

H 型翅片椭圆管束传热与阻力特性的实验研究

杨子江,袁益超,孔德满,李 猛

(上海理工大学 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室,上海 200093)

摘 要:对 H 型翅片椭圆管束的管外侧传热与阻力特性进行了模化实验研究,得到了 H 型翅片椭圆管束的管外侧传热与阻力特性变化规律,分析了横向管间距 s_1 与纵向管间距 s_2 对 H 型翅片椭圆管束传热与阻力特性的影响。研究表明:在研究范围内,随着 s_1 的增大,管外侧传热性能变差、阻力减小;随着 s_2 的增大,管外侧传热性能明显变差,阻力明显减小;且纵向管间距 s_2 对传热与阻力性能的影响比横向管间距 s_1 更明显。

关 键 词:H 型翅片;椭圆管;传热特性;阻力特性;实验

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.03.021

[引用本文格式]杨子江,袁益超,孔德满,等. H 型翅片椭圆管束传热与阻力特性的实验研究[J]. 热能动力工程,2020,35(3):145-150. YANG Zi-jiang, YUAN Yi-chao, KONG De-man, et al. Experimental tests on heat transfer and resistance characteristics of h-type finned elliptical tubes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 145-150.

Experimental Tests on Heat Transfer and Resistance Characteristics of H-type Finned Elliptical Tubes

YANG Zi-jiang, YUAN Yi-chao, KONG De-man, LI Meng

(Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: Experimental tests were performed to study the heat transfer and resistance characteristics at the outer surface of H-type finned elliptical tube banks, and the variation laws and correlations of external heat transfer and resistance were obtained. The effects of transverse tube pitch (s_1) and longitudinal tube pitch (s_2) on the heat transfer and resistance performance of H-type finned elliptical tube banks were investigated. It is found that the heat transfer performance is reduced, and the flow resistance is decreased, as s_1 increases. The heat transfer performance is reduced significantly, and the flow resistance is decreased significantly, as s_2 increases. Furthermore, the effect of longitudinal tube spacing s_2 on heat transfer and resistance performance is more evident, compared with the transverse tube spacing s_1 .

Key words: H-type fin, elliptical tube, heat transfer characteristic, resistance characteristic, experimental test

引 言

H 型翅片管是一种典型的管翅式传热元件,在大型电站锅炉省煤器中得到了广泛的应用^[1]。其管束的管外侧传热与阻力性能一直被许多学者所关

注,对于基管为圆管的 H 型翅片管,国内外学者对其进行了大量的试验与数值模拟,为学术界积累并提供了丰硕的理论成果。刘聿拯等人^[2]对一定结构的纵向 10 排 H 型翅片管进行了试验研究,得到了其管束的管外侧传热与阻力特性试验准则式;葛铭等人^[3]试验测定了 ND 钢和 316L 不锈钢双 H 型

翅片管的传热系数,发现接触热阻对 316L 不锈钢试件的传热系数影响较为明显,对 ND 钢试件的传热系数影响很小;吴艳艳等人^[4]通过数值研究发现,在顺列和错列这两种布置方式下,横向管间距对 H 型翅片管的管外侧传热和阻力特性的影响都明显大于纵向管间距的影响;张知翔等人^[5]在对 H 型翅片管的数值模拟优化中,总结出当横向相对管间距 s_1/d 为 2.237 时,翅片管的综合性能最好;Yu Jin 等人^[6]的研究结果表明,在 7 个结构参数(管排数、翅片厚度、开缝宽度、翅片高度、翅片节距、横向管间距和纵向管间距)中,横向管间距影响最大,开缝宽度影响最小。

当 H 型翅片管采用椭圆形基管时,得利于椭圆管固有的流线型外形,有着比圆管结构更好的传热与阻力性能。李飞等人^[7]对 H 型翅片椭圆管进行含尘烟气条件下的热态试验研究,发现顺列布置时,积灰对其管外侧传热特性与阻力特性的影响均小于错列布置,尤其在低雷诺数区域,顺列布置时积灰造成的 Nu 减少值只有错列布置时减少值的 50%;韩筱等人^[8]比较分析了 H 型翅片椭圆管的横、纵开缝方式对其传热与阻力特性的影响,研究表明,与纵开缝方式相比,当翅片管采用横开缝方式时,其传热与阻力性能更好。

相比于 H 型翅片圆管,目前对 H 型翅片椭圆管的相关研究才刚刚起步,研究成果相对较少。另外,管间距、翅片节距、翅片宽度和翅片高度等结构参数是各种翅片管束的管外侧传热与阻力性能的影响因素,但由于不同学者采用的翅片管束结构、试验工况存在差异,许多研究结论之间存在一定差异。

基于上述背景,本文采用模化实验方法研究特定结构的 H 型翅片椭圆管束,得到其管外侧传热与阻力特性的试验准则式,并实验研究横向管间距 s_1 与纵向管间距 s_2 对 H 型翅片椭圆管束传热与阻力特性的影响。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

采用的实验系统为闭式循环设计,如图 1 所示。来自风机的空气沿风道流至电加热器,经电加热器加热后进入实验模型段,横向冲刷 4×6 排顺列布置的 H 型翅片椭圆管束,被管束内冷却水冷却后进入

喷嘴流量箱,最后回到风机完成循环。

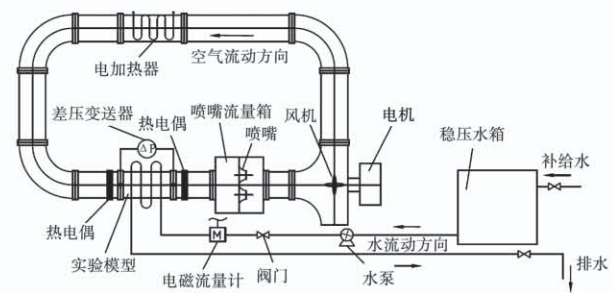


图 1 模化实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental test system

选用椭圆基管长、短轴比为 5:36 的经典椭圆管型,以及翅片宽度 w 与高度 h 相等($w = h = 80\text{ mm}$)的正方形翅片,并以此组合的翅片管作为研究对象,实验管束的结构参数及其管束布置方式如表 1 和图 2 所示。

表 1 实验管束的结构参数

Tab. 1 Geometric parameters of elliptical tube banks

参数/mm	数值
管外侧长半轴 a	20
管外侧短半轴 b	12
基管壁厚 δ	3
翅片高度 h	80
翅片宽度 w	80
翅片厚度 t	2.5
翅片开缝宽度 s	10
翅片节距 f	20
横向管间距 s_1	90
纵向管间距 s_2	100

实验时,通过变频电机调控风机转速来调节迎面风速,采集各实验工况稳定时的进、出口水温、水流量,进、出口风温、风流量以及管束进出口压差。其中,进、出口水温测量采用精度为 A 级的 Pt100 铂电阻,水流量测量采用精度为 0.2 级的 AXF040G 型电磁流量计,风流量测量采用喷嘴流量箱,进、出口风温测量采用经标定的铜-康铜热电偶,实验管束进出口压差测量采用精度为 0.2 级的 EJA120 型差压变送器。

另外,实验模型段包覆以保温玻璃棉作为保温层。

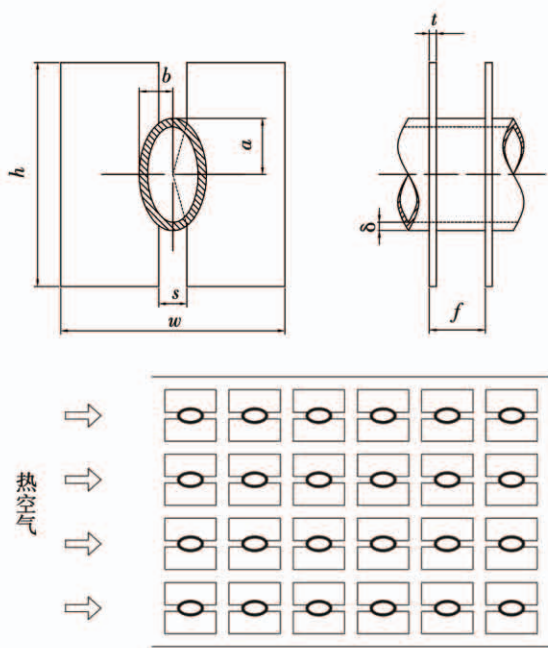


图2 椭圆管及其布置方式

Fig.2 Testing arrangement mode for elliptical tubes

1.2 数据处理方法

1.2.1 传热特性

管外空气的雷诺数为:

$$Re_a = \frac{u_m d_o}{\nu_a} \quad (1)$$

式中: u_m —最小流通截面空气流速, m/s; ν_a —基于平均温度下空气的运动粘度, m^2/s ; d_o —椭圆基管外侧短轴长度, m。

实验采用新制的洁净管子, 可忽略污垢热阻, 管外侧平均对流传热系数 α_1 为:

$$\alpha_1 = \left[\left(\frac{1}{KA_1} - \frac{\delta}{\lambda_t A_t} - \frac{1}{\alpha_2 A_2} \right) (A_t \eta_t + A_b) \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: A_1 —翅片管外侧全表面积, m^2 ; A_2 —基管内壁表面积, m^2 ; A_t —基管内外壁平均表面积, m^2 ; A_f —翅片表面积, m^2 ; A_b —基管外壁无翅片部分面积, m^2 ; δ —基管壁厚, m; λ_t —管壁导热系数, $W/(m \cdot K)$; η_t —翅片效率, 采用矩形翅片的翅片效率计算方法给出。

以管外侧全表面积为基准的总传热系数 K , 按传热方程式确定:

$$K = \frac{Q_w}{A_1 \Delta T} \quad (3)$$

式中: Q_w —总传热量, W; ΔT —按逆流布置方式计算的对数平均温差, K。

管内水侧的平均对流传热系数:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_w \lambda_w}{d_i} \quad (4)$$

式中: λ_w —基于平均温度下水的导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_i —椭圆管当量内径; 管内水侧的 Nu_w 通过迪图斯—贝尔特公式^[9]确定。

最终, H型翅片椭圆管束的管外侧传热特性采用无量纲准则数 Nu 评价:

$$Nu_a = \frac{\alpha_1 d_o}{\lambda_a} \quad (5)$$

式中: λ_a —平均温度下空气的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

1.2.2 阻力特性

H型翅片椭圆管束的管外侧阻力特性采用无量纲准则数 Eu 评价, 即:

$$Eu_a = \frac{\Delta P_m}{N \rho_a u_m^2} \quad (6)$$

式中: ρ_a —平均温度下空气的密度, kg/m^3 ; N —纵向管排数; ΔP_m —实验管束进出口压差, Pa。

2 实验结果与分析

2.1 模化实验数据

通过上述实验和数据处理过程后, 整理得到纵向6排、顺列布置的H型翅片椭圆管束的管外侧传热与阻力特性的实验值如图3所示。

从图3(a)可看出, 就传热特性而言, Re_a 越大, Nu_a 越大, 即空气流速的增大使得管外侧对流换热性能增强。这是因为, 空气流速增大, 使得空气经过试件换热表面时的扰动增强, 空气对翅片管束的冲刷更加充分, 减薄了流动与换热边界层, 试件换热性能显著提高。

从图3(b)可看出, 就阻力特性而言, Re_a 越大, Eu_a 越小, 即空气流速的增大使得管外侧流动阻力与惯性力的比值减小。这主要是因为惯性力与速度的平方成正比, 随着空气流速增大, 惯性力迅速增大, 其增幅远超于管外侧阻力的增幅, 故 Eu_a 减小。

2.2 模化实验准则式

将 Re_a 、 Nu_a 、 Eu_a 分别取自然对数, 分别拟合 $\ln Nu_a$ 与 $\ln Re_a$ 以及 $\ln Eu_a$ 与 $\ln Re_a$ 之间的直线关系式^[10], 并进一步整理得到H型翅片椭圆管束的管

外侧传热与阻力特性的实验准则式:

$$Nu_a = 0.124\,02Re_a^{0.681\,8}Pr^{1/3} \tag{7}$$

$$Eu_a = 1.781\,93Re_a^{-0.297\,4} \tag{8}$$

其中, Re 适用范围 5 500 ~ 16 000。

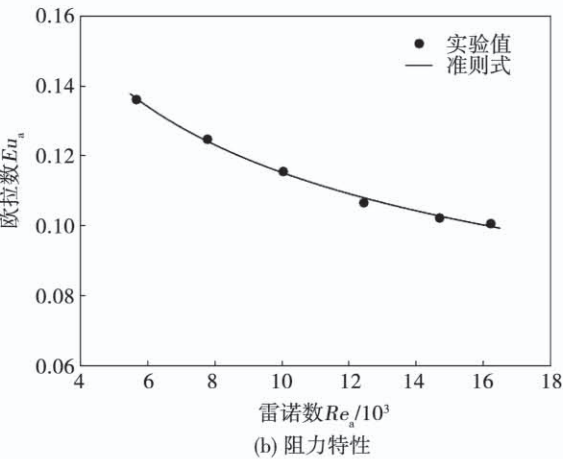
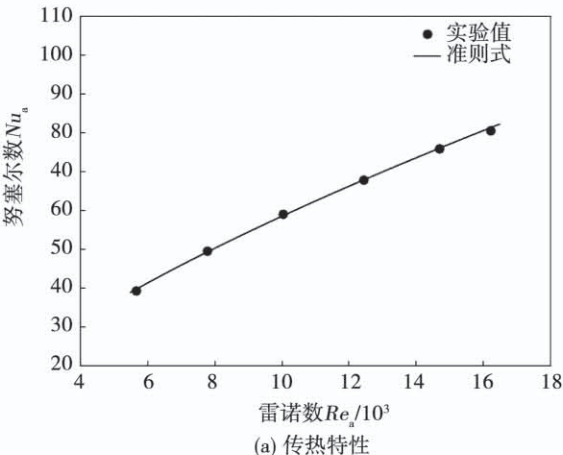


图 3 传热及阻力特性的实验值与实验准则式
Fig. 3 Results and correlations of experimental test for the heat transfer and resistance characteristics

如图 3 所示,原实验值与模化实验准则式符合得很好,其中 Nu_a 相对误差范围为 0.09% ~ 1.18%, Eu_a 相对误差范围为 0.07% ~ 1.15%。另外,可采用均方根误差 (RMSE) 来进一步评价拟合的模化实验准则式的整体情况,其计算式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2} \tag{9}$$

式中: n —样本数据点个数; x_i —拟合值; x_j —原实验值。

通过式(9)的计算得到,原实验值与模化实验准则式之间, Nu_a 均方根误差为 0.465 5, Eu_a 均方根

误差为 0.000 7,即采用提出的模化实验准则式,可较为准确地反映 H 型翅片椭圆管束的传热与阻力特性变化规律。

3 管间距对传热与阻力性能的影响

3.1 实验模型设计

另行设计 3 种结构的实验模型,以分析管间距对管束传热与阻力性能的影响。3 个实验模型的结构参数设置如表 2 所示,与 1 号试件相比,2 号试件通过保持横向管间距 s_1 不变,改变了纵向管间距 s_2 ,研究 s_2 对管束传热与阻力性能的影响;3 号试件通过保持纵向管间距 s_2 不变,改变了横向管间距 s_1 ,研究 s_1 对管束传热与阻力性能的影响。

表 2 3 个实验模型的结构参数

Tab. 2 Geometric parameters of three test models

参 数/mm	数 值		
	试件 1	试件 2	试件 3
管外侧长半轴 a	24	24	24
管外侧短半轴 b	14	14	14
基管壁厚 δ	3	3	3
翅片高度 h	95	105	95
翅片宽度 w	70	70	85
翅片厚度 t	2.5	2.5	2.5
翅片开缝宽度 s	10	10	10
翅片节距 f	20	20	20
横向管间距 s_1	80	80	90
纵向管间距 s_2	115	125	115

实验时,考虑到工况调节的便捷性,以等间隔的迎面风速作为工况调节因素。先得到管外侧平均对流传热系数 α_1 以及管外侧阻力 ΔP_m 与迎面风速 v 之间的关系,分别如图 4 和图 5 所示。

3.2 横向管间距的影响

进一步整理数据,得到传热特性的 $Nu_a - Re_a$ 关系,以及阻力特性的 $Eu_a - Re_a$ 关系,如图 6 所示。由图 6 可看出,在相同 Re_a 下,1 号试件的管外侧对流换热性能强于 3 号试件,阻力大于 3 号试件,对比其结构参数可知 Nu_a 与 Eu_a 均随着横向管间距 s_1 的增大而减小。

分析认为,横向管间距 s_1 减小,使得管束横向布

置更为紧凑,可在一定程度上增强热流的横向扰动,更有助于热边界层变薄,使传热性能得以增强;流体横向扰动增强,也会使得管外侧阻力增大。

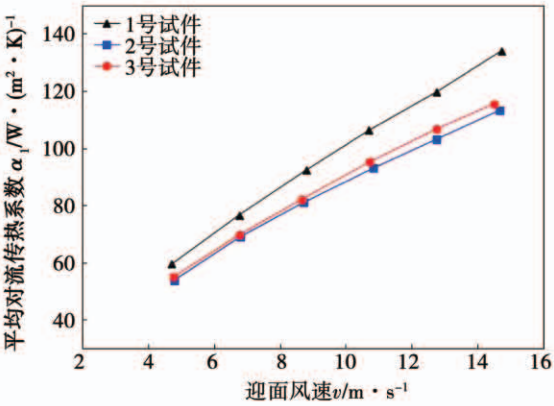


图 4 管外平均对流传热系数 α_1 与迎面风速 v 的关系
Fig. 4 The relationship between α_1 and air velocity

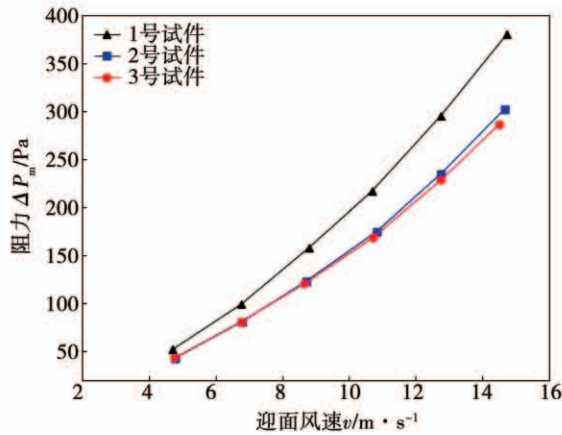


图 5 管外侧阻力 ΔP_m 与迎面风速 v 的关系
Fig. 5 The relationship between ΔP_m and air velocity

3.3 纵向管间距的影响

由图 6 可看出,在相同 Re_a 下,1 号试件的管外侧对流换热性能明显强于 2 号试件,阻力也明显大于 2 号试件,对比其结构参数可知 Nu_a 与 Eu_a 均随着纵向管间距 s_2 的增大而减小。

分析认为,纵向管间距 s_2 减小,使得管束布置在空气流动行程上更为紧凑,后排管对前排管的尾迹区产生较大的扰动,使得该区域的传热性能增强,并增大了管外侧阻力。

此外,2 号试件与 3 号试件相比,其传热性能较差,阻力较小。通过对两者的相对横向管间距 $s_1/2b$ 及相对纵向管间距 $s_2/2a$ 进行比较:2 号试件的相对

横向管间距 $s_1/2b$ 值为 2.86,相对纵向管间距 $s_2/2a$ 值为 2.60;3 号试件的 $s_1/2b$ 值为 3.21, $s_2/2a$ 值为 2.40。3 号试件的 $s_1/2b$ 值比 2 号试件大 13%, $s_2/2a$ 值比 2 号试件小 8%。即在研究范围内(特定尺寸的椭圆管, s_1 变化范围 80 ~ 90 mm, s_2 变化范围 115 ~ 125 mm, Re_a 范围 7400 ~ 21 000),纵向管间距变化对管外侧传热与阻力性能的影响要大于横向管间距的变化。

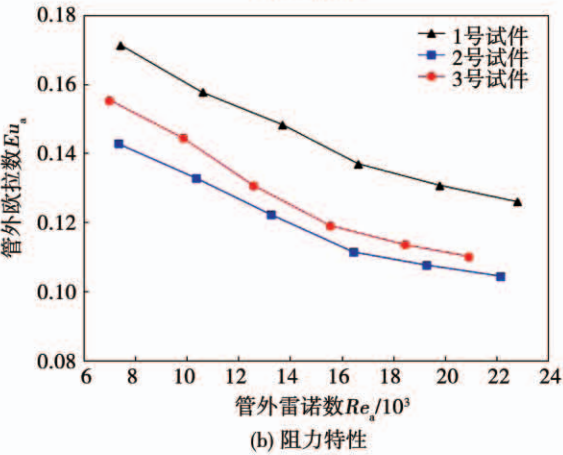
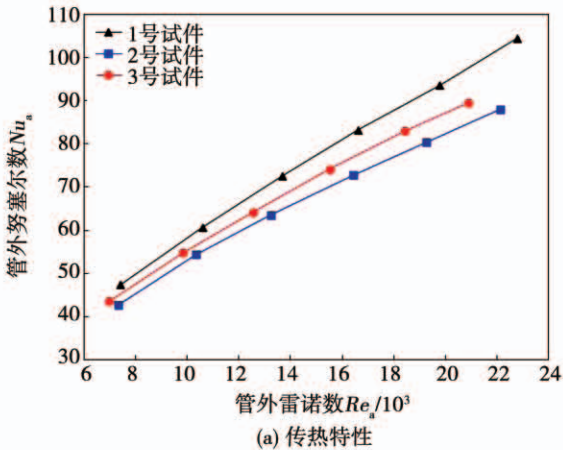


图 6 传热及阻力特性的实验结果比较
Fig. 6 Comparison of heat transfer and resistance results from experimental test

4 结 论

采用模化实验的方法研究 H 型翅片椭圆管束的传热与阻力特性,得出结论:

在研究范围内(特定尺寸的椭圆管, s_1 变化范围 80 ~ 90 mm, s_2 变化范围 115 ~ 125 mm, Re_a 范围 7 400 ~ 21 000);横向管间距 s_1 增大,传热性能变差、阻力减小;纵向管间距 s_2 增大,传热性能明显变

差、阻力明显减小;相比之下,纵向管间距 s_2 对传热与阻力性能的影响比横向管间距 s_1 更明显。

参考文献:

- [1] 刘彦丰,付晓俊. 低温省煤器 H 型鳍片管传热性能的研究[J]. 热能动力工程,2017,32(1): 80-85.
LIU Yan-feng, FU Xiao-jun. Study on the heat transfer performance of H-type finned tube of the low temperature economizer[J]. Journal of Engineering for Thermal energy and Power, 2017, 32(1): 80-85.
- [2] 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 Yu-zheng, YUAN Yi-chao, XU Shi-yang, et al. Experimental study on the characteristics of heat transfer and flow resistance for H-type finned tube banks[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(5): 457-460.
- [3] 葛铭,赵立杰,舒少辛,等. 接触热阻对双 H 型鳍片管传热系数的影响[J]. 中国电力,2017,50(2): 57-63.
GE Ming, ZHAO Li-jie, SHU Shao-xin, et al. Impact of thermal contact resistance on heat transfer coefficient of double H-type finned tubes[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 57-63.
- [4] 吴艳艳,孙奉仲,李飞,等. H 型翅片管束空气流动及换热特性[J]. 山东大学学报(工学版),2014,44(6): 90-94.
WU Yan-yan, SUN Feng-zhong, LI Fei, et al. Numerical study on the air motion of H-type finned tubes and heat transfer characteristics[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2014, 44(6): 90-94.
- [5] 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): 368-371.

ZHANG Zhi-xiang, WANG Yun-gang, ZHAO Qin-xin. Numerical study on performance optimization of H-type finned tubes[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 368-371.

- [6] JIN Y, TANG G H, HE Y L, 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: 241-251.
- [7] 李 飞,史月涛,孙奉仲,等. H 型翅片椭圆管束传热及阻力特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(14): 2261-2266.
LI Fei, SHI Yue-tao, SUN Feng-zhong, et al. Experimental research on heat transfer and resistance characteristics of H-type finned elliptical tubes [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(14): 2261-2266.
- [8] 韩 筱,曹绛敏,张姣阳. 椭圆 H 型翅片管压降与换热特性数值模拟[J]. 上海电力学院学报,2016,32(1): 12-14.
HAN Xiao, CAO Jiang-min, ZHANG Jiao-yang. Numerical simulation of pressure drop performance and heat transfer performance of H-type finned elliptical tube[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2016, 32(1): 12-14.
- [9] BERGMAN T L, LAVINE A S, INCROPERA F P, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [10] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社,2006.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer (4th edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

(丛 敏 编辑)