

套管管束式换热器换热特性试验研究^①

张伟杰^② 陈明辉 孔德春 厉日竹 扈玉民

(清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084)

摘 要 清华大学核能与新能源技术研究院对具有特殊结构的套管管束换热器(其传热单元由带螺旋肋片的外套管和带微波浪弯的内套管组成,通过自身结构实现传热管的支撑和定位)的换热特性进行了试验研究。试验结果表明,与一般流道的换热性能相比,不规则环形窄缝流道的换热系数不仅降低,而且随雷诺数的变化趋势也较平缓;外套管管间流道的换热系数降低,但变化趋势与普通流道相同。根据试验数据,采用分离系数法,拟合出了不规则环形窄缝流道和外套管管间流道的换热公式。

关键词 一体化轻水反应堆,套管管束式换热器,换热特性,分离系数法

0 引 言

套管管束式换热器具有结构紧凑的优点,适用于一体化轻水反应堆,研究其换热特性具有重要的工程应用意义。但国内在这方面的研究并不多。套管管束式换热器结构特殊,其传热单元由带螺旋肋片的外套管和带微波浪弯的内套管组成,通过自身结构实现传热管的支撑和定位。套管管束式换热器的设计解决了以下 3 个问题:(1)热工水力学设计。内外套管和环形窄缝使换热器形成了 3 个流道,一次侧流体在内套管管内和外套管管间双面加热环形窄缝的二次侧流体形成纯逆流换热,这与只有两个流道的一般管壳式换热器的设计方法完全不同,文献[1]给出了这种套管管束式换热器的总体设计方法。(2)并联流道的流量分配。一次侧流体在并联的内套管管内和外套管管间流动,其流量分配问题直接影响换热器的热工水力特性,进行合理的流量分配是设计高效套管管束式换热器的关键。为此,专门进行了流量分配试验并在文献[2]中描述了这个问题。(3)对特殊流道的换热特性进行试验。外套管外壁均布了 3 条纵向螺旋肋片,内套管在插入外套管的长度范围内均布了 4 个微波浪弯,一次侧流体纵向流过带螺旋肋片的外套管管间的换热特性与流过光管管束的换热特性有很大差别,二次侧流体流过不规则的环形窄缝的换热特性与流过均匀环

形窄缝的换热特性也不完全相同。研究外套管管间流道和不规则环形窄缝流道的换热特性是本文的重点。本文对双面加热的宽度为 1mm 的不规则环形窄缝流道的单相对流换热进行了研究,在试验范围内得到了不同于普通流道的换热特性。最近几年,刘瑞兰等人^[3]和孙中宁等人^[4]进行了单管环缝流道的换热特性研究,但试验雷诺数多集中在几百到几千范围内,对雷诺数大于 10^4 的情况却研究很少。其研究结果认为:环形窄缝流道与普通流道显著不同,没有明显的层流区、过渡流区和紊流区之分;环形窄缝流道的紊流明显提前。在纵流管束换热特性研究方面,Субботин 在 $s/d = 1$ (s 为管心距, d 为管子外径)的情况下试验结果只是 Михеев 公式的一半^[5],而在 $s/d = 1.4$ 的情况下试验结果比 Михеев 公式高 20% ~ 30%^[6]。Weisman 则根据试验数据拟合出换热特性准则关联式的系数与 s/d 的关系^[7]。

1 试验本体与试验台架

1.1 试验本体

套管管束式换热器试验本体由 19 根传热管组件、壳体和上下管箱等组成。传热管组件采用正三角形排列,管心距为 16.4mm。外套管基管的外径为 14.2mm,壁厚为 1.1mm,有效换热段高度为 1280mm。内套管的外径为 10mm,壁厚为 1mm,总长度为 1600mm。

^① 国家“211”工程建设资助项目。

^② 男,1983 年生,硕士;研究方向:反应堆用换热器试验研究;联系人, E-mail: zhangwj05@mails.thu.edu.cn (收稿日期:2007-11-21)

如图1所示,试验本体由3个流道组成:外套管管间流道(简称管外流道),内套管管内流道(简称管内流道)和环形窄缝流道(简称环缝流道)。为解决外套管和内套管的支撑和定位问题,采用了一种特殊结构。外套管之间通过3条纵向螺旋肋片相互接触固定,其螺旋肋片高度1.1mm,宽度1mm。内套管则在中部1200mm长度内均匀弯制了4个用于支撑定位的微波浪弯,波峰幅值6mm,插入外套管内对内套管起支撑和定位作用。

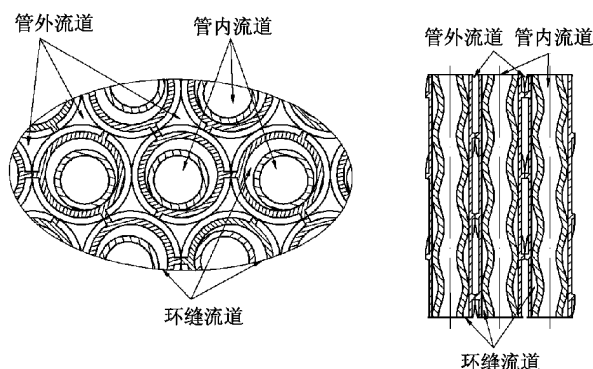
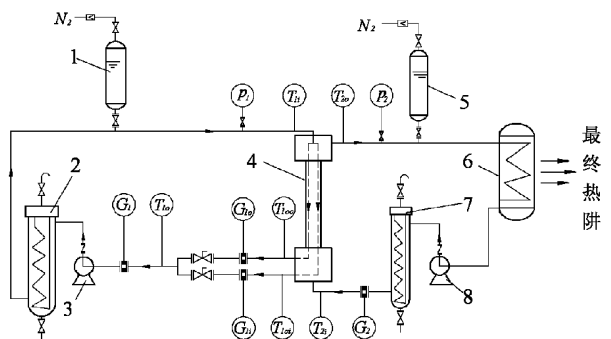


图1 试验本体流道示意图

1.2 试验台架

试验台架流程如图2所示,由3个回路组成。试验本体的管外流道、管内流道及相关设备组成一回路;试验本体的环缝流道及相关设备组成二回路;三回路为最终热阱。一回路单相水在离心泵的驱动下流经加热器,加热到试验要求范围,然后在试验本体的内套管管内和外套管管间自上而下流动,双面加热自下而上流动的二回路单相水,实现纯逆流换热。



1:一回路稳压阀;2:一回路电加热器;3:一回路循环泵;4:试验本体;5:二回路稳压阀;6:二回路换热器;7:二回路电加热器;8:二回路循环泵;

图2 试验台架流程图

温度由铂电阻温度计测量,误差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$;压力由压力变送器测量,精度0.1级;流量由孔板流量计测量,相对不确定度为1.5%。传热系数相对不确定度小于10%。该试验装置可进行温度 300°C 和压力6.4MPa以下的热工流体试验。

2 传热试验结果

套套管束式换热器传热系数是通过直接测量一、二回路的温度、压力和流量得到的。为了便于研究换热器3个流道的换热特性,尤其是研究环缝流道和管外流道的换热特性,传热试验不仅得到了总传热系数 K ,而且分别得到了内套管传热系数 K_i 和外套管传热系数 K_o 。试验研究了固定在不同二次侧(环缝流道)雷诺数条件下,3个传热系数随一次侧雷诺数的变化。试验结果表示在图3-图5中。对3个图进行比较可以看出,在相同流道雷诺数下,外套管传热系数低于内套管传热系数。

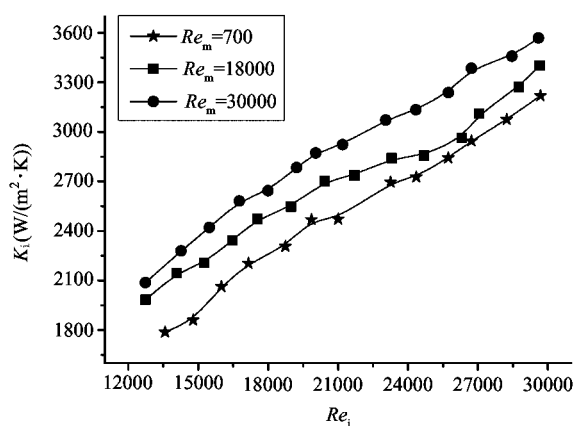


图3 内套管传热系数随雷诺数变化

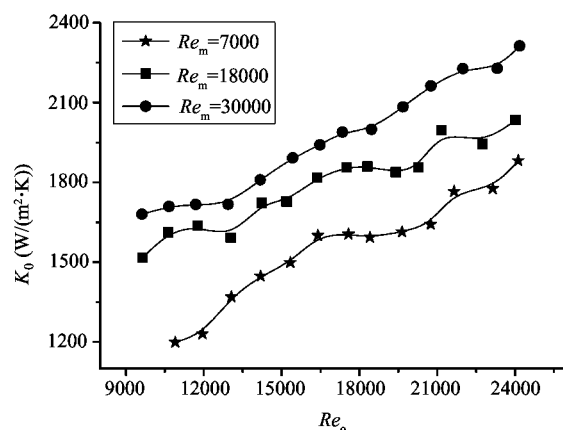


图4 外套管传热系数随雷诺数变化

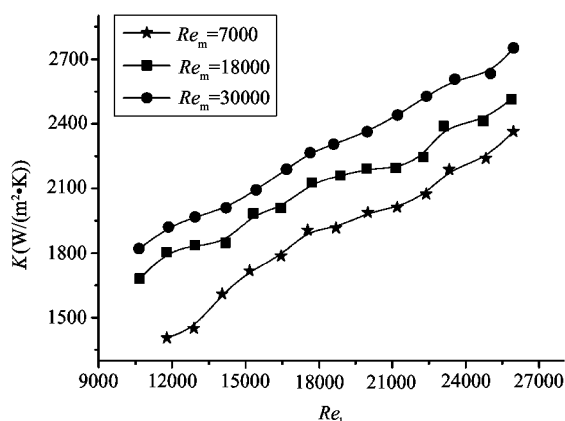


图 5 总传热系数随雷诺数变化

3 环缝流道和管外流道的换热特性

3.1 数据整理方法

与一般单管本体的换热试验不同,套管管束式换热器试验本体由 19 根结构紧凑的套管组件组成,且工作在高温高压下,不便直接测量内外套管的壁温。要得到环缝流道和管外流道的换热系数,只能通过测得的内外套管的传热系数和已知一个流道的换热特性采用分离系数法求得。具体方法如下:

1) 计算内外套管传热系数。内外套管传热系数 K_i 和 K_o 可根据试验数据由式

$$K_i = \frac{G_i(h_{ii} - h_{io})}{F_i \Delta T_{mi}} \quad (1)$$

$$K_o = \frac{G_o(h_{oi} - h_{oo})}{F_o \Delta T_{mo}} \quad (2)$$

求得。

2) 计算管内流道换热系数。内套管的微波浪弯幅度与管长相比特别小,所以可看成普通圆管。保持管内流道流体雷诺数大于 10^4 ,流体与壁面温差小于 30°C ,由 Dittus-Boelter 公式求得其换热系数:

$$Nu_i = 0.023 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.3} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \lambda_i}{de_i} \quad (4)$$

3) 计算环缝流道换热系数。在加热环缝流道的二回路水时,管外、管内流道流体入口温度相同,出口温度相差较小,可以近似认为内外传热管的壁温相同,根据内套管传热系数 K_i 和内套管换热系数 α_i 分离出环缝流道换热系数 α_m :

$$\alpha_m = \frac{1}{\frac{1}{K_i} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{d_i}{2\lambda_{iw}} \ln \frac{d_i}{d_{im}}} \cdot \frac{d_i}{d_{im}} \quad (5)$$

$$Nu_m = \frac{\alpha_m de_m}{\lambda_m} \quad (6)$$

4) 计算管外流道换热系数。根据外套管传热系数 K_o 和 α_m 分离出管外流道换热系数 α_o :

$$\alpha_o = \frac{1}{\frac{1}{K_o} - \frac{1}{\alpha_m} \frac{d_o}{d_{om}} - \frac{d_o}{2\lambda_{ow}} \ln \frac{d_o}{d_{om}}} \quad (7)$$

$$Nu_o = \frac{\alpha_o de_o}{\lambda_o} \quad (8)$$

式中: G 为质量流量 (kg/s); h 为比焓 (J/kg); F 为传热面积 (m^2); ΔT_m 为对数温差 (K); λ 为导热系数 ($\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$); de 为当量直径 (m)。下标 i 表示内套管, o 表示外套管, ii 和 io 分别表示内套管进口、出口, oi 和 oo 分别表示外套管进口、出口, m 表示窄缝流道, im 表示内套管外侧, om 表示外套管内侧, iw 和 ow 则分别表示内套管管壁和外套管管壁。

3.2 环缝流道换热特性分析

环缝流道换热特性试验的雷诺数范围为 5000 ~ 30000,普朗特数范围 0.8 ~ 1。图 6 示出了试验值与适用于此范围的 Gnielinski 公式计算值的比较。结果表明,本试验得到的环缝换热特性完全不同于适用于普通流道的 Gnielinski 公式。随着雷诺数的增加,换热特性越来越偏离 Gnielinski 公式。由于环缝很窄,在旺盛紊流区,湍流流体微团的横向脉动量和不规则漩涡运动受到抑制。另外,由于内套管的微波浪弯,使紧贴外套管内壁的部分的管壁堵死了部分流道,减少了换热面积,使换热特性更加弱化,所以内套管的结构应考虑改进。由试验数据拟合公式为:

$$Nu_m = 1.2 Re_m^{0.33} Pr_m^{0.4} \quad (9)$$

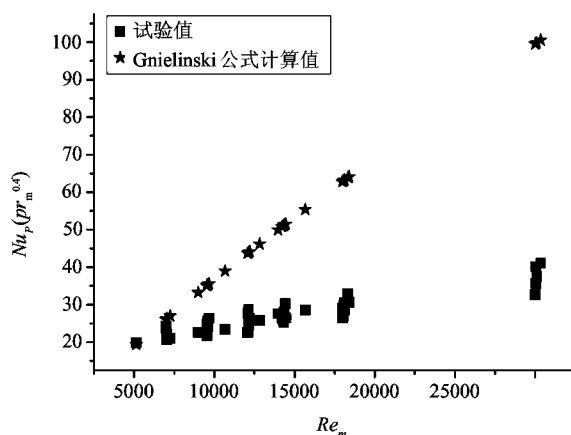


图 6 环缝流道试验值与 Gnielinski 公式比较

3.3 管外流道换热特性分析

管外流道换热特性试验的雷诺数范围为 10000 ~ 25000,普朗特数范围为 0.8 ~ 1。图 7 示出了试验

值与适用于此范围的 Михеев 公式计算值的比较。结果表明,管外流道的 Nu 比 Михеев 公式计算的 Nu 小,但随着雷诺数的增加其变化趋势与 Михеев 公式相同。换热性能降低的原因是在肋片接触点及相邻处间距过小,使湍流流体微团的横向脉动分量和不规则的漩涡运动受到抑制。由试验数据得到的拟合公式为:

$$Nu_o = 0.015 Re_o^{0.8} Pr_o^{0.43} \quad (10)$$

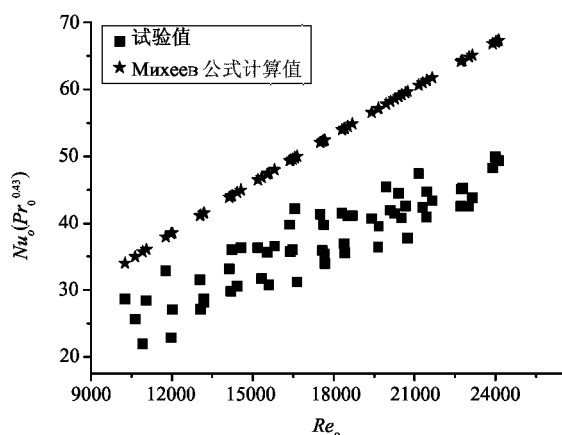


图7 管外流道试验值与 Михеев 公式比较

4 结论

本文对特殊结构的套管管束式换热器进行了试验,得到了该结构换热器的传热性能曲线。对双面加热的宽度为 1mm 的不规则环缝流道的单相对流换热进行了研究,在试验范围内得到了不同于普通

流道的换热特性,对研究双面加热环形窄缝单相对流换热机理有重要学术意义,对改进套管管束式换热器结构,发展用于一体化反应堆的换热器具有一定的工程意义。另外,本文所研究的带螺旋肋片的、小间距的外套管管束间的换热特性不同于正常间距的光管管束的结果也有重要的学术意义和工程意义。

参考文献

- [1] 陈明辉,厉日竹,何晓艳等.一体化核反应堆套管管束式换热器设计与试验.清华大学学报(自然科学版),2006,46(12):2065-2068
- [2] 刘俊强.一体化反应堆用套管管束式换热器热工水力特性试验研究:[硕士学位论文].北京:清华大学核研院,2007
- [3] Liu R L, Su G H, Qiu S Z, et al. Experimental investigation on single-phase convection heat transfer in annular gap. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer, Xi'an, China, 1999. 680-685
- [4] 孙中宁,阎昌琪,谈和平等.双侧加热窄环隙流道强迫对流换热.核动力工程,2002,24(3):33-36
- [5] Субботин В И, Ушаков И А, Габриэлов В Н. Теплообмен при течении ртути и воды в плотно упакованном пучке стержней. Атомная Энергия, 1960, 9(6): 461-469
- [6] Субботин В И, Ушаков П И, Жуаков А В. Исследование теплообмена при продольной обтекании волюй пучка стержней с относительным шагом $s/d = 1.4$. И. Ф. Ж., 1961, 4(3): 3-9
- [7] Weisman J. Heat transfer to water flowing parallel to tube bundles. Nuclear Science and Engineering, 1959, 6(1): 78-79

An experimental study on the heat transfer characteristics of a double-tube bundle heat exchanger

Zhang Weijie, Chen Minghui, Kong Dechun, Li Rizhu, Hu Yumin

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

The experimental study on a double-tube bundle heat exchanger with a special type of structure (Its heat transfer assembly consists of an external tube with lengthways spiral fins and an internal tube with microwave bends and implements supporting and positioning through the structure) was conducted in the Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University. The results show that compared with an ordinary flow path, an anomalous narrow annulus reduces the heat transfer and its heat transfer coefficient has little relation with the Reynolds number. The heat transfer performance of the flow path between external tubes is depressed, however its disciplinary is the same as an ordinary one. Based on the experimental data, a heat transfer formula of the flow path of anomalous narrow annulus and the flow path between external tubes is given by using the coefficient partition method, respectively.

Key words: integral light water reactor, double-tube bundle heat exchanger, heat transfer characteristics, coefficient partition methods