

研究论文

板翅式换热器两相流分配器

袁 培¹, 姜国宝¹, 张菲妮¹, 何雅玲¹, 谭民邦², 陶文铨¹

(¹ 西安交通大学能源与动力工程学院, 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; ² 四川空分设备(集团)有限公司, 四川 简阳 641400)

摘要: 两相流体分配不均匀是造成低温换热器传热性能急剧下降的主要原因。在板翅式换热器两相流入口设置分配器是一种广为采用的改善分配特性的工程方法。本文以空气-水实验模拟系统研究了一种两相流分配器的分配特性。研究表明: 所研究的气液分配器能够提高气液在板翅式换热器层间翅片通道分配的均匀性。

关键词: 板翅式换热器; 气液两相流; 气液分配器; 分配均匀性

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157(2011)S1-031-06

Two-phase distributor in plate fin heat exchanger

YUAN Pei¹, JIANG Guobao¹, ZHANG Feini¹, HE Yaling¹, TAN Minbang², TAO Wenquan¹

(¹ School of Energy and Power Engineering, State Key Laboratory of Multi-phase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; ² Sichuan Air Separation Plant (Group) Company, Jianyang 641400, Sichuan, China)

Abstract: The maldistribution of two-phase flow is one of the major factors that deteriorate the heat transfer performance of plate fin heat exchanger. The set-up of flow distributor at the heat exchanger inlet is one widely adopted engineering method to improve the flow distribution. In this paper the flow distribution performance of one type of distributor is experimentally tested by using air-water mixture. The test results show that the flow distributor studied can improve the two-phase flow distribution uniformity in plate fin heat exchanger.

Key words: plate fin heat exchanger; two-phase flow; distributor; uniform

引 言

板翅式换热器由于体积小、质量轻, 广泛应用于制冷、空气分离、低温技术、化工等领域。随着工业技术的发展, 板翅式换热器已经成为汽油提纯、乙烯加工、天然气液化等化工过程的核心设备, 在这些产品加工过程中蒸发冷凝相变换热在换热器的翅片通道内进行, 相变换热性能的好坏, 直接影响产品的质量。

对于高效紧凑的板翅式换热器, 物流分配不均

是造成换热性能下降的主要原因, 备受关注。Mueller^[1]对换热器的整体性能和物流分配均匀性进行了分析计算, 结果表明由于物流分配不均可使换热器性能下降 30% 以上。Kitto 等^[2]对板翅式换热器物流分配对换热器性能的影响进行了实验研究, 他们认为: 由于二次换热通道数目巨大, 传热温差较小, 换热器内部存在着严重的不均匀现象。在物流分配不均匀的换热器单元中, 物流分配较少的单元就会出现制冷剂“蒸干”现象, 传热温差急剧上升, 换热器传热恶化, 冷凝侧的高温高压气体

2011-03-15 收到初稿, 2011-03-24 收到修改稿。

联系人: 陶文铨。第一作者: 袁培 (1982-), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB203602)。

Received date: 2011-03-15

Corresponding author: Prof. TAO Wenquan, wqtao@xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research

Program of China (2007CB203602).

就不能凝结成液体，导致该部分冷凝蒸发单元失效。另一方面，在物流分配较多的通道内液体蒸发后会堵塞换热通道，也造成换热器传热恶化，换热器整体性能就会显著降低。在板翅式换热器设计过程中，由于物流分配不均引起换热器换热性能的下降一般通过增加有效传热面积来进行补偿，而增加换热面积不仅增加了生产及运行成本，还使得换热器结构有失紧凑。

换热器物流分配不均匀和多种因素有关，除了制造工艺及污垢阻力方面的原因外，主要与不合理的入口设计有关。板翅式换热器中流体进入换热器时，首先要通过一段入口总管，然后进入换热器的封头。因此，入口总管位置布置及封头体的设计直接影响到进入换热器层间流体均匀性。Shah 等^[3]建立了多通道流动均匀性和换热器性能变化的模型，该模型定性给出了通道流动均匀性对换热器性能的影响关系。西安交通大学低温教研室在封头体的改进方面做了详细的研究^[4-9]，成功开发了用于改善板翅式换热器物流整体均匀性的二次挡板封头。上述研究均为单相流动，而在天然气液化、石油气液化和分离工艺中，作为核心设备的板翅式换热器，气液两相流体同时进入换热器的情况时常发生。两相混合流动比单相流体更为复杂^[10]，流体分配不均匀现象更加明显。关于这方面的研究，巫江虹等^[11]研究了不同封头结构气液两相流体总体分配的均匀性。李夔宁等^[12]通过实验对平行流蒸发器内气液两相流分配均匀性进行了研究，结果表明气液入口管的位置对流量分配均匀性影响较大。而在同一层间通道内如何保证两相流体均匀地分布到各个通道，目前文献中还没有系统的研究。

目前国内外板翅式换热器常用的两相流层间分配结构有单折导流片和双折导流片。来自封头体的气体和液体在层间导流片的作用下，

流动方向发生改变，然后被送入数量众多的平行翅片通道。因此，在这种板翅式换热器 [图 1 (a)] 两相入口场合，在封头体和层间导流机构共同作用下 [图 1(b) 为双折导流片]，完成气液两相流体在层间及各层翅片通道内的分配。由于导流片的分配机构在流向发生改变时，容易造成相分离趋势，进而引起平行通道内气液分配不均问题。

本文研究一种不同于传统板翅式换热器 [图 1 (a)、(b)] 的板翅式换热器两相流分配结构。该结构的分配机制是出于如下考虑。首先将要进入气液分配器的气液两相流体进行分离，气体和液体分别从各自的通道进入分配器，在分配器内两相流体进行混合，然后进入各个翅片通道进行换热。基于这种思想，气液各相工质分别从各自的引入管进入不同的封头体 [图 1(c)]。其中气相制冷剂通过导流片进入气液分配器气相通道，液相制冷剂直接进入液相通道，而后气液制冷剂在分配器内进行混合，最后进入翅片通道进行换热。气液分配器在换热器层间单元安装位置如图 1(d) 所示。这一基本思想的可行性已经基本得到工程实践的确认，因此本文拟通过模拟实验研究该型式的气液分配器的几何尺寸对下游翅片区域气液分配均匀性的影响。

1 实验系统

图 2 给出了气液两相分配器结构示意图。图 2 (a) 为分配器实物图，包括气体通道、液体通道和气液连接通道。图 2(b) 为分配器结构图，总长度为 1290 mm，分配器在厚度方向间距和目前低温板翅式换热器常用翅片高度一致，为 6.5 mm。

实验由水和空气系统组成，如图 3 所示。

水系统：自来水首先进入补水箱，然后经泵 2 加压后进入实验段水系统入口，为了保证进入分配

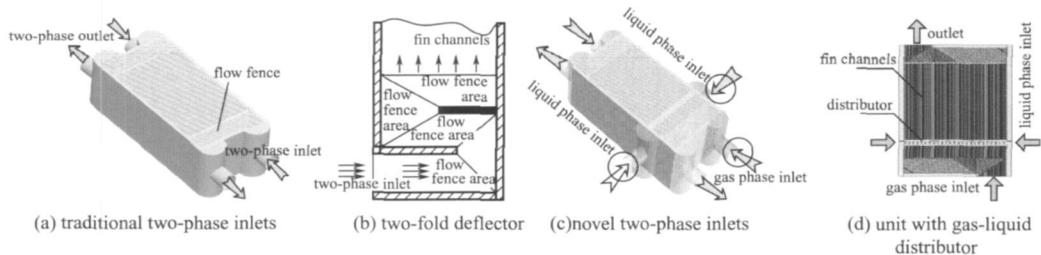


图 1 两相流板翅式换热器

Fig 1 Two phase inlet of plate fin heat exchanger

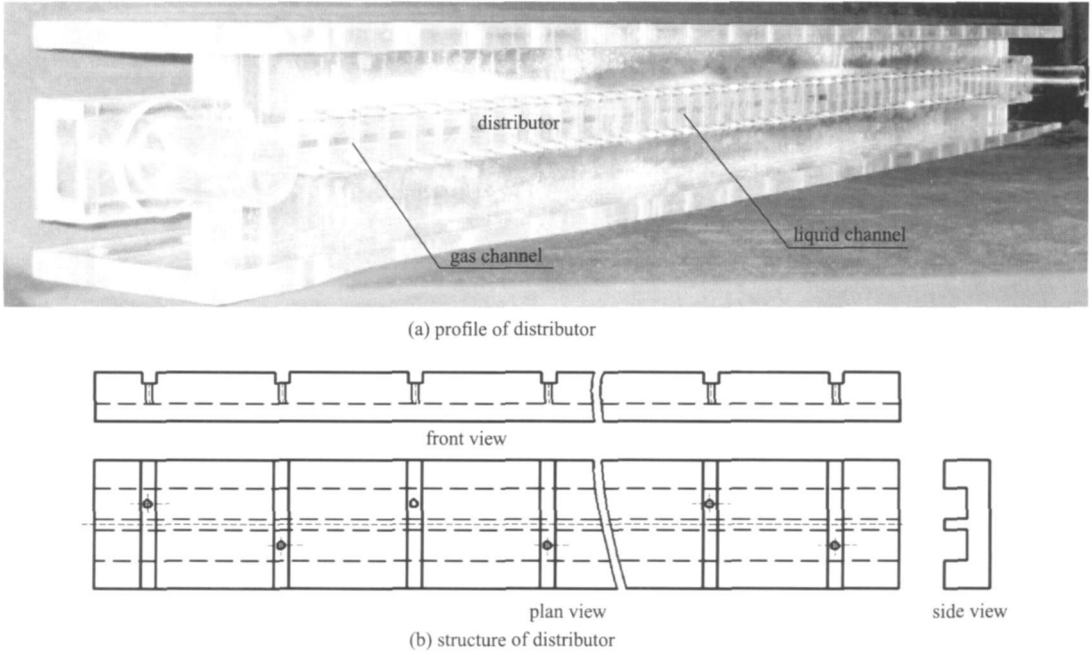


图 2 两相流分配器结构
Fig. 2 Profile of gas-liquid distributor

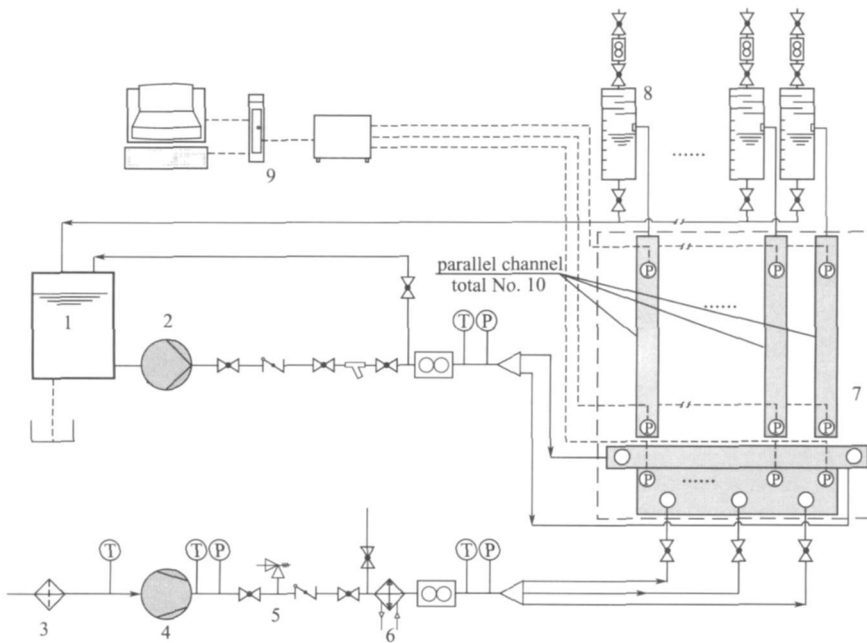


图 3 两相流实验台流程图
Fig. 3 Scheme of flow diagram

Ⓜ temperature test position; Ⓟ pressure test position; Ⓡ pressure test position; Ⓢ check valve; Ⓣ filter;
Ⓤ volume flow meter; 1—water tank; 2—water pump; 3—air filter; 4—air compressor; 5—relief valve; 6—air cooler; 7—test section; 8—phase separator; 9—data acquisition system

器的水流量恒定并且便于调节，在给水管和分配器水侧入口之间的管端上加一个旁通支管用来调节流量。给水体积流量由安装在试件前给水总管的转子式流量计读出，压力由安装在给水总管上的压力表读取。

空气系统：常压空气首先经压缩机 4 加压后经冷却器进入实验段空气入口。当系统工作时，靠安装在气体管道和分配器之间管段上的三通调节阀，对分配器气体流量进行调节。当需要增加实验段的流量时，调小旁通阀门，减小旁通管的流量；反之，调大旁通阀门，增加旁通管道管的流量。

实验用的板束体由空气入口静压箱、气液分配器和下游 10 个平行区域组成。为了清楚看到气液在分配器里的混合过程及翅片区的流动状况，板束体用有机玻璃加工而成。从实验可行性出发，将翅片区沿着宽度方向划分为 10 个相同的小区域，分别统计这些区域气液的流量，从而得到气液分配特性。文献 [4, 11, 13] 在研究流量分配均匀性时均采用同样的处理方法。通过实验段的汽水混合物首先经过气液分离器进行分离，然后进入各自计量系统进行称量。气体流量由设在气体出口前的转子流量计读出，仪表精度等级为 ±2.5%。液体流量通过计量其体积和测试时间由计算得出。

2 数据处理

气液两相流体在平行通道内的分布情况可通过归一化方法来表述。该方法能够清楚地反映不同通道流量不均匀的情况，称其为流量不均匀度，用 $D_{k,i}$ 表示。计算如式(1)所示^[13-14]。

$$D_{k,i} = \frac{\dot{m}_{k,i}}{\sum_{j=1}^{10} \dot{m}_{k,j} / 10}$$

其中，当 k 为 L 时为液体， k 为 G 时为气体； i 为通道编号。

为了使不同工况下流体分配均匀性具有可比性，引入标准方差指标，可以很好地综合反映不同实验工况条件下平行通道流体分配的不均匀性，用 STD_k (standard deviation) 表示，其定义如式(2)所示。

$$STD_k = \left[\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (D_{k,i} - 1)^2 \right]^{1/2}$$

标准偏差值越小，说明该工况流体分配越均匀；反之，说明流体分配不均匀。

3 结果及讨论

实验测量了不同气液流量下气液分配器对下游

10 个通道分配均匀性的影响。在液体流量分别为 0.5、0.85、1.25、1.6、2.0、2.2、2.34 $m^3 \cdot h^{-1}$ 时，通过改变气体流量，研究在不同气液流量下分配器各个平行通道内气液的分配情况。本实验共进行了 35 种工况和 105 组测试。

图 4 给出了液体流量为 0.5 $m^3 \cdot h^{-1}$ 时，不同气体流量下时 10 个通道气液流量分配的相对偏差。相对偏差越接近 1，说明该通道流量越接近平均水平，该通道内流体分配均匀性越好。

从图 4 中可以看出，气体和液体流量不均匀度基本在 1 上下波动。其中，气体流量不均匀度 [图 4(a)] 位于 0.82~1.28 的范围内，液体流量不均匀度 [图 4(b)] 在 0.74~1.25 范围内。

同一通道的气、液流量偏差如图 5(a) 所示。图 5(a) 中给出了所有实验工况下，平行通道内气体和液体分布情况。从图中可以看出：10 个平行通道内气体流量不均匀度在 0.6~1.5 之间，液体在 0.6~1.4 范围内；气液流量不均匀度主要集中在 0.8~1.2 之间，即平均值 1 上下 20% 的区间内。图 5(b) 给出了所有实验工况下气液流量标准

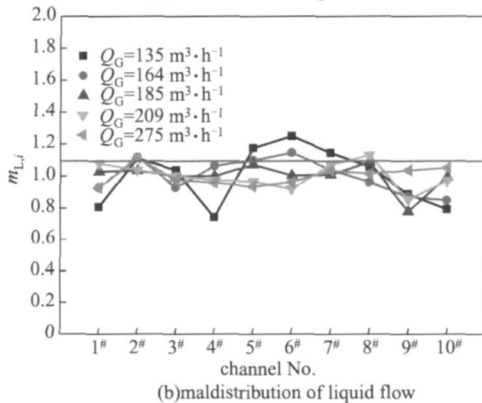
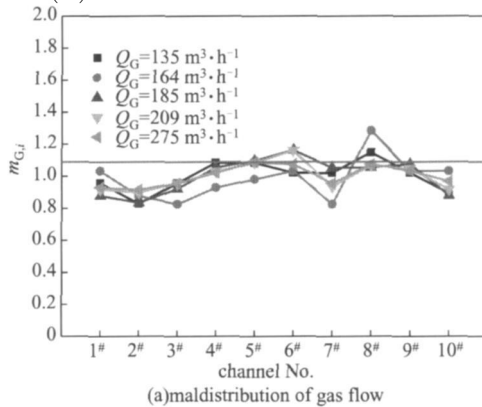


图 4 $Q_L = 0.5 m^3 \cdot h^{-1}$ 时气液通道流量的不均匀度

Fig. 4 Maldistribution in channels at

$Q_L = 0.5 m^3 \cdot h^{-1}$

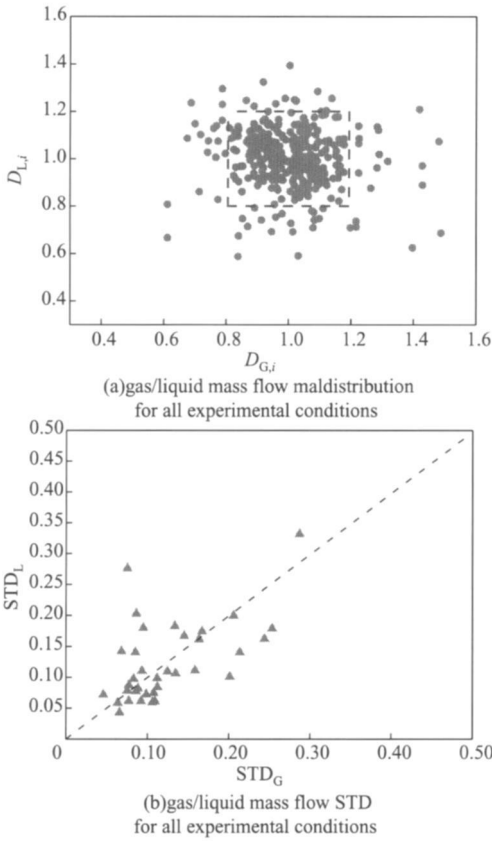


图 5 气体/液体流量不均匀度及标准差
Fig 5 Maldistribution in channel and standard deviation

差。气体流量最大标准差为 0.3，液体流量最大标准差为 0.35。从气液分配标准差分布位置还可以看出，气液标准差基本位于 45° 虚线的两侧，这也说明气液分配均匀情况大致相当。这些实验数据表明应用该种形式的分配器后可以避免文献 [13] 中所述传统两相流分配结构中液体比气体分配相对偏差更大的问题。

图 6 比较了本文实验分配器和文献 [10]、[13] 所用气液两相分配器的分配特性。如图 6(a) 所示，文献 [10] 给出了气液两相流干度为 0.18 时，封头不同位置气液流量偏差，其中气体流量分布在 0.8~1.2 之间，液体流量不均匀度在 0.6~1.8 之间。比较实验分配器和文献 [10] 可以看出，打孔管式封头分配结构，气体分配均匀性稍好，液体分配均匀性差。总体上本文所研究的结构分配均匀性优于打孔管式封头分配结构。

文献 [13] 采用笛状 180° 放置的分配器结构，其气体流量偏差分布在 0.2~2.2 之间，液体流量偏差分布在 0.5~2.4 之间。本文实验所用分配器

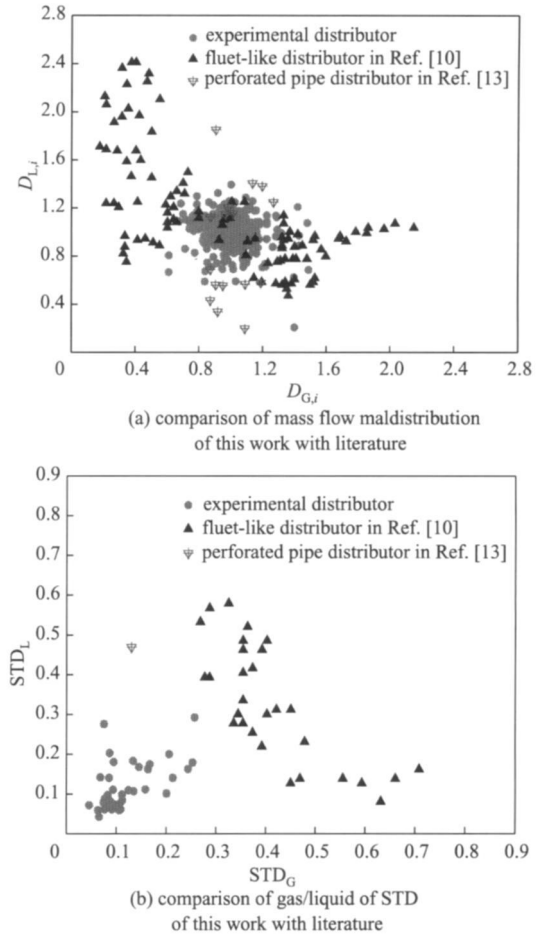


图 6 气体/液体流量不均匀度及标准差比较
Fig 6 Maldistribution in channel and standard deviation for all conditions

气液流量偏差远小于这些数值。

4 结论

本文实验研究了一种板翅式换热器两相流分配器结构，气水系统模拟实验结果表明该种形式的分配器能够提高气液分配均匀性。该种形式的分配器结构克服了液体流量偏差比气体大的问题，对所有实验研究的工况来说，采用该结构的分配器后，液体分配流量偏差和气体相当。

值得指出的是，虽然该种形式的分配器结构相比于现有的两种气液分配均匀性有所改善，但要成功地应用于板翅式换热器设计，还应该对分配器的结构做进一步优化研究。

References

[1] Mueller A C. Effects of some types of maldistribution on the performance of heat exchangers [J]. *Heat Transfer Engineering*,

- 1987, **8** (2): 75-86
- [2] Kitto J, Robertson J M. Effects of maldistribution of flow on heat transfer equipment performance [J]. *Heat Transfer Engineering*, 1989, **10** (1): 18-25
- [3] Shah R K, London A L. Effects of nonuniform passages on compact heat exchanger performance [J]. *Journal of Engineering for Power Transactions of the ASME*, 1980, **102** (3): 653-659
- [4] Jiao A J, Li Y Z, Chen C Z, *et al.* Experimental investigation on fluid flow maldistribution in plate fin heat exchangers [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2003, **24** (4): 25-31
- [5] Jiao Anjun (焦安军), Li Yanzhong (厉彦忠), Zhang Rui (张瑞), *et al.* Flow distribution performance of different distributor's configuration in plate fin heat exchange [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 2001, **11**: 153-158
- [6] Jiao Anjun (焦安军). Fluid flow distribution performance at heat exchanger's entrance and its optimization [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002
- [7] Zhang Zhe (张哲), Li Yanzhong (厉彦忠), Tian Jinjin (田津津). The CFD method on the process of design for plate fin heat exchanger [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2002, **3**: 42-45, 65
- [8] Wang Jiang (王江), Li Yanzhong (厉彦忠), Zhang Zhe (张哲), *et al.* Effect of header configuration on thermal performance of plate fin heat exchangers [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56**: 1413-1418
- [9] Wen Jian (文键), Li Yanzhong (厉彦忠), Zhou Aimin (周爱民), *et al.* A numerical and experimental investigation of the flow field at the entrance of plate fin heat exchanger [J]. *Chemical Engineering* (化学工程), 2006, **8**: 24-27
- [10] Wu Yuyuan (吴裕远), Wu Tiehui (吴铁晖), Chen Liufang (陈流芳). New progress in researches on gas liquid uniform distribution characteristic and typical structure design of cryogenic plate fin heat exchangers [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 2007 (4): 383-388
- [11] Wu Jianghong (巫江虹), Chen Changqing (陈长青), Wu Yezheng (吴业正). Research on the two phase inlet of the plate fin heat exchanger [J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 1996 (2): 38-40
- [12] Li Kuining (李夔宁), Wu Xiaobo (吴小波), Yin Yaling (尹亚领). Experiment on gas and liquid distribution character of the parallel evaporator [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* (热能动力工程), 2009, **6**: 759-765, 818-819
- [13] Marchitto A, Fossa M, Guglielmini G. Distribution of air water mixtures in parallel vertical channels as an effect of the header geometry [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, **33** (5): 895-902
- [14] Vist S, Pettersen J. Two phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds [C]. Grenoble, France: Elsevier Science Inc, 2004: 209-215