



移动扫码阅读

刘艳丽,李 强,陈占飞,等.煤气化渣特性分析及综合利用研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(10): 251-257.
LIU Yanli, LI Qiang, CHEN Zhanfei, *et al.* Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 251-257.

煤气化渣特性分析及综合利用研究进展

刘艳丽^{1,2}, 李 强^{1,2}, 陈占飞³, 赵 江^{1,2}, 赵 俞^{1,2}, 孙利鹏^{1,2}

(1.榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室,陕西 榆林 719000;2.榆林学院 榆林市固废资源化利用工程技术研究中心, 陕西 榆林 719000;3.榆林市农业科学研究院,陕西 榆林 719000)

摘 要:以煤气化技术为龙头的现代煤化工在气化过程中产生大量的煤气化渣。随着国家生态文明建设的快速推进,环保高质量发展的要求迫使煤气化渣的综合利用成为现代煤化工领域迫切需要解决的课题之一。然而,目前煤气化渣综合利用率低下,仍以露天填埋堆放为主,长期堆放对水体、大气造成较大污染。针对煤气化渣的研究主要包括制作气化渣营养基质或吸附材料、用作建筑材料、气化渣金属元素的回收利用,以及脱水脱碳资源化利用等方面,其研究路径存在利用率低、成本高、规模化效应差的不足,因此煤气化渣的综合利用仍然是社会各界高度关注的课题。鉴于此,采用资料查阅、野外调研与室内分析统计相结合的研究方法,在全面掌握煤气化渣的主要来源及危害、煤气化渣物理性质、化学性质及环境风险等基本特性的基础上,系统剖析了煤气化渣在建材领域、土壤改良领域、吸附催化材料等领域的研究与应用现状。同时,基于煤气化渣全产业链理念和资源化利用思路,结合野外调研实践,进一步提出煤气化渣处置无害化+消纳本地化相结合,低值规模化+高值精细化相结合,环境效应跟踪监测+综合利用装备系统研发相结合的综合利用思路和路径。期望为气化渣综合利用及煤化工清洁生产和循环发展提供参考。

关键词:煤气化技术;煤气化渣;气化渣资源化;煤化工清洁生产

中图分类号:TQ536 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)11-0251-07

Research progress characteristics analysis and comprehensive utilization of coal gasification slag

LIU Yanli^{1,2}, LI Qiang^{1,2}, CHEN Zhanfei³, ZHAO Jiang^{1,2}, ZHAO Yu^{1,2}, SUN Lipeng^{1,2}

(1.Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Shanbei Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China; 2.Yulin Solid Waste Resource Utilization Engineering Research Center, Yulin University, Yulin 719000, China; 3.Yulin Academy of Agricultural Sciences, Yulin 719000, China)

Abstract:The modern coal chemical industry, which takes coal gasification technology as the leading technology, produces a lot of coal gasification slag in the process of gasification. With the rapid development of national ecological civilization, the comprehensive utilization of coal gasification slag has become one of the urgent issues to be solved in the field of modern coal chemical industry. However, at present, the comprehensive utilization rate of coal gasification slag is low, and it is still mainly buried in open landfill, which causes great pollution to water and atmosphere for a long time. In scientific research on coal gasification residue mainly includes gasification residue nutrition substrate or adsorption material, and used as building materials, gasification slag metal recycling, and dehydration decarburization resource utilization and so on, its research way as the low efficiency, high cost, the lack of scale effect is poor, so the comprehensive utilization of coal gasification slag is still high attention from all walks of life. In view of this, using statistical information consulting, field investigation and indoor analysis research method of combining, in fully grasp the main source and harm of the coal gasification slag slag, coal gasification, physical properties, chemical properties and environmental risks, on the basis of the basic features, such as slag system

收稿日期:2021-12-01 **责任编辑:**黄小雨 **DOI:**10.13199/j.cmki.est.2021-0171

基金项目:陕西省教育厅服务地方专项资助项目(SXJYT-30);陕西省科技厅产业链资助项目(2021QFY04-03);榆林市青年科技新星资助项目(YLKJXX-2)

作者简介:刘艳丽(1985—),女,陕西定边人,硕士。E-mail:136194629@qq.com

通讯作者:李 强(1986—),男,陕西榆林人,副教授,博士。E-mail:mr.li_qiang@163.com

analyzed the coal gasification in the field of building materials, soil improvement areas such as catalysis, adsorption material in the field of research and application status. Slag at the same time, based on coal gasification principle of whole industry chain and recycling use ways, in combination with field investigation and practice, further put forward coal gasification slag disposal harmless + given localization, the combination of high value and low scale fine combination of comprehensive utilization of environmental effect tracing monitoring + equipment system research and development with the combination of the comprehensive utilization way of thinking and path. It is expected to provide reference for the comprehensive utilization of gasification slag, clean production and cycle development of coal chemical industry.

Key words: coal gasification technology; coal gasification slag; gasification slag resource; clean production of coal chemical industry

0 引言

“十三五”期间,我国煤炭产量 184.3 亿 t,决定了未来一定时期我国能源结构仍以煤炭为主。为了高值化利用煤炭资源煤转电、近年来的煤转气、煤转油等多元化开发利用技术大幅提升,与之同时煤基固废排放量大幅增加。据统计,2019 年我国工业固废排放量为 36.98 亿 t,其中煤气化渣的排放量达到 3 300 万 t^[1-2]。由于目前煤气化渣研究路径存在利用率低、成本高、规模化效应差的不足,堆存和填埋仍然是气化渣的主要处置方式^[3]。因此,煤气化渣的综合利用一直是社会各界高度关注的课题。

煤气化渣中含有未完全燃烧的残炭、高温激冷工艺形成丰富的比表面积和金属氧化矿物质,为气化渣的资源化利用提供了必要条件,同时也得到了相关专家和管理者对其资源化利用的高度关注^[4]。目前气化渣主要应用于制作营养基质、建筑材料、回收金属元素和脱水脱碳资源化等 4 个方面^[5-8]。然而,与煤矸石和粉煤灰相比,气化渣目前尚未形成可规模化消纳的成熟技术^[9]。据笔者调研,目前气化渣仍以填埋为主,占用了大量珍贵的土地资源。近年来,随着国家对企业执行固废“以量定产”政策的推进,对地方政府和企业如何快速推进气化渣的综合利用提出了更高的要求^[10]。

鉴于此,笔者采用资料查阅、调研实践、与室内分析统计相结合的研究方法,在了解气化渣的来源、危害及其理化性质的基础上,进一步剖析了气化渣的基础研究与应用现状,期望为气化渣综合利用及煤化工清洁生产和循环发展提供参考。

1 气化渣的来源及危害

煤气化过程是原煤在气化炉中经过高温高压条件与气化剂进行气化反应将原煤中的大量有机物大部分转化成气体燃料的过程。气化渣是煤气化反应过程中无机矿物质和残留的碳质颗粒形成的固态残渣,包括粗渣和细渣。粗渣和细渣的粒径分别集中在 16~4 目(1.19~4.75 mm)和<200 目(0.075 mm),粗

渣残炭量在 5%~30%,细渣残炭量在 30%~50%,产生量约占比 20%^[11]。

不同煤气化工艺产生气化渣的来源和状态存在差异。例如,固定床气化炉一般用块煤或煤焦为原料,与气化剂在炉内进行逆向流动,煤或煤焦由炉上部加入,气化剂自气化炉底部送入,含有残炭的渣由炉底排出,气化过程较完全,热效率和气化效率较高;循环流化床气化炉加入的煤粒径介于 3~5 mm,这些煤颗粒在气化剂的作用下处于持续悬浮和沸腾运动状态,产生的合成气和渣皆在接近炉温排出^[12];气流床气化炉是将粉煤(70%以上通过 200 目)用气化剂输送到炉内中,以并流方式在高温环境下反应,其中部分渣以熔融态状态排出,经淬冷后成为固态渣,绝大部分的碳元素都被转化为有用的合成气,在煤化工领域使用较多^[13-14]。

据统计,2019 年,我国煤气化渣综合利用率为 8.12%^[15]。目前,在煤化工“三废”管理中,气化渣较废水、废气的处置滞后,尤其是有效利用率和处理程度低,以堆放填埋为主。有研究报道,气化渣处理不仅会增加运输成本,更严重的是还会造成侵占土地、污染土壤、水体以及产生扬尘污染等环境问题与安全隐患,环保压力较大^[16]。

2 气化渣的基本性质

2.1 气化渣的物理特性

气化渣外观致密有光泽,整体呈灰黑色。其中,粗渣产生于气化炉的底部排渣口,介于 3.75~9.00 mm,占总排渣量的 60%~80%。细渣产生于合成的除尘装置处理,粒径在 50 μm 以下且以粉末状的形式存在,含水率较高,占总排渣量的 20%~40%。方梦祥等^[17]通过 SEM 和 XRF 对粗渣和细渣中可燃物分布进行分析,发现气化渣中可燃物分布不均匀,粗渣的可燃物含量随粒径的增大而减小,而细渣的可燃物含量随粒径的增大而增大。粗渣中可燃物与 CO₂的反应细渣的残碳含量明显大于粗渣,且渣样碳粒表面均具有发达的孔隙结构。渣中的大部分矿物质主要以无规则

晶型惰性物质存在,粗渣碳粒比表面积大于细渣^[18]。笔者参照《土壤农业化学分析方法》对陕西榆林某化工厂气化渣的物理性质进行了测试^[19]。结果表明,气化渣颜色为灰黑色的,有致密光泽度,pH 为 8.86,密度为 0.82 g/cm³,比表面积为 235.08 cm²/g,田间持水量为 57.20%气化渣的基本物理性质具体如下:

| | |
|--|----------------|
| 颜色 | 灰黑色(观察法) |
| 光泽度 | 致密有光泽(观察法) |
| 比表面积/(cm ² ·g ⁻¹) | 235.08(激光粒度仪法) |
| pH | 8.86(pH 值计法) |
| 密度/(g·cm ⁻³) | 0.82(环刀-烘干法) |
| 田间持水量/% | 57.20(环刀法) |

2.2 气化渣的化学性质

气化渣成分以 SiO₂ 为主,同时包括氧化钙、氧化镁、氧化铁等^[20]。笔者参照《土壤农业化学分析方法》,采用重铬酸钾容量法、比色法和火焰光度计法分别测试了煤气化渣的有机质含量为 33.47 g/kg,速效磷含量为 0.16 mg/kg,速效钾含量为 365.74 mg/kg^[21]。同时,笔者对比分析了陕西、内蒙古和宁夏气化渣性质,发现尽管地域不同,原煤的产地不同,化工企业的工艺流程不同,其气化渣的主要成分相近(表 2)。

表 2 气化渣的基本化学组成^[24]

Table 2 Basic chemical composition of gasification slag^[24]

| 气化渣 种类 | 各化学成分质量分数/% | | | | | | 烧失量/ % |
|-----------|--------------------------------|------------------|-------|--------------------------------|-------------------|------|-----------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | CaO | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | MgO | |
| 陕西粗渣 | 8.72 | 35.74 | 15.86 | 14.24 | 2.92 | 1.75 | 16.08 |
| 陕西细渣 | 7.73 | 14.87 | 8.15 | 8.74 | 1.56 | 1.56 | 52.92 |
| 宁夏粗渣 | 16.82 | 53.35 | 8.12 | 10.04 | 2.14 | 2.16 | 1.19 |
| 宁夏细渣 | 12.65 | 40.76 | 6.79 | 7.26 | 1.93 | 2.41 | 22.82 |
| 内蒙古粗渣 | 14.42 | 27.34 | 19.03 | 23.94 | 2.12 | 0.93 | 6.99 |
| 内蒙古细渣 | 12.89 | 32.02 | 11.19 | 11.53 | 3.23 | 0.87 | 25.39 |
| 粗渣平均值 | 13.32 | 38.81 | 14.34 | 16.07 | 2.39 | 1.61 | 8.09 |
| 细渣平均值 | 11.09 | 29.22 | 8.17 | 9.18 | 2.24 | 1.52 | 33.71 |

细渣的含碳量均比粗渣高,气化渣还含有氧化钙、氧化镁、二氧化钛等无机物,主要矿相为非晶态铝硅酸盐,夹杂着石英、方解石等晶相。例如,杨帅等^[22]、赵永彬等^[23]分析了德士古水煤浆、四喷嘴对

置式、GSP 三种气化炉细渣的化学成分,发现气化渣矿相由 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃ 等组成。以上特点是气化渣资源化利用技术的物质基础。

2.3 气化渣的环境风险评价

气化渣的环境风险指标选取了放射性元素活度、重金属和有机污染物苯并芘,测试方法分别为伽玛能谱仪法、火焰原子吸收光谱法和液相色谱法。由表 3 可以看出,与对照黄土相比,气化渣的 U-238、Th-232、Ra-226 核素的活度在一个数量级。表 4 显示煤气化渣没有重金属和苯并芘风险。

表 3 气化渣放射性元素活度

Table 3 Activity of radioactive elements in gasification slag

| 指标 | U-238 活度/ (Bq·kg ⁻¹) | Th-232 活度/ (Bq·kg ⁻¹) | Ra-226 活度/ (Bq·kg ⁻¹) |
|-----|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 气化渣 | 29.3±2.99 | 30.27±0.91 | 27.88±0.68 |
| 黄绵土 | 37.06±4.49 | 48.72±1.49 | 39.72±1.02 |

表 4 气化渣重金属和苯并芘含量^[25]

Table 4 Content of heavy metal elements and Benzopyrene in gasification slag^[25]

| 元素 | Cr | Ni | Cu | Zn | As | Cd | Hg | Pb | 苯并芘 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 检测含量/% | 32.55 | 19.76 | 33.61 | 95.76 | 16.07 | 0.39 | 0.07 | 51.31 | — |
| 标准含量/% | ≤90 | ≤40 | ≤35 | ≤100 | ≤15 | ≤0.20 | ≤0.15 | ≤35 | |

注:标准为中国土壤环境质量标准。

3 气化渣资源化利用现状

3.1 气化渣在建材领域的应用

1) 气化渣用作建筑回填应用。建筑工程中作为回填使用的散体建筑材料要求颗粒大小混杂,粗粒形成的孔隙被细颗粒充填,易形成紧密结构。气化渣具有非均粒性,孔隙较少,用作回填材料效果较好。例如,刘娟红等^[26]针对气化渣应用矿山充填中强度低的问题,研究激发剂对气化渣活性的影响,并将其部分替代粉煤灰用于矿山充填。王军龙等^[27]在生料配料中掺加煤矸石和气化渣均能起到降低熟料热耗、提高余热发电量、改善熟料质量的效果。傅博等^[28]针对气化渣对硅酸盐水泥强度和微观结构的影响进行了系统的研究,发现 10% 气化渣掺量在水泥浆体中能起到成核作用有利于水泥发生水化反应,提高水泥浆体中水化产物数量,缩短凝结时间,提高水泥浆体抗压强度。刘开平等^[29]比较了掺气化粗渣混凝土与普通混凝土的性能,发现掺有气化

粗渣的混凝土干缩率下降,抗压强度明显增强,且其强度随时间增长持续上升,并推荐在混凝土中掺杂研磨后的粗渣来替代天然砂作为混凝土的原料。此外,景国等^[30]、闫秀清^[31]采用气化渣替代大部分黏土配料生产硅酸盐水泥,抗压强度可达 38.6 MPa。鲁永明等^[32]采用气化细渣制备出的泡沫混凝土抗压强度可达 6 MPa,表观干密度为 740 kg/m³。可见,气化渣可以作为生料配料用于建筑回填料、生产水泥,但其最优掺量受气化渣本身性质及目标产品预期性能的影响。

2) 气化渣在制砖领域的应用。尹维新等^[33]研究利用粉煤灰和气化渣生产墙体砖,结果表明采用常压蒸汽养护工艺,制备出了 MU10 等级的砖,符合国家相关标准的要求。焦淑侠^[34]利用煤渣制备空心砖,研究发现在自然养护条件下,制备出 7 d 抗压强度为 11.08 MPa 的空心砖。章丽萍等^[35]利用气化渣为原材料,石膏为激发剂,生石灰、水泥

为辅料,在蒸汽养护条件下制备出符合国家标准要求的免烧砖。尹洪峰等^[36]以气化渣、黏土为原料,混合后制备出了 MU7.5 等级以上建筑用砖,与一般黏土砖相比,具有体积密度低、气孔率高等优点,满足了国家标准强度指标。ACOSTA 等^[37]利用 50% 低碳含量(烧失量 2.6%)的气化渣与黏土制备出工业级建筑用砖,满足国家的建筑标准。可见,掺和气化渣制备工业用砖是气化渣当前利用的方向之一。

3.2 气化渣在土壤改良中的应用

气化渣的产生经过高温激冷过程,其物理特性表现为多孔均孔,比表面积丰富,加之气化渣富含有机碳及微量元素,这为气化渣在土壤改良提供了可能和潜力。例如,冯君臣等^[38]发现气化渣作为堆肥添加剂可以延长高温期,使得堆肥无害化更加彻底,并认为气化渣作为堆肥添加剂的作用可分为 4 类:①减少 CO₂ 的排放量,减缓全球变暖的趋势;②减少氨气的挥发,增加保氮效果;③减少挥发性有机酸的排放,改善堆肥环境;④提高种子发芽率,降低堆肥产品的毒性,增加腐熟度。路春亚^[39]研究了煤气化渣对农业废弃物堆肥过程中抗生素抗性基因的影响,设置了对照组 CK(猪粪+秸秆)、煤气化渣占比降低组 L(猪粪+秸秆+5% CGS)和煤气化渣占比升高组 H(猪粪+秸秆+10% CGS) 3 个处理,添加气化渣可以加速堆肥体系的启动,延长堆肥的高温期,降低 pH,促进有机物的分解,提高堆肥效率,特别是添加 10% 的气化渣,堆肥结束后,所有处理碳氮元素质量比低于 20, GI 指数(种子发芽指数)均大于 80%,达完全腐熟,气化渣的添加可以加速有毒物质

分解,降低堆肥产品的毒性增强其腐熟程度。目前将气化渣在土壤改良的研究方向主要为制备土壤调节剂、硅肥原料、种植砂等,应用领域为盐碱地改良、沙漠化防治取得较好的研究效果,为气化渣应用于土壤生态修复领域提供了支撑^[40]。ZHU 等^[41]选择盐碱地玉米和小麦为对象,研究发现气化细渣掺量 20% 时,土壤容重降低、保水性能提高,作物发芽率显著提升。同时发现气化渣是良好的腐植酸储存和释放介质,有望成为一种用于土壤改良的低成本、高效的腐植酸缓释剂^[42]。

3.3 气化渣在吸附材料领域的应用

原煤在气化过程中产生的气化渣的表面具有多孔结构,呈现出比表面积大的特点,因此有研究将它作为吸附剂来处理工业废水。例如,普煜等^[43]研究气化渣在处理废水过程中发现,气化渣对煤气废水中的 COD 的去除效率可达 41.9%,酚类物质的去除效率可达 71.2%。刘转年等^[44]通过酸碱浸液方法对气化渣进行改性,发现通过碱性改性后的气化渣大大提高对气化废水中苯酚的吸附量,可达 7.236 mg/g。YUE^[45]采用酸碱化方法晶化处理气化渣,发现经晶化处理后的气化渣对 COD 的去除率可达 66.7%。朱仁帅等^[46]通过气化渣制备活性炭,碘吸附值随活化时间的增加而增加,可达 582.19 mg/g,铜离子脱除率可达到 40.63%。此外,刘崇国等^[47]对气化渣处理废水技术进行了研究,认为采用气化渣工艺处理含氟废水不仅可以有效回收废水中 2, 6-二氟苯甲酰胺,提高原料利用率,而且工艺能耗低,安全可靠,无化学试剂添加,具有一定的社会与经济效益。

4 展 望

近年来,以煤气化为核心技术的煤制气、煤制油等产业在我国得到了大力发展。气化渣的资源化、高值化利用已经成为新时代煤化工的短板。目前不能满足企业对固废“短平快”的解决思路和需求,致使气化渣无法实现规模化利用。基于气化渣排放量大、铝硅碳资源丰富和比表面积丰富等特性,现有气化渣的综合利用技术分析前景如下:

1) 气化渣的特性受到多种因素的影响,导致很难找到一种“普适性”的处理方法。因此,气化渣综合利用适宜走一条处置无害化+消纳本地化相结合,低值规模化+高值精细化相结合,环境效应跟踪监测+综合利用装备系统研发相结合的发展路径。

2) 根据目前国内外气化渣利用技术的基础研究现状,技术设备开发现状以及成本核算,市场容量

等因素,气化渣作为建筑材料、生态改良材料仍然是当前资源化利用的主流趋势。同时,在现有研究基础上,应进一步系统研究与试验示范气化渣制备采空区充填材料、保温岩棉、活性焦等新型领域,探索兼顾气化渣的规模化与高值化利用路径,为气化渣综合利用及煤化工清洁生产和高质量发展提供参考。

3) 由于煤气化过程的高温(800~1 300 ℃)和激冷作用,气化渣呈现出比表面积丰富、多孔均孔特性,为气化渣在土壤生态修复领域中的应用提供了可能和潜力。因此,研发气化渣应用于土壤改良基质,用于荒漠化防治、盐碱地改良、采煤沉陷区生态治理等领域不仅可以规模化消纳气化渣,而且能够取得较好的生态修复效果。

4) 基于分质分级利用理念,将气化细渣活化、进一步提取碳、铁、铝、硅及稀有元素等,在此基础上制备复合材料用作水处理吸附剂、催化剂、橡塑填料等,实现煤气化渣高附加值资源化利用。

参考文献(References):

[1] 宋瑞领,蓝 天.气流床煤气化炉渣特性及综合利用研究进展[J].煤炭科学技术,2021,49(4):227-236.
SONG Ruiling,LAN Tian.Review on characteristics and utilization of entrained-flow coal gasification residue[J].Coal Science and Technology,2021,49(4):227-236.

[2] 相微微,李夏隆,严加坤,等.榆林煤气化渣重金属生物有效性评价[J].农业环境科学学报,2021,40(5):1097-1105.
XIANG Weiwei,LI Xiaolong,YAN Jiakun,et al.Bioavailability evaluation of heavy metals in Yulin coal gasification slag[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021,40(5):1097-1105.

[3] 马伟平,梅 霞,李 真,等.煤炭地下气化残渣中微量元素的环境风险评估[J].煤炭学报,2021,46(11):3670-3681.
MA Weiping,MEI Xia,LI Zhen,et al. Environmental risk assessment of trace elements in the underground coal gasification residues [J].Journal of China Coal Society,2021,46(11):3670-3681.

[4] 史兆臣,戴高峰,王学斌,等.煤气化细渣的资源化综合利用技术研究进展[J].华电技术,2020,42(7):63-72.
SHI Zhaochen,DAI Gaofeng,WANG Xuebin,et al. Review on the comprehensive resources utilization technology of coal gasification fine slag[J]. Huadian Technology,2020,42(7):63-72.

[5] 倪 琳,崔小峰,徐立家,等. 燃料煤重金属元素在灰灰及炉渣中的分布与富集研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 203-208.
NI Lin,CUI Xiaofeng, XU Lijia,et al. Study on distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash and slag from fuel coal[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 203-208.

[6] 苏昇峰.水煤浆气化渣水处理技术的相关研究[J].煤化工与甲醇,2020,46(4):6-8.
SU Yifeng. Research on water treatment technology of coal water slurry gasification slag [J].Coal Cemical Methanol,2020,46(4):

6-8.

[7] 商晓甫,马建立,张 剑,等.煤气化炉渣研究现状及利用技术展望.[J].环境工程技术学报,2017,7(6):712-717.
SHANG Xiaofu,MA Jianli,ZHANG Jian,et al.Research status and prospects of utilization technologies of slag from coal gasification [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(6):712-717.

[8] 徐怡婷,柴晓利.铁负载煤气化渣基活性炭非均相 Fenton 体系降解甲基橙染料废水的工艺优化及其机理研究[J].山东化工,2016,45(22):159-164.
XU Yiting, CHAI Xiaoli.Kinetic Studies of degradation of methyl orange dye wastewater by heterogeneous Fenton-like using coal gasification slag-based activated carbon-Fe [J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(22):159-164.

[9] 景宇蓉.循环流化床锅炉掺烧气化炉细灰渣设计与分析[J].科技风,2020(3):167.
JING Yurong. Design and analysis of fine ash and slag of circulating fluidized bed boiler mixed firing gasifier[J].Technology Wind,2020 (3):167.

[10] 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):25-35.
DONG Yongbo. Recovery and recycling of carbon resource from fine dregs of water-coal slurry gasification[J].Nitrogenous Fertilizer Technology,2018,39(3):25-35.

[11] 宁永安,段一航,高宁博,等.煤气化渣组分回收与利用技术研究进展[J].洁净煤技术,2020,26(1):14-19.
NING Yongan, DUAN Yihang, GAO Ningbo, et al. Progress of component recycling and utilization technology of coal gasification slag. [J].Clean Coal Technology, 2020,26(1):14-19.

[12] 艾伟东.煤气化渣_有机高分子复合材料的制备及其性能研究[D].长春:吉林大学,2020:1-121.
AI Weidong.The study on preparation and properties of coal gasificationslag/polymer composites[J].Changchun:Jilin University, 2020:1-121.

[13] 盛羽静.气流床气化灰渣的理化特性研究[J].上海:华东理工大学,2017:1-70.
SHENG Yujing. Study on physicochemical characteristics of slag from entrained-flow coal gasification [J].Shanghai: East China University of Science and Technology,2017:1-70.

[14] 高旭霞,郭晓镭,龚 欣.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. Characterization of slag from entrained-flow coal gasificaion [J]. Journal of East China Universit y of Science and Tech nology (Natural Science Edition), 2009,35(5):677-683.

[15] 杜根杰,杜建磊,李红科,等.中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告[M].北京,中国工业固废网,2020:1-291.
DU Genjie,DU Jianlei,LI Hongke,et al.China solid waste comprehensive utilization industry development report [M]. Beijing, China Industrial Solid Waste Network,2020:1-291.

[16] 彭团儿.工业固废网,煤化工气化渣综合利用技术研究进展.2020[R/OL].(2020-5-23)[2021-2-25].http://www.chinagwfw.com/.

- [17] 方梦祥,穆宗勤.工业固废网,气化渣和灰渣综合利用技术.2020[R/OL].(2020-5-23)[2021-2-25].<http://www.chinagygfw.com/>.
- [18] 张付申.煤化工气化渣材料化利用.煤化工行业固废气化灰渣资源化利用技术云端专题研讨会.2020[R/OL].(2020-5-23)[2021-2-25].<http://www.chinagygfw.com/>.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [20] 顾成,李宇.煤基固废物综合利用研究进展[J].煤炭与化工,2020,43(9):98-106.
GU Cheng, LI Yu. Study on progress in comprehensive utilization of coal based solid waste[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(9):98-106.
- [21] 李强,孙利鹏,亢福仁,等.煤气化渣-沙土复配对毛乌素沙地苜蓿生长及重金属迁移的影响[C]//.中国环境科学学会2019年科学技术年会:环境工程技术创新与应用分论坛论文集(四),2019:590-595.
LI Qiang, SUN Lipeng, KANG Furen, *et al.* Effects of coal gasification slag-sand compound soil on alfalfa growth and heavy metal migration in mu us sandy land[C]//. Proceedings of Environmental Engineering Technology Innovation and Application Sub-Forum (four), 2019 Annual Conference of Science and Technology, Chinese Society for Environmental Sciences, 2019: 590-595.
- [22] 杨帅,石立军.煤气化细渣组分分析及其综合利用探讨[J].煤化工,2013,167(4):29-31.
YANG Shuai, SHI Lijun. Control technology of water content in the reaction liquid applied in the carbonylation of Methanol Synthesis to produce acetic acid[J]. Coal Chemical Industry, 2013, 167(4):29-31.
- [23] 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):110-187.
ZHAO Yongbin, WU Hui, CAI Xiaoliang, *et al.* Basic characteristics of coal gasification residual[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3):110-187.
- [24] 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):184-193.
QU Jiangshan, ZHANG Jianbo, SUN Zhigang, *et al.* Research progress on comprehensive utilization of coal gasification slag[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1):184-193.
- [25] 周国华,秦绪文,董岩翔.土壤环境质量的制定原则与方法[J].地质通报,24(8):722-727.
ZHOU Guohua, QIN Xuwen, DONG Yanxiang. Soil environmental quality standards: principle and method[J]. Geological Bulletin of China, 24(8):722-727.
- [26] 刘娟红,许鹏玉,周昱程,等.改性煤气化渣用于矿山充填的试验研究[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2528-2535.
LIU Juanhong, XU Pengyu, ZHOU Yucheng, *et al.* Experimental study on modified coal gasification slag Used for Mine Filling[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8):2528-2535.
- [27] 王军龙,胡鹏刚,杨冰凌,等.煤矸石和气化渣在水泥生料配料中的应用及比较[J].水泥,2018,(4):23-25.
WANG Junlong, HU Penggang, YANG Bingling, *et al.* Application and comparison of coal gangue and gasification slag in cement raw material batching[J]. Cement, 2018, (4):23-25.
- [28] 傅博,马梦凡,申旺,等.气化渣对硅酸盐水泥强度和微观结构的影响研究[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2523-2527.
FU Bo, MA Mengfan, SHEN Wang, *et al.* Influence of coal gasification slag on strength and microstructure of portland cement[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8):2523-2527.
- [29] 刘开平,赵红艳,李祖仲,等.煤气化渣对水泥混凝土性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2017,34(5):190-195.
LIU Kaiping, ZHAO Hongyan, LI Zuzhong, *et al.* Influence of coal gasification slag on cement concrete performance[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5):190-195.
- [30] 景国,史普天.利用固体废渣生产矿渣硅酸盐水泥的试验研究[J].水泥工程,2005(3):83-84.
JING Guo, SHI Putian. Experimental study on the production of Portland cement from solid slag[J]. Cement engineering, 2005(3):83-84.
- [31] 闫秀清.用煤渣烧制水泥熟料的试验研究[J].山西建筑,2009,35(15):151-213.
YAN Xiuqing. Experiment research on coal cinders burn cement familiar material[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(15):151-213.
- [32] 鲁永明,李之政,李伟,等.磨细炉底渣的性质及其在泡沫混凝土中的应用研究[J].中国建材科技,2014,23(4):15-18.
LU Yongming, LI Zhizheng, LI Wei, *et al.* Study of the properties of furnace bottom slag and its application in the foamed concrete[J]. China Building Materials Science & Technology, 2014, 23(4):15-18.
- [33] 尹维新,孙补.利用低质粉煤灰和煤渣开发墙体砖[J].砖瓦世界,2005(10):37-38.
YIN Weixin, SUN Bu. Low-quality fly ash and cinder are used to develop the wall[J]. Brick & Tile World, 2005(10):37-38.
- [34] 焦淑侠.利用石膏煤渣制备空心砖的试验研究[J].中国资源综合利用,2010,28(3):35-36.
JIAO Shuxia. Experimental study on preparation of hollow brick with gypsum cinder[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2010, 28(3):35-36.
- [35] 章丽萍,温晓东,史云天,等.煤间接液化灰渣制备免烧砖研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):354-358.
ZHANG Liping, WEN Xiaodong, SHI Yuntian, *et al.* Research on making non-burnt brick from indirect coal liquefaction residue[J]. Journal of China university of mining & Technology, 2015, 44(2):354-358.
- [36] 尹洪峰,汤云,任耘,等. Texaco 气化炉炉渣基本特性与应用研究[J].煤炭转化,2009,32(4):30-33.
YIN Hongfeng, TANG Yun, REN Yun, *et al.* Study on the characteristic and application of gasification slag from texaco gasifier[J]. Coal Conversion, 2009, 32(4):30-33.
- [37] ACOSTA A, IGLESIAS I, AINETO 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.

[38] 冯君臣. 浅谈废渣的处理与利用[J]. 山东化工, 2014, 43(1): 148-149.

FENG Junchen. Discussion on the treatment and utilization of waste residue[J]. Shandong Chemical Industry, 2014, 43(1): 148-149.

[39] 路春亚. 煤气化渣对农业废弃物堆肥过程中抗生素抗性基因的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019: 1-49.

LU Chunya. Effects of coal gasification slag on antibiotic resistance genes during agricultural waste composting[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019: 1-49.

[40] 刘娜, 李强, 孙利鹏, 等. 增施养分对复配气化渣-沙土的激发效应研究[J]. 榆林学院学报, 2021, 31(2): 28-31.

LIU Na, LI Qiang, SUN Lipeng, *et al.* Study on the Excitation effect of adding nutrient on gasified slag-sandsoil[J]. Journal of Yulin University, 2021, 31(2): 28-31.

[41] ZHU D D, MIAO S D, XUE B, *et al.* Effect of coal gasification fine slag on the physicochemical properties of soil[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2019, 230(7): 1-11.

[42] ZHU D D, ZUO J, JIANG Y S, *et al.* Carbon-silica mesoporous composite in situ prepared from coal gasification fine slag by acid leaching method and its application in nitrate removing[J]. Science of the Total Environment, 2020, 707: 136102.

[43] 普煜, 马永成, 陈樑, 等. 鲁奇炉渣在废水净化中的应用研究[J]. 工业水处理, 2007(5): 59-62.

PU Yu, MA Yongcheng, CHEN Liang, *et al.* Application of lurgislag to wastewater purification[J]. Industrial Water Treatment, 2007(5): 59-62.

[44] 刘转年, 全海山, 舒瑞, 等. 煤气发生炉炉渣改性和吸附性能[J]. 环境工程学报, 2013, 7(3): 1139-1144.

LIU Zhuannian, QUAN Haishan, SHU Rui, *et al.* Modification and adsorption property of gas furnace slag[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(3): 1139-1144.

[45] YUE X, LI X M, WANG D B, *et al.* Simultaneous phosphate and CODcr removals for landfill leachate using modified honey-comb cinders as an adsorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1): 553-558.

[46] 朱仁帅, 吕飞勇, 汤茜, 等. 利用水煤浆气化炉飞灰合成吸附材料的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2017(3): 12-15.

ZHU Renshuai, LYU Feiyong, TANG Qian, *et al.* Using coal-water slurry gasifier synthesis of fly ash adsorption materials[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2017(3): 12-15.

[47] 刘崇国, 匡建平, 罗春桃, 等. 煤气化灰渣资源化利用策略研究[J]. 当代化工研究, 2019(3): 23-25.

LIU Chongguo, KUANG Jianping, LUO Chuntao, *et al.* Research on resource utilization strategy of coal gasification ash[J]. Modern Chemical Research, 2019(3): 23-25.