

脉动流下贝塞尔曲线型波纹壁通道 流动传热特性研究

丁耀东, 刘真威, 李平

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为探究波纹壁结构和脉动流耦合作用下通道内流动强化换热的时空效应,基于贝塞尔曲线型多变、灵活、易控制的优势,设计出 3 种壁面型线的波纹壁通道,并对比分析了 3 种波纹壁通道在不同流动及脉动参数下的流动换热特性以及设计因素的作用机理。研究表明:湍流状态下(雷诺数为 5 000、10 000 和 20 000),迎流面积最小的模型 2 通道流动阻力最小,同时具有凹陷和凸起结构的模型 4 通道强化换热效果最佳;随脉动频率(2~20 Hz)的增加,3 种模型通道的综合热性能先增再减,而随着脉动振幅(0.1~0.9)的增加,3 种模型通道的综合热性能先增加再小幅度减小;在脉动流和壁面结构的共同作用下,热边界层的发展在结构单元尺度范围内被进一步破坏,高温工质区域沿流向间断分布。脉动流下波纹壁通道内流体扰动的时空耦合效应显著提升了通道综合热性能,为解决狭窄通道内部过热问题提供有效的途径。

关键词: 贝塞尔曲线;波纹壁通道;脉动流;强化换热;时空耦合效应

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209020 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0185-10



OSID 码

Flow and Heat Transfer Characteristics of Bezier-Curve Shaped Corrugated Channel Under Pulsating Flow

DING Yaodong, LIU Zhenwei, LI Ping

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To study the spatiotemporal effect of heat transfer enhancement in the channel under the coupling effect of corrugated structure and pulsating flow, three kinds of corrugated wall channels are designed based on the advantages of changeability, flexibility and easiness to control of Bezier curves in this study and their flow and heat transfer characteristics under different flow and pulsation parameters and the mechanism of design factors are compared and analyzed. The results show that under turbulent flow conditions ($Re=5\,000$, $10\,000$, and $20\,000$), the model 2 channel with the smallest head-on area has the smallest flow resistance, and the model 4 channel with concave and convex structures has the best heat transfer enhancement effect. With the increase of the pulsation frequency (2—20 Hz), the comprehensive thermal performance of the three model channels first increases and then decreases. And with the increase of the pulsation amplitude (0.1—0.9), the comprehensive thermal performance of the three model channels first increases and then slightly decreases. Under the combined impact of the pulsating flow and the wall structure, the development of the thermal boundary layer is further destroyed within the

scale of the structural unit, and the high-temperature working fluid region is discontinuously distributed along the flow direction. The spatiotemporal coupling effect of fluid disturbance in the corrugated wall channel under pulsating flow significantly improves the comprehensive thermal performance of the channel, and provides an effective way to solve the problem of overheating in the narrow channel.

Keywords: Bezier curves; corrugated channel; pulsating flow; heat transfer enhancement; spatiotemporal coupling effect

随着紧凑设计的高产热率设备在各工业领域的广泛应用,狭窄通道内部过热这一妨碍设备长期稳定运行的关键问题愈发突出。解决这一问题,原则上主动和被动两类强化换热策略^[1-2]。

改进流道几何造型可显著影响流动行为,是最直接有效的一类被动控制方法。在流向连续布置流动控制结构的通道可统称为波纹壁通道^[3],常见的通道壁面形状有矩形、三角形、圆弧形和正弦波形等^[4-6]。Islamoglu 和 Parmaksizoglu^[7]通过实验方法研究了三角形波纹通道的热性能,发现强化换热和摩擦系数都随结构垂直凸起高度的增加而增大。Paisarn^[8]通过实验和数值方法研究了同相和异相弧形波纹通道的传热和压降特性,结果表明热边界层的断裂和失稳是换热强化的主要原因。Rashidi 等^[9]数值研究了不同雷诺数下正弦波形通道的传热、压降和熵产表现,发现在波形振幅值为 0.1 时通道综合热性能最佳。上述研究中波纹壁结构的引入,增大了对流换热面积,阻碍沿流向连续发展的热边界层,均显著提升了通道的综合热性能。

贝塞尔曲线作为图形学中一类重要的参数形式曲线^[10],通过改变方程中控制点的坐标,可得到满足设计需求的各类曲线形式。因其具有造型灵活、易控制等特性,该曲线已经在透平机械流道及叶型优化设计中得到应用。王镇宇等^[11]和 Wang 等^[12]将贝塞尔曲线与数值计算相结合,分别针对扩压段倾斜壁面和离心压缩机的子午通道型线进行优化设计,优化后扩压器和离心压缩机的性能都得到显著提升。Deng 等^[13]采用七阶贝塞尔曲线,结合多种优化算法,以活塞最高温度和温度梯度为优化目标,对柴油机活塞冷却廊道截面形状进行再设计,优化后最高温度和最大温度梯度可下降 2.7% 和 2.5%。上述研究中贝塞尔曲线设计理念的引入,将优化对象参数化,优化方向和过程精准可控,优化潜力得到充分发掘。

主动强化与被动强化换热方法的结合可以进一步提升通道热性能。脉动流作为一种高效、易应用

的主动强化方法^[14],其与波纹壁通道的组合使用被认为在强化换热领域具有相互促进效果。杨卫卫等^[15-16]数值研究了引入正弦脉动速度入口后凹槽通道内的流动和传质效果,成果表明脉动速度显著改善了局部传质性能,且强化效果与凹槽几何结构密切相关。谢公南等^[17]数值研究了脉动入口作用下渐扩渐缩波纹通道的流阻及换热特性,结果表明在层流状态下,传热效果随脉动振幅和频率的增大而增强,而流阻大小与脉动频率无关。Wang 等^[18]采用格子玻尔兹曼方法(LBM)研究了百叶窗形通道中三角波形脉动流,发现脉动入口提升了百叶窗形结构的流动控制效果,引起了涡结构的膨胀和收缩,促进了流体间的传热传质。Hoang 等^[19]采用大涡模拟的方法研究了脉动进口条件下 V 型波纹壁通道的流动及换热特性,结果表明脉动速度促进了湍流流动行为的发展,增强了流动不稳定性,强化了通道换热性能。

综上所述,本研究将贝塞尔曲线与波纹壁通道壁面结构设计相结合,充分发挥贝塞尔曲线造型灵活多变、易控制的优势,设计出不同于先前绝大部分研究的非对称、非规则几何造型的波纹壁型线。本文对不同类型的贝塞尔曲线型波纹壁通道进行数值研究,重点关注波纹壁与脉动流耦合使用对通道综合热性能的影响,并进一步结合湍动能、速度、温度分布以及流线图,对众多影响通道热性能因素的作用机理进行阐释。

1 数值计算方法

1.1 物理模型

本研究物理模型如图 1 所示,测试段沿流向共

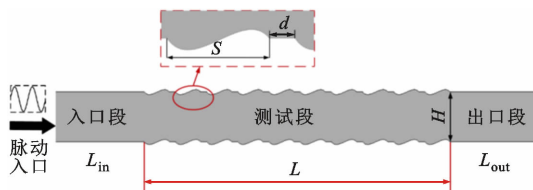


图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Physical model schematic

布置 10 个壁面结构,结构单元流向长度为 S ,相邻单元的间距为 d ,测试段总长为 L 。为方便收敛和控制出、口回流,添加长度分别为 L_{in} 和 L_{out} 的进、出口段,通道高度为 H 。 $S=8\text{ mm}$, $d=2\text{ mm}$, $L=98\text{ mm}$, $L_{\text{in}}=L_{\text{out}}=30\text{ mm}$, $H=16\text{ mm}$ 。

壁面结构型线满足下列三次二维贝塞尔曲线的参数方程

$$x(m)=(1-m)^3x_0+3m(1-m)^2x_1+3m^2(1-m)x_2+m^3x_3$$

(1)

$$y(m)=(1-m)^3y_0+3m(1-m)^2y_1+3m^2(1-m)y_2+m^3y_3$$

(2)

式中:参数 m 的取值范围为 $[0,1]$ 。 P 和 P_3 控制点即为贝塞尔线型的起点与终点,为满足控制结构流向平行布置, P 与 P_3 控制点固定在同一条水平线上。基于贝塞尔曲线的绘制原理, P_1 、 P_2 控制点决定贝塞尔线型的弯曲方向和程度,通过调整控制点 P_1 和 P_2 的位置可灵活改变壁面结构型线。如图 2 所示,本研究设计了 3 类贝塞尔曲线型结构,并补充了圆弧凸起结构(模型 1)作为造型参照。控制点坐标信息如表 1 所示,作为示例,模型 4 控制点在图 2 中直接标记给出。

表 1 控制点坐标信息

Table 1 Control point coordinates mm

模型	控制点坐标			
	P_0	P_1	P_2	P_3
模型 2	(0,0)	(1,1)	(2,2)	(8,0)
模型 3	(0,0)	(5,1)	(7,2)	(8,0)
模型 4	(0,0)	(2,-3)	(6,2.5)	(8,0)

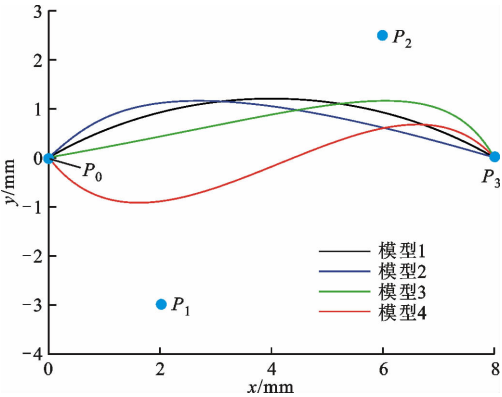


图 2 壁面结构型线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wall structure profile

1.2 控制方程及边界条件

针对本研究问题,求解的流动视为二维、不可压缩、湍流、非定常与常物性。基于上述假设,非定常雷诺时均(URANS)形式的纳维斯托克斯(Navier-

Stokes)方程如下

连续性方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}=0$$

(3)

动量方程为

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\frac{\partial \overline{(u_i u_j)}}{\partial x_j}\right)=-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)-\rho\overline{(u_i' u_j')}\right]$$

(4)

能量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t}+u_j\frac{\partial T}{\partial x_j}=\alpha\frac{\partial}{\partial x_j}\frac{\partial T}{\partial x_j}-\frac{\partial \overline{(u_j' T')}}{\partial x_j}$$

(5)

求解器设置参考同类型通道内流动换热问题的研究^[20-23],选用剪切应力传输(shear stress transfer,SST $k-\omega$)湍流模型封闭上述方程,SIMPLEC 算法被用于对压力和速度进行耦合,动量和能量方程采用二阶迎风格式离散求解。对速度、连续性和能量的残差进行监测,收敛判据设为 10^{-5} 。针对周期性非稳态问题,补充监测加热壁面的平均努塞尔数和测试段的范宁摩擦系数,相邻周期数值相对误差小于 0.1%时,计算视为达到周期稳定。

正弦脉动速度入口满足下列函数关系式

$$u(t)=U_0[1+A\sin(2\pi ft)]$$

(6)

式中: U_0 代表入口速度平均值; A 为脉动振幅; f 为脉动频率。

测试段上下壁面添加稳定热流密度 $q''=50\,000\text{ W/m}^2$,出口设置为自由出流边界条件,剩余边界均设置为绝热无滑移。

1.3 参数定义

本研究中,雷诺数定义为

$$Re=\frac{\rho U_0 D_h}{\mu}$$

(7)

式中: ρ 为工质密度; μ 为工质动力黏度; D_h 为当量直径,在本研究中取 $2H$; U_0 定义式如下

$$U_0=\frac{1}{t_p}\int_t^{t+t_p}u(t)dt$$

(8)

努塞尔数按下式给出

$$Nu=\frac{h''D_h}{k}$$

(9)

式中: k 为工质导热系数; h'' 为对流换热系数,由下式计算可得

$$h''=\frac{q''}{T_w-T_f}$$

(10)

式中: q'' 为热流密度; T_w 为当地壁面温度; T_f 取入口流体温度。

范宁摩擦系数定义式如下

$$f_{\text{Fanning}} = - \frac{(\Delta P/L) D_h}{2\rho U_0^2} \tag{11}$$

式中: ΔP 为测试段压降; L 为测试段流向长度。

针对周期性流动, 为方便统计与分析, 分别给出时均面平均努塞尔数和时均范宁摩擦系数的定义

$$\overline{Nu} = \frac{1}{t_p} \int_t^{t+t_p} Nu(t) dt \tag{12}$$

$$\langle Nu \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L Nu(x) dx \tag{13}$$

$$\overline{\langle Nu \rangle} = \frac{1}{t_p} \int_t^{t+t_p} \langle Nu \rangle dt \tag{14}$$

$$\overline{f_{\text{Fanning}}} = \frac{1}{t_p} \int_t^{t+t_p} f_{\text{Fanning}}(t) dt \tag{15}$$

综上所述, 综合热性能参数定义为

$$\eta = \left(\frac{\overline{\langle Nu \rangle}}{Nu_0} \right) \left(\frac{\overline{f_{\text{Fanning}}}}{f_{\text{Fanning}0}} \right)^{-1/3} \tag{16}$$

式中: Nu_0 和 $f_{\text{Fanning}0}$ 分别为恒定速度入口光滑直通道的面平均努塞尔数和范宁摩擦系数。

1.4 模型验证

1.4.1 网格与时间步无关性验证

如图 3 所示, 对近壁面处网格进行加密处理, 第一层网格高度满足 $y^+ < 1$ 。网格与时间步无关性验证均在模型 4、 $Re=10\ 000$ 、 $A=0.5$ 和 $f=10\ \text{Hz}$ 工况下开展。验证结果如表 2 和表 3 所示, 第 3 套网

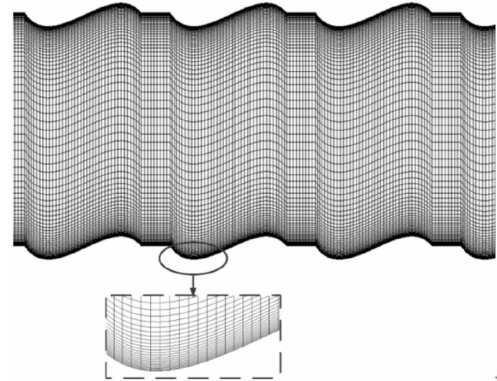


图 3 局部通道及近壁面细化网格展示
Fig. 3 Grid display and partial enlargement

表 2 网格无关性验证

Table 2 Grid independence validation

网格序号	节点数	$\overline{\langle Nu \rangle}$	相对误差/%	$\overline{f_{\text{Fanning}}}$	相对误差/%
1	6 360	205.61	-15.5	0.059 5	-2.43
2	20 200	226.35	-7.0	0.061 5	0.84
3	58 400	239.89	-1.4	0.060 8	-0.29
4	109 200	243.32		0.060 9	

表 3 时间步无关性验证

Table 3 Time step independence validation

时间步序号	时间步长	$\overline{\langle Nu \rangle}$	相对误差/%	$\overline{f_{\text{Fanning}}}$	相对误差/%
1	$(1/20)T$	238.72	-0.54	0.067 4	11.56
2	$(1/40)T$	240.40	0.16	0.062 0	2.67
3	$(1/80)T$	239.89	-0.05	0.060 8	0.63
4	$(1/160)T$	240.01		0.060 4	

格和时间步设置相对于第 4 套, 各项监测参数的相对误差都已经足够小, 满足继续开展后续研究的精度需求。综合考虑计算资源和计算精度因素, 本文后续研究均参考第 3 套网格和时间步设置开展。

1.4.2 数值模型验证

数值方法验证对象选择几何尺寸与本研究模型相近的正弦波纹壁通道, 数值计算结果与 Ahmed 等^[24]的实验数据相对比, 验证结果如图 4 所示, 面平均努塞尔数和流动压损与实验值的最大误差在 10% 以内。进一步, 补充对更高雷诺数下光滑直通道的范宁摩擦系数验证, 并与下列实验关联式^[25]结果进行对比

$$f_{\text{Fanning}} = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \tag{17}$$

结果如表 4 所示, 数值结果与实验关联式相对误差均在 5% 以内。综上所述, 当前数值模型精度足够可靠, 满足下一步研究需求。

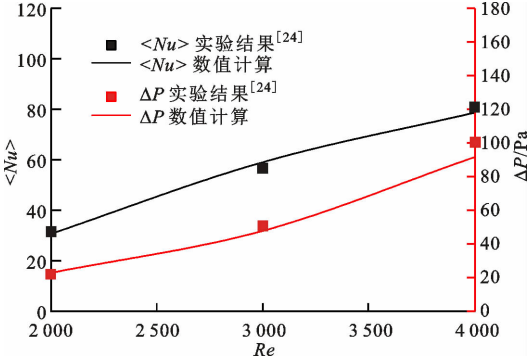


图 4 数值模型验证结果

Fig. 4 Numerical model verification results

表 4 范宁摩擦系数验证

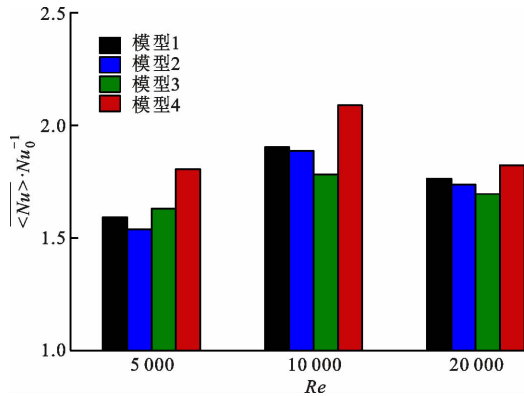
Table 4 The Fanning friction factor validation

Re	范宁摩擦系数		
	本研究数值结果	关联式结果	相对误差/%
10 000	0.032 62	0.031 47	3.65
15 000	0.027 40	0.028 18	-2.77
20 000	0.025 14	0.026 15	-3.86

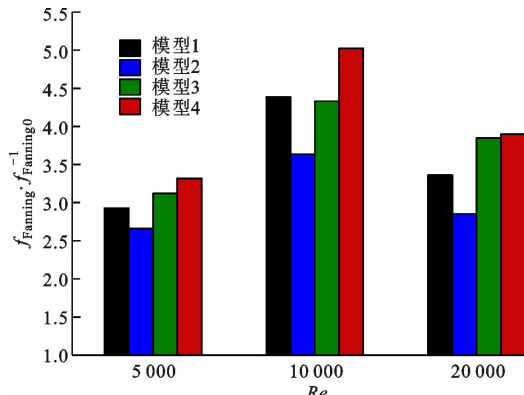
2 结果与分析

2.1 结构造型对通道性能的影响

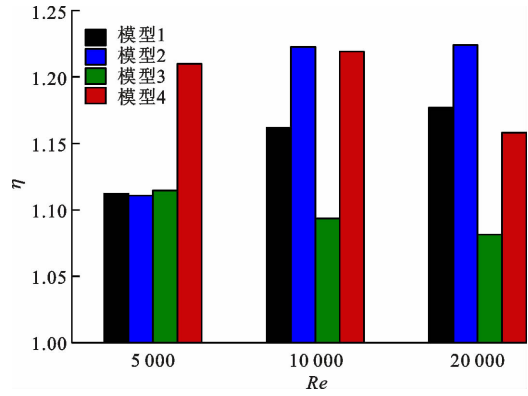
波纹壁结构的造型设计直接影响流动组织和流场分布,进一步影响强化换热效果、流动阻力以及综合热性能。图 5 给出了 Re 分别为 5 000、10 000 和 20 000,脉动入口参数取 $A=0.5$ 和 $f=10\text{ Hz}$ 时,4 种壁面结构造型的换热、流阻和综合热性能。当 $Re=5\text{ 000}$ 时,迎流面积最小的模型 2 的换热和阻力提升在 4 种模型中都是最小,而同时具有凸起、凹陷结构的模型 4 通道换热和阻力提升在 4 种模型中都取到最大。4 种结构通道的综合热性能提升均在 10% 以上,其中模型 4 提升最大达到 21.9%。当 Re 提升到 10 000 时,4 种模型通道的换热和阻力提升都更加显著,换热提升均超过 75%,阻力提升均超过 25%。模型 2 和模型 4 通道的综合热性能提升接近,均达到 22% 左右,而迎流面积最大的模型 3 提升最小。当 Re 进一步提升至 20 000,换热和阻力提升幅度相较 $Re=10\text{ 000}$ 时均出现回落。模型 3 迎流面积大引起过高流阻提升的劣势在高雷诺数下更加显著,综合热性能提升只有 8.1%,显著低于其余 3 种模型。与之相对应,模型 2 在高雷诺数下



(a) 换热性能



(b) 流动阻力



(c) 综合热性能

图 5 不同结构造型下换热、流阻及综合热性能对比

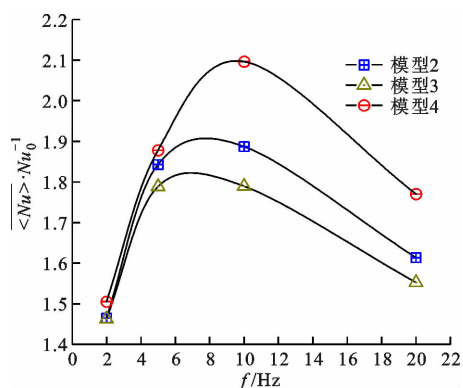
Fig. 5 Comparison of heat transfer, flow resistance and comprehensive thermal performance under different structural shapes

流阻低的优势明显,综合热性能提升可达 22.4%。

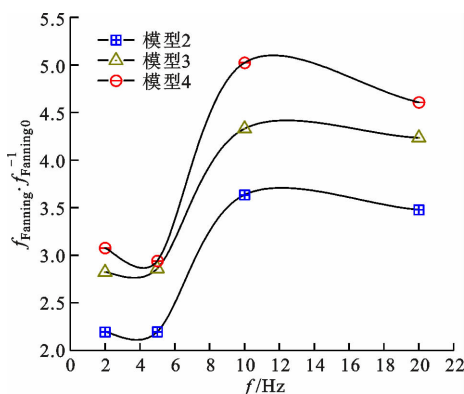
2.2 脉动参数对通道性能的影响

脉动参数 A 、 f 决定脉动流特性,同时对通道各项性能产生决定性影响。图 6 展示了在 Re 为 10 000、 $A=0.5$ 工况下,换热、流阻以及综合热性能随 f 的变化。如图 6(a)所示,3 种模型通道的强化换热效果都随 f 先增大再减小,当频率小于等于 5 Hz 时,3 种模型通道的强化换热效果近似。随着频率的提升,脉动流特性逐渐凸显,模型 4 通道的强化换热效果显著好于模型 3 和模型 2,且模型 3 的换热提升始终最低。图 6(b)给出了 3 种模型通道流动阻力随 f 的变化,3 种通道的变化趋势特点十分相似,均先小幅下降再迅速上升最后又小幅下降。模型 4 通道的流动阻力始终大于模型 3,而模型 2 的流动阻力始终最小。综合图 6(a)和图 6(b)的结果,计算得到综合热性能 η 绘制图 6(c)。如图 6(c)所示,3 种模型通道的 η 随 f 的变化趋势一致,均先增后减,极大值都出现在 $f=5\text{ Hz}$ 处。模型 2 在低频率段展现出优势,在 $f=5\text{ Hz}$ 时,综合热性能提升达 41.8%。当频率进一步提升,模型 2 通道和模型 4 的 η 几乎一致,而模型 3 的 η 最小。

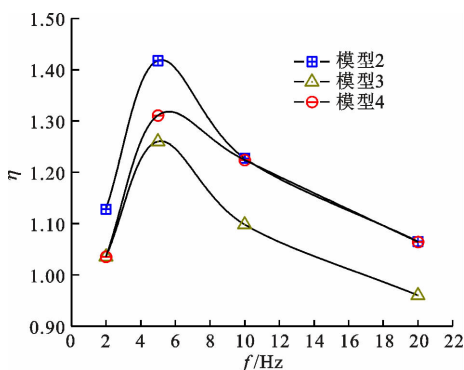
由上述结果可知,在 $f=5\text{ Hz}$ 下,3 种模型通道均获得了最佳综合热性能。进一步,图 7 给出了在 $Re=10\text{ 000}$ 、 $f=5\text{ Hz}$ 工况下,换热、流阻以及综合热性能随 A 的变化。如图 7(a)和 7(b)所示,随着脉动振幅的增加,换热和流阻均单调增加。3 种模型通道的换热提升变化趋势均近似正比例函数型,模型 4 的换热提升在 3 个模型中始终最大,且振幅越高差距越显著。3 种模型通道的流阻变化趋势都



(a) 换热性能



(b) 流动阻力

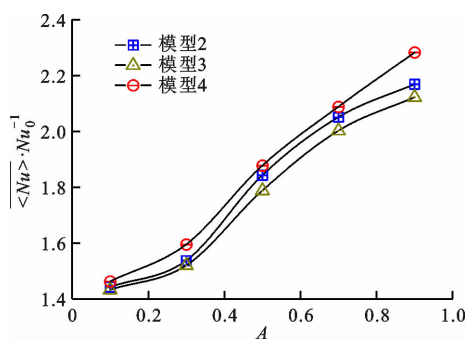


(c) 综合热性能

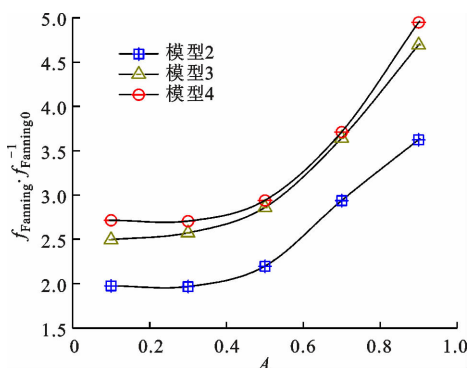
图6 脉动频率对换热、流阻和综合热性能的影响

Fig. 6 Effect of pulsation frequency on heat transfer, flow resistance and overall thermal performance

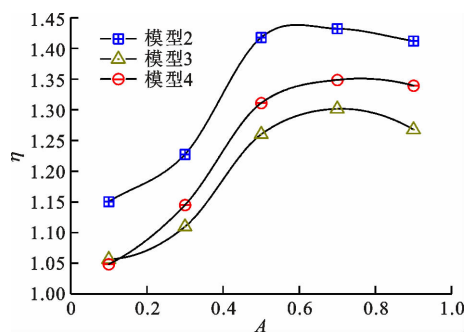
近似指数函数型,模型3和模型4的流动阻力提升幅度十分近似,而模型2的流动阻力提升幅度显著偏小。图7(c)给出了3种模型通道的综合热性能随 A 的变化。如图7(c)所示,在低振幅段,3种模型通道的 η 都随脉动振幅的提升而提升,当振幅大于0.5后,综合热性能随振幅的提升不明显,且进一步增大脉动振幅,3种模型的 η 均出现下降现象。综合热性能整体分布始终满足模型2优于模型4优于模型3。



(a) 换热性能



(b) 流动阻力



(c) 综合热性能

图7 脉动振幅对换热、流阻和综合热性能的影响

Fig. 7 Effect of pulsation amplitude on heat transfer, flow resistance and overall thermal performance

2.3 场场分析

这一部分将结合通道内流线图及云图分布,对造成通道性能差异的各影响因素进行机理分析。受限于篇幅,本文重点分析强化换热效果最佳的模型4通道,选择 $Re=10\ 000$ 、 $A=0.5$ 下的结果进行展示和分析。图8给出了模型4通道沿流向在下壁面第3个结构处的湍动能及流线一个周期内的变化规律。如图8所示,选择 $f=2, 5, 10, 20$ Hz 4个频率以及 $t=0, (1/4)T, (1/2)T, (3/4)T$ 4个时刻进行对比分析。当 $f=2$ Hz时,流动的脉动特性并不突出,在一个周期内的大部分时间都维持大小和形态

高度相似的双涡结构,仅在周期末向周期初转变阶段涡结构形态发生明显减小。湍动能分布方面,在较高流速阶段($t=(1/4)T,(1/2)T$),结构附近形成高端动能区域,湍流掺混能力增强,阻力损失也同时增大。当频率进一步提升至 5、10 Hz,高端动能区域的核心区域湍动能强度下降,但是分布区域向主流区域扩展。一个周期内涡结构的形态和大小变化明显,前人研究中观察到的涡生成、发展、成熟、迁移和脱落^[15-17]这一基本变化规律仍然存在。

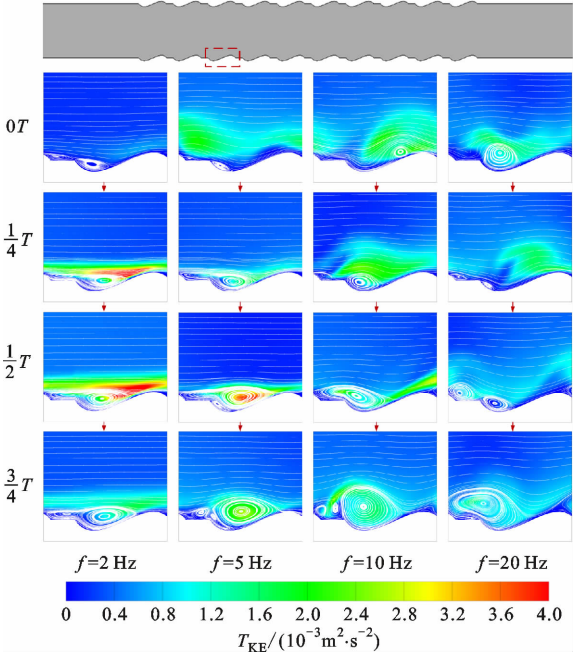


图 8 不同频率下湍动能分布和流线一个周期内随时间的演变

Fig. 8 Evolution of instantaneous turbulent kinetic energy distribution and the streamline in one cycle at different frequencies

值得注意的是,在流动周期的中、后期,涡结构出现失稳现象,次级小涡开始生成发展。图 9 对 $f=5\text{ Hz}$ 工况下流场进行更细的时间切面处理,如图 9 所示,从 $t=(4/8)T$ 时刻开始,主流速度的减小削弱了主流对结构间涡结构的压缩效果,主涡形态开始快速增大。与此同时,次级小涡开始先后生成并发展,其形态在 $t=(7/8)T$ 时刻达到最大。进一步,由于主流强度的大大削弱,脉动周期末端的主涡和次级涡都无法再从主流中补充足够的能量来进一步发展,原有涡结构形态也无法维持,涡结构迅速消散。上述现象在每一个结构单元尺度范围内又进一步破坏了热边界层的发展,同时也促进了涡间以及结构单元与主流的传热传质,与图 6(a)中 Nu 值的

显著提升相呼应。

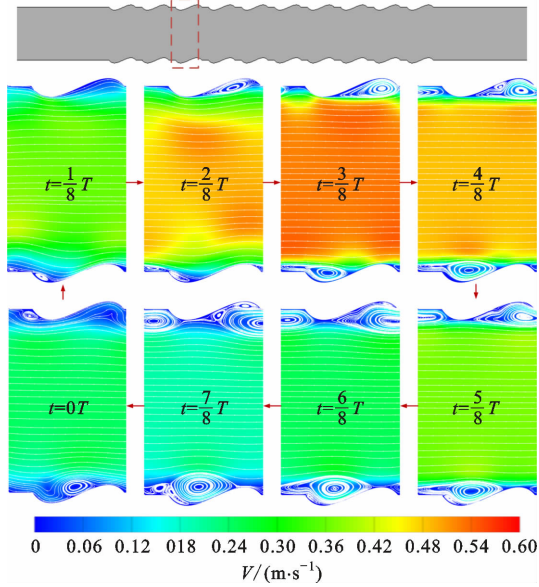


图 9 $f=5\text{ Hz}$ 时速度分布和流线一个周期内随时间的演变

Fig. 9 Evolution of instantaneous velocity distribution and the streamline in one cycle at $f=5\text{ Hz}$

当频率进一步提升至 20 Hz,流场整体的湍动能强度下降,脉动周期时长的减小进一步缩短了涡结构发展的时间。在周期的中段($t=(1/4)T,(1/2)T$),结构处的涡结构发展不够充分,涡结构显著小于其他频率的同时刻涡结构。在周期的末端($t=(3/4)T$),双涡结构融合成稳定的单涡结构,涡结构达到所有频率和时刻下的最大体积。在整个脉动周期内,主涡结构位置不发生明显的迁移现象,在原位置发展和消散。

脉动振幅对通道性能的影响相较于脉动频率更加显著。图 10 给出了模型 4 通道沿流向第 3 结构单元处在 $Re=10\,000$ 、 $f=5\text{ Hz}$ 、 $A=0.1$ 和 0.9 工况下,流场湍动能分布和流线一个周期内随时间的演变。如图 10 所示,当 $A=0.1$ 时,流动的脉动特征不显著,高端动能区域在整个周期内都附着在壁面结构附近。结构单元内的涡结构位置及形态随时间发展变化不明显,流场分布接近于稳态流动。当脉动振幅增大到 0.9,流场随时间变化显著。在 $t=(2/4)T$ 时刻,结构单元附近湍动能强度显著增强。随时间推进,高端动能区域在后半个脉动周期迅速扩散至主流核心区,同时涡结构显著增大,单涡直径超过 $1/4$ 通道高度,主流流线受到挤压、扭转。高端动能区域和主涡扩散至主流核心区范围显著增强了湍流的输运作用,强化了通道的散热性能,但是湍流

黏性阻力也大大提升,与图 7(b)高振幅段流动阻力迅速提升的现象相呼应。

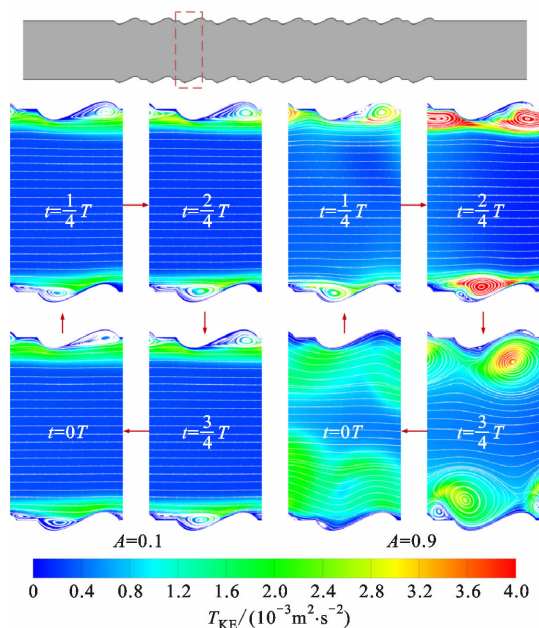
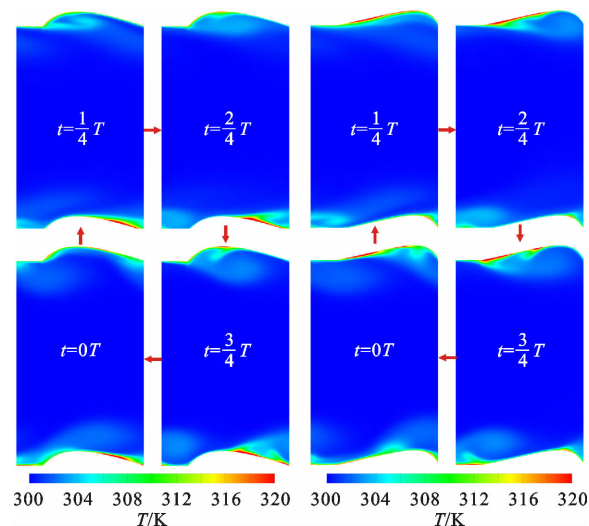


图 10 不同振幅下端动能分布和流线一个周期内随时间的演变

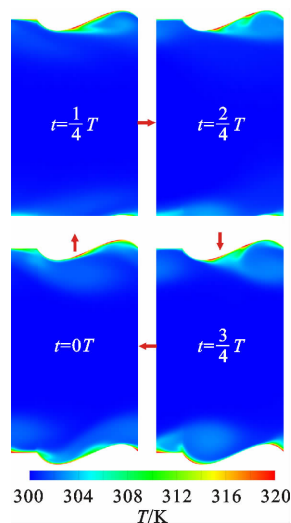
Fig. 10 Evolution of instantaneous turbulent kinetic energy distribution and the streamline in one cycle at different amplitude

图 11 依次给出了模型 2~4 通道沿流向第 5 结构单元处在 $Re=10\ 000$ 、 $A=0.5$ 和 $f=5\ \text{Hz}$ 下的温度场一个周期内随时间的演变。在壁面结构和脉动流动的共同作用下,3 种模型通道的温度场都得到不同程度的扰动,近壁面处的高温工质区域并没有沿流向发展变厚。靠近加热壁面处的部分高温工质随时间发展被脉动流裹挟至主流区域,沿通道高



(a) 模型 2

(b) 模型 3



(c) 模型 4

图 11 不同模型温度场一个周期内随时间的演变

Fig. 11 Evolution of instantaneous temperature distribution in one cycle at different models

度方向(壁面到主流)并没有形成稳定的温差梯度。模型 2 迎流侧在全周期都没有出现高温工质区域,而背流侧间断出现高温工质。模型 3 的下侧结构处仅存在少量高温工质积累现象,而在上侧结构的背流区域出现连续高温工质区域。模型 4 的高温工质积累现象最不明显,上下侧结构处均间断出现小范围高温工质区域,高温工质向主流区扩散现象在 3 种模型中最显著,与图 5(a)中模型 4 的最佳强化换热效果相呼应。

3 结 论

本文应用贝塞尔曲线理论设计新的波纹壁通道结构,对脉动速度和壁面结构耦合作用下的通道内流动、换热现象展开数值研究,主要研究结论总结如下。

(1)在脉动入口参数取 $A=0.5$ 和 $f=10\ \text{Hz}$ 条件下,模型 2 通道流动阻力始终最小,而模型 4 通道强化换热效果始终最佳。当 $Re=5\ 000$ 时,模型 4 通道的综合热性能提升最大,达到 21.9%。当雷诺数增大到 20 000 时,模型 2 通道的 η 最大,达到 1.224。

(2)当 $Re=10\ 000$ 、 $A=0.5$ 时,3 种模型通道的努塞尔数随脉动频率的增大均先增大后减小,而摩擦系数呈先小幅下降再迅速上升最后又小幅下降的变化趋势。3 种模型的 η 均先增后减,最大值均在 $f=5\ \text{Hz}$ 处取到。

(3)当 $Re=10\ 000$ 、 $f=5\ \text{Hz}$ 时,3 种模型通道

的努塞尔数和摩擦系数随脉动振幅的增大均单调增大, η 约在 $A=0.7$ 时取到最大值, 再进一步增大振幅, 3 种模型的综合热性能均下降。

(4) 在脉动流和壁面结构耦合作用下, 不仅主涡结构经历生成、发展、消散的基本变化过程, 在脉动周期的中后段失稳形成的次级小涡也经历类似过程。上述现象在小尺度范围内又进一步破坏了热边界层的发展, 促进了涡间以及结构单元与主流的传热传质。

(5) 3 种模型通道近壁面处的部分高温工质都在脉动流作用下被裹挟至主流区域, 近壁面处的高温工质区域并没有沿流向发展变厚, 高温工质区域主要在背流侧间断出现。

参考文献:

- [1] 赵振, 高建民, 徐亮, 等. 圆台扰流换热器结构参数优化的数值模拟研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(12): 35-46.
ZHAO Zhen, GAO Jianmin, XU Liang, et al. Numerical simulation on structural parameter optimization of heat exchanger with frustum of a cone [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(12): 35-46.
- [2] 李健武, 符阳春, 张志伟, 等. 进口雷诺数和湿空气含湿量对冲击冷却流动和传热特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 170-178.
LI Jianwu, FU Yangchun, ZHANG Zhiwei, et al. Influences of inlet Reynolds number and humidity ratio of moist air on flow and heat transfer characteristics of impingement cooling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 170-178.
- [3] 阴继翔, 李国君, 丰镇平. 交错波纹板原表面换热器通道内对流换热的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(1): 36-40.
YIN Jixiang, LI Guojun, FENG Zhenping. Numerical study on the characteristics of convection heat transfer in crossed-corrugated primary surface exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(1): 36-40.
- [4] 张峰, 王新军, 李军, 等. 肋片凹槽通道内的流动与换热特性数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(7): 1512-1518.
ZHANG Feng, WANG Xinjun, LI Jun, et al. Numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics of the rib-grooved channel [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(7): 1512-1518.
- [5] MOHAMMED H A, ABED A M, WAHID M A. The effects of geometrical parameters of a corrugated

- channel with in out-of-phase arrangement [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 40: 47-57.
- [6] TOKGOZ N, AKSOY M M, SAHIN B. Investigation of flow characteristics and heat transfer enhancement of corrugated duct geometries [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 518-530.
- [7] ISLAMOGLU Y, PARMAKSIZOGLU C. The effect of channel height on the enhanced heat transfer characteristics in a corrugated heat exchanger channel [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(8): 979-987.
- [8] PAISARN N. Study on the heat-transfer characteristics and pressure drop in channels with arc-shaped wavy plates [J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2010, 83(5): 1061-1069.
- [9] RASHIDI S, AKBARZADEH M, MASOODI R, et al. Thermal-hydraulic and entropy generation analysis for turbulent flow inside a corrugated channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 812-823.
- [10] FARIN G. Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide [M]. 4th ed. New York, USA: Academic Press, 1997: 96-112.
- [11] 王镇宇, 钱佳, 戴韧. 基于 CFD 和正交试验方法的非对称平面扩压器的流动优化 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(5): 352-356.
WANG Zhenyu, QIAN Jia, DAI Ren. Flow simulation and optimization of the asymmetric plane diffuser based on the CFD and orthogonal test method [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(5): 352-356.
- [12] WANG Jie, WANG Dong, CAI Wenxiang, et al. Study on the influence of meridional channel to centrifugal compressor performance [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 220-223: 592-596.
- [13] DENG Xiwen, CHEN Hao, XIN Qianfan, et al. Flexible section-profile design of a cooling gallery inside a diesel engine piston [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 176: 115372.
- [14] 杨卫卫, 何雅玲, 徐超, 等. 平直通道中层流脉动流动的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 925-928.
YANG Weiwei, HE Yaling, XU Chao, et al. Numerical study of laminar pulsating flow in a channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(9): 925-928.
- [15] 杨卫卫, 何雅玲, 陶文铨, 等. 凹槽通道中脉动流动强化传质的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2004,

- 38(11): 1119-1122.
- YANG Weiwei, HE Yaling, TAO Wenquan, et al. Numerical study on enhancing mass transfer in grooved channel by pulsating flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(11): 1119-1122.
- [16] 何雅玲, 杨卫卫, 赵春风, 等. 脉动流动强化换热的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 495-497.
- HE Yaling, YANG Weiwei, ZHAO Chunfeng, et al. Numerical study of enhancing heat transfer by pulsating flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 495-497.
- [17] 谢公南, 王秋旺, 曾敏, 等. 渐扩渐缩波纹通道内脉动流的传热强化 [J]. 高校化学工程学报, 2006, 20(1): 31-35.
- XIE Gongnan, WANG Qiuwang, ZENG Min, et al. Heat transfer enhancement inside converging-diverging wavy channel by pulsating flow [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2006, 20(1): 31-35.
- [18] WANG Chunsheng, WEI T C, SHEN Poyi, et al. Lattice Boltzmann study of flow pulsation on heat transfer augmentation in a louvered microchannel heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119139.
- [19] HOANG V Q, HOANG T T, DINH C T, et al. Large eddy simulation of the turbulence heat and mass transfer of pulsating flow in a V-sharp corrugated channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 166: 120720.
- [20] 申仲畅, 谢永慧, 张荻, 等. 不同球窝/球凸结构的旋转矩形通道传热及阻力特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(11): 52-57.
- SHEN Zhongyang, XIE Yonghui, ZHANG Di, et al. Heat transfer and flow friction performance of rotating rectangular channels with different dimple/protrusion structures [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(11): 52-57.
- [21] 张峰, 王新军, 李军. 球凹平板冲击冷却性能的数值研究及结构改进 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 124-130.
- ZHANG Feng, WANG Xinjun, LI Jun. Numerical investigation on the impingement cooling performance and structural improvement of dimpled plates [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 124-130.
- [22] LI Ping, GUO Dingzhang, LIU Ruirui. Mechanism analysis of heat transfer and flow structure of periodic pulsating nanofluids slot-jet impingement with different waveforms [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 937-945.
- [23] 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 micro-channel heat sinks with split protrusion [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(14): 1526-1534.
- [24] AHMED M A, YUSOFF M Z, NG K C, et al. Numerical and experimental investigations on the heat transfer enhancement in corrugated channels using SiO₂-water nanofluid [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2015, 6: 77-92.
- [25] INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. 6th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2006.

(编辑 武红江 亢列梅)