

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.11.014

粉煤灰与煤矸石协同焙烧陶粒填料及其 SBR 应用研究

陈涛^{1,2}, 邓锐^{1,2}, 王非³, 詹欣源^{1,2}, 李豪^{1,2}, 岳正波^{1,2}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 纳米矿物与污染控制安徽省高等学校重点实验室, 安徽 合肥 230009;

3. 中国石油化工股份有限公司 安庆分公司, 安徽 安庆 246002)

摘要:文章通过对粉煤灰、煤矸石固体废物的协同焙烧并对其制备工艺进行深度优化,最终得到性能较好的陶粒填料,采用 X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、比表面积检测法(Brunauer-Emmett-Teller, BET)等表征手段分析其性能。结果表明:陶粒材料制备的原料最佳配比(质量分数)为煤矸石 45%、粉煤灰 25%、膨润土 20%、氧化铁 5%、氧化钙 4%、氧化镁 1%;最佳工艺条件为 400 °C 下预热 20 min 并在 1 100 °C 焙烧 30 min,制备出的陶粒吸水率为 30.2%,表观密度为 1 546.4 kg/m³,比表面积为 70.1 m²/g,抗压强度为 328.9 N,酸损失率为 0.25%,碱损失率为 0,该陶粒符合 CJ/T 299—2008 标准;将所得陶粒投加至序批式活性污泥反应器(sequencing batch reactor, SBR)内,有利于提高微生物挂膜速率,进而提高反应器处理氨氮和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)的效果。该陶粒制备思路可实现煤矸石、粉煤灰固废的大掺量高值化利用,为解决煤矸石、粉煤灰固废堆积、环境污染等问题提供了理论基础和实验依据。

关键词:陶粒;粉煤灰;煤矸石;固废资源化;序批式活性污泥反应器(SBR)

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)11-1527-07

Preparation of ceramsite filler by synergic roasting of fly ash and coal gangue and its application in SBR reactor

CHEN Tao^{1,2}, DENG Rui^{1,2}, WANG Fei³, ZHAN Xinyuan^{1,2}, LI Hao^{1,2}, YUE Zhengbo^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Nanominerals and Pollution Control of Anhui Higher Education Institutes, Hefei 230009, China; 3. SINOPEC Anqing Petrochemical Company, Anqing 246002, China)

Abstract: In this paper, through the synergic roasting of fly ash and coal gangue solid waste and the deep optimization of its preparation process, the ceramsite filler with good performance was finally obtained. X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET) and other characterization methods were used to analyze its properties. The results show that the best mass fractions of ingredients are 45% coal gangue, 25% fly ash, 20% bentonite, 5% iron oxide, 4% calcium oxide and 1% magnesium oxide. The optimum conditions are preheating at 400 °C for 20 min and roasting at 1 100 °C for 30 min. The water absorption rate of the resulting ceramite is 30.2%, the apparent density is 1 546.4 kg/m³, the specific surface area is 70.1 m²/g, the compressive strength is 328.9 N, the acid loss rate is 0.25%, and the alkali loss rate is 0. The ceramite conforms to CJ/T 299—2008 standard. The addition of the ceramite into the sequencing batch reactor (SBR) is beneficial to increasing the microbial membrane adhesion rate, thus improving the effect of the reactor in the treatment of ammonia nitrogen and chemical oxygen demand (COD). This idea of ce-

收稿日期:2022-06-24;修回日期:2022-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52100139)

作者简介:陈涛(1997—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

岳正波(1980—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: zbyue@hfut.edu.cn.

ramsite preparation can realize the utilization of coal gangue and fly ash solid waste with large dosage and high value, and provide theoretical and experimental basis for solving the problems of coal gangue and fly ash solid waste accumulation and environmental pollution.

Key words: ceramicsite; fly ash; coal gangue; solid waste recycling; sequencing batch reactor(SBR)

0 引言

粉煤灰通常是指煤炭在炉内燃烧而产生的固体颗粒,其粒径通常在 $100\ \mu\text{m}$ 以下,煤矸石是在煤炭开采和加工过程中产生的一种固废,主要特点是含碳量低、硬度高^[1]。截至 2021 年,我国煤矸石储量已达 $(60\sim 70)\times 10^8\ \text{t}$,近 3 年来,在煤矸石综合利用水平不断提升和国家严格控制煤炭产能的情况下,新增煤矸石产生量仍达 $6.5\times 10^8\ \text{t}$ 左右^[2]。截至 2019 年底,我国粉煤灰累积堆存量约 $20\times 10^8\ \text{t}$,年产生量高达 $6\times 10^8\ \text{t}$,且每年全国仍以近 $2\times 10^8\ \text{t}$ 的存量递增^[3]。大量粉煤灰和煤矸石的堆存会给生态环境带来巨大的负担,例如露天堆放的粉煤灰不仅会占据大量土地,而且会扩散进入大气,被人体吸入后危害机体健康。煤矸石长期堆放会导致煤与硫铁矿氧化时放出的热量,积聚的温度又会进一步加速氧化反应导致产生更多的热量,若热量不能及时释放到环境中则会引起自燃现象,并产生 H_2S 、 SO_2 、 NO_x 等有害气体^[4]。

由此可见,粉煤灰、煤矸石带来的环境问题已经日益严重,我国已经提出对粉煤灰的回收综合利用率达到 60% 的要求^[5],因此实现粉煤灰、煤矸石的资源化,开发其潜在的利用价值显得极其重要。

陶粒作为陶瓷制品的一种,通常呈圆形或椭圆形球体,有着质轻、化学和热稳定性好等优点。工信部于 2018 年 5 月 15 日发布《工业固体废物资源综合利用评价管理暂行办法》和《国家工业固体废物资源综合利用产品目录》,其中包括陶粒制品^[6],此外,根据相关的研究进展可见固体废弃物制备陶粒的技术有一定的研究基础,可行性较高,是发展固体废弃物资源化利用的重要途径。

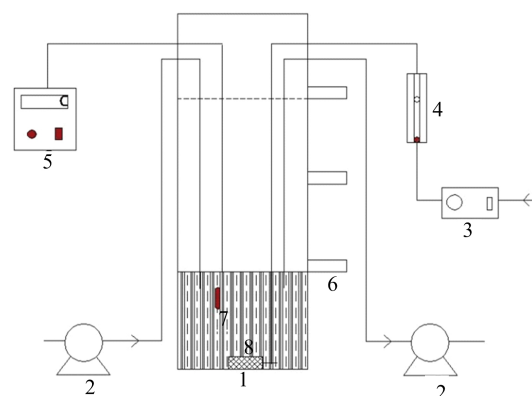
本文以粉煤灰、煤矸石为主要原料制备陶粒,对陶粒的吸水率、表观密度、颗粒强度等基本指标进行测试,最终确定制备该陶粒的最佳工艺条件。陶粒应用于水处理行业中要求其具备优良的性能,例如吸水率越高的陶粒,表观密度会越小,这在利于减少承重的同时提高了对污染物的吸附性

能;此外陶粒结构的稳定性强弱还与其强度有关^[7]。因此本文以降低制备能耗为前提,通过单因素试验考察焙烧温度、焙烧时间、预热时间对陶粒性能的影响,得出制备陶粒的最佳工艺条件,并从晶体结构、表面形态、孔隙等微观层面对最佳性能的陶粒进行了分析表征。

1 材料与方法

1.1 实验材料及装置

实验所用粉煤灰、煤矸石、膨润土均取自河南某矿场, Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 均为分析纯。实验所用序批式活性污泥反应器(sequencing batch reactor, SBR)装置如图 1 所示。



1. SBR 反应器 2. 蠕动泵 3. 曝气泵 4. 转子流量计
5. 温度控制器 6. 取样口 7. 温度传感器 8. 曝气头

图 1 SBR 反应器装置

1.2 陶粒的制备

粉煤灰、煤矸石化学成分与黏土矿物相似,其主要成分都是 SiO_2 和 Al_2O_3 ,且含有少量的 Fe、Na、K 等元素,满足制备陶粒的基本要求。原材料经粉碎机破碎后,以 200 目筛网筛分得到细粉末,使用 CaO 、 MgO 为助熔剂, Fe_2O_3 为造孔剂,采用人工造粒的方式制作生料球。

1.3 实验方法

陶粒制备的原料配比多种多样,结合陶粒以及污染物研究现状,采用以下 3 种原料配比制备陶粒,原料配比(质量分数)见表 1 所列。确定了最佳的原料配比后,分别设置不同梯度的预热时间(15、20、25、30 min)、焙烧时间(5、20、25、

30 min)、焙烧温度(900、1 000、1 100 ℃)探究上述条件对陶粒性能的影响。

表 1 陶粒制备的原料配比 %

序号	煤矸石	粉煤灰	氧化钙	氧化镁	氧化铁	膨润土
1	25	45	4	1	5	20
2	35	35	4	1	5	20
3	45	25	4	1	5	20

1.4 表征手段

陶粒的堆积密度、表观密度、吸水率、酸碱损失率等指标的测试均参照国标《轻集料及其试验方法》(GB/T 17431.2—2010)进行。

采用美斯特工业系统有限公司 CMT 微机控制电子万能试验机对颗粒强度进行测定。采用日本理学公司 D/max-yB 型 X 射线衍射仪(X-ray

diffractometer, XRD)对陶粒的主要晶体结构进行物相分析。采用美国康塔公司 NOVA3000e 比表面积和孔径分析仪对陶粒的粒径大小、粒径数量等指标进行测试。采用日本 JSM-6490LV 场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对陶粒的表面形态和孔隙结构进行分析。

2 结果与讨论

2.1 不同因素对陶粒性能的影响

本文通过 3 种不同的配比在 900 ℃下烧制陶粒,所得 M1、M2、M3 陶粒的性能参数见表 2 所列。

原料配比、焙烧温度、预热时间、焙烧时间因素对陶粒性能的影响如图 2 所示。

表 2 陶粒性能对比

陶粒	烧结温度/ ℃	堆积密度/ (kg/m ³)	表观密度/ (kg/m ³)	吸水率/ %	酸损失率/ %	碱损失率/ %	颗粒强度/ N
M1	900	624.0	1 719.0	22.9	2.96	0.56	44.3
M2	900	671.2	1 677.1	24.3	2.48	0	31.3
M3	900	670.8	1 625.9	25.5	2.60	0.30	72.7
M4	1 000	657.4	1 573.6	28.3	1.72	0	163.7
M5	1 100	645.6	1 546.4	30.2	0.25	0	328.9

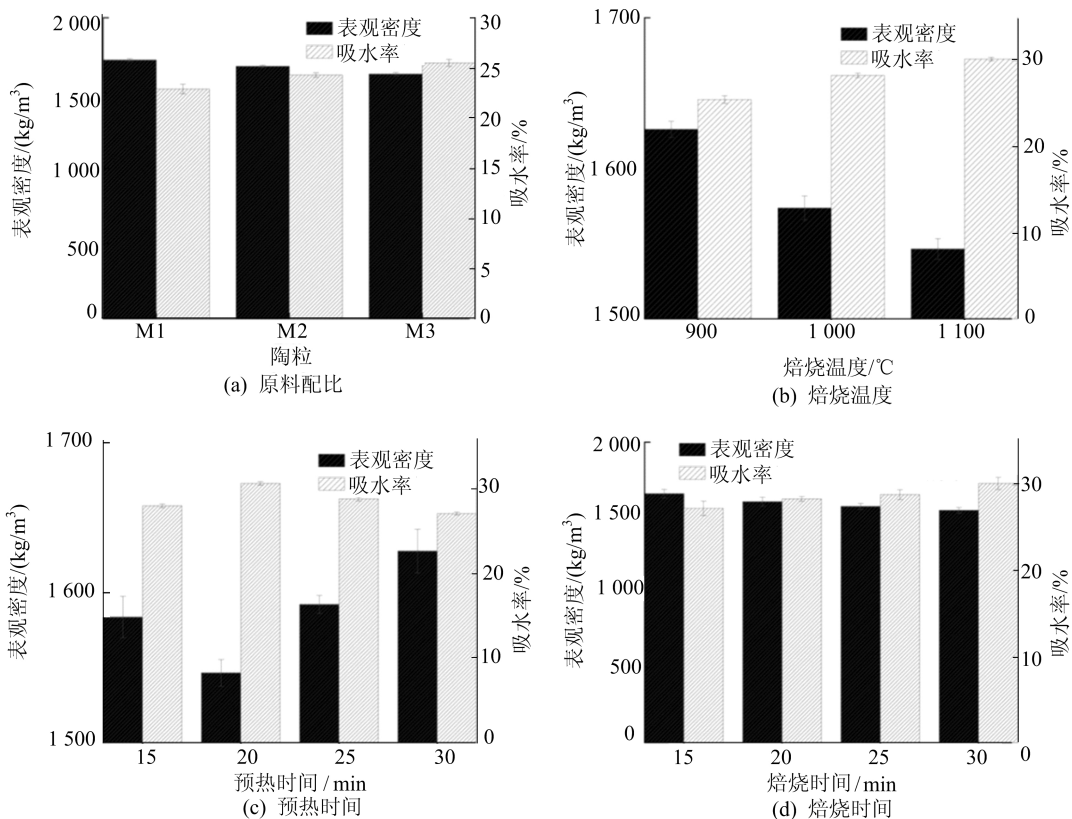


图 2 不同因素对陶粒性能的影响

从图 2a 可以看出, M3 陶粒吸水率最高, 可达 25.5%, 其颗粒强度相对于 M1 和 M2 提升了 80% 以上, 达到了 72.7 N, 因此, 本文将采用 M3 的原料配比进行后续研究。

以 M3 的原料配比为基础, 进一步优化工艺条件, 将焙烧温度由 900 °C 提升至 1 000 °C、1 100 °C, 最终得到 2 种性能更好的 M4 和 M5 陶粒, 从图 2b 可以看出, M4 和 M5 陶粒的吸水率和颗粒强度得到进一步提升, 其中 M4 的颗粒强度相对于 M3 增加了 2 倍多, 而 M5 的颗粒强度更是提升了 5 倍以上, 这表明温度对陶粒的颗粒强度和吸水率影响显著。当焙烧温度由 900 °C 升高至 1 100 °C 时, 吸水率随温度升高而升高, 表观密度随温度升高而降低, 当焙烧温度为 1 100 °C 时, 吸水率达到最大, 为 30.2%, 表观密度最低, 为 1 546.4 kg/m³, 且在 1 100 °C 下获得的陶粒颗粒强度为 329 N, 远高于前 2 组温度下获得的陶粒。本实验的目的是研制多孔且轻质的陶粒填料, 故选择的温度为 1 100 °C。

在烧制陶粒的过程中, 影响陶粒烧制温度的主要因素是原料的化学成分, 主要包括造孔剂、成型成分、助熔剂。造孔剂是指能在高温下发生一系列化学反应生成 CO、CO₂ 等气体, 成型成分包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃, 是构成陶粒主要骨架物质。助熔剂一般指能降低其物质的软化、熔化或液化温度的物质, 是高温下从熔融盐熔剂中生长晶体的一种方法, 常见助熔剂有 CaO、Na₂O、MgO 等^[8]。由于陶粒原料中的主要成分为 SiO₂ 及 Al₂O₃, 这将导致烧制陶粒所需温度较高, 因此添加助熔剂大幅降低烧制陶粒所需温度尤为重要。

从图 2c 可以看出, 增加预热时间, 陶粒的吸水率先增后减, 表观密度先减后增。根据相关研究, 如果预热时间太短, 可能导致陶粒球内的化学组分反应不充分; 如果预热时间过长, 又可能使气体逸出的过早, 使气体在烧制过程中应起到的造孔、扩孔作用减弱, 影响陶粒内部的孔隙结构, 最终导致吸水率降低, 表观密度增大^[9], 本研究中预热时间对陶粒性能影响也印证了这一点。考虑到预热时间对陶粒的颗粒强度影响可以忽略不计, 在预热时间为 20 min 时, 吸水率达到峰值, 表观密度最小, 此时的陶粒性能最佳, 因此确定最佳预热时间为 20 min。

从图 2d 可以看出, 吸水率随焙烧时间的延长逐渐增大, 表观密度随焙烧时间的延长逐渐减小,

30 min 组陶粒获得了最大的吸水率, 为 30.2%。虽然不同焙烧时间下颗粒强度略有变化, 20 min 组最高值为 343.5 N, 但在 4 个焙烧时间下, 陶粒的颗粒强度都为 300 N 以上, 可以满足大部分水处理反应的填料需求, 因此确定最佳的焙烧时间为 30 min。

2.2 晶体结构、比表面积及表面形态分析

研究表明, 使用粉煤灰、煤矸石制得的陶粒主要结构为氧化物和硅酸盐, 可用明确的分子式表示, 主要晶体组成都是 SiO₂。这些陶粒有一个共同特点, 即存在少量的重金属化合物(如氧化锰、氧化铅、镍铬氧化物等)。此外在陶粒中还检测到了对陶粒中重金属稳定化起积极作用的硅铝盐类物质^[10]。因此结合已有研究和 XRD 对比结果如图 3 所示, 本陶粒中确定的主要晶体有石英(SiO₂)、刚玉(Al₂O₃)、赤铁矿(Fe₂O₃)、磁铁矿(Fe₃O₄)、钙长石(CaAl₂Si₂O₈)等, 还含有少量的重金属氧化物。

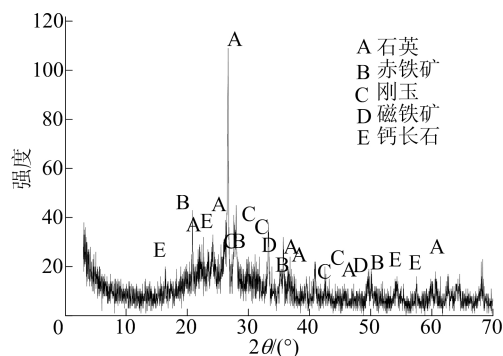


图 3 XRD 图谱

2.3 比表面积测试

比表面积检测法(Brunauer-Emmett-Teller, BET)结果见表 3 所列。

表 3 BET 测试结果

陶粒	比表面积/(m ² /g)	总孔容/(g/cm ³)	平均孔径/nm
M4	9.522	0.400 32	16.885 261
M5	70.144	0.886 58	5.077 153

在原料配比及焙烧参数不变的情况下, 1 100 °C 下得到的 M5 陶粒相对于 1 000 °C 条件下的 M4 陶粒有着更大的比表面积, 更大的总孔容, 但是其单个孔径相对较小, 在后面的 SEM 照片下陶粒的 BET 测试结果也得到了印证。将陶粒 M5 和文献中现有的陶粒分别进行对比结果见表 4 所列。

图 4 中:CAC 为市售主要陶粒;CFC 为粉煤灰陶粒;CG 为煤矸石陶粒;SC 为污泥陶粒。对

比发现 M5 相对于大部分陶粒具有比表面积大、堆积密度小等优点。

表 4 不同陶粒性能对比

参数	M5	CAC	CFC	CG	SC
直径/mm	20~30	4~6	4~6	3~5	3.5~7.0
比表面积/(m ² /g)	70.1	≥2	1.6	4.11	93.7
堆积密度/(kg/m ³)	675.6	≤1 000		1 560	668
表观密度/(kg/m ³)	1 546.4	1 600	1 700	950	1 251
颗粒强度/N	328.9	≥87			
空隙率/%	61.3	≥42			
来源	本文	文献[11]	文献[12]	文献[13]	文献[14]

2.4 表面形态和孔隙结构分析

性能较好的 M4 和 M5 陶粒的场发射 SEM 图片如图 4 所示。从图 4a、图 4b 可以看出,陶粒

的表面都一定的蜂窝状结构,都有着较多的孔状结构,但是 M5 陶粒表面出现了一些沟槽,而且出现了凹坑和较大的孔状结构。

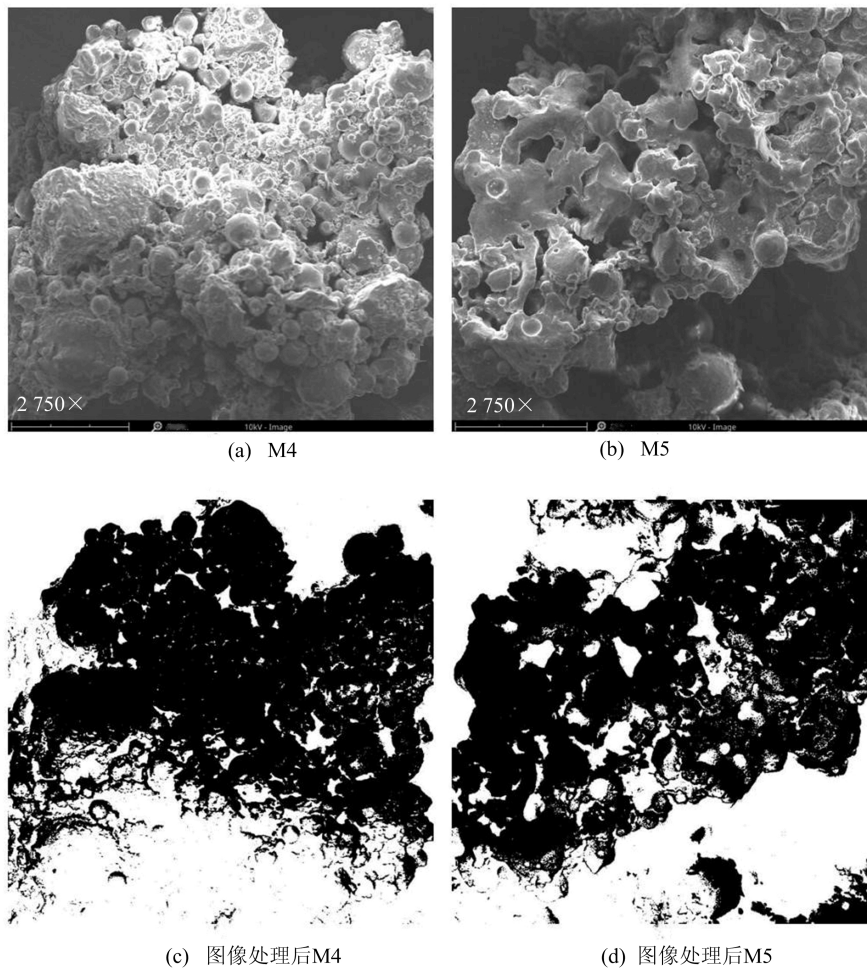


图 4 M4 和 M5 在相同放大倍数下的 SEM 图片

进一步将图 4a、图 4b 的孔隙结果利用 ImageJ 处理得到图 4c、图 4d,从图 4c 可以看出,陶

粒有很多微孔,且孔径分布相对均匀;而图 4d 陶粒的孔隙不均,且孔径更大,并且气孔连通较为严

重,这可能是因为焙烧过程中添加的造孔剂 Fe_2O_3 与粉煤灰、煤矸石中的碳在更高温的条件下更容易发生化学反应产生气体,气体的不断逸出在陶粒表面留下了大小的孔隙结构^[15],使得陶粒的表面变得更加粗糙,内部孔隙也更加发达,这样不仅降低了陶粒的密度,而且还增加了陶粒的比表面积。结合 BET 的数据,SEM 的分析结果印证了 M4 的孔径较大,总孔容却较小。

2.5 陶粒对 SBR 反应器的强化作用

投加陶粒后,SBR 反应器处理效果如图 5 所示。SBR 反应器在投加陶粒后化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)去除率基本保

持相对稳定,从第 1 天的 82% 提升至最高 87%, NH_4^+ 去除率也从 83% 提升至最高 86%,但是反应器在第 9 天去除率突然开始降低,在第 12 天时仅为 39%,这是由于反应器微生物的繁殖,陶粒表面生物膜变得越来越厚,阻塞反应器底部填料层,造成反应器中溶解氧分布不均。 NH_4^+ 去除效果同样也在第 9 天开始降低,在第 12 天时仅为 28%,后将陶粒取出清洗放回反应器后,污染物去除效果逐渐恢复。

从图 5 可以看出,如果反应器带有反冲洗功能,那么投加陶粒对于 SBR 反应器处理 COD、 NH_4^+ 的处理效果得到显著提升。

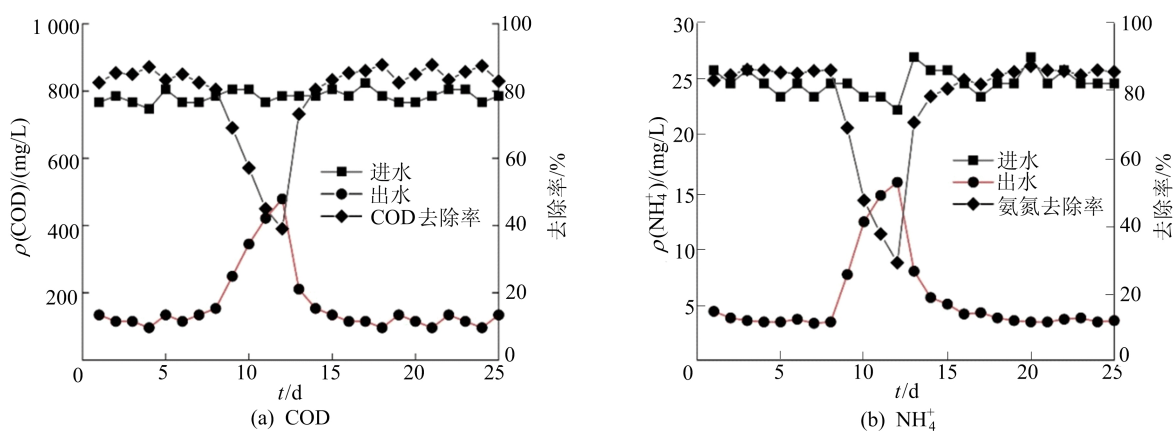


图 5 投加陶粒前、后 SBR 反应器处理效果

填料在污水处理工艺中占据着重要的作用,在生物膜反应器中的作用主要有:① 为微生物提供生长环境,并能持续保持较多的微生物量;② 反应器内的水流紊动扩散,对污废水起到重分布作用;③ 可以截留污水中悬浮物;④ 吸附污水中的 NH_4^+-N 、TP 等污染物^[16]。

本研究制得的陶粒具有微生物亲和力强、抗酸碱腐蚀能力强、机械强度大和成本低廉^[17]等水处理填料所需优点,且主要原料为粉煤灰、煤矸石,属于固废范畴,来源广泛,陶粒填料经实验分析表明,满足挂膜速度快,易于微生物生长,为污水处理技术提供了载体,具有强化 SBR 反应器的处理效果。

3 结 论

1) 利用粉煤灰、煤矸石为主要原料,添加适量膨润土,使用 CaO 、 MgO 为助熔剂, Fe_2O_3 为造孔剂可制备出性能良好的陶粒,最佳原料配比为煤矸石 45%、粉煤灰 25%、膨润土 20%、氧化铁 5%、氧化钙 4%、氧化镁 1%,最佳工艺条件为:干

燥温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$,干燥时间 30 min,预热温度 $400\text{ }^\circ\text{C}$,预热时间 20 min,焙烧温度 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$,焙烧时间 30 min。最佳工艺条件下烧制的陶粒吸水率 30.2%,表观密度 $1\ 546.4\ \text{kg}/\text{m}^3$,比表面积 $70.1\ \text{m}^2/\text{g}$,抗压强度 $328.9\ \text{N}$,酸损失率 0.25%,碱损失率 0。

2) 通过对陶粒的 XRD 分析可知,陶粒结构较复杂,主要晶体有石英(SiO_2)、刚玉(Al_2O_3)、赤铁矿(Fe_2O_3)、磁铁矿(Fe_3O_4)、钙长石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)等。陶粒的晶体结构都以氧化物结构和硅酸盐结构为主,且还含有少量的重金属化合物,此外陶粒中出现了利于重金属稳定化的硅铝盐类物质。

3) 利用场发射 SEM 观察发现陶粒表面粗糙,出现了蜂窝状结构,陶粒表面有许多孔和通道,且孔径较大,同时微孔和小孔也很多,并且气孔连通较为严重。由于粉煤灰、煤矸石中充足的成气物质使陶粒在烧结过程中内部产生了足够的气体,较多的气体从表面逸出,使得陶粒表面粗糙,内部孔隙发达,这样不仅使陶粒质轻,而且增

(下转第 1539 页)

- [18] BURGAIN J, GAIANI C, LINDER M, et al. Encapsulation of probiotic living cells; from laboratory scale to industrial applications[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(4):467-483.
- [19] MOKHTARI S, JAFARI S M, KHOMEIRI M, et al. The cell wall compound of *Saccharomyces cerevisiae* as a novel wall material for encapsulation of probiotics[J]. *Food Research International*, 2017, 96:19-26.
- [20] PICOT A, LACROIX C. Encapsulation of bifidobacterial in whey protein-based microcapsules and survival in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt[J]. *International Dairy Journal*, 2004, 14(6):505-515.
- [21] ESTEVINHO B N, ROCHA F, SANTOS L, et al. Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 31(2):138-155.
- [22] 邓紫琦, 丁一, 侯欣尧, 等. 基于孢粉素微胶囊的共包埋、保护及递送益生菌和乳糖酶的体系[J]. *食品科学*, 2022, 43(14):183-192.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 1532 页)

加了陶粒的吸附面积,理论上有利于陶粒吸附污水中的有害物质。

4) 投加陶粒后, SBR 反应器的 COD 去除率从 82% 提高至 87%, 氨氮去除率从 83% 提升至 86%, 若增加反冲洗装置, 反应器的去除率则有望达到 90% 以上。

[参 考 文 献]

- [1] DASH S, KAR B, PANDA L, et al. Use of sintered fly ash aggregate in pervious concrete[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2021, 62(1/2/3):199-219.
- [2] 湛玲丽, 韩利雄, 李璟玮, 等. 高掺量煤矸石固废微晶玻璃结构与性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(4):1124-1132.
- [3] 李琴, 杨岳斌, 刘君, 等. 我国粉煤灰利用现状及展望[J]. *能源研究与管理*, 2022(1):29-34.
- [4] ZHANG X Q, PAN Y Y. Preparation, properties and application of gel materials for coal gangue control[J]. *Energies*, 2022, 15(2):557.
- [5] 杨艳茹, 麻永林, 王军. 粉煤灰-煤矸石质多孔陶粒的制备研究[J]. *矿冶工程*, 2018, 38(5):96-99.
- [6] 李强, 张敬申, 梁瑞恒, 等. 人工湿地新型陶粒基质的制备及除磷性能研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(12):13-22.
- [7] WANG Z, CHEN H J, PEI L Z, et al. Preparation and characterisation of environmental-friendly ceramsites from iron ore tailings and sludge[J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2021, 14(4):884-892.
- [8] 石稳民, 黄文海, 罗金学, 等. 污泥资源化制备轻质陶粒研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(2):5-10.
- [9] 杨稔, 马丽萍, 闫贝, 等. 煤泥制备陶粒滤料的研究[J]. *现代化工*, 2011, 31(7):59-61.
- [10] YANG Y H, WEI Z A, CHEN Y L, et al. Utilizing phosphate mine tailings to produce ceramsite[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155:1081-1090.
- [11] BAO T, CHEN T, WILLE M L, et al. Performance and characterization of a non-sintered zeolite porous filter for the simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in a biological aerated filter (BAF)[J]. *RSC Advances*, 2016, 6:50217-50227.
- [12] HU H B, HAN H J, WANG W, et al. Effect of coal gangue-fly ash ceramic (CFC) media on municipal wastewater treatment in a pre-denitrification biological aerated filter[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2011, 31(1/2/3):372-378.
- [13] ZOU J L, XU G R, PAN K, et al. Nitrogen removal and biofilm structure affected by COD/NH₄⁺-N in a biofilter with porous sludge-ceramsite[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 94:9-15.
- [14] FENG Y, YU Y Z, QIU L P, et al. Impact of sorption functional media (SFM) from zeolite tailings on the removal of ammonia nitrogen in a biological aerated filter[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 21:704-710.
- [15] FENG X, JIN X, XIN F, et al. Resource utilization of laterite nickel ore smelting slag; research on ceramsite preparation process[J]. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 2020, 127:236-237.
- [16] 喻学敏, 周军, 陈浩. 以橡胶颗粒与陶粒为生物滤池填料的运行效果研究[J]. *工业水处理*, 2021, 41(9):69-73.
- [17] LIU J D, TIAN C, JIA X L, et al. The brewery wastewater treatment and membrane fouling mitigation strategies in anaerobic baffled anaerobic/aerobic membrane bioreactor[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 127:53-59.

(责任编辑 吴亮)