

1-4-2019

Mechanism of Biofouling Control on Micro-structured Surface

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;

Zhang Shuo

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.

Mechanism of Biofouling Control on Micro-structured Surface

Abstract

Abstract: Changing the wall microstructure geometry can improve the performance of surface antifouling and selfcleaning. A 3D numerical simulation of microfluidic in the near-wall region attached with microorganisms is performed with Fluent, and *the kinetic and dynamic characteristics of fluid in the near-wall region are examined. The inherent mechanism of antifouling on microwell surfaces is discussed.* Results reveal that streamwise vortices are formed in the microwells, *thus the distinctly periodic fluctuations of velocity, strain rate and wall shear stress on microwell surfaces are exhibited, resulting in the interference on microorganisms migration and the harder adhesion of microorganisms to microridges. Additionally, microwell evolves a finite boundary and isolated region with high wall shear stress, which inhibits the aggregation and adhesion of microorganisms in the microwells. In this study, the microwell surface of in-line arrangement with microwell gap of 2 μm and microwell radius of 5 μm can produce larger fluctuation values of strain rate and wall shear stress and reduce the flow drag of the channels.*

Keywords

biofouling, microstructure, antifouling, drag reduction, numerical simulation

Recommended Citation

Li Chunxi, Xue Quanxi, Zhang Shuo, Ye Xuemin. Mechanism of Biofouling Control on Micro-structured Surface[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3903-3913.

微结构表面防微生物粘附机理研究

李春曦, 薛全喜, 张硕, 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: 改变壁面微结构形状可提高其表面防污和自清洁性能。采用 Fluent 对微孔表面近壁区附有微生物下的流动进行了三维数值模拟, 分析了近壁区流体的运动学和动力学特征, 探讨了微孔表面防止微生物粘附的内在机理。研究表明: 在近壁区流场中, 微孔内形成顺流向旋涡, 使微孔表面上的速度、变形速率及剪切应力呈规律性波动, 流场的波动干扰了微生物的运动, 使其较难粘附在微脊上; 微孔成为一个有限边界且具有较高剪切应力的孤立区域, 从而抑制了微生物在微孔内的聚集和附着。孔径为 $5\ \mu\text{m}$ 、孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 、且顺列布置的微孔结构表面具有较大的变形速率和剪切应力波动值, 并能减小微通道的流动阻力。

关键词: 生物污损; 微结构; 防污; 减阻; 数值模拟

中图分类号: O 35

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 10-3903-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201810037

Mechanism of Biofouling Control on Micro-structured Surface

Li Chunxi, Xue Quanxi, Zhang Shuo, 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: Changing the wall microstructure geometry can improve the performance of surface antifouling and selfcleaning. A 3D numerical simulation of microfluidic in the near-wall region attached with microorganisms is performed with Fluent, and the kinetic and dynamic characteristics of fluid in the near-wall region are examined. The inherent mechanism of antifouling on microwell surfaces is discussed. Results reveal that streamwise vortices are formed in the microwells, thus the distinctly periodic fluctuations of velocity, strain rate and wall shear stress on microwell surfaces are exhibited, resulting in the interference on microorganisms migration and the harder adhesion of microorganisms to microridges. Additionally, microwell evolves a finite boundary and isolated region with high wall shear stress, which inhibits the aggregation and adhesion of microorganisms in the microwells. In this study, the microwell surface of in-line arrangement with microwell gap of $2\ \mu\text{m}$ and microwell radius of $5\ \mu\text{m}$ can produce larger fluctuation values of strain rate and wall shear stress and reduce the flow drag of the channels.

Keywords: biofouling; microstructure; antifouling; drag reduction; numerical simulation

引言

生物污损是由众多生活在水中的生物粘附、聚



收稿日期: 2016-08-26 修回日期: 2016-12-05;
作者简介: 李春曦(1973-), 女, 河北唐山, 博士, 教授, 研究方向为流体力学及流体工程等; 薛全喜(1990-), 男, 山东临沂, 硕士生, 研究方向为流动减阻; 张硕(1991-), 女, 河北邢台, 硕士生, 研究方向为流动减阻。

集在材料表面, 不断生长并对设备产生损害的现象。该现象的发生对水中设备产生诸多危害, 如船舶上的生物污损将导致航速降低, 耗油增加, 并加速船体腐蚀^[1-2]; 换热器上的生物污损将造成局部换热恶化、管道阻塞, 缩短使用寿命^[3]; 水下探测器上的生物污损则干扰声呐信号^[4]等。

污损形成初期, 微生物在材料表面上的附着发

生在纳米-微米的级别内,有的甚至在分子水平上。数小时内,数微米大小的细菌和单细胞藻类等微生物在水中材料表面上附着并形成一层细菌膜;随后形成由多细胞藻类、生物孢子、原生动物等组成的10~100 μm 的微型生物黏膜;之后大型植物的孢子、无脊椎动物等将在生物黏膜上生长、繁殖;最终污损生物在上述表面形成大范围的生物群落^[5]。此过程会持续数年,并且由于此生物膜能够承受非常恶劣的环境而难以控制^[6]。

为防止微生物污损对水中设备的危害,目前已开发了多种防污技术,其中最常用的防控方法是利用防污涂料释放的锡、汞等对微生物进行毒杀,从而达到防污的目的^[7]。但该方法在除污的同时,也破坏了周围水体环境,对生态等造成危害^[8]。因此,研发新型表面防污材料成为迫在眉睫的课题。

研究发现,鲨鱼、海豚等海洋生物长期生活在含微生物较多的环境中而不会出现生物沾污现象的原因是,其表皮存在大量微米级微结构,能有效阻止微生物的附着^[9]。受此启发,众多学者开展了含微结构表面的防污性能研究。Petronis等^[10]通过光刻技术制作出含沟槽和金字塔微结构的聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料,在瑞典海岸实地测试藤壶在其不同尺寸微结构表面的附着情况,发现深69 μm 、宽97 μm 的沟槽在减少藤壶附着性能最为有效,且沟槽微结构比金字塔微结构更不易让藤壶附着。Hoipkemeier-Wilson等^[11]利用化学修饰的PDMS材料,研究了表面微观形貌对石莼孢子附着和脱落的影响,将微结构设计为高5 μm 、宽5 μm 的柱体与脊肋,间距分别为5 μm 、10 μm 和20 μm ,通过实验发现宽、深均为5 μm 的微观形貌显著降低了孢子附着密度,5 μm 以上间距的通道更易附着孢子;水槽湍流实验表明,PDMS油改性的光滑表面及含柱体的微结构表面均明显降低了孢子的附着。Carman等^[12]模仿鲨鱼皮表面微结构,设计了具有圆柱、脊状及仿生微貌的3种表面,实验发现具有仿生微结构的表面最大可减少85%的石莼附着。

Halder等^[13]测试了含圆柱形微结构表面对细菌的防污效果,在PDMS表面制作深5 μm ,间距为2 μm 和5 μm 、直径依次为1~10 μm 的微孔,分析了静止及流动状态下微通道表面上大肠杆菌的附着特征;并在实验基础上模拟了通道内近壁区的流场特征,指出直径为10 μm 、间距为2 μm 的微孔结构表面能有效防止细菌附着。百安百科技公司仿照鲨鱼表皮盾鳞结构研制出鲨刻烃涂层,该材料应用在船体表面可降低藻类、贝类及藤壶67%的粘附量;当行驶速度达4~5 kn,可把附着在船体表面上的海生物清掉,实现船舶“自清洁”^[14]。郑纪勇等^[15]采用PDMS翻模复制方法,研制出具有十字形柱状且错列分布的微结构,实验验证了其表面具有防止硅藻、石莼等微生物附着的功能。

上述研究表明,具有合适仿生微结构的表面具有良好的防污效果,但已有研究大多采用实验方法,通过改变微结构形状和尺寸等研究其表面防污性能,而关于微结构对防止微生物附着的内在机理研究尚未深入展开,这也是研发新型表面防污材料的关键因素之一。鉴于此,本文在Halder等^[13]研究基础上,借助数值模拟方法,深入分析微结构表面近壁区的运动学及动力学特征,探讨微结构防止微生物附着的内在机理,并寻求最优的微结构防污减阻方案。

1 数值模拟

1.1 几何模型和网格划分

为模拟近壁区的实际流场,选取三维微通道区域如图1所示。其中,流动区域尺寸为: $L_x=0.445\text{ mm}$, $L_y=0.08\text{ mm}$, $L_z=0.11\text{ mm}$;坐标原点置于微通道底面(微结构上面)中间位置处。为消除微通道入口和出口效应对微结构表面流场的干扰,分别在入口和出口段设置一定长度的光滑区域;文中还开展了与相同尺寸光滑表面微通道的对比,以进一步比较说明微结构表面的防污性能。

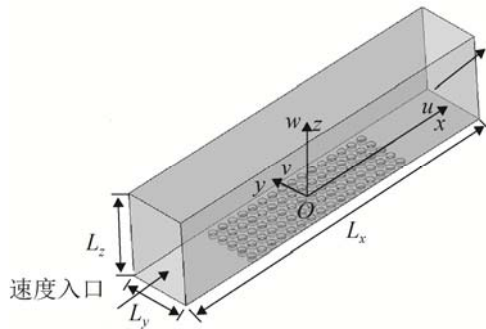


图 1 圆柱形微孔表面模型
Fig. 1 Model of microwell surface

在污损形成初期, 数微米级的微生物起主导作用, 因此控制此尺寸范围的微生物附着尤为重要。为此, 文中主要针对特征尺寸为 2~5 μm , 且较易形成污损的微生物, 如石莼孢子、大肠杆菌等^[16]的粘附状况开展研究。Hoipkemeier-Wilson 等^[11]、Halder 等^[13]实验研究发现, 孔深 5 μm 、孔径与微生物的尺寸相当时的圆柱形微孔, 防污效果较为显著, 故本文以此选取微孔的尺寸: 孔深 $h=5 \mu\text{m}$ 、孔径 $R=5 \mu\text{m}$ 、孔间距 $S=5 \mu\text{m}$, 简记为 R5S5。因微孔尺寸很小, 为保证计算的准确性, 对微结构附近区域网格进行局部加密, 而远离微结构的区域, 网格则较稀疏。在当前参数情形下, 选取如表 1 所示网格数进行了网格无关性验证, 最终确定模拟所用网格数为 250 万, 其中每个微孔结构内网格数为 3 000, 台阶处壁面微结构区网格为 8 万, 并采用尺寸函数, 以近壁区为中心向其他区域网格密度递减。

表 1 网格无关性验证

Tab. 1 Verification of mesh independence				
网格数/万	201	250	282	323
压降/Pa	16.123 5	16.392 3	16.401 8	16.402 9

1.2 控制方程及边界条件

考虑到近壁区附近为层流底层, 计算中假设 20 $^{\circ}\text{C}$ 的水在微通道中做三维定常层流流动, 其控制方程组包括连续性方程和运动方程:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

为衡量表面微结构对微通道内流动阻力的影响, 引入无量纲压降比 Π

$$\Pi = \frac{\Delta P_s - \Delta P_m}{\Delta P_s}$$

式中: ΔP_s 和 ΔP_m 分别为光滑表面和微结构表面通道中的压降。

为保证计算精度, 采用 Fluent 软件三维双精度求解器, 基于 SIMPLE 算法求解流场。计算区域采用速度入口, 设入口速度分布均匀, 为 $9 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 相应雷诺数为 0.82, 这与微通道内的低雷诺数流动相符^[17]。出口为自由出流, 其余边界均为无滑移壁面。模拟中, 当各方向速度参数的残差均小于 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, 已进入充分发展的层流状态。

2 微结构表面防污机理

已有研究表明, 微结构通过改变近壁区的流场环境, 进而削弱微生物在近壁区的附着^[18], 因而近壁区流体的运动学和动力学特征是揭示微结构表面防污特性的关键。为此, 下文对此展开分析。

2.1 微孔附近的运动学特征

图 2 为光滑表面与微孔表面通道内的流场分布。由图 2 可知, 对于光滑表面(图 2(a)), 流体平滑流过微通道表面, 受粘性滞止影响, 近壁区附近存在明显的速度梯度; 而微孔表面附近的流场(图 2(b))更加复杂, 除受粘性影响存在的速度梯度外, 微孔结构的存在使微孔内形成一明显的顺时针旋涡, 流动出现回流现象, 这一现象与刘占一等^[19]在脊状微结构表面的流场模拟中相同, 该特征有利于防止微生物在微孔内的附着, 从而减少微生物在整个表面上的附着面积。图 2(c)~(e)给出了微通道中 x 轴上 3 个方向上的速度分布。因壁面采用无滑移条件, 故光滑表面上的速度始终为 0; 而对于微孔表面, x 与 z 方向上的速度 u 和 w 呈规律的周期

性波动,在微孔两侧(图 2(b)中 A、C 区域)的速度相对较大,在中间位置(区域 B)速度较小,这是由于微孔口区域为主流与旋涡的交互作用区,区域 A 和 C 距旋涡中心较远,受主流影响较明显,因而速度较大;区域 B 距旋涡中心较近,受旋涡影响较大,因而速度略小。微孔口速度 v 呈现无规律波动现象(如图 2(d)所示):由于微孔口处的流体受沿 x 方向的主旋涡影响,同时流体微团在与微孔壁面的碰撞过程中会在 y 方向上产生非常微弱的无规则运动(如图 3(a)所示),两者的交互作用致使速度 v 呈显著的无规律波动,这一结论与 Halder 等^[13] 模拟结果比较吻合。受顺时针旋涡影响, w 在微孔前半部分区域 A 为负值,而在后半部分区域 C 为正值。在微孔口区域的速度波动可阻碍微生物向微孔内的运动,从而增强微孔表面的自清洁能力。

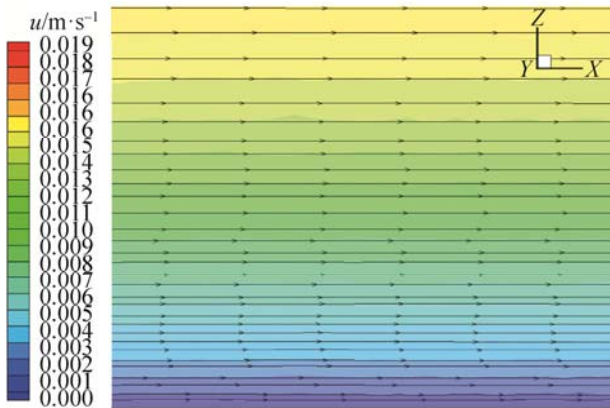
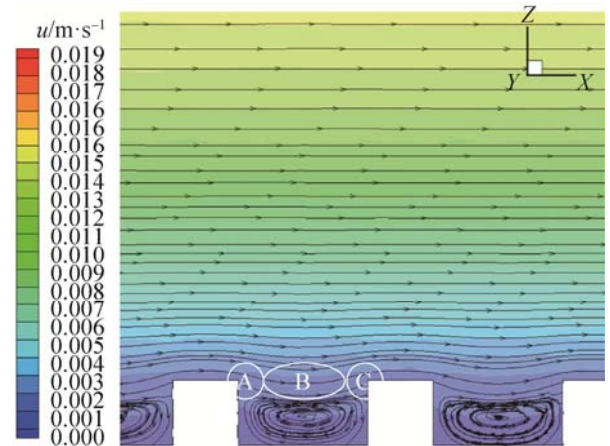
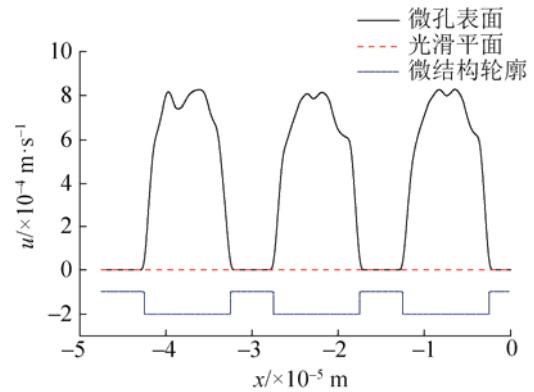
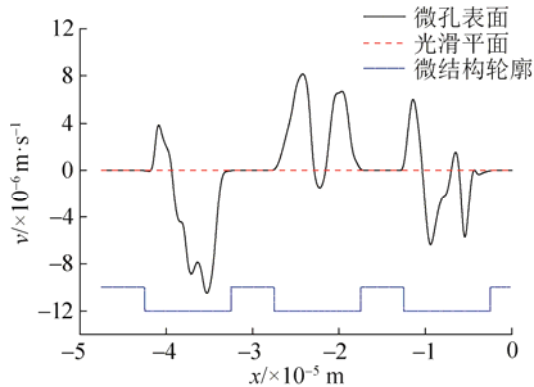
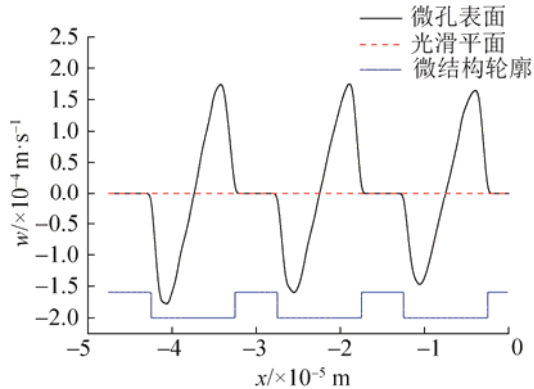
(a) 光滑表面通道在 xoz 平面速度分布(b) 微孔表面通道在 xoz 平面速度分布(c) 光滑表面与微孔表面沿 x 轴的速度分布 x 方向速度 u (d) 光滑表面与微孔表面沿 x 轴的速度分布 y 方向速度 v (e) 光滑表面与微孔表面沿 x 轴的速度分布 z 方向速度 w

图 2 光滑表面通道与微孔表面通道中的速度分布
Fig. 2 Velocity distribution on channels with smooth and microwell surfaces

图 3(b)为微孔表面在 xoy 平面上的速度分布:对于微孔表面,从孔边缘到孔中心速度不断增加,最大可达 8.38×10^{-4} m/s。速度场的类周期性变化特征干扰了微生物敏感的信息传递,破坏了污损过程中由细菌膜转变为微型生物黏膜的第一阶段^[20],从而使微生物不易附着在微孔表面上。

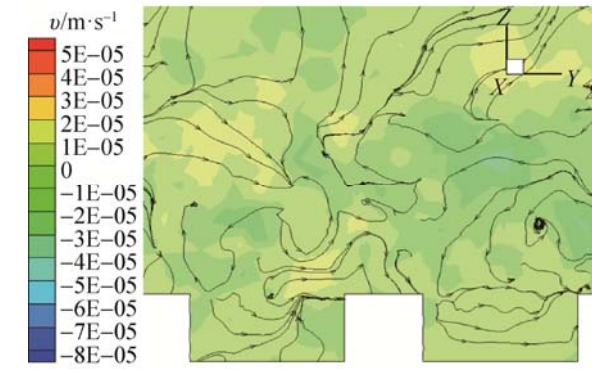
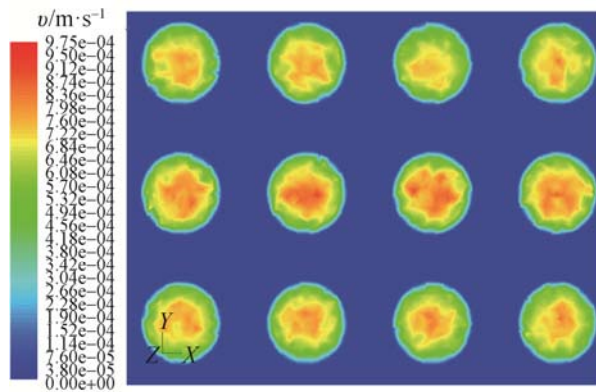
(a) 微孔表面通道在 yoz 平面速度分布(b) 微孔表面通道在 xoy 平面上的速度分布

图 3 微孔表面通道内的速度分布

Fig. 3 Velocity distribution on channels with microwell surfaces

2.2 微孔附近的动力学特征

流体微团的运动通常包括平移(速度)、旋转(角速度)、线应变(拉伸变形)和剪切应变(角变形)等四种基本形式,且上述运动通常会同时发生。与惰性粒子不同,微生物对其所受到来自流体的作用力更加敏感,这将影响其在物体表面的附着能力。

在流动中,微生物除受垂直于作用面的法向应力外,还受到粘性力作用。对于无自由液面的不可压缩流体,静压不影响流场的动力学组分,因此,应力张量全部由流动区域内的速度场决定。而速度场改变将影响运动学和动力学特征,例如旋涡、线变形速率和剪切应变等。由图 2(b)~(e)可得,微结构附近的流场呈显著的周期性变化,这势必引起变形速率和剪切应力也产生类似的变化特征。应力张量可表示为速度场和压力场之和,即

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - p\delta_{ij}$$

式中, p 为压强, τ_{ij} 和 δ_{ij} 为粘性应力张量和单位张量。

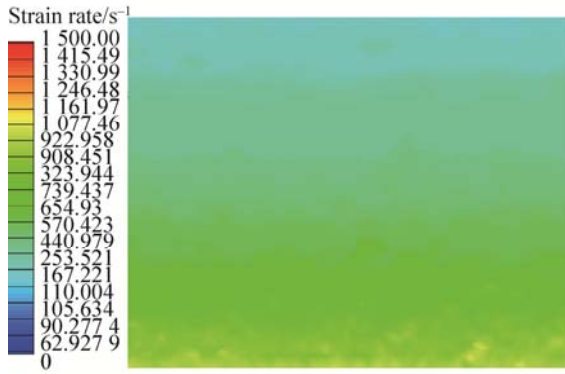
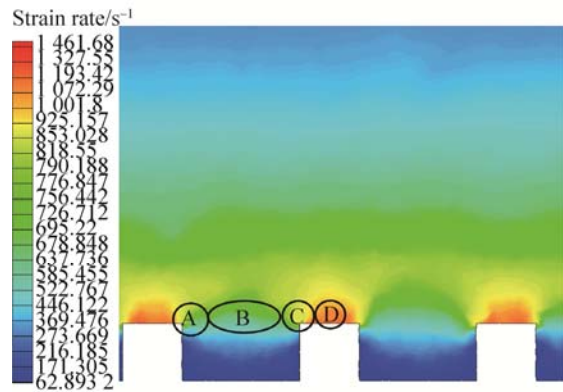
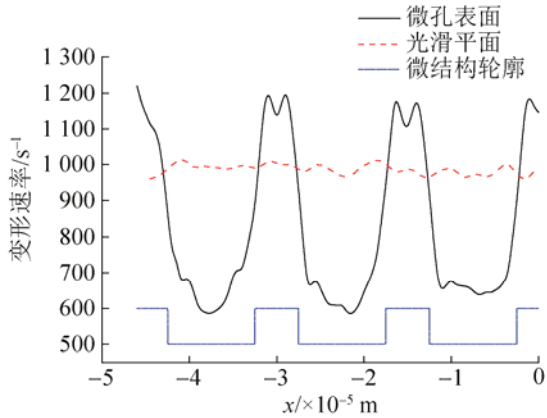
对于不可压缩粘性流体, τ_{ij} 为

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} = \begin{cases} 2\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} & (i = j) \\ \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) & (i \neq j) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_{ij} 为变形速率张量。由式(1)可知,对于常粘性系数流体,变形速率取决于速度场。对于微结构表面,其近壁区的微流体环境包括式(1)中的所有分量。对于在平面上充分发展的层流,边界层内速度分布可视为 Couette 流^[21]: 速度 v 和 w 在各方向上的梯度均为零; 速度 u 在 x 、 y 方向的速度梯度为零; 流体仅有沿 z 方向的速度梯度。因此,光滑平面上的粘性应力张量可简化为

$$\tau_{ij} = \mu \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial u}{\partial z} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial u}{\partial z} & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

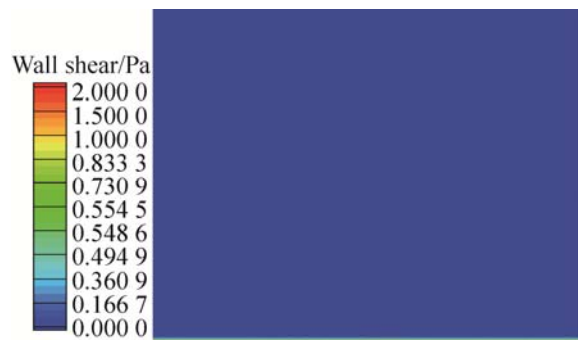
因此,在定常流中,微生物在平滑表面仅受恒定变形速率的作用,图 4(a)即证实了这一分析。但对于微孔表面,微生物将受到式(1)中不同变形速率分量的影响,如图 4(b)所示,微孔内的变形速率相对较小,但微脊上的变形速率波动较为显著。图 4(c)更直观地展示了光滑表面与微孔表面沿流向(x 轴)的变形速率。由图可知,沿流向的变形速率呈规律性波动: 在微孔上方变形速率较小,且低于光滑表面; 而在微脊两侧区域 A、C 上的变形速率迅速增大,且区域 A 和 C 上的最大值高于中间区域 D 处,这是因微孔上方流体的速度梯度相对较小,而在微脊两侧,因旋涡边缘与主流的相互作用,速度梯度迅速增大,致使变形速率提高; 在区域 D 处,速度梯度低于区域 A 和 C,致使变形速率降低,但微脊上的变形速率比光滑表面大。变形速率的波动特征体现了近壁区流场环境的复杂性,复杂多变的流场扰乱了微生物的附着环境,迫使微生物在微孔表面的附着变得困难。

(a) 光滑表面通道在 xoz 平面的变形速率分布(b) 微孔表面通道在 xoz 平面的变形速率分布(c) 光滑表面通道与微孔表面通道沿 x 轴的变形速率分布图4 光滑表面通道与微孔表面通道内的变形速率分布
Fig. 4 Strain rate distribution on channels with smooth and microwell surfaces

剪切应力在微生物附着过程中起着关键作用。图5给出了光滑表面与微孔表面通道内的剪切应力分布。图5(a)~(c)表明,光滑表面附近的剪切应力为一定值,而微孔表面上的剪切应力沿 x 、 y 方向随微孔位置呈周期性波动,剪切应力在微孔内非常小,在微脊上则较大。结合图5(d)可看出,剪切

应力最大值位于微脊靠近来流方向的区域C,在微脊区域D剪切应力出现小幅度减小,在微脊后侧区域A剪切力又有所增加。由于微脊表面上的壁面速度为零,微孔内旋涡造成微脊前侧区域C处的流体速度梯度较大,由此造成区域C的剪切应力总体上稍高于微脊区域D,而微脊后侧区域A的速度梯度较小,故剪切应力小于区域C。与光滑表面相比,微孔处的剪切应力均低于光滑表面,但在微脊上的平均剪切应力为1.24 Pa,高于光滑表面的1.01 Pa,这是因微结构内的旋涡可起到“滚动轴承”的减阻作用^[22],从而减小了微孔内的剪切应力;同时造成微脊上的速度梯度大于光滑表面,因此,其相应的剪切应力也相对较高。在微脊上,剪切应力的波动值为1.38 Pa,而在光滑表面近壁区的剪切应力接近一定值,由此表明:微结构表面上剪切应力波动的出现干扰了微生物的运动,使其较难粘附在微脊处。

图5(e)为微孔内底部区域E、F和G的剪切应力分布。可看出,微孔底面上的剪切应力变化较为平缓,沿流向呈抛物线变化,在底部中间区域F处达到最大,其波动幅值为0.092 Pa。由于在微孔内形成顺时针旋涡,区域F靠近旋涡中心,速度梯度相对较大,而区域E和G处的流速放缓,速度梯度较小。同时,由于旋涡的存在,使微孔侧壁剪切应力较大。微孔成为一个有限边界且具有较高剪切应力的孤立区域,微生物之间的信息传递受到限制,影响其群体感应行为^[23],从而抑制微生物在微孔内的聚集、粘附。

(a) 光滑表面通道在 xoz 平面上的剪切应力分布

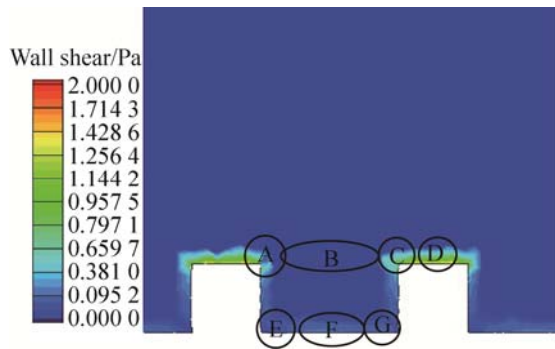
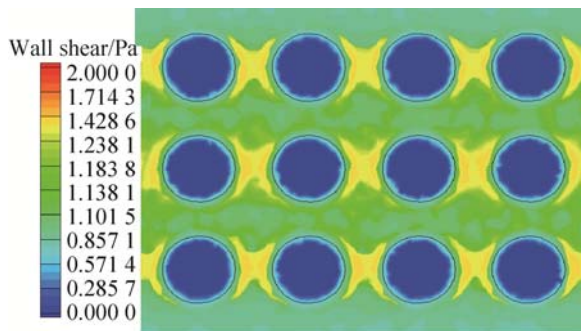
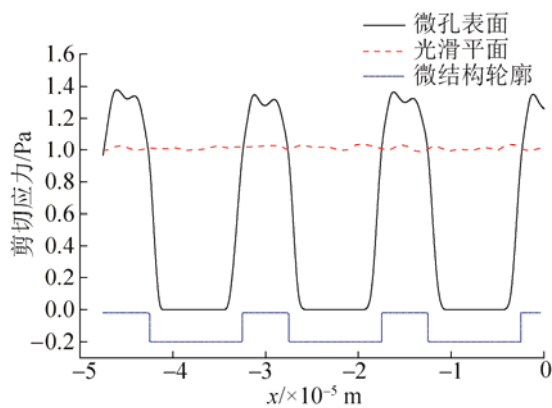
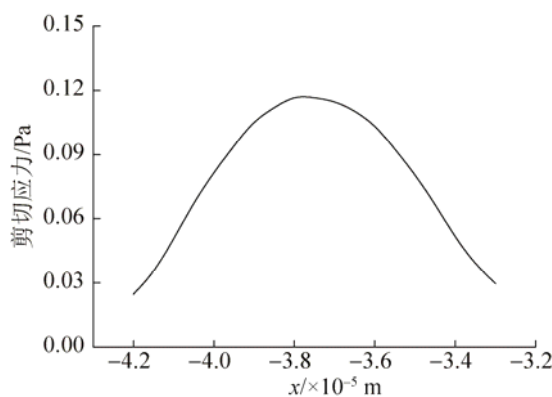
(b) 微孔表面通道在 xoz 平面上的剪切应力分布(c) 微孔表面通道在 xoy 平面的剪切应力分布(d) 光滑表面与微孔表面上沿 x 轴的剪切应力分布(e) 微孔底部沿 x 轴剪切应力分布

图 5 光滑表面通道与微孔表面通道内的剪切应力分布
Fig. 5 Shear stress distribution on channels with smooth and microwell surfaces

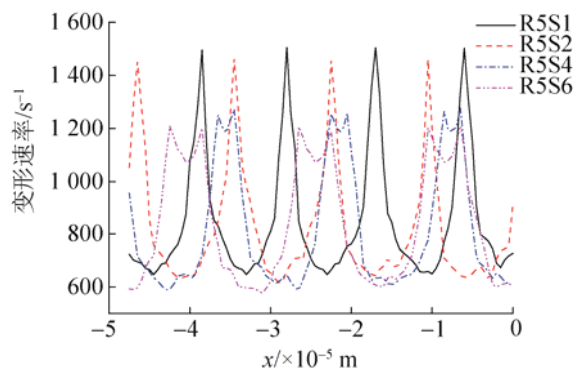
3 微孔结构对防污性能的影响

上述分析表明,壁面上的微结构可显著改变近壁区的运动学和动力学特征,从而实现微结构表面防污和自清洁功能。而微孔结构,如孔间距、孔径及其排列方式的不同,势必会引起近壁面流场环境的改变,进而影响其防污性能,下文将对此展开分析。

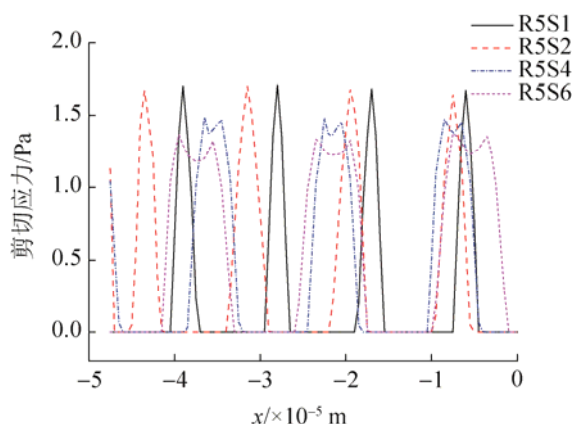
3.1 孔间距影响

孔间距变化对沿 x 轴的变形速率和剪切应力的影响如图 6(a)、(b)所示。随孔间距增大,变形速率在微脊上明显减小,而在微孔上方降低幅度较小;类似地,剪切应力在微脊上也显著减小,而在微孔上方剪切应力值接近一定值,与微脊相比可以忽略。这是因随孔间距增大,微孔内形成的旋涡与主流间的交互影响对微脊上的作用逐渐减弱,当孔间距较小时,微脊受旋涡左右两侧的影响效应叠加使变形速率和剪切应力值较大。而在较大孔间距(如 R5S4, R5S6)的微脊上,由微孔形成的叠加效应仅影响微脊两侧区域,而微脊中间区域所受影响较小,故微脊中间区域的变形速率和剪切应力低于两侧;同时,微孔内的旋涡效应被减弱,其两侧区域的最大值也相对较小。

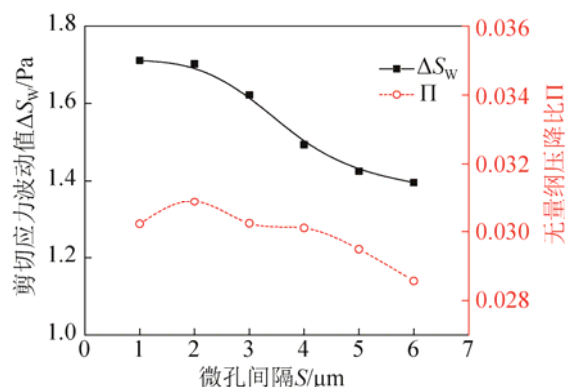
图 6(c)比较了孔间距对剪切应力波动和无量纲压降比的影响。随孔间距增大,其剪切应力波动值减小,当孔间距为 $1 \mu\text{m}$ 时,剪切应力波动幅值达到 1.71 Pa 。剪切应力波动值越大,表明在近壁区的微生物所受到的作用力越显著,微生物更难以形成基体膜^[24];同时,缩小孔间距可减少微生物的附着点^[25],进一步阻碍了微生物粘附。孔间距为 $2 \mu\text{m}$ 与 $5 \mu\text{m}$ 相比,其剪切应力波动值提高 27%。此结论与 Halder 等^[13]实验中的结果总体一致:其采用微孔进行微生物附着实验测试,结果显示,间距为 $2 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 的微孔,微生物附着率为 1.28%、2.25%, $2 \mu\text{m}$ 的微孔表面降低了 43% 的微生物附着。



(a) 不同孔间距下沿 x 轴的变形速率分布



(b) 不同孔间距下沿 x 轴的剪切应力分布



(c) 不同孔间距下的剪切应力波动值与无量纲压降比

图6 不同孔间距下相应量分布

Fig. 6 Distribution of main characteristic parameters under different microwell gaps

图6(c)还表明,采用微孔结构时,微通道内无量纲压降 Π 为正值,表明微孔结构在增强抗污能力的同时,还可减小流动阻力。随孔间距增大,压降比呈单驼峰曲线变化。当孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 时压降比为 0.0308 ,与孔间距为 $6\ \mu\text{m}$ 的压降比 0.0286 相比,其压降比提高 7.7% 。孔间距过小时,由于旋

涡部分从孔内“溢出”,干扰了相邻孔内的流动,从而造成流动阻力增加^[22]。孔间距过大时,流体所受微脊处的摩擦增大,由此造成流动阻力增大。故孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 的微孔表面通道减阻效果更佳。

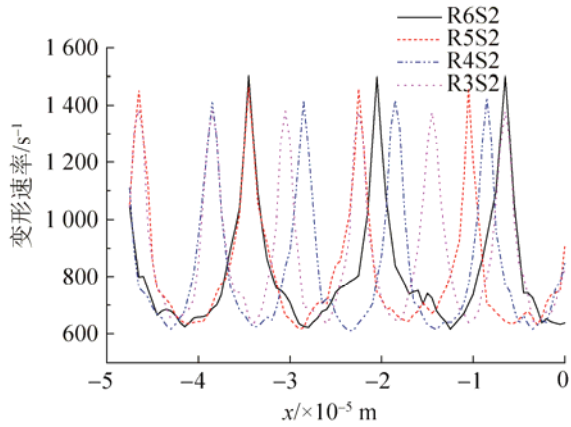
上述结果表明,随孔间距增大,近壁区的变形速率和剪切应力波动值降低,且增加了微脊上的附着点,不利于对微生物的控制;孔间距为 $1\ \mu\text{m}$ 时的剪切应力波动值比 $2\ \mu\text{m}$ 时大 0.58% ,但孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 时的减阻比 $0.1\ \mu\text{m}$ 时大 3% ,因此综合考虑,孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 的微结构表面具有更好的防污、减阻性能。

3.2 孔径影响

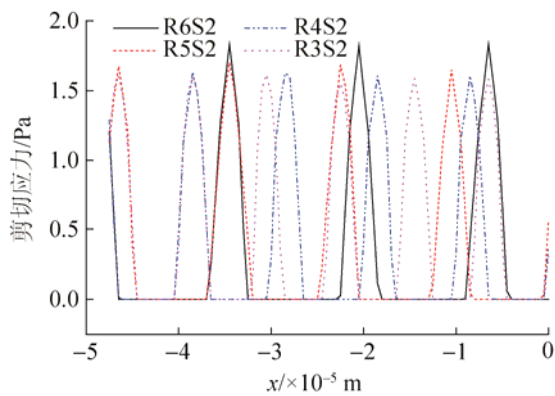
微孔尺寸的改变将影响微孔内旋涡区域的大小,进而引起微脊两侧的运动学和动力学特征变化。图7(a)~(b)为不同孔径下沿x轴的变形速率和剪切应力分布,该图表明:增大孔径提高了微脊上的变形速率和剪切应力及其峰值,同时扩大了微孔处的旋涡区,并使旋涡边缘区域与主流形成的速度梯度变化增大。

图7(c)为孔径对剪切应力波动和压降比的影响。由图可知:随孔径增大,剪切应力波动值提高,其中孔径为 $6\ \mu\text{m}$ 时,剪切应力波动幅值达到 $1.83\ \text{Pa}$;但对于文中的特征尺寸为 $2\text{--}5\ \mu\text{m}$ 的微生物,当孔径过大时,微孔上方区域随之扩大,使微孔内的流动环境变得较为平缓,并且会因附着面积的扩大反而有利于微生物附着。因此,存在一个最佳微结构,以避免微孔内剪切应力值较小的区域过大,并能提供最大剪切应力波动,从而提高微结构的防污和自清洁能力。

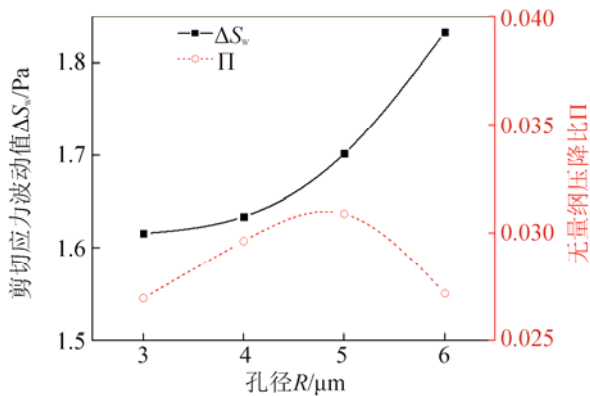
图7(c)还表明,随孔径增大,压降比呈单驼峰曲线变化,在孔径为 $5\ \mu\text{m}$ 时达到最大值 0.0308 。当孔径过大时,孔内的旋涡不仅消耗过多能量,而且微脊上较大的剪切应力将增加通道内的粘性阻力,因此, $6\ \mu\text{m}$ 孔径对应下的压降比减小,即通道减阻效果降低。综合考虑剪切应力波动值与压降比的变化,孔径为 $5\ \mu\text{m}$ 时微孔表面通道具有最佳的防污、减阻性能。



(a) 不同孔径下沿 x 轴的变形速率分布



(b) 不同孔径下沿 x 轴的剪切应力分布



(c) 不同孔径下的剪切应力波动值与无量纲压降比

图 7 不同孔径下相应量分布

Fig. 7 Distribution of main characteristic parameters under different microwell radius

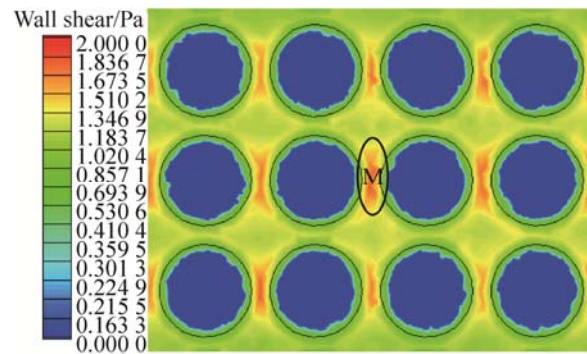
3.3 微孔排列方式的影响

微孔排列方式通过影响近壁面区的流场环境, 进而改变微结构通道的防污性能。图 8(a)~(b)比较了微孔顺列和错列布置方式下微孔通道在 xoy 平

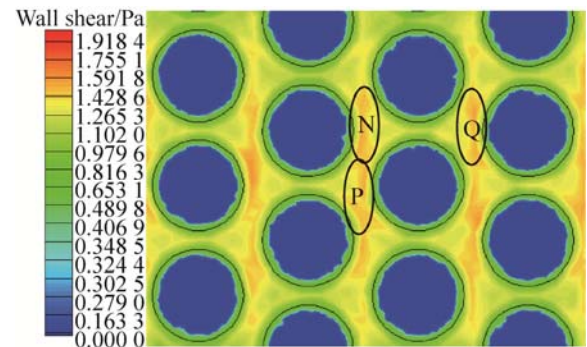
面上的剪切应力分布。两种排列方式下, 剪切应力最大值均位于微脊上; 错列布置的剪切应力最大值分布区域较广, 集中在微孔上下游区域 N, P, Q 的微脊上, 而顺列布置的剪切应力最大值则集中在顺流向的微脊区域 M 上。

图 8(c)~(d)表明, 错列布置时微孔两侧的变形速率和剪切应力的分布与顺列相应位置处基本一致, 但顺列布置的最大值高于错列布置; 错列布置时孔间(N, Q 之间的区域)的变形速率和剪切应力变化较平缓。这是因错列布置时的微脊面积较大, 微孔内产生的旋涡仅能影响微脊两侧的较小区域; 而顺列布置时微脊受微孔内旋涡左右两侧的影响效应叠加使变形速率和剪切应力值较大。

另外, 顺列布置时的剪切应力波动幅值高于错列布置, 且错列布置时区域 N, Q 之间的较为平缓的平台环境为微生物提供了较舒适的附着点, 因此顺列布置时的微孔防污效果更加突出。顺列、错列布置时的压降比分别为 0.030 8、0.030 7, 即顺列布置的微孔结构具有更好的减阻效果。因此, 顺列布置的微孔结构具有更好的防污减阻性能。



(a) 顺列布置方式下 xoy 平面剪切应力分布



(b) 错列布置方式下 xoy 平面剪切应力分布

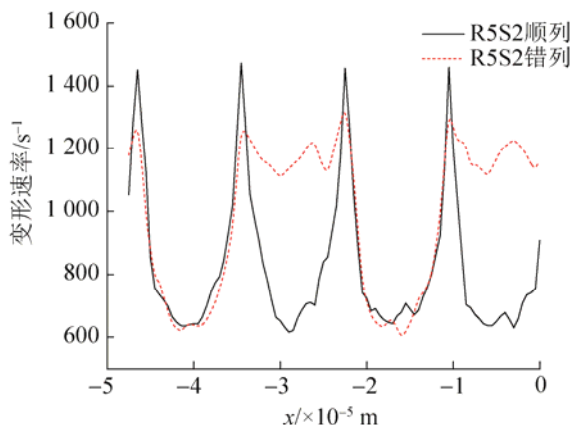
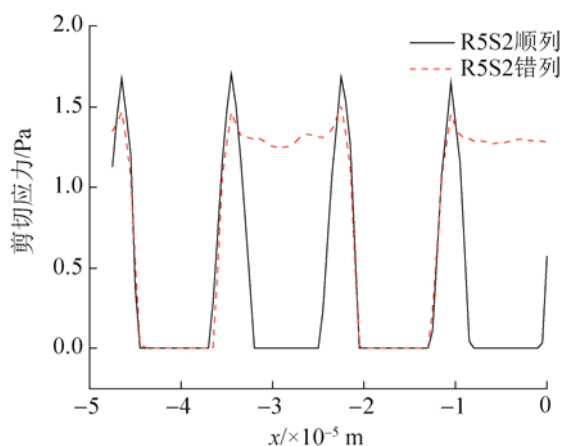
(c) 不同排列方式下沿 x 轴变形速率分布(d) 不同排列方式下沿 x 轴剪切应力分布

图8 不同排列方式下变形速率和剪切应力分布

Fig. 8 Distribution of strain rate and wall shear stress under different arrangements

综合微孔附近的运动学和动力学特征, 及微孔尺寸和排列方式的影响, 在本文研究中, 孔径为 $5\ \mu\text{m}$ 、孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 、且顺列布置的微孔表面具有最佳的防污减阻效果。

4 结论

(1) 微结构内旋涡的作用, 使微孔表面上的速度、变形速率及剪切应力随微孔呈规律性波动, 近壁区流场的波动干扰了微生物的运动, 使其较难粘附在微脊上; 同时, 微孔成为一个有限边界且具有较高剪切应力的孤立区域, 抑制了微生物在微孔内的聚集、附着。

(2) 孔间距越大, 近壁区的变形速率及剪切应力波动越小, 近壁区流场越平缓, 并且微脊上

的附着点增多, 更不利于对微生物的控制; 孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 时, 微通道具有较好的防污、减阻性能。

(3) 随孔径增大, 微孔内旋涡区域扩大, 近壁区的变形速率和剪切应力波动增大, 但微孔内的微生物附着点也将增大; 同时, 过大的微孔造成通道阻力增加。综合考虑, 孔径为 $5\ \mu\text{m}$ 时为最优的微孔尺寸。

(4) 顺列布置的微孔表面由于相邻微孔内旋涡边缘与主流交互作用的叠加, 使近壁区的变形速率和剪切应力波动大于错列布置; 另外, 顺列布置的微孔表面通道具有较好的减阻效果。孔径为 $5\ \mu\text{m}$ 、孔间距为 $2\ \mu\text{m}$ 、且微孔顺列布置的微结构表面具有最佳的防污减阻效果。

参考文献:

- [1] Yebra D M, Kiil S, Dam-johansen K. Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings [J]. *Progress in Organic Coatings (S0300-9440)*, 2004, 50(2): 75-104.
- [2] 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.
- [3] 曹生现, 崔长龙, 关晓辉, 等. 微生物污垢对典型换热器传热影响研究 [J]. *工程热物理论*, 2015, 36(3): 631-635.
Cao Shengxian, Cui Changlong, Guan Xiaohui, et al. Study on influence of biofouling on the typical heat exchanger transfer [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(3): 631-635.
- [4] 张金伟, 郑纪勇, 王利, 等. 仿生防污材料的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2014, 33(2): 86-94.
Zhang Jinwei, Zheng Jiyong, Wang Li, et al. Progress and prospect of antifouling materials based on biomimetic technology [J]. *Materials China*, 2014, 33(2): 86-94.
- [5] Briand J F, Djeridi I, Jamet D, et al. Pioneer marine biofilms on artificial surfaces including antifouling coatings immersed in two contrasting French Mediterranean coast sites [J]. *Biofouling (S0892-7014)*, 2012, 28(5): 453-463.
- [6] Rosenhahn A, Schilp S, Kreuzer H J, et al. The role of “inert” surface chemistry in marine biofouling prevention [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics (S1463-9076)*, 2010, 12(17): 4275-4286.

- [7] 高海平, 蔺存国, 张桂玲, 等. 表面微结构防污研究 [J]. 涂料工业, 2010, 40(1): 75-79.
Gao Haiping, Lin Cunguo, Zhang Guiling, et al. Study on antifouling properties of surface microtopographies [J]. Paint and coatings industry, 2010, 40(1): 75-79.
- [8] Gule N P, Begum N M, Klumperman B. Advances in biofouling mitigation: A review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology (S1064-3389), 2016, 46(6): 535-555.
- [9] 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.
- [10] Petronis Š, Berntsson K, Gold J, et al. Design and microstructuring of PDMS surfaces for improved marine biofouling resistance [J]. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition (S0920-5063), 2000, 11(10): 1051-1072.
- [11] Hoipkemeier-wilson L, Schumacher J F, Carman M L, et al. Antifouling potential of lubricious, micro-engineered, PDMS elastomers against zoospores of the green fouling alga *Ulva* (*Enteromorpha*) [J]. Biofouling (S0892-7014), 2004, 20(1): 53-63.
- [12] Carman m L, Estes T G, Feinberg A W, et al. Engineered antifouling microtopographies—correlating wettability with cell attachment [J]. Biofouling (S0892-7014), 2006, 22(1): 11-21.
- [13] 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.
- [14] 邵静静, 蔺存国, 张金伟, 等. 鲨鱼皮仿生防污研究 [J]. 涂料工业, 2008, 38(10): 39-41.
Shao Jingjing, Lin Cunguo, Zhang Jinwei, et al. Study on shark skin's bionical and antifouling properties [J]. Paint and Coatings Industry, 2008, 38(10): 39-41.
- [15] 郑纪勇, 蔺存国, 张金伟. 一种表面具有十字形规则微结构的防污材料的制备方法 [P]. 中国: CN102417792A. 2012-04-18.
Zheng Jiyong, Lin Cunguo, Zhang Jinwei. Preparation method of antifouling material with cross-shaped regular microstructure on the surface [P]. China: CN102417792A. 2012-04-18.
- [16] Callow J A, Callow M E. Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings [J]. Nature Communications (S2041-1723), 2011, 2(1): 244.
- [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] Koehl M R A. Mini review: hydrodynamics of larval settlement into fouling communities [J]. Biofouling (S0892-7014), 2007, 23(5): 357-368.
- [19] 刘占一, 胡海豹, 宋保维, 等. 不同间隔脊状表面的减阻数值仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6025-6028.
Liu Zhanyi, Hu Haibao, Song Baowei, et al. Numerical simulation research about riblet surface with different spacing [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21(19): 6025-6028.
- [20] Sombatsompop K, Visvanathan C, Aim R B. Evaluation of biofouling phenomenon in suspended and attached growth membrane bioreactor systems [J]. Desalination (S0011-9164), 2006, 201(1): 138-149.
- [21] Friedmann E. The optimal shape of riblets in the viscous sublayer [J]. Journal of Mathematical Fluid Mechanics (S1422-6928), 2010, 12(2): 243-265.
- [22] 吴正人, 郝晓飞, 戎瑞, 等. 脊状表面翼型叶片减阻机理研究 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1355-1361.
Wu Zhengren, Hao Xiaofei, Rong Rui, et al. Study on drag-reduction mechanism of riblet surface on aerofoil blade of centrifugal fan [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(6): 1355-1361.
- [23] Kim M K, Ingremeau F, Zhao A, et al. Local and global consequences of flow on bacterial quorum sensing [J]. Nature Microbiology (S2058-5276), 2016, 1(1): 15005.
- [24] Miura Y, Watanabe Y, Okabe S. Membrane biofouling in pilot-scale membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater: impact of biofilm formation [J]. Environmental Science & Technology (S0013-936X), 2007, 41(2): 632-638.
- [25] 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.