

螺旋折流板波槽管换热器换热性能实验研究

赫荣辉^{*},¹ 孙中宁²

(1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术国家级重点实验室, 成都 610213;
2. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要:以水为工质,对弓形折流板光管换热器、螺旋折流板波槽管换热器以及螺旋折流板光管换热器进行了传热实验。结果表明,螺旋折流板波槽管换热器具有良好的换热能力,螺旋角对螺旋折流板换热器壳程换热影响较大。与折流板数量为 14 个和 5 个的弓形折流板光管换热器相比,螺旋角为 9.8°的螺旋折流板光管换热器的壳程换热系数分别提高了 4% ~ 60% 和 5% ~ 70%;螺旋角均为 9.8°的螺旋折流板波槽管换热器与螺旋折流板光管换热器相比,前者的壳程换热系数和管程换热系数分别提高了 2% ~ 26% 和 60% ~ 120%;与螺旋角为 9.8°的波槽管换热器相比,螺旋角为 6°和 8°的波槽管换热器的壳程换热系数分别提高 13% ~ 48% 和 5% ~ 37%。

关键词:换热器;对比;强化换热;光管;波槽管;螺旋角

中图分类号:TK124 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2015.05.013

Experimental Investigation on Heat Transfer of Helical Baffle Heat Exchanger with Wave-groove Tubes

HE Ronghui^{*},¹ SUN Zhongning²

(1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213;

2. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: With water be the working medium, a series of heat transfer experiments have been performed on embowed baffle heat exchangers with smooth tubes, helical baffle heat exchangers with wave-groove tubes, and helical baffle heat exchangers with smooth tubes. The results shows that helical baffle heat exchanger with wave-groove tubes has good heat transfer performance, and spiral angle on the shell side of helical baffle heat exchanger with wave-groove tubes heat transfer effect is larger. Compared with segmental baffle heat exchanger with smooth tubes and 14 embowed baffle plates, as and 5 embowed baffle, the shell side heat transfer coefficient of helical baffle heat exchanger with smooth tubes of which the helical angle are both 9.8° is improved 4% ~ 60% and 5% ~ 70%. Besides, comparing the helical baffle heat exchanger with wave-groove tubes and the one with smooth tubes, of which the helical angle are both 9.8°, the heat transfer coefficient of shell side of the former is improved 2% ~ 26% compared to that of the latter, and the heat transfer coefficient of tube side of the former is improved 60% ~ 120% compared to that of the latter. Moreover, for the heat exchangers with wave-groove tubes, of which the the helical angle is 6° and 8°, the heat transfer coefficient of shell side respectively improved 13% ~ 48% and 5% ~ 37% compared to that of which the helical angle is 9.8°.

Key words: heat exchanger; comparison; strengthen heat transfer; smooth tube; wave-groove tube; helical angle

1 引言

管壳式换热器由壳程和管束组成,是换热器的一种常见的结构型式,以其高度的可靠性广泛应用于各工业领域。传统的管壳式换热器通过在管束上安装弓形折流板来达到强化换热的效果。螺旋折流板换热器是近年来出现的一种结构型式,在强化传热的同时,还能有效降低壳侧的流动阻力,引起了越

来越多研究者的关注,目前现有文献大多是针对采用光管的螺旋折流板换热器进行研究^[1-6],文献[7]对螺旋折流板波槽管换热器进行了实验研究,证实了螺旋折流板和波槽管结合可使换热能力得到进一步加强,但缺乏对采用不同螺旋角的波槽管换热器的研究。

为了研究螺旋折流板波槽管换热器的强化换热效果以及螺旋角对换热性能的影响,本文以单相水为工作介质,对三种不同螺旋角的全螺旋折流板波槽管换热器和两种弓形折流板光管换热器以及一种螺旋角的全螺旋折流板光管换热器进行了传热实验

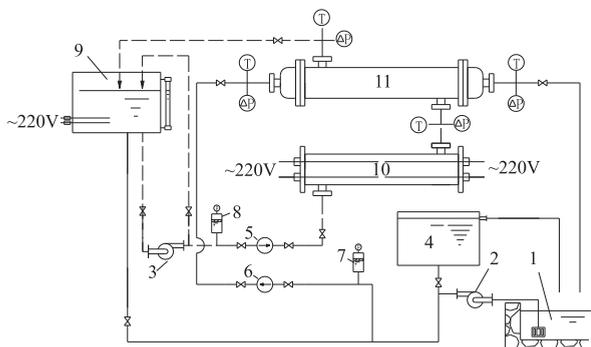
2015-04-02 收稿,2015-05-14 接受

* 通讯作者, E-mail: heronghui007@163.com

研究。

2 实验装置及实验体

本文的实验装置见图1,图中实线部分为冷却回路,虚线部分为加热回路。在冷却水泵的驱动下冷却水由冷却水箱进入实验体换热器的管程,在与壳程热水进行热交换后流入冷水池。加热水箱初始充水由冷却水泵完成。加热完成后,热水在热水循环泵的驱动下,经过预热器进入实验换热器壳侧,完成换热后流回加热水箱。实验中,预热器持续运行,以保证壳程入口热水温度的恒定,换热器管、壳程温度分别由铠装热电偶测量,换热器管、壳程流量由涡轮流量计测量。

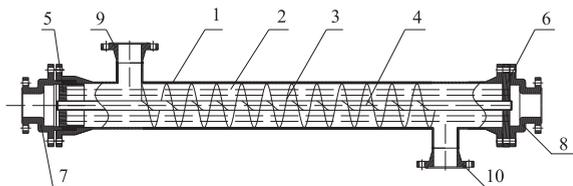


1.冷水池; 2.冷却水泵; 3.热水循环泵; 4.冷却水箱; 5.6.涡轮流量计; 7.8.稳压器; 9.热水箱; 10.预热器; 11.实验体

图1 实验装置示意图

实验体为一管壳式换热器,结构示意图如图2所示(以连续螺旋折流板波槽管管束换热器为例)。采用在同一壳体内依次插入不同结构型式的实验管束进行换热性能实验。为了验证连续螺旋折流板波槽管换热器管程和壳程的换热性能,本文对以下三类管束进行了实验:

- (a) 连续螺旋折流板波槽管管束;
- (b) 连续螺旋折流板光管管束;
- (c) 弓形折流板光管管束。



1.壳体; 2.传热管; 3.连续螺旋折流板; 4.芯管; 5、6.管板; 7、8.封头; 9、10.壳程进、出口接管法兰

图2 换热器实验体示意图

上述管束均采用相同的正方形的传热管排列方式、传热管尺寸为 $\Phi 14\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、传热管根数为 36 根,传热管材料为 B30。管束(a)中的传热管采用波

槽管(详见文献[8]),折流板螺旋升角采用 6° 、 8° 、 9.8° 三种角度。管束(b)的折流板螺旋升角为 9.8° 。管束(c)采用 14 个和 5 个折流板两种型式。

3 实验数据处理

管束平均总换热系数按式(1)确定。

$$\bar{K} = \frac{\bar{Q}}{(A_o \cdot \Delta t_m)} \quad (1)$$

式中, \bar{Q} 为热水放热量与冷水吸热量的算术平均值, kJ ; Δt_m 为对数平均温差, K ; A_o 为管束外表面积, m^2 。

由于实验体采用的波槽管和光管都是新管,且管束安装前进行了充分的清洗,故不考虑污垢热阻,壳侧平均对流换热系数 h_o 由式(2)求出。

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} - \frac{d_o}{2\lambda_w} \ln \frac{d_o}{d_i}} \quad (2)$$

式中, d_i 、 d_o 分别为管内、壳侧的当量直径, m ; λ_w 为管壁导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。其中壳侧的当量直径按式(3)确定。

$$d_o = \frac{D^2 - (n + m)d_{oo}^2}{D + (n + m)d_{oo}} \quad (3)$$

式中, D 为换热器壳体内径, m ; n 为传热管根数; m 为拉杆根数; d_{oo} 为传热管外径, m 。

管内平均对流换热系数用 D - B 公式^[9]及 Nu 的定义式求得

$$h_i = 0.023 \left(\frac{\lambda}{d} \right) Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (4)$$

式中, λ 为流体的导热系数, $w/(m \cdot K)$; d 为传热管内径, m ; Re 、 Pr 分别为雷诺数和普朗特数,其定义及计算方法详见文献[9]。

4 实验结果分析

4.1 壳程传热实验结果与分析

图3给出了两种弓形折流板光管换热器和螺旋角为 9.8° 的螺旋折流板光管换热器壳程对流换热系数随 Re 数的变化曲线,由图可以看出两种弓形折流板换热器的换热性能差异不大,但与螺旋折流板式换热器差距明显。在实验的雷诺数范围内,螺旋折流板光管换热器壳程的换热系数分别是弓形折流板数量为 14 个和 5 个的光管换热器的 1.04 ~ 1.6 和 1.05 ~ 1.7 倍。

螺旋折流板光管换热器与弓形折流板光管换热

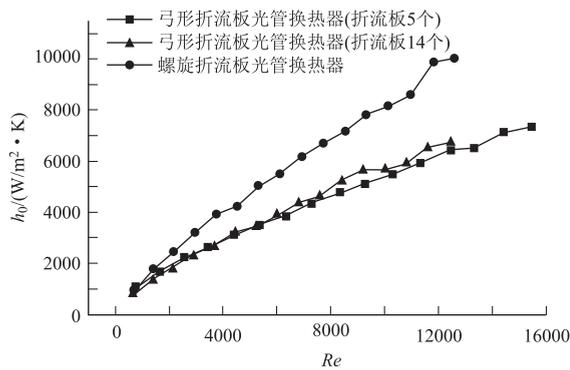


图3 弓形折流板光管换热器和全螺旋折流板光管换热器壳程换热系数对比

器结构的主要差异为折流板型式的差异。流体流过弓形折流板壳程时,在折流板的截流作用下流动轨迹表现为直线流动和断续流动交互进行,在靠近弓形折流板附近时,流动发生了紊乱,断续流动具有一定的局部强化换热作用。折流板数量多时,断续流动表现更加显著。

当流体流过螺旋折流板换热器壳程时,在螺旋折流板的作用下,流动轨迹由壳程入口的直线型流动变为螺旋型流动。螺旋型流动与断续流动相比对管壁的冲刷作用更加明显。螺旋流动的速度向量可以分解为沿管轴方向及垂直于管轴方向。沿管轴方向的分量使流体沿管轴向前流动,垂直于管轴方向使流体呈旋转绕管束壁面流动。垂直轴方向的流动加剧了流体对管束的冲刷,从而破坏了传热边界层使其减薄,达到强化换热的作用。

图4给出了螺旋角均为9.8°的全螺旋折流板光管换热器和全螺旋折流板波槽管换热器壳程对流换热系数随Re数的变化曲线,由图可以看出波槽管换热器换热性能均稍好于光管换热器。螺旋折流板波槽管换热器壳程的换热系数是螺旋折流板光管换热器的1.02~1.26倍。

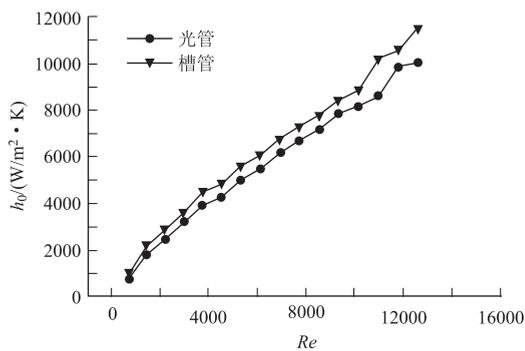


图4 螺旋折流板波槽管换热器与螺旋折流板光管换热器壳程换热系数对比

图4所述两种换热器结构的差别是传热管型式不同。连续螺旋折流板波槽管换热器所采用的波槽管的结构型式见图5,波槽管在压制成型后外表面形成规则的波浪形。流体流过传热管表面时,随着传热管表面的形状做波浪式流动,流体被扰动,削薄了边界层的厚度,从而使换热得到强化。

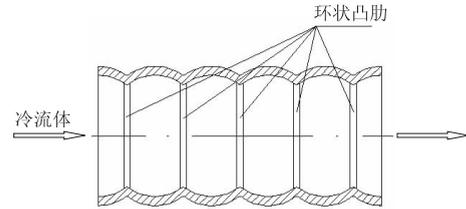


图5 波槽管内环状凸肋示意图

4.2 管程传热实验结果与分析

两种弓形折流板光管换热器以及螺旋折流板光管换热器的管程结构完全相同,三种螺旋角的螺旋折流板波槽管换热器管程结构也完全相同,仅对螺旋角为9.8°的折流板波槽管换热器和光管换热器管程换热性能进行对比。由对比图(图6)可以看出,波槽管换热器的管程对流换热系数明显高于光管换热器的管程换热系数。在实验的雷诺数范围内,波槽管换热器管程的换热系数是光管换热器的1.6~2.2倍。

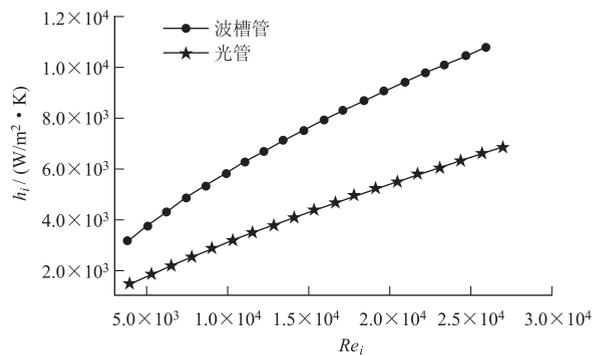


图6 螺旋折流板波槽管换热器和螺旋折流板光管换热器管程换热系数对比曲线

流体流过光管换热器管程时,流体呈规则的直线型流动。波槽管在压槽成型过程中在管内壁面形成环状凸肋(见图5),当流体流过波槽管管内时,在环状凸肋的局部截流作用下流体流动方向由直线形变为波浪形。波浪形的速度向量可以分解为沿管轴线和垂直于管壁两个方向,沿管轴线的向量使流体保持向前移动,而垂直于管壁的向量使流体对管壁形成冲刷,从而使近壁面处流动发生紊乱,削薄了传热边界层,从而达到强化换热的作用。

4.3 螺旋角对壳程换热影响分析

为了比较不同螺旋角对壳程换热的影响,进行了螺旋角为 6° 、 8° 、 9.8° 三种折流板波槽管换热器壳程换热性能对比实验。由对比图(图7)可以看出,随着螺旋角度的增加壳程换热系数呈下降趋势。在实验的 Re 数范围内,螺旋角为 6° 和 8° 的波槽管换热器壳程的换热系数分别是螺旋角为 9.8° 的波槽管换热器的1.13~1.48倍和1.05~1.37倍。

小螺旋角折流板换热器壳程换热性能好的原因是由于螺旋折流板改变了壳程流体的流场特性,流体进入壳程后随着折流板做螺旋形流动,小螺旋角导致了流程得到一定程度的增加,同时加剧了对管壁的冲刷,从而达到强化换热的效果。

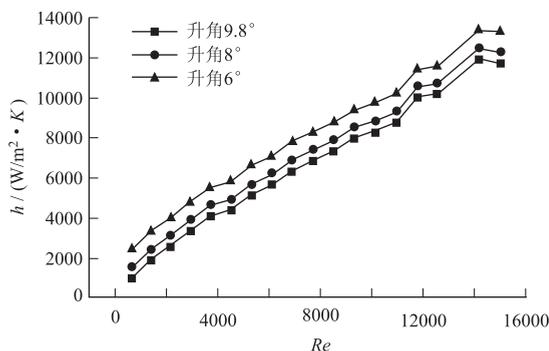


图7 3种螺旋角的折流板波槽管换热器壳程换热系数对比

5 结论

通过对两种弓形折流板光管换热器、一种全螺旋折流板光管换热器和三种螺旋角的全螺旋折流板波槽管换热器的传热实验研究,可以得到以下结论:

1)螺旋折流板波槽管换热器无论是壳程还是管程均具有良好的换热性能。在实验的 Re 数范围内,螺旋折流板光管换热器壳程的换热系数分别是弓形折流板数量为14个和5个的光管换热器的1.04~1.6和1.05~1.7倍;螺旋角均为 9.8° 的螺旋折流板波槽管换热器与螺旋折流板光管换热器相比,前者的壳程换热系数是后者的1.02~1.26倍,管程换热系数则是1.6~2.2倍。

2)螺旋角对螺旋折流板换热器壳程换热有一定的影响。螺旋角为 6° 和 8° 的波槽管换热器壳程的换热系数分别是螺旋角为 9.8° 的波槽管换热器的1.13~1.48倍和1.05~1.37倍。

参考文献

- [1] 高晓东. 螺旋折流板换热器试验研究[D]. 西安:西安交通大学, 1999.
- [2] 刘宗宽. 螺旋折流板换热器传热与阻力性能研究[D]. 西安:西安交通大学, 2000.
- [3] 刘建, 张正国, 高学农, 等. 螺旋折流板与弓形折流板强化管换热器的传热性能对比[J]. 压力容器, 2011(3):12-15.
- [4] 高晓东, 冯霄. 双螺旋结构螺旋折流板换热器实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2007, 21(4):547-549.
- [5] 吴国辉, 黄渭堂. 断续螺旋折流板在管壳式换热器中的应用[J]. 应用科技, 2005, 32(4):45-47.
- [6] 曾敏, 彭波涛, 喻澎清, 等. 连续螺旋折流板换热器传热与阻力性能实验研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(1):102-106.
- [7] 李建华, 孙中宁, 吴国辉. 螺旋折流板波槽管换热器换热与阻力实验研究[J]. 应用科技, 2006, 33(8):65-67.
- [8] 黄渭堂, 阎昌琪, 孙中宁. 一种新型波槽换热管[P]. 中国专利: ZL03244999.2, 2004-08-18.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 1998.