

通道内置三维柔性元件强化传热特性的数值模拟研究

苗春虎, 齐晓霓, 屈晓航, 朱合刚

(山东理工大学 能源与动力工程系, 山东 淄博 255000)

摘 要:基于双向流固耦合方法,对流体通道内安插柔性元件的换热过程建立数值计算模型。分别计算了不同雷诺数下通道内安插刚性元件、传统柔性元件和新型三维柔性元件的速度场与温度场,调整新型柔性薄板的高度与通道高度之比进行多组计算,以验证新型三维柔性元件对换热效果的积极作用,并得到其最佳换热尺寸。结果表明:在换热的充分发展区域,三维柔性元件在扰流与避免后方蓄热等方面的效果优于刚性元件和传统柔性元件;当新型柔性薄板的高度与通道高度之比在 13%~15% 左右时强化换热效果最好;当 Re 为 1 500 时,换热的综合强化传热因子(PEC)可达 1.25。

关 键 词:流固耦合;柔性体振动;强化换热;数值计算

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.08.013

[引用本文格式]苗春虎,齐晓霓,屈晓航,等.通道内置三维柔性元件强化传热特性的数值模拟研究[J].热能动力工程,2022,37(8):100-108. MIAO Chun-hu, QI Xiao-ni, QU Xiao-hang, et al. Numerical simulation research on enhanced heat transfer characteristics of three-dimensional flexible elements embedded in channels[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 100-108.

Numerical Simulation Research on Enhanced Heat Transfer Characteristics of Three-dimensional Flexible Elements Embedded in Channels

MIAO Chun-hu, QI Xiao-ni, QU Xiao-hang, ZHU He-gang

(Department of Energy and Power Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, China, Post Code: 255000)

Abstract: Based on the two-way fluid-structure interaction method, a numerical calculation model for the heat transfer process with flexible elements embedded in the fluid channel was established. The velocity and temperature fields of the rigid element, the traditional flexible element and the new three-dimensional flexible element embedded in the channel at different Reynolds numbers were calculated respectively. The ratio of the height of the new flexible sheet to the channel height was adjusted for multiple groups of calculations to verify the positive role of the new three-dimensional flexible element on the heat transfer effect and obtain its optimal heat transfer size. The results show that the three-dimensional flexible element is better than the rigid element and the traditional flexible element in the fully developed area of heat transfer in terms of turbulence and avoiding rear heat storage; When the ratio of the height of the new flexible sheet to the channel height is about 13% to 15%, the enhanced heat transfer effect is the best; when Re is 1 500, the comprehensive enhanced heat transfer factor can reach 1.25.

Key words: fluid-structure interaction, flexible body vibration, enhanced heat exchange, numerical calculation

收稿日期:2021-09-07;修订日期:2021-11-24

基金项目:国家自然科学基金(51806128);淄博市张店区校城融合(2021JSCG0014)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51806128); Zibo Zhangdian District School City Integration Fund (2021JSCG0014)

作者简介:苗春虎(1998-),男,山东淄博人,山东理工大学硕士研究生。

通讯作者:屈晓航(1989-),男,山东济南人,山东理工大学副教授。

引 言

随着生产力和工业化水平的提升,要求换热器等热交换设备具有更高的换热效率。最初,研究者发现管道流动中粗糙的换热表面往往有利于换热^[1],并提出了将粗糙换热表面应用于换热器的想法。之后在涡发生器及内部安插扰流元件,如三角翼、凸起和固定肋片等^[2-9],这些元件在促进冷热流体掺混、增强换热效果等方面的出色作用被科研人员逐步证实。Hidalgo 等人^[10]用柔性材料和摆动的簧片来充当扰流材料,将流体机械能转化为柔性体的动能,达到无需额外能量输入即可促进冷热流体掺混的效果。

目前,业界按照柔性体的固定面与流体流向的位置关系,将翅片分为常规翅片、倒置翅片和垂直翅片。Kim 等人^[11]阐述了倒置翅片的自振荡机制。Chen 等人^[12]在此基础上发现了标准翅片的运动诱导机制和倒置翅片的失稳诱导机制,总结了标准翅片与倒置翅片的特点,并说明了倒置翅片振动时流体惯性力较小,低速时更容易振动,扑动幅度更大。通道内置垂直翅片目前倍受关注,一些研究者也针对垂直翅片振动模式和机制进行探究。Lee 等人^[13]将垂直翅片的动态分为 3 种模式:拍打模式、完全偏转模式和不规则模式,通过数值计算结果分析了翅片摆动力与恢复力之间的动态模式对运动模式的影响,得出了拍打模式的换热性能优于其他模式。

在以上理论的支持下,诸多研究者开始验证内置柔性体对换热的影响。Gallegos 等人^[14]通过实验就矩形通道内安插翅片对换热性能的影响进行了研究,发现安插垂直翅片对通道内换热有强化作用,且对入口段的换热强化效果优于对下游的促进作用;Park 等人^[15]采用二维数值方法,模拟了固定翅片迎风倾角小于 90°时对流动和换热的影响,发现柔性翅片的抗弯刚度在一定范围内的增大会造成局部换热效果的增强;Chen 等人^[16]分别通过时间分辨粒子图像测速法和数值计算的方法,从扑动行为与涡的演变方面对垂直翅片的强化换热效果进行了分

析,证实了其积极作用。

研究者针对翅片的尺寸和排布问题也做了诸多研究。Huang 等人^[17]研究了多组倒置翅片的耦合性能表现,发现翅片错列排列换热效果更优;Yu 等人^[18]通过实验研究了倒置翅片长度与通道高度之比对散热性能和压降的影响,研究发现,当通道高度为翅片长的 4 倍时,达到最佳散热条件;Chen 等人^[19]采用浸入边界法研究了垂直柔性体的抗弯刚度、柔性体高度与相邻柔性体之间距离的比值、相邻两柔性体之间的间距与柔性体高度比对涡流和换热的影响,为之后的研究提供了经验。

相较于流固耦合强化换热二维计算,目前各界学者对三维计算涉及较少。在二维研究中,工质的流动受到内置柔性体的阻碍,柔性体后方逐渐形成一个换热阻碍区,工质在此处的流动与换热受到严重抑制。改进柔性体的结构,使工质能够直接流经换热阻碍区,会使换热效果得到较大提升。为了改进上述问题,本文提出了一种基于双向流固耦合的三维模型,对通道内部的垂直柔性板进行改造。对柔性板的改造有以下两个目的:(1) 保证有工质可从挖空部分通过,冲散后方的“死区”,强化后方换热;(2) 保留上方未挖通部分,使流体可以诱导柔性体扑动,促进后方冷热流体掺混,形成旋涡。

本研究在数值计算过程中采用周期性边界条件,便于得到流场充分发展后的结果;使用重叠网格法解决三维大变形的问題,得到多组不同换热方案的温度及速度分布、沿程努塞尔数,发现综合强化传热因子(PEC)皆大于 1,证明了对柔性板进行三维改造可以提升换热效率,为流体诱导振动强化换热带来了一种三维改造的新思路。

1 数学方法与物理模型

1.1 流体计算方程

忽略重力情况下,不可压缩流体的动量、能量方程可以写成如下形式。

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \rho u \nabla \varphi = \Gamma_{\varphi} \Delta \varphi + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中: φ —非稳态系数; Γ —扩散系数; S —源项,在各方程中的对应量如表 1 所示。

表 1 各方程中所对应的 φ, Γ, S

Tab. 1 Corresponding φ, Γ, S in each equation

方程	φ	Γ	S
质量	1		0
u 方向动量	u	μ	$-\partial p / \partial x$
v 方向动量	v	μ	$-\partial p / \partial y$
w 方向动量	w	μ	$-\partial p / \partial z$
能量	T	k / c_p	-

1.2 流固耦合方程

一般来说,当固体被边界包裹时,体积力作用在固体上,表面力和距离被施加在边界上。变形张量 ε 为:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [\nabla \boldsymbol{g} + (\nabla \boldsymbol{g}) ^ { \prime }] \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{g}$ —固体上的位移矢量,即施加在边界上的力和位移造成的影响

在线性等温和各向同性弹性时,应力的本构方程为:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{E}{1 + \nu} \left[\frac{\nu}{1 - 2\nu} \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \boldsymbol{I} + \boldsymbol{\varepsilon} \right] \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{I}$ —单位张量; E —杨氏模量; ν —泊松比。

将应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 的表达式引入动量方程中,并用其定义式代替 $\boldsymbol{\varepsilon}$,最终得到了位移 $\boldsymbol{g}$ 的二阶椭圆方程。代入后,动量方程写为:

$$-\rho \alpha + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = -\rho \alpha + \frac{E}{1 + \nu} \nabla \cdot$$

$$\left\{ \frac{\nu}{1 - 2\nu} \text{tr} [\nabla \boldsymbol{g}] \boldsymbol{I} + \frac{1}{2} [\nabla \boldsymbol{g} + (\nabla \boldsymbol{g}) ^ { \prime }] \right\} = 0 \tag{4}$$

式中: ρ —固体密度; α —加速度。

上述方程需要多组力和位移组成的边界条件,所以本文数值计算过程中,在固体与周围流体接触的边界上,将来自流体的连续力指定为边界条件。

1.3 基本公式

雷诺数:

$$Re = \rho v_0 D / \mu \tag{5}$$

式中: v_0 —速度; D —特征长度; μ —动力黏性系数。

局部努塞尔数 $Nu(x, t)$:

$$Nu(x, t) = \frac{h(x, t) D}{\lambda} = \frac{\text{d} Q(x, t)}{\Delta T \text{d} x} \times \frac{D}{\lambda} \tag{6}$$

式中: λ —流体导热系数; h —局部对流换热系数; Q —局部换热量; ΔT —温度差。

时间平均局部努塞尔数 Nu_x :

$$Nu_x = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau Nu(x, t) \text{d} t \tag{7}$$

式中: τ —时间。

通道阻力由 Darcy-Weisbach 方程给出:

$$f = \frac{\Delta p}{H \rho_0 U_0^2} \tag{8}$$

1.4 物理模型

计算域及新型柔性板的物理模型尺寸如图 1 和图 2 所示。

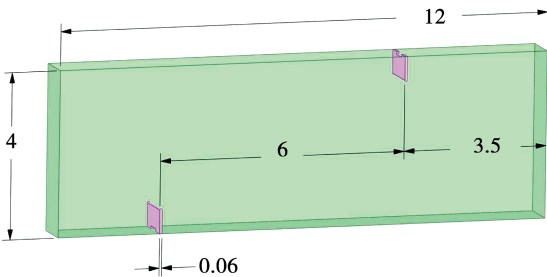


图 1 计算域尺寸示意图 (mm)

Fig. 1 Dimension diagram of calculation domain (mm)

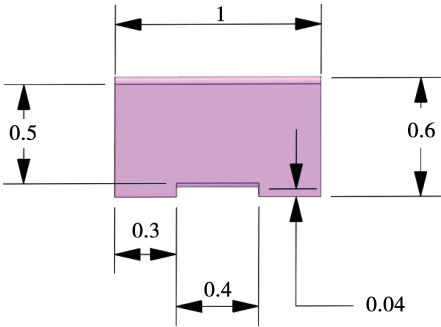


图 2 柔性板尺寸示意图 (mm)

Fig. 2 Dimension diagram of flexible sheet (mm)

为了尽可能减少对工质动能的削减,将迎流底面及顶面均设置为圆角切面,达到促进尾部涡流脱落、减少工质动能损耗的效果。基于实际应用角度,在雷诺数约为 2 500 的工况下对该模型进行初始数值计算。

数值计算过程中,选取 $k-\varepsilon$ 模型,采用混合初始方法初始化边界条件,应用 couple 算法对压力-速度进行耦合计算,采用二阶格式对动量、能量方程进行离散。使用一种动网格与重叠网格结合的方法,通过重叠网格与背景网格的数据交换,避免小尺

寸网格的大畸变带来的计算资源浪费和计算错误。使用周期性边界条件以得到充分发展阶段的流场情况,提高计算效率。

2 可靠性检验

2.1 数值计算方法验证

对平板通道内层流充分发展阶段进行了数值模拟,并将模拟结果与现有文献[20]进行对比,以验证数值计算方法的准确性。通道内的无量纲温度分布对比结果如图 3 所示,最大误差小于 3%,说明数值计算方法可信。

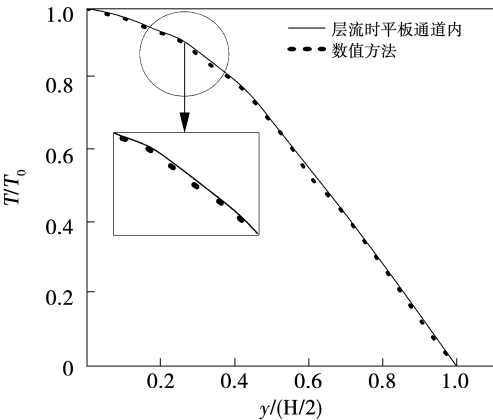


图 3 通道内的无量纲温度分布对比
Fig. 3 Comparison of dimensionless temperature distributions in channel

2.2 网格无关性检验

为了验证网格数与计算结果的无关性,进行无关性检验。取 $Re = 2\ 500$,在网格数分别为 29 万,49 万和 59 万时进行计算。图 4 为网格数为 29 万和 49 万时层流发展过程中柔性板后缘自由端端点的位移变化曲线,两种网格数下位移差值较小。

计算网格数分别为 29 万,49 万和 59 万的出口压降及平均努塞尔数如表 2 所示。最大误差仅 0.5%,从节省计算资源角度,确定网格数为 29 万。

表 2 不同网格数目下的平均努塞尔数和压降
Tab. 2 Average Nusselt number and pressure drop at different grid numbers

参数	网格数/万		
	29	49	59
平均努塞尔数	3 503	3 482	3 480
压降/ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$	354	350	351

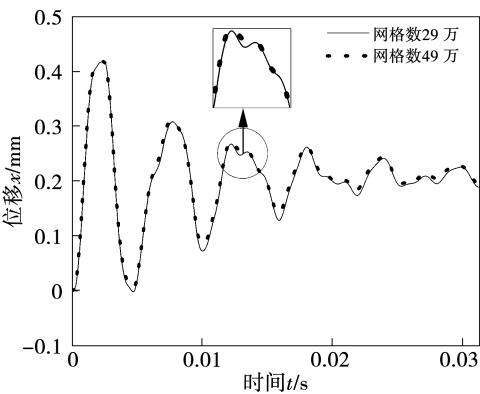


图 4 柔性板后缘自由端位移变化曲线
Fig. 4 Variation curve of displacement of free end of flexible sheet trailing edge

2.3 时间步长无关性检验

单位时间步长内柔性板的振动幅度要小于流固交界面的网格尺寸。经过预计算,将本文所有计算过程的时间步长设为 $7 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。为了检验该时间步长的可靠性,设置时间步长为 $2 \times 10^{-5} \text{ s}$ 的对照组进行计算。图 5 为两种时间步长下柔性板自由端的位移图。由图 5 可知,两种时间步长的位移误差不超过 5%,从节省计算资源与保证准确性两方面考虑,时间步长设为 $7 \times 10^{-5} \text{ s}$ 合理。

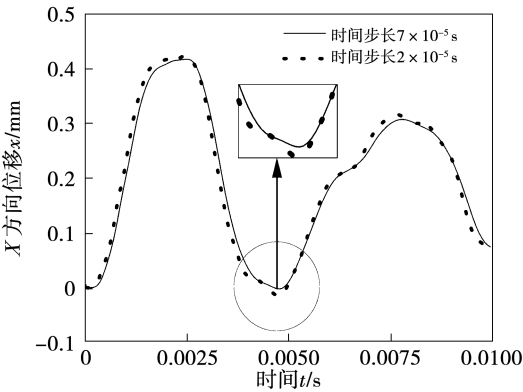


图 5 不同时间步长柔性板自由端的位移变化曲线
Fig. 5 Variation curve of displacement of free ends of flexible sheet with different time steps

3 结果与分析

3.1 新型三维柔性体对流动与换热效果的影响

图 6 为前两个周期内柔性板振动至特殊位置时刻的温度场。在 $t = 0.001\ 4 \text{ s}$ 时,柔性板达到沿流

动方向的最大弯曲幅度,随后自身回弹;在 $t = 0.004\ 9\ \text{s}$ 时,完成第 1 个摆动周期,开始第 2 次摆动。在流场充分发展后,柔性板自由端端点随时间的变化曲线在图 7 中给出。图 6 和图 7 证明了柔性板在流场中会受流体冲击产生摆动,并最终在一定尺度内持续振动,这对促进冷热流体掺混、防止积灰等产生了积极作用。

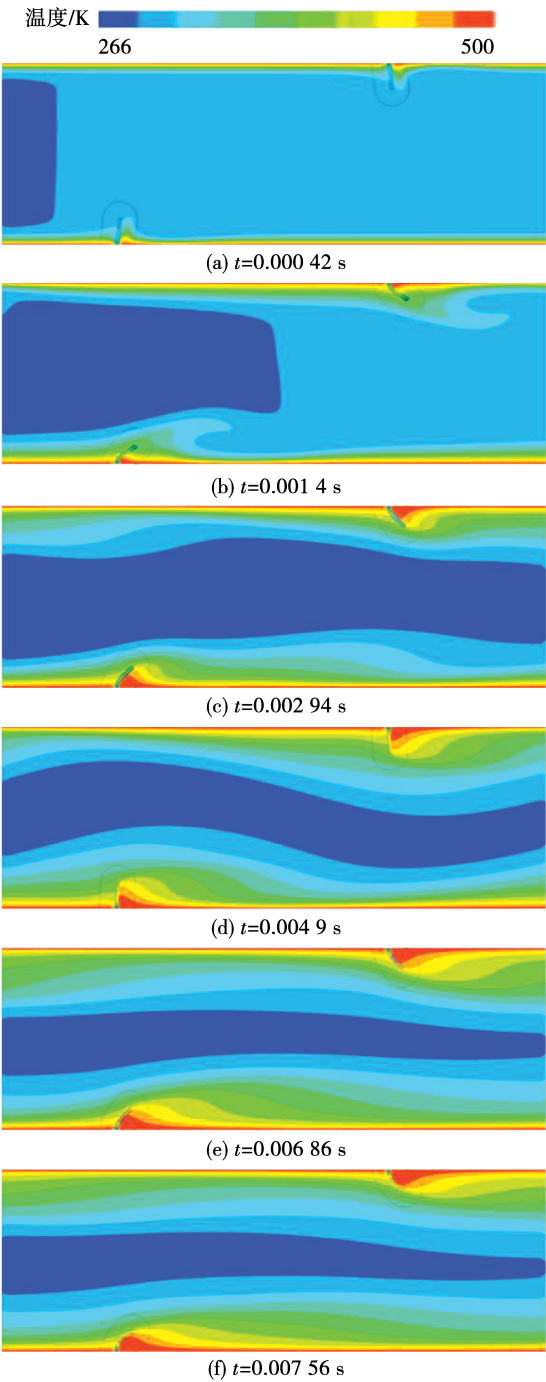


图 6 前两个振动周期的温度场

Fig. 6 Temperature field of the first two vibration periods

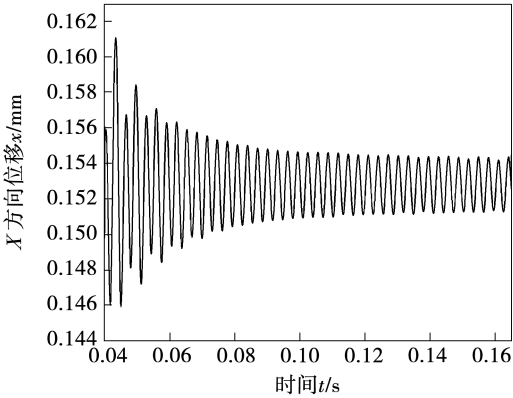


图 7 柔性板自由端的位移随时间变化曲线

Fig. 7 Variation curve of displacement of free end of flexible sheet with time

图 8 为两种情况下柔性体周围的温度分布^[21]。在柔性板后方形成了一个较大体积的蓄热团。图 8(b)为安插新型柔性体后近壁面的温度分布。图 9 为距下换热面高度为 0.1 mm 截面处的轴向静态温度。

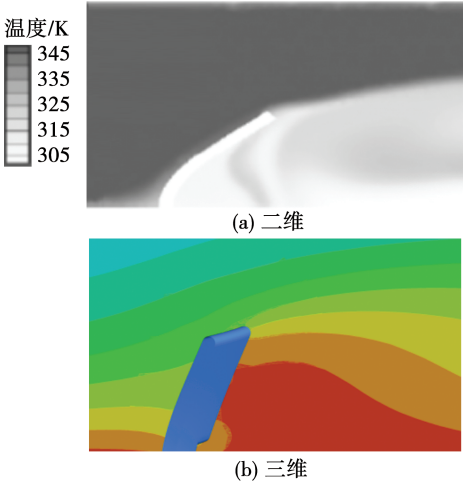


图 8 两种情况下柔性体周围的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution around flexible sheet in two cases

图 8 和图 9 表明,当流体流经 $x = 2.6\ \text{mm}$ 截面时,静态温度明显下降,因为此位置为柔性体的掏空部分下方;当流体流过时,在柔性板的遮挡作用下,流体会被迫从开口部分通过,使得此处温度更为接近冷却工质(入口流体)的温度,对换热有促进效果。因为新型柔性板开口部分上方仍然存在遮挡部分,所以 $x = 3\ \text{mm}$ 之后存在一个高温热团。在柔性体摆动和底部射流冲击的影响下,流道内形成了大

的旋涡,引起此处冷热流体的剧烈掺混,温度明显降低,换热效果提升。在 $x = 8\text{ mm}$ 后,边界层正常发展,热边界层变厚,温度持续升高,换热效果逐渐降低。

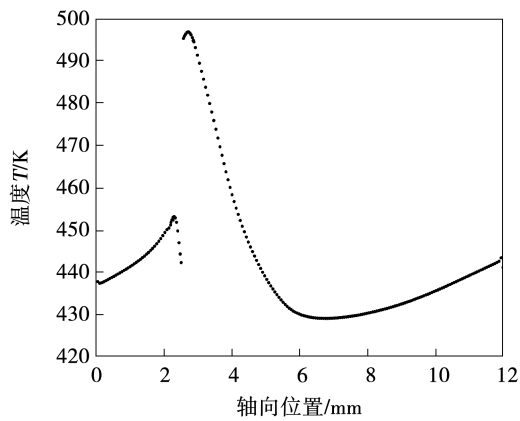


图 9 高度为 0.1 mm 处的轴向静态温度

Fig.9 Axial static temperature at height of 0.1 mm

通过以上对比发现,改造柔性板后,工质可以冲击柔性板后方热团,产生的底部射流还强化了挡板后方旋涡的脱落,在削弱流动阻力和强化换热方面

产生了积极作用,同时也打开了柔性薄板三维改造的新思路。无论是柔性体的改造,还是多块柔性体的最佳排布问题,都有研究价值。

3.2 刚性板与新型三维柔性板对流动与换热效果的影响

为了证明通道内置柔性板对换热效果的积极作用,需要设置内置刚性板进行对比计算。将两种模型的 Nu 和压降作为对照,流场充分发展后,不同雷诺数下的平均努塞尔数和压降如表 3 所示。

尽管刚性挡板会带来努塞尔数的提升,但能强化单向介质对流传热的方法都会引起流动阻力的增加,杨世铭^[22]提出了等流量的换热性能比较指标 PEC:

$$PEC = \frac{(Nu)_e/(Nu)_r}{f_e/f_r}$$

(9)

计算不同雷诺数下三维柔性板相较于刚性板模型的 PEC,结果如图 10 所示。PEC 均大于 1,这说明相较于 Nu 数提升,刚性挡板要付出更大的代价去克服产生的流动阻力,在实际应用中要谨慎考虑。

表 3 不同雷诺数下的平均努塞尔数和压降

Tab.3 Average Nusselt number and pressure drop at different Reynolds numbers

模型	Re =500		Re =1 000		Re =1 500		Re =2 000		Re =2 500	
	Nu	压降/Pa · m ⁻¹	Nu	压降/Pa · m ⁻¹	Nu	压降/Pa · m ⁻¹	Nu	压降/Pa · m ⁻¹	Nu	压降/Pa · m ⁻¹
刚性板	1 298	24	2 110	83	2 860	178	3 589	314	4 246	478
柔性板	811	7.1	1 140	21.1	2 407	126	2 988	241.4	3 500	340

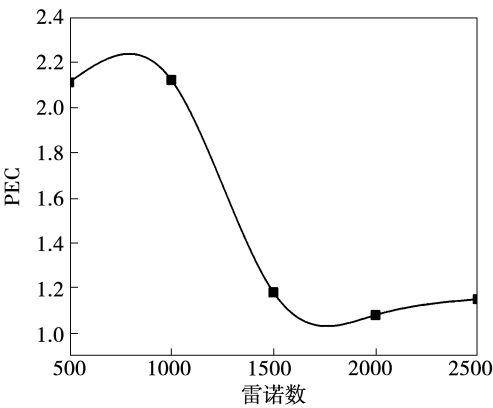


图 10 三维柔性板模型的相对 PEC 数

Fig. 10 Relative PEC number of three-dimensional flexible sheet model

整体上看,刚性挡板严重加剧了流体整体平均动能的消散,增大了进出口压差和流动阻力。在实际应用中,如果换热器较长,或者雷诺数较小,因存在多块挡板极易使流速过于缓慢甚至停滞,造成换热效果下降。而采用柔性薄板的模型,降低了内置物带来的阻力,还将工质的动能转化为柔性板摆动的动能,增大了流场的扰动进而增强换热。由此可知,相较于安插刚性内置物,安插柔性板的方法能降低阻力,无需额外功率输入即可促进工质震荡流动,形成旋涡促进冷热流体掺混,对强化换热发挥积极作用。

3.3 三维新型柔性板与传统柔性板的对比

图 11 为新型柔性板模型流线图。流线图反映

流体的流动路线,可较为直观地体现出新型柔性板相较于传统挡板的优势。工质可以从挖空部分经过,破坏闭塞热团区。虽然本模型也有遮挡部分,但相较于传统挡板,本模型中的工质可以从柔性板上方和中间通路部分一同切入闭塞热团区,也能对被遮挡区域的换热起到积极的效果。

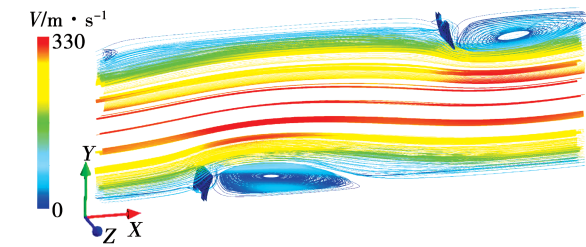


图 11 新型柔性板模型流线图

Fig. 11 Streamline diagram of new flexible sheet model

图 12 和图 13 分别给出了近下壁面沿流动方向的局部流速分布及通道内流速分布图。图 12 表明,自入口处流入以后,速度逐渐衰减,在 $x = 2.5\text{ mm}$ 截面处由于可流通通道变窄,流速急剧变大,此处 Nu 也相应增长;随后流通通道扩大,速度开始下降。由图 13 可知,在柔性体后方,由于受到柔性体摆动及下方流体冲击的影响,薄板后方形成了一个较大的稳定旋涡,旋涡的存在给换热带来了积极的影响,旋涡的脱落也降低了挡板带来的阻力,降低了整个换热系统的阻力系数。以上效果都是模型的三维改造带来的优势,而二维数值计算时底部无法持续流通且挡板前后压差较大,不利于旋涡的脱落,故换热

强化效果并未达到极限,与实际工况有一定的差距。

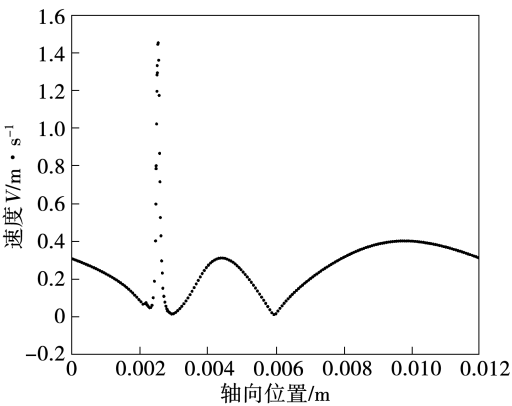


图 12 近下壁面沿流动方向的局部流速分布

Fig. 12 Local velocity distribution along the flow direction close to the lower heat exchange surface

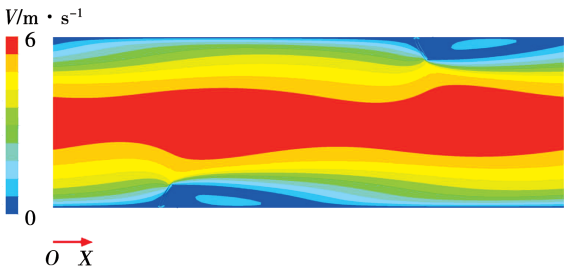


图 13 通道内速度分布图

Fig. 13 Velocity distribution in channel

通过数值计算得到了传统柔性板模型与新型柔性板模型的 Nu 和压降,如表 4 所示。在不同的雷诺数下,尽管新型板的努塞尔数略有降低,但压降均小于传统板。通过表 4 的数据,可以计算两者的 PEC 并进行对比。

表 4 传统柔性板模型与新型柔性板模型的 Nu 和压降

Tab. 4 Nu and pressure drop of traditional flexible sheet model and new flexible sheet model

模型	$Re = 500$		$Re = 1\ 000$		$Re = 1\ 500$		$Re = 2\ 000$		$Re = 2\ 500$	
	Nu	压降/ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$	Nu	压降/ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$	Nu	压降/ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$	Nu	压降/ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$	Nu	压降/ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$
传统板	814	7.3	1 145	21.2	2 424	146	3 041	253	3 540	373
新型板	811	7.1	1 140	21.1	2 407	126	2 988	241	3 500	340

不同雷诺数下新型挡板的 PEC 如图 14 所示。由图可知,三维新型柔性挡板的 PEC 均大于 1,且当雷诺数为 1 500 左右时 PEC 达到峰值,随后降低,但

在雷诺数大于 2 000 以后,又有增长的趋势。因此当雷诺数在 250 ~ 2 500 范围内,经过三维改造的柔性板提高了通道内的换热效果,在削弱流动阻力和

提升综合换热能力方面都优于传统模型。

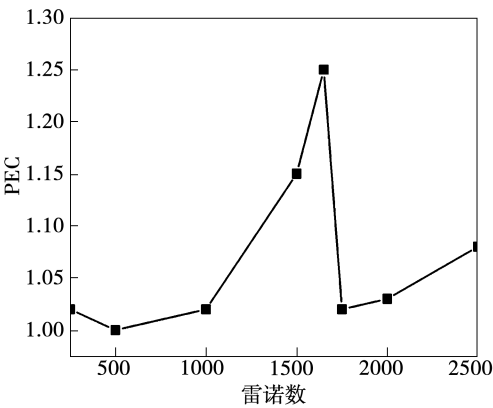


图 14 不同雷诺数下新型挡板的 PEC

Fig. 14 PEC of new baffle under different Reynolds numbers

4 结 论

(1) 基于流固耦合强化换热的理论基础,分别计算了不同雷诺数下通道内安插新型三维柔性元件、刚性元件和传统柔性元件的速度场与温度场,结果表明,新型三维柔性元件的综合强化传热因子均大于 1,换热效果和通道内压降均优于安插刚性元件和传统柔性元件。

(2) 对三维板式换热通道内部安插柔性体强化传热的过程进行了数值计算。结果表明,在柔性体受到空气冲击时,会出现大尺度形变与弯曲,随后在自身弹性的作用下回弹,随后又在冲击作用下开始第 2 个摆动周期,并不断往复。在流场充分发展后,三维柔性体的振动模式趋于一种颤振摆动,即对称轴两侧各部分持续进行小尺度的振动而整块柔性体的平衡位置保持不变。

(3) 计算结果表明,三维新型柔性板高度占通道高度的 15% 时,对换热的强化作用最好。在 250~2 500 的低雷诺数应用场景下,对比安插传统柔性元件, $Re \approx 1\ 500$ 时新型柔性板模型的 PEC 数最大值为 1.25。

(4) 研究证实了通道内置三维新型柔性板强化换热方法的可行性。传统二维研究的换热效果并未达到内置柔性体强化换热方法的上限,对柔性体的

三维改造与多组柔性体的三维排布问题将是未来内置柔性体方法转向应用的关键问题。

参考文献:

[1] WEBB R L, ECKERT E R G. Application of rough surfaces to heat exchanger design [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(9): 1647–1658.

[2] SHUI Lin-qi, GAO Jian-min, SHI Xiao-jun, et al. The effect of cooling conditions on convective heat transfer and flow in a steam-cooled ribbed duct [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(1): 331–341.

[3] ARMSTRONG J, WINSTANLEY D. A review of staggered array pin fin heat transfer for turbine cooling applications [J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 110(1): 94–103.

[4] ELWEKEEL F N M, ZHENG Qun, ANTAR M M A. Numerical study of turbulent flow through rib-roughened channels with mist injection [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2014.

[5] METZGER D E, HALEY S W. Heat transfer experiments and flow visualization for arrays of short pin fins [C]//Turbo expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 1982.

[6] GAZI I M, MOUNIR Z S, PHILLIP M L. Heat transfer in a channel with dimples and protrusions on opposite walls [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2001, 15(3): 275–283.

[7] GAUTAM B, HIMADRI C, ANUPAM S. Augmentation of heat transfer by creation of streamwise longitudinal vortices using vortex generators [J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(4): 406–424.

[8] 睢辉, 屈晓航, 董勇. 管内插入螺旋翅片流动与传热特性的数值模拟 [J]. 化工生产与技术, 2013, 20(5): 27–31.

SUI Hui, QU Xiao-hang, DONG Yong. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics of spiral fins inserted in tubes [J]. Chemical Production and Technology, 2013, 20(5): 27–31.

[9] 屈晓航, 田茂诚, 冷学礼. 振荡流通过内插螺旋翅片管传热特性的数值模拟 [J]. 化工进展, 2014, 33(7): 1691–1696.

QU Xiao-hang, TIAN Mao-cheng, LENG Xue-li. Numerical simulation of heat transfer characteristics of oscillating flow through interpolated helical finned tubes [J]. Progress in Chemical Industry, 2014, 33(7): 1691–1696.

[10] HIDALGO P, HERRAULT F, GLEZER A, et al. Heat transfer enhancement in high-power heat sinks using active reed technology [C]//2010 16th International Workshop on Thermal Investiga-

- tions of ICs and Systems(THERMINIC),IEEE,2010.
- [11] KIM D, COSSÉ J, CERDEIRA C H, et al. Flapping dynamics of an inverted flag [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 736 (R1).
- [12] CHEN Yu-jia, DENG Zhi-wen, LIU Ying-zheng. Time-resolved particle image velocimetry measurement of vortex dynamics behind tandem self-oscillating inverted flags in a channel flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 109982.
- [13] JAE B L, SUNG G P, HYUNG J S. Heat transfer enhancement by asymmetrically clamped flexible flags in a channel flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 116: 1003 – 1015.
- [14] GALLEGOS R K B, SHARMA R N. Heat transfer performance of flag vortex generators in rectangular channels [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 137: 26 – 44.
- [15] PARK S G. Heat transfer enhancement by a wall-mounted flexible vortex generator with an inclination angle [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119053.
- [16] CHEN Y, YU Y, PENG D, et al. Heat transfer enhancement of turbulent channel flow using dual self-oscillating inverted flags: staggered and side-by-side configurations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 851 – 863.
- [17] HUANG H, WEI H, LU X Y. Coupling performance of tandem flexible inverted flags in a uniform flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 837: 461 – 476.
- [18] YU Y, LIU Y, CHEN Y. Vortex dynamics and heat transfer behind self-oscillating inverted flags of various lengths in channel flow [J]. Physics of Fluids, 2018, 30(4): 045104.
- [19] CHEN Y, YANG J, LIU Y, et al. Heat transfer enhancement in a poiseuille channel flow by using multiple wall-mounted flexible flags [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 163: 120447.
- [20] 李晓伟. 通道湍流换热强化的数值与实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2008.
- LI Xiao-wei. Numerical and experimental study on turbulent heat transfer enhancement in channel [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [21] 麻程柳, 杨 荣, 李 峥, 等. 通道内柔性体流固耦合对流动和换热的影响 [J]. 动力工程学报, 2020, 40(8): 635 – 640.
- MA Cheng-liu, YANG Mo, LI Zheng, et al. Effect of fluid structure coupling of flexible body in channel on flow and heat transfer [J]. Journal of Dynamic Engineering, 2020, 40(8): 635 – 640.
- [22] 杨世铭. 传热学 [M]. (第四版). 北京, 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shi-ming. Heat transfer [M]. (Fourth Edition). Beijing, Higher Education Press, 2006.

(刘 颖 编辑)