

板翅式换热器不同气液入口分配方式的分配性能对比分析

李 焱¹, 李玉星¹, 胡其会¹, 王武昌¹, 谢 彬², 喻西崇²

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海石油研究总院, 北京 100149)

摘要:采用计算流体动力学方法对换热器单层通道处的气液相“先混合、后分配”的传统入口分配方式(方式 A)和气液相“先分配、后混合”的新型入口分配方式(方式 B)分别进行数值模拟。通过分析气液总流量在 0.078~0.291 kg/s 和液相质量分数在 7.8%~91.4% 内的换热器入口气液流量分布的不均匀度和流量标准方差等评价指标,对两种入口分配方式的分配性能进行评估。结果表明:相同流量条件下,方式 B 比方式 A 的气液分配不均匀度更小。流量的增大就会导致两种方式的气液分配不均匀度升高,其中方式 A 的气液分配不均匀度增幅更大。随着液相质量分数增加,方式 A 的气液不均匀度降低,方式 B 的气液分配不均匀度小幅升高,但方式 B 的气液分配不均匀度一直比方式 A 小,且保持较低值。方式 B 比方式 A 更能有效地提高板翅式换热器的流体流动分配均匀性。

关键词:气液两相流;板翅式换热器;流量标准方差;分配不均匀度

中图分类号:TE 646

文献标志码:A

Analysis and comparison of distribution performance of two entrance forms used in plate-fin heat exchangers

LI Yan¹, LI Yu-xing¹, HU Qi-hui¹, WANG Wu-chang¹, XIE Bin², YU Xi-chong²

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. CNOOC Research Center, Beijing 100149, China)

Abstract: For the traditional entrance form (form A) used in plate-fin heat exchangers, gas and liquid flows were mixed together before entering the header to be distributed. A novel form (form B) was designed, in which distribution was prior to mixing by using a gas-liquid distributor. Numerical simulation of the gas-liquid flow distribution was carried out for the two different entrance forms by computational fluid dynamics method, respectively. The non-uniformity and standard deviation of the gas-liquid flow distribution in entrances of the plate-fin heat exchanger were analyzed under different conditions of flow rate (0.078–0.291 kg/s) and liquid mass fraction (7.8%–91.4%). The calculation results show that the non-uniformity of gas-liquid flow distribution is smaller for the form B than that for the form A under the same flow conditions. The non-uniformity is more serious with the increase of mass flow rate, and the non-uniformity for the form A increases even greater. For the form B, the non-uniformity of gas-liquid flow distribution slightly rises with the increase of liquid mass fraction. Conversely, it reduces for the form A. The non-uniformity of gas-liquid flow distribution for the form B remains a lower value, which is smaller than that for the form A. The way of "distribution prior to mixing" can improve the uniformity of the fluid flow distribution in plate-fin heat exchangers effectively.

Key words: gas-liquid two phase flow; plate-fin heat exchanger; standard deviation of flow rates; non-uniformity of distribution

板翅式换热器在石油化工中的天然气液化、分离、制冷等工艺中备受关注^[1]。板翅式换热器高效

收稿日期:2013-05-16

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05026-006-07);中央高校基本科研业务费专项(13CX06059A);中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(CX2013022);2012 中澳天然气技术伙伴关系基金博士补充奖学金资助项目(2012)

作者简介:李焱(1986-),女,博士研究生,从事 FLNG 关键设备的海上适应性研究。E-mail: liyansally@gmail.com。

紧凑的特点与浮式液化天然气生产储卸装置 (FLNG, 又称 FPSO^[2]) 工艺中所需的空效率要求相符合, 使得该种换热器成为各大 FLNG 工艺中的重要主低温换热器^[3]。然而, 板翅式换热器内气液分布不均会导致换热器换热效率下降和压降过低等问题, 其中, 气液不均匀分配引起的换热器换热效率下降幅度可达 20% ~ 40%^[4], 并且这种趋势随着换热单元数量的增大而加剧, 因此流体分配不均是板翅式换热器设计中不容忽视的问题^[5-6]。影响板翅式换热器分配不均的因素有两方面: 一是由于封头配管设计不当, 上游压力分布不均, 或管道严重堵塞, 造成管束入口截面流体分配不均; 二是由于翅片结构的制造公差、制造和安装过程中产生的变形等原因造成的板束内部通道的不均匀分配^[7]。目前, 在国内空分设备的工业应用中多采用增大设计余量的方式弥补分配不均造成的换热影响^[8], 但是该方法在对空间要求严格的 FLNG 工艺应用中并不适用。为降低流体分布的不均匀程度, 很多学者对换热器的入口结构进行了改进, 提出了类似笛形的管状结构^[9-13] 或二次封头^[14-18] 等换热器入口结构。Wang^[9]、Marchitto^[10-11]、Kim^[12-13] 和仇嘉^[19] 等通过改变管径、管长、孔径开孔方向和通道数量等参数对换热器入口结构进行了改进, 文键^[5-6]、张哲^[14-16]、焦安军^[8, 17-18] 等在封头体的改进方面做了系统的研究, 但是, 这些措施对分配均匀性的改善程度有限。吴裕远等^[4] 提出了对气液“先分配、后混合”的入口分配原理。目前, 对换热器入口分配性能的研究主要集中在“先混合、后分配”分配方式的结构改进, 而对“先分配、后混合”方式的气液分配性能研究较少^[20]。笔者基于计算流体动力学方法, 利用 fluent 商业计算软件, 分别对换热器单层通道中气液“先混合、后分配”的传统入口分配方式和气液“先分配、后混合”的新型入口分配方式进行数值模拟。

1 不同入口分配方式与 CFD 方法应用

1.1 气液入口分配方式结构模型与网格划分

图 1 为不同换热器气液入口分配方式的结构示意图。(a) 为换热器气液“先混合、后分配”的传统入口分配方式 (方式 A), 天然气气液两相流经过入口封头直接进入换热器, 在翅片区实现通道间的换热; (b) 为气液“先分配、后混合”的新型入口分配方式 (方式 B), 上游来流的天然气先进行气液分离, 气相流体依次通过气相封头、导流片分配从下部进

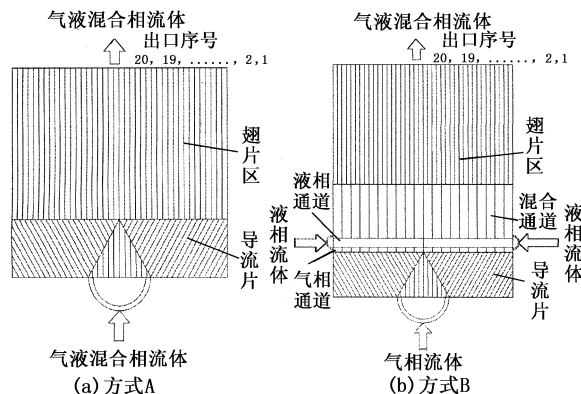


图 1 换热器单层通道不同入口方式结构示意图

Fig. 1 Sketch maps of two entrance forms in heat exchangers

入气液分配器^[21], 液相流体通过换热器两侧的液相封头进入气液分配器进行分配, 气液两相流混合后进入换热器翅片区。图 2 为方式 B 中分配器结构局部示意图。这个结构包括气相通道、液相通道和

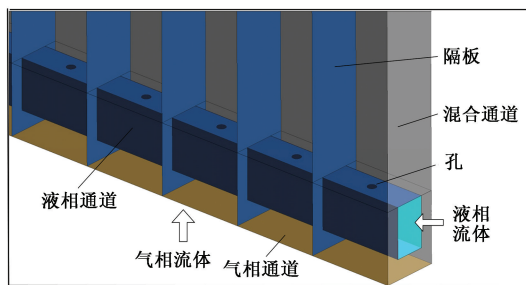


图 2 方式 B 分配器结构局部示意图

Fig. 2 Local structure diagram of model of gas and liquid floating through a distributor

气液混合相通道 3 部分^[21]。液体和气体分别通过各自的通道进入气液分配器, 两者在分配器中进行分配后混合均匀进入气液混合通道, 隔板将混合通道隔开成独立单元, 互不联通, 有效地防止了气液进行大规模对流, 造成分布不均。整个分配器厚 6.5 mm 与翅片高度一致, 分配器出口与换热器翅片区直接相连, 宽度与翅片区一致为 400 mm。将两种方式出口区域平均分为 20 个通道, 分别计算各通道出口流量。方式 A 和方式 B 几何模型沿 y 轴方向对称, 故进行简化做对称处理。由于各部分尺寸存在较大差异, 对模型结构分块进行结构网格的划分, 方式 A 网格约为 52 万, 方式 B 网格约为 86 万。

1.2 数学模型

在计算中流动状态假定为与时间无关的稳定流动, 同时由于重点研究换热器入口结构的流动过程, 没有涉及到换热器翅片区域的换热和相变, 故计算过程中只考虑物流分配, 不涉及热量交换, 不发生相变。

数值模拟的流态为湍流,目前常见的湍流模型有:标准 $k-\varepsilon$ 模型、 $RNGk-\varepsilon$ 模型和可实现的 $k-\varepsilon$ 模型。在本文的分配器内两相流场模拟中,无强漩涡流动和高粘性流体流动,故选择经典的标准 $k-\varepsilon$ 模型作为湍流模型,即可高效地模拟湍流流场。

模拟采用的天然气为气液两相流体,且气液比例有较宽广的分布(液相质量分数在 7.8% ~ 91.4%),故应用混合模型进行求解,该模型适于相间混合与分离,连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{\mathbf{v}}_m) = 0, \quad (1)$$

其中

$$\bar{\mathbf{v}}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{\mathbf{v}}_k}{\rho_m}, \quad \rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k.$$

式中, $\bar{\mathbf{v}}_m$ 为平均质量流速, m/s; ρ_m 为混合密度, kg/m³; α_k 为第 k 相的体积分数。

混合模型的动量方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \bar{\mathbf{v}}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{\mathbf{v}}_m \bar{\mathbf{v}}_m) = & -\nabla p + \\ & \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{\mathbf{v}}_m + \nabla \bar{\mathbf{v}}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \\ & \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^j \alpha_k \rho_k \bar{\mathbf{v}}_{\text{dr},k} \bar{\mathbf{v}}_{\text{dr},k} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

式中, j 为相的个数; $\mathbf{F}$ 为体积力; μ_m 为混合黏度; $\bar{\mathbf{v}}_{\text{dr},k}$ 为第 k 相的拖曳速度。

第 2 相的体积分数方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2) + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \bar{\mathbf{v}}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \bar{\mathbf{v}}_{\text{dr},2}). \quad (3)$$

方式 A 中几何模型气液混合物入口为质量流量入口,假定气液混合均匀。方式 B 气相入口和液相入口均设为质量流量入口。两个模型中均采用压力出口,壁面和隔板均设为无滑移壁面,不进行换热。

1.3 气液分布评价参数

为了比较不同入口方式的流量分布,将几何模型出口分为 20 个区域,沿 y 轴进行编号,从外侧到中心位置依次为 1, 2, 3, ..., n ($n = 20$, 见图 3), i 代表出口序号。 $\bar{m}_{1,i}$ 和 $\bar{m}_{m,i}$ 分别代表第 i 个出口的液相和混合相的质量流量。通过对计算结果的处理,得到以下评价标准。

(1) 平均流量是模型通道内平均流量,单位 kg/s。液相平均流量 $\bar{m}_1$ 和混合相平均流量 $\bar{m}_m$ 为

$$\bar{m}_1 = \frac{Q_m}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{m}_{1,i}}{n}, \quad (4)$$

$$\bar{m}_m = \frac{Q_m}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{m}_{m,i}}{n}.$$

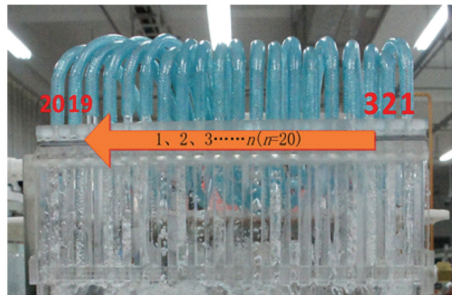


图 3 分配器试验控件

Fig. 3 Distributor used in experiments

(2) 不均匀度 D_i 是第 i 出口流量对平均液相流量的偏差。液相不均匀度 $D_{1,i}$ 和混合相不均匀度 $D_{m,i}$ 与 0 差值绝对值越小代表分配越均匀。反之,代表分配不均匀。

$$D_{1,i} = \frac{\bar{m}_{1,i} - \bar{m}_1}{\bar{m}_1}, \quad (5)$$

$$D_{m,i} = \frac{\bar{m}_{m,i} - \bar{m}_m}{\bar{m}_m}.$$

(3) 标准方差 STD 能够使不同工况下流体分配均匀性具有可比性,可以较好地综合反映不同工况参数下气液分布的不均匀性。数值越小说明模型气液分布越均匀,反之,说明分布不均匀。液相标准方差 STD_1 和混合相标准方差 STD_m 计算关系式分别为

$$STD_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{1,i}^2}, \quad (6)$$

$$STD_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{m,i}^2}.$$

1.4 试验验证

采用水和空气表征气液混合两相流,方式 A 和 B 试验控件在水平方向上结构对称做简化处理,故与模拟的几何模型一致,测量出口均设为 20 个通道,为了便于测量,将每两个出口分为一组,分别通过气体和液体金属浮子流量计(HRMZ-15YH1R1)对出口流量进行测量。在同一进料机械,不同流量条件下气液混合物压力有变化,测试了液相质量分数为 30% 的不同流量,压缩机和离心泵稳定地提供气液进口流量,出口为一个大气压,试验均压降小于 10 kPa,该部分压降主要是由于重力和模型段流动阻力与测试段不同阀门管道的阻力共同造成的。本试验中是常温条件,且压降变化小于 10%,流速远

远小于 100 m/s, 流体密度变化也远小于 5%, 可将气体视为不可压缩流体进行模拟。图 4 为气液同时进入换热器翅片时试验结果与模拟结果的对比较证。在工况为 350 kPa、15 °C 时, 入口水总流量为 0.66 m³/h, 空气总流量为 2 m³/h (标准状况) 的条件下将试验测量得到的液体流量数据与相同工况下的模拟结果进行对比, 模拟结果相对于试验结果总体误差约 8.4%, 实际中经过换热器入口结构的温度、压力不会有很大变化, 且在温度变化范围内未产生相变, 它们之间的气液质量比无变化, 而压降相对于总压降来说非常小, 出口流量的计算结果跟模型的模拟和试验结果相比, 差别微小, 前后两个模拟结果曲线趋近重合。图 4 表明, 该模拟能够良好地反映试验中物流分布规律, 实现了对模拟方法的试验验证。

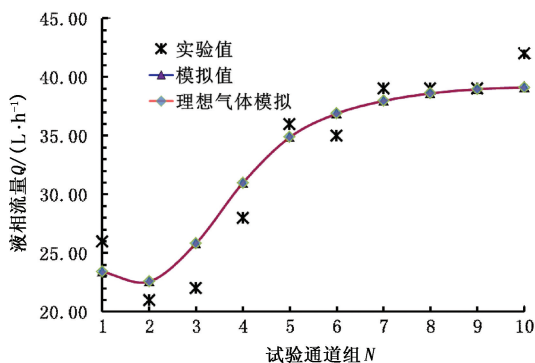


图 4 模拟值试验验证

Fig. 4 Comparison of experimental data with numerical results

2 结果及其讨论

数值模拟所用的气液两相流是某 LNG 流程中的天然气混合物分别为 CH₄ (10.5%), C₂H₆ (9.0%), C₃H₈ (15.8%), iC₄H₁₀ (18.2%), nC₄H₁₀ (30.8%), C₅H₁₂ (5.3%) (C₅ 以上组分设为 C₅⁺, 括号中数据为质量分数)。根据气液相平衡原理, 随着工况条件(温度、压力等)的变化, 天然气中气液相比例也随之发生变化, 相应的物性参数(密度、黏度等)均发生变化。

2.1 不同气液入口方式对不同位置出口物流分配的影响

模拟了流量在 0.194 kg/s (液相质量分数为 73.8%) 时不同入口方式的物流分布情况, 对各出口的流量和不均匀度 $D_{k,i}$ 进行了比较。图 5 为两种气液入口方式混合相和液相流量对比。通过比较发现, 方式 A 各个出口的流量存在很大的差异, 靠近换热器中部的通道内流量很大, 随着与中部的距离

越远, 通道内流量越小。方式 B 中进入翅片区的各个通道的流量分布变得比较均匀, 流体通道出口根据距离液相通道入口的远近, 流量存在比较小的差异, 距离液相入口较近, 混合通道内流量较大, 距离液相入口越远, 混合通道内流量越小。在两种情况中, 液相和混合相流量分布规律一致。方式 A 中 $\dot{m}_{l,i}$ 和 $\dot{m}_{m,i}$ 范围分别为 $2.99 \times 10^{-3} \sim 5.88 \times 10^{-3}$ kg/s 和 $2.15 \times 10^{-3} \sim 4.23 \times 10^{-3}$ kg/s, 远远大于方式 B 中 $\dot{m}_{l,i}$ 和 $\dot{m}_{m,i}$ 的范围。

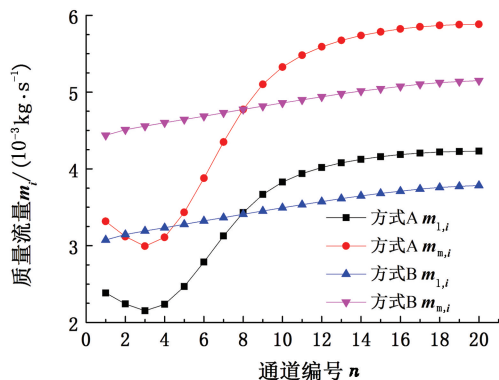


图 5 不同出口位置质量流量分布

Fig. 5 Mass flow rates in channels in two entrance forms

图 6 为换热器不同入口方式的各通道内混合相和液相分配的不均匀性对比。方式 A 中混合相 $D_{m,i}$ 和液相 $D_{l,i}$ 范围分别是 $-0.381 \sim 0.210$ 和 $-0.383 \sim 0.214$, 不均匀度在中部区域很大, 越靠近端部不均匀度越小, 呈依次递减关系, 经过计算得到液相方差 STD_1 为 0.230。方式 B 中混合相 $D_{m,i}$ 和液相 $D_{l,i}$ 范围在 $-0.0855 \sim 0.0608$ 和 $0.1189 \sim 0.0846$ 之间, 分配比较均匀, 液相方差 STD_1 为 0.0650, 小于气液同时进入时的方差值。由此可见换热器入口“先分配、后混合”方式的分配效果优于“先混合、后分配”。

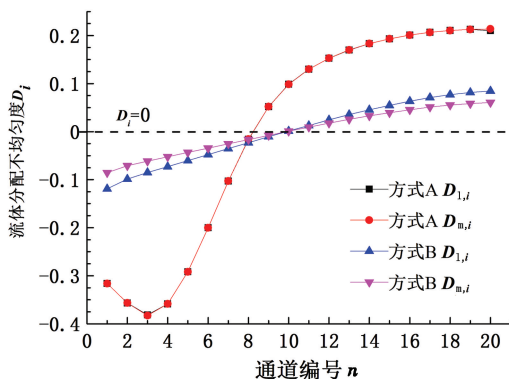


图 6 不同出口位置不均匀度对比

Fig. 6 Non-uniformity contrast in channels in two entrance forms

2.2 不同气液入口方式的物流分配随流量的变化

以-61 ℃条件下(此时液相密度为 602.543 kg·m⁻³,气相密度为 14.586 kg·m⁻³)液相质量分数约为 73.8%的天然气混合物为研究对象,对比分析了流量分别为 0.078、0.130、0.194、0.232 和 0.291 kg/s 时流道内流体的分布情况。

图 7 为流道出口混合相和液相方差随流量变化的对比。方差(STD_m 、 STD_l)的值越小、与 0 越接近代表分配效果越好。方式 A 中,随着流量增大,混

合相方差 STD_m 和液相方差 STD_l 范围分别是 0.185 ~ 0.239 和 0.197 ~ 0.246,都呈现明显增大的趋势。方式 B 中 STD_m 和 STD_l 比较小,随着流量的增大方差值有小幅增加。方式 B 的液相和混合相方差均比气液同时进入时的值明显减小,说明方式 B 分配效果更好,分配更加均匀。同时,两种分配方式随着流量的增大, STD_m 和 STD_l 都有所增加,分配不均匀性会增大。

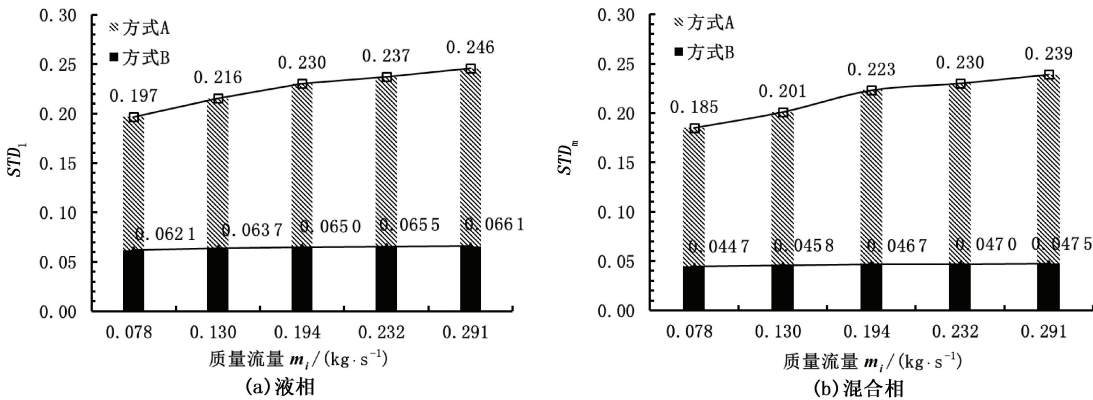


图 7 不同流量下液相及混合相流量标准方差

Fig. 7 Liquid and total flow distribution standard deviation for different flow rates

2.3 不同气液入口方式的物流分配随气液比变化

研究气液比影响所用到的天然气的总质量流量为 0.194 kg/s,工作压力为 1.360 MPa,温度分别为 42、25、-8、-61 和 -98 ℃,液相质量分数为 7.8% ~ 91.4%。图 8 为不同气液比条件下,不同入口方式的混合相和液相的流量标准方差。在同一液相比例

下,方式 B 的混合相和液相的流量分布比方式 A 有明显改善。方式 B 中 STD_m 和 STD_l 在 0.0043 ~ 0.0641 和 0.0477 ~ 0.0706 之间比方式 A 的流量方差小(STD_m 和 STD_l 分别为 0.192 ~ 0.252 和 0.201 ~ 0.256),分配更均匀。

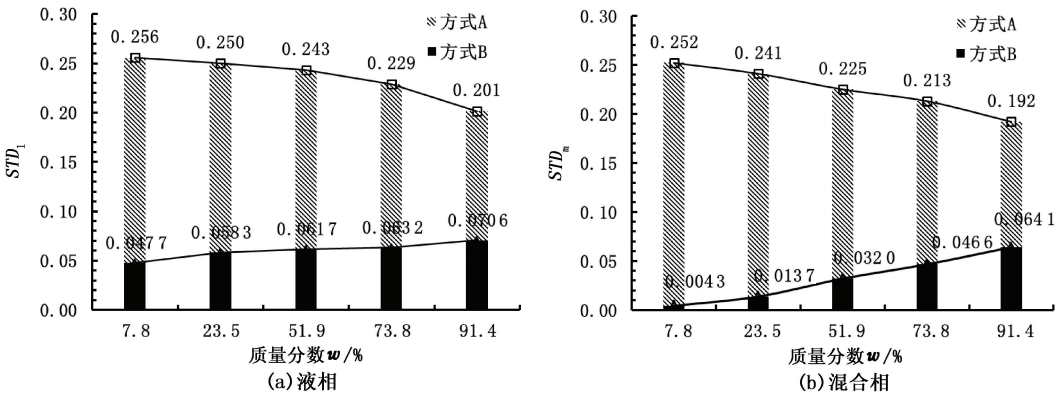


图 8 不同气液比下液相及混合相流量标准方差

Fig. 8 Liquid and total flow distribution standard deviation for different liquid mass fractions

在方式 A 中,液相质量流量的增大有利于分配器分配性能的提高,液相越多,分配越均匀。这个规律与文献[19]中所提到的入口干度越大,流道间液相分配不均匀性越差的规律一致。方式 B 中液相质量分数的增加会导致流量标准方差增大,这与分

配器特有的结构形式有直接原因。本文中提到的气液分配器结构可以使气液“先分配,后混合”,能够有效地避免气液混合物经过导流片时,由于密度不同,在转弯处离心力的差异而造成气液再次分离的状况。液体通过端部进入分配器,经液相流道上面

的小孔与气体混合,与液体入口距离不同使流速存在差异,液相质量分数越大这种差异就变得越明显,进而会出现流量标准方差值越来越大的规律。

在“先混合、后分配”的传统入口分配方式下,流体的流量标准方差都比较大,各通道流体分配不均匀,不利于换热器内流体的均匀分布和换热。“先分配、后混合”的新型入口分配方式与传统分配方式相比,流量标准方差较小,达到了较好的分配效果,有效降低了分配的不均匀程度。

3 结 论

(1)单层通道内换热器气液分配不均匀度随着流量的增大而增大,入口流量越大,气液分配不均匀度也越大。流量大的区域集中在板翅中间部分,越靠近端部,流量越小。

(2)分配器液相从两端进入的特殊结构,决定了气液分配不均匀程度随着液相比比例的增大而逐渐增大,液相比比例越大,气液分配的不均匀度越大。液相的不均匀程度高于混合相不均匀程度,液相质量分数是影响气液分配的重要因素。

参考文献:

- [1] 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.
JIAO An-jun, LI Yan-zhong, ZHANG Rui, et al. Effects of different inlet angles on distributor performance [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(9): 761-765.
- [2] 陈海阳, 李玉星, 孙法峰, 等. LNG FPSO 液舱内储液晃动特性的数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(4): 135-143.
CHEN Hai-yang, LI Yu-xing, SUN Fa-feng, et al. Numerical simulation of liquid sloshing characteristics in LNG FPSO containers[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 135-143.
- [3] 陈永东, 陈学东. LNG 成套装置换热器关键技术分析[J]. 天然气工业, 2010(1): 1-5.
CHEN Yong-dong, CHEN Xue-dong. A technical analysis of heat exchangers in LNG plants and terminals[J]. Natural Gas Industry, 2010(1): 1-5.
- [4] 吴裕远, 吴铁晖, 陈流芳. 双相变换热器气液均匀分配特性及典型结构研究的新进展[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 383-388.
WU Yu-yuan, WU Tie-hui, CHEN Liu-fang. 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, 2007, 41(4): 383-388.

- [5] 文键, 厉彦忠. 改善板翅式换热器封头流场分布的一种措施[C]//厉彦忠. 第六届全国低温工程与制冷工程大会论文集. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [6] WEN J, LI Y, WANG S, et al. Experimental investigation of header configuration improvement in plate-fin heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11/12): 1761-1770.
- [7] 顾安忠. 液化天然气技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 481.
- [8] 焦安军, 厉彦忠, 张瑞, 等. 物流分配的不均匀性对紧凑型换热器效能的影响[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(3): 265-269.
JIAO An-jun, LI Yan-zhong, ZHANG Rui, et al. Study on the effects of flow nonuniformity on performance of compact heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(3): 265-269.
- [9] WANG C, YANG K, TSAI J, et al. Characteristics of flow distribution in compact parallel flow heat exchangers, part II: modified inlet header[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(16): 3235-3242.
- [10] 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.
- [11] MARCHITTO A, DEVIA F, FOSSA M, et al. Experiments on two-phase flow distribution inside parallel channels of compact heat exchangers[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(2): 128-144.
- [12] KIM Nae-Hyun, SIN Tae-Ryong. Two-phase flow distribution of air-water annular flow in a parallel flow heat exchanger[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(12): 1340-1353.
- [13] KIM N, HAN S. Distribution of air-water annular flow in a header of a parallel flow heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(5/6): 977-992.
- [14] 张哲, 田津津. 板翅式换热器封头结构的物流分配特性[J]. 化学工程, 2009, 37(1): 15-18.
ZHANG Zhe, TIAN Jin-jin. Flow distribution properties of header configuration in plate-fin heat exchangers [J]. Chemical Engineering, 2009, 37(1): 15-18.
- [15] 张哲, 厉彦忠, 许箴. 板翅式换热器物流分配的研究概述[C]//厉彦忠. 第六届全国低温与制冷工程大会论文集. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [16] 张哲, 厉彦忠, 焦安军. 板翅式换热器封头结构的数值模拟[J]. 化工学报, 2002, 53(11): 1182-1187.

- ZHANG Zhe, LI Yan-zhong, JIAO An-jun. Numerical simulation of header construction of plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53(11):1182-1187.
- [17] 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(2):153-158.
- JIAO An-jun, LI Yan-zhong, ZHANG Rui, et al. Effects of different distributor configuration parameters on fluid flow distribution in plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003,54(2):153-158.
- [18] 焦安军. 换热器入口物流分配特性研究与优化设计[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2002.
- JIAO An-jun. Fluid flow distribution performance at heat exchanger's entrance and its optimization[D]. Xi'an: School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [19] 仇嘉,魏文建,张绍志,等. 基于CFD数值模拟的板式换热器分配器性能研究[J]. 机械工程学报,2010,46(14):130-137.
- QIU Jia, WEI Wen-jian, ZHANG Shao-zhi, et al. Research on performance of distributors used in plate heat exchangers based on CFD numerical simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(14):130-137.
- [20] 袁培,姜国宝,张菲妮,等. 板翅式换热器两相流分配器[J]. 化工学报,2011,62(S1):31-36.
- YUAN Pei, JIANG Guo-bao, ZHANG Fei-ni, et al. Two-phase distributor in plate-fin heat exchanger[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011,62(S1):31-36.
- [21] 李焱,李玉星,胡其会,等. 一种新型板翅式换热器气液分配器分配特性的敏感性分析[J]. 化工学报,2013,64(6):2007-2014.
- LI Yan, LI Yu-xing, HU Qi-hui, et al. Sensitivity analysis of the performance of a new gas-liquid distributor used in plate fin heat exchangers[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013,64(6):2007-2014.

(编辑 沈玉英)