

# 丝状菌污泥膨胀机理与控制方法

周 利<sup>1</sup>, 彭永臻<sup>2</sup>, 徐晓军<sup>1</sup>, 徐 慧<sup>1</sup>, 王伟平<sup>1</sup>

(1.青岛理工大学 山东省环境工程重点实验室, 山东 青岛 266033; 2.北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100022)

**摘 要:** 分析总结了近 10 年来国内外关于丝状菌污泥膨胀的最新研究成果, 着重介绍了引起膨胀的丝状菌种类、污泥膨胀的影响因素、污泥膨胀的机理及控制方法, 并展望了该课题今后的研究方向。

**关键词:** 活性污泥法; 污泥膨胀; 丝状菌; 控制方法

**中图分类号:** X 703      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-0679(2005)02-0043-05

自从活性污泥法问世以来, 在其运行管理中丝状菌污泥膨胀(以下简称污泥膨胀)问题一直是困扰人们的难题之一。它具有 3 个显著特点: (1) 发生率较高, 在欧洲近 50% 的城市污水厂每年发生污泥膨胀, 在我国污泥膨胀的发生率也很高, 例如在上海几乎所有的城市污水及工业废水处理厂都存在不同程度的污泥膨胀问题。 (2) 普遍性, 在各种类型的活性污泥工艺中都存在污泥膨胀问题, 甚至连被认为最不易发生污泥膨胀的间歇式曝气池也能发生污泥膨胀。 (3) 危害严重、难于控制, 污泥膨胀的后果不仅使污泥流失, 出水悬浮物增高使水质恶化, 也大大降低了处理能力, 严重者将导致工艺无法正常运行, 而且污泥膨胀一旦发生则难于控制或者需要相当长的时间。为此, 污泥膨胀问题倍受关注, 世界各国一直在开展这一课题的研究, 并取得了许多新的研究成果。

## 1 丝状菌种类

目前在活性污泥中已经发现的丝状菌有 30 多种, 但不少丝状菌并没有成功地分离和鉴定。最常出现丝状菌的只有十几种, 通过总结世界各国对膨胀污泥中丝状微生物的调查发现, 尽管在不同地区有所差异, 但最频繁出现的丝状菌有以下种类<sup>[1]</sup>: 微丝菌、*Nocardioform actinomycetes*、0092 型、0961 型、0041 型、0675 型、*Nostocoida limicola*、软发菌、浮游球衣菌、1701 型、021N 型、发硫菌等。

膨胀污泥中的丝状菌种类与活性污泥工艺运转条件密切相关。在低负荷下的丝状菌种类为: 0041 型、0092 型、0081 型及微丝菌; 在高负荷下的丝状菌为: 浮游球衣菌、021 型、1701 型和 1863 型菌; 低 DO 下的丝状菌种类有: 1701 型、021N 型、浮游球衣菌、1863 型; 也有研究表明营养不足时丝状菌有发硫细菌、021N 型和球衣菌。

## 2 引起污泥膨胀的主要原因

污泥膨胀是一个相当复杂的问题, 形成活性污泥的微生物是多种微生物的群体, 既受到污水水质条件的影响, 又受到运行条件及环境的影响, 如污水的种类、成分、浓度、水温、负荷、溶解氧、pH 值等因素都会对污泥膨胀产生影响。根据丝状菌对环境条件和基质种类需求的不同, 可将丝状菌污泥膨胀原因划分为 5 种类型<sup>[2]</sup>: 基质限制、DO 限制、营养物缺乏、pH 值影响和 H<sub>2</sub>S 影响。

[收稿日期] 2005-05-23

[基金项目] 国家“863”重大科技专项项目(2004AA601010); 北京市水质科学与水环境恢复重点实验室开放基金项目

[作者简介] 周 利(1963-), 男, 山东莱西人, 副教授, 博士。

### 3 有关污泥膨胀的机理

#### 3.1 A/V 假说

A/V 为微生物的表面积与微生物菌体的容积之比,该假说认为伸展于絮凝体之外的丝状菌的比表面积要大大超过絮凝体的比表面积,当微生物的生长受到底物浓度限制时,表面积大的丝状菌在获取底物和氧化底物所需的氧都比絮凝体有利,因此丝状菌在与胶团菌的生长竞争中占优势。A/V 假说可以很好地解释低负荷、缺乏营养(N 和 P)时容易发生丝状菌污泥膨胀的现象,但该假说只是定性化的解释,缺少量化的数据支持。

#### 3.2 选择性准则

Chudoba 在 1973 年提出了选择性理论,该理论以微生物生长动力学为基础,根据不同种类微生物具有不同的最大生长速率  $\mu_{\max}$  和饱和常数  $K_S$ ,分析丝状菌与菌胶团细菌的竞争情况。该理论认为活性污泥中存在 A、B 两种类型微生物种群,丝状菌属于 A 型,具有低的  $K_S$  和  $\mu_{\max}$  值,在低基质浓度时具有高的生长速率并占优势;而菌胶团细菌属于 B 型,具有较高的  $K_S$  和  $\mu_{\max}$  值,在高的基质浓度条件下生长速率大并占优势,如图 1 所示。Palm 又对该理论加以扩展,认为该理论对溶解氧也成立,即 DO 与碳源基质一样,其浓度的高低影响两种类型细菌的生长速率及优势地位。

选择性理论能从微生物生长动力学基础上对污泥膨胀现象给予合理的解释,已被人们广泛接受,并成为污泥膨胀研究领域主要理论。在该理论的指导下,已成功地开发出了选择器工艺来控制污泥膨胀。

#### 3.3 饥饿假说

Chiesa 等人将不同研究者对活性污泥动力学性质研究结果进行分析总结,提出了饥饿假说。该假说认为,活性污泥中存在三类微生物,第一类是快速生长的菌胶团细菌;第二类是具有高的基质亲和力的生长缓慢的耐饥饿丝状菌;第三类是对溶解氧有高的亲和力、对饥饿高度敏感的快速生长的丝状菌,如图 2 所示。在低基质浓度下,基质浓度小于  $S^*$  时,第二类微生物将占优势;当基质浓度大于  $S^*$  时,只要溶解氧的传递不是限制因素,第一类微生物将占优势;在高基质低溶解氧情况下,第三类微生物将占优势。

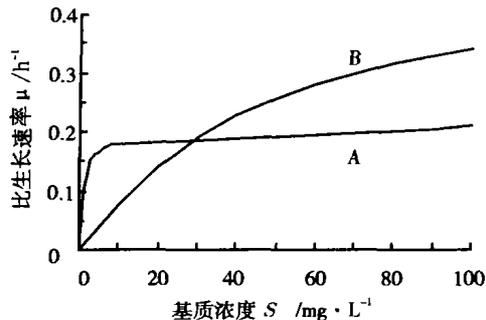


图 1 两种微生物竞争示意图

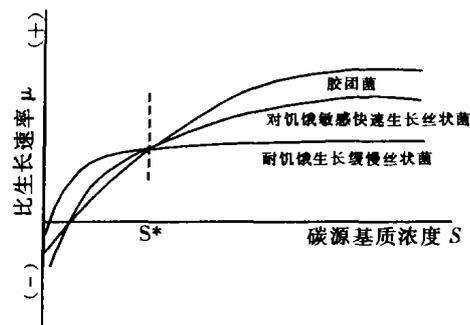


图 2 饥饿假说中三类微生物竞争

#### 3.4 积累-再生假说(AC-SC)

针对高负荷下发生膨胀的现象,Chudoba 提出了积累-再生假说,其模型如图 3 所示,其中  $S_{ex}$  为细胞外基质,  $V_{in}$  和  $V_{ex}$  分别为基质输入、输出细胞速率,  $V_s$ 、 $V_d$  分别为贮存物形成、解聚速率,  $V_m$ 、 $V_{m(s)}$  分别为基质和贮存物代谢速率,  $M$  为代谢产物。该理论认为基质被微生物利用要经过细胞内积累、贮存和代谢三个阶段,基质传递进入细胞内并在其内积累,在细胞复制之前,积累在单位重量细胞内基质的量称为积累能力(AC)。所积累的物质一部分可以转化为贮存物质,单位重量细胞所贮存基质的量称为贮存能力(SC)。活性污泥法中被去除的基质的量分为被氧化部分、积累部分和贮存部分,活性污泥在从曝气池到二沉池再回流到曝气池的循环过程中,只有当微

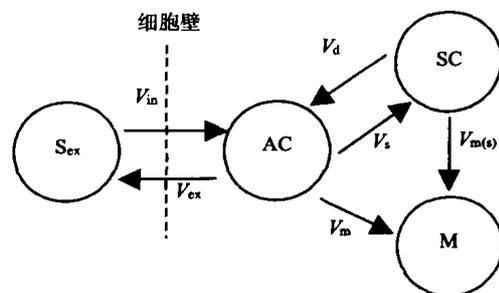


图 3 积累-再生假说示意图

生物积累的基质得到氧化后,其积累能力得到恢复,微生物才能进行代谢和生长。而不同种群的最大 AC 值是不同的,在混合培养液中,具有高 AC 值的微生物将处于优势地位。实验表明,胶团菌比丝状菌具有高的 AC 值,但当摄入的基质得不到氧化时,其高 AC 值的能力将不能充分发挥而得到降低,这就很好地解释了高负荷丝状菌污泥膨胀的原因。

### 3.5 统一的污泥膨胀理论<sup>[3]</sup>

在混合培养的活性污泥中,有多种物质的浓度都可以限制微生物的生长速率,微生物生长可以综合表示为

$\text{BOD(有机物)} + \text{DO} + \text{营养物(N、P、Fe、其它微量物质)} \xrightarrow{\text{pH、温度}} \text{活性污泥(微生物)} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{残余有机物}$   
其中 BOD、DO、N、P 及其它微量物质都可以成为控制丝状菌和胶团菌生长的控制因素,另外环境因素 pH、温度、 $\text{H}_2\text{S}$  等也会对微生物生长产生影响。因此,微生物之间的竞争应遵循广义的 Monod 方程

$$\mu_i = \mu_{\max} [S_1 / (K_{i1} + S_1) \cdot S_2 / (K_{i2} + S_2) \cdots S_n / (K_{in} + S_n)] \quad (i=1, 2 \text{ 分别代表丝状菌和胶团菌})$$

该方程表达了微生物生长受  $n$  种基质限制的一般情况。关于 pH 值的影响,可以在动力学方程参数的基础上,以动力学常数的乘积因子的形式进行耦合,或单独列出其动力学方程,从而统一在广义的 Monod 方程之下。关于  $\text{H}_2\text{S}$  的影响,有研究表明, $\text{H}_2\text{S}$  的出现是污水厌氧发酵的伴随现象,而其中低分子有机酸降解增加耗氧速率,导致 DO 受限,才是引起膨胀的根本原因,从而可以归为 DO 限制型膨胀。因此,对于 5 种基本型式的丝状菌膨胀(基质限制、DO 限制、营养物缺乏、pH 值影响及  $\text{H}_2\text{S}$  影响),都可以有广义的 Monod 方程来解释,这就在一定程度上很好地统一了污泥膨胀理论。

## 4 控制与防止丝状菌膨胀的方法和途径

丝状菌污泥膨胀的控制方法基本上可以分为两大类:一类是采用物理、化学方法投加某种物质增加污泥絮体的比重或杀灭丝状菌来控制污泥膨胀;另一类方法是从污泥膨胀成因出发,根据微生物的代谢机制,调控微生物的生长环境来控制丝状菌污泥膨胀。

### 4.1 投加某种物质增加污泥絮体的比重或杀灭丝状菌

投加铁盐、铝盐等混凝剂可以通过其凝聚作用提高污泥的压密性来增加污泥的比重。投加高岭土、碳酸钙、氢氧化钙等也可以提高污泥的压密性来改善污泥的沉降性能。例如,向曝气池中投加  $\text{FeCl}_2$  能有效控制污泥膨胀<sup>[4]</sup>;投加滑石粉(P8418)能很好地改善污泥沉降性能,使 SVI 从 850 mL/g 迅速降低至 250 mL/g,并逐渐稳定在 100~150 mL/g 范围内<sup>[5]</sup>。

由于丝状菌的比表面积要比絮状菌大得多,当微生物遇到有毒害作用的化学药剂时,遭受破坏的主要是丝状菌,因此投加某些化学药剂可以达到这一目的。最常用的化学药剂是氯气,通常向回流污泥中投加,投加量一般为 2~10 kg  $\text{Cl}_2$ /1 000 kg 干污泥。有研究表明,通过使用荧光细胞内染色剂可以迅速评估丝状菌(O21N 型)氯化杀灭程度<sup>[6]</sup>。此外,投加臭氧、过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )也能起到破坏丝状菌改善污泥沉降性能的作用。

### 4.2 调控微生物的生长环境来控制丝状菌污泥膨胀

4.2.1 调整运行工况 污水厂在运行中发生污泥膨胀时,如果查明膨胀的原因是由于运行工况不合理所致,可以调整运行参数来控制污泥膨胀。例如,污水厂常因为曝气池中溶解氧浓度过低而引起低溶解氧膨胀,可以加大曝气量或在推流式曝气池中合理分配曝气量(前端增加,后端降低),使曝气池内保持合适的溶解氧浓度来控制丝状菌膨胀<sup>[7]</sup>。笔者在试验研究中发现,对于低溶解氧污泥膨胀的发生,通过提高溶解氧浓度至 3.4 mg/L 运行一段时间,污泥膨胀就能得到有效控制,如图 4 所示。对缺乏营养(N 和 P)、pH 值过低引起的污泥膨胀,可以通过增加营养和调整 pH 值来防止和控制。

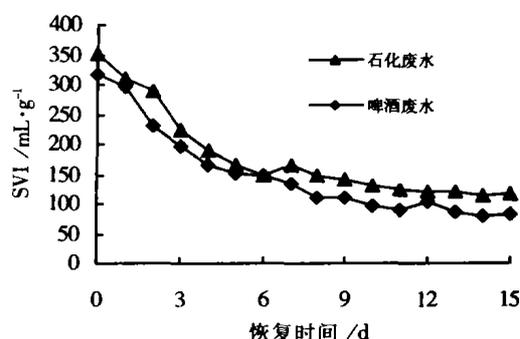


图 4 高 DO 下 SVI 值的变化

4.2.2 采用生物选择器 选择器方法就是在曝气池中形成一种有利于胶团菌生长的生态环境,选择性地发展胶团菌,应用生物竞争机制抑制丝状菌的过度繁殖,从而达到防止和控制污泥膨胀的目的。其具体做法就是在完全混合式、推流式曝气池前加设一个停留时间与曝气池相比短得多的小池子(称为生物选择器),由于其内初始混合液中底物浓度很高,局部提高了  $F/M$  比值,根据选择性准则,选择性地培养和发育了菌胶团细菌,使其成为曝气池内的优势菌,从而可以控制污泥膨胀的发生。根据选择器的运行条件不同,可将选择器分为好氧选择器、缺氧选择器和厌氧选择器。

4.2.3 采用对污泥膨胀有控制作用的工艺 大量实践表明,SBR 工艺与活性污泥法其它工艺相比是一种不易发生污泥膨胀的工艺。SBR 工艺的特点是间歇进水,在底物降解过程中反应器内底物浓度随时间逐渐降低,具有理想的推流状态,在反应开始出现的高基质浓度实际上起到了生物选择器的作用,因此丝状菌不易形成优势而发生污泥膨胀。

试验研究表明,在曝气池首端添加填料是一种控制高负荷污泥膨胀的有效方法<sup>[9]</sup>。填料在控制污泥膨胀中的主要作用是:首端对底物直接降解及因填料上生长微生物而增加了曝气池内生物总量,降低了有机负荷。另外,丝状菌附着在其上选择性地生长,减少了活性污泥絮体中丝状菌的量。

#### 4.3 各种控制方法的特点及效能比较

采用污泥絮体增重或杀灭丝状菌的方法来控制污泥膨胀,其特点是能够迅速降低 SVI 值,使膨胀得到有效地控制。污泥膨胀发生后采用其它方法控制往往需要较长时间,而且污泥膨胀的原因也不易查明,在膨胀得到有效控制之前,由于污泥大量流失导致污水厂不能正常运行,因此,迅速、有效的控制方法是很重要的。此类方法对于膨胀发生频率低、偶发性强的污水厂较为适用。但是,这类方法并不是很理想的污泥膨胀控制方法,因为采用这些方法时并没有从根本上控制丝状菌的繁殖,停止投加药剂后,污泥膨胀会出现反复,对规模较大的污水厂来说长期投加药剂无疑也增加了运转费用。另外,药剂的投加也能引起微生物生长环境的改变,导致处理效果的降低。因此这类方法作为临时应急之用为好。

采用生物选择器、合理的运行工艺及工况等方法已经成为目前控制和预防污泥膨胀的主要方法,其特点是,这类方法是从污泥膨胀成因出发,根据微生物的代谢机制,调控微生物的生长环境来控制丝状菌过度繁殖,而不是简单杀灭丝状菌。研究表明,好氧选择器和厌氧选择器都能有效地防止和控制低负荷和高负荷引起的污泥膨胀,并已在实践中得到应用<sup>[9,10]</sup>。

## 5 结语

由于污泥膨胀的多发性、普遍性及危害严重性,人们一直在持续不断地研究与实践污泥膨胀控制技术。丝状菌是活性污泥中不可缺少的重要微生物,在保持良好的污泥结构、高的净化效率、低的出水 SS 等方面具有重要作用,控制污泥膨胀方法从以前简单地用化学药剂杀灭丝状菌,发展到用环境调控及代谢机制调控的方法把活性污泥中丝状菌控制在合适的范围内来防止和控制污泥膨胀。因此,今后的研究将更加注重如何根据絮状菌和丝状菌在曝气池的空间与时间上的动态生理特性及其生态上的相互作用,控制丝状菌在活性污泥中占有合理的比例,得出切实可行的环境调控手段来有效控制与防止污泥膨胀。

#### 参考文献:

- [1] Jiri Wanner. The implementation of bulking control in the design of activated sludge systems[J]. Water Science and Technology, 1994,29(7):193-202.
- [2] 王凯军,许晓鸣.丝状菌污泥膨胀理论分析[J].中国给水排水,2001,17(3):66-69.
- [3] 王凯军.统一的活性污泥丝状菌型膨胀理论[J].环境科学,1992,14(2):44-48.
- [4] Yamamoto-Ikemoto Ryoko, Matsui Saburo, Komori Tomoaki, et al. Control of filamentous bulking and interactions among sulfur oxidation-reduction and iron oxidation-reduction in activated sludge using an iron coagulant[J]. Water Science and Technology, 1998,38(8-9):9-17.
- [5] Eikelboom D H, Grovenstein J. Control of bulking in a full scale plant by addition of talc (PE 8418) [J]. Water Science and Technology, 1998,37(4-5):297-301.

- [6] Goar W Ramirez , José L Alonso, Adelina Villanueva. A rapid, direct method for assessing chlorine effect on filamentous bacteria in activated sludge[J]. *Water Research*, 2000,34(15):3894-3898.
- [7] 邹笑蓉,李宏敏,梁衷华,等. 污泥膨胀控制实例[J].*给水排水*,2003,29(7):16-17.
- [8] 王凯军. 高负荷活性污泥膨胀控制的试验研究[J].*给水排水*,1999,25(11):30-33.
- [9] A Duine, S Kunst. Control of bulking sludge caused by Type 021 N and Type 0961 in an industrial wastewater treatment plant with an aerobic selector[J]. *Water Science and Technology*, 2002,46(1-2):29-33.
- [10] Jeanette Agertved, Jens-Ove Petersen. Improvement of sludge settleability in activated sludge plants treating effluent from pulp and paper industries[J]. *Water Science and Technology*, 1999,40(11-12):215-222.

## Mechanism and Control Methods of Filamentous Sludge Bulking

ZHOU Li<sup>1</sup>, PENG Yong-zhen<sup>2</sup>, XU Xiao-jun<sup>1</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, WANG Wei-ping<sup>1</sup>

(1.Shandong Province Key Lab of Environmental Engineering,Qingdao University of Technology,Qingdao 266033, China; 2.Beijing Key Lab of Water Quality Science and Water Environment Recovery, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

**Abstract:** This paper analyzed the research achievements of filamentous bulking at home and abroad over last decade years, introduced the types of filamentous bacteria, the factors causing filamentous bulking, the mechanism of filamentous bulking and the control methods, and put forward the research tendency in the future.

**Key words:** activated sludge process; sludge bulking; filamentous bacteria; control methods

\*\*\*\*\*  
(上接第 34 页)

### 参考文献:

- [1] 瞿群迪.采场上覆坚硬岩层组稳定性分析及其应用[D].徐州:中国矿业大学,1997.
- [2] 叶明亮.采场顶板破断规律及其应力状态的研究[J].*贵州工业大学学报*,1998,19(2):13-22.
- [3] 唐晓玲,叶明亮.薄煤层坚硬顶板的薄板理论分析及来压预报[J].*矿山压力与顶板管理*,2003,(2):89-92.
- [4] 唐晓玲,叶明亮.薄煤层坚硬顶板的薄板理论分析及来压预报[J].*西部探矿工程*,2003,(8):67-69.
- [5] 叶明亮,宿成建.薄煤层坚硬顶板采场围岩体三维应力状态的 ADINA 研究[J].*贵州工业学院学报*,1994,23(5):36-41.
- [6] 魏锦平,靳钟铭,杨彦风.坚硬顶板控制的数值模拟[J].*岩石力学与工程学报*,2002,21(增 2):2488-2491.
- [7] 徐芝纶.弹性力学[M].第三版.北京:高等教育出版社,1990.
- [8] 樊大钧.数学弹性力学[M].北京:新时代出版社,1983.

## The Solution to and Application of Elastic Problem of Limitless Board of the Banding

CHEN Jun-guo, MENG Jin-jun, DONG Zheng-zhu

(College of Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** This paper gives analytic solution fitted to roof stress of coal floor, using analysis method of limitless board of the banding by the complex function in elasticity. It is easy to achieve the stress distribution of roof by this formulation and numerical integration.

**Key words:** limitless board of the banding; stress function; numerical integration; roof stress