

文章编号: 0258-0926(2017)02-0024-04; doi:10.13832/j.jnpe.2017.02.0024

类三角形堆芯子通道超临界水传热试验研究

徐维晖¹, 马自强¹, 王为术^{1*}, 崔强¹, 朱晓静², 路统¹, 毕勤成³

1. 华北水利水电大学热能工程研究中心, 郑州, 450011; 2. 大连理工大学能源与动力学院, 辽宁大连, 116024;
3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安, 710049

摘要: 针对超临界水冷堆 (SCWR) 堆芯垂直上升类三角形子通道, 开展超临界水的流动传热试验研究。反应堆堆芯类三角形子通道棒束直径为 8 mm、栅距比为 1.4。试验参数范围为: 热流密度 $q=200\sim 800\text{ kW/m}^2$ 、压力 $P=23\sim 28\text{ MPa}$ 、质量流速 $G=700\sim 1300\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 。分析了 q 、 P 和 G 等热工参数对超临界水传热特性的影响。试验结果表明: 超临界压力下, 壁面温度 T_w 随 q 和 P 的增加而升高, 传热系数峰值降低; 提高 G 能够强化超临界水的传热, G 增加, T_w 降低, 传热系数增大; 当 G 增大到一定的程度, 改变 G 对传热起到强化作用的效果不如在低 G 下显著; 当 q 达到 800 kW/m^2 时, 在大比热区, T_w 随焓值变化剧烈, 传热系数峰值不明显; 当 P 提高到 28 MPa 时, 大比热区的强化传热作用被削弱。

关键词: 超临界水; 三角形子通道; 传热特性; 试验研究

中图分类号: TK 124 文献标志码: A

Experimental Investigation on Heat Transfer of Supercritical Pressure Water Flowing in Sub-Channel with Triangle Distribution in Reactors

Xu Weihui¹, Ma Ziqiang¹, Wang Weishu^{1*}, Cui Qiang¹, Zhu Xiaojing², Lu Tong¹, Bi Qincheng³

1. Institute of Thermal Energy Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, 450011, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024, China;
3. National Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China

Abstract: Experimental investigation on the heat transfer and flow of supercritical pressure water flowing in the sub-channel of SCWR, which was simulated by a vertical triangular channel, was conducted at the pressures of 23~28 MPa, mass fluxes of 700~1300 kg/(m²·s) and heat fluxes on the inner wall surface of 200~800 kW/m². The corresponding diameter of the fuel rod is 8mm and the ratio of pitch to diameter is 1.4. The effects of heat flux, pressure and mass velocity on the heat transfer characteristics were analyzed. Experimental results showed that the wall temperature increases and the peak of heat transfer coefficient decreases with the increasing of the heat flux and pressure when other parameters remain unchanged. Improvement of mass velocity can enhance the heat transfer, which is characterized by the lower wall temperature and higher heat transfer coefficient. However the intensify effect of mass velocity on the heat transfer performance is not obvious when it reaches a certain level. The wall temperature varies dramatically with the increasing of the enthalpy and the peak heat transfer coefficient is much lower than that of the lower heat flux when the heat flux reaches 800 kW/m². And the enhanced heat transfer that usually appears in the large specific heat region is greatly weakened when the pressure rises up to 28 MPa.

Key words: Supercritical water, Triangular channel, Heat transfer, Experimental investigation

0 引言

GIF 多国机构对超临界水冷反应堆 (SCWR) 开展了基础研究^[1-3]。超临界水传热不存在汽-水

共存区, 在大比热区 [$c_p > 8.4\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$] 传热显著区别于亚临界沸腾传热^[4-5]。管径、管截面以及内壁上肋化结构明显影响超临界流体流动传热特性。带

收稿日期: 2016-07-05; 修回日期: 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51406026); 河南省高校科技创新团队支持计划(16IRTSTHN017); 河南省科技创新人才计划(154100510011)

作者简介: 徐维晖 (1981—), 女, 副教授, 现主要从事流体动力输送水力安全研究工作

*通讯作者: 王为术, E-mail: wangweishu@ncwu.edu.cn

定位格架 SCWR 燃料棒堆芯流道流动传热与超临界锅炉管显著不同。国内外研究者大多采用 CFD 技术研究棒束通道超临界传热特性^[6-8]。因水的临界压力高, 试验研究难度大, 针对 SCWR 非圆子通道的传热试验研究较少。Wu^[9]和 Yang^[10]分别针对不同结构的环形通道进行了一系列传热特性试验研究。Wang^[11-12]试验研究了垂直环形通道、 2×2 棒束通道超临界水传热, 并分析了定位格架和螺旋绕丝对流道传热特性的影响。

堆芯棒束子通道数值和试验研究证实了通道截面和工质物性对通道内超临界流体传热和流动特性影响显著, 为此, 王为术^[13]对 SCWR 堆芯类四边形通道内流动传热进行了试验研究。笔者以堆芯三角形布置子通道为试验研究对象, 对其内超临界水的传热特性进行分析, 研究结果可以为 SCWR 堆芯结构设计及安全分析提供参考。

1 试验系统及方法

1.1 试验回路

试验在如图 1 所示的西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室超临界水回路系统进行。以去离子水为工质, 经滤网和阀门由高压柱塞泵升压分为 2 路注入试验段。旁路系统调节流量和压力; 主回路系统中工质经过质量流量计后进入换热器, 吸收部分从试验段流出的高温工质的热量进行初次预热, 随后进入预热段被交流变压器加热达到试验段入口参数要求。工质自下而上流经试验段。采用交流电直接加热模拟堆芯燃料棒释热, 最后热流体经换热器和冷凝器冷却回到水箱完成循环。

1.2 试验参数

试验段采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢作为材质, 采用线切割技术加工成满足试验要求的截面结构。试验段结构和测点布置见图 2。试验选用堆芯棒径为 8 mm、栅距比为 1.4 的类三角形子通道模型; 试验段长度为 1000 mm, 水在试验段内垂直上升流动。流量测点布置在预热段前, 由精度为 0.1% 的质量流量计测量。系统压力和试验段差压是由精度为 0.075% 的 RoseMount3051 压力变送器和差压变送器测量, 以保证试验测量的准确性, 在试验开始前需要对变送器进行调零操作。试验段入口和出口各布置一个 $\phi 3$ mm K 型铠装热电偶用来测量试验段进出口工质温度。试验段外壁面布

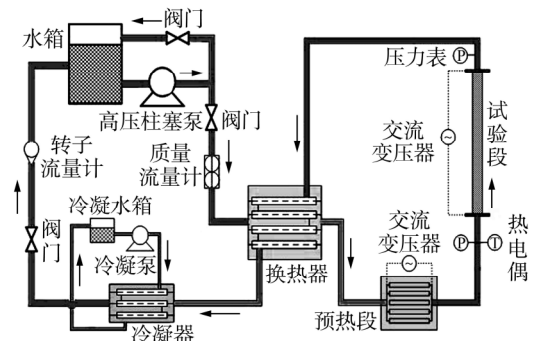


图 1 超临界水回路试验系统图

Fig. 1 Diagram of Supercritical Pressure Water Loop System

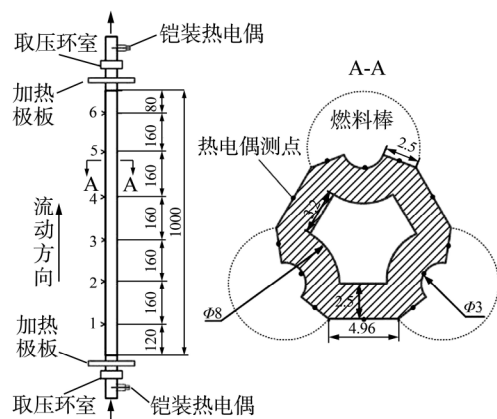


图 2 试验段结构及测点布置图

Fig. 2 Structure of Experiment Section and Measurement Point Arrangement

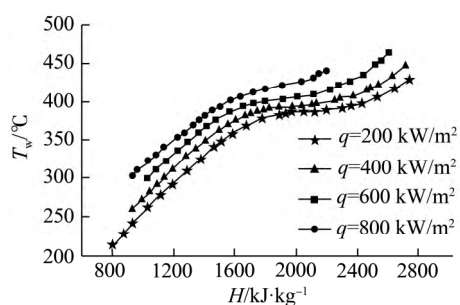
置有 $\phi 0.1$ mm NiCr-NiSi 热电偶丝对壁面温度进行测量。试验中所测得的参数均由 IMP3595 采集系统进行自动采集。

试验参数范围: 压力 $P=23$ 、 25 、 28 MPa; 热流密度 $q=200$ 、 400 、 600 、 800 kW/m²; 质量流速 $G=700$ 、 1000 、 1300 kg/(m²·s)。采用定热负荷法和变热负荷法相结合进行试验。

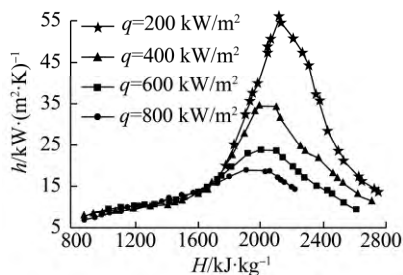
2 试验结果与分析

2.1 热流密度

图 3 为 $P=25$ MPa、 $G=1300$ kg/(m²·s) 条件下, q 对垂直上升类三角形子通道内壁面温度 (T_w) 和传热系数 (h) 的影响。由图 3a 可以看出, 在 P 和 G 一定的条件下, 随着工质流体焓值 (H) 的增加, T_w 变化经过 3 个阶段: 在远离大比热区的低焓值区和高焓值区, T_w 单调增加; 拟临界温度附近区域 T_w 平缓上升。随着 q 的增加, T_w 逐渐升高, 同时拟临界温度附近的平缓上升区域逐渐变短。由图 3b 可知, 在远离大比热区的低焓



a 内壁温度随焓值的变化



b 传热系数随焓值的变化

图3 热流密度对传热特性影响

Fig. 3 Effect of Heat Flux on Heat Transfer

值区, q 的变化对 h 影响不明显。在拟临界焓值附近, 随着 H 的增大, h 急剧增加至出现峰值, 存在传热强化区。同时随着 q 增加, h 的峰值会逐渐降低, 且 h 峰值对应的 H 向低焓值方向偏移。原因是 q 的增加, 会使径向温度梯度增大, 在较低的 H 下流动边界层达到拟临界温度。

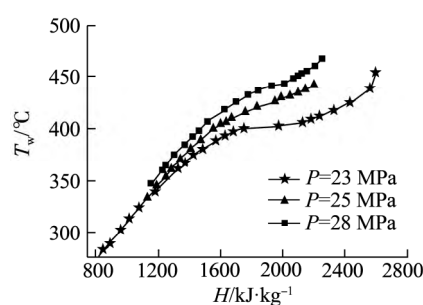
当 q 增加到 800 kW/m^2 时, T_w 随 H 几乎直线上升, 在拟临界温度区域温升速度较快, h 未见明显峰值, 表现出不同于低热流密度的变化趋势。这是由于在高热流密度下, 拟临界点附近壁面区域形成小密度流体层, 小密度流体层逐渐覆盖壁面, 从而阻碍试验段壁面与流体之间的对流换热, 导致传热强化效果逐渐减弱。从而使得在拟临界温度区域传热受到了明显的抑制, 并未出现低热流密度下的显著传热强化现象。

2.2 压力

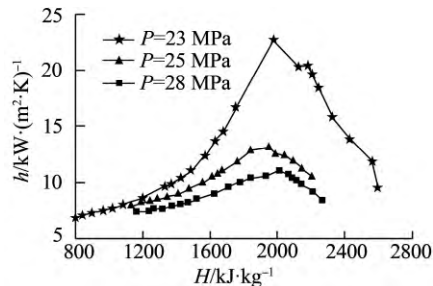
试验分别在 $P=23$ 、 25 、 28 MPa 超临界压力下进行研究, 分析总结了不同 P 下的超临界水传热特性。图 4 所示为 $q=600 \text{ kW/m}^2$ 、 $G=1000 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ 条件下, P 对类三角形通道内超临界水的传热特性影响。

从图 4 可以看出, 在远离大比热区的低焓值区, T_w 和 h 随主流体 H 变化的程度受 P 影响不大。

由图 4a 能够看出, 随 H 的增加, 在拟临界



a 内壁温度随焓值的变化



b 传热系数随焓值的变化

图4 压力对传热特性影响

Fig. 4 Effect of Pressure on Heat Transfer

温度附近, 试验段 T_w 随着 P 的增加而明显升高。由图 4b 能够看出, P 对 h 的影响主要体现在大比热区; 在这一区域, 随着 H 增加, h 先急剧升高之后又急剧降低, 出现一个 h 峰值, 即在大比热区域内出现了明显的强化传热现象。虽然在同一区域内出现最大传热系数, 但不同 P 下的具体位置却略有不同, 且 h 峰值出现的位置随着 P 的增加也相应提高。此外, P 越大, 相应的 h 峰值降低, P 从 23 MPa 增加到 28 MPa 时, h 峰值则从 $23.1 \text{ kW/(m}^2\cdot\text{K)}$ 降低到 $11.5 \text{ kW/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。这是因为随着 P 的提高, 拟临界焓值区超临界水的物性变化程度较低压力时有所缓和, 尤其比热变化非常明显; 因此提高 P 对大比热区的异常传热起到抑制作用。从这个角度讲, 提高 P 可增强系统的安全裕量, 对 SCWR 堆芯设计提供一定的参考价值。

2.3 质量流速

在 $P=25 \text{ MPa}$ 、 $q=400 \text{ kW/m}^2$ 情况下, G 对类三角形子通道内超临界水的传热特性影响曲线如图 5 所示。由图 5 中可以看出, 与 q 和 P 对超临界水的传热的影响不同, 提高 G 对加强子通道内的传热作用在整个焓值区都可以得到明显体现。在 q 和 P 一定条件下, 提高 G , 可以使 T_w 降低, h 显著增大。其强化传热作用机理可以从 2 方面解释, 首先由于流体流速的增加, 相应雷诺数增

大，惯性力作用增强，传热效果增强。其次， G 的提高，能明显增加湍流强度，增强流体扰动，达到传热强化。

由图 5a 还可看出， G 由 $700 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加到 $1000 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时， T_w 降低幅度较为明显。当 G 进一步增加至 $1300 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时， T_w 降低幅度有所减弱，说明当 G 增加到一定程度时，改变 G 对传热起到强化作用的效果不如在低质量流速下显著。

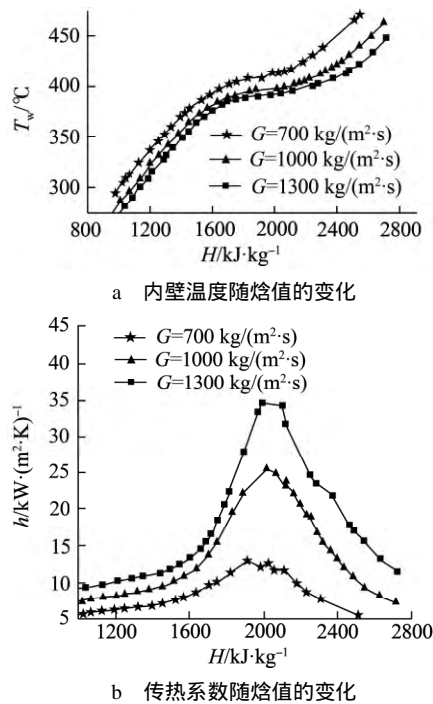


图 5 质量流速对传热特性影响

Fig. 5 Effect of Mass Velocity on Heat Transfer

3 结论

(1) 在大比热区， T_w 随着 q 的增加逐渐升高， h 则逐渐降低。当 q 增加到 $800 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时， T_w 随着 H 几乎呈直线上升，拟临界温度区域温升速度较快， h 未见明显峰值。

(2) P 对传热特性的影响主要在大比热区，在拟临界温度附近， T_w 随着 P 增加而明显升高，而 h 峰值随 P 的增加反而降低。

(3) 在整个焓值区，提高 G 能够明显强化类三角形子通道内的传热作用，尤其在拟临界温度附近强化作用更为明显。当 G 增加到一定程度时，改变 G 对传热起到强化作用的效果不如在低质量流速下显著。

参考文献:

- [1] Piroo I L, Duffey R B. Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications[M]. New York: ASME Press, 2007: 175-181.
- [2] Oka Y. Review of high temperature water and steam cooled reactor concepts[C]. Proceeding of SCR-2000, Tokyo, Japan, 2000.
- [3] Wu G, Bi Q C, Yang Z D, et al. Experimental investigation of heat transfer for supercritical pressure water flowing in vertical annular channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(9): 4045-4054.
- [4] Wang Jianguo, Li Huixiong, Guo Bin, et al. Investigation of forced convection heat transfer of supercritical pressure water in a vertically upward internally ribbed tube[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(10): 1956-1964.
- [5] Zhu Xiaojing, Bi Qincheng, Yang Dong, 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.
- [6] Jiang P X, Zhao C R, Shi R F, et al. Experimental and numerical study of convection heat transfer of CO_2 at super-critical pressures during cooling in small vertical tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(21-22): 4748-4756.
- [7] Yang J, Oka Y, Ishiwatari Y, et al. Numerical investigation of heat transfer in upward flows of supercritical water in circular tubes and tight fuel rod bundles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(4): 420-430.
- [8] Xiaojing Zhu, Shinichi Morooka, Yoshiaki Oka. Numerical investigation of grid spacer effect on heat transfer of supercritical water flows in a tight rod bundle[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 76: 245-257.
- [9] Wu G, Bi Q C, Yang Z D, et al. Experimental investigation of heat transfer for supercritical pressure water flowing in vertical annular channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(9): 4045-4054.
- [10] Yang Z D, Bi Q C, Wang H, et al. Experiment of heat transfer to supercritical water flowing in vertical annular channels[J]. Heat Transfer, 2013, 135(4): 676-709.
- [11] Wang Han, Bi Qincheng, Yang Zhendong, et al. Experimental and numerical study on the enhanced effect of spiral spacer to heat transfer of supercritical pressure water in vertical annular channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 48(15): 436-445.
- [12] Wang Han, Wang Weishu, Bi Qincheng, et al. Experimental study of heat transfer and flow resistance of supercritical pressure water in a SCWR sub-channel[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2015, 100: 15-25.
- [13] 王为术, 路统, 赵鹏飞, 等. 超临界水冷堆类四边形式子通道内超临界水的传热试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(20): 3356-3361.

(责任编辑: 刘君)