

11-20-2019

## Effect of Flow Field Environment on Microstructure Surface Preventing Microorganism Attachment

Chunxi Li

*Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;*

Quanxi Xue

*Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;*

Xiangshan Zhang

*Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;*

Xuemin Ye

*Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Effect of Flow Field Environment on Microstructure Surface Preventing Microorganism Attachment

### Abstract

**Abstract:** The kinetic characteristics of microorganism model moving in different surfaces and flow field environments are simulated. *The internal flow dynamics and the inherent mechanism of antifouling on microstructure surface are examined.* The results indicate that *for the static flow field, vortices are generated in the micro-pits as microorganism moves above microstructure surface. The velocity in the microstructure surface is greater than that in the smooth surface, and the strain rate and shear stress exerted on microorganism are relatively smaller resulting in the rapid passing the microstructure surface. For the dynamic flow field, the flow field presents regular fluctuations in the near-wall region. Microorganisms are affected by larger strain rate and shear stress, thus more energy is needed to support microorganisms to slow down its speed to seek suitable attachment points resulting in increasingly difficult attachment. The reverse flow field has a better antifouling effect than the co-directional flow field.*

### Keywords

microstructure, biofouling, flow field, vortex

### Recommended Citation

Li Chunxi, Xue Quanxi, Zhang Xiangshan, Ye Xuemin. Effect of Flow Field Environment on Microstructure Surface Preventing Microorganism Attachment[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 687-695.

# 流场环境对微结构表面防微生物附着的影响

李春曦, 薛全喜, 张湘珊, 叶学民

(电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 通过模拟微生物模型在不同表面和流场中的运动学特征, 分析了微生物周围的内流特征和防止微生物粘附的内在机理。研究表明: 静态流场中, 由于微坑内形成旋涡, 微结构表面上的流速大于光滑表面, 微生物所受变形速率及剪切应力较小, 微生物可快速通过微结构表面; 动态流场中, 近壁区流场呈规律性波动, 微生物受到较大变形速率及剪切应力的影响, 需更多的动力支持其减缓自身速度以寻找合适的附着点, 加大了其附着难度; 逆向流场比同向流场具有更好的防污效果。

**关键词:** 微结构; 微生物污损; 流场; 旋涡

中图分类号: O35 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0687-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0124

## Effect of Flow Field Environment on Microstructure Surface Preventing Microorganism Attachment

Li Chunxi, Xue Quanxi, Zhang Xiangshan, Ye Xuemin

(Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment of Education Ministry (North China Electric Power University),  
Baoding 071003, China)

**Abstract:** The kinetic characteristics of microorganism model moving in different surfaces and flow field environments are simulated. *The internal flow dynamics and the inherent mechanism of antifouling on microstructure surface are examined.* The results indicate that *for the static flow field, vortices are generated in the micro-pits as microorganism moves above microstructure surface. The velocity in the microstructure surface is greater than that in the smooth surface, and the strain rate and shear stress exerted on microorganism are relatively smaller resulting in the rapid passing the microstructure surface. For the dynamic flow field, the flow field presents regular fluctuations in the near-wall region. Microorganisms are affected by larger strain rate and shear stress, thus more energy is needed to support microorganisms to slow down its speed to seek suitable attachment points resulting in increasingly difficult attachment. The reverse flow field has a better antifouling effect than the co-directional flow field.*

**Keywords:** microstructure; biofouling; flow field; vortex

## 引言

微生物污损现象广泛存在于诸多工业领域



收稿日期: 2017-03-16 修回日期: 2017-06-27;  
基金项目: 国家自然科学基金(11202079), 河北省自然科学基金(A2015502058);  
作者简介: 李春曦(1973-), 女, 唐山, 博士, 教授, 研究方向为流体力学及流体工程; 薛全喜(1990-), 男, 临沂, 硕士生, 研究方向为流动减阻。

中, 如发电厂循环水中微生物引起的换热设备污损将增大壁面热阻、流动阻力和加快金属材料的腐蚀速率, 进而缩短设备使用寿命甚至威胁设备安全<sup>[1-2]</sup>; 海洋中的微生物污损将造成船舶航速下降, 船体腐蚀加重<sup>[3]</sup>。

生物污损的形成过程大致分为初始阶段、生长发展阶段和稳定渐进阶段。在污损形成初期, 数微

米大小的细菌及单细胞藻类等微生物附着在水中材料表面上进而并形成一层细菌膜,细菌膜进一步粘附多细胞藻类、生物孢子、原生动物等构成微型生物黏膜;随后大型生物孢子将根植在生物黏膜上生长、繁殖;最终形成稳定的污损生物群落<sup>[4]</sup>。研究发现,具有合适的微结构表面能有效抑制微生物的早期附着,为防微生物污损提供了一种环保可行的方法。近年来,多名学者仿照鲨鱼表皮制造出含微结构的表面材料,并测试了其防污性能。Brennan 团队仿照鲨鱼皮微结构研制出含微观形貌的 PDMS 表面(Sharklet AF),表明此类微结构材料可减少藻类、藤壶等污损生物约 85% 的附着率<sup>[5-6]</sup>。Rosenhahn 等<sup>[7]</sup>研究了含微结构的多壁碳纳米管、氟硅共聚材料表面的防污性能,实验表明含微/纳米结构表面能够有效降低藻类等的附着率。Halder 等<sup>[8]</sup>在 PDMS 表面制作出深 5  $\mu\text{m}$ , 间距和直径不同的微孔,测试了静止和流动状态下 PDMS 表面上大肠杆菌的附着特征和通道内流场特征,指出间距 2  $\mu\text{m}$ 、直径 10  $\mu\text{m}$  的微孔结构表面能显著减少细菌的附着。

对于含微结构表面减少微生物附着的机理,许多学者从不同物理机制方面提出见解。Callow 等<sup>[9]</sup>通过实验验证,认为生物孢子在表面上的粘附受表面形貌和表面张力的影响,表面形状及尺寸特征决定微生物的附着区域。Scardino 等<sup>[10-11]</sup>基于微生物尺寸与微结构的特征长度提出附着点理论,指出微生物集聚在附着点多的区域,减少附着点有利于降低微生物的附着率。Schumacher 等<sup>[12]</sup>在含图案表面上可产生横向力的基础上提出了纳米力梯度概念,认为由表面微观形貌产生的压力梯度将影响微生物在附着初期的表面接触。Carl 等<sup>[13]</sup>通过实验指出表面润湿性在贻贝等微生物的附着上起重要作用,且微观形貌对微生物附着也有关键作用。Halder 等<sup>[14]</sup>研究了单个细菌在微结构表面上的运动,提出微结构引起的微流体扰动可阻止微生物的附着过程。

上述研究表明,具有合适微结构的表面能有效

防止微生物的沾污,但对微结构防污机理的认识上尚未统一,尤其是微生物运动与内部流场间的相互作用对于微结构表面防污性能内在影响这方面的研究尚未深入展开。为此,本文以 Halder<sup>[14]</sup>实验为基础,采用数值模拟方法,深入分析微结构表面近壁区流体的运动学及动力学特征,考察微生物在静态和动态流场中的相互作用,进而探讨不同流场环境中微结构表面防止微生物附着的内在机理。

## 1 数值模拟

细菌等微生物体周边具有鞭毛结构,为便于模拟,将微生物简化为头部长 2  $\mu\text{m}$ 、宽 1  $\mu\text{m}$  的矩形,尾部长 10  $\mu\text{m}$ 、宽 0.5  $\mu\text{m}$  的长方形。微生物特征长度为 12  $\mu\text{m}$ ,这与 Koch 和 Subramanian<sup>[15]</sup>所用模型相同。假设微生物平行于无限大表面运动,距底面高度分别为 2  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$ , 16  $\mu\text{m}$ ,在静态或动态流场中运动。如图 1 所示,微通道长  $L$  为 445  $\mu\text{m}$ ,宽  $H$  为 110  $\mu\text{m}$ ,在已有的研究成果上选取微结构为矩形凹坑,坑深  $h$  为 5  $\mu\text{m}$ ,宽  $d$  为 10  $\mu\text{m}$ ,微坑间距  $a$  为 5  $\mu\text{m}$ 。为消除微通道入口和出口效应对内部流场的干扰,分别在入口和出口段设置一定长度的光滑区域。为反映微结构表面的防污性能,文中还与相同尺寸的光滑表面微通道进行对比。

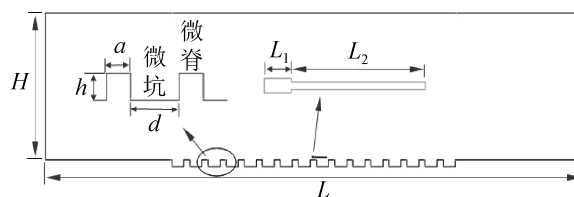


图 1 微通道及微生物模型示意图

Fig. 1 Diagram of microchannel and microorganism models

相对整个微通道,微结构及微生物尺寸较小,因此划分网格时,需在微结构与微生物附近区域进行网格加密,而远离此区域的网格则较稀疏,如图 2 所示,计算区域采用分块网格划分方法。为确保计算的准确性与网格无关性,分别采用 31 万、43 万、53 万和 65 万的网格对模型进行模拟,当流体的流动达到稳定后,选取进出口截面上平均压强

的差值作为微通道进出口的压降, 所得微通道进出口压降分别为 2.54 Pa, 2.60 Pa, 2.78 Pa 和 2.80 Pa。综合模拟精度和网格数后确定总网格数为 53 万, 其中微生物及微结构区域为 25 万。

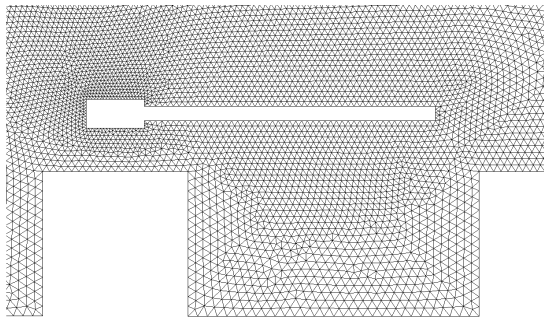


图 2 微生物及微结构附近的网格  
Fig. 2 Grids around microchannel and microorganism

模拟采用 Fluent, 应用二维双精度求解器提高计算精度。静态流场中, 微生物在静态流场以  $3 \times 10^{-5}$  m/s 的速度运动, 该值取自 Darnton<sup>[16]</sup>所得结果, 采用动网格模型进行模拟。动态流场中, 计算区域采用均匀速度入口, 速度为 0.002 m/s, 与 Halder<sup>[14]</sup>实验中的低速流动相同, 对应雷诺数为 0.436, 符合微通道内的低雷诺数流动特征<sup>[17]</sup>; 出口为自由出流, 其余边界均为无滑移壁面; 微生物仍以  $3 \times 10^{-5}$  m/s 的速度运动。模拟中, 非稳态模拟中时间步长定为  $10^{-2}$  s, 当各方向速度等参数的残差均小于  $10^{-4}$ , 则视计算达到收敛。经验证, 在流体流入具有微结构表面的区域之前, 流动已进入充分发展的层流状态。

微尺度下的流动, 仍然适用基于连续介质假设的控制方程组<sup>[18]</sup>。

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

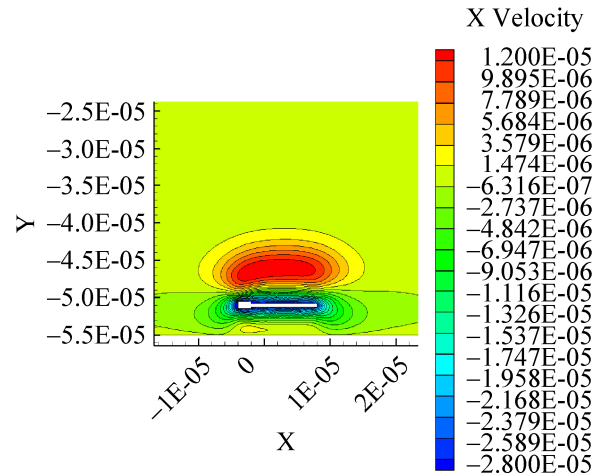
$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

## 2 模拟结果与分析

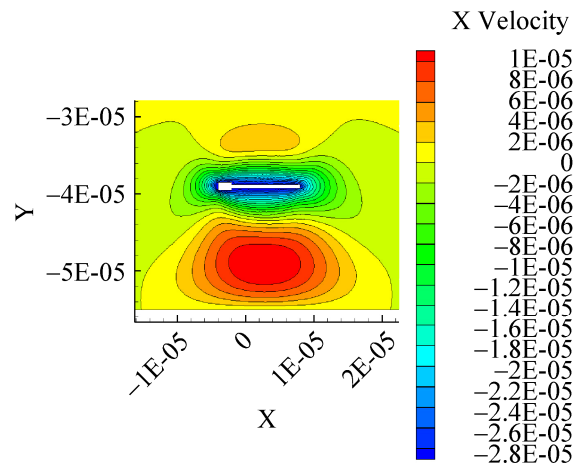
### 2.1 微生物距壁面高度的影响

Rosenhahn 和 Sendra<sup>[19]</sup>发现: 当微生物选择附

着区域时, 将放缓运动速度以便寻觅合适的附着点。为避免流体环境带来的干扰, 下文针对静态流场中的光滑表面, 讨论微生物距壁面高度对其附着性能的影响。如图 3 所示, 距壁面越远, 微生物附近的流速越接近其运动速度, 因微生物对前进方向处的流体有排挤效应, 故驱使流体从微生物周围绕流。



(a) 距壁面 4  $\mu\text{m}$



(b) 距壁面 16  $\mu\text{m}$

图 3 距壁面不同高度处的流场分布

Fig. 3 Flow field distribution at different distances from wall

在距壁面 2  $\mu\text{m}$  及 4  $\mu\text{m}$  下(本文仅给出 4  $\mu\text{m}$  结果), 受壁面无滑移影响, 仅在微生物上方出现明显回流现象; 但在距壁面 16  $\mu\text{m}$  情形下, 在微生物下方亦出现显著回流特征。这种流动特征也反映在微生物下方的流场较大差异性上(图 4): 距壁面较

远时, 流体微团受到无滑移壁面的影响较小, 微生物下方的流速较大, 即  $16\ \mu\text{m}$  情形下的流速整体大于  $4\ \mu\text{m}$  和  $2\ \mu\text{m}$  情形。因此, 当微生物选择附着时, 将先靠近壁面运动以减小自身速度, 并在近壁区进行最终附着。

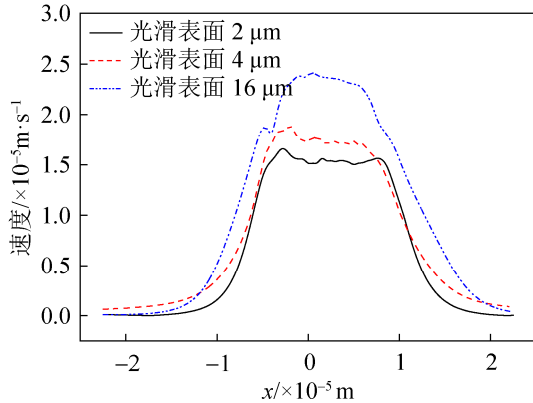


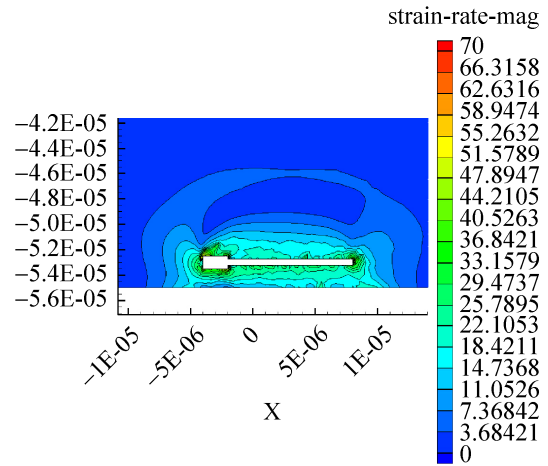
图4 微生物体下方  $0.5\ \mu\text{m}$  处的流速分布  
Fig. 4 Velocity distribution at the distance of  $0.5\ \mu\text{m}$  beneath microorganism

微生物运动改变了周围流体的运动学特征, 在粘性流体中, 运动的微生物必然受到流体粘滞力的影响。图 5(a) 为微生物附近流体的变形速率特征, 由图可知, 因变形速率与速度呈现相同变化趋势, 故微生物周围速度梯度较大、变形速率显著; 而距微生物越远, 其变形速率越小, 因此, 在微生物上方宽阔环境中的变形速率相同, 而壁面将影响微生物下方的变形速率。图 5(b) 表明, 3 种情形下的微生物所受变形速率变化一致, 但在头部、尾部及首尾关联处, 因流体环境突变, 速度梯度较大, 故微生物所受的变形速率影响较大。受壁面粘性滞止影响, 高度为  $2\ \mu\text{m}$  时, 微生物所受变形速率最大, 这在一定程度上阻碍了微生物的前进过程, 为其附着提供了有利条件。因此对近壁面和流体环境的深入研究有利于寻找防微生物沾污的表面结构。

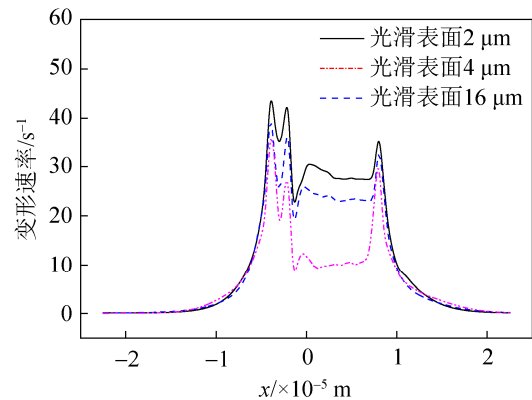
## 2.2 壁面微结构的影响

微生物附着的真实表面并非光滑表面, 为便于分析, 将其简化具有均匀微结构特征的表面; 相对光滑表面, 微生物游经微结构表面时, 因所处环境

发生明显改变, 必将影响其运动学特征, 进而改变其附着性能。下文针对微生物距壁面为  $2\ \mu\text{m}$  的情形开展流场环境影响的研究。



(a) 距壁面  $2\ \mu\text{m}$



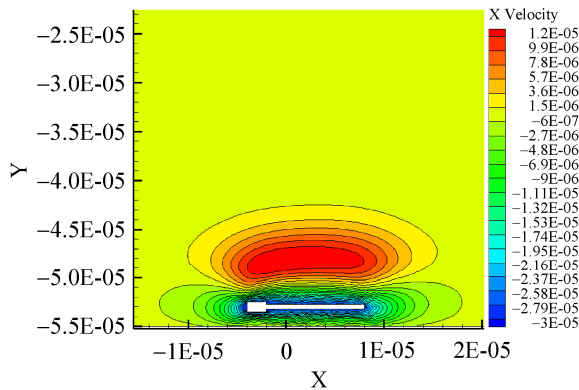
(b) 距壁面不同高度

图5 距壁面高度对微生物周围流体变形速率的影响  
Fig. 5 Effect of distance from wall on the strain rate around microorganism

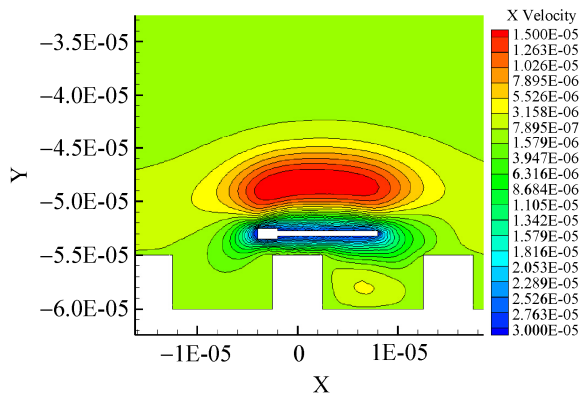
### 2.2.1 静态环境

静态环境中, 微生物在光滑表面与微结构表面上的运动特征如图 6 所示。两种表面结构下, 微生物上方的速度场基本一致, 但在微生物下方、近壁面处, 对应的速度场差别显著。当微生物游经微脊时 ( $0.1\ \text{s}$ ), 微坑内形成一明显旋涡 (图 6b); 当游经微坑时 ( $0.4\ \text{s}$ ), 形成充满整个微坑的旋涡 (图 6c)。图 6d 为微生物下方  $0.5\ \mu\text{m}$  处的流速分布, 受无滑移壁面影响, 光滑表面上的流速略低于微结构表面情形, 但在微坑上方, 因无壁面影响, 所以流速较

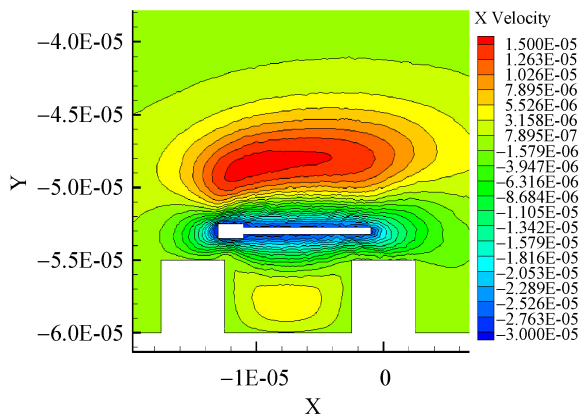
大; 微结构表面上的平均流速为  $9.73 \times 10^{-6}$  m/s, 高于光滑表面的  $9.45 \times 10^{-6}$  m/s, 即微生物可较快通过微结构表面。这与 Halder<sup>[14]</sup>通过实验研究单个细菌在光滑表面与含微结构表面上的运动规律相同: 微生物约 75% 的时间在光滑表面运动, 仅有 25% 的时间通过微结构表面。



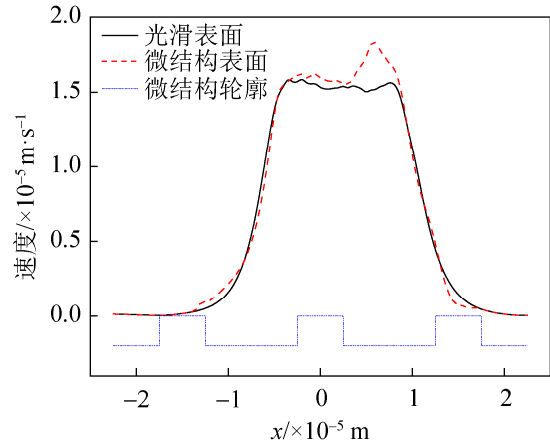
(a) 光滑表面



(b) 0.1 s 时微结构表面



(c) 0.4s 时微结构表面

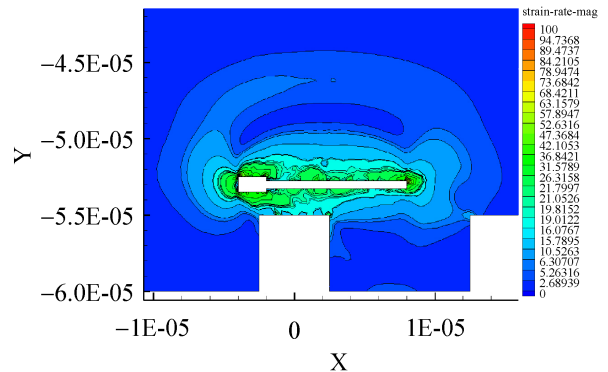


(d) 0.1 s 时微生物下方流体速度

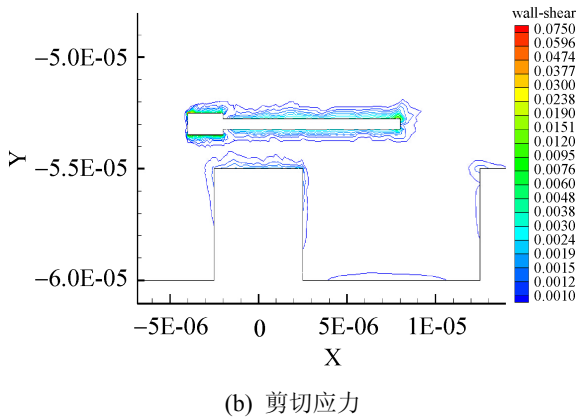
图 6 运动微生物周围的流速分布

Fig. 6 Distribution of flow velocity around the moving microorganism

图 7 表明, 与光滑表面相比, 总体上, 微生物周围流体的变形速率较大, 而距离微生物较远的区域, 其变形速率越小; 而近壁区受壁面微结构影响, 变形速率有明显变化, 其中微脊表面上的变形速率与光滑表面相似, 变形速率变化显著, 但在微坑区域, 其变形速率较小, 所受到的流体剪切应力也较小, 故微生物所受的粘性阻力较低, 即微生物容易通过该区域。图 8 表明, 与光滑表面相比, 微结构表面上的微生物所受变形速率和剪切应力整体较小, 在微脊处因靠近壁面, 故所受变形速率和剪切力较大, 而在微坑处所受的变形速率相对较小。因此微结构表面有利于减小运动微生物所受的流体作用力, 便于其快速通过此区域。

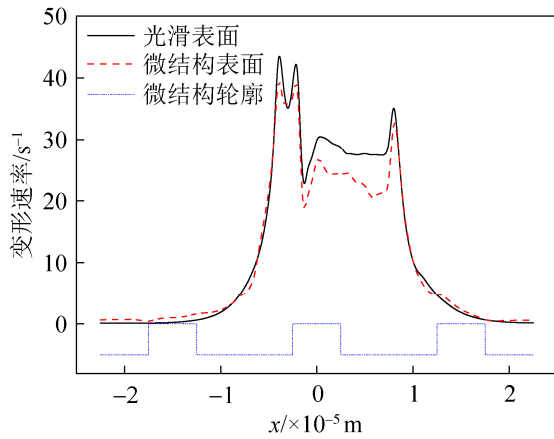


(a) 变形速率

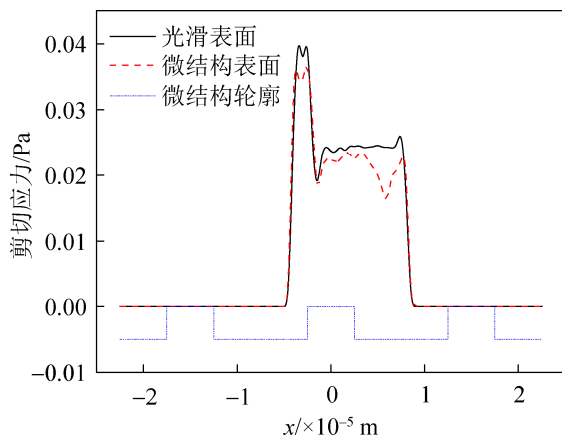


(b) 剪切应力

图7 运动微生物周围的变形速率和剪切应力分布  
Fig. 7 Distributions of strain rate and shear stress around microorganism



(a) 变形速率

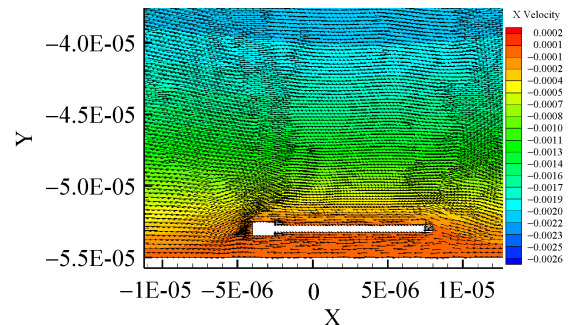


(b) 剪切应力

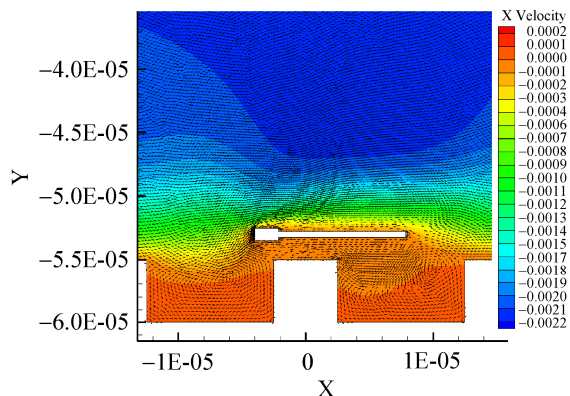
图8 运动微生物下方的变形速率和剪切应力分布  
Fig. 8 Distributions of strain rate and shear stress beneath microorganism

## 2.2.2 同向流场

图9中,微生物与流体运动方向一致。光滑表面上,微生物在近壁区的运动改变了邻域内的速度分布,微生物附近的流速明显小于其他区域;受微结构影响,微结构表面上的流场环境变得复杂,流体在微坑内形成顺流向旋涡<sup>[20]</sup>。微生物维持自身速度时不仅引起周围流体微团的运动,同时经过微坑上部也会在微坑内造成顺流向旋涡,因此微结构上方的流体速度大于光滑表面;当微生物经过微坑时,将周期性地受到其流动特征影响。图9(c)表明,因微生物运动速度减缓,其周围的流速减小,微结构表面上的速度明显高于光滑表面情形;在微生物尾部,受微坑内部缓慢流动环境的影响,致使尾部区域流速较小;而微脊处,受壁面挤压使流速高于微坑处。微结构表面上流速的周期性变化增大了微生物对自身运动控制的难度,且在较高速度下,微生物将较快地通过微结构表面区域。

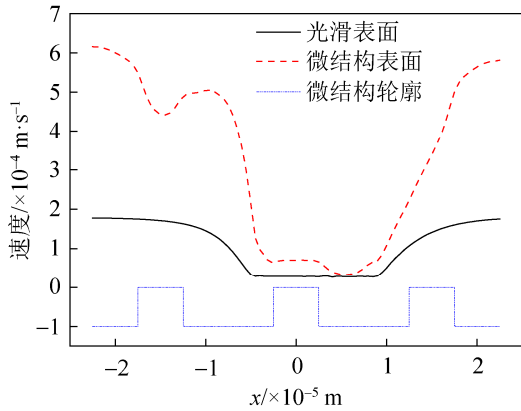


(a) 光滑表面



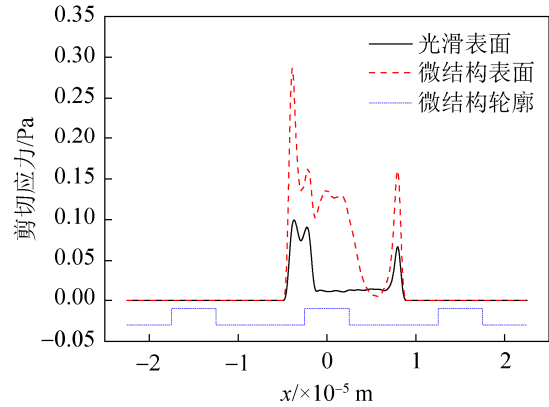
(b) 微结构表面





(c) 微生物下方 0.5 μm 处的流速分布

图 9 微生物在光滑表面与微结构表面上的速度分布  
Fig. 9 Velocity distribution of the smooth and microstructure surfaces

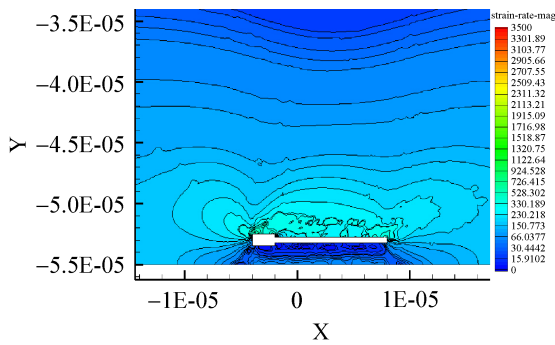


(c) 微生物下方 0.5 μm 处的剪切应力

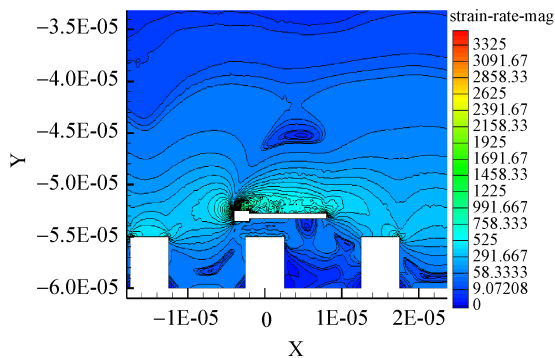
图 10 光滑与微结构表面上的变形速率和剪切应力分布  
Fig. 10 Distributions of deformation rate and shear on the smooth and microstructure surfaces

图 10 表明, 两种情形下微生物上方区域所受变形速率大体相似, 因微生物运动速度与周围流体流速存在差异, 所以微生物将受到较大的变形速率影响, 并以微生物为中心向上部流场内递减。但在近壁区有明显不同, 微生物与光滑表面间的流体受微生物影响较大, 变形速率较小; 但在微结构表面, 变形速率随微坑与微脊的交替出现明显波动。

图 10(c)比较了两种情形下微生物下方所受的剪切应力, 表明光滑表面上的流场环境比较稳定, 微生物所受剪切应力的平均值为 0.03 Pa; 但微结构表面上的剪切应力值波动较大为 0.3 Pa, 在头部、微脊及头尾结合处, 剪切力突变显著, 在微坑上方剪切应力较小, 但其平均值 0.1 Pa 仍大于光滑表面的 0.03 Pa。流场中, 在微结构表面存在较大剪切应力使微生物难以选择附着点, 同时周期性剪切应力波动的出现迫使微生物较难控制自身的运动, 因此微结构表面不利于微生物粘附, 有利于表面防污。



(a) 光滑表面



(b) 微结构表面

### 2.2.3 逆向流场

该情形下, 微生物与流体流动方向相反, 速度大小与同向情形相同。图 11 为微生物下方 0.5 μm 处的流速分布, 流体流动与微生物运动产生的扰动流场结合, 使微生物下方流速减小。光滑表面近壁区的流速接近定值, 微生物处于相对稳定的流体环境中。但在微结构表面上的近壁区, 流体环境复杂, 这表现在微坑处, 流体在流场中形成顺流向旋涡与微生物在流场中运动产生的逆流向旋涡相互作用, 使微坑上方的流体速度显著减小; 在微脊处, 受流体流动挤压, 微脊上方的流速较大。微生物在微结构表面受到不同流速的影响加大了微生物对自身的控制难度。微生物在流场中逆向

运动,需放缓自身的速度以便附着,因此需要更大的动力支持,微结构表面上波动的流场环境更是干扰了微生物附着的准备,因此微结构表面更不利于微生物粘附。

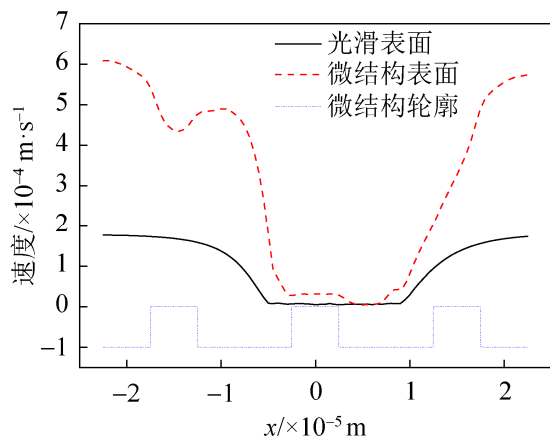


图 11 微生物下方 0.5  $\mu\text{m}$  处的流速分布  
Fig. 11 Distribution of velocity at the distance of 0.5  $\mu\text{m}$  beneath microorganism

图 12 显示,受微结构的影响,微生物与周边流体存在更大的速度梯度,因此微结构表面上的微生物所受剪切应力较大且复杂,其平均值为 0.142 Pa,波动幅度高达 0.406 Pa,远大于光滑表面的平均值 0.066 Pa 和波动值 0.074 Pa。微生物在较大流体粘性力驱动下,将耗费更多能量维持自身运动;另外,因微生物自身受到较大波动作用,这必将影响其基体膜的形成。因此,在逆流流场中,微生物难以在微结构表面长时间停留、附着。

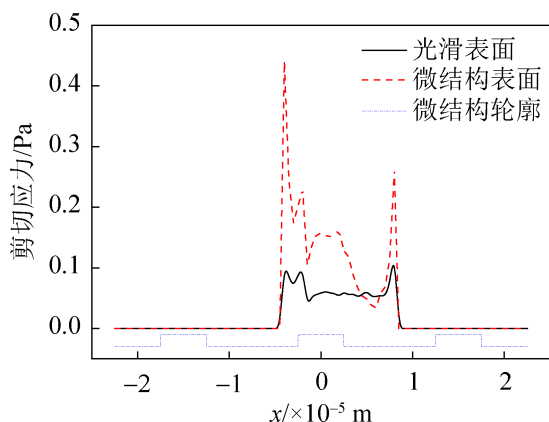


图 12 微生物下方所受的剪切应力  
Fig. 12 Distribution of shear stress beneath microorganism

### 3 结论

(1) 距光滑表面不同高度时的微生物所受壁面影响不同。静止流场中,微生物距壁面越近,所受壁面滞止影响愈显著,微生物周围流速愈小,其所受变形速率及剪切应力愈大,微生物更易选择合适的附着点,近壁区的流场环境影响了微生物附着的选择。

(2) 静态流场中,微生物以同一速度分别在光滑表面和含微结构表面上运动,由于微坑内形成旋涡,微生物受到近壁面的滞止作用减小,微结构表面上的流速大于光滑表面,同时微生物所受变形速率及剪切应力值较小,因此,微生物可快速通过微结构表面。

(3) 动态流场中,含微结构表面近壁区的流场呈现规律性的波动,微脊上方的流体流速高于光滑表面,微坑上方的流速相对较小,微生物在微结构上方受到较大的变形速率及剪切应力的影响;微生物需要更多的动力支持其减缓自身速度寻找合适的附着点,因此加大了其附着难度。逆向流场中的流场较为复杂,微生物受到较大的变形速率及剪切应力的影响,因此逆向流场比同向流场具有更好的防污效果。

### 参考文献:

- [1] 黄元平,武霖,徐志明. 电厂换热设备微生物污垢沉积与腐蚀实验[J]. 热力发电, 2015, 44(6): 111-116.  
Huang Yuanping, Wu Lin, Xu Zhiming. Experimental study on microbial fouling and corrosion on heat exchangers surface in power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(6): 111-116.
- [2] 于大禹,张静,尹旭,等. 循环冷却水管路微生物污垢形成的动态模拟[J]. 化工进展, 2010, 29(11): 2193-2197.  
Yu Dayu, Zhang Jing, Yin Xu, et al. Dynamic simulation for microbial fouling formation in circulating cooling water[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(11): 2193-2197.
- [3] Schultz M P, Bendick J A, Holm E R, et al. Economic impact of biofouling on a naval surface ship[J]. Biofouling (S0892-7014), 2011, 27(1): 87-98.

- [4] Chambers L D, Stokes K R, Walsh F C, et al. Modern approaches to marine antifouling coatings[J]. *Surface and Coatings Technology* (S0257-8972), 2006, 201(6): 3642-3652.
- [5] Brennan A B, Baney R H, Carman M L, et al. Surface topography for non-toxic bioadhesion control: US, US 7143709 B2 [P]. 2006.
- [6] Schumacher J F, Carman M L, Estes T G, et al. Engineered antifouling microtopographies—effect of feature size, geometry, and roughness on settlement of zoospores of the green alga *Ulva*[J]. *Biofouling* (S0892-7014), 2007, 23(1): 55-62.
- [7] Rosenhahn A, Ederth T, Pettitt M E. Advanced nanostructures for the control of biofouling: the FP6 EU integrated project AMBIO[J]. *Biointerphases* (S1934-8630), 2008, 3(1): IR1-IR5.
- [8] Halder P, Nasabi M, Lopez F J T, et al. A novel approach to determine the efficacy of patterned surfaces for biofouling control in relation to its microfluidic environment[J]. *Biofouling* (S0892-7014), 2013, 29(6): 697-713.
- [9] Callow M E, Jennings A R, Brennan A B, et al. Microtopographic cues for settlement of zoospores of the green fouling alga *Enteromorpha*[J]. *Biofouling* (S0892-7014), 2002, 18(3): 229-236.
- [10] Scardino A J, Harvey E, De Nys R. Testing attachment point theory: diatom attachment on microtextured polyimide biomimics[J]. *Biofouling* (S0892-7014), 2006, 22(1): 55-60.
- [11] Scardino A J, Guenther J, De Nys R. Attachment point theory revisited: the fouling response to a microtextured matrix[J]. *Biofouling* (S0892-7014), 2008, 24(1): 45-53.
- [12] Schumacher J F, Long C J, Callow M E, et al. Engineered nanoforce gradients for inhibition of settlement (attachment) of swimming algal spores[J]. *Langmuir* (S0743-7463), 2008, 24(9): 4931-4937.
- [13] Carl C, Poole A J, Sexton B A, et al. Enhancing the settlement and attachment strength of pediveligers of *Mytilus galloprovincialis* by changing surface wettability and microtopography[J]. *Biofouling* (S0892-7014), 2012, 28(2): 175-186.
- [14] Halder P, Nasabi M, Jayasuriya N, et al. An assessment of the dynamic stability of microorganisms on patterned surfaces in relation to biofouling control[J]. *Biofouling* (S0892-7014), 2014, 30(6): 695-707.
- [15] Koch D L, Subramanian G. Collective hydrodynamics of swimming microorganisms: Living fluids[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics* (S0066-4189), 2011, 43: 637-659.
- [16] Darnton N C, Turner L, Rojevsky S, et al. Dynamics of bacterial swarming[J]. *Biophysical journal* (S0006-3495), 2010, 98(10): 2082-2090.
- [17] 张程宾, 陈永平, 施明恒, 等. 表面粗糙度的分形特征及其对微通道内层流流动的影响 [J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7050-7056.  
Zhang Chengbin, Chen Yongping, Shi Mingheng, et al. Fractal characteristics of surface roughness and its effect on laminar flow in microchannels[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7050-7056.
- [18] Karniadakis G E M, Beskok A, Gad-el-Hak M. Micro flows: fundamentals and simulation[J]. *Applied Mechanics Reviews* (S0003-6900), 2002, 55: 76.
- [19] Rosenhahn A, Sendra G H. Surface sensing and settlement strategies of marine biofouling organisms[J]. *Biointerphases* (S1934-8630), 2012, 7(1): 63.
- [20] 胡海豹, 宋保维, 潘光, 等. 鲨鱼沟槽表皮减阻机理的仿真研究 [J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(21): 4901-4903.  
Hu Haibao, Song Baowei, Pan Guang, et al. Simulation Studies on Drag Reduction Mechanism of Shark Riblets Surface[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(21): 4901-4903.