

赵斌,赵利杰,高明非,等.不同布置 H 型鳍片管束传热流动准则关联式[J].煤炭学报,2017,42(3):782-788.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.8029

Zhao Bin,Zhao Lijie,Gao Mingfei,et al.Correlations of heat transfer and flow characteristics of H-type finned tube bank with different arrangements[J].Journal of China Coal Society,2017,42(3):782-788.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.8029

不同布置 H 型鳍片管束传热流动准则关联式

赵斌^{1,2},赵利杰^{1,2},高明非¹,李文¹,吕俊复²

(1.华北理工大学冶金与能源学院,河北唐山 063009;2.清华大学热能工程系,北京 100084)

摘要:从低低温省煤器的布置方式入手,以具有防磨、防积灰特点的 H 型鳍片管束为例,采用数值模拟的方法研究其在顺列和错列两种布置方式下的传热与流动特性。结果表明:在顺、错列两种布置方式下,当纵向管排数 ≥ 15 时,对 Nu 与 Eu 的影响可以忽略;进口流速、鳍片宽度、鳍片厚度、鳍片间距、开缝宽度和横向节距分别对两种布置方式下 H 型鳍片管束的 Nu 数与 Eu 数影响结果相同。鳍片宽度对 Nu 影响最大,鳍片间距对 Eu 影响最大,管束顺列布置时,开缝宽度对 Nu 与 Eu 影响最小,管束错列布置时,纵向节距对 Nu 数与 Eu 数影响最小。根据模拟数据拟合了 H 型鳍片管束在两种布置方式下分别对应的 Nu 与 Eu 准则关联式。研究结果可为燃煤电站低低温省煤器的优化设计提供参考。

关键词:H 型鳍片管束;布置方式; Nu 关联式; Eu 关联式

中图分类号:TK229.6 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2017)03-0782-07

Correlations of heat transfer and flow characteristics of H-type finned tube bank with different arrangements

ZHAO Bin^{1,2}, ZHAO Li-jie^{1,2}, GAO Ming-fei¹, LI Wen¹, LÜ Jun-fu²

(1.School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China; 2.Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Low-temperature economizer arrangement was introduced and the characteristics of anti-abrasion and anti-ash-deposition of H-type fin tube bundle were investigated. Numerical simulation was performed on the heat transfer and flow characteristics of H-type finned tube bank with in-line and staggered arrangement. Results show that when longitudinal tube increases up to 15th rows and more, it has little impact on Nu and Eu . Inlet fluid velocity, fin width, fin thickness, fin pitch, slit width and spanwise tube pitch have the same impact on Nu and Eu under two arrangements. Fin width has the most significant effect on Nu and fin pitch has the same effect on Eu . When it is in-line, slit width has the least effect on Nu and Eu . Longitudinal pitch has the same effect on Nu and Eu with staggered arrangement. Correlations of Nu and Eu for H-type finned tubes with two arrangements are presented. The research results can provide a reference for the optimization design of lower temperature economizer in the coal-fired power station.

Key words: H-type finned tube; in-line and staggered arrangements; correlation of Nu ; correlation of Eu

我国为“富煤、贫油、少气”的国家,2015年煤炭产量为 37.5 亿 t,占世界煤炭产量的 47%,煤炭在我

国能源结构中的处于绝对主导地位。从煤炭资源特点来看,我国的优质煤种储量少,低阶煤储量相对较

多^[1]。目前燃煤电站通过在尾部烟道加装低低温省煤器以降低排烟温度,减少锅炉排烟热损失,提高煤炭利用率。燃煤锅炉主要燃用劣质煤,其烟气中富含大量的灰尘颗粒,为减少磨擦和积灰等因素的影响,结构复杂的换热管不能应用在低低温省煤器中,在普通鳍片管基础上发展的 H 型鳍片管由于在鳍片表面存在特殊的沟槽结构,减少了部分鳍片表面进口和尾部分离区的换热面积,降低了进口和尾部分离区传热恶化对传热的影响,从而增大了鳍片的平均对流换热系数,达到强化换热的目的,因此研究低低温省煤器内 H 型鳍片管的优化设计具有重要意义^[2-4]。

刘聿拯、杨大哲等^[5-6]对单一结构的 H 型鳍片管换热器的传热和流动性能进行实验分析,总结出适用于该结构的传热与阻力准则关联式;Heng Chen、吴新等^[7-8]通过对不同结构参数 H 型鳍片管束的传热与阻力特性进行实验分析,拟合出了适用于该 5 组不同结构参数的 H 型鳍片管束传热及阻力的准则关联式;鉴于实验的复杂程度,张知翔等^[9-10]采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型数值模拟了 H 型鳍片管传热、阻力及综合性能的研究,分析了纵向管排修正系数 C_n 、纵向节距修正系数 C_s ;Yu Jin 等^[11]利用 RNG $k-\varepsilon$ 模型数值模拟了 H 型鳍片管受到不同参数的影响因素,得出横向管间距对换热器换热影响最大,鳍片开缝宽度对其干扰最小。

现有研究主要针对 H 型鳍片管束在顺列布置方式下,通过改变其结构参数,得到适合该结构的传热与流动准则关联式,但对错列布置的 H 型鳍片管束研究较少。而本文针对顺、错列不同布置下的 H 型鳍片管束进行数值研究,分析了不同参数对 Nu 和 Eu 的影响规律,拟合出适用于一定范围的准则关联式。

1 计算模型

1.1 物理模型与结构参数

H 型鳍片管束的物理模型如图 1 所示,根据模型对称性合理简化,在两种布置方式下所选的计算区域如图 2 所示。

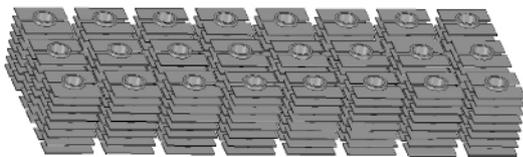


图 1 H 型鳍片管束

Fig. 1 H-type finned tube bank

1.2 控制方程与边界条件

由于控制方程与边界条件与换热管束的布置方

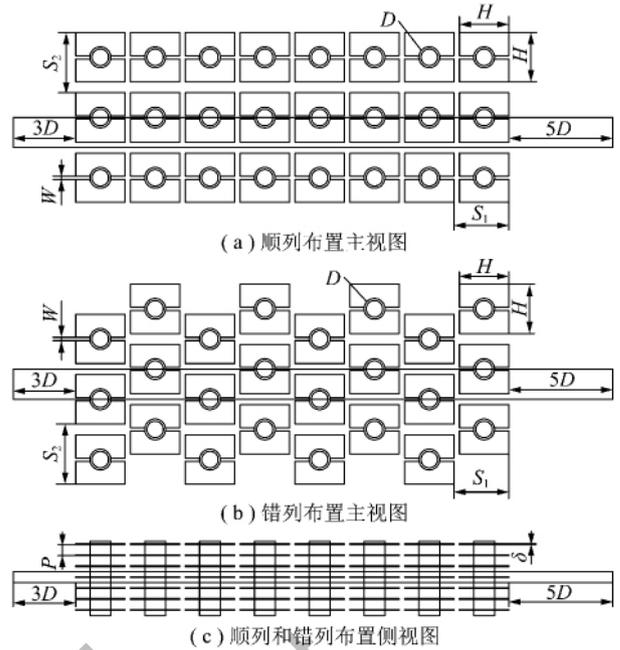


图 2 H 型鳍片管束两种布置下的结构参数与计算区域

Fig. 2 Structural parameters and calculation area of H-type finned tube bundles under two arrangements

式无关,不随管束布置方式的不同而发生改变。故在两种布置方式下均可假定过程为三维不可压缩、稳态、湍流模型,流体流动与传热应满足的控制方程括连续性方程、动量方程和能量方程分别如式(1)~(3)所示。

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

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \text{grad } p \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] + S_h \quad (3)$$

式中, $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$; k_{eff} 为有效传热系数, $k_{\text{eff}} = k + k_t$, 其中 k_t 为湍流传热系数; $\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right]$ 分别为导热项、组分扩散项和黏性耗散项; J_j 为组分 j 的扩散流量; S_h 为包括了化学反应热及自定义的体积热源项。

由文献[10]可知,在低 Re 数下,利用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对 H 型鳍片管进行模拟具有更好的计算精度,因此本文的计算模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,计算模型表示如下:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_i \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_i S^2 - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_p \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (5)$$

式中 μ_{eff} 为有效黏度, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, 其中 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$,

$$C_\mu = 0.0845; R \text{ 为应变率}, R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k$$

其中 $\eta = \frac{sk}{\varepsilon}$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$; $S^2 = 2S_{ij}$, 其中 $S_{ij} =$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \text{在 RNG } k-\varepsilon \text{ 模型中}, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} =$$

1.68。

数据处理过程中所用到的计算公式总结如下:

$$\Phi = c_p w A_f \rho_f (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{(T_{\text{out}} - T_w) - (T_{\text{in}} - T_w)}{\ln \left(\frac{T_{\text{out}} - T_w}{T_{\text{in}} - T_w} \right)} \quad (7)$$

$$h = \frac{\Phi}{A \Delta T} \quad (8)$$

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (9)$$

$$w' = \frac{w A_f}{A_{\text{min}}} \quad (10)$$

$$Re = \frac{w' D}{\nu} \quad (11)$$

$$Eu = \frac{2\Delta p}{\rho w'^2 N} \quad (12)$$

式中 w 为流体进口速度, m/s ; D 为基管直径, mm ; ν 为流体的运动黏度, m^2/s ; c_p 为流体定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; Φ 为鳍片管所吸收的热量, W ; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; A , A_f , A_{min} 分别为鳍片管换热总面积、计算区域入口面积、流通域内的最小截面积, m^2 ; T_{in} , T_{out} , T_w 分别为计算区域进、出口温度和鳍片管表面平均温度, K ; ΔT 为烟气与鳍片管外壁的对数平均温差; λ 为流体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Δp 为计算区域流体进出口压差, Pa ; w' 为最小截面处流体速度, m/s ; N 为纵向管排数; Re (雷诺数) 为表征黏性影响的相似准则数; Nu (努塞尔数) 反映了对流换热强烈程度, 是描述管束换热的准则数; Eu (欧拉数) 反映了流场压力降与其动压头之间的相对关系, 是描述管束流阻的准则数。

计算时为消除计算过程中的入口效应与出口效应, 将数值计算区域的入口段和出口段分别延长 $3D$ 和 $5D$, 如图 2 所示。计算过程中假设: 忽略鳍片与基管间的接触热阻; 基管内壁温度为恒定温度。在两种

布置方式下计算区域入口均为速度入口边界条件, 出口为压力出口边界条件, 其余 4 个面均为对称边界条件。动量方程与能量方程均采用二阶迎风差分格式, 收敛条件为连续性方程的相对残差小于 10^{-4} , 其余方程的相对残差小于 10^{-5} 。网格划分采用六面体结构, 根据计算精度的不同, 采取分块划分技术, 在进行网格独立性验证后, 最终确定最小网格尺寸为 0.5 mm 。其中湍流强度 I 由式 (13) 计算得出。

$$I = 0.16 (Re_{D_H})^{-1/8} \quad (13)$$

式中 Re_{D_H} 为以水力直径为特征长度求出的雷诺数。

2 结果分析

模拟计算中, 鳍片管基管外径与基管壁厚为固定值, 分别为 38 mm 和 4 mm 。根据模拟结果分析纵向管排数、流体进口速度、鳍片宽度、鳍片厚度、鳍片间距、鳍片间开缝宽度、纵向管间距与横向管间距等 8 个参数对鳍片管束在顺、错列两种布置方式下 Nu 和 Eu 的影响规律。

2.1 纵向管排数

图 3 为在两种布置方式下, 管束 Nu 随纵向管排数的变化情况。当鳍片管束顺列布置时, Nu 随纵向管排数的增加逐渐降低并趋于平缓, 当纵向管排数 ≥ 15 时, Nu 已基本保持不变。当鳍片管束错列布置时, Nu 随纵向管排数的增加呈现出波动状态, 并且波动程度逐渐降低, 当纵向管排数 ≥ 15 时, Nu 已基本保持不变。

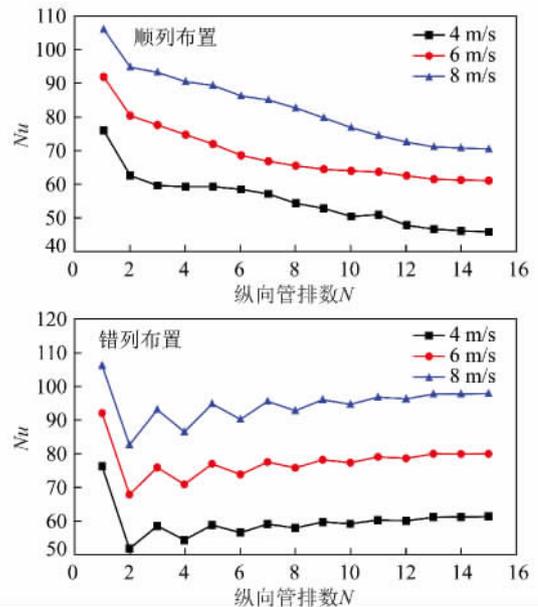


图 3 Nu 随纵向管排数的变化

Fig. 3 Variation of Nu with number of longitudinal tube rows

2.2 进口流速

图 4 为 Nu 与 Eu 随进口流速的变化情况。在两种

种布置方式下 Nu 均随进口流速的增加呈现出线性增长的趋势 Eu 均随进口流速的增加而降低并且降低幅度逐渐减小,若进口流速在较低的区间内变化, Eu 变化程度较大,主要是由于进口流速的增加使 Re 数逐渐增大 Nu 也随之增加,而 Eu 与进口流速的平方成反比,与压差成正比,进口流速较低时,压差变化范围较小 Eu 变化较大,随着进口流速的增加,压差变化逐渐变大 Eu 变化趋于平缓。

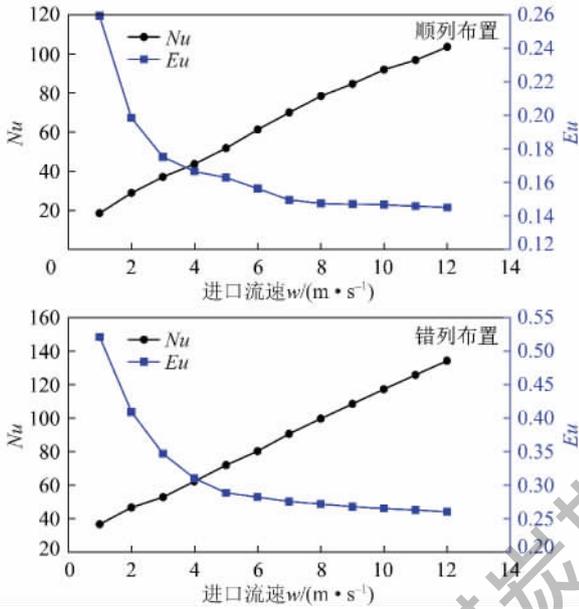


图 4 Nu 与 Eu 随进口流速的变化

Fig. 4 Variation of Nu and Eu with inlet velocity

2.3 鳍片宽度

图 5 为 Nu 与 Eu 随鳍片宽度的变化情况。在两种布置方式下, Nu 均随鳍片宽度的加大而降低, Eu 均随鳍片宽度的增加而加大,由于鳍片宽度的增加,鳍片边缘处的换热系数逐渐降低,使得整体 Nu 降低,而流体流动时的阻碍面积增加,使得 Eu 增加。同时在保持不同管排的鳍片间距离不变时,随着鳍片宽度的增加,流通域内最小截面处的流速降低, Re 数降低,进而也会使得 Nu 降低, Eu 增加。

2.4 鳍片厚度

Nu 与 Eu 随鳍片厚度的变化如图 6 所示。两种布置方式下 Nu 与 Eu 均随鳍片厚度的增加而增加,其主要原因是随着鳍片厚度的增加,鳍片管最小截面处的流速增加, Re 数增加,进而使得 Nu 与 Eu 增加,同时鳍片厚度的增加也使得流体流经鳍片区域收缩程度加大,扰流程度增加, Nu 与 Eu 增加。

2.5 鳍片间距

如图 7 所示,鳍片间距对 Nu 与 Eu 的影响与鳍片厚度相似,主要是影响鳍片区域的流速,进而影响 Nu 与 Eu 。两种布置方式下 Nu 与 Eu 均随鳍片间距

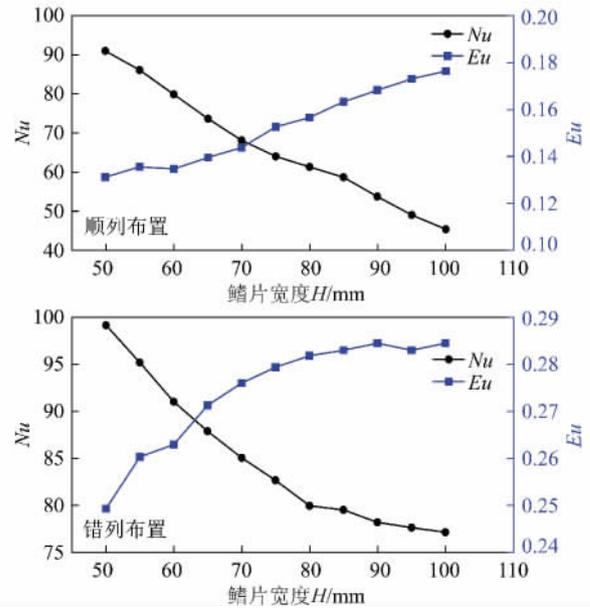


图 5 Nu 与 Eu 随鳍片宽度的变化

Fig. 5 Variation of Nu and Eu with fin width

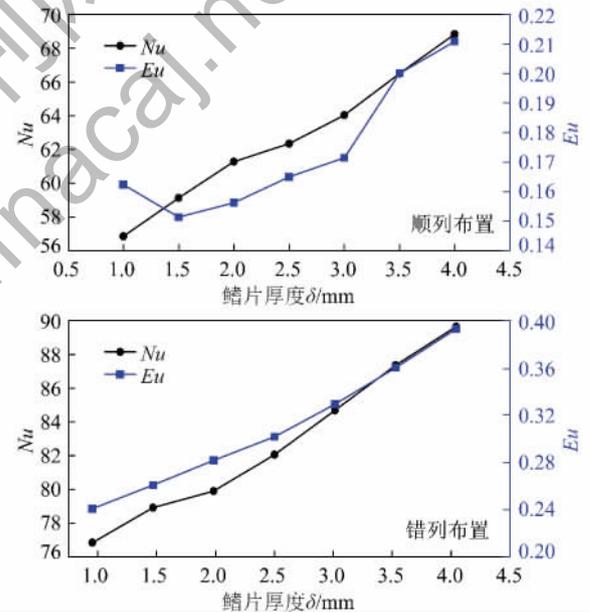


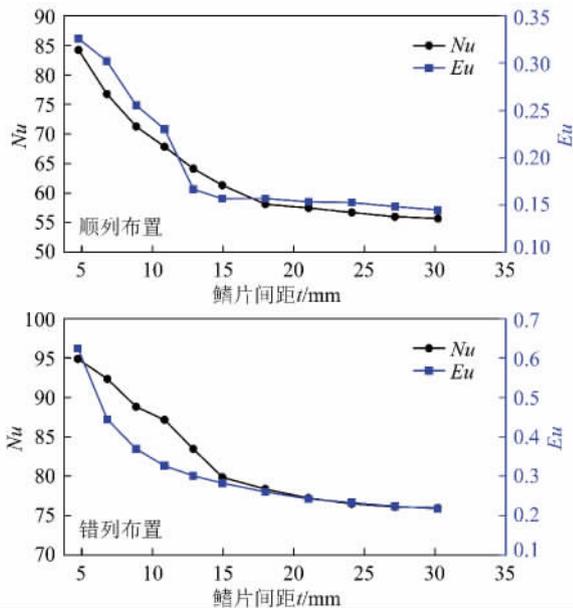
图 6 Nu 与 Eu 随鳍片厚度的变化

Fig. 6 Variation of Nu and Eu with fin thickness

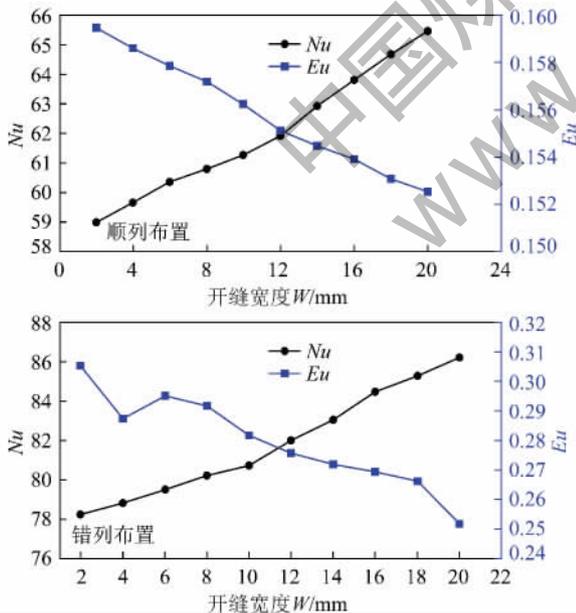
的增加而逐渐降低并趋于平缓,这主要是因为流通区域内的固体截面积不变,而当鳍片间距较小时,鳍片间距的变化对流通区域的最小截面积有较大影响,随着鳍片间距的增加其影响程度逐渐降低,即 Re 数随着鳍片间距的增加而降低,并且降低幅度逐渐减小,从而使得 Nu 与 Eu 呈现出先降低后逐渐趋于平缓的趋势。

2.6 开缝宽度

开缝宽度是影响 H 型鳍片管的重要参数,图 8 为 Nu 和 Eu 随开缝宽度的变化。 Nu 均随开缝宽度的增加而增加, Eu 均随开缝宽度的增加而降低。这

图7 Nu 与 Eu 随鳍片间距的变化Fig. 7 Variation of Nu and Eu with fin pitch

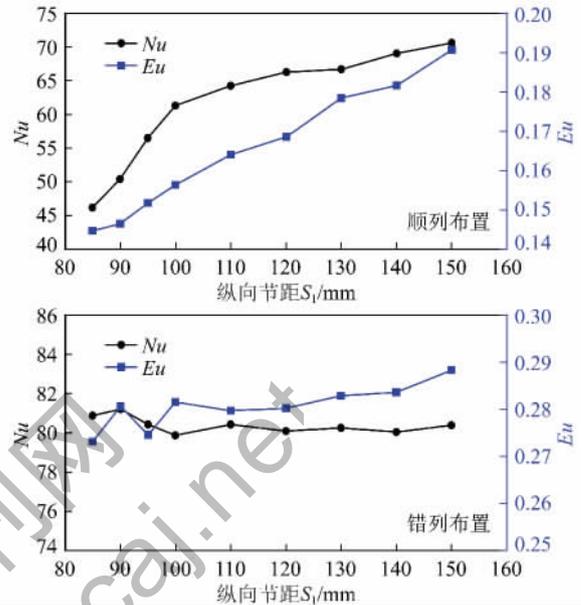
主要是因为开缝位于鳍片的传热恶化区域,随着开缝宽度的增加,鳍片中传热恶化区域渐渐缩小,使得整体 Nu 增加,但同时开缝宽度的增加也减少了鳍片的换热面积,使得换热量减小。随着开缝宽度的增加,鳍片开缝区域内的回流空间增大,减少了其阻力,同时开缝宽度增加也会降低流动的阻碍面积,进而使得 Eu 降低。

图8 Nu 与 Eu 随开缝宽度的变化Fig. 8 Variation of Nu and Eu with slit width

2.7 纵向节距

在两种布置方式下, Nu 与 Eu 随纵向节距的变化如图9所示。当鳍片管束顺列布置时, Nu 与 Eu 随纵向节距的增加逐渐增加,主要是由于随着纵向节距的

增加,管后的扰流区域增大,进而使得 Nu 与 Eu 增加。当鳍片管束错列布置时, Nu 与 Eu 随纵向节距的增加基本不变,主要是由于鳍片管在错列布置并且流体充分发展时,管后扰流受下一排管影响较小,因此随着纵向节距的增加, Nu 与 Eu 呈现出基本不变的趋势。

图9 Nu 与 Eu 随纵向节距的变化Fig. 9 Variation of Nu and Eu with longitudinal tube pitch

2.8 横向节距

Nu 与 Eu 随横向节距的变化如图10所示。在两种布置方式下, Nu 与 Eu 均随横向节距的增加而降低,这主要是因为随着横向节距的增加,鳍片管中流通域内的最小截面积增加,在进口流速不变的情况下,流通域内的最大流速降低, Re 数降低,进而使得 Nu 与 Eu 呈现降低的趋势。

3 关联式拟合

模拟中纵向管排数、进口流速、鳍片宽度、鳍片厚度、鳍片间距、开缝宽度、纵向节距与横向节距8个参数分别相互独立,因此H型鳍片管束传热与流动特性的无量纲关联式可写成:

$$Nu = PRe^{p_1} \left(\frac{H}{D}\right)^{p_2} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{p_3} \left(\frac{t}{D}\right)^{p_4} \left(\frac{W}{D}\right)^{p_5} \left(\frac{S_1}{D}\right)^{p_6} \left(\frac{S_2}{D}\right)^{p_7} \quad (14)$$

$$Eu = CRe^{c_1} \left(\frac{H}{D}\right)^{c_2} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{c_3} \left(\frac{t}{D}\right)^{c_4} \left(\frac{W}{D}\right)^{c_5} \left(\frac{S_1}{D}\right)^{c_6} \left(\frac{S_2}{D}\right)^{c_7} \quad (15)$$

基于上述模拟数据,采用多元线性回归方法对鳍片管束进行换热与流动关联式拟合,可得:

顺列布置:

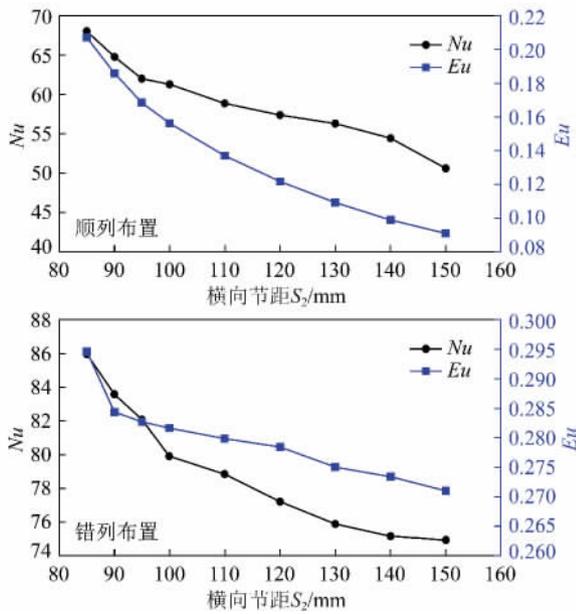


图 10 Nu 与 Eu 随横向节距的变化

Fig. 10 Variation of Nu and Eu with spanwise tube pitch

$$Nu = 0.1734 Re^{0.7026} \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.9332} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{0.1342} \times \left(\frac{t}{D}\right)^{-0.2452} \left(\frac{W}{D}\right)^{0.0408} \left(\frac{S_1}{D}\right)^{0.4902} \left(\frac{S_2}{D}\right)^{-0.4147} \quad (16)$$

$$Eu = 2.9375 Re^{-0.2152} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.5167} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{0.2152} \times \left(\frac{t}{D}\right)^{-0.5263} \left(\frac{W}{D}\right)^{-0.0103} \left(\frac{S_1}{D}\right)^{0.3803} \left(\frac{S_2}{D}\right)^{-1.4824} \quad (17)$$

错列布置:

$$Nu = 1.0410 Re^{0.5372} \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.3673} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{0.1045} \times \left(\frac{t}{D}\right)^{-0.1406} \left(\frac{W}{D}\right)^{0.0426} \left(\frac{S_1}{D}\right)^{-0.0591} \left(\frac{S_2}{D}\right)^{-0.2623} \quad (18)$$

$$Eu = 6.6003 Re^{-0.2829} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.2279} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{0.3582} \times \left(\frac{t}{D}\right)^{-0.5593} \left(\frac{W}{D}\right)^{-0.0625} \left(\frac{S_1}{D}\right)^{0.0078} \left(\frac{S_2}{D}\right)^{-0.1352} \quad (19)$$

关联式的适用范围: $Re = 2000 \sim 35000$; $H = 50 \sim 100$ mm; $\delta = 1 \sim 4$ mm; $t = 5 \sim 30$ mm; $W = 2 \sim 20$ mm; $S_1 = 85 \sim 150$ mm; $S_2 = 85 \sim 150$ mm; $N \geq 15$ 。为验证拟合公式的正确性,通过计算值与模拟值对比,所得结果如图 11 所示。

Nu 与 Eu 的计算值与模拟值偏差均在 10% 以内,证明该拟合公式在上述变化范围内具有良好的计算精度。

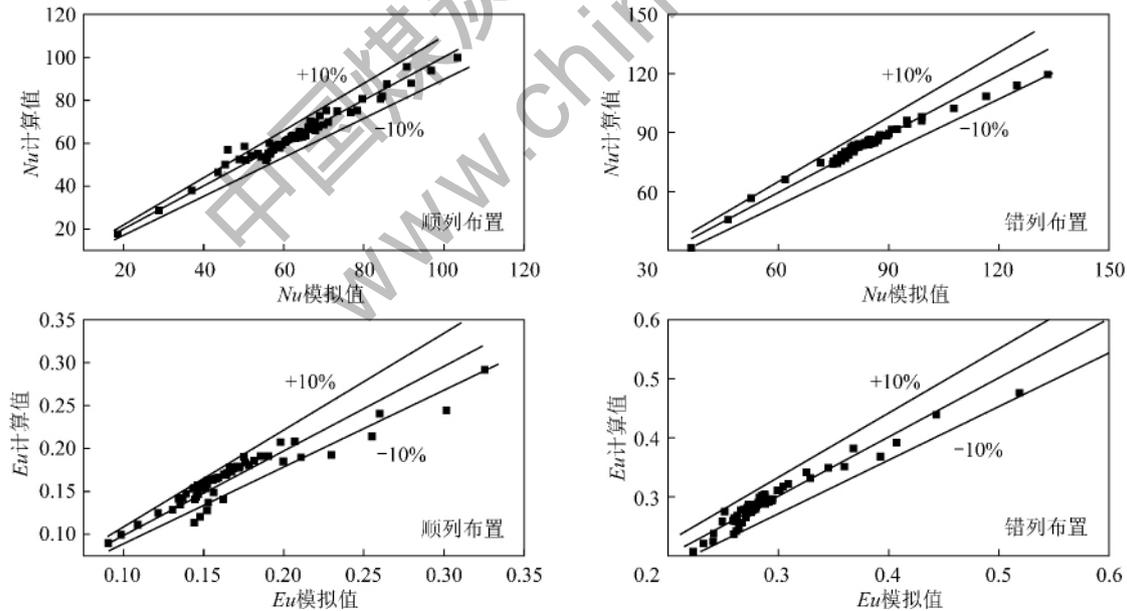


图 11 顺列和错列布置时模拟值与计算值对比

Fig. 11 Comparison between the simulation and calculation value under in-line arrangement and staggered arrangement of the tube bundles

4 结 论

(1) 当鳍片管束顺列布置时, Nu 与 Eu 随纵向管排数的增加逐渐降低并趋于平缓; 当鳍片管束错列布置时, Nu 随纵向管排数的增加呈现出波动状态, 且波

动程度逐渐降低, Eu 则随纵向管排数的增加逐渐降低并趋于平缓。

(2) 鳍片管束在顺、错列两种布置方式下, 进口流速、鳍片宽度、鳍片厚度、鳍片间距、鳍片间开缝宽度与横向节距对管束的 Nu 和 Eu 的影响相同; 管束

顺列布置时 Nu 和 Eu 随纵向节距的增加而增加,管束错列布置时 Nu 和 Eu 则随纵向节距的变化基本保持不变。

(3) 基于模拟数据,利用多元线性回归方法拟合出 H 型鳍片管束在顺列和错列两种布置方式下的 Nu 与 Eu 的关联式,该关联式在一定范围内具有良好的计算精度。

参考文献(References):

- [1] 张锦萍,李冬,张成,等.低温热提质褐煤的理化结构演化及燃烧特性[J].煤炭学报,2015,40(3):671-677.
Zhang Jinping, Li Dong, Zhang Cheng, et al. Physical/chemical structure evolution and combustion characteristics of mild thermally upgraded lignite[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 671-677.
- [2] 杜春涛,张进治,王若宾,等.矿井回风换热器换热性能影响因素的仿真及实验研究[J].煤炭学报,2014,39(5):897-902.
Du Chuntao, Zhang Jinzhi, Wang Ruobin, et al. Simulative and experimental study on impact factors on heat transfer performance of mine return air heat exchanger[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 897-902.
- [3] 赵斌,赵利杰,王庆功,等.H型鳍片管结构参数选取方法[J].化工学报,2015,66(12):4751-4757.
Zhao Bin, Zhao Lijie, Wang Qinggong, et al. Selection of structure parameters for H-finned tube[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015, 66(12): 4751-4757.
- [4] 高增丽,刘永启,高振强,等.基于煤矿乏风热氧化的填充床内置换热器取热特性[J].煤炭学报,2015,40(6):1402-1407.
Gao Zengli, Liu Yongqi, Gao Zhenqiang, et al. Heat extraction characteristic of packed bed embedded heat exchanger based on thermal oxidation of coal mine VAM[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1402-1407.
- [5] 刘聿拯,袁益超,徐世洋,等.H形鳍片管束传热与阻力特性实验研究[J].上海理工大学学报,2004,26(5):457-460.
Liu Yuzheng, Yuan Yichao, Xu Shiyang, et al. Flow and heat transfer analysis of fin-and-tube heat exchangers with side-mounted trapezium winglets[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(5): 457-460.
- [6] 杨大哲,黄新元,薛立志.H型鳍片管的传热与流动特性试验研究[J].锅炉制造,2008(6):14-17.
Yang Dazhe, Huang Xinyuan, Xue Lizhi. The experimental study on the characteristics of heat transfer and flow of H-type finned tube[J]. Boiler Manufacture, 2008(6): 14-17.
- [7] Heng Chen, Wang Yungang, Zhao Qinxin, et al. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of H-type finned tube banks[J]. Energies, 2013, 7(11): 7094-7104.
- [8] 吴新,商宇薇,王军龙,等.H型鳍片管束传热特性实验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(1):88-93.
Wu Xin, Shang Yuwei, Wang Junlong, et al. Experimental research heat transfer characteristics of H-type finned tube bundles[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(1): 88-93.
- [9] 张知翔,王云刚,赵钦新.H型鳍片管传热特性的数值模拟及验证[J].动力工程学报,2010,30(5):368-371,377.
Zhang Zhixiang, Wang Yungang, Zhao Qinxin. Numerical simulation and verification on heat transfer characteristics of H-type finned tubes[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(5): 368-371, 377.
- [10] 张知翔,王云刚,赵钦新.H型鳍片管性能优化的数值研究[J].动力工程学报,2010,30(12):941-946.
Zhang Zhixiang, Wang Yungang, Zhao Qinxin. Numerical study on performance optimization of H-type finned tubes[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 941-946.
- [11] Jin Yu, Tang Guihua, He Yaling, et al. Parametric study and field synergy principle analysis of H-type finned tube bank with 10 rows[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60(1): 241-251.