

碳源不足的城市污水 Highsludge[®] 高浓度活性污泥去除研究

周克钊¹ 段余杰² 邬甘霖³ 熊易华¹ 罗万申¹ 李堂发¹

张学兵¹ 张明杰¹ 万志健³ 程 鹏¹ 何 俊⁴

(1 中国市政工程西南设计研究院,成都 600018; 2 深圳市水污染治理指挥部办公室,深圳 518036;

3 深圳市罗芳污水处理厂,深圳 518003; 4 四川大学,成都 610064)

摘要 Highsludge[®] 高浓度活性污泥工艺采用兼氧-好氧组合流程,最显著的特点是活性污泥浓度高和好氧段溶解氧低。对该工艺处理碳源不足的城市污水进行了中试研究,结果表明:Highsludge[®] 高浓度活性污泥工艺可以在进水碳源不足条件下,保证很好的 TN 去除效果,在进水 TN 不高于 59.2 mg/L 的条件下,出水 TN 低于 15 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。试验分析了 TN 去除情况与各工艺运行参数的相关关系,发现 MLSS 和 DO 是控制出水 TN 最关键的参数。同时试验发现,高浓度活性污泥条件下,普通沉淀池可以正常运行,剩余污泥产量较少但会产生较多的生物泡沫。

关键词 城市污水 污水处理工艺 高浓度活性污泥 低溶解氧 脱氮 碳源

0 引言

Highsludge[®] 城市污水高浓度活性污泥低溶解氧短时深度除氮工艺,在兼氧—好氧组合的 MLE 流程^[1,2]基础上,采用高浓度活性污泥和低溶解氧的技术手段,在相当短的水力停留时间内达到了较高的总氮去除效果,同时有效去除氨氮、总磷和其他污染物,剩余污泥量较少,节约运行成本。

本工艺试验研究是深圳市罗芳污水处理厂深度处理及回用工程一期改造中试的部分内容,既进行了碳源充足的沉砂池出水试验^[3],也进行了碳源不足的 AB 法中间沉淀池出水试验。

2007 年 11 月 20 日~12 月 13 日和 2008 年 7 月 6 日~10 月 31 日,共进行了 3 次碳源不足的高浓度活性污泥试验(以下简称“高泥”),作为对比,期间还进行了 1 次常规浓度活性污泥试验(以下简称“常泥”)和 1 次常规偏高浓度活性污泥试验(以下简称“中泥”)。

出水水质以《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)中的观赏性景观环境用水河道类标准为目标,其中 BOD₅、总氮、氨氮、色度等指标,与《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准相同。TN 的去除是试验的难点和重点。

1 试验概况

1.1 工艺流程和试验装置

中试模拟一期工程 AB 法 B 段的现有工艺,但为了强化脱氮效果,不再采用原 A²/O 或 MUCT 流程,将最前端的厌氧区改为兼氧区,成为兼氧—好氧组合的 MLE 流程(见图 1)。

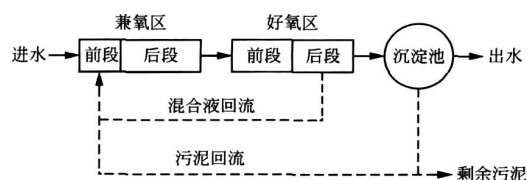


图 1 试验工艺流程

由图 1 可见,兼氧区和好氧区皆分别分为前后两段,分别占生化池总体积的 15%、31%、27%、27%,其中兼氧区共占 46%,好氧区共占 54%。中试规模 2×300 m³/d。进水来自一期工程 AB 工艺的中间沉淀池。

1.2 检测与化验

现场化验由污水处理厂承担,按照国家相关标准,与污水处理厂的日常检测化验工作一并进行。现场测定各池水温、DO、好氧池 SV,每天 1 次,瞬时样。化验进出水的 pH、COD_{Cr}、BOD₅、SS、TN、NH₃-N、TP,每日 8:00~20:00 每小时取样 1 次,

混合样。化验好氧区后段混合液和回流污泥的 MLSS、MLVSS、SVI,每天 1 次,瞬时样。

2 运行与分析

试验期间的主要运行参数见表 1。由表 1 可见,试验期间的 HRT 控制在 6.38~6.45 h。

表 1 不同活性污泥浓度条件下的主要运行参数

运行参数		常泥	中泥	高泥 1	高泥 2	高泥 3
HRT/ h		6.43	6.38	6.42	6.45	6.46
水温/		29.8	23.6	28.7	29.0	29.2
气水比		5.95	6.20	4.53	5.81	5.69
SRT/ d		3.20	6.63	11.12	16.05	11.12
污泥性能	MLSS/ mg/L	3 844	5 509	6 005	6 688	6 942
	MLVSS/ mg/L	1 125	2 540	2 175	2 057	2 207
	MLVSS/ MLSS	0.29	0.46	0.36	0.31	0.32
	SVI/ mL/g	51	114	134	110	133
碳氮比	COD/ TN	5.78	5.58	5.50	4.89	4.58
	BOD/ TN	2.39	2.76	2.31	2.11	2.13
溶解氧	兼氧区前段/ mg/L	0.68	0.37	0.46	0.68	0.66
	兼氧区后段/ mg/L	0.29	0.20	0.21	0.36	0.28
	好氧区前段/ mg/L	1.69	2.83	1.31	1.30	1.12
	好氧区后段/ mg/L	2.77	3.70	1.91	2.56	2.39
污泥负荷	TN/ kg/ (kgMLSS · d)	0.032	0.028	0.014	0.020	0.022
	NH ₃ —N/ kg/ (kgMLSS · d)	0.022	0.020	0.011	0.012	0.014
	BOD ₅ / kg/ (kgMLSS · d)	0.072	0.073	0.034	0.041	0.044
沉淀池	表面负荷/ m ³ / (m ² · h)	1.27	1.28	1.27	1.27	1.27
	沉淀时间/ h	2.35	2.34	2.35	2.36	2.37
	堰口负荷/ m ³ / (m · h)	1.17	1.18	1.17	1.17	1.16
	固体负荷/ kg/ (m ² · d)	343	521	542	600	623

常泥试验的 MLSS 控制在 3 844 mg/L,中泥试验控制在 5 509 mg/L,高泥试验则控制在 6 005~6 942 mg/L。MLVSS 则普遍明显偏低。常泥试验的 SVI 很低,中泥和高泥试验的 SVI 较高,超过 100 mL/g,但污泥沉降性能良好,出水清澈。

试验水温较高,平均在 23.6~29.8。进水碳氮比显著偏低,COD/ TN 为 4.58~5.78,远低于 ≥ 8 的要求,BOD/ TN 为 2.11~2.76,远低于 ≥ 4 的要求,表明进水碳源严重不足。

总回流比平稳,为 3.07~3.50。波动原因是当进水流量增大时,总回流量却受到回流泵的限制而无法增大,使得总回流比减小。另外,其间回流混合液泵发生故障,也造成了总回流比降低。

气水比略高,平均在 4.53~6.20,与进水浓度和

水温等因素有关,与试验装置的有效水深较浅(3 m)也有一定关系。

DO 普遍偏低,好氧区后段的最高 DO 为 1.91~3.70 mg/L,常泥和中泥试验均略高于高泥试验。

TN 负荷平均在 0.014~0.032 kg/ (kgMLSS · d),常泥和中泥试验大于高泥试验,均远低于《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,以下简称“规范”)推荐的 ≤ 0.05 kg/ (kgMLSS · d)。

NH₃—N 负荷均相当低,平均在 0.011~0.022 kg/ (kgMLSS · d),常泥和中泥试验高于高泥试验。

BOD₅ 负荷平均在 0.034~0.073 kg/ (kgMLSS · d),常泥和中泥试验高于高泥试验,均在规范推荐的 0.05~0.15 kg/ (kgMLSS · d) 的下限。

SRT 普遍偏低,平均在 3.20~16.05 d,其中常泥和中泥试验,均低于规范推荐的 11~23 d,短于高泥试验。

沉淀池表面水力负荷和沉淀时间适中,平均为 1.27~1.28 m³/ (m² · h),2.34~2.37 h,均在规范推荐的 0.6~1.5 m³/ (m² · d),1.5~4.0 h 范围内。堰口负荷很小,平均在 1.16~1.18 m³/ (m · h),均远低于规范推荐的 ≤ 6.12 m³/ (m · h)[即 1.7 L/ (m · s)]。

沉淀池固体负荷很高,平均为 343~623 kg/ (m² · d),均数倍于规范推荐的 ≤ 150 kg/ (m² · d),其中中泥和高泥试验的固体负荷更是特别高。

3 处理效果

试验期间的进出水水质的统计结果见表 2,其中进出水 TN 参见图 2。

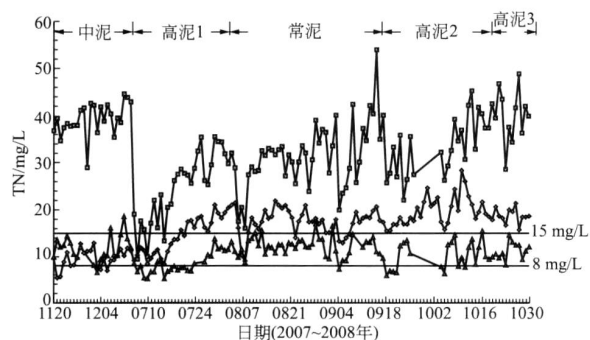


图 2 试验进出水 TN 浓度

由表 2 可见,进水 pH 平均 7.48~7.79,已经满足出水 6~9 的要求,出水 pH 平均 7.30~7.77。进水 pH 呈弱碱性,有利于生物硝化,出水 pH 仍呈弱

表2 试验期间主要进出水水质

项目		pH	COD _{Cr} /mg/L	BOD ₅ /mg/L	SS /mg/L	TN /mg/L	NH ₃ -N /mg/L	TP /mg/L
常泥	进水	7.61	174	71	162	31.45	22.64	3.18
	出水	7.54	15	2.6	6	12.16	0.85	0.86
中泥	进水	7.73	219	108	126	39.24	27.12	4.94
	出水	7.63	23	5.3	10	11.82	2.24	0.98
高泥1	进水	7.79	131	53	78	24.59	18.01	2.13
	出水	7.77	12	2.2	5	8.39	2.26	0.79
高泥2	进水	7.57	164	73	137	33.96	21.75	3.20
	出水	7.50	17	2.1	6	10.20	0.46	1.33
高泥3	进水	7.48	180	83	187	39.91	25.90	4.12
	出水	7.30	17	2.3	6	11.29	0.58	1.45
出水要求	景观环境	6~9	—	10	20	15	5	1
	一级A	6~9	50	10	10	15	5	0.5

注:“—”表示无要求。

碱性,说明处理过程中反硝化充分,使得碱度充分恢复。

进水 COD_{Cr}、BOD₅、SS 分别为 131~219 mg/L、53~108 mg/L、78~187 mg/L,出水分别为 12~23 mg/L、2.1~5.3 mg/L、5~10 mg/L,均基本满足景观环境和一级 A 标准的要求。

进水 TN 和 NH₃-N 分别为 24.59~39.91 mg/L、18.01~27.12 mg/L,浓度很高且变化大,出水分别为 8.39~12.16 mg/L、0.46~2.26 mg/L,去除效果很好且比较稳定。

进水 TP 平均 2.13~4.94 mg/L,出水平均 0.79~1.45 mg/L,去除效果不理想,但可在深度处理中采用化学强化除磷解决,不是本中试的重点。

4 分析与讨论

4.1 TN 去除情况与主要运行参数

各试验阶段的进水平均 TN 和平均 TN 去除率,以及主要运行参数,汇总于表 3。

表3 各试验阶段的主要运行参数与进出水 TN 及 TN 去除率

项目	TN / mg/L		TN 去除率 / %	HRT / h	MLSS / mg/L	TN 负荷 / kg / (kg MLSS · d)	好氧后段 DO / mg/L
	进水	出水					
常泥	31.45	12.16	60.08	6.43	3 844	0.032	2.77
中泥	39.24	11.82	70.06	6.38	5 509	0.028	3.70
高泥1	24.59	8.39	63.05	6.42	6 005	0.014	1.91
高泥2	33.96	10.20	69.71	6.45	6 688	0.020	2.56
高泥3	39.91	11.29	71.33	6.46	6 942	0.022	2.39

由表 3 可见,出水 TN 最低试验阶段为高泥 1 (8.39 mg/L),TN 去除率最高试验阶段为高泥 3 (71.33%),均为高浓度活性污泥试验阶段,表明提高活性污泥浓度是提高 TN 去除能力、控制出水 TN 的有效手段。高泥 1 和高泥 3 试验脱氮效果都很好,但高泥 1 的进水 TN 最低,代表性不足,高泥 3 可以代表最佳脱氮阶段。

试验中 HRT 基本维持不变,与出水 TN 和 TN 去除率的关系不够清晰。

TN 负荷高的阶段,一般出水 TN 就高,表明降低 TN 负荷也是控制出水 TN 的最有效手段。

好氧区后段 DO 越小,出水 TN 越低,表明降低好氧区后段 DO 也是控制出水 TN 的有效手段。将整个系统的 DO 控制在较低水平,有利于反硝化细菌的生长,并提高其活性,从而有利于同步硝化反硝化(SND)。其中最重要的是,将好氧区前段(发生 SND 的主要场所)DO 控制在 1 mg/L 左右的较低水平,这与其他研究者的结论是一致的^[4,5]。

4.2 出水 TN 与主要运行参数的相关性分析

由于出水 TN 受到很多因素的共同影响,其中单一因素的作用并不明显,如 HRT、水温、碳氮比、回流比、气水比、DO、SRT 和沉淀池表面水力负荷等,只有 MLSS 和 TN 负荷与出水 TN 的相关关系最为明显,是控制出水 TN 的最关键运行参数,见图 3 和图 4。

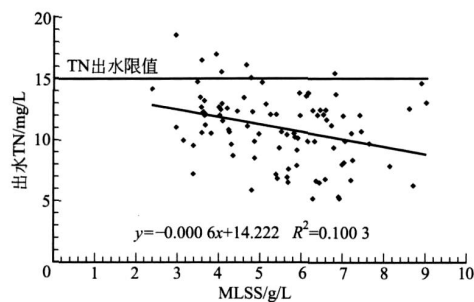


图3 MLSS 与出水 TN 的关系

由图 3 可见,随着 MLSS 的增加,出水 TN 逐渐降低。要达到标准要求的 15 mg/L,则 MLSS 可以相当低,甚至在规范推荐的 2.5~4.5 g/L 以下。

由图 4 可见,随着 TN 负荷的增加,出水 TN 逐渐升高。要达到标准要求的 15 mg/L,则 TN 负荷

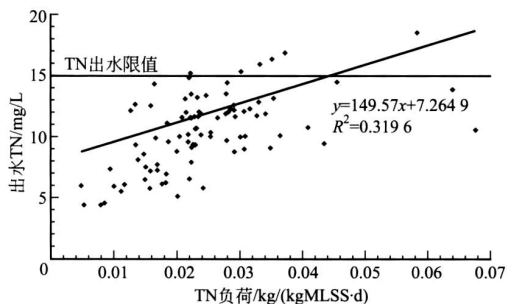


图4 TN负荷与出水TN的关系

需要在 $0.052 \text{ kg}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 以下,与规范推荐的 $\leq 0.05 \text{ kg}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 一致。

TN 负荷能够综合反映 MLSS、HRT 和进水 TN 的影响,与出水 TN 的关系最为密切。但是,在确定的 HRT 和进水 TN 条件下,TN 负荷受到 MLSS 的直接影响,故 MLSS 是控制出水 TN 的最关键的控制参数。

4.3 高浓度活性污泥试验的进出水 TN

试验的进出水 TN 的相关关系见图 5。由图 5 可见,随着进水 TN 的增加,出水 TN 也相应增加,在高泥试验的运行条件下,欲将出水 TN 控制在一级 A 要求的 15 mg/L 以下,进水 TN 应控制在 59.20 mg/L 以下。

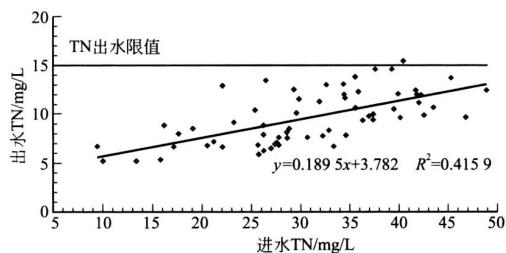


图5 高泥试验进出水TN的相关关系

4.4 同步硝化反硝化反应

4.4.1 TN 超额去除率

试验期间的 TN 去除率统计结果见表 4。表 4 中还列出了 TN 超额去除率,即实际 TN 去除率与理想 TN 去除率之差。

由表 4 可见,在所有 5 个试验阶段中,都是平均 TN 实际去除率小于平均 TN 理想去除率,平均 TN 超额去除率均为负值,说明在碳源不足的条件下,SND 不显著,至少没有显著到实际去除率大于理想去除率的程度,与其他的研究者的观点一致^[6]。

表4 TN去除率统计结果

项目	平均实际去除率/ %	平均理想去除率/ %	平均超额去除率/ %
常泥	60.08	77.78	- 17.70
中泥	70.06	71.08	- 1.02
高泥 1	63.05	77.66	- 14.61
高泥 2	69.71	77.59	- 7.88
高泥 3	71.33	77.73	- 6.40

在碳源不足的条件下 SND 不显著,说明 SND 与传统硝化反硝化同样依赖碳源,由此可以推论,二者的机理一致,区别仅在于是否发生在同一个反应器内而已。

4.4.2 TN 超额去除率与 MLSS 的关系

如前所述,MLSS 和 TN 负荷是控制出水 TN 的关键运行参数,但 TN 负荷与超额去除率的关系不够明显,而 MLSS 与超额去除率的关系相当明显,见图 6。

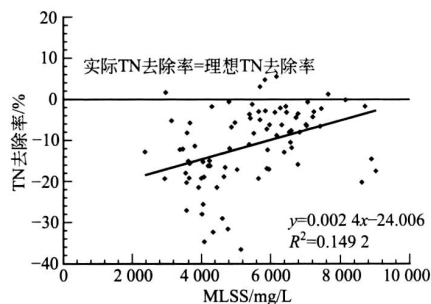


图6 MLSS与TN超额去除率的关系

由图 6 可见,超额 TN 去除率随 MLSS 的增加而增加。当 MLSS 等于 10 g/L 时,超额 TN 去除率大于 0,表明 SND 显著到实际去除率大于理想去除率的地步,但试验运行表明,采用碳源不足的中沉池出水,MLSS 难以维持在 10 g/L 左右,因此,在碳源不足条件下,SND 也就不可能显著到实际去除率大于理想去除率的地步。

4.5 普通沉淀池对高浓度活性污泥法的适应性

高浓度活性污泥试验达到了极佳的 TN 去除效果,最根本的原因是采用了浓度相当高的活性污泥。提高活性污泥浓度在同样污泥负荷的条件下显然提高了系统的处理能力。而在同样污染物负荷和 HRT 的条件下,却降低了系统的污泥负荷,可以得到更优的处理效果。该原理显而易见,唯一的障碍

是担心沉淀池的承受能力。

在本试验期间,出水 SS 良好,MLSS 可以维持在 6~8 g/L,并未观察到任何对沉淀池正常运行不利的现象,证明普通沉淀池可以承受高浓度活性污泥法带来的冲击。

按照规范的规定,二沉池的固体负荷宜不大于 150 kg/(m²·d)。中泥和高泥试验的固体负荷分别为 521 kg/(m²·d)、542 kg/(m²·d)、600 kg/(m²·d)和 623 kg/(m²·d),常泥试验的固体负荷也达到 343 kg/(m²·d),均数倍于规范的限度,而沉淀池运行正常,这从一定程度上说明规范关于固体负荷的规定可以修正。

4.6 剩余污泥量

许多研究者认为^[7~9],污水中所含污染物是由不同粒径大小的非溶解性组分和溶解性组分构成的。在好氧生物处理中,大于 0.1 μm 的颗粒基本未被降解,在厌氧生物处理中,小于 1 μm 的颗粒可被降解,大于 100 μm 的颗粒基本未被降解。粒径 0.1 μm 是污水中污染物可生物处理性质的重要界限,占总量 30 %左右的粒径小于 0.1 μm 的有机污染物是溶解性的,易于生物处理。粒径大于 0.1 μm 的有机污染物是非溶解性的,难于生物处理。

生物处理过程中固体的降解量和产生量均相对较少,而且可以部分抵消。若剩余污泥量大于进水输入 SS 量,则说明生物处理过程中固体的产生量大于降解量,污泥净产生。若二者相等,则产生量等于降解量,污泥量不变。若前者小于后者,则产生量小于降解量,污泥净降解。

试验期间的进水 SS、比排泥量(即排泥量/进水量)和比排泥率(即比排泥量超过进水 SS 的比例),见表 5。

表 5 进水 SS、比排泥量和比排泥率

参数	进水 SS/ mg/L	比排泥量/ mg/L	比排泥率/ %
常泥	162	322	+ 98
中泥	126	230	+ 83
高泥 1	78	144	+ 85
高泥 2	137	112	- 18
高泥 3	187	168	- 10
高泥平均	134	141	+ 19

由表 5 可见,由于进水 SS 很低,无论 MLSS 高低,5 个阶段中 3 个的比排泥率为正值,污泥净增加,2 个的比排泥率为负值,污泥净减少。但是,常泥试验的比排泥率 + 98 %,中泥的比排泥率 + 83 %,高泥的比排泥率平均 + 19 %,差距显著,说明随着 MLSS 的升高,剩余污泥量显著减少。

高浓度活性污泥处理的剩余污泥量较少的原因,应该是污泥在处理过程中被生物消化较多,而在常规浓度活性污泥处理中污泥被生物消化得较少。

为了维持高浓度活性污泥运行,必须控制剩余污泥排放,故高浓度活性污泥处理的剩余污泥量本来就应该较少。

4.7 生物泡沫问题

高浓度活性污泥运行也会带来新的问题,这就是生物泡沫问题。生物泡沫可能在处理系统的某些地方聚集,但只需采用喷水除沫即可解决。生物泡沫会带出一些污泥,故高浓度活性污泥法的剩余污泥实际减少量,应该略少一些。

5 结论

(1) 高浓度活性污泥法可以在进水碳源不足条件下,达到极佳的 TN 去除效果。

(2) 在进水 TN 不高于 59.20 mg/L 的条件下,高浓度活性污泥技术可以保证出水基本达到景观环境和一级 A 要求的 15 mg/L。

(3) MLSS 是控制出水 TN 的最关键参数。将整个系统的 DO 控制在较低水平,特别是将好氧前段的 DO 控制在 1 mg/L 左右的较低水平,也是控制出水 TN 的关键手段。

(4) 高浓度活性污泥可以使用普通沉淀池,产生剩余污泥较少但会产生较多的生物泡沫。

参考文献

- 1 Kart Vaith/ CDM, 1000 Friends of Florida, 2005
- 2 Black & Veatch, Nutrient Removal Technologies, EPA Workshop-Chicago, 09/14/2006
- 3 周克钊,段余杰,邬甘霖,等. Highsludge 城市污水高浓度活性污泥 SND 除氮工艺试验研究. 中国给水排水,2009,25(3):1~6
- 4 M üch E V, Lant P, Keller J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors, Water Research,1996,30:277~284

以磷酸钙盐形式从内循环反应器中回收磷的初步研究

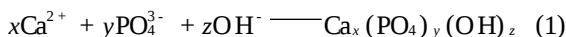
梅 翔 王 磊 陈建华 陈 林 王 照

(南京林业大学化学工程学院环境工程系, 南京 210037)

摘要 为探讨连续流内循环反应器以磷酸钙盐形式从污泥厌氧消化液中回收磷的工艺条件, 考察了 pH、Ca/P 摩尔比、曝气强度和水力停留时间等因素对磷回收工艺过程的影响。结果表明, 在污泥厌氧消化液总磷浓度 86 ~ 108 mg/L、正磷浓度 66 ~ 80 mg/L 的条件下, 保持反应体系 pH 9.0 ~ 9.5、Ca/P 摩尔比 2.0、水力停留时间 45 min、曝气强度 0.014 L/(L · min), 内循环反应器磷的回收率接近 90%, 同时回收产品中磷的含量(以 P_2O_5 计)达到 22.15%, 可以作为磷肥生产原料。

关键词 污泥厌氧消化液 内循环反应器 磷回收 磷酸钙盐

一方面, 磷矿作为一种不可再生的矿产资源^[1], 已经被国土资源部列为 2010 年后不能满足国民经济发展的矿石之一^[2]; 另一方面, 城市污泥中含有丰富的磷元素, 我国城市污水处理厂的初沉污泥、活性污泥中磷的含量(以 P_2O_5 计)分别为 1% ~ 3%、0.78% ~ 4.3%^[3], 所以从城市污泥中回收磷不仅能够缓解磷矿短缺压力, 而且能够使得污泥减量化及防止过量磷排放造成水体富营养化。国内外关于以各种形式进行磷回收有许多报道^[4~7], 其中磷酸钙盐是主要形式之一。磷酸钙盐沉淀有多种形式, 如磷酸钙(TCP)、磷酸氢钙(DCPA)、磷酸八钙(OCF)、羟基磷灰石(HAP)^[8], 其反应通式如下:



目前研究主要集中在磷回收过程影响因素的探

讨, 并取得了一定进展^[9~11]。而相关研究较少结合连续流反应系统考察主要影响因素在磷回收过程中的作用, 未能系统提出连续流反应过程磷回收适宜的工艺条件, 难以为工程应用提供依据。众所周知, 内循环反应器具有传质效率高、流化性能好、反应时间短和能耗低等优点, 广泛应用于污水处理、生物发酵、动植物细胞培养等领域^[12~14]。本研究采用连续流内循环反应器系统以磷酸钙盐形式从污泥厌氧消化液中回收磷, 探讨影响磷回收的主要因素, 获得磷回收适宜的工艺条件。

1 材料与方法

1.1 污泥厌氧消化液

试验用泥采用南京某城市污水处理厂混合污泥(初沉污泥和剩余污泥), 该污水处理厂采用 A/O 工艺处理污水。所取混合污泥经过常温厌氧消化后获得富磷消化液, 消化液在转速为 3 000 r/min 的条件下离心分离 15 min, 有效降低消化液中 SS 后得上清液作磷回收用。污泥厌氧消化上清液水质见表 1。

留学回国人员择优资助项目; 江苏省“六大人才高峰”项目; 江苏省“青蓝工程”资助。

- 5 Pochana K, Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND), *Wat Sci Tech*, 1999, 39: 61 ~ 68
- 6 Chiu Y C, Lee L L, Chang C N, et al. Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, 59(1): 1 ~ 7
- 7 Levine A D, et al. Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: treatment and reuse implications.

Journal WPCF, 1985, 57, (7): 805 ~ 816

- 8 Ericsson B, et al. Activated sludge characteristics in a phosphorus depleted environment. *Water Research*, 1988, 22(2): 151 ~ 162
- 9 周克钊. 生物/化学(BC)法处理城市污水研究. *中国给水排水*, 2000, 16(10): 13 ~ 17

& E-mail: zhoukezhaoh @126.com

收稿日期: 2008-12-10