

活性污泥和生物膜复合/联合工艺在污水处理厂技术改造中的应用

丁永伟¹ 王琳¹ 王宝贞¹ 袁玉斗² 宋凤鸣³

(1 哈尔滨工业大学市政及环境工程学院, 哈尔滨 150090;

2 中色科技股份有限公司, 洛阳 471039; 3 山东省广饶县污水处理厂, 东营 257300)

摘要 随着我国污水处理厂污染物排放标准不断提高, 许多污水处理厂面临技术改造问题。提出了技术改造的原则和引进的技术方案。综述了国内外活性污泥和生物膜复合/联合工艺在污水处理厂技术改造中应用和研究情况。该工艺用于污水处理厂的技术改造具有明显的优点, 同时也指出了尚需解决的一些问题。

关键词 技术改造 活性污泥 生物膜 复合式工艺 联合式工艺 A²/O 工艺 BAF 工艺

我国于 2003 年 7 月 1 日起开始实施《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)。与《污水综合排放标准》(GB 8978—1988, 1996)中有关城市污水处理厂的部分相比, 新标准明显提高了对出水氨氮的要求, 首次对总氮和粪大肠菌群提出明确要求, 对动植物油、石油类、阴离子表面活性剂(LAS)等难降解物质的去除也提出了很高要求。在这种情况下, 我国部分以前建设或现在超负荷的污水处理厂将面临技术改造的问题。如何在不对现有工艺作较大改动的情况下, 对其进行技术改造, 提高其处理能力和效果引起人们极大的关注。

1 技术改造的原则

(1)改造后的工艺能够满足新标准处理水质的要求。

(2)工艺运行可靠, 且具有灵活性。

(3)投资少, 尽量利用现有的构筑物。

(4)占地小, 布置紧凑。

(5)在改造过程中尽量不干扰现有工艺的运行。

2 可选的技改方案

溶解氧(DO)和污泥龄(SRT)是控制污水生物处理生化速率的两个主要因素, 二者的升高能够提

高工艺的处理能力和硝化效果。当现有污水处理厂充氧系统的能力、二沉池分离能力和污泥回流系统的能力不能满足更高 DO 和 SRT 的调节要求时, 可根据超负荷的程度考虑技改措施。

(1)加大进水的预处理程度, 降低后续生物处理系统的负荷, 提高生物处理的硝化效果。可在初沉池投加絮凝剂, 提高进水中颗粒性污染物质的去除效果, 在降低了后续生物处理负荷的同时, 也减少了生物处理系统的污泥产量, 在保持曝气池内污泥浓度不变的情况下, 提高了系统的污泥龄, 使生物处理系统的效率也得到提高。当进水中污染物多以悬浮或胶体形式存在时, 这种方法较为有效, 可使硝化过程在系统中发生, 能够去除氨氮; 但其缺点是药剂消耗增加运行费用, 预处理使后续反硝化和除磷过程的碳源减少, 总氮和总磷的生物去除受到限制, 需通过外加碳源或初沉污泥的水解来补充。

(2)在曝气池内投加特种生物菌种的方法来提高现有生物处理系统能力的应用。但是这种方法面临着投加的生物菌种会逐渐退化, 不能在系统中占优势的问题; 菌种的连续投加会大大增加运行费用。Peter Kos提出了向不能发生硝化的曝气池内投加

40 蔡建安, Smith J A. 活性污泥法污水处理虚拟设备. 中国给水排水, 2001, 17 (9): 17~22

41 龙瀛, 贾海峰, 赵冬泉. 城市污水系统仿真模型的设计与初步应用. 给水排水, 2004, 30 (4): 107~11242 熊春春, 魏刚. 水处理技术的经济评价. 给水排水, 1999, 25 (3): 44~46

43 张玉祥. 企业开展污水再生回用工作存在的主要问题及对策. 给

水排水, 2004, 30 (6): 23~25

◎通讯处: 重庆市长江二路 174 号后勤工程学院研究生二队

电话: 13594190317

E-mail: liaouser1@163.com

收稿日期: 2005-06-23

富集的硝化菌的方法^[1],建造一个容积为曝气池容积3%的小曝气池,将氨氮浓度高达300~900 mg/L、温度为30~35℃的污泥厌氧消化池上清液或厌氧污泥脱水液引入此曝气池中,同时补充部分进水(调节水温、补充BOD),持续曝气使其发生硝化反应,使硝化细菌在污泥中富集,然后将富含硝化菌的污泥连续或定期投加到主曝气池中,使以短污泥龄运行的曝气池在能够发生硝化反应。试验的结果是这种工艺运行在传统硝化工艺所需的SRT的60%情况下,就能够达到和传统硝化工艺相同的出水效果,但是其用于污水处理厂改造的投资仅为传统硝化工艺改造投资的10%~15%。不具有污泥厌氧消化系统的污水处理厂很难采用Peter Kos的这种办法。

(3)在曝气池内投加载体,构成活性污泥和生物膜复合式工艺,使部分微生物附着在载体上而被截留在曝气池中,此时曝气池内的生物量由附着态和悬浮态组成,附着态微生物为新增加的生物量,这种方法可大幅度提高曝气池内生物量,降低污泥负荷,使系统具备硝化能力,但不会对总氮和总磷去除所需的碳源造成负面影响,能够充分利用原污水中的碳源。同时由于附着态微生物不参与污泥分离和回流过程,现有的二沉池和污泥回流系统可以不做任何改动,技术改造的费用较小。这种改造方式一般不涉及现有污水管线的改动,对现有工艺的运行影响较小。其缺点是增加了填料的投资,曝气池内溶解氧浓度宜为3~4 mg/L,比活性污泥工艺要高。

(4)当上述这些方法都不能满足要求时,只有增加反应池和沉淀池的数量,或重新建造具有除磷脱氮功能的工艺,这种方法一般需要巨大的投资,同时还会影响现有工艺的运行。在增加反应池数量时,可在现有工艺后增加生物膜工艺,组成活性污泥和生物膜联合工艺,充分发挥活性污泥处理能力大和生物膜硝化效果好、对难降解污染物去除能力强的特点。在可选的生物膜工艺中,曝气生物滤池(BAF)工艺是一种较为合适的选择,其集生物反应和过滤为一体,能够保证稳定的硝化效果和较低的出水悬浮物浓度,其出水可以满足新国标中一级标准A对悬浮物小于10 mg/L的要求。当采用联合式工艺时,活性污泥段可按反硝化和除磷模式运行,生物膜段按硝化模式运行,根据进水C/N和C/P调节硝化段出水回流至反硝

化缺氧段的比例,以达到最优的除磷脱氮效果。这种联合式工艺能够解决传统A²/O工艺中除磷和脱氮间污泥龄的矛盾。

3 活性污泥和生物膜复合/联合工艺的应用和研究情况

Chudoba P和Pujol R提出^[2]如果现有曝气池HRT≥5 h,可以将其分割成缺氧区和好氧区两格,在好氧区投加Pegazur浮动填料(一种硝化细菌在有机凝胶小球中固定的载体),现有的预处理构筑物和二沉池均可保持不变,使其达到除氮的效果,其所需的占地面积是传统的活性污泥脱氮工艺的一半。由于硝化细菌被固定为好氧池中,悬浮态微生物的作用仅用于反硝化。采用这种工艺,可以在BOD负荷(以BOD₅和MLVSS计)达到0.4 kg/(kg·d),氨氮容积负荷达到0.4 kg/(m³·d)(12℃)时,取得出水总氮小于10 mg/L的效果。此种工艺已用于英国泽西岛的Bellozanne污水处理厂(120 000 PE(1 PE=0.2 m³/d))的改造中,改造前最大时流量为2 160 m³/h,以去除有机物为主,曝气池容积8 100 m³,分为并联运行独立三格廊道(3×2 700 m³)。改造后好氧区约占原曝气池容积的一半(3×1 350 m³),投加10%的Pegazur浮动载体,每格约130 m³。改造后能够处理最大时流量3 240 m³/h,出水TN小于10 mg/L,改造的费用约为520 FF(法郎)/PE。该工艺采用化学除磷。

Chudoba P和Pujol R提出如果现有曝气池HRT≤5 h,可将其改造成高负荷缺氧反应器,在二沉池后增加上向流硝化曝气生物滤池,硝化出水回流至高负荷缺氧反应器。二沉池的数量需要增加,以满足硝化回流液增加水量的沉淀过程。此时大部分BOD在缺氧池中作为反硝化的碳源得以去除。这种方案使硝化细菌和异养菌完全分开,保证了前者效率的充分发挥。这种方案对于水量冲击负荷十分有效,由于二沉池容积较大,平时可以间歇运行,当遇到暴雨时,根据缺氧池中氧化还原电位(ORP)的变化情况,将硝化液停止回流,缺氧池按好氧池运行,二沉池连续运行,可以保证暴雨时期的去除效果。采用这种工艺来改造某规模为50 000 PE的污水处理厂,平均流量590 m³/h,旱天最大流量750 m³/h,雨季最大流量3 600 m³/h。改造后出水

TN 小于 15 mg/L(12℃)。由于需要考虑雨季流量冲击负荷的影响,对于常规的活性污泥脱氮工艺,需要建设调节池,因此至少需要的占地面积为 4 600 m²;对于改造方案推荐的工艺,需要的占地面积为 2 050 m²,约为前者的一半左右。两者的投资相差不多,约为 600 FF/PE。

Clifford W Randall 等^[3]将美国马里兰州安纳波利斯污水处理厂两个 37 000 m³/d 的活性污泥处理系统中的一个改造为复合式 A/O 工艺,在 475 m³ 好氧池中放置了 30 000 m 类似 Ringlace 的填料。这样改进的目的在于使好氧池水力停留时间为 6 h 的普通活性污泥工艺具有和 A/O 除氮工艺相同的处理性能,这样可以在不必另外建设构筑物的前提下提高原有处理厂的处理效果,节省基建投资。对比试验进行了 12 个月,6 个月按推流式运行,6 个月按分段进水模式运行。和对照系统相比,复合式工艺将容积硝化速率提高了 225%,在水温 15℃ 的条件下,硝化速率达到了 1.75 kg/(d·km)。同时载体的存在也提高了好氧池中的反硝化作用,在好氧池中由于硝化作用形成的硝酸盐大约有 30%~88% 通过好氧反硝化得到去除,这样至少可以使复合式 A/O 工艺的缺氧区容积减少 25%。采用复合式 A/O 工艺可大大提高普通 A/O 工艺的性能,水温越低这种提高越明显。分段进水模式优于推流式。由于填料的存在造成曝气池断面流速分布的不均,可能造成短流,因此采用填料间隔布置、旋流曝气和穿孔墙配水的形式可以提高复合式工艺的性能。

N. Müller 介绍了德国 7 个采用复合式工艺的污水处理厂的基本情况^[4],它们采用了名为 Bio-2-Sludge 的工艺,其曝气池横断面原理图见图 1。其特点是将生物膜载体(填料)放置在曝气池的纵向两侧,曝气系统仅沿填料区域布置,气流对填料的冲刷有利于保持生物膜的更新,同时这种布置方式使污水在曝气池断面上环流运动,有利于提高混合效果,防止由于填料的放置而造成的短流现象,极大方便了填料底部曝气系统的检修,这种填料装填方式比较适合固定载体。7 个污水处理厂的情况见表 1,其采用的填料见表 2。

Bio-2-Sludge 工艺生物膜载体(填料)的填充

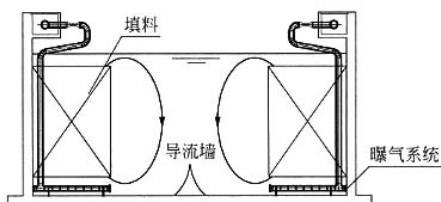


图 1 Bio-2-Sludge 工艺原理

表 1 采用 Bio-2-Sludge 工艺的污水处理厂的基本情况

处理厂名称	处理规模/PE ^①	生物池总容积/m ³	载体类型及数量/m ³		MLSS/g/L	SVI/mL/g	污泥负荷/kg/(kg·d) ^②
Berghausen	24 000	1 740 N/DN	Flocor E	417	3.0	70	0.17
Calw-Hirsau	53 000	1 620 N	Tropac	413	3.6	90	0.30
Enzberg	10 000	760 N/DN	Tropac	155	4.2	55	0.15
Geiselbullach	250 000	7 800 N/DN	Ringlace	988 ^③	7.4	46	0.07
Horb	20 000	457 N	Flocor E	83	3.3	85	0.40
Schömburg	15 000	1 130 N/DN	Tropac	217	6.0	50	0.15
Weil der Stadt	22 600	1 500 N/DN	NSW	237	4.2	130	0.10

注:① 1 PE=0.2 m³/d;② 污泥负荷(以 BOD₅ 和 MLSS 计);③单位 km。

表 2 采用 Bio-2-Sludge 工艺污水厂的载体描述

Tropac	波纹状 PVC 材质竖管,交替连接成矩形块状
Flocor E	塑料块状,构造类似蜂巢,具有从底部到顶部的“之”形的通道
NSW	类似墙结构的 PE 材质竖管,连接成矩形块状
Ringlace	PE 材质的软绳,在绳子四周有许多改性 PVC 材质的小环,绳子悬挂在框架中,照片见图 2。

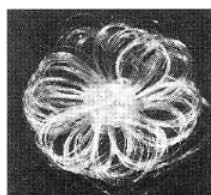


图 2 Ringlace 的结构

比通常在 18%~28% 之间。Eberhardt 和 Lang 所作的一系列测试表明水质净化效果不随填充比的进一步增加而增加。曝气器距离填料底部的距离在 0.15 m(Berghausen)~0.65 m(Geiselbullach)之间,此距离应当尽可能的小,以限制曝气器产生的微气泡必须通过填料区域。由于生物膜载体对水流的阻力,填料区域内微气泡上升的流速小于未布置填料区,这有利于提高氧的传质效率。由于生物膜的存

在提高了系统的污泥龄,污泥的稳定化程度较高,MLVSS通常为MLSS的60%~75%;污泥产率也较低,在Geiselbullach污水处理厂,采用Bio-2-Sludge后的比剩余污泥产量比以前减少了50%;污泥沉降性能良好,SVI均较低。

这里尤其提到Geiselbullach污水处理厂,用复合式工艺改造后,污泥SVI值降至46 mL/g,能够使曝气池内污泥浓度达到7 400 mg/L,这在常规的活性污泥工艺中是很难达到的,极大地提高了该污水处理厂的处理能力,并且不占用新的土地,投资较小。

我国山东广饶污水处理厂和江苏句容污水处理厂采用了这种Bio-2-Sludge类型的复合式工艺,其曝气池照片见图3。广饶污水处理厂采用了一种类似Ringlace的织物填料,设计处理规模25 000 m³/d,曝气池HRT=5.3 h;句容污水处理厂采用了国内常见的软性纤维组合填料,设计处理规模25 000 m³/d,曝气池HRT=5.5 h,目前均已达标运行。在实际运行中发现这种填料布置方式确实能够保证良好的水力混合效果,利于曝气池的检修维护。

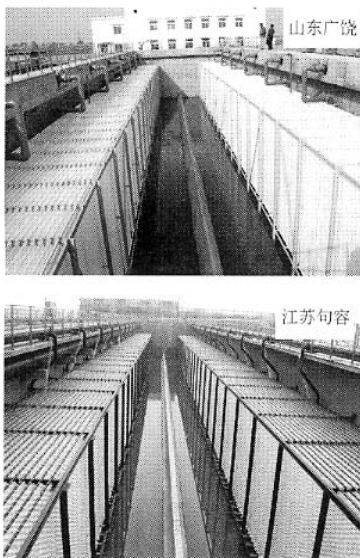


图3 山东广饶和江苏句容污水处理厂曝气池照片

我国大连春柳河污水处理厂采用LINPOR工艺对原有工艺进行改造^[5],处理能力由60 000 m³/d增加到80 000 m³/d,现已投产且出水达标。铁岭市污水处理厂也采用该工艺。

在我国香港,由于人多地少,特区政府排水管理

处(DSD, Drainage Services Department)最近进行了名为“各种形式复合式污水处理工艺可行性研究”科研项目^[6],评估这种紧凑(compact)的复合活性污泥和生物膜工艺(HAB)在香港地区处理城市污水的可行性。在香港,现有的许多污水处理厂采用传统的具有二沉池的活性污泥处理工艺,尽管很容易将这种工艺改造成泥龄、具有缺氧区和混合液回流的MLE工艺,但是由于采用较长的泥龄,会导致系统中污泥量和污泥沉降性能的改变,从而会影响到生物处理工艺和二沉池泥水分离的性能。此外,由于香港普遍采用海水冲厕,污水中盐度较高,使硝化细菌的最大比增长速率非常小,这会使改造后的MLE工艺除氮的能力更弱。

他们的研究结果^[6]表明:在改造后的MLE工艺中采用复合式工艺,能够使生长较为缓慢的硝化细菌在填料上附着生长,从而提高系统的硝化效果,这使复合式工艺可以运行在低于临界泥龄(硝化作用发生的最小泥龄)的条件下,但仍保持完全硝化的效果;HRT从15 h降至7.5 h, SRT从10 d降至5.2 d,混合液污泥浓度从3 000 mg/L降至1 300 mg/L,复合式系统的硝化和除氮性能几乎不变,甚至更好。传统的MLE工艺必须运行在2.5倍的临界泥龄条件下,否则系统的硝化能力将会在三个泥龄时间内丧失,但复合式工艺可以在小于硝化细菌临界泥龄的条件下仍具有硝化效果,这使工艺具有比改造前更小的污泥浓度,使二沉池的效果提高。载体的投加对SBR工艺处理效果的提高和复合式MLE工艺相似。由于SBR工艺固有的缓冲能力大、具有较高的起始底物浓度利于硝化作用等优点,其比MLE工艺具有更稳定的除氮效果,传统的SBR工艺比复合式MLE工艺具有更好的硝化效果。因此对现有的污水处理厂的改造,采用复合式MLE工艺较为合适,它不需要太大的投资;对于新建污水处理厂,可以考虑采用复合式SBR工艺。

Chen Guang Hao讨论了复合式工艺对难降解污染物的处理效果^[7]。污染物处理的难易程度用其最大比去除速率(MSRR, Maximum Specific Removal Efficiency)来表示,当用活性污泥系统处理最大比去除速率小于0.5 d⁻¹的有机污染物时,其处理效果急剧下降;如要对最大比去除速率为0.1 d⁻¹的有机污

染物取得 80% 的去除率,MLVSS 必须维持在 6 000 mg/L 以上,这会造成二沉池泥水分离困难,是不可行的,这说明活性污泥工艺处理可生物降解性较差的污染物时的效果是较差的。但是采用复合式系统,只要附着生物量和悬浮生物量的比值不小于 0.027,其对最大比去除速率为 0.1 d^{-1} 的有机污染物都有非常好的去除效果。对于这样难降解的污染物,单纯提高活性污泥浓度并不能提高其处理效果,这是因为这些污染物需要一些特殊类型的生长较为缓慢的微生物来降解。而在复合式系统中,由于附着态微生物的存在,容易使这些生长缓慢的微生物得以增殖,从而提高了对难降解污染物的处理效果。对于易生物降解的污染物,活性污泥(悬浮态微生物)所起的作用就较大,因为此时不需要太长的接触时间。在复合式工艺中,当污染物最大比降解速率低于 0.71 d^{-1} 时,生物膜的去污占较大作用,当最大比降解速率低于 0.1 d^{-1} 时,这种作用更明显,这可以用两种不同形态微生物竞争可用底物来解释。当污染物最大比降解速率为 0.1 d^{-1} 时,生物膜的去污效率随进水有机物浓度的升高而升高,而活性污泥的去污率则保持相对恒定。复合式工艺对 MSRR 为 0.1 d^{-1} 的污染物要取得 80% 以上的去除率,最优的运行条件是: COD_G 负荷小于 $0.53 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,HRT 为 6 h,填料数量: $225 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

4 活性污泥和生物膜复合/联合工艺优点和尚需解决的问题

复合式工艺的优点是:用于污水处理厂改造时简单易用,不占用新的土地,能够提高悬浮污泥的沉降性,抑制污泥膨胀,提高运行稳定性,也可用于新建污水处理厂。其存在的问题是:尚无国产的性能良好的商品化浮动填料;对浮动载体,需要在曝气池末端设置填料气提泵等装置使填料回流至始端;国际上的应用大多是针对除氮的改造应用,增加填料后对除磷效果的影响尚未见实际工程报道;国内积累的工程经验尚不多。

联合式工艺的优点是:采用短泥龄 A^2/O 和 BAF 联合工艺,活性污泥段可起到 BAF 的预处理工序,其出水 $\text{COD}_G \leq 100 \text{ mg/L}$, $\text{SS} \leq 20 \text{ mg/L}$,非常适合 BAF 的硝化过程,延长 BAF 的反冲洗周期;将

BAF 出水回流至短泥龄 A^2/O 的缺氧区,和反硝化除磷理论相结合,可同时解决除磷和脱氮过程污泥龄的冲突,以及污水中碳源不足的问题;控制活性污泥段进入 BAF 的水量比例,使 BAF 出水和活性污泥段出水混合后出水达到排放标准的同时,将部分 BAF 出水用于污水回用,可达到节能和水资源利用的双重目的。其存在的问题是:由于 BAF 水力损失较大,用于污水处理厂改造时,会受到现有构筑物高程的限制,可能需新设加压泵站;工艺流程较为复杂,设备和管线增多,维护量增大;回流至 A^2/O 缺氧段的 BAF 出水会使 MLSS 降低,使容积反硝化速率减小;现有活性污泥段二沉池的数量可能要增加,以满足 BAF 回流水造成的其水力负荷的升高;短泥龄 A^2/O 的剩余污泥稳定化程度较低,其合理的处置问题需要解决;投资较大,需占用新的土地,对新建污水处理厂更为适合。

参考文献

- 1 Kos P. Short SRT (Solids Retention Time) nitrification process/flowsheet. Wat Sci Tech, 1998, 38(1): 1~2
- 2 Chudoba P, Pujol R. Technical solutions for upgrading high rate and medium loaded activated sludge plants for nutrient removal. Wat Sci Tech, 2000, 41(9): 131~138
- 3 Randall W, Sen D. Full-scale evaluation of an integrated fixed-film activated sludge (IFAS) process for enhanced nitrogen removal. Wat Sci Tech, 1996, 33(12): 155~162
- 4 Müller N. Implementing biofilm carriers into activated sludge process - 15 years of experience. Wat Sci Tech, 1998, 37(9): 167~174
- 5 周雷. 城镇污水生物处理新工艺及其应用. 中国给水排水 2003, 19(12): 36~39
- 6 Tam H L S, Tang D T W, Leung W Y, et al. Performance evaluation of hybrid and conventional sequencing batch reactor and continuous processes. Wat Sci Tech, 2004, 50(10): 59~65
- 7 Chen G H, Huang J-C, Irene M C Lo. Removal of rate-limiting organic substances in a hybrid biological reactor. Wat Sci Tech, 1997, 35(6): 81~89

◎通讯处: 212400 江苏省句容市句河瓜子沟桥南句容市污水处理厂

电话: 13895730816

E-mail: dyw01331@126.com

收稿日期: 2005-03-09