

# 新概念污水处理厂的低碳设计技术要点研究

相凤欣, 马 昭, 范晓莉

(西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 传统污水处理厂以使污染物达标为主要目的, 采用常规技术处理, 污水处理能耗较高。为实现“双碳”目标, 在“双碳”背景下, 传统的污水处理厂要逐渐向新概念水厂转变, 污水处理厂不能再仅仅是去除污染物的系统, 而是资源和能源工厂, 为自身及周边区域提供再生资源和能源, 为社会可持续发展做出贡献。对新概念污水处理厂的低碳设计技术要点进行研究, 可以从低碳污水处理技术、污水处理能源开发技术、污水处理资源回收技术三个方面进行设计, 从而达到安全高效、低碳节能、资源化利用的目的。

**关键词:** 新概念污水处理厂; 低碳设计; 低碳污水处理技术; 污水处理能源开发技术; 污水处理资源回收技术  
**中图分类号:** X703.1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2025)03-0174-04

## Research on Key Points of Low-carbon Design Technology for New-concept Wastewater Treatment Plant

XIANG Fengxin, MA Zhao, FAN Xiaoli

(Xi'an Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

**Abstract:** The traditional wastewater treatment plants (WWTPs) are mainly to treat pollutants and meet the standards with the conventional technology, but the energy consumption of sewage treatment is high. In order to achieve the goal of “double carbon”, under the background of “double carbon”, the traditional WWTPs will be gradually transformed into new-concept WWTPs. The WWTP is not only a system for removing pollutants, but also a resource and energy plant, which provides the renewable resources and energy for itself and its surrounding areas, and contributes to the sustainable development of society. The key points of low-carbon design technology in new-concept WWTP are studied, which can be designed from three aspects of low-carbon sewage treatment technology, sewage treatment energy development technology, and sewage treatment resource recovery technology so as to achieve the purpose of safety, high efficiency, low-carbon energy saving, and resource utilization.

**Keywords:** new-concept wastewater treatment plant (WWTP); low-carbon design; low-carbon sewage treatment technology; sewage treatment energy development technology; sewage treatment resource recovery technology

## 0 引言

2013年由6位专家发起、并在2020年扩展成9位知名专家组成的概念厂专家委员会提出:“建设面向未来,超越当今世界先进水平20年的中国污水处理概念厂,由跟跑者转变为领跑者”,实现“水质永续、能源回收、资源循环、环境友好”的追求目标。

习近平总书记在联合国第75届大会上表示到2030年我国要实现“碳达峰”目标,到2060年我国要落实“碳中和”目标,为了使“双碳”目标触底,我国颁布了诸多政策,如《减污降碳协同增效实施方案》<sup>[1]</sup>、《2030年前碳达峰行动方案》<sup>[2]</sup>等,为各行各业的发

展转型和碳减排行动确立了目标和方向。因此,在“双碳”背景下,建立安全高效、低碳节能、资源化利用的新概念污水处理厂是未来发展的必然趋势。

## 1 污水处理厂碳排放情况<sup>[3-4]</sup>

污水处理厂的污水处理结构一般包括格栅、沉砂池、初沉池、生物池、二沉池及深度处理等,而温室气体排放量的核算范围主要考虑三类:CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O。

### (1) CO<sub>2</sub>排放

污水处理厂二级生物处理利用微生物降解去除污染物,使污水中的可降解污染物一部分为微生物提供能量,被氧化为CO<sub>2</sub>;一部分则被同化为微生物自身的细胞物质,当微生物发生内源呼吸时,会消耗自身物质、生成CO<sub>2</sub>排放。

收稿日期: 2024-05-09

作者简介: 相凤欣(1987—),女,硕士,工程师,从事给排水设计工作。

## (2)CH<sub>4</sub>排放

污水处理中所有处理单元均会产生不同程度的厌氧反应,在微生物的作用下产生CH<sub>4</sub>排放。

## (3)N<sub>2</sub>O排放

在污水处理厂的二级生物处理中,常常会利用微生物的代谢降解含氮污染物,目标是产生N<sub>2</sub>、排入大气;但是在实际的污水处理厂运行过程中,硝化和反硝化反应不彻底时,会产生N<sub>2</sub>O中间产物,排入大气中。

综合上述现状碳排放情况,污水处理行业的碳排放量占全社会碳排放总量的1%~2%<sup>[5]</sup>,因此,未来污水处理厂在设计时应当考虑从低碳污水处理技术、污水处理能源开发技术、污水处理资源回收技术方面着手,以期实现新概念污水处理厂节能降碳的目标。规划城镇污水处理厂的碳中和运行路径如图1所示。

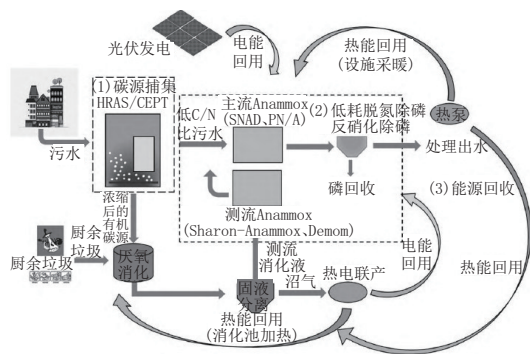


图1 城镇污水处理厂的碳中和运行路径<sup>[6]</sup>

## 2 低碳污水处理技术

### 2.1 低碳污水处理工艺

污水中的有机物富含大量能源,在传统的污水处理工艺中这部分能源往往直接被矿化为CO<sub>2</sub>,排入大气中,成为碳排放的主要环节之一。污水处理厂实现碳减排或碳中和运行的关键在于使处理工艺低耗运行、厂站能源可回收利用,故需要开拓新的低碳处理工艺,业内研究人员表示可使用“碳捕捉”<sup>[7]</sup>技术实现预处理目标,再加上热电联产、厌氧消化等技术,能高效回收利用污染物;在二级处理过程中可运用反硝化除磷、厌氧氨氧化等技术,其目的是降低能耗,确保污水处理厂达到低碳运行的效果。

#### 2.1.1 预处理“碳捕捉”技术

通过对“碳捕捉”技术加以分析可知,其原理是在污泥内捕集COD(Chemical Oxygen Demand),而后使用热电联产、厌氧消化等技术收集能源。“碳捕捉”技术能在CEPT(Chemical Enhanced Primary Treatment)、HRAS(High-Rate Activated Sludge)等技术的助力下

发挥作用。

HRAS的独特之处是可使污染停留时间及水力停留时间均较短,污泥负荷较高,用絮凝、吸附等方式去除污染物中的有机物,将有机物转移到污泥中,避免有机物被直接氧化消耗。Guven等<sup>[8]</sup>对污水处理厂的进水进行了中试试验,当HRT(Hydraulic Retention Time)为60 min时,COD总去除率达到了59%;当SRT(Sludge Retention Time)为0.35 d时,COD的吸附矿化率为23%。诸多研究显示,较短的SRT和HRT有利于运用高负荷活性污泥法实现低生物矿化率和高碳源捕捉。

CEPT是通过在初沉池中投加一定的絮凝剂以使得污水中胶体脱稳,形成较大的絮凝体,增加沉降速率,将更多有机物转移到污泥中,从而实现能源回收。He等<sup>[9]</sup>利用CEPT技术对污水厂进水加以处理,通过归纳总结研究成果发现,用聚合氯化铝铁能更好地去处污染物,使每升出水中的COD含量不足60 mg,去除率约为74%。CEPT技术在国外部分区域应用率较高,除运用该技术以外,还投放了FeCl<sub>3</sub>,捕捉BOD<sub>5</sub>的效率约为65%<sup>[10]</sup>。

#### 2.1.2 二级低碳处理技术

城镇污水处理中采用预处理阶段“碳捕捉”技术获取的碳源约为60%,二级处理进水中的COD浓度较低,无法实现脱氧除磷的需求,在应用与推广反硝化除磷、厌氧氨氧化等技术的过程中,可逐步实现基于低碳环境的脱氮除磷目标。

厌氧氨氧化技术属于新型脱氮技术,厌氧氨氧化反应是在厌氧条件下,以氨为电子供体,以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>或NO<sub>2</sub><sup>-</sup>为电子受体,将氨氧化成N<sub>2</sub>,这个反应能比全程硝化(氨氧化为硝酸盐)节省60%以上的供氧量。新加坡的樟宜回用水处理厂采用Anammox工艺,使得出水无机氮低于4 mg/L,能耗降低了30%,曝气池容积比传统活性污泥法降低40%。Morales等<sup>[11]</sup>将厌氧氨氧化技术用于污水处理,优化侧流处理效果,应用结果表明,该技术有利于降低整体曝气量,约能减少25%。厌氧氨氧化工艺主要应用于处理高氨氮废水(例如垃圾渗滤液处理及污泥厌氧消化液处理),但以厌氧氨氧化工艺原理为主流的污水处理厂较少,目前应用较为成功的有奥地利的Strass污水处理厂、新加坡的樟宜回用水厂与中国西安市的第四污水处理厂。

反硝化除磷工艺是反硝化脱氮与生物除磷二者的结合,是一种新型除磷工艺,应用该技术需率先厌

氧释磷,而后储存PHA(Polyhydroxyalkanoates),营造缺氧环境,使氧气被硝态氮所代替,电子受体持续吸磷。相较于传统的除磷技术手段,该技术能够处理碳源竞争、泥龄冲突等问题,还能节约碳源约50%,亦可减少曝气充氧电耗约30%<sup>[12-13]</sup>。在单污泥处理环节运用反硝化除磷理论,核心工艺为A<sup>2</sup>O(Anaerobic-Anoxic-Oxic)、BCFs(Biologisch-Chemische-Fosfaat-Stikst of Verwijdering)与UCT(University of Cape Town)等,通过厌氧、反硝化脱氮、好氧除磷等方式实现脱氮除磷的目标,其中辅助措施为反硝化除磷,可高效去除氮磷,同时还可减少能耗、节约碳源,但双泥法较为复杂,在应用领域中的推广存在客观阻力<sup>[14]</sup>。

## 2.2 高效控制技术

污水处理厂可通过智能控制内外回流比、加药系统、曝气系统三方面,对参数进行优化,从而节约运行能耗成本。

在污水处理过程中运用智能回流控制技术,并使用数字技术打造配套的控制系統,能依据构筑物的运行状态和水质水量自动调节工况点,还能灵活调控运行参数,针对回流泵进行变频控制,继而优化运行状态,达到追加节电效益的目的。

在污水处理厂内构建智能加药系统,主要是根据进水总磷和出水总磷浓度优化控制加药量,目的是做到按需加药,对污水厂的前段投加、同步投加与后段投加能够实现全自动的计算和控制,确保在达标排放的同时,使加药量最省。

智能曝气系统可以根据污染物负荷、好氧区溶解氧以及工艺运行状况自动评估曝气量需求,进而调控鼓风机的空气调节阀門,使得曝气量与需气量相匹配,从而达成节能目的。

## 2.3 节能降耗新设备

选用高效低耗的设备可以大幅度降低污水处理厂的单位能耗,使运行成本大大降低。污水处理厂的设备主要分工艺设备、电气设备、暖通设备。

工艺设备的主要能耗在于鼓风机,约占污水厂总能耗的60%,应选用高效低耗的设备,鼓风机流量应可在90%~100%范围可调,可通过閘門进行调节,并配调速装置节能。另一个主要耗能的设备是污水厂提升泵,为保证水泵运行效率较高,可运用变频与定频相结合的运行模式,依据集水池液位改变水泵的频率,达到降低启泵频率的目的,实现节能并延长设备使用寿命。

电气设备应合理选择电缆尺寸,减少配电线纜

长度;合理选用变压器,并保证可持续在高效区运行;选用高效节能灯具,采用智能控制照明系统,控制灯具开启及照明时间,节约能耗。

暖通设备应选用节能规范的空调通风产品,需满足机械通风的单位耗电量 $\leq 0.27 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ,空调风机单位耗电量 $\leq 0.48 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。

## 3 污水处理能源开发技术

污水处理能源开发技术是实现碳中和目标的重要举措,主要为发挥沼气热电联产手段的作用,代替以往的电能消耗方式;在污水处理系统内构建光伏发电结构,由于该结构有分布均匀的特点,可有效利用绿色能源,改善水厂运行方式,实现资源化再生的目标;而从冬季为居民供热的角度出发,可运用污水源热泵技术,同时实现夏季可满足居民制冷的需求。

厌氧消化-热电联产技术(AD-CHP, Anaerobic Digestion-Combined Heat and Power)是以污泥为处理对象产出甲烷,达到回收能量的目的。从“碳捕捉”的角度出发,可运用CEPT、HRAS等技术,在处理富碳污泥的过程中采用厌氧消化产能模式。Solon等<sup>[15]</sup>通过研究得出结论,相较于传统的活性污泥处理技术,HRAS在处理污泥时获取的甲烷较高,高出约1.25倍。厌氧消化产生的沼气可利用热电联技术产电产热,电能用于污水处理厂自身耗电,热能用于厂区的建筑采暖及消化池加热。

分布式光伏发电需要在厂区建筑物的表面安装元件,这些元件共同构成了光伏发电系统。在我国已经有部分污水处理厂投入建设了分布式光伏发电系统,并达到了能源自给自足的效果<sup>[16]</sup>。值得一提的是,光伏板安装在建筑物上,可发挥保温的作用,在此基础上可降低能耗。

污水源热泵技术是利用污水源热泵和热交换器组合的方式对污水进行热能回收。该技术可运用水与大气不同的温度差,把热量传至水中,亦可从水中传出热量,继而在污水内高效提取热能。当前我国以及国外发达国家广泛运用该技术,如挪威的一些污水处理厂使用该技术为商业建筑提供采暖所需热能<sup>[17]</sup>,西安市的第五污水厂、草堂污水厂等污水处理厂使用该技术既实现了能源自给自足的目标,又为周边建筑提供了采暖所需热能<sup>[18]</sup>。事实证明,回收污水的热能,能够有效降低厂区能耗并为临近区域供暖,间接减少温室气体排放。

## 4 污水处理资源回收技术

### 4.1 再生水回用

根据《城市污水再生利用分类》(GB/T 18919—2002)<sup>[19]</sup>、《国民经济行业分类码》(GB/T 4754—2017)<sup>[20]</sup>等国家标准,社会各界均可运用再生水,包括农业灌溉用水、工业生产用水、渔业用水等,再生水还可用来浇灌绿植并作为城市杂用水,亦可用来补充水源,而通过二级强化及深度处理工艺可满足以上回用水质要求。随着《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》<sup>[21]</sup>等相关政策出台,城镇再生水回用率还将逐年增加。

### 4.2 污泥资源化处置

污水处理厂的剩余污泥最终要进行无害化处置,方式主要包含焚烧发电、制砖、制肥、卫生填埋等,从剩余污泥中还可以回收类藻酸盐产品。研究发现,在常规的活性污泥工艺中,微生物均可利用污水中的有机物合成并保持较高含量的类藻酸盐,其含量可高达污泥干重的10%~35%<sup>[5]</sup>。

## 5 结 语

在“双碳”背景下,传统污水处理厂要逐渐向新概念水厂转变,污水处理厂不再仅仅是去除污染物的系统,而是资源和能源工厂,可为自身及周边区域提供再生资源和能源,为社会可持续发展做出贡献。新概念污水处理厂的低碳设计主要可以从以下几个方面进行。

(1)以预处理“碳捕捉”、厌氧氨氧化及反硝化除磷原理为基础,设计和研发新的低碳污水处理工艺,在生物氧化之前对碳源进行富集,再使用热电联产、厌氧消化等技术收集能源;二级处理阶段采用低碳新技术,进一步去除污水中的污染物。该技术相较传统的污水处理流程增加了对热电联产技术、厌氧消化等环节的投资,但产生的能源可源源不断产生后续经济效益。

(2)通过回流比、加药系统、曝气系统高效智能控制及节能降耗新设备的运用,最优化污水处理厂各项运行参数,节省运行期间的药剂及电能,该技术可降低15%以上的电能,并使药耗降低30%~50%<sup>[22]</sup>,总体碳排放量可大幅度减少。

(3)利用污水厂自身优势,利用厌氧消化-热电联产技术(AD-CHP)、光伏发电技术、水源热泵技术进行能源开发利用,可有效降低厂区的能耗,在满足

自身需求的同时,还可为临近区域提供电能或热能。

(4)污水处理后产生的尾水可作为再生水水源,为城镇提供杂用水、工业用水以及环境用水等,剩余污泥可制砖、焚烧发电、制磷等,实现了污水、污泥的资源回收利用。

### 参考文献:

- [1] 生态环境部. 减污降碳协同增效实施方案:环综合〔2022〕42号[EB/OL].(2022-06-13)[2024-05-09]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220617\\_985879.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html).
- [2] 国务院. 2030年前碳达峰行动方案:国发〔2021〕23号[EB/OL].(2021-10-26)[2024-05-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.html](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.html).
- [3] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [4] 谢淘,汪诚文. 污水处理厂温室气体排放评估[J]. 清华大学学报(自然科学版),2012,52(4):473-477.
- [5] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. 给水排水,2017,53(3):1-3,73.
- [6] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径—碳源捕获及碳源改向[J]. 中国给水排水,2017,33(8):43-52.
- [7] Rahman A, Meerburg F A, Ravadagundhi S, et al. Bioflocculation Management Through High-Rate Contact-Stabilization: A Promising Technology to Recover Organic Carbon from Low-Strength Wastewater[J]. Water Research, 2016(104):485-496.
- [8] Guven H, Ersahin M E, Dereli R K, et al. Effect of Hydraulic Retention Time on the Performance of High-Rate Activated Sludge System: A Pilot-Scale Study[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2017, 228(11):1-10.
- [9] He Qiulai, Wang Hongyu, Xu Congyuan, et al. Feasibility and Optimization of Wastewater Treatment by Chemically Enhanced Primary Treatment(CEPT): A Case Study of Huangshi[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2016, 28(1-4):209-215.
- [10] Nunez C, Dornfeld M, Shankles K C, et al. Cost Savings and Performance Improvement of Large System Iron Salt Use for Integrated Sulfide Control and Chemically Enhanced Primary Treatment by Using Peroxide Regenerated Iron Technology[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2010, 2010(16):1110-1121.
- [11] 黄霞,张晓健. 水与废水物化处理的原理与工艺[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [12] 郝晓地,汪慧贞,钱易,等. 欧洲城市污水处理技术新概念——可持续生物除磷脱氮工艺(上)[J]. 给水排水,2022,28(6):6-11.
- [13] 徐贵达,李冬,刘志诚,等. 高频间歇梯度曝气启动短程硝化反硝化除磷颗粒污泥[J]. 中国环境科学,2021(11):5125-5132.
- [14] 赵伟华,郑妹卉,王凯. 污水反硝化除磷技术的机理与工艺研究进展[J]. 水处理技术,2020(7):1-5.
- [15] Solon K., Jia Mingsheng, Volcke E.I.P. Process Schemes for Future Energy-Positive Water Resource Recovery Facilities[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2019, 79(9):1808-1820.
- [16] 刘晓明,严俊泉,黄棚兰. 太阳能发电在水处理行业中的创新应