

DOI: 10.7652/xjtuxb201601012

倾斜上升光管上母线处超临界压力水 传热关联式的建立

郭宇朦, 李会雄, 张庆, 雷贤良

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为发展精度高、对不同倾角条件通用性强的倾斜上升光管内上母线处超临界压力水传热关联式,收集、整理了公开文献中非传热恶化工况条件下相关实验数据和传热关联式,并对现有关联式预测性能进行了分析和定量评价,发现现有关联式对倾斜上升光管内上母线处超临界压力水的换热系数的预测误差较大,且通用性差。考虑到物性变化以及光管与水平方向夹角对倾斜光管内超临界压力水传热的影响,建立了新的传热关联式。结果表明,新传热关联式预测误差较小,平均相对误差、平均相对绝对误差、标准偏差分别为 0.88%、12.80%、16.68%,落在 $\pm 30\%$ 误差带内的数据百分比为 90.06%,其对不同倾斜角度的光管的通用性强,能够用来预测倾斜上升光管内上母线处超临界压力水在非传热恶化工况条件下的换热系数,对超(超)临界锅炉设计和安全运行具有重要的工程实际意义。

关键词: 倾斜光管;超临界压力水;传热;关联式

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0072-06

Establishment of Heat Transfer Correlation for the Supercritical Water Flow near the Upper Generating Line of an Inclined Upward Smooth Tube

GUO Yumeng, LI Huixiong, ZHANG Qing, LEI Xianliang

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

Abstract: In order to develop an accurate and universal correlation for predicting the heat transfer coefficient of the supercritical water (SCW) flow near the upper generating line in an upward smooth tube with different inclined angles, the existing empirical correlations were evaluated in this paper based on the collected experimental data from literature under the working conditions without heat transfer deterioration. It is shown that the prediction error of these correlations were quite large. Considering the effects of the SCW thermal physical properties and the inclined angle of the tube on heat transfer performance in a smooth tube, a new correlation was proposed. The prediction error of this new correlation was smaller compared with the existing empirical correlations and its mean relative deviation, mean relative absolute deviation and standard deviation are 0.88%, 12.80% and 16.68%, respectively and 90.06% of the data fall within the error zone of $\pm 30\%$. It means that the proposed correlation can be used to predict the heat transfer coefficient of the SCW flow near the upper generating line in an inclined upward smooth tube under the working condition without heat transfer deterioration, providing a basis for the design and safe operation of supercritical pressure boilers.

Keywords: inclined smooth tubes; supercritical water; heat transfer; correlation

收稿日期: 2015-06-08。 作者简介: 郭宇朦(1990—),女,硕士生;李会雄(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50876090);国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB251502)。

网络出版时间: 2015-10-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151013.1132.002.html>

超(超)临界发电机组具有大容量、高参数、低能耗等诸多特点,已经成为我国火力发电机组的重要发展方向。超(超)临界锅炉的关键技术之一就是炉膛水冷壁的设计和制造。水冷壁的形式主要有螺旋管圈和垂直管圈两种,其中螺旋管圈水冷壁因其具有对锅炉变负荷适应性好、水冷壁出口热偏差小等优点而得到了广泛应用。

目前,研究学者针对倾斜上升光管内超临界压力水的传热特性已开展了比较广泛的研究,并且提出了一系列针对倾斜上升光管内超临界压力水换热系数的传热关联式,但是这些关联式均是在单一倾角 α (光管与水平方向夹角)的光管实验数据基础上得到的,其针对不同倾角的光管传热的适用性有待研究^[1-6]。

相比于垂直光管内超临界压力水的传热特性,倾斜光管的传热特性较为复杂,表现为倾斜光管内超临界压力水所受到的重力方向与流动方向存在夹角,由此导致超临界压力水也可能发生与亚临界压力下类似的“分层流动”,即浮升力作用会引起倾斜光管内超临界流体的自然对流^[6]。现有研究表明,受自然对流诱导的二次流的影响,受热倾斜上升光管内壁温和换热系数沿管周向分布不均,上母线(管顶点)处传热效果最差,内壁温最高,壁温飞升的峰值也最大,上母线处会首先发生传热恶化^[7-11]。

综上所述,为满足超(超)临界锅炉设计和安全运行的需要,特别是针对上母线处传热较差的特点,发展高精度的适用于不同倾角光管内上母线处超临界压力水传热的预测关联式具有重要意义。

本文收集了非传热恶化工况条件下倾斜上升光管上母线处超临界压力水传热实验数据,在此基础上,对相关关联式的预测能力进行了全面深入的评价、分析。考虑到光管上母线处超临界压力水的传热特性的影响因素,本文提出了一个新的传热预测关联式。

1 传热实验数据信息及关联式收集

通过文献调研发现,现有传热关联式均是在非传热恶化工况基础上建立的,并且本文收集的传热恶化数据点较少,因此本文仅针对非传热恶化工况进行数据点和传热关联式的收集。本文收集了现有公开文献中关于倾斜上升光管上母线处超临界压力水传热的实验数据点 677 个,涉及实验工况 46 个,以及预测非传热恶化工况条件下倾斜上升光管内超临界压力水的传热关联式 6 个^[1-9]。通过对关联式

形式的分析发现,现有关联式均是在 Dittus-Boelter 关联式基础上添加了物性修正来考虑流体物性随温度变化对热量传递过程的影响,物性修正项多为密度比修正项 $\rho_w \cdot \rho_b^{-1}$ 、导热系数比修正项 $\lambda_w \cdot \lambda_b^{-1}$ 等组合形式。

2 现有传热关联式预测能力的分析与评价

图 1 给出了现有传热关联式预测值与不同学者实验值的比较。由图 1 可知,大比热区外,换热系数随焓值变化比较平稳;在大比热区内,随工质焓值的增大,超临界压力水的换热系数先上升,出现一个峰值后再逐渐下降;质量流速较低时,文献[1]关联式在大比热区内的预测值比实验值偏高,质量流速较高时,情况则相反;文献[5-6]关联式预测的换热系数峰值所对应的焓值比实验值大,且大比热区内换热系数的预测值比实验值偏低;文献[2-3]关联式的预测峰值所对应的位置与实验值相同,但是换热系数的预测值比实验值偏低;文献[4]关联式在大比热区外的预测值比实验值偏高,且在大比热区内,没有预测出相应的峰值。总体来说,现有关联式预测效果均不好。

图 2 给出了现有传热关联式预测值与本文收集到的整体实验数据的比较。由图 2 可以看出,文献[4-5]关联式预测值比实验值偏高,分散性较大;文献[3]关联式预测值比实验值偏低;其他关联式对于全范围数据具有一定的预测能力,但是对不同工况的预测效果不同。

为进一步分析现有关联式预测精度,本文采用平均相对误差 σ_1 、平均相对绝对误差 σ_2 、标准偏差 σ_3 和相关系数 ρ_{xy} 来定量评价,相关定义为

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^n e_i / N \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sum_{i=1}^n |e_i| / N \quad (2)$$

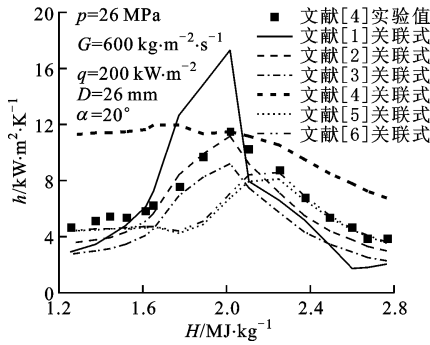
$$\sigma_3 = \left(\sum_{i=1}^n (e_i - \sigma_1)^2 / (N - 1) \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$e_i = (Nu_c - Nu_M) \times 100 / Nu_M \quad (4)$$

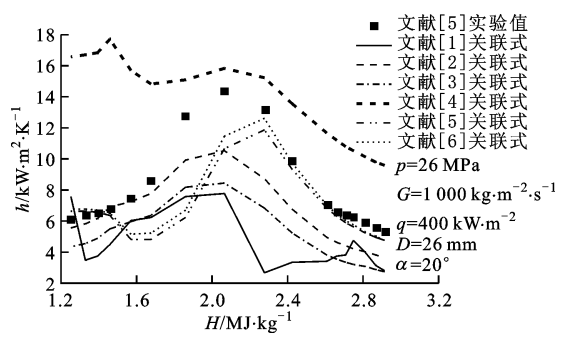
$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{(D(X))^{1/2} (D(Y))^{1/2}} \quad (5)$$

式中: $\text{cov}(X, Y)$ 表示 X 和 Y 的协方差; $D(X)$ 和 $D(Y)$ 表示 X, Y 的方差。

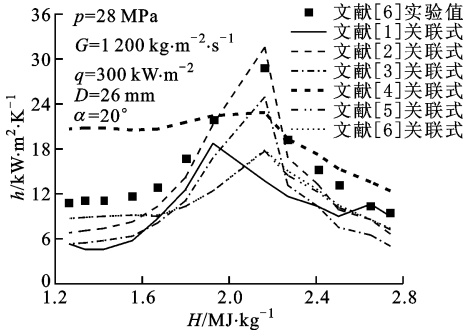
表 1 给出了不同关联式预测值与实验数据的误差分析结果。由表 1 可看出,仅有文献[2,5]关联式的平均相对绝对误差低于 20%、平均相对误差绝对



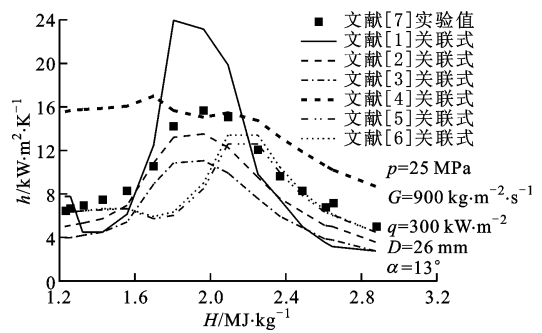
(a) 现有关联式预测值与文献[4]实验值比较



(b) 现有关联式预测值与文献[5]实验值比较

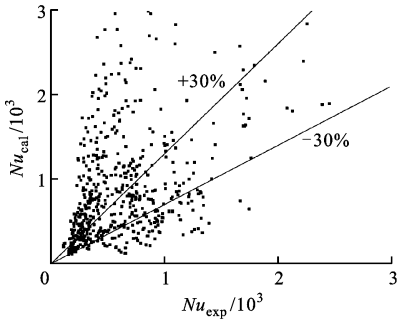


(c) 现有关联式预测值与文献[6]实验值比较

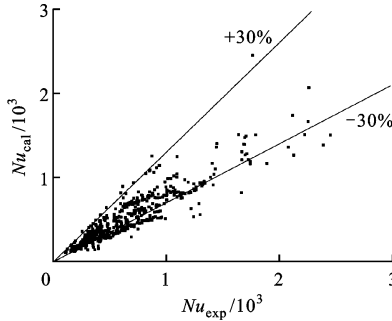


(d) 现有关联式预测值与文献[7]实验值比较

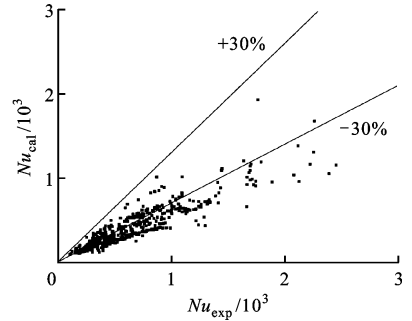
图 1 现有传热关联式预测值与实验值的比较



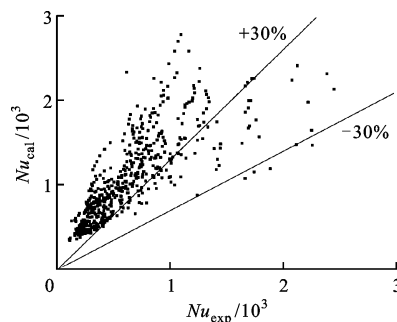
(a) 文献[1]关联式预测值与实验数据比较



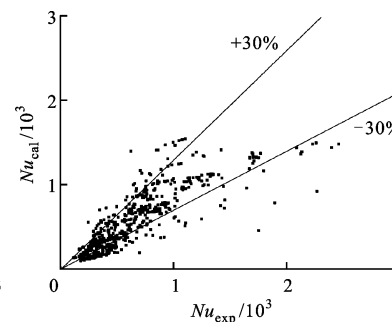
(b) 文献[2]关联式预测值与实验数据比较



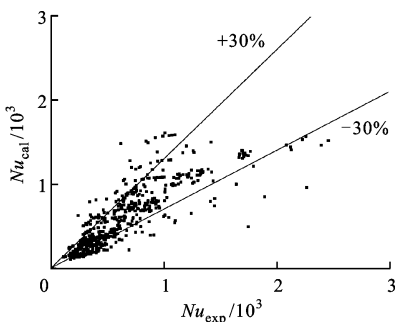
(c) 文献[3]关联式预测值与实验数据比较



(d) 文献[4]关联式预测值与实验数据比较



(e) 文献[5]关联式预测值与实验数据比较



(f) 文献[6]关联式预测值与实验数据比较

图 2 现有传热关联式预测值与整体实验数据的比较

值低于 30%、标准偏差低于 30%，而且落入 ±30% 误差带内的预测数据百分比在 60% 以上，其他关联

式的预测结果准确度要低于以上两个关联式。

综合上述分析结果可知，现有传热关联式的预

表 1 不同传热关联式预测值与实验数据的误差分析

关联式来源	$\sigma_1/\%$	$\sigma_2/\%$	$\sigma_3/\%$	ρ_{xy}	落入不同误差带的数据百分比/%		
					$\pm 10\%$	$\pm 20\%$	$\pm 30\%$
文献[1]	108.61	131.53	282.62	0.434 7	9.91	20.72	32.25
文献[2]	-18.04	22.30	18.53	0.912 3	22.52	45.23	70.45
文献[3]	-35.92	36.21	14.72	0.912 1	5.77	12.25	33.51
文献[4]	92.43	93.59	60.14	0.783 4	3.42	6.67	11.89
文献[5]	-8.78	24.54	29.49	0.854 5	23.78	50.81	68.29
文献[6]	-4.80	24.60	31.10	0.831 3	24.14	50.63	68.11

测值误差较大,预测值与实验值变化趋势的吻合程度并不理想,对不同倾斜角度光管的通用性较差。因此,需要建立准确性高、通用性强的预测倾斜上升光管内上母线处超临界压力水换热系数的传热关联式。

3 新传热关联式的建立与评价

3.1 传热关联式形式的讨论

图 3 给出了超临界压力水物性参数(密度 ρ 、导热系数 λ 、动力黏度系数 μ)随温度的变化。由图 3 可知,拟临界温度处,水的密度、导热系数和动力黏度系数会迅速降低。超临界压力水物性的变化会对管内流体的传热带来较大影响,因此应在考虑以上物性影响的基础上建立传热关联式。

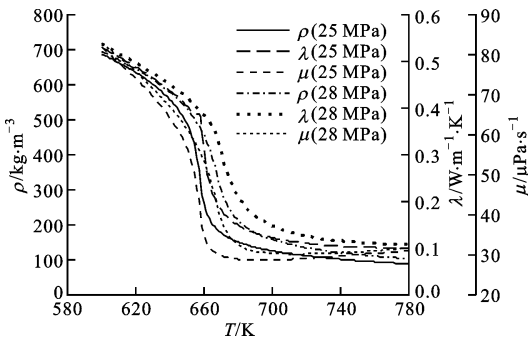


图 3 25、28 MPa 下水的密度、导热系数、动力黏度系数随温度的变化

本文将综合考虑光管内超临界压力水传热特性的影响因素,以流体温度为定性温度,在 Dittus-Boelter 关联式基础上进行相关修正,形式为

$$Nu_b = C Re_b^m \overline{Pr}_b^n FR \tag{6}$$

式中: $\overline{Pr}_b = \frac{\overline{C}_p \mu_b}{\lambda_b}$, $\overline{C}_p = \frac{(H_w - H_b)}{(T_w - T_b)}$;修正因子 $F = [\rho_w \cdot \rho_b^{-1}, \lambda_w \cdot \lambda_b^{-1}, \mu_w \cdot \mu_b^{-1}, \dots]$, $\mu_w \cdot \mu_b^{-1}$ 为动力黏度系数比修正项; R 为其他影响因素。

图 4 给出了与文献[5]实验数据对应的物性修

正比项随焓值的变化。由图 4 可知, $\rho_w \cdot \rho_b^{-1}$ 和 $\lambda_w \cdot \lambda_b^{-1}$ 对传热特性的影响几乎相同,表现为 $\rho_w \cdot \rho_b^{-1}$ 和 $\lambda_w \cdot \lambda_b^{-1}$ 随焓值的变化趋势以及大小非常接近,两者具有很强的共线性。进一步应用数学统计方法中的方差膨胀因子对 $\rho_w \cdot \rho_b^{-1}$ 和 $\lambda_w \cdot \lambda_b^{-1}$ 进行了共线性分析,两者的方差膨胀因子大于 10,表明二者具有很强的共线性^[12]。因此,为保证线性回归拟合的准确度, $\rho_w \cdot \rho_b^{-1}$ 和 $\lambda_w \cdot \lambda_b^{-1}$ 不能同时存在。考虑到受热倾斜上升管内二次流对倾斜光管内传热特性影响较大,大比热区(工质的比定压热容大于 8.4 kJ · kg⁻¹ · K⁻¹ 的区域)内超临界压力水密度的剧烈变化会使得管内横截面因自然对流作用诱导的二次流较为强烈^[13-14],因此本文在 Dittus-Boelter 关联式基础上添加了 $\rho_w \cdot \rho_b^{-1}$ 和 $\mu_w \cdot \mu_b^{-1}$ 的组合形式。

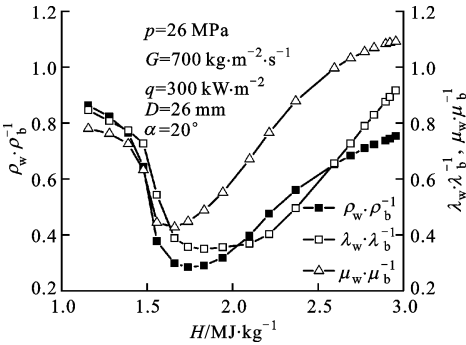
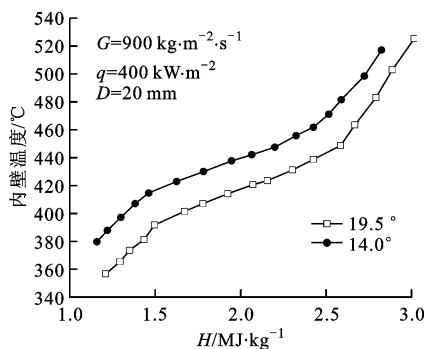
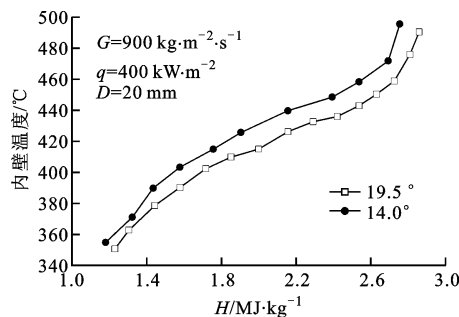


图 4 与文献[5]实验数据对应的 $\rho_w \cdot \rho_b^{-1}$ 、 $\lambda_w \cdot \lambda_b^{-1}$ 和 $\mu_w \cdot \mu_b^{-1}$ 随焓值的变化

图 5 为超临界压力区不同倾角光管上母线处内壁温分布比较曲线^[9]。由图 5 可知,在整个实验焓值范围内,小倾角光管内壁温要高于大倾角的对应值。这主要是由于随着倾角的减小,自然对流垂直于主流方向的分量加大,使得因自然对流而诱导的二次流作用加剧,更多的密度小、温度高且传热能力差的流体会沿管壁向上母线处运动并聚集,使上母线处管壁换热条件差,不易被流体冷却,因此倾角较小的管子上母线处内壁温度更高。

(a) $p=23$ MPa(b) $p=28$ MPa图5 超临界压力区不同倾角光管上母线处内壁温比较^[9]

综上所述,倾角 α 的大小对管内超临界压力水的传热影响显著。但是,现有关联式均是针对单一倾角的实验数据建立的,并未考虑 α 对管内传热特性的影响,因此对不同倾角光管的通用性较差。

本文综合考虑物性比修正项和倾角对管内传热特性的影响,以流体温度为定性温度,针对收集的非传热恶化工况条件下上母线处实验数据进行线性回归拟合,得到的新传热关联式形式为

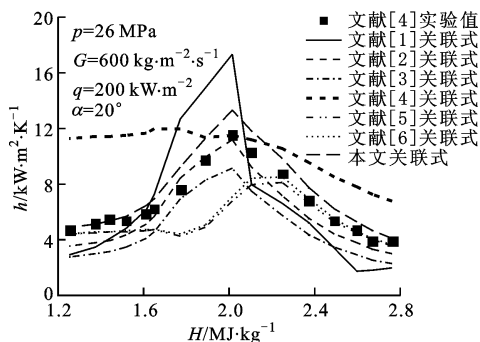
$$Nu_b = 0.015\,083 Re_b^{0.822\,66} \overline{Pr}_b^{0.807\,11} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.357\,13} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.607\,20} (\tan\alpha)^{0.060\,146} \quad (7)$$

式(7)的适用范围:压力 $p=23\sim30$ MPa,质量流速 $G=600\sim1\,200$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,热流密度 $q=200\sim500$ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$, $\alpha=13^\circ\sim22^\circ$ 。

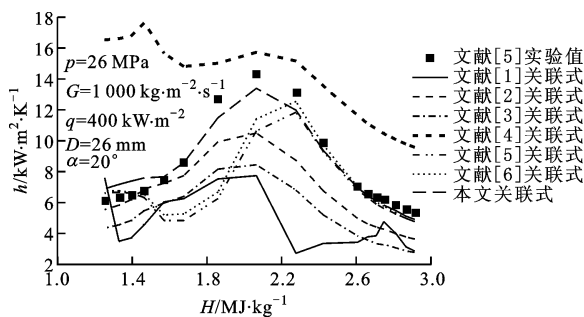
3.2 新传热关联式的预测能力评价

图6给出了本文提出的倾斜光管内上母线处超临界压力水传热关联式的预测值与不同质量流速、不同倾角光管实验数据的比较结果。由图6可以看出,本文的非传热恶化工况条件下传热关联式的预测值随焓值的变化规律与实验值吻合较好,能较准确地预测出换热系数随工质焓值的变化规律,对不同工况、不同倾角光管的通用性较好。

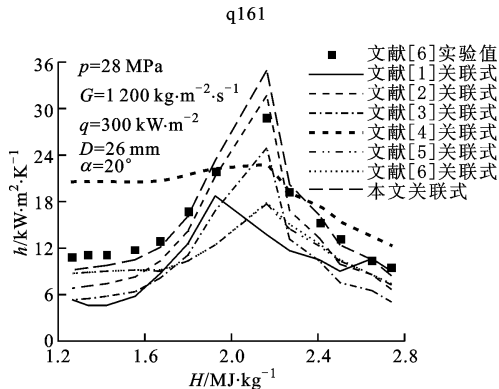
图7给出了本文关联式与整体实验数据的对比



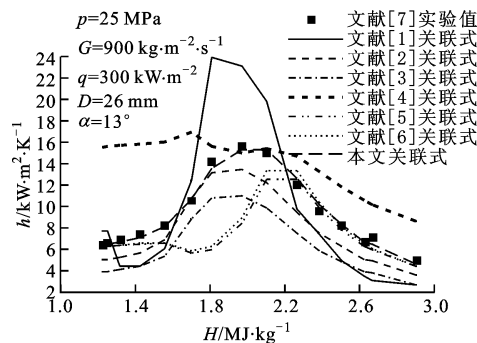
(a) 本文关联式预测值与文献[4]实验值比较



(b) 本文关联式预测值与文献[5]实验值比较



(c) 本文关联式预测值与文献[6]实验值比较



(d) 本文关联式预测值与文献[7]实验值比较

图6 本文传热关联式预测值与实验值的比较

结果。由图7可以看出,大部分预测值与实验值的相对误差落在 $\pm 20\%$ 误差带以内。本文关联式的平均相对误差 σ_1 、平均相对绝对误差 σ_2 、标准偏差 σ_3 、相关系数 ρ_{xy} 分别为 0.88% 、 12.80% 、 16.68% 、 0.946 ,并且预测值落在 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 误差带内的百分比分别为 49.90% 、 79.92% 、 90.06% ,表明本文关联式对于实验值的预测误差较小,且对不同倾角光管的实验数据通用性较好。

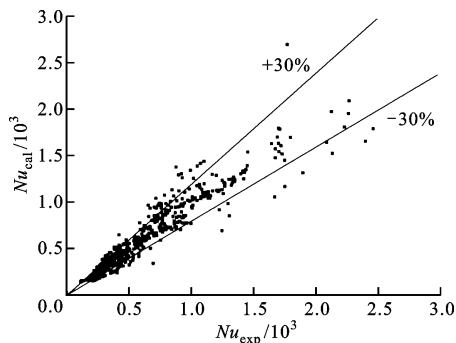


图7 本文传热关联式预测值与整体实验数据的比较

综合以上分析可知,本文所建立的关联式预测值各项指标均优于现有关联式,对倾斜光管内上母线处超临界压力水非传热恶化数据具有较好的预测能力。

4 结 论

本文收集、整理了非传热恶化工况条件下倾斜上升光管上母线处超临界压力水实验数据和传热关联式,对现有传热关联式进行了全面定量评价,在分析倾斜光管内超临界压力水传热的影响因素基础上建立了新的传热关联式,可以得出以下主要结论。

(1)现有传热关联式预测值与实验数据吻合效果不好,预测误差较大,总体预测效果较差,并且现有传热关联式未考虑光管倾斜角度对管内超临界压力水传热特性的影响,对不同倾角光管的通用性差。

(2)本文综合考虑了超临界压力水物性修正形式以及光管倾角对管内超临界压力水传热特性的影响,建立了新的传热关联式。经误差分析可知,本文关联式的预测能力优于现有关联式,能准确计算不同倾斜角度光管上母线处超临界压力水的换热系数,对超(超)临界锅炉水冷壁设计和运行具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 田永生,陈听宽,徐进良,等. 超临界压力下水在倾斜管内传热特性的研究[J]. 化工学报,1993,44(1):

34-40.

TIAN Yongsheng, CHEN Tingkuan, XU Jinliang, et al. Heat transfer water characteristics of flowing in inclined supercritical tubes [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1993, 44(1): 34-40.

[2] 胡志宏. 超临界和近临界压力区垂直上升及倾斜管传热特性研究[D]. 西安:西安交通大学,2001.

[3] 唐人虎. 600 MW 超临界变压运行锅炉水冷壁的传热特性研究[D]. 西安:西安交通大学,2006.

[4] YIN F, LI T K C, XIONG H. An investigation on heat transfer to supercritical water in inclined upward smooth tubes [J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 27(9): 44-52.

[5] 孙树翁. 超超临界锅炉水冷壁传热特性试验研究[D]. 西安:西安交通大学,2007.

[6] 吴刚,毕勤成,王汉,等. 超临界压力水在倾斜上升管内传热的试验研究[J]. 西安交通大学学报,2011,45(5): 6-11.

WU Gang, BI Qincheng, WANG Han, et al. Heat transfer characteristics of supercritical water in inclined upward tube [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 6-11.

[7] 朱晓静. 330 MW 直流锅炉螺旋管圈水冷壁传热特性及热敏感性研究[D]. 西安:西安交通大学,2005.

[8] 于水清. 超临界水在水平管中的流动传热特性分析[D]. 西安:西安交通大学,2015.

[9] 尹飞. 超临界锅炉螺旋管圈内螺纹管水冷壁传热及壁温特性研究[D]. 西安:西安交通大学,2005.

[10] 王为术,陈听宽,罗毓珊,等. 超临界压力区倾斜上升光管壁温分布与传热特性的试验研究[J]. 动力工程,2005(5): 623-627.

WANG Weishu, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Experimental research on wall temperature distribution and heat transfer characteristics of the tilted smooth riser tubes in the supercritical pressure region [J]. Power Engineering, 2005(5): 623-627.

[11] 李会雄,孙树翁,郭斌,等. 超临界水在倾斜光管中的传热不均匀特性研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(2): 241-245.

LI Huixiong, SUN Shuweng, GUO Bin, et al. Experimental investigation on the circumferential nonuniformity in heat transfer of water in inclined smooth upward tubes at supercritical pressures [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 241-245.

[12] 马雄威. 线性回归方程中多重共线性诊断方法及其实证分析[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2008(2): 78-81.

(下转第123页)