

# 碱热处理对污泥颗粒及脱水性能的影响特性

李卓君<sup>1,2,3</sup>, 王旭东<sup>1,2,3</sup>, 吕永涛<sup>1,2,3</sup>, 陈立成<sup>1,2,3</sup>, 刘晋文<sup>1,2,3</sup>,  
王磊<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 陕西省膜分离重点实验室, 陕西 西安 710055;  
2. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西北水资源与环境生态教育部重点  
实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 利用碱热方法对脱水污泥进行预处理,研究了不同的水热时间、温度、加碱量对污泥脱水性能的影响,并采用 SEM、BET、激光粒度分布仪对污泥颗粒的性质进行表征。研究表明:碱热联合处理能增强污泥的脱水性能,在 210 ℃ 下投加污泥干基质量 40% 的 CaO,加热 60 min 后进行离心处理,污泥的含水率可从 80.57% 降至 62.48%;SEM 结果显示污泥胶体被破坏至更为细小的颗粒;激光粒度分布仪测定结果显示,污泥颗粒的平均粒径从 78.75 μm 降至 24.43 μm;原污泥的 BET 比表面积为 0.27 m<sup>2</sup>/g,Langmuir 比表面积为 0.36 m<sup>2</sup>/g,经碱热处理之后 BET 比表面积达到 5.97 m<sup>2</sup>/g,Langmuir 比表面积达到 8.24 m<sup>2</sup>/g。

**关键词:** 污泥; 热水解; 碱热处理; 脱水性能; 比表面积

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0011-05

## Influence of Alkaline-thermal Treatment on Sewage Sludge Particle and Dewatering Performance

LI Zhuo-jun<sup>1,2,3</sup>, WANG Xu-dong<sup>1,2,3</sup>, LÜ Yong-tao<sup>1,2,3</sup>, CHEN Li-cheng<sup>1,2,3</sup>,  
LIU Jin-wen<sup>1,2,3</sup>, WANG Lei<sup>1,2,3</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Membrane Separation, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China; 3. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology <Ministry of Education>, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** By means of alkaline-thermal process, the dewatered sludge was pretreated, and the effects of different hydrothermal time, temperature and alkaline addition on sludge dewatering performance were studied. Meanwhile, properties of sludge particle were characterized through SEM, BET and laser particle size distribution. According to the research results, the alkaline-thermal combined treatment could enhance the sludge dewatering performance. By adding CaO with 40% of sludge dry basis at the temperature of 210 ℃ and carrying out centrifugal treatment after heating for 60 min could reduce the moisture content of sludge from 80.57% to 62.48%. The SEM results showed that the sludge

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划项目(2017KCT-19-01); 陕西省重点产业链(群)项目(2017ZDCXL-GY-07-02); 陕西省技术创新引导专项(2018HJCG-18)

通信作者: 王旭东 E-mail: xudongw7904@126.com

particle was destroyed to finer particle; the laser particle size distribution results showed that the average particle size of sludge declined from 78.75  $\mu\text{m}$  to 24.43  $\mu\text{m}$ ; the specific surface areas of original sludge of BET and Langmuir were 0.27  $\text{m}^2/\text{g}$  and 0.36  $\text{m}^2/\text{g}$  respectively, which reached to 5.97  $\text{m}^2/\text{g}$  and 8.24  $\text{m}^2/\text{g}$  after alkaline-thermal treatment.

**Key words:** sludge; thermal hydrolysis; alkaline-thermal treatment; dewaterability; specific surface area

作为污水处理的副产物,污泥是一种丰富的废物生物质,通常采用填埋或焚烧的方法进行处理,这会挤压填埋场库容、堵塞垃圾渗滤液管,同时污泥所散发的异味和焚烧产生的细小颗粒物会影响空气质量,造成二次污染。污泥利用的关键在于脱水,由于污泥表面含有大量胞外聚合物(EPS),导致其脱水困难。水热处理是一种有效的脱水方法,它可以破坏胞外聚合物而释放间隙水<sup>[1]</sup>,同时碱性物质的加入能够降低污泥细胞壁对高温的抵抗力,促进污泥的脱水<sup>[2]</sup>。由于加热破坏了污泥微生物基体的基本组成物质,碱性物质可以溶解污泥微生物细胞中的脂质<sup>[3]</sup>,故碱热联合处理是一种更为有效的污泥脱水预处理技术。

盛广宏等<sup>[4]</sup>利用碱热联合处理剩余污泥,发现污泥减量化效果突出,对脱水性能的改善显著,在90  $^{\circ}\text{C}$ 条件下投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处理5 h后,污泥离心后含水率可达75.7%。刘金凤等<sup>[5]</sup>同样采用碱热联合处理,发现随着温度的升高和处理时间的延长,污泥上清液中可溶性COD浓度不断增加,污泥中固体物质溶解,污泥量减少,提高了厌氧消化性能。Li等<sup>[6]</sup>采用添加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的方式进行碱热水热试验,发现污泥的脱水性能与温度呈正相关;同时与单纯水热处理相比, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的加入可以提高处理后的污泥的机械脱水性能;并且随着pH值增大,处理后的污泥脱水性变好。

$\text{CaO}$ 粉末遇水可以产生大量热量,在碱热处理中可以额外提供一部分热量,相比于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 既可以降低成本,又能增强碱热处理的效果。同时 $\text{CaO}$ 可以在热化学环境下被活化,增加其总表面自由能,有效改善污泥的比表面积和微孔结构等表现特征<sup>[7]</sup>。也有研究表明,安全廉价的 $\text{CaO}$ 能加速污泥热化学反应<sup>[8]</sup>。综上, $\text{CaO}$ 粉末具有低成本、低风险、高性能的应用优势,故笔者选用 $\text{CaO}$ 粉末作为碱性添加剂,采用碱热联合方法处理污泥,旨在研究处理时间、温度、加碱量等对污泥脱水性能的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验污泥

试验所用污泥取自西安市某污水处理厂。取回的污泥搅拌均匀后置于冰箱(4  $^{\circ}\text{C}$ )中保存、备用。该污水厂采用 $\text{A}^2\text{O}$ 工艺,剩余污泥采用机械脱水。试验采用的样品为机械脱水后的污泥,含水率在80%左右。从污泥的应用角度考虑,试验中测定了污泥的水分、灰分、挥发分和固定碳的含量,其比例分别为80.57%、37.66%、56.18%、6.16%。

### 1.2 试验方法

污泥碱热处理:取80 g污泥分别与不同质量的 $\text{CaO}$ 混合均匀(取污泥干基的3%、5%、10%、20%、40%),置于100 mL高压反应釜中,在不同温度下(150、180、210  $^{\circ}\text{C}$ ),将反应釜放置于烘箱中处理不同的时间(10~60 min)。反应结束后将反应釜取出自然冷却,待完全冷却后打开反应釜,热解过程结束。同时取80 g污泥作为空白组重复相同的污泥热解步骤。水热结束后当污泥温度降到室温时取样进行相关分析,并将剩余污泥样品置于冰箱(4  $^{\circ}\text{C}$ )中保存、备用。

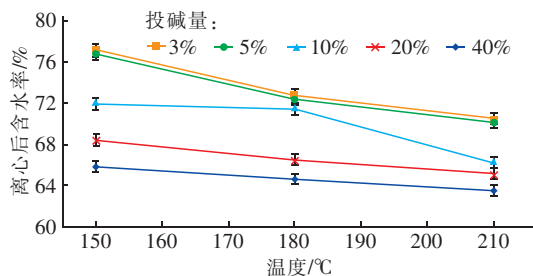
样品离心脱水:取碱热处理之后的污泥试样置于高速离心机中,在10 000 r/min的条件下离心脱水15 min,随后采用重量法<sup>[9]</sup>测定样品含水率。每组试验均平行做3次,以其平均值作为测试结果。

## 2 结果与讨论

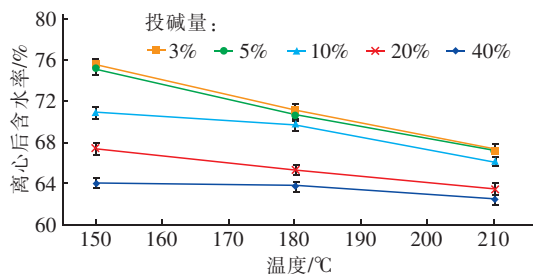
### 2.1 处理温度对污泥脱水性能的影响

准确称取80 g原污泥置于100 mL反应釜中,选取反应时间为30和60 min,按反应温度分别为150、180、210  $^{\circ}\text{C}$ 进行反应,考察反应温度对污泥水热及脱水效果的影响。结果表明,不同投碱量的污泥经水热处理及离心后的干基含水率都是随水热温度的升高而下降(见图1)。分析认为出现这种现象是因为随着反应温度的升高,污泥细胞壁被破坏,因此污泥失去了它的胶体结构<sup>[10]</sup>,大分子有机物被水解为小分子有机物<sup>[11]</sup>,最终实现了污泥减量和改善

脱水性能,降低了污泥含水率。结合图1,选择最佳反应温度为210℃。



a. 反应时间为30 min



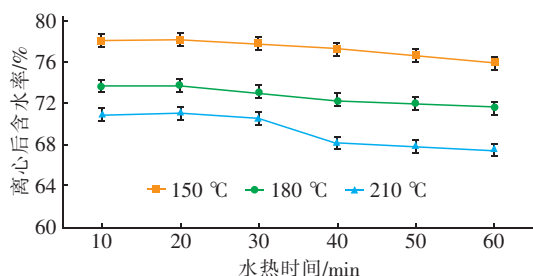
b. 反应时间为60 min

图1 污泥在不同水热温度下反应30、60 min后的离心含水率

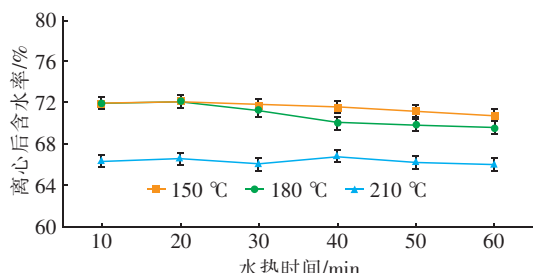
Fig. 1 Moisture content of sludge after centrifugation at different hydrothermal temperatures and time

## 2.2 处理时间对污泥脱水性能的影响

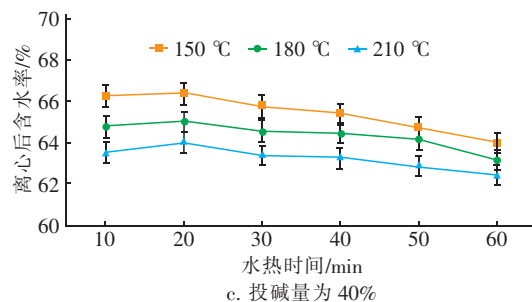
准确称量80 g污泥置于100 mL反应釜中,选取反应温度为150、180、210℃,投碱量为0、10%、40%,反应时间为10、20、30、40、50、60 min,考察不同反应时间对污泥水热效果的影响,结果见图2。



a. 未投碱



b. 投碱量为10%



c. 投碱量为40%

图2 不同投碱量下离心后含水率随水热时间的变化

Fig. 2 Change of moisture content with the hydrothermal time at different alkali dosage

由图2可知,处理时间的长短对降低离心污泥干基含水率有一定的影响,且在不同条件下污泥离心含水率的整体变化趋势相似,即随着时间的延长而不断降低;当投加碱时,污泥含水率可进一步降低。此外,在处理时间较短时,离心污泥干基含水率呈略微上升的趋势,这可能是因为污泥絮体结构和细胞壁虽然在水热处理过程中被破坏,但形成了大量小颗粒物质,吸附水的能力变强,水分不太容易被离心去除。由图2可见,最佳反应时间为60 min。这与王在钊等人<sup>[12]</sup>在单因素水热试验研究中得到的结论相似。

## 2.3 投碱量对污泥脱水性能的影响

准确称取80 g原污泥置于100 mL反应釜中,固定反应温度为210℃,选取反应时间为10、30、60 min,考察投碱量对污泥脱水效果的影响,结果如图3所示。

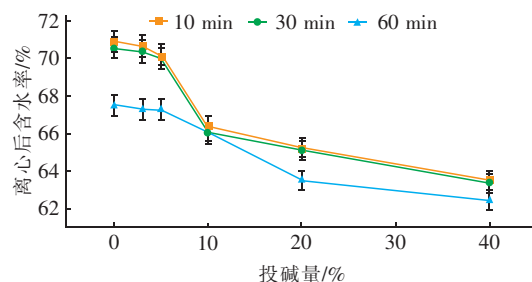


图3 水热温度为210℃时离心后含水率随投碱量的变化

Fig. 3 Change of moisture content with the amount of alkali after centrifugation at hydrothermal temperature of 210 °C

由图3可知,碱热水解破解污泥的效果很好,污泥絮体及细胞结构的破解可以释放出细胞内的间隙水、胞内水,从而提高污泥脱水性能<sup>[13]</sup>。随着投碱量的逐渐增加,污泥脱水性能大幅度提高,离心含水

率不断降低。原因是碱的加入降低了污泥细胞壁对高温的抵抗作用,促进了菌体和细胞破碎,提高了污泥的脱水性能。在投加 40% 的 CaO 后热处理 60 min,污泥的含水率可从 80.57% 降至 62.48%,因而确定最佳投碱量为 40%。

## 2.4 污泥表征分析

### 2.4.1 污泥 SEM 表征

图 4 所示为不同水热温度下污泥颗粒的 SEM 照片。随着水热温度的提高,污泥颗粒的破碎效果越来越好。在原污泥中可见各种块状的污泥颗粒,而经过水热处理后污泥表面出现孔隙,颗粒变小,说明污泥的絮体结构被破坏,细胞壁破裂导致絮体内的结合水部分转变成自由水,使得污泥脱水效果得以提升<sup>[14]</sup>。

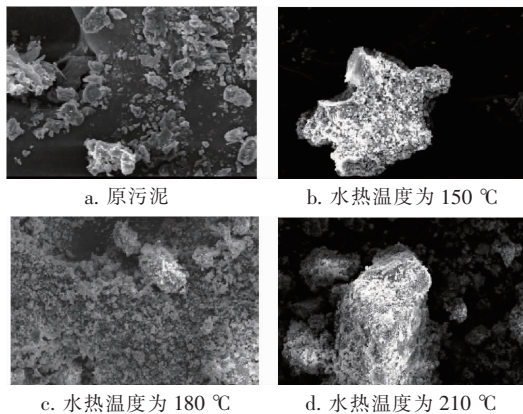


图 4 污泥水热处理 60 min 后微观结构随水热温度的变化

Fig. 4 Microstructure changes with the hydrothermal temperature after 60 min of hydrothermal treatment

### 2.4.2 污泥颗粒比表面积的变化

在投碱量为 40% 条件下,对经碱热处理之后的污泥颗粒进行比表面积测定,结果表明,在水热反应时间为 30 min 的条件下,水热温度为 150、180、210 °C 时,BET 比表面积分别为 2.64、3.87、4.55 m<sup>2</sup>/g,Langmuir 比表面积分别为 3.57、5.35、6.23 m<sup>2</sup>/g;当水热反应时间为 60 min 时,水热温度为 150、180、210 °C 条件下的 BET 比表面积分别为 3.80、5.09、5.97 m<sup>2</sup>/g,Langmuir 比表面积分别为 5.21、6.97、8.24 m<sup>2</sup>/g。可见,随着水热处理温度的升高,污泥颗粒的比表面积增大。原污泥的 BET 比表面积为 0.27 m<sup>2</sup>/g,Langmuir 比表面积为 0.36 m<sup>2</sup>/g,经水热处理之后,污泥颗粒的 BET 和 Langmuir 比表面积均大幅增加。这说明碱热处理有效地破坏了污泥絮体的结构,释放出其内部结合水,使污泥絮体产生大量

细小孔隙,故比表面积明显增加。

### 2.4.3 污泥粒度分布

污泥经过水热处理之后的粒度分布如图 5 所示。在处理时间为 60 min、投碱量为 40% 的条件下,污泥粒径分布图的中轴随着处理温度的升高逐渐向左移动,表明体积占比最大的粒径逐渐降低;污泥的平均粒径随着水热处理温度的升高而降低:原污泥的平均粒径为 78.75 μm,而经 150、180、210 °C 水热处理 60 min 后的污泥平均粒径分别降至 40.17、40.97、24.43 μm。碱热联合处理能够破坏污泥絮体结构,使其由大颗粒转化成小颗粒,平均粒径降低,在粒径变化过程中,污泥的结合水释放,从而提高了离心脱水性能。

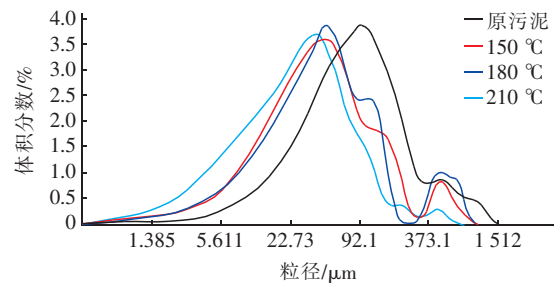


图 5 污泥水热处理 60 min 后粒径分布随水热温度的变化

Fig. 5 Particle size distribution of the sludge after hydrothermal for 60 min

## 3 结论

① 水热处理对污水处理厂剩余污泥有显著的减量效果,反应温度、时间和投碱量是污泥脱水效果的影响因素,其中投碱量是关键因素。试验条件下污泥减量的最佳反应温度为 210 °C,反应时间为 60 min,投碱量为干基的 40%。污泥初始含水率为 80.57%,在此条件下污泥经离心脱水后含水率可降至 62.48%。

② 在碱热反应过程中,随着反应温度的升高、反应时间的延长和投碱量的增加,污泥中的大分子有机物水解为溶解性的小分子有机物,使得污泥表面孔隙增多,比表面积增大;同时污泥絮体的平均粒径大幅度降低,在投碱量为 40%、反应温度为 210 °C、反应时间为 60 min 时,污泥的平均粒径从 78.75 μm 降至 24.43 μm。

③ 污泥脱水性能受碱热处理影响显著,加入 CaO 可以与污泥中的 H<sub>2</sub>O 反应生成 Ca(OH)<sub>2</sub>,可以节省资金,同时 Ca<sup>2+</sup> 的“吸附架桥”作用可以促进污泥脱水性能的进一步提升。

## 参考文献:

- [1] Xue Y G, Liu H J, Chen S S, *et al.* Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge[J]. *Chem Eng J*, 2015, 264:174 – 180.
- [2] Guan B H, Yu J, Fu H L, *et al.* Improvement of activated sludge dewaterability by mild thermal treatment in  $\text{CaCl}_2$  solution[J]. *Water Res*, 2012, 46:425 – 432.
- [3] 何玉凤, 杨凤林, 胡绍伟, 等. 碱处理促进剩余污泥高温水解的试验研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2260 – 2265.  
He Yufeng, Yang Fenglin, Hu Shaowei, *et al.* Promoting high-temperature hydrolysis under alkaline condition[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8): 2260 – 2265 (in Chinese).
- [4] 盛广宏, 陈蓓蓓, 刘金凤. 热碱处理破解污泥效果研究[J]. *环境科技*, 2013, 26(2): 38 – 42.  
Sheng Guanghong, Chen Beibei, Liu Jinfeng. Investigation on sludge hydrolysis by alkaline-thermal treatment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 26(2): 38 – 42 (in Chinese).
- [5] 刘金凤, 盛广宏, 王诗生. 水处理对污泥性质的影响[J]. *环境污染与防治*, 2013, 35(11): 71 – 76.  
Liu Jinfeng, Sheng Guanghong, Wang Shisheng. Effect of thermal hydrolysis treatment on the characteristics of waste sludge[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2013, 35(11): 71 – 76 (in Chinese).
- [6] Li C X, Wang X D, Zhang G Y, *et al.* Hydrothermal and alkaline hydrothermal pretreatments plus anaerobic digestion of sewage sludge for dewatering and biogas production: Bench-scale research and pilot-scale verification[J]. *Water Res*, 2017, 117:49 – 57.
- [7] Zheng Y F, Shi L W. Mechanochemical activation of calcium oxide powder[J]. *Powder Technology*, 1996, 87:249 – 254.
- [8] Shao J G, Yan R, Chen H P, *et al.* Catalytic effect of metal oxides on pyrolysis of sewage sludge[J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(9): 1113 – 1118.
- [9] 宜慧. 城市污水厂污泥碱热预处理特性及厌氧消化工艺研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.  
Yi Hui. Characteristics and Anaerobic Digestion Process of Alkaline Thermal Pretreatment WWTP Sewage Sludge [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014 (in Chinese).
- [10] 陈畅亚. 壳聚糖 – 改性粉煤灰联合调理改善污泥脱水性能及机理初探[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
Chen Changya. Effectiveness and Mechanisms of Sewage Sludge Conditioning with Chitosan and Modified Coal Fly Ash [D]. Changsha: Hunan University, 2013 (in Chinese).
- [11] 荀锐, 王伟, 乔玮. 水热改性污泥的水分布特征与脱水性能研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 851 – 856.  
Xun Rui, Wang Wei, Qiao Wei. Water distribution and dewatering performance of the hydrothermal conditioned sludge[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(3): 851 – 856 (in Chinese).
- [12] 王在钊, 贾通通, 王蛟秦, 等. 水热预处理对污泥理化性质的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(5): 440 – 446.  
Wang Zaizhao, Jia Tongtong, Wang Jiaoqin, *et al.* Effect of hydrothermal pretreatment on physicochemical properties of sludge [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(5): 440 – 446 (in Chinese).
- [13] Yu J, Guo M H, Xu X H, *et al.* The role of temperature and  $\text{CaCl}_2$  in activated sludge dewatering under hydrothermal treatment[J]. *Water Res*, 2014, 50:10 – 17.
- [14] 王治军, 王伟. 污泥热水解过程中固体有机物的变化规律[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(7): 1 – 5.  
Wang Zhijun, Wang Wei. Transformation regularity of organic solids in sludge thermal hydrolysis process[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(7): 1 – 5 (in Chinese).



作者简介: 李卓君(1994 – ), 女, 河北安国人, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥处理及资源化。

E-mail: lizhuojun0217@126.com

收稿日期: 2018 – 11 – 09