

石化剩余污泥的酶解预处理技术研究

章继龙*

(中国石化集团资产经营管理有限公司扬子石化分公司水厂,江苏南京210048)

摘要:酶对剩余污泥进行预处理能加速厌氧消化。采用 α -淀粉酶、枯草杆菌蛋白酶、中性蛋白酶及其复合酶系处理石化剩余污泥。结果表明,酶的最优投加量为40 mg/(g TSS),筛选出2种效果最佳的单酶并按比例复合,结果发现, $m(\alpha$ -淀粉酶): m (中性蛋白酶)为1:3时,35℃作用16 h后,SCOD增加至3 775.84 mg/L,氨氮质量浓度增加至292.09 mg/L,磷质量浓度增加至2.83 mg/L,VS去除率提高至32.3%。为提高剩余污泥厌氧消化效率、促进剩余污泥减量提供了行之有效的预处理方法。

关键词:剩余污泥;酶解;厌氧消化;复合酶;减量化

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)05-0191-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.05.039

Study on enzymatic hydrolysis pretreatment technology for petrochemical excess sludge

ZHANG Ji-long*

(Water Plant of Yangzi Petrochemical Branch Company, Sinopec Group Asset Management Co., Ltd., Nanjing 210048, China)

Abstract: Using enzyme to pre-treat with excess sludge can accelerate anaerobic digestion. α -Amylase, subtilisin, neutral protease, and their complex enzymes are used to treat with petrochemical excess sludge. It is found that the optimal dosage of enzyme is 40 mg per gram of TSS. Complex enzymes achieve much better anaerobic digestion effect to excess sludge than any single enzyme. Two kinds of single enzyme with better effect are screened out to form complex enzymes that are used to treat with excess sludge. As $m(\alpha$ -amylase): m (proteinase)=1:3, SCOD has increased to 3 775.84 mg·L⁻¹, NH₃⁺-N concentration has increased to 292.09 mg·L⁻¹, phosphorus concentration has increased to 2.83 mg·L⁻¹ and the removal efficiency of VS has increased to 32.3% after 16 h of reaction at 35℃.

Key words: excess sludge; enzymatic hydrolysis; anaerobic digestion; complex enzyme; reduction

我国剩余污泥产量大,急需对其进行稳定化、无害化和资源化处理和处置。厌氧消化是目前应用最为广泛的污泥处理方法,但水解是污泥厌氧消化的限速步骤,因此,探索促进污泥水解的预处理技术具有重要意义^[1]。基于污泥胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substance, EPS)的化学组成,相对于超声破碎^[2]、臭氧处理^[3]等物理和化学预处理方法,酶预处理法不仅能够提高污泥的可生化性、缩短消化时间,而且具有容易控制、不产生二次污染等优点^[4]。Donosobravo等^[5]研究发现脂肪酶的投加显著提升了甲烷产量。Yang等^[6]分别将蛋白酶与淀粉酶投加至剩余污泥中,结果表明,在酶的作用下VSS减少量分别达到39.7%和54.2%。由此可见,酶预处理技术能够显著提高污泥减量效率。笔者分析比较了枯草杆菌蛋白酶、 α -淀粉酶、中性蛋白酶及其复合酶作用下溶胞效果,考察了不同酶系对剩余污泥预处理效果的影响。

1 材料和方法

1.1 污泥性质

石化剩余污泥的基本性质如表1所示。

表1 石化剩余污泥的基本性质

指标	SCOD	NH ₄ ⁺ -N	P	VSS
数值/(mg·L ⁻¹)	678.85	64.75	0.612	21.65

1.2 分析项目及实验仪器

1.2.1 分析项目

SCOD:采用密封消解重铬酸钾法测定;磷质量浓度:采用钼酸铵分光光度法进行测定;氨氮:采用水杨酸-次氯酸钠法测定。所测水相样品为1 200 r/min离心6 min取上清过滤后的水样。

1.2.2 实验仪器

HYG-A型回转恒温调速摇瓶柜;Anke TDL-40B离心机;PerkinElmer Lambda 25紫外分光光度计;

收稿日期:2020-06-23;修回日期:2021-03-19

作者简介:章继龙(1971-),男,硕士,工程师,主要从事PTA化工废水运行管理及研究,通讯联系人,zhangjl.yzsh@sinopec.com。

LDZX-30KBS 高压灭菌锅。

1.3 实验方法

1.3.1 单酶预处理实验

选取枯草杆菌蛋白酶(PT)、中性蛋白酶(NP)、 α -淀粉酶(α -A)、纤维素酶(CL)、半纤维素酶(HCL),考察酶解对污泥的处理效果。

取 200 mL 污泥于 250 mL 锥形瓶中,按 20、40、60 mg/(g TSS)计,将 0.09、0.18、0.27 g 不同酶制剂分别溶于 10 mL 蒸馏水中,摇匀待酶制剂溶解,分别将其添加至锥形瓶中混合均匀,在 35℃ 下反应 8 h 以探究剩余污泥性能。

1.3.2 复合酶预处理实验

将 3 种酶两两匹配,按 1:1、1:2、1:3、2:1、3:1 质量比混合,在各个比例下的投加质量(g)分别为 0.135:0.135、0.09:0.18、0.067 5:0.202 5、0.18:0.09、0.202 5:0.067 5。将不同复合酶添加至装有 200 mL 剩余污泥的锥形瓶中,混合均匀。探究 35℃-8 h、35℃-16 h 和 50℃-16 h 3 个条件下的酶解效果。

1.3.3 中试实验

以某石化剩余污泥为处理对象。基于酶筛选试验中所获结果,选择 $m(\alpha\text{-淀粉酶}):m(\text{中性蛋白酶})=1:3$ 的复合酶系作为促进污泥减量的酶制剂。首先进行缺氧水解反应,向水解池中投加复合酶系,促进污泥水解。缺氧反应后的泥水混合物直接进入厌氧消化池,以进料量调节污泥停留时间,运行过程中的污泥停留时间和废水停留时间保持一致。

2 结果与分析

2.1 单一酶对石化剩余污泥的水解作用

2.1.1 SCOD 溶出效果分析

SCOD 是评价污泥水解速率的重要指标,因为 SCOD 表征的是与污泥后续厌氧消化相关的可被直接利用并降解的有机物^[7]。石化剩余污泥中有机物主要以固态形式存在,酶水解促进剩余污泥胶团聚解和微生物细胞破碎,导致有机物大量溶出。不同质量分数酶液处理后污泥 SCOD 质量浓度如表 2 所示。由表 2 可知,在 35℃ 下反应 8 h 后,枯草芽孢杆菌的 SCOD 溶出效果最优,且 SCOD 随着酶质量分数的增加而增加,当酶质量分数为 60 mg/(g TS) 时,SCOD 达 2 313.03 mg/L;其次对 SCOD 溶出具有良好效果的是 α -淀粉酶。酶质量分数的增加导致污泥中 SCOD 质量浓度提升但增幅趋于一致,此时,体系内有机质的水解速率与酶解溶出效率保持一

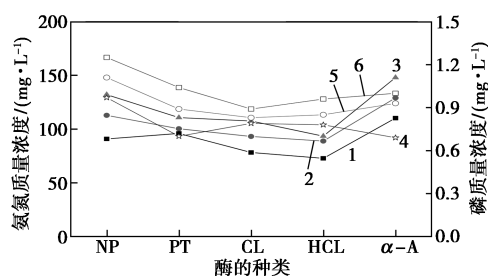
致。这与唐冶^[8]的研究结果一致。对于石化剩余污泥,各酶对 SCOD 质量浓度的提升效果为:枯草杆菌蛋白酶>淀粉酶>中性蛋白酶。

表 2 各质量分数酶液处理后污泥 SCOD 含量

酶种类	酶质量分数/(mg·g ⁻¹ TS)		
	20	40	60
NP	1200.00	1374.09	1744.89
PT	1813.78	2074.87	2313.03
CL	1184.90	1230.41	1251.99
HCL	1167.01	1174.95	1241.03
α -A	1569.34	1795.62	2016.07

2.1.2 氨氮和磷溶出效果分析

实验表明,大分子的胞外聚合物可在淀粉酶的水解作用下不断水解成有机酸、氨、二氧化碳等小分子物质^[9],从而有效提高了氨氮质量浓度。酶质量分数对氨氮质量浓度和磷质量浓度的影响如图 1 所示。由图 1 可知,污泥上清中氨氮质量浓度与酶质量分数呈正相关,酶质量分数越高,氨氮溶出越多,细胞破碎越彻底。各酶对氨氮溶出能力大小为: α -淀粉酶>中性蛋白酶>枯草杆菌蛋白酶>纤维素酶>半纤维素酶。当 α -淀粉酶质量分数为 60 mg/(g TS) 时,污泥上清中氨氮质量浓度最高,为 147.96 mg/L。同时,当温度为 35℃ 时,中性蛋白酶的释磷能力相对较好,当酶质量分数为 60 mg/(g TS) 时,污泥上清中磷质量浓度为 1.25 mg/L,而其他 4 种酶的释磷能力没有明显差异。



1—20 mg/(g TS)-N; 2—40 mg/(g TS)-N; 3—60 mg/(g TS)-N;
4—20 mg/(g TS)-P; 5—40 mg/(g TS)-P; 6—20 mg/(g TS)-P

图 1 氨氮质量浓度和磷质量浓度的变化趋势

2.1.3 TS 去除分析

不同酶作用下污泥的 TS 去除率如表 3 所示。由表 3 可知,在 35℃ 条件下,不同种类酶质量分数与污泥 TS 去除率都是成正相关,相较于其他几种酶,当枯草杆菌蛋白酶质量分数为 60 mg/(g TS) 时,污泥

TS 去除率最高,达 32.1%;中性蛋白酶、半纤维素酶和 α -淀粉酶对污泥 TS 的去除效果没有显著差异;而纤维素酶对污泥 TS 的去除效果相较而言比较差。对污泥 TS 去除的促进作用从强到弱的排序为:枯草芽孢杆菌> α -淀粉酶>半纤维素酶>中性蛋白酶>纤维素酶。同时,虽然相较于 60 mg/(g TS),质量分数为 40 mg/(g TS)时污泥 TS 去除率有所下降,但是在实际应用中,在达到处理效果的基础上,要切实考虑处理成本,因此,最佳酶质量分数为 40 mg/(g TS)。

表 3 不同酶作用下污泥的 TS 去除率 %

酶种类	酶质量分数/(mg·g ⁻¹ TS)		
	20	40	60
NP	21.53	23.09	27.10
PT	26.86	28.05	32.11
CL	10.06	10.40	18.70
HCL	14.67	19.17	27.23
α -A	22.16	23.18	27.37

2.2 复合酶投加的酶解效果

根据上述单酶实验结果筛选出 3 种酶制剂,包括 α -淀粉酶、枯草杆菌蛋白酶、中性蛋白酶。同时结合经济性分析,选择 40 mg/(g TS)为复合酶系投加量,对 3 种酶制剂进行两两组合,研究复合酶系处理后对水解过程中其他指标的影响。其中,3 种酶两两组合后分别按 1:0、1:1、1:2、1:3、2:1、3:1、0:1 质量比进行混合。反应条件分别为 35℃-8 h、35℃-16 h 和 50℃-16 h。

2.2.1 α -淀粉酶:中性蛋白酶复合酶系对剩余污泥的作用效果

(1) SCOD 溶出效果

α -淀粉酶:中性蛋白酶复合酶系在不同实验条件下上清液中 SCOD 的溶出情况如表 4 所示,原泥上

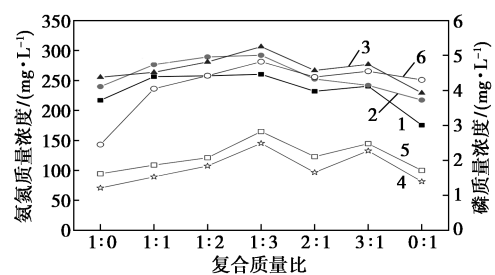
表 4 不同质量比(α -淀粉酶:中性蛋白酶)复合酶系处理后 SCOD 含量 (mg·L⁻¹)

$m(\alpha\text{-淀粉酶}):$ $m(\text{中性蛋白酶})$	35℃-8 h	35℃-16 h	50℃-16 h
1:0	1795.62	2361.94	2837.02
1:1	1904.37	2439.99	3058.69
1:2	1975.76	2732.78	3374.63
1:3	2046.37	3184.53	3775.78
2:1	1919.33	2275.51	3337.78
3:1	2005.56	2412.76	2937.02
0:1	1374.09	1665.93	1825.39

清液 SCOD 质量浓度为 568.02 mg/L。由表 4 可知,SCOD 的溶出率随着中性蛋白酶质量分数的增加而增加,而淀粉酶对 SCOD 溶出量的影响较小,但 50℃下淀粉酶质量分数的增加明显地促进了 SCOD 的溶出。当 $m(\alpha\text{-淀粉酶}):m(\text{中性蛋白酶})$ 为 1:3、温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,SCOD 溶出效果最佳,为 3 775.84 mg/L。当反应温度为 35℃,SCOD 溶出效果最佳的试验条件为: $m(\alpha\text{-淀粉酶}):m(\text{中性蛋白酶})$ 为 1:3 和反应时间为 16 h,此时,SCOD 为 3 184.53 mg/L。即当淀粉酶:中性蛋白酶投加质量比为 1:3 时,中温或 50℃反应 16 h SCOD 都达到同比最高值。

(2) 氨氮和磷溶出效果

α -A:NP 复合酶系在不同条件下厌氧消化剩余污泥后氨氮变化情况如图 2 所示,其中温度越高,消化时间越长,氨氮溶出越明显。当 $m(\alpha\text{-A}):m(\text{NP})$ 为 1:3、反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,氨氮质量浓度最高,为 306.48 mg/L; $m(\alpha\text{-A}):m(\text{NP})$ 为 1:3、反应温度为 35℃、反应时间为 16 h 时,氨氮质量浓度为 292.09 mg/L。因此,与单酶作用相比,复合酶显著提升了氨氮的溶出质量浓度。同时由图 2 可知,温度升高对磷溶出的影响较大。相较于原泥中总磷质量浓度(0.63 mg/L),当 α -A:NP 复合比为 1:3、反应温度为 35℃、反应时间为 16 h 时,污泥中总磷质量浓度达 2.83 mg/L;反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,污泥中总磷质量浓度达 4.82 mg/L。



1—35℃-8 h-N; 2—35℃-16 h-N; 3—50℃-16 h-N;
4—35℃-8 h-P; 5—35℃-16 h-P; 6—50℃-16 h-P

图 2 氨氮质量浓度和磷质量浓度变化趋势

(3) TS 去除分析

以 TS 为评价参数,考察不同条件下污泥的减量性能,结果如表 5 所示。由表 5 可知,当 $m(\alpha\text{-淀粉酶}):m(\text{中性蛋白酶})=1:3$ 、反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,污泥 TS 去除率最高,为 34.6%。而复合比为 1:3、反应温度为 35℃、反应时间为 16 h 时,污泥 TS 去除率为 32.3%。比较 2 组数据可

知,35℃条件下污泥 TS 去除率只略低于 50℃时的污泥 TS 去除率,但 35℃所需热量却明显低于 50℃时所需热量。

表 5 不同质量比(α -淀粉酶:中性蛋白酶)复合酶系处理后污泥 TS 去除率 %

$m(\alpha\text{-淀粉酶}):$ $m(\text{中性蛋白酶})$	35℃-8 h	35℃-16 h	50℃-16 h
1:0	23.18	25.87	26.77
1:1	25.68	27.68	29.28
1:2	27.94	29.94	31.34
1:3	30.28	32.28	34.57
2:1	29.02	29.02	30.02
3:1	28.13	28.45	30.32
0:1	23.09	24.99	28.09

2.2.2 α -淀粉酶:枯草杆菌蛋白酶复合酶系对剩余污泥的作用效果

(1) SCOD 溶出效果分析

淀粉酶:枯草杆菌蛋白酶复合酶系处理后 SCOD 的质量浓度变化情况如表 6 所示。由表 6 可知,在 α -A:PT 复合酶系、最佳复合比 $m(\alpha\text{-A}):m(\text{PT})$ 为 1:3 时,污泥 SCOD 溶出效果最优。在 35℃、反应时间为 16 h、 $m(\alpha\text{-A}):m(\text{PT})=1:3$ 时,SCOD 为 3 522.75 mg/L。根据复合酶体系作用结果分析发现,随着反应时间的延长,酶促反应进行更加充分,污泥中微生物细胞壁大量破解,较难生物降解的复杂有机物被分解为小分子物质,溶出的有机质质量浓度得到显著升高,不断转化为液相中的可溶性物质。

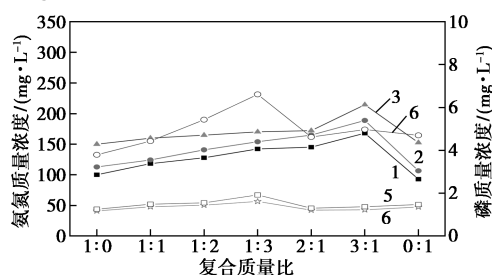
表 6 不同质量比(淀粉酶:枯草杆菌蛋白酶)复合酶系处理后 SCOD 的质量浓度变化情况 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

$m(\alpha\text{-淀粉酶}):$ $m(\text{中性蛋白酶})$	35℃-8 h	35℃-16 h	50℃-16 h
1:0	1795.62	2361.94	2837.02
1:1	2221.22	2676.28	3195.80
1:2	2832.03	3095.27	3631.91
1:3	3216.83	3522.75	3887.64
2:1	2395.02	2839.55	3501.28
3:1	1980.06	2902.91	3671.15
0:1	2074.87	3095.18	3428.57

(2) 氨氮和磷溶出效果分析

氨氮质量浓度和磷质量浓度随复合酶复合质量

比的变化情况如图 3 所示。由图 3 中可以看出,在 α -A:PT 复合酶系中, $m(\alpha\text{-A}):m(\text{NP})$ 为 3:1 时,氨氮溶出效果最佳,当反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,氨氮质量浓度为 214.45 mg/L;反应温度为 35℃、反应时间为 16 h 时,氨氮质量浓度为 188.79 mg/L。与 SCOD 增幅相比,氨氮质量浓度增幅明显较低。研究表明^[10],碳水化合物和蛋白质的可生物降解率分别为 52% 和 39%,说明蛋白质的可生物降解性较差。另外,文献[11]表明,在中性或碱性环境中都不利于氮磷的释放,而本实验测得污泥环境为中性偏碱,不属于氮磷溶出的有利环境。同时,结合 SCOD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分析发现,磷质量浓度的变化趋势与 SCOD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 一致。其中最佳释磷投加量为 $m(\alpha\text{-A}):m(\text{PT})=1:3$,此时磷质量浓度为 6.61 mg/L。



1—35℃-8 h-N;2—35℃-16 h-N;3—50℃-16 h-N;
4—35℃-8 h-P;5—35℃-16 h-P;6—50℃-16 h-P

图 3 氨氮质量浓度和磷质量浓度随复合酶复合比的变化情况

(3) TS 去除分析

TS 的降解速率直接反应污泥的减量程度, α -淀粉酶:枯草杆菌蛋白酶复合酶系处理后污泥 TS 去除率如表 7 所示。由表 7 可知,当 $m(\alpha\text{-淀粉酶}):m(\text{中性蛋白酶})$ 为 1:3 时,与 α -淀粉酶/中性蛋白酶复合酶系相同,最佳反应条件仍然为 50℃ 和 16 h,此时污泥 TS 去除率为 40.8%。当反应温度为

表 7 不同质量比(α -淀粉酶:枯草杆菌蛋白酶)复合酶系处理后污泥 TS 去除率 %

$m(\alpha\text{-淀粉酶}):$ $m(\text{中性蛋白酶})$	35℃-8 h	35℃-16 h	50℃-16 h
1:0	23.18	24.54	27.02
1:1	26.21	28.18	30.43
1:2	27.01	30.87	34.31
1:3	32.35	36.67	40.79
2:1	29.22	32.72	35.42
3:1	30.62	33.66	34.82
0:1	28.05	31.12	33.04

35℃、反应时间为 16 h 时,污泥 TS 去除率为 36.7%,略低于 50℃时所获结果。

2.2.3 枯草杆菌蛋白酶:中性蛋白酶复合酶系对剩余污泥的作用效果

(1) SCOD 溶出效果分析

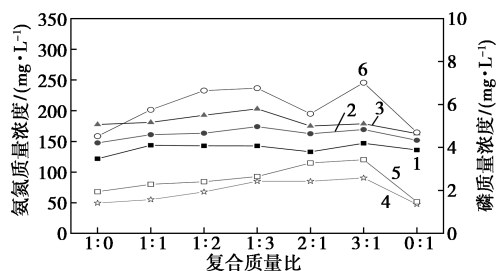
枯草杆菌蛋白酶:中性蛋白酶复合酶系处理后 SCOD 质量浓度的变化情况如表8所示。由表 8 可知,当 $m(\text{枯草杆菌蛋白酶}):m(\text{中性蛋白酶})=3:1$ 、反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,SCOD 溶出效果最佳,为 4 150.94 mg/L;反应温度为 35℃、反应时间为 16 h 时,SCOD 质量浓度为 3 924.51 mg/L。与前面 2 种复合酶系相比,PT:NP 复合酶系更能促进污泥破碎,提高 SCOD,同时在该复合酶系中,枯草杆菌蛋白酶对 SCOD 溶出的促进效果要比中性蛋白酶强。

表 8 不同质量比(枯草杆菌蛋白酶:中性蛋白酶)复合酶系处理后 SCOD 质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

$m(\text{枯草杆菌蛋白酶}):m(\text{中性蛋白酶})$	35℃-8 h	35℃-16 h	50℃-16 h
1:0	2074.87	3095.18	3428.57
1:1	2508.40	3477.34	3668.69
1:2	2640.69	3587.74	3827.53
1:3	2869.03	3727.60	3996.57
2:1	3337.54	3456.82	4056.26
3:1	3699.58	3924.51	4150.94
0:1	1374.09	1665.93	1825.39

(2) 氨氮和磷溶出效果分析

在 PT:NP 复合酶系中,氨氮质量浓度和磷质量浓度随 PT:NP 复合质量比的变化趋势如图4所示。由图 4 中可以看出,在 $m(\text{PT}):m(\text{NP})$ 为 1:3、反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,氨氮溶出效果最佳;而最低点是在 PT:NP 复合质量比为 1:0。中性蛋白酶在该复合酶系中对氨氮溶出的贡献率要高于



1—35℃-8 h-N;2—35℃-16 h-N;3—50℃-16 h-N;
4—35℃-8 h-P;5—35℃-16 h-P;6—50℃-16 h-P

图 4 氨氮质量浓度和磷质量浓度变化趋势

枯草杆菌蛋白酶。同时由图 4 可知,当 $m(\text{PT}):m(\text{NP})=3:1$ 、反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 条件下,磷质量浓度达到最高,为 6.76 mg/L。而与前 2 种复合酶系相比,PT:NP 复合酶系能在 50℃ 下更有效地促进剩余污泥的磷溶出。

(3) TS 去除分析

枯草杆菌蛋白酶:中性蛋白酶复合酶系处理后污泥 TS 去除率如表9所示。由表 9 可知,当 $m(\text{枯草杆菌蛋白酶}):m(\text{中性蛋白酶})=3:1$ 、反应温度为 50℃、反应时间为 16 h 时,污泥 TS 去除率最高,为 38.9%。而在相同复合比下,虽然 35℃ 温度下反应 16 h 时 TS 去除率略低于 50℃,但是 35℃ 的温度相较于 50℃ 减少了热能消耗,因此,在后续实验中,首选酶解温度为 35℃。

表 9 不同质量比(枯草杆菌蛋白酶:中性蛋白酶)复合酶系处理后污泥 TS 去除率 %

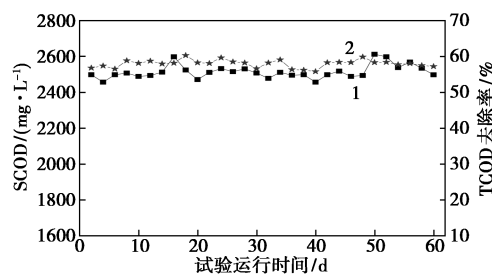
$m(\text{枯草杆菌蛋白酶}):m(\text{中性蛋白酶})$	35℃-8 h	35℃-16 h	50℃-16 h
1:0	28.05	31.12	33.04
1:1	30.08	33.25	34.31
1:2	30.93	34.82	35.27
1:3	31.28	35.02	36.03
2:1	31.85	35.27	36.95
3:1	32.13	36.23	38.97
0:1	23.09	25.31	28.09

通过单酶和复合酶的作用效果对比可以发现,复合酶作用效果始终高于单酶,这是由于剩余污泥是多种大量聚合物絮凝体形成的菌胶团——胞外多聚物(EPS)组成,污泥中有机质需进入微生物细胞才能参与微生物代谢转化过程,因此实现微生物的溶胞破解与 EPS 的快速水解成为剩余污泥预处理的主要目的。研究表明,单一酶对底物有选择性,只能针对特定有机物产生降解效果,水解专一性较强^[12],且单一酶容易被诱捕、吸附或束缚到污泥固体分子中,造成酶活下降^[13]。而复合酶系能够对剩余污泥中多种组分进行同步降解,扩充了底物选择性,从而可在短时间内使污泥大幅度溶解,细胞破碎,有机物溶出,从而促进剩余污泥的减量。

3 中试实验

基于单酶及复合酶筛选实验中所获结果,结合酶解效果与经济性,选择 $m(\alpha\text{-淀粉酶}):m(\text{中性蛋白酶})=1:3$ 的复合酶系,按照 40 mg/(g TS) 投加量

进行污泥消化中试试验,厌氧消化系统运行阶段 SCOD 溶出及 TCOD 去除率变化趋势如图 5 所示。由图 5 可知,在加酶条件下,消化装置运行 2 个月期间,污泥 TCOD 去除率稳定在 58% 左右。且污泥 SCOD 一直稳定在 2514 mg/L 左右,说明酶显著促进了污泥的破解,使溶出物大幅提升。



1—SCOD 质量浓度;2—TCOD 去除率

图 5 厌氧消化系统运行阶段 SCOD 溶出及 TCOD 去除变化趋势

4 结论

(1) 在单一酶的作用下,α-淀粉酶的释氮能力最佳;中性蛋白酶的释磷能力最佳;枯草杆菌蛋白酶溶出 SCOD 的能力最佳。结合经济性分析,优选 TSS 酶添加量为 40 mg/g。

(2) 同等外部条件下,复合酶的作用效果比单一酶的作用效果要好,在 $m(\alpha\text{-淀粉酶}):m(\text{中性蛋白酶})=1:3$ 复合酶系作用下,各指标达到最佳,石化剩余污泥的水解效果最好。

(3) 将复合酶系添加至中试反应装置中发现,复合酶系的添加促进了剩余污泥的厌氧消化效果,剩余污泥 TCOD 去除率为 58% 左右。

参考文献

- [1] 辛晓东.酶溶剩余污泥发酵产酸效能与机制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [2] 徐慧敏,何国富,戴晓虎,等.超声联合碱解预处理对剩余污泥破解和厌氧消化的影响[J].环境工程学报,2017,11(5):3073-3078.
- [3] 裴晋.臭氧/热水解与厌氧消化组合工艺对制药污泥产甲烷性能与抗药基因去除研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [4] 马欣.生物酶法提取剩余污泥蛋白质的研究[D].天津:天津理工大学,2017.
- [5] Donosobravo A, Fdzpolanco M. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and grease trap: Assessment of enzyme addition[J]. Process Biochemistry, 2013, 48(5-6): 936-940.
- [6] Yang Q, Luo K, Li X M, et al. Enhanced efficiency of biological excess sludge hydrolysis under anaerobic digestion by additional enzymes[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(9): 2924.
- [7] 胡凯.污泥预处理—厌氧消化工艺性能及预处理过程中有机物变化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:214.
- [8] 唐治,耿宇聪,李强,等.外加酶对剩余污泥水解与厌氧消化的影响实验研究[J].中国沼气,2015,33(4):31-35.
- [9] Shanableh A, Joma S. Production and transformation of volatile fatty acids from sludge subjected to hydrothermal treatment[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(10): 129-135.
- [10] Feng Leiyu, Yan Yuanyuan, Chen Yingguang. Kinetic analysis of waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids production at pH 10[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(5): 589-594.
- [11] 苑宏英,张华星,陈银广,等.pH 对剩余污泥厌氧发酵产生的 COD、磷及氨氮的影响.环境科学,2006,27(7):1358-1361.
- [12] Zhou J, Wang Y H, Chu J, et al. Optimization of cellulose mixture for efficient hydrolysis of steam-exploded corn stover by statistically designed experiments[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(2): 819-825.
- [13] Wawrzynczyk J, Recktenwald M, Norrlov O, et al. The function of cation-binding agents in the enzymatic treatment of municipal sludge[J]. Water Research, 2008, 42: 1555-1562. ■

巴斯夫、Quantafuel 和瑞曼迪斯有望就塑料废弃物的化学回收开展合作

近日,巴斯夫、Quantafuel 和瑞曼迪斯 (REMONDIS) 签署了一项谅解备忘录,将联合评估化学回收合作业务,包括共同投资建设一座塑料废弃物热解装置。根据备忘录,瑞曼迪斯作为世界领先的废弃物和水资源管理公司将向该座工厂提供合适的塑料废弃物;巴斯夫则将把该装置生产的热解油用作一体化基地的生产原料,进一步推进“化学循环”项目 (ChemCycling™); Quantafuel 则将为该热解装置提供技术支持并负责运营。Quantafuel 作为混合塑料废弃物热解和热解油提纯的专家,与巴斯夫共同开发并持有废弃物热解及热解油提纯技术。三方还将共同评估热解装置的选址事宜。

欧洲每年产生近 2 000 万 t 塑料废弃物无法回收。作为机械回收的补充解决方案,化学回收将有助于将更多塑料废弃物纳入材料循环系统中。否则,这些废弃物将被焚烧。热解技术可用于处理那些因技术或经济原因而未能被

机械回收的塑料废物。

协议三方将共同确定瑞曼迪斯所提供的哪些塑料废弃物可进行化学回收,从而最大程度地实现塑料循环经济。

欧盟及各国在国家层面上的立法将为化学回收建立框架机制,从而决定其在多大程度上可为塑料循环经济做出贡献,其中包括将基于化学回收原料制成的产品计入回收含量目标。

巴斯夫一体化基地将使用从塑料废弃物中提取的热解油进行生产,从而节省了同等数量的化石资源。由于在化工价值链的初始阶段便开始使用热解油,因此最终销售的产品将与采用化石原料生产的产品具备完全相同的特性。最终产品所用的回收材料份额将根据第三方认证的质量平衡方法进行分配,巴斯夫亦可借此向客户提供标有 Cycled™ 的认证产品。(张兆莱)