

倾斜内螺纹管中超临界水的传热和流动阻力特性研究

张鑫¹, 刘朝晖¹, 毕勤成¹, 吕海财², 杨冬¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 深圳大学材料学院, 518071, 广东深圳)

摘要: 为探究超(超)临界锅炉机组内螺纹管螺旋管圈型水冷壁的传热和流动阻力特性, 在外径 35 mm、壁厚 7.75 mm 的六头内螺纹管中进行了实验研究, 实验参数为压力 22.5~28 MPa, 热流密度 300~500 kW/m², 质量流速 600~1 000 kg/(m²·s), 内螺纹管倾斜角度 5°~45°。研究了倾斜角度和质量流速对超临界压力下水的传热和流动阻力特性的影响, 用 5 个传热关联式对传热实验数据进行了评估, 拟合了超临界水的对流传热和摩擦阻力系数实验关联式。结果表明: 内螺纹管内壁面温度 and 水的传热系数几乎不随倾斜角度的变化而改变; 随着质量流速的增加, 内壁面温度减小, 传热系数增大; 随着倾斜角度的增大, 水的摩擦阻力系数和摩擦阻力压力降均显著增大; 随着质量流速的增加, 摩擦阻力系数减小, 不同压力下摩擦阻力压力降呈现不同的变化规律; 拟合的传热关联式与实验数据吻合良好, 95.8% 的拟合值与实验值偏差在 ±20% 之内; 拟合的摩擦阻力系数关联式与实验数据吻合良好, 拟临界点前后分别有 84.2% 和 88.2% 的拟合值与实验值偏差在 ±20% 之内。

关键词: 超临界; 内螺纹管; 传热特性; 阻力特性

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202012013 **文章编号:** 0253-987X(2020)12-0106-10



OSID 码

Heat Transfer and Resistance Characteristics of Water in an Inclined Internally Ribbed Tube Under Supercritical Pressure Conditions

ZHANG Xin¹, LIU Zhaohui¹, BI Qincheng¹, LÜ Haicai², YANG Dong¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518071, China)

Abstract: The heat transfer and resistance characteristics of spiral wall with internal rib in supercritical (ultra-supercritical) boiler at different inclination angles are explored, and experiment is carried out in a $\Phi 35\text{ mm} \times 7.75\text{ mm}$ six-head internally ribbed tube. Experimental parameters are as follows: pressure from 22.5 to 28 MPa, heat flux from 300 to 500 kW/m², mass flux from 600 to 1 000 kg/(m²·s), inclination angles of the internally ribbed tube from 5° to 45°. The effects of inclination angles and mass flux on the heat transfer and resistance characteristics of the supercritical water are discussed according to the experimental results, five heat transfer correlations are used to evaluate the test data, and a convective heat transfer correlation and a friction resistance coefficient correlation are developed. Results show that the inner wall temperature and the heat transfer coefficient are almost unchanged with the change of

the inclination angles. With the increase of the mass flux, the inner wall temperature decreases and the heat transfer coefficient increases. With the increase of the inclination angles, the water friction resistance coefficient and the friction resistance pressure drop increase significantly. And with the increase of the mass flux, the friction resistance coefficient decreases and the friction resistance pressure drop varies under different pressures. The developed heat transfer correlation is in good agreement with the experimental data, and about 95.8% of the calculated values are within the error of $\pm 20\%$ from the experimental values. The developed friction resistance coefficient correlation is in good agreement with the experimental data, about 84.2% of the calculated points before the pseudo-critical point and 88.2% of the calculated points after the pseudo-critical point of have deviations within $\pm 20\%$ from the experimental data.

Keywords: supercritical; internally ribbed tube; heat transfer characteristics; resistance characteristics

目前,我国电力工业仍以煤电为主。为了满足我国经济快速发展对于电力的迫切需要,同时降低对环境的污染,我国正在大力建设供电煤耗少、机组净效率高的超(超)临界变压运行直流锅炉^[1-3]。炉膛水冷壁是直流锅炉中最重要的部件,内螺纹管由于具有强化传热、抑制传热恶化的优点,被广泛应用于超(超)临界锅炉机组炉膛水冷壁^[4-6]。超(超)临界锅炉机组的内螺纹管水冷壁一般有 2 种形式:水平围绕上升螺旋管圈形式和垂直上升管形式。

很多学者对超临界压力下内螺纹管水冷壁的传热及阻力特性进行了研究。Shen 等研究表明,超临界压力下,在拟临界区,内螺纹管中水的传热得到明显的强化,随流体质量流速的减小和热流密度的增大,传热强化现象会有所减弱^[7]。Wang 等研究表明,超临界压力下,当水的质量流速小于 $1\,000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,内螺纹管中水在拟临界区剧烈的物性变化对于其传热及摩擦阻力特性有很大的影响,质量流速和压力是影响水的总压降及摩擦阻力压力降的两个重要因素^[8]。Yang 等研究表明,超临界压力下,随压力的增大,水流经内螺纹管的摩擦阻力压力降会减小;随压力的减小,热流密度的增大,水的加速压力降增大^[9]。Zhang 等研究了超临界压力下内螺纹管中水的传热恶化现象,发现随热流密度与质量流速比的增大,在拟临界区会发生水的传热恶化现象,而压力的增大可以抑制这种现象的发生^[10]。

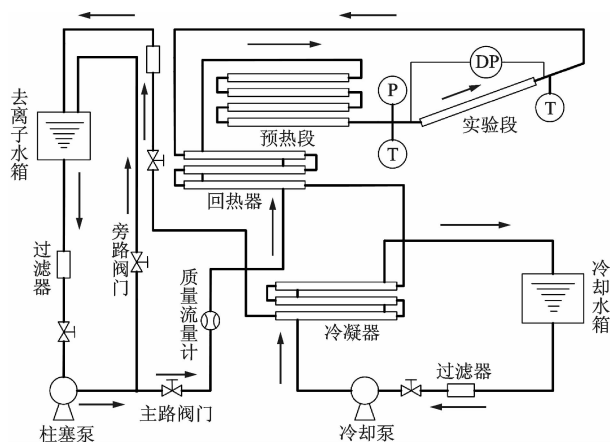
前人对于内螺纹管水冷壁的研究大多集中在垂直上升管,对于倾斜布置的螺旋管圈则研究较少。六头内螺纹管是一种被广泛应用于超(超)临界变压运行直流锅炉炉膛水冷壁的元件。本文通过实验研究了超临界压力下,倾斜角度为 $5^\circ \sim 45^\circ$ 、外径 35 mm、壁厚 7.75 mm 的六头内螺纹管中上升流的传

热及流动阻力特性,模拟了具有不同上升角的螺旋管圈型水冷壁,为超(超)临界锅炉机组内螺纹管螺旋管圈型水冷壁的设计提供了参考依据。

1 实验系统及原理

1.1 实验系统

实验在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室高温高压实验平台上进行,实验系统示意图如图 1 所示,工质为去离子水,储存在水箱中的去离子水经过滤器过滤后进入高压柱塞泵升压,并分为两路,一路经旁路阀门回到储水箱,另一路经回热器、预热段加热,在实验段进行实验,实验完成的工质再经由回热器、冷凝器的冷却重新回到储水箱,循环完成。



P—测压点;T—测温点;DP—压差变送器。

图 1 高温高压汽-水两相流实验系统示意图

实验段为一外径 35 mm、壁厚 7.75 mm 的六头内螺纹管,内螺纹管下方有一支架,在实验过程中通过调整支架的位置调整内螺纹管的倾斜角度,内螺纹管的制造材料为碳钢(SA-213T12)。实验段总长

度 4 000 mm,加热段长度 2 000 mm,加热段前后分别设有 1 000 mm 的稳定段,测量实验段压降 ΔP 的两个测点位置间的距离为 2 300 mm,整个实验段外部包裹硅酸铝纤维毡,以减少实验段的热量散失。实验段入口压力 P 由 Rosement3051 压力传感器测量,实验段压降 ΔP 由 Rosement3051 压差变送器测量,加热段外壁面温度 t_{wo} 由 58 个直径 0.5 mm 的 NiCr-NiSi 热电偶点焊在加热段上测量,58 个热电偶分布在实验加热段的 1~8 号 8 个截面处,热电偶分布情况及内螺纹管结构如图 2 和图 3 所示,内螺纹管的相关结构参数如表 1 所示。实验段入口及出口处流体温度 t_{in} 和 t_{out} 由位于入口及出口处的两个直径 3 mm 的 NiCr-NiSi 铠装热电偶垂直于管道插入到管道正中心测量。

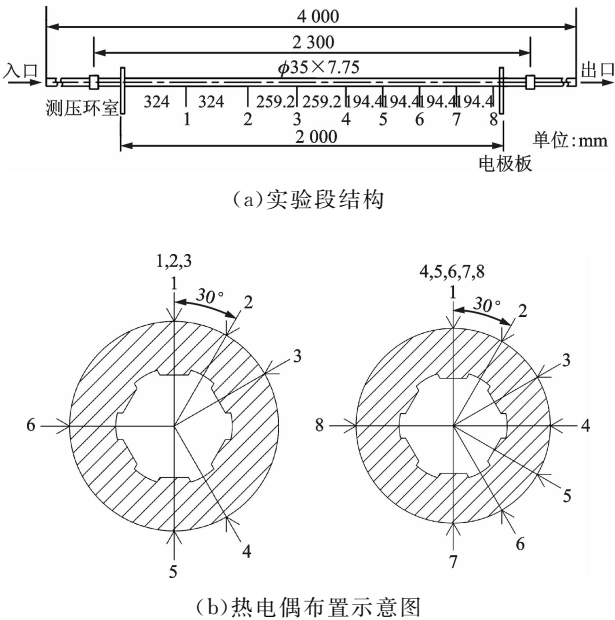


图 2 实验段结构及热电偶布置示意图

表 1 内螺纹管相关结构参数

参数	数值
螺纹头数 N	6
螺距 x/mm	10.8
螺纹顶宽(周向) C_1/mm	4.77
螺纹顶宽(纵向) C_2/mm	4.77
螺纹高度 H/mm	1.2
小内径 $d_{\min}/\text{mm}$	17.1
大内径 $d_{\max}/\text{mm}$	19.5
水力学直径 d/mm	19
外径 D/mm	35
螺旋升角 $\alpha/(\text{^\circ})$	45

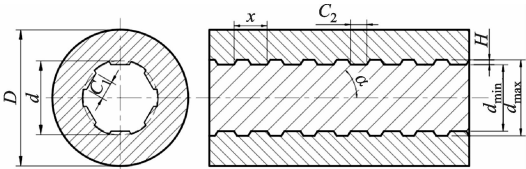


图 3 内螺纹管结构示意图

1.2 数据处理方法

内螺纹管的水力学直径

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi l}} \tag{1}$$

式中: V 是内螺纹管中充满水后水的体积; l 为内螺纹管的长度, $l=4\,000\text{ mm}$ 。

实验段的加热效率

$$\eta = Q_L/Q \tag{2}$$

式中: Q_L 为流体流过加热段后吸收的热量; Q 为施加的加热功率。 Q_L 和 Q 的计算公式分别为

$$Q_L = \frac{1}{4} \pi d^2 G (H_{\text{out}} - H_{\text{in}}) \tag{3}$$

$$Q = UI \tag{4}$$

式中: G 为流体的质量流速; H_{in} 和 H_{out} 是由实验段进出口流体温度 t_{in} 和 t_{out} 求得的实验压力下的进出口焓; U 和 I 分别为实验段的加热电压和电流。

实验段内壁面热流密度

$$q = \frac{Q\eta}{\pi d L_{\text{heat}}} \tag{5}$$

式中: L_{heat} 为加热段长度, $L_{\text{heat}}=2\,000\text{ mm}$ 。

实验段加热方式为全周均匀加热,截面上的平均传热系数

$$h = \frac{q}{t_w - t_f} \tag{6}$$

式中: t_f 为计算截面处的主流体温度,可由进出口处主流体焓内插得到该截面处主流体焓 H_f ,再利用 WST 水物性计算程序^[11] 求得; t_w 为计算截面处的平均内壁面温度,是计算截面处各个热电偶对应的内壁面温度 t_{wi} 的算术平均值。

实验中测量的是实验段外壁温 t_{wo} ,可通过圆柱坐标下的管内导热微分方程求得内壁温。

$$t_{wi} = t_{wo} - \frac{qd}{2k_w} \left(\frac{1}{2} - \frac{d^2}{D^2 - d^2} \ln \frac{D}{d} \right) \tag{7}$$

式中: k_w 为内螺纹管壁的导热系数; t_{wo} 为计算截面处各个热电偶测量的外壁面温度。

压降测量系统的示意图如图 4 所示。压力降 ΔP 的计算公式为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta P_m + \rho_c g L \sin\theta \tag{8}$$

式中: ΔP_m 为压差变送器的测量值; ρ_c 为室温下测

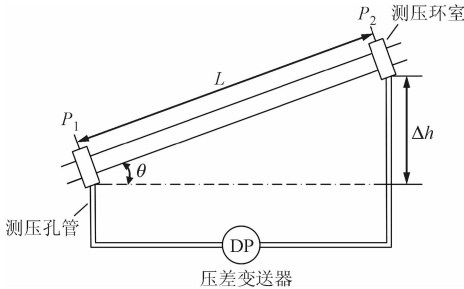


图 4 压降测量系统示意图

压孔管中水的密度; L 为压降测量系统两个测点间的距离, $L=2\,300\text{ mm}$; θ 为内螺纹管的倾斜角度。 ΔP 还可以由式(9)计算

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_g \tag{9}$$

式中: ΔP_f 为水的摩擦阻力压力降; ΔP_a 为水的加速压力降; ΔP_g 为水的重力压力降。 ΔP_f 通常按 Fanning 公式计算^[12]

$$\Delta P_f = f \frac{L}{d} \frac{G^2}{2\rho_f} \tag{10}$$

其中, f 为单相摩擦阻力系数, ρ_f 为流体密度。

ΔP_a 和 ΔP_g 由式(11)和(12)计算

$$\Delta P_a = (\rho_{out}^2 u_{out}^2 - \rho_{in}^2 u_{in}^2) = G^2 \left(\frac{1}{\rho_{out}} - \frac{1}{\rho_{in}} \right) \tag{11}$$

$$\Delta P_g = g \left(\frac{H_{out} \rho_{out} + H_{in} \rho_{in}}{H_{out} + H_{in}} \right) L \sin \theta \tag{12}$$

式中: H_{out} 、 ρ_{out} 、 u_{out} 分别为实验段出口处水的焓、密度、速度; H_{in} 、 ρ_{in} 、 u_{in} 分别为实验段入口处水的焓、密度、速度。

1.3 不确定度分析

对于直接测量的变量 x_i ,其不确定度为

$$x_i = x_{i,m} \pm \delta x_i \tag{13}$$

式中: $x_{i,m}$ 为该变量的测量值; δx_i 为该变量的不确定度。

对于一个间接测量的变量 R ,如果 R 是 n 个直接测量的变量的函数,则 R 的不确定度为^[13]

$$\delta R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \tag{14}$$

实验过程中各变量的不确定度如表 2 所示。

2 实验结果及分析

2.1 超临界水的热物理性质

水在超临界压力下的热物理性质随流体温度的变化异常剧烈,尤其是在拟临界温度附近。图 5、图 6 为压力 25 MPa 和 28 MPa 时,水的比定压热容(c_p)、密度(ρ)、导热系数(λ)及动力黏度(μ)随温度的变化情况。实验过程中,水的比定压热容(c_p)在

表 2 各变量的不确定度

参数	不确定度/%
压力	0.08
压差	0.62
质量流速	1.10
流体温度	0.28
管壁温度	0.17
加热功率	1.78
热流密度	4.40
传热系数	13.3

拟临界温度(流体比定压热容峰值对应的温度)附近出现了骤升和骤降,其峰值随着压力的增大而右移,并且显著减小;水的密度和动力黏度在拟临界温度附近骤降,压力越接近临界压力(22.115 MPa),这种变化越剧烈;当压力为 25 MPa 时,水的导热系数(λ)在拟临界温度之前有很窄范围的局部增加,28 MPa 时这种局部增加的现象则不太明显。可见水在超临界压力下剧烈的物性变化对于其传热有很大的影响。

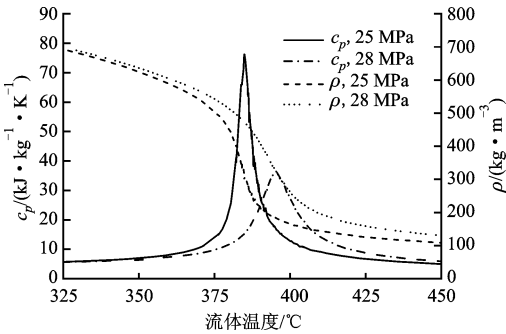


图 5 超临界水的比定压热容和密度

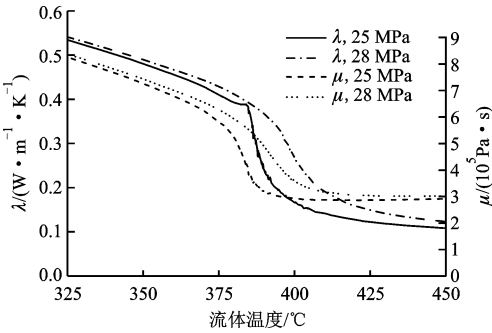


图 6 超临界水的导热系数和动力黏度

2.2 倾斜角度对传热的影响

图 7 为 $G=800\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $q=400\text{ kW}/\text{m}^2$ 、压力分别为 25 MPa 及 28 MPa 时,内壁面温度及传热系数(h)随内螺纹管倾斜角度的变化情况。当内螺纹管倾斜角度 $\theta=5^\circ \sim 45^\circ$ 时,不同倾斜角度下测

得的内壁面温度及传热系数的值几乎没有差异,内壁面温度及传热系数的值几乎不受倾斜角度的影响。压力为 25 MPa 和 28 MPa 时,相比于高焓区和低焓区,拟临界焓 (H_{pc} , 即流体比定压热容峰值对应的焓) 附近内壁面温度和主流流体温度之差达到最小,相应地在拟临界焓附近发生了传热强化现象。超临界水在拟临界焓附近的传热强化现象与其物性在此区域的剧烈变化有很大关系,尤其是比定压热容的剧烈增大(见图 5、图 6)。拟临界区比定压热容的剧烈增大迅速提高了水的吸热能力,使被加热的壁面得到更有效的冷却,因此发生了传热强化现象。

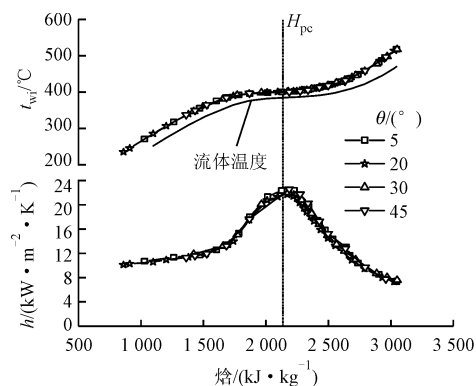
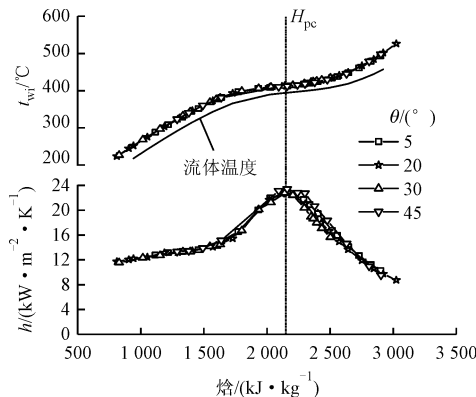
(a) $p = 25 \text{ MPa}$ (b) $p = 28 \text{ MPa}$

图 7 倾斜角度对内壁温 and 传热系数的影响

2.3 质量流速对传热的影响

图 8 为 $\theta = 20^\circ$ 、 $q = 400 \text{ kW/m}^2$ 、压力分别为 25 MPa 及 28 MPa 时,内壁面温度及传热系数随质量流速的变化情况。从图 8 可以看出,随着质量流速的增大,内螺纹管内壁温减小,但这种差别并不明显,而水的传热系数增大,特别是在拟临界焓附近,这与文献[14-16]结果一致,这是因为随着质量流速的增大,水的湍流强度及内壁面形成的旋流作用增强,增强了水对加热壁面的冷却,从而强化了超临界水的传热。

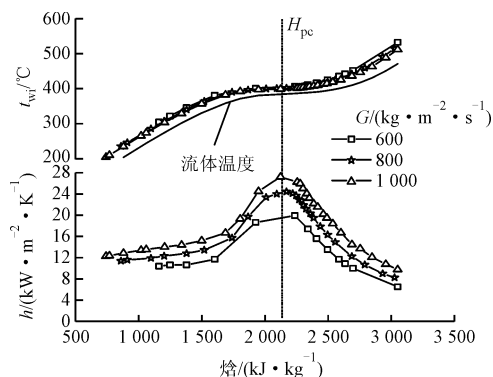
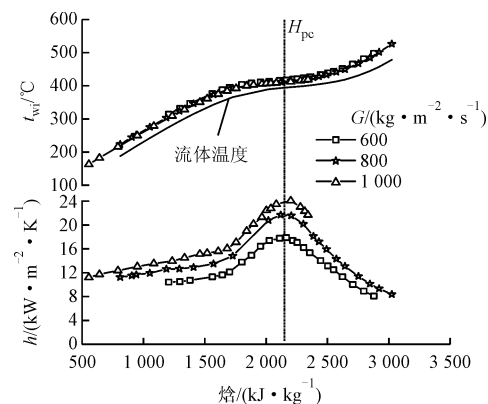
(a) $p = 25 \text{ MPa}$ (b) $p = 28 \text{ MPa}$

图 8 质量流速对内壁温 and 传热系数的影响

2.4 传热实验关联式的对比及拟合

很多学者提出了超临界压力下水的传热实验关联式,本文选取 Wang 公式^[17]、Li 公式^[18]、Jackson 公式^[19]、Pan 公式^[20]、Yang 公式^[21]与实验数据进行对比,各个公式的具体形式如表 3 所示。

表 3 中相关变量的定义如下。以工质温度为定性温度的努塞尔数 Nu_t 为

$$Nu_t = hd/\lambda_t \quad (15)$$

以内壁面温度为定性温度的努塞尔数 Nu_w 为

$$Nu_w = hd/\lambda_w \quad (16)$$

以工质温度为定性温度的雷诺数 Re_t 为

$$Re_t = Gd/\mu_t \quad (17)$$

以内壁面温度为定性温度的雷诺数 Re_w 为

$$Re_w = Gd/\mu_w \quad (18)$$

以工质温度为定性温度的普朗特数 Pr_t 为

$$Pr_t = \mu c_p/\lambda_t \quad (19)$$

以工质温度为定性温度的平均普朗特数 $\overline{Pr}_t$ 的公式为

$$\overline{Pr}_t = \frac{\mu_t c_p}{\lambda_t} = \frac{H_w - H_t}{t_w - t_t} \frac{\mu_t}{\lambda_t} \quad (20)$$

以内壁面温度为定性温度的平均普朗特数 $\overline{Pr}_w$ 为

$$\overline{Pr}_w = \frac{\mu_w \overline{c_p}}{\lambda_w} = \frac{H_w - H_f}{t_w - t_f} \frac{\mu_w}{\lambda_w} \quad (21)$$

式中： μ_w 、 λ_w 、 H_w 、 ρ_w 为以内壁面温度为定性温度的水的动力黏度、导热系数、焓、密度； μ_f 、 λ_f 、 H_f 、 ρ_f 为以工质温度为定性温度的水的动力黏度、导热系数、焓、密度； $\overline{c_p}$ 、 c_p 分别为水的平均比定压热容和比定压热容； t_w 、 t_f 分别为内壁面温度和工质温度； H_{pc} 、 t_{pc} 分别为水的拟临界焓和拟临界温度。

表 3 几种传热关联式的形式

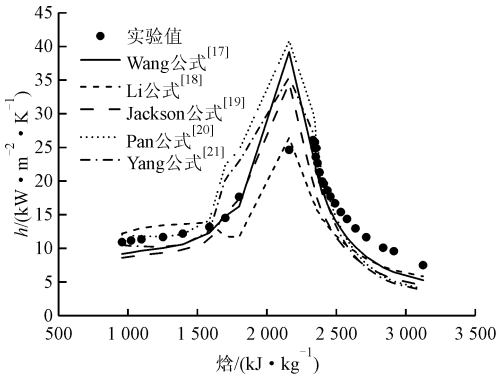
来源	传热关联式
Wang 公式 ^[17]	$Nu_f = 0.01 Re_f^{0.88} Pr_f^{0.61} (\rho_w / \rho_f)^{0.6} (\overline{c_p} / c_p)^{0.49}$
Li 公式 ^[18]	$Nu_f = 0.021 2 Re_f^{0.832\ 73} \overline{Pr}_f^{0.118\ 16} (\rho_w / \rho_f)^{0.381\ 28}$
Jackson 公式 ^[19]	$Nu_f = 0.018 3 Re_f^{0.82} Pr_f^{0.5} (\rho_w / \rho_f)^{0.3} (\overline{c_p} / c_p)^n$ $n = \begin{cases} 0.4, & t_f < t_w < t_{pc} \text{ 或 } 1.2 t_{pc} < t_f < t_w \\ 0.4 + 0.2(t_w / t_{pc} - 1), & t_f < t_{pc} < t_w \\ 0.4 + 0.2(t_w / t_{pc} - 1)[1 - 5(t_b / t_{pc} - 1)], & t_{pc} < t_f < 1.2 t_{pc} \end{cases}$
Pan 公式 ^[20]	$Nu_w = \begin{cases} 3.119 Re_w^{0.420\ 8} \overline{Pr}_w^{0.906\ 5} (\rho_w / \rho_f)^{0.458\ 7}, & H \leq H_{pc} \\ 1.802 Re_w^{0.458\ 2} \overline{Pr}_w^{1.399} (\rho_w / \rho_f)^{0.999\ 3}, & H > H_{pc} \end{cases}$
Yang 公式 ^[21]	$Nu_w = \begin{cases} 3.337 4 Re_w^{0.404\ 8} \overline{Pr}_w^{0.961\ 4} (\rho_w / \rho_f)^{0.490\ 5}, & H \leq H_{pc} \\ 7.419 8 Re_w^{0.347\ 6} \overline{Pr}_w^{1.39} (\rho_w / \rho_f)^{1.122\ 6}, & H > H_{pc} \end{cases}$

如表 3 所示,5 个传热关联式可以分为两大类,一类包括 Wang 公式、Li 公式、Jackson 公式,是以工质温度为定性温度提出的传热关联式,另一类包括 Pan 公式、Yang 公式,以内壁面温度为定性温度提出的传热关联式。

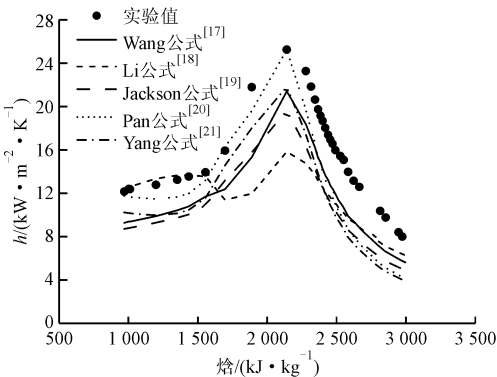
图 9 为内螺纹管倾斜角度 $\theta=20^\circ$ 时,传热系数实验值与 5 个传热关联式计算值的对比情况;图 10 为努塞尔数实验值与 5 个传热关联式计算值的对比情况。

选取实验数据与传热关联式计算值之间的平均误差 S、标准偏差 d 对实验数据进行评估,这两个变量的计算公式为

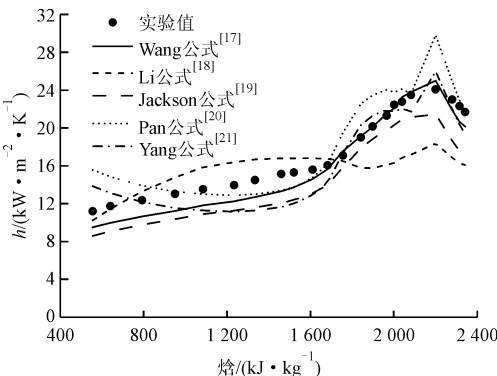
$$S = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{n} \quad (22)$$



(a) $p=22.5\text{ MPa}$, $G=800\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $q=300\text{ kW}/\text{m}^2$



(b) $p=25\text{ MPa}$, $G=800\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $q=500\text{ kW}/\text{m}^2$



(c) $p=28\text{ MPa}$, $G=1\ 000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $q=400\text{ kW}/\text{m}^2$

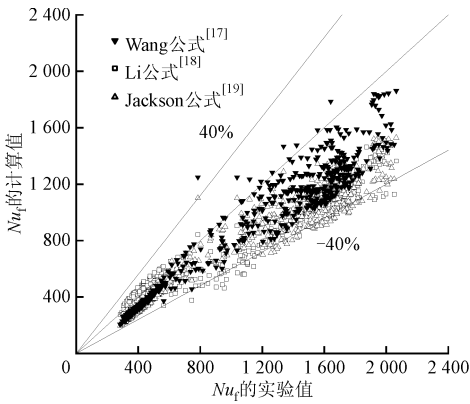
图 9 传热系数实验值和各公式计算值的对比

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - S)^2}{n - 1}} \quad (23)$$

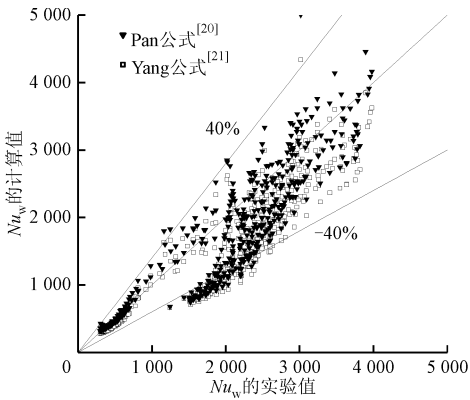
式中： n 为数据点的个数,本文取 $n=521$;平均误差 S 代表了关联式对实验数据的总体预测水平;标准偏差 d 代表了关联式计算值与实验数据之间的离散程度; e_i 为努塞尔数实验值与计算值间的偏差,计算式为

$$e_i = \frac{Nu_{cal}}{Nu_{exp}} - 1 \quad (24)$$

表 4 为各关联式对实验数据的预测精度汇总。



(a)以工质温度为定性温度的 Nu_i 对比



(b)以内壁面温度为定性温度的 Nu_w 对比

图10 努塞尔数实验值与各公式计算值的对比

中水的传热关联式,如式(25)所示。

$$Nu_f = 0.002\,11Re_f^{1.024\,13}Pr_f^{0.056\,01}\left(\frac{\rho_w}{\rho_f}\right)^{-0.096\,05}\left(\frac{c_p}{c_p}\right)^{0.015\,23}$$

(25)

式(25)的适用范围为:内径 35 mm、壁厚 7.75 mm 的六头内螺纹管,压力 $p=22.5\sim28$ MPa,质量流速 $G=600\sim1\,000$ kg/(m²·s),热流密度 $q=300\sim500$ kW/m²,内螺纹管倾斜角度 $\theta=5^\circ\sim45^\circ$ 。式(25)的预测精度如表 4 所示,可以看出,95.8%的数据的偏差小于 20%。拟合值与实验值的对比情况如图 11 所示。

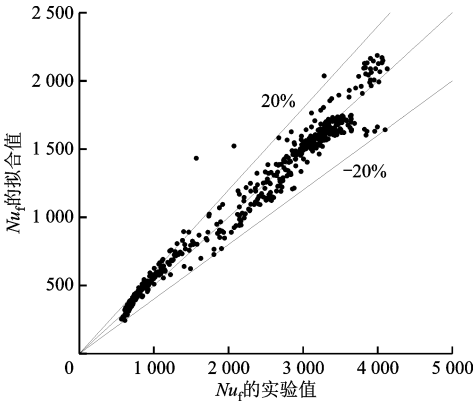


图11 本文公式的努塞尔数拟合值与实验值对比

如表 4 所示,5 个传热关联式中,Wang 公式的平均误差为-19.0%,说明其预测精度整体偏低,标准偏差为 9.8%,是 5 个传热关联式中最低的,说明其数据的集中程度是最好的,88.5%的计算值与实验数据偏差在±30%以内,99.8%的计算值与实验数据偏差在±40%以内,因此,可以认为,Wang 公式是 5 个传热关联式中对实验数据预测精度最高的。

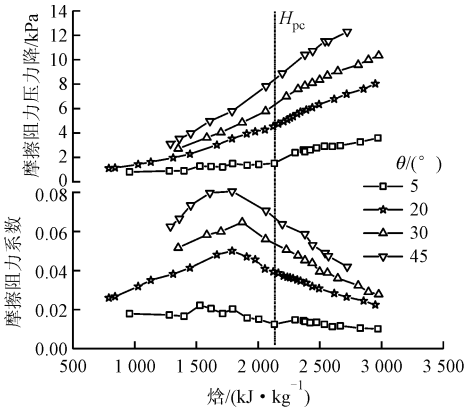
表4 传热关联式对实验数据预测精度汇总

关联式	S/%	d/%	覆盖的实验数据范围/%			
			±10%偏差	±20%偏差	±30%偏差	±40%偏差
Wang 公式	-19.0	9.8	15.2	48.2	88.5	99.8
Li 公式	-21.0	17.6	21.9	30.9	57.4	94.2
Jackson 公式	-27.4	10.1	5.0	17.9	59.7	88.1
Pan 公式	-11.0	20.5	41.2	65.3	77.0	87.0
Yang 公式	-20.1	17.6	23.4	52.3	71.3	83.1
本文拟合公式	2.2	9.5	73.3	95.8	99.6	99.6

本文以 Wang 公式为基本形式,提出了超临界压力下内径 35 mm、壁厚 7.75 mm 的六头内螺纹管

2.5 倾斜角度对摩擦阻力特性的影响

图 12 为 $G=800$ kg/(m²·s)、 $q=400$ kW/m²、压力分别为 25 MPa 及 28 MPa 时,水的摩擦阻力压力降和摩擦阻力系数随内螺纹管倾斜角度的变化情况。当内螺纹管倾斜角度在 5°~45°范围内变化时,随着倾斜角度的增大,水的摩擦阻力压力降及摩擦阻力系数均显著增大。随着流体焓的增大,摩擦阻力压力降呈单调递增的趋势,且倾斜角度越大,摩擦阻力压力降随流体焓增长的速度越快。当倾斜角度



(a) $p=25$ MPa

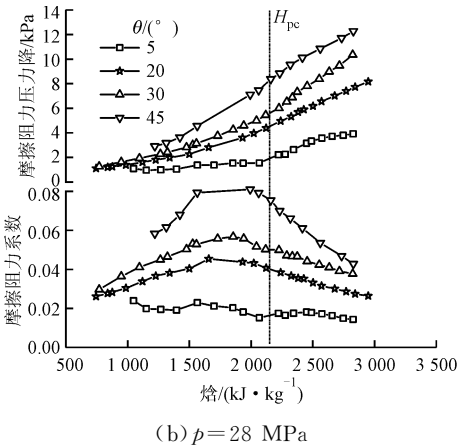


图 12 倾斜角度对摩擦阻力特性的影响

$\theta=20^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$ 时, 在低焓区域, 摩擦阻力系数会随着流体焓的增大而增大, 在拟临界焓之前达到最大值, 随后又会随着流体焓的增大而减小, 当 $\theta=5^{\circ}$ 时这一变化规律则不太明显。

2.6 质量流速对摩擦阻力特性的影响

图 13 为 $q=400\text{ kW/m}^2$ 、 $\theta=20^{\circ}$ 、压力分别为 25 MPa 及 28 MPa 时, 水的摩擦阻力压力降和摩擦阻力系数随质量流速的变化情况。当压力为 28 MPa

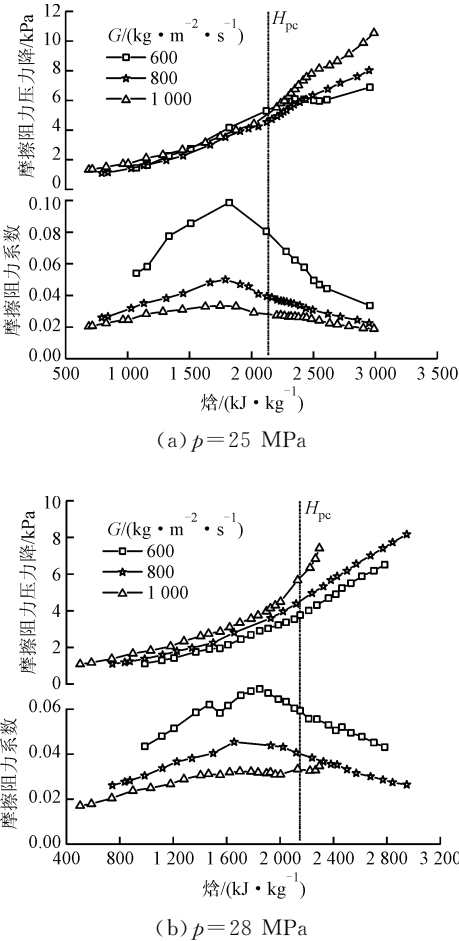


图 13 质量流速对摩擦阻力特性的影响

时, 随着质量流速的增大, 水的摩擦阻力压力降增大, 摩擦阻力系数减小。当压力为 25 MPa、焓小于 2 439 kJ/kg 时, 与压力为 28 MPa 时相比, 3 种质量流速下水的摩擦阻力压力降差别较小, 并且当焓在 1 335~2 439 kJ/kg 范围内时, $G=600\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 对应的摩擦阻力压力降比 $G=800\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 时略大; 压力为 25 MPa 时摩擦阻力系数随质量流速的增大而减小。

2.7 摩擦阻力系数实验关联式的拟合

单相流体的摩擦阻力系数常按照 Blasius 公式^[12]计算

$$f = \frac{0.3164}{Re_i^{0.25}} \tag{26}$$

对本文的实验数据进行分析后得知, 拟临界焓前后, 水的摩擦阻力特性存在差异, 因此, 本文以 Blasius 公式为基本形式, 综合考虑内螺纹管倾斜角度和工质质量流速的影响, 分别在拟临界焓前后拟合了摩擦阻力系数实验关联式。图 14 为摩擦阻力系数实验值和拟合公式计算值的对比情况。

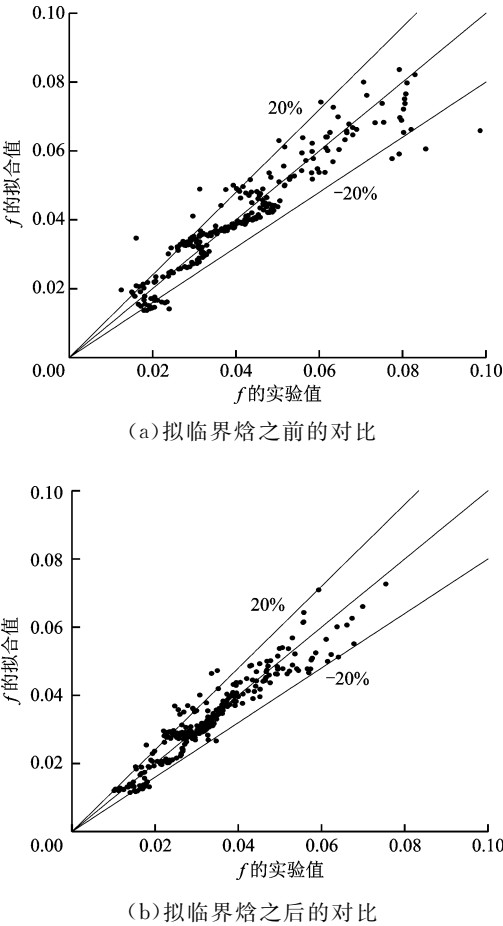


图 14 摩擦阻力系数拟合值与实验值的对比

拟临界焓之前

$$f = 0.000\,709 Re_f^{0.342} \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^{-1.809\,24} \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right)^{0.660\,01} \quad (27)$$

拟临界焓之后

$$f = 594\,24.73 Re_f^{-1.075\,2} \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^{-0.584\,69} \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right)^{0.603\,04} \quad (28)$$

式中: $G_{\max}$ 为工质最大质量流速, $G_{\max} = 1\,000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $\theta_{\max}$ 为内螺纹管最大倾斜角度, $\theta_{\max} = 45^\circ$ 。

式(27)(28)的适用范围为: 内径 35 mm、壁厚 7.75 mm 的六头内螺纹管, 压力 $p = 22.5 \sim 28\text{ MPa}$, 质量流速 $G = 600 \sim 1\,000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 热流密度 $q = 300 \sim 500\text{ kW}/\text{m}^2$, 内螺纹管倾斜角度 $\theta = 5^\circ \sim 45^\circ$ 。

式(27)(28)的预测精度如表 5 所示(拟临界前数据点个数为 $n = 253$, 拟临界后数据点个数为 $n = 272$), 可以看出, 分别有 84.2%、88.2% 的数据偏差小于 20%。

表 5 拟合关联式对实验数据预测精度汇总

关联式	$S/\%$	$d/\%$	关联式覆盖实验数据范围/ $\%$			
			$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$
			偏差	偏差	偏差	偏差
式(27)	0.4	16.9	58.9	84.2	96.0	98.0
式(28)	0.2	12.8	65.4	88.2	96.3	99.3

3 结 论

本文研究了压力 22.5~28 MPa、质量流速 600~1 000 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热流密度 300~500 kW/m^2 条件下, 倾斜角度 $5^\circ \sim 45^\circ$ 、内径 35 mm、壁厚 7.75 mm 的六头内螺纹管中水的传热与阻力特性, 得到了如下结论。

(1) 内螺纹管内壁面温度及水的传热系数几乎不随内螺纹管倾斜角度的变化而改变, 倾斜角度的改变对水的传热特性没有影响; 随着工质质量流速的增加, 内螺纹管内壁面温度减小, 水的传热系数增大。

(2) 选取 5 个经典的超临界水传热关联式, 以平均误差、标准偏差及关联式覆盖实验数据范围为标准, 对实验数据进行了评估, 并且以预测精度最高的 Wang 公式为基本形式, 拟合了适合于本文实验工况的传热关联式, 与实验数据对比, 95.8% 的数据的偏差小于 20%。

(3) 随着内螺纹管倾斜角度的增大, 水的摩擦阻

力压力降和摩擦阻力系数均显著增大, 倾斜角度的改变对水的摩擦阻力特性有很大影响; 随着工质质量流速的增大, 水的摩擦阻力系数减小, 压力为 28 MPa 时, 摩擦阻力压力降随着质量流速的增大而增大, 压力为 25 MPa 时, 在焓较小区域内, 3 种质量流速对应的摩擦阻力压力降差别不大。

(4) 以 Blasius 公式为基本形式, 综合考虑内螺纹管倾斜角度及工质质量流速的影响, 分别在拟临界焓前后提出了适合于本文实验工况的摩擦阻力系数实验关联式, 与实验数据对比, 分别有 84.2%、88.2% 的数据的偏差小于 20%。

参考文献:

- [1] 陈听宽. 超临界与超超临界锅炉技术的发展与研究[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(6): 42-48.
CHEN Tingkuan. Development and research on supercritical and ultra-supercritical boiler technology [J]. World Sci-Tech R&D, 2005, 27(6): 42-48.
- [2] 田成文, 范庆伟, 杜娟. 高效低污染超临界发电技术[J]. 节能, 2006(4): 25-27.
TIAN Chengwen, FEN Qingwei, DU Juan. Generation electric technology for high efficiency low pollution supercritical thermal power unit [J]. Energy Conservation, 2006(4): 25-27.
- [3] 王娜娜, 边小君, 曹云娟. 600 MW 级超临界与亚临界锅炉技术比较[J]. 浙江电力, 2003(6): 21-24, 28.
WANG Nana, BIAN Xiaojun, CAO Yunjuan. Comparison of the technical features between 600 MW supercritical and subcritical pressure boiler [J]. Zhejiang Electric Power, 2003(6): 21-24, 28.
- [4] 王为术, 徐维晖, 陈听宽, 等. 内螺纹管内流动传热特性研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 81-87.
WANG Weishu, XU Weihui, CHEN Tingkuan, et al. Research progress on characteristics of flow and heat transfer in internally ribbed tubes [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2011, 32(4): 81-87.
- [5] 孙洪民, 华洪渊. 超超临界锅炉垂直水冷壁的结构特点和水动力特性[J]. 应用能源技术, 2009(10): 15-18.
SUN Hongmin, HUA Hongyuan. The structure feature and hydrodynamic characteristics of the vertical water wall of ultra-supercritical boiler [J]. Applied Energy Technology, 2009(10): 15-18.

- [6] 王宝华. 超超临界直流锅炉垂直上升管圈水动力特性探讨 [J]. 锅炉技术, 2008, 39(10): 5-8.
WANG Baohua. Investigation on the vertical upward water wall hydrodynamic behavior of a 1 000 MW ultra-supercritical once-through boiler [J]. Boiler Technology, 2008, 39(10): 5-8.
- [7] SHEN Zhi, YANG Dong, MAO Kaiyuan, et al. Heat transfer characteristics of water flowing in a vertical upward rifled tube with low mass flux [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2015, 70: 341-353.
- [8] WANG Siyang, QU Mofeng, JIANG Huiqing, et al. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of vertical upward rifled tube in the advanced ultra supercritical steam generator [C]// ASME 2017 Power Conference. New York, USA: ASME, 2017: V001T01A005.
- [9] YANG Dong, SHEN Zhi, NIE Xin, et al. Hydraulic resistance of subcritical and supercritical water flowing in a rifled tube [C]// Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. New York, USA: ASME, 2017: V007T09A017.
- [10] ZHANG Weiqiang, LI Huixiong, ZHANG Qing, et al. Experimental investigation on heat transfer deterioration of supercritical pressure water in vertically-upward internally-ribbed tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 120(5): 930-943.
- [11] 居怀明, 徐元辉, 李怀莹. 载热质热物性计算程序及数据手册 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 45-78.
- [12] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 65-72.
- [13] COLEMAN H W, STEELE W G. Engineering application of experimental uncertainty analysis [J]. AIAA Journal, 1995, 33(10): 1888-1896.
- [14] WANG Wenyu, YANG Dong, JIANG Huiqing, et al. Heat-transfer and frictional-resistance characteristics of the water wall tube of an ultra-supercritical CFB boiler [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2017, 128: 279-290.
- [15] 韩海龙. 超临界锅炉水冷壁中超临水的传热及阻力特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016: 32-33.
- [16] ZHANG Qing, LI Huixiong, ZHANG Weiqiang, et al. Experimental study on heat transfer to the supercritical water upward flow in a vertical tube with internal helical ribs [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89(10): 1044-1053.
- [17] WANG Han, BI Qincheng, YANG Zhendong, et al.

- Experimental investigation of heat transfer from a 2×2 rod bundle to supercritical pressure water [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 275: 205-218.
- [18] LI Yaode, YANG Dong, OUYANG Shijie, et al. Coupling effect of heat transfer and flow resistance in the rifled tube water wall of a ultra-supercritical CFB boiler [J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(5): 1078-1088.
- [19] JACKSON J D. Consideration of the heat transfer properties of supercritical pressure water in connection with the cooling of advanced nuclear reactors [C]// The 13th Pacific Basin Nuclear Conference. Beijing, China: Atomic Energy Press, 2002: 200-204.
- [20] PAN Jie, YANG Dong, DONG Zichun, et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of low mass flux rifled tube with upward flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(13/14): 2952-2961.
- [21] YANG Dong, PAN Jie, ZHOU C Q, et al. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of vertical upward rifled tube in supercritical CFB boiler [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2011, 35(2): 291-300.

[本刊相关文献链接]

- 何娟, 邓清华, 高铁瑜, 等. 周向角和直径比对切向双旋流冷却流动与传热特性的作用机理. 2020, 54(9): 89-99. [doi: 10. 7652/xjtuxb202009010]
- 程想, 冯松, 陈强, 等. 纽带管内吸热型碳氢燃料结焦及流动换热特性实验研究. 2020, 54(6): 133-139. [doi: 10. 7652/xjtuxb202006017]
- 官本希, 王昊, 邢继远, 等. 四叶孔支撑板换热器壳程流态及其传热机制研究. 2020, 54(6): 148-154. [doi: 10. 7652/xjtuxb202006019]
- 杨竹强, 李天卉, 高天泽, 等. 跨临界碳氢二元混合物的水动力学与传热特性实验研究. 2020, 54(6): 140-147. [doi: 10. 7652/xjtuxb202006018]
- 李健武, 符阳春, 张志伟, 等. 进口雷诺数和湿空气含湿量对冲击冷却流动和传热特性的影响. 2020, 54(5): 170-178. [doi: 10. 7652/xjtuxb202005022]
- 高中华, 兰海平, 潘辉, 等. 小通道内高参数火箭煤油流动传热特性研究. 2020, 54(1): 108-115. [doi: 10. 7652/xjtuxb202001014]
- 王瑞琴, 晏鑫, 何坤. 带肋板尾缘开缝叶片内的流动传热性能研究. 2020, 54(1): 150-161, 183. [doi: 10. 7652/xjtuxb202001019]

(编辑 亢列梅)