

脉动流与波纹壁通道耦合强化换热及优化研究

丁耀东, 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: 为获得节能效果良好的散热通道,并进一步提升壁面结构优化设计效率,提出将遗传算法应用于数值计算过程,建立壁面型线的数学模型。对比分析了正弦脉动流作用下弧型、正弦型和贝塞尔曲线型3类波纹壁通道内流动换热现象,实现应用遗传算法调控优化计算流程,完成了通道结构的精确、快速优化。结果表明,弧型通道的流阻最低,正弦型通道的传热增强效果最好,而贝塞尔型通道兼具适度的传热增强和流动阻力提升。当雷诺数为5 000和10 000时,贝塞尔型通道综合性能显著优于其余两类通道,相对提升均超过20%,而雷诺数增加到20 000时,通道综合性能也仅略小于弧型通道。壁面结构的添加在近壁面处激发出高湍动能区域,增强了近壁面流体与主流的传热、传质过程,近壁面高温工质被周期性地输运向主流方向。以贝塞尔型通道为优化对象,以综合性能评价指标为目标函数,建立了结合遗传算法的壁面型线快速精确优化方法。优化后的贝塞尔型结构整体趋向右后方布置,抑制了背流侧次级涡的分裂,涡结构强度得到保证。这一现象改善了背流侧的温度分布,缓解了局部过热问题,并最终实现了综合性能评价指标高达38.7%的提升。

关键词: 遗传算法;贝塞尔曲线;波纹壁通道;脉动流;强化换热

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202307011 **文章编号:** 0253-987X(2023)07-0120-10

Research on Coupling of Pulsating Flow and Corrugated Channels for Heat Transfer Enhancement and Genetic Algorithm Optimization

DING Yaodong, LI Ping

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

Abstract: In order to obtain the channel enhanced heat transfer technology with good energy saving effect, the enhanced heat transfer performance mechanism and flow characteristics under the coupling effect of the corrugated channel wall profile and the inlet pulsating flow were studied. The flow and heat transfer phenomena in three kinds of corrugated channels under the sinusoidal pulsating flow were compared and analyzed. The results show that under the studied Reynolds number range, the arc channel has the lowest flow resistance, the sinusoidal channel has the best heat transfer enhancement effect, and the Bezier channel has both moderate heat transfer enhancement and flow resistance improvement. When the Reynolds number is 5 000 or 10 000, the comprehensive performance of the Bezier channel is significantly better than that of the other two kinds of channels, relatively improved by more than 20%. When the Reynolds number increases

to 20 000, the comprehensive performance is only slightly smaller than that of the arc channel. The addition of the wall structure excites a high turbulent kinetic energy region near the wall, which enhances the heat and mass transfer between the fluid near the wall and the mainstream, and the high-temperature fluid near the wall is periodically transported to the mainstream. Furthermore, with the Bezier channel featuring excellent comprehensive performance selected and the comprehensive performance evaluation criterion chosen as the objective function, a fast and accurate optimization method of the wall profile based on the genetic algorithm is established. The optimization results show that the Bezier structure tends to be arranged to the right and rear is conducive to the improvement of comprehensive performance, and the improvement of the optimal channel reaches 38.7%. The change of the channel structure affects the distribution position and intensity of the secondary vortex, which further improves the temperature distribution on the downstream side and alleviates the problem of local overheating.

Keywords: genetic algorithm; Bezier curve; corrugated channel; pulsating flow; heat transfer enhancement

随着工业设备的性能提升和高度集成化,热流密度提升引起的通道换热恶化问题成为了限制各领域设备发展的瓶颈^[1-3],因此发展更加适用、高效、节能的冷却技术已成为研究人员面临的不可回避的难题。

作为强化换热众多技术路线中的一条,通过添加自激励或强制脉动源引入脉动流,在拥有入口效应、减薄边界层、增加湍流强度等多重强化换热机理的同时,还抑制了换热器的结垢,在船舶工业领域得到重点应用^[4-6]。王军等^[7]实验研究了引入脉动流对板式换热器强化换热效果,结果表明脉动流可以增强换热效果,达到节能减排的目的。张亮等^[8]采用数值模拟方法进行了类似研究,发现当振动分率大于1时,传热增强效果显著。先前研究已经揭示了脉动流参数对弧形波纹壁通道传热、传质过程的影响机制^[9-10],结果表明在所研究工况范围内,脉动频率为10 Hz时换热提升最大,而综合性能指标在5 Hz时最优。脉动流的引入向流场输入非稳态激励,当各项参数设置合理时,能显著促进流体传热、传质过程,提升设备综合热性能。

通过优化通道的造型设计来提升其综合热性能,无需引入额外设备,不提升系统复杂程度,始终为强化换热领域的研究热点。Ajeel等^[11]数值研究了半圆型、梯型和房屋型3类波纹壁通道,其中梯型结构获得最优综合性能指标,而半圆型和房屋型结构次之。韩怀志等^[12]关注了波纹壁通道中倒角连接结构对综合热性能的影响,研究发现将大波谷半径布置于来流侧可获得更好的热性能。Bhowmick等^[13]对梯型、三角型和正弦型的带单层多孔铝泡沫

的波纹壁通道开展数值研究,结果表明梯型通道在不同雷诺数和纳米流体体积分数下均获得最佳综合热性能。Ma等^[14]数值模拟了不同相位移角下的交叉正弦波纹板换热器的热力性能,结果表明当相位移角为324°时,性能达到最佳。波纹壁通道的型线轮廓、整体布置等都会对通道综合热性能产生显著影响,进行造型优化可以充分释放通道综合热性能潜力。

近年来,将优化算法与数值计算进行耦合这一模式引起了研究人员的关注。相较于进行正交实验以获得优化模型,在优化算法的控制下,针对多变量问题的优化时长大大缩短,且优化效果更佳。其中遗传算法又因为其适用范围广和全局搜索性好的特点,得到了研究人员的青睐。Wang等^[15]将螺旋盘管换热器设计集成到遗传算法中,优化后的换热器热通量和传热率分别提高了110%和101%。Yan等^[16]通过基于遗传算法的多目标优化,获得了具有Y形分形网络的散热器的优化设计,研究结果表明,多目标优化模型可以节省高达25%的泵送功率。Moon等^[17]应用遗传算法优化了添加翅片装置的通道。与没有内部翅片的光滑装置相比,优化后的通道的总热阻在层流状态下降低了77%,湍流状态下降低了65%。遗传算法在上述研究的优化过程中显示出其优越的控制性能,辅助研究人员快速准确地获得了优化结果。

综上所述,在正弦波纹壁通道的基础上,研究者进一步提出贝塞尔型波纹壁通道的设计方案。贝塞尔曲线^[18]概念的引入,进一步赋予了波纹壁型线一

个更加灵活多变的数学模型。其数学模型的引入,也为后续结合优化算法,实现对综合性能评价指标优化过程的智能调控提供便利^[19]。本文数值研究了脉动流作用下 3 类通道的传热、传质过程,进一步利用贝塞尔曲线数学模型并结合遗传算法,实现了对贝塞尔通道壁面型线的精确快速优化,获得了综合性能指标更优的波纹壁通道,为设计高效、节能的板式换热器提供思路。

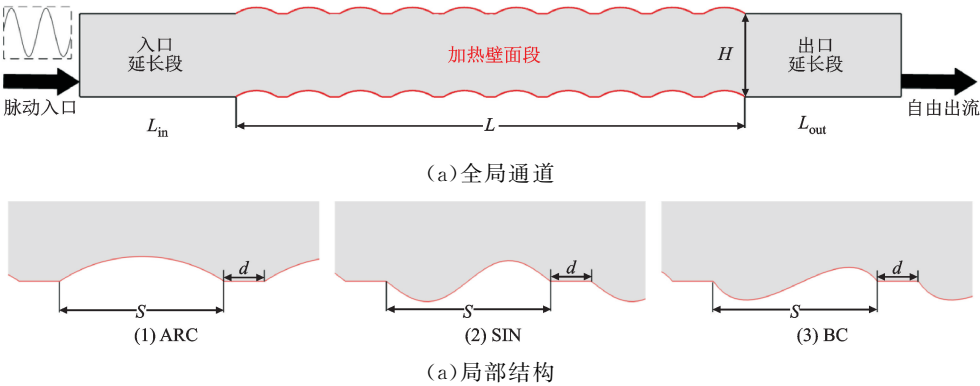


图 1 3 类波纹壁通道模型示意图
Fig. 1 Physical model schematic

表 1 通道模型几何参数	
Table 1 Channel model geometric parameters	
单位:mm	
通道参数	数值
测试段流向长度 L	98
进/出口延长段 $L_{in}=L_{out}$	30
通道高度 H	16
壁面结构流向长度 S	8
相邻壁面结构流向间隔 d	2

本研究重点关注圆弧形 (ARC)、正弦波型 (SIN) 和贝塞尔型 (BC) 这 3 类通道,后文算例中的 3 类通道壁面型线如图 2 所示。

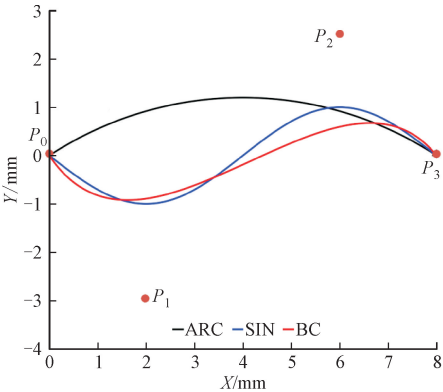


图 2 通道结构型线示意图
Fig. 2 Schematic diagram of channel wall structure profile

1 数值计算方法

1.1 物理模型

3 类波纹壁通道模型如图 1 所示,加热壁面段等间隔布置共 10 个几何结构(图 1 中以弧型结构为例),同时为使流动充分发展并控制出口回流,计算模型添加进、出口延长段。通道模型的各项几何参数在表 1 中给出。

图 2 中的 4 个红色标记点为贝塞尔曲线的 4 个控制点,体现贝塞尔曲线绘制原理,其中 0、3 控制点决定曲线始末,1、2 控制点决定曲线走向。三次二维贝塞尔曲线数学模型通常以如下参数方程形式给出

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

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

式中:参数 m 的取值范围为 $[0,1]$ 。

1.2 控制方程及边界条件

为在保证计算精度的同时,简化数值求解过程,针对本研究中流动问题,做出以下假设:①二维;②非稳态;③湍流;④不可压缩;⑤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

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right]$$
 (4)

能量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} - \frac{\partial u_j T'}{\partial x_j} \tag{5}$$

式中： x_i 、 x_j 分别代表笛卡尔坐标系下的 x 、 y 方向； μ_i 、 μ_j 分别为 x 、 y 方向的速度矢量。

本文工作基于 ANSYS Fluent 20.0 商用软件进行数值求解^[20-22]。选用剪切应力传输(SST $k-\omega$)湍流模型对上述方程进行封闭,选用 SIMPLEC 算法对压力-速度耦合场进行求解,选用二阶迎风格式动量和能量方程进行离散。当数值计算结果同时满足下列 3 个条件:①速度、连续性项的残差达到 10^{-5} ;②能量项的残差达到 10^{-6} ;③相邻周期的时均面平均努塞尔数和时均范宁摩擦系数相对误差小于 0.1%时,数值计算达到收敛。

正弦脉动入口速度满足下列函数关系式

$$u(t) = U_0[1 + A\sin(2\pi ft)] \tag{6}$$

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 $q'' = 50 \text{ kW/m}^2$,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

$$Re = \frac{\rho U_0 D_h}{\mu} \tag{7}$$

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 的定义式如下

$$U_0 = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} u(t) dt \tag{8}$$

式中： t 代表时间; τ 为一个脉动周期的时长。

努塞尔数按下式给出

$$Nu = \frac{h'' D_h}{k} \tag{9}$$

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

$$h'' = \frac{q''}{T_w - T_f} \tag{10}$$

式中： q'' 为热流密度; T_w 为当地壁面温度;由于进出口流体温升极小,此处 T_f 可近似取入口流体温度。

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,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。

时均努塞尔数为

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

面平均努塞尔数为

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

时均面平均努塞尔数为

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

时均范宁摩擦系数为

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

综上,综合性能评价指标^[23]定义为

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

式中： Nu_0 和 $f_{\text{Fanning}0}$ 分别代表以 U_0 为恒定速度入口条件下光滑直通道的面均努塞尔数和范宁摩擦系数。

式(16)无量纲化参照基准的选择依据于表 2 的基准工况计算结果。在综合考虑本文研究主旨后,选择平直通道和稳定流入口组合作为本文后续研究的基准工况。

计算结果表明,单独应用脉动流或波纹壁结构均无法有效提升通道综合性能评价指标,本文后续研究均基于耦合使用条件下的工况展开。

表 2 基准工况计算结果($Re=10\,000, A=0.5, f=10 \text{ Hz}$)

Table 2 Base case trial results($Re=10\,000, A=0.5, f=10 \text{ Hz}$)

工况	$\overline{\langle Nu \rangle}$	$\overline{f}_{\text{Fanning}}$	P_{EC}
平直通道+稳定流入口	114.87	0.0121	1
平直通道+脉动流入口	115.16	0.0112	1.029
贝塞尔结构通道+稳定流入口	164.99	0.0329	1.027

1.4 模型验证

1.4.1 网格与时间步无关性验证

局部通道及近壁面细化网格如图 3 所示,对近壁面网格进行加密处理, y^+ 值小于 1,满足 SST $k-\omega$ 模型对网格的需求。网格与时间步无关性验证均在 BC

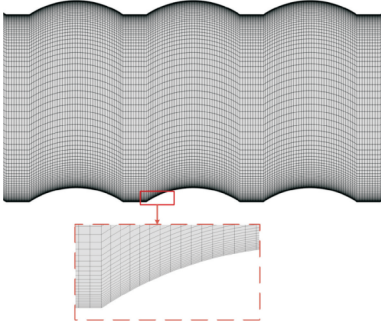


图 3 局部通道及近壁面细化网格

Fig. 3 Grid display and partial enlargement

型通道, $Re=10\,000$ 、 $A=0.5$ 和 $f=10\text{ Hz}$ 工况下开展, 结果见表 3 和表 4, 在第 3 套网格和时间步设置下, 监测值相对误差已经足够小, 达到本研究问题对数值精度的需求。为节省计算资源、缩短计算时长, 后续研究均采用第 3 套网格和时间步设置进行。

表 3 网格无关性验证

Table 3 Grid independence validation

网格 序号	节点数	$\overline{Nu}$	$\overline{Nu}$ 的相 对误差 / %	$\bar{f}_{\text{Fanning}}$	$\bar{f}_{\text{Fanning}}$ 的相 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 4 时间步无关性验证

Table 4 Time step independence validation

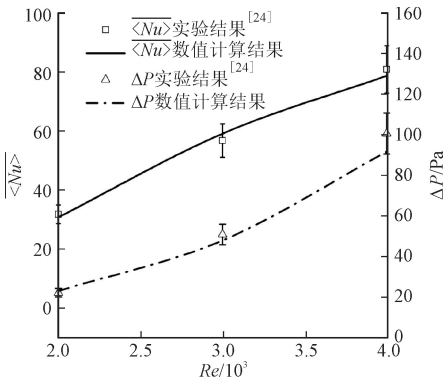
时间步 序号	时间 步长	$\overline{Nu}$	$\overline{Nu}$ 的相对 误差 / %	$\bar{f}_{\text{Fanning}}$	$\bar{f}_{\text{Fanning}}$ 的相对 误差 / %
1	$(1/20)\tau$	238.72	-0.54	0.067 4	11.56
2	$(1/40)\tau$	240.40	0.16	0.062 0	2.67
3	$(1/80)\tau$	239.89	-0.05	0.060 8	0.63
4	$(1/160)\tau$	240.01		0.060 4	

1.4.2 数值模型验证

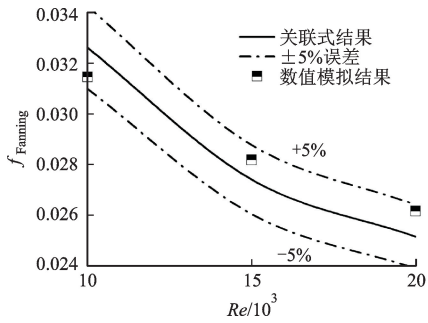
数值模型验证分为两部分开展, 分别对换热和流阻求解进行精度校核。换热验证部分, 选择 Ahmed 等^[24]实验研究的几何尺寸相近的正弦波纹壁通道作为参照; 流阻验证部分, 选用下列实验关联式^[25]结果作为参照

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

数值模型验证结果如图 4 所示, 换热求解部分的数值结果与实验测量值的最大误差在 10% 以内; 而流阻求解部分的数值结果与实验关联式的相对误差更是控制在 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。



(a) 换热验证部分



(b) 流阻验证部分

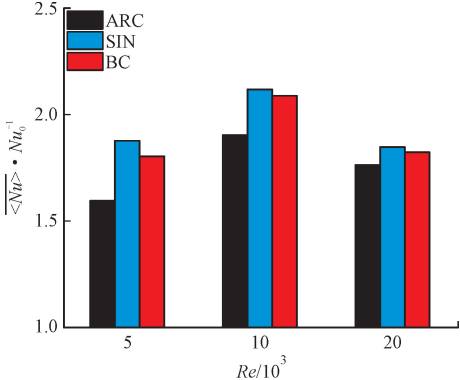
图 4 数值模型验证结果

Fig. 4 Numerical model verification results

2 结果与分析

2.1 结构造型对通道性能的影响

图 5 给出了 3 种通道在 $A=0.5$ 、 $f=10\text{ Hz}$ 、 Re 为 5 000、10 000、20 000 时的传热增强、流动阻力和综合性能评价指标。相对值的计算基于同条件下无脉动平直通道的数值计算结果。由图 5 可见, 在所有雷诺数下, 正弦型通道的流动阻力和传热增强最大, 而弧型通道的流动阻力和传热增强最小。迎流侧面积大小和最大凸起高度是不同类型通道产生差异的主要原因。3 类通道的综合性能评价指标都得到了提升, 当 Re 为 5 000 和 10 000 时, BC 型通道 P_{EC} 提升均超过 20%。与 Re 为 10 000 相比, 当 Re 进一步增加到 20 000 时传热和阻力的相对增量有所下降。正弦通道迎流侧面积大导致的高流动阻力缺点在高雷诺数时更为显著, P_{EC} 明显低于其他两个通道, 相对提升仅有 9.46%。BC 型通道在所有雷诺数下都具有适度的传热增强和流动阻力。在 Re 为 5 000 和 10 000 时, 综合性能指标明显优于其他两个通道, 当 Re 增加到 20 000 时, 综合性能指标仅略小于弧型通道。综上所述, 与传统波纹通道相比, BC 型通道表现出更好的综合性能, 具有更大的优化潜力。



(a) 传热增强

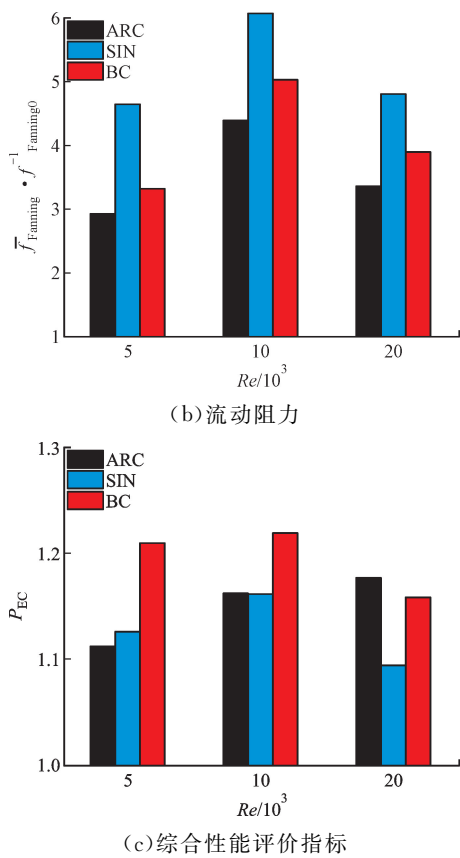


图 5 3 类通道的换热、流阻、综合性能评价指标对比
Fig. 5 Comparison of heat transfer, flow resistance, and performance evaluation criterion of three kinds of channels

图 6 给出了 3 类通道的湍动能分布及流线随时间的变化。如图 6 所示,在脉动流和壁面结构的共同作用下,3 类通道结构单元处的涡结构均经历生长、发展、溃灭这一相似的发展过程。通道几何结构引起的差异则主要体现在湍动能、涡结构的强度和分布上。SIN 型通道高端动能区域分布最广,且具有最高的湍动能强度,BC 型通道次之,而 ARC 型通道整体湍动能强度最弱。类似地,3 类通道的涡结构尺度大小也基本满足上述关系。上下壁面结构处的主涡结构显著影响了近壁面的流场分布,主流流线也发生不同程度的扭转。当主流流速达到最低时,这一现象最为明显,如图 6 所示,在脉动末期 $t=(3/4)\tau$ 时刻,3 类通道的涡结构均发展到最大形态,削弱了主流强度降低对近壁面处冷却效果的负面影响。3 类通道在涡结构的发展进程中均生成次级涡,其中 ARC 型通道的次级涡大小显著小于另外两种类型的通道。SIN 型和 BC 型通道在脉动后期均在依附主涡的位置生成尺寸较大的次级涡,沿壁面发展的热边界层在小尺度范围内被进一步间断。

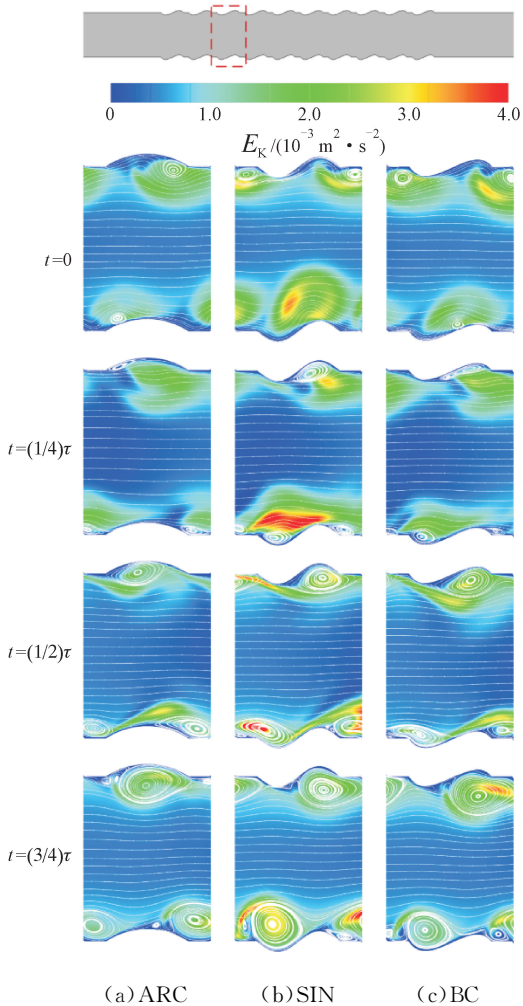


图 6 3 类通道的湍动能分布及流线随时间的变化
Fig. 6 Evolution of instantaneous turbulent kinetic energy distribution and the streamline in three kinds of channels

综上所述,壁面结构的添加在近壁面处激发出高端动能区域,并影响了全流场的湍流强度,增强了近壁面流体与主流的传热、传质过程。与此同时,流动阻力也显著增加,且湍动能强度越高,涡结构尺寸越大,阻力提升越明显,与图 5 结果相对应。

图 7 给出了 3 类通道的温度场随时间的变化。结构的添加将通道壁面区分为迎流侧与背流侧区域,背流侧的流速降低,易形成流动死区,造成热量积累,进一步产生局部热点。如图 7 所示,3 类通道的背流侧均出现高温工质积累现象,但在结构阻隔和周期扰动的共同作用下,高温工质沿流向间断分布,并未连续积累。同时,近壁面附近的高温工质在高端流强度流动的作用下被周期性的输运向主流方向。SIN 型和 BC 型通道的整体扩散效果近似,且均优于 ARC 型通道。在局部热点控制方面,BC 型

通道效果最佳,在已给出的 4 个周期时刻,均未出现代表高温的红色区域。

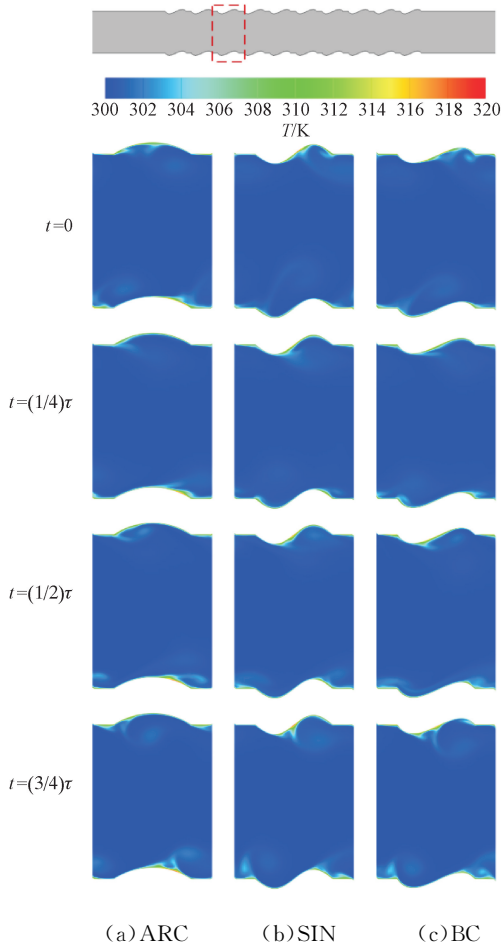


图 7 3 类通道的温度场随时间的变化

Fig. 7 Evolution of instantaneous temperature distribution in three kinds of channels

2.2 优化进程及结果分析

基于以上研究结果,虽然 BC 型通道的强化换热性能略弱于 SIN 通道,但流阻却远小于 SIN 型通道,当前研究并没有充分释放 BC 型通道的综合性能潜力。因此,针对 $Re=10\,000$ 、 $A=0.5$ 、 $f=5\text{ Hz}$ 工况下的 BC 型通道设计了一种自动优化方案。为了保证贝塞尔曲线的高度和形状处于合理范围,将 P_1 和 P_2 的坐标区间 (x_1, y_1, x_2, y_2) 设置为 $(0, -5, 4, 1)$ 到 $(4, -1, 8, 5)$ 。遗传算法优化流程如图 8 所示,基于 Matlab 平台,应用遗传算法自动选取待优化参数,并通过脚本命令实现对 CFD 过程的自动调控。综合考虑优化过程的耗时和优化效果,选择将种群规模设置为 20。种群演化进程如图 9 所示,在经过 20 代共 400 次迭代计算后,种群最佳值已经非常接近种群平均值,继续计算结果不再显著变化,满足终

止条件。终止计算时,种群适应度最优值从 -1.325 降低为 -1.387 ,对应通道综合性能评价指标 P_{EC} 提升至 1.387。

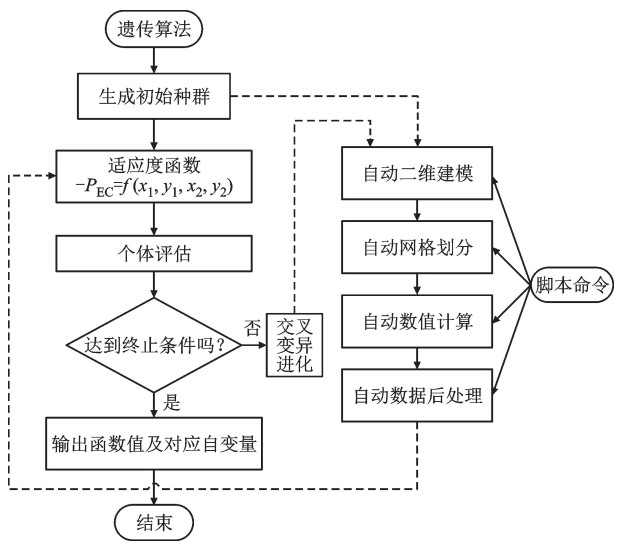


图 8 遗传算法优化流程

Fig. 8 Flow chart of the genetic algorithm optimization process

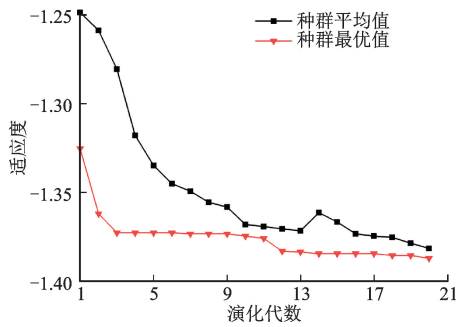


图 9 种群演化进程

Fig. 9 Population evolution process

图 10 给出了前三代和最后一代种群中最优个体对应的贝塞尔型线。随着演化的进行,最大凸起高度呈下降趋势的同时,最大凸起高度对应位置整体后移,凹陷深度加深,贝塞尔曲线整体向右下方移动。上述型线对应通道的各项具体参数在表 4 中列出。

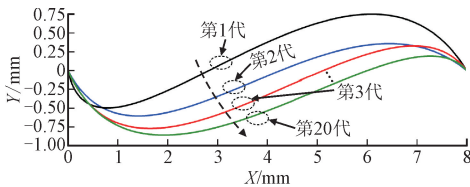


图 10 贝塞尔线型演化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the Bezier curve evolution process

表 4 不同代中最优 BC 型通道参数

Table 4 Optimal BC channel parameters in different generations

代数	P_1 控制点坐标	P_2 控制点坐标	$\overline{Nu}$	$\overline{f}_{\text{Fanning}}$	h
1	(0.6 mm, -1.9 mm)	(5.8 mm, 2.4 mm)	204.559	0.029 4	1.325
2	(1.5 mm, -1.9 mm)	(5.4 mm, 1.4 mm)	195.473	0.023 6	1.361
3	(1.5 mm, -2.3 mm)	(6.4 mm, 1.4 mm)	203.553	0.026 0	1.372
20	(1.6 mm, -2.4 mm)	(6.7 mm, 1.0 mm)	201.581	0.02 45	1.387

优化过程中不同代数型线对应通道的近壁面温度分布如图 11 所示,脉动流与壁面结构的时空耦合效应对热边界层产生了显著的扰动。在一个结构单元范围内,高温流体沿流向未出现明显积累现象。局部热点在上下侧壁面均有分布,且分布范围、强度与该时刻入口流速大小并不成负相关关系。如图 11 中展示的 4 个时刻,差异也主要体现在近壁面高温流体向主流的扩散强度。随着演化的进行,可以明显观察到下侧壁面背流侧的局部热点逐渐消失。

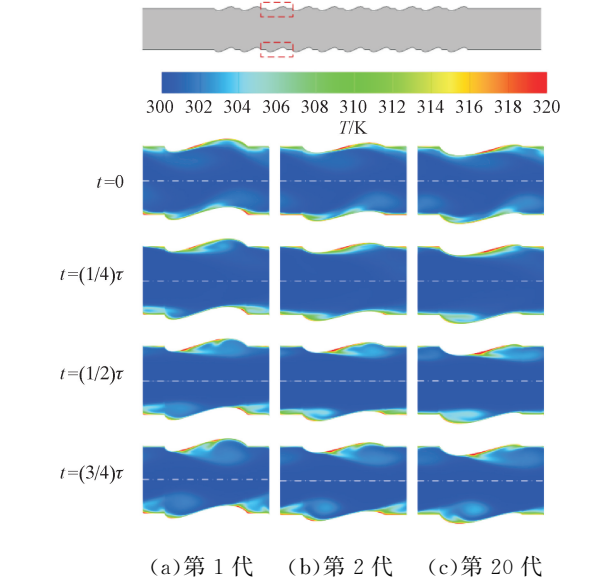


图 11 不同代数下近壁面温度场分布随时间的演化

Fig. 11 Evolution of instantaneous temperature distribution near the wall in channels for different generations

图 12 给出了不同代数下湍动能分布及流线随时间的演化。由于结构尺寸变化程度已经很小,优化进程中的 3 个通道湍动能分布及主涡结构非常相似。流场差异主要体现在次级涡结构部分,尺寸和强度相对较小的次级涡会削弱局部流动传热强度,进而导致图 12 中局部热点的产生。在第 20 代种群中性能最优通道中,涡的分裂现象受到抑制,背流侧的次级涡结构强度得到保证,因此,背流侧过热现象得到改善。

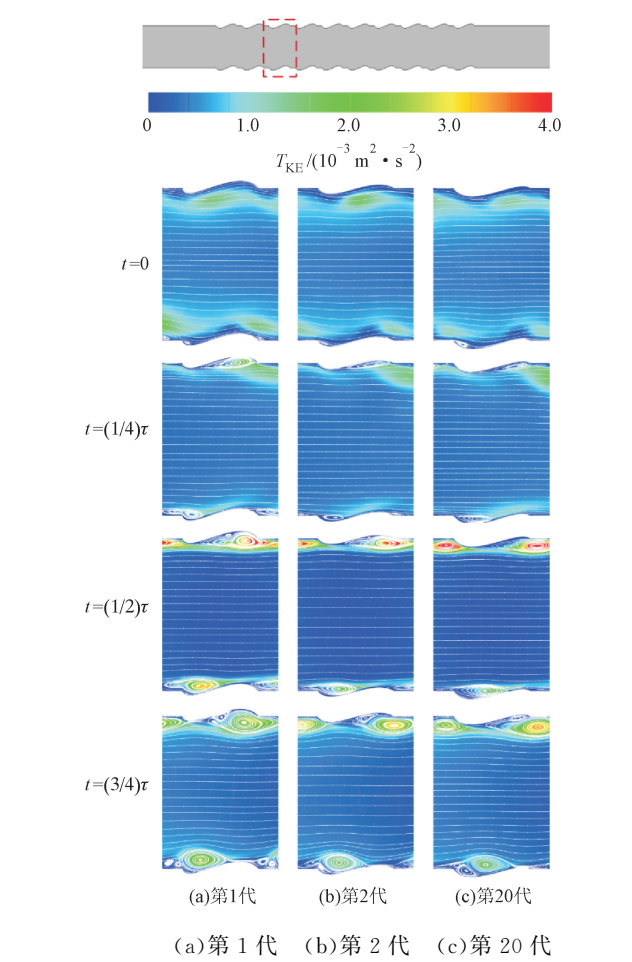


图 12 不同代数下湍动能分布及流线随时间的演化

Fig. 12 Evolution of instantaneous turbulent kinetic energy distribution and the streamline in channels for different generations

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,并进一步应用遗传算法对贝塞尔壁面型线实现精确优化,获得了更优综合性能的通道设计,主要研究结论总结如下。

(1)ARC 型通道的流阻最低,SIN 型通道的传热增强效果最好,而 BC 型通道兼具适度的传热增

强和流动阻力提升。当雷诺数为 5 000 和 10 000 时,BC 型通道综合性能评价指标明显优于其余两类通道,相对提升均超过 20%,而雷诺数增加到 20 000 时,也仅略小于弧型通道。

(2)壁面结构的添加在近壁面处激发出高湍动能区域,并影响了全流场的湍流强度,增强了近壁面流体与主流的传热、传质过程,流动阻力也同样显著增加,且湍动能强度越高,涡结构尺寸越大,阻力提升越明显。

(3)随着优化进程的进行,每一代中最优通道的贝塞尔曲线整体趋向于向右后方移动。通道结构的变化影响次级涡的分布位置和强度,进一步改善了背流侧的温度分布。优化结束时,最佳通道综合性能指标提升了 38.7%。

参考文献:

- [1] TANG Aikun, LI Jianming, LOU Liusheng, et al. Optimization design and numerical study on water cooling structure for power lithium battery pack [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113760.
- [2] KSHETRIMAYUM K S, YOON Y G, GYE H R, et al. Preventing heat propagation and thermal runaway in electric vehicle battery modules using integrated PCM and micro-channel plate cooling system [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113797.
- [3] SUN Siliang, LIU Dong, WANG Yingze, et al. Heat transfer characteristics of Taylor-Couette flow with axially distributed slits using field synergy principle and entropy generation analysis [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 129: 105699.
- [4] 张东辉,丁玉鑫,吴明发,等.管内脉动流强化换热研究进展 [J]. 节能技术, 2016, 34(3): 221-227, 231. ZHANG Donghui, DING Yuxin, WU Mingfa, et al. The research progress of heat transfer enhancement of pulsating flow in tube [J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(3): 221-227, 231.
- [5] 杨兴林,刘春艳,彭艳,等.船用人字形板式换热器脉动流强化换热试验 [J]. 船舶工程, 2022, 44(12): 76-81. YANG Xinglin, LIU Chunyan, PENG Yan, et al. Experiment on pulsating flow enhancement of marine heringbone plate heat exchanger [J]. Ship Engineering, 2022, 44: 12.
- [6] 周丽,张东辉,王剑桥,等.往复脉动流对板式换热器的性能强化实验研究 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40(17): 137-140. ZHOU Li, ZHANG Donghui, WANG Jianqiao, et al.

Experiment of the pulsation strengthen heat transfer in plate heat exchanger [J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(17): 137-140.

- [7] 王军,侯宇,林小龙,等.基于板式换热器的脉动流强化换热实验研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022(2): 116-119. WANG Jun, HOU Yu, LIN Xiaolong, et al. Experimental research on enhanced heat transfer of pulsating flow based on plate heat exchanger [J]. Automation & Instrumentation, 2022(2): 116-119.
- [8] 张亮,张安龙,曲平平,等.脉动流场下波壁管内流体流动与换热特性 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 173-178. ZHANG Liang, ZHANG Anlong, QU Pingping, et al. Fluid flow and heat transfer characteristics in wavy wall tube under pulsating flow field [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(1): 173-178.
- [9] DING Yaodong, TAN Youwei, LI Ping. Coupling effect of arc-shaped convex structure and sinusoidal pulsating flow on the thermal performance of the corrugated channel [J]. Heat Transfer Research, 2022, 53(9): 57-71.
- [10] 丁耀东,刘真威,李平.脉动流下贝塞尔曲线型波纹壁通道流动传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(9): 185-194. DING Yaodong, LIU Zhenwei, LI Ping. Flow and heat transfer characteristics of Bezier-curve shaped corrugated channel under pulsating flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9): 185-194.
- [11] AJEEL R K, SALIM W S I W, HASNAN K. Thermal performance comparison of various corrugated channels using nanofluid: numerical study [J]. Alexandria Engineering Journal, 2019, 58(1): 75-87.
- [12] 韩怀志,于瑞天,廖文君.非对称型波纹通道流动与传热性能的数值模拟 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(7): 998-1004. HAN Huaizhi, YU Ruitian, LIAO Wenjun. Numerical simulation study on the flow and heat transfer characteristics of asymmetrical corrugated channels [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(7): 998-1004.
- [13] BHOWMICK D, RANDIVE P R, PATI S. Implication of corrugation profile on thermo-hydraulic characteristics of Cu-water nanofluid flow through partially filled porous channel [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 125: 105329.
- [14] MA Qingchan, YANG Yanxia, ZUO Yuqing. Thermal performance optimization of heat exchanger with

- mixed cross-corrugated sinusoidal plate channels [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117138.
- [15] WANG Cong, CUI Zhengyu, YU Hongmei, et al. Intelligent optimization design of shell and helically coiled tube heat exchanger based on genetic algorithm [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 159: 120140.
- [16] YAN Yunfei, YAN Hongyu, YIN Siyou, et al. Single/multi-objective optimizations on hydraulic and thermal management in micro-channel heat sink with bionic Y-shaped fractal network by genetic algorithm coupled with numerical simulation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 129: 468-479.
- [17] MOON H, BOYINA K, MILJKOVIC N, et al. Heat transfer enhancement of single-phase internal flows using shape optimization and additively manufactured flow structures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 177: 121510.
- [18] FARIN G. *Curves and surfaces for computer-aided geometric design: a practical guide* [M]. 4th ed. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1997: 96-112.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] BHANDARI P, PRAJAPATI Y K. Fluid flow and heat transfer behavior in distinct array of stepper micro-pin fin heat sink [J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2021, 28: 31-61.
- [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, et al. *Fundamentals of heat and mass transfer* [M]. 6th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2006.

(编辑 武红江)