

文章编号：0258-0926(2014)06-0017-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2014.06.0017

超临界水冷堆类四边行子通道 亚临界水的传热试验研究

徐维晖¹，王为术¹，梁诚胜¹，路统¹，王汉²，王林川²，毕勤成²

1. 华北水利水电大学热能工程研究中心，郑州，450011；2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，西安，7100495

摘要：在压力为11~19 MPa，质量流速为700~1300 kg/(m²·s)，热流密度为200~600 kW/m²的工况范围内，对超临界水冷堆（SCWR）堆芯棒直径为8 mm，栅距比为1.2的类四边行子通道的传热特性进行试验研究。结果表明：热流密度对类四边行子通道管内的传热特性的影响显著，热流密度越高，传热恶化越容易发生；在较低的质量流速下，传热恶化发生可能性较大，质量流速较高时，对传热特性影响较小；压力对类四边行管内传热特性的影响明显，压力越高，传热恶化现象越易发生，且临界干度值越低，传热恶化所覆盖的焓值区域越大。

关键字：反应堆堆芯；类四边行子通道；传热特性；传热恶化

中图分类号：TL4 文献标志码：A

0 前言

超临界水冷堆（SCWR）是第四代核反应堆国际论坛提出的6种概念堆型之一，高效、安全、结构简单，可显著提高能源转换效率^[1-2]，其相关研究得到核技术大国的大力支持，SCWR概念设计预计到2025年可完成。中国与加拿大已针对堆芯通道传热特性合作开展了试验研究。

SCWR在超临界压力下运行，但在启堆、停堆过程和事故工况下，堆芯必然会处于亚临界区。亚临界水的传热可能出现偏离核态沸腾（DNB）和干涸两类传热恶化^[3]，因此堆芯通道亚临界区的试验研究十分必要。亚临界压力区水的传热特性研究主要针对光管和内螺纹管。内螺纹管可以有效抑制亚临界区DNB传热恶化，不同截面和管径的传热特性差别显著^[4-5]。目前针对SCWR子通道的传热特性分析计算，主要依靠CFD、RELAP以及各个试验室研发的数值程序进行数值模拟^[6-8]。

受试验技术的限制，针对SCWR子通道结构的研究非常少。笔者以SCWR堆芯子通道为对象，针对堆芯棒径为8 mm，栅距比（ P/D ）为1.2的类四边行子通道内沸腾传热特性进行试验研究，以期SCWR概念设计提供试验依据。

1 试验系统和方法

1.1 试验系统

试验回路系统见图1，试验工质（去离子

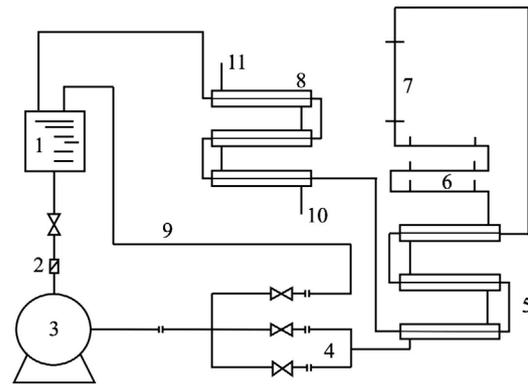


图1 试验系统流程图

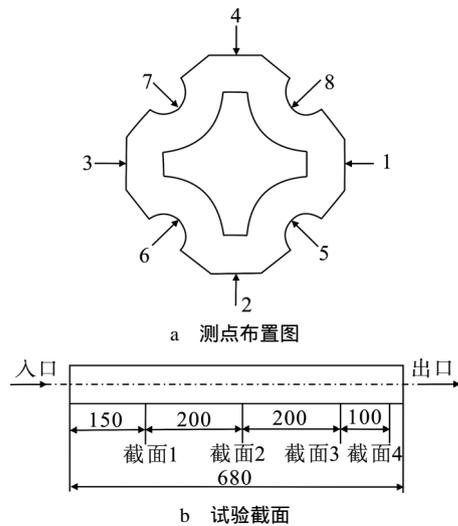
Fig. 1 Schematic Diagram of Experiment System

1—水箱；2—滤网；3—高压柱塞泵；4—孔板流量计及调节阀；5—高效再生式换热器；6—预热段；7—传热试验段；8—冷却换热器；9—旁路；10—冷却水进口；11—冷却水出口

水）由水箱经滤网过滤后，进入高压柱塞泵升压后分两路进入系统：一路为调节主路的流量和压力的旁路系统；另一路是试验主回路系统。在主回路系统中，工质经孔板流量计测量流量后，进入预热段加热至所需的流体参数，再输送至试验段进行试验，由试验段出来的高温流体经套管式换热器冷却后回到水箱。

1.2 试验段截面和温度测点布置

试验段截面形状和测点布置图，见图2。在680 mm长的试验段上设置4个截面，分别距入口150、350、550、650 mm，试验段的外壁温由24个NiCr-NiSi热电偶测得。



注:截面1测点布置:1,2,3,6,7,8;截面2测点布置:1,2,4,5,6,7;
截面3测点布置:1,3,4,5,6,8;截面4测点布置:2,3,4,5,7,8

图2 试验截面和测点布置图

Fig. 2 Structure of Test Section with Probe Locations

2 试验结果与分析

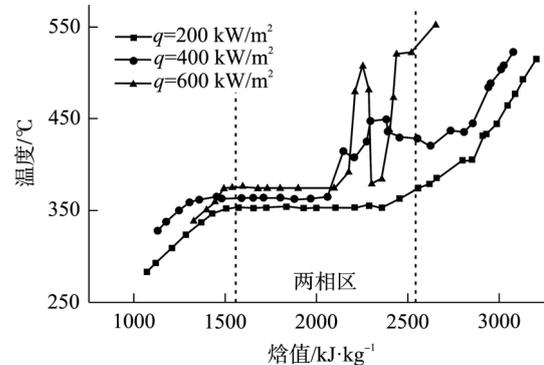
两相换热特性一直是传热研究领域最为重要的研究方向之一。尽管类四边形成管内形状和圆管相比较为复杂,但发生对流沸腾传热恶化仍可分为 DNB (发生在欠热区域低干度区的模态沸腾) 和干涸 (发生在高干度时) 2 类。为深入研究类四边形成管内流体在汽-液两相区以及汽液单相区的传热特性,分别分析热流密度、质量流速和压力对于内壁面温度的影响。

2.1 热流密度的影响

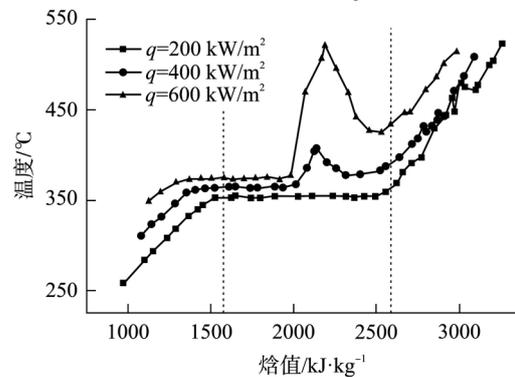
图3给出压力 P 为 15 MPa、质量流速 G 分别为 $700 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $1000 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 工况不同热流密度下类四边形成管内壁面温度与焓值的变化规律。由图可得,类四边形成管内壁面温度先单调增加,进入两相区以后,在低干度值时保持不变,在高干度值时则可能会导致粘附壁面的液膜蒸干,发生干涸传热恶化,随后在管内高速流动的雾状流的影响下内壁面温度有一个下降过程;然后进入过热蒸汽区,管内流体为单相气,内壁面温度又单调增加。

在图3a和图3b中,热流密度 q 为 $400 \text{ kW}/\text{m}^2$ 和 $600 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时都发生了干涸传热恶化,壁面温度急剧上升,临界干度都在 0.6 左右,且管内壁面温度最大值随着热流密度的增大而上升,在热流密度为 $600 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时壁温峰值 t_{\max} 达到 500 以上;而在热流密度为 $200 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时没有发生传热

恶化。这说明在相同的 P 和 G 下, q 越高,传热恶化越容易发生,发生传热恶化时的临界干度值差距不大。在整个焓值区域,管内壁面温度都随着 q 的增加而升高。



a $P=15 \text{ MPa}, G=700 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$



b $P=15 \text{ MPa}, G=1000 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

图3 亚临界区热流密度对类四边形成管内壁面温度的影响

Fig. 3 Effect of Heat Flux on Inner Surface Temperature at Subcritical Pressure

2.2 质量流速的影响

图4给出了 11 MPa、 $600 \text{ kW}/\text{m}^2$ 和 15 MPa、 $400 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时不同 G 下,类四边形成管内壁面温度和焓值的变化规律。

在图4a中,在 $G=700, 1000, 1300 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 三种情况下两相区内内壁面温度差距很小,都没有发生明显的传热恶化现象。而图4b中, $G=700 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时发生了特别明显的第二类传热恶化,粘附在壁面上的液膜被蒸干;在 $G=1000 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $1300 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时也发生了传热恶化现象,但不是很显著,内壁面温度有所上升,但上升的幅度不大。同时,随着管内 G 的增大,发生传热恶化时的工质临界干度值有所上升,即传热恶化被有效滞后。这说明,在相同的 P 和 q 下, G 越小,越容易发生传热恶化现象,发生传热恶化时的临

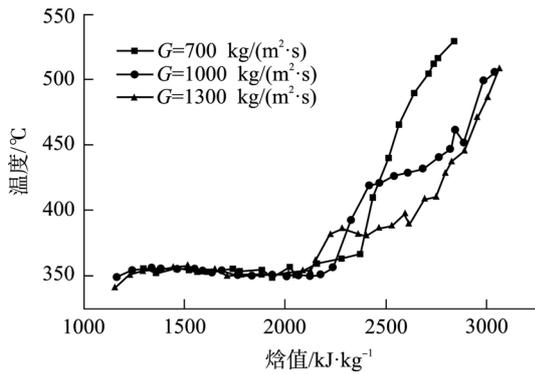
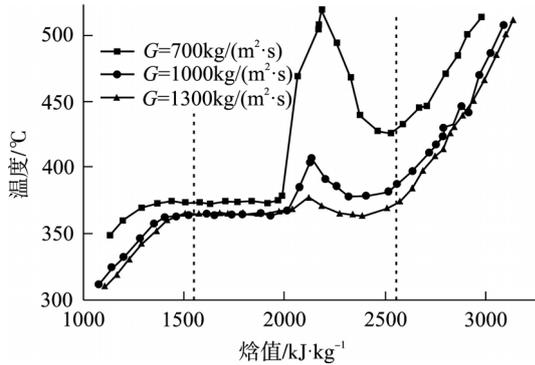
a $P=11$ MPa, $q=600$ kW/m²b $P=15$ MPa, $q=400$ kW/m²

图4 亚临界区质量流速对类四边形子通道内表面温度的影响

Fig. 4 Effect of Mass Velocity on Inner Surface Temperature at Subcritical Pressure

界干度值也越低；在两相区， G 对内表面温度的影响很小，管内壁面温度高于流体温度 10 左右；而在单相水和单相气区域，管内壁面温度随着 G 的增加而降低。因此，在给定的工况下， G 对管内传热特性的影响较为显著， G 越高，传热效果越好。

2.3 压力的影响

图 5 为 700 kg/(m²·s)、600 kW/m² 和 1000 kg/(m²·s)、400 kW/m² 以及 1000 kg/(m²·s)、400 kW/m² 时不同压力下类四边形子通道内表面温度随焓值变化曲线。

如图 5 所示，管内传热的都在 15 MPa 和 19 MPa 压力下发生了明显的干涸传热恶化，而在 11 MPa 时没有明显的传热恶化现象发生。这说明在相同的 G 、 q 和干度的情况下， P 越高，传热恶化越容易发生，且 P 越高，发生传热恶化的临界干度值越低，跨越的焓值区域也越广；这主要是因为 P 越接近临界压力，水的汽化潜热也越来越小，饱和蒸汽焓值也随之减小；在进入两相区以前的

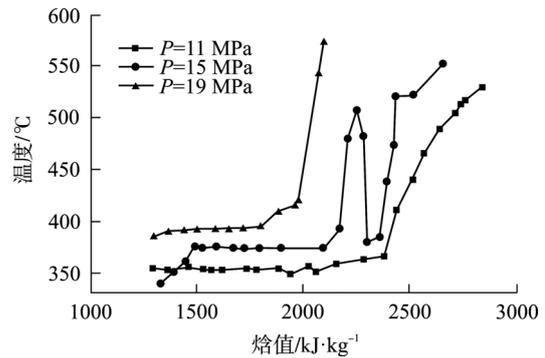
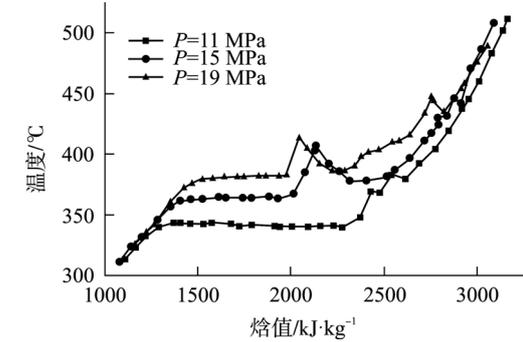
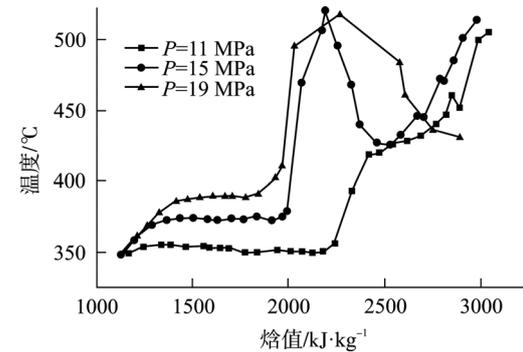
a $G=700$ kg/(m²·s), $q=600$ kW/m²b $G=1000$ kg/(m²·s), $q=400$ kW/m²c $G=1000$ kg/(m²·s), $q=600$ kW/m²

图5 亚临界区压力对类四边形子通道内表面温度的影响

Fig. 5 Effect of Pressure on Inner Surface Temperature at Subcritical Pressure

低焓值区域（单相水），不同 P 下内表面温度大致相等，在高焓值区域（单相气），管内壁温随 P 的升高而升高，主要由于水的饱和温度随 P 的升高而升高造成的。

3 结论

(1) 热流密度对类四边形子通道管内的传热特性的影响显著，热流密度越高，传热恶化越容易发生。因此，在反应堆各种工况中，一定要保证通道内各处热流密度小于其临界热流密度。

(2) 质量流速对管内传热特性的影响较为显

著,质量流速越高,传热效果越好;质量流速越低,越容易发生传热恶化现象,发生传热恶化时的临界干度值越高,传热恶化可以被高的质量流速有效滞后。

(3) 压力对类四边管管内传热特性的影响很大,越靠近临界压力,传热恶化现象越容易发生,压力越高,发生传热恶化的临界干度值越低,跨越的焓值区域也越广。

参考文献:

- [1] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum. A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems [R]. GIF-002-00. 2002.
- [2] 程旭, 刘晓晶. 超临界水冷堆国内外研发现状与趋势[J]. 原子能科学技术. 2008, 2(42): 167-172.
- [3] 林宗虎, 陈立勋. 锅内过程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [4] Kohler W, Kastner W. Heat transfer and pressure loss in rifled tubes[C]. Proceeding of 8th International Heat Transfer Conference, 1986: 2861-2864.
- [5] Kitto J B, Wiener M. Effects of no uniform circumferential heating and inclination on critical heat flux in smooth and ribbed bore tubes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1986,12:297-302.
- [6] Ambrosini W, Sharabi M. Assessment of stability maps for heated channels with supercritical fluids versus the predictions of a system code[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2007, 39 (5): 627-635
- [7] Cheng X, Kuang B, Yang Y H. Numerical analysis of heat transfer in supercritical water-cooled flow channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237: 240-252.
- [8] Zhu Y, Laurien E. Numerical Investigation of supercritical water cooling channel flows around a single rod with a wrapped wire[C]. In: Proc. ICAPP 10th, San Diego, California, USA, 2010.

Experimental Investigation on Heat Transfer Characteristics of Subcritical Pressure Water Flowing in Subchannel with Square Distribution in SCWR

Xu Weihui¹, Wang Weishu¹, Liang Chengsheng¹, Lu Tong¹, Wang Han²,
Wang Linchuan², Bi Qincheng²

1. Institute of Thermal Energy Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;
2. National Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 71049, Shanxi, China

Abstract: Within the pressure range from 11 to 19 MPa, mass velocity from 700 to 1300 kg/(m²·s), and inner wall heat flux from 200 to 1000 kW/m², experiments were performed to investigate the heat transfer characteristics of water flowing in subchannel with square distribution in SCWR. The subchannel was formed according to the fuel rods of the diameter 8 mm, and the pitch-to-diameter ratio was 1.2. The results show that the heat transfer characteristics of subcritical pressure water flowing in the subchannel with square distribution are significantly affected by the inner wall heat flux. Heat transfer deterioration more likely happens with higher inner wall heat flux. Heat transfer deterioration is more likely happened under low mass velocity, while it has little influence on the heat transfer characteristics at high mass velocity. The pressure has significant effects on the heat transfer characteristics. The higher pressure, the more likely the heat transfer deterioration occurred. The lower critical steam quality and the widely enthalpy region where heat transfer deterioration happen.

Key words: Reactor core, Subchannel with square distribution, Heat transfer characteristics, Heat transfer deterioration

作者简介:

徐维晖(1978—),女,副教授。2007年毕业于华北水利水电学院,获工学硕士学位。现主要从事流体动力输送研究。

王为术(1972—),男,教授。2006年毕业于西安交通大学,获工学博士学位。现主要从事多相流流动与传热学的研究。

梁诚胜(1984—),男,华北水利水电大学在读硕士研究生。现主要从事多相流流动与传热学的研究。

(责任编辑:张祚豪)