

DOI: 10.7652/xjtuxb201309005

环形通道内超临界水的传热特性研究

王汉, 毕勤成, 杨振东, 王林川, 吴刚

(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: 针对超临界水冷堆(SCWR)堆芯内非圆通道、高热流密度下传热特性研究困难的现状,在压力为 23~28 MPa、质量流速为 350~1 000 kg/(m²·s)、热流密度为 200~1 000 kW/m² 的试验条件下,对环缝间隙为 4 mm 的环形通道内超临界水的传热特性进行了试验研究。在 SCWR 的概念设计运行工况下,并未发生传热恶化现象,这一结论对 SCWR 堆芯传热分析具有重要参考意义。试验结果表明,热流密度和质量流速对传热特性影响非常明显。此外,螺旋绕丝能够显著强化局部传热,并对下游的传热情况具有一定的改善作用。在环形通道中,一定试验参数下仍然观察到了传热恶化现象,且传热恶化的试验工况与 Ogata 关系式预测值比较接近。就传热恶化的机理而言,浮升力对传热恶化的发生起着重要作用。在所选定的 6 组换热经验关联式中, Jackson 和 Bishop 关联式对换热系数的预测效果最好。

关键词: 超临界水;传热特性;环形通道;螺旋绕丝;传热恶化

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0028-07

Heat Transfer Characteristics of Supercritical Water in Annular Flow Channel

WANG Han, BI Qincheng, YANG Zhendong, WANG Linchuan, WU Gang

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

Abstract: Experiments were conducted to investigate the heat transfer characteristics of supercritical pressure water in an annular flow channel with a gap size of 4 mm at the pressure of 23-28 MPa, mass velocity of 350-1 000 kg/(m²·s) and heat flux of 200-1 000 kW/m². The results show that, at the conceptual design parameters of SCWR, no heat transfer deterioration occurred, and the heat flux and mass flux had significant influence on heat transfer. The wrapped wire arranged on the heated rod had a remarkable effect on local heat transfer, and it could also improve the heat transfer in downstream. At particular test parameters, heat transfer deterioration was observed in the annular channel, and the mass flux and heat flux corresponding to deterioration were close to those predicted by the Ogata correlation. According to the criterion of Jackson, the heat transfer deterioration may be mainly caused by buoyancy. The comparison between the six heat-transfer correlations selected and the experimental data shows that the Jackson's correlation and the Bishop's correlation perform best and they can be used in predicting heat transfer of supercritical water in annular flow channels.

Keywords: supercritical water; heat transfer characteristics; annular channel; wrapped wire spacer; heat transfer deterioration

超临界水冷堆(SCWR)是第 4 代核反应堆概念堆型之一,其设计运行工况在水的临界点(374 ℃、22.1 MPa)以上,与第 3 代轻水堆(LWR)相比,其热效率可由 33% 提高到 45%,因此经济效益十分明显^[1-3]。此外,由于工质在堆芯内不发生相变,机组回路可省略蒸汽发生器、汽水分离器、稳压器及蒸汽干燥器等,系统结构大大简化。

SCWR 虽然可以消除亚临界压力下可能出现的沸腾危机,但是水的物性在拟临界区发生剧烈变化,加之 SCWR 堆芯棒束流道复杂,高热流密度下可能带来一系列流动与传热问题。从 20 世纪 60 年代开始,国外许多学者对超临界水的流动及换热特性进行了研究^[4-6]。在国内,西安交通大学多相流实验室也开展了一系列试验研究^[7-10],内容包括流动方向、加热类型、流道形状、不同工质等的影响,积累了大量的试验数据,在传热特性分析、传热机理以及关联式分析等方面取得了很多研究成果。

然而,目前为止绝大部分研究均是针对管内流动。在反应堆中,热量是由燃料元件棒束产生并传递给在棒束间流动的冷却剂,这种超临界压力下棒束间非圆通道的流动及传热与圆管管内流动有着显著的区别,国内外已公开发表的相关研究资料非常匮乏。环形通道可以模拟堆芯单根加热棒的几何结构,因此本文在实验室现有的研究成果基础上,通过试验手段研究超临界水在环形通道内的流动与传热特性,具有非常重要的工程应用价值。

1 试验装置与方法

试验在西安交通大学高压汽水两相流试验台上进行,试验系统详细介绍可参考文献^[11]。Φ8 mm×1.5 mm 的电加热不锈钢内管嵌入 Φ20 mm×2 mm 的不锈钢外管,形成间隙为 4 mm 的圆环形通道,流体在该环形通道内垂直上升流动。内管的有效加热长度 L 为 1 400 mm。如图 1 所示,内管内壁面布置了 6 组热电偶以测量壁面温度,通过求解二维导热温度场可以求得内管外壁温度^[12]。此外,在内管第 1 截面($m-1$)处布置了长度为 100 mm 的螺旋绕丝,通过对比有无绕丝结构来研究其扰流作用。壁温 t_w 由 Φ0.2 mm 镍铬-镍硅热电偶测量,流体温度 t_b 由 K 型铠装热电偶测量,压力 p 用罗斯蒙特 3051 电容式压力传感器测量。所有测量参数均由 IMP3595 分散式采集系统自动采集。

试验参数范围:压力 $p=23,25,28$ MPa;内管外壁面热流密度 $q=200,400,600,800,1\,000$ kW/m²;质

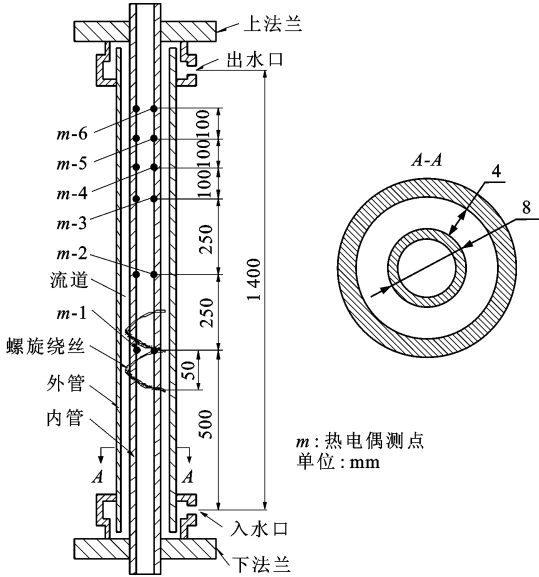


图 1 试验段测点布置

量流速 $G=350,700,1\,000$ kg/(m²·s)。试验过程中保持系统压力、质量流速及壁面热流密度恒定,逐步提高试验段入口工质的焓值,从而获得不同参数下水的传热特性。为了消除入口效应及螺旋绕丝对传热的影响,如无附加说明,本文插图的壁温、换热系数 h 和焓值 H 均是选用第 5 截面($m-5$)的试验数据,流体焓值根据 WST 水物性计算程序^[13]得到。

2 试验结果及分析

2.1 SCWR 概念设计工况传热分析

在 SCWR 概念设计中,其运行工况为 25 MPa、1 000 kg/(m²·s)、1 000 kW/m²,此工况下环形通道内超临界水的传热特性如图 2 所示。壁温随流体焓值几乎线性升高,拟临界区的最大换热系数约为 11.5 kW/(m²·K),在整个焓值区并未发生传热恶化。这一试验结果对 SCWR 正常运行具有重要的参考意义。

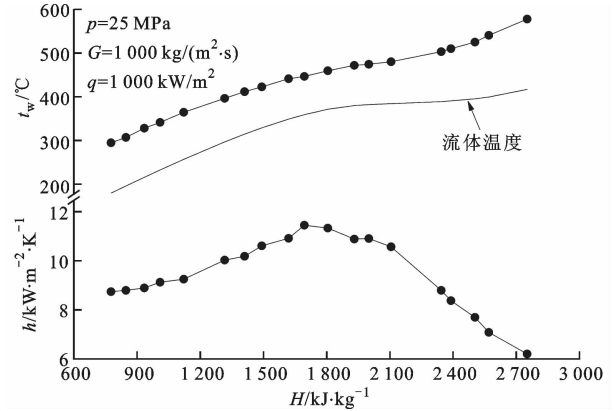


图 2 SCWR 运行工况下传热特性

2.2 系统参数对传热特性的影响

2.2.1 热流密度的影响 在压力为 23 MPa、质量流速为 $1\,000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,不同热流密度下超临界水的传热特性如图 3 和图 4 所示。由图 3 可见,壁温随流体焓值的增加缓慢上升,在拟临界焓值 H_{pc} 附近存在一段平坦区域,然后继续单调上升。此外,随着热流密度的增加,壁温随之明显升高。由图 4 可知,热流密度对换热系数的影响主要体现在拟临界区,在这一区域,传热明显得到了强化,但换热系数随热流密度的增大而减小。在远离拟临界区的低焓值区和高焓值区,不同热流密度下的换热系数几乎相同。这一试验结果与徐峰等人对超临界水在垂直上升圆管的传热研究^[14]具有一致性。

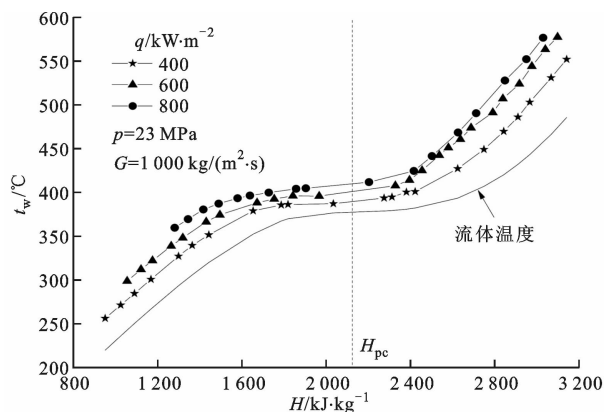


图 3 热流密度对壁温的影响

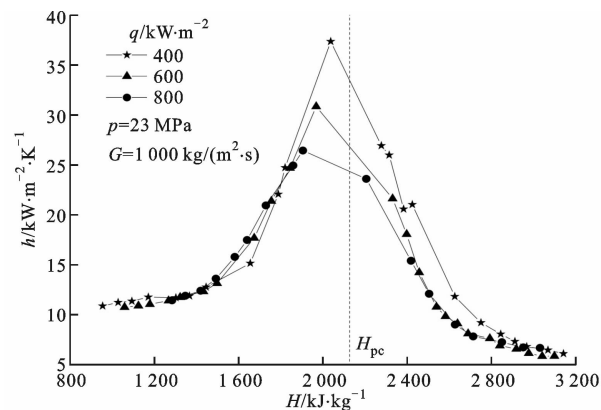


图 4 热流密度对换热系数的影响

2.2.2 质量流速的影响 当压力为 28 MPa、热流密度为 $600\text{ kW}/\text{m}^2$ 时,质量流速对环形通道传热特性的影响如图 5 和图 6 所示。在质量流速为 $1\,000\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,壁温随流体焓值平缓上升。随着质量流速的降低,试验段壁温明显升高。在质量流速为 $350\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,壁温随焓值几乎线性上升。由图 6 可知,随着质量流速的提高,对流换热系数显著增大,说明提高质量流速可以明显强化超临界水

的传热。此外,不同于热流密度对换热系数的影响,质量流速的强化传热不仅仅局限于拟临界区,在低焓值区和高焓值区同样有显著的作用。

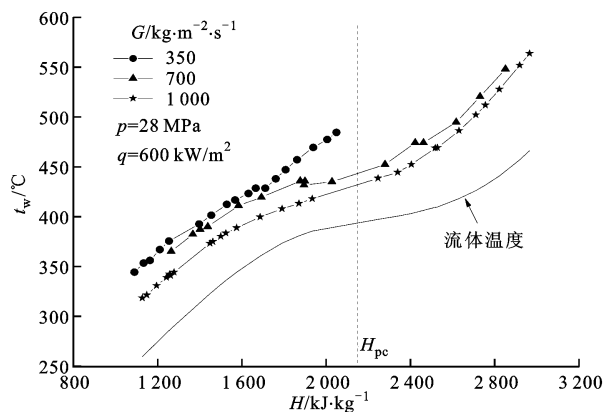


图 5 质量流速对壁温的影响

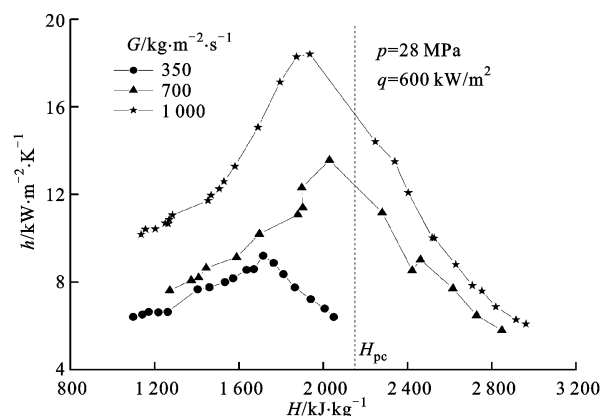


图 6 质量流速对换热系数的影响

2.3 螺旋绕丝对传热的影响

图 7 示出了压力为 28 MPa、质量流速为 $400\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热流密度为 $400\text{ kW}/\text{m}^2$ 时螺旋绕丝对试验段第 1 截面壁温和换热系数的影响。从图 7 可以看出,在拟临界点附近,带有螺旋绕丝的试验段壁温比没有螺旋绕丝的试验段壁温低 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,相应的对流换热系数前者的峰值是后者的 1.5 倍。在低焓值区和高焓值区,有无螺旋绕丝的壁温差进一步增大到 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可知,螺旋绕丝能够很好地强化局部传热。

2.4 环形通道内传热恶化

2.4.1 传热恶化表现形式 图 8 示出了压力为 25 MPa、质量流速为 $350\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、热流密度为 $600\text{ kW}/\text{m}^2$ 、试验段入口温度为 $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时壁温沿试验段轴向分布曲线。由图可见,在第 2 截面处发生了明显的壁温飞升。第 1 截面的壁温为 $422\text{ }^{\circ}\text{C}$,第 2 截面处壁温突然升高到 $540\text{ }^{\circ}\text{C}$,第 3 截面处壁温恢复到 $460\text{ }^{\circ}\text{C}$,我们认为此时即为典型的传热恶化表

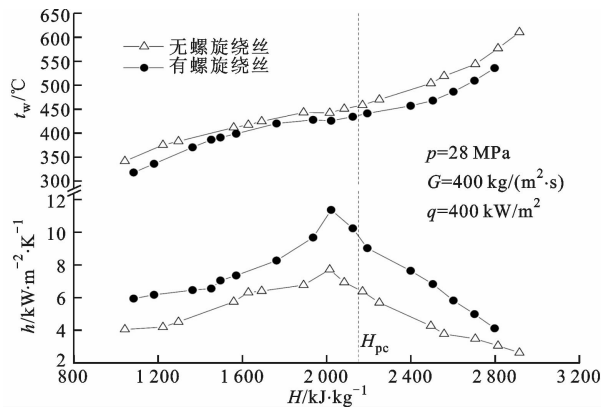


图 7 螺旋绕丝对传热特性的影响

现形式。第 2 截面处壁温随流体焓值的变化曲线如图 9 所示, 传热恶化的发生位置大致在 1 600~1 800 kJ/kg 范围内, 且壁温波动较为陡峭, 存在一个明显的峰值。此外, 由图可知, 超临界下传热恶化的壁温飞升值并不是整个焓值区壁温的最高值, 在高焓值区, 随着试验段入口流体温度的增加, 壁温要高于传热恶化时的壁温飞升值。

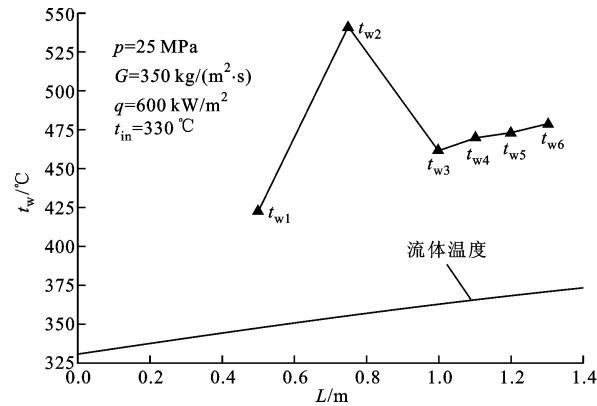


图 8 沿管长壁温分布(传热恶化工况)

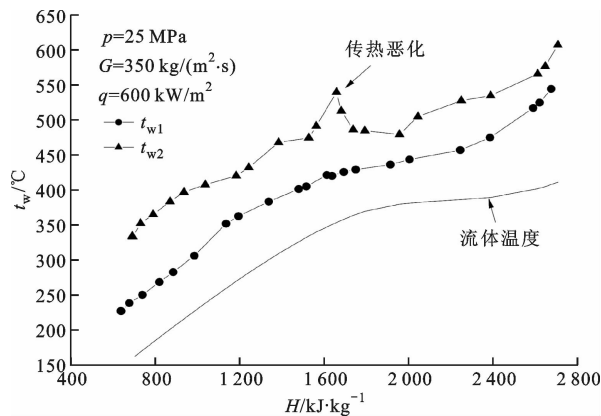


图 9 环形通道内的传热恶化

2.4.2 传热恶化起始工况判定 由以上分析可知, 当质量流速较低而热流密度相对较高时, 超临界水

在环形通道内比较容易发生传热恶化。就实际工程应用而言, 如何准确预测传热恶化的起始点是一个普遍关注的问题。现有的评价传热恶化起始点的关系式主要有如下几个:

Styrikovich 关系式^[15]

$$q = 580.0G \quad (1)$$

Yamagata 关系式^[5]

$$q = 200G^{1.2} \quad (2)$$

Ogata 关系式^[16]

$$q = 0.034 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} \left(\frac{C_p}{\beta} \right)_{PC} G \quad (3)$$

Petuhkov 关系式^[17]

$$q = 0.187f \left(\frac{C_p}{\beta} \right)_{PC} G \quad (4)$$

图 10 所示为上述 4 个关系式所计算的传热恶化热流密度随质量流速的变化情况, 图中阴影部分为在整个试验参数范围内未发生传热恶化的区域。由图可知, Styrikovich 和 Yamagata 关系式预测的传热恶化热流密度几乎包含在试验中未发生传热恶化区域内, 即这两个关系式对传热恶化起始点的预测较为保守。Petuhkov 关系式预测值明显高于试验数据, Ogata 关系式所给出的热流密度与传热恶化数据点最为接近, 可以近似作为环形通道内超临界水传热恶化起始工况的判定。

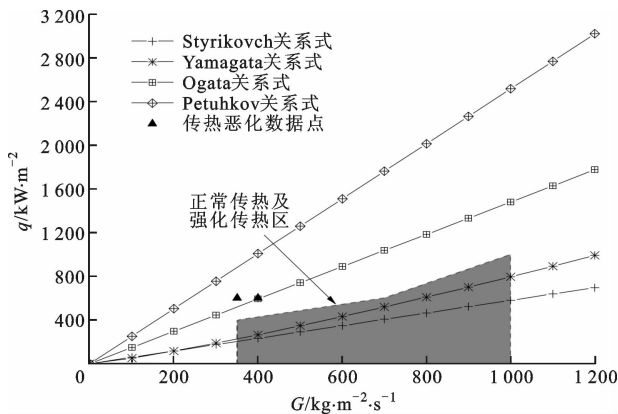


图 10 传热恶化起始点的预测

2.5 超临界水传热恶化机理分析

2.5.1 浮升力效应 目前为止, 超临界水的传热恶化机理尚未完全研究清楚, 很多研究者认为超临界水在拟临界区热物性随温度的剧烈变化导致传热恶化现象的发生, 但究竟是物性变化本身的原因还是物性变化产生的浮升力或热加速的影响所致, 存在较大争议。本文认为浮升力是导致传热恶化的一个重要因素。在热流密度较高的情况下, 加热壁面与流体的温差较大, 边界层流体容易吸收足够的热量

达到拟临界温度,使得边界层内流体密度、黏度、导热系数等急剧减小,而主流流体还未进入拟临界区,其黏度较大,这样就导致内边界层与主流流体间切应力减小,同时由于边界层流体密度的剧烈下降,产生浮升力。以上两种因素共同作用,使得加热管壁被一层温度高、密度低的“轻流体”覆盖,壁面得不到主流流体的有效冷却而导致传热恶化。

2.5.2 浮升力判定准则 Jackson 根据边界层理论导出的 $\overline{Gr}/Re_b^{2.7} < 10^{-5}$ 准则对超临界流体的浮升力判定有较好的作用效果^[6]。应用该准则,环形通道内浮升力与流体物性的变化关系可由图 11 推知。热流密度为 200 kW/m^2 时,当壁温略高于拟临界温度而主流流体温度低于拟临界温度时,沿径向流体物性变化梯度达到最大,浮升力作用应该最强,恰好此时 Jackson 准则判定浮升力存在一个峰值(如图中间虚线所示)。随着加热过程的进行,当主流流体温度超过拟临界温度时(如图右侧虚线所示),流体热物性变化趋于平缓,浮升力作用应该可以忽略;由 Jackson 准则判定结果可知,此时 $\overline{Gr}/Re_b^{2.7}$ 均在 1×10^{-5} 以下,表明 Jackson 判定准则与宏观分析结果符合较好。热流密度提高到 400 kW/m^2 时,可以得到相似的分析结果,但此时浮升力作用效果比 200 kW/m^2 时增强。这是因为在相同的质量流速下,热流密度越高,加热壁面与主流流体温差越大,沿径向流体热物性变化梯度越大,浮升力作用越强。

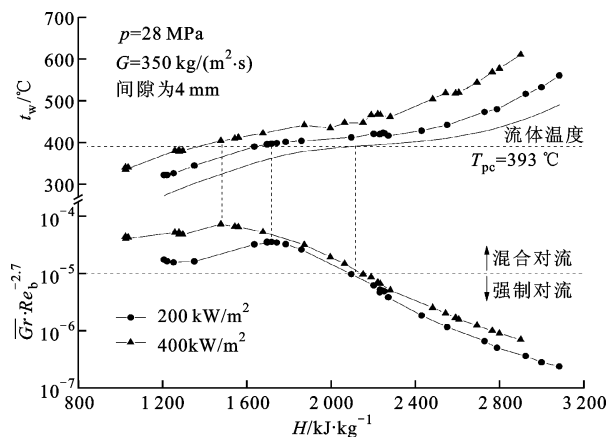


图 11 Jackson 准则对浮升力的判定(正常传热工况)

应用 Jackson 准则对图 9 中的传热恶化工况进行判定,结果如图 12 所示。由图可知,在 $q/G = 1.71$ 的情况下, $\overline{Gr}/Re_b^{2.7}$ 均在 1×10^{-5} 以上,浮升力作用效果非常明显。在低焓值区,浮升力随壁温的升高先增大到某一最大值,然后逐渐减小。随着加热过程的进一步发展,在传热恶化发生时, Jackson

准则判定表明浮升力作用在局部得到了加强。这一现象表明传热恶化的发生不仅受到流体热物性变化的影响,而且确实与浮升力作用有关。当主流流体进入高焓值区后,流体物性变化趋于缓和,浮升力作用非常微弱。

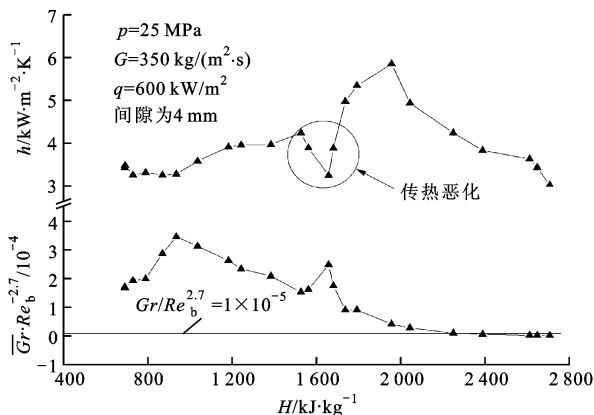


图 12 Jackson 准则对浮升力的判定(传热恶化工况)

2.6 传热关联式

由于超临界下流体物性在大比热区剧烈变化所造成的处理困难,理论分析的方法并未得出令人满意的结果。因此,许多研究者根据各自的研究结果提出了多种适用于超临界压力下流体对流传热经验关联式。文献[18]推荐应用较为广泛的关联式,如 Dittus-Boelter、Krasnoshekov、Jackson、Bishop、McAdams 及 Ornatsky 关联式等。图 13 示出了正常传热工况下该 6 组经验关联式与试验数据的对比情况,在整个焓值范围内,只有 Ornatsky、Jackson 及 Bishop 3 组关联式与试验数据较为接近。在传热恶化工况下(如图 14 所示),低焓值区 Jackson 关联式与试验数据吻合最好,而 Bishop 关联式则在高焓值区较好地预测了换热系数,其他 4 组关联式无法预测传热恶化时的换热系数。

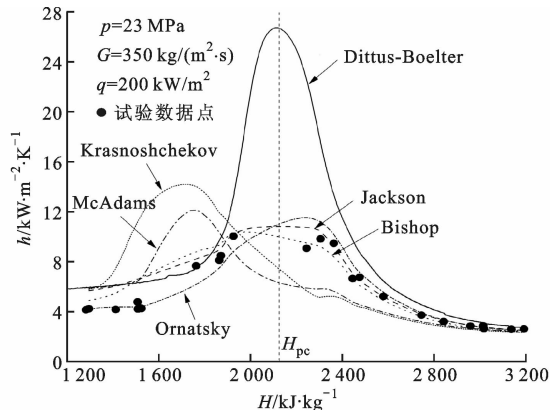


图 13 经验关联式与试验数据的对比(正常传热工况)

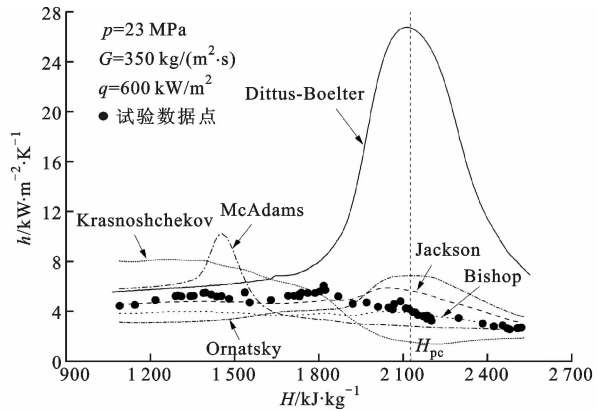


图 14 经验关联式与试验数据的对比(传热恶化工况)

经以上分析可知, Jackson 和 Bishop 关联式对环形通道内的传热情况预测较为准确, 这两个公式与试验参数范围内的全部 946 个试验数据点(包含传热恶化工况)的对比如图 15 和图 16 所示。在 $\pm 25\%$ 的误差下, Jackson 关联式捕获了 80.9% 的试验数据, 而 Bishop 关联式捕获了 81.5% 的试验数据, 说明这两组关联式可以作为预测环形通道内超临界水传热特性的经验关联式。

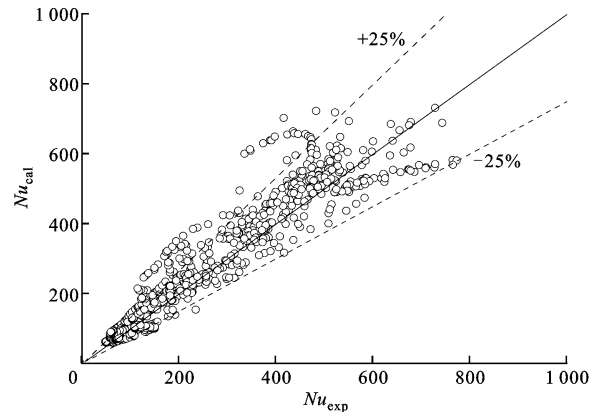


图 15 Jackson 关联式与试验数据的比较

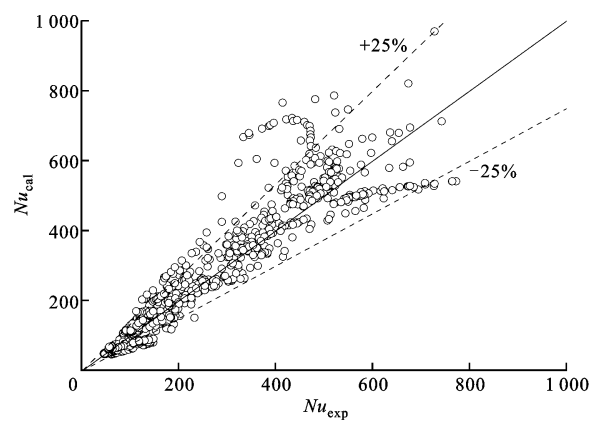


图 16 Bishop 关联式与试验数据的比较

3 结 论

通过分析超临界水在环形通道内的传热特性试验数据, 可以得出以下结论。

(1) 在 SCWR 概念设计运行工况下, 没有发生传热恶化。在拟临界区, 换热系数随热流密度的增加而减小; 质量流速对传热的影响较为明显, 换热系数随质量流速的提高而明显增大。

(2) 螺旋绕丝具有良好的局部强化传热作用, 其强化作用随流动向下游发展并逐渐减弱。

(3) 4 mm 间隙环形通道内的传热恶化发生在拟临界焓值前, 但壁温的飞升值小于高焓值区的最高壁温。在现有的评价传热恶化起始点的关系式中, Ogata 关系式与试验情况最为吻合。

(4) 浮升力作用是导致超临界下流体传热恶化的一个重要因素, Jackson 判定准则与试验结果符合较好, 可以定性分析浮升力对超临界流体传热的影响。

(5) Jackson 和 Bishop 关联式与试验数据符合较好, 可以作为超临界水在环形通道内换热系数的预测公式。

参考文献:

- [1] OKA Y, KOSHIZUKA S. Conceptual design study of advanced power reactor [J]. Progress in Nuclear Energy, 1998, 32(1): 163-177.
- [2] OKA Y, KOSHIZUKA S. Supercritical-pressure, once-through cycle light water cooled reactor concept [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2001, 38(12): 1081-1089.
- [3] BARANAEV Y D, KIRILLOV P L, POPLAVSKII V M, et al. Supercritical pressure water nuclear reactors [J]. Atomic Energy, 2004, 96(4): 345-351.
- [4] ACKERMAN J W. Pseudo-boiling heat transfer to supercritical pressure water in smooth and ribbed tubes [J]. Journal of Heat Transfer, 1970, 92(3): 490-498.
- [5] YAMAGATA K, NISHIKAWA K, HASEGAWA S, et al. Forced convective heat transfer to supercritical water flowing in tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(12): 2575-2593.
- [6] JACKSON J D, HALL W B. Forced convection heat transfer to fluids at supercritical pressure [J]. Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles, 1979, 2: 563-611.
- [7] 陈听宽, 陈宣政, 陈学俊, 等. 亚临界及近临界压力

- 区垂直水冷壁光管和内螺纹管传热特性的试验研究[J]. 动力工程, 1991, 11(1): 17-22.
- CHEN Tingkuan, CHEN Xuanzheng, CHEN Xuejun, et al. Experimental research on boiling heat transfer characteristics of smooth and internally ribbed tubes in vertical water walls in subcritical and near critical pressure regions [J]. Power Engineering, 1991, 11 (1): 17-22.
- [8] 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.
- [9] ZHU X J, BI Q C, YANG D, et al. An investigation on heat transfer characteristics of different pressure steam-water in vertical upward tube [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(2): 381-388.
- [10] WANG J G, LI H X, YU S Q, et al. Investigation on the characteristics and mechanisms of unusual heat transfer of supercritical pressure water in vertically-upward tubes [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2011, 54(9/10): 1950-1958.
- [11] 郑建学, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 高压汽水两相流内螺纹管壁温与临界热负荷特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(5): 63-68.
- ZHENG Jianxue, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Investigation on the characteristics of wall temperature and critical heat flux of internally ribbed tube with high pressure steam-water two phase flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1995, 29(5): 63-68.
- [12] 周强泰. 电加热厚壁管内壁温度的计算 [J]. 南京工学院学报, 1985(4): 38-43.
- ZHOU Qiangtai. Calculation of inner wall temperature for a electrically heated thick-wall tube [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, 1985(4): 38-43.
- [13] LEMMON E W, MCLINDEN M O, HUBER M L. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties: REFPROP [CP]. Ver. 9.0. Boulder, USA: National Institute of Standards and Technology, 2002.
- [14] 徐峰, 郭烈锦, 毛宇飞, 等. 超临界压力下水在垂直加热管内传热特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(5): 468-471.
- XU Feng, GUO Liejin, MAO Yufei, et al. Experimental investigation to the heat transfer characteristics of water in vertical pipes under supercritical pressure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39 (5): 468-471.
- [15] STYRIKOVICH M A, MARGULOVA T K, MIROPOLSKIY Z L. Problem in the development of designs of supercritical boilers [J]. Teploenergetika, 1967, 14 (6): 4-7.
- [16] OGATA H, SATO S. Forced convection heat transfer to boiling helium in a tube [J]. Cryogenics, 1974, 14 (7): 375-380.
- [17] PETUHKOV B S, KURGANOV V A. Heat transfer and flow resistance in the turbulent pipe flow of a fluid with near-critical state parameters [J]. Teplofizika Vysokikh Temperature, 1983, 21: 392-400.
- [18] PIORO I L, KHRTABIL H F, DUFFEY R B. Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels: empirical correlations (survey) [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 230(1/2/3): 69-91.
- [本刊相关文献链接]**
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统冷却特性研究. 2013, 47(5): 24-30. [doi:10.7652/xjtuxb201305005]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流动特性的研究. 2013, 47(3): 42-47 [doi:10.7652/xjtuxb201303008].
- 晏鑫, 李军, 丰镇平. 迷宫密封传热特性的数值研究. 2012, 46 (11): 1-5. [doi:10.7652/xjtuxb201211001]
- 杨珏, 张勇, 赵传奇, 等. 双排棒组件超临界水堆堆芯方案设计. 2012, 46(9): 78-82. [doi:10.7652/xjtuxb201209015]
- 张冬青, 杨冬, 刘计武, 等. 超临界循环流化床下降水冷屏流量分配特性试验研究. 2012, 46(5): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201205006]
- 申仲旸, 谢永慧, 张荻, 等. 不同球窝/球凸结构的旋转矩形通道传热及阻力特性研究. 2011, 45(11): 52-57. [doi:10.7652/xjtuxb201111010]
- 霍文浩, 祁明旭, 李军, 等. 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011, 45(7): 9-14. [doi:10.7652/xjtuxb201107003]
- 蓝吉兵, 谢永慧, 张荻. 微通道中球窝/球凸强化传热特性研究. 2011, 45(7): 89-94. [doi:10.7652/xjtuxb201107017]
- 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. 2011, 45(5): 6-11. [doi:10.7652/xjtuxb201105002]
- 赵振兴, 杨震, 刘宏, 等. 煤粉加压气化炉膜式螺旋管和蛇形管对流传热特性研究. 2011, 45(1): 10-14. [doi:10.7652/xjtuxb201101003]
- 卢欢, 杨冬, 周旭, 等. 超临界直流锅炉水冷壁压降及出口汽温计算. 2011, 45(1): 38-42. [doi:10.7652/xjtuxb201101008]
- 邓志安, 罗毓珊, 陈听宽, 等. 低质量流速垂直和倾斜并联内螺纹管两相流不稳定性研究. 2010, 44(1): 17-21. [doi:10.7652/xjtuxb201001005]

(编辑 荆树蓉)