

# 两相流板翅式换热器入口分配特性的实验研究

许 箐, 厉彦忠, 张 哲

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 实验研究了板翅式换热器入口两相流分配不均匀性问题. 结果表明: 两相流在换热器入口截面上的分配不均匀主要体现在液相上, 其中又以横向不均匀为主; 气体雷诺数及干度对两相流的分配特性有很大的影响; 对于整个横截面上的二维分布情况, 气相与液相的分配不均匀度均随着气体雷诺数的增大而增大, 液相的不均匀度随着干度的增大而增大, 气相的不均匀度随着干度的增大而减小; 气体雷诺数的变化主要影响液相在横向上的分配特性, 干度的变化主要影响液相在纵向上的分配特性.

**关键词:** 板翅式换热器; 两相流; 流体分配

**中图分类号:** TH17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)03 - 0243 - 04

## Experimental Study on Two-Phase Flow Maldistribution at the Entrance of Plate-Fin Heat Exchangers

Xu Qing, Li Yanzhong, Zhang Zhe

(School of Energy and Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

**Abstract:** Two-phase flow distribution in the entrance of plate-fin heat exchangers was experimentally studied. It is found that gas  $Re$  and dryness are the main factors affecting two-phase flow distribution. A parameter of dimensionless velocity deviation is defined to describe maldistribution in two orthogonal directions. The results indicate that the liquid flow nonuniformity is more apparent than that of gas and the flow maldistribution in crosswise direction is more violent than that in the ordinate direction. The flow maldistribution of both gas and liquid components increase with the increase of gas flow  $Re$ . The gas flow maldistribution decreases with the inlet dryness increasing, but the liquid flow maldistribution increases simultaneously. It is also found that the liquid flow profile in the crosswise direction is strongly affected by the variation of gas flow  $Re$  and that in ordinate direction is mainly affected by the two-phase flow dryness.

**Key words:** plate-fin heat exchanger; two-phase flow; flow distribution

板翅式换热器的传热效率高, 轻巧紧凑, 在航空、化工、空气分离、暖通空调等领域均已得到广泛的应用. 由于换热器的安装制造、导流片及封头的结构设计、流动工况的变化等均可引起其内部物流分配不均匀, 从而造成换热器效能下降<sup>[1]</sup>. Mueller 等人<sup>[2]</sup>通过建立数学模型计算发现: 入口物流/温度分布不均匀是引起紧凑式换热器效能下降的重要因素. Ranganayakulu 等人<sup>[3]</sup>通过改进数值计算的方法对换热器两侧物流分配不均匀的情况进行了计算,

结果表明: 换热器的效能随着入口速度分配均匀性的改善而增大; 对于分配很不均匀的流型, 可使换热器效能下降达到 30%. 对两相流换热器而言, 流体不均匀分配对换热效能的影响更大, 特别是对要求小温差工作的高效低温换热器, 较小的流体不均匀分配, 将会导致换热器换热效能的严重恶化, 甚至影响换热器的机械性能<sup>[4]</sup>. 对于两相流不均匀分配, Mueller 等人<sup>[2]</sup>指出: 当两相流干度变化时, 可能导致两相流压降变化, 造成两相流在流道中分配不均

收稿日期: 2003 - 09 - 01. 作者简介: 许 箐(1978~), 男, 硕士生; 厉彦忠(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 西安交通大学博士学位论文基金资助项目 (DFXJ TU2002 - 12); 全国首届优秀博士学位论文作者专项基金资助项目 (199933).

匀;流体不稳定密度波也能造成液体在换热器内部的喘振.文献[5]对板翅式换热器两相流不均匀特性进行了理论分析及数值计算.这些研究工作都可归于理论方面,而对两相流分配特性的实验研究,就不如单相流动研究进行得全面.本文的实验目的就是为了探索两相流的分配特性以及气体雷诺数( $Re$ )、干度对其的影响.

## 1 实验系统及内容

实验系统如图1所示.该实验台可以进行气相、液相、气液两相的不均匀分配特性研究.本文研究了空气、空气/水混合物的不均匀分配特性.各通路循环由如下环节组成:空气经压缩机压缩后通过稳压器、过滤器、涡轮流量计进入测试系统;水经过水泵后通过稳压器、过滤器、涡轮流量计进入测试系统;空气和水混合后进入试件,流经转换开关箱后分单股进入气液分离器,进行分相测量.数据采集处理系统包括硬件和软件两部分:硬件部分由计算机、压力传感器、压差传感器、涡轮流量计以及数据采集板组成;软件系统由采集程序及数据处理程序组成.

由于板翅式换热器的结构特点,要对每一个微型流道(passage)内的流量进行测量是不可能的.为了实现对小流量的精确测量和进行相关的实验研究,将试件的流体流通截面划分为30个子区域,如图2所示.将每个子区域作为一个流体均匀分配的通道(channel),对每个通道的流量引出测量,从而获得流体经过封头及导流片之后在换热器截面上的速度分布分配特性.文献[6,7]的研究表明:单相流体在换热器入口截面的纵、横方向上均存在着速度分配不均匀;封头结构和导流片的导流性能对于单相流体不均匀分配的影响体现在换热器截面的不同方向上.为了比较分析方便,将流体在流通截面上的二维分布分解为纵向(总管的流动方向)和横向(垂直于总管的流动方向)的2个一维流动来研究.

在两相流动中,板翅式换热器每层流道中的单

个通道可以看作是直径很小的圆管,类似于垂直上升管内的两相流动.在较小的液体质量流量时,板翅式换热器的内部流动存在3种形态:环状流、搅拌流和塞状流.不论是在圆管内还是在板翅式换热器中,流型的转换都只依赖于液体的质量流量<sup>[8]</sup>.

为了研究两相流在板翅式换热器入口段的分配特性,进行了以下实验:在保持流体质量干度不变

的条件下,研究了不同气体 $Re$ 对流体分配的影响;在保持气体流量不变的条件下,研究了不同干度对流体分配的影响.

## 2 实验结果的分析与讨论

为了分析流体在流通截面上的横向与纵向分配不均匀性,将30路通道流量的测量值根据下式进行处理,得到流体在横向及纵向上的平均速度:

横向

$$v_i = (Q_{5i-4} + Q_{5i-3} + Q_{5i-2} + Q_{5i-1} + Q_{5i}) / 5A \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

纵向

$$v_i = (Q_i + Q_{i+5} + Q_{i+10} + Q_{i+15} + Q_{i+20} + Q_{i+25}) / 6A \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

式中: $Q_i$ 为各通道的体积流量; $A$ 为图2所示的通道面积.为了对比分析方便,用速度偏差 $u$ 来表征横、纵方向上的速度分布.在横向上, $u_i = (v_i - v_{ave}) / v_{ave}$ ,在纵向上, $u_i = (v_i - v_{ave}) / v_{ave}$ ,其中 $v_{ave} = \frac{1}{30A} \sum_{i=1}^{30} Q_i$ ,为截面的平均速度. $u$ 、 $u$ 的离散情况可以反映流体在整个入口流通截面上的分配均匀程度,数值越大表明分配就越不均匀.

### 2.1 流量变化对两相流不均匀性的影响

通过同时改变气体及液体流量保持两相流质量干度为18%,得到不同的气体 $Re$ 下两相流在换热器横截面上的分布,如图3、图4所示.从图中可以看出以下特点.对于气相分配,在横向上,随着气体 $Re$ 的增大,由于速度峰值出现的位置不同造成

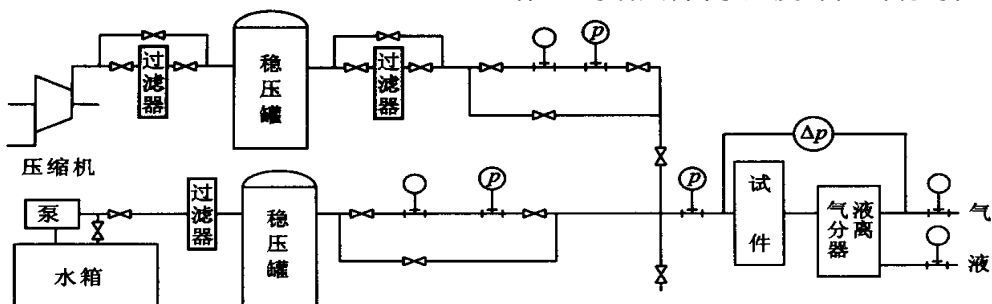


图1 实验系统图

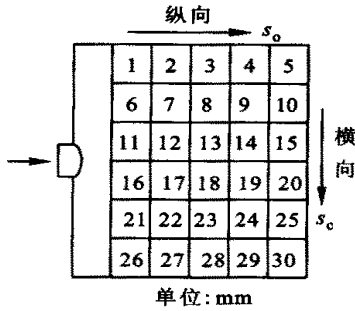
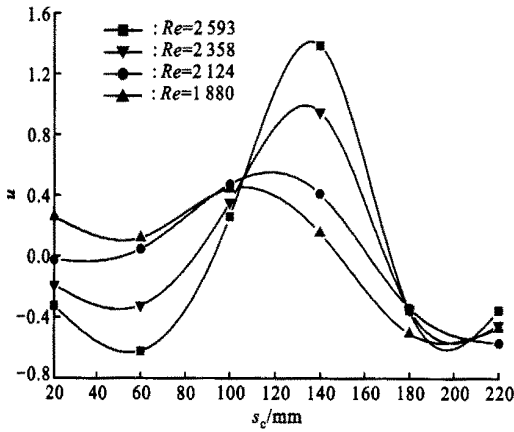
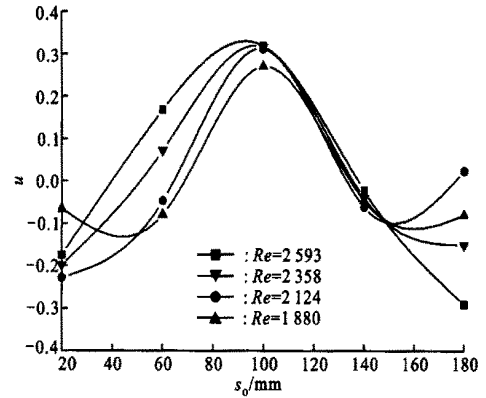


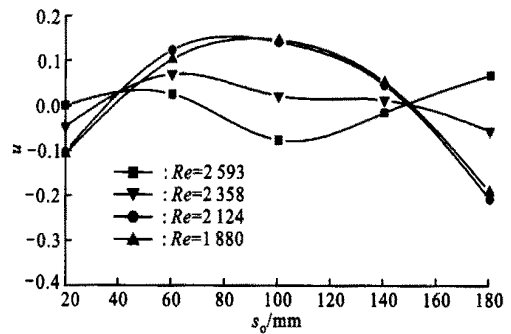
图2 通道排列



(a) 液相

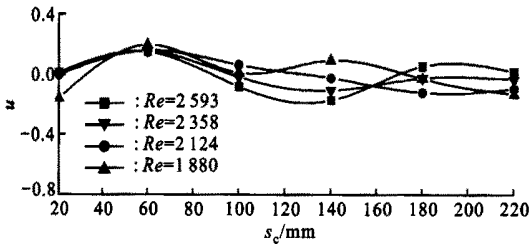


(a) 液相



(b) 气相

图4 不同气体 Re 下 u 沿纵向分布



(b) 气相

图3 不同气体 Re 下 u 沿横向分布

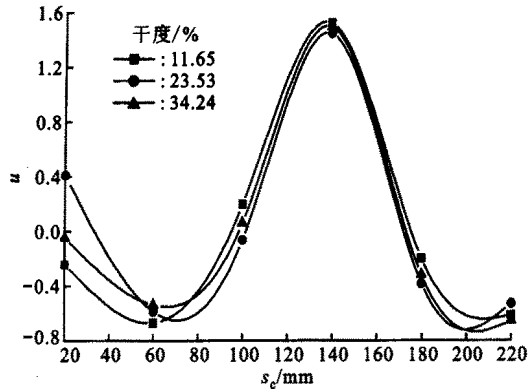
流动形态发生变化,从而使不均匀度增大;在纵向上,随着气体  $Re$  的增大,速度峰值减小使得不均匀度减小;由于横向不均匀度大于纵向,对于整个横截面上的二维分布而言,不均匀度随着气体  $Re$  的增大而增大。对于液相分配,在横向上,随着气体  $Re$  的增大,不均匀度增大,最大速度偏差出现的位置逐渐向后移动;在纵向上,随着气体  $Re$  的增大,不均匀度增大,最大速度偏差出现的位置逐渐向前移动;对于整个横截面上的二维分布而言,不均匀度随着气体  $Re$  的增大而增大。

### 2.2 干度变化对两相流不均匀性的影响

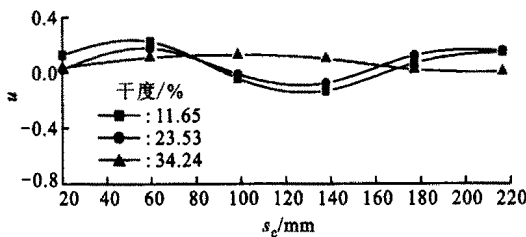
在气体流量保持不变、 $Re = 2\ 600$  的情况下,通过改变液体流量得到不同干度下两相流体在换热器

横截面上的分布情况,如图5、图6所示。从图中可以看出以下特点。对于气相分配,在横向上,随着干度的增大,速度峰值逐渐减小,流动趋于平缓,不均匀度减小;在纵向上,由于干度变化的影响,造成了流动形态的变化,但不均匀度变化不大;从总体上看,横向不均匀度大于纵向,因而对于整个横截面上的二维分布而言,不均匀度随着干度增大而减小。对于液相分配,在横向上,当干度增大时,速度分配特性基本不变,表现出了较好的对称性,不均匀度变化较小;在纵向上,随着干度增大,不均匀度增大,最大速度偏差出现的位置逐渐向后移动,速度分配也有较大的变化,且有出现2个峰值的趋势;对于整个横截面上的二维分布而言,虽然横向分配不均匀为主要影响,但由于纵向不均匀度变化更加显著,不均匀度随着干度的增大而增大。

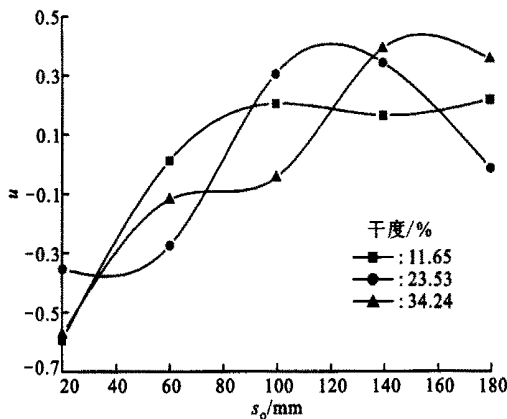
对比图3~图6可以看出,两相流动中的液相和气相,在横向位置上的速度偏差均大于纵向。在不同的方向上,两相流体的分配又有以下特点:在横向上,液相的速度偏差远远大于气相,其最大速度偏差为气相的7倍;在纵向上,液相的最大速度偏差仅为气相的1.5~4.0倍,差异明显减小。由此可知,两相



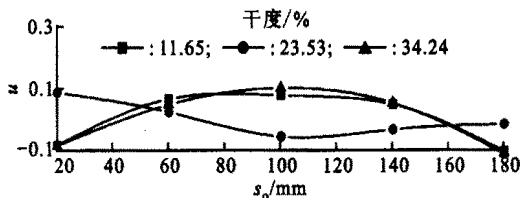
(a) 液相



(b) 气相

图5 不同干度下  $u$  沿横向分布

(a) 液相



(b) 气相

图6 不同干度下  $u$  沿纵向分布

流在换热器入口截面上的分配不均匀主要体现在液相上,其中又以横向不均匀为主。

对比图 3a、图 4a、图 5a、图 6a 还可以发现,气体  $Re$  的变化主要影响液相在横向上的分配特性;干度

的变化主要影响液相在纵向上的分配特性。由于封头结构主要影响横向分配而导流片型式主要影响纵向分配,研究结果对两相流板翅式换热器的优化设计有指导意义。

### 3 结论

(1) 由于板翅式换热器入口段的结构特点,两相流在其内部的流动中存在着速度的不均匀分配。实验研究表明,液相不均匀度大于气相,横向不均匀度大于纵向。两相流在换热器入口截面上的分配不均匀主要体现在液相上,其中又以横向不均匀为主。

(2) 气体  $Re$  及干度对于两相流的分配特性具有很大的影响。对于整个横截面上的二维分布而言,气相与液相的分配不均匀度均随着气体  $Re$  的增大而增大,液相的不均匀度随着干度的增大而增大,气相的不均匀度随着干度的增大而减小。

(3) 气体  $Re$  的变化主要影响液相在横向上的分配特性;干度的变化主要影响液相在纵向上的分配特性。由于封头结构和导流片型式分别影响横向及纵向分配,可以根据实际情况的需要有针对性的改进板翅式换热器的入口段结构参数。

#### 参考文献:

- [1] Kays W M, London A L. Compact heat exchangers [M]. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 1984.
- [2] 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.
- [3] Ranganayakulu C, Seetharmu K N. The combined effects of longitudinal heat conduction flow nonuniformity and temperature nonuniformity in cross flow plate fin heat exchanger [J]. Int Comm Heat Mass Transfer, 1999, 26(5): 669 ~ 678.
- [4] Kitto J B, Robertson J M. Effects of maldistribution of flow on heat transfer equipment performance [J]. Heat Transfer Engineering, 1989, 10(1): 18 ~ 25.
- [5] 巫江虹,陈长青,吴业正. 板翅式换热器两相流封头设计及其分配特性[J]. 低温工程, 1996(5): 10 ~ 14.
- [6] 焦安军,厉彦忠,张瑞,等. 导流片的导流角度对其性能的影响[J]. 化工学报, 2001, 52(9): 761 ~ 765.
- [7] 焦安军,厉彦忠,张瑞,等. 板翅式换热器不同结构导流片导流性能的研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(11): 1 113 ~ 1 117.
- [8] Müller-Menzel T, Hecht T. Plate-fin heat exchanger performance reduction in special two-phase flow conditions [J]. Cryogenics, 1995, 35(5): 297 ~ 301.

(编辑 王焕雪)