脱除率为78.1%。

重介质选煤工艺流程中均包括重介质旋流器处理^[2-3],是当前少有的工业应用成熟的煤炭脱硫方式。重介质旋流器洗选煤炭,分选粒度范围为0.045~50mm,且产品指标稳定;但重介质洗选仅可有效脱除煤中团聚的黄铁矿硫,对细粒、显微粒无机硫化物及有机硫化物作用甚微。此外,关键辅助设施如精煤脱泥设备、脱介筛等还不完善,应用过程中存在介耗高、电耗比高、煤泥水处理难、洗选效率不高等问题。

2) 浮选脱硫

浮选是工业中<0.5mm粒级煤脱硫的有效方法之一,在我国煤炭洗选领域占比超过10%。常规多段浮选法仅能脱除少量的黄铁矿硫,改进后的抑制黄铁矿浮选和两段反浮选效果更佳。

抑制剂是浮选脱硫的关键,无机类的石灰、水玻璃,有机类的巯基乙酸、联苯三酚等是研究较多的浮选脱硫抑制剂^[4]。邵绪新等^[5]研究了巯基乙酸为抑制剂时,南桐煤样浮选脱硫效果,全硫脱除率达到50.4%,黄铁矿脱除率为63%;付晓恒等^[6]研究了疏水絮凝浮选法处理淮北张庄煤和中梁山煤,全硫脱除率分别达到72.9%和79.25%。

浮选技术虽具有一定脱硫效果,但面对我国种类繁杂的煤样,其适应性仍相对狭窄,为进一步提高浮选脱硫的效率,行业研究人员一方面积极研发高效、安全的絮凝剂,探索相关工艺参数;另一方面通过与其他强化技术联用,形成耦合浮选脱硫技术,在研的有超声波强化浮选技术,微生物浮选技术等。

除上述工业化的脱硫技术外,其他炉前煤炭脱硫技术均处于实验室研究阶段。

3) 微波脱硫

微波脱硫是利用含硫化合物与煤介电性质的不同,导致在电场中被加热程度不同而实现脱硫。微波单独辐射直接脱硫时,无机硫脱除率为30%~40%,对有机硫则无脱除作用。

微波单独辐照脱硫效果一般,但微波对改善煤中含硫化合物性质和促进其他煤炭脱硫过程效果明显,因而,微波与其他脱硫法联用技术被广泛研究。目前已知的有:微波预处理-磁选脱硫、微波化学脱硫、微波预处理-微生物脱硫等几类。

翁斯灏^[7]研究发现,微波联合磁选共同处理煤样时,微波下辐照60s,煤中无机硫脱除率可达到

91%;程刚等^[8]对比了原煤样和微波预处理后煤样,经嗜酸氧化亚铁硫杆菌脱硫的效果,结果发现微波联合细菌法比单纯细菌法脱硫率提高5%~10%;微波化学脱硫,是用微波辐照煤样与酸、碱或氧化剂的混合物,实现脱硫。赵景联等^[9]研究发现,用微波辐照煤样与冰醋酸和过氧化物的混合物可使有机硫脱除率达到60.20%,微波化学法脱硫效果明显,但易造成煤样氧化,黏结性显著破坏。

上述微波脱硫法,仅微波化学法可同时脱除无机硫和有机硫,但其对煤炭质量的破坏不容忽视,且脱硫成本较高。另外,微波处理煤样时,易产生H₂S和SO₂等有害气体。

4) 电选脱硫

煤炭脱硫领域研究较多的电选技术是摩擦电选,可洗选0~0.074 mm粒级煤炭,国内将其作为微粉煤处理和粉煤灰脱碳技术进行研究,近年来微粉煤方面的研究多集中在脱硫脱灰^[10]。路阳等^[11]研究认为,微粉煤摩擦电选过程中,经一次分选、两次精选后,精煤的硫分由5.5%降至2.89%,脱硫率达到84.2%。

摩擦电选机研究方面,较典型的有Western Ontario大学的流化床摩擦预荷电分选机、NETL's摩擦静电分选机、TES摩擦静电分选机、中国矿业大学摩擦静电分选机等。其中,中国矿业大学摩擦静电分选机可脱除50%~85%黄铁矿硫。

摩擦电选工艺简单,处理过程污染小、无水耗,是微粉煤处理的有效技术,但过程机理研究不足,限制了该技术的发展。研发处理量大、高效的摩擦电选设备是研究的重点^[12]。

5) 磁选脱硫

煤炭脱硫领域研究较多的磁选技术是高梯度磁选,根据试验条件不同分为湿法高梯度磁选脱硫和干法高梯度磁选脱硫。

干法高梯度磁选脱硫方面,青岛建筑工程学院利用XCG-II辊式磁选机对查庄煤进行了干法高梯度磁选脱硫实验,结果表明其脱硫率为40.21%。湿法高梯度磁选脱硫方面,青岛理工大学利用SLON-100周期式脉动高梯度磁选机对燃煤进行了湿法磁选脱硫实验,结果表明,脱硫率为41.80%^[13]。

为提高脱硫效率,研究者探索了高梯度磁选与浮选联合脱硫。马先军等^[14]研究发现,湿法高梯度磁选处理山东淄博某矿煤时,脱硫率为31.87%,黄铁矿硫脱除率为45.02%,磁选后煤再经浮选,黄铁

矿硫脱除率升至84.56%。

研究普遍认为,湿法高梯度磁选脱硫效率高于干法,但湿法脱硫涉及到后续废液处理,易产生二次污染,因此进展缓慢。

磁选曾被认为最接近工业化的脱硫技术,但由于煤中黄铁矿磁性弱而表面磁性强化技术的缺乏,高梯度磁选机无法连续运行等,至今仍未工业化。

1.2 化学法

1) 电化学脱硫

电化学脱硫分为氧化法和还原法,还原法成本过高,目前已少从脱硫角度进行研究。电化学氧化脱硫主要依靠发生在阳极的氧化反应,将煤中各形态硫化物转化为硫酸盐而脱除,电解质分酸性体系和碱性体系。

HCl为常见酸性电解质,张鸿波等^[15]研究了某种煤在HCl电解质溶液中,电流密度、煤浆浓度、电解时间及电解质浓度均为最佳条件下的脱硫效果,结果表明,该煤的全硫脱除率最高可达76.2%。为提高各形态硫与电极表面的接触几率,需在酸性介质的阳极表面加入氧化剂,Fe³⁺、Mn³⁺等,以及Fe²⁺、Mn²⁺等易被氧化为氧化剂的物质为常见氧化剂^[16]。

NaOH为常见碱性电解质,崔平等^[17]研究认为发生在电极表面的电解除硫是碱性介质中的主要除硫作用。由于碱性条件下的电化学脱硫,精煤灰分将增长40%~70%,因此目前碱性条件下的电化学脱硫研究相对较少。

酸性条件下电化学氧化脱硫过程条件温和,脱硫效果良好,是目前电化学脱硫领域研究较多的方法,但其无法高效脱除有机硫,且易对煤质产生劣化影响。

2) 萃取脱硫

根据萃取条件可分为超临界萃取和溶剂萃取2类。20世纪90年代以后,超临界萃取脱硫的研究已很少报道。萃取脱硫可脱除煤中有机硫。

溶剂萃取脱硫方面,萃取溶剂是关键。碘甲烷、正丙醇、对甲酚、四氯乙烯等为常见萃取溶剂,其中四氯乙烯效果最优。刘振学等^[18]研究认为,经四氯乙烯萃取处理后的煤样,可脱除30%~70%的有机硫,过程中四氯乙烯还充当重介质脱除了90%的黄铁矿硫。

在单种溶剂萃取脱硫的基础上,探索了复合溶剂的萃取脱硫效果。郑李辉^[19]研究发现,以四氯乙

烯和对甲酚混合物为萃取溶剂,全硫脱除率可达62.7%,而以纯四氯乙烯为萃取溶剂时,仅为39.8%。另外,在溶剂萃取过程中,增加微波辐照或超声波技术等辅助措施,可明显改善萃取脱硫效果。

萃取脱硫条件温和、对煤质破坏小,近几十年内发展较快。但因有机硫无法测定,萃取脱硫机理研究接近空白,脱硫主、副反应无法确定;此外,萃取脱硫后产物的利用、过程损耗和污染的控制也未解决。

除上述方法,熔融碱浸出法、碱液浮沉-浸熔法、化学氧化法等化学脱硫法也均有研究,这些技术虽脱硫效果良好,但对煤质的破坏以及高成本投入也不适于工业化。

1.3 微生物法

微生物可改变煤中含硫化合物表面性质或将其转化为易脱除形态,使其变得易被脱除,实现微生物脱硫。脱硫过程温和,操作相对简便。陶云山^[20]利用球红假单胞菌处理新阳高硫焦煤发现,当菌液量、煤粒度、浸出时间、浸出温度、硝酸预处理时间等最优的条件下,全硫脱除率可达58.84%。

微生物脱硫的关键是菌种选择。不同形态硫需不同微生物。于晓朦^[21]研究发现,氧化亚铁硫杆菌、氧化硫硫杆菌、嗜热硫杆菌等对脱除黄铁矿硫较为有效;红球菌、戈登氏菌、节杆菌、嗜酸热硫化叶菌等对脱除有机硫较为有效。

微生物脱硫工艺方面,微生物堆浸法和微生物预处理-物理洗选法研究较多。微生物堆浸法是将菌液喷洒至煤堆,含硫化合物转化为硫酸排出实现脱硫。该方法操作简便,处理量大,但操作周期过长(>30 d),酸液处理成本高且易破坏环境。微生物预处理-物理洗选法利用微生物可选择吸附在黄铁矿表面,强化黄铁矿与煤质亲水性的差别,使煤粒与黄铁矿在浮选过程中更易分离。该方法脱硫周期短,黄铁矿硫脱除率达80%。

目前微生物脱硫的有效菌种欠缺,工艺过程缺乏稳定性,脱硫周期长,存在脱硫液难处理等问题。

2 热解脱硫

研究热解脱硫的初衷,是在不影响焦炭质量的前提下,通过改变炼焦过程条件,促进煤中硫化物以气体形态析出,获得低硫焦炭。根据热解条件,热解脱硫可分为不同气氛下热解脱硫和与添加剂共热解脱硫。目前所有的热解脱硫技术,均处在实验室研究阶段。

2.1 不同气氛下热解脱硫

根据气体所起作用,不同气氛下热解脱硫分为惰性、氧化和还原3种,其中还原气氛下热解脱硫效果良好,且以加氢效果最佳。廖洪强等^[22]研究发现,在热解终温650℃、压力0.1 MPa的加氢条件下,兖州高硫煤脱除率可达69.8%。鉴于纯氢源成本较高,黄孝文等^[23]研究了以焦炉煤气代替纯氢回炉热解脱硫,结果显示,焦饼中心温度达800℃,20%焦炉煤气回炉,可有效降低焦炭硫含量。但胡德生^[24]认为,焦炉煤气回炉不仅未降低焦炭硫含量,反而使其冷强度和热性能恶化。当前,加氢热解过程更多的被用于热解反应机理及其他分子层面的研究。

2.2 与添加剂共热解脱硫

与添加剂共热解脱硫方面,添加剂分无机和有机。研究认为废塑料、生物质、沥青等有机添加剂可在热解过程中为含硫自由基提供充足的小分子自由基,实现脱硫,周仕学等^[25]将煤与生物质按1:1混合以一定方式热解,发现无机硫脱除率大于93%,有机硫脱除率大于80%。无机添加剂方面,笔者曾对比了16种不同添加剂分别与某焦煤共热解脱硫情况,发现该焦煤与一定量 γ - Al_2O_3 在模拟炼焦条件下共热解,全硫脱除率达到34.22%,较该焦煤单独热解时全硫脱除率提高11.16%^[26]。

热解脱硫尚处于实验室研究阶段,热解条件、研究煤样、实验环境等都相对理想,该过程的可行性尚需进一步探索。

3 煤气脱硫

焦炉煤气脱硫的目的是去除煤气中的 H_2S 和少量气态有机硫,已工业应用的技术很多,根据脱硫工作环境,可分为干法和湿法2类。

3.1 煤气干法脱硫

常见干法脱硫技术有活性炭法、氧化铁法、氧化锌法、钴钼加氢串氧化锌法等,其中钴钼加氢串氧化锌法脱硫效果最优越,其脱硫过程中,气态有机硫经钴钼加氢几乎全部转化为 H_2S ,再经氧化锌法脱除 H_2S ,煤气中 H_2S 含量最低降至 0.1×10^{-6} 以下^[27]。

煤气干法脱硫精度高,常作为末端处理进行深脱硫。当前的干法脱硫技术面临脱硫剂硫容有限、回收再生困难的问题,钴钼加氢串氧化锌法虽脱硫效果优良,但能耗高,催化剂再生困难。

3.2 煤气湿法脱硫

湿法脱硫分物理法和化学法,低温甲醇洗为典型物理法,改良 A. D. A 法、栲胶法、HPF 法、真空碳

酸盐法、氨水脱硫法等为典型化学法^[28-29]。我国炼焦行业广泛使用湿法化学脱硫进行焦炉煤气脱硫,典型工艺见表 1。

表 1 典型焦炉煤气湿法脱硫工艺
Table 1 Typical coke oven gas wet desulfurization process

工艺名称	催化剂	脱硫效率/%	脱硫原理	硫产品
改良 A. D. A 法	NaVO ₃ , A. D. A	99	催化氧化	熔融硫
栲胶法	NaVO ₃ , 栲胶	99	催化氧化	熔融硫
HPF 法	对苯二酚, PDS, 硫酸亚铁	99	催化氧化	熔融硫或硫酸
真空碳酸钾法	无	99	湿法吸收	硫磺或硫酸

上述脱硫法中,栲胶法与改良 A. D. A 法原理及过程相同,栲胶法是对改良 A. D. A 法的改进,脱硫效果与改良 A. D. A 法相当,但运行费用降低,且解决了改良 A. D. A 法中硫磺堵塔的问题。HPF 法以氨为碱源进行脱硫,催化剂在脱硫和再生过程中均具有催化作用,由于该法不需外加碱源,催化剂用量少,对环境污染小,在国内焦化厂应用甚广;真空碳酸钾法脱硫效率高,废液产生量小,由于投资成本高,仅在少数大型焦化厂有应用。

常见湿法脱硫技术还有 MDEA 法、氨法脱硫等,脱硫原理及过程与上述方法大同小异。近年来,不少学者着手研究新的脱硫方法,如络合铁氧化法等,脱硫效果良好,但尚无工业应用案例。

4 结 论

经过梳理,发现各工段脱硫技术的应用或研究进度各不相同,脱硫效果也参差不齐,为了实现烟煤热解全流程的有效脱硫,笔者认为应从以下几方面努力:

1) 加大炉前脱硫技术的应用范围和研究力度。从源头减少硫的带入是全流程脱硫效果最佳及成本最低的方式,因此应重点加强炉前脱硫技术的应用和研发。一方面,利用浮选、重介质洗选等已工业化技术,扩大烟煤入炉前洗选脱硫比例;另一方面,开发微波、超声波等与其他在研技术的联用技术,通过微波、超声波等手段,促进煤炭脱硫前预处理和脱硫过程强化,提高脱硫效率,加速各类在研炉前脱硫技术的工业应用。

2) 加强针对有机硫脱除技术的研发。炉前脱硫技术中,已工业化的重介质洗选、浮选,在研的电选、磁选等物理洗选法仅可脱除团聚形态的无机黄铁矿硫,电化学脱硫法虽可脱除有机硫,但对煤炭质

量的劣化影响却不容忽视,萃取脱硫和微生物脱硫相对温和且可脱除有机硫,但效率较低;炉中热解脱硫虽能直接降低焦炭硫含量,但技术的成熟度不足。因此,面对有机硫比例日益增长的炼焦煤,应加强针对有机硫脱除技术的研发。

3) 研发配套环保技术,减少过程污染。炉前重介洗选、浮选脱硫,炉后煤气脱硫等工业化脱硫方法虽能实现脱硫,但过程中易产生废液和固体废弃物污染,在研的脱硫技术也存在易产生二次污染的问题,如微波处理煤样易产生 H₂S 等有害气体,因此应在加速脱硫技术研发的同时,加强相关环保技术的研发,提高脱硫过程效率。

参考文献 (References):

- [1] 张军华. 重介质旋流器选煤工艺探讨[J]. 煤炭加工与综合利用, 2015(3): 19-21.
- [2] 郑晓东. 重介质选煤工艺流程及其应用研究[J]. 煤炭与化工, 2014, 37(12): 117-119.
Zheng Xiaodong. Heavy medium coal preparation process and application[J]. Coal and Chemical Industry, 2014, 37(12): 117-119.
- [3] 曹珍贵. 重介选煤过程中重介质的密度预测控制系统[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014: 3-20.
- [4] 董立周, 刘继红, 王俊涛, 等. 煤泥浮选技术发展概况[J]. 选煤技术, 2015(5): 96-99.
Dong Lizhou, Liu Jihong, Wang Litao, et al. Survey of the development of coal slime flotation technology[J]. Coal Preparation Technology, 2015(5): 96-99.
- [5] 邵绪新, 任守政, 李军, 等. 细粒煤的浮选法脱硫研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4): 25-28.
Shao Xuxin, Ren Shouzheng, Li Jun, et al. Desulfurization of fine coal by flotation method[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(4): 25-28.
- [6] 付晓恒, 王祖训. 疏水絮凝-浮选法分选主焦中煤的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(1): 57-61.

- Fu Xiaoheng, Wang Zuna. Research on separation of middlings from prime coal by hydrophobic flocculation-flotation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, 25(1): 57-61.
- [7] 翁斯灏. 用穆斯堡尔方法研究辐照时间对原煤微波-磁脱硫的影响[J]. 核技术, 1994(7): 437-442.
- Weng Sihao. A study of influence of irradiation time on the microwave-magnetic desulfurization of raw coal by Mossbauer method[J]. Nuclear Techniques, 1994(7): 437-442.
- [8] 程刚, 王向东, 蒋文举, 等. 微波预处理和微生物联合煤炭脱硫技术初探[J]. 环境工程学报, 2008, 2(3): 408-412.
- Cheng Gang, Wang Xiangdong, Jiang Wenju, et al. Preliminary study on bio-desulfurization technology of coal in combination with microwave pretreatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(3): 408-412.
- [9] 赵景联, 张银元, 陈庆云, 等. 微波辐射氧化法联合脱除煤中有机硫的研究[J]. 微波学报, 2002, 18(2): 80-84.
- Zhao Jinglian, Zhang Yinyuan, Chen Qingyun, et al. The desulfurization of high organic sulfur coal by oxidation under microwave radiation[J]. Journal of Microwaves, 2002, 18(2): 80-84.
- [10] 黄国涛, 罗思义, 周扬民, 等. 微粉煤的摩擦电选实验研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(5): 315-317.
- Huang Guotao, Luo Siyi, Zhou Yangmin, et al. Research on Tribo-electrostatic test of fine coal[J]. Coal Technology, 2015, 34(5): 315-317.
- [11] 路阳, 曹亦俊, 章新喜, 等. 微粉煤摩擦电选脱硫降灰试验研究[J]. 选煤技术, 2006(6): 3-5.
- [12] 何鑫, 章新喜, 李超永, 等. 摩擦电选技术的现状与进展[J]. 煤炭技术, 2015, 34(2): 334-336.
- He Xin, Zhang Xinxi, Li Chaoyong, et al. Present situation and development of triboelectrostatic separation technology[J]. Coal Technology, 2015, 34(2): 334-336.
- [13] 王灿. 煤磁选脱硫机理及研究现状[J]. 中外企业家, 2014(26): 219-221.
- [14] 马先军, 朱申红, 王庆峰, 等. 煤炭高梯度磁选-浮选脱硫降灰试验[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1): 5-10.
- Ma Xianjun, Zhu Shenhong, Wang Qingfeng, et al. Experimental study on high-gradient magnetic separation and flotation for coal desulfurization and desliming[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(1): 5-10.
- [15] 张鸿波, 苏长虎, 李永盛, 等. 煤电化学脱硫过程的动力学行为[J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 25(2): 148-151.
- Zhang Hongbo, Su Changhu, Li Yongsheng, et al. Dynamics analysis of electrochemical desulfurization process of coal[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2015, 25(2): 148-151.
- [16] 张鸿波, 李丽, 李悦, 等. 高硫煤电化学催化氧化脱硫机理的研究[J]. 矿产综合利用, 2013(2): 71-73.
- Zhang Hongbo, Li Li, Li Yue, et al. Mechanism of high-sulfur removal from coal by electrolytic oxidation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(2): 71-73.
- [17] 崔平, 王知彩, 周国平, 等. 煤的电化学脱硫研究(III)-碱性有隔膜电解体系[J]. 矿业安全与环保, 2002, 29(06): 15-18.
- [18] 刘振学, 宋庆峰, 徐怀浩, 等. 煤的萃取脱硫及煤萃取物种有机含硫化物的研究进展[J]. 山东科技大学学报, 2011, 30(3): 54-63.
- Liu Zhenxue, Song Qingfeng, Xu Huaihao, et al. Research progress in extractive desulfurization of coal and organic sulfur-bearing compounds in extracts[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2011, 30(3): 54-63.
- [19] 郑李辉. 高硫煤中有机硫的萃取脱除研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2011: 49-50.
- [20] 陶云山. 新阳高硫焦煤微生物脱硫的试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016: 48-58.
- [21] 于晓朦. 微生物技术在煤炭和煤气脱硫中的应用研究[D]. 阜新: 辽宁科技大学, 2013: 21-27.
- [22] 廖洪强, 李保庆, 张碧江. 富氢气氛下煤热解脱硫脱氮的研究[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(3): 268-272.
- Liao Hongqiang, Li Baoqing, Zhang Bijiang. Desulfurization and denitrogenation in coprolysis of coal with hydrogen-rich gases[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1999, 27(3): 268-272.
- [23] 黄孝文, 郭占成. 焦炉煤气循环干熄焦及焦炭脱硫[J]. 过程工程学报, 2005, 5(6): 621-625.
- Huang Xiaowen, Guo Zhancheng. Coke oven gas recycling in coke dry quenching and coke desulfurization[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 5(6): 621-625.
- [24] 胡德生. 煤气返回炼焦过程脱硫探索实验[J]. 宝钢技术, 2006(4): 53-55.
- Hu Desheng. An exploratory test on coke desulfuration by recycling COG in coking process, 2006(4): 53-55.
- [25] 周仕学, 刘振学, 于洪观, 等. 高硫强粘结性煤高温热解脱硫的研究[J]. 煤炭转化, 2000, 23(1): 44-46.
- Zhou Shixue, Liu Zhenxue, Yu Hongguan, et al. Research on the desulfurization of high sulfur and strongly caking coal by high temperature pyrolysis[J]. Coal Conversion, 2000, 23(1): 44-46.
- [26] 王之正. 添加剂对高硫煤热解过程硫迁移的作用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014: 52-62.
- [27] 徐贺明, 屈一新, 闪俊杰, 等. 焦炉煤气精脱硫系统的研究与优化[J]. 天然气化工·C1化学与化工, 2015(40): 64-68.
- Xu Heming, Qu Yixin, Shan Junjie, et al. Research and optimization of desulfurization system for coke oven gas[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2015(40): 64-68.
- [28] 张新喜, 张超群, 胡冰, 等. 高硫焦炉煤气湿法脱硫工艺新改进[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(11): 48-49.
- Zhang Xinxi, Zhang Chaoqun, Hu Bing, et al. New improved gas wet desulfurization technology for high sulfur coking oven[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(11): 48-49.
- [29] 管福征, 陈夏, 朱建梅. 以氨为碱源的焦炉煤气脱硫工艺[J]. 燃料与化工, 2014, 45(6): 44-46.
- Guan Fuzheng, Chen Xia, Zhu Jianmei. Coke oven gas desulfurization technology taking ammonia as alkali source[J]. Fuel & Chemical Process, 2014, 45(6): 44-46.