

# 煤气化炉渣免烧陶粒的制备及其在反硝化滤池中的应用

张祎昉, 武陈\*, 曹宗仑, 王崇, 孙杰  
(中石化(北京)化工研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:**煤气化炉渣是煤气化过程中产生的固体废弃物。大量的炉渣堆积不仅造成了资源的浪费,而且增加了企业的运营成本,对当地环境造成危害。以内蒙古地区的煤气化炉渣为主要原料,加入水泥、生石灰、CaSO<sub>4</sub>等,通过免烧结的方式制备陶粒。在制气炉渣、水泥、生石灰、CaSO<sub>4</sub>质量比为70:30:2.5:5的条件下制得的陶粒性能最优越,比表面积可达51.7 m<sup>2</sup>/g,堆积密度为809 kg/m<sup>3</sup>,颗粒破碎强度为6.61 MPa。将该陶粒用作反硝化生物滤池填料,相比于普通市售陶粒挂膜速度更快;在水力停留时间(HRT)为12 h时,化学需氧量(COD)由300 mg/L下降至60 mg/L以下,COD去除率在80%以上;硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)由60 mg/L下降至2 mg/L以下,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N去除率在95%以上。利用煤气化炉渣制备免烧结陶粒实现了煤气化炉渣的资源化利用,同时为污水反硝化处理提供了一种新的填料。

**关键词:**煤气化炉渣;免烧结陶粒;填料;反硝化;除COD;除NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N

中图分类号:TU502

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S1-0213-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.038

## Preparation of non-sintering coal gasification slag ceramsite and its application in denitrification filter

ZHANG Yi-yang, WU Chen\*, CAO Zong-lun, WANG Dong, SUN Jie  
(Sinopec Beijing Research Institute of Chemical Industry, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Coal gasification slag is a solid waste generated during the coal gasification process. Coal gasification slag generated in Inner Mongolia region, China is mixed with cement, quicklime and CaSO<sub>4</sub> to prepare ceramsite through a non-sintering method. Result shows that the optimal raw materials mass ratio is coal gasification slag:cement:quicklime:CaSO<sub>4</sub>=70:30:2.5:5. Specific surface area of non-sintered ceramsite prepared under this ratio can reach 51.7 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, bulk density is 809 kg·m<sup>-3</sup>, and particle crushing strength is 6.61 MPa. Using this ceramsite as a filler for denitrification biofilters results in a faster biofilm formation rate than using ordinary commercially available ceramsite. Chemical oxygen demand (COD) decreases from 300 mg·L<sup>-1</sup> to below 60 mg·L<sup>-1</sup>, with a removal rate over 80% when the prepared ceramsite is used as fillers for denitrification biofilters and the hydraulic retention time (HRT) is 12 h. The content of nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) decreases from 60 mg·L<sup>-1</sup> to below 2 mg·L<sup>-1</sup>, with a removal rate over 95%. This routine achieves re-utilization of coal gasification slag and provides a new filler for wastewater denitrification treatment.

**Key words:** coal gasification slag; non-sintering ceramsite; filler; denitrification; COD removal; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N removal

煤气化是指在高温高压环境中,煤中碳元素与气化剂反应并转化为以一氧化碳为主的可燃性有机挥发物的过程<sup>[1-2]</sup>。煤气化技术实现了煤炭资源高清洁、高效率的转化,是我国洁净煤技术的重要组成部分。煤气化炉渣是煤气化过程中,煤炭灰分中含有的矿物质经完全熔融后发生分解和化合反应,所得到的产物经淬冷后生成的以非晶态玻璃体为主的固体废弃物,其主要成分包括:SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO和残余碳等<sup>[3-5]</sup>。全球每年的煤气化炉渣排放量约为5 000万t,煤气化炉渣的总量在持续增加<sup>[6-7]</sup>。

煤气化炉渣的大量堆积,不仅占用土地面积,同时还对土壤、大气和水体等周围环境造成污染。目前,煤气化炉渣主要处理方式是堆砌填埋,但这一方法不仅没有充分进行资源利用,还存在着很大的环境风险。

事实上,煤气化炉渣中含有丰富的无机矿物和残余的碳,具有很好的资源化利用潜力<sup>[8-10]</sup>。目前,国内外对于煤气化炉渣应用的研究主要集中在建筑材料<sup>[11-13]</sup>(水泥、混凝土)的制备、残余碳的富集与回收<sup>[14]</sup>、多孔吸附材料的制备<sup>[15-16]</sup>和土壤改良<sup>[17]</sup>

收稿日期:2024-02-23;修回日期:2024-06-18

作者简介:张祎昉(1992-),女,博士,工程师,研究方向为污水处理,zhangyy.bjhy@sinopec.com;武陈(1985-),男,博士,高级工程师,研究方向为污水处理,通讯联系人,wuchen.bjhy@sinopec.com。

等方面。尽管取得了一定的进展,但仍有大量炉渣没有实现资源化利用,需要开发更经济、更环境友好的资源化利用技术。

陶粒是一种人造轻骨料,具有强度高、密度低、比表面积大、热稳定性好<sup>[18]</sup>等诸多优势,广泛应用于建筑材料、园林绿化以及环保等领域。其中,陶粒在环保领域的应用主要是作为生物滤池的填料<sup>[19-20]</sup>,供微生物附着和生长,通过微生物的新陈代谢活动去除废水中的污染物。此外,陶粒还能作为吸附剂处理含金属离子<sup>[21]</sup>、磷<sup>[22-23]</sup>或氟<sup>[24]</sup>的废水。

生产陶粒是煤气化炉渣资源化利用的重要途径之一。现有陶粒制备工艺主要采用烧结法<sup>[25-26]</sup>,陶粒产品强度高且堆积密度小,但存在能耗高、污染大、成本高等弊端。而采用免烧法制备陶粒则可完全避免上述问题,其具有成本低、能耗小、生产工艺简单等特点,更符合当前绿色低碳循环发展的理念。

本文对内蒙古地区的煤气化炉渣进行了综合利用研究,探索了煤气化炉渣免烧制备陶粒的方法,通过分析制备条件对陶粒堆积密度、颗粒破碎强度以及比表面积的影响,确定了煤气化炉渣免烧制备陶粒的最佳工艺,并将制得的陶粒作为生物滤池的填料,开展了反硝化试验,考察了对废水中硝酸盐化合物的去除效果。

## 1 实验部分

### 1.1 原料和仪器

本实验所用煤气化炉渣取自内蒙古鄂尔多斯地区的煤气化炉渣粗渣。普通硅酸盐水泥和生石灰购于郑州大造化工厂。硫酸钙、硝酸钠、乙酸钠、磷酸二氢钠等均来自上海麦克林生化科技有限公司,纯度均为分析纯。

制备陶粒使用的仪器为滁州华冶机电科技有限公司生产的 QLC400-II 变速实验成球机。用 X4200W 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析煤气化炉渣的化学成分。经检测,本实验所用煤气化炉渣的化学组成如表 1 所示。

表 1 煤气化炉渣的化学组成

组分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	游离碳	其他
质量分数/%	42.98	15.30	3.38	18.52	19.82

### 1.2 制备方法和性能测试

#### 1.2.1 免烧陶粒的制备方法

将煤气化炉渣在 105℃ 烘箱中烘干 4 h,用研磨机磨细后过 200 目不锈钢筛备用。称取筛分后的煤

气化炉渣、生石灰和硫酸钙,混合均匀后置于成球机中。控制成球机转速为 50 r/min,向粉料中均匀洒去离子水,去离子水质量约为粉料质量的 10%。随着水的加入,粉料会逐渐形成球形颗粒。转动 3 min 后,所有粉料均形成球形陶粒粗坯。将陶粒粗坯取出后自然晾干,在室温下养护 7 d 得到陶粒产品。

#### 1.2.2 免烧陶粒的性能测试

(1) 免烧陶粒的堆积密度测定按照 GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法》规定进行。

(2) 免烧陶粒的强度性能由颗粒破碎强度(Particle crushing strength, PCS)来表征<sup>[27]</sup>。

使用压力测试仪测定陶粒的破碎压力,重复测定 10 次取平均值,并通过下式计算陶粒的颗粒破碎强度:

$$PCS(\text{MPa}) = 2.8P/\pi d^2$$

其中,  $P$  为颗粒破碎压力,  $N$ ;  $d$  为颗粒半径。

(3) 免烧陶粒的微观形貌由 ZEISS Sigma 300 型扫描电子显微镜(SEM)分析,扫描电压为 1~5 kV;比表面积及孔结构由 JW-BK122W 型比表面及孔径分析仪(BET)测试。

### 1.3 煤气化炉渣免烧陶粒在生物滤池中的应用

反硝化滤池具有占地面积小、处理负荷高、操作简单、投资较少等诸多优势,是污水处理中脱氮的主要方式之一<sup>[28]</sup>。陶粒填料是反硝化生物滤池的核心之一,起到截留水体中悬浮物、为微生物生长提供载体等作用,其性能对微生物挂膜启动、滤池的稳定运行有较大影响<sup>[29]</sup>。本实验同时运行两个有机玻璃圆柱形反硝化滤池,其内径为 8 cm,高度为 60 cm,有效容积为 1 L。实验进水为模拟废水,将乙酸钠(碳源)、硝酸钠(氮源)、磷酸二氢钠(磷源)按需求称取所需量进行配置。系统采用上向流方式运行,在蠕动泵加压作用下污水由下进水口进入滤池。

滤池中填料为采用上述方法制备的陶粒,记为 1<sup>#</sup>;对照组为普通市售陶粒,记为 2<sup>#</sup>。本实验采用接种挂膜法,将驯化后的活性污泥直接投加进反硝化滤池中进行挂膜,开始实验后定期取样,监测进出水 NO<sub>3</sub>-N、COD 等变化情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤气化炉渣免烧陶粒的制备

#### 2.1.1 水泥用量对陶粒性能的影响

煤气化炉渣和水泥总质量为 100 g,调节二者的质量比,在生石灰和 CaSO<sub>4</sub> 的用量分别为 10 g 和

5 g的条件下,制备了一系列免烧陶粒,并分别进行了表征,实验结果见图1。

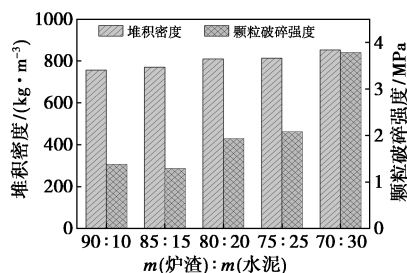


图1 水泥用量对陶粒性能的影响

从图1可以看出,随着水泥用量的增加,陶粒的堆积密度和颗粒破碎强度也随之增加。当煤气化炉渣和水泥的质量比为70:30时,陶粒的颗粒破碎强度最大,达到3.78 MPa,此时的堆积密度为852 kg/m<sup>3</sup>。造成这一现象的原因是由于水泥的堆积密度大于煤气化炉渣的堆积密度,随着水泥用量的增加,陶粒产品的堆积密度随之增加。同时,在水泥用量增加后,水泥的水化作用增强,产生更多的水化产物Ca(OH)<sub>2</sub>,Ca(OH)<sub>2</sub>与煤气化炉渣中的SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>发生火山灰反应,增强了胶凝作用,从而提高陶粒的颗粒破碎强度<sup>[30]</sup>。

### 2.1.2 生石灰用量对陶粒性能的影响

控制煤气化炉渣、水泥、CaSO<sub>4</sub>用量分别为70 g、30 g、5 g不变,加入不同质量的生石灰制备了一系列陶粒并对其进行了表征,考察了生石灰用量对陶粒性能的影响,实验结果如图2所示。

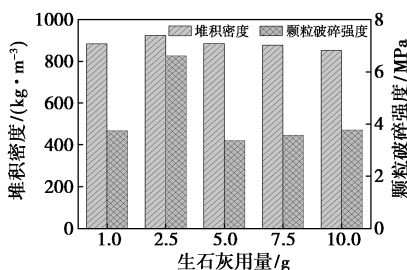


图2 生石灰用量对陶粒性能的影响

随着生石灰用量的增加,陶粒的堆积密度和颗粒破碎强度呈先上升后下降的趋势,其中最佳生石灰用量为2.5 g,此时陶粒的堆积密度为925 kg/m<sup>3</sup>,颗粒破碎强度为6.61 MPa。水和生石灰反应生成Ca(OH)<sub>2</sub>,同样起到了促进胶凝作用的效果,提高了陶粒的颗粒破碎强度和堆积密度;但由于生石灰自身的密度较轻,用量过多时会造成陶粒的堆积密度和颗粒破碎强度下降。

### 2.1.3 CaSO<sub>4</sub>用量对陶粒性能的影响

在确定了水泥和生石灰的最佳用量后,研究

CaSO<sub>4</sub>用量对陶粒性能的影响。煤气化炉渣、水泥和生石灰的用量分别为70、30 g和2.5 g,添加不同质量的CaSO<sub>4</sub>并检测陶粒性能,结果如图3所示。

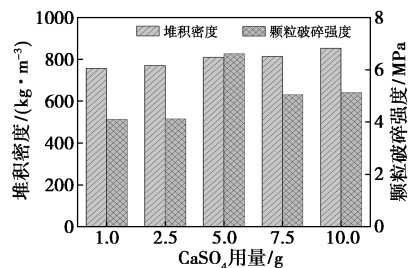


图3 CaSO<sub>4</sub>用量对陶粒性能的影响

在陶粒的制备过程中,水泥水化以及生石灰水解均会生成Ca(OH)<sub>2</sub>,生成的Ca(OH)<sub>2</sub>与煤气化炉渣中的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>发生火山灰反应,生成具有胶凝性的水化铝酸钙。CaSO<sub>4</sub>可和水化铝酸钙继续反应,生成钙矾石,从而进一步提高陶粒的颗粒破碎强度和堆积密度<sup>[31]</sup>。从图3可以看出,当CaSO<sub>4</sub>的添加量为5 g时,陶粒的颗粒破碎强度为6.61 MPa,远高于其他CaSO<sub>4</sub>添加量制备的陶粒。

综上所述,在煤气化炉渣、水泥、生石灰、CaSO<sub>4</sub>质量比为70:30:2.5:5的条件下,制备的陶粒颗粒破碎强度最高。在此条件下制备的陶粒表面和破裂面的SEM图如图4所示。从SEM图可以看出,陶粒的表面和破裂面均很粗糙,孔洞结构丰富,以介孔和大孔居多。这表明陶粒具有较强的吸附能力,有利于微生物的附着、生长与繁殖<sup>[32]</sup>。BET分析测试结果表明,煤气化炉渣制备的陶粒比表面积为51.7 m<sup>2</sup>/g,市售陶粒比表面积为27.2 m<sup>2</sup>/g,煤气化炉渣

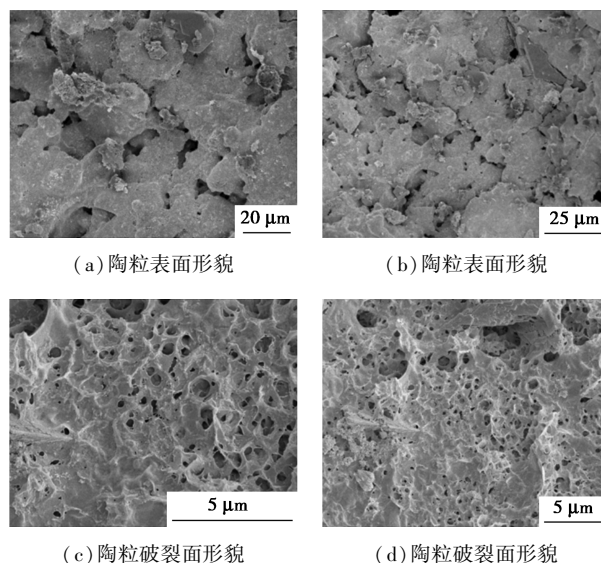


图4 陶粒表面形貌和陶粒破裂面的形貌

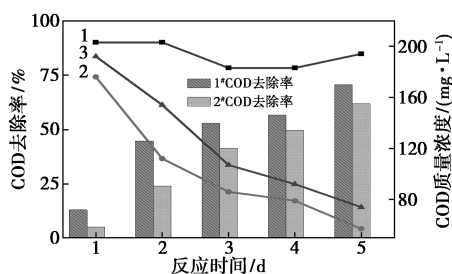
制备的陶粒比表面积明显高于普通市售陶粒,较大的比表面积同样有利于反硝化菌的生长。

## 2.2 煤气化炉渣免烧陶粒的反硝化性能测试

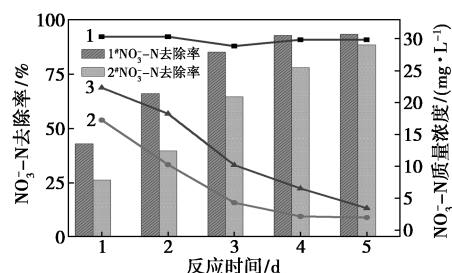
### 2.2.1 挂膜启动阶段污染物去除效果

挂膜启动阶段废水中污染物去除效果如图 5 所示。图 5(a)是 COD 的变化情况。可以看出,在 1<sup>#</sup>滤池中,COD 去除率逐渐上升,这表明微生物在煤气化炉渣制备的陶粒上逐渐繁殖生长。相比之下,2<sup>#</sup>滤池中 COD 的去除率略低于 1<sup>#</sup>滤池。

挂膜启动阶段 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率如图 5(b)所示。在实验运行初期进水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度设置为 30 mg/L, HRT 设置为 16 h。随着挂膜时间的增加,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>滤池中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度均呈下降趋势,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率逐渐升高。在挂膜阶段,1<sup>#</sup>滤池中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率明显高于 2<sup>#</sup>滤池。滤池中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率连续 3 d 超过 60%即可视为挂膜成功<sup>[33]</sup>。从图 5(b)可见,1<sup>#</sup>滤池在反应开始第 4 天即挂膜成功,而 2<sup>#</sup>滤池在第 5 天才挂膜成功,这表明反硝化菌在煤气化炉渣制备的陶粒上生长速度更快。



1—进水 COD 浓度;2—1<sup>#</sup>滤池出水 COD 浓度;  
3—2<sup>#</sup>滤池出水 COD 浓度  
(a) 进出水 COD 浓度及去除率



1—进水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度;2—1<sup>#</sup>滤池出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度;  
3—2<sup>#</sup>滤池出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度  
(b) 进出水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度及去除率

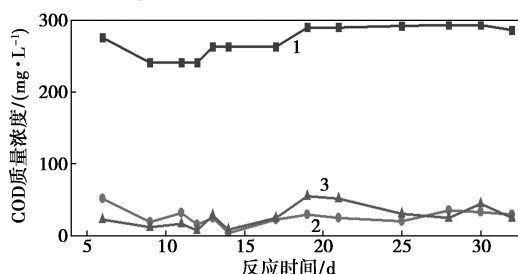
图 5 挂膜阶段进出水 COD 浓度、去除率及进出水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度、去除率

### 2.2.2 运行阶段污染物去除效果

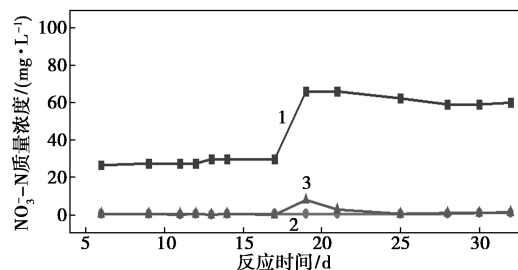
运行阶段进水 COD 仍维持在 300 mg/L 左右,由图 6(a)可见,在整个运行阶段,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>滤池出水

COD 均在 60 mg/L 以下,COD 去除率在 80% 以上。

1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>滤池出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化如图 6(b)所示。在反硝化实验正式运行后,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>滤池出水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 稳定保持在 2 mg/L 以下。在反应的 19 天,将进水硝氮浓度由 30 mg/L 提升至 60 mg/L,1<sup>#</sup>滤池出水 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率分别为 90.2% 和 99.1%,2<sup>#</sup>滤池出水 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率分别为 81.4% 和 88.2%,这表明煤气化炉渣制备的陶粒能更好地应对高浓度进水,具有更高的处理负荷,这是由于煤气化炉渣制备的陶粒具有更大的比表面积,更有利于反硝化菌的生长。在反应第 23 天,将 2 个滤池的水力停留时间由 16 h 降低至 8 h,2 个滤池出水中 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度均没有明显变化。



(a) 进出水 COD 浓度



(b) 进出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度

1—进水;2—1<sup>#</sup>滤池出水;3—2<sup>#</sup>滤池出水

图 6 运行阶段进出水中 COD 浓度和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度

煤气化炉渣制备的陶粒不仅在挂膜阶段的启动速率快于市售陶粒,而且在煤气化炉渣制备的陶粒上反硝化菌的生长更为稳定。实验进入长期运行后,以煤气化炉渣制备的陶粒作为滤料对废水的处理效果和市售陶粒基本相同,但以煤气化炉渣做反硝化生物滤池所用填料能更好地应对高浓度进水,具有更高的处理负荷。采用煤气化炉渣制备陶粒不仅能解决煤化工企业炉渣堆积的问题,同时制备的陶粒在反硝化滤池中可以充当微生物生长载体,使反硝化菌稳定生长,将废水中的 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 同步高效去除,实现煤气化炉渣的资源化利用。并且制备过程为免烧,大大降低了陶粒的生产成本,具有巨大应用价值。

### 3 结论

煤气化炉渣免烧陶粒的最佳原料质量配比为煤气化炉渣:水泥:生石灰:CaSO<sub>4</sub> = 70:30:2.5:5。在此条件下制备出的陶粒比表面积可达 51.7 m<sup>2</sup>/g,明显高于普通市售陶粒;此时陶粒堆积密度为 809 kg/m<sup>3</sup>,颗粒破碎强度为 6.61 MPa,符合水处理滤料的相关标准要求。使用该陶粒作为反硝化生物滤池的滤料,不仅可以实现废水中 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的同步高效脱除,而且相比于普通市售陶粒挂膜速度更快,并且能更好地应对来水变化的冲击。用煤气化炉渣制备陶粒实现了煤气化炉渣的资源化利用,且制备方式避免了高温烧结,成本大幅度降低,具有广泛的应用前景。

### 参考文献

- [1] 王辅臣. 煤气化技术在中国:回顾与展望[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 1-33.
- [2] 汪寿建. 现代煤气化技术发展趋势及应用综述[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 653-664.
- [3] 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, (3): 110-113.
- [4] Aprianti N, Faizal M, Said M, et al. Gasification kinetic and thermodynamic parameters of fine coal using thermogravimetric analysis [J]. Energy, 2023, 268: 126666-126670.
- [5] Xue X, Liu C, Han W, et al. Proposal and investigation of a high-efficiency coal-fired power generation system enabled by chemical recuperative supercritical water coal gasification [J]. Energy, 2023, 267: 126598-126602.
- [6] 范宁, 张逸群, 樊盼盼, 等. 煤气化渣特性分析及资源化利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(8): 145-154.
- [7] Qu J, Zhang J, Li H, et al. A high value utilization process for coal gasification slag: Preparation of high modulus sodium silicate by mechano-chemical synergistic activation [J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149761-149765.
- [8] 韩鹏. 煤化工煤气化炉渣资源化技术的应用[J]. 煤化工与甲醇, 2021, 47(12): 5-6.
- [9] 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.
- [10] 朱菊芬, 李健, 闫龙, 等. 煤气化渣资源化利用研究进展及应用展望[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(6): 11-21.
- [11] Yang P, Suo Y, Liu L, et al. Study on the curing mechanism of cemented backfill materials prepared from sodium sulfate modified coal gasification slag [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105318-105324.
- [12] 谢海巍, 潘福元, 刘尊青, 等. 煤气化渣与粉煤灰影响其水泥胶凝硬化产物的强度机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 26-34.
- [13] 黎洁, 谢贤, 李博琦, 等. 地质聚合物研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 141-148.
- [14] Liu D, Wang W, Tu Y, et al. Flotation specificity of coal gasification fine slag based on release analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132426-132430.
- [15] Yuan N, Zhao A, Hu Z, et al. Preparation and application of porous materials from coal gasification slag for wastewater treatment: A review [J]. Chemosphere, 2022, 287: 132227.
- [16] Liu X, Yang S, Liu S, et al. Performance and mechanism of phosphorus removal by slag ceramsite filler [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148(1): 858-866.
- [17] Zhao X, Zhao X, Chen C. Ecological floating bed for decontamination of eutrophic water bodies: Using alum sludge ceramsite [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 311: 114845.
- [18] 童思意, 刘长森, 刘玉林, 等. 我国固体废弃物制备陶粒的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(3): 140-150.
- [19] 张文艺, 翟建平, 郑俊. 曝气生物滤池污水处理工艺与设计[J]. 环境工程, 2006, 24(1): 9-13.
- [20] 王健, 金鸣林, 魏林, 等. 用粉煤灰制备新型水处理滤料[J]. 化工环保, 2003, 23(6): 352-355.
- [21] 吴权佳, 王铎, 叶涛, 等. 剩余污泥裂解灰陶粒吸附酸性矿山废水中 Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 性能及机理[J]. 有色金属, 2023, (8): 149-158.
- [22] 李天鹏, 王正庆, 丁华栋, 等. 固废基陶粒对含磷废水的处理研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(S2): 108-113.
- [23] Xing Y, Huang X, Yu J, et al. Removal of phosphorus from wastewater by metal salt doping waste-based ceramsite [J]. Desalination and Water Treatment, 2022, 272: 126-137.
- [24] 张焯, 余铁鹏, 汪炎, 等. 给水厂污泥免烧陶粒强化尾水除磷除氟性能研究[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(5): 62-67.
- [25] Anagnostopoulos I, Stinakis V. Utilization of lignite power generation residues for the production of lightweight aggregates [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(1): 329-336.
- [26] 王大川, 陈英杰, 杨桓, 等. 基于煤制气渣物化性质烧制陶粒试验研究[J]. 混凝土, 2022, (5): 112-116.
- [27] Li Y, Wu D, Zhang J, et al. Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts [J]. Powder Technology, 2000, 113: 176-184.
- [28] 李亚楠, 张皓, 王宇晖, 等. 无机-有机基质配置对反硝化生物滤池脱氮除磷效能的影响机制[J]. 东华大学学报, 2023, 49(2): 150-158.
- [29] 黄华, 杨志宏, 董俊. 基于不同滤料的反硝化深床滤池性能中试[J]. 煤炭工程, 2023, 55(8): 23-27.
- [30] Thomas J, Harilal B. Properties of cold bonded quarry dust coarse aggregates its use in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 67-75.
- [31] Geetha S, Ramamurthy K. Environmental friendly technology of cold-bonded bottom ash aggregate manufacture through chemical activation [J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18: 1563-1569.
- [32] 朱宏伟, 于涛, 郭志鹏, 等. 新型给水污泥-粉煤灰陶粒性能与除磷效果[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2741-2750.
- [33] 周娅, 买文宁, 梁家伟, 等. 硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1885-1891. ■