

# 给排水管网中生物膜形成机制及其对水质影响研究

李海涛

江西一央建设有限公司 江西九江 332100

**摘要:** 给排水管网中的生物膜形成是一个受管道特性、微生物属性与水动力条件共同调控的动态过程, 经历初始附着、生长成熟与脱落再生长三个阶段。生物膜通过分泌胞外聚合物形成三维结构, 其内部微生物群落复杂且分层, 使其具备强大的环境适应能力。在给水管网中, 生物膜作为微生物的“储存库”, 会释放病原菌、消耗消毒剂、产生异味物质, 导致水质微生物学指标超标、感官性状劣化及化学稳定性破坏, 直接威胁饮水安全。在排水管网中, 生物膜则通过代谢产物加速管道腐蚀与结垢, 缩小有效管径以降低过水能力, 并对有害物质产生复杂的迁移转化作用, 增加系统运维成本与环境风险。因此, 深入理解生物膜的形成机制及其对管网系统的多维度影响, 对于开发有效的控制策略、保障给排水系统的安全稳定运行具有至关重要的意义。

**关键词:** 给排水管网; 生物膜; 形成机制; 水质影响

## 引言

给排水管网是现代城市基础设施的“血管”, 其安全稳定运行直接关系到公众健康与环境质量。然而, 在这一密闭、复杂的管道系统中, 微生物的附着与生长形成了一层肉眼难以察觉的生物膜, 它如同一个“隐形”的生态系统, 深刻影响着管网的运行效能与输送介质的质量。生物膜的存在不仅可能导致饮用水安全隐患, 还会引发排水管道的功能性障碍, 是城市水务管理中一个长期存在且亟待解决的难题。因此, 系统性地研究给排水管网中生物膜的形成机制, 剖析其对水质和管网功能的具体影响, 对于制定科学的管网维护策略、保障城市水安全具有重大的理论价值与紧迫的现实需求。

### 一、给排水管网生物膜的形成机制

生物膜在给排水管网中的形成是一个动态连续的过程, 受管道特性、微生物属性与水动力条件共同调控, 可分为初始附着与微生物定殖、生长成熟、脱落再生长三个阶段, 各阶段相互衔接且具有明确特征。

#### (一) 初始附着与微生物定殖

初始附着是生物膜形成的起点, 核心是微生物在管道表面的稳定停靠, 主要受三方面因素影响。管道表面条件直接决定附着难度: 铸铁管、镀锌钢管等金属管道因使用过程中易产生锈蚀, 表面存在大量凹陷与孔隙, 为微生物提供天然附着位点, 相比光滑的PE管, 其初始附着量可高出30%~50%; 管道内壁的沉积物(如泥沙、腐蚀产物)也会增加表面粗糙度, 进一步降低微生物附

着的能量壁垒。

微生物自身特性影响附着能力: 水中的假单胞菌、不动杆菌等细菌可分泌黏性物质, 增强与管道表面的结合力; 真菌孢子、原生生物则通过形态适应(如菌丝缠绕)实现稳定停靠, 且细菌通常比真菌更早完成初始附着, 成为后续群落的“基础种群”。水动力条件通过流速调节附着效率: 流速过低(给水管网流速 $< 0.5\text{m/s}$ 、排水管网流速 $< 0.6\text{m/s}$ )时, 微生物有充足时间与管道表面接触, 定殖概率显著提升; 流速过高(给水管网流速 $> 1.5\text{m/s}$ )则会产生剪切力, 阻碍微生物稳定附着, 仅少数黏附能力强的微生物可留存<sup>[1]</sup>。

#### (二) 生物膜的生长与成熟过程

初始定殖的微生物通过代谢繁殖与EPS分泌, 推动生物膜进入生长成熟阶段, 此阶段是生物膜结构与功能完善的关键。EPS作为生物膜的“结构骨架”, 主要由多糖、蛋白质与核酸组成, 不仅能将微生物包裹其中形成三维网络, 还能吸附水中的营养物质(如氮、磷)与金属离子, 为微生物生长提供持续能量与保护。随着EPS不断积累, 生物膜厚度从初始的几微米逐步增至数百微米, 形成肉眼可见的膜状结构。

微生物群落结构随生长过程逐步复杂化: 初始阶段以单一异养菌为主, 随着营养物质的富集, 真菌、原生生物甚至微型后生动物(如轮虫)逐渐迁入, 形成“细菌-真菌-原生生物”的多级食物链。成熟生物膜还具有明显的空间分层特征: 表层微生物直接接触水体, 以好氧菌为主, 代谢活跃且易与水体交换物质; 深层微生物

因氧气供应不足,多为兼性厌氧菌或厌氧菌,主要降解表层渗透的有机物与代谢产物。这种分层结构使生物膜具备较强的环境适应能力,可在不同水质、水温条件下维持生长。

### (三) 生物膜的脱落与再生长

生物膜并非永久附着于管道表面,在内外因素作用下会发生脱落,随后进入再生长阶段,形成“附着-生长-脱落-再附着”的循环。脱落主要源于两方面:一是水动力条件变化,如管网阀门启闭导致的流速突变、用水高峰时的瞬时高流速,产生的剪切力可撕裂生物膜结构,导致部分片段脱落;二是生物膜自身老化,成熟生物膜内部营养供应不足,微生物代谢产物(如有机酸)积累,使生物膜与管道表面的结合力减弱,最终自然脱落。

脱落的生物膜片段可成为新的附着载体,快速启动再生长过程。这些片段携带活性微生物与EPS,在水流作用下迁移至管道其他区域,若遇到适宜的表面条件(如粗糙表面、低流速区域),可跳过初始适应阶段直接定殖,再生长速度通常比初始附着快2~3倍。这种循环特性使生物膜在管网内持续存在,即使通过冲洗清除部分生物膜,短期内仍可能重新形成<sup>[2]</sup>。

## 二、生物膜对给水管网水质的影响

给水管网的核心功能是输送合格饮用水,生物膜的存在会从微生物学、感官性状、化学稳定性三个维度破坏水质,导致饮用水安全风险升高。

### (一) 对微生物学指标的影响

生物膜是给水管网中微生物的“储存库”,其存在直接导致水体微生物学指标超标。生物膜内栖息的细菌、真菌等微生物,在环境条件变化(如水温升高至25~35℃、余氯浓度下降)时,会通过扩散或脱落释放到水中,使水体中细菌总数、总大肠菌群等指标超出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)要求。例如,生物膜中的军团菌在适宜水温下易从膜内释放,若饮用水中军团菌浓度超过100CFU/L,可能引发居民呼吸道感染疾病。

生物膜还会降低消毒剂的杀菌效果:EPS可吸附水体中的游离氯,形成“氯耗层”,导致管道内壁附近余氯浓度远低于水体主体,使生物膜内的病原微生物(如沙门氏菌、隐孢子虫)免受杀灭,长期存活并通过间歇性脱落进入饮用水。某小区给水管网监测显示,管道内壁生物膜存在时,末梢水余氯浓度从0.2mg/L降至0.03mg/L,细菌总数则从50CFU/mL升至300CFU/mL,微生物污染风险显著升高<sup>[3]</sup>。

### (二) 对感官性状指标的影响

生物膜的代谢活动与脱落过程,会导致给水管网水质感官性状劣化,主要表现为异味、浊度升高与颜色变化。生物膜中的微生物在代谢过程中会产生挥发性有机化合物,如土臭素、2-甲基异茨醇,这些物质阈值极低(土臭素阈值约0.005 $\mu$ g/L),即使浓度微小也会使水产生明显的土腥味或霉味,严重影响用户饮用体验。

生物膜脱落的片段(含微生物细胞、EPS、管道腐蚀产物)会增加水体浊度:正常给水管网水浊度通常低于1NTU,而生物膜大量脱落时,浊度可升至2~5NTU,导致水呈现浑浊状态。同时,生物膜代谢可能改变水体pH值,促使管道内壁的铁、锰等金属离子释放,使水呈现黄褐色或红褐色,进一步恶化感官性状,降低用户对水质的信任度。

### (三) 对化学稳定性的影响

生物膜的存在会破坏给水管网水质的化学稳定性,主要体现在水体pH变化、金属离子溶出与消毒剂消耗三个方面。生物膜中的硝化细菌在代谢过程中会分解氨氮产生硝酸,导致水体pH值下降,酸性环境会加速金属管道的腐蚀——铸铁管在pH<6.5的条件下,腐蚀速率可提升2倍以上,管道中的铁、铅、锌等金属离子会随腐蚀溶出。某老旧小区给水管网监测显示,生物膜导致水体pH从7.5降至6.2,水中铁离子浓度从0.1mg/L升至0.5mg/L,超出国家标准限值(0.3mg/L)。

生物膜还会大量消耗水体中的消毒剂:EPS中的有机物与微生物细胞会与氯发生氧化还原反应,降低水体余氯浓度。给水管网末梢水余氯需维持在0.05mg/L以上以保证持续杀菌效果,而生物膜存在时,余氯消耗速度加快,末梢水余氯可能降至0.02mg/L以下,失去消毒能力,进一步加剧微生物超标风险。此外,生物膜代谢产物(如有机酸)还可能与管道中的金属离子形成络合物,改变水体化学组成,影响水质长期稳定性<sup>[4]</sup>。

## 三、生物膜对排水管网系统功能的影响

排水管网承担污水输送功能,生物膜的存在会从管道腐蚀结垢、过水能力、有害物质迁移转化三个维度破坏系统功能,增加运维成本与环境风险。

### (一) 对管道腐蚀与结垢的影响

生物膜是加速排水管网管道腐蚀的关键因素,其代谢活动会改变管道周围的化学环境,形成“生物膜-化学腐蚀”的协同作用。排水管网中污水含有大量有机物,生物膜中的异养菌在降解有机物时会产生乙酸、丙酸等有机酸,这些酸性物质降低管道内壁pH值,对铸铁管、

钢管等金属管道产生化学腐蚀；同时，生物膜中的硫酸盐还原菌会将污水中的硫酸盐转化为硫化氢，硫化氢与管道表面的铁离子反应生成硫化亚铁，进一步加速腐蚀，形成黑色腐蚀产物。

腐蚀产物与生物膜自身的EPS、污水中的悬浮物会共同在管道内壁形成结垢层。某城市老城区排水铸铁管因生物膜长期积累，结垢层厚度达5~10mm，不仅增加管道重量，还会导致管道内壁粗糙程度升高，水流阻力增大。结垢层脱落时还可能堵塞支管，某小区曾因结垢层堵塞排水支管，导致雨季路面积水深度达30cm，影响居民出行，该城市每年因生物膜导致的管道腐蚀与结垢，需投入数百万元进行管道更换与疏通<sup>[5]</sup>。

### （二）对管道过水能力的影响

生物膜的生长与结垢层的形成，会直接缩小排水管网管道的有效管径，降低过水能力，严重时引发管道堵塞。排水管网设计时需保证流速 $\geq 0.6\text{m/s}$ 以防止淤积，而生物膜与结垢层会使管道内径缩小——例如DN500的排水管道，若结垢层厚度为10mm，有效管径缩小至DN480，过水面积减少约7.8%，对应的过水能力下降10%~15%。

当生物膜大量生长或结垢层脱落时，还可能导致局部管道堵塞。某工业园区排水管网监测显示，生物膜与工业废水携带的油脂、残渣混合堆积，在管道转弯处形成长度约2m的堵塞段，导致管道内污水滞留时间从2小时延长至5小时，不仅降低排水效率，还会加剧污水厌氧发酵，产生更多异味气体（如硫化氢）。此外，过水能力下降会导致管道内流速减慢，进一步促进生物膜附着与悬浮物淤积，形成“过水能力下降-淤积加剧-能力再下降”的恶性循环。

### （三）对有害物质迁移转化的影响

生物膜对排水管网中有害物质的迁移转化具有双重作用，既可能减少有害物质扩散，也可能产生新的环境风险。生物膜的EPS含有羟基、羧基等官能团，能与污水中的重金属离子（如铅、镉）形成络合物，将其固定在生物膜内，减少向受纳水体的迁移。某污水处理厂进水口监测显示，生物膜存在使水中铅离子浓度较管网入口降低40%，证实生物膜对重金属的吸附固定作用。

然而，生物膜在污水处理过程中展现出的生物转化能力具有双面性，它既能够通过微生物代谢活动改变污染物的存在形态和毒性特征，同时也可能带来新的环境风险。具体而言，存在于生物膜中的氨氧化菌群能够将污水中的氨氮化合物通过生物氧化作用逐步转化为亚硝

酸盐类物质，这些亚硝酸盐在缺氧的管网环境中又可能通过复杂的生物化学反应进一步转化为具有致癌作用的亚硝胺类化合物。此外，生物膜中活跃的还原菌种可以将高毒性的六价铬离子通过还原反应转化为毒性相对较低的三价铬形态，但这种转化过程并非绝对安全，因为随着生物膜的自然脱落，这些还原产物可能重新释放到水体环境中，仍会对水生生态系统造成潜在的毒害影响。我国某大型化工园区的长期监测数据就清晰地验证了这一现象：排水管网末端的生物膜富集区域使得出水中的亚硝酸盐浓度较进水口显著提升了近3倍，这一变化不仅增加了水体的生态风险，还对下游污水处理厂的工艺运行参数提出了更为严格的调控要求。

### 结语

给排水管网生物膜的形成是一个受多因素调控的动态过程，其从初始附着定殖、生长成熟到脱落再生长的各阶段特征显著，且对管网系统的水质安全与功能稳定产生多维度影响。在给水管网中，生物膜通过降低消毒剂效能、释放微生物与代谢产物，导致饮用水微生物学指标超标、感官性状劣化及化学稳定性破坏，直接威胁用户饮水安全；在排水管网中，生物膜则通过加速管道腐蚀结垢、缩小有效管径、影响有害物质迁移转化，降低系统过水能力，增加运维成本与环境风险。未来研究需进一步结合管网材质革新（如开发抗菌型管道材料）、水动力优化（如动态调节流速抑制附着）、生物膜靶向控制技术（如高效EPS降解剂）等手段，探索从源头抑制生物膜形成、阻断其负面影响的综合策略，为提升给排水管网系统的运行安全性与经济性提供理论支撑与技术保障。

### 参考文献

- [1] 刘洋. 生物膜基膜在膜生物反应器中的过滤特性及其稳定机制研究[D]. 武汉大学, 2021.
- [2] 郭子军, 田学达, 余辉, 等. 微电解-电极生物膜法在污水深度处理中的应用[J]. 2021(2015-6): 1001-1007.
- [3] 张成, 吴荣. 景观-生物膜系统在水环境修复中的应用分析[J]. 水资源开发与管理, 2020(2): 5. DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2020.02.08.
- [4] 李敏. 渗滤液输运管道结垢影响机制驱动的管材优化研究[D]. 西南交通大学, 2022.
- [5] 陈继平. 供水管网管壁生物膜抗性基因转移机制及脱落风险研究[D]. 同济大学, 2022.