
污水的生物脱氮除磷机理及其反应器设计的相互关系

刘洪波, 孙力平

(天津城市建设学院 市政与环境工程系, 天津 300384)

摘要: 脱氮除磷机理是相应脱氮除磷反应器设计的基础。本文概括了脱氮除磷工艺的三种方法: 物化法、生物法和生物强化法; 提出传统脱氮除磷机理及其反应器设计之间的关系。在此基础上, 对新型脱氮除磷反应器及其机理发展研究应用作了探讨。这些反应器和工艺涉及: DPB 反应器、SHARON、ANAMMOX。

关键词: 脱氮除磷机理; 反应器设计; 新型反应器及其机理; MBR; DPB 反应器; SHARON; ANAMMOX

1 前言

水体中的氮、磷积累到一定程度会引起水体的富营养化。水体富营养化会导致水体中藻类大量繁殖, 引起赤潮和水华等问题, 导致水体发臭^[1]。我国淡水资源紧张, 人均淡水占有率不到世界平均值的 1/4, 水体富营养化的治理可改善水质, 对我国经济发展具有战略性的意义。治理水体富营养化问题, 追根溯源是对氮、磷营养元素治理。

脱氮除磷反应器是氮磷等营养元素得以减少乃至消失的场所, 因此开发高效脱氮除磷反应器是脱氮除磷的关键所在。

脱氮除磷机理是反应器设计的基础, 先进的脱氮除磷理论可以产生高效的反应器。人们对脱氮除磷机理认识的每一次进步都会带来脱氮除磷反应器设计的改进^[13]。近年来水处理微生物学方面的进步产生了很多经济节能的反应器与工艺: MBR、DPB 反应器、SHARON、ANAMMOX^[11,12]。

另外, 理念的提出对新型脱氮除磷反应器的开发也很重要。比如荷兰 Delft 大学提出的可持续发展生物除磷脱氮理论就是现今除磷脱氮领域的一个新理念, 它在很大程度上促进了新型脱氮除磷反应器朝这个理念发展^[15]。该理念的背景是当今世界对可持续发展的呼声越来越高, 而同时水处理界对可持续发展工艺要求也越来越严。荷兰 Delft 大学开发出的可持续发展 BCFS 脱氮工艺通过实现尽量减少 CO₂ 排放量, 尽量避免投加碳源, 尽量多的产生甲烷来体现可持续发展的理念。除磷的可持续发展工艺尚未见诸于文献中, 是未来研究的一个方向。

2 脱氮除磷方法的机理与反应器设计

国内外除磷脱氮方法概括起来有三种: 物化法、普通生物法和生物强化法^[13,18,5]。

物化法是通过物理化学作用去除污水中营养元素的方法^[16,20]。物化法除磷是通过在污水中投加絮凝沉淀物质完成的。机理是污水中的絮凝吸附与沉淀反应, 以前者为主。常用的絮凝剂为铝盐、铁盐或石灰。最近也有报道投加磷酸镁盐同时除磷脱氮的。通过调节处理水的 pH 值, 可使用氨吹脱法除氮。物化法的优点是操作简单、见效快, 缺点是成本较高。在污水厂附近有可利用的制铁制铝废液时常采用物化法以废治废。反应器设计的关键是保证足够的接触反应时间。接触反应池一般采用完全混合式, 接触时间在 20~30 min。物化法比生化法流程短, 因此反应器设计也较简单。

普通活性污泥法脱氮除磷技术已经有很多成熟的工艺, 如 A/O、A²/O、四段 Bardenpho、五段 Bardenpho、UCT、改良 UCT、SBR 等。但其机理到目前为止还没有完全为人们所掌握。早期的研究成果表明能够在厌氧状态下释磷的细菌主要是不动菌属, 约占释磷菌总量的 35%左右, 其次是假单胞菌属、气单胞菌属^[10,14]。因此早期的除磷脱氮反应器设计都着重于创造适合以上三种聚磷菌生

长的宏观环境。A/O、A²/O 工艺采取厌氧/好氧的顺序工艺。SBR 工艺在一个反应器内让活性污泥微生物在不同时间周期经历厌氧→缺氧→好氧宏观环境。至于 Bardenpho 工艺、UCT 工艺从本质上来说与 A/O (A²/O) 工艺无异。当然不同的反应器设计所考虑的侧重点是不一样的：Bardenpho 工艺的特点是将反应器分阶段设置，整个工艺呈推流式，能够很好的在不同的阶段体现不同微生物的优势，缺点是基建投资过高，运行管理复杂。UCT 工艺较之 Bardenpho 工艺来说分级的观念有所淡化，但在改良 UCT 工艺中也将关键的缺氧区分成了两级，可看成是 A/O 与 Bardenpho 工艺的揉合体。下图为几种常见的除磷脱氮工艺。

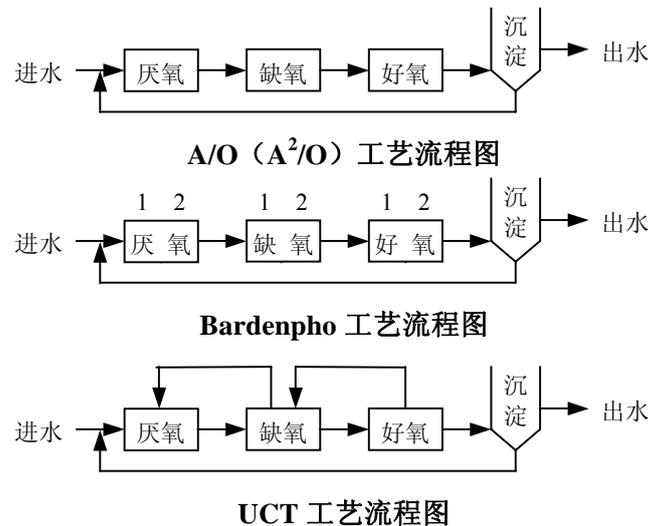
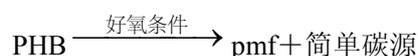
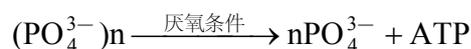
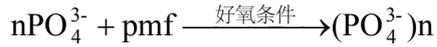


图 1 常见除磷脱氮工艺流程

随着人们对除磷脱氮机理认识的逐渐深入，更多高效的反应器得以产生。传统的脱氮理论认为所有硝化菌均为自养好氧菌，所有反硝化菌均为异养厌氧菌；生物脱氮必需经历三个阶段：氨化阶段（好氧或厌氧）、硝化阶段（需氧）和反硝化阶段（缺氧）。因此以 A/O 工艺为代表的除磷脱氮反应器设计都是在时间或空间上为微生物创造这三个阶段的宏观环境。现代微生物学理论则认为硝化细菌可以为异养菌，反硝化细菌可以为自养菌。基于现代微生物理论设计出来的 ANAMMOX^[6]、SHARON^[9]以及 SHARON 和 ANAMMOX 的结合工艺^[3]等可以节约 COD，减少曝气量，减量剩余污泥。以上新工艺反应器设计的要点是控制曝气池中 DO 浓度到接近理论值。SHARON 和 ANAMMOX 的结合工艺的设计要求更高一点，要求反应器中电子供体 (NO₂⁻) 与受体 (NH₄⁺) 之间的比例在一定范围内。反应器中若存在死角或涡流对去除率的影响将高于传统除磷脱氮系统。传统除磷机理认为聚磷菌 (PAO) 在厌氧环境下为了生存代谢的需要会释放体内的聚磷酸盐，并放出能量；与此同时，污水中有机物在厌氧细菌的作用下形成 PHB；利用磷释放所产生的能量，聚磷菌大量储存 PHB 到细胞中。在好氧条件下 PAO 会分解体内的 PHB，产生质子驱动力 (pmf)，过量的吸收体外的 PO₄³⁻ 达到除磷的目的。对应的机理表示如下：





传统除磷反应器围绕着以上机理，在反应器设计方面做了很多改进，力求满足 PAO 的宏观环境。现代微生物学者发现自然界存在着一种反硝化聚磷菌（DPB），可以在缺氧的条件下吸磷。这一发现意义重大：利用反硝化聚磷菌可同时去除污水中的 N、P 元素，节省了动力费与 COD，减少了剩余污泥排放量。DPB 新型反应器的设计目的：培养适于 DPB 生长的宏观环境，发挥 DPB 的同步除磷脱氮功能。反应器设计关键是控制连续的厌氧、缺氧交替环境；选择合适的厌氧、缺氧水力停留时间。针对 DPB 的生活习性，DPB 新型反应器可选择以下几种形式：推流式连续厌氧（A）/缺氧（A）反应器、膜法 SBR 反应器、厌氧 SBR 反应器、改进 UCT 工艺等。

生物强化法的理论基础有别于传统生物除磷脱氮。传统普通生物法认为凡是在生物反应器中出现的微生物都是最具竞争优势的菌种；生物强化理论认为虽然生物反应器中的生物共生组合可以达到脱氮除磷目的（或其它同化污水的目的），但其菌种组合有可能并非是最优化的。基于这种思想，产生了生物强化污水除磷脱氮技术：通过人工筛选的方法找出可用于生物除磷脱氮的微生物菌种，将它们进行组合，固定化，最后开发出合适的反应器来支持特种菌种的生长繁殖与代谢的方法。生物强化法成功典型是日本的生物制剂技术或称为有效微生物制剂（EM）技术^[11]。国内也有不少相关优势菌种投加及反应器设计的实例。生物强化法反应器设计关键是投菌点、投菌时间和投菌量设计；菌种与污水的有效混合装置设计；防止菌种流失的结构设计等。

3 新型生物法除磷脱氮机理研究与反应器设计

国内外脱氮除磷技术都存在两个问题。① 由于聚磷菌和硝化菌细胞停留时间相差不大（低温状况下，聚磷菌和硝化细菌的细胞停留时间差距为一天左右，高温状态下，二者之间的差距微乎其微），在工艺的厌氧区就难免会引入一些 NO_3^- ，作为电子受体与释磷菌争夺简单有机酸基质。因此传统生物除磷脱氮方法一般无法同时高效除磷脱氮。② 传统多段脱氮除磷反应器（如 A/O、A²/O 等）由于要分步实现微生物硝化反硝化，释磷与放磷，基建和运行费都较高。

新型反应器的开发设计可以解决以上传统除磷脱氮技术难题的一个或两个方面。

3.1 新型 DPB 反应器设计

最近研究表明，除了氧之外，硝酸盐也可作为电子受体除磷^[20]。将传统厌氧/好氧除磷系统中的好氧段换成缺氧段就可以培养反硝化聚磷菌^[15,18]。

众所周知，有 COD 可利用时，硝酸盐氮对缺氧段释磷是有抑制作用的。在实际工程中，除磷常与硝化/反硝化联合（比如 UCT 工艺），因此很容易将硝酸盐氮引入厌氧区。为了解释硝酸盐氮对释磷的抑制机理，很多研究者做了污泥中同时含 COD 与硝酸盐氮时污泥的特性研究。如 Newtherlands 污水处理厂改良 UCT 工艺有硝酸盐与无硝酸盐时污泥释磷活性的研究^[16,17]。反硝化聚磷菌对磷的吸收可能是硝酸盐释磷水平减少的原因。如果这个假设成立，对含 COD 与硝酸盐氮污泥除磷性能的研究对研究反硝化聚磷菌占聚磷菌比例的问题大有帮助。根据含有硝酸盐氮与不含硝酸盐氮时的不同放磷速度，可计算 DPB 占除磷菌的比例。但目前对 DPB 的确切代谢机理还不太清楚。

另外，现在已知的反硝化菌都可以利用氧气作为电子受体，有部分也可以硝酸盐氮作电子受体。

因此 DPB 可能只在好氧和缺氧条件下起作用，而好氧除磷菌在缺氧条件下没有活性。因此，可通过比较厌氧除磷污泥和缺氧除磷污泥生物相比较两者吸磷活性。

根据以上除磷机理可以设计以下 DPB 除磷脱氮反应器：推流式连续厌氧（A）/缺氧（A）反应器、膜法 SBR 反应器、厌氧 SBR 反应器、改进 UCT 工艺等。若设计推流式连续厌氧（A）/缺氧（A）反应器一般将厌氧段 HRT 设为 2 小时，缺氧段 HRT 设为 4 小时。试验证明这种工艺厌氧释磷与 COD 吸收量为：0.25 gP/gCOD，缺氧吸磷与硝酸盐去除比为：0.06 molP/mol e^[14,10]。

我国重庆建筑大学罗固源教授^[4,17]也研究过 DPB 机理与反应器设计。罗教授是利用双泥法加强反硝化聚磷菌（DPB）在污水中的竞争优势实现同时除磷脱氮。图 2 为罗固源教授的双泥法 DPB 反应器示意图。

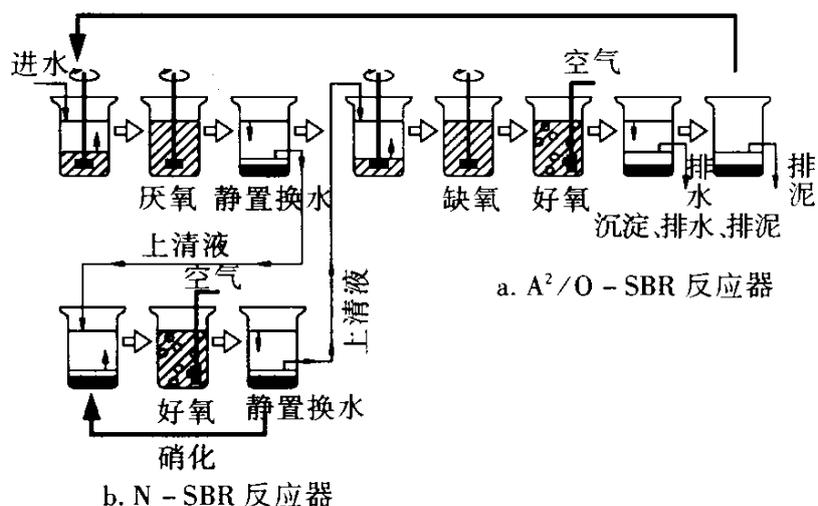


图 2 DPB 反应器示意图

3.2 新型脱氮反应器设计

针对污水生物脱氮的问题，最近也出现了很多理论。比如短程硝化理论、同步硝化反硝化理论、ANAMMOX 理论等。短程硝化理论认为通过适当反应器设计可使反应器内部有合适的宏观环境与微观环境，让硝化菌进行短程硝化。短程硝化示意反应式：



短程硝化可以减少基建投资与节省能耗。ANAMMOX 理论则认为反硝化菌可以直接利用 NH₃ 作电子供体。ANAMMOX 可以节约碳源，体现了可持续发展的观念。对碳源不足的污水生化处理比较适用。同步硝化反硝化认为通过适当反应器设计可使反应器内部有合适的宏观环境与微观环境，让硝化菌进行同步硝化反硝化。同步硝化反硝化反应器设计一般是通过控制溶解氧实现微环境，让自养硝化菌进行硝化；硝化产物通过微环境进入缺氧区，利用碳源作电子供体来进行反硝化。它可以节约基建费与电费。还有一种工艺将短程硝化与 ANAMMOX 串接起来，工程上也称短程硝化反硝化。在该工艺中，短程硝化反硝化产生的 NO₂⁻可以直接利用 NH₃-N 作电子供体，同时补充一部分

硝化所需的碱度。该工艺示反应式示意如下：



该工艺最为节省动力费，是理想的可持续发展工艺。

4 新型脱氮除磷反应器及其机理研究的应用前景

以双泥法新型 DPB（同步反硝化除磷菌）反应器为例。

采用双泥系统（聚磷菌、反硝化菌共存于一个活性污泥系统中，硝化菌存在于另一个污泥系统），可分别控制硝化菌和异养菌（聚磷菌和反硝化菌）的泥龄，解决了异养菌与硝化菌的不同泥龄之争，有利于反硝化脱氮除磷与硝化的各自优化；异养型兼性菌在理想的厌氧、缺氧、好氧交替的环境下进行反硝化和除磷，同时自养型专性好氧硝化菌可始终在曝气环境中进行好氧硝化；两个反应器的沉淀上清液相互交换，保证了原水中 85%~90% 的 COD 在进入 A²/O-SBR 厌氧段时被活性污泥快速吸附或降解，并用于该段厌氧释磷和缺氧反硝化，提高了有机物的利用率；同时提高了缺氧段初期 NO₃⁻ 的浓度，有利于反硝化；两个反应器的沉淀上清液相互交换，使进入 N-SBR 的 COD 浓度较低，且多为溶解性难降解有机物，其 BOD/TKN 值约为 0.8~1。此上清液不利于 N-SBR 中异养型微生物的生长，但有利于提高硝化菌的比例，强化硝化作用，提高 COD 的利用率；在缺氧状况下，聚磷菌可在快速反硝化脱氮的同时吸磷，提高了易降解有机物的利用率，改善了脱氮除磷效果^[7]。

DPB 反应器由于利用和强化了微生物的同时除磷脱氮功能，因此在经济上比普通的除磷脱氮反应器（包括 SBR）要节省。新型反应器体积小，回流小（可不用回流，若需回流可采用完全用阀门控制，利用重力完成回流），节省回流泵费用；除磷脱氮效果好。可以较大限度的利用有机物产生甲烷，较大程度的减轻处理过程中向空气中排放 CO₂，从而在一定程度上体现了可持续发展的理念。

5 结语

除磷脱氮机理是反应器设计的基础，除磷脱氮机理通过除磷脱氮反应器设计体现。

新型高效节能反应器的开发是脱氮除磷技术的一个方向，可以减少投资和运行费用。同时新型反应器的开发要注意体现可持续发展的观念。

参考文献

- [1] 王弘宇, 杨开等. 废水生物除磷技术及其研究进展. 环境技术, 2002(2): 38-42.
- [2] Carliell, C.M.; Wheatley, A.D. Metal and phosphate speciation during anaerobic digestion of phosphorus rich sludge. Water Science and Technology.
- [3] Randall, C.W.; Chapin, R.W. Acetic acid inhibition of biological phosphorus removal. Water Environment Research.
- [4] 罗固源. 城市污水 PIAS 除磷效果初探. 重庆环境科学, 2000, 22(3): 40-42.
- [5] 孙力平. 污水处理新工艺与设计计算实例. 科学出版社, 2002.
- [6] P.A. Castillo, S. González-Martínez and I. Tejero. Observations during start-up of biological phosphorus removal in biofilm reactors. Water Science and Technology.
- [7] 罗固源. 城市污水 PLAS 除磷效果初探. 重庆环境科学. 2000, 22(3).
- [8] 田淑媛, 等. 生物除磷及其生化机理研究. 中国给排水. 2001, 17(1).
- [9] Kempton, Timothy J.; Cusack, Edward. Sustainable management of BNR biosolids. Water Science and Technology.
- [10] Morgan, Scott; Farley, Ray; Pearson, Rob. Retrofitting an existing trickling filter plant to BNR standard - Selfs Point, Tasmania's first. Water Science and Technology.
- [11] 施永生. 亚硝酸型生物脱氮技术. 给水排水, 2000 年 26 卷第 11 期.

-
- [12] 吕锡武, 李峰, 稻森悠平, 水落元之. 氨氮废水处理过程中的好氧反硝化研究. 给水排水, 2000 年 26 卷第 4 期.
- [13] Lee, T.T.; Wang, F.Y.; Newell, R.B. On the modelling and simulation of a BNR activated sludge process based on distributed parameter approach. *Water Science and Technology*.
- [14] Pitman, A.R. Management of biological nutrient removal plant sludges - change the paradigms? *Water Research*.
- [15] 冯生华, 黄晓东, 蒋慧敏. 一种占地小耗电少的污水污泥处理新工艺. 给水排水, 2001 年第 27 卷第 12 期.
- [16] 向仁军, 张在峰, 李和平. 一体化生物除磷脱氮工艺装置. 中国给水排水, 2000 年 4 月.
- [17] 罗固源, 罗宁, 吉芳英, 许晓毅. 新型双泥生物反硝化除磷脱氮工艺. 中国给水排水, 2002 年 9 月.
- [18] Tonkovic, Z. Aerobic stabilisation criteria for BNR biosolids. *Water Science and Technology*.
- [19] 冯生华, 刘延华. 生物除磷糖控制(CHC)工艺的试验研究. 中国给水排水, 2002 年 9 月.
- [20] 邱慎初. 化学强化一级处理(CEPT)技术. 中国给水排水, 2000(1).