

大型煤电化基地/园区环境保护与治理专栏

煤气化灰渣脱碳技术研究进展

史 达^{1,2,3}, 张建波^{2,3}, 杨晨年^{2,3,4}, 曲江山^{2,3,4}, 李少鹏^{2,3}, 李会泉^{2,3,4}, 何发钰^{1,5}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国科学院 过程工程研究所 绿色过程与工程中科院重点实验室, 北京 100190; 3. 湿法冶金清洁生产国家工程实验室, 北京 100190; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 中国五矿集团总公司, 北京 100010)

摘 要: 煤气化技术是我国现代煤化工的基础, 该过程将煤中有机物转化为化学品, 无机物以气化灰渣形式外排。目前煤气化灰渣主要以堆存为主, 造成严重的环境和水体污染。在对煤气化灰渣进行消纳处理过程中, 因内部含有大量的未燃碳, 使其在建工建材等规模化利用途径受限。当前的国内外碳、灰分选方法虽有一定的效果, 但基本处于实验室研究和半工业试验阶段, 因存在成本高、分选效率低等问题, 未能实现大规模工业化应用。碳灰分选效果受煤气化灰渣的矿相组成、物相成分、粒度分布、微观形貌等因素影响, 不同类型气化渣需要采取不同的分选工艺, 进而实现碳灰的高效分离。结合煤气化灰渣脱碳的主要影响因素, 分析了煤气化灰渣脱碳的主要工艺技术和装备, 多角度阐述了煤气化灰渣碳、灰组分的主要分离方法, 并进一步总结对比各分选方法的工艺特点和不足。分析了各技术在煤气化灰渣脱碳分选应用的发展趋势, 指明了研发绿色、高效、低成本的新型浮选药剂, 解决煤气化灰渣灰分吸附覆盖问题, 开发针对细粒级煤气化灰渣脱碳的分选工艺与装备, 实现脱碳分选产品的高值化利用, 是当前煤气化灰渣脱碳技术的重要发展方向。

关键词: 煤气化灰渣; 脱碳; 浮选; 分离; 资源化利用

中图分类号: TQ536; X7

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)06-0001-10

Research progress of the decarburization technology of coal gasification ash slagSHI Da^{1,2,3}, ZHANG Jianbo^{2,3}, YANG Chennian^{2,3,4}, QU Jiangshan^{2,3,4}, LI Shaopeng^{2,3}, LI Huiquan^{2,3,4}, HE Fayu^{1,5}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 3. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Beijing 100190, China; 4. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 5. China Minmetals Corporation, Beijing 100010, China)

Abstract: Coal gasification technology is the foundation of modern coal chemical industry in China. In this process, the organic matter in coal is converted into chemicals, and the inorganic matter is discharged in the form of gasification slag. At present, coal gasification slag is mainly stored in piles, causing serious environmental and water pollution. In the process of dissipating coal gasification slag, because of the large amount of unburned carbon inside, the large-scale utilization channels such as construction materials and building materials are limited. Although the current carbon and ash separation methods at home and abroad have certain effects, they are basically in the stage of laboratory research and semi-industrial testing. Due to the problems of high cost and low separation efficiency, large-scale industrial applications have not been realized. The separation of carbon ash is affected by the mineral phase composition, phase composition, particle size distribution, micro-morphology and other factors of coal gasification slag. Different types of gasification slag need to adopt different separation processes to achieve efficient separation of carbon and ash. Combined with the main influencing factors of coal gasification slag decarburization, the main technology and equipment of coal gasification slag decarbonization were analyzed, the main separation methods of carbon and ash components of coal gasification slag were expounded from multiple angles, and the technological characteristics and shortcomings of

收稿日期: 2020-08-25; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.EP20082501

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1904302); 国家自然科学基金资助项目(51804293, U1810205); 固废资源化利用与节能建材国家重点实验室开放基金资助项目(SWR-2019-005); 中石化合作企业横向资助项目(419035-3)

作者简介: 史 达(1994—), 男, 山西大同人, 博士研究生, 从事煤气化渣资源化利用方面的科研工作。E-mail: 617557797@qq.com。通讯作者: 张建波, 副研究员。E-mail: zhangjianbo@ipe.ac.cn; 李会泉, 研究员。E-mail: hqli@ipe.ac.cn; 何发钰, 研究员。E-mail: hefayu@minmetals.com

引用格式: 史达, 张建波, 杨晨年, 等. 煤气化灰渣脱碳技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 1-10.

SHI Da, ZHANG Jianbo, YANG Chennian, et al. Research progress of the decarburization technology of coal gasification ash slag[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 1-10.



移动阅读

each sorting method were further Summarized and compared. Finally, the development trend of various technologies in the decarbonization and separation of coal gasification slag was analyzed, and the development of new green, efficient, and low-cost flotation reagents was pointed out to solve the problem of unburned carbon-ash adsorption cover. The separation technology and equipment for the decarbonization of granular coal gasification slag and the realization of high-value utilization of decarbonization separation products is an important development direction of current coal gasification slag decarbonization technology.

Key words: coal gasification slag; decarbonization; flotation; separation; resource utilization

0 引言

“富煤贫油少气”是我国能源结构的主要特点^[1-2],煤电、煤化工转化已成为我国煤炭利用的主要方式。煤气化技术作为煤化工领域的一个重要方向,是指在特定的温度和压力下,氧气、空气或水蒸气作为氧化剂,与煤中有机质部分进行非彻底氧化燃烧反应生产煤气或合成气,从而进一步合成化学品的技术^[3]。2018年,我国现代煤化工用煤量达9 560万t,预计2020年底将达1.5亿t,其中煤气化占现代煤化工用煤总量的90%以上^[4-6]。

煤气化渣是煤气化过程产生的副产物,通常分为:粗渣(在炉底排放)、细渣(以飞灰形式随气流排出后经水淬、过滤后外排)^[7-9]。我国气化渣每年排放量巨大,年产超3 000万t(湿渣),2001年前,中国、美国等大部分气化渣均通过填埋或渣场堆存处理,但填埋和堆存会导致严重的环境污染和安全隐患^[10-11]。据调查,一个180万t/a的煤制甲醇企业,年生产气化渣约93万t,若送渣场堆存处理,每年成本为9 300万~12 090万元;若自建渣场,每年处理费用为2 325万~3 720万元^[12-14]。因此,需要对气化灰渣进行综合利用。目前国内外对气化渣的应用主要集中在:建工建材的制备,水体和土壤修复,循环掺烧和再气化利用,硅基、陶瓷材料、催化剂等高附加值材料^[15-16]。以水泥或混凝土行业为例,根据GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》要求,拌制混凝土和砂浆用粉煤灰烧失量 $\leq 10.0\%$,气化粗渣碳含量相对较低,且有丰富的活性矿物相,有利于凝胶反应的发生,从而提高砂浆强度,但气化细渣中的高残碳(烧失量在20%~60%)会严重阻碍矿渣与水泥、石灰的胶凝反应,使其难以作为混凝土和水泥的外加剂^[17-18]。若要对气化灰渣中的未燃碳进行配煤掺烧利用,其高灰分又会影响气化渣作为补充燃料的掺烧量,增大煤灰量^[19],碳、灰相互制约,阻碍了其资源化利用。因此,气化渣碳组分的分离是实现气化渣的高值化、减量化、无害化利用的关键^[20-23]。

本文概述了气化渣性质对碳灰分离的影响规

律,阐述了国内外不同脱碳方式和设备对脱碳效果的研究进展,总结了当前研究的优势和不足。结合本课题组前期在气化灰渣资源化利用方面的基础和经验,分析了气化灰渣未来的发展方向,提出了气化渣脱碳技术和设备的创新与开发是其未来发展方向,为气化渣综合利用技术的开发提供参考。

1 煤气化渣脱碳主要影响因素

气化渣脱碳因其气化工艺和地区煤种的不同,产出的气化粗渣和、细渣的性质不同。对于不同粒径、组成及含量、微观结构的气化渣,脱碳工艺的选择也不同,因此需对脱碳的影响因素进行研究和概述^[24-28]。

1.1 气化渣组成及含量对脱碳过程的影响

气化渣的化学组成和矿物构成是其综合利用的基础,也是脱碳工艺技术的重要依托。气化渣主要由未燃碳、非晶相熔融玻璃体和未完全反应的矿物晶体构成。赵永彬等^[29]研究了宁煤集团3个气化项目的粗渣基本特性,发现其产生的气化残渣烧失量差异较大,分别为4.34%、13.4%和39.27%,认为这可能是由于气化炉不同的工艺条件导致。不同气化工艺条件的碳转化率不同,使气化灰渣残碳含量差异较大,进而导致烧失量差异很大。高旭霞等^[30]对8种粗渣和细渣的可燃物含量进行测定,结果表明,粗渣可燃物含量明显低于细渣,气化渣可燃物含量为11%~65%,多喷嘴水煤浆气化炉粗渣和细渣的残碳含量均远小于德士古气化炉。Wu等^[18]研究了气化粗渣、气化细渣的残碳特征(烧失量分别为16.6%、26.4%),结果表明,粗渣和细渣均含有较高残余碳,阻碍其在水泥行业的利用,并探讨了2种渣通过简单筛分降低原渣碳含量的可行性。不同炉型、不同气化条件产出的气化渣残碳含量变化较大,对于符合国家相关标准的气化渣可直接进行利用,对无法直接利用的高残碳气化渣,需对其进行脱碳,再实现资源化利用^[10]。

Matjie等^[26]建立了一种可定量测试灰渣中无定形玻璃体和晶体矿物质的相对含量方法,气化渣中部分玻璃体和晶体部分主要为富Si-Al的玻璃

体、偏高岭土、Fe-Ca-Mg-Ti相、石英、钙长石、磷酸铅盐等,同时还含有大量的高温晶相,如钙长石、莫来石、透辉石等。结合当前国内外研究结果分析可知,无机组分包括非晶玻璃体和晶体矿物质,非晶相主要是由于经高温气化后仍处于熔融态玻璃相的渣还未结晶,直接进入水室经历骤冷过程形成;晶体矿物质是部分颗粒在炉体内停留时间短,未反应即被携带排出反应室。

国内外研究主要以Si、Ca、Fe、Al的矿物质晶相以及渣中可燃碳为考察对象,不同地区、不同工艺、不同煤质煤种产生的气化渣矿物含量虽不相同,但主要元素均为C、Ca、Si、Al、Fe。实现气化渣的综合利用、碳-灰的高效分离,需充分考虑其化学组成的共性与特性,因地制宜设计脱碳工艺。

1.2 气化渣粒度对脱碳的影响

重选、浮选等脱碳方法对入料粒度有严格要求,不同粒度的原料需采用与其相适应的分选设备。盛羽静^[31]研究了不同气化工艺、不同地域气化灰渣的理化特性,结果表明,粗渣中可燃物含量普遍比细渣低,粗渣粒径主要分布在大粒径区域,0~88 mm含碳量<15%,88~125 mm含碳量在30%左右,大于125 mm后,含碳量逐渐减小;细渣粒径主要分布在小粒径区域,随着细渣粒径的增大,分布在某一粒级的比例越少,含碳量越高,特别是88~250 mm,含碳量均高于50%。Pan等^[32]分析了气流床产生的不同粒径渣的基础特性,结果表明,细渣含碳量随粒度的增大而增大,而粗渣含碳量主要分布在中间粒径(105~280 mm),与文献^[31]研究结果不同,细渣大多分布在中间粒级,<20 mm和>65 mm含量较少,这可能是由于气化工艺不同导致。Guo等^[33]通过采用机械搅拌式浮选机发现,对于38~75 mm粒级,浮选残碳的烧失量为63.5%;<38 mm粒级浮选残碳的烧失量低于40%,采用机械搅拌式浮选机对不同粒级的气化细渣浮选效果差异明显。

综上,原煤在进入气化炉后,经高温气化被破碎成不同粒径,气化渣烧失量与粒级关系密切。气化细渣的粒径越大,烧失量越大;气化粗渣的大粒径物料烧失量低,产率高,因此基于含碳量与气化灰渣粒度的变化规律,可采用粒级筛分预处理方式提高碳的分离效率。粗粒级的气化粗渣经筛分可获得烧失量很低的物料,直接进行利用;而烧失量相对较高的粗渣细粒级产率并不高,故可燃体分布率不高;气化细渣可通过筛分实现目的组分的富集。气化渣粒度对浮选脱碳工艺具有重要影响,气化细渣粒度组成为三峰分布,粒径峰值分别为10、50、400 μm,三峰

均不在煤泥浮选的常规粒级;气化细渣在微细粒级(<74 μm)和粗粒级(>250 μm)分布较多,直接在常规浮选机上进行脱碳效果较差,主要是因为微细粒级比表面积大,耗药量大,且细粒级残碳与细粒级灰分之间容易发生罩盖现象,降低分选效果。另一方面,粗粒级浮选过程中,由于残碳颗粒较大,与药剂作用后黏附于气泡,上浮中重力较大易使气泡和残碳颗粒发生脱附,从而降低脱碳效果,因此,在浮选脱碳过程需充分考虑气化渣粒度特性。对于细粒级物料,可考虑微泡浮选柱设备或选择性絮凝浮选,以提高分选效率;对于粗粒级气化渣,可通过磨矿进行粒度调控后再给入浮选机分选。综上,气化渣不同粒级残碳的分布具有一定规律,通过简单筛分即可快速实现脱碳,而在浮选过程也需要根据气化渣粒度特性选用不同的设备、药剂和工艺。

1.3 气化渣微观结构对脱碳的影响

颗粒的微观结构决定其物理化学性质,原煤经高温气化,与气化剂作用后,表面变得疏松多孔,表面润湿性也随之发生变化。Ai等^[34]对气化细渣的表面形貌进行研究,结果表明,经气化后,气化渣中未燃碳亲水性增强,不利于与捕收剂基体结合,含有球形玻璃微珠和不规则的絮状未燃烧碳粒,部分未燃碳中有玻璃微珠插入孔隙中,大多数微珠呈单体形式赋存,少量在范德华力作用下沿未燃碳边缘附着。张晓峰等^[35-37]认为,气化飞灰颗粒为球状,表面附着更小的球形颗粒,残碳即使经过气化,仍呈无定形态,飞灰与残碳之间虽然有部分黏附发生,但不存在灰熔融聚合,这种灰、碳结构为后续的物理方法脱碳提供了依据。

除上述特征外,通过对气化渣微观结构的测试发现虽然残碳与灰分没有发生大规模熔融聚合,但未燃碳颗粒呈蜂窝状多孔结构,孔隙丰富,相当一部分的灰分嵌布于孔道中,若直接采用常规的重选、浮选法,很难将碳灰彻底分离,可采取超声分散或使用分散剂对渣浆分散处理,使碳和灰先解离完全,再进一步分选。另外,未燃碳的多孔结构使其比表面积增大,从而增大了浮选药剂用量,用于改善碳粒表面疏水性的捕收剂填充于孔道中,降低了与起泡剂分子和气泡的碰撞几率,捕收能力减弱,分选指标下降。因此,可在浮选过程选择性的引入大分子有机基团,可使未燃碳之间相互聚集,增大比表面积,也可填充未燃碳颗粒孔道,达到降低浮选药剂用量的目的,从而降低分选成本。

气化渣未燃碳实质上属于煤炭的一种,但煤气化细渣经高温气化,各项特征(如粒度、疏水性、孔

隙率、比表面积等)与原煤的区别较大。因此,气化渣的脱碳分选既应借鉴煤炭浮选,又应区别于煤炭分选,针对气化灰渣不同的物化性质,采用物理和化学预处理方法,定向调控颗粒的微观赋存形态,实现高效分选。

2 煤气化渣脱碳技术

2.1 浮选脱碳技术

泡沫浮选是利用不同组成矿物表面的疏水性差异,将有用矿物附着在气泡上并从矿物泡沫中回收,选择性分离出有价值矿物的方法^[38]。泡沫浮选是选矿领域常见的工艺,在废物处理中应用较广泛。此外,新的浮选药剂和浮选设备发展迅速,为处理微细粒气化细渣碳-灰分离提供了重要途径。

2.1.1 浮选脱碳药剂

气化渣脱碳浮选药剂可选择性改变气化渣颗粒的亲疏水性,增大残碳和灰分的可浮性差异,实现碳、灰的浮选分离。Zhang等^[39]针对常规浮选难以有效回收未燃碳、药剂用量大、成本高等问题,采用不同浓度的盐水(包括NaCl、MgCl₂、AlCl₃)配置到浮选过程,结果表明,无机盐阳离子能显著改善颗粒的可浮性,降低颗粒的Zeta电位,未燃碳回收率明显提高,Al³⁺溶液中,泡沫尺寸最小,能增大气泡与微细粒渣的有效碰撞概率,但未解决浮选捕收剂用量大的问题。邹涛等^[40]利用一种含油废弃物作为浮选药剂(炼化厂罐底清理的含油污泥)与气化细渣的残碳分离富集,控制气化渣水温度为40~80℃,pH=7~9,制备得到富碳细粉的含碳量可达89.86%,回收率为61.23%,得到的脱碳尾灰可用于建筑材料,固体废弃物残油率为2.27 mg/g,满足地方环保处置要求,不仅实现了气化渣固体废弃物的利用,还降低了处理成本。Guo等^[33]通过浮选动力学过程对气化细渣进行提纯,采用新型捕收剂W501和起泡剂W502,实现残碳与尾灰的分离回收,结果表明,烧失率为24%的气化细渣经3段浮选流程,精矿产率为20%,烧失率为64.47%,残碳回收率52.65%,尾矿产率80%,烧失率可降至4%以下。Zhou等^[41]研究了细粒未燃碳的浮选效率与捕收剂在碳颗粒表面的分散度,通过采用4种表面活性剂改善碳颗粒的表面性质,将捕收剂与表面活性剂按一定比例混合制成乳状液,以提高目标未燃碳的疏水性,使浮选更易于发生,浮选结果表明,原料烧失率为9.85%,TX活性剂可使精矿烧失率提至54.43%,未燃碳回收率为79.58%,表面活性剂的加入能控制颗粒-气泡、颗粒-颗粒、颗粒-油滴的接触,改善并乳化捕收

剂,且能使气泡更加分散,显著增强未燃碳与捕收剂的吸附作用。

目前浮选研究仍存在药剂用量过大、成本不合算、富碳精矿含碳量较低等问题^[42];气化渣浮选捕收剂和起泡剂的研究大多数集中在复配药剂或组合药剂,以降低药剂成本和环境污染,或在原有药剂分子基础上进行改性,新结构选择性强、捕收能力强的药剂研发较慢。

2.1.2 浮选脱碳设备及工艺

浮选设备的研究大多集中在浮选机、浮选柱、浮选槽上。表1为目前主流浮选设备及其优缺点^[43]。

表1 目前主流浮选设备及优缺点

Table1 Current mainstream flotation equipment and the advantages and disadvantages

种类	优点	缺点
机械搅拌式浮选机	工艺技术完善、处理能力强、分选范围广	吸入式动力消耗大;压气式需用鼓风机鼓入空气,系统复杂;叶轮易磨损
喷射式浮选机	结构简单、以微泡形式析出空气、处理量大、充气量大	增加了循环泵,系统复杂;喷嘴易于磨损;喷嘴易堵塞
浮选柱	节约能耗、处理细粒级物料效果优异、简化浮选流程、节省占地面积	分选粒度范围窄

Uçurum^[44]研究了Jameson浮选机操作参数对未燃碳回收和动力学的影响,结果表明,pH=6.5~7.0、柴油用量3500 g/t、松油用量2500 g/t时,可燃碳回收率最佳,达96.5%,灰分脱除率为91.2%,且符合浮选一级动力学模型,浮选模型与试验结果拟合较好, $R^2 > 0.99$,说明Jameson浮选机是一种可行的分选设备。

大唐国际化工技术研究院^[45]采用浮选法分离煤气化渣的碳组分,将富碳组分打入制浆磨煤机与气化煤原料混合回用,可将含碳量15%~40%的气化渣富集至含碳量80%。张一昕等^[46]发明了一种气化细渣浮选分离脱水系统,其中浮选-脱水装置预先设置了黑水缓冲槽和浮选药剂缓冲槽,将黑水和浮选药剂通过管道给入浮选-脱水装置,浮选-脱水装置安装有真空过滤板、滤饼刮刀、灰滤饼刮刀,在浮选药剂作用下使碳和灰在真空过滤平台的槽体形成分层,实现气化细渣残碳、灰和水的分离。葛晓东^[47]分别采用浮选柱和浮选机对气化细渣进行提质研究,结果表明,原料灰分50.73%,在浮选机中柴油用量9 kg/t、仲辛醇用量为4.5 kg/t以及矿浆浓度为40 g/L的条件下,可获得灰分为24.25%、产率为58.05%的浮选精矿产品,在浮选柱中采用与浮选机

相同的药剂制度,可获得灰分 23.66%、精煤产率为 54.91% 的浮选精矿产品,对比发现浮选柱对气化细渣的提质效果优于浮选机,这主要是因为浮选柱的微气泡更多,与颗粒碰撞几率更大,且气泡尺寸对气化细渣中微细粒级的回收具有促进作用。吴阳^[48]系统研究了传统浮选药剂对气化渣的正、反浮选效果,正浮选精矿灰分 55.36%,尾矿灰分 62.82%,反浮选精矿灰分 55.27%,尾矿灰分 83.62%,反浮选脱碳效果优于正浮选,主要原因是气化细渣中的亲水细灰在碳表面罩盖现象严重,另一方面由于物料粒度过细,矿浆泥化现象严重,导致碳、灰难以分离。赵世永等^[49]在单槽浮选机中对 Texaco 气化细渣进行试验,先将细渣全部磨至 <0.5 mm 以下,对柴油、仲辛醇制成乳化混合药剂浮选后,发现对浮选分离碳、灰过程有明显改善作用,进一步在浮选时加入超声波作用,精矿烧失量明显变化,最佳条件下,精矿烧失量 53.07%,尾矿烧失量 41.50%。XU 等^[50]考察了旋流-静态微泡浮选柱与传统浮选机对脱碳性能的影响,轻柴油为捕收剂,聚乙二醇和异辛醇复配的组合药剂为起泡剂,结果表明,在最佳浮选条件下,浮选柱中未燃碳的回收率为 89.69%,比浮选机高 6.5%,且更有利于 <74 μm 细粒级的回收,浮选柱尾矿烧失率降至 1.99%,主要是因为旋流微泡浮选柱的旋流矿化和管流矿化作用。浮选机对于粗粒级的气化渣浮选效果优于浮选柱,而浮选柱对细粒级的回收效果明显高于浮选机,针对不同粒级的气化渣,应选择性采取不同的浮选设备,从而达到高效碳灰分离的目的。

目前浮选法仍是气化渣最主流的脱碳方法,其优势主要有:脱碳效率高,浮选尾矿的烧失率可降至 2% 以下;浮选设备价格低,前期投入成本小;气化过程产生的粗渣和细渣均有较高的含水量,脱水较困难,而浮选过程对入料的含水量无严格要求,可直接给入浮选机进行分选。但浮选法的最大缺点是浮选药剂用量过大,因此高效捕收剂和起泡剂的开发仍是气化渣浮选脱碳的研究重点。

2.2 重选脱碳

重选是利用颗粒间密度的差异,在重力场作用下实现松散分层分离的过程,是煤炭分选的最主要方法,也是分选煤气化副产品的重要方法^[51]。Charah Environmental, Inc 与 UK-CAER^[52-53]针对气化渣脱碳联合开发了筛分-重选分选流程,并于 2001 年建立了处理量达 100 t/h 的气化渣处理厂,2004 年已处理其渣场堆存的 14 万 t 气化灰渣,该工艺先将气化渣进行多段筛分,筛上产品为低碳渣,烧

失量 <5%,筛下产品经水力旋流器分选出富碳燃料产品(烧失量 30% 左右)和高碳细粒级产品(烧失量 >60%),富碳可做燃烧掺料。杨玉芬等^[54-55]采用“先分级,后分选”的工艺,实现了干法流态化方法进行脱碳的分层分选结果,其 <0.074 mm 下层高灰分物料最终产品产率为 86.55%,碳含量 <4.0%,工艺简单,能有效降低灰渣中的碳含量。章新喜等^[56]将粗渣与细渣分别给入筛孔尺寸不同的筛分机,再将提纯后的碳产品给入脉动液固流化床分选机,分选出产品通过 0.03~0.15 mm 筛分机或沉淀池处理后,若满足需要则直接过滤烘干,否则结合浮选获得最终高碳产品,该工艺可将灰分为 65% 灰渣分选为灰分 27% 的碳产品和灰分 70% 的细粒级尾渣。赵鹏等^[57]以德士古水煤浆气化废渣为原料,通过摇床重力分离出高含碳量细渣和高硅酸盐玻璃质灰渣块,并用分离出的高含碳量细渣燃烧提供热量,玻璃渣块进一步烘干粉磨可服务水泥混凝土行业。

目前,气化渣重选脱碳虽取得了一定成效,但利用重介旋流器、摇床、螺旋溜槽、动筛跳汰机、螺旋选矿机等重选设备对气化渣进行脱碳的研究较少。另外,由于气化细渣的粒度较小,而重选过程细颗粒最终运动速度与粒度关系密切,在单一重力场中所受分选力相对于细粒级间的黏滞阻力较弱,脉石矿物和目的矿物之间难以产生足够的位移差,未来可能在原有重力场的基础上,叠加离心场或磁场,来强化重选脱碳过程。

2.3 火法燃烧脱碳

火法脱碳利用高温燃烧将气化渣中的碳组分直接氧化成 CO₂ 排出,同时配备烟气回收和 CO₂ 收集系统^[58-62],实现脱碳和资源的绿色、清洁综合利用。梅琳等^[63-65]考察了物种高碳飞灰的样品成分,通过控制 CFD 循环流化床锅炉的床压、风速等,二次灰含碳量稳定在 5% 左右,最大脱碳效率可达 75%。王金福等^[66]提供了一种煤气化灰渣氧化脱碳制灰分联产蒸汽的方法,试验装置示意如图 1 所示。采用快床-密床组合循环反应器,快床反应器氧化脱碳率约 80%,脱碳后灰渣进入密床反应器中脱碳率可达 99%,灰分产品含水量低于 0.5%,烧失量低于 5%,同时实现了热值副产蒸汽。

火法脱碳是脱除气化渣中未燃碳最彻底、最直接的方法,但由于气化渣中含碳量相对较低,传统的燃烧方法脱碳率低,需要补充气体助燃,同时燃烧初期为了达到碳的燃点,需额外的燃料来维持炉温,造成火法脱碳通常需要比其他脱碳工艺更高的建设和运行成本。

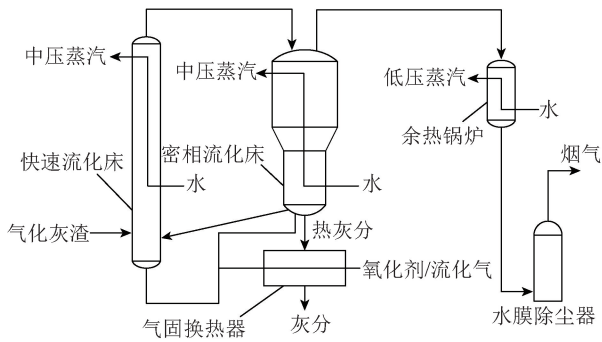


图1 气化渣脱碳联产蒸汽装置示意

Fig.1 Schematic diagram of gasification slag decarbonization co-generation steam device

2.4 电选脱碳

电选主要利用颗粒进入静电区域后,在静电、摩擦、旋转等作用下,利用颗粒的电物理性质和带电差异,实现碳飞灰与矿物质飞灰的分离^[67-68]。

文献[68-71]对高压静电脱碳进行了研究,图2为电选试验装置,该方法脱碳效果良好,电场强度、风量、电压、结构等对分离效果影响较大,可燃碳与无机矿物之间的相对分离程度对分离效果影响很大,而细小颗粒的影响相对轻微,粒度越大,这种影响越明显。Schoffstall等^[72]对3种高烧失量灰渣进行干法分选,采用超声筛和摩擦电选结合技术,结果表明,筛分对摩擦电选效果有促进作用。Jiang等^[73]认为,颗粒摩擦荷电是摩擦电选带电的主要原因

素,并在试验中加入铜粉增加了颗粒表面的荷电量,说明混合铜粉可提高灰的分选效率。虽然电选脱碳在煤基灰渣分选中取得一定效果,但对气化细渣,由于其表面疏松多孔,含水率较高,需要解决脱水烘干问题才能应用于气化细渣脱碳。另外,高压静电分选的局限性为:碳、灰的单体解离度较低时,灰与碳相互连结,电选方法无法实现,各成分矿物摩擦带电相互干扰大,易出现带电不均匀现象,影响分选效果^[74]。因此,电选脱碳在实验室虽已被证实是成功可靠的,但需要先克服气化渣脱水干燥和电选如何工业化的问题。

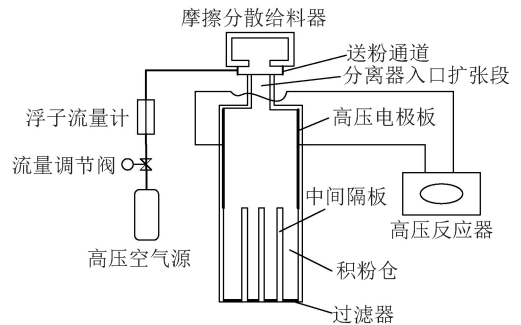


图2 电选试验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of electrical selection test device

2.5 总结

浮选法、重选法、燃烧法、电选法4种脱碳技术汇总见表2。

表2 气化渣脱碳方法

Table 2 Summary of decarbonization of gasification slag

脱碳方法	特点	发展方向
浮选法	优点:工艺简单,设备投资成本低 缺点:药剂消耗量大,运行成本高	① 浮选设备改进,不同浮选设备适选粒级不同,针对不同粒级选用合适的浮选设备;② 浮选药剂研究,开发低成本浮选药剂;③ 改进浮选工艺(如超声波分散浮选、预先筛分选择性磨矿等)
重选法	优点:处理量大,生产成本低,环境污染小 缺点:占地面积大,重选设备基础设施投资大,脱碳效率较浮选法低	提升微细粒级气化渣碳灰分离效果
燃烧法	优点:脱碳较为彻底 缺点:设备投资成本高,需要预先干燥,废气污染环境	降低设备成本,脱碳渣的高附加值利用
电选法	实验室研究阶段,理论上可行,但对水分有较高要求,需要预先对气化渣进行烘干处理	分选室内流场分布,颗粒电荷性质追踪测定等

浮选法可有效实现气化渣残碳和灰分的分离,分选效率较高,工艺简单,设备投资成本小,但药剂消耗量大,成本不合算,药剂进入水体无法回收,易污染水体。因此,在后续研究中,可进一步探究气化渣耗药量大的原因,采用更绿色、廉价、用量少的药剂体系。重选法具有处理量大、生产成本低、环保等优点,但重选过程脱碳效果略低于燃烧法和浮选法,除高碳、低碳产物外,还会有部分富碳产物。相比于

浮选法和重选法,燃烧法最大的优势在于脱碳比较彻底,碳组分直接转化为 CO_2 ,随烟气排出,产生的废气易造成环境污染。电选设备、技术和理论具有一定的先进性,但由于气化渣的水分含量高,限制了其在气化渣脱碳方面的应用。

气化渣脱碳未来发展趋势主要有:

1) 高效低成本药剂分子设计。要求该药剂既可强力捕收渣中的碳组分,同时避免与灰分产生吸

附作用,且药剂消耗量小、无环境污染,生产成本低;目前浮选药剂主要是通过煤油、柴油等非极性捕收剂改善残碳的表面疏水性,而对灰分几乎无作用。若能针对无机组分的 Si、Al、Fe 氧化物选择性抑制,或许可提高脱碳效果。另外,目前使用的捕收剂,药剂用量大、成本高制约着气化灰渣浮选脱碳的发展,应对现有残碳捕收剂改性进行深入研究,特别是捕收剂乳化和组合捕收剂的开发。

2) 基于微观结构,若能在浮选过程前加入分散过程,如超声波分散、选择性分散絮凝等方法,将附着在煤粒表面的微细粒球形灰分分开,有望提高浮选脱碳效果。

3) 脱碳新设备的研发。目前在各脱碳技术研究领域,新型脱碳设备的研发极具前景。以浮选脱碳为例,近年来新设备的研发进展较缓慢,主要在向大型化方向发展,亟需开发针对微细粒物料的浮选设备。重选设备方面,在单一重力场中所受分选力相对于细粒级间的黏滞阻力较弱,脉石矿物和目的矿物之间难以产生足够的位移差,未来可能在原有重力场的基础上,叠加离心场或磁场,多场强化重选脱碳过程。

3 结论及展望

我国煤化工行业每年排出大量的气化渣,但限于其含碳量高、碳-灰难以分离等问题,制约着气化渣绿色、清洁、高值化资源利用。目前国内外气化渣脱碳利用技术主要包括:浮选法、重选法、电选法、火法燃烧。这些方法在分选过程中仍面临诸多问题:浮选法分选效率高,但药剂成本高;电选法由于气化细渣含水率高,需预先解决其脱水问题,再进行电选,因此限制较多;火法燃烧过程中热量和 CO₂ 回收的问题亟待解决;重选法过程清洁无污染,但分选效率低,需进一步提高分选效率。随着煤基固废治理研究的深入开展,未来气化渣脱碳的研究方向有:

1) 在基础研究方面,气化渣基础物性研究仍有很多不足,如气化渣中碳的赋存状态、气化渣中碳的大分子模型等,对脱碳工艺有重要影响,需进一步研究。

2) 在脱碳工艺方面,目前脱碳工艺大多采用单一的重选或浮选流程,对多种脱碳工艺的同时耦合的探究较少,可通过结合 2 种或 2 种以上的脱碳工艺,提高脱碳效率。

参考文献 (References):

[1] 王迪.中国煤炭产能综合评价与调控政策研究[D].徐州:中国

矿业大学,2013:25-30.

WANG Di.Study on integrated assessment and regulation policies of China's coal production capacity[J].Xuzhou:China University of Mining & Technology,2013:25-30.

[2] 丛威.我国煤炭产能调控动力机制及模式研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013:30-36.

CONG Wei.Study of dynamic mechanism and mode for China's coal production capacity regulation policy[D].Beijing:China University of Mining & Technology-Beijing,2013:30-36.

[3] 郑欢.中国煤炭产量峰值与煤炭资源可持续利用问题研究[D].成都:西南财经大学,2014:76-94.

ZHENG Huan.Research on Chinese coal production peak and sustainable utilization of coal resources[D].Chengdu:Southwestern University of Finance and Economics,2014:76-94.

[4] 傅丛,白向飞,丁华,等.我国动力用煤及煤化工领域对煤质的基本要求[J].煤质技术,2019,34(5):1-8.

FU Cong, BAI Xiangfei, DING Hua, et al. Basic requirements of coal quality for Chinese power coal chemical industry[J].Coal Quality Technology,2019,34(5):1-8.

[5] 杨芊,杨帅,樊金璐,等.“十四五”时期现代煤化工煤炭消费总量控制研究[J].煤炭经济研究,2020,40(2):25-30.

YANG Qian, YANG Shuai, FAN Jinlu, et al. Research on total coal consumption control of modern coal chemical industry in the "Fourteenth Five-Year Plan" period[J].Coal Economic Research,2020,40(2):25-30.

[6] 徐振刚.中国现代煤化工近 25 年发展回顾·反思·展望[J].煤炭科学技术,2020,48(8):1-25.

XU Zhengang. Review, rethink and prospect of China's modern coal chemical industry development in recent 25 years[J].Coal Science and Technology,2020,48(8):1-25.

[7] 沙兴中,杨南星.煤的气化与应用[M].上海:华东理工大学出版社,1995:14-17.

SHA Xingzhong, YANG Nanxing. Gasification and application of coal[M].Shanghai:East China University of Science and Technology Press,1995:14-17.

[8] 卢珊珊.气流床煤气化灰渣的特性研究[D].上海:华东理工大学,2011:3-5.

LU Shanshan. Study on the characteristics of slag and fly ash which generated from entrained-bed gasifiers[D].Shanghai:East China University of Science and Technology,2011:3-5.

[9] 许慎启.煤气化反应动力学及渣中残碳反应活性研究[D].上海:华东理工大学,2011:1-7.

XU Shenqi. Gasification kinetics study of coal char and unburned carbon in slag[D].Shanghai:East China University of Science and Technology,2011:1-7.

[10] 张晓峰,王玉飞,范晓勇,等.煤气化细渣浮选脱碳分析[J].能源化工,2016,37(5):54-57.

ZHANG Xiaofeng, WANG Yufei, FAN Xiaoyong, et al. Analysis on decarbonization of coal gasification fine slag flotation[J].Energy and Chemical Industry,2016,37(5):54-57.

[11] WANG S. Development and application of modern coal gasification technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016,35(3):653-664.

- [12] 董永波.水煤浆气化细渣碳资源回收及循环利用[J].氮肥技术,2018,39(3):25-36.
DONG Yongbo. Recovery and recycling of fine slag carbon resources from coal water slurry gasification [J]. Nitrogen fertilizer technology, 2018, 39(3): 25-36.
- [13] RATAFIA-BROWN J A, MANFREDO L M, HOFFMANN J W, et al. In an environmental assessment of IGCC power systems [C]//Nineteenth Pittsburgh Coal Conference. Pittsburgh, 2002: 16-17.
- [14] ZOU Caineng, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, et al. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 205-215.
- [15] 曲江山, 张建波, 孙志刚, 等. 煤气化渣综合利用研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 184-192.
QU Jiangshan, ZHANG Jianbo, SUN Zhigang, et al. Research progress on comprehensive utilization of coal gasification slag [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 184-192.
- [16] 胡文豪. 煤气化渣铝硅组分活化分离与资源化利用基础研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
HU Wenhao. Basic study on activation separation and resource utilization of Al-Si components in coal gasification residue [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [17] LI Zuzhong, ZHANG Yayun, ZHAO Hongyan, et al. Structure characteristics and composition of hydration products of coal gasification slag mixed cement and lime [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 265-274.
- [18] WU T, GONG M, LESTER E, et al. Characterisation of residual carbon from entrained-bed coal water slurry gasifiers [J]. Fuel, 2007, 86: 972-982.
- [19] WU S, HUANG S, JI L, et al. Structure characteristics and gasification activity of residual carbon from entrained-flow coal gasification slag [J]. Fuel, 2014, 122: 67-75.
- [20] ACOSTA A, IGLESIASA I, AINETOA M, et al. Utilisation of IGCC slag and clay steriles in soft mud bricks (by pressing) for use in building bricks manufacturing [J]. Waste Management, 2002, 22(8): 887-891.
- [21] LI Zuzhong, ZHANG Yayun, ZHAO Hongyan, et al. Structure characteristics and composition of hydration products of coal gasification slag mixed cement and lime [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 265-274.
- [22] YOSHITAKA I. Utilization of coal gasification slag collected from IGCC as fine aggregate for concrete [C]//Proceedings of the EUROCOALASH 2012 Conference. Greece, 2012: 1-8.
- [23] MARTIN I, ECHEVERIA A A, GARCIA-ROMERO E. Recycling of residual IGCC slags and their benefits as degreasers in ceramics [J]. Journal of Environment Management, 2013, 129: 1-8.
- [24] WU S, HUANG S, WU Y, et al. Characteristics and catalytic actions of inorganic constituents from entrained-flow coal gasification slag [J]. Energy Insitute, 2015, 88(1): 93-103.
- [25] DUAN W, YU Q, LIU J, et al. Characterizations of the hot blast furnace slag on coal gasification reaction [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 936-943.
- [26] MATJIE R H, LI Z, WARD C R, et al. Chemical composition of glass and crystalline phases in coarse coal gasification ash [J]. Fuel, 2008, 87(6): 857-869.
- [27] JENNER H A, JANSSEN-MOMMEN J P M, KOEMAN J H. Effects of coal gasification slag as a substrate for the plant *Cyperus esculentus* and the worm *Eisenia fetida* [J]. Ecotoxicol. Environ. Saf., 1992, 24(1): 45-67.
- [28] YUAN H, YIN H, TANG Y, et al. The basic characteristics of gasification slag from texaco gasifier and shell gasifier [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 675: 728-732.
- [29] 赵永彬, 吴辉, 蔡晓亮, 等. 煤气化残渣的基本特性研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 110-113, 74.
ZHAO Yongbin, WU Hui, CAI Xiaoliang, et al. Research on the basic characteristics of coal gasification residue [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 110-113, 74.
- [30] 高旭霞, 郭晓甯, 龚欣, 等. 气流床煤气化渣的特征 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2009, 35(5): 677-683.
GAO Xuxia, GUO Xiaolei, GONG Xin, et al. Characteristics of coal gasification slag in airstream bed [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science edition), 2009, 35(5): 677-683.
- [31] 盛羽静. 气流床气化灰渣的理化特性研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2017: 28-45.
SHENG Yujing. Study on physicochemical characteristics of slag from entrained-flow coal gasification [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017: 28-45.
- [32] PAN Chanchan, LIANG Qinfeng, GUO Xiaolei, et al. Characteristics of different sized slag particles from entrained-flow coal gasification [J]. Energy Fuels, 2016, 30(2): 1487-1495.
- [33] GUO Fanhui, MIAO Zekai, GUO Zhenkun, et al. Properties of flotation residual carbon from gasification fine slag [J]. Fuel, 2020, 267: 1-8.
- [34] AI Weidong, ZHANG Jiupeng, MIAO Shiding, et al. A low-cost and high-value reinforcing filler for styrene butadiene rubber fabricated by a pneumatic separation technique from coal gasification fine slag [J]. Polymer Journal, 2019, 15: 1-11.
- [35] 张晓峰, 王玉飞, 党睿, 等. 煤气化细渣特性对其浮选脱碳过程的影响 [J]. 河南化工, 2016, 33(7): 11-13.
ZHANG Xiaofeng, WANG Yufei, DANG Rui, et al. Influence of fine slag characteristics of coal gasification on its flotation decarburization process [J]. Henan Chemical Industry, 2016, 33(7): 11-13.
- [36] 马飞, 李寒旭, 盛新, 等. Shell 煤气化飞灰粘附特性及沉积机理分析 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(10): 114-117.
MA Fei, LI Hanxu, SHENG Xin, et al. Adhesion characteristics and deposition mechanism of Shell gasification fly ash [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 114-117.
- [37] ZHAO Xianglong, ZENG Cai, MAO Yanyan, et al. The surface characteristics and reactivity of residual carbon in coal gasification slag [J]. Energy and Fuels, 2010, 24: 91-94.
- [38] 王淀佐, 胡跃华. 浮选溶液化学 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988: 10-35.
WANG Dianzuo, HU Yuehua. Solution chemistry of flotation [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1988: 10-35.

- [39] ZHANG Rui, GUO Fangyu, XIA Yangchao, et al. Recovering unburned carbon from gasification fly ash using saline water [J]. *Waste Management*, 2019, 98: 29-36.
- [40] 邹涛, 林益安, 刘军, 等. 基于气化黑水的含油废弃物热洗-细渣高值利用集成工艺: CN110422975A [P]. 2019-11-08.
ZOU Tao, LIN Yian, LIU Jun, et al. Integrated Process of oil-bearing waste thermal washing and fine slag high-value utilization based on gasification black water: CN110422975A [P]. 2019-11-08.
- [41] ZHOU Feng, YAN Chunjie, WANG Hongquan, et al. The result of surfactants on froth flotation of unburned carbon from coal fly ash [J]. *Fuel*, 2017, 190: 182-188.
- [42] 胡俊阳. 北方某煤气化炉渣的综合利用研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
HU Junyang. Study on the comprehensive utilization of a coal gasification slag in the North [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [43] 白雪杰, 朱金波. 煤泥浮选设备研究现状及进展 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2017(1): 40-42, 46.
BAI Xuejie, ZHU Jinbo. Research Status and development of slime flotation equipment [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2017(1): 40-42, 46.
- [44] UÇURUM M. Influences of Jameson flotation operation variables on the kinetics and recovery of unburned carbon [J]. *Power Technology*, 2009, 191(3): 240-246.
- [45] 李春启, 杨明顺, 康善娇, 等. 煤气化细渣分选及回用的方法: CN105524669A [P]. 2016-04-27.
LI Chunqi, YANG Mingshun, KANG Shanjiao, et al. Separation and reuse of coal gasification fine slag: CN105524669A [P]. 2016-04-27.
- [46] 张一听, 郭凡辉, 武建军, 等. 一种煤气化细渣浮选分离脱水系统及方法: CN110052334A [P]. 2019-07-26.
ZHANG Yixin, GUO Fanhui, WU Jianjun, et al. The invention relates to a coal gasification fine slag flotation separation dewatering system and a method: CN110052334A [P]. 2019-07-26.
- [47] 葛晓东. 煤气化细渣表面性质分析及浮选提质研究 [J]. *中国煤炭*, 2019, 45(1): 107-112.
GE Xiaodong. Study on surface properties of coal gasification fine slag and its flotation [J]. *China Coal*, 2019, 45(1): 107-112.
- [48] 吴阳. 煤气化灰渣的分选加工利用研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2017: 42-53.
WU Yang. Study on separation, processing and utilization of coal gasification ash residue [J]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017: 42-53.
- [49] 赵世永, 吴阳, 李博. Texaco 气化炉灰渣理化特性与脱碳研究 [J]. *煤炭工程*, 2016, 48(9): 29-32.
ZHAO Shiyong, WU Yang, Li Bo. Physicochemical properties and decarbonization of ash residue in Texaco gasifier [J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(9): 29-32.
- [50] XU M, ZHANG H, LIU C. A comparison of removal of unburned carbon from coal fly ash using a traditional flotation cell and a new flotation column [J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2017, 53(1): 628-638.
- [51] 谢广元, 张明旭, 边炳鑫, 等. 选矿学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002: 99-102.
XIE Guangyuan, ZHANG Mingxu, BIAN Bingxin, et al. *Beneficiation science* [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2002: 99-102.
- [52] National Energy Technology Laboratory. Gasifier by-product handling experience [EB/OL]. (2020-03-26) [2020-03-26]. <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energysystems/gasification/gasifipedia/byproduct-handling>.
- [53] CHARLES E Price, MADISONVILLE K Y. Method and system for beneficiating gasification slag: US 7328805B2 [P]. 2008-02-12.
- [54] 杨玉芬, 陈清如, 骆振福. 流态化技术干法脱炭的理论分析与试验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(6): 36-39.
YANG Yufen, CHEN Qingru, LUO Zhenfu. Theoretical analysis and experimental study of fluidization dry process for carbon removal [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(6): 36-39.
- [55] 杨玉芬, 陈清如, 黎强. 空气重介质流化床分选技术分析 [J]. *淮南工业学院学报*, 2002(1): 36-39.
YANG Yufen, CHEN Qingru, LI Qiang. Analysis of air heavy medium fluidized bed separation technology [J]. *Journal of Huainan Institute of Technology*, 2002(1): 36-39.
- [56] 章新喜, 章明玥, 段超红, 等. 气化炉灰渣中碳的回收方法: CN101870896A [P]. 2010-10-27.
ZHANG Xinxi, ZHANG Mingyue, DUAN Chaohong, et al. Recovery method of carbon from gasification furnace ash and slag: CN101870896A [P]. 2010-10-27.
- [57] 赵鹏, 邵伟, 陈剑宁, 等. 一种德士古炉水煤浆气化废渣的综合利用方法: CN101456689A [P]. 2009-06-17.
ZHAO Peng, SHAO Wei, CHEN Jianning, et al. A comprehensive utilization method of Texaco coal water slurry gasification waste slag: CN101456689A [P]. 2009-06-17.
- [58] 纪龙, 曾鸣. 燃煤电厂 CO₂ 捕集与利用技术综述 [J]. *煤炭工程*, 2014, 46(3): 90-92.
JI Long, ZENG Ming. A review of CO₂ capture and utilization in coal-fired power plants [J]. *Coal Engineering*, 2014, 46(3): 90-92.
- [59] 张东明, 杨晨, 周海滨. 二氧化碳捕集技术的最新研究进展 [J]. *环境保护科学*, 2010, 36(5): 7-9, 35.
ZHANG Dongming, YANG Chen, ZHOU Haibin. Recent advances in carbon dioxide capture technology [J]. *Environmental Protection Science*, 2010, 36(5): 7-9, 35.
- [60] 骆仲决, 方梦祥, 李明远, 等. 二氧化碳捕集封存和利用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 166-167.
LUO Zhongyue, FANG Mengxiang, LI Mingyuan, et al. *Carbon dioxide capture, storage and utilization technology* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 166-167.
- [61] 李现勇. 整体煤气化联合循环 (IGCC) 发电和二氧化碳减排技术 [C] // 2009 年二氧化碳减排控制技术与资源化利用研讨会论文集. 上海: 上海人民出版社, 2010: 59-64.
LI Xianyong. Integrated gasification combined cycle and CO₂ reduction technologies [C] // Proceedings of the 2009 Symposium on Carbon Dioxide Emission Reduction and Control Technologies

- and Resource utilization. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2010; 59-64.
- [62] 张启阳, 黄凤敏, 陆诗建, 等. 燃烧前脱碳技术与工程进展[J]. 应用化工, 2015, 44(7): 1331-1334.
ZHANG Qiyang, HUANG Fengmin, LU Shijian, et al. Advances in decarbonization technology and Engineering before combustion [J]. Applied Chemical Industry, 2015, 44(7): 1331-1334.
- [63] 梅琳, 卢啸风, 王泉海, 等. 飞灰流化床燃烧脱碳的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(26): 4454-4461.
MEI Lin, LU Xiaofeng, WANG Haiquan, et al. Experimental study on decarburization of fly ash in fluidized bed combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(26): 4454-4461.
- [64] 李登新, 吕俊复, 刘青, 等. 高碳团聚飞灰的燃烧特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 26(11): 215-218.
LI Dengxin, LYU Junfu, LIU Qing, et al. Combustion characteristics of high carbon agglomerated fly ash [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 26(11): 215-218.
- [65] 何宏舟. 飞灰回燃对燃烧福建无烟煤 CFB 锅炉运行影响的研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(1): 53-57, 107.
He Hongzhou. Study on the effect of fly ash backcombustion on CFB boiler operation of Fujian anythracite [J]. Thermal Power Engineering, 2006, 21(1): 53-57, 107.
- [66] 王金福, 唐强, 郑妍妍, 等. 一种煤气化灰渣氧化脱碳制灰分联产蒸汽的方法: CN105441131B [P]. 2018-04-20.
WANG Jinfu, TANG Qiang, ZHENG Yanyan, et al. A method of producing ash and steam by oxidative decarbonization of coal gasification ash: CN105441131B [P]. 2018-04-20.
- [67] MCMAHAN L Gray, KENNETH J Champagne, YEESOONG, et al. Physical cleaning of high carbon fly ash, fuel processing technology [J]. Fuel Processing Technology, 2002, 76(1): 11-21.
- [68] 王启民. 循环流化床锅炉飞灰高压静电脱碳的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006: 10-37.
WANG Qimin. A study on CFB boiler fly ash triboelectrostatic separation [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006: 10-37.
- [69] 张全国, 李刚, 徐波, 等. 粉煤灰静电脱炭技术研究 [J]. 安全与环境学报, 2002, 2(1): 47-50.
Zhang Quanguo, Li Gang, Tao Youjun, et al. Simulation study of fly ash particle motion characteristics in rotary tribological elector [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 2(1): 47-50.
- [70] 张全国, 杨群发, 焦有宙, 等. 粉煤灰高压静电脱炭工艺特性的试验研究 [J]. 粉煤灰, 2002(5): 3-6.
ZHANG Quanguo, YANG Qunfa, JIAO Youzhou, et al. Experimental study on the characteristics of high pressure electrostatic decarbonization process for fly ash [J]. Fly Ash, 2002(5): 3-6.
- [71] 张相锋. 粉煤灰脱炭试验装置研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2000: 20-25.
ZHANG Xiangfeng. Study of the experimental installation of separating charcoal from fly ash [D]. Henan: Henan Agricultural University, 2000: 20-25.
- [72] SOONG Y, SCHOFFSTALL M R, GRAY M L, et al. Dry beneficiation of high loss-on-ignition fly ash, separation and purification technology [J]. Separation and Purification Technology, 2002, 26(2): 177-184.
- [73] JIANG Kelvin, TAO D, STENCEL J M. Enhancement of dry triboelectric separation of fly ash using seed particles [J]. Coal Preparation, 2003, 23(1/2): 67-76.
- [74] 叶世旺, 陶东平, 陶有俊, 等. 旋转摩擦电选起电器内粉煤灰颗粒运动特性的模拟研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1343-1351.
YE Shiwang, TAO Dongping, TAO Youjun, et al. Simulation study of fly ash particle motion characteristics in rotary tribological elector [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1343-1351.