

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.012

换热器入口段结构优化设计^{*}

周思杭¹, 彭翔²

(1. 杭州中车车辆有限公司, 浙江 杭州 310019;

2. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对换热器内部流动不均匀性、换热性能恶化的问题,对换热器的封头和导流片等入口段结构设计进行了研究,提出了换热器入口段结构与流动不均匀性的关联分析方法。通过对封头内部流动进行了CFD仿真分析,确定了导流片倾斜角、高度比等结构参数对流动不均匀性、换热损失的影响,建立了封头结构参数、导流片结构参数与换热效率间的关联模型。最后以换热损失最小为设计目标,进行了传统封头、二次型封头、改进二次型封头这3种形式入口段结构的参数优化设计。研究表明:改进二次型封头的内部流动不均匀性最小、换热效率最高,是换热器最佳入口段结构。

关键词:换热器;封头;流动不均匀性;导流片;CFD

中图分类号:TH122;TF066.2⁺1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)12-1427-05

Optimization method of entrance structure in heat exchanger

ZHOU Si-hang¹, PENG Xiang²

(1. CRRC. Hangzhou Co., Ltd., Hangzhou 310019, China;

2. Key Lab. of E&M., Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the flow nonuniform and deteriorative performance in the heat exchanger, study on the unreasonable structure design of inlet header and deflector was carried out. An optimization design method of entrance structure was proposed to decrease the flow nonuniformity. Firstly, the flow of the internal header was analyzed using CFD simulation method, and the flow uniformity under different structure parameters of deflector were calculated. Then the correlation model among structure parameters of inlet header and deflector, thermal efficiency of heat exchanger was constructed. Finally, three types of entrance structure were optimized to decrease the heat loss of heat exchanger as traditional inlet header, modified inlet header, and second modified inlet header. The results indicate that second modified inlet header is the best head type.

Key words: heat exchanger; inlet header; flow no-uniformity; deflector; CFD

0 引言

由封头与导流片组成的入口段是超大型板翅式换热器中重要的分流装置。入口段结构设计的不合理是导致换热器内部流动不均匀性、进而导致换热效率降低的关键,且随着板翅式换热器的大型化、换热器尺寸增加,进入入口段的流体的横向流动增加、速度分布不

均匀度增加,且存在一定的涡旋流动和回流,板翅式换热器的流动不均匀性进一步加剧。因此,如何进行入口段结构的设计,是降低超大型板翅式换热器流动不均匀性的关键之一。

国内外学者围绕这一问题做了大量的研究:ZHANG^[1-2]提出了两种改进型二次封头来减少入口段流动不均匀性;WEN^[3]构建了具有均匀交错小孔挡板

的封头,有效改善了换热器入口段的流动不均匀性;JUNG^[4]设计了翅片横向旁通结构,减少入口流动不均匀性对换热器热力学性能的影响;CHU^[5]比较了具有倾斜挡板、弓形折流挡板、螺旋折流挡板、改进螺旋折流挡板等 4 种不同挡板结构的封头内部流动不均匀性,发现具有等间距螺旋折流挡板的封头结构在四者中换热性能最佳;SINGH^[6]指出封头结构参数与工况参数对换热器内部流动不均匀性有重要影响,通过封头结构的优化设计、工况与结构参数的匹配设计可以有效改善换热器内部流动不均匀性;SAID^[7]提出了孔结构、喷嘴结构改善封头内部流动不均匀性,使用孔结构后,流动不均匀性降低到传统封头的 1/12,使用喷嘴结构后,流动不均匀性降低到传统封头的 2/15;焦安军^[8,9]研究了入口管管径、一次封头出口当量截面直径和二次封头出口当量截面直径三者之间的关系,以及它们对板翅式换热器内部物流分配的影响,发现当量直径比为 1 时,板翅式换热器截面物流分配最为均匀。

入口段流动不均匀性是封头和导流片结构综合影响的结果,而现有的研究常常进行封头或者导流片的独立研究,既开展了面向温度均匀性、流速均匀性的封头结构优化设计,又开展了面向流动不均匀性最小的导流片结构参数优化设计,但缺少封头和导流片结构与流动不均匀性的关联设计,没有综合考虑入口段结构参数对流动不均匀性、甚至换热损失的影响。

针对该问题,本文提出换热器入口段结构与流动不均匀性关联分析方法。

1 换热器封头内部流动仿真分析

换热器的入口段结构如图 1 所示。

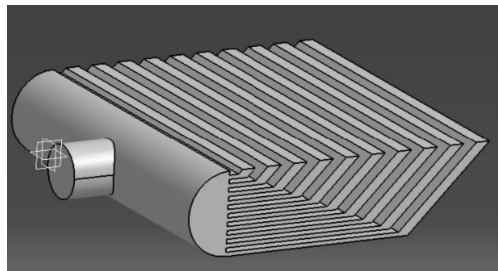


图 1 换热器的入口段结构

封头由一个水平半圆柱流道和一个竖直圆柱流道相贯而成。其主要结构尺寸为:入口管直径 200 mm、封头瓜皮式结构半径 80 mm、长 1 250 mm。

笔者研究的主要问题是封头结构对流动不均匀性的影响。不计算温度场,只计算封头内部的流动分布

情况。采用常温 20 ℃ 水作为工质,设定水的密度 ρ 、黏度 μ 、定压比热容 C_p 等物性参数为常数。流体以均匀的入口速度进入封头,经过封头后端进入导流片中。封头内部的整个流动区域处理为稳态的湍流流动。

本研究将 Catia 中构建的封头几何模型导入 Gambit 中进行自由网格划分,网格大小设置为 8,整个模型网格数为 25 346 个。将划分后的网格导入 Fluent 中进行流动仿真求解,封头入口设置为速度入口 $v = 2.5 \text{ m/s}$,出口设置为流量出口 outflow,壁面条件:四周墙体绝热,无速度滑移。紊流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter, Turbulent Intensity = 1%; Hydraulic Diameter = 0.5 m。收敛条件设置为残差绝对值小于 10^{-5} 。

换热器封头内部的流体流动属于三维稳态常物性不可压缩湍流流动,并且忽略体积力,因此计算模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,采用有限体积法离散控制方程,速度与压力耦合采用 SIMPLEC 算法,收敛条件为残差绝对值小于 10^{-5} 。本研究利用交错网格技术求解各个变量。

经过流动仿真分析,传统封头内部的速度幅值分布如图 2 所示。

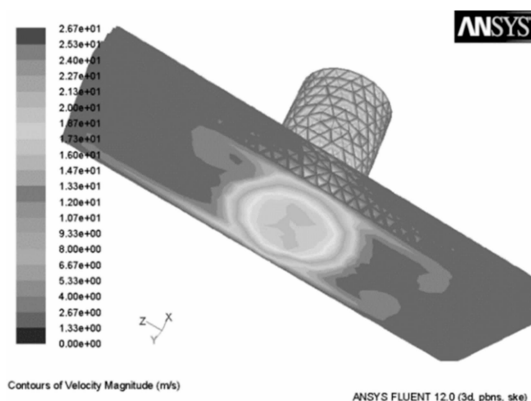


图 2 传统封头内部速度幅值分布

压力分布如图 3 所示。

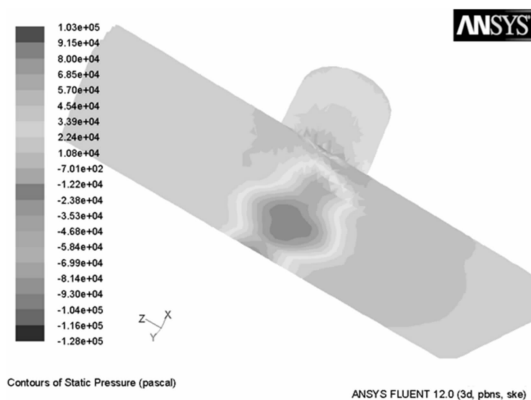


图 3 传统封头内部压力分布

标准封头计算结果与焦安军的实验结果基本一致,验证了模型的有效性。

2 导流片结构参数与流动不均匀性间关联模型构建

2.1 流动不均匀性表征

反映入口段内部流动不均匀性的指标有很多种,本研究使用导流片出口速度的标准差 S 进行入口段流动不均匀性的定量表征。

导流片出口流体进入 N 个翅片通道,将每个翅片通道在横向上均匀划分为 M 个,根据 CFD 仿真分析结果确定的出口速度分布,计算 $N \times M$ 个区域的导流片出口速度 v_i ,并进行换热器入口段流动不均匀性的定量表征:

$$S = \frac{1}{N \times M - 1} \sqrt{\sum_{i=1}^{N \times M} \left(v_i - \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^{N \times M} v_i \right)^2} \quad (1)$$

2.2 导流片结构参数与流动不均匀性的敏感度分析

导流片的结构型式如图 4 所示。

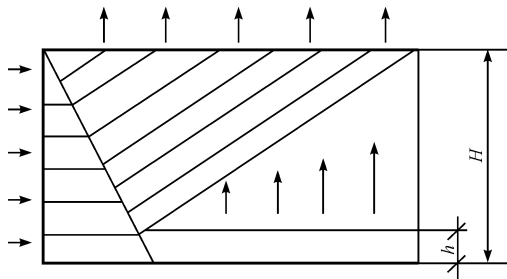


图 4 导流片结构

h —导流片底座高度; H —导流片整体高度; α —导流片倾斜角

为了研究不同导流片倾斜角 α 、结构参数 h/H 对流动不均匀性的影响,本研究在 Catia 中建立了不同的倾斜角($\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ 和 60°) 和不同的结构参数($h/H = 0, 0.1$ 和 0.2) 的几何模型,使用 Gambit 进行网格模型构建和 CFD 进行流动仿真分析。使用同样的方法,进行不同封头直径 d 、导流片高度比 h/H 、质量流量 G 等结构与流动参数下的换热器入口段流动不均匀性仿真分析。

首先本研究确定了封头和导流片结构参数与流动不均匀度 S 的单因素敏感度曲线,而后根据入口段参数与不均匀度 S 的单因素敏感度分析结果,以不均匀度 S 最小为设计要求,构建了雷诺数 Re 与质量流量 G 、入口封头水力直径 d 的关联关系图,如图 5 所示。

进而笔者建立了不均匀度 S 与封头水力直径 d 、导流片高度比 h/H 、入口质量流量 G 间关联设计模型,如图 6 所示。

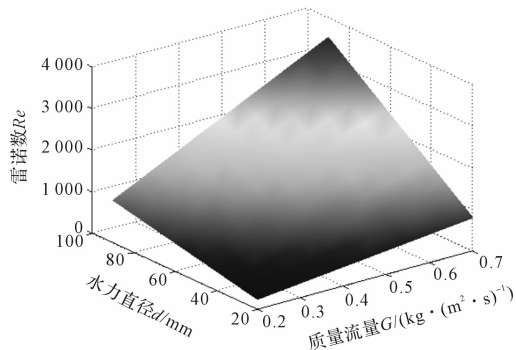


图 5 雷诺数与质量流量、封头水力直径的关联关系图

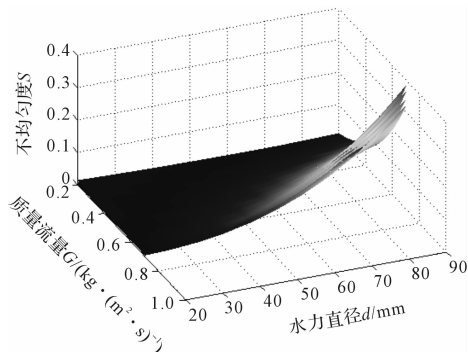


图 6 不均匀度 S 与结构参数间关联设计模型

3 面向换热损失最小的入口段结构参数设计结果分析

入口段流动不均匀导致换热器整体效能下降,引起换热效率损失。因此,本研究比较了几种封头结构的换热损失,以入口段结构引起的换热损失最小为目标,实现了入口段结构参数的最优设计。

3.1 入口段流动不均匀性与换热效率损失间关联模型构建

入口段流动的不均匀加剧内部温度场的分布不均匀以及纵向导热,从而导致换热器整体效能的下降,应建立不均匀度 S 与换热效率损失间的关联模型。

当冷热流体都均匀分布时,换热器理想换热效率为:

$$\varepsilon_{\text{ideal}} = 1 - \exp\left\{\frac{Ntu^{0.22}}{Cr} [\exp(-Cr \times Ntu^{0.78}) - 1]\right\} \quad (2)$$

式中: Ntu —传热单元数,定义为总热导 UA 与较小热容量 $C_{\min}$ 的比值; Cr —冷热流体中较小热容量与较大热容量的比值。

Ntu 和 Cr 的计算方法如下:

$$Ntu = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (3)$$

$$Cr = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{\min}}{(\dot{m}c_p)_{\max}} \quad (4)$$

当入口段存在流动不均匀性时,每层翅片上的换热效率为:

$$\varepsilon(x)=\frac{1-\exp(-Ntu(x)\times(1-R(x)))}{1-R(x)\exp(-Ntu(x)\times(1-R(x)))}\quad(5)$$

换热器的实际换热效率为:

$$\varepsilon_{\text{shiji}}=\int_0^{\bar{x}}\varepsilon(x)\left(1+S\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)f(x)dx+\int_{\bar{x}}^1\varepsilon(x)f(x)dx\quad(6)$$

由于入口段流动不均匀度 S 而导致效率的损失为:

$$\Delta\varepsilon=\varepsilon_{\text{lilun}}-\varepsilon_{\text{shiji}}\quad(7)$$

不均匀度 S 与效率偏差 $\Delta\varepsilon$ 间的关联曲线如图 7 所示。

3.2 面向换热损失最小的入口段结构参数最优设计

本研究设计了 3 种封头结构,分析不同的封头构型下的入口段流动不均匀性,计算入口段流动不均

匀度 S ,将不均匀度最小的封头构型作为最优构型。

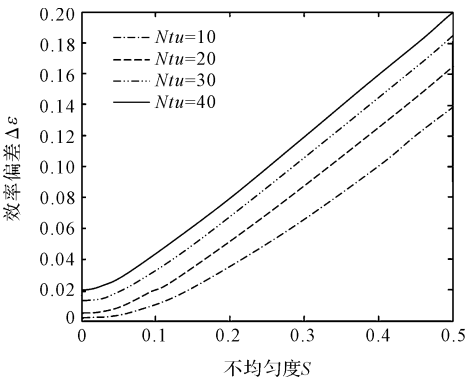


图 7 不均匀度与效率偏差间的关联关系

在传统封头的基础上,本研究设计了二次型封头和改进二次型封头共 3 种封头构形,3 种封头型式如图 8 所示。

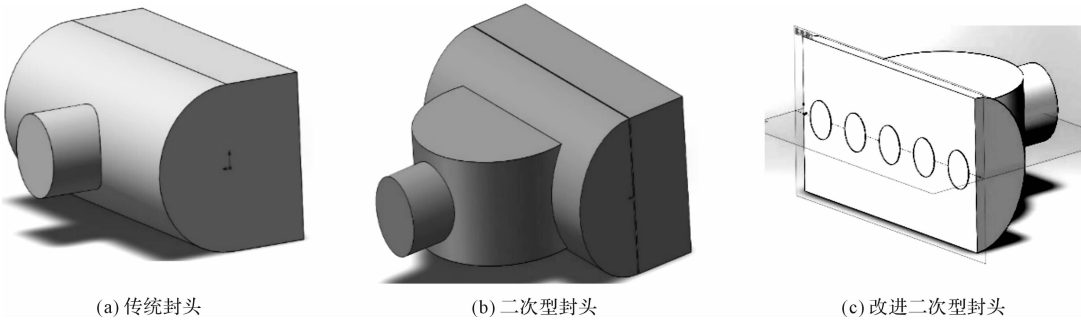


图 8 3 种封头型式

(1)传统封头。现有换热器通常采用的封头结构,从入口管进来的流体直接进入半圆形封头,主要结构参数包括入口直径 $d=20\text{ mm}$ 、封头长度 $L=150\text{ mm}$ 、封头半径 $R=50\text{ mm}$;

(2)二次型封头。该型式在传统封头外侧增加导流区域,从入口管进来的流体首先经过扇形区域进行一次扩散,然后在传统封头中进行二次扩散,主要结构参数包括:入口直径 $d=20\text{ mm}$ 、一次封头半径 $R=25\text{ mm}$ 、一次封头弧度 $\gamma=120^\circ$ 、封头长度 $L=150\text{ mm}$ 、封头半径 $R=50\text{ mm}$;

(3)改进二次型封头。该型式在二次型封头的基

础上,在封头出口区域增加挡板,使从封头进入导流片的流体进行进一步分流,通过挡板减少进入中间区域的流体量,进一步增加封头出口流体的均匀度,主要结构参数包括:入口直径 $d=20\text{ mm}$ 、一次封头半径 $R=25\text{ mm}$ 、一次封头弧度 $\gamma=120^\circ$ 、封头长度 $L=150\text{ mm}$ 、封头半径 $R=50\text{ mm}$ 、挡板孔数量 $n=5$ 、挡板孔直径 $d_2=15\text{ mm}$ 。

本研究使用 CFD 分析方法进行了 3 种封头内部的流动仿真分析,确定了封头内部流动速度分布、压力分布。当雷诺数 $Re=1\,000$ 时,各封头内部的流体速度分布如图 9 所示。

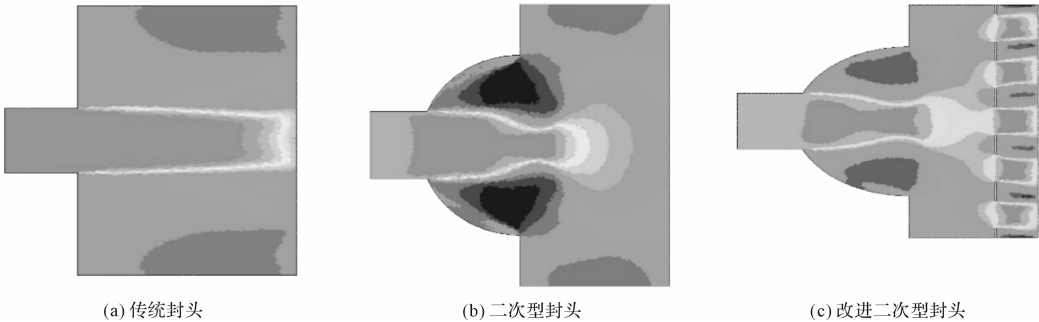


图 9 不同封头内部速度分布

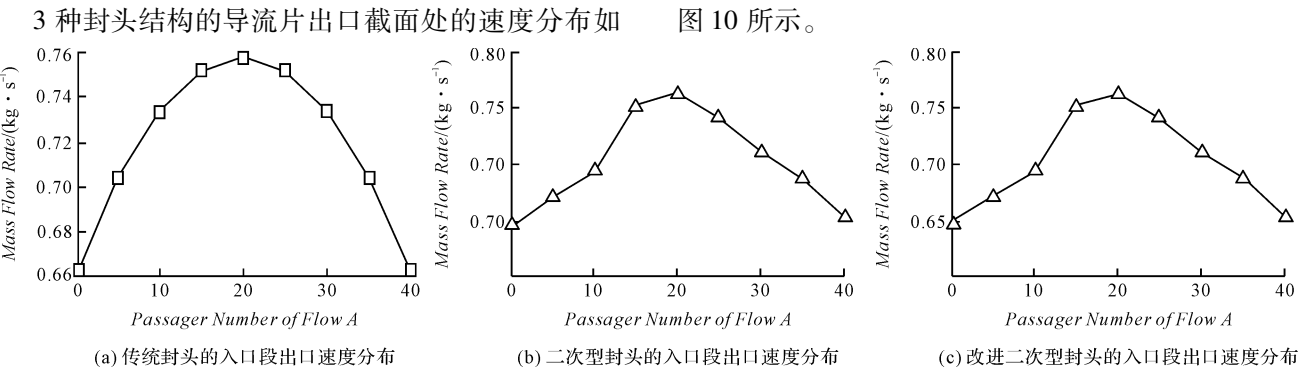


图 10 不同封头类型的入口段出口速度分布

图 10 结果显示:3 种封头的导流片出口流动不均匀性分别为 0.40、0.35 和 0.31, 计算得到的 3 种封头结构的换热损失分别为 9.6%、8.9% 和 6.2%。由此可见,改进型二次封头明显降低了入口段内部流动不均匀性、减少了换热损失。因此,改进型二次封头为最佳封头结构。

4 结束语

本研究提出了换热器入口段结构与流动不均匀性间关联分析方法,面向换热损失最小,进行了入口段结构的优化设计,有效降低了超大型板翅式换热器流动不均匀性:

- (1)进行了封头和导流片内部流动仿真分析,建立了封头和导流片结构参数(封头直径、导流片高度比、导流片倾斜角等)与入口段流动不均匀性的关联设计模型;
- (2)分析了入口段流动不均匀性对超大型板翅式换热器的换热损失的影响,比较了传统封头、二次型封头和改进型二次封头 3 种结构的入口段流动不均匀性、换热损失;
- (3)面向换热损失最小进行了入口段结构的优化设计,确定超大型板翅式换热器的最佳封头型式为改进型二次封头。

参考文献 (References):

[1] ZHANG Z, LI Y. CFD simulation on inlet configuration of plate-fin heat exchangers[J]. *Cryogenics*, 2003, 43(12):

673-678.
[2] ZHANG Z, MEHENDALE S, TIAN J, et al. Fluid flow distribution and heat transfer in plate-fin heat exchangers[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2014, 36(9): 806-819.
[3] WEN J, LI Y, ZHOU A, et al. An experimental and numerical investigation of flow patterns in the entrance of plate-fin heat exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(9-10): 1667-1678.
[4] JUNG J, HWANG G, BAEK S, et al. Partial flow compensation by transverse bypass configuration in multi-channel cryogenic compact heat exchanger[J]. *Cryogenics*, 2012, 52(1): 19-26.
[5] CHU W X, MA T, ZENG M, et al. Improvements on maldistribution of a high temperature multi-channel compact heat exchanger by different inlet baffles[J]. *Energy*, 2014, 75(c): 104-115.
[6] AWAD M M. Nonuniformities in compact heat exchangers—scope for better energy utilization: a review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59(6): 1686-1687.
[7] SAID S A M, BEN M R, HABIB M A, et al. Reducing the flow mal-distribution in a heat exchanger[J]. *Computers & Fluids*, 2015, 107(1): 1-10.
[8] 王亚男,夏 焱,鹿世化. 微通道平板换热器内流体分配不均的研究进展[J]. *流体机械*, 2015, 43(9): 83-87.
[9] 焦安军,厉彦忠,张 瑞,等. 封头结构对板翅式换热器物流分配不均匀性的影响[J]. *化工学报*, 2003, 54(7): 906-912.

[编辑:李 辉]

本文引用格式: