高压下打孔翅片通道内的流动换热性能

康 蕊，厉彦忠，杨永斌，杨宇杰
（西安交通大学能源与动力工程学院，西安 710049）

摘要：采用数值模拟方法研究高压下打孔板翅式换热器翅片通道内的流动换热性能。首先，分析高压下打孔翅片通道内流动换热性能的变化规律，结果显示，换热因子 j 和摩察因子 f 均随翅片厚高比的增加而减小，随翅片密度的增加先减小后增大。其次，拟合高压下打孔翅片通道内 j、f 因子的预测关系式，并将通过预测关系式计算所得的 j、f 因子与文献中的实验值对比。对比结果显示，本文的预测关系式可以较好地预测较广范围内不同结构打孔翅片通道内的流动换热性能。最后，评价高压下打孔翅片通道内的强化换热性能。

关键词：制冷与低温工程；打孔翅片；流动换热性能；性能评估；相对熵产分布因子
中图分类号：V511+.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-2850(2017)14-1580-15

Fluid flow and heat transfer behaviors of perforated fins channels at high pressure

KANG Rui, LI Yanzhong, YANG Yongbin, YANG Yujie
(*School of Energy and Power Engineering*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049, *China*)

Abstract: In order to design and optimize the plate-fin heat exchanger, the thermal hydraulic performances of perforated fin-channels are investigated numerically under higher pressure. Firstly, the general behavior of flow and heat transfer in perforated fin channels are analyzed. The results show that higher thickness-to-height ratio of fin causes a considerable reduction in heat transfer performance of perforated fin, there exist optimum fin density which contribute to peak performance. Secondly, Based on the analysis of a large amount of numerical data, general correlations of heat transfer factor j and friction factor f are developed, then comparing the value of the j and f factors between experiental value and numerical simulation results. It is found that the proposed correlations predict 90% of the j data and 95% of the f data within ±20% under laminar flow, and the proposed correlations predict 92% of the j data and 96% of the f data within ±20% under turbulent flow. Finally, the performance of heat transfer enhancement of perforated fins is evaluated.

Key words: refrigeration and cryogenics engineering; perforated fins; thermal hydraulic performance; performance evaluation; relative entropy production distribution factor

0 引言

最近几十年，随着计算流体动力学（computational fluid dynamics，CFD）和计算传热学的大力发展，大量学者开始使用数值模拟方法研究板翅式换热器的流动换热性能，并拟合了一些板翅式换热器的换热因子 j 和摩擦因子 f 的关联式，为板翅式换热器的设计提供了理论指导。LI 等[1]利用数值模拟方法研究了打孔翅片孔的排列方式和打孔率对板翅式换热器流动换热性能的影响。ALIABADI 等[2]利用数值模拟方

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20130201110069）
作者简介：康蕊（1992—），女，硕士研究生，主要研究方向：板翅式换热器
通信联系人：厉彦忠，教授，主要研究方向：板翅式换热器. E-mail: yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn

法研究了流体物性和翅片结构对打孔翅片通道内的流动换热性能的影响。SHAERI 等[3]利用数值模拟方法研究了各种翅片结构的流场和温度场分布，比较了不同翅片结构的翅片效率，研究出一种新型的翅片结构。RAO 等[4]模拟了中低压下 15 种翅片结构，得出了考虑翅片密度和翅片厚高比的换热因子 j 和摩擦因子 f 的关联式。王伟平[5]采用 CFD 数值模拟技术，研究了多孔式翅片传热与流阻特性，重点分析了不同孔口因素对多孔式翅片传热与流阻的影响。但是在这些公开的文献中，对于打孔板翅式换热器的研究主要集中在物流分配方面。也有学者研究打孔板翅式换热器翅片通道内的流动换热性能，并给出了打孔板翅式换热器 j、f 因子的预测关系式，但是此预测关系式只适用于翅片厚度较窄的中低压板翅式换热器，不能预测高压下打孔翅片通道内的流动换热性能[1~5]。因此，研究高压下打孔翅片通道内的流动换热性能，拟合高压下较广范围内打孔板翅式换热器 j、f 因子的预测关系式，对于高压下打孔板翅式换热器的优化设计具有十分重要的理论价值和实际意义。

1 几何结构与数值计算模型

1.1 物理模型与计算区域

图 1 给出了打孔翅片结构，其基本特征可以通过翅片厚度 t、翅片截距 s、翅片高度 h、翅片通道的有效长度 L、孔径 d、打孔率 σ 描述。假定翅片通道形状为规则的矩形，打孔翅片通道的水力直径 D_h 引用 ZHU 等[6]所提的定义式，定义为

$$D_h = \frac{4LA_c}{A} = \frac{4shL}{2sL + 2hL - 2n_{row}\pi r^2 + 2n_{row}\pi 2rt}, \tag{1}$$

其中，A 为总换热面积；A_c 为翅片通道的横截面积；n_{row} 为打孔数；r 为孔的半径。

鉴于板翅式换热器隔板和翅片的周期性与对称性，在数值模拟时取一个周期通道，为使模拟更接近实际测定情况并保证出口无回流，在模型进出口分别建立 5 mm 的进口段和出口段。

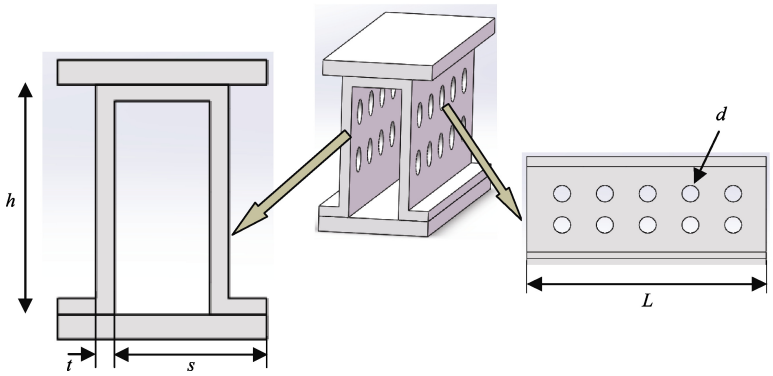


图 1 打孔翅片结构

Fig. 1 Structure of perforated fins

1.2 控制方程与边界条件

鉴于板翅式换热器翅片通道性能多采用稳态法测量，且考虑到实际流动换热过程的复杂性，本文对所研究的翅片通道内流动换热问题作出如下假设：

1）翅片通道内的流动与换热均为稳态，且无相变；

2）忽略翅片通道内的自然对流与辐射换热；

3）忽略流体与固体壁面间的界面热阻；

4）忽略重力的影响；

5）流体与固体的热物性维持恒定。

基于上述分析与假设，通用控制方程分别在层流区域与湍流区域转化为关于具体控制变量的稳态守恒方程。

1）层流流动与换热

质量守恒方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0\,, \tag{2}$$

其中，u、v、w 分别为 x、y、z 方向上的流体速度。

x-动量方程：

$$\rho(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2})\,, \tag{3}$$

y-动量方程：

$$\rho(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2})\,, \tag{4}$$

z-动量方程：

$$\rho(u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2})\,, \tag{5}$$

其中，ρ 为流体的密度；p 为流体的压强；μ 为流体的黏度。

流体在对流条件下的传热微分方程为

$$\rho C_p(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z})=\lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2})\,, \tag{6}$$

其中，C_p 为流体的定压比热容；λ 为流体的导热系数。

对于固体导热材料，无内热源存在的热传导方程为

$$\lambda_s(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2})=0\,, \tag{7}$$

其中，λ_s 为固体导热系数。

2）湍流流动与换热

关于湍流流动与换热的数值模拟，目前已采用的方法可以概括为直接数值模拟法（direct numerical simulations，DNS）、大涡数值模拟法（large eddy simulations，LES）和 Reynolds 平均数值模拟法（Reynolds averaging numerical simulations，RANS）[7]。DNS 与 LES 用于求解 3D 非定常湍流，对计算机内存与运算速度的要求较高。鉴于当今计算机的发展水平，这些方法在实际工程问题中的应用仍然十分有限。RANS 以时均控制方程组为基础，是目前工程湍流计算中应用最广泛的数值模拟方法。

RANS 中所涉及的湍流模型种类繁多。不同的湍流模型基于不同的考虑与假设，没有一种模型可以对任意几何边界条件与各种流动工况的湍流问题均给出准确的描述与满意的求解结果，因此对于不同条件下的湍流问题有必要合理选择湍流模型。

针对板翅式换热器翅片通道内的湍流流动与换热问题，文献[7]中曾采用标准 k-ε 模型、可实现 k-ε 模

型、剪切应力运输（shear stress transport，SST）*k-ω* 模型以及低 *Re k-ε* 模型进行数值计算与分析。以下将首先给出湍流动量守恒方程与能量守恒方程，接着给出上述湍流模型的简要介绍。需要说明的是，根据前述的稳态流动假设，这里认为湍流也是稳态的，因此以下给出的湍流控制方程中，与时间有关的项均已略去。

1）湍流动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_t\frac{\partial u_j}{\partial x_i})-\frac{2}{3}\rho k\delta_{i,j}-\frac{\partial p}{\partial x_i}, \tag{8}$$

其中，μ_t 为湍流黏度（Pa·s）；k 为单位质量流体的湍动能（$m^2\cdot s^{-2}$）。

2）湍流能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_t}{\sigma_T})\frac{\partial T}{\partial x_j}\right]+\frac{1}{C_p}(\Phi+\rho\varepsilon), \tag{9}$$

其中，σ_T 为湍流 *Pr* 数，其值取决于湍流模型；ε 为湍动能的耗散率（$m^2\cdot s^{-3}$）；Φ 为耗散函数。

3）低 *Re k-ε* 模型

本文板翅式换热器的湍流流动与换热问题将采用低 *Re k-ε* 模型中的 AB 模型，其中 AB 模型的常数取值为 C_μ=0.09，$C_{1\varepsilon}$=1.45，$C_{2\varepsilon}$=1.83，σ_k=1.0，σ_ε=1.4.

为对流动换热的控制方程组进行封闭，需要对计算区域的边界条件进行设置。在计算中，计算区域中的流动进口为质量流速进口；流动出口为压力出口边界条件；隔板、翅片以及流体的两侧均设置为周期性边界条件；考虑到风洞实验一般为冷凝或蒸发过程，因此上下壁面采用第一类边界条件即等壁温边界条件，对翅片通道内的常温空气进行加热；流动进口与出口的上下两侧设置为对称边界条件；流固接触面为耦合壁面边界。

1.3 网格生成与数值求解

数值模拟时，网格划分质量直接影响结果的准确性和计算速度。其中打孔翅片采用结构化六面体网格和非结构化四面体的混合网格，如图 2 所示。

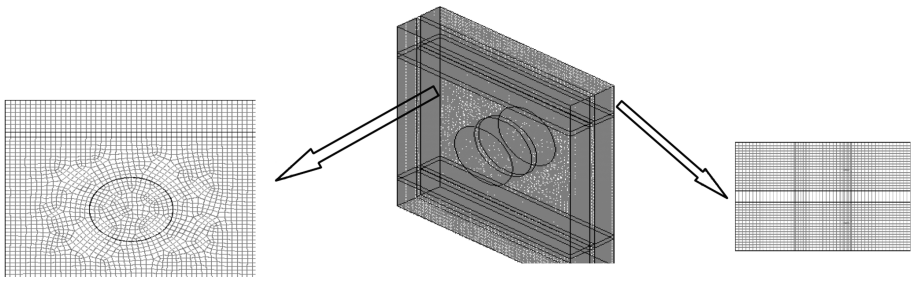


图 2 打孔翅片网格示意图

Fig. 2 Mesh scheme of perforated fins

采用 FLUENT 15.0 求解器对计算区域进行数值求解，并采用收敛特性较好的 SIMPLEC 算法求解压力与速度的耦合方程。对于层流流动与换热方程的离散，压力采用标准格式离散，动量和能量方程采用二阶迎风格式离散。当 *Re*<2 000 时采用层流模型；当 *Re*≥2 000 时采用低 *Re* 模型中的 AB 模型。计算中将各方程的残差与翅片进出口流体的面积平均温度作为监测变量，并认为当层流的变量残差均小于

1×10^{-6}，湍流的变量残差均小于 1×10^{-4}，计算收敛。

1.4 网格独立性检验

由数值仿真实验得到的数据，可以计算得到翅片的换热因子 *j*. 其中，换热因子 *j* 的定义式为

$$j=\frac{Nu}{Re\cdot Pr^{1/3}}, \tag{10}$$

其中，*Re*、*Pr*、*Nu* 分别定义为

$$Re=\frac{GD_{\mathrm{h}}}{\mu}, \tag{11}$$

$$Pr=\frac{\mu C_p}{\lambda}, \tag{12}$$

$$Nu=\frac{h_{\mathrm{c}}D_{\mathrm{h}}}{k_i}. \tag{13}$$

翅片通道内的换热系数 h_{c} 的计算式为

$$h_{\mathrm{c}}=\frac{1}{\eta_0}\frac{1}{\frac{1}{U}-\frac{b}{k_{\mathrm{s}}}\frac{A}{2A_{\mathrm{w,cp}}}}, \tag{14}$$

其中，$A_{\mathrm{w,cp}}$ 为隔板壁面面积；*b* 为隔板厚度；k_{s} 为固体材料导热系数。

翅片通道的传热系数 *U* 的计算式为

$$U=\frac{Q}{A\Delta T_{\mathrm{LMTD}}}, \tag{15}$$

其中，*Q* 为翅片通道内的总换热量。

对数平均温差 ΔT_{LMTD} 的计算式为

$$\Delta T_{\mathrm{LMTD}}=\frac{(T_{\mathrm{base}}-T_{\mathrm{fluid,in}})-(T_{\mathrm{base}}-T_{\mathrm{fluid,out}})}{\ln(\frac{T_{\mathrm{base}}-T_{\mathrm{fluid,in}}}{T_{\mathrm{base}}-T_{\mathrm{fluid,out}}})}. \tag{16}$$

翅片通道的表面效率 η_0 为

$$\eta_0=1-\frac{A_{\mathrm{sec}}}{A}(1-\eta_{\mathrm{f,id}}), \tag{17}$$

其中，A_{sec} 为翅片通道内二次表面面积。

理想翅片效率 $\eta_{\mathrm{f,id}}$ 的计算式为

$$\eta_{\mathrm{f,id}}=\frac{\tanh(\frac{1}{2}mh)}{\frac{1}{2}mh}, \tag{18}$$

$$m=\sqrt{\frac{2h_{\mathrm{c}}}{k_{\mathrm{s}}t}}. \tag{19}$$

联立式（10）～式（19），*j* 因子可以通过迭代求解得出。

Fanning 摩擦因子 *f* 的物理意义为局部剪应力与局部流动动能之比，计算如下：

$$f=\frac{\Delta P}{G^2}\frac{\rho D_{\mathrm{h}}}{2L}, \tag{20}$$

其中，ΔP 为翅片通道的进出口压差（Pa）；L 为翅片通道的总长度（m）。

数值模拟中，网格质量直接影响模拟结果的准确性，保证较高质量的网格数量对于计算结果的准确度至关重要，因此本节对打孔翅片的网格无关性进行验证，以保证数值模拟中较高的网格质量。其中打孔翅片[8]模型 13.95（P）的参数如下：材料为铝，翅片高度 h=5.08 mm，翅片间距 s=1.82 mm，翅片厚度 t=0.305 mm，孔径 d=2 mm，打孔率 σ=16%，Re=6 000，流动工质为空气，网格无关性验证如图 3 所示。可以看出，为在保证数值计算可靠性的基础上缩短计算时间，打孔翅片通道的网格数量不应小于 210 万。

1.5 数值模型验证

为保证模型的正确性，对计算模型进行实验验证，将模拟计算值与文献[8]的实验值进行对比。打孔翅片模型 13.95（P）的参数如下：材料为铝，流动工质为空气，翅片高度 h=5.08 mm，翅片间距 s=1.82 mm，翅片厚度 t=0.305 mm，孔径 d=2 mm，打孔率 σ=16%，Re=500～10 000，数值模拟结果与文献实验数据的对比如图 4 所示。

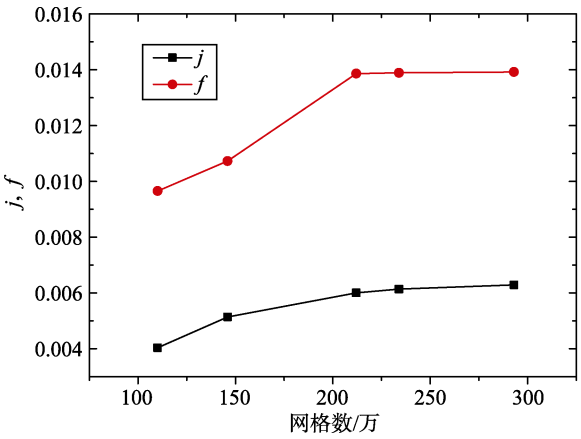


图 3 打孔翅片网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence test for perforated fins

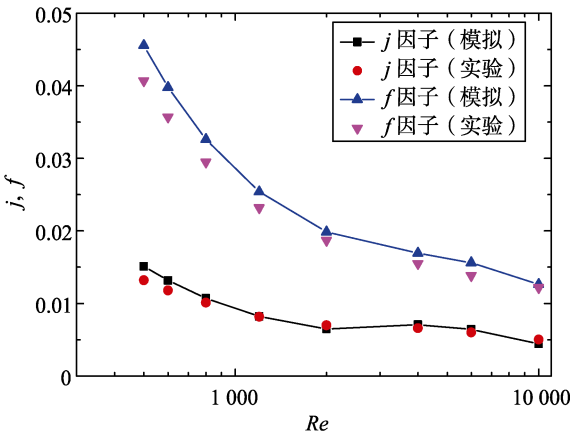


图 4 打孔翅片数值结果与实验数据对比

Fig. 4 Comparison of numerical values and experimental data for perforated fins

2 高压下打孔翅片通道内的流动换热性能

2.1 流动工况对打孔翅片通道内流动换热性能的影响

为研究不同流动工况下打孔翅片通道内的流动换热性能，分别计算了 Re=300～8 000 下的换热因子 j 和摩擦因子 f. 这里翅片结构参数为：翅片厚高比 α=0.076 9，翅片密度 γ=0.250 0，翅片厚长比 δ=0.003 3、打孔率 σ=11%. 计算结果如图 5 所示，可以看出，换热因子 j 和摩擦因子 f 随 Re 数的增加先减小而后趋于平缓，当 Re≥2 000 时，换热因子 j 和摩擦因子 f 随 Re 数的变化幅度越来越小并趋于平缓。

2.2 翅片结构对打孔翅片通道内流动换热性能的影响

2.2.1 翅片厚高比对打孔翅片通道内流动换热性能的影响

为研究不同翅片厚高比下打孔翅片通道内的流动换热性能，分别计算了质量流量 m=0.000 03 kg·s^{-1}，不同翅片厚高比下的换热因子 j 和摩擦因子 f. 这里翅片结构参数为：翅片密度 γ=0.250 0，翅片厚长比 δ=0.003 3，打孔率 σ=11%. 计算结果如图 6 所示，可以看出，换热因子 j 和摩擦因子 f 随翅片厚高比 α 的增加而逐渐递减，且随着翅片厚高比 α 越来越大，其减小的幅度越来越小。

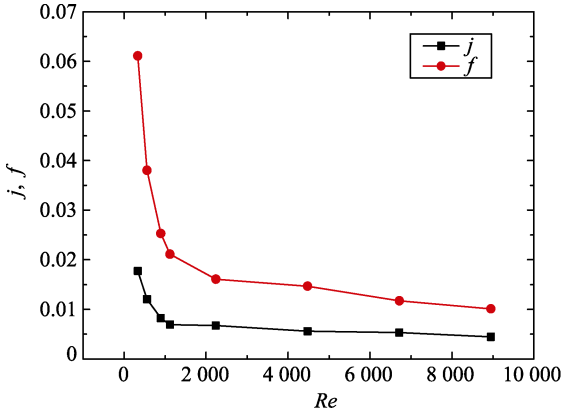


图5 不同 *Re* 数下高压打孔翅片的换热因子 *j* 和摩擦因子 *f*

Fig. 5 *j* and *f* factors of perforated fins at high pressure with different *Re* values

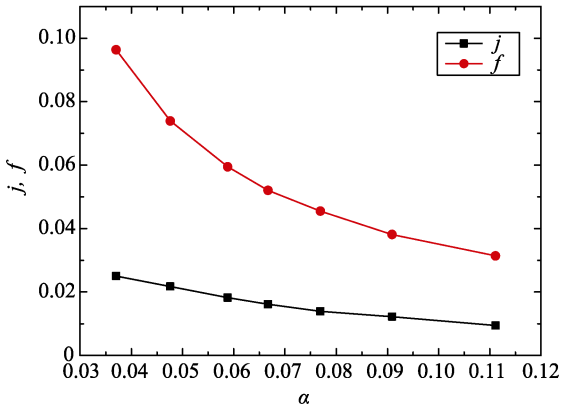


图6 不同厚高比下高压打孔翅片的换热因子 *j* 和摩擦因子 *f*

Fig. 6 *j* and *f* factors of perforated fins at high pressure with different thickness/height ratios

2.2.2 翅片密度对打孔翅片通道内流动换热性能的影响

为研究不同翅片密度下打孔翅片通道内的流动换热性能，分别计算了质量流量 m=0.000 07 kg·s^{-1}，不同翅片密度下的换热因子 j 和摩擦因子 f. 这里翅片结构参数为：翅片厚高比 α=0.076 9，翅片厚长比 δ=0.003 3，打孔率 σ=11%. 计算结果如图 7 所示，可以看出，换热因子 j 和摩擦因子 f 随翅片密度 γ 的增加均先减小后增大，但是最小的换热因子 j 和摩擦因子 f 所对应的最低的翅片密度 γ 并不相同，其中换热因子 j 所对应的最低的翅片密度 γ=0.150 0，摩擦因子 f 所对应的最低的翅片密度 γ=0.250 0.

2.2.3 翅片厚长比对打孔翅片通道内流动换热性能的影响

为研究不同翅片厚长比下打孔翅片通道内的流动换热性能，分别计算当 Re=800 时，不同翅片厚长比下的换热因子 j 和摩擦因子 f. 这里翅片结构参数为：翅片厚高比 α=0.031 3，翅片密度 γ=0.100 0，打孔率 σ =11%. 计算结果如图 8 所示，可以看出，换热因子 j 和摩擦因子 f 与翅片厚长比 δ 呈单调递增的关系，均随翅片厚长比的增加而增加。

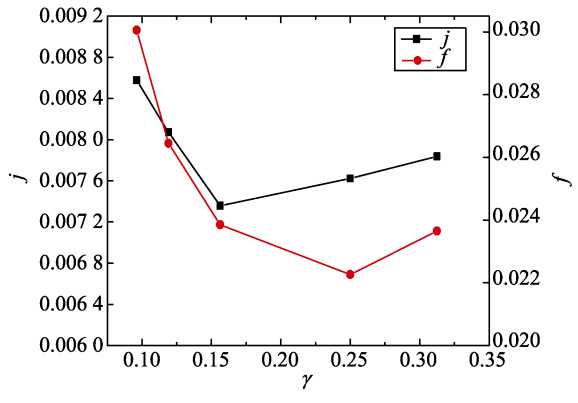


图7 不同翅片密度下高压打孔翅片的换热因子 *j* 和摩擦因子 *f*

Fig. 7 *j* and *f* factors of perforated fins at high pressure with different densities of fins

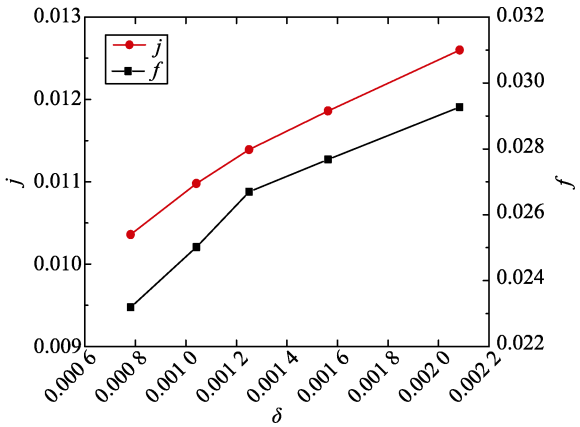


图8 不同翅片厚长比下高压打孔翅片的换热因子 *j* 和摩擦因子 *f*

Fig. 8 *j* and *f* factors of perforated fins at high pressure with different thickness/length ratios

2.2.4 打孔率对打孔翅片通道内流动换热性能的影响

为研究不同打孔率下打孔翅片通道内的流动换热性能，分别计算当 Re=800 时，不同打孔率下的换热因子 j 和摩擦因子 f. 这里翅片结构参数为：翅片厚高比 α=0.076 9，翅片密度 γ=0.250 0，翅片厚长比 δ=0.005 0. 计算结果如图 9 所示，可以看出，换热因子 j 和摩擦因子 f 与打孔率 σ 呈单调递增的关系，均随打孔率 σ 的增加而增加。

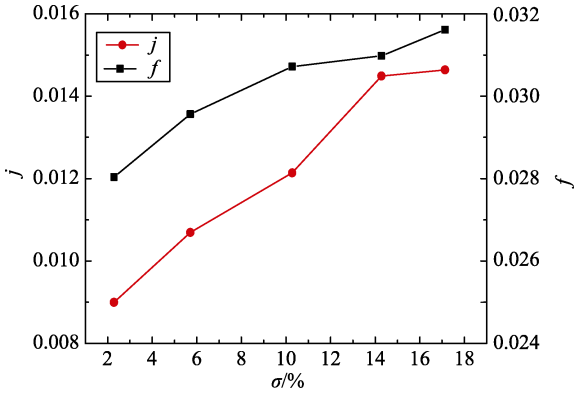


图 9 不同打孔率下高压打孔翅片的换热因子 j 和摩擦因子 f

Fig. 9 j and f factors of perforated fins at high pressure with different punching rates

2.3 打孔翅片 j、f 因子通用预测关系式

2.3.1 多型号打孔翅片流动换热数值模拟

为探索打孔翅片通道内流动换热的一般预测关系式，需要对多种结构参数的打孔翅片进行数值模拟，计算出其 j 因子和 f 因子，然后再对所计算的 j 因子和 f 因子进行拟合。在探索打孔翅片通道内流动换热的一般预测关系式时，选取 31 组结构的打孔翅片，按水力直径从大到小进行排列，如表 1 所示。其中翅片结构参数的范围为：0.031 3≤α≤0.142 9，0.096 2≤γ≤0.555 6，0.000 8≤δ≤0.005 0，2%≤σ≤18%，翅片材料为铝，流动工质为空气，流动工况范围 100≤Re≤1000 0.

表 1 所模拟的打孔翅片结构

Tab. 1 Structure of perforated fins

翅片编号	D_h/mm	α	γ	δ	σ/%
1	0.811 0	0.052 1	0.555 6	0.003 5	12
2	1.024 2	0.039 7	0.500 0	0.003 5	14
3	1.578 5	0.044 6	0.384 6	0.003 5	13
4	1.945 2	0.076 9	0.312 5	0.003 3	11
5	2.260 2	0.031 3	0.100 0	0.002 1	12
6	2.260 2	0.031 3	0.100 0	0.001 3	12
7	2.260 2	0.031 3	0.100 0	0.001 0	12
8	2.260 2	0.031 3	0.100 0	0.001 6	12
9	2.260 2	0.031 3	0.100 0	0.000 8	12
10	2.267 0	0.051 0	0.294 1	0.003 5	15
11	2.314 0	0.111 1	0.250 0	0.003 3	18
12	2.375 1	0.057 5	0.277 8	0.003 5	14
13	2.420 3	0.076 9	0.250 0	0.005 0	2
14	2.424 9	0.090 9	0.250 0	0.003 3	14
15	2.451 3	0.076 9	0.250 0	0.005 0	6
16	2.494 0	0.076 9	0.250 0	0.005 0	10
17	2.504 9	0.076 9	0.250 0	0.003 3	11
18	2.532 6	0.076 9	0.250 0	0.005 0	14

续表

翅片编号	D_h/mm	α	γ	δ	σ/%
19	2.560 9	0.076 9	0.250 0	0.005 0	17
20	2.565 4	0.066 7	0.250 0	0.003 3	10
21	2.612 7	0.058 8	0.250 0	0.003 3	8
22	2.682 0	0.047 6	0.250 0	0.003 3	7
23	2.749 2	0.037 0	0.250 0	0.003 3	5
24	3.088 1	0.061 0	0.217 4	0.003 5	15
25	3.089 9	0.142 9	0.142 9	0.003 5	14
26	3.207 0	0.071 4	0.200 0	0.003 5	13
27	3.412 9	0.089 3	0.172 4	0.003 5	14
28	3.863 7	0.076 9	0.156 3	0.003 3	11
29	4.119 8	0.069 4	0.151 5	0.003 5	13
30	4.730 5	0.076 9	0.119 0	0.003 3	11
31	5.430 5	0.076 9	0.096 2	0.003 3	11

2.3.2 打孔翅片 *j*、*f* 因子预测关系式的确定与拟合

在 2.1 节和 2.2 节中对影响打孔翅片流动换热性能的因素进行了分析，可以看出，影响打孔翅片流动换热性能的因素不仅包括翅片的几何结构参数即翅片厚高比 α、翅片密度 γ、打孔率 σ、翅片厚长比 δ 4 个因素，还包括 *Re* 数。基于以上分析，打孔翅片 *j*、*f* 因子预测关系式的形式确定为

$$j = A_0 \alpha^{A_1} \gamma^{A_2} \sigma^{A_3} \delta^{A_4} Re^{A_5}\ , \tag{21}$$

$$f = B_0 \alpha^{B_1} \gamma^{B_2} \sigma^{B_3} \delta^{B_4} Re^{B_5}\ . \tag{22}$$

将所计算的打孔翅片 31 组结构、11 种流动工况中的 341 组数据的 *j*、*f* 因子代入式（21）和式（22）中进行拟合。在拟合中发现，层流和湍流放在一起拟合所得关联式的相关性和准确度较差，无法满足要求，因此在拟合打孔翅片 *j*、*f* 因子预测关系式时，将层流和湍流分开进行拟合。

层流下分别计算了 5 种流动工况下，31 组翅片结构的 *j*、*f* 因子，选取其中 91 组数据进行拟合，式（21）和式（22）中所涉及的关联式指数如表 2 所示。其 *j* 因子数据拟合的相关性系数为 0.91，*f* 因子拟合的相关性系数为 0.98. 图 10、图 11 分别给出了根据所得流动换热性能预测关系式计算的 *j*、*f* 因子与 70 组数值模拟数据的对比，其 *j* 因子和 *f* 因子预测关系式的计算值与模拟值的最大误差均在±10%以内，说明所提出的关联式能够较好地描述不同结构下打孔翅片通道内的流动换热性能。

表 2　层流下 *j*、*f* 因子预测关系式中的指数值

Tab. 2　Index values of *j* and *f* factors in predictive relation under laminar flow

j 因子关系式指数	指数值	*f* 因子关系式指数	指数值
A_0	0.8538 7	B_0	13.979 72
A_1	–0.299 46	B_1	–0.151 54
A_2	0.129 48	B_2	–0.041 16
A_3	0.131 20	B_3	0.139 65
A_4	0.033 22	B_4	0.040 6
A_5	–0.659 01	B_5	–0.887 6

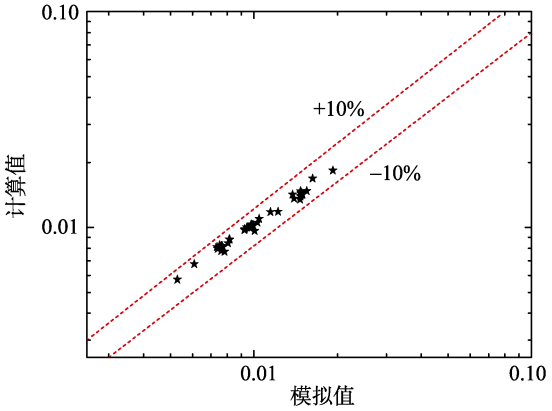


图 10 层流 j 因子关联式计算值与数值模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of the calculated value and the numerical values for the j factors under the laminar flow

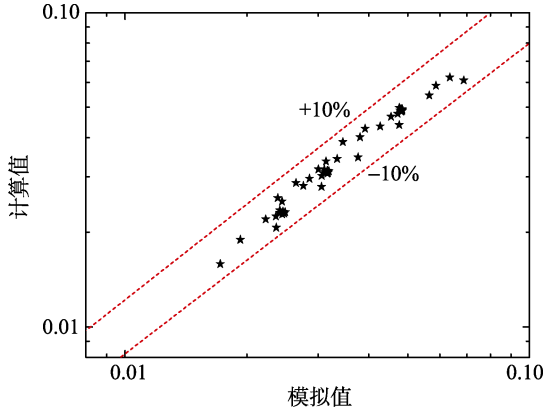


图 11 层流 f 因子关联式计算值与数值模拟结果对比

Fig. 11 Comparison of the calculated value and the numerical values for the f factors under the laminar flow

湍流下分别计算了 6 种流动工况下，31 组翅片结构的 j、f 因子，选取其中 98 组数据进行拟合，式（21）和式（22）中所涉及的关联式指数如表 3 所示。其 j 因子数据拟合的相关性系数为 0.89，f 因子拟合的相关性系数为 0.87. 图 12、图 13 分别给出了根据所得流动换热性能预测关系式计算的 j、f 因子与 47 组数值模拟数据的对比，其中关系式对 94%的 j 因子数据点和 96%的 f 因子数据点的预测偏差均在±20%以内，说明所提出的关联式能够较好地描述不同结构下打孔翅片通道内的流动换热性能。

表 3 湍流下 j、f 因子预测关系式中的指数值

Tab. 3 Index values of j and f factors in predictive relation under turbulent flow

j 因子关系式指数	指数值	f 因子关系式指数	指数值
A_0	0.013 44	B_0	0.006 95
A_1	−0.140 89	B_1	0.017 04
A_2	−0.059 47	B_2	−0.018 86
A_3	0.082 93	B_3	−0.083 68
A_4	0.233 67	B_4	0.764 55
A_5	−0.148 54	B_5	−0.192 31

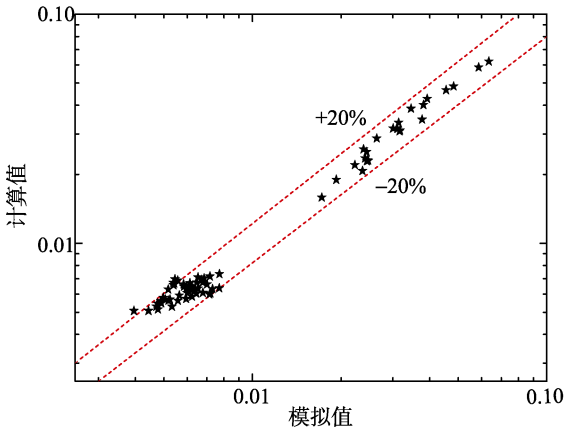


图 12 湍流 j 因子关联式计算值与数值模拟结果对比

Fig. 12 Comparison of calculated values with numerical values for j factor under turbulent flow

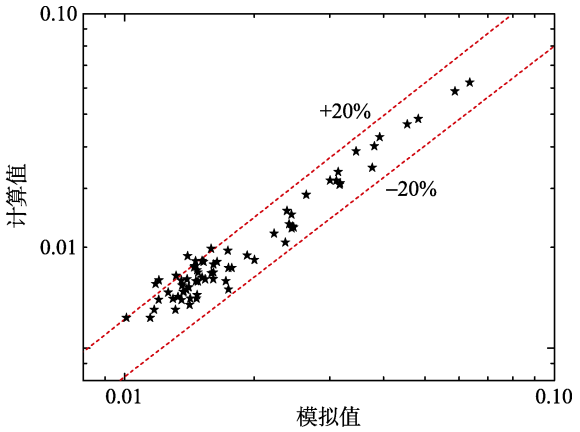


图 13 湍流 f 因子关联式的计算值与数值模拟结果对比

Fig. 13 Comparison of calculated value with numerical values for the f factor under turbulent flow

2.3.3 打孔翅片 *j*、*f* 因子预测关系式预测能力分析

为检验所提出关联式的预测能力，总共收集了 55 个实验数据点，其中层流 30 个 *j*、*f* 因子实验数据点，湍流 25 个 *j*、*f* 因子实验数据点。这些实验数据点分别来自 KAYS 等[8]、王松汉[9]、RIDDELL[10]所发表的实验数据。这里需要说明的是，所有实验数据均采用风洞实验获得，流动工质均为空气，翅片材料为铝。这些实验数据点所对应的打孔翅片的型号以及结构和流体的流动工况如表 4 所示。

表 4 文献中实验用打孔翅片的几何结构参数及流体流动工况

Tab. 4 Geometry parameters and flow condition for perforated fins in papers

翅片型号	D_h/mm	α	γ	δ	σ/%	*Re* 数范围
13.95（P）	2.490 4	0.060 0	0.167 6	0.006 1	15	500～10 000
无	3.977 3	0.066 7	0.200 0	0.002 1	2	300～8 000
无	1.172 7	0.048 0	0.146 3	0.000 8	14	100～1 500
64PF1402	2.038 4	0.031 3	0.142 9	0.000 7	10	100～10 000
64PF1405	1.561 8	0.078 1	0.357 1	0.001 6	10	100～10 000
64PF1803	2.429 2	0.046 9	0.166 7	0.001 0	10	100～10 000
64PF1805	2.130 6	0.078 1	0.277 8	0.001 6	10	100～10 000

为检验所提出的打孔翅片 *j*、*f* 因子预测关系式的预测能力，将文献中给出的 *j*、*f* 因子实验值与本节所提出的预测关系式所得的 *j*、*f* 因子相比较，实验值与预测关系式计算值的比较结果如图 14～图 17 所示。

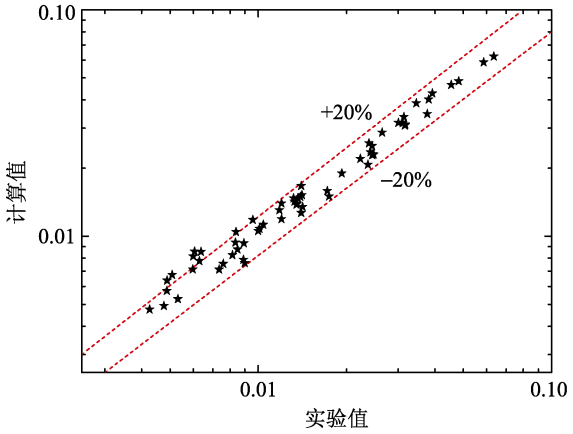


图 14 层流 *j* 因子预测关系式的计算值与实验值对比

Fig. 14 Comparison of calculated values with experimental data for *j* factor under laminar flow

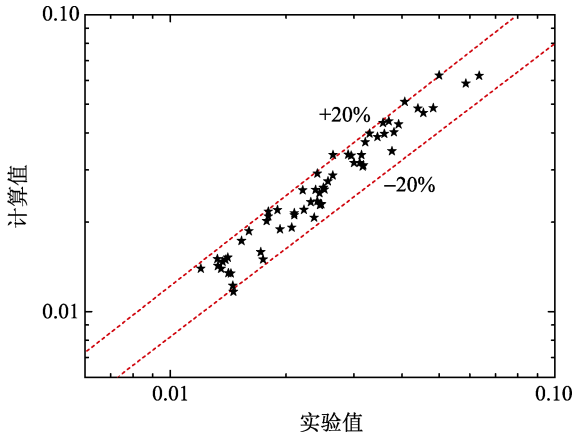


图 15 层流 *f* 因子预测关系式的计算值与实验值对比

Fig. 15 Comparison of the calculated values with experimental data for *f* factors under laminar flow

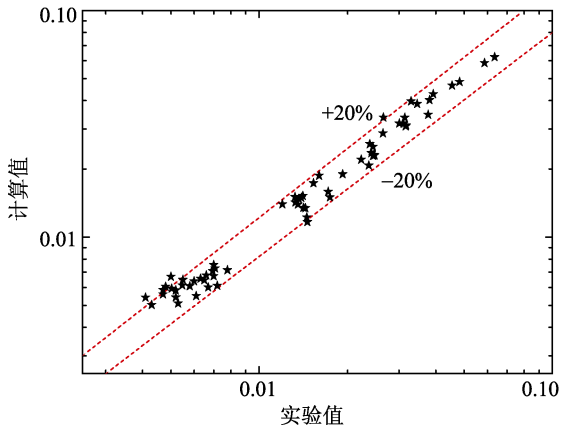


图 16 湍流 *j* 因子预测关系式的计算值与实验值对比

Fig. 16 Comparison of calculated values with experimental data for *j* factor under turbulent flow

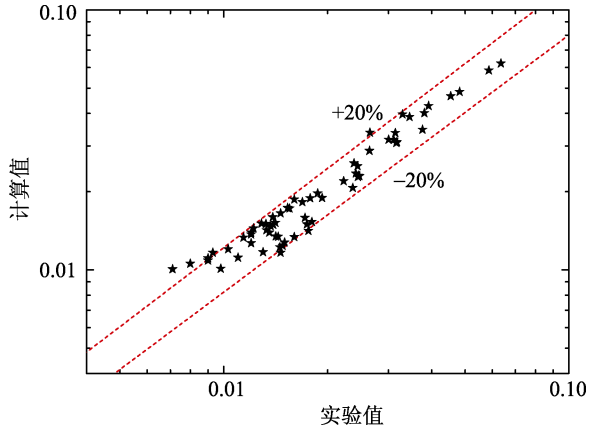


图 17 湍流 *f* 因子预测关系式的计算值与实验值对比

Fig. 17 Comparison of calculated values with experimental data for *f* factor under turbulent flow

对于层流区域，其中关系式对 90%的 j 因子数据点和 95%的 f 因子数据点的预测偏差均在±20%以内；对于湍流区域，其中关系式对 92%的 j 因子数据点和 96%的 f 因子数据点的预测偏差均在±20%以内。由以上分析看出，所提出的预测关系式能够较好地预测在所研究 Re 数范围内较广的打孔翅片结构的 j、f 因子。

3 高压下打孔翅片通道内的强化换热性能

3.1 打孔翅片通道内的强化换热性能

本文引用相对熵产分布因子[11]的方法评价高压下打孔板翅式换热的强化换热性能。其中相对熵产分布因子 Ψ^*表示强化换热通道换热不可逆性的相对减小量与摩擦压降不可逆性的相对增加量之比。参数 Ψ^* 的数值越大，强化换热通道的强化换热性能越高。其定义式为

$$\Psi^*=\frac{(N_{S1,o,\Delta T}-N_{S1,a,\Delta T})/N_{S1,o,\Delta T}}{(N_{S1,a,\Delta P}-N_{S1,o,\Delta P})/N_{S1,o,\Delta P}}, \tag{23}$$

$$N_{S1,\Delta T}=1+\frac{1}{\tau_0\varepsilon}\ln[\frac{1+\tau_0(1-\varepsilon)}{1+\tau_0}], \tag{24}$$

$$N_{S1,\Delta P}=\frac{1}{\iota_0\varepsilon}\frac{fRe^2}{2j}\frac{\mu^2Pr^{2/3}}{\rho^2D_{\mathrm{h}}C_pT_{\mathrm{base}}}\ln[\frac{1+\tau_0(1-\varepsilon)}{(1+\tau_0)(1-\varepsilon)}], \tag{25}$$

$$\tau_0=\frac{T_0-T_{\mathrm{base}}}{T_{\mathrm{base}}}, \tag{26}$$

$$\varepsilon=1-\exp(-N_{\mathrm{tu}}), \tag{27}$$

$$N_{tu}=\frac{4L}{D_{\mathrm{h}}}\frac{j}{Pr^{2/3}}, \tag{28}$$

其中，$N_{S1,\Delta T}$ 为由有限温差引起的熵产转化而来的无量纲熵产数；$N_{S1,\Delta P}$ 为由摩擦压降引起的熵产转化而来的无量纲熵产数；τ_0 为翅片进口的相对换热温差；T_0 为翅片进口的面积平均温度；ε 为定壁温边界条件下的传热效能数；N_{tu} 为传热单元数。

在评价高压下打孔翅片通道内的强化换热性能时，一方面选取板翅式换热器中最基本的平直翅片通道作为参考基准，另一方面保证打孔翅片与平直翅片通道具有相同面的横截面形状、相同流体的质量流量以及在进口处具有相同的相对换热温差。

考虑到相对熵产分布因子 Ψ^*的计算需要换热因子 j 和摩擦因子 f，因此本文通过数值模拟的方法计算了翅片厚高比 α=0.076 9、翅片密度 γ=0.250 0、翅片通道的有效长度 L=144 mm、打孔率 σ=11%、Re=300～8 000 的两种翅片类型的换热因子 j 和摩擦因子 f，计算结果如图 18 所示。然后将数值计算得出的换热因子 j 和摩擦因子 f 代入式（23）～式（28），计算得出打孔翅片通道内的相对熵产分布因子，以此来评价高压下打孔翅片通道内的强化换热性能。由图 18 可以看出，打孔翅片的换热性能较高，但是其流动性能较差。

打孔翅片通道内强化换热性能的计算结果如图 19 所示，可以看出，打孔翅片通道内的强化换热性能随 Re 数的增大先增大后减小，当 Re=1 000 时，打孔翅片通道内的强化换热性能达到最佳。

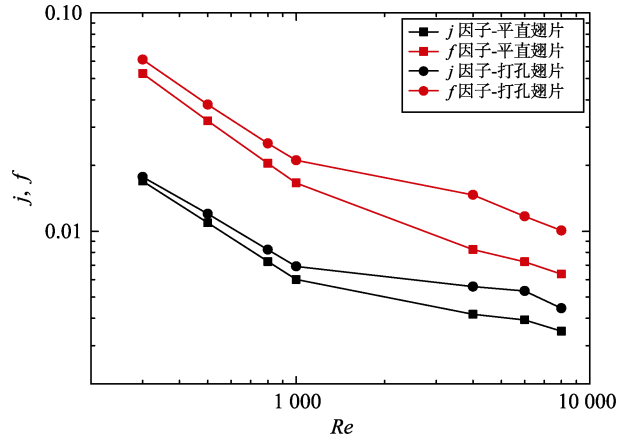


图 18 高压下两种翅片类型的换热因子 j 和摩擦因子 f 比较

Fig. 18 Comparison of j and f factors for two different kinds of perforated fins at high pressure

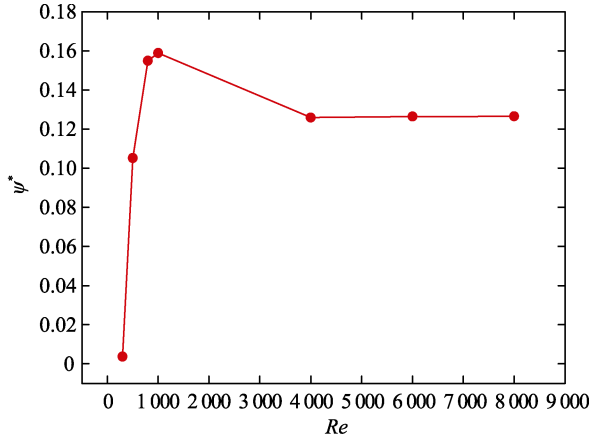


图 19 高压下打孔翅片的强化换热性能

Fig. 19 Enhanced heat transfer performance of perforated fins at high pressure

3.2 翅片结构对打孔翅片通道内强化换热性能的影响

3.2.1 翅片厚高比对打孔翅片通道内强化换热性能的影响

图 20 给出了翅片密度 γ=0.250 0、翅片厚长比 δ=0.003 3、打孔率 σ=11%的打孔翅片在不同质量流量下相对熵产分布因子 Ψ^*随翅片厚高比的变化规律，这里保证打孔翅片进口相对换热温差不变，其进口相对换热温差 τ_0=0.09. 由图 20 可以看出，一方面，当翅片进口相对换热温差一定时，在不同的质量流量下，其打孔翅片通道的强化换热性能随翅片厚高比的变化规律一致，均随翅片厚高比先增大后减小；另一方面，对于不同的质量流量，最优的强化换热性能所对应的翅片厚高比一致，均为 0.09 左右。综上，当翅片进口相对换热温差不变时，在不同的质量流量下，对于此种翅片结构的高压打孔翅片存在最佳的翅片厚高比，此时高压打孔翅片通道内的强化换热性能最佳。

3.2.2 翅片密度对打孔翅片通道内强化换热性能的影响

图 21 给出了翅片厚高比 α=0.076 9、翅片厚长比 δ=0.003 3、打孔率 σ=11%的打孔翅片在不同质量流量下相对熵产分布因子 Ψ^*随翅片密度的变化规律，这里保证打孔翅片进口相对换热温差不变，其进口相

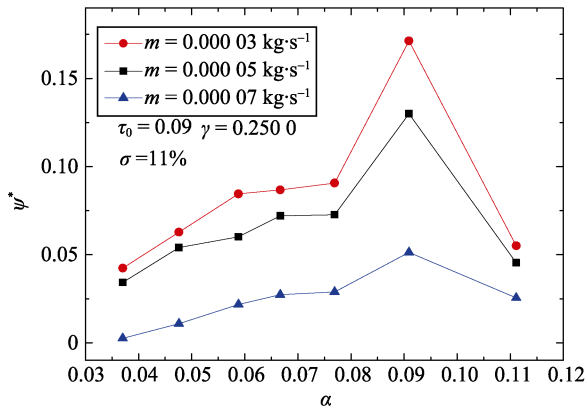


图 20 不同质量流量、不同翅片厚高比下高压打孔翅片的强化换热性能

Fig. 20 Enhanced heat transfer performance of perforated Fins at high pressure under different thickness/height ratios of fins and mass flow rates

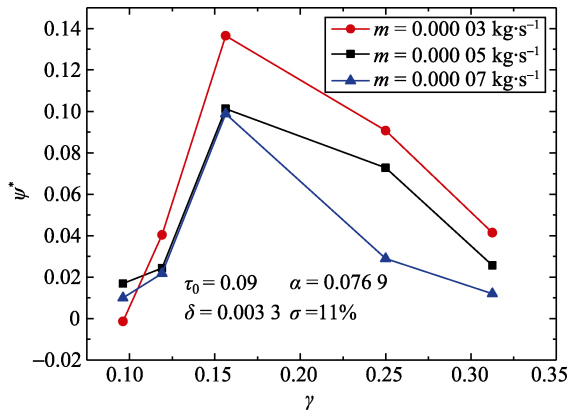


图 21 不同质量流量、不同翅片密度下高压打孔翅片的强化换热性能

Fig. 21 Enhanced heat transfer performance of perforated fins at high pressure under different densities of fins and mass flow rates

对换热温差 τ_0=0.09. 由图 21 可以看出，一方面，当翅片进口相对换热温差一定时，在不同的质量流量下，其打孔翅片通道的强化换热性能随翅片密度的变化规律一致，均随翅片密度先增大后减小；另一方面，对于不同的质量流量，最优的强化换热性能所对应的翅片密度一致，均为 0.15 左右，并且对于质量流量为 m=0.000 05 kg·s^{-1} 和质量流量 m=0.000 07 kg·s^{-1} 两种情况下最佳翅片密度所对应的最优的翅片通道强化换热性能几乎相等。综上，当翅片进口相对换热温差不变时，不同的质量流量下，对于此种翅片结构的高压打孔翅片存在最佳的翅片密度，此时高压打孔翅片通道内的强化换热性能最佳。

4 结论

研究首先给出了高压下打孔翅片通道内流动换热性能的变化规律；其次拟合了高压下打孔翅片通道内 j、f 因子的预测关系式；最后评价了打孔翅片的强化换热性能，得出以下结论：

1）基于单因素分析法，探讨了不同流动工况、不同翅片厚高比、不同翅片密度、不同翅片厚长比、不同打孔率下打孔翅片通道内的流动换热性能。发现对于不同流动工况，打孔翅片通道内的 j、f 因子均随 Re 数的增加先增大后趋于平缓；对于不同翅片厚高比，打孔翅片通道内的 j、f 因子均随翅片厚高比 α 的增加而减小；对于不同翅片密度，打孔翅片通道内的 j、f 因子均随翅片密度 γ 的增加先减小后增大；对于不同翅片厚长比和打孔率，打孔翅片通道内的 j、f 因子均随两者的升高而单调递增。

2）基于对打孔翅片通道内流动换热性能的分析，确定了打孔翅片 j、f 因子预测关系式的形式。并通过数值计算 11 种流动工况、31 组结构的打孔翅片 j、f 因子，获得了 341 组 j、f 因子数据点。利用这 341 组数据分别对层流和湍流两种流动状态下打孔翅片的 j、f 因子进行了拟合，得出了层流和湍流两种流动状态下高压打孔板翅式换热器 j、f 因子的预测关系式。为检验所提出的打孔翅片 j、f 因子预测关系式的预测能力，一方面，将预测关系式计算所得的 j、f 因子与 101 组数值模拟所得的 j、f 因子进行对比，对比结果显示，对于层流，其 j 因子和 f 因子预测关系式的计算值与模拟值的最大误差均在±10%以内，对于湍流，其中关系式对 94%的 j 因子数据点和 96%的 f 因子数据点的预测偏差均在 20%以内；另一方面，将文献中给出的 j、f 因子实验值与本文所提出的预测关系式计算所得的 j、f 因子相比较，结果显示，对于层流区域，其关系式对 90%的 j 因子数据点和 95%的 f 因子数据点的预测偏差均在±20%以内，对于湍流区域，其中关系式对 92%的 j 因子数据点和 96%的 f 因子数据点的预测偏差均在±20%以内。由以上分析看出，本文所提出的预测关系式能够较好地预测在所研究 Re 数范围内较广的打孔翅片结构的 j、f 因子。

3）以平直翅片为基准，在保证平直、打孔两种翅片通道有相同的横截面形状、相同的流体质量流量以及进口处有相同的换热温差的前提下，对高压下打孔翅片通道的强化换热性能进行分析，结果显示，打孔翅片通道内的强化换热性能随 Re 数的增加先增大后减小，发现当 Re=1 000 时，打孔翅片通道内的强化换热性能达到最佳。

4）探讨了结构参数对高压下打孔翅片通道内强化换热性能的影响。结果显示，对于翅片厚高比，在不同流体质量流量、不同进口相对换热温差下，打孔翅片通道内的强化换热因子均随翅片厚高比的增加而先增大后减小，存在最佳的翅片厚高比使打孔翅片通道内的强化换热性能最优，此最佳翅片厚高比为 α=0.09；对于翅片密度，在不同流体质量流量、不同进口相对换热温差下，打孔翅片通道内的强化换热因子均随翅片密度的增加而先增大后减小，存在最佳的翅片密度使打孔翅片通道内的强化换热性能最优，此最佳翅片密度为 γ=0.150 0.

[参考文献] (References)

[1] LI J, LING X, PENG H. Field synergy analysis on convective heat transfer and fluid flow of a novel triangular perforated fin[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64(5): 526-535.

[2] ALIABADI M K, HORMOZI F. Performance analysis of plate-fin heat exchangers: different fin configurations and coolants[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2013, 27(3): 515-525.

[3] SHAERI M R, YAGHOUBI M, JAFARPUR K. Heat transfer analysis of lateral perforated fin heat sinks[J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2019-2029.

[4] RAO R B S, RANGANATH G, RANGANAYAKULU C. Development of colburn factor and fanning friction factor correlations for compact surfaces of the triangular perforated fins using CFD[J]. Heat Transfer Engineering, 2016, 37(2): 150-161.

[5] 王伟平. 大型冷箱内换热器及其配管系统的流体均配与传热优化研究[D]. 杭州：浙江大学，2014.
WANG W P. Large heat exchanger inside cold box and piping system of fluid distribution and heat transfer optimization research[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)

[6] ZHU Y H, LI Y Z. Three-dimendional numerical simulation on the laminar flow and heat transfer in four basic fins of plate-fin heat exchangers[J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130(11): 1617-1620.

[7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安：西安交通大学出版社，2003.
TAO W Q. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003. (in Chinese)

[8] KAYS W M, LONDON A L. Compact heat exchangers[M]. New York: McGraw-Hill, 1984.

[9] 王松汉．板翅式换热器[M]．北京：化学工业出版社，1984．
WANG S H. Plate-fin heat exchanger[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1984. (in Chinese)

[10] RIDDELL R A. Heat transfer and flow friction characteristics of a plate-fin type cross-flow heat exchanger with perforated fins[J]. Heat Transfer Engineering,1966, 112(12): 121-138.

[11] YANG Y J, LI Y Z, SI B, et al. Performance evaluation of heat transfer enhancement in plate-fin heat exchangers with offset strip fins[J]. Physics Procedia, 2015, 67: 543-550.