

• 水业导航 •

城镇污水处理功能提升和技术设备发展的几点思考

国家城市给水排水工程技术研究中心 郑兴灿 孙永利 尚 巍 张秀华

1 城镇污水处理功能提升与技术设备发展的需求分析

“十一五”期间,城镇污水处理工程的建设 and 运行成为我国各地落实水污染物减排责任目标的最主要途径。截至 2010 年底,全国已建成城镇污水处理厂 2 832 座,总处理能力达 1.25 亿 m^3/d ,年处理污水量 343.3 亿 m^3 ,较“十五”末翻一番,累计新增污水处理厂 2 000 余座,有 16 个省、自治区、直辖市实现了县县(市)建有城镇污水处理厂的目标。全国设市城市污水处理率提高到 76.9%;县城污水处理率提高到 44.2%。通过城镇污水处理厂新增的 COD 年削减量约 500 万 t,占全国新增削减总量的 70% 以上,在实现 COD 总量减排 10% 目标的过程中发挥了重要作用。

“十二五”期间,国家有关部门将在 COD 考核指标的基础上,把氨氮等指标纳入各级政府的污染物减排考核责任目标,主要水污染物(COD、氨氮、总氮、总磷)的削减,仍然主要依靠城镇污水处理工程的设计建设、功能提升和优化运行,这不仅会进一步推动城镇污水处理新建工程项目的继续发展,而且会推动已有污水处理厂的持续升级改造。根据“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施规划,到 2015 年,全国城镇污水处理能力预计达到 2 亿 m^3/d ,新增污水处理规模 4 300 万 m^3/d ,升级改造规模 3 000 万 m^3/d ,新建污水再生利用设施 2 700 万 m^3/d 。

随着我国城镇污水处理规模的不断增大、排放标准的不断提高、污泥安全处理处置的迫切需求,特别是重点流域、区域的城镇污水处理厂,普遍要求达到国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级 A 排放标准,部分城市和区域要求出水水质达到更高、更严的水体质量标准,或者实现高品质再生水的生产,全面提升我国城镇污水处理厂的减排能力,保障稳定达标并同时达到省地、节能、降耗的效果,已经成为必然的选择和今后的发展方向,这就对城镇污水处理厂的功能提升和技术设备发展提出了更

高、更新、更迫切的要求,精细化管理也应运而生。

因此,结合我国实际情况和发展需求,特别是目前仍然有许多污水处理厂存在出水氮、磷不达标或不能同时达标的问题,以及部分污水处理厂 COD 难达标的问题(尤其工业园区),进一步发展我国自己的城镇污水处理技术设备研发、生产制造和综合服务体系,建立规模化和集约化的城镇污水处理技术设备产业,大力提升污水处理厂的污染物去除功能和实际处理能力,同时为更高排放标准提供技术储备,是十分必要的。与此同时,全球化的发展趋势使得世界各地对污水处理技术设备的需求也日益增大,为我国污水处理技术设备走向世界创造了难得的发展机遇。

2 城镇污水处理功能提升与技术设备发展的历史机遇

城镇污水处理工艺技术和运行效能的提高,离不开污水处理设备产品的同步发展,各类机械及电气设备的稳定运行是完成污水处理工艺过程的基础保障,设备产品的工艺性能、产品质量、使用寿命及后续服务水平是工程项目建设和运行成败的关键要素,设备的价格和能耗对工程项目的总造价和运行成本也有着非常重要的影响。另外,污水处理设备产品的创新发展和不断改进,对工艺技术的发展也起到重要的促进、补充和完善作用。

就城镇污水处理工艺技术和工程应用而言,我国 20 世纪 80 年代以前建设的城市污水处理厂大部分采用普通曝气活性污泥法或仅为一级处理,80 年代中期开始推行污水二级生物处理,80 年代中后期开始研究和应用生物除磷脱氮技术,90 年代开始进入城镇污水处理的快速发展阶段,改良 A^2/O 、除磷脱氮氧化沟等生物除磷脱氮工艺开始得到较为广泛的推广应用,城镇污水处理厂的生物处理池构造、水力流态和曝气混合设备选择呈现出多样化及集成化的发展趋势。与此同时,污水处理专用机械设备及控制系统的研制和生产制造也取得了

相当大的进展。

国产污水处理设备的生产始于 20 世纪 70 年代中后期,国内第一座大型城市污水处理厂(天津纪庄子)的污水处理专用机械设备基本都是国内自行设计和制造的,但当时污水处理设备产品的标准化、成套化、系列化水平低,定型产品少。80 年代后期到 90 年代中期,城市污水处理厂建设大多采用外国政府及国际金融机构贷款,污水处理技术设备基本上以成套引进为主,这虽然影响了自主研发和发展,但也为随后的引进消化和再创新提供了条件。90 年代后期,随着国债资金对污水处理项目的大力支持,出现了引进、消化、合资、自主创新并存的发展模式。

经过 20 多年的发展,我国城镇污水处理技术设备正逐渐走向成熟和规模化发展,通过不断地引进、消化、改进和自主创新,已经基本形成了适合我国城镇污水水质特点和自然资源环境条件的污水处理工艺技术路线,国产污水处理设备也基本上能够实现污水处理全工艺流程的配套。从进水端到出水端的污水处理工艺全过程都可以找到国内生产的设备产品,部分设备产品的技术性能已经达到或接近国际先进水平。特别是 20 世纪 90 年代以来,国家科技投入和扶持力度的不断加大,污水处理专用设备以及与之配套的通用设备的生产制造水平都有了较大程度的提高。

但就总体发展水平、市场竞争力和今后发展需要来说,我国城镇污水处理设备产业仍然处于相对落后的状态,产品质量、稳定性、可靠性和耐用性等方面有待进一步提高,不少通用和专用的污水处理机电设备,特别是一些比较关键的设备产品(例如水泵、风机、阀门、离心脱水机、膜装置),与国际先进水平还有较大的差距。随着排放标准的提高,特殊污染物、微量污染物的去除要求,已经形成新的处理功能 and 环境质量要求,从而在功能、质量以及省地、节能、降耗和环境影响等方面,对污水处理技术设备有了更高的要求,并形成新的和不断扩增的市场需求。

3 城镇污水处理功能提升与技术设备发展的基本思路

发展到今天,我国城镇污水处理工程设计、建设和运行管理等方面仍然面临着很多亟待解决的问题,导致这些问题的影响因素很多并且相互交织,其中最主要的约束性影响因素是我国城镇污水的水质

构成复杂、水质水量时空变动大、悬浮固体无机组分含量高、碳氮比偏低且时段性波动、工业废水冲击及持续性影响、冬季水温偏低和氮磷排放标准高等方面,而且东、西、南、北,地域及季节性差异极为明显,即使同一城市的不同排水区域,都会存在明显的差异,各个工程项目都有其个性特征及特殊问题。随着排放标准及功能要求的进一步提高,这些影响因素的交织和叠加所导致的问题将更为突出与复杂。

因此,需要针对这些约束性影响因素及今后的发展变化趋势,围绕城镇污水处理厂除磷脱氮功能提升和出水稳定达标的工艺技术设备瓶颈问题,在总结已有污水处理工艺技术和设备研发成果和实际运行状况的基础上,进一步明晰我国城镇污水处理的主导工艺技术路线,消除或缓解这些因素所导致的最不利影响,包括城镇污水处理厂总氮去除率低、冬季硝化能力明显下降或不稳定、活性污泥惰性组分含量高、活性污泥反硝化和耗氧速率低以及由此进一步导致的能耗物耗增大、出水难以达标或不能稳定达标等方面问题。结合污水处理工程项目的设计建设和运行优化,推动技术成果的直接转化和实际工程应用,全面提升我国城镇污水处理工程的污染物减排效能。

结合一级 A 稳定达标和高品质再生水利用的发展需求,选择我国城镇污水处理技术设备发展的薄弱环节和关键工艺单元,以工艺技术设备的成套化和集成化为核心,在污水机械(预)处理新型设备、新型初沉(发酵)池技术、移动床复合硝化反应器系统、高效曝气及混合系统、低能耗膜生物反应器系统、新型深度处理(过滤)设备、臭氧氧化及脱色消毒技术设备等方面开发出一系列适合我国污水水质和排放标准的单元工艺设备,形成自主知识产权或专有技术,降低设备造价和运行能耗,同时结合工程设计建设和优化运行,建立示范工程,提升污水处理设备的系列化及成套化能力,促进污水处理设备的产业化发展和新技术、新设备的大规模工程化应用。

4 城镇污水处理功能提升和技术设备发展的重点方向

4.1 污水机械格栅(格网)除污技术与设备

随着生活水平的不断提高,进入污水处理厂内的粗大漂浮物逐渐减少,但各种细小线性漂浮物、片状漂浮物呈现逐渐增多的趋势,例如,污水中的毛

发、织物细纤维、塑料与橡胶碎片(薄膜)等越来越多。原水中这些漂浮物及杂质进入后续生物处理段后,容易造成不可忽视的不利影响。近年来,随着膜生物反应器、载体填料工艺、硝化反硝化滤池、机械转盘过滤器、微滤膜及超滤膜过滤等新型工艺技术的工程应用,这种不利影响更为突出。除了表现为污水及污泥管道、工艺设备的堵塞和磨损、影响整个污水处理系统的顺畅运转之外,还影响新型工艺单元的正常稳定运行,例如:膜丝的缠绕、填料的拥堵、滤料的板结,以及活性污泥惰性组分含量的升高。

我国的机械格栅(格网)除污设备已经能够基本满足一般性的污水处理要求,但仍然存在拦污效能不够理想、运行效率较低、设备故障率较高、环境卫生状态较差等问题。一般污水处理厂采用的齿耙式格栅对污水中细微漂浮物及杂质的去除效果很差,基本不能去除。旋转式细格栅,虽然能够去除一部分这类物质,但目前此类设备尚存在栅渣清理不理想的问题,局部水头损失较大,不能保证设备的长期、稳定运行,也很难针对老污水处理厂实施技术改造。

因此,有必要针对我国城镇污水的漂浮/悬浮物特点和新出现的强化预处理功能要求,从提高拦污效果、降低设备故障率着手,对格栅设备进行效能测试和问题剖析,重点进行细格栅和超细格栅的研制和改进提高,包括用于污水处理厂前端、回流污泥和深度处理前端的拦污,要求在适用性、高效性、可靠性、稳定性、先进性和经济性等方面取得较大突破,在可操作性、可维修性和安全健康等人性化设计方面有明显提高,高效拦截污水中的漂浮物、悬浮物和各种形态的杂物,降低污泥杂质含量,减小细微漂浮物及颗粒无机物对后续生物处理和污泥处理处置的不利影响。

4.2 高性能机械除砂洗砂技术与设备

沉砂系统可减少后续设施的维护和更新费用。一旦砂粒大量沉积和堵塞,就会减少处理池的有效停留时间,污泥活性下降,动力能耗增加,机械设备受损。目前的除砂系统对粒径大于 0.2 mm 的砂粒有较好的去除效果,但不太稳定;对粒径 0.1~0.2 mm 的砂粒,去除效果不太理想;对于粒径小于 0.1 mm 的砂粒,去除效率很低。因此,需要对沉砂

系统的实际运行效果与存在问题进行调研分析,甄别关键影响因素,重点针对粒径小于 0.2 mm 的砂粒高效去除和清洗,研究开发出除砂效率高、有机物分离效果好、能耗低、占地面积小、土建费用低、管理方便的新型高效沉砂除砂系统及配套设备,其中包括曝气沉砂池、旋流沉砂池、砂水分离及洗砂设备的效能改进。

曝气沉砂池的除砂、洗砂效果较好,但处理效果因厂而异,与池形构造、水力流态、运行控制及排砂系统密切相关。需要进一步对现有系统展开调研和测试研究,分析总结除砂效果与池型构造的相关性,通过流场模拟和试验验证,筛选出较为理想的池型构造;曝气沉砂池旋流速度是通过曝气量来控制的,但气量调节难以掌握,过大会降低细小砂粒去除率,过小又无法保证足够旋流速度,进水流量又是不断变化的,实际运行中很难将气量始终控制在合适的数值上,如能根据水量变化对气量进行联动精细控制,就有可能取得较为稳定的除砂效果。在工程改进和运行优化的基础上,考虑建立曝气沉砂池工艺系统的数学模型,开发设计选型软件。

旋流沉砂池近年来也有较多的应用,但用户普遍反映除砂效果不理想。这就需要对现有旋流沉砂系统的进水模式、水力学流态、停留时间、提砂方式等关键影响因素进行剖析,特别是水量波动大的情况下,结合生产性性能测试,查找关键问题,有针对性地研究提出基于池型优化(包括进水导流设计)、螺旋桨片改进、流态强度(搅拌转速)控制、排砂方式优化、水量波动调节(进、出水流速及流态控制)的高效旋流沉砂工艺系统及配套设备,形成能够高效去除 0.1~0.2 mm 粒径砂粒和稳定去除 0.2 mm 以上粒径砂粒的除砂系统及控制策略,形成相应数学模型和设计软件。

4.3 高效能新型初沉(发酵)池工艺技术与设备

全国城镇污水处理信息系统的统计数据表明,我国大部分地区(尤其南方地区)城镇污水 SS/BOD₅ 比值明显偏高,处于超高比值(>2)和高比值(1.4~2)的城镇污水处理厂所占比例分别高达 32%和 16%。与发达国家城镇污水 SS/BOD₅ 比值为 1.1 左右相比,我国城镇污水处理厂年平均 SS/BOD₅ 比值高于 1.1 的比例高达 78%。由于 SS/BOD₅ 比值过高,不

设置初沉池时,大量无机悬浮固体进入后续生物处理系统,活性污泥产率系数会明显偏高(1~1.5 kgDS/kgBOD₅),生物池污泥活性偏低(MLVSS/MLSS 值仅 0.3~0.5),使得污水生物处理池的池容有效利用率降低,运行性能不稳定。即使设置初沉池,污泥产率也在 0.8~1 kgDS/kgBOD₅ 左右。

特别是南方地区,雨季时容易出现高进水悬浮固体(SS)浓度的负荷冲击,活性污泥 MLVSS/MLSS 实际值低于 0.4,甚至低于 0.3,仅为正常生活污水处理系统的一半左右,导致生物处理系统的硝化能力明显下降,甚至完全丧失,反硝化速率也相应大幅度降低,需要数周时间才能恢复,因而,明显影响城镇污水处理厂的稳定运行,特别是氨氮和总氮的稳定达标。

设置常规初沉池能够较好地降低进水无机悬浮固体对后续生物处理系统的影响,颗粒态总磷也有较高的去除率,但因为水力停留时间较长(2 h 左右)、表面溢流负荷率较低[2 m³/(m²·h)],SS 去除率一般在 50%~70%之间,悬浮物中的有机与无机成分协同沉淀,在去除悬浮无机物的同时会出现有机物的过度去除。由于常规初沉池对碳、氮的去除比例不同,进水碳氮比偏低的问题会更加突出,有些情况下,BOD₅/TN 值可能降低到 2.5~3 的水平,加剧反硝化碳源不足程度,影响后续工艺的生物除磷脱氮效果。因此,有必要研究开发具有进水悬浮固体无机组分分离和有机组分水解发酵功能并可按多种模式运行操作的高效能初沉(发酵)池及技术设备,提高预处理出水 VSS/SS 比值,改变进水碳源特性,促进内碳源的后续利用。

4.4 生物膜移动床复合硝化反应器技术与设备

城镇污水处理厂提标升级改造中,必然遇到的难题是原有生物处理池的池容严重不足。我国早期建设的污水处理厂,泥龄和污泥产率设计取值偏低,生物反应池容小。在难以满足增加池容的条件下,要解决硝化/反硝化生物脱氮问题和实现出水水质稳定达标实属不易,其中最大的难点就是池容不扩增的情况下获得稳定的硝化功能,特别是低水温条件下出水氨氮和 TN 的稳定达标。

基于活性污泥法与生物膜法技术集成的移动床生物膜反应器是一种较为新颖、高效的污水处理工

艺,主要基于可流化生物载体悬浮填料的应用,可针对传统污水生物处理工艺中存在的 COD 去除效率不够高、硝化稳定性差、受低温影响大等问题,提升传统生物处理单元的处理效率。通过硝化细菌及其他微生物附着在载体上,在反应器中随混合液回旋翻转,使得专性好氧微生物菌群与兼性厌氧微生物菌群在空间上相对分离,达到增强不同功能微生物作用的目的。此工艺可以提高生物曝气池的硝化菌生物量及活性,增强氨氮、总氮的去除能力及稳定性。

污水处理专用生物载体填料已经成为国内外污水处理厂升级改造的重要产品。目前市场上污水处理用的填料有固定式、悬挂式、分散堆积式和悬浮式等多种形式。由于填料市场不够规范,加上权威性技术标准的缺失,填料种类繁多,质量千差万别,用户、设计单位对其应用均持比较谨慎的态度,对各种填料进行客观评价的文献不多,工程应用研究情况的综合评估更少。

固定式填料以各种波纹板为代表,多用于单纯生物膜工艺,很难控制生物膜性状,曝气量明显增加。悬挂式纤维丝填料比表面积较大、挂膜容易、价格适中,但容易缠结、结块、断丝、中心绳易断,安装复杂、检修困难,生物膜厚度不可控制,内部厌氧状态,静止时易长红虫。分散堆积式填料多用于浸没式生物滤池,活性污泥曝气池的改造中很少使用。悬浮填料具有较好发展前景,具有比表面积较大,传质阻力小,微生物代谢旺盛,不易堵塞、适用条件广等优点,尤其是其不需固定,不用安装的特点,非常适用于原有池体结构不易于做较大变动的曝气池改造工程。

因此,有必要针对城镇污水处理厂提标改造土地短缺、低温季节硝化速率低、日常运行受水质波动影响等难题,研制具有高流化特性、刚性弹性兼备、适合复合硝化反应器的新型生物载体悬浮填料,要求其具备有效比表面积大、空隙率及充填率高、流动性好、水力阻力小、推动力需求低的性能特征;通过移动床复合硝化反应器池体构造、水力学流态、池体推进及混合设备、拦截格网、悬浮填料及其他部件的系统研究,开发适合不同处理规模及主体工艺的系列化移动床复合硝化反应器系统;重点优化反应器的水力流态和混合条件,形成填料流化条件和格

网自清洗能力,反应器内填料不拥堵、无明显液位差,生物膜厚度适中、不易脱落、硝化活性高。

4.5 高标准除磷脱氮且低能耗的 MBR 工艺技术与设备

膜生物反应器(MBR)是膜分离技术与传统活性污泥处理技术相结合的一种高效污水处理技术,实现了水力停留时间和污泥龄的相对分离,可以保障生物系统在高污泥龄的状态下正常运行。但是,MBR 污水除磷脱氮系统也是一种高能耗的系统,由于较高的污泥浓度,通常形成较高的溶解氧消耗量,因 α 系数的降低,微孔曝气系统的充氧效率也会受到影响,膜冲洗和膜驱动压力则是最主要的额外能耗单元。另一方面,MBR 除磷脱氮系统多级回流或高流量回流的特征,使其内部碳源的利用效率有所降低,影响低碳氮比城镇污水的总氮的去除效果和稳定达标,或者需要投加更多的外部碳源。高投资、高能耗和氮磷去除问题在较大程度上限制了 MBR 工艺的推广应用。

因此,需要针对 MBR 污水处理工艺存在的高能耗和除磷脱氮能力提升问题,以 MBR 工艺的氮、磷稳定达标和节能降耗为主要目标,从工艺技术路线、工艺单元选择、膜材料选择、设计参数优化和运行控制等不同方面,开展 MBR 除磷脱氮工艺的系统研究,进行除磷脱氮工艺单元的优化布置、运行调控及其与膜反应器单元的兼容配置,研制新型膜材料、膜组器及膜污染控制技术,优选外部碳源及投加点,通过生产性测试和工程验证,形成节能型 MBR 除磷脱氮工艺技术体系、核心设备和控制方案,编制工艺设计和运行管理指南。

4.6 污水深度处理的新型机械过滤技术与设备

砂滤池是国内外普遍采用的污水深度处理工艺,运行稳定可靠,但占地偏大、能耗较高。最近几年,机械过滤开始得到青睐,其中有代表性就是盘式过滤器。琥珀公司转盘过滤器过滤介质为不锈钢丝网和聚脂丝网,滤速 8~10 m/h;按照转鼓过滤方式工作,由一系列水平安装并可旋转的过滤转盘构成,转盘由各单一不锈钢组件组成,组件表面为网状结构;内进水过滤器类型,污水从内向外穿流过滤,过滤液体从机械的端部流出。具有占地面积小、滤速高、过滤精度高、水头小、能耗低的特点,不足之处是

反冲洗所需压力较高、反冲洗比较困难。

Aqua Disk 公司和浦华控股有限公司,采用纤维织物介质作为过滤介质,采用外进水、内出水设备结构,过滤转盘外包滤布代替传统过滤介质,滤布结构特殊,沿过滤方向首先通过纤维毛层(可搭成弯曲的、相对活动的过滤通道),然后通过大孔隙支撑层,这种结构使得滤布当量孔径很小,可截留粒径几微米的微小颗粒,反冲洗较为彻底,滤布上有机和无机垢均无累积,长期使用通量无明显衰减,水质水量稳定。具有紧凑、占地小、总装机功率低、水头小的优点,改造扩建容易实施,运行维护简单方便。不足之处是,尚不能与化学絮凝、化学除磷相结合。

根据城镇污水处理厂一级 A 提标建设与运行管理的需求,需要以强化 SS、COD 和 TP 的进一步去除为重点,开展金属孔状、非金属孔状、纤维滤布等过滤介质的综合性能比较;根据不同原水水质条件和处理要求,结合现有机机械过滤设备使用中存在的问题,研究不同过滤介质的适用性和适配性,改进过滤介质和清洗系统的性能,形成符合稳定达标处理要求、高性价比的过滤材料选择和过滤系统总体设计;研制出高性能、低运行成本的机械过滤主体设备及自清洗、自动控制等附属系统,开展工程应用示范和产业化。

5 结语

按照传统模式单独进行工艺技术研究,已经不能适应我国城镇污水处理功能提升的需求,今后的发展需要体现单元工艺技术与设备发展密切关联的理念,按照工艺技术设备整体优化的需求,分析不同处理单元存在的问题,结合新形势下减排目标的完成,为污水处理系统处理功能的提高提出具体的解决方法和途径。需要体现从工程设计、设备配套到运行管理的全过程精细化调控策略,强化工艺合理设计、设备选型和工艺运行调控的结合。需要体现高排放标准工艺组合与设备的全流程配套,并形成系列化的个性解决方案。需要体现省地、节能、降耗和低环境影响的发展方向。希望本文能够起到抛砖引玉的作用,引起业界对污水处理功能提升和技术设备协同发展问题的更广泛关注,群策群力,进一步推动我国城镇污水处理事业及技术设备产业的健康发展。