

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.001

SEUE-WAO污泥湿式氧化工艺的生产性试验研究

孟继安^{1,2}, 钟达文³, 孙昊^{2,4}, 秦伟⁵, 戴丁军⁶

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 2. 清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215000; 3. 华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206; 4. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214000; 5. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 6. 宁波市哈雷换热设备有限公司, 浙江 宁波 315506)

摘要: 研究开发了一种新型的污泥湿式氧化处理工艺即SEUE-WAO工艺,并开展了规模为25 t/d(污泥含水率为80%)的生产性试验。该工艺在高温、高压、富氧环境下对微生物细胞进行破壁,使得有机物发生水解和氧化反应而生成小分子有机酸、CO₂和水,从而实现污泥的减量化、无害化和稳定化;通过换热反应一体化技术深度回收反应热量,电耗≤60 kW·h/t(以湿泥计),在不添加化学药剂的情况下脱水泥饼含水率<35%。同时,脱水泥饼的处置路径灵活性强,可用于园林绿化以及包装类纸板、陶粒和制砖等建材生产的原料添加物,也可以用于焚烧;分离液具有用作污水处理厂反硝化碳源的潜力。生产性试验证明,该工艺具有超低能耗、安全可靠、环境友好、处理周期短、占地面积小、碳减排显著等优点。

关键词: 污泥处理; 湿式氧化; 减量化; 资源化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0001-07

Full-scale Study on SEUE-WAO Sludge Wet Air Oxidation Process

MENG Ji-an^{1,2}, ZHONG Da-wen³, SUN Hao^{2,4}, QIN Wei⁵, DAI Ding-jun⁶

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tsinghua Suzhou Environmental Innovation Research Institute, Suzhou 215000, China; 3. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 5. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. Ningbo Hrale Plate Heat Exchanger Co. Ltd., Ningbo 315506, China)

Abstract: This paper developed a new sludge wet air oxidation process, namely SEUE-WAO process, and carried out a production test with scale of 25 t/d (sludge moisture content was 80%). The process broke the microbial cell walls in high temperature, high pressure and oxygen-rich environment, resulting in the hydrolysis and oxidation of organic matters to generate small molecular organic acids, CO₂ and water, so as to achieve the reduction, harmlessness and stabilization of sludge. The reaction heat was deeply recovered through the integrated heat exchange-reaction technology. The power consumption was less than 60 kW·h/t, and the moisture content of the dewatered sludge cake was decreased to less than 35% without adding chemical agents. The disposal method of the sludge cake was flexible, which could be used for landscaping and incineration, and used as raw material additives for the production of

packaging cardboard and building materials such as ceramsite and brick. The separation liquid had the potential to be used as denitrifying carbon sources in wastewater treatment plants. The production test showed that the process had the advantages of ultra-low energy consumption, high safety and reliability, environmental friendliness, short treatment cycle, small footprint area and significant carbon emission reduction.

Key words: sludge treatment; wet air oxidation; reduction; resource utilization

湿式氧化技术(WAO)具有有机物降解率高、固相产物含固率高、尾气无有毒有害物质等优点,国内外已有大量的研究将其用于污泥的处理^[1-3]。大量的研究和工程应用表明^[2-4],在湿式氧化过程中,污泥中的微生物细胞在高温下发生破壁,释放大量可溶有机物,有机物在富氧环境下进行湿式氧化反应而被降解,污泥颗粒内和颗粒间的结合水随之释放,从而提高污泥的沉降性、降低污泥比阻,达到污泥稳定化、无害化和减量化的目的。近年来,国内诸多学者对污泥湿式氧化处理技术进行了探索^[5-6],但相关工业化研究和应用还鲜有报道。

由于传统湿式氧化技术处理污泥的运行压力和温度偏高,导致设备造价较高,安全性欠佳,并且对操作人员技能要求也高;不仅如此,部分工艺热量回收采用污泥-水(或油)-污泥间接换热技术,热量回收工艺复杂,换热器设计不合理容易导致污泥在换热管内发生沉积、结垢甚至堵塞问题,存在一定的安全隐患,且经济性较差。针对上述技术难点,清华大学开发了SEUE-WAO工艺,并在宁波成功开展了生产性试验。

1 生产性试验及工艺流程

SEUE-WAO 工艺的生产性试验装置于 2021 年 7 月在宁波某污水处理厂投入运行,进泥为市政污泥。该装置的设计污泥处理量为 25 t/d,进泥含水率为 80%,固相产品产量为 5 t/d,处理周期约为 2~3 h。湿式氧化后污泥经板框脱水获得分离液和泥饼。泥饼中的有机物含量可低于 20%、含水率低于 35%,减量化达到近 80%,实现了污泥的减量化、无害化、稳定化,同时泥饼可用于瓦楞纸、陶粒、制砖生产的原料添加物,实现了资源化利用。通过调节富氧空气流量,可调控固相产物中的有机物含量,进而控制泥饼热值。分离液富含小分子有机酸,具有用作污水处理厂反硝化碳源的潜力。

SEUE-WAO 工艺为连续运行的湿式氧化工艺,

其原理如图1所示。

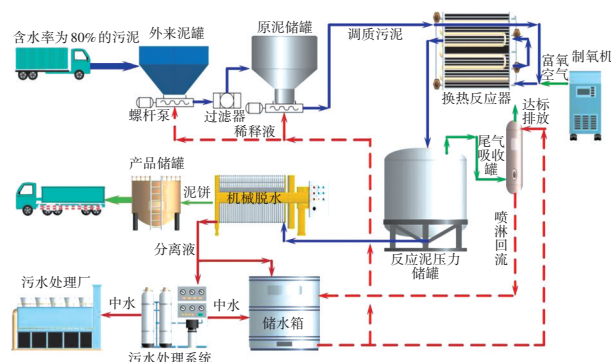


图1 SEUE-WAO 工艺流程

Fig.1 Sketch of SEUE-WAO process

含水率为 80% 的污泥进入外来泥罐和原泥储罐暂存。原泥在输送泵的作用下与机械脱水的分离液(或中水)进行混合形成调质污泥,低温的调质污泥(约 30℃)经换热器与经过湿式氧化反应后的高温污泥(约 200℃)进行换热升温。升温后的调质污泥(约 180℃)与富氧空气进行混合,进入氧化反应器中,反应器内压力为 1.6~3.2 MPa(可根据工艺需要进行调整),污泥中的有机物与氧气发生反应释放出大量的热量,氧化反应器内置电加热器,若污泥反应温度未达到设定温度,可调节电加热器功率将反应污泥加热至设定温度(约 200℃)进行湿式氧化反应。在氧化反应器内,污泥中的有机质被分解为小分子有机酸、 CO_2 和水等。湿式氧化反应后的高温污泥(约 200℃)流入换热器热侧与低温的调质污泥进行换热,冷却后的污泥产物进入反应泥压力储罐(约 50℃),反应泥压力储罐的压力为 1.0~1.6 MPa,采用反应泥余压余热储存工艺,通过反应泥压力储罐储存反应泥的余压,并利用余压将反应泥输送至机械脱水单元进行脱水,节省泵的投资和运营成本。机械脱水后分离液用作污泥调质的稀释液,可将分离液的余热用于加热原泥,同时利用分离液的酸性增强工艺的阻垢抗垢性能,不仅获得

了明显的节能效果,而且还显著提高了工艺的可靠性和装置启停的简便性等。脱水后的污泥产物(含水率<35%)暂存在产品储罐中,泥饼外运处置。分离液一部分作为稀释液对污泥进行调质,剩余部分则经污水处理系统处理达标后排放。反应生成的气体通入尾气吸收罐内进行喷淋处理,达标后排入大气。

2 结果与讨论

2.1 换热反应器性能分析

SEUE-WAO工艺采用穿透混合旋流管式高效低阻湿式氧化反应技术替代传统反应釜式湿式氧化反应技术,一方面克服了原有反应釜反应不均匀、不充分的难题,使得污泥内有机物更加高效充分地反应,而且通过混合旋流设计使得污泥不易堵塞和结垢,同时污泥输送阻力明显降低;另一方面,反应器为非压力容器,具有超高的安全可靠。反应温度为180~200℃,时间长达30~60 min,再配合氧化剂及高压作用,本工艺基本实现了病原菌的全部灭杀。另外,自清洁减阻换热反应技术和酸性分离液回用工艺,避免了污泥结垢、堵塞和高黏多相难输送等问题,工艺设备的可靠性和安全性大幅提高,且可实现余热的深度回收。某额定运行工况下换热器的温度分布如图2所示,换热器冷热两侧的污泥逆向流动,对数平均温差大约为20℃,在夏季工况下工艺过程无需外加热,在冬季工况下只需少量补热。

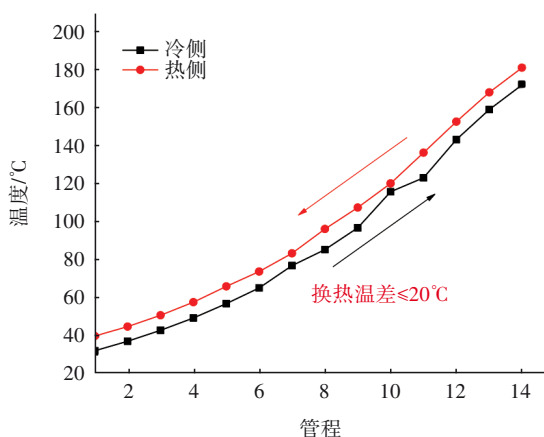


图2 换热器冷热侧污泥沿管程的温度变化

Fig.2 Change of sludge temperature along the hot and cold side of heat exchanger

2.2 物质和能量平衡分析

通过对宁波项目的试验样品进行多轮检测和

分析,得到SEUE-WAO工艺的物质和能量平衡图,如图3所示。

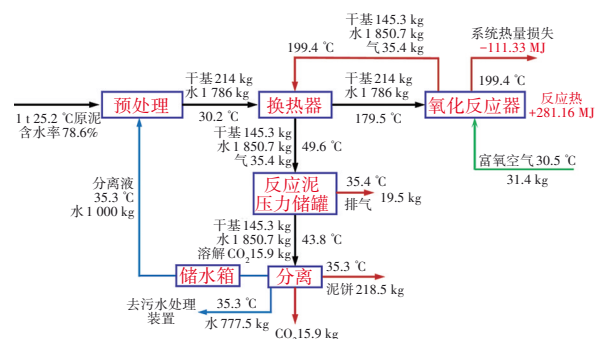


图3 SEUE-WAO工艺的物质和能量平衡示意

Fig.3 Diagram of mass and energy balance of SEUE-WAO process

原泥平均含水率为78.6%,有机物含量为45.0%,则1 t原泥中水的质量为786 kg,干基质量为214 kg,其中有机物的质量为96.3 kg,无机物的质量为117.7 kg。1 t原泥(25.2℃)与1 t分离液(35.3℃)进行混合后,制得2 t温度为30.2℃的调质污泥。调质污泥进入换热器与湿式氧化反应后的热污泥进行换热升温,由最初的30.2℃升温至179.5℃,随后进入氧化反应器与富氧空气混合进行氧化反应,有机物反应释放的热量约为281.16 MJ,其中换热反应器总体热损失约为111.33 MJ,其余热量可将污泥升温至199.4℃,稳定运行过程中,无需启动电加热器进行加热;反应后的热污泥进入换热器与冷的调质污泥进行换热冷却至49.6℃,而后进入反应泥压力储罐进行储存,反应泥压力储罐外表面与大气接触发生自然对流,使反应后污泥的温度进一步下降。

进入板框压滤机的污泥约为43.8℃,部分分离液进入储水箱,其温度将进一步降低,回流进行调质处理的分离液温度约为35.3℃;部分分离液进入污水处理系统。排气口设置在反应泥压力储罐顶部,由于散热其排气温度下降至35.4℃。一个月的运行数据统计显示,SEUE-WAO工艺的运行能耗主要为制氧机、泵、板框压滤机等设备的电耗,平均电耗≤60 kW·h/t(按湿泥计)。

湿式氧化反应生成的CO₂,一部分在带压的反应泥压力储罐中溶解于水中,一部分与碳酸钙生成碳酸氢钙,一部分与未反应的O₂和N₂等混合气体排出反应泥压力储罐,经气体分析仪检测,排气中的

CO₂浓度为45%~60%。反应后污泥进入机械脱水单元进行脱水,泥饼为218.5 kg,减量化达到78%。

2.3 污泥处理产物分析

污泥经湿式氧化处理后,其产物分为固相产物、液相产物和生成气。鉴于生成气主要包括CO₂、O₂、N₂,无NO_x等有害成分^[3-4],以下重点分析固相产物和液相产物。

2.3.1 固相产物分析

① 泥质和成分分析

原泥有机物含量为45.0%,经SEUE-WAO工艺处理后泥饼的有机物含量降至21.5%,含水率为33.5%,总养分为11%,含水率和总养分均达到了《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)标准中污泥用于园林绿化的要求(含水率<40%、总养分≥3%),说明污泥中氮、磷、钾等营养成分在处理过程中得到了有效的保留,有利于后续的资源化利用。富含养分的泥饼回归土壤,可解决贫瘠土地对营养的需求,可用于土地改良、园林绿化以及荒漠化治理、矿山植被修复、水土保持等多种生态保护的用途,变废为宝,形成生态循环,改善城市环境。

脱水泥饼的X射线衍射图谱见图4,在 $2\theta=27^\circ$ 附近出现了SiO₂的强衍射峰,污泥中含有SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₃O₄等无机化合物。污泥中微生物含有的蛋白质由于结晶性不强,在X射线衍射图谱中未发现典型的强衍射峰。

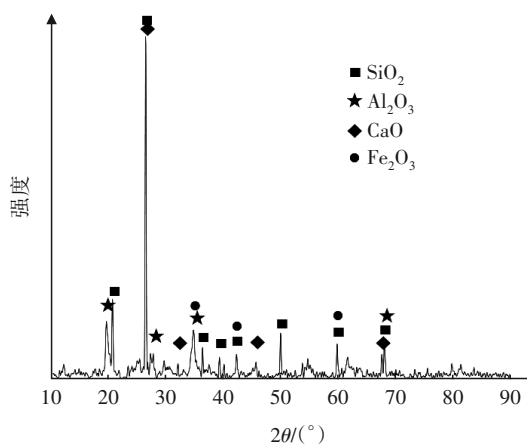


图4 脱水泥饼的X射线衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction pattern of dewatered sludge cake

脱水泥饼的傅里叶变换红外光谱见图5,在1 033.86 cm⁻¹处出现了较高的透射强度,此处为Si—O键伸缩振动吸收峰,803 cm⁻¹处为Si—O—Si

键对称伸缩振动吸收峰,在645.8 cm⁻¹处为Al—O键伸缩振动吸收峰,再次证明脱水泥饼中含有较多的SiO₂和Al₂O₃。红外光谱显示了C—H键的吸收峰,弥补了X射线衍射对低原子质量如C、H等元素的不确定性,证明了脱水泥饼中含有部分有机物,大部分为无机物,多种检测方法显示的结果基本一致。

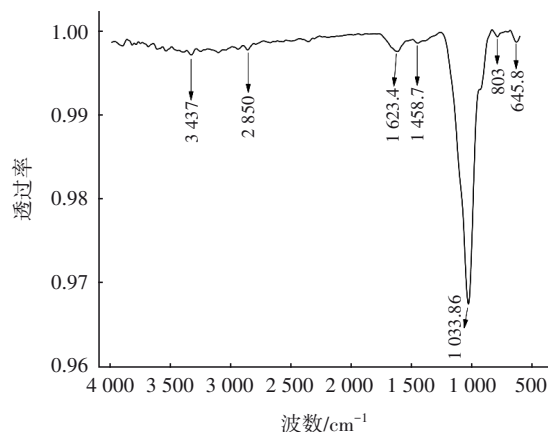


图5 脱水泥饼的红外光谱

Fig.5 Infrared spectroscopy of dewatered sludge cake

② 热稳定性分析

脱水泥饼的同步热分析曲线如图6所示(TG为热重,DTG为微商热重,DSC为差示扫描量热)。

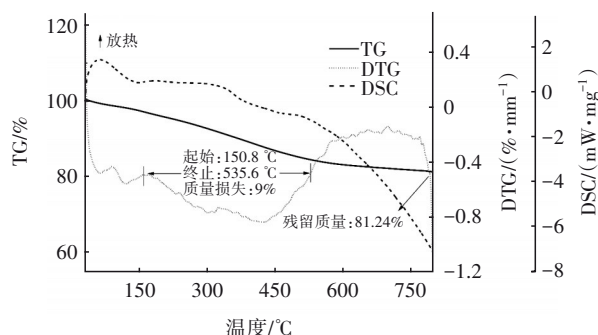


图6 脱水泥饼的热重分析

Fig.6 Thermogravimetric analysis of dewatered sludge cake

泥饼的DTG曲线可分为3个阶段:第1个阶段为30~150℃,第2个阶段为150~535℃,第3个阶段为535℃以上。第1个阶段为污泥中的游离水和吸附水脱附导致的质量损失,第2个阶段为污泥中的挥发分析出阶段,第3个阶段为焦炭燃尽阶段。DSC曲线整体表现为吸热,没有明显的吸热峰,说明脱水泥饼的吸放热较为稳定。总体上看,污泥的热重曲线非常平缓,从室温到800℃的质量损失为

18.76%,吸放热较为稳定,总体热稳定性良好,说明湿式氧化反应较为充分,易降解有机物得到充分反应,脱水后泥饼的稳定性较高。

③ 泥饼热值

经SEUE-WAO工艺处理后的污泥更易于脱水,无需加入任何药剂,采用板框即可将含水率降至35%以下,现场堆置1~2 d后,其含水率可继续降至15%~25%。氧化过程中通过调节氧气流量,可控制泥饼有机物的氧化程度,例如,当泥饼的有机物含量为20.6%时,含水率为20.5%,收到基低位热值为3 239.8 kJ/kg;而当泥饼的有机物含量为24.5%时,含水率为26.4%,收到基低位热值为3 612.4 kJ/kg,可以满足自持燃烧(3 493 kJ/kg)的需求。因此,通过调节氧化剂流量可控制泥饼的热值,如果处置路径为焚烧处理,则可通过低程度的湿式氧化得到高热值的泥饼。

④ 资源化利用

包装类纸板的无机填料主要为高岭土、滑石粉、碳酸钙等,这与脱水泥饼的无机物成分相近,同时脱水泥饼还含有羟基、羧基等在纸张成型过程中起到搭桥作用的基团。因此,脱水泥饼在理论上作为包装类纸板的填料是可行的。目前常用的造纸填料多为微米级填料,平均粒度约为0.1~10 μm ^[7]。经过绝干处理后的污泥粒径分布如图7所示。

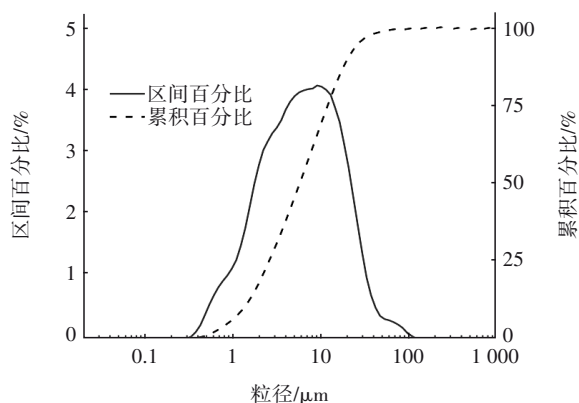


图7 绝干污泥的粒径分布

Fig.7 Particle size distribution of dried sludge

绝干污泥的粒径呈现正态分布,90%的粒径不超过20.25 μm ,中位粒径为5.79 μm ,其粒径分布与常用的造纸填料粒径分布相近,但分布范围较广。另外,污泥的重金属含量低于《城镇污水处理厂污泥泥质》(GB 24188—2009)中表2的限值,亦符合造纸填料的要求。因此,脱水泥饼符合造纸填料

的一般选用要求,是一种较好的综合型造纸填料。

采用文献[7]中的方法,将脱水泥饼作为填料制得若干纸板,纯纤维制得纸板的抗张强度为15.28 N·m/g,而添加35%泥饼制得纸板的抗张强度达到17.50 N·m/g,纸板强度更高。泥饼有机成分中主要包括纤维素和蛋白质类物质,可与纤维形成氢键,改善无机成分降低纸板机械性能的问题,提高纸制品的力学性能和填料的留着率。因此,将脱水泥饼用于造纸,不仅可节省木材资源和原材料成本,而且还可提高包装类纸板的强度。2020年我国瓦楞原纸产量达到 $2\,390\times 10^4$ t,泥饼的添加比例可为30%~50%,保守计算即采用30%的添加比例,则可消纳泥饼 717×10^4 t,折合成含水率80%的污泥为 $3\,259\times 10^4$ t,此举可大幅减少木材的砍伐,提升我国生态系统的碳汇能力,助力“碳达峰、碳中和”目标。

2.3.2 分离液分析

① 分离液的常规水质特征

SEUE-WAO工艺处理后污泥经机械脱水产生的分离液的水质特征如表1所示。可知,分离液的COD浓度一般在15 000~20 000 mg/L之间,属于高浓度有机废水,且BOD/COD>0.55,可生化性较好;但总氮浓度高于1 500 mg/L,且 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{TN}>0.36$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{TN}<0.05$,表明该分离液中除了含有大量氨氮外,还含有较多的有机氮。

表1 分离液水质特征

Tab.1 Water quality characteristics of separation

项目	liquid					
	mg·L ⁻¹					
	COD	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	TP
样品1	16 320	1 677	887	72.4	1	7.6
样品2	20 240	2 218	1 326	30.0	2	15.3
样品3	14 769	1 924	693	30.6	1	15.6
样品4	15 077	2 151	782	26.2	1	16.5

② 分离液与传统碳源的反硝化性能对比

鉴于分离液的生化性较好、碳氮比较高,具备作为碳源的部分特征,考察了其反硝化性能,并与常用碳源葡萄糖和乙酸钠进行对比,结果见表2。可知,乙酸钠的比反硝化速率整体高于葡萄糖,硝态氮浓度和C/N对其影响较小。葡萄糖的比反硝化速率则表现出较大差异,可以低至0.29 mg/(g·h),也可以达到9.42 mg/(g·h)。在本研究中,同等测试条件下,分离液的比反硝化速率略高于葡萄糖、但低于乙酸钠,和已有的研究结果^[8-11]基本一致。因

此,分离液作为污水处理的反硝化碳源有较强的可行性。

表2 分离液及传统碳源葡萄糖、乙酸钠的比反硝化速率

Tab.2 Specific denitrification rates of seperation liquid, glucose and sodium acetate

碳源	硝态氮/(mg·L ⁻¹)	工艺	C/N	温度/℃	污泥浓度/(mg·L ⁻¹)	比反硝化速率/(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	来源
乙酸钠	20.79	SBR	3~5	25	3 500(MLSS)	3.80	文献[8]
葡萄糖	19.65	SBR	3~5	25	3 500(MLSS)	0.29	
葡萄糖	40	批次	10	22~23	3 880(MLVSS)	2.09	文献[9]
乙酸钠	40	批次	4	22~23	3 830(MLVSS)	5.70	
乙酸钠	35	SBR	5.5~6	室温	2 800(MLVSS)	16.30	文献[10]
葡萄糖	99.6	批次	3	室温	2 610(MLSS)	9.42	文献[11]
葡萄糖	10	批次	8	20	4 715(MLSS)	0.93	本研究
乙酸钠	10	批次	8	20	4 715(MLSS)	2.72	
分离液	10	批次	8	20	4 715(MLSS)	1.03	
分离液	20	批次	8	20	4 715(MLSS)	1.10	
分离液	30	批次	8	20	4 715(MLSS)	1.28	

另外,分离液呈深棕色,稀释200~250倍后的颜色与自来水和蒸馏水接近,因此,若作为反硝化碳源使用,在不考虑增加其他去除色度的方法时,应控制投加比例,保证出水色度满足要求。

2.4 技术经济优势分析

① 无害化、减量化效果显著:泥饼含水率<35%,减量化可达到75%~80%,工艺温度为180~200℃,湿式氧化反应时间达到30~60 min,再配合氧化剂及高压作用,病原菌基本完全被杀灭。污泥处理全过程所需时间为2~3 h,处理时间短。

② 环境友好、产物可资源化利用:无化学药剂添加,污泥处理全过程密闭运行。泥饼可作为包装纸板类原料;分离液具有用作污水厂反硝化碳源的潜力。

③ 能耗低、运营成本低:工艺通过高效的污泥-污泥换热技术,深度回收反应热量;通过反应泥余压余热储存工艺回收分离液热量和利用压力能,大幅降低工艺能耗,包含制氧和污泥输送的工艺平均总能耗≤60 kW·h/t,相比传统工艺,具有明显的碳减排效果;本工艺直接运行成本为80~100元/t,低于现有低温真空干化的200~250元/t、厌氧消化+土地利用技术路线的250~350元/t^[12]、污泥干化焚烧的250~500元/t^[13]。如果污泥固相产物可用于包装类纸板材料的原料,则运行成本可进一步降低。

④ 高效安全、可靠性高:采用穿透混合旋流管式高效低阻湿式氧化反应技术,一方面克服了原有反应釜反应不均匀、不充分的难题,使得污泥中

的有机物能更加高效充分地反应,而且通过混合旋流的设计使得污泥不易堵塞、结垢,污泥输送阻力明显降低;另一方面,反应器为非压力容器,具有超高的安全可靠性能。自清洁减阻换热反应技术和酸性分离液回用工艺,避免了污泥结垢、堵塞和高黏多相难输送等问题。

⑤ 污泥处理规模为100 t/d时所需占地约为600~1 300 m²,如果处理规模增加,可进一步节省用地。

3 结论

① SEUE-WAO工艺通过高效安全自清洁低阻换热反应一体化技术,在高温、高压、富氧环境下可有效降解污泥中的有机物,同时深度回收湿式氧化反应热量,换热器平均换热温差≤20℃,电耗≤60 kW·h/t,无需添加任何化学药剂,病原菌基本全部被杀灭,泥饼含水率<35%,实现了污泥的无害化、稳定化和减量化。

② 污泥固相产物可用于园林绿化以及包装类纸板、陶粒和制砖等建材生产的原料添加物,也可用于焚烧或者掺烧;污泥脱水分离液具有用作污水处理反硝化碳源的潜力,不仅实现了污泥的全资源化利用,同时可有效提高工艺的经济性。

③ 该技术具有超低能耗、安全可靠性能高、环境友好、处理周期短、占地面积小、碳减排显著等优点,具有广阔的市场空间。

致谢:感谢中国水环境集团曹效鑫教授级高工在数据整理和文章撰写中的指导。

参考文献:

- [1] HII K, BAROUTIAN S, PARTHASARATHY R, *et al.* A review of wet air oxidation and thermal hydrolysis technologies in sludge treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 155: 289–299.
- [2] KELESSIDIS A, STASINAKIS A S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries [J]. *Waste Management*, 2012, 32(6): 1186–1195.
- [3] CHAUZY J, MARTIN J, CRETENOT D, *et al.* Wet air oxidation of municipal sludge: return experience of the North Brussels Waste Water Treatment Plant [J]. *Water Practice & Technology*, 2010, 5(1): wpt2010003.
- [4] BERTANZA G, GALESSI R, MENONI L, *et al.* Wet oxidation of sewage sludge: full-scale experience and process modeling [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 7306–7316.
- [5] 杨欢,陈阳,覃小刚,等. 基于连续式热态实验平台的污泥湿式氧化实验[J]. *动力工程学报*, 2019, 39(7): 576–584.
- YANG Huan, CHEN Yang, QIN Xiaogang, *et al.* Sludge wet air oxidation experiments in a continuous hot test bed [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2019, 39(7): 576–584 (in Chinese).
- [6] 陶明涛,张华. 污泥水热处理技术及其工程应用[J]. *北方环境*, 2012, 24(3): 211–214.
- TAO Mingtao, ZHANG Hua. Sludge hydrothermal treatment technologies and their engineering applications [J]. *Northern Environment*, 2012, 24(3): 211–214 (in Chinese).
- [7] 王婷婷,曹延芬,孙昊,等. 无害化污泥填料应用于造纸的可行性分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39(6): 989–993.
- WANG Tingting, CAO Yanfen, SUN Hao, *et al.* Feasibility study of utilizing treated harmless sludge as fillers in papermaking [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2021, 39(6): 989–993 (in Chinese).
- [8] 吴代顺,桂丽娟,陈晓志,等. 不同类型碳源及其投加量对污泥反硝化的影响研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2012, 31(3): 99–103.
- WU Daishun, GUI Lijuan, CHEN Xiaozhi, *et al.* Effects of different types and dosages of carbon sources on denitrification of activated sludge [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2012, 31(3): 99–103 (in Chinese).
- [9] 程喆,王晓昌,张永梅,等. 厨余发酵液与乙酸钠、葡萄糖脱氮性能的比较[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(1): 362–366.
- CHENG Zhe, WANG Xiaochang, ZHANG Yongmei, *et al.* Comparison between fermentation liquid of food-waste and sodium acetate, glucose on denitrification potential [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(1): 362–366 (in Chinese).
- [10] 李梦露,蒋建国,张昊巍. 餐厨垃圾水解酸化液作碳源的脱氮效果研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(4): 917–923.
- LI Menglu, JIANG Jianguo, ZHANG Haowei. Effect of kitchen waste hydrolysis products on domestic wastewater denitrification [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(4): 917–923 (in Chinese).
- [11] 付昆明,张晓航,刘凡奇,等. 葡萄糖碳源条件下C/N对反硝化和N₂O释放性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(4): 1279–1288.
- FU Kunming, ZHANG Xiaohang, LIU Fanqi, *et al.* Effect of C/N on denitrification and N₂O release with glucose as the carbon source [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(4): 1279–1288 (in Chinese).
- [12] 李雪怡,梁远,方小锋,等. 北京市污泥处理处置现状总结分析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(22): 38–42.
- LI Xueyi, LIANG Yuan, FANG Xiaofeng, *et al.* Summarization and analysis of sludge treatment and disposal in Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(22): 38–42 (in Chinese).
- [13] 李彪,周欣,高波,等. 顺义区污泥干化焚烧处理工程设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(14): 63–68.
- LI Biao, ZHOU Xin, GAO Bo, *et al.* Design of sludge drying incineration treatment process in Shunyi District [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(14): 63–68 (in Chinese).

作者简介:孟继安(1964—),男,湖北红安人,博士,研究员,主要研究方向为污泥湿式氧化处理。

E-mail:mja@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2022-05-13

修回日期:2022-08-12

(编辑:刘贵春)