

• 水业导航 •

污水处理技术的研究与发展

清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 施汉昌

近十年来,我国城市污水处理设施建设发展迅速,据住建部《关于全国城镇污水处理设施 2011 年第四季度建设和运行情况的通报》记载,城镇污水处理厂从 2001 年 300 多座发展到 2011 年 3 135 座,相应的城市污水处理能力从 2 200 万 m^3/d 增长到 13 600 万 m^3/d 。城市污水处理厂在数量上增加了 10 倍,在处理能力上增长了 6 倍。这一快速发展大大提升了城市污水处理的能力,有效地削减了污染物的排放量,缓解了我国快速城市化进程中水环境污染的压力。今后一段时期,城市污水处理厂建设的数量仍会继续增加,但会从以往的大中型污水处理厂为主,转向以中小型污水处理厂为主。中小型污水处理厂在处理工艺的选择上将会更趋于多样化,更强调因地制宜的工程设计。过去十年建成的城市污水处理厂采用的主流处理工艺是 A^2/O 、氧化沟和序批式活性污泥法(SBR)等。特别是近五年来,由于推行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 B 和一级 A 标准,脱氮除磷的需求使 A^2/O 工艺日益成为被广泛采用的工艺。这些污水处理技术在 20 世纪 80~90 年代产生于欧美的污水处理行业,我国城市污水处理厂的大规模建设晚于欧美约 20 年,给了我们向欧美学习的机会。30 多年来,科技工作者对国外的污水处理技术进行了大量的研究,包括原理解析、结构测绘、改进设计和优化运行等。因此,我国现有的城市污水处理技术基本上是引进吸收,使外来技术本土化,以适合中国国情的需求。这些技术在现阶段我国的水污染控制中无疑是发挥了重要的作用,但能否满足我国社会经济未来发展的水污染控制目标呢?这里需要对我国水环境污染的特点做一个分析。

1 社会需求是技术发展的推动力

中国是世界人口第一大国,且从西到东的人口分布和经济发达程度极不平衡,西部人口向东部经济发达地区迁移,使东部地区的人口密度更高,人类活动更剧烈,污染物排放更集中。据环境保护部

《2011 中国环境状况公报》统计,2011 年在 3 000 多座污水处理厂运行负荷率达到 70% 以上的情况下,仍有 2 499.9 万 t COD 和 260.4 万 t 氨氮排入水环境。人们生活总吃饭喝水和排污,这些污染物绝大部分最终会进入水体。在不考虑工业污染和农业污染排放量的前提下粗略地做一个计算,我国东中部地区约 9 亿人口,如果每人每天产生污水 0.1 m^3 ,每天产生的污水量是 9 000 万 m^3 ,假设这些污水都被处理到满足一级 A 的排放标准。每年仍然会有约 164 万 t 的 COD、49 万 t 的总氮、16.4 万 t 氨氮和 1.64 万 t 总磷排入东中部水体。这样的污染排放,仍然会使水环境不堪重负。因此,重要的出路之一是在污水处理技术领域不断开拓创新,研发能满足我国水污染控制,且能使水体得到修复和改善的污水处理技术。

2 新型污水处理技术在中国的机遇

对比 20 世纪 70 年代后期欧美污水处理技术大发展的条件和历史经验,我国具有发展新型污水处理技术的四大条件,其中前两条是我国特有的历史机遇,后两条是国际上可共享的条件。

(1) 我国严重的水环境污染和脆弱的环境承载力为新型污水处理技术的发展提供了迫切的需求和巨大的潜在市场。

(2) 30 余年的经济快速发展使国家达到了世界第二大经济实体的水平,具备了支撑新型污水处理技术研发和应用的经济实力。

(3) 世界人口和经济的发展使人类赖以生存的各种资源渐现短缺,资源价格逐渐抬升,使人们日益体会到发展资源节约型社会的重要性。

(4) 90 年代以来,在生物、信息、材料等领域产生了一系列影响 21 世纪人类发展方向的高新技术。这些高新技术引入能源、医药、食品等领域,使这些领域产生了巨大的进步。而这些高新技术几乎没有在污水处理技术领域开花结果。

这四项条件加上科技人员的努力将促成具有自主知识产权的污水处理新技术发展,以适应我国水

污染控制的需求。在发展方向上,污水处理技术将从目前污水处理厂的达标排放技术和优化运行与节能降耗技术向污水处理的资源化技术发展。污水处理的资源化技术不仅是污水回用所需要的高品质再生水处理技术,还将发展污水中碳、氮、磷等资源的回收技术。污水处理的资源化不仅符合可持续发展的方向,而且可以增加污水处理的附加值,改变污水处理资金的投入产出比例与现状,适应我国不同经济发展区域各种污水处理设施长期运行的要求。在技术来源上污水处理技术的发展将是生物工程、新型材料和信息技术在污水处理领域的广泛应用。上述污水处理资源化技术的发展已经初露端倪,如能加大投入,长期坚持研究,破解技术难点,必然可以形成新型的污水处理技术。以下试举几例,予以分析。

3 污水资源化技术的研究与发展

污水资源化首先是将污水处理成符合不同用水水质标准的高品质再生水,实现水资源的有效利用。在我国这样一个水资源紧缺的国家,污水回用无疑是具有重要意义的。目前从技术上看,一级处理、二级处理、深度处理和膜处理技术的结合可以满足将污水按需要处理成各种再生水,并在技术上基本成熟。研究重点将集中于技术集成、系统优化和降低运行成本。在这一领域新型膜材料及其组件制造技术将为高品质再生水生产技术的发展提供有力的技术支撑。

污水资源化中最值得关注的是碳源的回收利用。由于现行的污水处理中对有机碳采用了氧化成二氧化碳的技术路线,所以去除碳源污染物需要消耗大量的能源。从节能降耗、碳减排和可持续发展的多重目标出发,这种传统的处理模式需要向新型的污水资源化模式转变。污水中碳源的资源化将向两个方向发展,一个方向是将碳源转化成能源,另一个方向是将碳源转化成有机材料。由于污水中的碳源浓度相对较低,直接利用污水中的碳源有一定的难度。有研究通过控制运行条件(包括:溶解氧和停留时间等)使活性污泥积累 PHAs,从而获取富含有机碳的微生物细胞,进而制取有机材料或生物柴油。但直接从污水培养的细胞中有机碳含量较低,目前这些技术还只是处于实验室研究的水平。利用污水处理产生的剩余污泥获取能源和碳源的技术更为成熟。

将剩余污泥中的碳源转化成甲烷气体作为能源,已经是成熟的技术,国内外有很多成功的案例。

目前,我国一部分日处理污水能力在 10万 m^3 以上的大型污水处理厂已经建立了污泥厌氧消化获取甲烷的设施,部分污水处理厂的污泥厌氧消化装置运行良好,实现了污泥减量,并回收了能源,取得了良好的效果。污泥厌氧消化技术需要进一步研究提高厌氧消化系统装备的质量,优化厌氧反应器的运行条件,形成适合我国污泥特点的成熟的污泥厌氧消化的系列技术。我国污水处理的特点是除了大型污水处理厂外,还有一大批日处理能力在 1万 m^3 以下的小型污水处理厂。这些污水处理厂大部分建设在区县和乡镇,那里的技术力量薄弱,产生的污泥量较少,不宜照搬大型污水处理厂独立进行污泥厌氧消化的模式。可能的污泥处理途径是在一定距离的区域内建立集中污泥处理装置,将分散在小厂中的污泥集中进行厌氧消化处理。这种污泥集中式处理的模式首先面临的是污泥的运输问题。由于污泥运输增加了污泥处理的成本,因此采用污泥集中处理模式的前提是在各厂先将污泥脱水,然后运到一定距离以外的污泥处理厂进行处理。这种模式要求研发高含固率的污泥厌氧消化技术,需要研究含水率低的污泥进行厌氧消化时厌氧反应器中的传质机理、反应速率和微生物种群,从而研发出高含固率污泥厌氧消化的新型反应器以及加速反应的生物及化学药剂。

与剩余污泥制取能源相比,将剩余污泥中的碳源转化成小分子有机酸,通过生物合成技术制取有机材料(PHAs)是相对较新的技术,目前还没有实现工程化。此类技术的发展存在两个难点,其一是污泥中相当一部分有机碳以纤维素或木质素的形式存在,往往需要在高温高压下才能分解,在一般水解条件下不能转化成有机酸。其二是污泥中转化成小分子有机酸的碳源浓度较生物合成的要求偏低,因此要供给微生物足够的碳源需要采用连续发酵的模式。而连续发酵技术在生物制药和生物化工行业还很少使用,需要做进一步的研究和完善。如果这两个难点能够突破,利用剩余污泥制取有机材料(PHAs)将成为一项具有重要意义资源化技术。要提高污泥中碳源转化成能源或合成有机材料的转化率,其关键之一是将纤维素或木质素分解。在自然界中纤维素和木质素就像人体骨骼中的钙,它形成了自然生态系统的骨架。如果自然界存在大量纤维素和木质素的高效降解微生物就不会有森林草原,就会房倒屋

塌,衣不蔽体。但自然界中有在一定条件下能够分解纤维素和木质素的微生物,如一些腐生细菌或真菌等。因此要分解污泥中的纤维素和木质素只能寄希望于基因工程菌,将分解纤维素或木质素的基因导入在污泥处理系统中能大量繁殖的微生物体内,形成新的微生物来促进纤维素和木质素的分解。这些基因工程菌潜在的环境风险可以采用膜分离技术和消毒技术来控制。目前的膜生物反应器可以基本做到截留细菌个体,再加上消毒可以保证出水的安全性。

在世界上磷已经属于稀缺资源,污水中磷的回收可以采用化学或生物富集的技术,这方面已开展了大量的研究工作,并获得了不少技术积累,将随着磷资源的日益短缺,逐步走向工程应用。污水中氮的浓度较低,要直接资源化比较困难。一种方法是将污水中的氮转化到生物污泥中,再从水解的浓缩液中回收氮。另一种可能的方法是在污水收集过程中进行源分离,将尿液分离后直接利用。

4 污水处理节能降耗技术的研究与发展

我国建成运行的大中型污水处理厂已有 3 000 余座,位于小城镇的污水处理厂建设方兴未艾。在不久的将来,我国将成为世界上污水处理厂最多,污水处理能力最大的国家。这些污水处理厂的运行将获得巨大的环境效益,同时也将产生巨大的能耗和物耗。从实现国家节能减排和可持续发展的目标出发,发展污水处理的节能降耗技术具有重大的意义。

污水处理厂需要节能和降耗两类技术。节能主要是节约电能,在污水处理厂污水提升、鼓风机曝气和污泥脱水消耗了约 90% 的用电量,因此这三大环节是研发节能技术的重点。污水处理厂的降耗是指降低药耗,主要是设法减少用于化学除磷的除磷剂、用于反硝化补充碳源的药剂和用于污泥脱水的絮凝剂。对于已经建成的污水处理厂,主要的节能潜力在于运行条件的优化和精确控制。污水处理厂在设计时为了保证高峰负荷下处理出水水质达到排放标准,在反应时间和设备能力上都有较大的冗余。如果处理厂经常处于这种冗余的状态下运行,就会造成电能和药剂的过度消耗。我国污水处理厂运行技术的研究起步较晚,与发达国家的先进污水处理厂相比,在监控技术、运行水平和人员素质上都有较大差距,因此在这方面尚需开展大量的研发工作。首先,针对占污水处理厂能耗 50% 以上的鼓风机曝气系

统需要研发高效的、具有良好调节功能的鼓风机,为实施精确曝气奠定基础。在此基础上研发精确曝气系统和控制策略,包括适用于中小型污水处理厂的以溶解氧和气体流量为参数的串级反馈控制模式和适用于大型污水处理厂的基于进水动态负荷的前馈—串级反馈控制模式。深入开展精确曝气的研究需要运用基于计算流体力学和生物反应动力学模型的模拟软件,这些关键技术手段还有待进一步开发,并在大量应用中取得经验。与稳态运行的污水处理厂相比,采用精确曝气技术一般可以降低曝气能耗 10%~15%。污水提升的节能需要通过研究建立针对来水变化的提升泵编组运行方案,因此在污水处理厂设计时就要选择多泵可调节的配置,为运行节能提供物质基础。更先进的研究工作是将水量水质的监测仪表设置到污水处理厂上游的管线中,为提升泵的编组方案和进水水质水量的变化提供预警数据。在降低药耗方面对于反硝化投加碳源需要研发基于硝酸盐浓度监测参数的反馈加药控制系统,对于化学除磷可以研发基于来水磷酸盐负荷的前馈—出水磷酸盐浓度反馈的加药控制系统。运用这些加药控制系统实现适量加药,避免药剂的浪费。污泥脱水的加药控制还有待深入研究,首先需要确定与污泥含水率相应的监测参数,其次是建立检测参数与药剂投加量的剂量效应模型,从而建立控制系统。这方面还有大量的关键技术需要深入研究。“十一五”期间,在“水专项”和“863 计划”的支持下,已经对污水处理厂的节能降耗技术开展了初步的研究,并在处理能力为 10 万 m^3/d 的污水处理厂成功地建立精确曝气、化学除磷和反硝化碳源投加控制系统的示范工程。通过“十二五”期间的进一步研究和推广应用,将在确保处理出水达标排放的前提下,实现污水处理厂节能降耗的目标。

5 结语

鉴于我国特定的历史时期和社会经济条件,污水处理技术面临着发展的新机遇。污水处理的目标将从达标排放向节能降耗、低碳运行和资源化的新目标迈进。随着高新技术引入水污染控制领域,以资源化为导向的新型处理技术将不断涌现,它就像站在海岸遥望海中已经看到桅杆尖头的一只航船,让我们以辛勤的努力和满腔热忱来迎接这一新阶段的到来吧!

本文受到清华大学自主科研计划(No. 20121087922, No. 20101081834)的资助。