

数学模拟技术在污水处理工艺设计、优化、研发中的应用(下)

郝晓地¹ 甘一萍² 周 军² Mark van Loosdrecht³

(1 北京建筑工程学院, 北京 100044; 2 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100063;

3 荷兰代尔夫特工业大学, 代尔夫特 2628BC)

4 方案比较与工艺设计

工程设计中一般要经过方案比较后方能实施工艺设计。传统方案比较往往根据经验或可借鉴工程实例进行。经济的可比性可根据两个选定的工艺在占地、耗材、耗能等方面的信息得出判断,然而,技术方面的可比性常常就靠想当然来推断,很少有运行过程与处理效果的科学预知性。在某种程度上,方案比较演变成为了比较而比较,形同虚设。此处,利用上述已被验证的联合模型,对接受相同进水的两种反硝化除磷工艺——BCFS[®]与A₂N进行模拟运行结果比较。图3^[19]显示了两种工艺被模拟的出水氮与磷的水质与污泥龄和温度之间的关系,其内在关系一览无余。模拟还可以显示更多所关心的内容,如污泥浓度、剩余污泥产量等,甚至总耗氧量和反硝化过程中产生的氮气等也能定量显示出来。

传统工艺设计一方面方法本身固有着局限性,

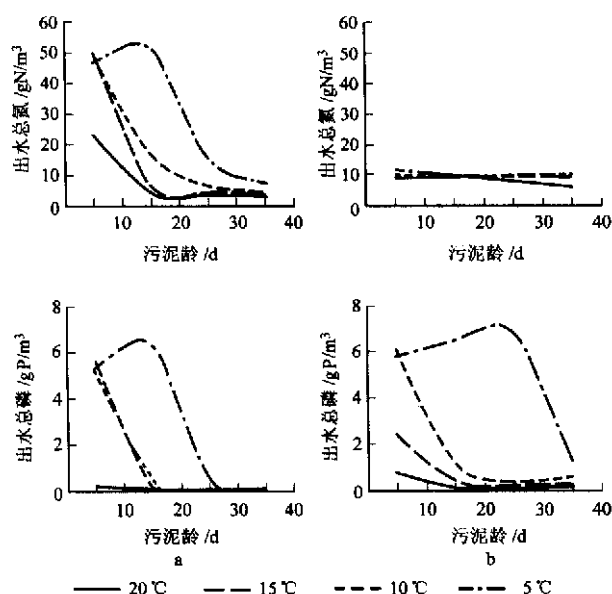


图3 模拟比较 BCFS[®] (a)与 A₂N (b)工艺出水水质

因为简化米-门公式视有机底物降解遵循一级反应^[21],与真实污水处理情况误差较大。事实上,大多数污水处理情况使有机底物降解与底物浓度的关系处于0~1级之间。另一方面,工艺设计完成后不太可能预测实际运行后的水质,往往只有等污水处理厂建成并运行后方能检验设计方案的正确与否。如果说保守的设计只是带来无谓的投资的话,那经验不足的设计便会导致完工后无法补救的缺憾。

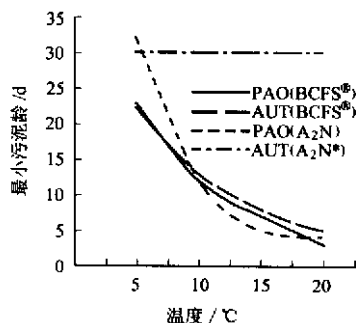
借助于数学模拟,传统设计中的不足均能事先弥补,无论是出水水质、污泥浓度,还是回流污泥与内循环量等都能根据不同反应池体积,不同工艺条件如图3一样定量显示。数学模型各种反应过程以完全型米-门公式表示,模拟时计算机可根据真实的污水处理情况从0~1级由微分计算底物的降解速率,从而彻底避免了传统设计中因“近似”表示动力学计算公式而导致的计算结果的不准确性。因此,数学模拟辅助工艺设计不仅具有结果的预知性,而且还能准确把握设计方案,使其接近最优化设计。

5 问题诊断与运行优化

无论工艺设计是否做到了最优化,一旦污水处理厂建成投产后只有通过优化运行,才能达到最佳处理效果。这就要求根据已建成的处理工艺流程适时调整工况,同时相应增减曝气、回流、循环、排泥等附属设备的工作能力。如果能事先了解运行中控制处理效果的关键问题所在,那就有可能针对性地随环境、水量、水质等参数的变化而及时采取工程措施。数学模拟在运行问题诊断方面优势明显。此处仍以上述BCFS[®]与A₂N工艺为例说明。

在以反硝化除磷为主的工艺中,不同温度下自养硝化细菌与除磷细菌的最低污泥龄是运行控制中最为关键的工艺参数。联合模型模拟得出了BCFS[®]与A₂N工艺中最低污泥龄与温度的定量关

系(图4)。温度严重影响这两类细菌的最低污泥龄,在低温下(低于10℃)这两类细菌最低污泥龄差别缩小,可视为等同(对BCFS®工艺而言)。因此,运行中可据此随温度变化增减排泥量而达到控制污泥龄,优化运行的目的。模拟也可以对运行中增减曝气量、回流量、内循环量等对处理效果的影响定量显示,使运行优化具有直接的理论指导。



PAO 除磷细菌 AUT 自养菌

* A₂N 工艺中自养菌固定生长,模拟固定 SRT = 3 d

图4 BCFS®与A₂N工艺中关键菌属所需最低污泥龄

6 试验定向与工程放大

污水生物处理新技术的产生完全依赖于在微生物学以及相关的生物化学方面的新发现和新认识。传统由基础研究成果上升到技术转化生产力一般还要经过必不可少的应用研究阶段。这其中“小试—中试—应用”似乎是不可逾越的过程。这一漫长的技术转化过程既费时又费力,常导致事倍功半。

随着数学模拟技术的普及和应用,这种传统观念正在被逐渐改变。数学模拟技术可以帮助应用研究定向,并直接用来指导试验设计。例如面对一项新的应用研究,试验过程要涉及的影响因子可能有数个,甚至数十个。因此,试验装置往往也就越多才能使研究做得越快、越细、越好。实际上,完全可以籍基础研究的成果,如细菌生理学特征参数等,建立相关反应过程的数学模型,并用数学模型模拟试验的全部过程。数学模拟可以在极短的时间内从众多影响因子中辨认出关键因子,同时还可以排除没有必要研究的次要因子,从而缩小研究范围。同时,在小试研究的基础上,通过数学模拟的帮助,可以越过中试过程,使小试结果直接放大为工程应用。此外,数学模拟还有一些试验研究无法比拟的优点,例如生物膜特征参数(生物膜厚度、密度、空隙率等),难

以通过试验探明这些参数变化对处理效果的影响。相反,数学模型则可以方便地调整这些参数,模拟探知对过程的相应影响。

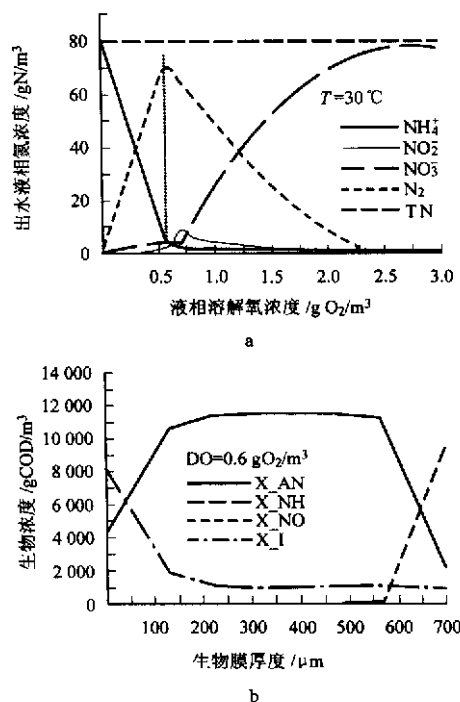
厌氧氨(氮)氧化(ANAMMOX)是一个微生物学在氮循环方面的新发现,中温亚硝化(SHARON)是对硝化过程的一个新认识^[12,13]。它们的研究与应用过程便采用了数学模拟技术的帮助,一方面借助模拟结果指导小试,另一方面又通过数学模拟直接将小试结果放大为生产应用,从而有了世界上第一例的SHARON与ANAMMOX应用实例^[22]。

ANAMMOX在生物膜中的应用又导致CANON工艺的出现^[12,13]。ANAMMOX细菌是一种繁殖速度极低的菌属(增长率 $<0.1\text{ d}^{-1}$),对它们进行试验研究将极为耗时。在这种情况下,数学模拟对试验定向研究的优势便突显出来。通过对CANON工艺中所涉及的三种自养菌反应过程建立数学模型^[23],并利用AQUASIM 2.0软件中一维生物膜结构模型,对CANON工艺进行了工艺参数、动力学参数、生物膜特征参数等模拟试验^[23,24]。

图5^[23]显示了被模拟的CANON工艺中溶解氧对出水水质影响的典型曲线以及在最佳溶解氧条件下的生物膜结构组成。这样一种从模拟结果得来的关系曲线与生物膜结构组成从理论上洞察了制约CANON工艺自养脱氮效果的关键因子——溶解氧。如图5a所示,数学模拟还可以将产生的氮气显示出来,使结果更为直观。反观试验研究,如果要想得到如图5a所示的结果,没有几年的时间是难以完成的,而图5b以试验方法几乎是难以实现的。因此,通过模拟缩小试验研究范围后可以做到重点突破,大大缩短研发周期,节省大笔科研资金。

7 结语

污水生物处理数学模型从活性污泥工艺到生物膜工艺,从有机物(COD)去除到营养物(N,P)去除,从外部描述的黑匣子模型到内在联系的代谢模型,经过二三十年的发展已基本完善。特别是近十年间计算机技术的快速发展使得数学模型的应用变成现实。数学模型可以建立在基础研究(如微生物生理学等)获得的成果基础上,模型可以直接用于小试研究定向,并可以在小试中校正涉及的动力学参数等模型参数,小试结果再加上数学模拟的辅助可以越



X _ AN ANAMMOX 菌 X _ NH 亚硝化菌
X _ NO 硝化菌 X _ I 惰性组分
图 5 CANON 工艺出水水质取决溶解氧典型曲线 (a) 与
最佳溶解氧浓度下的生物膜结构组成 (b)

过中试一步放大为工程设计,模拟也可在最后的工艺运行中起到优化运行的作用。总之,数学模拟技术可以使污水处理工艺的研发、设计、运行成为三位一体的超级辅助工具。

参考文献

- Henze M, et al. Activated sludge model No 1. In: IAWPRC Scientific and Technical Report, No 1. IAWPRC, London, 1987
- Gujer W, et al. The activated sludge model No. 2: biological phosphorus removal. Wat Sci Tech, 1995, 31(2): 1~11
- Henze M, et al. Activated sludge model No 2D. Wat Sci Tech, 1999, 39(1): 165~182
- Gujer W, et al. Activated sludge model No 3. Wat Sci Tech, 1999, 39(1): 183~193
- Smolders G J F, et al. Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence. Biotechnol Bioeng, 1994, 43: 461~470
- Smolders G J F, et al. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process. Biotechnol Bioeng, 1994, 44: 837~848
- Murnleitner E, et al. An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal process. Biotechnol

- Bioeng, 1997, 54: 434~450
- Kuba T, et al. A metabolic model for the biological phosphorus removal by denitrifying organisms. Biotechnol Bioeng, 1996, 52: 485~695
- Rittman B E, McCarty P L. Model of steady-state-biofilm kinetics. Biotechnol Bioeng, 1980, 22: 2343~2357
- Wanner O, Reichert. Mathematical modelling of mixed-culture biofilms. Biotechnol Bioeng, 1996, 49: 172~184
- Picioreanu C. Multidimensional modelling of biofilm structure: [PhD thesis]. Delft: Delft University of Technology, 1999
- 郝晓地, 等. 欧洲城市污水处理新概念——可持续生物除磷脱氮技术(上). 给水排水, 2002, 28(6): 6~11
- 郝晓地, 等. 欧洲城市污水处理新概念——可持续生物除磷脱氮技术(下). 给水排水, 2002, 28(7): 5~8
- Siegrist H, et al. The EAWAG Bio-P module for activated sludge model No 3. Wat Sci Tech, 2002, 45(6): 61~76
- Morgenroth E, et al. The use of mathematical models in teaching wastewater treatment processes. Wat Sci Tech, 2002, 45(6): 229~233
- Reichert P. AQUASIM 2.0 - computer program for the identification and simulation of aquatic systems. EAWAG, Dübendorf, Switzerland, 1998
- Hao X D, et al. Model based evaluation of denitrifying dephosphatation in a two-sludge system. J Envir Eng, 2001, 127(2): 112~118
- Kuba T, et al. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system. Wat Res, 1996, 30(7): 1702~1710
- Hao X D, et al. Model-based evaluation of two BNR processes: UCT and A₂N. Wat Res, 2001, 35(12): 2851~2865
- 郝晓地, 等. 可持续生物除磷脱氮 BCFS® 工艺. 给水排水, 2002, 28(9): 5~8
- 张自杰, 等. 排水工程(下册). 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000
- 郝晓地, 等. 荷兰鹿特丹 DOKHAVEN 污水处理厂介绍. 给水排水, 2003, 29(10): 19~25
- Hao X D, et al. Sensitivity analysis of a biofilm model describing a one-stage completely autotrophic nitrogen removal (CANON) process. Biotechnol and Bioeng, 2002, 77(3): 266~277
- Hao X D, et al. Model-based evaluation of temperature and inflow variation on a partial nitrification-Anammox biofilm process. Wat Res, 2002, 36(19): 4839~4849

(续完)

□电话 (010) 68322128
收稿日期 2003-6-5