

文章编号:1671-6833(2013)04-0077-04

一种带状支撑的纵流壳程换热器热力特性分析

王永庆, 靳遵龙, 郭晓迪, 雷佩玉, 郭月明

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:以纵流壳程换热器作为研究对象,对一种带状支撑纵流壳程换热器的壳程流体流动与传热特性进行了数值研究与分析.基于纵流壳程换热器的特性,建立了带状支撑结构的计算模型,对其流体流动与传热进行了数值计算,得到了壳程流场和温度分布等细观信息.对带状支撑换热器在不同几何参数及工况情况下的热力性能进行了综合分析,并将其特性与折流杆式支撑壳程特性进行了对比分析.研究表明,在相同的流动条件下,带状支撑结构壳程内,流体具有较强的湍动度,增大了换热效果.

关键词:换热器;纵向流;带状支撑结构;热力特性

中图分类号: TK172 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.018

0 引言

换热设备是化工、炼油、动力、食品、轻工等许多工业部门广泛使用的一种通用设备.虽然换热设备种类繁多,但管壳式换热器具有制造容易,生产成本低,选材范围广,清洗方便,适应性强,处理量大,工作可靠,且能适应高温高压的一系列优点,使用范围最广^[1-2].近年来,新型壳程支撑形式的换热器不断涌现^[3],纵流壳程换热器受到越来越多的关注,纵流壳程换热器是指通过管束支承结构来代替传统的折流板支承结构,使壳程流体主要呈纵流方式流动的一类换热器^[2,4-5],由于其壳程流体纵向冲刷管束,与管程流体实现了近似完全逆流,有效温差大,传热死区小,且支承结构对壳程流体扰动强,传热效率高,也有效地防止了流体横向冲刷管束时引起的流体诱导振动.

对纵流壳程换热器的进一步深入研究,是当前的重要课题,尤其对换热器壳程中的流体流动与传热过程进行分析与研究有助于开发可靠、高效、经济的换热器结构.采用数值模拟方法对换热器进行细观分析与研究,是对实验与理论研究的一个有益补充,促进了换热器的进一步发展^[6].

笔者对一种带状支撑纵流壳程换热器的壳程流体流动与传热特性进行了研究与分析,得到了

壳程流场和温度分布等细观信息,对其在不同几何参数及工况情况下的热力性能进行了综合分析,并将其特性与折流杆式支撑壳程特性进行了对比.

1 模型的建立

纵流壳程换热器壳程内部结构复杂,工业应用中换热器的结构尺寸过于庞大,如采用数值模拟方法对整个换热器壳程进行模拟,受计算机软硬件条件的限制,难以得到较为准确可靠的结果.

1.1 壳程模型的建立

纵流壳程换热器壳程结构中除壳程壳体对其附近的流体流动与传热有较大的影响外,内部远离壳体的支承结构具有的对称重复性以及流体在壳程离开进出口段的流动具有周期性.在模拟计算中将整个壳程简化为周期性单元流道模型.

换热器的壳体直径远大于换热管直径,在壳程横截面上,壳壁附近的流动对整个壳程中心主流区域的影响较小,且由于流动基本上呈现纵流状态,流体在径向上的速度分量相对较小,因此符合对称性简化的要求;换热器壳程长度较大,流体进入壳程后,除了在入口和出口处受进出口的影响流动状况变化较大以外,在其余的整个壳程空间,受壳程结构周期性的影响,流体流动在充分发展后,呈现出一定的周期性,符合周期性简化的

收稿日期:2013-02-20;修订日期:2013-05-20

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2011M501187);河南省基础 Research 计划资助项目(122300410046)

作者简介:王永庆(1979-),男,河南林州人,郑州大学讲师,博士,主要从事传热强化与节能技术研究,E-mail:wangyq@zzu.edu.cn.

要求.因此,周期性单元流道模型可以较为有效地反映纵流壳程换热器壳程内流体流动的特性^[7].带状支撑纵流壳程换热器的壳程周期性单元流道模型如图 1 所示. L_b 为支撑间距,一个周期性单元流道长度取 $2L_b$.

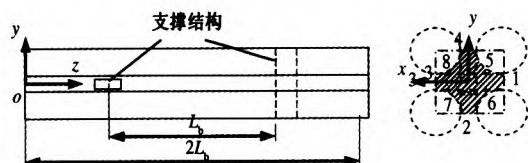


图 1 周期性单元流道模型

Fig.1 Periodic fluid flow unit model

图 1 中,面 1,2,3,4 设置为对称面,面 5,6,7,8 为计算模型中的换热面,对应于管壁面,流道的两个端面为周期性面,流体沿 z 轴正向先后经过两个垂直排布的支撑结构.在周期性模型中,压力可由压力梯度来表征,压力梯度可理解为单位长度的压力降,其定义为:

$$\Delta p = \frac{p(x, y, z) - p(x, y, z + s)}{s} \quad (1)$$

1.2 模型的正确性验证

采用冷模实验验证有关数值模型的正确性.本实验采用 LDV 测量某些关键点的流速.

根据实验数据,横截面中横向的流体流速 v 比轴向的流速 u 小两个数量级,因此可以把单元流道的边界面设置成对称面.

采用郑州大学热能工程研究中心计算关联式^[2]和 Phillips 石油公司计算关联式^[5],验证折流杆换热器壳程传热系数数值结果,对壳体直径为 1 000 mm 的换热器,在 Re 数为 10 000 和 15 000 两种情况下,数值计算结果与关联式计算结果, Nu 数误差均小于 10%. 以上流动与传热的验证结果表明,周期性单元流道模型可以用来计算纵流壳程换热器的壳程特性,并且具有较高的精度与准确性.

1.3 研究结构壳程计算模型

建立带状支撑纵流壳程换热器的壳程周期性单元流道模型如图 2(a) 所示,为与传统杆式支撑壳程特性相对比,建立相应杆式支撑壳程模型如图 2(b). 模型中,换热管外径为 25 mm,排列方式为正方形布管,中心距 32 mm.

检查节点数和网格质量后,在 FLUENT 中选用离散求解器和标准 $k-\varepsilon$ 模型,打开能量方程,并在边界条件中作如下设置:设置介质为水,将管壁温度设置为 400 K,将介质的入口温度设置为

307 K,边界条件中壁面为标准无滑移壁面,周期性条件中设置单元流道内的流量,压力速度的耦合采用 SIMPLE 算法,动量和能量离散方程求解均采用二阶迎风格式.

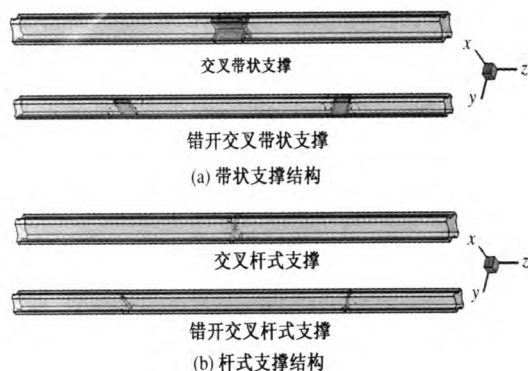


图 2 数值计算模型

Fig.2 Numerical calculation model

2 计算结果与分析

2.1 流体流动与传热分析

支撑间距 L_b 为 750 mm,单元流道内的流体的当量 Re 数为 20 000 时的相交交叉带状支撑结构中,周期性单元模型中间横截面上的支撑结构附近速度矢量图如图 3 所示.

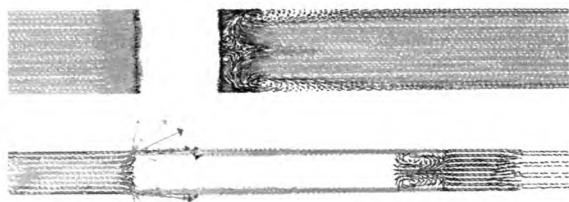


图 3 中间横截面的速度矢量图

Fig.3 Velocity vectors on middle cross section

从图 3 中看出,经过支撑板以后,在横截面上速度分布沿 z 轴有很大程度混合,但流道中心处的流速总的来说较周边低.在同一个横截面上从模型周边到中心处,也存在一个压力梯度.流体经过支撑板时,随流通面积的突然减小,流体以高速流出,在壁面出存在回流现象.由于回流和漩涡的存在,高速流体区域逐渐向流道中心发展,并逐渐达到均匀,碰到下一个支撑板,开始新一轮变化,如此周而复始.

流体在经过周期性单元流道周期模型一个周期段过程中的温度变化如图 4 所示.支撑部件的管间区域,由于流速较高,传热速度较快;经过支撑板之后,由于回流的作用加速了管壁附近流体和该区域流体的混合,也带动了后方高温流体的

回流,该部分流体温度升高较快.随着流动传热的继续发展,传热速度下降,各横截面上的温度分布逐渐趋于均匀,直至接近下一个支撑结构.整个流道内的流体温度沿 z 方向逐渐升高.

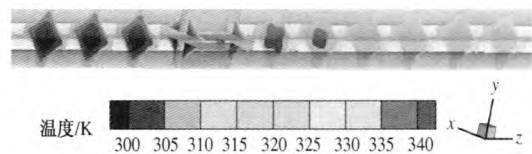


图 4 沿 z 方向不同截面的温度分布云图
Fig.4 Temperature contours on sections along z axis

2.2 不同工况下的热力分析

在同样的质量流量下,随着支撑间距的增大,压降减小,传热系数降低,压降随支承的增大下降的幅度很大,而传热系数的下降较缓.在当量 Re 数为 15 000 时的压降和传热效果随支撑间距变化见图 5. 且在同样的支撑板间距下,随着质量流量的增大,传热系数增大,压降增大,在相同支撑间距下传热效果和压降均随流体质量流量的增大而增大.

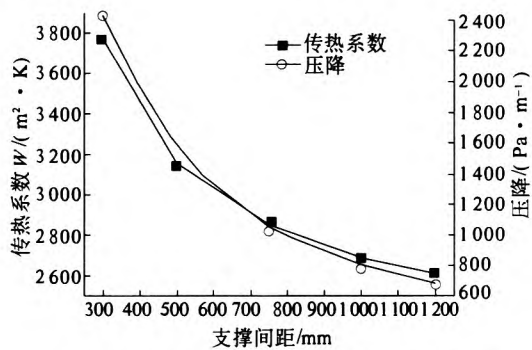


图 5 压降和传热效果随支撑间距变化图
Fig.5 Heat transfer coefficient and pressure gradient changes with baffle pitch

在同样的支撑板间距下,两种壳程支撑结构方式导致了不同的传热效果和压降大小.在相同支撑间距不同支撑结构方式下传热效果和压降随流体质量流量变化见图 6 和 7. 由图可知,在相同条件下,相交交叉带状支撑结构的传热系数较大,同时压降也较大.

2.3 综合性能分析

实验和理论研究中发现管内对流换热的强化往往以阻力的增加为代价,因此有必要对管内强化对流方式下的传热和流动阻力的综合热力性能进行评价.

Webb 提出强化流道与光滑直管的直观、明确的评价指标^[7-8],即①相同换热面积和泵功条件下,强化流道与光管的换热量之比;②相同换热面积和换热量条件下,强化流道与光管所耗的泵

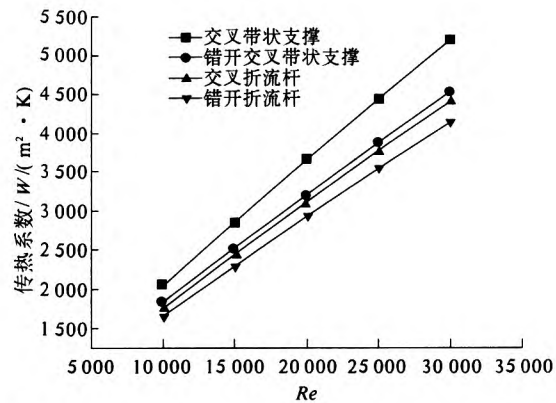


图 6 不同支撑结构方式下传热系数随 Re 数变化图
Fig.6 Heat transfer coefficient changes with fluid flux

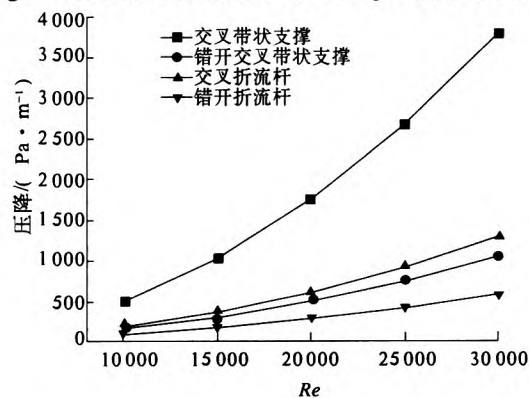


图 7 不同支撑结构方式下压降随 Re 数变化图
Fig.7 Pressure gradient changes with fluid flux

功之比;③相同泵功和换热量条件下,强化流道与光管所需的换热面积之比.在此,对本文所有简化模型选择单位面积、单位泵功上的传热量作为热力性能评价的衡量指标.

流体流过换热段所需泵功为

$$P=A\Delta p\cdot u. \tag{2}$$

式中: $A,\Delta p$ 分别为计算模型中换热管截面积和换热段压降.

以交叉带状支撑结构为对比基准,在数值模拟计算结果下不同结构方式支撑下的热力性能如图 8 所示.在笔者研究雷诺数范围内,在 Re 数小于 15 000 时,热力性能降低幅度较大, Re 数大于 15 000 时热力性能降低趋势趋于平缓.

相同条件下,单位面积、单位泵功的传热量错开交叉折流杆最高,这表明:在本论文研究范围内,两种支撑结构在两种放置形式下,错开折流杆具有较好的综合性能.

3 结论

(1)在同样流速及支撑间距下,传热系数最大的是相交交叉带状支撑结构,同时压降最大的也是相交交叉带状支撑结构.流体通过相交交叉

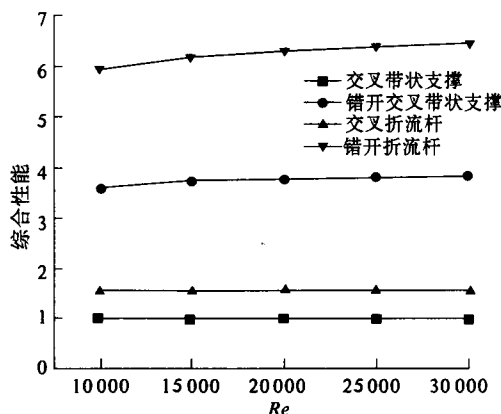


图8 不同支撑结构单位面积单位泵功上的传热量对比
Fig.8 Compare of heat transfer quantity per area and pump power for different structure

带状支撑结构时,沿换热壁面形成高速流,流速较其它结构大,形成较强的湍流效果,增大了传热效果,同时也带来了很大的压力损失。

(2)相交交叉杆式支撑只在折流杆相交的区域形成高速流,对换热面的直接影响相对较小,换热面附近的低速流虽有漩涡,但强度较小,因此换热面的对流换热效果不如错开杆式支撑。

(3)杆式支撑的壳程空隙率大,支撑结构下的流体流动压力降要比带状支撑结构小的多,通过杆式支撑的扰流作用,流体形成了较大的湍流度,而且其衰减速度较慢,因此综合热力性能优于带状支撑。

参考文献:

[1] SUN Hai-yang, QIAN Cai-fu. Study of the heat trans-

fer and flow resistance of large and small hole (LASH) baffle heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54:536-540.

[2] 董其伍,刘敏珊. 纵流壳程换热器[M]. 北京:化学工业出版社,2006.

[3] ZHANG Jian-fei, LI Bin, HUANG Wen-jiang, et al. Experimental performance comparison of shell-side heat transfer for shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and segmental baffles [J]. Chemical Engineering Science. 2009, 64:1643-1653.

[4] KAKAÇ S, LIU H T. Heat exchangers: Selection, rating and thermal design [M]. Florida: CRC Press, 2012.

[5] GENTRY C C. RODbaffle heat exchanger technology [J]. Chemical Engineering Process. 1990, 86(7):48-57.

[6] DONG Qi-wu, WANG Yong-qing, LIU Min-shan. Numerical and experimental investigation of shellside characteristics for RODbaffle heat exchanger[J]. Applied thermal engineering. 2008, 28:651-660.

[7] 吴慧英,程惠尔,周强泰. 基于 Webb 指标的管内强化对流换热性能的计算及应用[J]. 上海交通大学学报. 1999, 33(3):377-379.

[8] WEBB R L. Principles of Enhanced Heat Transfe [M]. New York: Wiley & Sons, 1994.

Analysis of Thermodynamic Characteristics in Shell Side of a Shell-and-tube Heat Exchanger with Ribbon Support

WANG Yong-qing, JIN Zun-long, GUO Xiao-di, LEI Pei-yu, GUO Yue-ming

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The shell-and-tube heat exchanger with longitudinal fluid flow in shell side was selected as the research object. The characteristics of fluid flow and heat transfer in shell side of shell-and-tube heat exchanger with a ribbon support structure were studied numerically. Based on the characteristics of fluid flow and heat-transfer in shell side of heat exchanger, the periodic unit duct model was presented and adopted in the numerical calculations for heat exchanger. The detailed information of the fluid flow and temperature field were obtained. The thermodynamic characteristics in shell side of the ribbon support structures with different parameters were analyzed comprehensively. In addition, the characteristics were compared with that of rod baffle heat exchanger, another heat exchanger with longitudinal fluid flow in shell side. It is concluded that in the same condition, in shell side with a ribbon support structure, fluid is of bigger turbulent intensity, which enhances heat transfer.

Key words: heat exchanger; longitudinal fluid flow; ribbon support structure; thermodynamic characteristics