

三维肋管肋结构参数对流动传热特性的影响

贾金奎,张俊楠,廖强,丁玉栋

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:为了探究三维肋管肋结构参数对管外流动和传热特性的影响,采用控制变量法通过实验研究了热空气横掠三维肋管时,管外努塞尔数 Nu 与欧拉数 Eu 随肋结构参数的变化规律。与相同实验工况下的光管对比,分析了不同肋高、肋宽以及轴向间距对三维肋管综合传热性能的影响。结果表明:在一定流速范围内, Nu 随着肋高和肋宽的增加而增加,随着轴向间距的增加而减小;相同换热条件下,三维肋管综合性能评价指标(Performance Evaluation Criterion, PEC) 优于光管;且换热管的 PEC 随着肋高和肋宽的增加而增加,随着轴向间距的增加反而减小。

关键词: 传热;流动;湍流;三维肋管;肋结构参数

中图分类号:TK172 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.12.012

[引用本文格式] 贾金奎,张俊楠,廖强,等. 三维肋管肋结构参数对流动传热特性的影响[J]. 热能动力工程,2021,36(12): 75-80. JIA Jin-kui, ZHANG Jun-nan, LIAO Qiang, et al. Effects of fin structural parameters on the flow and heat transfer characteristics of three-dimensional finned tube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12): 75-80.

Effects of Fin Structural Parameters on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Three-dimensional Finned Tube

JIA Jin-kui, ZHANG Jun-nan, LIAO Qiang, DING Yu-dong

(Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030)

Abstract: In order to explore the effect of fin structural parameters of three-dimensional finned tube on the flow and heat transfer characteristics outside the tube, the controlled variable method was used to experimentally study the variation rule of Nusselt number (Nu) and Euler number (Eu) outside the tube with fin structural parameters when the hot air crosses the three-dimensional finned tube. Compared with the smooth tube under the same conditions, the effects of different fin heights, fin widths and axial fin pitches on the comprehensive heat transfer performance of three-dimensional finned tube were analyzed. The results show that within a certain velocity range, the Nu increases with the increase of fin height and fin width, but decreases with the increase of the axial fin pitch. The comprehensive performance evaluation criterion (PEC) of three-dimensional finned tubes is superior to the smooth tube under the same heat transfer conditions. And the PEC of heat transfer tube increases with the increase of fin height and fin width, but decreases with the increase of the axial fin pitch.

Key words: heat transfer, flow, turbulent flow, three-dimensional finned tube, fin structural parameters

收稿日期:2021-01-20; 修订日期:2021-01-20

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0601100)

Fund-supported Project: National Key Research and Development Project(2016YFB0601100)

作者简介:贾金奎(1996-),男,山西临汾人,重庆大学硕士研究生。

通讯作者:廖强(1963-),男,重庆人,重庆大学教授。

引言

换热器广泛地应用于冶金、化工、电力、轻工业、动力及空调等领域^[1]。由于气相介质热容小,气侧传热系数低,导致气-液换热过程中气侧热阻约占总热阻的90%^[2]。为设计出结构紧凑、换热效率高且成本较低的换热器,越来越多的学者针对气侧无源强化换热技术开展研究^[3-4],如在气侧换热表面加翅片或肋片,强化流体扰动以及增加换热面积等。常见的翅片和肋片形式有平板翅片^[5-6]、螺旋翅片^[7-8]、H型翅片^[9-10]、环形肋、直肋和针肋等。近年来,通过刻切方式在管壁表面形成离散的三维肋,构成的三维肋管成为一种新型高效的换热元件。

Huang 等人^[11]实验研究了不同形状针肋管的传热性能,结果表明,滴状针肋存在流线型的结构,对流动换热有显著影响。葛铭等人^[12]和何春霞等人^[13]研究了叉排三维肋管的流动传热特性,得到了不同工况下三维外肋管流动传热特性的经验关联式。Zhang 等人^[14]研究了三维肋管肋高、肋宽、轴向间距以及周向间距结构参数对三维肋管流动传热特性影响的占比。赵偲妍等人^[15]通过数值模拟研究了三维肋管肋高、轴向间距以及肋片厚度对流动传热特性的影响,结果表明,在特定的模拟工况范围内,增加肋片高度和减小肋片轴向间距可以有效提升三维肋管的传热性能。Chen 等人^[16]实验研究了三维肋管管束的流动传热特性,结果表明,三维肋管表面的离散肋片使管壁周围温度分布趋于均匀,减小了管壁与热空气之间的温差,因此三维肋管管束有良好的传热特性。

三维肋管能提高换热器的换热效率,并且离散的三维肋结构参数对换热管流动传热性能的影响十分显著。因此,本文对热空气横掠三维肋管的单管进行了实验,研究三维肋管肋高、肋宽以及轴向间距对流动传热的影响,拟合出三维肋管管外流动传热经验关联式。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

为了研究三维肋管不同肋结构参数对流动传热特性的影响规律,搭建了图1所示的三维肋管流动

传热特性实验系统。实验系统主要由变频风机、电加热器、恒温水箱和三维肋管换热器等设备组成。空气被风机鼓入管道中,电加热器加热至实验工况,经过渐扩的管道及整流栅后,形成流向平直且流速稳定的热空气。热空气横掠三维肋管进行对流传热。实验段前后采用引压管连接压差变送器,三维肋管进出口处采用热电阻来测量冷却水进出口温度。为了减小实验过程中的热损失,风道与测试部分均用保温棉覆盖进行隔热处理。

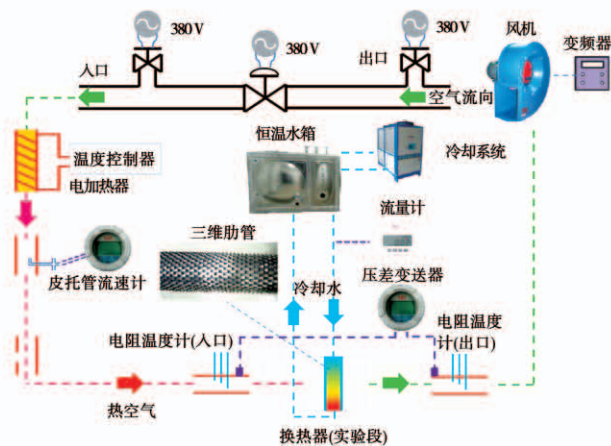


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

1.2 实验设置

实验中,采用基管外径为40 mm,壁厚为3 mm的三维肋管,管壁表面的三维肋以叉排方式布置,如图2所示。肋高、肋宽以及轴向间距设置如表1所示。实验过程中空气流速分别为2.9,4.3,5.8和7.2 m/s。



图2 三维肋管示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-dimensional finned tube

表 1 三维肋管肋结构实验参数

Tab.1 Structural parameters of three-dimensional finned tube

肋高 H/mm	肋宽 W/mm	轴向间距 P_t/mm
1.5	1.0	1.5
3.0	2.0	3.0
4.5	3.0	3.0
6.0	4.0x	6.0

1.3 数据处理及误差分析

雷诺数 Re 表示三维肋管管外空气流动状态;努塞尔数 Nu 表示三维肋管对流传热强度,将其作为三维肋管强化传热性能的定量指标;欧拉数 Eu 表示空气横掠三维肋管后动量传递特征数,将其作为压降损失的定量指标。三维肋管的换热量计算:

$$Q = mc_p(T_{out,water} - T_{in,water}) \quad (1)$$

三维肋管管外的对流传热系数计算:

$$h = \frac{Q}{A\Delta T} \quad (2)$$

阻力系数 Eu 计算式:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho u_{max}^2} \quad (3)$$

利用 PEC 定量评价三维肋管的综合强化传热性能:

$$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(Eu/Eu_0)^{1/3}} \quad (4)$$

式中: Q —换热管内冷却水所获得的热量, J/s; $T_{in,water}$ —换热管进口冷却水温度, K; $T_{out,water}$ —换热管出口冷却水温度, K; h —管外平均对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; ΔT —空气和管壁之间的平均温差, K; A —基管外表面积, m^2 ; Δp —实验段进出口之间的静压差, Pa; u_{max} —空气流过换热器中最小截面处的流速, m/s; m —管内水的质量流量, kg/s; c_p —水的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; ρ —水的密度, kg/m^3 ; Nu_0 —光管的努塞尔数; Eu_0 —光管的欧拉数。

实验前所有的测量仪器都经过校准,实验中测量得到的数据使用 Moffat^[17] 推荐的不确定度分析方法处理,见式(5)~式(8)。实验获得的 Nu 和 Eu 的最大不确定度分别为 $\pm 3.50\%$ 和 $\pm 2.4\%$ 。

$$\Delta Q = [(\frac{\partial Q}{\partial m}\Delta m)^2 + (\frac{\partial Q}{\partial c_p}\Delta c_p)^2 + (\frac{\partial Q}{\partial T_{out,water}}\Delta T_{out,water})^2 + (\frac{\partial Q}{\partial T_{in,water}}\Delta T_{in,water})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\Delta h = [(\frac{\partial h}{\partial Q}\Delta Q)^2 + (\frac{\partial h}{\partial A}\Delta A)^2 + (\frac{\partial h}{\partial T_{ave,air}}\Delta T_{ave,air})^2 + (\frac{\partial h}{\partial T_{ave,wall}}\Delta T_{ave,wall})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\Delta Nu = [(\frac{\partial Nu}{\partial u}\Delta h)^2 + (\frac{\partial Nu}{\partial D}\Delta D)^2 + (\frac{\partial Nu}{\partial \lambda}\Delta \lambda)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\Delta Eu = [(\frac{\partial Eu}{\partial (\Delta p)}\Delta (\Delta p))^2 + (\frac{\partial Eu}{\partial u}\Delta u)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中: $T_{ave,air}$ —空气进出口平均温度, K; $T_{ave,wall}$ —换热管壁面平均温度, K; D —基管外径, m; ΔD —基管外径的不确定度; Δh —传热系数的不确定度; ΔQ —传热量的不确定度; λ —流体导热系数, $W/(m \cdot K)$; Δu —流体速度的不确定度; ΔNu —三维肋管努塞尔数的不确定度; ΔEu —三维肋管欧拉数的不确定度。

为了验证三维肋管传热特性实验数据的准确性,对实验装置进行可靠性测试。首先测试外径为 40 mm 的光管的传热特性,将实验结果与 Žukauskas 关联式进行比较,如图 3 所示。由图可知,实验的 Nu 和经验关联式的 Nu 最大误差为 $\pm 6.8\%$,这说明实验系统是可靠的。

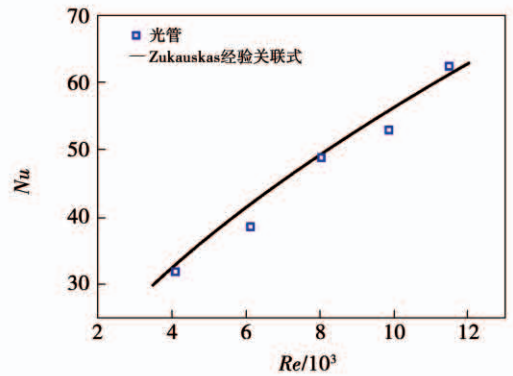


图 3 实验系统可靠性验证

Fig.3 Experimental system reliability verification

2 实验结果及分析

在实验过程中热空气横掠换热管,实验设置的 Re 在 4 000 ~ 10 000 范围内,风道中空气处于湍流流动状态,而换热管管外边界层属于层流流动状态。因此,流体边界层能在基管表面自由发展,直到流体脱离壁面。换热管周围较厚的热边界层阻碍了热量的传递。三维肋管的离散肋片可以扰动流场,破坏热边界层的发展,降低传热阻力从而改善传热性能。

同时,改变三维肋管表面肋片的结构参数,换热面积也会发生变化,进而影响三维肋管的传热性能。

2.1 肋高对流动传热特性的影响

图4给出不同肋高下三维肋管的流动传热特性。

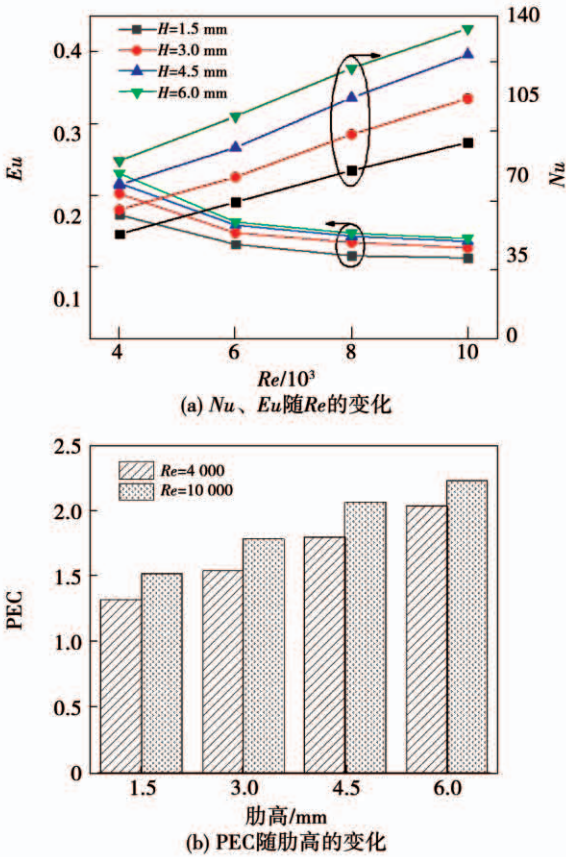


图4 不同肋高下三维肋管的流动传热特性

Fig.4 Flow and heat transfer characteristics of three-dimensional finned tubes with different finned heights

由图4可知,随着肋高的增加,三维肋管的 Nu 数不断增加, Eu 数不断减小,PEC不断增加。以雷诺数为4000和10000工况为例,三维肋管的PEC均大于1,说明实验所用肋管的综合传热性能强于光管。三维肋管肋高对流动传热性能的影响最为显著。造成这一现象的主要原因:一方面是肋高增加,传热面积大大增加;另一方面是三维肋管肋片可以扰动流场并且打断边界层的发展。流体横掠肋片之后会形成回流、漩涡以及涡束。肋高越高,对流体的扰动越强,肋管表面的传热系数提高。然而,肋片高度的增加使得流体与固体壁面之间的摩擦增加,动

能损失较大,增加了流动阻力。

2.2 肋宽对流动传热特性的影响

不同肋宽参数三维肋管流动及传热规律如图5所示。

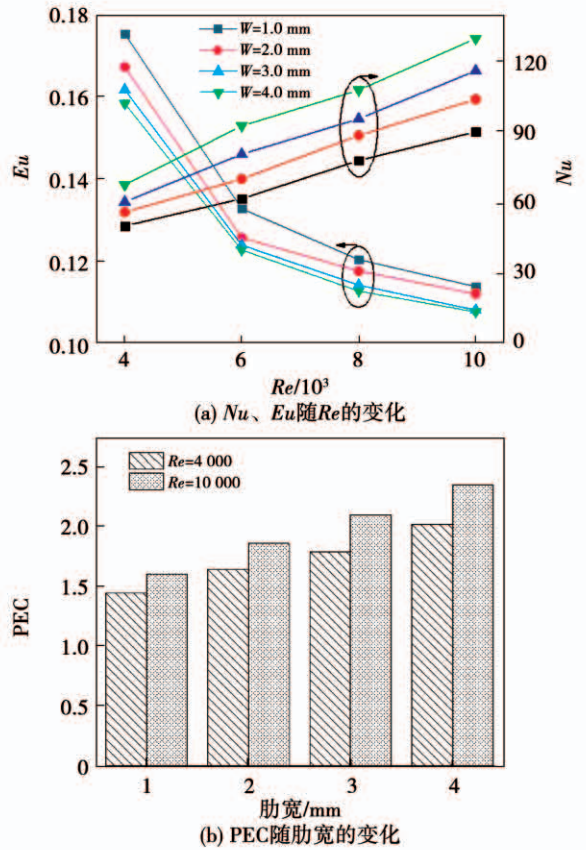


图5 不同肋宽下三维肋管的流动传热特性

Fig.5 Flow and heat transfer characteristics of three-dimensional finned tubes with different finned widths

Re 为4000时, Nu 随着肋宽增加变化较小;而 Re 为6000~10000时, Nu 随着肋宽增加变化较大。以雷诺数为4000和10000为例,三维肋管的综合传热性能PEC随着肋宽的增加而增加。当热空气横掠三维肋管时,气体的流动方向与肋片表面平行,肋宽较小时周向肋片的个数增加,扰流源变多,流体流经肋片间的狭缝形成的回流增加,增加了摩擦损失。随着肋宽的增加,三维肋管逐渐接近于圆环肋管,肋片间的二次扰流减小,压降减小。较小的肋宽可以增加气体的扰动,起到强化传热的作用。但是,从传热性能的角度看,肋宽为4.0mm的三维肋管传热性能最强。结果表明,肋宽的增加导

致肋管传热性能增强的主要因素是换热面积的增加。

2.3 轴向间距对流动传热特性的影响

图 6 给出不同轴向间距下三维肋管的流动传热特性。随着轴向间距的减小,三维肋管的 Nu 和 Eu 逐渐增加。

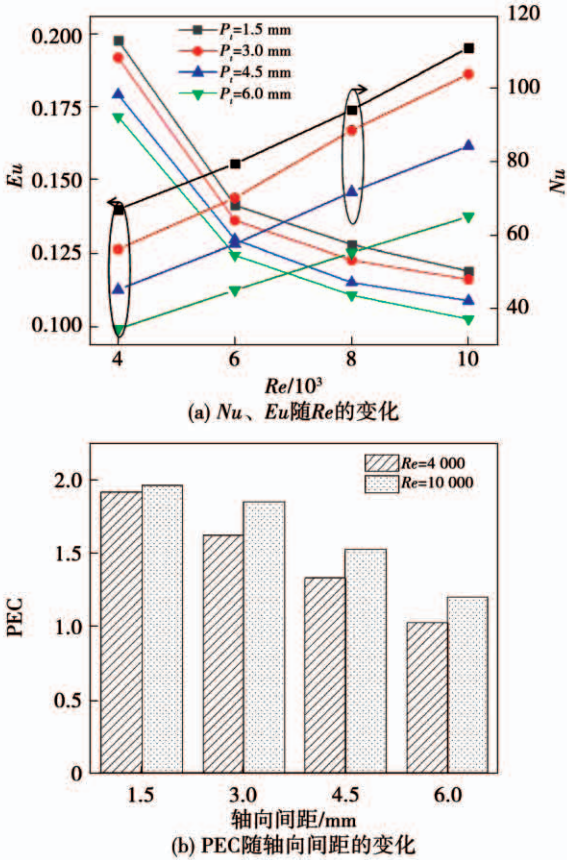


图 6 不同轴向间距下三维肋管的流动传热特性

Fig. 6 Flow and heat transfer characteristics of three-dimensional finned tubes with different axial spacings

从图 6(a) 中看出,轴向间距从 6.0 mm 减小至 1.5 mm 时, ΔNu 和 ΔEu 增加速率慢慢减小。从图 6(b) 中看出,轴向间距为 6.0 mm 时, PEC 略大于 1, 三维肋管的综合传热性能与光管相差较小。此时, 三维肋管在流动传热方面没有显著的优势。而三维肋管的综合传热性能 PEC 随着轴向间距的减小而增加。轴向间距减小, 空气在肋片狭缝之间的流速增加, 在肋片与基管表面的扰动变强的同时动能损失相应增加。三维肋管轴向间距较小时, 三维肋管表面肋片越密集换热面积越大, 此时传热性能得到

提升。然而换热面积的增加意味着流体与肋片的接触面积增加, 摩擦损失增大, 流体压降增加。随着轴向间距进一步减小, 过于密集的轴向间距还会阻碍流体横掠肋片之后二次流的产生, 进而削弱了三维肋管强化传热的作用。从换热管的综合传热性能来看, 在实验参数范围内随着轴向间距的减小, 三维肋管综合传热性能逐渐增强。

2.4 三维肋管换热管经验关联式

基于三维肋管换热管的实验数据, 通过多元线性回归方法, 拟合出肋高 H 、肋宽 W 以及轴向间距 P_t 对三维肋管换热管流动传热性能影响的经验关联式:

$$Nu = 0.4065 Re^{0.66461} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0.36497} \cdot \left(\frac{W}{D}\right)^{0.25588} \cdot \left(\frac{P_t}{D}\right)^{-0.425} \quad (9)$$

$$Eu = 11.6031 Re^{0.48318} \left(\frac{H}{D}\right)^{0.20249} \cdot \left(\frac{W}{D}\right)^{-0.0205} \cdot \left(\frac{P_t}{D}\right)^{-0.1091} \quad (10)$$

使用限制条件为: 三维肋管肋结构为叉排, 管外 Re 在 4 000 ~ 12 000 范围内, 换热管肋高 H/D 在 0.037 5 ~ 0.15 范围内, 肋宽 W/D 在 0.025 ~ 0.1 范围内, 轴向间距 P_t/D 为 0.037 5 ~ 0.15。此外, 将拟合出的经验关联式的经验值与实验值进行对比, 三维肋管换热管 Nu 和 Eu 的经验值和实验值偏差分别为 $\pm 20.3\%$ 。

3 结 论

以三维肋管肋高、肋宽以及轴向间距为主要研究对象, 通过三维肋管性能测试实验台, 探究了三维肋管肋结构参数对传热性能以及流动阻力的影响规律, 揭示了三维肋管传热性能提升的原因。结论如下:

(1) 通过三维外肋管的流动传热实验, 得出在实验给出的工况范围内, 三维外肋管的 Nu 数值是光管的 1.1 ~ 2.5 倍, Eu 是光管的 1.06 ~ 1.68 倍, 三维肋管的 PEC 均大于 1。

(2) 肋高不仅可以破坏边界层扰动流场, 而且相应的增加了对流传热面积。因此, 肋高对 PEC 的

影响最为显著。肋宽变化一定程度上扰动了流场,但是三维肋管传热性能提升的主要因素是换热面积的增加。适当的轴向间距既可强化流体的扰动,还可以增加换热面积,改善三维肋管的传热性能。

(3) 在实验条件范围内拟合了三维肋管管外对流换热经验关联式,其 Nu 和 Eu 的经验值和实验值偏差分别为 $\pm 20.3\%$ 和 $\pm 13\%$ 。

参考文献:

- [1] ALAM T, KIM M H. A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81 (1): 813 - 839.
- [2] HAN Hui, HE Ya-ling, Li Yin-shi, et al. A numerical study on compact enhanced fin-and-tube heat exchangers with oval and circular tube configurations [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 65(5): 686 - 695.
- [3] NAGARANI N, MAYILSAM Y K, MURUGESAN A, et al. Review of utilization of extended surfaces in heat transfer problems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29 (1): 604 - 613.
- [4] LIEBENBERG L, MEYER J P. In-tube passive heat transfer enhancement in the process industry [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(16): 2713 - 2726.
- [5] CHINGULPITAK S, AHN H S, ASIRVATHAM L G, et al. Fluid flow and heat transfer characteristics of heat sinks with laterally perforated plate fins [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 138(8): 293 - 303.
- [6] PIS'MENNYI E N. Regularities of flow and heat transfer at the surface of transversely finned tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(19/20): 5016 - 5031.
- [7] KUNTYSH V B, SUKHOTSKII A B, FARAFONTOV V N, et al. Experimental study of heat exchange and aerodynamic and thermal contact resistance of staggered bundles of tubes with spiral rolled fins of air-cooled devices [J]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, 55(36): 22 - 32.
- [8] WANG Wei, ZHANG Ya-ning, LIU Jian, et al. Large eddy simulation of turbulent flow and heat transfer in outward transverse and helically corrugated tubes [J]. *Numerical Heat Transfer Applications, Part A: Applications*, 2019, 75(7): 456 - 468.
- [9] CHEN Heng, WANG Yun-gang, ZHAO Qin-xin, et al. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of H-type finned tube banks [J]. *Energies*, 2014, 7 (11): 7094 - 7104.
- [10] BHALE P, KAUSHIK M, LIAW J S, et al. Airside performance of H-type finned tube banks with surface modifications [J]. *Energies*, 2019, 12(4): 1 - 16.
- [11] HUANG Liang, LI Qing-ling, ZHAI Hong-yan. Experimental study of heat transfer performance of a tube with different shaped pin fins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129 (17): 1325 - 1332.
- [12] 葛 铭, 赵利杰, 戴维葆, 等. 叉排三维外肋管的传热特性 [J]. *化工学报*, 2017, 68(10): 3733 - 3738.
GE Ming, Zhao Li-jie, DAI Wei-bao, et al. Heat transfer of staggered three-dimensional externally finned tube [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(10): 3733 - 3738.
- [13] 何春霞, 王厚华, 廖光亚, 等. 三维外肋管的自然对流换热特性的实验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2003, 25 (3): 59 - 62.
HE Chun-xia, WANG Hou-hua, LIAO Guang-ya, et al. Experiment reasearch on heat transfer of extarnal three-dimensional finned tube in free convection [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2003, 25(3): 59 - 62.
- [14] ZHANG Jun-nan, CHENG Min, DING Yu-dong, et al. Influence of geometric parameters on the gas-side heat transfer and pressure drop characteristics of three-dimensional finned tube [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2019, 133 (4): 192 - 202.
- [15] 赵偲妍, 李 静, 许居武, 等. 三维矩形外肋管流动传热特性数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(4): 907 - 915.
ZHAO Si-yan, LI Jing, XU Ju-wu, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer of air flowing across 3D rectangular finned tube [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40 (4): 907 - 915.
- [16] CHEN Zi-yong, CHENG Min, LIAO Qiang, et al. Experimental investigation on the air-side flow and heat transfer characteristics of 3 - D finned tube bundle [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131(3): 506 - 516.
- [17] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1 (1): 3 - 17.

(刘 颖 编辑)