

球型纳米颗粒 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的制备及其 强化污泥电渗透干化研究

李亚林^{1*}, 黄羽², 韩欣宏¹, 黄文宝¹, 孙猛¹, 张行¹
(1. 河南工程学院环境与生物工程学院, 河南 郑州 451191;
2. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:为了探究纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 强化污泥电渗透干化的可行性,在常温条件下采用液相沉淀法制备 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,并将制备得到的球型纳米颗粒 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 用于强化城市污泥的电渗透干化。结果表明,在分散剂的用量为 8 mL、表面活性剂质量为 0.2 g、搅拌时间为 30 min、NaOH 用量为 60 mL、滴加速率为 4.6~5 mL/min 时,纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的纯度可达到 94.02%。制得的纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为结晶度完整的球型和椭球型颗粒,并对污泥电渗透干化具有良好的强化作用,当通电电压为 40 V、纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数为 20 mg/g DS 时,电渗透干化污泥的含水率可降至 57.69%。

关键词: 纳米颗粒; 氢氧化钙; 响应曲面法; 电渗透; 污泥脱水

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2022)07-0166-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.07.032

Preparation of spherical nanoparticles $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and its application in enhancing electroosmosis drying of sludge

LI Ya-lin^{1*}, HUANG Yu², HAN Xin-hong¹, HUANG Wen-bao¹, SUN Meng¹, ZHANG Xing¹

(1. College of Environment and Bioengineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of nano- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in strengthening the electroosmotic drying of municipal sludge, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is prepared through liquid phase precipitation method at room temperature. The spherical nano- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ prepared is used to strengthen the electroosmotic drying of municipal sludge. It is shown that the purity of nano- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ can reach 94.02% when the dosage of dispersant is 8 mL, the dosage of surfactant is 0.2 g, the stirring time is 30 min, the dosage of NaOH is 60 mL, and the dropping rate is 4.6~5 mL·min⁻¹. The obtained nano- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is spherical and ellipsoidal particles with complete crystallinity, and has a good strengthening effect on electroosmotic drying of sludge. The moisture content of sludge can be reduced to 57.69% after electroosmotic drying when the voltage is 40 V and the mass fraction of nano- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is 20 mg·g⁻¹ DS.

Key words: nanoparticles; calcium hydroxide; response surface method; electro-osmotic; sludge dewatering

我国“十三五”期间污水处理及相关投资新增的近 6 000 亿元中用于污泥处理、处置设施改造的占比仅为 5%^[1]。传统机械脱水处理后的污泥仍因含水率高而严重限制了其后续的处理与处置^[2]。“十四五”期间破解污泥处置难点、实现污泥的无害化、推进资源化的关键,仍是寻找到高效、经济的污泥脱水干化技术。

CaO 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是污泥脱水干化工艺中最早被使用的一类碱性调理脱水药剂,因其使用简单、能耗低,至今仍被广泛应用^[3-4]。然而,传统市售的 CaO 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 受其自身纯度、粒度和比表面积的影响,在与污泥混合时分散度较差、易导致脱水药剂

用量的增加和脱水干化效果下降^[5-6]。电渗透干化技术作为一种新兴的污泥深度脱水方法,被众多研究者证明其在脱水干化方面具有的效果^[7-8],但由于电渗透脱水干化电能消耗高、耗时长及存在副反应的抑制作用,单独用于污泥脱水的效果并不理想^[9]。相关研究表明,对污泥进行改性可在一定程度上改善污泥的电渗透脱水效果^[10-11]。

基于此,笔者采用液相沉淀法在常温下以无水 CaCl_2 和 NaOH 为原料,加入分散剂和表面活性剂制备纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,在减小 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粒径的同时提高其反应性、分散性和迁移性,在制备得到纳米 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的基础上将其用于强化污泥电渗透脱水

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2022-05-01

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102310064); 教育部中西部高等学校青年骨干教师国内访问学者项目(19042); 教育部国家级大学生创新创业训练计划项目(202111517002); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划资助项目(2019GGJS239)

作者简介: 李亚林(1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固体废物处理与资源化, 通讯联系人, li_ya_lin@haue.edu.cn。

干化,以期提高污泥电渗透污泥脱水干化的效率和改善污泥脱水干化的效果。

1 材料与试剂

1.1 材料

Ca(OH)₂ 制备所需原料 CaCl₂、聚乙二醇(PEG200)、十二烷基硫酸钠(SDS)和 NaOH 均为分析纯;城市污泥取自新郑市某污水处理厂浓缩池,含水率为 98.5%~99.5%。

1.2 污泥电渗透干化装置

电渗透干化装置为自制亚克力材质^[12],主体为外径 120 mm、内径 100 mm、长 250 mm 的圆柱筒,筒体左端依次放置有孔径 48 μm 的尼龙滤布和直径为 90 mm、纯度为 90%、带有 25 个 4 mm 圆孔的碳片,碳片外端用亚克力板平压固定,连接电源负极;筒体右端为带有导线的可移动碳片活塞,连接电源正极。

稳压直流电源(JP150200,无锡安耐斯电源有限公司生产)用来监测电压、电流;热电偶温度计(CHB902型,上海誉赫电子科技有限公司生产)测实时温度;电子天平(YP10001P型,上海衡际科学仪器有限公司生产)用来测定实时脱出的水量;电动推杆(XTL型,常州龙翔气弹簧有限公司生产)提供推力。

2 实验方法

2.1 纳米 Ca(OH)₂ 的制备方法

称取 22.200 0 g 无水 CaCl₂ 于干燥锥形瓶中,添加 80 mL 去离子水制得反应母液,将定量分散剂(PEG)和表面活性剂(SDS)加入母液中,搅拌一定时间使其混合完全。之后通过恒压滴液漏斗以一定速率将定量 NaOH 溶液(质量分数为 29%)加入到定速搅拌(500 r/min)的反应液中,NaOH 溶液滴尽后停止搅拌,于室温下放置 30 min,用无水乙醇对抽滤得到的固体进行数次洗涤后进行冷冻干燥,即得到 Ca(OH)₂ 粉末。

2.2 纳米 Ca(OH)₂ 纯度、产率测定及形貌表征

采用酸碱滴定法进行样品纯度的测定^[13],样品平行测定 3 次,结果取平均值,样品的纯度及产率的计算式分别为:

$$f = [(m_r \times c \times V) / (2 \times m)] \times 100\% \quad (1)$$

$$p = [(m_1 \times f) / m_2] \times 100\% \quad (2)$$

式中: f 为样品的纯度,%; c 为 HCl 溶液的浓度, mol/L; V 为 HCl 滴定的体积,L; m_r 为 Ca(OH)₂ 的

相对分子质量,g/mol; m 为所取样品的质量,g; p 为样品的产率,%; m_1 为实际制得样品的质量,g; m_2 为理论制得样品的质量,g。

利用 X 射线衍射仪(XRD,D8 ADVANCE 型,德国 Bruker 公司生产)对制得的样品粉末涂片进行测定,采用 Jade 软件进行物相组成分析;样品粉末置于装有乙醇溶液的试管中,充分混合后置于超声清洗机(F-100SD 型,深圳福洋科技集团有限公司生产)分散 1 h,之后滴加在单晶抛光硅片和覆膜铜网上,使用聚焦离子束扫描电子显微镜(FIB-SEM, Auriga 型,德国 Carl Zeiss 股份公司生产)和透射电子显微镜(TEM,JEM2100 型,日本电子株式会社生产)对其进行形貌分析。

2.3 污泥电渗透干化流程及评价指标

取定量污泥加入自制纳米 Ca(OH)₂,迅速搅拌均匀后加入反应器,利用电子推杆将反应器推进,使污泥充满活塞,以保证污泥与阴、阳极板完全接触。过程中每隔 10 s 记录电流、温度、脱出水量,当脱出水量小于 0.01 g/s 时断电停止^[14]。

干化污泥含水率采用烘干称重法测定^[6],以污泥的实时含水率降低率和干化污泥含水率为指标来评价污泥的干化效果,其计算式分别为:

$$W = [(M_0 \times W_0 - M) / (M_0 - M)] \times 100\% \quad (3)$$

$$W_r = [(W - W_0) / W_0] \times 100\% \quad (4)$$

式中: W 为污泥的理论含水率,%; M_0 为浓缩污泥的质量,g; W_0 为浓缩污泥的含水率,%; M 为实时脱出的水量,g; W_r 为污泥的实时含水率降低率,%。

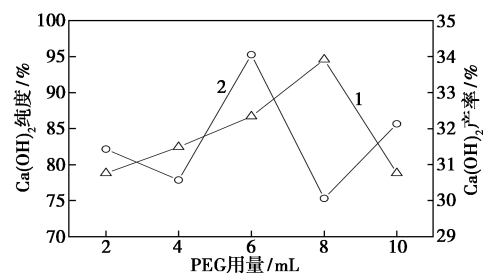
3 结果与分析

3.1 纳米 Ca(OH)₂ 的制备及其优化分析

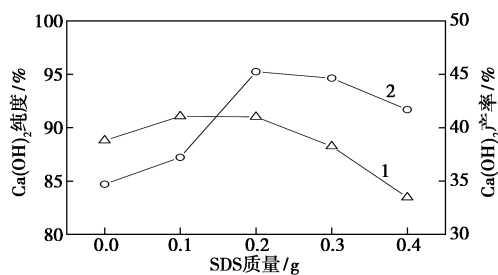
3.1.1 PEG 和 SDS 用量对 Ca(OH)₂ 制备的影响

取定量反应母液,固定其他条件制备纳米 Ca(OH)₂,PEG 和 SDS 的用量对 f 值和 p 值的影响如图 1 所示。

由图 1(a)中可以看出,随着 PEG 用量的增加, f 值呈现先增后降的趋势,在 PEG 用量为 8 mL 时, f 值达到最高,为 94.57%;而在 PEG 用量为 6 mL



(a) PEG 用量的影响



(b) SDS 质量的影响

1—Ca(OH)₂ 纯度;2—Ca(OH)₂ 产率

图 1 PEG 用量和 SDS 质量对制备 Ca(OH)₂ 的影响

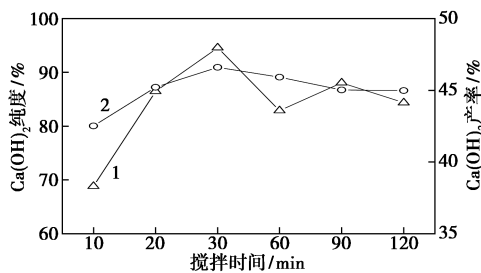
时, p 值达到最大值, 为 34.05%。这是由于 PEG 充当分散剂用来改善颗粒的均匀性和分散性, 当其用量较少时, 反应体系中的分散剂处于未饱和状态, 颗粒间因分散性有限易相互吸引聚集沉降, 而机械搅拌产生的动态流场和机械力不足以将团聚体打散, CaCl₂ 也极易被生成的颗粒包裹而无法进一步与 NaOH 反应, 使得 f 值和 p 值下降。同时, PEG 高分子在进入到液相体系后由于空间位阻稳定作用以链状形式展开, 链状两端分别吸附在颗粒表面和溶液中, 以达到空间位阻的稳定^[15]; 当体系中的 PEG 过量时, 其与颗粒间的吸附力大幅增加, 导致物质间的吸附力过度饱和, 而使得高分子长链结构相互缠绕, 粒子间的运动被束缚^[16], 极易在反应体系中发生吸附沉降而导致 f 值下降。

由图 1(b) 中可以看出, SDS 质量小于 0.2 g 时, f 值和 p 值均随着 SDS 质量的增加而提高, 因为当体系中的 SDS 存量较少时, 其可以改变反应体系中反应液的表面张力, 但所能起到的作用受限, 直接造成反应体系中颗粒发生团聚, 随着趋近于临界浓度, PEG 长链上会附着大量的 SDS 而形成束缚胶束的集聚, 从而促进 Ca(OH)₂ 的生成, 这与侯瑞琴等^[17] 的研究结论相一致; 而当 SDS 质量为 0.2 g 时, f 值和 p 值均达到最大值, 分别为 91.01% 和 45.24%; 之后继续增加 SDS 质量, f 值和 p 值均随着 SDS 质量的增加而降低, 因为随着 SDS 在体系中的存量超过其临界胶束浓度, 反应体系中的 SDS 会更多地转变为自由的胶束, 此时前阶段 PEG 与 SDS 形成的集聚束缚胶束会与之共存在反应体系中^[18], 更利于球状 Ca(OH)₂ 的生成。

3.1.2 搅拌时间对脱水剂制备的影响

取定量反应母液, 固定其他条件不变, 在 PEG 用量为 2 mL、SDS 质量为 0.2 g 时, 搅拌时间对制备

的 Ca(OH)₂ 的 f 值和 p 值的影响如图 2 所示。



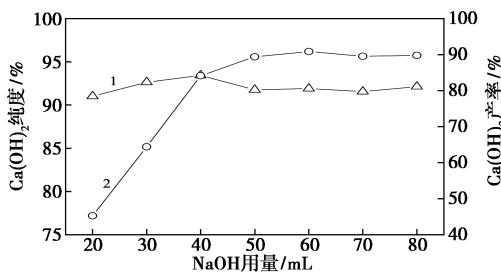
1—Ca(OH)₂ 纯度;2—Ca(OH)₂ 产率

图 2 搅拌时间对 Ca(OH)₂ 制备的影响

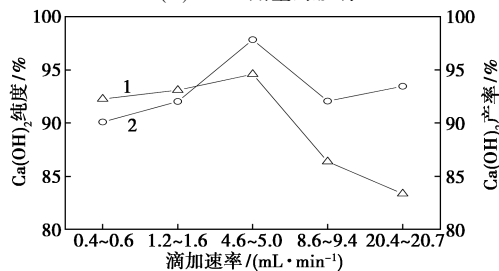
由图 2 中可以看出, 在搅拌时间为 30 min 时, f 值和 p 值达到最高, 之后随着搅拌时间的延长, p 值先下降后趋于恒定, 而 f 值稳定在 88.06% 左右。因为当搅拌时间太短时, PEG 未能将其高分子长链展开并与 SDS 形成束缚胶束而影响后续纳米 Ca(OH)₂ 的形成; 当搅拌时间过长, SDS 有充分时间与 PEG 发生结合并达到饱和, 此时溶液黏度增加, CaCl₂ 会与 PEG-SDS 类胶束形成裹挟^[19], 与 NaOH 的反应速率受限, 导致 f 值和 p 值的下降。

3.1.3 NaOH 用量和滴加速率对 Ca(OH)₂ 制备的影响

取定量反应母液, 在 PEG 的用量为 2 mL、SDS 的质量为 0.2 g、搅拌时间为 30 min 时, NaOH 的用量和滴加速率对制备的纳米 Ca(OH)₂ 的 f 值和 p 值的影响如图 3 所示。



(a) NaOH 用量的影响



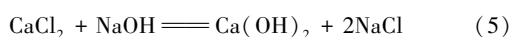
(b) NaOH 滴加速率的影响

1—Ca(OH)₂ 纯度;2—Ca(OH)₂ 产率

图 3 NaOH 用量和滴加速率对 Ca(OH)₂ 制备的影响

由图 3(a) 中可以看出, NaOH 用量对于 f 值影

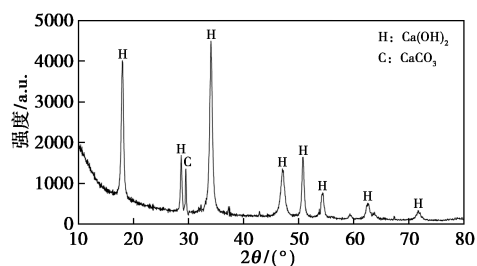
响不大,而对 p 值的影响显著, p 值随着 NaOH 用量的增加呈现出提高的趋势,在 NaOH 用量为 60 mL 时, p 值达到最大(90.83%),之后趋于平衡。这是因为式(5)中的强碱置换反应可以在短时间内迅速完成,当 NaOH 用量不足时,有限的 NaOH 与 CaCl₂ 发生反应后即达到终止;随着 NaOH 溶液的增加,反应正向进行越明显,生成的 Ca(OH)₂ 越多, p 值越高;当 CaCl₂ 消耗完后,继续增加 NaOH 用量无法提升 p 值。



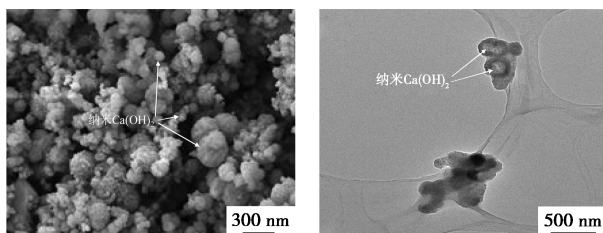
由图 3(b)中可以看出,随着滴加速率的逐渐增加,反应物的 f 值和 p 值均呈现出先升后降的趋势,在滴加速率为 4.6~5 mL/min 时, f 值和 p 值达到最大,分别为 94.58% 和 97.83%。这是因为当滴加速率缓慢时,生成的 Ca(OH)₂ 在混合液中停留时间较长,与空气中的 CO₂ 发生反应生成 CaCO₃,导致 f 值降低;且因 Ca(OH)₂ 有一定的溶解度,滴定量不变,滴加速率缓慢的情况下,随着时间增长,部分 Ca(OH)₂ 溶解,易造成 p 值下降。而当滴加速率过大时,CaCl₂ 尚未与 NaOH 充分反应,部分生成的半成品聚合物就被新加入的 NaOH 分子附着表面,形成胞聚体阻碍下一步反应而导致 f 值降低。

3.1.4 自制纳米 Ca(OH)₂ 表征

在 PEG 用量为 2 mL、SDS 质量为 0.2 g、搅拌时间为 30 min、NaOH 用量为 60 mL、滴加速率为 4.6~5 mL/min 条件下,对制备得到的 Ca(OH)₂ 样品进行表征,结果如图 4 所示。



(a) 自制 Ca(OH)₂ 的 XRD 图



(b) 自制 Ca(OH)₂ 的 SEM 图 (c) 自制 Ca(OH)₂ 的 TEM 图

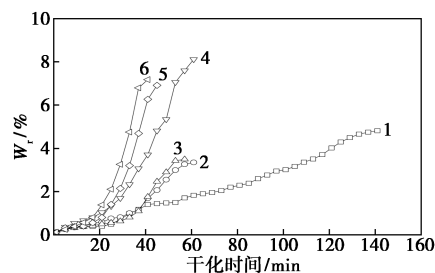
图 4 自制 Ca(OH)₂ 的 XRD、SEM 和 TEM 图

由图 4(a)中可以看出,标准的三方晶型在 2θ

为 17.961 6、28.694 2、34.081 0、47.223 4、50.867 2、53.880 0、62.732 7° 和 71.726 1° 处的特征衍射峰均与 Ca(OH)₂ 标准图谱(pdf 44-1481)特征峰一致,证明制得的 Ca(OH)₂ 样品晶相完整;同时,在 29.531 6° 出现了 CaCO₃ 的衍射峰,表明在样品制备环节,Ca(OH)₂ 有被碳化的倾向。由图 4(b)中可以看出,制备的 Ca(OH)₂ 绝大部分的形貌为准球型颗粒,少部分为椭球型,这与前述单因素中的推测相吻合;另外,Ca(OH)₂ 颗粒的粒径在 100~300 nm 之间,这与图 4(c)TEM 图中观察到形貌相吻合。

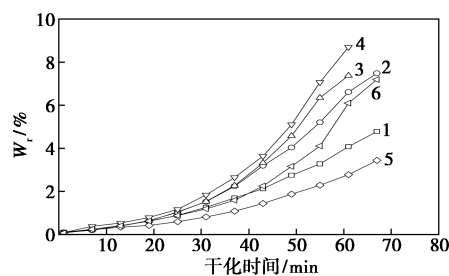
3.2 纳米 Ca(OH)₂ 强化污泥电渗透干化

控制初始污泥量,按照 2.3 中流程进行污泥电渗透干化实验,脱水过程中每脱除 100 g 水电动液推杆推进 1 次,分别考察电压梯度和纳米 Ca(OH)₂ 用量对污泥干化的影响,结果如图 5 所示。



1—10 V;2—20 V;3—30 V;4—40 V;5—50 V;6—60 V

(a) 电压梯度的影响



1—5 mg/g DS;2—10 mg/g DS;3—15 mg/g DS;
4—20 mg/g DS;5—25 mg/g DS;6—30 mg/g DS

(b) Ca(OH)₂ 用量的影响

图 5 电压梯度和 Ca(OH)₂ 用量对污泥电渗透干化的影响

由图 5(a)中可以看出,当电压小于 40 V 时, W_r 随着梯度的增加而升高,污泥含水率不断降低;当电压为 40 V 时, W_r 最高,污泥含水率降至 59.13%;而当电压大于 40 V 时,污泥脱水在 40 min 内迅速中止, W_r 下降。这是因为在电渗透干化的初期,在电场作用下污泥中的水分由阳极向阴极发生渗流,此时阴极区域聚集脱出的水分有限^[20];同时由于低温下水的黏度较高,在出水口附着导致其张力较大,水分不易流出,使得脱水初始阶段 W_r 上升缓慢。随

着电压的增加,在单位面积污泥通过的电流也在增加,水分的驱动力增加,使得脱水速率加快, W_r 升高。之后继续增加电压会使阳极区域产生的 H^+ 激增,阳极污泥的 pH 降低,Zeta 电位也随之降低,污泥脱水效果因为电渗流速降低而恶化^[21]。

由图 5(b)中可以看出,当 $Ca(OH)_2$ 用量少于 20 mg/g DS 时, W_r 随着 $Ca(OH)_2$ 用量的增加而升高,当 $Ca(OH)_2$ 用量为 20 mg/g DS 时,污泥含水率达到最低的 57.69%。之后继续增加 $Ca(OH)_2$ 用量, W_r 出现下降趋势。因为当 $Ca(OH)_2$ 用量较少时,体系中 $Ca(OH)_2$ 的浓度较低,同时电解产生的 H^+ 会中和一定量的 OH^- , $Ca(OH)_2$ 对污泥中的有机物破坏作用有限;随着 $Ca(OH)_2$ 用量的增加,一方面污泥内离子浓度增加,电渗流增强,电渗透脱水效果变好;另一方面 $Ca(OH)_2$ 用量的增加会使体系中的 Ca^{2+} 增多,污泥的絮体间会因为胶体颗粒表面的负电荷与体系中的 Ca^{2+} 发生中和作用而出现吸附与桥连,有利于脱水^[22];且 $Ca(OH)_2$ 电离出的 OH^- 提供的碱性环境使得污泥细胞壁胀裂溶解,污泥絮体间的稳定结构被破坏,从而促进脱水。当 $Ca(OH)_2$ 用量激增后,体系中 OH^- 的溶胞作用增强,破坏作用增大,污泥内部的蛋白质和多糖等大分子有机物被氧化成小分子有机物,污泥粒径减小,脱水阻力增大;同时过量的 Ca^{2+} 离子可以完全抑制污泥的电动效应^[23],从而导致污泥干化性能变差。

4 结论

(1)在 PEG 用量为 8 mL、SDS 质量为 0.2 g、搅拌时间为 30 min、NaOH 用量为 60 mL、滴加速率为 4.6~5 mL/min 时,纳米 $Ca(OH)_2$ 的纯度和产率可分别达到 94.58% 和 97.83%。

(2)自制纳米 $Ca(OH)_2$ 粒度在 100~300 nm 之间,颗粒大多为球型或椭球型,具有典型的完整的晶体结构。

(3)当通电电压为 40 V、自制纳米 $Ca(OH)_2$ 用量为 20 mg/g DS 时,污泥含水率可降到 57.69%,自制纳米 $Ca(OH)_2$ 对污泥电渗透干化的强化作用显著。

参考文献

- [1] 国家发展改革委.住房城乡建设部关于印发《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》的通知[EB/OL].(2021-06-06)[2021-07-19].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202106/t20210611_1283168_ext.html.
- [2] 王丽苹,李平,木合塔尔·吐尔洪,等. Fe^0/H_2O_2 类芬顿法提高污泥脱水性能及机理分析[J].现代化工,2018,38(12):119-123.
- [3] Czechowski F, Marcinkowski T. Primary sludge stabilisation with calcium hydroxide [J]. Environmental Chemistry Letters, 2006, 4(1):11-14.
- [4] Yu W, Yang J, Shi Y, et al. Roles of iron species and pH optimization on sewage sludge conditioning with Fenton's reagent and lime[J]. Water Research, 2016, 95:124-133.
- [5] 王涛.污泥石灰干化技术现状及处理处置过程应注意的问题[J].给水排水,2013,39(7):40-44.
- [6] Li Y L, Liu J W, Chen J Y, et al. Reuse of dewatered sewage sludge conditioned with skeleton builders as landfill cover material[J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2014, 11(1):233-240.
- [7] Deng W, Lai Z, Hu M, et al. Effects of frequency and duty cycle of pulsating direct current on the electro-dewatering performance of sewage sludge[J]. Chemosphere, 2020, 243:125372.
- [8] Mahmoud A, Hoadley A F A, Citeau M, et al. A comparative study of electro-dewatering process performance for activated and digested wastewater sludge[J]. Water Research, 2018, 129:66-82.
- [9] 冯源,詹良通,陈云敏.城市污泥电渗脱水实验研究[J].环境科学学报,2012,32(5):1081-1087.
- [10] Tuan P, Sillanpaa M. Effect of freeze/thaw conditions, polyelectrolyte addition, and sludge loading on sludge electro-dewatering process[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 164(1):85-91.
- [11] Guo X, Wang Y, Wang D. Permanganate/bisulfite (PM/BS) conditioning-horizontal electro-dewatering (HED) of activated sludge: Effect of reactive Mn(III) species[J]. Water Research, 2017, 124:584-594.
- [12] 李亚林,刘蕾,魏添,等.横向电渗透污泥深度脱水实验装置:中国,201621204719.8[P].2019-10-29.
- [13] 张伟.酸碱指示剂滴定法测定碱度过程分析[J].仪器仪表与分析监测,2020,45(2):35-38.
- [14] Yu W B, Yang J K, et al. Study on dewaterability limit and energy consumption in sewage sludge electro-dewatering by in-situ linear sweep voltammetry analysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 317:980-987.
- [15] 王芝贤,欧海峰,宫喜军,等.表面活性剂 PEG 在掺锡纳米 SnO_2 粉末氧化共沉淀制备中的作用[J].过程工程学报,2005,5(3):305-308.
- [16] Guo G Q, Gan W P, Luo J, et al. Preparation and dispersive mechanism of highly dispersive ultrafine silver powder [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(22):6683-6687.
- [17] 侯瑞琴,杜玉成,刘铮,等.纳米氢氧化钙颗粒制备、表征及 NO_x 捕获性能研究[J].非金属矿,2010,33(5):5-7.
- [18] 王纯荣,方云,冯杰文.以 SDS-PEG 团簇为软模板在温和条件下合成金纳米环[J].化学学报,2007,65(12):1177-1180.
- [19] 王芝贤,欧海峰,宫喜军,等.表面活性剂 PEG 在掺锡纳米 SnO_2 粉末氧化共沉淀制备中的作用[J].过程工程学报,2005,5(3):76-79.
- [20] Qian X, Zhou X, Wu J, et al. Electro-dewatering of sewage sludge: Influence of combined action of constant current and constant voltage on performance and energy consumption[J]. Science of the Total Environment, 2019, 667:751-760.
- [21] Yang Z, Lee D J. Structure evolution of wastewater sludge during electroosmotic dewatering [J]. Drying Technology, 2010, 28(7):890-900.
- [22] Liu H, Yang J, Zhu N, et al. A comprehensive insight into the combined effects of Fenton's reagent and skeleton builders on sludge deep dewatering performance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 258-259:144-150.
- [23] Loginov M, Citeau M, Lebovka N, et al. Electro-dewatering of drilling sludge with liming and electrode heating [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 104:89-99. ■