

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2026.20240130

## 整体式螺旋翅片管束结构参数对传热特性的影响

张丹枫<sup>1,2</sup>, 董辉<sup>1,2</sup>, 赵亮<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 辽宁省流程工业节能与绿色低碳技术工程研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 为研究结构参数对整体式螺旋翅片管束间传热特性的影响, 设计并制作了13组不同结构参数的整体式螺旋翅片管束, 搭建了1:1管束传热特性实验台, 借此开展管束传热特性实验研究. 研究表明: 在生产可调范围内, 适当增大烟气流速、翅片高度、翅片间距和纵向管距, 可以提升管束的气侧 $Nu$ ; 横向管距对管束的气侧 $Nu$ 影响不显著. 基于实验数据, 提出了描述整体式螺旋翅片管束气侧 $Nu$ 的关联式, 为后续管束热工参数优化数值计算提供理论基础.

**关键词:** 余热锅炉; 省煤器; 整体式螺旋翅片管束; 传热特性

中图分类号: TK 223 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2026)01-0131-07

## Effect of Structural Parameters of Integral Spiral Finned Tube Bundles on Heat Transfer Characteristics

ZHANG Dan-feng<sup>1,2</sup>, DONG Hui<sup>1,2</sup>, ZHAO Liang<sup>1,2</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Engineering Research Center of Process Industry Energy Saving and Low-Carbon Technologies, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: DONG Hui, E-mail: dongh@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To investigate the influence of structural parameters on the heat transfer characteristics between integral spiral finned tube bundles, 13 groups of such tube bundles with varying structural parameters were designed and fabricated. A 1:1 experimental bench for heat transfer characteristics was established to conduct experimental research on the heat transfer characteristics of these tube bundles. The findings indicate that the Nusselt number ( $Nu$ ) on the gas side of the tube bundles improves with an increase in flue gas velocity, fin height, fin pitch, and longitudinal pitch within the production's adjustable range. Conversely, the transverse pitch does not significantly affect the  $Nu$  on the gas side of the tube bundles. Based on the experimental data, a correlation equation describing the  $Nu$  on the gas side of the integral spiral finned tube bundles is proposed, providing a theoretical foundation for subsequent research on the optimization of numerical calculations of the thermal parameters of these tube bundles.

**Key words:** heat recovery steam generator; economizer; integral spiral finned tube bundle; heat transfer characteristic

换热管束是换热器的核心换热元件, 其换热能力直接决定了换热器的换热性能. 整体式螺旋翅片管是1种在900~950 °C条件下通过对厚壁无缝低碳钢钢管进行挤压、轧制成型的螺旋翅片管, 翅片和基管为一体. 相比于目前工业常用的

利用高频电流将翅片和基管焊接在一起的高频焊接翅片管, 其接触热阻更小、表面更为光滑, 当烟气横掠管束时, 烟气侧(即气侧)阻力更低. 整体式螺旋翅片管的翅片截面为梯形, 对于破坏翅片间流场的速度边界层和温度边界层具有更高

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2225025).

作者简介: 张丹枫(1991—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士研究生.

通信作者: 董辉, E-mail: dongh@mail.neu.edu.cn.

的效果,因此具有较好的传热特性.

目前,国内外针对联合循环余热锅炉省煤器整体式螺旋翅片管束(以下简称整体式螺旋翅片管束)流动与传热等热工问题的研究刚刚起步. Feng 等<sup>[1]</sup>建立了一种整体式螺旋翅片管束流动和积灰数值计算模型,模拟研究了管束的横向和纵向管距对管束传热和积灰特性的影响规律. Feng 等<sup>[2]</sup>提出了一种综合性能评价因子用以对比不同翅片管束的性能,模拟研究了管距对整体式和H型螺旋翅片管束综合性能的影响,对比了2种管束的综合性能.Lang 等<sup>[3]</sup>建立了直列和错列整体式螺旋翅片管束积灰模型,研究了横向和纵向管距对管束气侧传热、阻力和积灰特性的影响规律. 靳万龙等<sup>[4]</sup>模拟研究了整体式螺旋翅片管束流动传热特性,结果表明翅片间距的调整对管束综合性能影响可以忽略,随着翅片高度和纵向管距增大,管束综合性能呈现先增后减的趋势.就现有研究成果可以发现,有关整体式螺旋翅片管束的研究还存在以下不足:1) 缺少翅片管本身结构参数(例如翅片高度和翅片间距等)对管束传热特性的影响研究;2) 有关整体式螺旋翅片管束的实验研究未见报道.这导致对于整体式螺旋翅片管束气侧传热特性的认识不够全面.

基于此,本文联合苏州海陆重工股份有限公司,以整体式螺旋翅片管束在省煤器中的应用为

研究目的,通过搭建1:1整体式翅片管束流动传热实验台,分析结构参数对整体式螺旋翅片管束传热特性的影响,为整体式螺旋翅片管束在燃气-蒸汽联合循环余热锅炉省煤器中的设计与应用提供理论支撑.

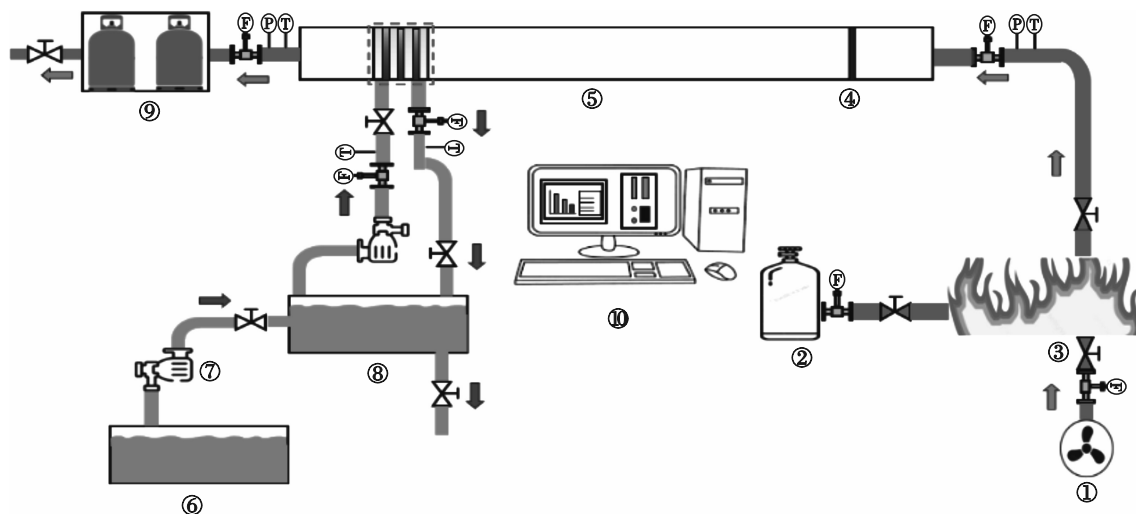
## 1 实验系统的建立

### 1.1 实验目的

本实验通过研究生产可调范围内整体式螺旋翅片管束的翅片间距和高度、横向和纵向管距等参数对管束气侧  $Nu$  的影响规律,获得气侧  $Nu$  关联式,为后续开展管束模拟研究提供数据支撑.

### 1.2 实验系统

根据某9F联合循环余热锅炉结构,设计了用于研究整体式螺旋翅片管束气侧传热特性的实验系统,实验系统示意图如图1所示.系统中,精确控制的天然气和空气在燃烧室混合并在风机的推动下进入换热装置,与图中虚线框内的整体式螺旋翅片管束进行换热.处理后的烟气经过尾气处理系统被排出.水通过水泵从管束下部注入,在管内与管束发生换热后从上部排出.箭头标明了烟气和水的流动方向.符号F,T,P分别代表流量、温度和压力的测量装置.图2展示了实验系统的实物图.



1—离心风机;2—天然气;3—燃烧室;4—均流孔板;5—换热装置;  
6—冷水箱;7—水泵;8—水箱;9—尾气处理系统;10—数据收集系统.

图1 管束换热实验系统图

Fig. 1 Experimental system diagram of tube bundle heat exchange

实验过程中,烟气进出口温度由量程为0~500 °C,精度为±0.5%的热电偶测量;烟气进出口压差由精度为±0.2%的差压变送器测量;烟气流

量由精度为±1%的孔板流量计测量.水进出口温度由量程为0~100 °C,精度等级为A级的热电偶测量;水的流量由精度为±0.5%的电磁流量计

测量.

错列布置为6×3,即管束纵向为6列,横向为3排.

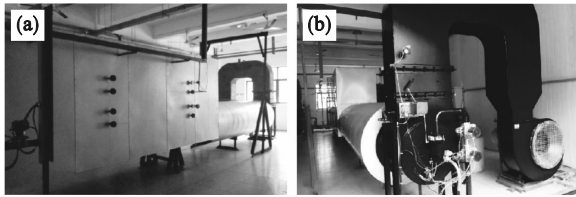


图2 实验系统实物图

Fig. 2 Physical diagram of experimental system  
(a)—左视图; (b)—主视图.

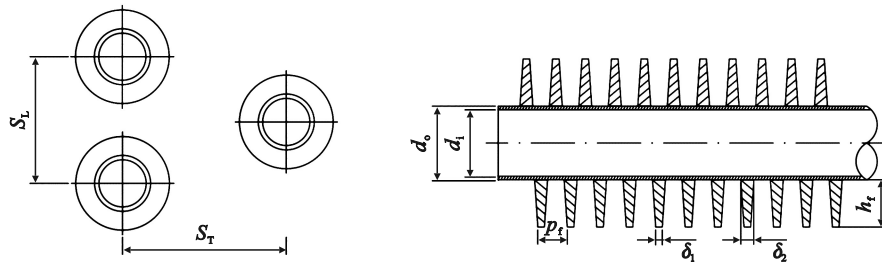
### 1.3 实验对象

考虑到整体式螺旋翅片管束的制造费用较高以及管束制造工艺的制约问题,设计并制作了13组不同结构参数的整体式螺旋翅片管束,其结构参数变化参考生产可调范围,旨在探究结构参数对整体式螺旋翅片管束气侧传热特性的影响及规律,具体的结构参数详见表1,整体式螺旋翅片管束结构示意图如图3所示.工业上为方便运输及安装,会将管束制成3排通过联箱连接的换热模块,因此参考工程实际情况,本实验中管束

表1 整体式螺旋翅片管束结构参数

Table 1 Structural parameters of integral spiral finned tube bundles

方案	翅片管参数/mm				管束布置参数/mm	
	内径	外径	翅片间距	翅片高度	纵向管距	横向管距
1	32	38	5	12.8	104	89
2	32	38	11	12.8	104	89
3	32	38	14	12.8	104	89
4	32	38	8	12.8	104	89
5	32	38	8	7.0	104	89
6	32	38	8	10.0	104	89
7	32	38	8	16.0	104	89
8	32	38	8	12.8	104	59
9	32	38	8	12.8	104	74
10	32	38	8	12.8	104	104
11	32	38	8	12.8	59	89
12	32	38	8	12.8	74	89
13	32	38	8	12.8	89	89



$S_r$ —横向管距;  $S_l$ —纵向管距;  $d_i$ —管内径;  $d_o$ —管外径;  $\delta_1$ —翅尖厚度;  $\delta_2$ —翅根厚度;  $h_f$ —翅片高度;  $p_f$ —翅片间距.

图3 整体式螺旋翅片管束结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of integral spiral finned tube bundle structure

### 1.4 实验数据处理

烟气横掠管束时,烟气与水发生间壁式换热,在这一传热过程中,总传热量  $Q$  的表达式为

$$Q = \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} \quad (1)$$

式中:  $Q_1$  为烟气放热量, W;  $Q_2$  为水吸热量, W. 总传热量的表达式又可以写成

$$Q = KA_o \Delta T_m \quad (2)$$

式中:  $K$  为总传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $A_o$  为气侧总换热面积,  $m^2$ ;  $\Delta T_m$  为2种流体的平均温差, K. 本文中,  $\Delta T_m$  按式(3)计算<sup>[5]</sup>:

$$\Delta T_m = \frac{(T'_g - T''_w) - (T''_g - T'_w)}{\ln \frac{T'_g - T''_w}{T''_g - T'_w}} F \quad (3)$$

式中:  $T'_g$  为烟气进口温度, K;  $T''_g$  为烟气出口温度,

K;  $T'_w$  为水进口温度, K;  $T''_w$  为水出口温度, K;  $F$  为温度修正系数<sup>[5]</sup>. 烟气放热量  $Q_1$  的表达式为

$$Q_1 = \dot{m}_1 (T'_g - T''_g) c_{p,g} \quad (4)$$

式中:  $\dot{m}_1$  为烟气质量流量, kg/s;  $c_{p,g}$  为烟气比定压热容,  $kJ/(kg \cdot K)$ . 水吸热量  $Q_2$  表达式为

$$Q_2 = \dot{m}_2 (T''_w - T'_w) c_{p,w} \quad (5)$$

式中:  $\dot{m}_2$  为水质量流量, kg/s;  $c_{p,w}$  为水比定压热容,  $kJ/(kg \cdot K)$ .

当换热稳定时,烟气放热量与水吸热量热平衡的相对误差的绝对值须小于等于5%,此时应满足:

$$\left| \frac{Q_1 - Q_2}{(Q_1 + Q_2)/2} \right| \leq 5\% \quad (6)$$

对翅片管的传热过程进行分析,传热过程总

传热系数与各部分传热系数关系式如下:

$$\frac{1}{K} = \left( \frac{1}{h_o} + R_o \right) \frac{1}{\eta_o} + \frac{A_o}{2\pi l \lambda_t} \ln \frac{d_o}{d_i} + \left( \frac{1}{h_i} + R_i \right) \frac{A_o}{A_i} \quad (7)$$

式中:  $h_o$  为气侧对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $R_o$  为管外积垢热阻,  $(m^2 \cdot K)/W$ ;  $\eta_o$  为翅片总效率;  $l$  为管长,  $m$ ;  $\lambda_t$  为翅片管的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $h_i$  为水侧对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $R_i$  为管内积垢热阻,

$$A_f = \frac{2Nl \sqrt{\left( \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \right)^2 + h_f^2} \sqrt{[\pi(d_o + h_f)]^2 + p_f^2} + Nl\delta_1 \sqrt{[\pi(d_o + h_f)]^2 + p_f^2}}{p_f} \quad (9)$$

式中:  $N$  为换热管的数量, 个. 在本研究中, 每组实验使用的换热管数量为 18 个.

$$A_t = N\pi d_o l - \frac{Nl\delta_2 \sqrt{[\pi(d_o + h_f)]^2 + p_f^2}}{p_f}, \quad (10)$$

$$A_o = A_t + A_v, \quad (11)$$

$$A_i = N\pi d_i l. \quad (12)$$

对于翅片效率  $\eta_f$ , 整体式螺旋翅片管将参考连续型螺旋翅片管进行翅片效率的计算, 根据 Weierman<sup>[6]</sup> 的研究, 其关系式为

$$\eta_{f,th} = \frac{\tanh[m(h_f + \delta/2)]}{m(h_f + \delta/2)}, \quad (13)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h_o}{\lambda_r \delta}}, \quad (14)$$

$$\eta_f = \eta_{f,th} (0.7 + 0.3\eta_{f,th}) \times$$

$$\left\{ 0.45 \times [\eta_{f,th} (0.7 + 0.3\eta_{f,th}) - 1] \ln \left( \frac{d_f}{d_o} \right) + 1 \right\}, \quad (15)$$

$$d_f = 2 \times h_f + d_o. \quad (16)$$

式中:  $\eta_{f,th}$  为翅片效率分析解;  $\delta$  为翅片厚度,  $m$ ;  $d_f$  为折算翅片外径,  $m$ . 对于管内水侧的对流传热系数, 根据 Gnielinski<sup>[7]</sup> 的研究成果计算, 其关系式如下:

$$Nu_w = \frac{(f_D/8)(Re_i - 1000)Pr_i}{1 + 12.7\sqrt{f_D/8}(Pr_i^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{l} \right)^{2/3} \right]. \quad (17)$$

式中:  $Nu_w$  为水的努塞尔数;  $Re_i$  为水的雷诺数;  $Pr_i$  为水的普朗特数;  $f_D$  为达西摩擦系数, 其关联式如下:

$$f_D = (1.82 \lg Re_i - 1.64)^{-2}, \quad (18)$$

$$h_i = \frac{\lambda_w Nu_w}{d_i}. \quad (19)$$

式中:  $\lambda_w$  为水的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ .

实验的不确定度可以根据 Moffat<sup>[8]</sup> 提出的公式进行计算:

$$\delta R = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (20)$$

$(m^2 \cdot K)/W$ ;  $A_i$  为水侧总换热面积,  $m^2$ .

由于实验用的管束未经使用, 管内外的积垢热阻为 0. 其中翅片总效率的关系式为

$$\eta_o = \frac{(A_t + \eta_f A_f)}{A_o}. \quad (8)$$

式中:  $A_t$  为基管换热表面积,  $m^2$ ;  $A_f$  为翅片换热面积,  $m^2$ ;  $\eta_f$  为翅片效率.

式中:  $\delta R$  为各测量参数  $X_i$  的因变量  $R$  的总不确定度;  $\delta X_i$  为各个独立变量的不确定度, 可以根据测量设备的精度和测量值获得.

## 2 实验结果与分析

借鉴文献[9], 采用以下技术指标来评价管束传热特性.

1)  $Re$ , 表征流体的流动状态:

$$Re = \frac{\rho_g u_{g,ave} d_o}{\mu_g}. \quad (21)$$

式中:  $Re$  为烟气的雷诺数;  $\rho_g$  为烟气密度,  $kg/m^3$ ;  $u_{g,ave}$  为管束最小流通截面的平均烟气流速,  $m/s$ ;  $\mu_g$  为烟气动力黏度,  $Pa \cdot s$ .

2)  $Nu$ , 表征管束气侧的传热特性:

$$Nu_g = \frac{h_o d_o}{\lambda_g}. \quad (22)$$

式中:  $\lambda_g$  为烟气导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $Nu_g$  为烟气的努塞尔数.

计算气侧  $Re$  和  $Nu$  时, 特征温度选用进出口烟气温度的平均值, 特征长度选用管外径, 特征速度选用管束最小流通截面的平均烟气流速<sup>[10-11]</sup>. 根据设备精度和式(20)可得  $Nu$  的不确定度为 3.65%.

### 2.1 换热平衡分析

实验过程中, 气侧放热与水侧吸热未达到热平衡的实验数据应予以舍弃. 图 4 展示了管束 1~13 在实验过程中气侧与水侧的换热平衡. 根据式(6) 计算得出实验中气侧与水侧最大换热平衡误差为 3.99%, 这表明本文实验结果的可靠性.

### 2.2 翅片高度和翅片间距对管束气侧 $Nu$ 影响

图 5 展示了在相同实验工况条件下, 不同翅片高度对整体式螺旋翅片管束气侧  $Nu$  的影响规律. 结果表明, 在生产可调范围内, 当烟气流速恒定时, 管束气侧  $Nu$  随翅片高度的增加呈现先增

后减的趋势;与翅片高度为 7, 10, 16 mm 相比,翅片高度为 12.8 mm 的  $Nu$  分别平均增加了 12.13%, 6.62% 和 4.08%. 当翅片高度保持不变时,随着烟气流速的增大,管束气侧  $Nu$  增大. 考虑到测量设备的不确定度,当烟气流速保持不变时,适当增加翅片高度可以提升管束的气侧  $Nu$ , 继续增大翅片高度对管束的气侧  $Nu$  影响不显著. 整体式螺旋翅片管束翅片高度对  $Nu$  的影响规律与文献[12]中的规律一致. 这一现象可归因于适当增加的翅片高度,可以打破翅片表面的热边界层,使得烟气与翅片更好地进行换热,从而提高管束的气侧  $Nu$ ;而随着翅片高度增大,翅片管的导热热阻会随之增加,这会降低管束的气侧  $Nu$ .

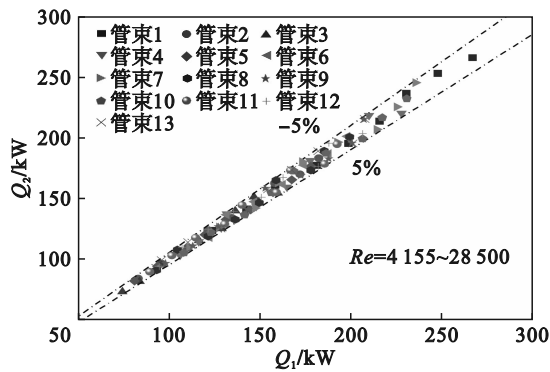


图 4 气侧与水侧换热平衡

Fig. 4 Heat transfer balance between flue gas side and water side

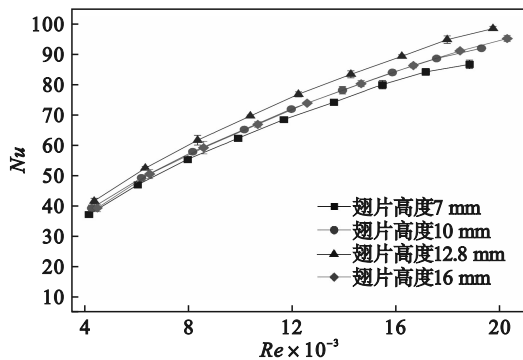


图 5 翅片高度对管束气侧  $Nu$  的影响规律

Fig. 5 Influence of fin height on  $Nu$  on gas side of tube bundles

图 6 展示了在相同实验工况条件下,不同翅片间距对整体式螺旋翅片管束气侧  $Nu$  的影响规律. 结果表明,在生产可调范围内,当烟气流速恒定时,管束气侧  $Nu$  随着翅片间距的增加先增大后减小;与翅片间距 5, 8, 14 mm 相比,翅片间距 11 mm 的  $Nu$  分别平均增加了 7.41%, 2.69% 和 1.85%. 当翅片间距保持不变时,随着烟气流速的增大,管束气侧  $Nu$  增大. 考虑到测量设备的不确

定度,可以得出结论,在本研究工况范围内,当烟气流速保持不变时,适当增加翅片间距可以提升管束的气侧  $Nu$ , 继续增大翅片间距对管束的气侧  $Nu$  影响不显著. 整体式螺旋翅片管束翅片间距对  $Nu$  的影响规律与文献[13-14]中的规律一致. 这一现象可以归因于适当增加的翅片间距,可以使烟气更容易渗透到翅片根部进行换热,进而提高了管束的气侧  $Nu$ ;而过大的翅片间距不利于打破翅片表面的热边界层.

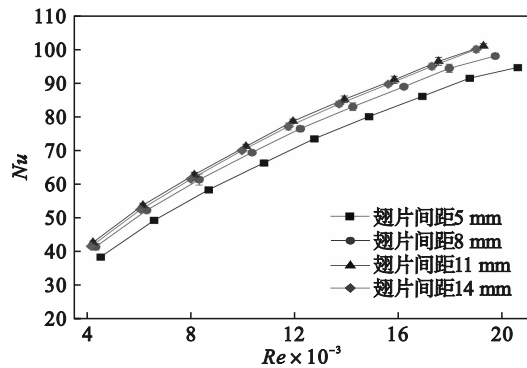


图 6 翅片间距对管束气侧  $Nu$  的影响规律

Fig. 6 Influence of fin pitch on  $Nu$  on gas side of tube bundles

### 2.3 横向管距和纵向管距对管束气侧 $Nu$ 影响

图 7 展示了在相同实验工况条件下,不同横向管距对整体式螺旋翅片管束气侧  $Nu$  的影响规律. 结果表明,在生产可调范围内,当烟气流速保持不变时,管束气侧  $Nu$  随着横向管距的增大呈现递增的趋势;与横向管距 59, 74, 89 mm 相比,横向管距为 104 mm 的  $Nu$  分别平均增加 3.46%, 2.37% 和 1.03%. 当横向管距保持不变时,随着烟气流速的增大,管束气侧  $Nu$  增大. 考虑到测量设备的不确定度,可以得出结论,在本研究工况范围内,当烟气流速保持不变时,横向管距的变化对管束的气侧  $Nu$  影响不显著. 马有福<sup>[15]</sup>与 Kawaguchi 等<sup>[16]</sup>也得到了相同的结论,其认为在常见的横向管距调整范围内,管束的气侧  $Nu$  受横向管距变化的影响有限.

图 8 展示了在相同实验工况条件下,不同纵向管距对整体式螺旋翅片管束气侧  $Nu$  的影响规律. 结果表明,在生产可调范围内,当烟气流速保持不变时,管束气侧  $Nu$  随着纵向管距的增大呈现递增的趋势;与纵向管距 59, 74, 89 mm 相比,纵向管距为 104 mm 的  $Nu$  分别提高了 11.51%, 7.04% 和 5.28%. 当纵向管距保持不变时,随着烟气流速的增大,管束气侧  $Nu$  增大. 考虑到测量设备的不确定度,可以得出结论,在本研究工况范

围内,当烟气流速保持不变时,适当增加纵向管距可以提升管束的气侧  $Nu$ . 整体式螺旋翅片管束翅片间距对  $Nu$  的影响规律与文献[17]中的规律一致. 这一现象可以归因于适当增大纵向管距,可以增大管束间烟气的湍流度,从而增强管束的气侧  $Nu$ .

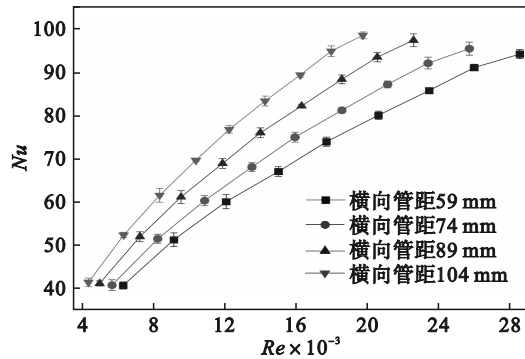


图7 横向管距对管束气侧  $Nu$  的影响规律

Fig. 7 Influence of transverse pitch on  $Nu$  on gas side of tube bundles

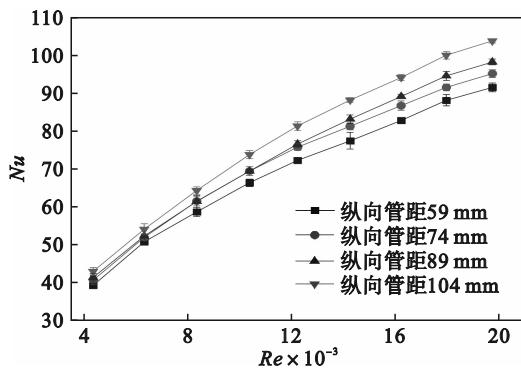


图8 纵向管距对管束气侧  $Nu$  的影响规律

Fig. 8 Influence of longitudinal pitch on  $Nu$  on gas side of tube bundles

## 2.4 $Nu$ 关联式拟合

根据文献[18]对实验数据的处理方式,采用无量纲数  $S_T/d_o$ ,  $S_L/d_o$ ,  $p_f/d_o$  和  $h_f/d_o$  对本文 117 组实验结果进行非线性拟合,整体式螺旋翅片管束气侧  $Nu$  的关联式如下:

$$Nu = 0.143 \times Re^{0.6} \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{p_f}{d_o}\right)^{0.1} \times \left(\frac{h_f}{d_o}\right)^{0.097} \times \left(\frac{S_T}{d_o}\right)^{0.865} \times \left(\frac{S_L}{d_o}\right)^{0.159} \quad (23)$$

式(23)的确定系数  $R^2=0.973$ . 如图9所示,整体式螺旋翅片管束  $Nu$  实验值与关联式计算值的相对误差范围是  $-9.27\% \sim 9.46\%$ , 关联式适用范围是  $Re=4\ 155 \sim 28\ 500$ ,  $S_T/d_o=1.55 \sim 2.74$ ,  $S_L/d_o=1.55 \sim 2.74$ ,  $p_f/d_o=0.13 \sim 0.37$ ,  $h_f/d_o=0.18 \sim 0.42$ .

为了更直观地显示每个实验值与关联式计算值之间的偏差程度,图10中展示了  $Nu$  的实验

值与关联式计算值的相对误差的直方图和正态分布曲线,分别反映了相对误差的分布规律. 由图10可以发现整体式螺旋翅片管束气侧  $Nu$  的实验值与关联式计算值的相对误差高度集中在  $-4\% \sim 4\%$  之间,占比 64.1%;  $Nu$  相对误差正态分布曲线的均值为  $-0.77\%$ , 标准差为 4.06. 这些数据表明实验值与关联式计算值之间的误差合理,根据实验结果拟合的关联式准确,利用关联式预测整体式螺旋翅片管束气侧  $Nu$  的结果可信.

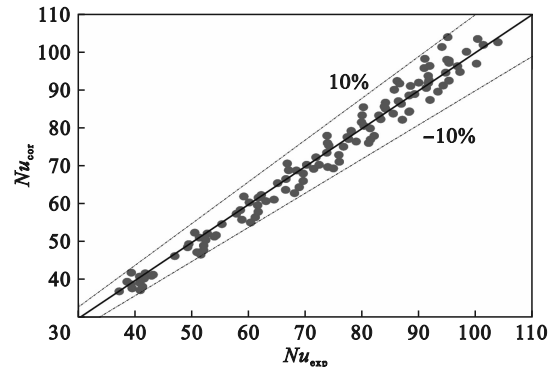


图9 实验值与关联式计算值对比

Fig. 9 Comparison of experimental values and calculated values by correlation equation

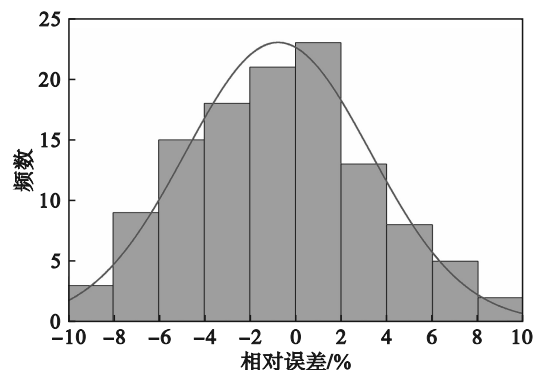


图10 实验值与关联式计算值相对误差直方图和正态分布曲线

Fig. 10 Histogram and normal distribution curve of relative errors between experimental values and calculated values by correlation equation

## 3 结 论

1) 在生产可调范围内,随着烟气流速的增大,管束气侧  $Nu$  增大;横向管距对管束气侧  $Nu$  影响不显著;管束气侧  $Nu$  随纵向管距增大而增大,适当增加翅片高度和翅片间距可以提升管束气侧  $Nu$ ;继续增大翅片高度和翅片间距,  $Nu$  变化不显著. 对于某 9F 联合循环余热锅炉省煤器,适宜

结构参数为:翅片间距11 mm,翅片高度12.8 mm,横向管距104 mm,纵向管距104 mm.

2) 通过无量纲数对实验结果进行非线性拟合,得到了整体式螺旋翅片管束气侧 $Nu$ 的关联式,其适用范围是 $Re=4\ 155\sim 28\ 500$ ,  $S_T/d_o=1.55\sim 2.74$ ,  $S_L/d_o=1.55\sim 2.74$ ,  $p_f/d_o=0.13\sim 0.37$ ,  $h_f/d_o=0.18\sim 0.42$ .

#### 参考文献:

- [1] Feng Z W, Xin C Y, Zhou T, et al. Airside thermal-hydraulic and fouling performances of economizers with integrally-molded spiral finned tubes for residual heat recovery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118365.
- [2] Feng Z W, Su B J, Xin C Y, et al. Airside thermal-hydraulic performance evaluation of flue gas coolers for waste heat recovery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 228: 120433.
- [3] Lang C Z, Lu C X, Sun B, et al. Performance comparison of inline and staggered integrally-molded spiral finned tubes for low-carbon emissions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 241: 122355.
- [4] 靳万龙,范高峰,王利民,等.整体型螺旋翅片管束流动换热特性数值研究[J].*热力发电*,2021,50(7):31-39.  
(Jin Wan-long, Fan Gao-feng, Wang Li-min, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of integral spiral finned tube bundles [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(7): 31-39.)
- [5] 刘纪福.翅片管换热器的原理与设计[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013:20-30.  
(Liu Ji-fu. Theory and design for fin-tube heat exchangers [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013: 20-30.)
- [6] Weierman C. Correlations ease the selection of finned tubes [J]. *Oil and Gas Journal*, 1976, 74(36): 94-100.
- [7] Gnielinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow [J]. *International Chemical Engineering*, 1976, 16(2): 359-367.
- [8] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3-17.
- [9] Keawkamrop T, Mesgarpour M, Dalkilic A S, et al. Effect of the segmented fin height on the air-side performance of serrated welded spiral fin-and-tube heat exchangers [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 35: 102128.
- [10] Zhou H, Liu D, Sheng Q Y, et al. Research on gas side performance of staggered fin-tube bundles with different serrated fin geometries [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 152: 119509.
- [11] Maghsoudali Y, Rastegarkoutenaei A, Sahami M, et al. Experimental investigating the thermal and hydraulic performance of heat exchangers with helix wire finned tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 231: 120919.
- [12] Jia R Z, Wang Y C, Kang H F, et al. Research on the heat transfer and flow characteristics of a new type of aluminum noncontact thermal resistance finned tubes [J]. *Journal of Energy Engineering*, 2017, 143(4): 04016065.
- [13] Kiatpachai P, Pikulkajorn S, Wongwiset S. Air-side performance of serrated welded spiral fin-and-tube heat exchangers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 89: 724-732.
- [14] Nuntaphan A, Kiatsiriroat T, Wang C C. Heat transfer and friction characteristics of crimped spiral finned heat exchangers with dehumidification [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(2/3): 327-340.
- [15] 马有福.锯齿螺旋翅片管束强化换热特性研究[D].上海:上海理工大学,2012.  
(Ma You-fu. Investigation on the heat transfer enhancement of serrated fin tube banks [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2012.)
- [16] Kawaguchi K, Okui K, Kashi T. Heat transfer and pressure drop characteristics of finned tube banks in forced convection (comparison of the heat transfer characteristics between spiral fin and serrated fin) [J]. *Heat Transfer—Asian Research*, 2005, 34(2): 120-133.
- [17] 陆国栋,周强泰,田茂诚,等.空气横掠顺列螺旋槽管和光管管束的传热特性[J].*动力工程学报*,2025,25(1):44-49.  
(Lu Guo-dong, Zhou Qiang-tai, Tian Mao-cheng, et al. Heat transfer characteristics of air flowing across bundles of rifled and bare tubes in aligned arrangement [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2005, 25(1): 44-49.)
- [18] Briggs D E, Young E H. Convective heat transfer and pressure drop of air flowing across triangular pitch banks of finned tubes [J]. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 1963, 59(41): 1-10.