

流速对再生水滴灌系统毛管内生物膜表面特征的影响*

李贵兵¹ 任树梅¹ 许廷武² 杨培岭¹ 李云开¹ 闫大壮¹
(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学国际学院, 北京 100083)

【摘要】 采用三维白光干涉形貌仪观测不同流速下附着于PE管内的生物膜表面形貌,分析再生水滴灌条件下不同流速对滴灌系统内生物膜表面形貌的影响。结果表明:中流速区,生物膜表面固体颗粒物多,表面粗糙,生物膜较厚;高流速区,生物膜表面光滑,生物膜较薄;生物膜平均厚度与流速的关系符合指数规律,流速为0.22 m/s,生物膜平均厚度达到最大值。流速大于0.90 m/s的生物膜生长速率随着流速增加而下降快,生物膜易脱落,且水力剪切力也急增,清洗滴灌系统的流速应大于0.90 m/s。

关键词: 生物膜 滴灌 再生水 堵塞 表面形貌
中图分类号: S182; S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)05-0036-06

Effects of Flow Velocity to Surface Topographic Characteristics of Biofilm on Lateral Pipes of Reclaimed Wastewater Irrigation

Li Guibing¹ Ren Shumei¹ Xu Tingwu² Yang Peiling¹ Li Yunkai¹ Yan Dazhuang¹
(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. International Education College, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

3-D topography of white light interference instrument was used to observe the surface topography of biofilm under different velocity rates in PE pipe, and the impact of velocity rate and surface topography of biofilm was analyzed. The results showed that more solid particulate was on biofilm surface with roughness in the middle-velocity zone. In the high-velocity zone, biofilm surface was smoother and biofilm's thickness was thinner. The relationship between the average thicknesses of biofilm with velocity rate agreed to the exponential law whose maxima velocity rate is 0.22 m/s. Under the condition of velocity rate is greater than 0.90 m/s, the growth rate of biofilm was decreased faster with the increase of velocity rate, and more biofilm fell off, and hydraulic shear stress force increased rapidly, so cleaning velocity rate of the drip irrigation system should be larger than 0.90 m/s.

Key words Biofilm, Drip irrigation, Reclaimed water, Clogging, Surface topography

引言

再生水中的细菌会附着在营养相对丰富的介质表面生长、繁殖,这些活细菌、死细菌及其细胞碎片、固体颗粒往往被浓稠的胞外多聚物所包裹,构成三维异质结构,称之为生物膜。再生水滴灌条件下,生物膜会附着于滴灌系统内,影响水流运动,特别是流

道内的流动。毛管和流道内的生物膜具有粘附性,不断吸附固体颗粒、微生物团体而增长,并在水力剪切力作用下脱落,脱落的生物膜随水流进入灌水器流道内,沉积于流道,诱发灌水器堵塞。生物膜表面的粗糙度等影响毛管和流道的摩擦阻力,从而影响灌水器的水力性能和抗堵塞性能,生物膜的表面特征能体现生物膜的生长、固体颗粒物等的沉积与被

收稿日期: 2009-04-28 修回日期: 2009-06-03
* 国家自然科学基金资助项目(50779068)和长江学者和创新团队发展计划项目(2RTD657)
作者简介: 李贵兵,硕士生,主要从事灌溉与排水理论与技术研究, E-mail: liguibing@163.com
通讯作者: 任树梅,教授,主要从事灌溉与排水理论与技术研究, E-mail: renshumei@126.com

捕捉及微生物的生长,因此探索不同流速的生物膜表面特征具有重要意义。

生物膜表面形貌参数是生物膜生长的综合反映,是流体流动的动力学特性(流速、湍流度、水力剪切力)与生物膜生长相互影响结果,其中流速可以通过影响流动剪切力、湍流度以及营养物质输运等来影响生物膜生长。表面形貌参数包括膜体表面的粗糙度、厚度、覆盖率等微观参数 又能体现生物膜的生长与功能。如生物膜展开面与投影面的面积比率能体现生物膜表面能的大小,较大的表面能有利于污染物等的物理吸附和络合吸附^[1]。有研究发现生物繁衍与流速有关,流速越高给生物发育的养分越多^[2]。Charbel 等^[3]针对污水管内的生物膜进行研究,发现生物膜的凝聚力受搅拌速度和离子强度的影响较大,细菌生物量增长取决于生物膜厚度和层次;最底层中的细菌生物量是污水生物膜界面层,占 51% 的细菌总生物量。Barton 等^[4]研究生物膜对管道表面的粗糙度的影响,发现生物膜中细菌的比重较大。在生物膜表面形貌观测方面,Netuschil 等^[5]用激光共聚焦显微镜观察了生物膜的表面,并测量其厚度。Bakker 等对普通光学显微镜进行改进,通过照相机,采集生物膜的图像,分析生物膜的形态^[6-7]。苑维双等采用原子力显微镜观察微生物膜的表面形貌,并分析其表面的粗糙度^[8]。Richter 等采用光学探针显微镜观察了生物膜薄片,分析其形态^[9]。但以上研究主要针对供水管网、污水处理系统、自然水体中固体颗粒物质表面及人工培养的生物膜。

本文观测不同流速下再生水滴灌系统的初期生物膜的表面形貌,分析流速对生物膜表面特征的影响,探索再生水滴灌系统内初期生物膜的生长机理,为滴灌系统的清洗提出合理的流速。

1 材料与方法

1.1 试验设计

以滴灌所用 PE 管为研究材料,采用生物泳动床工艺处理过的再生水为试验用水。以毛管内设计

流速和灌水器流道内数值模拟结果设计试验流速^[10-11],水压为 10 m,通过闸阀调节 PE 管流量来控制管内流速,采用圆管水流雷诺数判别流态。

通过量纲分析,得出圆管的水力剪切力

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho v^2$$

(1)

式中 τ_0 ——圆管最大水力剪切力, N/m²
 λ ——沿程阻力系数
 ρ ——水密度,取 1.0 g/cm³
 v ——圆管内平均流速, m/s

通过调节闸阀,设定相应的流量和固定压力,以达到试验设计要求。试验共 10 d,每隔 4 d 停止运行 1 d,每次开机运行 8 h。运行中,测水温,检查流量变化。每隔 2 d 校正一次各 PE 管的流量,每隔 3 d 清洗过滤器。随机取管段样品。

试验在室内进行,水温变化不大,为 (28.0 ± 1.5)℃。PE 管内流速设计及流态判别如表 1 所示,表 2 为生物泳动床水质测量参数。

表 1 PE 管内流速设计及流态判别
Tab.1 Velocity rate and discriminant of velocity in PE pipe

流量 /L·min ⁻¹	管径 /mm	流速 /m·s ⁻¹	τ_0 /N·m ⁻²	雷诺数	流态
0.5	13.8	0.06	0.31	916.16	层流
1	13.8	0.12	0.63	1 833.95	层流
4	13.8	0.45	0.81	7 334.24	紊流
8	13.8	0.90	2.73	14 670.11	紊流
12	13.8	1.34	5.84	22 004.34	紊流
16	13.8	1.78	8.71	29 340.21	紊流

1.2 试验装置设计

试验测试系统 6 套,每套系统采用压力罐(设计压力为 1.0 MPa)稳压供水,配 120 目的网式过滤器,0~0.25 MPa 的压力表,和 5 根 $\phi 16$ mm (内径 13.8 mm) 的 PE 管,在其末端安装闸阀控制流量,图 1 为试验测试系统示意图。

1.3 测试方法

通过测量,比较 SPM9500J3 原子力显微镜(AFM)

表 2 生物泳动床水质测量参数
Tab.2 Parameters of water quality

COD /mg·L ⁻¹	SS /mg·L ⁻¹	NH ₃ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	溶解氧 /mg·L ⁻¹ (26.3℃)
33.00	25.00	0.80	1.00	2.00	7.06	2.18	1.21
pH 值	TSS /mg·L ⁻¹	钙 /mg·L ⁻¹	镁 /mg·L ⁻¹	铁 /mg·L ⁻¹	锰 /mg·L ⁻¹	电离度 /us·cm ⁻¹ (23℃)	
7.31	78.00	65.80	6.93	0.41	0.11	505	

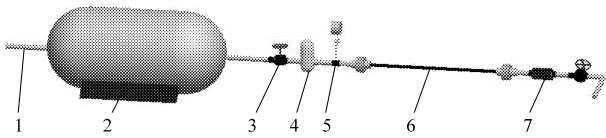


图 1 试验测试系统

Fig.1 Test designing system

1. 接再生水 2. 压力稳压罐 3. 阀门 4. 过滤器 5. 压力表
6. PE 管 7. 水表

和三维白光干涉表面形貌仪(分辨率:480×752,垂直扫描分辨率:最小可到 0.01 nm,校正精度:小于 0.1%)的适用性,以此找到获取清晰、真实的生物膜表面图像的观测方法。发现 AFM 探针生物膜形貌有破坏,图像不清晰,经过多次重复扫描,才能获得清晰图像,但探针已破坏生物膜样品的表面。而三维白光干涉形貌仪采用非接触测量,能获得清晰而无划痕的真实图像,故本试验采用三维白光干涉形貌仪观测生物膜的形貌。

采用 SPIP(V4.4.3 版本)软件处理数据,提取 0.06、0.12、0.45、0.90、1.34、1.78 m/s 的初期生物膜形貌图,其放大倍数为 50 倍,扫描范围 173 μm×128 μm。为使生物膜的表面形貌清晰显现,设定高度放大倍数为水平方向上的横、纵坐标的 2 倍。

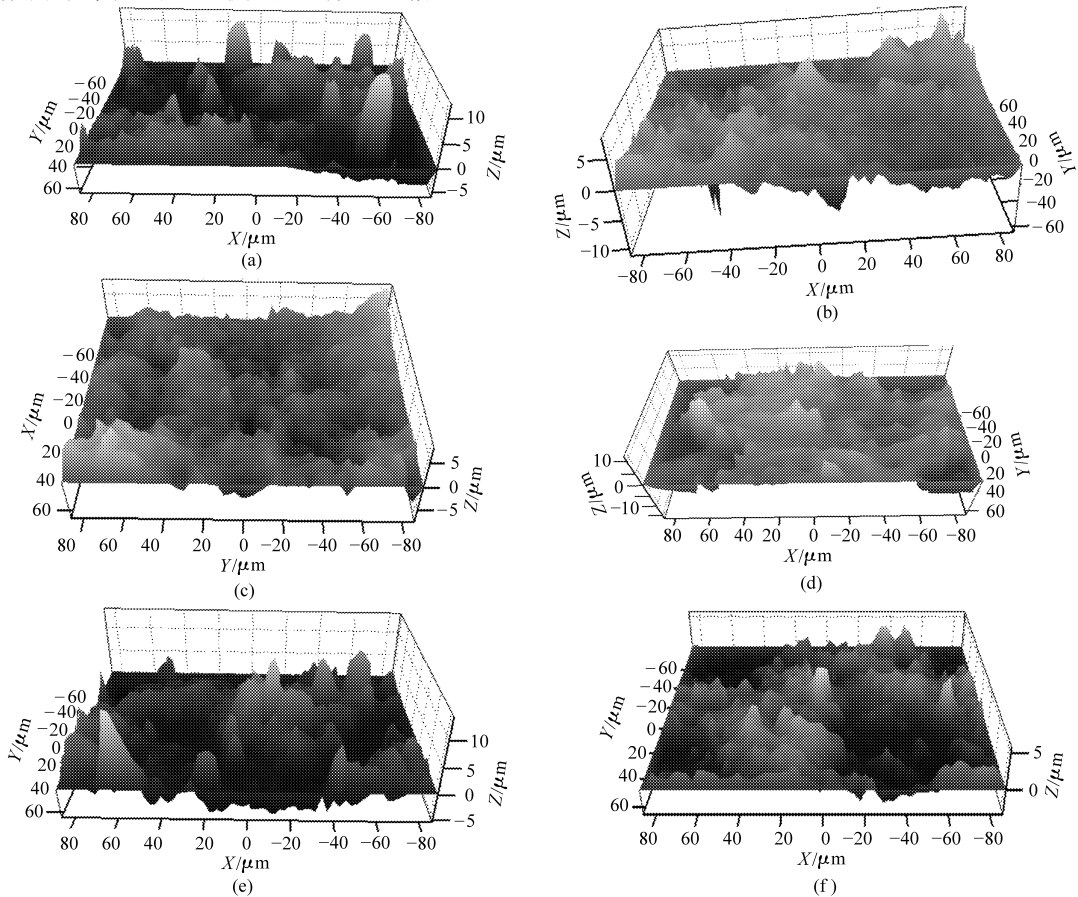


图 2 各流速的初期生物膜表面三维形貌图

Fig.2 3-D topography characteristics of the initial biofilm's surface with FBR

(a) 流速 0.06 m/s (b) 流速 0.12 m/s (c) 流速 0.45 m/s (d) 流速 0.90 m/s (e) 流速 1.34 m/s (f) 流速 1.78 m/s

2 结果与分析

2.1 不同流速下初期生物膜生长形貌特征

图 2 为各流速的初期生物膜表面三维形貌图,从图 2 中能明显看出流速对生物膜表面的影响,即流速越大,表面越平坦。

流速为 0.06 m/s 时生物膜出现局部凸起(图 2a),说明在低流速下,固体颗粒易沉积,易被微生物吸附,或黏附于生物膜表面,但营养物质少,微生物的繁殖来不及覆盖或填充固体颗粒间的空隙。生物膜系统内微生物、粘性物质少,内部的颗粒结构显示明显。

图 2b~图 2d 为流速 0.12、0.45、0.90 m/s 的生物膜结构,可以看出,生物膜结构较紧密,高低起伏不大,独立的凸起部分较少,说明流速增加,固体颗粒物质、微生物团聚体等沉积较少。由于单位时间输送营养物质的增加,使微生物接触的营养物质增加,其繁殖速度提高,能更快地填充生物膜表面的固体颗粒间的空隙。初期生物膜表面存在孔隙,原因可能是生物膜在生长过程中形成富氧(营养)区和贫氧(营养)区,局部微生物死亡或代谢降低,粘附

力较小,固体颗粒物质和微生物团聚体等捕捉少,生物膜的累积少。无论是整体还是局部高度,流速为 0.12 m/s 的生物膜的高度达到 28.62 μm ,可认为在 0.06 ~ 0.45 m/s 间,最有利于生物膜的生长。

图 2e、图 2f 为流速 1.34、1.78 m/s 时的生物膜结构,图中表明生物膜结构很紧密,局部凸起少,但表面的“沟壑”较多,原因可能是生物膜的表面富氧(营养)区和贫氧(营养)区扩大或是水力剪切力的影响。比较流速 0.06 m/s 和 1.78 m/s 的生物膜,发现高度差别显著,流速为 0.06 m/s 的生物膜高度为 18.72 μm ;流速为 1.78 m/s 的生物膜高度仅有 9.06 μm ,说明在高流速下,供应的营养物质比较多,微生物繁殖快,生物膜捕捉的固体颗粒增加,生长速度快;但高速水流的冲刷使生物膜更易脱落。

2.2 不同流速下初期生物膜三维形貌参数

根据三维形貌评价理论(采用三维中面法),分

析不同流速初期生物膜三维形貌特征参数。表 3 为各流速的初期三维形貌参数,从表 3 中的数据可知, S_a (轮廓算数平均偏差)、 S_q (表面形貌的均方根偏差)、 S_y (轮廓最大高差)、 S_z (表面十点高度)、 S_{mean} (轮廓平均高度)、 S_{3A} (轮廓表面面积)、 S_{dr} (液体滞留指数)随流速变化的趋势相似,都是随流速上升;出现一个峰值后,再下降,但总体趋势是下降。而 S_{min} (轮廓最小高度)则在 0.45 m/s 之前急速下降,然后一个短暂的回升,再下降,总体趋势先急速下降,再缓慢下降。综合上述各个参数,发现 0.12 ~ 0.45 m/s 的生物膜表面较粗糙。从表中数据可得到, S_a 、 S_q 、 S_y 、 S_z 、 S_{mean} 、 S_{min} 、 S_{dr} 、 S_{3A} 随流速变化的趋势相似,都是在 0.12 m/s 附近达到最大值,然后随流速降低,其间出现一个小峰值,但总体趋势下降。

S_{3A} 说明表面有突起部分,而固体颗粒物质镶嵌在生物膜表面,这会使 S_{3A} 很大。表面比 S_{dr} 能衡量

表 3 各流速的初期生物膜三维形貌参数
Tab.3 Parameters of initial biofilm's 3-D topography under different velocities

形貌参数	流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$					
	0.06	0.12	0.45	0.90	1.34	1.78
S_a/nm	2 036	2 811	1 516	1 412	1 963	1 153
S_q/nm	2 652	3 838	2 562	1 960	1 907	1 453
S_y/nm	18 725	28 621	19 538	19 397	15 748	9 057
S_z/nm	14 914	22 239	14 150	13 728	15 859	8 124
S_{min}/nm	-6 146	-16 842	-11 204	-7 818	-5 573	-3 320
$S_{\text{mean}}/\text{nm}$	21.00	92.50	-4.54	-37.00	11.90	-3.65
$S_{dr}/\%$	28.60	49.30	32.20	18.00	16.10	9.78
S_{3A}/nm^2	2.85×10^{10}	3.31×10^{10}	2.62×10^{10}	2.57×10^{10}	2.93×10^{10}	2.43×10^{10}

生物膜表面能量随着流速增加, S_{dr} 先增加,然后下降,流速显著影响生物膜表面比。流速 0.12 m/s 附近的生物膜的 S_{dr} 最大,其表面能也最大,与生物膜的 S_{mean} 一致,说明表面能越大,生物膜表面对固体颗粒物质、微生物团体、微生物等的吸附和捕捉作用越强,生物膜易累积。流速低,微生物自由生长,固体颗粒物质、微生物团体在重力作用下沉积,生物膜的 S_{dr} 增大。生物膜具有的表面能大,微生物等易被附着于凸起的颗粒表面,其表面也易吸附各种离子,生物膜表面的微生物能获得营养物质。随流速增加,微生物生长和固体颗粒沉积受影响,生物膜表面呈现出“沟”、“脊”。水力剪切力和摩擦阻力增加,生物膜易脱落,有平坦的趋势。高流速,湍流强度增加,生物膜的营养物质增多,离子等物质易碰撞于生物膜表面,其表面的微生物增长。生物膜为获得更多营养物质,在水力剪切力的影响下,生物膜向表面能增大的方向发展,所以高流速下的生物膜表面的

高低起伏增大。
2.3 初期生物膜平均厚度与流速的关系
流速 0.12 ~ 0.90 m/s 时,生物膜生长快,生物膜厚度较大。生物膜厚度随着流速增加而先急速增加,然后递减,表 4 为初期生物膜平均厚度。

表 4 初期生物膜平均厚度
Tab.4 Average thickness of the initial biofilm

流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.06	0.12	0.45	0.90	1.34	1.78
生物膜厚度/ μm	6.17	16.94	11.2	7.78	5.58	3.32

通过拟合分析,发现生物膜平均厚度的增长符合指数关系递减规律。当流速 $v \rightarrow \infty$ 时,生物膜的厚度为零。图 3 为各流速与生物平均厚度的关系。
生物膜平均厚度先随流速急剧增加,达到一个极值点后,符合指数的变化趋势,逐渐下降,所以其分布函数可以用指数分布函数表为
$$h(v) = 20.718(e^{-1.072v} - e^{-12.185v}) \quad (2)$$

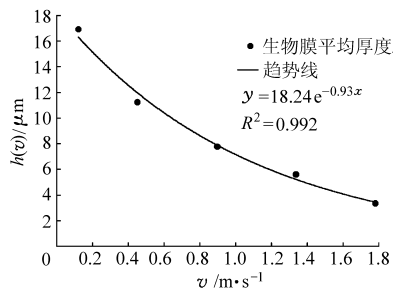


图3 各流速与生物膜平均厚度的关系
Fig.3 Relations of velocity and the average thickness of the initial biofilm

通过非线性回归分析,得: $R^2 = 0.857$,初期生物膜平均厚度变化趋势与拟合结果相似。

令 $h(v)' = 0$,解方程得: $v = 0.2187\text{ m/s}$,即当流速为 0.22 m/s 时,生物膜平均厚度达到最大值 $h_{\text{max}} = 14.95\text{ }\mu\text{m}$,方程的另一种表达式为

$$\frac{h(v)}{h_{\text{max}}} = 1.386(e^{-1.072v} - e^{-12.185v}) = 1.386 \frac{e^{12.185v} - e^{1.072v}}{e^{13.257v}} \quad (3)$$

式(3)更加清晰地说明流速对生物膜的影响,流速增加,水力剪切力逐渐增大,但对生物膜的厚度影响小,但当流速达到一定时,水力剪切力的作用突显。图4为初期生物膜平均厚度的分布与拟合结果图。

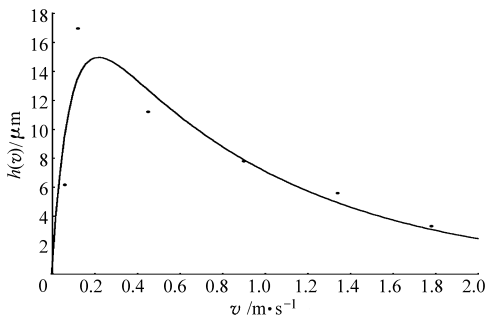


图4 初期生物膜平均厚度的分布与拟合结果
Fig.4 Fitting result and distribution of the average thickness of the initial biofilm

2.4 初期生物膜平均结膜速率

采用 SPIP 软件分析各流速下的初期生物膜的平均厚度,计算出每天生物膜的生长厚度作为平均结膜速率,初期生物膜的平均结膜速率如图5所示。

从图5可知,流速为 0.45 m/s 的生物膜的结膜速率快。高流速下的生物膜不易结膜,说明生物膜

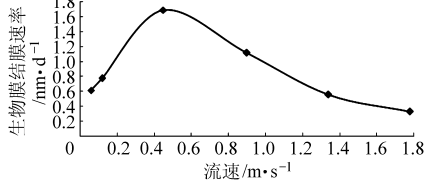


图5 初期生物膜平均结膜速率
Fig.5 Conjunctiva rate of the initial biofilm

结膜与水力剪切力和营养物质有关。

3 讨论

探针式测量易破坏柔软的生物膜表面。其次探针满足了不严重破坏生物膜表面的要求,但水平测量范围较小;而且生物膜高低起伏较大,易超出探针的垂直测量范围,并且探针易卡在缝隙中,导致测量失效。如 AFM 主要用于测量固体材料表面的形貌和力^[14]。有人采用扫描电镜观察含水生物膜的形态^[15~16],但只能获得形态图,不易从中提取准确的形貌数据。三维白光干涉表面形貌仪能实现非接触式的测量,且能获得清晰、真实的三维形貌图和形貌数据。

Ollos 等^[17]认为随着管道流速增加而生物膜内的细菌数量增加;Cloete 等发现管道流速为 $3 \sim 4\text{ m/s}$ 时易使生物膜脱离介质表面^[18];Markku 等研究发现,PE 和铜管内流速为 $0.03 \sim 0.19\text{ m/s}$ 时,随着流速的增加,生物膜生长速率和生物膜内细菌数量呈递增趋势^[19];Chang 等^[20]发现生物膜脱落速率随着湍流度增加而增加。本文通过恒温模拟再生水滴灌试验,发现生物泳动床污水处理工艺条件下再生水滴灌毛管内部初期生物膜平均厚度呈单峰型变化,流速为 0.22 m/s 的生物膜平均厚度达到最大值;生物膜表面呈高低起伏,同时随着流速的增加生物膜表面先粗糙后趋于光滑。这主要是由于低流速,微生物数量和种类较少,粘性分泌物质较少;固体颗粒物质易沉积,且易被微生物粘附于生物膜表面而呈自由生长,生物膜生长主要受营养物质、悬浮颗粒物输移的影响,生物膜厚度较小;微生物受营养供应所限而生长慢、胞外多聚物分泌物少而来不及覆盖或填充固体颗粒间的孔隙,导致生物膜表面粗糙度高,增加了生物膜吸附营养物质、捕获固体颗粒物质的机率。流速增加,微生物数量和种类的增多,单位时间输送的营养物质增加,粘性分泌物增多,生物膜易吸附固体颗粒及微生物团体,生物膜生长快,增加的水力剪切力和湍流度对生物膜脱落影响不大,生物膜厚度较大;生物膜粗糙、疏松、孔隙多,内层微生物能获得较多的营养物质供应,新陈代谢活跃,粘絮状代谢物多,有利于生物膜生长。当流速达到 0.22 m/s 时,可以认为水流输移的营养物质已能满足生物膜生长的需求,生物膜内所有孔隙均会更快地被微生物及其分泌的胞外多聚物分泌所填充,生物膜厚度最大。流速高于 0.22 m/s 时,生物膜内所有孔隙均被填充,生物膜变得光滑、密实;生物膜系统内部微生物的营养物质供应受限,导致微生物死亡或新陈代谢缓慢,粘性分泌物少,生物膜的粘附

力降低,同时随着流速的增加,湍流度高而水力剪切力增加,生物膜更易脱落,此时生物膜的生长主要受管道内水力剪切力控制。

综上所述,流速对管道内生物膜的形貌特征有着深刻的影响,但滴灌系统内部流速的分布极为不均。滴灌系统的流速一般集中在 $0 \sim 2.0 \text{ m/s}$,灌水器的进水口和出水口在 $0.2 \sim 0.8 \text{ m/s}$ 之间,流道的齿角后流速较低,小于 0.2 m/s ^[10~13]。所以灌水器进水口与出水口出的生物膜的生长速度较快;流道齿角后易沉积固体颗粒物质、微生物团体及脱落的生物膜,齿角被填充。高流速不适宜生物膜的生长,所以干管、支管不易附着较厚的生物膜。滴灌毛管内流速从首端到末端不断降低,因而再生水滴灌系统毛管内生物膜极易生长;在毛管 0.22 m/s 附近生物膜生长最快,使毛管内壁变粗糙,水力损失增大,影响灌水器均匀系数。流速大于 0.90 m/s 时,水力剪切力急剧增加,生物膜生长速率下降,生物膜易脱落,所以清洗滴灌系统时,建议流速大于 0.90 m/s ,

同时采用加酸、加氯等化学处理杀死微生物,提高生物膜的脱落率。

4 结论

(1) 通过白光干涉形貌显微镜能获得清晰、真实的生物膜表面三维形貌图。

(2) 低流速区,初期生物膜表面固体颗粒较多,表面粗糙;随着流速增加,生物膜表面固体颗粒减少,相对较光滑,其表面具有方向性。低流速区,固体颗粒物质易沉积,微生物所获得营养物质有限,结膜慢;高流速时固体颗粒物质难沉积,微生物所获得营养物质丰富,结膜快。 $0.12 \sim 0.90 \text{ m/s}$ 流速范围内的生物膜生长速率快,生物膜厚度较大,对灌水器的堵塞影响显著。

(3) 初期生物膜厚度与流速的关系符合指数变化的规律,能用指数方程表示其关系,并在 0.22 m/s 处存在生物膜厚度极大值。

(4) 建议清洗滴灌系统流速不低于 0.90 m/s 。

参 考 文 献

- 1 红卫,陈明洪,陈志和. 环境泥沙的表面特征与模型[M]. 北京:科学出版社,2009.
- 2 李爽,张晓健. 给水管壁生物膜的生长发育及其影响因素[J]. 中国给水与排水,2003,19(13):49~52.
- 3 Charbel M, Samrani A, Mouawad R, et al. Disruption of biofilms from sewage pipes under physical and chemical conditioning [J]. Environmental Sciences, 2009, 21(1):120~126.
- 4 Barton A F, Wallis M R, Sargison J E, et al. Hydraulic roughness of biofouled pipes, biofilm character, and measured improvements from cleaning[J]. Hydraulic Engineering, 2008, 134(6):852~857.
- 5 Netuschil L, Reich E, Unteregger G, et al. A pilot study of confocal laser scanning microscopy for the assessment of undisturbed dental plaque vitality and topography[J]. Archives of Oral Biology, 1998, 43(4):277~285.
- 6 Bakke R, Kommedal R, Kalvenes S. Quantification of biofilm accumulation by an optical approach [J]. Journal of Microbiological Methods, 2001, 44(1):13~26.
- 7 Lauvvik T, Bakke R. Biofilm thickness measurements by variance analysis of optical images[J]. Microbiological Methods, 1994, 20(3):219~224.
- 8 苑维双,李进,张飒,等. 原子力显微镜在微生物腐蚀研究中的应用[J]. 表面技术, 2007, 36(6):30~32, 35.
Yuan Weishuang, Li Jin, Zhang Sa, et al. Applications of atomic force microscopy to microbiologically induced corrosion[J]. Surface Technology, 2007, 36(6):30~32, 35. (in Chinese)
- 9 Richter A, Smith R, Ries R. Growth and morphology of biological thin films[J]. Applied Surface Science, 1999, 144~145:419~424.
- 10 Wei Q S, Shi Y S, Dong W C, et al. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1~2):130~136.
- 11 Zhang J, Zhao W H, Wei Z Y, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2):120~129.
- 12 Li Y K, Yang P L, Xu T W, et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter[J]. Irrigation Science, 2008, 26(5):427~438.
- 13 李云开,杨培岭,任树梅,等. 圆柱型灌水器迷宫式流道内部流体流动分析与数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2005, 20(6):736~743.
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Analyzing and modeling flow regime in labyrinth path drip irrigation column emitter with CFD[J]. Hydrodynamics A, 2005, 20(6):736~743. (in Chinese)

- Irrigation Machinery, 2006,24(5):1~7. (in Chinese)
- 2 施卫东,张启华,陆伟刚,等. 新型深井离心泵叶轮内部流动的研究[J]. 流体机械,2008,36(5):21~24.
Shi Weidong, Zhang Qihua, Lu Weigang, et al. Flow calculation of new-type deep well pump[J]. Fluid Machinery,2008,36(5):21~24. (in Chinese)
- 3 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- 4 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1998:193~202.
- 5 何有世,袁寿其,郭晓梅,等. 分流叶片离心泵叶轮内变工况三维数值分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2005,26(3):193~197.
He Youshi, Yuan Shouqi, Guo Xiaomei, et al. Numerical simulation for inner flow of impeller with splitting vanes of centrifugal pump under different operating condition[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,2005,26(3):193~197. (in Chinese)
- 6 李龙,王泽,徐峰,等. 离心泵叶轮内变工况三维湍流数值模拟[J]. 农业机械学报,2004,35(6):72~73.
Li Long, Wang Ze, Xu Feng, et al. Simulation of 3-D turbulent flow inside centrifugal pump impellers at varying conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(6):72~73. (in Chinese)
- 7 Zhou Weidong, Zhao Zhimei, Lee T S, et al. Investigation of flow through centrifugal pump impellers using computational fluid dynamics[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2003,9(1):49~61.
- 8 龙志军,裴毅,杨晓珍,等. 离心泵叶轮内部湍流流场的数值模拟[J]. 排灌机械, 2005,23(2):8~10.
Long Zhijun, Pei Yi, Yang Xiaozhen, et al. Numerical simulation of turbulent flow inside impeller of centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005,23(2):8~10. (in Chinese)
-

(上接第 41 页)

- 14 陈光章,林晶,阎永贵,等. AFM 技术在微生物腐蚀研究中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术,2006,18(6):426~428.
Chen Guangzhang, Lin Jing, Yan Yonggui, et al. Application of atomic force microscope in study of microbiologically influenced corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology,2006,18(6):426~428. (in Chinese)
- 15 祝明,赵燕,王守伟,等. 生物渗滤床内生物膜形态及微生物种群构成研究[J]. 河北化工,2008,31(2):13~17.
Zhu Ming, Zhao Yan, Wang Shouwei, et al. Research on characters of biofilm and its microorganism community in biological filter bed[J]. Hebei Chemical Engineering and Industry,2008,31(2):13~17. (in Chinese)
- 16 Emmanouela R, Pavlina K, Catherine J, et al. Characterization, morphology and composition of biofilm and precipitates from a sulphate-reducing fixed-bed reactor[J]. Journal of Hazardous Materials,2008,153(1~2):514~524.
- 17 Ollos P J. Effects of drinking water biodegradability and disinfectant residual on bacterial regrowth[D]. Ontario Canada: University of Waterloo,1998.
- 18 Cloete T E, Westaard D, Van S J. Dynamic response of biofilm to pipe surface and fluid velocity[J]. Water Science Technology,2003,47(5):57~59.
- 19 Markku J L, Michaela L, Ilkka T, et al. The effects of changing water flow velocity on the formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes[J]. Water Research,2006,40(11):2151~2160.
- 20 Chang H T, Rittmann B E, Amar D R, et al. Biofilm detachment mechanisms in a liquid fluidized bed[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1991,38(5):499~506.