

仿生鱼鳞微通道对流传热数值模拟以及结构参数优化

李娟¹, 姚浩¹, 朱章钰¹, 石雷²

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 江苏南京 210037; 2. 中南大学能源科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要:建立了仿生鱼鳞结构微通道三维物理模型,通过数值模拟微通道内对流传热过程,获得了鱼鳞结构参数对平均摩擦系数、平均努塞尔数和综合传热性能因子的影响规律,并采用均匀实验设计方法对结构参数进行优化得到了仿生微通道的目标值热阻和泵功之间的拟合多元二次回归方程。研究表明:仿生鱼鳞结构微通道的平均摩擦系数与平均努塞尔数均大于光滑矩形微通道;仿生鱼鳞结构产生的阻力更小;鱼鳞仿生结构微通道的综合性能因子最大为1.55(雷诺数为1300时),综合传热性能明显优于矩形光滑微通道;鱼鳞结构的相对高度 $h_{s,1}/H$ 和相对宽度 $b_{s,1}/W$ 对综合传热性能影响较大;仿生鱼鳞微通道的热阻和泵功回归方程的拟合优度 R^2 分别为0.9576和0.9905,拟合方程可信度高。

关键词:鱼鳞仿生;传热;减阻;微通道;均匀实验方法

中图分类号:TK124

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.09.017

[引用本文格式]李娟,姚浩,朱章钰,等.仿生鱼鳞微通道对流传热数值模拟以及结构参数优化[J].热能动力工程,2024,39(9):144-154. LI Juan, YAO Hao, ZHU Zhangyu, et al. Numerical simulation and structural parameter optimization of convective heat transfer in microchannel of biomimetic fish scale[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 144-154.

Numerical Simulation and Structural Parameter Optimization of Convective Heat Transfer in Microchannel of Biomimetic Fish Scale

LI Juan¹, YAO Hao¹, ZHU Zhangyu¹, SHI Lei²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, China, Post Code: 210037;

2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha, China, Post Code: 410083)

Abstract: A three-dimensional physical model of the biomimetic fish-scale microchannel was established. The effects of the fish-scale structural parameters on the average friction coefficient, the average Nusselt number and the comprehensive heat transfer performance factors were obtained by numerical simulation of the convective heat transfer process in the microchannel, and the uniform experimental design method was used to optimize the structural parameters and obtain the fitting multivariate quadratic regression equations between the target thermal resistance and pumping power of biomimetic microchannel. The results show that the average friction coefficient and the average Nusselt number of the biomimetic fish-scale microchannel are larger than that of the smooth rectangular microchannel. The biomimetic fish-scale structure produces less resistance. The maximum comprehensive performance factor of the fish-scale biomimetic microchannel is 1.55 ($Re = 1300$), and the comprehensive heat transfer performance is obviously better than that of the smooth rectangular microchannel. The relative height $h_{s,1}/H$ and the relative width $b_{s,1}/W$ of fish-scale structure have great influence on the comprehensive heat transfer performance. The goodness of fit R^2 of the thermal resistance and pumping power regression equations biomimetic fish-scale microchannel are 0.9576 and 0.9905, respectively, indicating high reliability of the fitting equations.

收稿日期:2023-10-27; 修订日期:2024-01-11

基金项目:国家自然科学基金(51506098)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51506098)

作者简介:李娟(1987-),女,南京林业大学副教授。

Key words: fish-scale biomimetics, heat transfer, drag reduction, microchannel, uniform experimental method

引言

近年来,随着微电子技术、能源动力、航空航天、生物化工、核能技术等先进工程领域的电子设备朝着微型化和集成化的方向发展,微型化和集成化的电子元件的热流密度也随之提高,热负荷的骤增给设备器件的运行效率产生影响,严重降低元件的寿命和性能^[1]。微通道作为解决先进工程领域电子元件散热问题的有效手段,受到研究者的广泛关注。

自然界生物经过数亿年的进化演变,形成的特定外形或表面结构给微通道强化传热提供了新思路^[2-5]。流体在微通道内主要有单相和两相两种传热方式^[6]。相对于两相传热,微通道单相传热能力虽有不足之处,但是流体流动状态发展较为稳定,开发较为成熟^[7-8]。鱼类在经过漫长的演变,进化出了优异的水下减阻技能,其独特的外形结构和鱼鳞可以大大减小其在水中运动前进时的阻力^[9]。除此之外,鱼鳞结构排列方式和形状可以使水流在鱼体表面产生旋涡效应,增加鱼在水中的稳定性,可以减小水流对鱼体的阻力^[10-13]。

于秀荣等人^[14]研制了不同鲨鱼皮沟槽形状的仿生减阻薄膜,并进行了风洞试验,结果表明,仿生薄膜可以有效降低飞机表面的流阻。Bixler 等人^[15-18]受到鲨鱼皮、蝴蝶、稻叶等多种动植物表面微结构的影响,研究了封闭通道内的沟槽表面减阻效果并进行了结构上的优化,优化实验包含了流速、沟槽形态、沟槽种类、通道尺寸等多个试验参数,研究发现,在沟结构基础上,减小槽深或使用疏水性材料,均可优化其减阻性能。Goh 等人^[19]将倒置鱼鳞结构布置于一个光滑的圆管微通道以提高有效传热面积和微通道的平均对流传热系数,这种结构不仅可以扩大有效传热面积,还能阻碍热边界层的充分发展。Quan 等人^[20]在碳纤维表面逐层组装仿生鱼鳞结构,以提高复合材料的导热性和力学性能,在纤维表面进行两次循环的 GO/PEA/CNT 组装后,复合材料的导热系数提高了 51.5%,此外层间抗剪强度、抗折强度和抗折模量分别提高 52.2%、33.3%

和 60.1%。郭丁彰等人^[21]受到鲨鱼皮仿生结构概念的影响,设计了带劈缝的球凸结构微通道并分析流动和传热特性,当劈缝宽度为 15 μm 时,劈缝球凸结构微通道比光滑球凸微通道流动阻力明显降低,综合热性能参数 TP 最大为 1.85。

基于鱼鳞仿生结构在降低流阻和强化传热方面的巨大潜力^[22-24]。本文通过建立鱼鳞结构的三维物理模型,对仿生鱼鳞结构微通道进行对流传热过程的数值模拟。研究了仿生鱼鳞结构的参数对平均摩擦系数、平均努塞尔数和微通道综合传热性能因子的影响,总结影响规律,并利用均匀试验设计方法拟合了微通道内仿生鱼鳞结构参数与总热阻、泵功的函数关系。

1 物理模型

以鲨鱼鳞片作为仿生对象,设计出了仿生鳞片结构的微通道强化传热结构。将此结构以周期性的形式布置于光滑矩形微通道(MC)流道中央构成仿生鱼鳞结构微通道(MC-S),如图1所示。微通道计算模型的长度 L 为 78 mm,宽度 W 为 2 mm,高度 H 为 0.5 mm,侧壁宽 b 为 0.25 mm,底座高 h 为 0.5 mm。

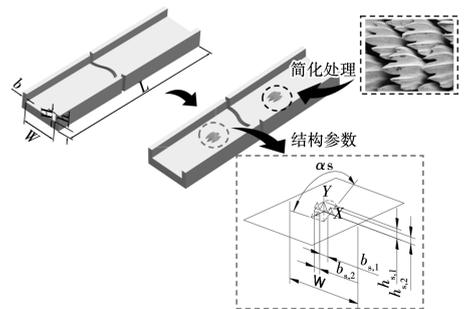


图1 微通道三维结构

Fig. 1 3D structure of microchannel

为了便于结构参数方面的研究,对实际的鱼鳞结构进行一定程度的简化。鳞片结构的平面二维结构由3个底在同一直线上的等腰三角形组成,然后以距离中间等腰三角形顶角点固定长度的平行于三角形底边的直线作为旋转轴,经旋转获得三维结构,其中旋转角与鳞片结构长度张角 α_s 为 120° 。仿生鱼鳞结构的基本尺寸参数如表1所示。

表 1 仿生鱼鳞结构基本几何尺寸

Tab. 1 Basic geometric dimensions of biomimetic fish-scale structure

参 数	数值/mm
一级鳞片高度 $h_{s,1}$	0.24
二级鳞片高度 $h_{s,2}$	0.16
一级鳞片底长 $b_{s,1}$	0.24
二级鳞片底长 $b_{s,2}$	0.16

2 数学模型及数值模拟

2.1 数学模型

为简化数值计算,对微通道内流体流动传热过程作出如下假设:(1) 数值模拟雷诺数范围为 400 ~ 1 300,流动为三维稳态不可压缩流动;(2) 流动是连续的, $N-S$ 方程仍适用且边界速度无滑移,温度无跳跃;(3) 去离子水的密度和比热容及固体的物性参数简化为常数,去离子水的导热系数及动力粘度定义为关于温度的函数;(4) 考虑入口效应的影响;(5) 不考虑粘性耗散、辐射换热及体积力的影响。基于以上假设,微通道内单相流动及传热的控制方程可简化为:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \rho_f \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_f \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho_f \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_f \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho_f \left(\frac{\partial w}{\partial \tau} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_f \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} = \quad (2)$$

能量守恒方程(流体):

$$u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + w \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda_f}{\rho_f c_{p,f}} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

能量守恒方程(固体):

$$\lambda_s \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (4)$$

2.2 数值分析

采用 Fluent 软件进行求解计算时,将入口边界定义为速度入口,出口边界为压力出口,压强为 1 个标准大气压,具体工况可参照表 2;定义微通道基底底面为恒热流边界条件,热流密度 q_w 为 50 kW/m^2 ;定义微通道基底左右侧壁面为对称边界条件;定义微通道流体与固体接触壁面为无滑移耦合边界条件;定义微通道其余壁面为无滑移绝热边界条件。

表 2 模拟工况

Tab. 2 Simulated conditions

工况	进口雷诺数	进口流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	体积流量/ $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$
1	400	0.503 4	90.60
2	550	0.692 2	124.59
3	700	0.880 9	158.58
4	8 50	1.069 7	192.54
5	1 000	1.258 5	226.53
6	1 150	1.447 2	260.49
7	1 300	1.636 0	294.48

求解器采用 Fluent 默认的压力基求解器。由于模拟雷诺数范围为 400 ~ 1 300,选择层流模型进行流动求解计算,开启能量方程。对去离子水的导热系数及动力粘度进行变物性参数设置。定义固体材料为 6063 铝合金,其密度为 $2\ 690 \text{ kg/m}^3$,比热容为 $900 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数为 $218 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。采用 SIMPLE 算法实现压力-速度耦合求解。同时选择二阶迎风格式用于动量及能量方程的空间离散。当残差值小于 10^{-4} 时,判断连续性方程收敛;当残差值小于 10^{-6} 时,判断动量及能量方程收敛。

2.3 数值处理

为保证数据的准确性,需要定义有效热流密度:

$$q = Q/A_{\text{tot}} \quad (5)$$

式中: Q —微通道内流体实际吸收的热量, W; A_{tot} —对流换热面积, m^2 。

$$Q_{\text{eff}} = mc_p (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \quad (6)$$

$$m = V\rho_f \quad (7)$$

式中: m —去离子水质量流量, kg/s ; c_p —去离子水比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T_{in} —微通道进口温度, K; T_{out} —微通道出口温度, K; ρ_f —去离子水密度, kg/m^3 。

微通道表面平均对流传热系数定义为:

$$h = q / (T_w - T_f) \quad (8)$$

式中: T_w —微通道壁面平均温度, K; T_f —去离子水平均温度, K; q —有效热流密度, W / m^2 。

平均努塞尔数定义为:

$$Nu = hD_h / \lambda_f \quad (9)$$

式中: D_h —微通道水力直径, m; λ_f —去离子水导热系数, $W / (m \cdot K)$ 。

为便于比较鱼鳞结构微通道与光滑矩形微通道的综合性能,引入综合性能因子对其进行评价,定义如下:

$$PEC = \frac{Nu_{ch} / Nu_0}{(f_{ch} / f_0)^{1/3}} \quad (10)$$

式中: Nu_{ch} —鱼鳞结构微通道平均努塞尔数; Nu_0 —光滑矩形微通道平均努塞尔数; f_{ch} —鱼鳞结构微通道表观平均摩擦系数; f_0 —光滑矩形微通道表观平均摩擦系数。

2.4 网格划分与独立性验证

采用 ICEM 软件对光滑矩形微通道及仿生鱼鳞微通道进行非结构网格划分,并对仿生鱼鳞结构所在区域进行局部网格加密以提高解的质量,如图 2 所示。

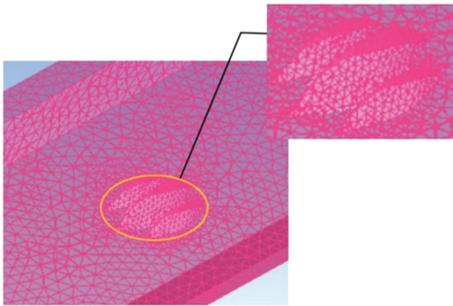


图 2 仿生鳞片结构微通道局部网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local grid division of microchannels of biomimetic scale structure

本文以不同的网格尺寸,分别对光滑矩形微通道划分了 5 组网格进行网格独立性验证,验证结果如表 3 和图 3 所示。通过相对误差分析发现,在雷诺数为 400 的工况下,网格数量为 248 万时,平均摩擦系数和平均努塞尔数的相对误差均小于 1%。

微通道的数值模拟研究均选取 248 万左右的网格数量。图 3 可以看出,数值模拟中光滑矩形微通道的平均摩擦系数与平均努塞尔数随网格数量变化趋势。

表 3 网格独立性验证

Tab. 3 Grid independence verification

序号	网格数量/ 万	平均摩擦 系数	误差/ %	平均 努塞尔数	误差/ %
1	115	0.187 8	2.07	7.10	6.29
2	167	0.186 4	1.30	6.89	3.14
3	198	0.185 1	0.60	6.80	1.80
4	248	0.184 2	0.11	6.72	0.60
5	304	0.184 0	-	6.68	-

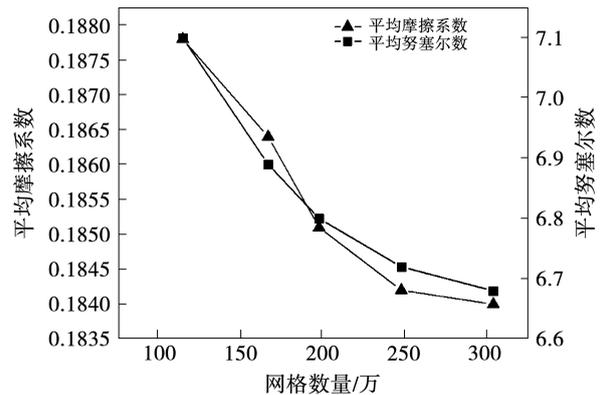


图 3 网格独立性验证

Fig. 3 Grid independence verification

2.5 模型验证

为验证数值模拟方法的有效性,选取光滑矩形微通道数值模拟得到的平均摩擦系数、平均努塞尔数和局部努塞尔数与文献中[25]的理论公式以及文献[26]中的实验数据进行对比。

数值模拟得到的平均摩擦系数 f_1 与理论值 f_2 和实验值 f_3 分别最大相差 9.56% 和 8.98%, 模拟值平均努塞尔数 Nu_1 与实验值 Nu_3 最大相差 6.87%, 上述误差均在工程应用允许的范围 ($< 10\%$), 因此采用数值模拟的方法能很好地预测微通道内流体的流动和传热特性。

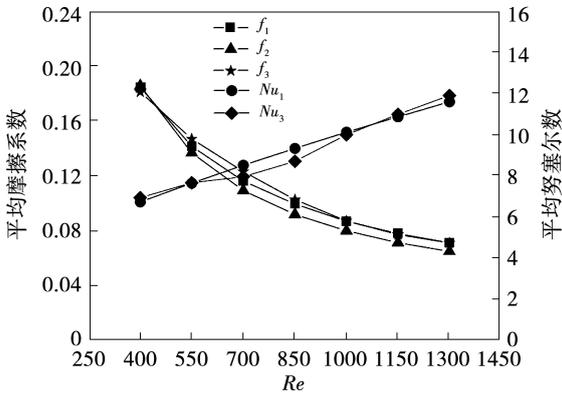


图4 数值模拟有效性验证

Fig. 4 Validation of effectiveness of numerical simulation

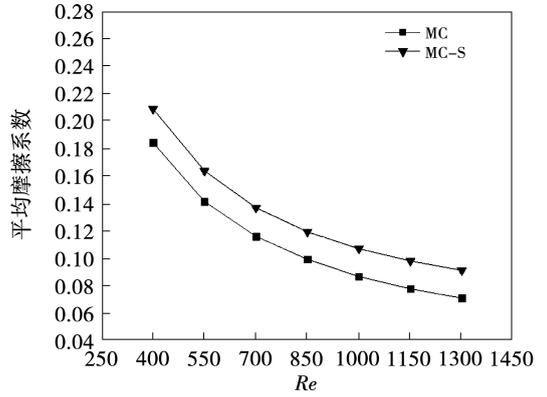


图6 不同结构微通道平均摩擦系数随雷诺数变化

Fig. 6 Variation of average friction coefficient of different microchannels with Reynolds number

3 结果分析与讨论

3.1 传热与流动性能

图5、图6分别给出了光滑矩形微通道和鱼鳞结构微通道平均努塞尔数和平均摩擦系数随雷诺数的变化趋势。随着雷诺数增大,微通道壁面热边界层厚度随之减小,微通道传热能力相应地得到提升。当雷诺数从400增大到1300时,光滑矩形微通道和鱼鳞结构微通道的平均努塞尔数分别提高了72.11%和116.76%。微通道内的平均摩擦系数呈现出逐渐减小的趋势。与光滑矩形微通道相比,鳞片结构仿生微通道阻力损失增加的幅度为13.29%~28.32%。由于鱼鳞结构对通道内流体存在着扰动作用,仿生鱼鳞结构微通道的平均努塞尔数高于矩形微通道。当雷诺数为1300时,鳞片结构微通道的平均努塞尔数比光滑矩形微通道提高了68.78%。

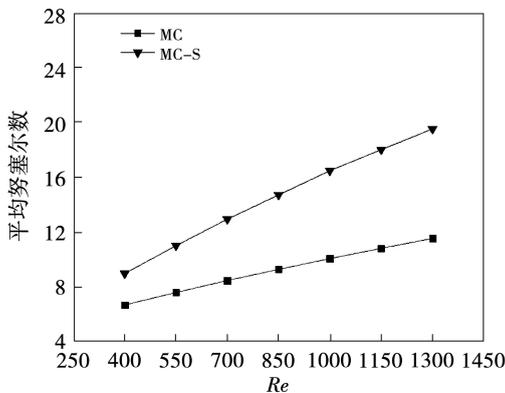


图5 不同结构微通道平均努塞尔数随雷诺数变化

Fig. 5 Variation of average Nusselt number of different microchannels with Reynolds number

对于仿生鱼鳞结构微通道,鱼鳞结构沿微通道横截面宽度上的波动分布,使得主流体在发生分流运动时更为复杂。一、二级鳞片结构的高度不同,而回转轴相同,这导致了通道中部主流体沿通道流动方向受鳞片结构扰动作用的时间有长短。次中心主流体和四周流体更早地向通道中心位置聚拢,冲刷一级鳞片附近的主中心流体。流体在流经鱼鳞结构微通道段时,流通截面积会发生收缩-扩张-等截面的周期性变化,局部流体流速先增加后减小。因此,每经过一次鱼鳞结构,流体截面压力先减小后增大,局部截面压力呈现周期性变化,如图7所示。

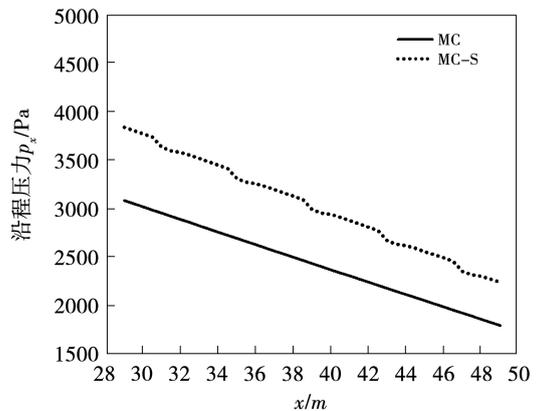


图7 鱼鳞结构微通道沿程压力分布

Fig. 7 Pressure distribution of fish-scale microchannel along the path

图8给出了仿生鱼鳞结构微通道综合性能因子随雷诺数变化的曲线。可以看到,随着雷诺数的增长,仿生鱼鳞结构微通道的综合性能因子曲线的上升趋势逐渐平缓,甚至呈现下降趋势。在雷诺数400~1300范围内,仿生鱼鳞结构微通道的综合性

能因子均大于1,变化范围为1.29~1.55。

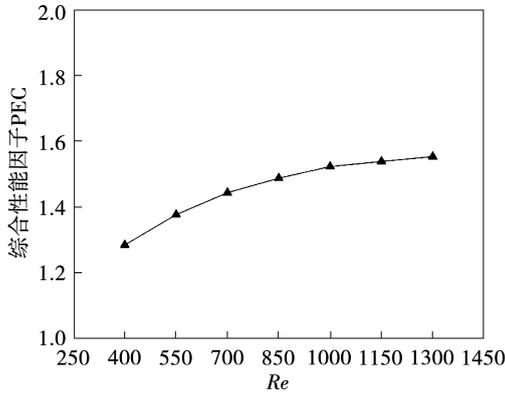


图8 鱼鳞结构微通道综合性能因子随雷诺数变化

Fig. 8 Variation of comprehensive performance factor of fish-scale microchannel with Reynolds number

3.2 结构参数影响

选取了一级鳞片相对宽度 $b_{s,1}/W$ 、一级鳞片相对高度 $h_{s,1}/H$ 、以及决定鳞片结构在微通道流动方向长度的张角 α_s 3个参数进行结构参数影响研究。 $b_{s,1}/W$ 、 $h_{s,1}/H$ 和 α_s 的变化范围分别为 0.12~0.24, 0.42~0.66 和 $90^\circ \sim 150^\circ$ 。二级鳞片结构的底长和高度与一级鳞片结构对应的底长和高度之间均保持 2/3 的倍数关系。

3.2.1 $b_{s,1}/W$ 参数的影响

图9~图12给出了固定 $h_{s,1}/H=0.48$ 和 $\alpha_s=120^\circ$ 时,不同雷诺数条件下,鳞片结构微通道平均摩擦系数、平均努塞尔数和综合性能因子以及热阻和泵功随 $b_{s,1}/W$ 的变化关系。相同雷诺数条件下,仿生鱼鳞结构微通道平均摩擦系数、泵功、平均努塞尔数以及综合性能因子均随 $b_{s,1}/W$ 的增加而增加,热阻随 $b_{s,1}/W$ 的增加而减小。这是因为随着 $b_{s,1}/W$ 由 0.12 增加至 0.24,鳞片结构在微通道横截面宽度方向上的占比由 0.28 增加至 0.56,对微通道底面边界层流体的扰动作用也相应增强。鳞片在微通道横截面上呈波状分布,两个二级鳞片结构外侧流体流通面积进一步缩小,受挤压增强作用,冷热流体混合加剧。两个二级鳞片结构内侧流体受相邻一级鳞片的挤压流速也进一步加大,且由于二级鳞片的中心线在微通道横截面上分别向两侧横移,通道中心主流体受扰动的区域增加。鳞片结构微通道平均摩擦系数和泵功的最大增加幅度为 15.26%,平均努塞尔数的最大增加幅度为 21.74%,热阻的最大减小幅

度为 13.94%,综合性能因子的最大增加幅度为 17.44%。

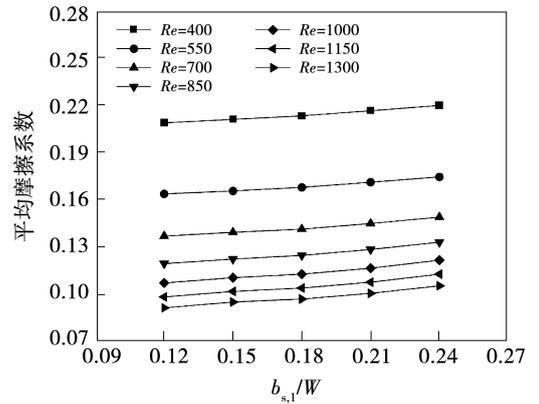


图9 $b_{s,1}/W$ 对微通道平均摩擦系数的影响

Fig. 9 Effect of $b_{s,1}/W$ on average friction coefficient of microchannels

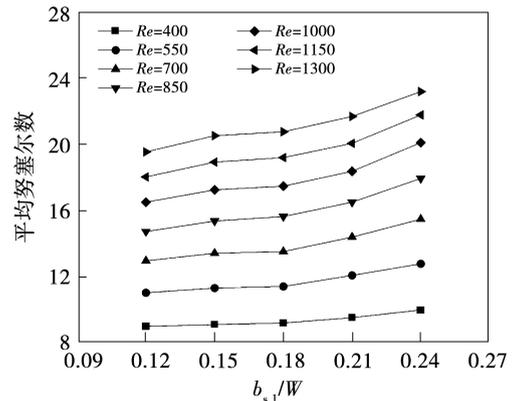


图10 $b_{s,1}/W$ 对微通道平均努塞尔数的影响

Fig. 10 Effect of $b_{s,1}/W$ on average Nusselt number of microchannels

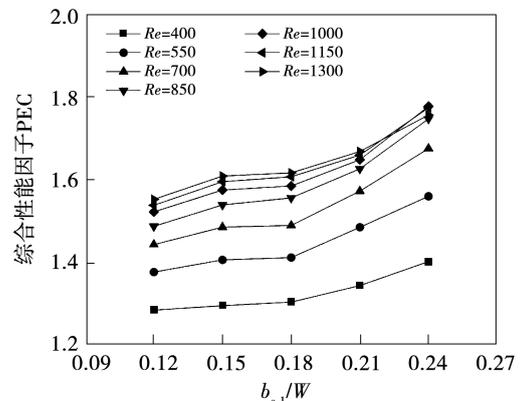


图11 $b_{s,1}/W$ 对微通道综合性能因子的影响

Fig. 11 Effect of $b_{s,1}/W$ on comprehensive performance factor of microchannels

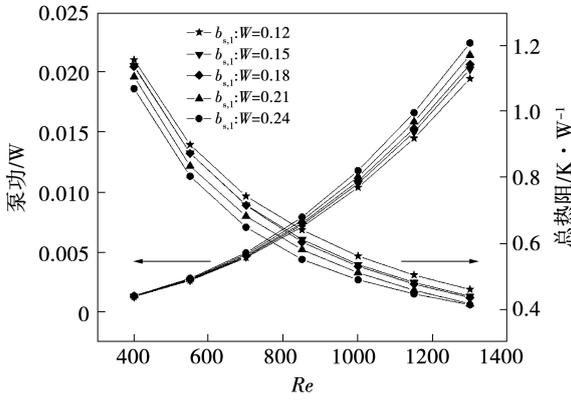


图 12 $b_{s,1}/W$ 对总热阻和泵功的影响

Fig. 12 Effect of $b_{s,1}/W$ on total thermal resistance and pumping power

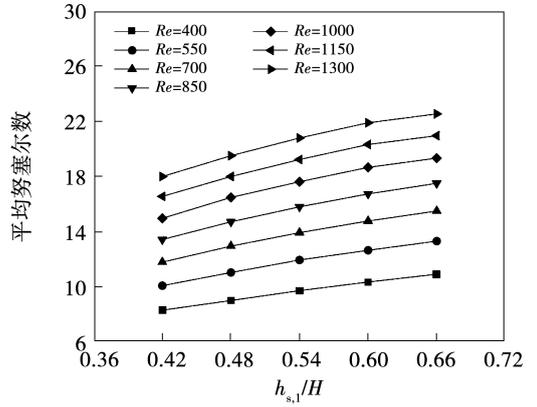


图 14 $h_{s,1}/H$ 对微通道平均努塞尔数的影响

Fig. 14 Effect of $h_{s,1}/H$ on average Nusselt number of microchannels

3.2.2 $h_{s,1}/H$ 参数的影响

固定 $b_{s,1}/W=0.12$ 和 $\alpha_s = 120^\circ$ 时,图 13 ~ 图 16 分别给出了不同雷诺数条件下,仿生鱼鳞结构微通道平均摩擦系数、平均努塞尔数、综合性能因子以及热阻和泵功随 $h_{s,1}/H$ 的变化趋势。 $h_{s,1}/H$ 决定各级鳞片结构的高度,鳞片结构越高,沿通道横截面宽度方向上被一、二级鳞片结构划分的各块波状区域的流通面积就越小。当下壁面的热流体受挤压程度增加,热流体的流速加快,且向上运动的趋势更为明显,与通道上部冷流体混合运动加剧,流动路径增加。随着 $h_{s,1}/H$ 的增大,仿生鱼鳞结构微通道平均摩擦系数、泵功、平均努塞尔数均呈现上升趋势,热阻呈现下降趋势。上述 4 种流动及传热特性参数的最大变化幅度分别为 21.08% ,21.08% ,32.05% 和 -18.3%。通道的综合性能最大提升 26.4%。

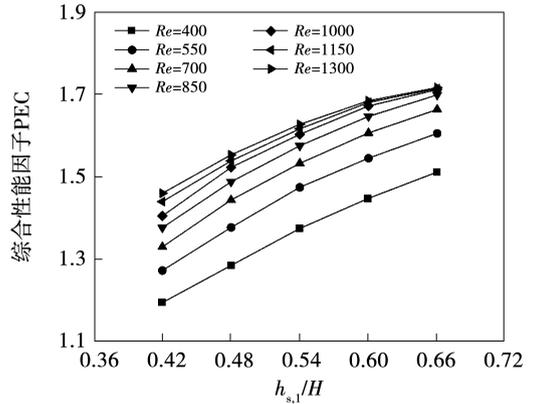


图 15 $h_{s,1}/H$ 对微通道综合性能因子的影响

Fig. 15 Effect of $h_{s,1}/H$ on comprehensive performance factor of microchannels

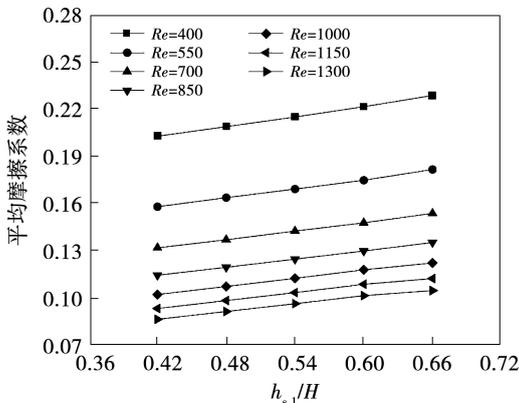


图 13 $h_{s,1}/H$ 对微通道平均摩擦系数的影响

Fig. 13 Effect of $h_{s,1}/H$ on average friction coefficient of microchannels

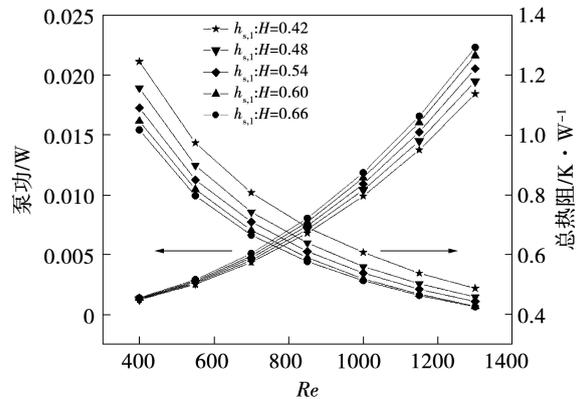


图 16 $h_{s,1}/H$ 对总热阻和泵功的影响

Fig. 16 Effect of $h_{s,1}/H$ on total thermal resistance and pumping power

3.2.3 α_s 参数的影响

固定 $h_{s,1}/H=0.48$ 和 $b_{s,1}/W=0.12$ 时,不同雷诺数条件下,仿生鱼鳞结构微通道平均摩擦系数、平均努塞尔数、综合性能因子以及热阻和泵功随 α_s 的变化关系分别如图 17 ~ 图 20 所示。增加 α_s 可以增加鳞片结构沿流动方向分布的长度,增加了一、二级鳞片间的固液接触面积,强化了对流换热。当雷诺数为 1 300 时,随着 α_s 的增加,仿生鱼鳞结构微通道平均摩擦系数从开始的 0.090 06 增加至 0.092 32,最大增加幅度为 2.51%,平均努塞尔数的最大增加幅度为 8.22%,热阻的最大减小幅度为 7.1%,综合性能因子的最大增加幅度为 8.44%。与 $h_{s,1}/H$ 和 $b_{s,1}/W$ 相比, α_s 对鳞片结构微通道流动及传热性能的影响程度稍低。

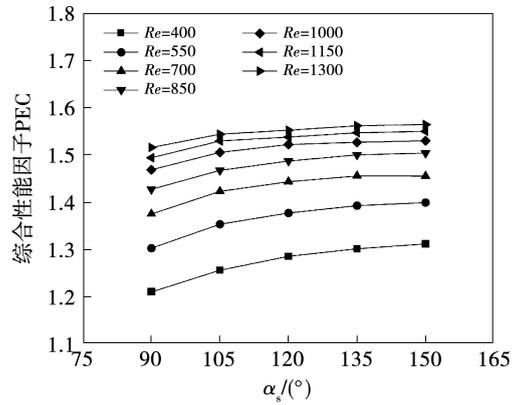


图 19 α_s 对微通道综合性能因子的影响

Fig. 19 Effect of α_s on comprehensive performance factor of microchannels

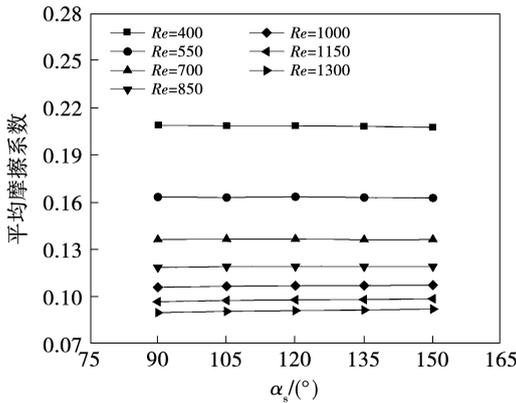


图 17 α_s 对微通道平均摩擦系数的影响

Fig. 17 Effect of α_s on average friction coefficient of microchannels

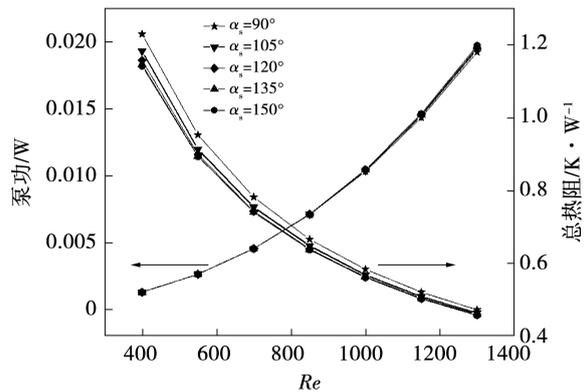


图 20 α_s 对总热阻和泵功的影响

Fig. 20 Effect of α_s on total thermal resistance and pumping power

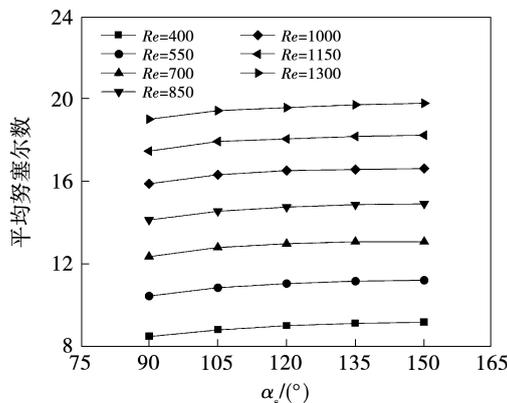


图 18 α_s 对微通道平均努塞尔数的影响

Fig. 18 Effect of α_s on average Nusselt number of microchannels

4 均匀试验设计

采用控制变量法详细分析了 $b_{s,1}/W$ 、 $h_{s,1}/H$ 和 α_s 3 个因素单独对仿生鱼鳞结构微通道流动与传热特性的影响。为综合分析各因素对微通道流动及传热性能的影响,得到各结构参数分别与热阻和泵功之间的函数关系,本节采用均匀试验法进行研究^[27]。

将热阻 R_{tot} 和泵功 W_p 作为衡量指标,以 $b_{s,1}/W$ 、 $h_{s,1}/H$ 和 α_s 作为研究仿生鱼鳞结构微通道的因素。仿生鱼鳞结构微通道均匀试验的雷诺数工况依据综合性能因子选择为 1300。参考均匀试验设计的准则,本研究采用三因素十一水平的均匀试验表,如表 4 所示。

表 4 均匀设计表

Tab.4 Uniform design table

试验	因素 1	因素 2	因素 3
1	1	5	7
2	2	10	3
3	3	4	10
4	4	9	6
5	5	3	2
6	6	8	9
7	7	2	5
8	8	7	1
9	9	1	8
10	10	6	4
11	11	11	11

代入各结构参数,建立仿生鱼鳞结构均匀试验设计表。通过 UG 建立三维模型,再运用 Fluent 对模型进行数值模拟,最终得到的均匀试验结果如表 5 所示。

表 5 仿生鱼鳞结构微通道均匀试验结果

Tab.5 Uniform design result for microchannel of biomimetic fish-scale structure

试验	$b_{s,1}/W$	$h_{s,1}/H$	$\alpha_s/(^\circ)$	热阻/ $K \cdot W^{-1}$	泵功/W
1	0.120	0.516	126	0.476	0.019
2	0.132	0.636	102	0.446	0.021
3	0.144	0.492	144	0.471	0.020
4	0.156	0.612	120	0.463	0.021
5	0.168	0.468	96	0.517	0.019
6	0.180	0.588	138	0.425	0.022
7	0.192	0.444	114	0.528	0.019
8	0.204	0.564	90	0.474	0.021
9	0.216	0.420	132	0.467	0.020
10	0.228	0.540	108	0.451	0.021
11	0.240	0.660	150	0.398	0.026

考虑到结构参数间可能存在交互影响,因此根据表 5 的结果对仿生鱼鳞微通道与目标值热阻和泵功分别进行多元二次回归方程拟合,拟合方程格式如下:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (11)$$

式中: y — R_{tot}, W_p ; x_1 — $b_{s,1}/W$; x_2 — $h_{s,1}/H$; x_3 — α_s 。

将数据导入 STATA 软件进行多元回归分析,最

终得到仿生鱼鳞微通道热阻和泵功关于各结构参数的多元二次回归方程系数,如表 6 所示。对多元二次回归方程分别进行拟合优度 R^2 分析,拟合优度 R^2 的值越接近于 1,方程的可信度越大。鱼鳞仿生微通道关于热阻的回归方程的拟合优度 R^2 为 0.957 6; 仿生鱼鳞微通道关于泵功的回归方程的拟合优度 R^2 为 0.990 5,都接近于 1,因此方程可信。

表 6 仿生鱼鳞微通道 (MC-S) 热阻及泵功多元二次回归方程系数值

Tab.6 Values of multivariate quadratic regression equations for thermal resistance and pumping power for microchannel of biomimetic fish-scale structure

系数	热阻/ $K \cdot W^{-1}$	泵功/W
a_0	1.803 9	0.022 2
a_1	3.832 5	-0.131 7
a_2	-4.073 8	0.029 4
a_3	-7.578×10^{-3}	-8.29×10^{-5}
a_{11}	-5.232 2	0.055 9
a_{22}	2.241 2	0.122 7
a_{33}	-0.028 9	5.441×10^{-4}
a_{12}	2.047 2	-0.02 32
a_{13}	0.011 5	-1.011×10^{-4}
a_{23}	2.02×10^{-5}	2.92×10^{-7}

5 结 论

本文确定了影响仿生鱼鳞结构微通道流动和传热特性的结构参数,对仿生鱼鳞结构微通道进行数值模拟。通过均匀试验设计法综合考虑不同结构参数对微通道总热阻以及泵功的影响,得到了仿生微通道与目标值热阻和泵功之间的拟合多元二次回归方程。主要结论如下:

(1) 雷诺数为 1 300 时,仿生鱼鳞结构微通道的平均努塞尔数比矩形微通道提高了 68.78%,阻力损失增加的幅度为 13.29% ~ 28.32%。

(2) 当 $h_{s,1}/H = 0.48$ 和 $\alpha_s = 120^\circ$ 时,在不同雷诺数下,仿生鱼鳞结构微通道的平均摩擦系数、平均努塞尔数、泵功以及综合性能因子随 $b_{s,1}/W$ 增大而增大,热阻随 $b_{s,1}/W$ 增大而减小。泵功的最大增幅为 15.26%,热阻的最大减小幅度为 13.94%,平均努塞尔数最大增幅为 21.74%,综合性能因子最大

增幅为 17.44%。

(3) 当 $b_{s,1}/W = 0.12$ 和 $\alpha_s = 120^\circ$ 时,在不同雷诺数下,仿生鱼鳞结构微通道的平均摩擦系数、平均努塞尔数、泵功以及综合性能因子随 $h_{s,1}/H$ 增大而增大,热阻随 $h_{s,1}/H$ 的增加而减小。泵功的最大增幅为 21.08%,热阻的最小减小幅度为 18.3%,平均努塞尔数最大增幅为 32.05%,综合性能因子最大增幅为 26.3%。

(4) 当 $h_{s,1}/H = 0.48$ 和 $b_{s,1}/W = 0.12$ 时,在不同雷诺数下,仿生鱼鳞结构微通道的平均摩擦系数、平均努塞尔数、泵功以及综合性能因子随 α_s 增大而增大,热阻随 α_s 的增加而减小。泵功的最大增幅为 2.51%,热阻的最小减小幅度为 7.1%,平均努塞尔数的最大增幅为 8.22%,综合性能因子的最大增幅为 8.44%。与 $h_{s,1}/H$ 和 $b_{s,1}/W$ 相比, α_s 对仿生鱼鳞结构微通道流动及传热性能的影响程度稍低。

(5) 通过均匀试验设计对仿生鱼鳞微通道的结构进行多参数优化设计,将微通道参数与热阻以及泵功进行多元回归方程拟合,得到仿生鱼鳞微通道的最优结构参数。

参考文献:

[1] ZI Q H, YUN F Y, ZHI E Z. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review[J]. Energy, 2021, 216: 1–143.

[2] JACKSON R. Bionics analysis in social economics[J]. Journal of Global Economy, Business and Finance, 2022, 4(12): 29–36.

[3] ABDULBARI A H, MAHAMMED D H, HASSAN Y B Z. Bio-inspired passive drag reduction techniques: A review[J]. Chembioeng Reviews, 2015, 2(3): 185–203.

[4] 龚亚, 郭张鹏, 张天一, 等. 箭鱼形翅片微通道流动换热特性研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(11): 2024–2030.

GONG Ya, GUO Zhangpeng, ZHANG Tianyi, et al. Flow and heat transfer characteristics of swordfish fin microchannel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(11): 2024–2030.

[5] 谭慧, 宗宽, 熊长武, 等. 叶脉型微通道热沉设计及散热特性分析[J]. 工程设计学报, 2019, 26(4): 477–483.

TAN Hui, ZONG Kuan, XIONG Changwu, et al. Design and heat transfer performance analysis of leaf vein-shaped microchannel heat sink[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(4): 477–483.

[6] 王长亮, 靳遵龙, 王永庆, 等. 微通道气液两相流研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(S1): 1–7.

WANG Changliang, JIN Zunlong, WANG Yongqing, et al. Research

progress of gas-liquid two-phase flow in micro-channels[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(S1): 1–7.

[7] ZHANG S, ZHU C, FENG H, et al. Intensification of gas-liquid two-phase flow and mass transfer in microchannels by sudden expansions[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 229: 1–9.

[8] YIN Y, GUO R, ZHU C, et al. Enhancement of gas-liquid mass transfer in microchannels by rectangular baffles[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 236: 1–27.

[9] 宋保维, 刘冠杉, 胡海豹. 不同宽高比的 V 型 traveling 波表面减阻仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(32): 222–224.

SONG Baowei, LIU Guanshan, HU Haibao. Simulation study on surface drag-reduction with V-size traveling wave of different aspect ratios[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(32): 222–224.

[10] 钱风超. 仿生鱼鳞形凹坑表面减阻性能的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

QIAN Fengchao. Numerical simulation on drag reduction of bionic squamous cavity non-smooth surface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[11] 程拼拼, 蒋成刚, 吴承伟. 仿生二级微沟槽表面减阻特性数值模拟[J]. 中国科技论文, 2014, 9(8): 940–943.

CHENG Pinpin, JIANG Chenggang, WU Chengwei. Numerical simulation of drag reduction characteristics in bionic secondary micro-grooved surface[J]. China Sciencepaper, 2014, 9(8): 940–943.

[12] 潘家正. 湍流减阻新概念的实验探索[J]. 空气动力学学报, 1996(3): 304–310.

PAN Jiazheng. The experimental approach to drag reduction of the transverse ribbons on turbulent flow[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1996(3): 304–310.

[13] LEE S, JANG Y. Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(5): 659–672.

[14] 于秀荣, 寇开昌, 林德宽. 减阻聚合物薄膜的研制[J]. 西北工业大学学报, 1993(3): 391–393.

YU Xiurong, KOU Kaichang, LIN Dekuan. Development of polymer film riblets for drag reduction[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1993(3): 391–393.

[15] BIXLER D G, BHUSHAN B. Fluid drag reduction and efficient self-cleaning with rice leaf and butterfly wing bioinspired surfaces[J]. Nanoscale, 2013, 5(17): 685–710.

[16] BIXLER D G, BHUSHAN B. Fluid drag reduction with shark-skin riblet inspired microstructured surfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(36): 4507–4528.

[17] BIXLER D G, BHUSHAN B. Bioinspired micro/nanostructured surfaces for oil drag reduction in closed channel flow[J]. Soft Matter, 2013, 9(5): 1620–1635.

- [18] BIXLER D G, BHUSHAN B. Shark skin inspired low-drag micro-structured surfaces in closed channel flow [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 393: 384–396.
- [19] GOH L A, OOI T K. Nature-inspired inverted fish scale micro-scale passages for enhanced heat transfer [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 106: 18–31.
- [20] QUAN G P, LIU Y L, FENG H Y, et al. Layer-by-layer assembly of biomimetic fish scale structure on carbon fiber surfaces to improve thermal conductivity and mechanical properties of composites [J]. Applied Surface Science, 2023, 615: 1–11.
- [21] 郭丁彰, 黄心悦, 李平. 布置带劈缝球凸结构微通道热沉内流动和换热特性 [J]. 科学通报, 2019, 64(14): 1526–1534. GUO Dingzhang, HUANG Xinyue, LI Ping. Flow structure and heat transfer characteristics of microchannel heat sinks with split protrusion [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(14): 1526–1534.
- [22] WALSH M, LINDEMANN A. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction [C]//22nd Aerospace Sciences Meeting, 1984: 347.
- [23] 宋美艳. 微球构筑的仿生减阻防污涂层的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- SONG Meiyuan. Study on bionic drag-reducing and anti-fouling coating using microspheres [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [24] 李晓辉. 横向沟槽减阻的仿真分析 [A]. 北京力学会. 北京力学会第二十三届学术年会会议论文集 [C]. 北京力学会: 北京力学会, 2017: 2. LI Xiaohui. Simulation analysis of drag reduction in transverse trench [A]. Beijing Force Society, 2017: 2.
- [25] SHAH R K, LONDON A L. Laminar flow forced convection in ducts [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [26] 严伟. 基于响应面法的冷板微通道散热性能优化研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2020. YAN Wei. Research on thermal performance optimization of micro-channel based on response surface method [D]. Jilin: Jilin University, 2020.
- [27] 杜双奎. 试验优化设计与统计分析 (第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2019. DU Shuangkui. Experimental design and statistical analysis (2nd edition) [M]. Beijing: Science Press, 2019.

(姜雪梅 编辑)



明阳风电集团的 16.6 MW 巨型涡轮机抵达广东

中国风力涡轮机制造商明阳集团 (Mingyang) 宣布, 其 16.6 MW 的 OceanX 风力涡轮机已抵达中国广东省阳江市明阳青洲四号海上风电场。OceanX 是世界上最大的单容量浮动风力发电平台, 可在水深超过 35 m 的地方使用。明阳集团表示, 一旦投入运营, 预计每年将产生 5 400 万千瓦时的电力, 足以为 3 万户三口之家提供 1 年的电力。

在平台上, 塔身呈现出新颖的 V 形, 并装有两台 8.3 MW 的涡轮机。这两台涡轮发动机配备了平行叶轮, 覆盖面积超过 52 000 m², 面积大约相当于 7 个足球场。叶轮叶尖相距 5 m, 这种设计优化了螺距和风力效率。这个独特的系统允许叶轮反向旋转, 提高了中心区域的风速, 与具有相同扫掠面积的单个大型涡轮机相比, 空气动能发电量提高了 4.29%。OceanX 采用单点系泊系统, 使涡轮机始终面对来风。系泊系统将支撑结构的极限载荷降低了 40%, 提高了涡轮机的生存能力, 可抵抗 17 级台风。

明扬集团与德国清洁能源资产管理公司 Luxcara 近期签署协议后, OceanX 风力涡轮机将很快运往欧洲。明阳集团已被选为德国北海 Waterkant 海上风电项目的首选涡轮机供应商, 将为其提供 16 台涡轮机。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)