

ICS XX.XXX.XX

CCS X XX

团体标准

T/CIECCPA XXX—202X

污泥处理厌氧碳转化、利用、固化 技术规范

(征求意见稿)

Technical specification for anaerobic carbon conversion, utilization
and solidification of sludge treatment

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布

СЛЕДСТВИЕ

目 录

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 污泥废水要求	3
6 总体要求	3
7 污泥处理厌氧碳转化、利用、固化技术	3
7.1 技术选择	3
7.2 污泥厌氧碳转化制备短链脂肪酸	4
7.3 污泥厌氧消化产能	5
7.4 污泥连续热水解	7
7.5 厌氧热解炭化	8
8 污泥厌氧碳转化产物回收及回用设计	8
9 技术效能评价及碳排放核算方法	9
9.1 污泥厌氧碳转化产物回用潜力评价	9
9.2 污泥厌氧碳转化、利用、固化技术总体效能评价	9
9.3 污泥厌氧碳转化、利用、固化过程碳排放的核算	11
10 二次污染控制要求	14
附 录 A（资料性） 污泥处理厌氧碳转化—利用—固化参考技术	15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：哈尔滨工业大学（深圳）、北京排水集团、哈尔滨工业大学、太原理工大学、北京交通大学、海天水务集团股份公司、联合环境技术（天津）有限公司、江苏坤升环境科技有限公司等。

本文件主要起草人：王爱杰、张树军、刘文宗、郭婉茜、费俊杰、李西齐、韩晓宇、王鸿程、周爱娟、阎怀国、史英君、蔡伟伟、高亚琳、王刚、李琨、张沙、王乾第、吴清莲等。

本文件为首次发布。

污泥处理厌氧碳转化、利用、固化技术规范

1 范围

本文件规定了污泥处理厌氧碳转化、利用、固化技术的术语和定义、核心工艺技术、碳排放核算。

本文件适用于城镇污水厂产生的剩余污泥、工业园区污水厂产生的富含有机质的物化或生化污泥。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 14554 恶臭污染物排放标准

GB 16297 大气综合排放标准

GB 18918 城镇污水处理厂污染物排放标准

GB/T 23484 城镇污水处理厂污泥处置分类

GB/T 31962 污水排入城镇下水道水质标准

GB 50014 室外排水设计标准

GB/T 50125 给水排水工程基本术语标准

DB34/T 3439 污泥高效节能炭化工艺技术规范

CJJ 131 城镇污水处理厂污泥处理技术规程

CJ/T 221 城市污水处理厂污泥检验方法

CJJ 60 城镇污水处理厂运行、维护及安全技术规程

T/CECS 496 城镇污水处理厂污泥厌氧消化技术规程

3 术语和定义

GB/T 50125-2010界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 剩余污泥 waste activated sludge

污水处理工艺中从二次沉淀池（或沉淀区）排出系统外的活性污泥，主要包括剩余活性污泥，也包括初沉污泥、部分物化污泥等混合污泥。

3.2 污泥发酵产酸 anaerobic fermentation for SCFAs production

剩余污泥在无氧条件下通过微生物分解代谢，大分子有机质转化为乙酸、丙酸、丁酸、戊酸等短链脂肪酸。

3.3 污泥厌氧碳转化 anaerobic carbon conversion

对污泥在厌氧条件下进行短期发酵或中长期消化，通过污泥微生物生化作用将污泥碳转化为脂肪酸、甲烷等其他形式的资源化碳产物的技术过程。

3.4 污泥连续热水解 continuous thermal hydrolysis

污泥在加温加压的条件下，污泥细胞发生破裂，从而污泥细胞水等得以释放，而且连续进出料、全过程没有相变、无药剂投加的深度脱水技术。

3.5 污泥热解炭化 pyrolysis carbonization

将脱水后的污泥进行间接绝氧加热，使污泥在高温下进行热解，固体产物冷却后成为污泥炭，热解产生的挥发性气体燃烧后提供炭化所需热量的工艺过程。

3.6 污泥碳转化产物利用 anaerobic carbon converted products utilization

对污泥厌氧处理产生的富含短链脂肪酸等有机物的发酵液进行回收并作为原位碳源应用于活性污泥法处理污/废水脱氮除磷的过程。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

SCFAs: 短链脂肪酸 (short chain fatty acids)

COD: 化学需氧量 (chemical oxygen demand)

BOD₅: 五日生化需氧量 (five-day chemical oxygen demand)

SCOD: 溶解性化学需氧量 (soluble chemical oxygen demand)

SS: 悬浮物 (suspended solids)

TN: 总氮 (total nitrogen)

TP: 总磷 (total phosphorous)

TDS: 总溶解性固体 (total dissolved solids)

MEC-AD: 微生物电解池型厌氧消化 (microbial electrolytic cell-anaerobic digestion)

DS: 干污泥 (dry sludge)

5 污泥废水要求

污泥废水经二级处理后的水质应以实际检测数据为准。无检测数据时，水质取值可参照表1。

表1 污泥泥质及水质

项目	pH	含水率 (%)			污泥清液指标 (mg/L)			
		剩余活性污泥	浓缩污泥	脱水污泥	COD	氨氮	TN	TP
城镇污水厂剩余污泥	6~9	96~99.5	94~96	65~85	<50	<5	<15	<0.5
工业园区污水厂剩余污泥	6~9	96~99.5	94~96	65~85	<500	<45	<70	<8

表2 污泥中重金属

项目	重金属 (mg/kg DS)							
	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Hg	As
城镇污水厂剩余污泥	0.04~20	51~1500	3.6~1000	217~3000	20~1000	16.4~200	0.04~15	0.78~75
工业园区污水厂剩余污泥	0.04~999	51~9592	3.6~1022	217~30098	20~6365	16.4~6206	0.04~17.5	0.78~269

6 总体要求

6.1 技术选择应遵循技术先进可行、成熟可靠、高效节能、二次污染少、系统运行稳定等原则。

6.2 应遵循全过程自动控制及安全管理,实现污泥减量化、碳排削减和污水厂内部碳源资源化循环利用。

6.3 污泥厌氧处理减碳技术系统的碳排放和效能评估应包含系统综合碳排放测定、外碳源替代成本节约评估、污泥总体减量评估、污泥连续热水解脱水水性改善评估以及污泥生物炭转化率评估等。

7 污泥处理厌氧碳转化、利用、固化技术

7.1 技术选择

7.1.1 污泥处理厌氧碳转化、利用、固化技术系统包括厌氧碳转化制备短链脂肪酸、厌氧消化产能、连续热水解深度脱水及污泥中碳的厌氧固定技术,

7.1.2 剩余污泥资源化厌氧处理前,应对污水厂剩余污泥的产量、水质、泥质及变化情况进行全面调查,并进行必要的分析检测和资源化潜力评估。

7.1.3 针对不同类型的剩余污泥进行厌氧转化制备短链脂肪酸和消化产能前,应根据污泥具体性质及水厂实际条件选择基于热水解、碱处理、冻融、电化学等技术的及其联合技术的预处理方式。

7.1.4 厌氧碳转化技术中短链脂肪酸厌氧发酵制备和消化产能的选择应根据水厂实际如脱氮、节能等方面的需求进行选择。

7.1.5 对污泥深度脱水技术的选择应根据出泥含水率要求进行技术、经济比较后选择。

7.1.6 剩余污泥（含消化和产酸发酵剩余污泥）碳固化制备污泥生物炭技术的选择应根据污泥性质进行必要调质、活化处理，然后进行厌氧高温热解条件和工艺的选择。

7.1.7 污泥厌氧碳转化碳源的回收和回补生化反硝化技术的选择时，应综合考量发酵污泥含水率、脱水性能等性质和发酵液 pH、SCOD、NH₃-N、TN、TDS 等水质，并进行必要的前处理。

7.1.8 技术选择可以根据水厂实际需求进行单一技术和复合技术系统的选择，具体如图 1 所示。

7.1.9 实际效能评估和碳排放的核算是必需的，本文件提供了可参考的效能评估和碳排放核算的方法。

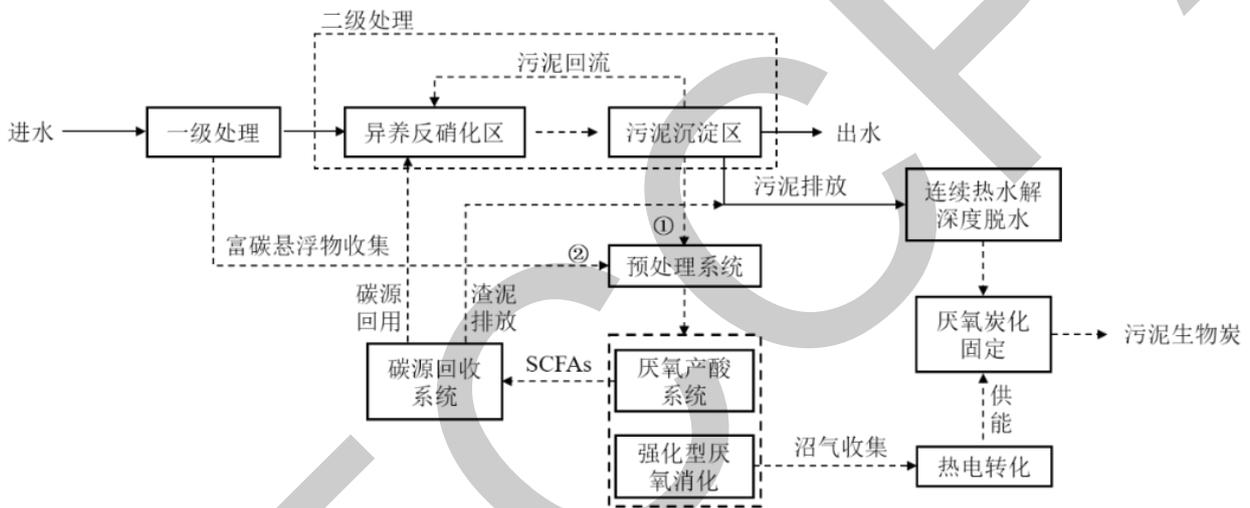


图1 污泥厌氧处理减碳技术系统工艺

7.2 污泥厌氧碳转化制备短链脂肪酸

7.2.1 常用的以提高有机质降解率和短链脂肪酸（SCFAs）产量为目的的剩余污泥预处理技术主要有间歇式热水解、冻融、碱与旋流联合等方法。具体宜根据污水厂污泥性质及需求情况进行选择，简易流程图如附录 A.1 所示。

7.2.2 污泥发酵产酸工艺一般分为中温发酵（30℃~35℃）和高温发酵（50℃~60℃），宜优先采用中温发酵，对于采用热水解强化预处理的宜采用高温发酵以利用余热。

7.2.3 污泥发酵产酸工艺一般分为批次、半连续及连续发酵工艺，宜采用半连续运行方式。

7.2.4 污泥自身 C/N 一般约 7，为强化蛋白质的降解和转化提升 SCFAs 产率，宜采用农业秸秆、餐厨垃圾等含碳废弃有机质对污泥进行调质，使 C/N 比处于 17~70。

7.2.5 污泥发酵产酸宜根据 SCFAs 的产物组成特性要求，适当调整厌氧发酵工艺的关键参数，包括 pH 值、碳氮比（C/N 比）、有机负荷率（OLR）等。发酵系统 pH 宜在 8~11。

7.2.6 对于厌氧发酵产酸系统，进料污泥含固率宜处于 5%-10%，搅拌速度设置为 30 rpm-60 rpm，发酵时间宜小于 7 天。

7.2.7 SCFAs 含量的检测可采用蒸馏后滴定法，具体参考 CJ/T 221-2005。宜采用高效液相色谱和气相色谱法检测。

7.2.8 对 SCFAs 进行提取和分离，有沉淀法、液液萃取法、电渗析法、膜分离法等，宜采用液液萃取和膜分离法。

7.3 污泥厌氧消化产能

7.3.1 污泥厌氧消化产能技术指利用水解发酵产酸菌、产乙酸菌和产甲烷菌等功能菌群的生化反应及相互作用，在厌氧条件下逐步实现污泥固体降解和沼气回收的技术。

7.3.2 传统厌氧消化的工艺流程：初沉污泥和剩余污泥按一定比例均质混合——离心脱水后储存在料仓中，经适当的含固率调整后进行厌氧消化，具体参考标准 CJJ 131。

7.3.3 高级厌氧消化工艺：针对污泥传统厌氧消化水解速率较慢问题，引入可加速污泥细胞破壁和强化水解的预处理技术，将污泥预处理后进行厌氧消化。常用高级预处理技术包括：

- （1）间歇式高温热水解，温度 160℃~180℃、保留时间 30~60 分钟；
- （2）微电压驱动的污泥厌氧消化，微电压小于 1V；
- （3）其他机械法预处理（超声、高压匀质、球磨及裂解离心等）、生物方法预处理（酶解法、双温度阶段法）、化学法预处理（酸、碱及高级氧化还原等）及热物理法（冻融、热水解等）。

7.3.4 污泥厌氧消化典型工艺参数，如表 3 所示：

表 3 污泥厌氧消化典型工艺参数

工艺类型	消化温度 (°C)	消化时间 (d)	污泥含水率 (%)	挥发性固体容 积负荷 kgVSS/(m ³ d)
常规浓度厌氧消化	33~38	20~30		重力浓缩污泥： 0.6~1.5； 机械浓缩污泥： 不应大于 2.3

高含固厌氧消化	33~38	20~30	90~92	1.6~3.5
	中温:			
基于高温热水解预处	37°C~42°C	15~20*	88~92	2.8~5.0
理的高含固厌氧消化	高温:			
	53°C~55°C			

*当与餐厨垃圾协同厌氧消化且餐厨垃圾未经高温热水解预处理时，消化时间应当延长

7.3.5 污泥厌氧消化系统检测指标：包括传统厌氧消化、热水解-厌氧消化等在内的厌氧消化系统常规监测指标包括：pH、含水率、TS、VS、TSS、VSS、COD、碱度、氨氮、总磷、总氮、重金属、脂肪酸及沼气组分（甲烷、氢气、二氧化碳、硫化氢等）等，具体的检测指标及标准分析方法如表 4 所示：

表 4 检测指标及分析方法

检测指标	分析方法名称	方法编号
pH	电极法	CJ/T 221-2005
TS, VS, TSS, VSS	重量法	CJ/T 221-2005
含水率	重量法	CJ/T 221-2005
总/可溶 COD	快速消解法	HJ/T 399—2007
总/可溶蛋白	凯氏定氮法	GB 5009. 5—2016
总/可溶多糖	苯酚硫酸法	GB/T 35818-2018
总脂肪	索氏提取法	GB/T14772—2008
碱度	指示剂滴定法	CJ/T 221-2005
氨氮	纳氏试剂分光光度法	HJ 535—2009
细菌总数	平皿计数法	CJ/T 221-2005
大肠菌群	多管发酵法	CJ/T 221-2005
蛔虫卵	集卵法	CJ/T 221-2005
重金属(镉、铬、汞、铅、 砷、镍、锌、铜、硼、钾)	消解后电感耦合等离子体发射光谱法	CJ/T 221-2005
总磷	氢氧化钠熔融后钼锑抗分光光度法	CJ/T 221-2005
总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	CJ/T 221-2005
脂肪酸	蒸馏后滴定法	CJ/T 221-2005
沼气组分 (CH ₄ 、H ₂ 、CO ₂ 、 H ₂ S 等)	气相色谱法	GB/T 8984-2008 GB/T 14678-93

注：可溶性有机物质的检测，如可溶性蛋白、可溶性多糖，污泥样品经过高速离心（10000 rpm，20 min）、过滤（微孔滤膜，0.45 μm）处理后，以上清液为样品进行测定。

7.3.6 对于微电压驱动的厌氧消化，需要监测的指标还要包括电流、电压，宜采用数据采集器自动记录，并采用电化学工作站进行电化学测试。生物膜内的氢气浓度测定宜采用氢气微电极。

7.3.7 厌氧消化产甲烷系统，进料污泥含固率最高不宜超过 30%，10%-15%为佳，搅拌速度为 30-60rpm，具体根据污泥状态调节，厌氧消化时间不宜少于 14 天。

7.3.8 厌氧消化产能系统应配套沼气收集装置，操作场所内严禁烟火。

7.3.9 沼气的收集、净化与贮存宜参考以下要求：

- (1) 收集系统具有除湿、防爆和防腐蚀特性。
- (2) 净化采用过滤器、脱硫塔等，可采用膜分离等对经净化的沼气进一步纯化。
- (3) 贮存有湿式气柜、干式气柜和膜式气柜；一般采用 3-5kPa 低压气柜，规模较大时采用 1MPa 高压气柜。多余的沼气应采用内燃式沼气燃烧器消耗。

7.3.10 沼液的收集与处理宜参考一下要求：

- (1) 收集系统管道和储罐须进行防腐蚀处理，小规模储罐采用厚壁 PE 桶，定期进行管道（尤其弯头处）和储罐沉积物清理，以防所含杂质及沉积物造成堵塞，常见的沉淀物有鸟粪石、蓝铁矿和碳酸钙。
- (2) 沼液的处理工艺包括：混凝沉淀、厌氧氨氧化、膜浓缩、氨汽提、鸟粪石除氮磷。

7.4 污泥连续热水解

7.4.1 污泥连续热水解深度脱水技术系统应包含污泥调质过滤环节、预热环节、连续热水解环节、冷却减压环节、污泥脱水环节。简易技术流程及技术参数如附录 A.3 所示。

7.4.2 污泥调质过滤环节包括对浓缩污泥或预脱水污泥进行稀释和均质，然后筛滤掉石砾等大的杂质。其中，进料污泥含水率宜在 85-90%，具体进料浓度可根据实际水厂的要求进行调设。

7.4.3 污泥进入热水解反应罐前宜进行预加热，利用裂解后污泥对冷污泥进行预热，实现系统内热回收，预热温度宜在 120-160℃。

7.4.4 连续热水解温度宜在 200-240℃，压力宜在 3-5 MPa，反应时间宜控制在 10 分钟左右。

7.4.5 连续热水解结束后宜经过减压单元卸去压力，同时，通过减压单元控制系统需要的压力。

7.4.6 连续热水解后污泥经预热单元回收热量后温度降低至 80℃，再由冷却器降温至 50℃以下。

7.4.7 污泥脱水方法宜根据实际水厂工艺和需求具体选择，宜采用板框压滤进行中高压脱水，无需要及调理，脱水后滤饼含水率低于 35%。

7.4.8 污泥脱水后滤液宜返回到污水处理系统进水。

7.4.9 污泥连续热水解深度脱水系统的具体工程设计宜参考 T/CECS20005 和 CJJ60。

7.5 厌氧热解炭化

7.5.1 污泥厌氧炭化固定技术系统宜包含污泥调质池、污泥干化设备、造粒机械、程控热解炭化炉、酸洗及水洗池、热解废气收集和处理设施。简易技术流程及技术参数如附录 A.4 所示。

7.5.2 污泥来源包括深度脱水污泥和厌氧处理发酵液回收系统脱水污泥。进料污泥的含水率宜不高于 85%，污泥干化宜采用热风干化，以循环利用余热。

7.5.3 污泥需进行活化处理，具体包括物理法（即利用高温水蒸气、 CO_2 、 O_2 等高温气体）、化学法（即利用 ZnCl_2 、 KOH 等化学药剂）以及物理-化学联合法。宜优先采用利用厌氧消化产能及连续热水解的热能的高温水蒸气活化的物理法；对于功能污泥炭材料宜采用 ZnCl_2 浸渍活化法，可参考专利 CN200810071503.2。

7.5.4 宜采用中高温炭化（ 400°C - 900°C ），具体热解温度经试验获得。升温速率宜采用慢速升温（ 0.1 - 10°C/s ），以减少焦油和合成气。

7.5.5 粗品生物炭宜经过酸洗去除灰分和金属氧化物等杂质，并水洗以平衡 pH 至中性。酸洗宜采用浓度不超过 3 mol/L 的盐酸。

7.5.6 干化生物炭宜储存于相对湿度不高于 60% 的环境，使用前宜经吸附性能专业测试，并重点进行重金属残留检测，检测方法宜参考 GB/T 12496.22。

7.5.7 可燃热解气含有大量甲烷、一氧化碳、氢气等，宜在 850°C - 950°C 下采用分级燃烧技术完全燃烧，产生的高温烟气回收用于炭化炉供能。

7.5.8 污泥炭化过程焦油等脱除、回收和利用方法宜参考专利 CN201810764432.8，CN201720369674.8 及 CN202110464743.4。

8 污泥厌氧炭转化产物回收及回用设计

8.1 回收及回用系统的设计主要针对围绕污泥厌氧发酵产酸系统构建的工艺系统，其目的为回收富含短链脂肪酸（SCFAs）的污泥发酵液用作生物脱氮除磷补充碳源。简易流程图如附录 A.2 所示。

8.3 发酵产物回收前宜采用混凝脱水的固液分离后进行分相处理。

8.4 固液分离宜采用有机高分子混凝剂，如聚丙烯酰胺（PAM）等，与低压脱水或微滤设备联用，以保留发酵产物种的碳源。

8.5 污泥厌氧转化碳源回用前需进行具体的水质项目检测，主要包括 SCOD、TN、pH、TDS 及重金属等指标，具体水质指标要求如表 7 所示。

8.6 回收碳源经检测达标后，宜经反硝化潜力小试评估后使用。

8.7 碳源宜采用液态连续流回用至生化处理异养反硝化区，如需贮存或运输，装置应做防腐并控温不超过 10℃。

表7 污泥厌氧转化碳源用于生物脱氮除磷时回用碳源品质

水质项目	单位	指标	
		城镇生活污水厂	污水处理上游场站
pH	—	6.5~9.0	6.5~9.5
SCOD/TN	mg/L	>15	>15
TDS	g/L	<20	<30
重金属	mg/L	GB/T 31962-2015	
其他	mg/L	GB/T 31962-2015	

9 技术效能评价及碳排放核算方法

9.1 污泥厌氧碳转化产物回用潜力评价

9.1.1 污泥厌氧处理转化碳源的回用潜力评估需污水厂化验室宜配备紫外可见分光光度计、程式马弗炉、调温烘干箱、磁力搅拌器及分析天平等仪器，另配常规量器及必备耗材。

9.1.2 潜力评估试验宜采用回用区生化污泥进行反硝化小试模拟，模拟采用批次试验，按时间分段取样测定系统 COD 和 TN 含量的变化。

9.1.3 回用碳源的脱氮潜力采用反硝化污泥系统单位时间单位污泥量脱除单位 TN 消耗回用碳源的 COD 进行评价，记为 $\Delta C/\Delta N$ ，量纲为 $mgCOD \cdot mgTN^{-1}gVSS^{-1}$ 。

9.1.4 碳源回用前宜采用上述潜力评估试验所得 $\Delta C/\Delta N$ 对回用发酵液中伴存的 TN 脱除所需碳源量进行近似扣除。

9.2 污泥厌氧碳转化、利用、固化技术总体效能评价

9.2.1 在生物脱氮除磷方面的效能，根据水厂实际监测出水 TN、TP 的指标变化进行总体评价。

9.2.2 在外部碳源降耗方面，根据实际减少量进行评价。参考核算过程如下：

$$\Delta SCOD = SCOD_{end} - SCOD_{ori}$$

$$\Delta TSS = TSS_{ori} - TSS_{end} \quad (9-1)$$

式中，

$\Delta SCOD$ —— 产酸发酵系统溶解性 COD 增量

T/CI ECPA XXX—202X

$SCOD_{ori}$ —— 产酸发酵系统初始溶解性 COD

$SCOD_{end}$ —— 产酸发酵系统发酵结束时溶解性 COD

ΔTSS —— 产酸发酵系统污泥减量

TSS_{ori} —— 系统初始污泥浓度

TSS_{end} —— 系统发酵结束时污泥浓度

$$\varphi = \frac{\Delta SCOD}{\Delta TSS} \times 100\%$$
$$\delta = \frac{m \cdot TSS \cdot \varphi - TN \cdot V \cdot \Delta C / \Delta N}{COD_{CS}} \quad (9-2)$$

式中,

φ —— 厌氧处理碳源转化率

δ —— 潜在外部碳源替代比例

m —— 污泥产量

$\Delta C / \Delta N$ —— 碳源回补反硝化脱氮系统系数

TN —— 回收发酵液中总氮浓度

V —— 回收发酵液总量

COD_{CS} —— 污水厂实际使用外碳源折合 COD 含量

9.2.3 污泥总体减量效能采用厌氧处理减碳技术系统应用前后出厂污泥总固含量的削减进行评估, 具体如下:

$$\Delta TSS = TSS_{ori} - TSS_{end}$$

$$\Delta m = m \cdot \Delta TSS$$

$$\sigma = \frac{\Delta m}{W \cdot TSS_{ori}} \times 100 \quad (9-3)$$

式中,

Δm —— 出厂污泥减量

σ —— 污泥总体减量比

9.2.4 连续热水解深度脱水技术系统的效能评估板框压滤后污泥饼的含水率的削减进行评估。

9.2.5 污泥炭化技术系统的效能评价采用污泥碳固化为生物炭的转化率 $\eta(\%)$, 具体如下:

$$\eta = \frac{m_{SBC}}{m_{DS}} \times 100\% \quad (9-4)$$

式中，

η —— 污泥炭化系统碳固化率（%）

m_{SBC} —— 成品污泥基生物炭的干重

m_{DS} —— 热解炭化前干污泥的总重

9.3 污泥厌氧碳转化、利用、固化过程碳排放的核算

9.3.1 本文件涉及碳排放核算边界应包含污泥厌氧碳转化制备短链脂肪酸、污泥厌氧消化产能、污泥连续热水解和污泥热解炭化的直接碳排放、间接碳排放和碳补偿。

9.3.2 污泥处理厌氧碳转化、利用及固化过程碳排放核算方法

(1) 直接排放，根据 IPCC 第四次评估报告提供的参考，CO₂ 的全球变暖潜能值为 1，CH₄ 和 N₂O 的全球变暖潜能值为 25 和 298。本标准中厌氧消化产能过程产生 CH₄ 被回收利用属于碳补偿，直接排放量为 0。

(2) 污泥发酵产酸 CH₄ 逸散排放

$$E_{CH_4, \text{厌氧消化}} = m \times C_L \times \varphi_1 \times \rho_2 \times G_{CH_4} \quad (9-5)$$

式中，

$E_{CH_4, \text{厌氧消化}}$ —— 污泥厌氧消化 CH₄ 逸散碳排放量，kg

m —— 污泥产量干重（以 DS 计）

C_L —— 产 CH₄ 因子（以 DS 计），341 m³ t⁻¹

φ_1 —— 污泥厌氧消化 CH₄ 逸散率，5%

ρ_2 —— CH₄ 密度 0.72 kg m⁻³

G_{CH_4} —— CH₄ 的全球增温潜势，25

(3) 污泥厌氧消化 CH₄ 回收

收集厌氧消化产生的 CH₄ 气体可用 CHP 技术加以高效利用，甲烷浓度越高，可回收利用产生的电能也会越高，本文 CH₄ 单位体积产电量取 2.30 kW h m⁻³。

$$R_{\text{厌氧消化}} = m \times C_L \times (1 - \varphi_1) \times C_D \times EF_{\text{电}} \quad (9-6)$$

式中，

T/CI ECPA XXX—202X

$R_{\text{厌氧消化}}$ —— 厌氧消化碳补偿量, kg

C_L —— 厌氧消化产 CH_4 因子 $341 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$

φ_1 —— 污泥厌氧消化 CH_4 逸散率, 5%

$\text{EF}_{\text{电}}$ —— 电力排放因子, 0.5839

(4) 污泥连续热水解

$$Q_S = (T_2 - T_1) \times C_S \times m \times 10^{-3} \quad (9-7)$$

式中,

Q_S —— 污泥固体升温所需热量, GJ

T_1 —— 污泥初始温度, $^{\circ}\text{C}$

T_2 —— 水解温度, $^{\circ}\text{C}$

C_S —— 污泥比热容, $3.62 \text{ kJ} (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$

m —— 污泥产量干重 (以 DS 计)

$$M_W = \left(\frac{m}{1-w_1} - \frac{m}{1-w_2} \right) \times 10^3$$

$$Q_W = C_W \times \frac{mw_1}{1-w_1} \times (T_2 - T_1) \times 10^{-6} + Q_g \times M_W \times 10^{-6} \quad (9-8)$$

式中,

M_W —— 污泥干重减量 (以 DS 计), kg

Q_W —— 污泥中水分吸收的热量, GJ

w_1, w_2 —— 污泥处理前、后含水率

C_W —— 水的比热容, $4.2 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$

Q_g —— 水在 100°C 时的汽化潜热, $2260 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

m —— 污泥产量干重 (以 DS 计), kg

$$E_{\text{热水解}} = (Q_S + Q_W) \times 50\% \times \text{EF}_{\text{热}} \times 10^{-3} \quad (9-9)$$

式中,

$E_{\text{热水解}}$ —— 热水解过程碳排放量, kg

$EF_{热}$ —— 热力排放因子, 110

(5) 污泥热解炭化

污泥中热解合成气中成分主要为 CO_2 、 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等。 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等可燃气体成分可燃, 污泥热解气体可以燃烧进行, 最终产物为 CO_2 和 H_2O , 因此, 热解过程中生成的 CH_4 不计入温室气体排放量, 以最后燃烧生成的 CO_2 计算。总体上, 将污泥中未被热解炭化固定的碳充分氧化转化为 CO_2 的情况核算, 如下:

$$E_{CO_2,热解} = (m \times C_0 - m_{biochar} \times C_{biochar}) \times O_F \times \frac{44}{12} \times 10^3 \quad (9-10)$$

式中,

$E_{CO_2,热解}$ —— 污泥热解 CO_2 排放量, kg

m —— 污泥产量干重 (以 DS 计)

$m_{biochar}$ —— 污泥生物炭干重

C_0 —— 干污泥中的碳比例, 宜采用元素分析法

$C_{biochar}$ —— 污泥生物炭中碳比例, 宜采用元素分析法

O_F —— 氧化因子, 100%

(6) 电能、热能和药剂碳排放核算公式

间接排放的计算一般采用排放因子法, 用活动消耗数据与对应的量化单位活动排放量的经验系数 (排放因子) 相乘得到碳排放量。如下所示:

$$E = D \times EF \quad (9-11)$$

式中,

E —— 碳排放量, kg

D —— 耗电量、耗热量或耗药量

EF —— 对应的排放因子, 具体参考值如表 6 所示

表 6 活动消耗及其对应排放因子

活动消耗 (D)	排放因子 (EF)
电力	$0.5839 \text{ kg} \cdot (\text{kW h})^{-1}$
热力	110 kg GJ^{-1}
药剂 (PAM)	25 kg kg^{-1}

药剂 (FeCl₃)8.3 kg kg⁻¹

药剂 (CaO)

1.4 kg kg⁻¹

10 二次污染控制要求

应配套建设二次污染的预防设施，保证综合废水处理过程产生的废水、废气、恶臭、废渣、噪声及二次污染物的防治与排放符合 GB 50014、GB 16297、GB 14554、GB 18918、GB 12348 等相关环保标准要求。

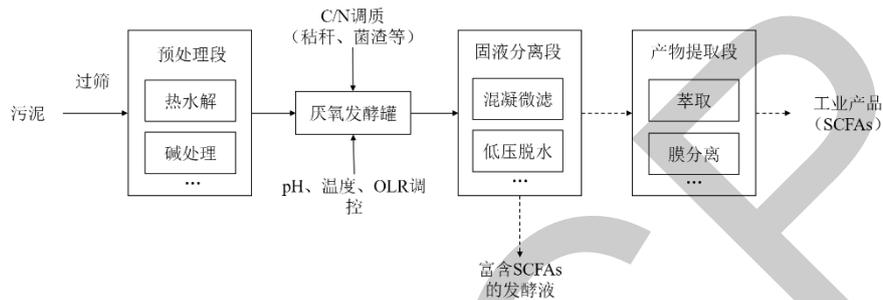
附录 A

(资料性)

污泥处理厌氧碳转化—利用—固化参考技术

A.1 污泥厌氧碳转化制备短链脂肪酸技术系统

A.1.1 工艺流程



A.1.2 工艺参数

——热水解温度：60~180 °C

——厌氧发酵pH值：8~11

——厌氧发酵温度：30 °C~35 °C（中温）；50 °C~60 °C（高温）

——厌氧发酵氧化还原电位（ORP）：-400~100 mv

——C/N比：17~70

——膜分离组件：微滤或超滤

A.2 污泥厌氧转化碳源回收和原位利用系统

A.2.1 工艺流程

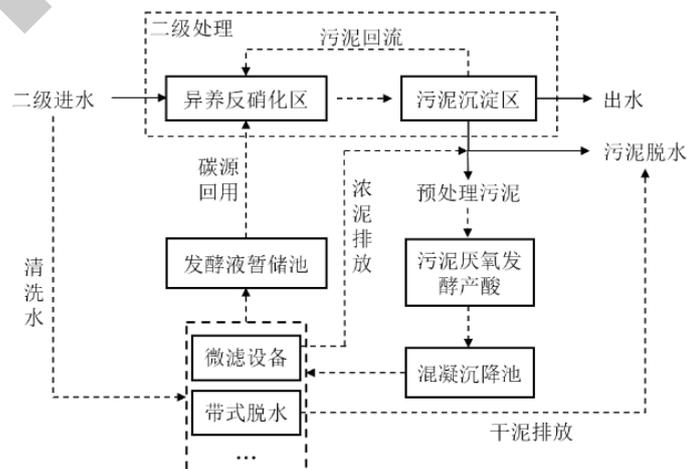


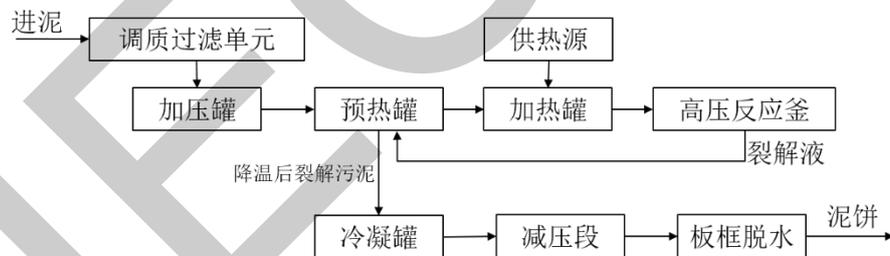
图 A.1.3 污泥厌氧转化碳源回收及原位利用流程示意图

A.2.2 工艺参数

- PAM浓度：0.15-0.2%
- PAM投加量：5.0-7.5 mg/gTSS
- 混凝搅拌速率：100~150 rpm
- 混凝搅拌时间：5 min~10 min
- 沉降浓缩时间：5~10 h
- 平膜微滤微滤膜表面污泥负荷：5 m³/(m² h)~10 m³/(m² h)
- 发酵液储存池温度：有条件长期存储的小于10 °C，无条件的直接室温使用
- 碳源回用后的生化系统内回流：200-400%
- 碳源回用后的生化系统外回流：75%-80%

A.3 污泥连续热水解深度脱水技术系统

A.3.1 工艺流程

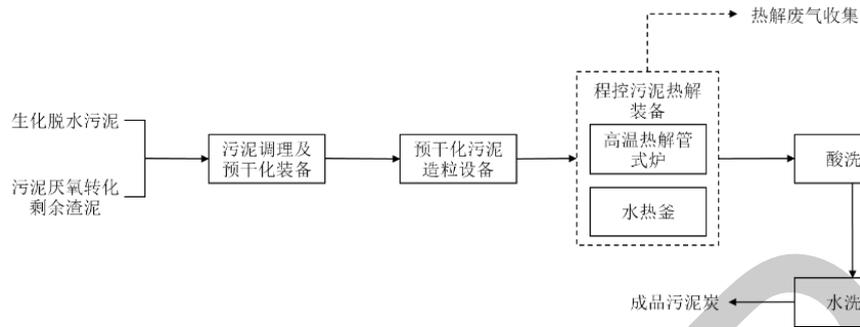


A.3.2 工艺参数

- 调理后污泥含水率：85%-90%
- 预热后出料温度：120-160 °C
- 连续热水解反应温度：200-240 °C
- 热水解反应时间：10 min
- 经热交换器出泥温度：< 80 °C
- 冷却器出泥温度：< 50 °C
- 脱水污泥含水率：≈ 35%

A.4 污泥厌氧炭化碳固定技术系统

A.4.1 工艺流程



A.4.2 工艺参数

- 进料污泥含水率：<85%
- 预干化污泥含水率：<30%
- 热解前污泥粒径：<20 mm
- 热解温度1：管式炉热解温度400 °C-900 °C
- 热解温度2：水热釜热解温度150 °C-250 °C，操作压力2-3.5 MPa
- 酸洗盐酸浓度：2-3 mol/L
- 水洗pH终点：6.8-7.0