

# 硫酸庆大霉素废水处理的研究

陈 晓

(南阳市环境监测站, 河南 南阳 473000)

**摘 要:** 抗生素工业废水具有成分复杂、污染物浓度高、色度大、生物毒性等特点, 比较难于治理。硫酸庆大霉素是常用的抗生素之一, 其废水除具备上述特点外, 还存在 pH 值波动范围大、水质、水量不均、 $\text{SO}_4^{2-}$  浓度高等问题。本研究采用交换母液絮凝过滤 - 水解酸化 - IC - SBR - MBR 工艺处理含有硫酸庆大霉素的废水, 在进水 COD 浓度 6 000 mg/L ~ 10 000 mg/L、SS 浓度 2 000 mg/L ~ 3 000 mg/L 的条件下, 通过优化交换母液絮凝过滤药剂用量、水解酸化池废水停留时间、IC 池的容积负荷、SBR 池、MBR 的污泥负荷等处理工艺, 使出水水质能够达到 COD 60 mg/L、 $\text{BOD}_5$  10 mg/L、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  10 mg/L。

**关键词:** 含硫酸庆大霉素废水; 水解酸化; 内循环厌氧反应器; 序批式活性污泥系统; 膜生物反应器; 氨水脱气塔

中图分类号: X703 文献标识码: A

## Studies on Gentamycin Sulfate - contained Wastewater Treatment

CHEN Xiao

(Nanyang Environmental Monitoring Station, Nanyang, Henan 473000, China)

**Abstract:** Antibiotic industrial wastewater with complicated components, pollutants at high concentrations high chroma and high toxicity is hard to be treated. Gentamycin sulfate is one of the common antibiotics, and its wastewater still exist the problems such as pH fluctuation, uneven of water quality and quantity, high concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  besides having the above characteristics. The exchange liquor flocculation filtering - hydrolysis acidification - IC - SBR - MBR process was used to treat the wastewater containing gentamycin sulfate at the conditions as follows: inflow water COD: 6 000 mg/L ~ 10 000 mg/L, SS: 2 000 mg/L ~ 3 000 mg/L, through optimizing exchange liquor flocculation filtering reagent, retention time in hydrolysis acidification pool, volume load of IC pool, SBR pool, sewage sludge load of MBR process to make effluent can reach COD 60 mg/L,  $\text{BOD}_5$  10 mg/L,  $\text{NH}_3 - \text{N}$  10 mg/L.

**Key words:** gentamycin sulfate - contained wastewater; hydrolysis acidification; internal circulation anaerobic reactor; sequencing batch reactor activated sludge system; membrane bio - reactor; ammonia degassing tower

抗生素工业废水由于具有成分复杂、污染物浓度高、色度大、残留抗生素具有生物毒性等特点, 历来是工业废水中难以处理的一类, 国内外学者对抗生素废水的处理进行了大量的研究<sup>[1-3]</sup>, 取得了一定的进展。文中采用交换母液絮凝过滤 - 水解酸化 - 初沉淀 - 调节池 - IC - SBR - MBR 工艺, 对南阳某药业有限公司硫酸庆大霉素废水进行了研究, 并选择了适宜的工艺条件, 使废水处理达到了最佳的效果。

### 1 废水来源

南阳某药业有限公司以生物发酵法生产硫酸庆大霉素, 年产 230 t 以上。是目前中国乃至世界上最大的硫酸庆大霉素生产基地。该产品采用淀粉、豆饼粉、葡萄糖、蛋白陈、多种无机盐、盐酸、液

碱、氨水等 18 种原材料, 经过四级微生物发酵、离子交换、洗涤、浓缩、炭脱、喷雾等工序, 从发酵母液中提取硫酸庆大霉素。在上述生产过程中产生了大量的有机和无机废水——饱和树脂洗涤、再生的酸碱废水, 含有残留的硫酸庆大霉素, 对微生物具有一定的抑制作用, 同时废水中还含有不少生物发酵代谢所产生的生物难降解物质, 其综合生物降解性能差<sup>[1]</sup>。该产品在生产过程中每天排放高浓度有机废水约 600 t 和低浓度废水约 550 t。目前国内工程应用的处理技术不多, 且不够成熟, 投资和處理成本高, 废水实际处理率低<sup>[2]</sup>。为此, 针对企业存在的实际问题, 开展了硫酸庆大霉素废水处

收稿日期: 2011 - 03 - 24

作者简介: 陈晓 (1972—), 男, 河南南阳人, 工程师, 主要从事环境工程、清洁生产与监测技术的研究。

理技术的攻关研究,并进行现场试验,为工业应用提供科学依据。

在试验研究中,笔者对采用不同处理技术及其组合进行比较研究。研究表明,内循环厌氧反应器(IC)<sup>[3]</sup>、序批式活性污泥系统(SBR)<sup>[4]</sup>和膜生物反应器(MBR)<sup>[5]</sup>组合工艺是处理硫酸庆大霉素废水最为高效的处理工艺,具有可行性和经济性。

## 2 试验方法与装置

### 2.1 废水水质

该生产废水可分为二个部分:一是发酵罐冲洗废水、离子树脂交换后母液废水、饱和树脂漂洗废

水,经絮凝、板框过滤预处理除去废水中的固形物,为高浓度有机废水。二是饱和树脂的酸碱洗涤废水及脱色树脂的酸碱再生废水,为低浓度废水。

第一部分的特点:(1)成分复杂,色度高,水量大,污染物浓度高,生物难降解;(2)间歇性排水,水量、水质不均,冲击负荷大;(3)排水中抗生素浓度高,对微生物具有一定的抑制作用。

第二部分废水是低浓度废水,含盐量和氨氮浓度高,COD 较低,对厌氧微生物的活性具有抑制作用,且 pH 值波动大。其中酸碱废水应单独储存,经脱氨预处理后,再进入好氧池进行生化处理。

废水水质如表 1 所示。

表 1 硫酸庆大霉素废水水质

项目	pH	SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )
板框过滤废水	6.1~6.8	2 000~3 000	6 000~10 000	2228	645.5
洗涤再生废水	2.0~12.0	400~800	650~1 100	110	1 500~1 700

### 2.2 试验装置及工艺流程

试验装置及工艺流程如图 1 所示。庆大霉素高浓度废水在配水池中用自来水稀释成不同的浓度进入水解池,水解后的废水进入加热池,加热至 37±2℃,用泵泵入内循环厌氧反应器。IC 为钢结构,容积为 25.5 m<sup>3</sup>(φ2.0 m×8.0 m),外有保温材料保温,底部装有布水器,上部装有七室三相分离器,从底部至上部每 0.5 m 处设一取样口。IC 出

水进入中间配水池,并将脱氨后的低浓度废水也加在中间配水池中(中间配水池还可以加入原废水和自来水以配制成不同浓度的废水),中间配水池出水用泵打入序批式活性污泥系统。SBR(6.3 m×5.2 m×5.4 m)的容积为 125 m<sup>3</sup>,采用罗茨空压机供气,曝气器采用可变微孔曝气盘。同时,在 SBR 池中,置入 MBR,通过 MBR 的过滤后,其废水可以直接进行外排或中水回用。

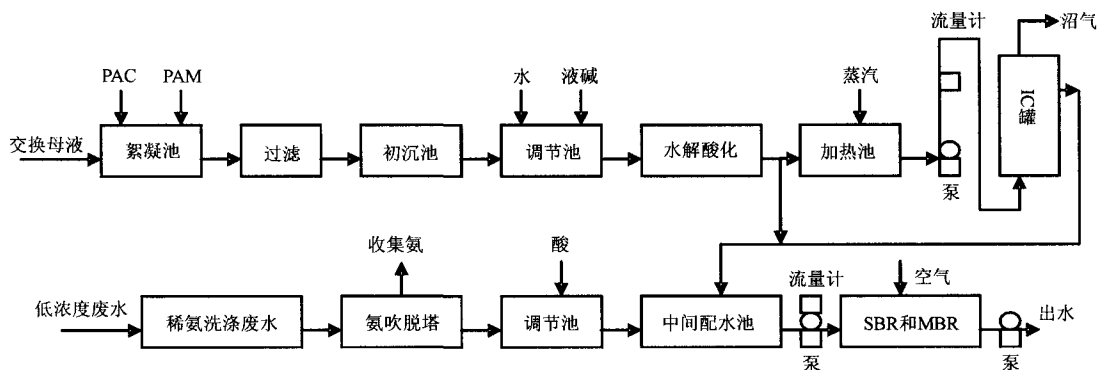


图 1 试验装置示意

### 2.3 接种污泥

接种污泥取自郑州某酒精厂废水处理工程中的厌氧污泥和好氧污泥,厌氧菌种的  $(VSS)/ (TSS) = 0.52$ ,加入 IC 中污泥的平均浓度为 22 g TSS/L;好氧菌种的  $w(VSS)/w(TSS) = 0.67$ ,加入 SBR 中污泥的平均浓度为 5 g TSS/L。

### 2.4 分析项目

分析项目有 pH 值、温度、污泥浓度 (MLSS)、挥发性污泥浓度 (MLVSS)、化学需氧量 (COD)、生化需氧量 (BOD<sub>5</sub>) 等,测定方法均采用标准方法<sup>[6]</sup>。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 交换母液的絮凝与过滤实验

在不同加药量条件下,COD、SS 的去除率见表 2、图 2 所示。

表 2 交换母液在不同加药量处理情况下结果

PAM /ppm	聚合氯化铝 /ppm	COD 浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )		去除率/%	SS 浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )		去除率/%
		过滤前	过滤后		过滤前	过滤后	
3	100	14 564	8 360	42.6	13 052	2 010	84.6
3	150	16 014	8 952	44.1	20 970	2 873	86.3
3	200	13 193	7 230	45.2	22 736	2 842	87.5
5	100	15 512	8 330	46.3	28 349	2 353	91.7
5	150	15 380	8 090	47.4	31 110	2 520	91.9
5	200	19 228	9 960	48.2	33 760	2 667	92.1
10	100	15 890	8 390	47.5	29 868	2 270	92.4
10	150	18 828	9 772	48.1	34 540	2 556	92.6
10	200	14 795	7 590	48.7	35 257	2 609	92.6

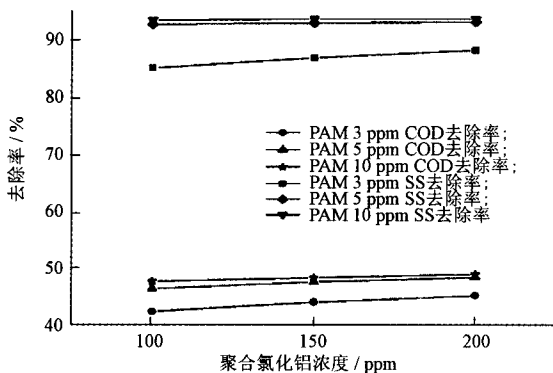


图 2 不同加药量对庆大霉素交换母液絮凝效果

由表 2、图 2 可知,当 PAM 浓度为 3 ppm 以上、聚合氯化铝浓度为 100 ppm 以上时,废水中 COD、SS 去除率分别达到 42.6%、84.6% 以上。随 PAM、聚合氯化铝投加量的增大,COD、SS 去除率均呈现增大趋势,但 PAM 浓度为 5 ppm 以后,随 PAM 浓度增大去除率增加幅度变小;聚合氯化铝浓度为 100 ppm 以后,随聚合氯化铝浓度增大去除率增加幅度变小。由于 PAM 浓度 5 ppm、聚合氯化铝浓度 100 ppm 时,COD、SS 去除率已分别达到 46.3%、91.7%,从经济角度考虑,此浓度最为适宜。

#### 3.2 厌氧处理试验

IC 反应器实际上是由多个上下重叠的 UASB 反应器串联组成的。由下面第一个 UASB 反应器产生的沼气作为提升的内动力,使升流管与回流管的混合液产生密度差,实现下部混合液的内循环,使废水获得强化预处理。其上的 UASB 反应器对废水继续进行处理,直至经过第七个 UASB 反应器

后,就会使出水达到预期的处理要求。与 UASB 反应器相比,在获得相同处理效率的条件下,IC 反应器具有更高的进水容积负荷率和污泥负荷率。

3.2.1 内循环厌氧反应器的处理试验情况 内循环厌氧反应器的启动运行可分为污泥驯化期、提高负荷期、稳定运行期三个阶段。在污泥驯化期初期采用低浓度间歇脉冲进水,以增加反应器内部反应液的混合程度,保持进水浓度不变,逐步增加进水量;然后采用连续进水,使厌氧污泥得到驯化。当 IC 的容积负荷( $N_v$ )达到 40 kg COD/( $m^3 \cdot d$ )、COD 去除率( $E_{COD}$ )大于 75%、pH 大于 7.0、VFA 浓度达到 100 mg/L 以下时,即进入提高负荷期。当进水浓度增加至原废水浓度,每运行 7 d 增加容积负荷 25%,启动运行 90 d 时,IC 底部已形成颗粒污泥,反应器性能稳定,容积负荷达到 50 kg COD/( $m^3 \cdot d$ ),此时进入稳定运行期。厌氧反应器的容积负荷是其设计应用的重要参数,因此考察 IC 在不同负荷下的处理效果,可为生产性应用提供科学的、可靠的依据。

在稳定运行期,IC 在不同容积负荷下的处理效果见图 3。

由图 3 可见,IC 的容积负荷在 40 kg COD/( $m^3 \cdot d$ )以下时,COD 去除率达 90% 以上,而且变化不大。当容积负荷在 45 kg COD/( $m^3 \cdot d$ )以上时,COD 的去除率逐渐下降,运行稳定性降低。考虑到运行的稳定性、可靠性以及工程应用的经济性等因素,废水的容积负荷宜采用 40 kg COD/( $m^3 \cdot d$ )。容积负荷为 40 kg COD/( $m^3 \cdot d$ )时,IC 的处理效果如表 3 所示。由表 3 可见,IC 对 SS、COD、

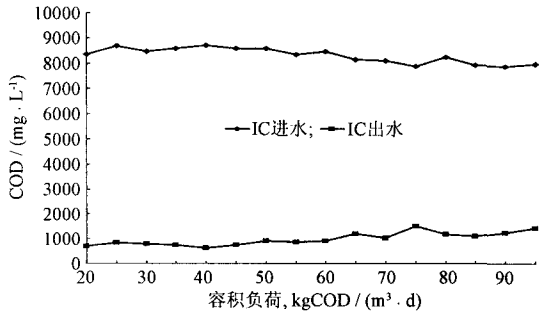


图 3 IC 容积负荷 (N<sub>v</sub>) 和 COD 去除率的关系

BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub> - N 的去除率分别为 61.0%、90.6%、96.5%、76.4%。

表 3 IC 的处理效果

项目	IC 进水	IC 出水	去除率/%
pH	6.8 ~ 7.3	7.2 ~ 7.6	—
SS/(mg · L <sup>-1</sup> )	2 090	815	61.0
COD <sub>Cr</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	8 360	786	90.6
BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	2 228	78	96.5
NH <sub>3</sub> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )	645.5	152	76.4

### 3.3 低浓度废水的处理

由于低浓度废水氨氮较高,并且水中的氨氮多以铵离子(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)和游离的氨 NH<sub>3</sub> 的状态存在,两者并保持平衡,关系为: NH<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O ⇌ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + OH<sup>-</sup>,平衡状态受 pH 值的影响较大,当 pH 值升高时,平衡向左移动,游离氨的占比增大。当 pH 值为 11 左右时,NH<sub>3</sub> 达 90% 以上。游离氨易于从水中逸出,如加以曝气的话,则可以促使氨从水中逸出。

因此,对废水可采用氨吹脱塔,将 85% 以上的氨从废水中吹脱回收,同时,废水的 pH 值降低到 9.0 左右。其氨氮、COD、pH、SS 处理效果见表 4。

表 4 低浓度废水氨洗涤液经氨吹脱塔处理后的效果

项目	氨吹脱塔进水	氨吹脱塔出水	去除率/%
pH	13 ~ 14	8.5 ~ 9.5	—
SS/(mg · L <sup>-1</sup> )	750	738	1.6
COD <sub>Cr</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	820	820	0
BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	110	106	3.0
NH <sub>3</sub> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )	1 650	247	89.0

由表 4 可见,低浓度废水经过氨吹脱塔的预处理后,可使 NH<sub>3</sub> - N 得以有效去除,加之其废水的 SS、COD、BOD<sub>5</sub> 的指标符合 SBR 的进水要求,为此,将这部分废水与 IC 出水一起进入好氧 SBR 进

行处理。

### 3.4 好氧处理试验

SBR 启动运行的初期,按间歇进水、间歇曝气、间歇排水的方式进行调试;启动运行到 22 d 时,污泥变为土黄色,絮凝沉淀性能良好,出水水质稳定,此时便进入稳定运行期。SBR 的处理效果示于表 5,由表 5 可见,SBR 进水的 COD 为 802 mg/L,BOD<sub>5</sub> 为 80 mg/L,BOD<sub>5</sub>/COD 为 0.1,出水 COD 去除率不太高。为增加好氧处理的可生化性和营养物质,在厌氧出水中加入部分原废水作为好氧处理的进水,从而增强了污泥的活性,提高了污泥的吸附降解作用,COD 去除率明显提高。

表 5 SBR 的处理效果

项目	SBR 进水	SBR 出水	排放标准	去除率/%
pH	7.2 ~ 7.6	7.3 ~ 7.7	6.0 ~ 9.0	—
SS/(mg · L <sup>-1</sup> )	796	98	50	87.6
COD <sub>Cr</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	802	149	80	81.4
BOD <sub>5</sub> /(mg · L <sup>-1</sup> )	80	31	20	61.2
NH <sub>3</sub> - N/(mg · L <sup>-1</sup> )	182	21	10	88.5

污泥负荷(N<sub>s</sub>)是 SBR 重要的设计运行参数,因此考察 SBR 在不同负荷下的处理效果,为生产性应用提供科学依据。在稳定运行期,SBR 的污泥浓度为 6 000 mg MLSS/L 时,不同污泥负荷条件下的处理效果见图 4。

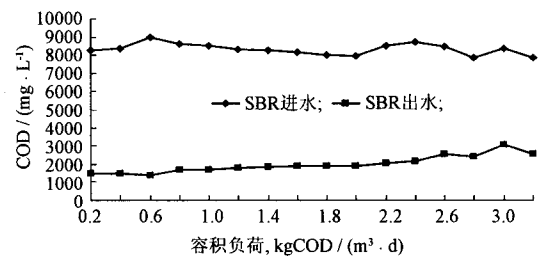


图 4 SBR 污泥负荷 (N<sub>s</sub>) 和 COD 去除率的关系

由图 4 可见,污泥负荷在 0.6 kg COD/(kgMLSS · d) 以下时,COD 的去除率达 80% 以上,而且基本保持不变;当污泥负荷大于 0.6 kg COD/(kgMLSS · d) 时,随着污泥负荷的增加,COD 去除率明显下降,出水 COD 升高。考虑到 SBR 运行的可靠性和经济性,选用污泥浓度为 6 000 mg MLSS/L,污泥负荷为 0.6 kg COD/(kgMLSS · d),其处理效果及排放标准见表 5。

由表5可见, SBR对SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N的去除率分别为87.6%、81.4%、61.2%、88.5%,出水SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N分别为98 mg/L、149 mg/L、31 mg/L、21 mg/L,仍然达不到微生物制药工业废水排放标准,需要进行废水的深度处理。

### 3.5 MBR深度处理

将MBR置于SBR好氧池中,由于膜组件的高效截留作用,将全部的活性污泥都截留在反应器内,使得反应器内的污泥浓度可达到较高水平,这样,就大大降低了生物反应器内的污泥负荷,提高了MBR对有机物的去除效率。同时,SBR的曝气作用可以对MBR起到再生作用。由于膜组件的分离作用,使得生物反应器中的水力停留时间(HRT)和污泥停留时间(SRT)完全分开,这样就可以使生长缓慢、世代时间较长的微生物(如硝化细菌)也能在反应器中生存下来,保证了MBR除具有高效降解有机物的作用外,还具有良好的硝化作用。其处理效果见表6。

表6 MBR的处理效果

项目	MBR进水	MBR出水	回用水一级A标准	去除率/%
pH	7.2~7.6	7.0~7.6	—	—
SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	796	7.3	10	99.1
COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	802	33.0	60	95.9
BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	80	8.8	10	89.0
NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	182	7	/	96.2

由表6可见,废水经MBR深度处理后,其对SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N的去除率分别为99.1%、95.9%、89.0%、96.2%,出水SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N分别为7.3 mg/L、33.0 mg/L、8.8 mg/L、7 mg/L,达到了中水回用水质一级A标准。

### 3.6 处理技术方案

根据试验研究结果,工业规模化处理硫酸庆大霉素废水建议采用图5所示的工艺流程进行处理。

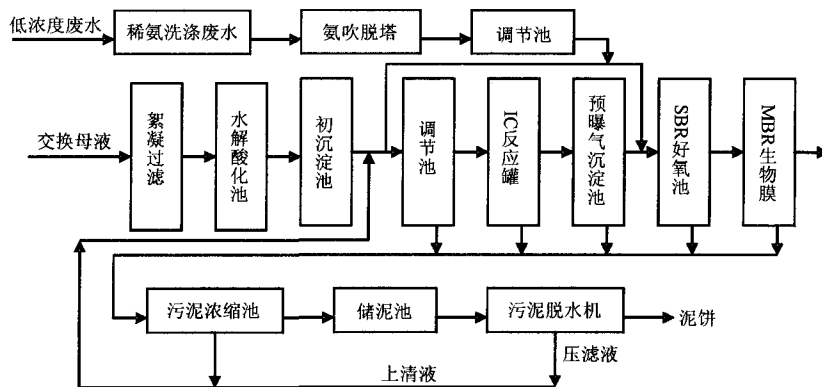


图5 硫酸庆大霉素废水处理工艺流程

## 4 结论

(1)内循环厌氧反应器(IC)处理硫酸庆大霉素废水,当容积负荷为40 kg COD/(m<sup>3</sup>·d)时,SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N的去除率分别为61.0%、90.6%、96.5%、76.4%。

(2)使用氨吹脱塔对低浓度废水进行预处理后,氨氮去除率达89%。

(3)序批式活性污泥处理系统,当污泥浓度为6 000 mg MLSS/L、污泥负荷为0.6 kg COD/(kgMLSS·d)时,SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N的去除率分别为87.6%、81.4%、61.2%、88.5%。

(4)厌氧出水w(BOD<sub>5</sub>)/w(COD)<0.3,可生化性差,营养物质少,加入部分原废水进行好氧处

理,能够增加好氧处理的生化性和污泥活性,提高好氧处理效率。

(5)经过SBR出水再经MBR深度处理,其SS、COD、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N的去除率分别为99.1%、95.7%、89.0%、96.2%,并达到了工业废水处理回用水水质一级A标准。同时MBR对细菌和病毒也有着较好的去除效果,这样就可以省去回用水处理单元中的消毒工艺,简化了工艺流程。

### [参考文献]

- [1] 方明成,吴珊,李桂枝.生化制药废水处理试验研究[C].第三届全国污水处理技术交流会,北京,1997:208-211.

(下转第23页)

### 3.8 反应器的结构

目前大多数关于好氧颗粒污泥的报道都是SBR,反应器结构及尺寸对于反应器中的液体流动形成及微生物的聚合形态有重要的影响。在试验中反应器设计采用较大的高度和内径比(H/D)有利于产生一个较长的环流轨迹,这相应会加强对微生物聚合体的水力摩擦,使器中的微生物聚合体始终处于一种水力摩擦作用下,逐渐演化形成为一种规则颗粒形状,以使其表面自由能最低。在实际应用中,采用SBR操作模式和较大的反应器高度和内径比被证明有利于选择和截流有较好沉降性能的颗粒污泥<sup>[11]</sup>。近期苏州科技学院李媛等<sup>[12]</sup>做了采用CSTR反应器培养好氧颗粒污泥的研究,采用连续流完全混合反应器(CSTR)成功培养出了好氧颗粒污泥。

## 4 结论

好氧颗粒污泥具有结构致密、沉降性能好、多样化微生物代谢菌群共存与协同偶合、稳定性和抗冲击负荷能力强等特点,有望解决传统活性污泥处理工艺运行过程中泥水分离困难、容积负荷率低等问题,故在含复杂成分的有机废水处理中具有良好的应用潜力。目前,有关好氧污泥颗粒化的研究多数集中在模拟有机废水处理方面,几乎没有直接利用工业废水培养的研究,主要还在于对好氧颗粒的形成机理、污泥颗粒化主控因子等研究尚未深入有关。因此,今后好氧污泥颗粒化的研究方向应着眼于以下3方面:

(1)已有研究表明,基质组成与负荷、水力剪切力、污泥沉降时间等是好氧污泥颗粒化的主要影响因素,需要结论性地确立好氧污泥颗粒化主控因子,建立相关概念模型,以期为颗粒化反应器的工程应用奠定理论基础。

(2)已初步研究发现,好氧颗粒污泥具备高效脱氮、除磷、降解有毒有机污染物的能力,需明晰不同操作工艺下颗粒结构特性(如颗粒粒径、沉降性

能、EPS含量和组成等)与颗粒化调控参数的相关性,并开发新型高效的有机/无机废水生物处理与修复工艺(好氧颗粒化反应器)。

(3)探索不同操作条件下,好氧污泥颗粒化过程微生物种群演替、功能降解菌空间分布规律,在分子水平上解析好氧污泥颗粒化的微生物作用机理,丰富与发展废水生物处理微生物学理论。

### [参考文献]

- [1] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic Observation of Aerobic Granulation in Sequential Aerobic Sludge Blanket Reactor[J]. Appl Microbiol, 2001, 91(1): 168 - 175.
  - [2] 王艳静, 李亚新. 好氧颗粒污泥的研究[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(2): 147 - 150.
  - [3] Peng DC, Nicola SB, Jean Philipped. Aerobic Granular Sludge - A Case Report[J]. Wat Res., 1999, 33(3): 890 - 893.
  - [4] Beun J J, Hendeiks A. Aerobic Granulation in a Sequencing Batchreactor[J]. Wat Res, 1999, 33(10): 2283 - 2290.
  - [5] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒污泥活性的培养及理化特性研究[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 38 - 41.
  - [6] 竺建荣, 刘纯新, 何建中, 等. 厌-好氧交替工艺的生物除磷特性研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 394 - 398.
  - [7] Liu QS, Tay JH, Liu Y. Substrate Concentration - in - dependent Aerobic Granulation in Sequential Aerobic Sludge Blanket Reactor[J]. Environ Technol, 2003, 24: 1235 - 1243.
  - [8] 王芳, 杨凤林, 张兴文, 等. SBAR中培养条件对好氧颗粒污泥特性影响[J]. 大连理工大学学报, 2005. 11, 45(6): 808 - 813.
  - [9] Qin L, Tay J H, Liu Y. Selection Pressure is a Driving Force of Aerobic Granulation in Sequencing Batch Reactors[J]. Process Biochem, 2004. 39: 579 - 584.
  - [10] Jiang H L, Tay J H, Liu Y, et al. Ca<sup>2+</sup> Augmentation for Enhancement of Aerobically Grown Microbial Granules in Sludge Blanket Reactors[J]. Biotechnol. Lett. 2003, 25: 95 - 99.
  - [11] Liu Y, Tay J H. The Essential Role of Hydrodynamic Shear Force in the Formation of Biofilm and Granular Sludge[J]. Water Res. 2002, 36(24): 1653 - 1665.
  - [12] 李媛, 沈耀良, 孙立柱. 采用CSTR反应器培养好氧颗粒污泥的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(5): 10 - 13.
- (上接第19页)
- [2] 杨军, 陆正禹, 胡纪萃, 等. 抗生素工业废水生物处理技术的现状与展望[J]. 环境科学, 1997, 18(3): 83 - 85.
  - [3] GUIOT S R. Performance of An Upflow Anaerobic Reactor Combining A Sludge Blanket and A Filter Treating Sugar Waste[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1985, 27(6): 800 - 806.
  - [4] GORONZY M C, 朱明权. 循环式活性污泥法的应用及其发展[J]. 中国给水排水, 1996, 12(6): 4 - 10.
  - [5] Li, S. Z., X. Y. Li, D. Z. Wang. Membrane (RO - UF) filtration for antibiotic wastewater treatment and recovery of antibiotics[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 34(1 - 3): 109 - 114.
  - [6] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 276 - 285.