

百年活性污泥法面临革新

中国人民大学环境学院副院长 王洪臣

100 年前，活性污泥法正式诞生。诞生百年的技术不计其数，但百年来一直占据行业支配地位的技术却是屈指可数，活性污泥法就是这样一个屈指可数的技术。在纪念活性污泥法诞生百年的今天，人们不禁要问：活性污泥法何以对人类持续服务了百年？它还将服务下一个百年吗？活性污泥法的革新替代技术在哪里？

1914 年 4 月 3 日，英国两个年轻卫生工程师爱德华·阿登和威廉·洛克特发表了《无需滤池的污水氧化试验》一文，首次提出“活性污泥”的概念，标志着活性污泥法正式诞生。活性污泥法诞生后，世界各地迅速开始研究，并着手实际建设污水处理厂。1923 年，中国第一座活性污泥法污水处理厂在上海北区建成，日处理能力为 3500 立方米。此后几年，上海东区和西区污水处理厂也相继建成，日处理量分别为 1.7 万立方米和 1.5 万立方米。

百年后的今天，世界各地至少有 50000 座活性污泥法污水处理厂在运行，每天处理着至少 5 亿立方米的污水。可以毫不夸张地说，没有活性污泥法的世界将难以想象。那么，活性污泥法何以对人类持续服务了百年？

首先，这可归因于活性污泥法的“简单”。一个曝气池，一个沉淀池，再加上回流，即可组成活性污泥系统，完成污水处理基本功能。简单意味着可靠，意味着可以普及，也意味着较低的处理成本。其次，活性污泥法“功能强大”也是重要原因。尤其是活性污泥法是源于自然的生物技术，这或许是其具有强大生命力的根本原因。

在肯定活性污泥法巨大历史作用的同时，必须看到它在新形势下日益凸显的两大缺陷：

一是活性污泥法需要大量电耗，是重要的碳排放源。按照最新统计，美国的污水处理 2011 年全年共耗电 302 亿千瓦时（仅包括污水处理和再生，不包括原位处理、污水收集和再生水输配），占当年全社会总用电量的 0.8%。日本作为一个工业化国家，污水处理电耗也占到全社会总电耗的 0.8%。我国目前实际污水处理率和处理标准都较低，污水处理电耗占全社会总电耗的比例还较低。污水处理的高电耗，除了增加运行成本，还使之成为重要的碳排放源。

二是活性污泥法导致大量生物污泥的产生。美国污水处理行业年产污泥总干重 750 万吨，欧洲年产 1000 万吨，中国年产 600 万吨，全球总年产量约 3000 万吨，折算成含水率 80%的脱水污泥约 1.5 亿吨。

这些污泥的 40% 60%是由生物菌体组成的生物污泥，是活细胞与水分组成的特殊水合结构。由于大量水分和有机物都被“包裹”在细胞内，导致污泥脱水性能很差，且难以进行较为彻底的稳定化处理，成为污水处理的“累赘”。为提高污泥稳定化效果，可采用热水解、超声波、微波、聚焦电脉冲以及生物酶水解等方法对污泥进行预处理，使活细胞的细胞壁破裂，释放其中的水分和有机物，提高脱水性能和稳定化程度，但这些设施建设及运行成本较高，实际建成的还不多。

活性污泥法实现污水处理功能是以高能耗为代价，这些能耗被用于为微生物供氧分解污水中的有机物，而这些有机物本身却是能量载体。因此，活性污泥法被形象地表述为“以能量摧毁能量”的技术，也是“减排水污染物、增排温室气体”的技术。基于以上分析，虽然活性污泥法还会惯性地为人类继续服务，但我们有理由认为，它不会持续成为下个 100 年的主流技术。

活性污泥法的革新替代技术在哪里？

污水处理的主要功能是去除有机物和无机营养物质，前者导致水体黑臭，后者则是富营养化的根源。活性污泥法将 50%左右的有机物分解成水和二氧化碳，另一部分合成为生物菌体，在“以

能量摧毁能量”的同时，产生大量难以处理的生物污泥。

因此，人们很自然地希望污水处理首先是对有机物进行厌氧产能或分离后厌氧产能，而不是好氧化分解与合成。如果有机物首先被分离或处理，污水中将会留下待处理的无机营养物质。无机磷通常可通过生物或化学过程实现高效去除，不存在技术障碍，问题主要集中在无机氮的去除。氨氮通常通过硝化和反硝化过程转化为氮气脱出，硝化过程需要大量能耗，因此人们一直在探求低能耗硝化工艺。另外，反硝化过程需要消耗大量碳源，如果有机物首先被分离，反硝化则无法进行。

综上，如果存在低能耗和低碳源需求的脱氮技术，污水处理过程将发生重大变化：采用产能的厌氧处理替代高能耗的好氧处理，首先将有机物去除并回收能量，进而再将无机氮进行低能耗去除。厌氧氨氧化现象的发现、研究以及实践有可能让这一设想变为现实。

欧美几个大型课题组近几年开展了厌氧氨氧化主流应用的大量小试和中试研究，提出一些解决对策，初步证明了厌氧氨氧化主流应用的可行性。随着各地研究与实践的不断深入，人们必将克服主流厌氧氨氧化技术瓶颈，主流厌氧氨氧化技术的规模化应用可以预期。

近两年，采用厌氧膜生物反应器对污水直接进行厌氧处理成为研究热点，多采用厌氧流化床膜生物反应器。研究表明，在常温下，若待处理污水在反应器内的平均停留时间为 6 小时 10 小时，70% 75%的有机物可转化为甲烷，约 15%转化成污泥，污泥产率仅为好氧处理的 1/3。由于出水有机物浓度与好氧工艺基本接近，因此有人将该工艺称之为厌氧二级处理。

但是，厌氧流化床膜生物反应器也存在一些技术缺陷或需要解决的问题：一是存在膜污染，由于低产泥量和流化状态会有所减缓，但膜通量不能高于 8L/m²/hr，远低于好氧膜生物反应器；二是污水中的硫酸盐 10%以上被反硫化成硫化氢，增加了气体脱硫的成本；三是超过 30%的甲烷在常温或低温时，能溶解在水中，需要设置吹脱单元将之吹脱出来。

综上，可能替代活性污泥法的未来污水处理工艺是碳氮两段法：要先对污水中的有机物进行分离，分离出的污泥通过厌氧消化产生甲烷，或对污水直接进行厌氧处理产能，分离后含有氨氮的污水通过主流厌氧氨氧化进行脱氮。按理论估算，采用活性污泥法，处理 1 人口当量的污染物需要耗电 44 瓦时，而采用上述碳氮两段法，处理 1 人口当量的污染物将产生 24 瓦时能量，从而使污水处理厂真正成为“能源工厂”，且污泥产量仅为活性污泥法的 1/4。