

板翅式换热器封头内部流场的测量与改进研究

文 键, 厉彦忠, 周爱民, 张 科, 王 江
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 利用粒子图像测速仪(PIV),对板翅式换热器封头结构改进前、后的流场进行了可视化研究分析.实验结果表明,原始封头内部的物流分配存在严重的不均匀性,采用添加打孔挡板之后的改进型封头,流场的不均匀性有了很大的改善.从实验对比分析中得出,当挡板小孔呈错排分布、开孔率沿挡板的中轴线向两侧逐渐增加、且总开孔率达到50%左右的时候,在相同的入口条件下,不均匀系数由原始封头的1.210降至0.209,最大流速与最小流速之比由23.163降至1.756.此研究结果对于板翅式换热器的优化设计具有重要意义.

关键词: 板翅式换热器;粒子图像测速仪;封头结构

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)01-0010-04

Particle Image Velocimetry Experimental Investigation of Header Configuration on Flow Maldistribution in Plate-Fin Heat Exchanger

Wen Jian, Li Yanzhong, Zhou Aimin, Zhang Ke, Wang Jiang
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Flow characteristics of flow field in the header of a plate-fin heat exchanger were investigated with particle image velocimetry (PIV). It is found that the fluid flow maldistribution is very serious for conventional header while the improved header configuration with punched baffle can effectively improve the performance. When the punched baffle is proper in length, the small holes are in staggered arrangement and the punched ratio gradually increases from the central axis to the boundary along the baffle length, the performance of flow distribution in the plate-fin heat exchanger is effectively improved by the optimum design of header configuration. The flow maldistribution parameter S decreases from 1.210 to 0.209 and the ratio of the maximum velocity to the minimum decreases from 23.163 to 1.756.

Keywords: plate-fin heat exchanger; particle image velocimetry; header configuration

板翅式换热器具有结构紧凑、传热效率高、便于通道布置和换热面积分配等特点^[1].引起该类换热器整体效能下降的主要因素是由于封头设计不合理导致换热器内部的物流分配不均匀^[2,3].本文在数值模拟^[4]的基础上,提出在原始封头瓜皮结构的1/2高度处添加打孔挡板的结构改进方法.粒子图像测速仪(PIV)是一种利用颗粒成像方法测量瞬态流场的流动测量技术,通过在流体中播撒示踪粒子,根据

图像处理技术分析粒子图像的位移而得到空间多点的速度矢量^[5,6].虽然PIV技术已经应用于很多工程领域的流场测量,但目前国内外还没有将其应用于换热器内部流场的分析测量.因此,本文考虑用PIV技术来研究板翅式换热器封头内部的流场分布特性,分析其对物流分配特性的影响规律,寻求最佳封头结构型式,从而改善换热器内部物流分配特性.由于实验条件的限制,不能直接采用低温工质进行

收稿日期: 2005-03-28. 作者简介: 文 键(1976~),女,博士生;厉彦忠(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 教育部跨世纪优秀人才基金资助项目;全国首届优秀博士学位论文作者专项基金资助项目(199933);西安交通大学博士学位论文基金资助项目(DFXJ TU2004-02).

实验,而且数值模拟证明,对于结构改进前、后的封头,低温工质和空气具有相同的流场变化趋势,因此本文采用空气替代低温工质进行实验。

1 实验设备及方案

1.1 风路系统

图1是实验台的风路系统简图,该实验采用风机上游供气方式,通过孔板流量计测量供气量。孔板上下游各有一段等径直管作为稳定段。所有试件均采用有机玻璃,与原型呈1:1比例制作,以保证该模型能够尽可能精确地反映原型的性能。

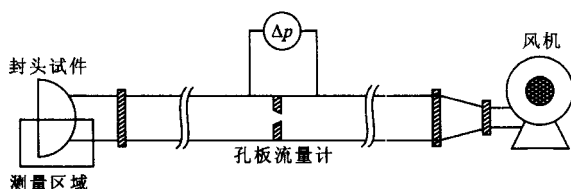


图1 实验风路系统简图

1.2 PIV系统

本实验采用西安交通大学流体机械国家专业实验室的二维PIV测试系统,主要由集成式Nd Yag双激光器、630046型PIVCAM1030摄像机、同步器和图像数据分析系统等几部分组成。在运用PIV系统进行流动测量时,示踪粒子的选择和施放是获得理想测量结果的关键因素。实验采用Rosco1600烟雾发生器,安置在风机的入口处,使烟雾和气流一同进入风路系统,在管道中混合均匀后再进入封头进行测试,从而保证发烟方式满足实验要求。实验希望观测到的封头流场区域为封头的半圆截面,而PIV片光源的照亮区域和CCD相机拍摄的流场范围有限,因此选择其观测视场为封头半圆截面的一半,测量封头长度方向上不同截面处的流场分布情况(见图1)。

为了分析封头出口截面物流分配的不均匀性,引入不均匀系数 S 的概念。它揭示了实验数据的离散程度, S 的绝对值越大,表示截面物流分配越不均匀。反之其分配就越均匀。不均匀系数按下式计算

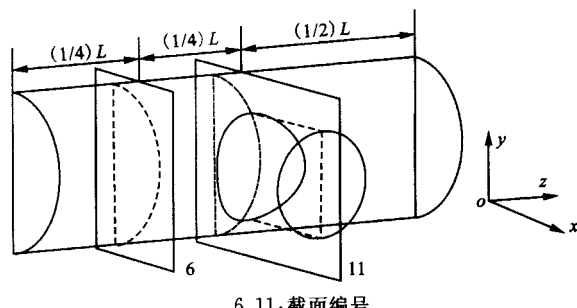
$$S = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{ch(i)} - V_{ave})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中: N 代表截面数; $V_{ch(i)}$ 表示第 i 截面的流速; V_{ave} 表示所有截面的平均流速。

2 原始封头的测量结果

由于封头结构的对称性,实验选取封头长度的

一半,从中轴线到周边,依次选取11个截面,研究其流场分布情况。限于文章篇幅,仅选取如图2所示的截面11和截面6进行分析。



6,11:截面编号

图2 测试剖面示意图

图3所示的截面11处于封头的中轴线上且正对入口管。在 y 方向,此截面的物流分配极不均匀,即正对入口管的地方流速较大,上游流线平行流向出口,而偏离入口管的地方由于流体边界形状的突然扩大,流动状态随之发生急剧的改变,主流脱离边壁而形成漩涡,流体在此处形成一个死区。漩涡会引起机械能转化为热能,从而导致机械能的损失。而且,漩涡所消耗的能量较大,这是因为除了摩擦以外,尚有漩涡与主流之间的质量交换的缘故。

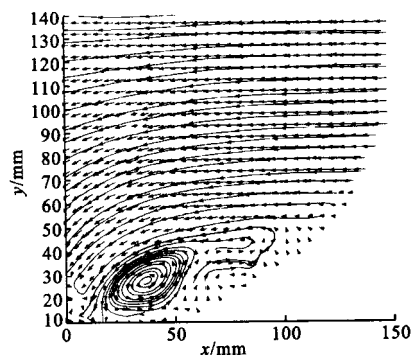


图3 原始封头截面11的速度矢量和流线分布图

图4所示的截面6偏离入口管,随着截面离入口管距离的增大,小漩涡逐渐增大成为大尺度漩涡

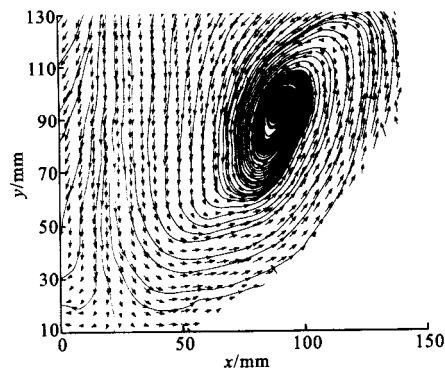


图4 原始封头截面6的速度矢量和流线分布图

并向四周扩散,而且沿流向拉伸明显.可见,封头内部这部分流体主要依靠流体的漩涡运动扩散而来.这是因为流体在出口截面横向压力梯度的作用下向封头两边流动,小部分流体刚好到达出口并沿着出口通道流出,大部分流体碰到边壁,流动受到阻碍,脱离边壁形成漩涡并向周边扩散.

由以上的分析可知,对于改进前的原始封头,物流主要依靠流体形成的漩涡,利用出口截面上的横向压力梯度进行分配.因此,入口管附近的地方流量大,而远离入口管的周边截面流量偏小,不仅物流分配不均匀,而且流体形成的漩涡会引起较大的能量损失.因此,需要对此封头进行结构改造,使其出口截面物流分配均匀.

3 改进型封头的测量结果

如文献[4]所述,在原始封头瓜皮结构的1/2高度处,添加一块打孔挡板.挡板上的小孔直径分别为小孔 $\varnothing 10$ mm、中孔 $\varnothing 20$ mm和大孔 $\varnothing 30$ mm三种,由中轴线到周边逐渐增大.流体到达孔板处流动被阻碍,根据Bernoulli方程,此时压力升高,形成一个横向的压力梯度,导致流体向周边流动,使得流体在到达封头的出口之前,就已经分配均匀.

改进后的封头截面11与改进前相比,在y方向上物流分配均匀,且流体的死区消失(见图5).中间正对入口管的出口截面改进后的流速明显降低,而偏离入口管的出口截面流速明显增大.这是因为孔板正中的小孔直径最小,对来流产生的阻力最大,导致了一个横向的压力梯度,迫使来流向四周分布,而边上的小孔孔径比较大,使得分流来的流体顺利通过,而且与改进之前相比,孔板前来流的漩涡消失.这是因为添加孔板之后,使得此处高度减半,没有足够的空间形成漩涡.

图6所示截面6的流体主要依靠挡板截面的横

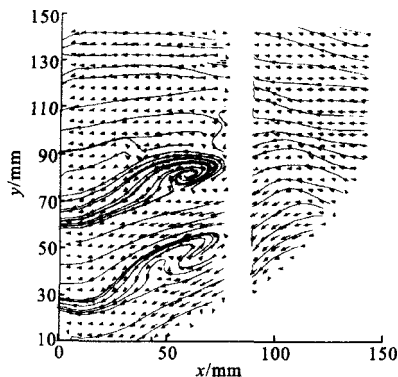


图5 改进型封头截面11的速度矢量和流线分布图

向压力梯度分流而来.当流体由挡板分流过来时,在挡板前面会形成一个明显的漩涡,流体经过挡板上的小孔分流之后,在y方向上流体分布均匀,与改进前相比,流体流线的方向发生明显改变,直接从封头出口截面的微通道流出.

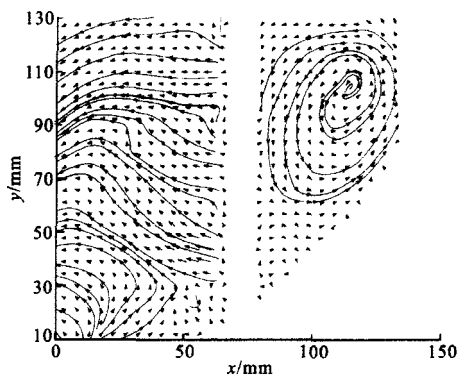


图6 改进型封头截面6的速度矢量和流线分布图

从上述分析可以得出,封头在添加打孔挡板之后,流体经过挡板分配之后再流到各出口截面,流场的不均匀分配情况有了很大改善,不仅在封头轴向,而且在出口截面的径向上,物流分配的不均匀性均得到很大的改善.同时,各截面的流体漩涡与改进前相比大大减少,因此由于湍流耗散引起的能量损失减少,这可以抵消一部分由于添加挡板而给封头带来的压力损失,从而使得添加挡板之后,流体的压力损失增加不大,满足压降对结构改进的限制.

图7揭示的是2种不同封头结构在入口平均雷诺数均为60 000时,沿封头长度方向的物流分配情况.实验测量了11个截面,考虑到封头结构的对称性,假定其内部流场也是对称分布,所以总的截面数为21.从图7中可以看出,添加挡板之后的改进型封头物流分配的改进效果明显.对于原始封头,最大流速与最小流速之比为23.163,不均匀系数达到1.210,而对于改进型封头,中间截面流速明显降低,两侧周边截面的流速明显提高.最大流速与最小流

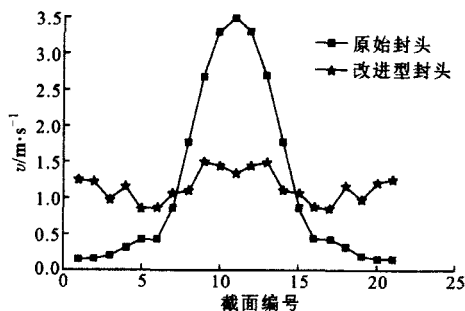


图7 封头改进前、后物流分配情况对比

速之比分别降为 1.756,不均匀系数则降为 0.209.

4 挡板结构的确定

从以上的实验结果可以看出,主要是由于挡板将入口管轴线附近的截面流速降低,从而提高了远离轴线的周边位置的截面流速,达到在整体上改善截面流速均匀分布的目的.因此,有必要进一步进行实验研究,选取合适的挡板结构尺寸,达到物流均匀分配的最优效果.

4.1 中孔面积比率的影响

挡板的厚度和长度分别为 5 和 600 mm,三种小孔的孔径如上节所述,且小孔均呈顺排分布.根据原始封头的速度分布, $\varnothing 10$ mm 小孔的打孔区域对应为封头入口管截面.设 A_1 、 A_2 和 A_3 分别代表孔板上小孔、中孔和大孔的总面积,本文主要考虑中孔面积比率 $A' = A_2 / (A_1 + A_2 + A_3)$ 与物流分配的关系.封头入口平均雷诺数均为 60 000.

当中孔面积比率为 0.2、0.3、0.4 时,封头各截面的物流分配情况较之原始封头都有了很大改进.随着面积比率的增加,三种孔板型封头物流分配的不均匀系数分别为 0.381、0.306 和 0.384.可见,当中孔面积比率为 0.3 时,出口物流分配的均匀性最好.因为随着中孔面积比率的增加,中孔数量逐渐增多,而大孔数量随之逐渐减少,则挡板的打孔率逐渐减小.小孔数目的增加使流场变得更均匀,而打孔率的降低则增加了挡板对流体的阻力.因此,综合考虑以上两方面的因素,中孔面积比率为 0.3 左右,即中孔总面积占整个开孔面积的 $1/3$ 是比较合适的.

4.2 挡板小孔布局的影响

挡板长度为 670 mm,三种小孔的尺寸同上.实验结果表明,将挡板上小孔的排列方式由顺排改为错排之后,不均匀系数由 0.306 降至 0.209,出口的物流分配变得更加均匀.因为孔的排列由顺排改为错排之后,挡板的开孔率增大,使得小孔数目增多,对物流均匀分配所起的作用也增大,从而使得封头的不均匀系数降低.而且,挡板开孔率的提高(打孔率由顺排的 47% 增大到错排的 53%),可以减小挡板对流体的流动阻力,从而降低流体进出口的压力

损失.可见,挡板上小孔的排列方式采用错排是比较合理的.

5 结 论

(1) 利用 PIV 技术对改进前、后封头各处截面流场进行测试,克服了以往单点测量方式工作量大、测点少等不足,在实验要求的二维平面流场中,约测量出了 17 000 个测点的瞬时速度矢量值,实验数据获取快捷、可靠、精度高.

(2) 从实验结果可以看出,添加挡板之后的封头改进效果明显.当挡板上小孔呈错排分布、中孔面积占整个打孔面积的 $1/3$ 、且打孔率沿封头中轴线向周边逐渐增加的时候,物流不均匀系数由原始封头的 1.210 降至 0.209,最大流速与最小流速之比由 23.163 降至 1.756.

(3) 打孔挡板结构简单,成本低廉,易于加工安装,对于板翅式换热器的应用研究和设计开发具有重要意义.

参考文献:

- [1] Mueller A C, Chiou J P. Review of various types of flow maldistribution in heat exchangers [J]. Heat Transfer Engineering, 1988, 9 (2):36-50.
- [2] Jiao A J, Li Y Z, Chen C Z, et al. Experimental investigation on fluid flow maldistribution in plate-fin heat exchanger[J]. Heat Transfer Engineering, 2003, 24 (4):25-31.
- [3] Zhang Zhe, Li Yan Zhong. CFD simulation on inlet configuration of plate-fin heat exchanger[J]. Cryogenics, 2003, 43(12):673-678.
- [4] Wen Jian, Li Yanzhong. Study of flow distribution and its improvement on the header of plate-fin heat exchanger[J]. Cryogenics, 2004, 44(11):823-831.
- [5] Weterweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(12):1392-1397.
- [6] Duursma G R, Glass D H, Rix S J L, et al. PIV investigations of flow structures in the fluidised bed freeboard region[J]. Powder Technology, 2001, 120(1):2-11.

(编辑 王焕雪)