

再生水滴灌毛管内颗粒-管壁碰撞特性研究*

李云开 王伟楠 孙昊苏

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 利用三维白光干涉形貌仪对滴灌系统中光滑毛管管壁、未使用过的毛管管壁、附生生物膜的毛管管壁3种壁面进行表面形貌测试,在此基础上借助相位多普勒粒子分析仪研究了3种壁面条件下,3种粒径颗粒与壁面碰撞规律。结果表明:生物膜管壁的比表面积(212%)显著高于毛管管壁(4.37%)及光滑管壁(0.196%);细颗粒(粒径为10 μm)与光滑管壁碰撞的平均速度低于生物膜管壁,且表现出光滑管壁、毛管管壁、生物膜管壁速度概率分布逐渐变宽的趋势,而中(粒径为50 μm)、粗(粒径为100 μm)两种颗粒物平均速度接近于零,概率密度分布未出现明显变宽趋势,说明附生生物膜对粒径高于50 μm的颗粒物运移影响不显著。

关键词: 再生水 滴灌 毛管 碰撞特性 颗粒物 生物膜

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0159-08

Particle – Wall Collision Characteristics Influenced by Biofilms in Drip Irrigation Laterals with Reclaimed Water

Li Yunkai Wang Weinan Sun Haosu

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The Phase Shift Micro XAM – 3D was used to measure the roughness of smooth wall, new lateral wall and lateral wall attached by biofilm. The phase-Doppler particle anemometer was used to measure the particle movement with the effect of different walls. The study used three different particle sizes: 10 μm, 50 μm, 100 μm under three different walls. The results showed that the surface area of biological lateral wall (212%) was significantly higher than that of new lateral wall (4.37%) and smooth wall (0.196%). The velocity of small particles (particle size of 10 μm) collided with smooth wall was lower than that collided with the biofilm lateral wall. The velocity distribution of smooth wall, new lateral wall and biofilm lateral wall tended to be gradually wider and wider. While the average velocities of middle particles (50 μm) and big particles (100 μm) are closed to zero and didn't widen. The reason is that the biofilm enhanced the surface adsorption capacity which reduced the number of small particles. The result proved that the effect of biofilm on big particles was not significant.

Key words: Reclaimed water Drip irrigation Capillary tube Collision characteristics Particles Biofilm

引言

污水处理再生后回用灌溉是缓解全球性水资源紧缺问题的有效途径之一,滴灌因其对灌溉水的可控性而被认为是再生水灌溉最为有效和可靠的灌溉

方式,但因再生水中水质复杂,水中含有大量的悬浮固体微粒、盐分离子、有机质、微生物菌群等物质^[1-2],使得再生水滴灌系统堵塞过程、机理变得更为复杂,发生堵塞的风险也大大增加^[3]。

在自然环境条件下细菌等微生物几乎存在于

收稿日期: 2015-01-06 修回日期: 2015-02-09

* 国家自然科学基金资助项目(51179190)和公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201401078)

作者简介: 李云开,教授,博士生导师,主要从事滴灌灌水器设计及堵塞机理与控制研究,E-mail: liyunkai@126.com

所有暴露于水中的固体表面^[4],也就是说微生物也会在滴灌系统管道壁面附着。再生水中营养物质相对丰富,水中的微生物会附着介质表面生长、繁殖,颗粒物、微生物及其分泌的粘性胞外聚合物共同组成了一种结构稳定的生物膜物质,现已有对滴灌系统毛管内部附生生物膜特征的探索性研究报道^[5]。水源中悬浮颗粒物的存在是导致灌水器堵塞的直接因素^[3,6-7],毛管内悬浮颗粒物的输移特性对灌水器堵塞发生及其在毛管中的分布特性有着重要影响。由于生物膜在管壁附着,很大程度上改变了壁面特征,这将使悬浮颗粒与壁面间的碰撞过程及作用机制发生显著变化,进而影响悬浮颗粒物在灌溉系统中的输移过程。近年来,有学者利用概率密度函数方法和直接积分方法对颗粒-壁面碰撞模型进行研究,概率密度函数方法可以提供壁面附近颗粒相的速度分布,Elghobashi 等^[8-9]更认为该方法是唯一合理模拟边界条件的方法。但总体而言,目前国内外对于颗粒-壁面碰撞的研究往往简化了颗粒相边界条件,例如:设壁面处颗粒法向速度为零,浓度、切向速度和雷诺应力的法向梯度为零等,考虑壁面粗糙度的颗粒-壁面碰撞试验与模拟模型研究极少报道^[10-11]。对于再生水滴灌系统而言,颗粒的尺寸与生物膜表面粗糙度大致为同一个数量级,这时如果把壁面当作光滑表面,则随着碰撞次数的增加,颗粒的法向速度逐渐减小,最终会趋于零,这与实际情况不符,因此必须考虑生物膜表面粗糙度和粘性力的影响,以正确反映各变量在各方向上的重新分配。因此,需借助相位多普勒粒子分析仪(PDPA)、现代粒子跟踪测速(PTV)等现代流动测试技术研究颗粒-生物膜表面碰撞动力学过程。

基于此,在对生物膜管壁、无生物膜毛管管壁以及光滑亚克力材质管壁 3 种壁面形貌特性进行测试的基础上,采用先进的相位多普勒粒子分析仪进行生物膜影响下的壁面碰撞试验,分析毛管附生生物膜的存在对颗粒-壁面碰撞后颗粒物运动平均速度、脉动速度以及速度概率密度分布的影响,旨在为研究生物膜影响下颗粒物在再生水滴灌毛管内部输移、沉积过程提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验设计

本试验主要考虑 3 种壁面:一是附有生物膜的滴灌毛管壁面,是进行再生水滴灌 405 d 后的毛管壁面,简称生物膜管壁(BLW);二是从未用过的毛

管管壁,简称毛管管壁(NLW);三是亚克力平板管壁,简称光滑管壁(SW)。颗粒物选择荧光颗粒,材料为聚苯乙烯,密度约为 1 050 kg/m³,密度与水接近,在水流扰动作用下能够完全离底悬浮,其平均粒径分别是 10 μm、50 μm 和 100 μm。在试验前,首先在供水平台中加入适量的示踪粒子,并与水进行充分的搅拌混合。经过预备试验研究发现,10 μm 颗粒测试的适宜体积分数为 1%,50 μm 和 100 μm 颗粒测试的适宜体积分数为 4%。

1.2 壁面形貌测试

利用三维白光干涉形貌仪(Phase Shift Micro XAM-3D)对 3 个壁面形貌特征进行测试。三维白光干涉形貌仪性能参数如表 1 所示。

表 1 三维白光干涉形貌仪主要参数
Tab.1 Main parameters of Phase Shift Micro XAM-3D

参数	数值
分辨率/(像素×像素)	752×480
X、Y、Z 行程/(mm×mm×mm)	100×100×100
RMS 重复精度/nm	1
垂直扫描范围/μm	30,100,5 000,10 000
垂直扫描分辨率/nm	最小可到 0.01
数据采集速度/(μm·s ⁻¹)	2.1(标准型)
侧向分辨率/μm	0.11~8.8
视场范围/(mm×mm)	0.084×0.063~8×10
校正精度/%	≤0.1
反射率/%	1~100

采集的图像利用 SPIP (Scanning probe image processor) 软件进行分析,分析测试段平均粗糙度 S_q 、峰值高度 S_y 、比表面积 S_{dr} 3 个参数。 S_q 和 S_y 反映了生物膜表面的粗糙度情况, S_{dr} 主要衡量生物膜表面能量,值越大说明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。具体计算方法如下:

(1) 平均粗糙度 S_q

平均粗糙度指轮廓偏距平均高度的均方根,即

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} (z(x_k, y_l) - \mu)^2}$$

其中
$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l)$$

式中 M ——采样区域内横向的单元序号
 N ——采样区域内纵向的单元序号
 x_k ——采样区域内横向的第 k 个单元
 y_l ——采样区域内纵向的第 l 个单元
 $z(x_k, y_l)$ ——采样区域内横向的第 k 个单元和纵向的第 l 个单元所对应点的高度
 μ ——平均高度

(2) 峰值高度 S_y

$$S_y = z_{\max} - z_{\min} \tag{3}$$

式中 $z_{\max}$ ——采样区域内的最高点处高度
 $z_{\min}$ ——采样区域内的最低点处高度

(3) 比表面积 S_{dr}

比表面积为表面展开面与投影面的面积比率，

计算式为

$$S_{dr} = \frac{\sum_{k=0}^{M-2} \sum_{l=0}^{N-2} A_{kl} - (M-1)(N-1)\delta_x\delta_y}{(M-1)(N-1)\delta_x\delta_y} \times 100\% \tag{4}$$



(a)

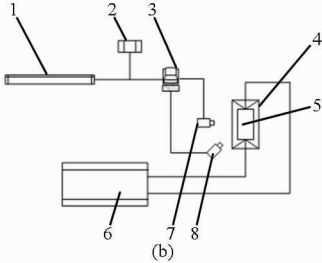
其中 $A_{kl} = \frac{1}{4} \left[\sqrt{\delta_x^2 + (z(x_k, y_l) - z(x_k, y_{l+1}))^2} + \sqrt{\delta_y^2 + (z(x_{k+1}, y_l) - z(x_{k+1}, y_{l+1}))^2} \right]$

$$\tag{5}$$

式中 δ_x —— x 方向像素点的间距
 δ_y —— y 方向像素点的间距

1.3 颗粒-壁面碰撞试验系统

本试验在清华大学热能工程实验室进行，试验装置布置图如图 1 所示，主要包括以下部分：PDPA 测试系统、供水平台、试验模型、支撑平台。



(b)

图 1 试验系统布置图

Fig. 1 Layout of test system

(a) 实物图 (b) 结构图

1. 激光器 2. 同步控制器 3. 计算机 4. 支撑平台 5. 测试模型 6. 供水平台 7、8. 发射镜头

1.3.1 PDPA 设备

采用丹麦丹迪公司的 58N50 型 PDPA 系统进行测试，光学参数如表 2 所示，其光路为后向散射布置，为使采集到的数据与实际相符合，试验前移动镜头支架对测试段进行光路对准，确认 4 束光汇集于测试段区域，光路对准无误后准备测试。

表 2 PDPA 光学参数
Tab. 2 Optical parameters of PDPA

参数	后向散射光路	发射镜头接收光路
发射镜头焦距/mm	500	1 000
接收镜头焦距/mm	500	
两束激光间距/mm	38	38
绿光波长/nm	514	514. 5
蓝光波长/nm		488
光腰直径/mm	1. 35	1. 35
绿光条纹间距/ μm	6. 77	13. 54
蓝光条纹间距/ μm		12. 84
绿光测量体长度/mm	6. 39	25. 54
蓝光测量体长度/mm		24. 23
绿光测量体直径/mm	0. 24	0. 48
蓝光测量体直径/mm		0. 46
有效散射角/ $^\circ$	143	143
最大检测浓度/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	60 000	
最大检测粒径/ μm	417. 2	

1.3.2 模型情况

本试验使用后台阶模型，台阶绕流是一种基本的流体力学绕流模型，流体通过台阶时会发生流动分

离，在台阶角部形成旋涡，流体绕过旋涡重新与壁面接触，然后继续沿壁面流动，滴灌灌水器中，流道内大量存在几何形状急剧变化区域，与台阶绕流现象较为近似，因此将后台阶模型作为简化几何模型进行研究。模型长 200 mm、宽 100 mm、高 70 mm，采用亚克力材料制作，四面透明，密封性良好，模型内部设置 20 mm 高台阶一个，台阶下位于后台阶中部设置一个 50 mm×40 mm 的测试段，测试的时候截取测试段大小的壁面，用胶水粘结后待用。模型具体如图 2 所示。在模型拍摄区域沿模型侧壁面由外向内依次取 11 个拍摄点位，每个点位相距 2 mm，最后一个拍摄点位位于模型测试段中心(图 2d)，分别测试 3 种处理在 3 种粒子条件下拍摄点位处粒子法向速度分布情况。设置取样点 2 000 个，测量时限 2 min。

1.3.3 PDPA 测速原理及参数分析方法

PDPA 是根据运动粒子的光散射效应来进行测量的。当激光照射到颗粒上时，发生多普勒效应，散射光发生频移，检测到这个频移就可以测量颗粒的速度，计算式为^[12-13]

$$f_d = \frac{|v_{px}|}{d_f} = \frac{2\sin \frac{\theta}{2}}{\lambda} |v_{px}| \tag{6}$$

式中 f_d ——多普勒频移 λ ——激光波长
 v_{px} ——颗粒穿过控制体中明暗相间干涉条纹时的速度
 θ ——干涉角

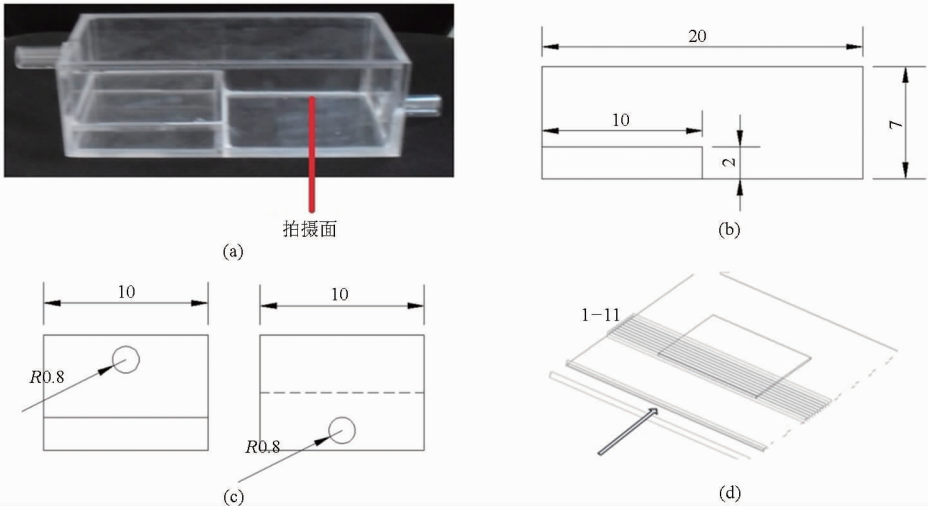


图 2 试验模型

Fig. 2 Experimental model

(a) 实物图 (b) 横截面 (c) 进出水口 (d) 测试部位

研究颗粒运动最基本的工作是描述其运动方程。颗粒在紊流中的运动方程形式上可以表示为^[14-16]

$$du_p/dt = F(u_p(t), u_f(x(t), t)) \quad (7)$$

式中 u_p ——颗粒速度 u_f ——流体速度

$x(t)$ ——颗粒位移

F ——作用在颗粒单位质量上的力

从形式上看,若已知紊流速度场 u_f 的统计特征和颗粒的受力状况 F ,就可以得到颗粒运动的解。然而,由于颗粒粒径大小不一、物理化学性质不同、形状千差万别以及壁面的不平滑,导致单颗粒在紊流中的运动是一个看似简单实际上非常复杂的问题,因此对颗粒运动的随机性进行统计分析,在理论推导泥沙运动规律及指导实际中具有重要的意义^[15]。

2 结果与分析

2.1 附生生物膜对毛管管壁三维形貌的影响

利用三维白光干涉形貌仪对光滑管壁、毛管管壁、生物膜管壁 3 个壁面的表面进行测试,结果如

图 3 所示。从图中可以看出:3 种介质表面均呈高低起伏的山丘分布状,均存在突起;光滑壁面较为平整,表面突起较少,粗糙度较小;毛管管壁表面则存在一定数量的突起和凹坑,高度差异较大;而生物膜管壁表面存在大量的突起。利用 SPIP 软件对形貌特征指标进行分析,结果为:3 个壁面的平均粗糙度 S_q 分别为 127、3 599、3 608 nm,峰值高度 S_y 分别为 4 893、37 986、36 011 nm,比表面积 S_{dr} 分别为 0.196%、4.37%、212%,这说明毛管管壁和生物膜管壁表面粗糙度、峰值高度差异较小,显著高于光滑壁面(相差一个数量级);而对于比表面积而言,生物膜管壁要显著高于毛管管壁,毛管管壁又高于光滑壁面,三者间存在数量级的差异,这说明生物膜壁面较其他两者具有更大的粘附力。

2.2 管壁附生生物膜对颗粒-壁面碰撞后平均速度和脉动速度的影响

对每组工况 6、7、8、9、10、11 共 6 个测试点位(图 2d)测试的 2 000 样本点取速度的平均值与脉动速度平均值,结果如图 4、5 所示。粗颗粒与细颗粒在平均速度和脉动速度方面表现出明显的差别,

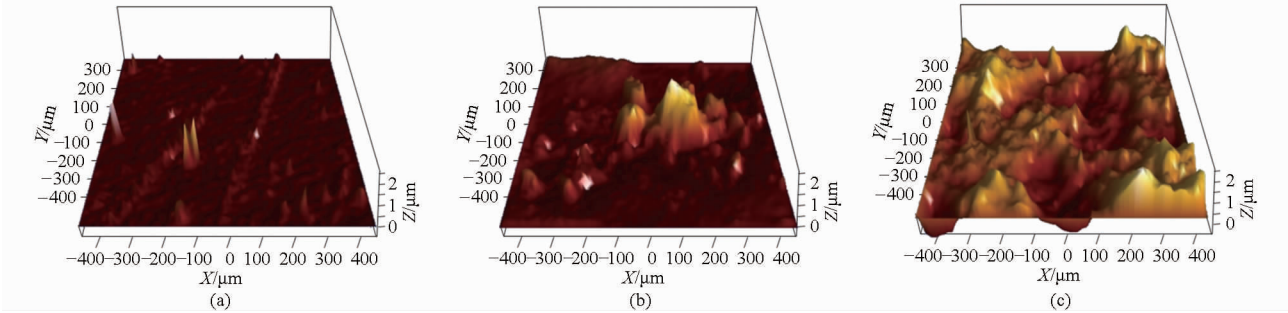


图 3 壁面三维表面形貌

Fig. 3 3D surface topography of wall

(a) 光滑管壁 (b) 毛管管壁 (c) 生物膜管壁

从图4中可以看出：50 μm 和 100 μm 的大颗粒与壁面碰撞后平均速度反向，50 μm 颗粒在光滑壁面中反向速度略大，在毛管管壁和生物膜管壁中较小，100 μm 颗粒在光滑壁面中反向速度略小，在毛管管壁和生物膜管壁中较大。但总体而言，50 μm 颗粒和 100 μm 颗粒在与3种壁面碰撞后平均速度均非常小，接近于零，这说明反弹前后正向和反向颗粒的数量接近，速度略有变化但正反向速度相差不大，大颗粒并未因碰撞而发生明显分散，也未因粗糙度等参数的变化而改变碰撞特性。10 μm 颗粒表现出了较大的正向平均速度，这主要是由于颗粒和壁面碰撞后更加分散，部分颗粒碰撞后产生了滑移现象，而后由于10 μm 颗粒跟水性较好，颗粒又随水相运动，反弹的颗粒数量减少所致。10 μm 颗粒与光滑壁面碰撞后的平均速度要显著低于毛管管壁和生物膜管壁，这主要受壁面粗糙度的影响，因为光滑壁面碰撞反弹的颗粒数量较多，粗糙度的增大会使得颗粒发散程度增加，减少10 μm 颗粒的反弹数量；而颗粒与生物膜管壁碰撞后其平均速度要高于毛管壁面，这主要是由于生物膜比表面积大，增强了壁面吸力，进一步减少了反弹颗粒数量。

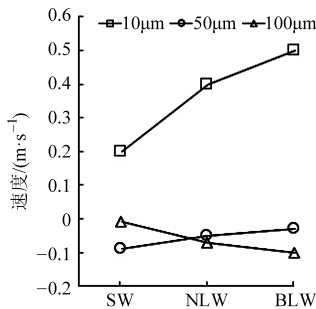


图4 颗粒平均速度
Fig.4 Average velocity of particles

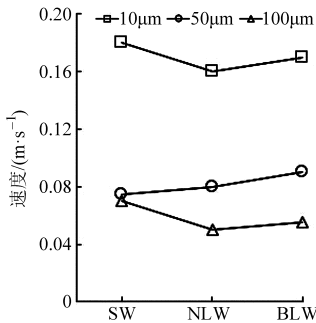


图5 颗粒脉动速度
Fig.5 Fluctuation velocity of particle

由图5中可以看出，随着颗粒粒径的增大，脉动速度减小，说明细颗粒受脉动作用影响较强，而大颗粒脉动较弱，脉动速度变化较小；相同粒径颗粒在不同粗糙度壁面下脉动速度变化不大，50 μm 颗粒在3种处理中脉动速度最为接近，说明粗糙度改变对

50 μm 颗粒脉动速度影响较小，因而50 μm 颗粒可在CFD两相流模拟中较多应用，以排除脉动速度变化的影响。

2.3 管壁附生物膜对颗粒-壁面碰撞后速度概率密度分布的影响

分别取6、8、9共3个测试点位(图2d)处颗粒-壁面碰撞后速度的概率密度分布进行分析，结果如图6~8所示。从中可以看出：与3种壁面碰撞后，颗粒法向速度分布均呈现单峰二次抛物线分布，而且表现出光滑壁面、毛管管壁、生物膜管壁速度概率密度分布均变宽的变化趋势。对于10 μm 粒径，这种变化趋势更加明显，光滑壁面与毛管管壁速度分布区间为0~1 m/s，而生物膜管壁速度分布区间变为-1~2 m/s，速度分布明显变宽，这主要是由于生物膜附着引起了表面能量的变化，表面能量增强，加强了生物膜对水流中细颗粒和营养物质的吸附，颗粒在碰撞过程中受到粗糙角的影响，改变反弹方向，由于生物膜表面吸力的增加，使得细颗粒反弹的速度降低，并在各方向上的重新分配，使得速度概率密度分布变宽。而50、100 μm 粒径的颗粒速度概率密度分布均在-1~1 m/s之间，未出现明显变宽趋势，这是由于颗粒粒径较大，毛管管壁和生物膜管壁形貌也不足以显著影响大颗粒运动，颗粒在碰撞后自身有一定惯性作用，会随着水流和自身惯性进行调整，不至出现运动紊乱状态。

3 讨论

再生水中含有丰富的有机物、金属离子、固体颗粒、悬浮的淤泥和细菌等微生物，而生物膜生长所需的营养物质、微生物和固体颗粒等均能通过过滤器进入到滴灌系统，这为滴灌系统内生物膜的生长提供了机会。附生物膜的存在是诱发再生水滴灌系统灌水器堵塞的关键因素，生物膜组分中固体颗粒物、磷脂脂肪酸以及胞外聚合物含量之间存在极显著的相关关系^[17]。国内外众多学者对于灌水器内部附生物膜形成特性、影响因素及其对灌水器堵塞的影响等开展了大量的研究^[18]，在一定程度上揭示了灌水器生物堵塞的诱发机制。

实际上，滴灌系统毛管内壁附生物膜形成后，也会在毛管内水流剪切力的作用条件下产生脱落，脱落后形成的新颗粒物会随水流进入到下游的灌水器内部，而可能会在流道内水流剪切力低的部位（主要为流道进口、出口）沉积，导致滴头流道的尺寸不断变小而最终被堵塞，这是产生灌水器生物堵塞的另外一个重要过程。本研究发现，毛管内壁附生物膜后会显著改变毛管壁面特性，使得管壁粗

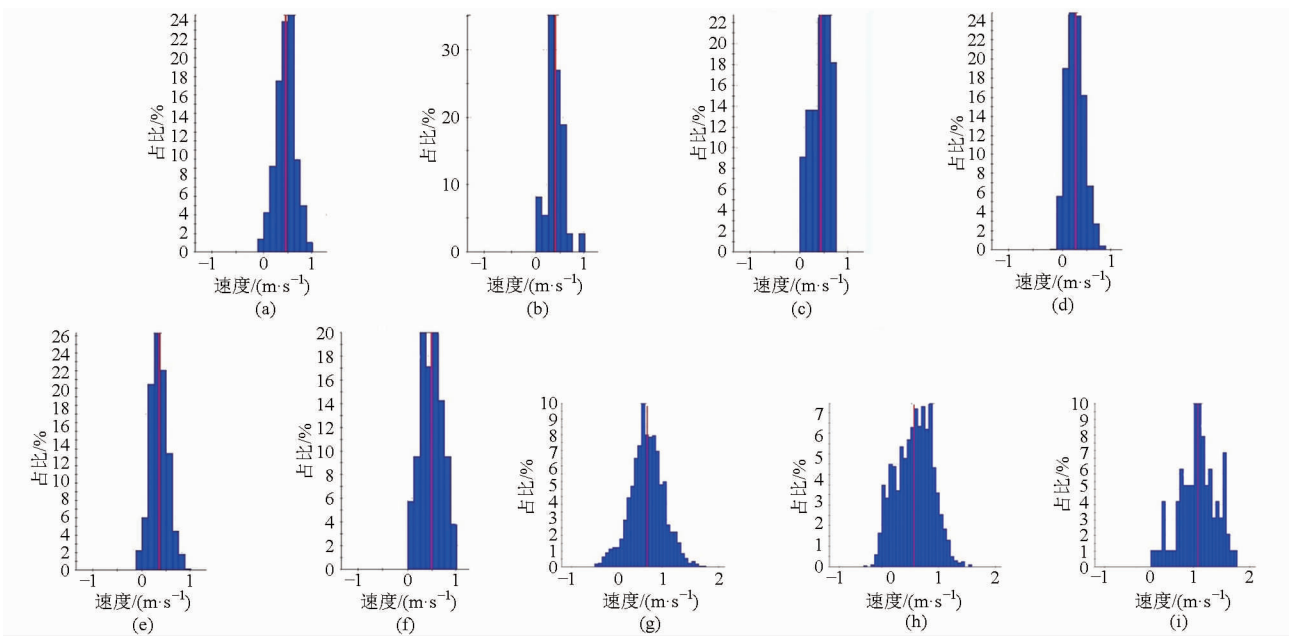


图 6 10 μm 颗粒壁面附近法向速度概率密度分布

Fig. 6 Probability density distribution of normal velocity near the wall of 10 μm

(a) SW,位置6 (b) SW,位置8 (c) SW,位置9 (d) NLW,位置6 (e) NLW,位置8
(f) NLW,位置9 (g) BLW,位置6 (h) BLW,位置8 (i) BLW,位置9

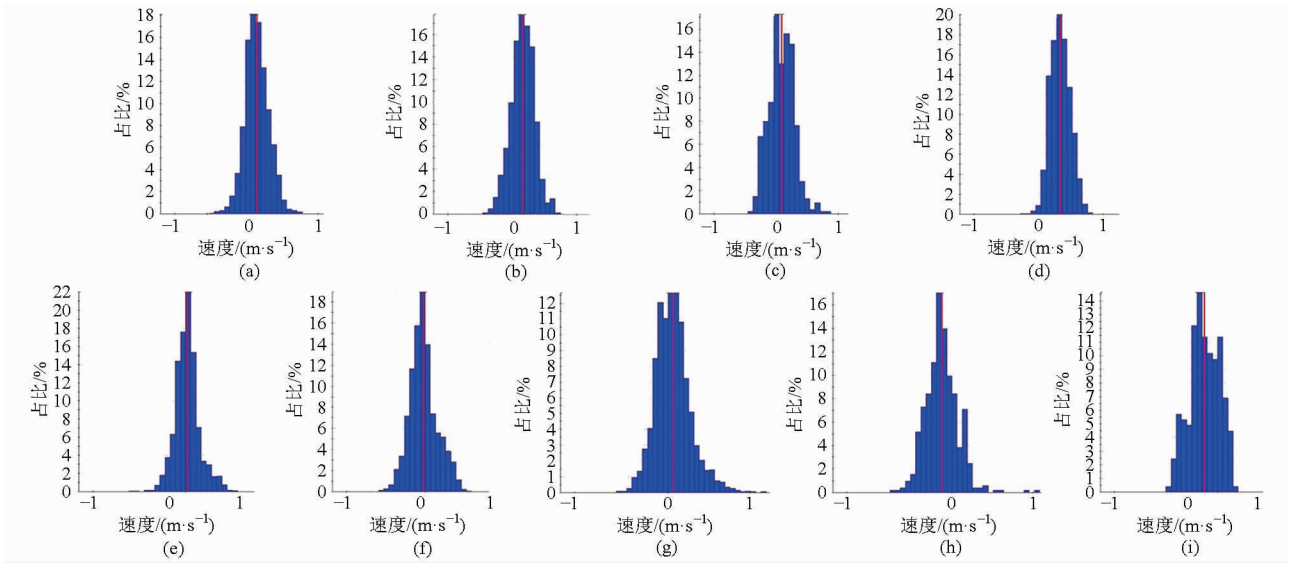


图 7 50 μm 颗粒壁面附近法向速度概率密度分布

Fig. 7 Probability density distribution of normal velocity near the wall of 50 μm

(a) SW,位置6 (b) SW,位置8 (c) SW,位置9 (d) NLW,位置6 (e) NLW,位置8
(f) NLW,位置9 (g) BLW,位置6 (h) BLW,位置8 (i) BLW,位置9

糙度、比表面积以及壁面对颗粒物的吸附力显著增加,进而使得细颗粒反弹数量和平均速度大幅降低、速度也更加分散,但对于粒径大于 50 μm 以上颗粒与管壁的碰撞特性影响较小。也就是说,以往很少关注而数量巨大的细小颗粒物会更加容易吸附到生物膜表面,进而加速了生物膜的形成,并且使得生物膜中颗粒物较细,但这也会使得脱落的生物膜颗粒较细,也更加容易进入到灌水器内部而使堵塞风险大幅增加。

4 结论

(1) 通过对表面形貌的测试,发现毛管管壁和生物膜管壁表面粗糙度分别为 3 599、3 608 nm,差异较小,显著高于光滑壁面粗糙度 127 nm。对比表面积而言,生物膜管比表面积为 212%,显著高于毛管管壁的 4.37%,毛管管壁又高于光滑壁面的 0.196%,说明毛管壁面生物膜的存在增强了壁面吸力,壁面具有更大的粘附力。

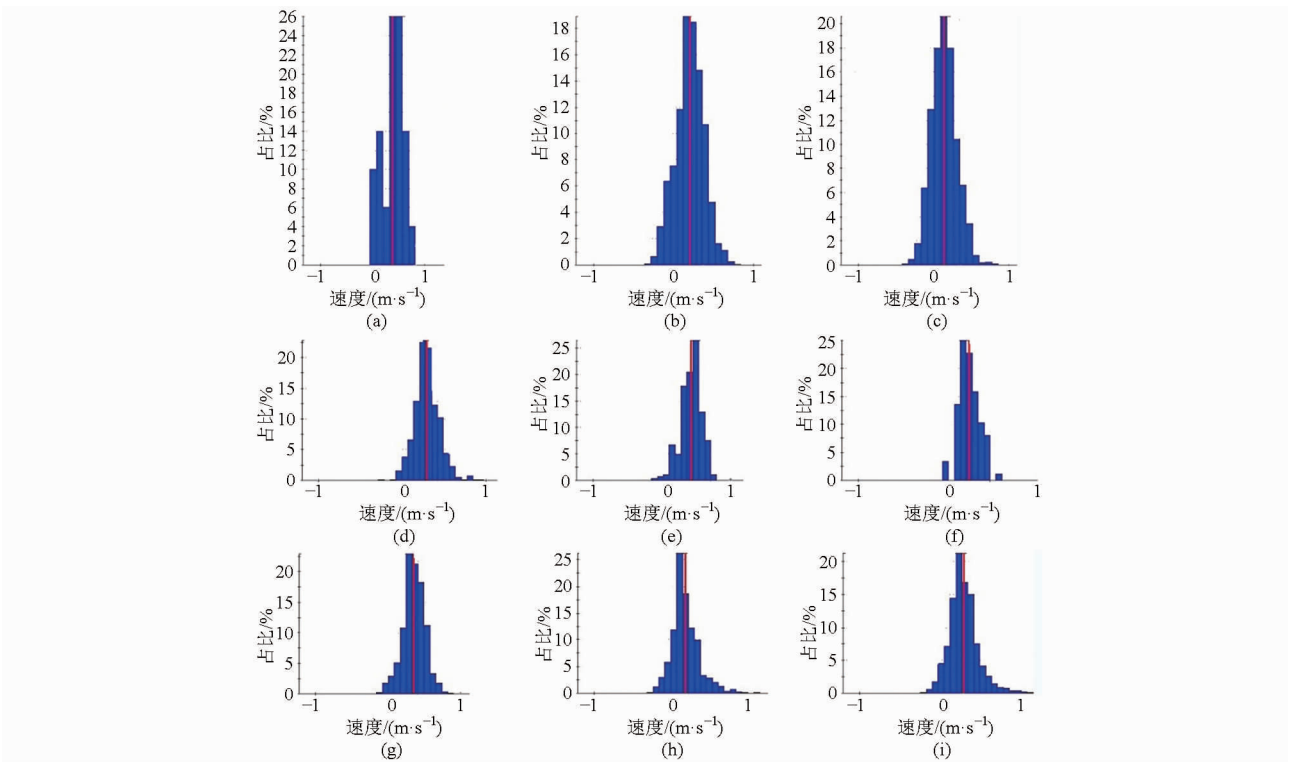


图8 100 μm 颗粒壁面附近法向速度概率密度分布

Fig.8 Probability density distribution of normal velocity near the wall of 100 μm

(a) SW,位置6 (b) SW,位置8 (c) SW,位置9 (d) NLW,位置6 (e) NLW,位置8

(f) NLW,位置9 (g) BLW,位置6 (h) BLW,位置8 (i) BLW,位置9

(2) 对颗粒平均速度和脉动速度的测试发现,颗粒与光滑壁面碰撞的平均速度低于生物膜管壁,10 μm 颗粒最为明显,特别是与生物膜管壁碰撞后表现出较大的平均速度,而50 μm 及100 μm 与壁面碰撞后平均速度很小,接近于零,细颗粒受脉动作用影响较强,大颗粒脉动速度变化较小。说明生物膜壁面的粘附力使得细颗粒与之碰撞后反弹数量减小,而大颗粒具有较大惯性,会随水流和自身惯性进行调整,正向和反向颗粒数量接近。

(3) 10 μm 颗粒明显表现出在光滑壁面、毛管管壁、生物膜管壁作用下速度概率分布逐渐变宽的趋势,由0 ~ 1 m/s 变为 - 1 ~ 2 m/s,而50 μm 、100 μm 两种粒径颗粒物概率密度分布均在 - 1 ~ 1 m/s之间,未出现明显变宽趋势。说明壁面形貌使得细颗粒与壁面碰撞后速度在各方向上平均分配,碰撞后速度更为分散,而大颗粒粒径较大,壁面形貌不足以显著影响大颗粒运动。

参 考 文 献

- 1 Dasberg S, Or D. Drip irrigation [M]. Berlin: Springer, 1999.
- 2 Schischa A, Ravina I, Sagi G, et al. Drip irrigation with reclaimed effluent the clogging problem[J]. International Water & Irrigation Review, 1997, 17(3): 8 - 12.
- 3 Li Yunkai, Liu Yaoze, Li Guibing, et al. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters[J]. Irrigation Science, 2012, 30(1): 43 - 56.
- 4 Bishop P L. The role of biofilms in water reclamation and reuse[J]. Water Science and Technology, 2007, 55(1 - 2): 19 - 26.
- 5 Li G B, Li Y K, Xu T W, et al. Effects of average velocity on the growth and surface topography of biofilms attached to the reclaimed wastewater drip irrigation system laterals[J]. Irrigation Science, 2012, 30(2): 103 - 113.
- 6 Adin A, Sacks M. Dripper clogging factor in wastewater irrigation[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(6): 813 - 826.
- 7 Ravina I, Paz E, Sofer Z, et al. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater[J]. Irrigation Science, 1992, 13(3): 129 - 139.
- 8 Elghobashi S, Truesdell G C. On the two-way interaction between homogeneous turbulence and dispersed solid particles. I: turbulence modification[J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989—1993), 1993, 5(7): 1790 - 1801.
- 9 张夏. 双流体颗粒-壁面碰撞模型的理论及实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- 10 Zhang Xia. Theoretical and experimental studies of two-fluid particle - wall collision model [D]. Beijing: Tsinghua University,

2003. (in Chinese)
- 10 葛令行,魏正英,唐一平,等. 迷宫流道内沙粒-壁面碰撞模拟与 PIV 实验[J]. 农业机械学报,2009,40(9):46-50.
Ge Lingxing, Wei Zhengying, Tang Yiping, et al. Simulation and experimental analysis on sand-wall collisions in labyrinth channel emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):46-50. (in Chinese)
- 11 孙昊苏. 滴灌水器迷宫流道内水流及颗粒物运动特征测试[D]. 北京:中国农业大学,2012.
Sun Haosu. Visualizing flow characteristics in labyrinth path of drip irrigation emitters with DPIV and PDPA technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 12 DANTEC Measurement Technology[M]. PDA Installation & User's Guide. Denmark,1994.
- 13 李丹勋. 悬移质颗粒运动特性的研究[D]. 北京:清华大学,1999.
Li Danxun. Study on the motion characteristics of suspended particles[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999. (in Chinese)
- 14 Reeks M W. On the dispersion of small particles suspended in an isotropic turbulent fluid[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1977, 83(3): 529-546.
- 15 胡春宏. 关于泥沙运动基本概率的研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 15-21.
Hu Chunhong. Investigation on basic probability of grain motion[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(1): 15-21. (in Chinese)
- 16 Ninto Y, Garcia M H. Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: implications for sediment transport[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 326: 285-319.
- 17 Zhou B, Li Y, Pei Y, et al. Quantitative relationship between biofilms components and emitter dogging under reclaimed water drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2013, 31(6): 1251-1263.
- 18 李云开, 宋鹏, 周博. 再生水滴灌系统灌水器堵塞的微生物学机理及控制方法研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 98-107.
Li Yunkai, Song Peng, Zhou Bo. Microbiology mechanism and new controlling methods for emitter clogging in the reclaimed water drip irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 98-107. (in Chinese)
- 19 杨培岭, 廖人宽, 任树梅, 等. 化学调控技术在旱地水肥利用中的应用进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 100-109.
Yang Peiling, Liao Renkuan, Ren Shumei, et al. Application of chemical regulating technology for utilization of water and fertilizer in dry-land agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 100-109. (in Chinese)
-

(上接第 222 页)

- 8 Pind P F, Angelidaki I, Ahring B K. Dynamics of the anaerobic process: effects of volatile fatty acids [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 82(7): 791-801.
- 9 Martin C, Alriksson B, Sjode A, et al. Dilute sulfuric acid pretreatment of agricultural and agro-industrial residues for ethanol production [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2007, 137-140: 339-352.
- 10 Barampouti E M P, Mai S T, Vlyssides A G. Dynamic modelling of the ratio of volatile fatty acid/bicarbonate alkalinity in a UASB reactor for potato processing wastewater treatment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005, 110(1-3): 121-128.
- 11 Sánchez E, Borja R, Travieso L, et al. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(3): 335-344.
- 12 赖明, 纪跃波. 基于 PLC 的自动滴液机精密滴定控制技术 [J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2014, 19(2): 137-142.
Lai Ming, Ji Yuebo. The PLC-based control technology of titration precision for automatic dropping machine [J]. Journal of Jimei University: Natural Science, 2014, 19(2): 137-142. (in Chinese)
- 13 徐昊, 许根国. 基于 LabVIEW 的虚拟光度滴定系统 [J]. 现代仪器, 2012, 18(4): 47-51.
Xu Hao, Xu Genguo. The virtual photometric titration system on LabVIEW [J]. Modern Instruments, 2012, 18(4): 47-51. (in Chinese)
- 14 Rieger C, Weiland P. Prozessstörungen frühzeitig erkennen [J]. Biogas Journal, 2006(4): 18-20.
- 15 吴树彪, 顾雯雯, 庞昌乐, 等. 厌氧发酵碱度和有机酸在线监测系统设计与实验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 172-176.
Wu Shubiao, Gu Wenwen, Pang Changle, et al. Design and test of Alkalinity and VFA online monitoring system in anaerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 172-176. (in Chinese)
- 16 刘芳, 张万钦, 吴树彪, 等. 厌氧发酵中挥发酸含量与碳酸氢盐碱度的滴定法修正 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 91-96.
Liu Fang, Zhang Wanqin, Wu Shubiao, et al. Titration method for total inorganic carbon and volatile fatty acids determination in anaerobic digestion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 91-96. (in Chinese)
- 17 Zoutberg G R, Eker Z. Anaerobic treatment of potato processing wastewater [J]. Water Science and Technology, 1999, 40(1): 297-304.
- 18 华东理工大学分析化学教研组, 成都科学技术大学分析化学教研组. 分析化学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 1995.