

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.19.013

# 碳化强度对市政污泥脱水性能及理化性质的影响

郭彦峰<sup>1,2</sup>, 张弛<sup>1</sup>, 孔鑫<sup>1</sup>, 袁进<sup>1</sup>, 杨志宏<sup>3</sup>, 吴博<sup>3</sup>,  
张凌云<sup>4</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 北京分公司, 北京 100044; 3. 山西省正阳污水净化有限公司, 山西 晋中 030600; 4. 山西新科联环境技术有限公司, 山西 太原 030024)

**摘要:** 将Ruyter开发的煤化模型应用于水热碳化预处理市政污泥,探究了碳化强度 $f$ 对裂解液、水热碳理化性质及污泥脱水性能的影响。结果表明,经碳化强度 $f=0.12$ 的预处理,污泥抽滤脱水后含水率可降至53%,相比未经预处理的对照组降低了28%;此外,提高碳化强度可促进 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、SCOD、TOC在裂解液中的释放,当碳化强度 $f=0.12$ 时,SCOD、TOC含量分别高达18 210、8 685 mg/L,而 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量在 $f \leq 0.21$ 条件下随着碳化强度的增加而升高。另外发现,EPS中蛋白质和多糖含量与污泥脱水性能有很强的相关性;随着碳化强度的增大,水热碳表面的芳构化结构显著增多,亲水性含氧官能团减少,从而改善污泥脱水性能。将该工艺应用于污水厂,结果显示碳化后的污泥经板框压滤脱水,含水率可降至29%左右,脱水效果显著。

**关键词:** 市政污泥; 水热碳化; 碳化强度; 脱水性能; 官能团

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)19-0081-06

## Effect of Carbonization Intensity on Dewatering Performance and Physicochemical Properties of Municipal Sludge

GUO Yan-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>, KONG Xin<sup>1</sup>, YUAN Jin<sup>1</sup>, YANG Zhi-hong<sup>3</sup>,  
WU Bo<sup>3</sup>, ZHANG Ling-yun<sup>4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 2. Beijing Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100044, China; 3. Shanxi Zhengyang Sewage Purification Limited Company, Jinzhong 030600, China; 4. Shanxi Xinkelian Environmental Technology Limited Company, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The coalification model proposed by Ruyter was employed in the pretreatment of municipal sludge through hydrothermal carbonization, and the influences of carbonization intensity  $f$  on the physicochemical properties of the pyrolysis solution, hydrothermal carbon, and the dewatering performance of sludge were examined. After pretreatment with a carbonization intensity of 0.12, the water content of the sludge could be reduced to 53%, which was 28% lower than that of the control group

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目(201703D111019); 国家自然科学基金资助项目(51908396); 国家重点研发计划项目(2019YFC0408602); 山西省重点研发计划(社会发展方面)重点项目(201903D311004)

通信作者: 袁进 E-mail: yuanjin@tyut.edu.cn

without pretreatment. In addition, enhancing the carbonization intensity could facilitate the release of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , SCOD, and TOC in the pyrolysis solution. When the carbonization intensity was 0.12, the SCOD and TOC could respectively reach 18 210 mg/L and 8 685 mg/L, while the  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  increased with the increase of carbonization intensity under the condition of  $f$  equal or less than 0.21. Additionally, it was discovered that the contents of protein and polysaccharide in EPS exhibited a significant correlation with the dewatering performance of sludge. As the carbonization intensity rose, the aromatization structure on the surface of hydrothermal carbon increased significantly, while the hydrophilic oxygen-containing functional groups decreased, thereby enhancing the sludge dewatering performance. The process was implemented in a sewage treatment plant. The results indicated that the water content of carbonized sludge could be reduced to approximately 29% through plate and frame filter press, and the dewatering performance was remarkable.

**Key words:** municipal sludge; hydrothermal carbonization; carbonization intensity; dewatering performance; functional group

市政污泥中含有大量的重金属、致病菌及难降解有机物,如果直接排放会对生态环境造成二次污染<sup>[1]</sup>。随着污泥处置问题日益严峻,提高污泥脱水性能,降低外运污泥含水率变得尤为重要。常见的污泥预处理方法有超声波处理法、生物法、酸碱处理法等,但均存在一定的局限性<sup>[2]</sup>。水热碳化是近年来发展起来的污泥处理处置新技术,用以提高污泥生化性能和脱水效率,目前关于水热碳化技术提高污泥脱水性能的研究多采用控制变量单因素法,探究在不同碳化温度和碳化时间下对污泥脱水性能的影响,但对于碳化温度与碳化时间的交互性影响及二者共同作用效果考虑较少。为此,笔者将基于Ruyter开发的煤化模型应用于对水热碳化预处理改善污泥脱水性能的评价中。该模型根据氧含量(干无灰基)的变化,在亚烟煤水平(6%)完全转化的假设下,将停留时间( $t$ )和温度( $T_k$ )相结合,确定转化因子 $f$ ,其中 $f$ 反映了碳化处理的强度<sup>[3]</sup>。笔者在实验室小试的基础上结合晋中市正阳污水处理厂碳化车间实际运行数据,重点探讨了不同碳化强度下污泥的脱水性能及碳化固、液相产物的理化性质,以期对污泥脱水性能的改善提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥来源与特性

污泥样品取自晋中市某污水处理厂脱水机房泥饼,该厂采用A<sup>2</sup>/O工艺(缺氧/厌氧/好氧),二沉池产生的污泥经过叠螺浓缩机浓缩后,加药、板框压滤脱水至含水率约80%的泥饼。在实验室中,将泥

饼与去离子水按照质量比为1:3混合,用电动搅拌机搅拌形成泥浆制成实验污泥,置于4℃冰箱中备用。实验污泥的含水率为93%,pH为7.12,毛细吸水时间(CST)为57 s,TOC、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、SCOD含量分别为274、17、602 mg/L,TS含量为56 g/L。

### 1.2 污泥低温水热处理

从冰箱中取出实验污泥,用电动搅拌机在800 r/min下搅拌10 min,使污泥达到完全均质,量取120 mL污泥放入PPL材质内衬,置于反应釜中,拧紧反应釜盖及螺丝,使其处于密闭状态,以200 r/min的转速搅拌污泥,当反应釜内污泥样品的温度达到设定的水热温度时,自动开始计时,并按照设定的水热停留时间进行碳化处理;反应完成后,立即取出反应釜于冷水槽中降至室温,然后量取30 mL碳化污泥于布氏漏斗中,在-0.1 MPa压强下过0.45 μm滤膜进行抽滤,分别得到固相产物水热碳和液相产物裂解液。

### 1.3 实验设计

根据前期的预实验结果,考虑到经济因素以及处理效率,设定反应温度为160~240℃、反应时间为10~120 min,开展两种因素对污泥水热预处理后脱水性能改善情况的影响。利用Ruyter开发的煤化模型<sup>[3]</sup>(该模型适用的反应条件范围较广:温度为120~390℃、时间为1 min~6个月)和整体动力学,根据氧含量(干无灰基)的变化,将停留时间( $t$ )和温度( $T_k$ )相结合,确定碳化强度( $f$ )。实验设计如表1所示。

表1 水解碳化参数

Tab.1 Hydrothermal carbonization parameters

碳化温度/℃	反应时间/min	碳化强度 $f$
160	112	0.09
180	79	0.12
200	47	0.15
220	26	0.18
240	14	0.21

#### 1.4 分析项目与方法

CST: CST测定仪;污泥含水率:重量法;SCOD:多参数水质分析仪;氨氮:纳氏试剂比色法;多糖:苯酚-硫酸法;蛋白质:改良型 Bradford 法蛋白质浓度测定试剂盒;TOC:总有机碳分析仪;表面官能团结构:傅里叶红外光谱仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳化强度 $f$ 对污泥脱水性能的影响

碳化强度 $f$ 对污泥脱水性能的影响见图1。

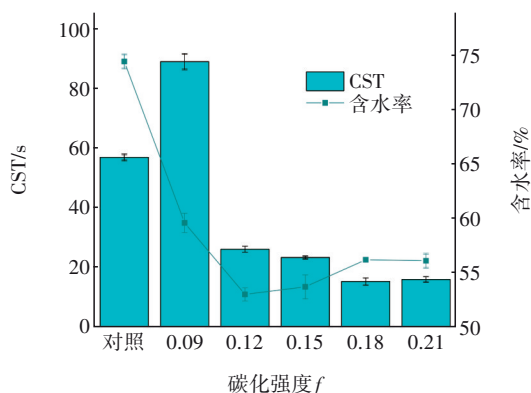


图1 碳化强度对污泥脱水性能的影响

Fig.1 Effect of hydrothermal carbonization intensity on sludge dewatering performance

随着碳化强度的增加,污泥抽滤后泥饼含水率先降低后趋于稳定,而CST则先升后降最后趋于稳定。当碳化强度 $f=0.09$ (160℃,112 min)时,污泥的CST不仅未降低,反而由对照组的56 s升至86 s,可能是由于在此碳化强度下,污泥细胞壁破裂,释放出一些胞外聚合物,亲水性较强,黏性较大,故CST增加<sup>[4]</sup>;此外,在此碳化强度下,出现大量的黄色油状泡沫,可能与水热碳化生成焦油类物质有关,这会对后续裂解液的深度处理造成不利影响<sup>[5]</sup>。当碳化强度 $f=0.12$ (180℃,79 min)时,抽滤至泥饼破裂的时间大大缩短,抽滤后泥饼含水率最低可达53%,与对照组相比降低了28%;CST降至26 s,与对照组相比降低了54%,这是由于在此碳化强度下,

部分大分子难溶性有机物转化为短链型聚合物,细胞间结合水被大量释放,污泥黏滞性降低,故污泥脱水性能得到极大改善。另外可以看出,温度对脱水性能的影响要大于反应时间。当碳化强度继续增加时,大量的小分子物质通过缩聚反应生成致密细小的碳微球,堵塞滤膜,会对抽滤后泥饼含水率测定有所影响<sup>[6]</sup>。故综合考虑,确认碳化强度 $f=0.12$ (180℃,79 min)为最佳反应条件。

### 2.2 碳化强度 $f$ 对裂解液中有有机物释放的影响

碳化强度 $f$ 对裂解液中有有机物释放的影响如图2所示。对照组中SCOD和TOC含量分别为602、274 mg/L,随着碳化强度的增加,碳化污泥裂解液中的SCOD和TOC含量先增大后趋于稳定,而 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量一直增加。当碳化强度 $f=0.12$ (180℃,79 min)时,SCOD和TOC含量分别为18 210、8 685 mg/L,继续提升碳化强度并不会对SCOD、TOC含量有较大影响,这可能是由于在 $f=0.12$ 时,污泥细胞壁完全破碎,污泥裂解液中的大分子聚合物转化为小分子物质溶于液相中,极大地促进了有机物的释放<sup>[7]</sup>;而 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量在碳化强度 $f \leq 0.21$ 的条件下随着碳化强度的增加而一直增大,这可能是由于 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 主要来源于污泥中的含氮有机物,碳化程度越高,反应越剧烈, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 就越能充分释放<sup>[4]</sup>。当碳化强度 $f \geq 0.12$ 时,裂解液呈黑褐色,并伴有烧焦糊味产生,可能是发生了美拉德反应,产生了含黑色素的高分子难降解物质<sup>[8]</sup>。

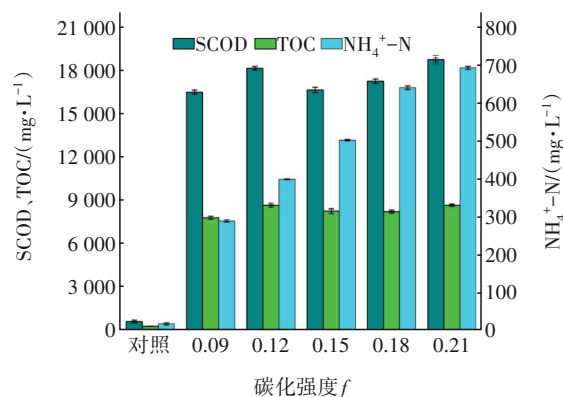


图2 碳化强度对裂解液中有有机物的影响

Fig.2 Effect of hydrothermal carbonization intensity on solubilized organic compounds in pyrolysis solution

### 2.3 碳化强度 $f$ 对裂解液中EPS释放的影响

EPS由蛋白质、多糖、核酸等大分子物质组成,其中蛋白质与多糖含有极性官能团而具有亲水性,

增强了污泥细胞的持水性,对污泥脱水性能有较大的影响<sup>[4]</sup>。碳化强度 $f$ 对裂解液中蛋白质和多糖释放的影响见图3。可以看出,分层后的EPS中溶解型EPS(S-EPS)含量远大于紧密型EPS(T-EPS)和松散型EPS(L-EPS)含量,说明水热碳化作用有效破坏了污泥细胞壁,使T-EPS和L-EPS大量转化为S-EPS而溶于液相中。

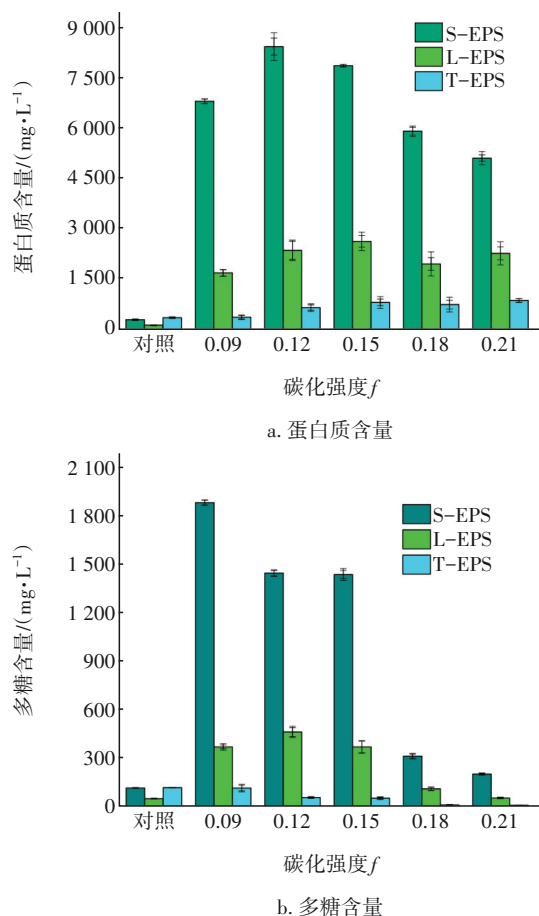


图3 碳化强度对蛋白质和多糖释放的影响

Fig.3 Effect of hydrothermal carbonization intensity on protein and polysaccharide release

当碳化强度 $f=0.09$ 时多糖含量达到最高,之后多糖含量随着碳化强度的增加而不断减少,此时裂解液颜色呈淡棕色,可能与多糖中部分羰基分解产生茶色化合物有关<sup>[9]</sup>;蛋白质含量随着碳化强度的增加先升后降,在 $f=0.12$ 时达到最高,说明蛋白质中肽键比多糖中糖苷键更加稳定,不易分解<sup>[10]</sup>。另外可以看出,水热污泥EPS中蛋白质的含量要远高于多糖的含量,说明蛋白质为EPS的主要成分,这与宋宪强等<sup>[4]</sup>和Wang等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。

当碳化强度 $f>0.12$ 时,蛋白质和多糖含量均逐

渐下降,高强度碳化条件下大分子蛋白质和多糖发生水解、缩聚、脱羧等反应,亲水性物质逐渐减少,污泥黏度降低<sup>[11]</sup>。当碳化强度 $f$ 增至0.18时,多糖和蛋白质含量逐渐趋于稳定,此时CST达到18 s,亲水性物质大量转化为疏水性物质,污泥细胞持水性减弱,脱水性能达到理论最佳状态<sup>[12]</sup>。同时,实验结果显示,CST与多糖含量变化趋势有一定的相关性,证明了EPS含量与污泥脱水性能有一定关系。

## 2.4 碳化强度对污泥中官能团的影响

碳化强度对水热碳中官能团的影响见图4。

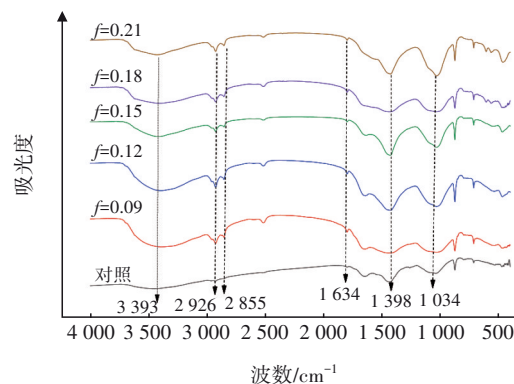


图4 碳化强度对水热碳中官能团的影响

Fig.4 Effect of hydrothermal carbonization intensity on functional groups in hydrothermal carbon

与原污泥相比,不同碳化强度下的水热碳中官能团种类有较大差异,表明在不同碳化强度下污泥理化性质已发生了变化。其中,3393  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰反映O—H的伸缩振动,随着碳化强度的增加,此峰信号逐渐减弱;2926、2855  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰分别反映C—H的拉伸、伸缩振动,此峰信号先增强后减弱,表明污泥经水热碳化后,C—H暴露出来,并且随着碳化强度的升高,降解程度加剧,含量降低<sup>[13]</sup>;1398  $\text{cm}^{-1}$ 处吸收峰反映芳香环碳结构( $-\text{C}=\text{C}-$ )的伸缩振动,随着碳化强度的增加,此峰信号明显增强,表明碳化后污泥中大分子聚合物破裂,生成大量芳构化结构,具有较强的芳香性<sup>[14]</sup>;在1634  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰反映酰胺结构( $\text{C}=\text{N}$ ),随着碳化强度的增加,此峰信号增强,这是由于在碳化条件下大分子蛋白质转化为小分子物质,大量肽键断裂,此时大量亲水性物质转化为疏水性物质,脱水性能大大改善<sup>[10,14]</sup>;在1034  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰反映多糖衍生物结构( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ),随着碳化强度的增加,此峰信号逐渐增强,这是由于在较高的碳化强度下,大分



子物质多糖水解时可能伴随产生多糖衍生物,此峰也可能与C—O—C在脂肪醚中不对称拉伸有关<sup>[14]</sup>。综上可知,不同碳化强度下水热碳中官能团的变化与污泥脱水性能有较强的相关性。

2.5 水热碳化提升污泥脱水性能的机制

污泥水热碳化过程机理见图5。在水热碳化作用下,污泥细胞壁破碎,有机物大量溶出,EPS大量释放,亲水性大分子聚合物水解为短链小分子疏水性物质<sup>[6]</sup>。溶于液相的小分子羧基化合物和氨基化合物会发生美拉德反应,生成难降解黑色素高分子化合物,使裂解液呈黑褐色、焦糊味<sup>[8]</sup>。其中,羧基和羟基在高碳化强度条件下裂解,继而发生缩聚、聚合反应,可生成容易聚合的不饱和化合物<sup>[15]</sup>;部分短链酮烃、烯烃等裂解脱氢脱水,发生芳构化反应,生成多环芳香族水热碳<sup>[12]</sup>。综上,水热碳化可改变污泥理化性质,使细胞内结合水转化为自由水,污泥持水性减弱,进而显著改善污泥脱水性能。

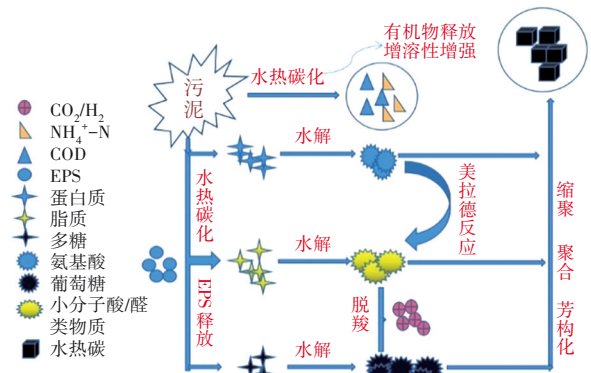


图5 水热碳化过程机理

Fig.5 Mechanism of hydrothermal carbonization process

2.6 污水厂中污泥脱水性能的提升效果

研究在山西省晋中市正阳污水处理厂进行,设计处理量为100 m<sup>3</sup>/d,碳化车间工艺流程如下:剩余污泥先经过叠螺机浓缩脱水,脱水后污泥含水率约为85%,再经过预加热器在150℃条件下预热,最后在反应罐中于210℃下反应6~7 min,根据Ruyter开发的煤化模型确定碳化强度 $f=0.12$ 。在碳化车间稳定运行期间,取5次样品进行测定,结果见表2。可知,在碳化强度 $f=0.12$ 条件下,抽滤含水率平均为52.61%,与实验室小试测得的抽滤含水率(53%)相近;碳化后污泥在4 MPa下压滤后含水率可降至29%左右,脱水效果显著;正阳污水厂污泥碳化后

裂解液中氨氮含量偏高,可能与碳化车间进料含固率偏高有关,导致污泥中含氮有机物浓度升高。另外,第2次取样的测试结果显示,其CST明显高于其余4组,但其脱水后含水率却较低,可能是由于污水厂水质和水量波动较大,进料含水率偏低,致使抽滤含水率较低,其中SCOD含量较高,说明污泥中亲水性有机物含量较高,使污泥持水性增强,导致CST偏高。而实际污水厂处理碳化后污泥时采用4 MPa板框压滤脱水,较大的机械外力使脱水后泥饼含水率相差不大,接近于平均值。

表2 晋中市正阳污水厂污泥水热碳化数据

Tab.2 Data of sludge hydrothermal carbonization process in Zhengyang Wastewater Treatment Plant of Jinzhong City

项目	进料含水率/%	抽滤含水率/%	CST/s	SCOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	压滤含水率/%
第1次	86.67	52.02	21.2	16 175	691	31.01
第2次	84.34	51.43	26.9	20 390	770	28.21
第3次	85.21	54.19	22.1	19 560	819	26.78
第4次	88.11	53.34	23.7	20 770	825	28.34
第5次	85.33	52.07	22.7	18 450	690	30.12
平均	85.93	52.61	23.3	19 065	759	28.89

3 结论

① 当碳化强度 $f=0.12$ (180℃,79 min)时,污泥脱水性能得到极大改善,抽滤后含水率可降至53%,CST降至26 s,继续提高碳化强度对污泥脱水性能改善不显著;在此碳化强度下,污泥细胞壁破碎完全,有机物大量释放,裂解液中SCOD、TOC含量达到较高值,但NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量在 $f\leq 0.21$ 条件下随着碳化强度的提升而不断升高。污泥中EPS具有亲水性,且EPS中蛋白质肽键比多糖糖苷键更加稳定,EPS含量与脱水性能有较大关系。当碳化强度 $f=0.18$ 时,大分子多糖、蛋白质水解为小分子物质而溶于液相,导致亲水性物质转化为疏水性物质,污泥持水能力进一步减弱,脱水性能进一步改善。

② 经水热碳化后污泥性质发生明显变化。水热碳中出现了酰胺结构(C=N)和多糖衍生物结构,表明在较高的碳化强度下蛋白质和多糖裂解为小分子物质,可能会伴随肽键和多糖衍生物的出现,这与污泥脱水性能有较大相关性;水热碳中发生了缩聚、芳构化反应,出现了烷基芳香结构和环碳芳香结构(—C=C—),芳香性增强。

③ 晋中市正阳污水厂污泥碳化工艺数据显示,在碳化强度 $f=0.12$ 条件下,碳化后污泥在4 MPa下压滤后含水率可降至29%左右,脱水效果显著;抽滤含水率平均为52.61%,与实验室小试测得的抽滤含水率(53%)相近;裂解液中氨氮含量偏高,这可能与碳化车间进料含固率偏高有关,导致污泥中含氮有机物浓度升高。

#### 参考文献:

- [1] KIM H J, CHON K, LEE Y G, *et al.* Enhanced mechanical deep dewatering of dewatered sludge by a thermal hydrolysis pre-treatment: effects of temperature and retention time [J]. *Environmental Research*, 2020, 188:109746.
- [2] 乔兴博, 俞海祥, 董光霞, 等. 污泥脱水预处理技术综述 [J]. *净水技术*, 2020, 39(4): 86-95.  
QIAO Xingbo, YU Haixiang, DONG Guangxia, *et al.* Review of sludge dewatering pretreatment technology [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(4): 86-95 (in Chinese).
- [3] RUYTER H P. Coalification model [J]. *Fuel*, 1982, 61(12): 1182-1187.
- [4] 宋宪强, 叶泽鹏, 周锡武. 低温水热处理改善城市污泥理化性质及脱水性能 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(17): 26-30.  
SONG Xianqiang, YE Zepeng, ZHOU Xiwu. Improving physical-chemical properties and dewaterability of municipal sludge by low temperature hydrothermal treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(17):26-30 (in Chinese).
- [5] XU X W, JIANG E C. Treatment of urban sludge by hydrothermal carbonization[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 182-187.
- [6] XU Z, ZHOU J, LIU Y, *et al.* Effect of hydrothermal carbonization on dewatering performance of dyeing sludge [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(67): 38574-38581.
- [7] 甘雁飞, 周宁娟, 张若晨, 等. 废水处理厂剩余污泥水热减量及改善脱水性能的研究 [J]. *环境工程*, 2017, 35(4): 91-96.  
GAN Yanfei, ZHOU Ningjuan, ZHANG Ruochen, *et al.* Study on excess sludge reduction from wastewater treatment by hydrothermal method [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(4): 91-96 (in Chinese).
- [8] DANSO-BOATENG E, SHAMA G, WHEATLEY A D, *et al.* Hydrothermal carbonisation of sewage sludge: effect of process conditions on product characteristics and methane production [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 177: 318-327.
- [9] DWYER J, STARRENBURY D, TAIT S, *et al.* Decreasing activated sludge thermal hydrolysis temperature reduces product colour, without decreasing degradability [J]. *Water Research*, 2008, 42(18): 4699-4709.
- [10] WANG L, LI A. Hydrothermal treatment coupled with mechanical expression at increased temperature for excess sludge dewatering: the dewatering performance and the characteristics of products [J]. *Water Research*, 2015, 68: 291-303.
- [11] FENG G, TAN W, ZHONG N, *et al.* Effects of thermal treatment on physical and expression dewatering characteristics of municipal sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 247: 223-230.
- [12] WANG L, CHANG Y, LI A. Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 108: 423-440.
- [13] HE C, GIANNIS A, WANG J Y. Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: hydrochar fuel characteristics and combustion behavior [J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 257-266.
- [14] PENG C, ZHAI Y, ZHU Y, *et al.* Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization: char properties, combustion behavior and thermal characteristics [J]. *Fuel*, 2016, 176: 110-118.
- [15] FUNKE A, ZIEGLER F. Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering [J]. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 2010, 4(2): 160-177.

作者简介:郭彦峰(1995- ),男,山西忻州人,硕士,研究方向为污泥处理处置、水环境治理等。

E-mail:1981257152@qq.com

收稿日期:2023-08-03

修回日期:2023-11-05

(编辑:刘贵春)