第46卷第2期 东北大学学报(自然科学版) Vol.46,No.2
2025年2月 Journal of Northeastern University(Natural Science) Feb. 2025

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230264

柔性柱初始倾角对微通道传热增强的影响

于珂凡[1], 赵 亮[1], 董 辉[1], 何永清[2]

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 重庆工商大学 微纳系统与智能传感重庆市重点实验室, 重庆 400067)

摘 要: 为解决电子器件的散热问题,对具有不同初始倾角的柔性柱微通道内的流动与传热特性进行了数值研究. 此外,还探讨了柔性柱的动态特性和倾角对流体传热性能、水动力摩擦系数和总水热效率的影响. 结果表明,柔性柱倾角为0.2π时,产生1.25 μm的小振幅,不利于涡流的产生,而在完全扑动模式下的柔性柱可以产生周期性涡流,更有利于边界层的扰动和冷热流体的混合,从而强化传热. 在雷诺数 Re 为800~1 200的范围内,柔性柱存在最佳的倾角0.6π,在最佳工况下,以较高的机械损失为代价,可以使流体传热性能(Nu_{tot})提高63.5%,总水热效率(η)提高7.5%.

关 键 词: 强化传热;柔性涡发生器;微通道;任意拉格朗日-欧拉法;数值模拟

中图分类号: TK 124; TK 172 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)02-0042-09

Effect of Initial Inclination Angle of Elastic Pillars on Heat Transfer Enhancement in Microchannel

YU Ke-fan[1], *ZHAO Liang*[1], *DONG Hui*[1], *HE Yong-qing*[2]

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Micro Nano Systems and Intelligent Sensing, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China. Corresponding author: DONG Hui, E-mail: dongh@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To solve the heat dissipation problem of electronic devices, the flow and heat transfer features of elastic pillar with different initial inclinations in microchannel are numerically investigated. Furthermore, the influences of dynamic characteristics and inclination angle of the elastic pillar on fluid heat transfer performance, hydrodynamic friction factor, and overall hydrothermal efficiency are probed. The results indicate that 1.25 μm oscillation is generated when the inclination angle of the elastic pillar is 0.2π. This small amplitude is not conducive to the generation of vortices. On the other hand, an elastic pillar in a fully flapping mode can generate periodic vortices, which is more conducive to the disturbance to the boundary layer and the mixing of cold and hot fluids, thereby enhancing heat transfer. In the range of Re from 800 to 1 200, the elastic pillar has the optimal inclination angle of 0.6π. Under the optimum working condition, at the expense of high mechanical loss, the heat transfer performance of the fluid can be improved by 63.5%, and the total hydrothermal efficiency can be increased by 7.5%.

Key words: heat transfer enhancement; flexible vortex generator; microchannel; arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method; numerical simulation

海草在水中自发地摇摆,导致水底产生小涡减缓流速[1].其根源在于海草本身是一种柔性物质,可以响应来自流体流动的应力而变形,减少流动阻力.基于此,一些学者提出一种仿海草的柔性结构[2-5],通过柔性结构的扑动来形成涡流,强化传热的同时有效减阻,用于解决电子器件的散热问题.

Mirzaee等[6]在微通道的底壁安装单个柔性

收稿日期: 2023-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176067); 河北省杰出青年科学基金资助项目(E2022202139); 河北省自然科学基金资助项目(E2021202163).

作者简介: 于珂凡(1998—),女,辽宁大连人,东北大学硕士研究生; 董 辉(1969—),男,辽宁黑山人,东北大学教授,博士生导师.

柱，通过柱子振荡产生横向涡流，使冷热流体有效混合，从而显著降低了热壁面的温度. Ghalambaz 等[7]进一步使用任意拉格朗日-欧拉(ALE)法来模拟柔性柱运动与其周围流体间的相互作用. 观察到柔性柱的振幅越大，边界层附近产生的扰动越强. 基于以上单个柔性柱表现出的强传热性能，Wang 等[8]在微通道的侧壁安装了2个柔性柱，结果表明，后柔性柱受到前柔性柱产生的流体力而出现振动，不断地产生小而规则的涡流，明显干扰了边界层，促进流体与壁面间的热传导. 文献[9-12]研究了两侧设有对称或非对称柔性柱的微通道散热情况. 微通道两侧设置1对非对称柔性柱，可以产生更强烈的涡流扰动，热效率比对称布置的高135%. 还发现当抗曲刚度相同时，微通道侧壁具有2个柔性柱比单个的有更大的热性能[13]. 然而上述的结果只限于垂直布置的柔性柱. 为了进一步探究柔性柱结构布局的影响，一些学者在此基础上又引入了具有初始倾角的柔性柱. Lee 等[13]通过浸没边界法(immersed boundary method，IBM)研究了单个柔性柱的初始倾角对流场和运动模式的影响，发现具有不同倾角的柔性柱扑动极有可能影响流体的混合质量和传热. Kang 等[14]在微通道两侧壁面设置不对称且具有初始倾角的柔性柱，发现当初始倾角为75°，间隙距离为柔性柱长度的2.4倍时，微通道热性能提高了122%. 以上研究都是基于1种柔性涡发生器，文献[15-17]进一步尝试将柔性柱与刚性涡发生器结合，探究其强化传热效果. 发现柔性柱产生的涡旋与刚性涡发生器产生的涡旋混合，这些涡旋破坏了热边界层，并阻止其重新生长，从而显著提高了传热率. 相比于刚性柱的情况，热性能系数增加了40%左右，所以将2种涡发生器组合使用是1种新型有效的几何构型.

目前，针对柔性结构的研究多集中在竖直布置的柔性板或柔性柱的传热性能分析上. 由于柔性柱的倾角对其扑动动力学起着至关重要的作用，而对于具有初始倾角的柔性结构研究却较少，且主要采用浸没边界法(IBM)，虽然有效提高了求解效率，但同时也导致了较低的求解精度. 不同于以往的研究，本文考虑到微通道中的流体与固体之间复杂的相互作用，将刚性涡发生器与带有初始倾角的柔性柱结合，采用高精度的任意拉格朗日-欧拉法探究流体-固体相互作用而引起的涡流结构. 通过数值模拟调节初始倾角来更好地探索传热的最佳条件. 计算基于有限元法，时间积分采用后向微分公式，通过直接法求解线性方程. 详细地研究在不同 Re 下，柔性柱的初始倾角对微通道传热性能、摩擦损失以及柔性柱动态模式的影响. 最终获得同时满足强化传热和流动减阻需求的最佳倾角柔性柱结构，为工业应用提供理论技术支撑.

1　物理模型与计算方法

图1显示了二维微通道的几何模型，相关的参数如表1所示. 圆柱形障碍物放置在靠近微通道入口的中心线上，具有一定初始倾角的柔性柱布置在微通道的侧壁上，二维柔性柱的一端固定在壁面上，另一端不受限制. 微通道中的工作流体为去离子水，柔性柱的材料为硅橡胶，具体参数如表2所示.

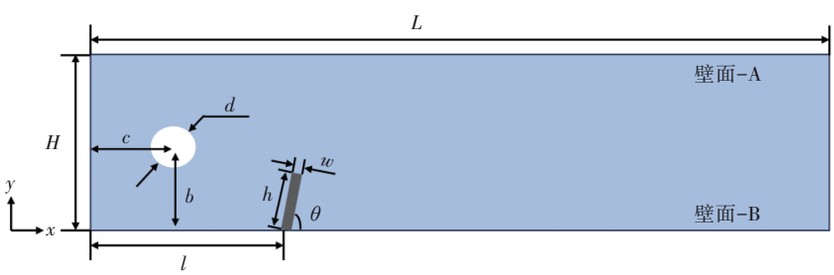

图1　二维微通道几何示意图

Fig. 1　Geometric schematic diagram of two-dimensional microchannels

流体的体积力作用在柔性柱上，导致弯曲变形，柔性柱内的 von-Mises 应力和流体施加的体积力使柔性柱呈现周期性的扑动. 微通道入口处采用速度 u_{in}，

$$u_{in}(0,y,t)=\frac{3}{2}\bar{u}\left(\frac{4y}{H^2}\right)(H-y). \tag{1}$$

其中：$\bar{u}$ 是入口处的平均速度；H 是微通道的高度；t 是时间；y 是与微通道底部间的距离. 出口为

表1 二维微通道几何参数

Table 1 Geometric parameters for two-dimensional microchannels

参数	数值	参数	数值
微通道宽度 H/μm	35w	圆柱障碍物离壁面B的距离 b/μm	17.5w
微通道长度 L/μm	150w	圆柱障碍物直径 d/μm	3w
柔性柱离流动入口的距离 l/μm	42w	柔性柱宽度 w/μm	14
圆柱障碍物离流动入口的距离 c/μm	11w	柔性柱高度 h/μm	13w
柔性柱倾角 θ	0.2π ~ 0.8π		

表2 柔性柱材料物性

Table 2 Physical properties of elastic pillar material

物性参数	数值	物性参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	2 500	泊松比	0.48
弹性模量/MPa	7	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	2.5
比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	1 200		

压力出口,设置为0 Pa.此外,定义的克努森数在0.1和0.001之间,因此在微通道壁和柔性柱边界上采用麦克斯韦滑移条件[18]:

$$u=u_{\mathrm{w}}+\sigma_{\mathrm{v}}\kappa\frac{\mathrm{d}u_x}{\mathrm{d}y}+\sigma_{\mathrm{T}}v\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\ln T_{\mathrm{w}}\right). \tag{2}$$

其中:u_{w}=0 m/s为微通道的壁面速度;κ为导热系数;u_x为流体速度在x方向的分量;σ_{v}和σ_{T}分别是黏性滑移系数和温度滑移系数,定义为$\sigma_{\mathrm{v}}=\left(2-\alpha_{\mathrm{v}}\right)/\alpha_{\mathrm{v}}$和$\sigma_{\mathrm{T}}=3/4$,$\alpha_{\mathrm{v}}$表示切线动量调节系数(tangetial momentum adjustment coefficient, TMAC),取0.9;v为运动黏度;T_{w}为侧壁温度.基于通道入口平均速度和刚性涡发生器直径,雷诺数Re_{d}设置为100.基于通道的水力直径,雷诺数Re设置为800~1 200,以确保整个通道处于层流状态.微通道入口和两侧壁面采用恒定温度边界条件,分别为300 K和360 K.其他固体边界,如柔性柱的壁面,假定处于绝热状态.

2 数值方法

2.1 控制方程

对二维微通道的流动传热问题进行以下假设:层流、瞬态流动;不考虑重力作用;流体为牛顿不可压缩黏性流体.本文采用Hirt等[19]提出的ALE公式求解变形网格上的流动方程,通过移动网格速度$\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}$将柔性柱的变形引入到N-S方程中.基于以上假设,流动传热控制方程如下[20]:

连续性方程为

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0; \tag{3}$$

动量方程为

$$\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\left(\left(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}\right)\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u}=-\frac{1}{\rho_{\mathrm{f}}}\nabla p+v\nabla^2\boldsymbol{u}; \tag{4}$$

能量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\left(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}\right)\cdot\nabla T=a\nabla^2T. \tag{5}$$

其中:∇是梯度算子;$\boldsymbol{u}$是流体速度矢量;$\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}$是网格速度;$p$是压力;$\rho_{\mathrm{f}}$是流体密度;$T$是温度;$a$是热扩散率.

固体变形方程如式(6)所示[21]:

$$\rho_{\mathrm{s}}\frac{\partial^2s}{\partial t^2}=\nabla\cdot\boldsymbol{F}\boldsymbol{\sigma}. \tag{6}$$

其中:s表示固体位移;ρ_{s}是固体密度;$\boldsymbol{F}$是变形梯度张量;$\boldsymbol{\sigma}$是第二类Piola-Kirchhoff应力张量.

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{I}+\nabla\boldsymbol{u}, \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\sigma}=2\frac{\partial W}{\partial\boldsymbol{C}}. \tag{8}$$

其中:$\boldsymbol{I}$是单位张量;W是应变能密度函数;$\boldsymbol{C}$表示右柯西-格林变形张量,其定义为

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}. \tag{9}$$

基于不同的应变能密度函数W开发了不同的超弹性材料模型.在本文中,采用了Neo-Hookean模型[22],其中应变能密度函数W定义为

$$W=\frac{1}{2}\mu\left(\boldsymbol{I}_1^C-3\right)-\mu\ln\boldsymbol{J}+\frac{1}{2}\lambda\left(\ln\boldsymbol{J}\right)^2, \tag{10}$$

$$\mu=\frac{E}{2\left(1+v\right)}, \tag{11}$$

$$\lambda=\frac{vE}{\left(1+v\right)\left(1-2v\right)}. \tag{12}$$

其中:$\boldsymbol{I}_1^C$是张量$\boldsymbol{C}$的第一不变量;μ和λ是与弹性模量和泊松比相关的Lame常数;E是弹性模量;$\boldsymbol{J}$是变形梯度张量$\boldsymbol{F}$的行列式.

2.2 特征参数

衡量微通道内流体传热能力的时间平均努塞尔数和线平均努塞尔数定义如下[23]:

$$\overline{Nu}\left(x\right)=\frac{1}{t}\int_0^t\frac{q_{\mathrm{w}}\left(x,t\right)H}{k\left(T_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{b}}\left(x,t\right)\right)}\mathrm{d}t, \tag{13}$$

$$\overline{\overline{Nu}}=\frac{1}{L}\int_0^L\overline{Nu}\left(x\right)\mathrm{d}x. \tag{14}$$

其中:q_{w}是壁面两侧的热通量平均值;L是微通道

长度；T_w是壁面温度；T_b是流体温度，其表达式为

$$T_b(x,t)=\frac{\int_0^H \boldsymbol{u}(x,y,t)T(x,y,t)\mathrm{d}y}{\int_0^H \boldsymbol{u}(x,y,t)\mathrm{d}y}. \tag{15}$$

将水热效率与光滑微通道进行比较，以研究柔性柱微通道的整体性能[24]. 微通道的总水热效率考虑热交换能力和机械损失，其定义如下：

$$\eta=\left(\frac{Nu_{tot}}{Nu_0}\right)\left(\frac{f}{f_0}\right)^{-\frac{1}{3}}. \tag{16}$$

其中：Nu_{tot}是壁面总努塞尔数；下标 0 对应于光滑的微通道；f是摩擦系数，衡量流体流动过程中的机械损失，定义为

$$f=\frac{2H}{L}\frac{\Delta p}{\rho\bar{u}^2}. \tag{17}$$

式中：ρ表示流体密度；Δp表示压降，其定义为

$$\Delta p=p_{in}-p_{out}. \tag{18}$$

无量纲时间和无量纲长度的定义如下：

$$t^*=\frac{t\bar{u}}{H}, \tag{19}$$

$$x^*=\frac{x}{H}. \tag{20}$$

3　计算结果与讨论

3.1　模型验证

用 Turek 等[25]提出的数值基准 FSI2 验证当前的流固耦合问题. 如图 2 所示，在微通道的上游放置 1 个圆柱形障碍物，障碍物后放置 1 个柔性柱. 将本文的数值模拟结果与 Turek 等[25]的数值基准进行比较. 如图 3 所示，柔性柱的尖端位移的相对偏差最大为 3.5%. 为了保证当前流固耦合模型的准确性，本文继续对 Dadvand 等[15]的数值模拟结果进行验证. 在相同的工况下，监测微通道的壁面 Nu 和柔性柱的尖端振动情况. 如图 4 所示，模拟值与 Dadvand 等[15]的结果非常一致，壁面 Nu 的相对偏差在 0.7%~2.7% 之间，柔性柱尖端位移的相对偏差在 0.5%~3.3% 之间，因此建立的模型可以准确预测微通道中的流体流动传热情况.

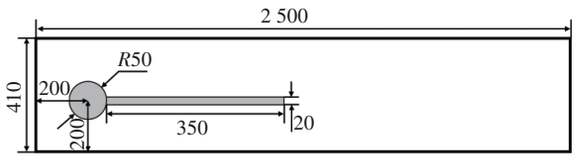

图 2　Turek 等[25]提出的物理模型图（单位：mm）

Fig. 2　Physical model diagram proposed by Turek et al [25]（unit：mm）

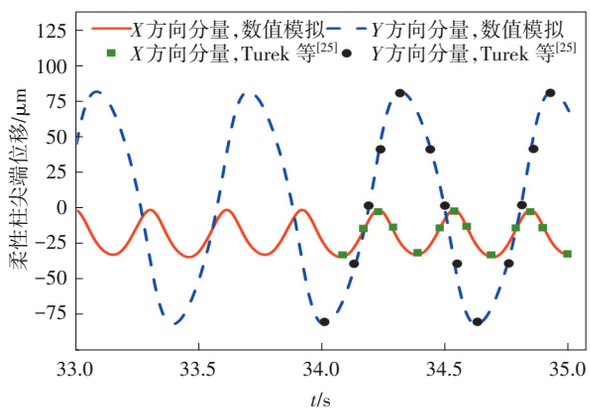

图 3　柔性柱尖端位移

Fig. 3　Displacement of flexible pillar tip

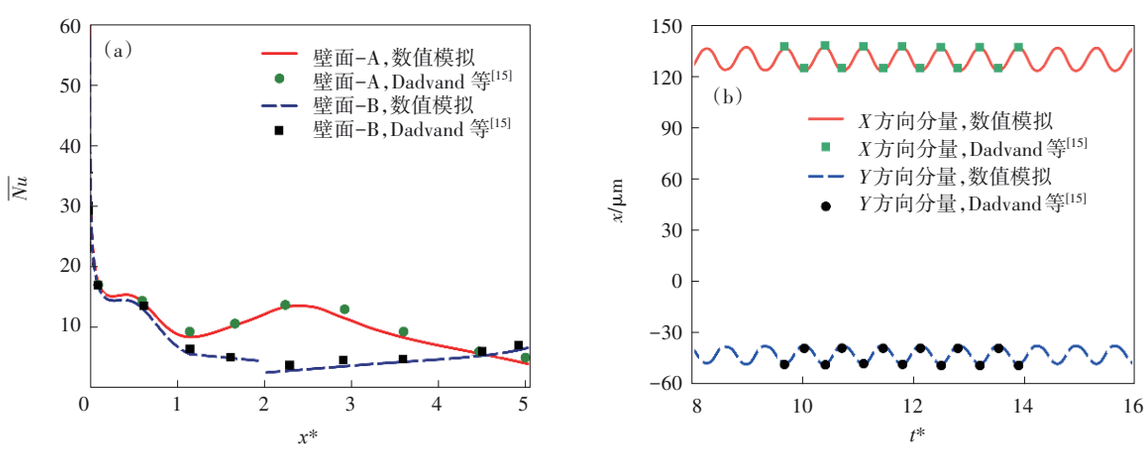

图 4　当前研究与 Dadvand 等[15]模拟结果对比

Fig. 4　Comparison between present work and simulation results by Dadvand et al [15]

（a）—时间平均局部努塞尔数；（b）—柔性柱尖端位移.

3.2 网格无关性验证

为了验证结果的网格独立性,对倾角0.5π的柔性柱微通道进行了数值模拟.如图5所示,该网格在微通道侧壁面和流固耦合界面进行了适当的细化,对流体域施加移动网格技术,流体和固体网格随着固体的移动或变形而变形.

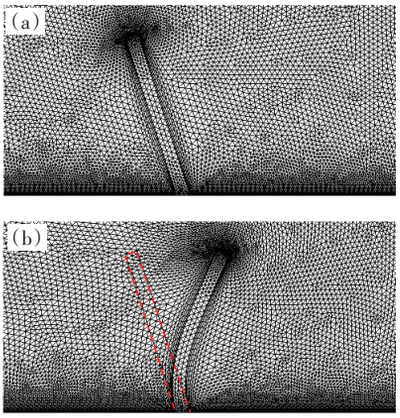

图5 倾角0.5π的柔性柱微通道网格划分

Fig. 5 Mesh division of elastic pillar microchannels with an inclination angle of 0.5π

(a)—壁面处网格细化;(b)—移动网格.

表3计算了不同网格单元数下的微通道壁面的总努塞尔数.可以看出,当网格数为128 000时,相对误差小于1%,获得了很好的精度.

表3 倾角0.5π的柔性柱的网格无关性验证

Table 3 Verification of grid independence for elastic pillar with an inclination angle of 0.5π

网格数	Nu_{tot}	误差/%	计算时间/h
579 59	33.199	12.3	8.65
103 348	33.441	11.7	22.47
128 000	37.555	0.8	34.43
148 102	37.867	0.0	48.98

3.3 柔性柱倾角对微通道散热的影响

如图6所示,在带有刚性涡发生器的矩形微通道中引入1个带有初始倾角的柔性柱.当倾角右倾0.2π时,柔性柱的偏转接近壁面,对流体的扰动影响较小.随着倾角的增加,当柔性柱逐渐左倾时,微通道内对流体的堵塞率增加,在壁面-A附近形成高流速区,流体流速达到2.5 m/s,强化了壁面-A附近的对流传热.其中倾角为0.6π的流体流速整体最高,达到2.75 m/s.刚性涡发生器产生周期性涡流作用在柔性柱上,导致微通道下游区域的壁面-B附近形成一系列涡旋(图6),这些涡旋破坏了热边界层的形成,强化了流体与壁面-B间的热传导.

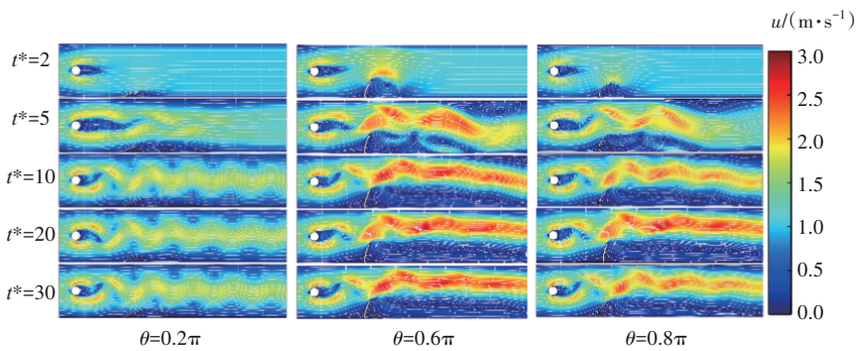

图6 不同柔性柱倾角下微通道的瞬态速度云图和流线图

Fig. 6 Transient velocity cloud and streamline diagrams of microchannels with different inclination angles of elastic pillar

微通道内流体整体涡流强度为-20 ~ 20 s^{-1}.如图7所示,当倾角为0.2π时,刚性涡发生器产生的周期性涡流交替脱落.柔性柱贴近壁面扑动,产生细长的涡流.这2种涡流之间没有发生混合,不利于流体内部之间的传热.随着倾角逐渐左倾,刚性涡发生器产生的负涡流(C)与柔性柱产生的负涡流(L)充分混合,大大提高了传热效率.当负涡流L向下游区域倾斜时,由于负涡流L引起的诱导,正涡流分离到壁面-A区域.其中,倾角为0.6π的柔性柱,混合涡流强度最高为17.06 s^{-1}.当倾角为0.8π时,同样产生连续混合的涡流,涡流强度为10.13 s^{-1}.

如图8所示,不同倾角下的柔性柱都呈现扑动模式,当倾角等于0.6π时柔性柱的扑动幅度最大,称为最佳倾角.其中倾角小于0.5π时,扑动幅度随着倾角的增加而增加,这与Jing等[17]的结果一致.当倾角为0.2π时,柔性柱的扑动幅度很小,仅达到1.25 μm.较小的振幅不利于涡流的产生和流体的传热,但是会减小微通道的压力损失.随着倾角的增加,柔性柱扑动幅度变大,最大达到12.74 μm.由于强烈的扑动,可以产生连续的涡流,使微通道核心中的冷流体与侧壁附近的热

流体结合，强化壁面的传热．图9通过快速傅里叶变换得到柔性柱尖端谐波振荡的频率，发现主频率在1.57 Hz左右．其中倾角为0.6π的柔性柱主频率最小，达到1.50 Hz. 图9a中主要有1个主谐波模式，在图9b~9d中观察到二次谐波模式．由图可知，柔性柱的扑动幅度很大程度上决定了微通道的传热情况，但是频率对传热的影响不大．

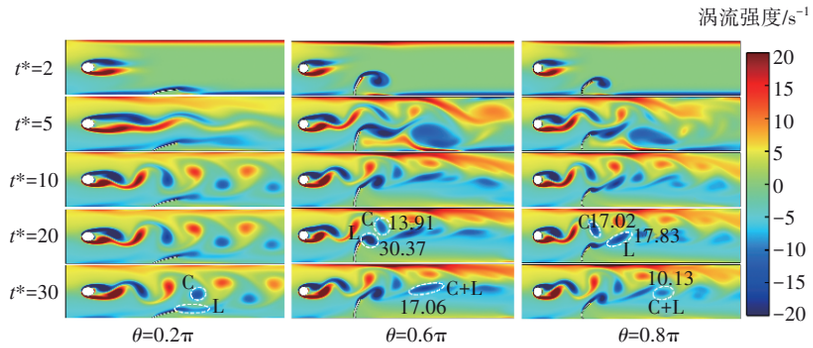

图7　不同柔性柱倾角下微通道的瞬态涡流强度云图

Fig. 7　Transient vorticity cloud pictures of microchannels with different inclination angles of elastic pillar

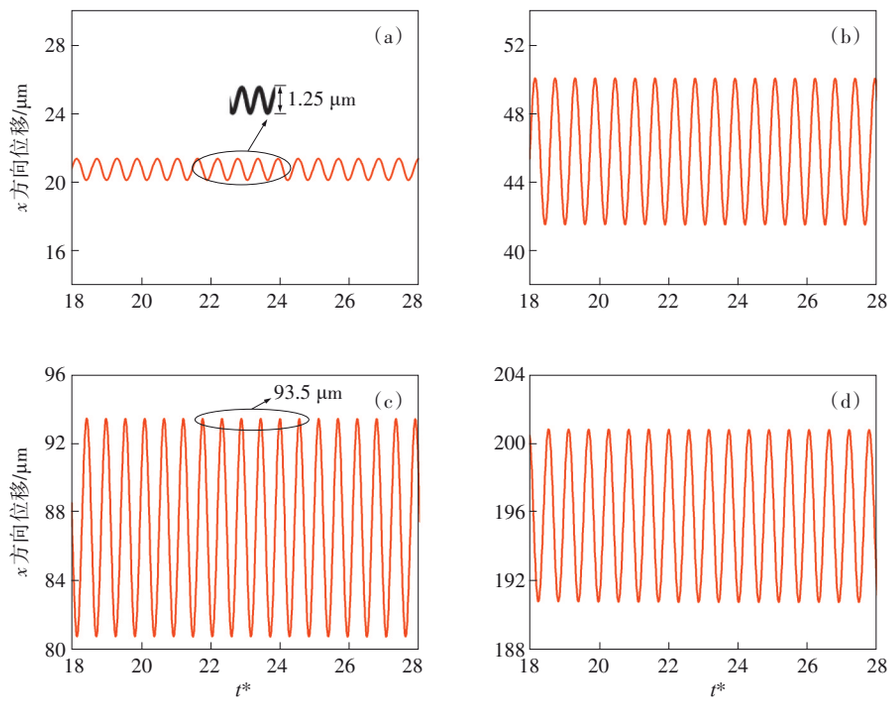

图8　不同倾角下柔性柱自由端x方向的尖端位移

Fig. 8　Tip displacement of the x-component at the end of an elastic pillar with different inclination angles

(a)—θ=0.2π；(b)—θ=0.4π；(c)—θ=0.6π；(d)—θ=0.8π.

图10和图11研究了不同柔性柱倾角对微通道总努塞尔数的影响．从图中可以看出，随着*Re*的增大，壁面的总努塞尔数相应增加，但所对应的总努塞尔数比减小．这是由于流体的流速变大，导致其与壁面间的对流传热增强，柔性柱微通道与光滑微通道间传热能力差距缩小．微通道壁面的总努塞尔数随着倾角的增加呈现先增大后减小的趋势．在*Re*为1 200、倾角为0.6π时柔性柱的扑动最强烈，综合传热能力最优，壁面的总努塞尔数达到39.334. 与倾角0.2π和0.8π相比较，总努塞尔数分别提高了7.24%和3.92%，与光滑微通道相比提高63.5%. 在相同工况下，与Dadvand等[15]的研究结果相比较，总努塞尔数同样得到提高．摩擦系数比表现出与努塞尔数比大致相同的趋势，这意味着具有更好传热率的同时也具有更多的机械损失[24].

图12显示在不同*Re*和倾角下，微通道的总水热效率（η）大于1，最大达到1.503. 根据式（16）

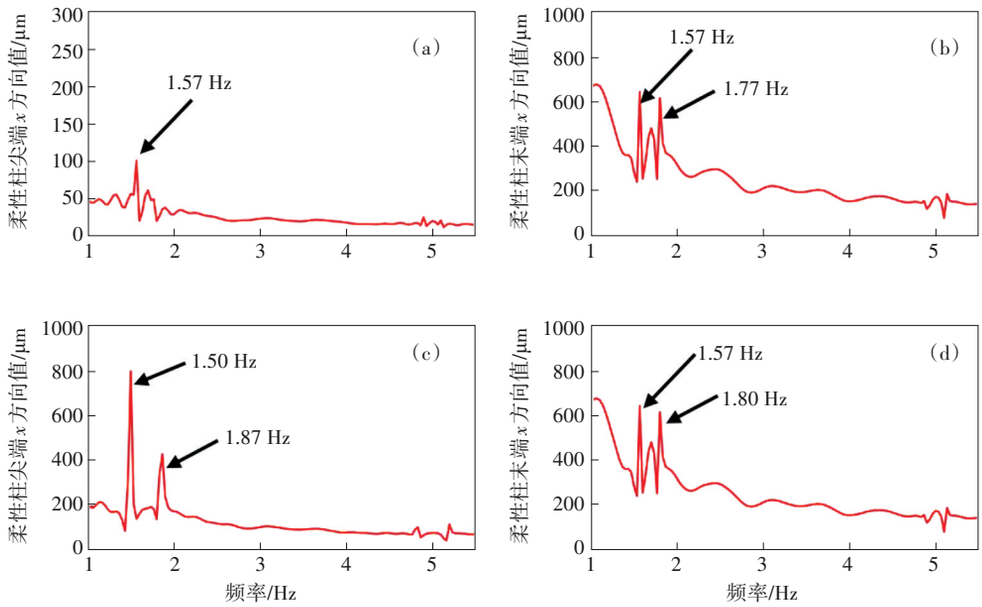

图9 不同倾角下柔性柱自由端 x 方向的频谱

Fig. 9 Frequency of the x-component at the end of an elastic pillar with different inclination angles

(a)—θ=0.2π;(b)—θ=0.4π;(c)—θ=0.6π;(d)—θ=0.8π.

可知,柔性柱微通道的 Nu 大于光滑微通道,而且 Re 越低,η 越高.右倾的柔性柱总水热效率明显优于左倾的,其中倾角 0.2π 的柔性柱 η 是 0.6π 的 1.26 倍左右.这是因为受流体冲击的影响,右倾的柔性柱贴近壁面,与左倾的柔性柱相比,加宽了流体流动的间隙,降低了微通道的阻塞率,产生较低的压降.然而,高传热通常伴随着高压降,所以在机械损失可接受的范围内,可以选择倾角为 0.6π 的柔性柱微通道进行散热,此时柔性柱微通道的 η 比光滑微通道提高 7.5%.

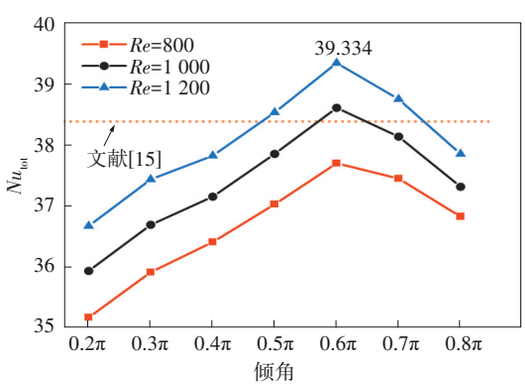

图10 不同柔性柱倾角下微通道两侧壁面的总努塞尔数

Fig. 10 The total Nusselt number of the walls on both sides of microchannel under different inclination angles of elastic pillar

3.4 柔性柱的变形

当 Re 为 1 000 时,研究了不同的初始倾角对柔性柱变形的影响.如图 13 所示,由于根部的固定约束,柔性柱弯曲后,内部应力主要集中于底部.根据变形能量理论,当 von Mises 应力超过材料的屈服强度时,柔性柱就会发生失效.本文的柔性柱材料为硅橡胶,屈服强度等于 2.4 MPa.

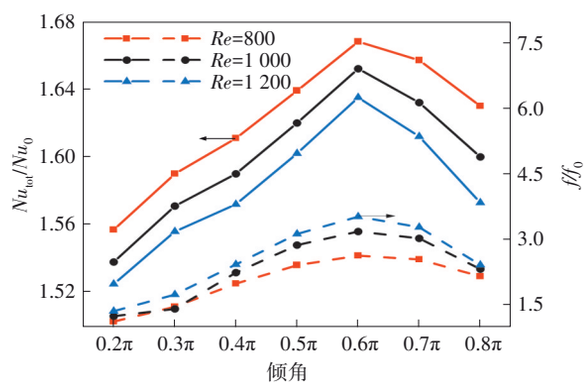

图11 不同柔性柱倾角下微通道的总努塞尔数比和摩擦系数比

Fig. 11 The total Nusselt number ratio and friction coefficient ratio of microchannels under different inclination angles of elastic pillar

如图 14 所示,当柔性柱倾角为 0.2π ~ 0.4π 时,柔性柱向右倾斜,F 点的 von Mises 应力大于 E 点,最大值不超过 0.4 MPa,远小于硅橡胶的屈服应力.随着柔性柱倾角的增加,von Mises 应力逐

渐增大.E点的von Mises应力大于F点，最大值接近1.8 MPa. 如图15所示，随着Re的增加，柔性柱的最大von Mises应力随之增加，最大值略小于2.4 MPa，仍能保证柔性柱在该Re数下不会失效. 因此，在本文考虑的层流状态（Re=800～1 200）下，所使用的硅橡胶柔性柱处于安全设计区，不会发生断裂.

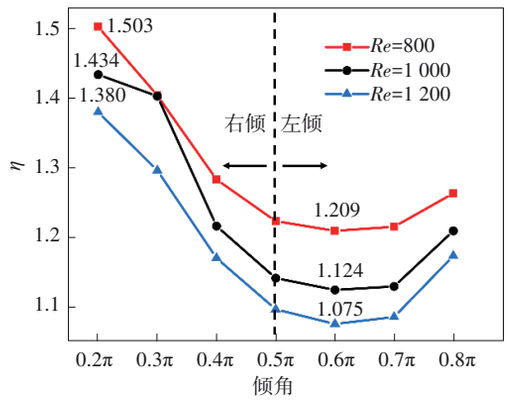

图12　不同柔性柱倾角下微通道的综合性能

Fig. 12　Comprehensive performance of microchannels under different inclination angles of elastic pillar

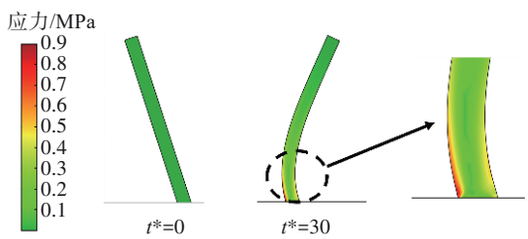

图13　倾角0.6π的柔性柱von Mises应力图（Re=1 000）

Fig. 13　von Mises stress diagram of an elastic pillar with an inclination angle of 0.6π（Re=1 000）

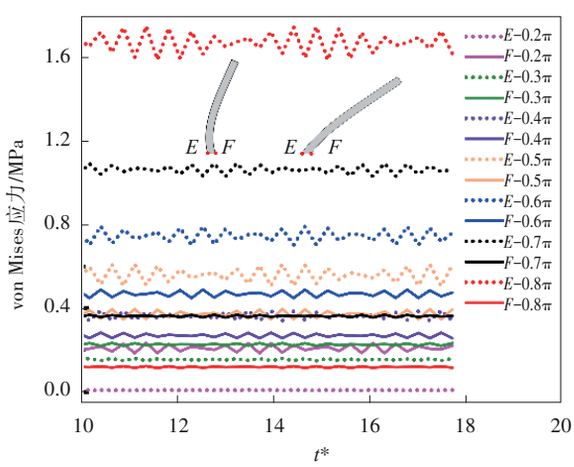

图14　不同倾角的柔性柱的最大von Mises应力

Fig. 14　Maximum von Mises stress of elastic pillar with different inclination angles

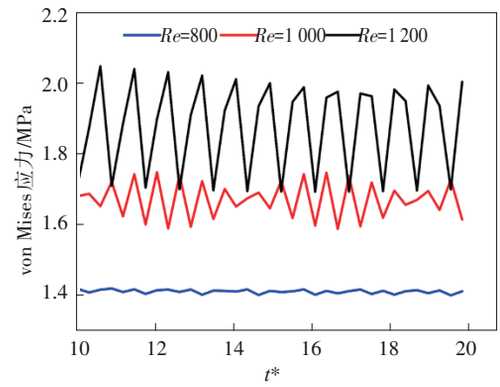

图15　不同Re下倾角0.8π的柔性柱E点的最大von Mises应力

Fig. 15　Maximum von Mises stress at point E of an elastic pillar with an inclination angle of 0.8 π under different Re

4　结　　论

1）随着Re的增加，通道壁面附近流体的局部流速提高，传热能力增强，壁面努塞尔数最大可以提高7.24%. 但相应地也会导致压降大幅度增加，使柔性柱微通道高传热能力的优势减小.

2）由于体积力的作用，柔性柱主要表现出扑动模式. 当柔性柱完全扑动时，可以产生周期性涡流，增加了冷热流体的混合和边界层的扰动，强化微通道的传热. 当柔性柱轻微扑动时，则产生细长的涡流，不能有效地扫过热边界层，强化传热效果不明显.

3）微通道的压降随着倾角的增加先增大后减小，由于压降增加的幅度大于传热性能提升的幅度，所以传热能力强的微通道综合性能较低，但综合性能指标始终大于1. 如果从传热的角度考虑，柔性柱存在最佳倾角0.6π. 在最佳参数条件下，微通道两侧壁面的传热性能相较于光滑微通道提高了63.5%，总水热效率（η）提高7.5%.

4）柔性柱的最大应力出现在底端附近，在所研究的层流条件下，柔性柱的von Mises应力始终小于材料的屈服强度.

参考文献：

[1] Fu C J, Wang J G, Zhao T L, et al. Experimental study on the influence factors of flow velocity structure and turbulent characteristics in open channel with biomimetic grass[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1): 5512536.

[2] Ali S, Habchi C, Menanteau S, et al. Heat transfer and mixing enhancement by free elastic flaps oscillation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 85: 250-264.

（下转第56页）