

输配水管道附生生物膜的研究进展

罗岳平 邱振华 李 宁

[摘要] 附生在输配水管道内壁的生物膜是使管网水质下降的最重要原因之一。本文介绍了有关管道附生生物膜的形成动态、生物和物理特征及环境条件对生物膜的影响,生物膜的防治等的研究进展。

[关键词] 供水 水质 生物膜 经济意义

自然环境中,细菌等微生物几乎可附生到所有与水接触的固体表面^[1]。这些附生微生物往往包埋在浓稠的细胞外化合物基质中,构成一个结构和功能的整体,称之为生物膜^[2]。生物膜不仅增加固体表面的粗糙度,阻滞水流,而且降低水质,给水下设施的维护等带来困难^[3]。有关研究一直为科研工作者和工程技术人员所重视,本文对其进展作一些介绍。

一、附生生物膜的形成动态

附生生物膜的出现是个与时间密切相关的过程^[2]。在不同的发育时期,附生微生物的种类和数量及其表现出来的群落特征相差很大,据此将生物膜的演替划分为附生基质表面性质的调控,微生物可逆性粘附,微生物不可逆性粘附,微群落形成,生物膜的出现、脱落和扩散五个连续的阶段。

1. 附生基质表面性质的调控

不同材料的管道与水流接触后,水中各种有机物,如蛋白质、聚多糖等可能通过疏水相互作用、表面化合反应等作用吸附到内壁。吸附速率取决于水中有机物质的含量、水流特征等,但最后积累厚度一般不超过 $0.1\mu\text{m}$ ^[4]。

发生吸附的有机物对管壁的表面粗糙度、热传递性能等影响不大,但它们改变了管材的表面电荷和疏水性等表面特征^[5],同时提供了细菌等微生物生长所需的营养物质,为它们发生粘附创造了有利条件。

2. 微生物可逆性粘附

在管道内流动的水体中含有各种各样的微生物,受范德华力、静电和疏水相互作用、氢键、

偶极矩、色散力等理化作用力控制,部分个体与管壁接触,进而发生粘附。但这些粘附个体仍作布朗运动,在水流冲击下易解除粘附,处于一种不稳定的可逆粘附状态。

发生可逆性粘附的微生物都来源于浮游类群,因而水中微生物的种类和数量及其生理状态决定可逆性粘附的发生速度和程度。在流水较为清洁的情况下,可逆性粘附是个缓慢的过程,这对延长管材的使用寿命很有意义。

3. 微生物不可逆粘附

发生可逆性粘附后,有些粘附个体分泌大量具有粘合作用的细胞外化合物,它们将微生物和管道内壁紧密联系在一起^{[6][7]},从而使粘附具有不可逆性。

微生物发生不可逆粘附是附生生物膜发育过程中的关键阶段。这些经受住水力冲刷的微生物逐渐形成结构复杂的生物膜。

4. 表面微群落

在生物膜形成初期,附生微生物斑块状散布在管道内壁^[2]。由于数量少,生物间不存在对营养和空间的竞争,因而分裂增生速度快,形成的菌落或细胞群体连接成片,相对均匀地覆盖在管道内壁^[8]。

5. 生物膜的出现、脱落和扩散

随着细菌和藻类等微生物的继续粘附及粘附个体的不断增生,附生群落逐渐复杂化。物种组成上,粘附生物种类增加,甚至原生动物也出现在膜表层。结构上,附生群落向外伸展,由突出的二维平面变为垂直的三维立体,发育良好时还出现明显的分层现象。

在膜的增长期,微生物的粘附速度超过解吸速度,因而粘附生物量不断增加。但当膜生长到一定厚度后,营养物质和氧气向内层的扩散受阻,结果膜深处的微生物受营养物质和氧气缺乏胁迫而死亡,从而引起膜大块脱落,这种现象在营养丰富的环境中非常普遍^[3]。

水力冲刷也是引起生物膜脱落的重要原因。生物膜外层结构较为疏松,在向外伸展的过程中,水流不断将其冲走,这同样使得膜不能无限增厚。

细菌和藻类等微生物在粘附后发生各种各样的生理变化,尤其分泌的细胞外化合物的性质和数量发生变化以及细胞外酶的积累会破坏膜的稳定性。

膜的脱落和扩散是膜内生物更新的重要途径,这个过程在污水治理中被广泛应用。但在供水生产中,脱落并扩散到水中的粘附微生物会降低水质,影响工业生产和居民生活,需要预防并采取积极措施予以消除。

二、附生生物膜的生物和物理特征

附生生物膜是一个复杂的系统。受生长时间和环境条件的影响,其结构和组成处在不断的变化之中,所表现出来的生物和物理特征也随之改变。

1. 研究附生生物膜生物和物理特征的方法

对附生生物膜进行定量研究的关键在于发展干扰最小的取样技术。普通光学显微镜能够在不破坏样品的条件下观察膜的一般外观,用INT染色后还可在一定程度上反映膜的空间分布^[9],但其对膜的认识主要局限于平面,不能深入内部。运用扫描电镜(SEM)和透视电镜(TEM)能获得生物膜的清晰图像,而且能观察到膜的内部,但样品预处理复杂,可能破坏膜的自然结构^[10]。

近年来,一些学者用共焦激光扫描显微镜(CSLM)研究生物膜的三维结构,取得较好效果^[11]。

2. 附生生物膜的物理特征

管道内壁附生生物膜的质地与水流强度密

切相关^[12]。水流速大,附生生物膜结构致密且均匀性好。在水流平缓的管网末梢,生物膜结构疏松且较大幅度地垂直伸展,这主要是各类丝状微生物伸入水流获得营养物质和氧气而充分生长的结果。

管道内壁附生生物膜的厚度及表面平整状况也与水流强度有关。在流速较快的管道内壁的生物膜的厚度不大,表面平整。水流平缓的情况下,生物膜易积累增厚,表面凹凸不平,表现出极强的异质性。

管道内壁附生生物膜的密度随水流速度增加而增大,这可能与强水流对附生物种的选择,膜内水分被水流挤压出来等因素有关。Hoehn和Ray还发现,生物膜的密度在膜生长期较大($105\text{mg}/\text{cm}^3$),到达临界厚度后相对稳定在一个低值($25\sim 30\text{mg}/\text{cm}^3$)。此外,不同深度处的膜的密度也不一样,充分反映出生物膜空间结构的复杂性^[13]。

3. 附生生物膜的生物特征

形成生物膜的铁细菌和硫细菌等分泌细胞外化合物的能力很强,细菌细胞常被厚厚的粘质外鞘及沉积其上的无机铁和硫黄颗粒等包被。在由这些细菌形成的生物膜中,细菌只占一小部分,而各种细胞外化合物构成主体^[13]。

生物量是描述附生生物膜生物特征的一个重要参数。可采用测量干湿重,悬浮生物膜后测透光率,以此计算活细菌的生物量等直接方法及测总有机碳(TOC),化学需氧量(COD),降解能力和染料吸收能力等间接方法来确定生物膜的生物量^[14]。大量研究表明,生物膜生物量呈“S”增长,即在生长初期,生物膜的生物量很小,随着时间延长,生物量逐渐积累并维持在一个相对稳定的水平。

细菌等微生物在粘附后发生生理改变^[6]。一些学者通过测ATP、蛋白质和脂肪含量,电子传递系统(ETS),氧在生物膜内的分布,同位素示踪,同化营养基质的能力等对比进行研究。结果发现,附生微生物通常表现出比悬浮个体更高的代谢和酶活性,生长繁殖速度和呼吸速率等都呈增强趋势^[15]。

生物膜内,藻类、细菌和真菌等自养和异养微生物在空间上紧邻,彼此相互交换代谢产物,尤其藻类分泌的可溶性有机物为异养细菌等利用,引起微生物增生,消耗余氯,并可能使水产生异味,降低水质。

三、附生生物膜与环境条件的关系

环境条件影响附生生物膜的生长速度,群落特征,同时决定附生生物膜的存在时间,改变膜内生物的生理活动等。

1. 水力条件对附生生物膜的影响

流动的水体不断将营养物质和氧等运输到水-管壁界面,促进细菌等微生物生长繁殖,加速生物膜生长。与此同时,水流的冲刷作用使外层粘附个体不断脱落,抑制生物膜的增厚生长。两者平衡的结果,生物膜厚度一般不超过 $1000\mu\text{m}^{[4]}$ 。

管网支线水流平缓,附生微生物既能获得足量营养和氧气,水流冲刷作用又不太强烈,附生微生物的生物量因此而较大程度的积累,严重腐蚀管材。

Allison 和 Gilbert 认为,流水对粘附物种有较强的选择作用,生物膜的生长也表现出特殊方式:微生物的粘附速度慢,但粘附发生后,由于流水带来丰富的营养,生物膜生物量迅速增加。

2. 水体营养状态对附生生物膜的影响

水-管壁界面富集相对丰富的营养物质,在水体营养水平低的情况下,很多贫营养型细菌利用这些营养物质生长繁殖并形成生物膜。

富营养水体中,细菌等微生物数量多,粘附事件发生的频率高且生物膜生长速度快,因而长期流动营养水平较高的自来水的管道易腐蚀。夏秋季,水中营养物质的浓度相对高,管道腐蚀速度也较贫营养的春冬季快。

3. 基质性质对附生生物膜的影响

细菌等微生物发生粘附的速度和程度与基质性质密切相关。无缝钢管、聚四氯乙烯等都易为微生物粘附且附生微生物的物种多样性高。美国学者在输配水管道生物膜中检出了 28 种细菌,某些厌氧菌在生物膜上的数量高达每

cm^2 上百万个。

青铜、铜-镍合金等材料具有微生物毒性,微生物在初期的粘附被抑制。但随着部分抗性强的细菌对表面的改造,材料表面毒性被掩饰,毒性敏感种也逐渐粘附并导致腐蚀。

管道表面粗糙度是影响腐蚀速度的重要因素。水体流经光滑平整的表面时,水力冲刷均匀,微生物较难粘附。管道表面变得粗糙不平后,凹陷处能够给微生物提供保护,粘附微生物较好生长并使管材腐蚀加速。多数情况下,管道出现一定程度的腐蚀后,其老化是一个非常迅速的过程。

四、附生生物膜对供水业的影响及其防治

附生生物膜对供水业的破坏作用逐渐被人们认识,一些有效的防治措施正在推广使用。

1. 附生生物膜对供水业的影响

附生在输水管道内壁的生物膜能引起管网水质严重下降,尤其会使管网水的浊度、色度、细菌总数、有毒重金属含量等指标恶化,威胁居民身体健康,干扰正常的工业生产。

在多种附生生物膜内都有生长的铁细菌氧化还原态铁,所析出的铁能使管网末梢水中铁的含量严重超标。铁锈沉积严重时,水流改向或突然加快都会引起生物膜大块脱落,出现红水现象。

硫酸盐还原菌也是附生生物膜的重要组成部分。厌氧条件下,它们将硫酸盐还原为硫化物,消耗氢而使金属表面阴极发生去极化作用。加速管材的电化学腐蚀。据估计,铁硫细菌的参与使管材的腐蚀速度加快 300~500 倍。

藻类在附生生物膜内数量不大,但其对余氯的消耗量大,结果使水中残存细菌再度繁殖,导致管网末梢水中细菌数量明显增加。一些蓝藻分泌的细胞外化合物还会使水散发异味,降低饮用效果。

在严重腐蚀的管道中,附生生物膜向外凸出,提高管壁摩阻系数并使管道有效截面缩小,结果使管道的输水能力下降,管网末梢服务压力不足。一些水厂采取加压措施,增加了能耗。

附生生物膜生长过程中不断消耗管材,部

分管道壁逐渐变薄,出现穿孔或爆管现象,影响供水系统安全运行,也增加管道维护难度。

2. 附生生物膜的防治

提高出厂水水质是控制生物膜在管道内壁附生的有效措施。处理不彻底的出厂水不仅将细菌等微生物带入管道,为生物膜的生长提供种源,水中丰富的有机物还供给微生物充足的营养,加速生物膜发育。有条件的水厂可采取活性炭过滤及去磷去氮等深处理工艺,提高出厂水质量。

出厂水中一般少有悬浮物,但仍有细小粉沙等颗粒进入管道。它们易在吸附能力强的生物膜表面聚集,形成软性沉淀。控制出厂水浊度对维持管道的输水能力有重要意义。

细菌等微生物的生长有其适宜的pH环境,pH超过8.4以后,铁硫细菌的生长基本被抑制。据此,可通过提高出厂水的pH值来延缓生物膜发育。而且在碱性介质中, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等腐蚀生成物的溶解度小,所生成的钝性保护膜能减轻腐蚀作用。

各种类型的管材以不同速度腐蚀,铺设管网时应尽可能选择耐腐蚀的球墨铁管等,中小口径管推广使用塑料管材。

对于已发生腐蚀的管道,如果管道结构强度满足要求,可采用刮管涂衬技术进行处理,如果结构强度不足,则可内套软管或内插小口径水管。在修复费接近更新费的情况下,应考虑更新管道。

调整和控制管网流态也是防治附生生物膜的有效方法。微生物在流动的水体中难以发生粘附后生长,因此保持管道中水的流动能在一定程度上延缓生物膜的出现。提高管内水的流速还可抑制各种厌氧菌的生长,减慢微生物引起的电化学反应速度并使形成的钝化膜对管道内壁起良好的保护作用。

周期性冲洗管道可起到除去管内沉积物,改善水质的作用。继续利用已严重腐蚀的管道供水则应尽可能保持稳定水压,避免水体紊流增加而引起生物膜脱落后扩散,扩大生物污染的范围。

给水排水 Vol. 23 No. 8 1997

参考文献

- [1] Fletcher M., "Adherence of marine microorganisms to smooth surface", In "Bacterial Adherence", Edited by Beachey E. H., London and New York: Chapman and Hall, 1980, 345~374.
- [2] Allison D. G. and P. Gilvert, "Bacterial biofilms", Sci., Progress oxford, 1992, Vol. 76, 305~321.
- [3] Characklis W. G. and Cooksey K. E., "Biofilms and microbial fouling", In "Advances in Applied Microbiology", Edited by Lidskin A. I., New York: Academic Press Inc., 1983, Vol. 29, 93~133.
- [4] Characklis W. G., "Fouling biofilm development: a Process analysis", Biotech. Bioengng., 1981, Vol. 23, 1923~1960.
- [5] Baier R. E., "Physiological responses induced in bacteria adhering to surfaces", In "Adsorption of Microorganism to surfaces", Edited by Bitton C. and K. C. Marshall, New York: Wileys, 1980, 59~104.
- [6] ZoBell C. E., "The effect of solid surfaces upon bacterial activity", J. Bact., 1943, Vol. 46, 39~56.
- [7] Marshall K. C., et al., "Mechanism of the initial events in the sorption of marine bacteria to surfaces", J. Gen. Microbiol., 1971, Vol. 66, 337~348.
- [8] Allison D. G. and I. W. Sutherland, "The role of exopolysaccharides in adhesion of freshwater bacteria", J. Gen. Microbiol., 1987, Vol. 133, 1319~1327.
- [9] Lazarova V., et al., "Integrated approach for biofilm characterization and biomass activity control", Wat. Sci. Technol., 1994, Vol. 29 (7), 345~354.
- [10] Kinner N. E., Balkwill D. L. and P. L. Bishop, "Light and electron microscopic studies of microorganisms growing in rotating biological contactor biofilms", Appl. Environ. Microbiol., 1983, Vol. 35, 1659~1669.
- [11] de Beer D., et al., "Effects of biofilm structures on oxygen distribution and mass transport", Biotechnol. Bioengng., 1994, Vol. 43, 1131~1138.
- [12] Lazarova V., B. Capdeville and L. Nikolov, "Biofilm performance of a fluidized bed biofilm reactor for drinking water denitrification", Wat. Sci. Technol., 1992, Vol. 26 (3/4), 555~566.
- [13] Jones C. H., I. L. Roth and W. M. Sanders, "Electron microscopic study of a slime layer", J. Bact., 1969, Vol. 99, 316~325.
- [14] Murgel G. M., et al., "Experimental apparatus for selection of adherent microorganisms under stringent growth conditions", Appl. Environ. Microbiol., 1991, Vol. 57, 1987~1996.
- [15] Hoehn R. C. and A. D. Ray, "Effects of thickness on bacterial film", J. Wat. Pollut. Control Fed., 1973, Vol. 45, 2302~2320.

○作者通讯处: 410007 长沙市劳动路 313 号

长沙市自来水公司

电话: (0731) 5197183

收稿日期: 1997-1-9