

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.14.002

Nereda[®]好氧颗粒污泥工艺配置及运行性能

吴志明¹, 陈学春¹, 赵欣², 刘洋²

(1. 德和威<北京>环境工程有限公司, 北京 100022; 2. 哈斯康宁工程咨询<上海>有限公司, 上海 200030)

摘要: Nereda[®]工艺是好氧颗粒污泥(AGS)工艺的一种。通过Nereda[®]工艺运行周期的介绍,分析了其好氧颗粒污泥的颗粒化成因以及脱氮除磷的优势,阐明了Nereda[®]工艺对比SBR传统活性污泥法的优缺点。目前,针对不同的污水处理现场开发了Nereda[®]工艺不同的工艺配置,以美国Wolf Creek、巴西Deodoro和爱尔兰Ringsend污水厂的Nereda[®]工艺为例,详细介绍了它们的概况以及实际运行性能,最后总结了Nereda[®]好氧颗粒污泥技术在未来应用场景中的竞争优势。

关键词: Nereda[®]工艺; 好氧颗粒污泥; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)14-0010-09

Process Configuration and Operational Performance of Nereda[®] Aerobic Granular Sludge Technology

WU Zhi-ming¹, CHEN Xue-chun¹, ZHAO Xin², LIU Yang²

(1. DHV <Beijing> Environmental Engineering Co. Ltd., Beijing 100022, China; 2. Royal Haskoning Consulting <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: The Nereda[®] process is a type of aerobic granular sludge (AGS) process. The granulation causes of aerobic granular sludge and the advantages of nitrogen and phosphorus removal were discussed through the introduction of the operating cycle of the Nereda[®] process. The advantages and disadvantages of the Nereda[®] process compared to the traditional activated sludge process of SBR were clarified. Various Nereda[®] process configurations have been developed for different sewage treatment sites in different countries. The overview and actual operating performance of different wastewater treatment plants were introduced in detail with examples of the Nereda[®] process application at Wolf Creek WWTP in the United States, Deodoro WWTP in Brazil, and Ringsend WWTP in Ireland. Finally, the competitive advantages of Nereda[®] aerobic granular sludge technology in future application scenarios were summarized.

Key words: Nereda[®] process; aerobic granular sludge; nitrogen and phosphate removal

Nereda[®]工艺属于好氧颗粒污泥(AGS)工艺的一种,这项业界突破性的技术源于荷兰代尔夫特理工大学的发现,后通过与荷兰各地水务局、荷兰应用水研究基金会(STOWA)和荷兰皇家哈斯康宁DHV公司(Royal Haskoning DHV)等多方合作,将这项具有优异的脱氮除磷性能的新型水处理工艺于

2005年应用到实际工程中,并随之在世界各地大规模推广。目前,Nereda[®]工艺已进入中国并已建成了全规模的处理厂。

1 Nereda[®]工艺的污泥颗粒化成因

Nereda[®]工艺有着特殊的周期运行模式(见图1),每个反应器都经过一个同时进水/出水-曝气-沉

淀的循环。

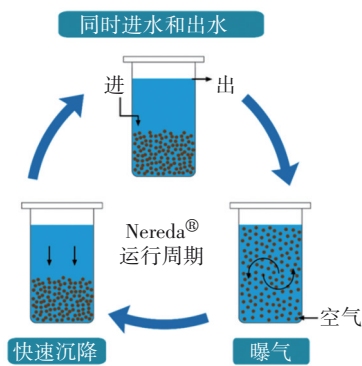


图1 Nereda[®]工艺的运行周期

Fig.1 Operating cycle of the Nereda[®] process

从工艺运行模式看,Nereda[®]是一种SBR批处理过程,但其不仅能培养出性能良好的好氧颗粒污泥而且还得到了工程化应用,分析其原因主要有以下几方面:

① 进水方式。Nereda[®]反应器上向柱塞流的进水方式营造了特定水力选择压的环境,污泥因沉降性的差异会自然地在反应器竖向高度上形成梯度分布,在底部原水和上部“干净”水没有掺混的情况下,反应器底部沉降性好的污泥总是与“新鲜”的原水充分接触、反应,这很好地形成了“盛宴期”。相比反应器上部的絮状污泥,底部的污泥具有更多的生长机会,这便为大颗粒污泥的形成提供了很好的竞争优势。

② 微生物的选择。在厌氧进水条件下,聚磷菌和聚糖菌等细菌可以将水中易降解COD转化为储存聚合物,随后在好氧条件下将储存聚合物作为碳源用于微生物的慢速生长。在这种“盛宴期”和“饥饿期”交替环境中,此种微生物特有的机制是维持颗粒稳定性和防止好氧阶段丝状菌膨胀增殖的本质^[1-3]。相关研究显示,较长的厌氧进水时间和以慢速生长细菌为主的颗粒污泥的结构更为致密,表面更为光滑,稳定性更好^[4-5]。在同一个反应器中通过步序时间的控制,可以很好地形成“盛宴期”和“饥饿期”的交替环境,从而更好地培养出稳定的颗粒污泥。即使是在连续流系统中,若想要培养出好氧颗粒污泥,也同样需要创造合适的“盛宴期”和“饥饿期”的环境,但这比SBR系统更加难以实现^[6]。相关报道证实,减小曝气强度和曝气时间会限制聚糖菌的生长,但会促进聚磷菌的富集^[7]。

③ 物理选择压。通过快速沉降,粒径较大且沉降性能好的颗粒污泥会被截留在反应器,而粒径小、沉降性能差的污泥则会被排出反应器^[8]。通过选择性地将污泥床上部或者底部的污泥排出反应器,还可以获得不同的优势菌群,如聚磷菌或者聚糖菌^[9]。

2 Nereda[®]工艺脱氮除磷的优势

① 脱氮

因好氧颗粒污泥有着特殊的分层结构,从外到内按照溶解氧的浓度梯度分别对应好氧区、缺氧区和厌氧区。好氧区主要分布着聚磷菌和硝化菌,缺氧区主要为反硝化菌,厌氧区则以聚糖菌等异养菌为主^[10]。脱氮主要发生在Nereda[®]运行周期的曝气阶段,此时除了发生硝化作用将氨氮氧化为硝酸盐氮外,颗粒内部因存在缺氧区还会通过反硝化反应将硝酸盐氮还原为氮气,这个过程被称作同时硝化反硝化(SND)。尤其是在适宜的溶解氧以及进水VFA含量较高的情况下,同时硝化反硝化作用会得到加强^[11]。运行过程中,通过各个在线监测仪表的实时监测如溶解氧、氨氮等,可实现智能化精准曝气,还可通过交替的好氧、缺氧条件(如对曝气段的启停)来强化系统的反硝化功能。相关研究还证实,聚磷菌和聚糖菌在厌氧阶段储存的内碳源也可充当反硝化过程中的电子供体^[12],因此可以减少对外部碳源的消耗,从而提升脱氮能力。

② 除磷

在曝气阶段,聚磷菌将磷酸盐转化为聚磷化合物,从而使颗粒污泥的灰分和密度增加^[13],由此聚磷菌更易在反应器底部富集,而聚糖菌由于不具备好氧吸磷、厌氧释磷的能力会在反应器上部占据优势。通过Nereda[®]快速沉降的周期运行,可选择性地将反应器上部沉降性能较差的以聚糖菌为主的污泥“淘洗”出反应器,从而使反应器中的聚磷菌成为优势菌群^[14]。在柱塞流的厌氧进水过程中,底部较大密度的聚磷菌可以优先摄取“新鲜”污水中的易降解COD并发生厌氧释磷过程,较大程度上避免了厌氧阶段聚糖菌对碳源的争夺。因而Nereda[®]工艺比传统活性污泥法具备更好的生物除磷能力。

3 Nereda[®]工艺对比SBR工艺的优缺点

Nereda[®]工艺和传统SBR活性污泥法的运行方式明显不同。Nereda[®]反应器不需要单独耗时的滯

水阶段,依靠固定滗水器溢流水即可。在滗水过程中,Nereda®工艺为恒液位运行,无需像传统SBR的移动滗水器一样在高低液位之间变动。更为重要的是,相较于传统SBR,Nereda®工艺的最大优势在于其反应器的污泥浓度可达8 g/L以上,并且沉降速度更快,因此Nereda®反应器的池容比传统SBR减少50%以上。在污泥产率上,由于好氧颗粒污泥中的异养菌(如聚磷菌或聚糖菌),以及硝化菌的比生长速率比活性污泥低,但是好氧颗粒污泥的内源呼吸速率比活性污泥高,因此其生物污泥产量比传统活性污泥法更低^[15]。当然,实际的污泥产量会受运行人员操作管理水平的影响。此外,由于Nereda®反应器在进水和曝气阶段有着特殊的水力流态和曝气方式,因此不需要搅拌器、污泥回流泵等动力设备,而是通过采用专门的布水、布气、排泥、滗水内件等完成Nereda®工艺的高效运行。

当然,以序批方式运行的好氧颗粒污泥反应器同样也存在固有的缺点。最受关注的问题是活性污泥的启动周期以及颗粒污泥的稳定性。以普通的活性污泥作为接种污泥到逐步颗粒化并达到设计处理能力,通常需要3~5个月的启动时间,具体取决于污水流量、浓度和水温。在启动阶段之后,污泥颗粒化的过程可能仍会持续数月。因此,从普通活性污泥培养到成熟的颗粒污泥可能需要较长的时间。在污泥颗粒化过程中,好氧颗粒的生长会增大污泥的沉降速度和密度,但是颗粒的大小是有限制的。因为颗粒尺寸过大会使传质受限,加剧微生物在颗粒内部对底物的竞争,饥饿条件下会增加内源呼吸速率并加快细胞水解^[16],从而影响有机物的去除和好氧颗粒的稳定性。此外,在低有机负荷或低溶解氧条件下,有可能会造成颗粒表面丝状菌的过度繁殖,导致污泥沉降性变差,并影响好氧颗粒污泥系统的稳定^[17]。值得注意的是,不是所有采用Nereda®工艺的项目在运行期间都能达到污泥100%的颗粒化,即便如此,Nereda®反应器中的污泥体积指数(SVI)相比普通活性污泥会有明显降低,沉降性能优异,出水COD和氮、磷能够在短期内满足高标准排放要求^[14]。当然,接种部分或者全部颗粒污泥可以加快Nereda®工艺的启动周期,最快可以在1个月内完成反应器的启动。目前,在全球范围内已有50多座采用Nereda®工艺的污水处理设施在运行,其中不乏已经稳定运行5年以上的污水

处理厂。

另外,Nereda®反应器的进水置换率不宜过高,与传统SBR相比,Nereda®工艺的进水置换率可高达65%以上,但当布水内件出现堵塞而导致布水不均时,可能会造成出水短流,从而使出水指标异常。同时,因Nereda®系统依托专有的智能化控制器和配套的PLC设备包,以及在线仪表(如DO、氨氮或ORP和自动阀门等)来实现工艺的高级控制,因此仪表、阀门的维护工作量以及频次比常规活性污泥处理系统更多。

就单个反应器而言,Nereda®与传统SBR一样,进水为间歇式,因此处理连续的来水往往需要多个Nereda®反应器。多个反应器按照时序交替进行进水和出水、曝气、沉淀,循环运行,对智能化控制要求较高,一旦某个正在运行的反应器出现故障不能工作,那么Nereda®系统的总处理水量可能会在某个时段明显减少。

4 Nereda®系统的工艺配置

不论是新建项目还是扩容、改造项目,Nereda®工艺都能依据不同的配置(见图2)来满足项目的建设需求。

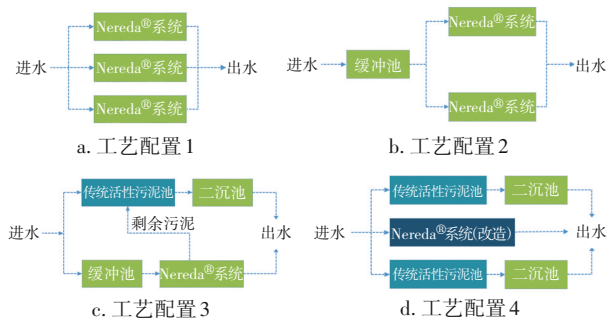


图2 Nereda®系统的典型工艺配置示意

Fig.2 Schematic diagram of typical Nereda® system configurations

① 配置1:新建3个或3个以上的Nereda®反应器,配置结果是任何时刻至少有一个Nereda®反应器在进水。该配置方式适用于重力流或者有泵送连续进水的系统,其优点是可实现连续进水和出水,允许完全靠重力流进水,每个Nereda®反应器的进水流量变化完全和上游来水的日变化规律一致。

② 配置2:新建1个以上的缓冲池以及2个以上的Nereda®反应器,适用于采用泵送的进水系统。在水量不大或者处理流量波动较大的工业水等场

合,有可能只需要 1 个 Nereda[®]反应器。此种配置已被证明是最常见和最经济的配置方式之一。原因在于有进水缓冲池的情况下,留给 Nereda[®]反应器的生物反应时间可以更长,因而其池容往往可以做得更小,曝气风机的风量也可以更小。因 Nereda[®]反应器涉及较多的特殊内件,从经济性角度考虑,增加其池容往往比增加进水缓冲池池容的造价更高。所以是否增加进水缓冲池及缓冲池和 Nereda[®]反应器的池容通常需要通过系统经济性衡量来确定。另外,当来水流量或者负荷波动较大时,在 Nereda[®]反应器前设置缓冲池可以更好地削峰,也有利于整个系统的稳定运行。

③ 配置 3:新建 Nereda[®]系统与常规活性污泥

法系统平行运行,此种配置也叫混合扩容或者并行扩容。在此种配置中,新的 Nereda[®]系统只接收部分原水,而其余部分由现有的常规处理系统处理。与并行扩容相比,混合扩容通过将 Nereda[®]剩余污泥投加到常规活性污泥反应池,可以强化普通污泥的性能,增大系统处理能力和增强生物脱氮除磷性能。

④ 配置 4:将现有的常规活性污泥池或 SBR 池改造成 Nereda[®]反应器。这种配置利用了现有的基础设施,同时可增加系统处理能力,并减少能源和化学品的使用。

上述 4 种配置工艺在已经运行的 Nereda[®]项目中有许多成功的工程实例,汇总见表 1。

表 1 正在运行的国内外部分 Nereda[®]工艺工程案例汇总

Tab.1 Summarized data on the worldwide operational Nereda[®] process cases (partial)

污水厂名称	运行开始时间	污(废)水种类	日均处理水量/(m ³ ·d ⁻¹)	类型	工艺配置
Blackburn(英国)	2020 年	市政污水	65 600	新建	配置 1:6N
Wolf Creek(美国)	2020 年	市政污水	13 250	新建	配置 1:3N
Epe(荷兰)	2011 年	市政污水	8 000	新建	配置 1:3N
Alpnach(瑞士)	2018 年	市政污水	14 000	新建	配置 2:1B+3N
Barston(英国)	2019 年	市政污水	16 600	新建	配置 2:1B+3N
Deodoro(巴西)	2016 年	市政污水	64 800	新建	配置 2:3B+3N
Longyou(中国)	2019 年	工业废水	20 000	新建	配置 2:1B+2N
Zutphen(荷兰)	2019 年	工业废水	10 135	新建	配置 2:1B+2N
Westfort(荷兰)	2015 年	工业废水	1 422	新建	配置 2:1B+2N
Garmerwolde(荷兰)	2014 年	市政污水	20 000	新建	配置 2:1B+2N
Vroomshoop(荷兰)	2013 年	市政污水	2 800	改造	配置 3:混合扩容
Ringsend(爱尔兰)	2017 年	市政污水	625 000	改造	配置 3+配置 4
Frielas(葡萄牙)	2014 年	市政污水	12 000	改造	配置 4:改造 CAS
Sappi Lanaken(比利时)	2018 年	工业废水	14 400	改造	配置 4:改造 CAS
Idaho Springs(美国)	2021 年	市政污水	3 770	改造	配置 4:改造 SBR

注: B 指缓冲池;N 指 Nereda[®]反应器;CAS 指传统活性污泥工艺。

5 Nereda[®]工艺的运行性能

5.1 美国 Wolf Creek 污水处理厂(工艺配置 1)

Wolf Creek 污水处理厂位于美国阿拉巴马州南部鲍德温县的 Foley 市区,原生物处理工艺是氧化沟,可以处理约 7 570 m³/d 的污水,处理后的出水排入 Wolf Creek 河道。

为了应对人口增长需要,并满足未来更严格的废水排放要求尤其是氮和磷的排放要求,作为该厂的业主即美国 Riviera Utilities 公司,没有直接选择新建额外的氧化沟系统来提高处理能力,而是选择了 Nereda[®]工艺。主要原因是厂区可利用的空间有

限,而 Nereda[®]工艺能够以更具经济性的方式解决未来高排放标准的问题。应用 Nereda[®]工艺技术升级后,污水日均处理量将提升至 13 250 m³/d,峰值处理量为 22 710 m³/d。该厂也是 Nereda[®]工艺在美国落地的首座全规模污水处理厂。

该厂 Nereda[®]系统包含三座圆形的好氧颗粒污泥反应器,每座反应器的池容为 2 200 m³。自 2020 年 1 月开始启动,30 d 出水即达到了严格的排放要求,启动阶段的进、出水指标见表 2。

从长期的运行数据来看,经 Nereda[®]工艺处理后的出水通过滤布滤池去除悬浮物后,最终出水

BOD₅和TSS浓度均小于5 mg/L(见表3)。即使是面对该地区常见的热带风暴和飓风带来的雨水(峰值流量最高可达960 m³/h),该厂仍能维持良好的性能并且始终满足出水排放要求。

表2 Wolf Creek污水处理厂Nereda®工艺在启动阶段的运行指标

Tab.2 Startup operational data of the Nereda® process in Wolf Creek WWTP

项目	进水均值	出水均值要求	滤布滤池出水均值
BOD ₅	190	5	5
TSS	175	10	3
TN		5	5
NH ₃ -N	19	1	1
TP	5	1.5	1.5

表3 Wolf Creek污水处理厂Nereda®工艺的设计水质和运行指标

Tab.3 Design water quality and operational data of the Nereda® process in Wolf Creek WWTP

项目	设计值		运行指标			
	进水均值	出水要求均值	进水		出水(滤布滤池)	
			平均值	95%保证率	平均值	95%保证率
COD	381		430	817	31	61
BOD ₅	275	5	204	504	3.6	6.5
TSS	235	10	292	1 048	3.1	6.4
TN		5			3.9	7.2
NH ₃ -N	42	1	19.6	29	0.3	1.2
TP	7.5	1.5	6	7	1.8	3.2

注: 运行指标为2020年1月—12月期间的数据。

为更好地了解Nereda®工艺系统颗粒化进程,在现场取样进行了粒径筛分试验,运行1个月以及9个月左右的污泥形态变化如图3所示(图源: Aqua-Aerobic Systems公司)。结果显示,运行1个月反应器内已经有粒径>600 μm的颗粒形成,运行9个月后粒径>212 μm的颗粒占比已经超过60%,最大颗粒粒径已达2 000 μm以上。

得益于颗粒污泥对有机物和氧气的高利用率,以及Nereda®智能控制器对工艺过程的精准控制,2020年该厂全年的吨水平均能耗仅0.26 kW·h/m³,相比原氧化沟工艺节约了40%~50%的能耗。凭借在占地和高标准出水水质方面的优势,采用Nereda®工艺的Wolf Creek污水处理厂在2021年GWI平台全球水奖评选中荣获“年度废水工程”杰出奖。

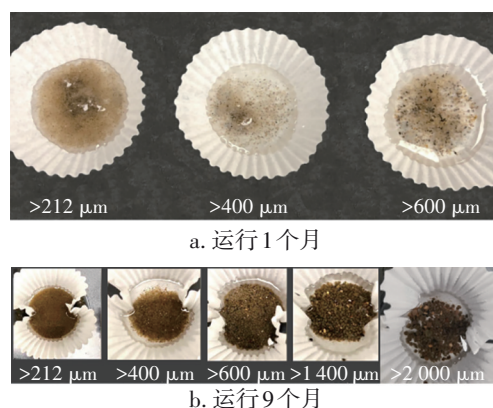


图3 Wolf Creek污水厂Nereda®反应器不同阶段的污泥形貌

Fig.3 Sludge morphology at different stages of the Nereda® process reactor in Wolf Creek WWTP

5.2 巴西Deodoro污水处理厂(工艺配置2)

Deodoro污水厂位于巴西海滨城市里约热内卢(2016年夏季奥运会的四个场馆所在地之一),其首要任务是为体育场馆周围的社区提供污水处理服务。该污水处理厂是南美洲首座采用Nereda®工艺的污水厂。该厂共分两期建设,一期设计处理水量为64 800 m³/d,已于2016年投入使用。二期处理水量将达到86 400 m³/d,覆盖里约热内卢西区40%的人口,相当于处理432 000人口当量(1个人口当量相当于60 gBOD₅/d,下同)的废水。两期建设完成后,Nereda®系统的处理能力将是Deodoro污水厂原处理能力的10倍。目前新的污水处理厂共有3座Nereda®反应器(见图4蓝色部分),每个反应器池容约6 500 m³,另外还有将原有曝气池改造成的总池容约6 900 m³的进水缓冲池。

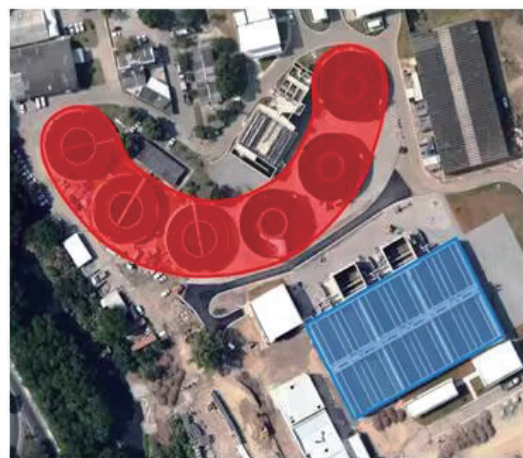


图4 巴西Deodoro污水处理厂(Nereda®工艺)

Fig.4 Overview of Deodoro WWTP with Nereda® process in Brazil

2017年2月以后,该厂原有污水处理设施(包含曝气池和二沉池)已完全退役(见图4红色部分),所有进入厂区的污水都只经过Nereda®系统处理,且无需后续的三级处理设施。从2020年全年的运行数据(见表4)来看,虽然当地的出水指标只对BOD₅和SS有要求,但Nereda®系统处理出水这两项指标远高于排放标准,而且对氮和磷的去除率也分别达到了82%和57%。Nereda®系统出水达标的同时也实现了污泥的颗粒化,如图5所示。

表4 2020年Deodoro污水厂(Nereda®工艺)的设计水质和运行指标

Tab.4 Design water quality and operational data of Deodoro WWTP with Nereda® process in 2020

mg·L⁻¹

项目	设计值		运行指标			
	进水	出水要求	进水		出水	
	平均值	平均值	平均值	95%保证率	平均值	95%保证率
COD	560		215	408	41.5	78.7
BOD ₅	300	40	97	185	15.6	34.0
TSS	300	40	87	229	11.7	22.2
TKN	45		26	41	4.6	9.6
NH ₃ -N					2.2	7.8
PO ₄ ³⁻ -P					1.1	3.1
TP	10		3	5	1.3	2.7

注: 运行指标为2020年1月—12月期间的数据。



图5 Deodoro污水厂的Nereda®反应器出水堰以及颗粒污泥

Fig.5 Nereda® effluent weir and granular sludge in Deodoro WWTP

因为Nereda®系统拥有优异的性能,流向里约热内卢西区河流和帆船赛事举办地瓜纳巴拉湾的生活污水大大减少,同时其水质也明显得到改善。因而采用Nereda®工艺的Deodoro污水厂也成为2016年里约奥运会最重要的遗产项目之一。

5.3 爱尔兰Ringsend污水厂(工艺配置3和4)

都柏林现有的Ringsend污水处理厂于2003年投入使用,是爱尔兰最大的污水处理厂,承担着爱尔兰40%的公共污水处理责任,其设计处理量为164×10⁴人口当量,处理流量为11.3 m³/s,出水要求仅基于BOD₅和SS的去除。但目前的处理量已达190×10⁴人口当量,其中生活污水占58%,工业废水占42%。雨季最大进水流量会增加到23 m³/s,此时将启用雨水储池来均衡缓冲。

现有的污水处理厂包括格栅、隔油沉砂池、初沉池这些前处理单元,以及两层堆叠的24座作为二级生物处理单元的SBR池(每层12座),如图6所示。SBR池采用间歇式循环延时曝气活性污泥法(简称ICEAS),每座SBR池的容积为13 500 m³。SBR出水通过UV消毒后排放到敏感水域——Liffey河。



图6 爱尔兰Ringsend污水处理厂

Fig.6 Ringsend WWTP overview in Ireland

为了解决目前的超负荷问题和运行中的相关瓶颈,爱尔兰水务公司提出了对现有污水厂的主要升级思路,包括采用营养物去除工艺,以满足“欧洲城市废水处理指令”所需的处理水平,即TN和TP的年平均分别小于10 mg/L和1 mg/L。在升级项目之后,Ringsend污水厂将有能力处理240×10⁴人口当量(144 000 kgBOD₅/d)和60×10⁴ m³/d的废水,峰值流量为13.8 m³/s。

引入Nereda®技术的第一步是运行一个小型工艺验证装置(最大处理量为5 m³/d),以建立稳定的运行条件,然后对整个项目设计流量/负荷进行长时间的测试。在为期一年的中试验证中,保持了和原SBR池相同的水温条件(10~20℃)和相同的进水水质(见表5)。

2015年6月—2016年6月期间的实测运行数据证实,Nereda®工艺单元处理的污水完全满足新的排

放标准。具体见表6。

表5 Ringsend污水厂的设计进、出水水质

Tab.5 Design influent and effluent quality of

Ringsend WWTP

mg·L⁻¹

项 目	进水均值	出水要求		
		平均值	95%保证率	最大值
COD	532		125	250
BOD ₅	240		25	50
TSS	252		35	87.5
TN	36.5	10		
TP	5.8	1		

表6 Ringsend的Nereda®工艺验证装置的出水指标

Tab.6 Effluent data of the Nereda® process proving

unit in Ringsend WWTP

mg·L⁻¹

项 目	Nereda®工艺验证装置出水指标		
	平均值	95%保证率	最大值
COD	40.6	61.0	82.0
BOD ₅	5.5	10.9	14
TSS	9.1	22.0	34.0
TN	6.9		
TP	1.0		

上述中试工艺验证获得成功之后,按照计划对位于上层的其中1座SBR池进行了Nereda®技术工程改造,如图7所示。



图7 Ringsend污水厂现有SBR单元改造为Nereda®反应器

Fig.7 Retrofit of an existing SBR to Nereda® reactor in

Ringsend WWTP

此改造的Nereda®反应器于2017年6月开始启动运行,处理水量为22 900 m³/d,峰值流量为1 700 m³/h。新的Nereda®反应器接种的是成熟的好氧颗粒污泥,处理水量比原SBR单元提高了1.25倍,短时间调试后出水即达到了排放标准(见表7)。在此运行期间,Nereda®反应器的污泥浓度从原先的2.5 g/L增加到了8 g/L,且培养出了具有良好沉降特性

的颗粒污泥。

表7 Ringsend污水厂Nereda®工艺单元运行指标

Tab.7 Operational data of Nereda® process unit in

Ringsend WWTP

mg·L⁻¹

项 目	COD	BOD ₅	SS	TP	TN
95%保证率下Nereda®出水	56	9	26		
Nereda®出水最大值	88	20	38		
Nereda®出水平均值	46	6	14	1	6

基于上述Nereda®反应器的运行数据,假定将24座SBR池都改造为Nereda®反应器,那么系统的总脱氮能力将达到18 000 kgN/d,比需要的氮目标去除能力高出28%。另外,Nereda®系统无需化学加药除磷,仅凭生物除磷即可满足TP<1.0 mg/L的排放标准。因此,该阶段的成功运行也验证了Nereda®反应器的高效脱氮和除磷能力。

如上所述,从单个Nereda®单元的运行表现和改造经济性来看,没有必要将24座反应池都改造成Nereda®反应器,只需将上层的12座SBR改造成Nereda®反应器,并将Nereda®反应器的剩余污泥持续投加到下层的12座SBR池,即形成混合扩容方案。于是,由SBR改造的Nereda®反应器运行稳定后,便将上层Nereda®反应器排出的剩余污泥接种到下层其中1座SBR反应池,形成混合SBR池,并对Nereda®反应器和混合SBR池的混合出水进行了较长时间的监测,具体出水水质见表8。

表8 Ringsend污水厂Nereda®+混合SBR系统的运行指标

Tab.8 Operational data of Nereda®+SBR combined

system in Ringsend WWTP

mg·L⁻¹

项 目	Nereda®反应器+混合SBR池的混合出水指标		
	平均值	95%保证率	最大值
COD	53	68	94
BOD ₅	8	17	19
TSS	14	25	49
TN	9.8		
TP	0.9		

注: 运行指标为2018年10月—2019年2月期间的数据。

混合扩容方案在连续运行中实现了预期的出水目标,且下层接收颗粒污泥的SBR反应池脱氮能力达到了527 kgN/d,比原普通SBR池提高了约33%。此外,混合SBR池的污泥沉降性更好更稳定。混合SBR和普通SBR反应器的30 min污泥体积指数(SVI₃₀)的对比如图8所示,从2017年4月接种剩

余污泥到运行优化的过程中,混合SBR污泥的 SVI_{30} 从接种之初的300 mL/g下降到了75 mL/g以下。

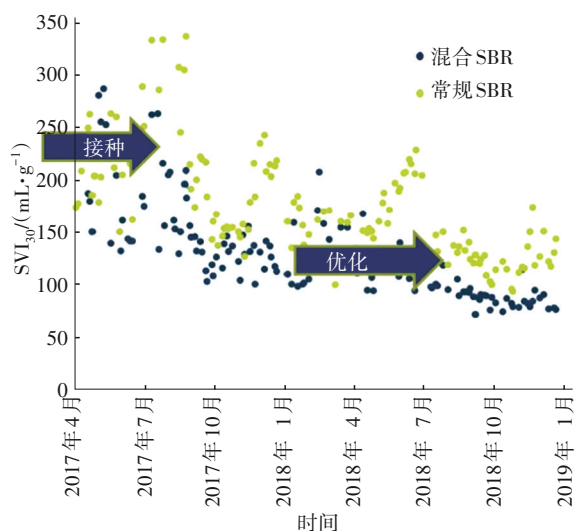


图8 Ringsend污水厂Nereda®+混合SBR与传统SBR的 SVI_{30} 比较

Fig.8 Comparison of SVI_{30} of the Nereda®+SBR combined system and conventional SBR activated sludge system in Ringsend WWTP

上述运行结果证实了混合扩容方案的可行性,且可以通过该方案将下层普通SBR池都转变成混合SBR池。这种混合工艺方案的优势在荷兰Vroomshoop污水处理厂也得到了印证。Vroomshoop污水厂新建的Nereda®系统和原有活性污泥系统并行运行,接收了Nereda®剩余污泥的活性污泥系统的 SVI_{30} 从原先的120 mL/g下降到70 mL/g以下^[18]。因此,Ringsend污水厂通过Nereda®工艺实现原位混合扩容的方案表现出了明显的竞争优势,既节省了因改造下层SBR池增加的土建施工费用,同时又提升了全厂的污水处理能力尤其是脱氮除磷性能。

为了在24座SBR池改造期间仍维持当前的污水处理能力,在未开发区域还新建了6座Nereda®反应器,也是上下两层的建筑结构,每层有3座反应器,每座反应器池容为8 500 m³。新建Nereda®系统总处理能力将达到40×10⁴人口当量。该污水厂2018年初开始建设,2021年11月启动运行。

估计到2027年Ringsend项目的升级改造将全部完成。届时24座SBR反应器也将通过混合扩容方案悉数改造完成,其处理能力将提高到200×10⁴人口当量,最终将成为一座超大型的Nereda®反应器和传统SBR池混合运行的污水厂。

6 结语

Nereda®反应器是一种序批式的反应器,因其特殊的周期运行模式,有利于污泥颗粒化的形成,并具备脱氮除磷的优异性能。为了处理连续的来水,Nereda®工艺往往需要多个反应器或者缓冲池。在不同应用场景中,可以有不同的工艺配置。作为新建项目,可以采用3个或以上的反应器(工艺配置1)并联运行或者1个缓冲池加上2个以上的反应器(工艺配置2)串联运行,具体视来水波动情况、进水是重力流还是压力流以及系统经济性来选择。而针对改造或扩建项目,可以采用并行扩容或者混合工艺扩容(工艺配置3),也可以通过将传统活性污泥池或者SBR池改造为Nereda®反应器(工艺配置4)来运行。对于用地紧张又亟需提升污水处理能力或者出水需提标的污水厂,工艺配置3和配置4无疑是较好的选择。接种了Nereda®剩余污泥的传统活性污泥系统,其污泥特性和沉降性能会大大改善,在提升污水厂系统处理能力的同时还可以强化脱氮除磷的性能。

参考文献:

- [1] VAN DIJK E J H, HAAKSMAN V A, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* On the mechanisms for aerobic granulation-model based evaluation [J]. *Water Research*, 2022, 216: 118365.
- [2] GAO D W, LIU L, LIANG H, *et al.* Aerobic granular sludge: characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, 31(2): 137-152.
- [3] LIU Y, LIU Q S. Causes and control of filamentous growth in aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. *Biotechnology Advances*, 2006, 24(1): 115-127.
- [4] YUAN Q, GONG H, XI H, *et al.* Strategies to improve aerobic granular sludge stability and nitrogen removal based on feeding mode and substrate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 84: 144-154.
- [5] DE KREUK M K, VAN LOOSDRECHT M C M. Selection of slow growing organisms as a means for improving aerobic granular sludge stability [J]. *Water Science & Technology*, 2004, 49(11/12): 9-17.
- [6] KENT T R, BOTT C B, WANG Z W. State of the art of aerobic granulation in continuous flow bioreactors [J].

- Biotechnology Advances, 2018, 36(4): 1139–1166.
- [7] DE SOUSA R S L, BARROS A R M, PAULO M F, *et al.* Aerobic granular sludge: cultivation parameters and removal mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2018, 270: 678–688.
- [8] SHENG G P, LI A J, LI X Y, *et al.* Effects of seed sludge properties and selective biomass discharge on aerobic sludge granulation [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 160(1): 108–114.
- [9] WINKLER M K H, BASSIN J P, KLEEREBEZEM R, *et al.* Selective sludge removal in a segregated aerobic granular biomass system as a strategy to control PAO–GAO competition at high temperatures [J]. Water Research, 2011, 45(11): 3291–3299.
- [10] WINKLER M K H, KLEEREBEZEM R, DE BRUIN L M M, *et al.* Microbial diversity differences within aerobic granular sludge and activated sludge flocs [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(16): 7447–7458.
- [11] LAYER M, VILLODRES M G, HERNANDEZ A, *et al.* Limited simultaneous nitrification–denitrification (SND) in aerobic granular sludge systems treating municipal wastewater: mechanisms and practical implications [J]. Water Research X, 2020, 7: 100048.
- [12] WANG Y Y, GUO G, WANG H, *et al.* Long-term impact of anaerobic reaction time on the performance and granular characteristics of granular denitrifying biological phosphorus removal systems [J]. Water Research, 2013, 47(14): 5326–5337.
- [13] BASSIN J P, WINKLER M K H, KLEEREBEZEM R, *et al.* Improved phosphate removal by selective sludge discharge in aerobic granular sludge reactors [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, 109(8): 1919–1928.
- [14] PRONK M, DE KREUK M K, DE BRUIN B, *et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment [J]. Water Research, 2015, 84: 207–217.
- [15] ROLLEMBERG S L D S, DE BARROS A N D, LIRA V N S A, *et al.* Comparison of the dynamics, biokinetics and microbial diversity between activated sludge flocs and aerobic granular sludge [J]. Bioresource Technology, 2019, 294: 122106.
- [16] LEE D J, CHEN Y Y, SHOW K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 919–934.
- [17] FRANCA R D, PINHEIRO H M, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* Stability of aerobic granules during long-term bioreactor operation [J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(1): 228–246.
- [18] PRONK M, GIESEN A, THOMPSON A, *et al.* Aerobic granular biomass technology: advancements in design, applications and further developments [J]. Water Practice & Technology, 2017, 12(4): 987–996.

作者简介:吴志明(1989–),男,福建南平人,硕士,工程师,主要从事水污染治理工艺设计工作。

E-mail:jimmy.wu@dhv-beec.com

收稿日期:2022-08-10

修回日期:2022-09-30

(编辑:丁彩娟)

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力