

新型整流喷嘴式分流器最佳入口工况数值模拟

Numerical simulation study of optimal inlet conditions of rectifier nozzle type distributor

孙欢 雷卓娅 滕信波 朱俊达

SUN Huan LEI Zhuo-ya TENG Xin-bo ZHU Jun-da

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室,天津 300134)

(Tianjin University of Commerce, Key Laboratory of Tianjin Refrigeration Technology, Tianjin 300134, China)

摘要:目的:改善或尽可能消除制冷系统中节流后气液两相制冷剂在蒸发器中分配不均匀导致的制冷系统性能下降的现象。**方法:**基于多相流模型中的混合物模型,建立整流喷嘴式分流器的物理模型及气液两相流动的数学模型,通过CFD模拟该分流器内部的相分布情况和气液两相分离程度,分析入口工况(流速、干度)对分流器分液均匀性的影响。**结果:**当入口流速为1 m/s,入口干度为0.2时,流型逐步趋于稳定,形成对称的环形流,分流器在此工况下整体不均匀度达到最小值,分流效果最优。**结论:**在对分流器结构进行优化的基础上,通过调整入口工况至最佳可进一步优化流型,形成对称环形流实现均匀分液。

关键词:分流器;CFD模拟;两相流;均匀性;入口工况

Abstract: Objective: In order to effectively improve or eliminate as much as possible in the refrigeration system, the uneven distribution of gas-liquid two-phase refrigerant in the evaporator leads to the performance decline of the refrigeration system.
Methods: The adopts CFD numerical simulation method was used to establish the physical model of rectifier nozzle type distributor and mathematical model of gas-liquid two-phase flow, based on the mixture model in multiphase flow model, which simulated the phase distribution and the degree of gas-liquid two-phase separation inside this distributor,. Then the influence of inlet conditions (inlet flow rate and mass flow fraction of gas) on the uniformity of diverter distribution was analyzed. **Results:** The results showed that when the inlet flow rate was 1 m/s and the mass flow fraction of gas was 0.2, the flow pattern gradually stabilizes and a uniform annular flow could be formed. Under the control of these conditions, the overall unevenness of the distributor

reached the minimum value and had the best effect of liquid separation. **Conclusion:** On the basis of optimizing the structure of the distributor, the flow pattern can be further adjusted by adjusting the inlet condition to the best, and the symmetrical annular flow can be formed to realize uniform liquid separation.

Keywords: distributor; CFD numerical simulation; two-phase flow; distribution uniformity; inlet conditions

制冷设备中,蒸发器管路内的制冷剂能否实现均匀分配,对蒸发器的换热性能起着关键作用。制冷剂经膨胀阀后,流态为两相流,为了尽可能实现制冷剂的均匀分配,辅助元件分流器至关重要^[1-3]。系统的支路供液过量容易造成回气带液,节流元件接收错误的信号工作异常,而制冷剂供液较少的支路其蒸发面积得不到充分利用,导致过热度高,使得换热效率降低,系统性能恶化^[4-5]。徐博等^[6]在多种干度和质量流量条件下,通过CFD模拟,提出了一种新型双筒体型分流器。孙文卿等^[7-8]通过CFD模拟,分别开发了一种新型锥形分流器和一种顶部带有旋流叶片结构的泡罩型分流器。翁晓敏等^[9]通过CFD模拟,提出了6种新型插孔式分流器结构。Fan等^[10]设计了7个不同结构的分流器,并通过CFD模拟研究其流量分配性能和能量耗散。Pu等^[11]根据分流器进气管的特点,提出了一种新的进气管结构优化策略。李登稳等^[12]对文丘里型气液分流器进行研究,得到多组相含率和速度矢量图。Raynal等^[13]选择VOF模型模拟了分流器内气液两相流体的流动。Wu等^[14]提出了基于简单结构构建环形流实现均匀分液的分流器,其分配性能优于目前最常用的圆锥式分流器。Sun等^[15]基于“流型整定和临界分流”的分配理念,提出了一种分流效果较好的新型分流器整流喷嘴式临界分流器,与文丘里式分流器相比,制冷量提高了22.7%。

但是,上述分流器仍存在以下不足:^①对分流效果较好的新型整流喷嘴式分流器的数值模拟研究有限;^②入

基金项目:天津市科技计划项目(编号:KT201904)

作者简介:孙欢(1981—),男,天津商业大学副教授,博士。

E-mail:sunhuan@tjcu.edu.cn

收稿日期:2021-07-23

口流型是影响分流均匀性的重要因素之一,目前对通过数值模拟详细分析分流器内部相分布情况和流型的研究较少;③分流效果改善的研究主要集中在对分流器结构的优化上,而对通过选取最佳入口工况形成对称流型—环形流来改善分配均匀性的研究较少。因此,文章拟构建新型分流器整流喷嘴式分流器的物理模型,采用CFD数值模拟其内部相分布情况和气液两相分离程度;基于模拟结果,期待找出该分流器实现环形流均匀分液的最佳入口工况,为提高制冷剂分配均匀性提供新的思路。

1 模型的建立

1.1 几何模型建立

分流器工作原理如图1所示,主要可分为3阶段:旋流扰动阶段、环状流整定阶段和临界分流阶段。第1阶段,气液两相制冷剂在旋流叶片的扰动下,液体流向管壁,气体集中在中路,第2阶段整流器整流,第3阶段经过扰动和整流后流型趋于对称稳定,到达喷嘴时,基本实现气液均匀分配。

整流喷嘴式分流器的核心部件是旋流叶片和声速喷嘴,其中喷嘴喉部临界直径0.2 cm,喷嘴长度3 cm,叶片L长10 cm,螺距c为2.5 cm,管内径d为0.84 cm,入口管径D为5 cm,其物理模型分别如图2和图3所示。

1.2 网格划分

采用ICEM CFD 16.0划分网格,考虑到网格的质量直接影响数值计算结果,分流器整体结构复杂,因此进行分块划分网格。由于流体经过旋流叶片和喷嘴处速度增大,流场复杂,因此,旋流叶片和喷嘴处的网格划分采用非结构化网格,而其他部分均采用结构化网格划分。经

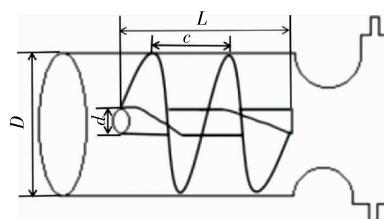


图1 整流喷嘴式分流器原理图

Figure 1 Principle diagram of rectification nozzle type distributor

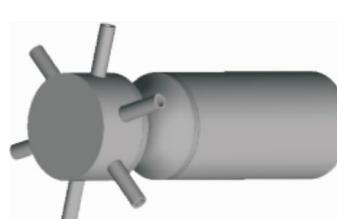


图2 整流喷嘴式分流器

Figure 2 Rectifier nozzle type distributor

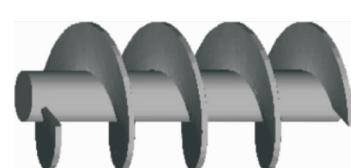


图3 旋流叶片建模

Figure 3 Model of the cyclone blade

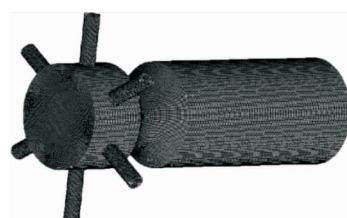


图4 分流器整体网格示意图

Figure 4 Schematic diagram of the overall grid of the distributor



图5 旋流叶片的网格划分

Figure 5 Grid of cyclonic blades



图6 结构化网格划分

Figure 6 Structured meshing

网格独立性检验,最终选定计算模型的网格数2 274 129,网格质量0.7,分流器的网格划分如图4~图6所示。

在CFD分析中,将质量和动量守恒方程离散为代数方程,用有限容积法求解方程组^[16~17]。

(1) 体积分数:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV . \quad (1)$$

(2) 连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n m_{pq} , \quad (2)$$

式中:

\vec{v}_q —— 第q相得到的速度,m/s。

(3) 动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) &= -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \\ \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + m_{pq} \vec{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) , \end{aligned} \quad (3)$$

式中:

$\vec{\tau}_q$ —— q相的剪切应力,N;

\vec{F}_q —— 体积力,N;

$\vec{F}_{lift,q}$ —— 升力,N;

$\vec{F}_{vm,q}$ —— 虚拟质量力,N;

\vec{R}_{pq} —— 相间作用力,N。

(4) 湍流模型:目前计算气液两相流的数学模型较多,而雷诺应力模型(RSM)对于气液两相分布、预测其流型的精确性较高,更适合于气液两相流的计算,其具体形式如下^[18~20]:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \overline{u_i u_j}) = \\
 & - \frac{\partial}{\partial x_k} [\rho (\overline{u_i u_j u_k}) + p (\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j)] + \\
 & \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i u_j} \right) - \rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) - \\
 & \rho \beta (g_i \overline{u_i \theta} + g_j \overline{u_j \theta}) + p \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} - \\
 & 2\rho \Omega_k (\overline{u_i u_m \epsilon_{ikm}} + \overline{u_i u_m \epsilon_{jkm}}), \\
 & \left\{ \begin{array}{l} D_{ij}^T = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \\ \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \\ \varphi_{ij} = \varphi_{ij,1} + \varphi_{ij,2} + \varphi_{ij}^w \\ \epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \epsilon + Y_M) \end{array} \right. . \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中,对流项为左边第 2 项;右边分别为湍流扩散项、分子扩散项、应力产生项、浮力产生项、压力应变项、耗散项和系统旋转产生项。

2 计算方法与边界条件

2.1 计算方法

(1) 选用 FLUENT 16.0 作为数值模拟软件,FLUENT 3D 单精度求解器求解。

(2) 模拟流体以湍流形式流动,只考虑分流器内两相流体的流动,不考虑相间的传热传质以及制冷剂与管壁间的换热。多相流模型选择适用于均匀多相流的混合物模型,湍流模型选择 RSM 模型,壁面函数为 Standard Wall Function。

(3) 模型采用非稳态数值计算,模型各物理量参数的收敛标准为一阶迎风差分格式,控制方程的残差控制在 10^{-4} 以下,采用 SIMPLE 算法计算压力速度耦合,松弛因子为系统默认值,初始化模型流场后,开始计算。

2.2 边界条件

模型计算设置入口边界条件为速度入口,数值为 $0.25 \sim 10.00 \text{ m/s}$,出口边界条件为压力出口。其主相为液相,次相为气相,入口干度为 $0.05 \sim 0.50$,使用无滑移边界条件。

制冷剂选用 R22,其物性参数通过 Refprop 9.0 查询,主要模拟分流器内部的相分布,考虑到分流器内部的压力降较小,主要压降在分流管,选用蒸发温度为 -25°C 时的物性参数,如表 1 所示。

2.3 模型验证

利用 Han 等^[21] 的试验数据验证数值模型的正确性。为保证模型验证的可靠性,验证设置的模拟工况、工质与 Han 等的试验工况、工质一致,具体工况见表 2。此外,提出两个误差因素——流量比相对偏差和质量流量标准差相对偏差,以量化评价整流喷嘴式分流器模型模拟结果的可靠性,如式(5)、式(6)所示。

$$\delta_m = \frac{\dot{m}_{\text{CFD}} - \dot{m}_{\text{exp}}}{\dot{m}_{\text{exp}}} \times 100\%, \quad (5)$$

$$\Delta S = \left| \frac{S_{\text{CFD}} - S_{\text{exp}}}{S_{\text{exp}}} \right| \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

\dot{m} —— 无量纲流量比, $\dot{m} = \frac{M_i}{M}$;

\dot{m}_{CFD} —— CFD 的流量比;

\dot{m}_{exp} —— 试验结果的流量比;

ΔS —— 质量流量的标准差, $\Delta S =$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i}{M} - 1 \right)^2};$$

S_{CFD} —— CFD 模拟的标准差;

S_{exp} —— 试验结果的标准差。

由图 7 可知,5 种工况下,Han 等^[21] 与试验分流器模拟的流量比和质量流量标准差的最大相对偏差均 $< 10\%$ 。因此,文中所提出的新型整流喷嘴式分流器具有较高的可靠性,可用于进一步研究。

3 结果与讨论

3.1 分流均匀性的评判指标

为对分流器分流的均匀性进行评判,Habib 等^[22-24] 引入分流率 ϵ 和不均匀度 S 作为评判标准。其中分流率用来反映各个支管具体的分流效果,定义为各支管流量与总入口流量的比值;不均匀度研究分流器整体分流的均匀程度,数值越小,表示分流越均匀,具体计算式如下:

表 1 R22 物性参数

Table 1 R22 physical parameters

名称	密度/ (kg · m ⁻³)	动力黏度/ (Pa · s)	导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
气相	8.958 2	0.000 010 33	0.007 9	649.476 4
液相	1 362.000 0	0.000 285 66	0.106 1	1 113.400 0

表 2 CFD 工况

Table 2 Working condition of CFD

工况	质量流量/(kg·h ⁻¹)	入口干度
1	50	0.2
2	75	0.2
3	100	0.2
4	100	0.1
5	100	0.3

$$\epsilon = q_i/q_{\text{总}},$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{q_{\text{平均}}} - 1 \right)^2},$$

式中:

q_i —— 第 i 根管的流量, kg/s;

$q_{\text{总}}$ —— i 根管的总流量, kg/s;

$q_{\text{平均}}$ —— 平均流量, kg/s;

n —— 支路数量。

3.2 入口流速对分配均匀性的影响

袁培等^[25]发现,当制冷剂入口流速由 0.25 m/s 递增至 2.50 m/s 时,同类型分流器各个支管的不均匀度相差 $<1\%$,基本能实现均匀分液。董续君等^[26]研究表明,随

着质量流量的增大,偏差率变小。Lee 等^[27-28]发现突出的通道末端具有较高的混合效应。通过适当调整支管侵入深度,随着液体流速的增加,液体的轴向动量会被通道的突出端大大衰减,并在通道末端附近发生强烈的局部再循环,使得气体与液体的局部混合加强,两相混合物的流动则更像一种均匀流动,最终流型达到比较理想的状态。因此,设置工况入口干度 0.2,入口流速分别为 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.50, 4.00, 6.00, 8.00 m/s,在此条件下进行模拟,得到不同流速下的流场分布、分流率和不均匀度 S 如表 3 所示。

由图 8 可知,不均匀度最小值为 0.632%,最大值为 1.842%,相差不超过 2%,分流率均在平均值 0.167 附近波动,分流效果理想。1、2、5 号管的分流率较好,各管分流率相差均 $<0.1\%$,几乎接近相等;3、6 号管分流率较大,4 号管分流率较小,两管分流率最大相差达到 0.6%,需缩短 3、6 号管和 4 号管分流率的差距,提高整体均匀性。当入口速度为 0.25 ~ 1.00 m/s 时,不均匀度逐渐减小至最小值 0.006,之后随着入口流速的不断增大,不均匀度逐渐增大。

由图 9~图 11 可知,随着气液两相轴向动量逐渐增大,液膜分布逐渐均匀,形成均匀的环状流。入口处,两

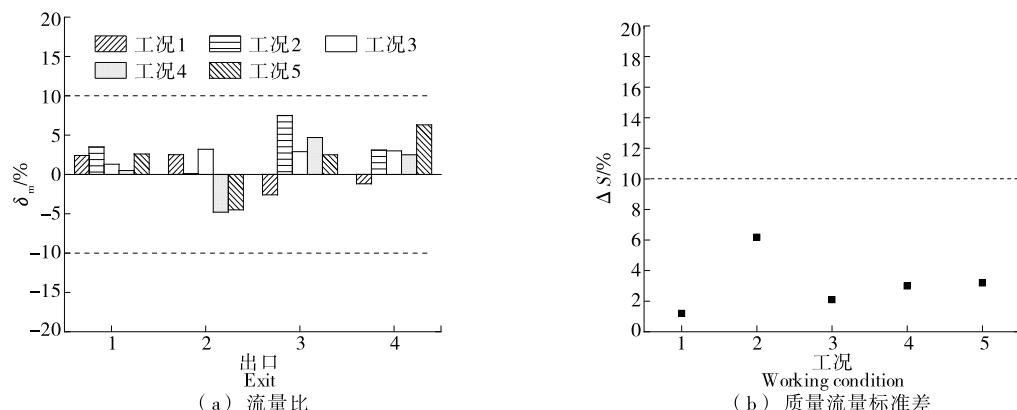


图 7 试验与模拟的相对偏差

Figure 7 Relative deviation between experiment and simulation

表 3 不同流速下分流器的分流率及不均匀度

Table 3 Split ratio and nonuniformity of distributor at different flow rates

出口	0.25 m/s	0.50 m/s	1.00 m/s	1.50 m/s	2.50 m/s	4.00 m/s	6.00 m/s
1	0.166 32	0.166 34	0.166 99	0.166 76	0.167 11	0.167 58	0.167 91
2	0.166 60	0.166 62	0.167 23	0.167 08	0.167 37	0.167 93	0.168 46
3	0.168 56	0.168 52	0.168 56	0.168 79	0.169 10	0.169 43	0.169 86
4	0.164 67	0.164 66	0.165 89	0.164 91	0.165 23	0.165 47	0.166 00
5	0.167 27	0.166 94	0.166 44	0.166 99	0.168 33	0.167 14	0.165 41
6	0.167 28	0.167 63	0.167 61	0.168 30	0.167 67	0.169 79	0.172 16
不均匀度 S	0.007 80	0.007 86	0.006 32	0.008 73	0.009 46	0.012 42	0.018 42

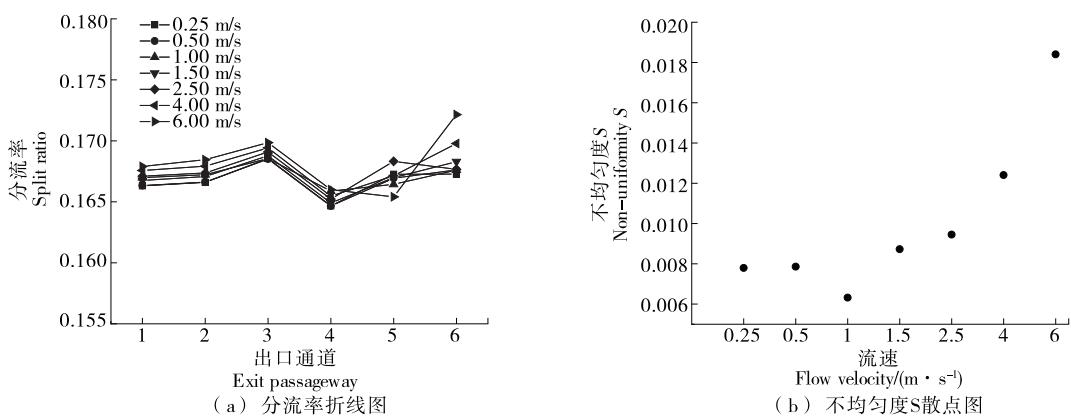


图 8 不同流速下分流率折线图及不均匀度 S 散点图

Figure 8 Line chart of split ratio and S scatter plot of non-uniformity at different flow rates

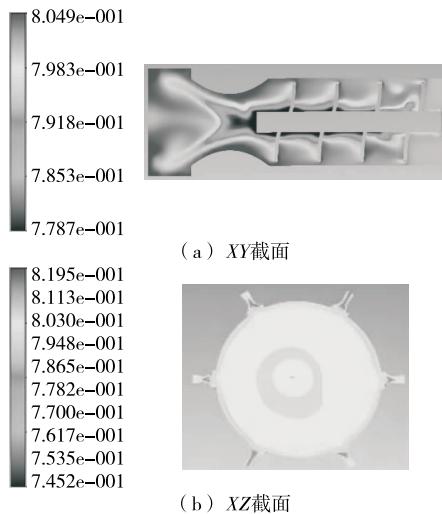


图 9 入口速度为 1.00 m/s 的相分布图

Figure 9 Phase distribution for inlet velocity of 1.00 m/s

相制冷剂并未马上分离，在旋流叶片的导流作用下，液相制冷剂沿叶片方向向管壁运动；当制冷剂到达分配室后，中间的制冷剂相态主要为气相，两侧的主要为气液混合物。通过旋流叶片和整流器的混合和整流后，喷嘴入口流型基本达到均匀稳定，从而确保接触气液两相的几率相同，实现分流器的等干度等流量分配。当入口速度为 1.00 m/s 时，迭代收敛最快，整流形成均匀环状流。当入口速度为 1.50~6.00 m/s 时，流型逐渐变得紊乱，均匀性有所下降，当入口速度为 8.00 m/s 时，迭代发散，流型彻底紊乱。

因此，当分流器入口流速为 1.00 m/s 时，形成均匀稳定的环状流，整体不均匀度最小，分流效果最佳。

3.3 入口干度对分配均匀性的影响

两相流中，在一定的入口干度范围内，干度的增加会使两相流的不均匀度降低。与此同时，分流器分流原理不同以及分流器型号不同，该规律也会有所差异^[29]。此

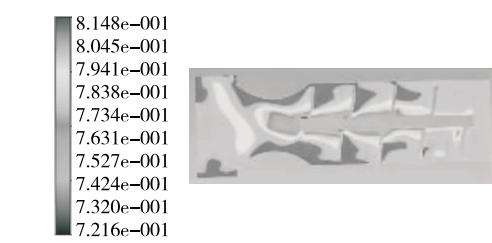


图 10 入口速度为 6.00 m/s 的相分布图

Figure 10 Phase distribution for inlet velocity of 6.00 m/s

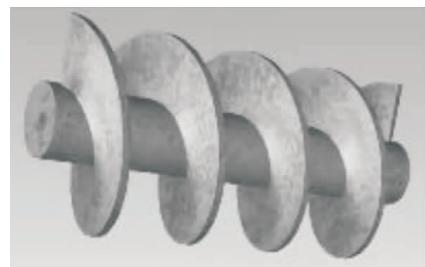


图 11 入口速度为 8.00 m/s 的相分布图

Figure 11 Phase distribution for inlet velocity of 8.00 m/s

外，空泡系数^[30~31]是区分两相流和单相流以及评价两相流动介质状态的重要参数。两相流介质的入口干度与其密切相关，对两相流流型和制冷剂的均匀分配影响关键。Byun 等^[32]研究发现，一定范围内，标准偏差随入口干度的增加而减小。随着入口干度的增加，液体被迫流向下游，两相射流的强度会有所增加，产生更强的轴向动量，使液体进一步流向下游，分液逐渐均匀。Vist 等^[33]研究表明，一定范围内，随着入口干度的增加可以减少因重力对两相分离而产生的影响。Tandon 等^[34]提出了一种空泡系数模型为了两相环状流，Todd 等^[35]也提出了一种空泡系数模型为了水平管内的环形流动，其考虑了动量涡扩散系数阻尼在气液分界面的影响。

因此,文中设置的工况为入口流速 1.00 m/s,入口干度分别为 0.05,0.15,0.20,0.25,0.30,0.35,0.50,在此条件下进行模拟,得到不同入口干度下分流器的分流率及不均匀度 S 见表 4。

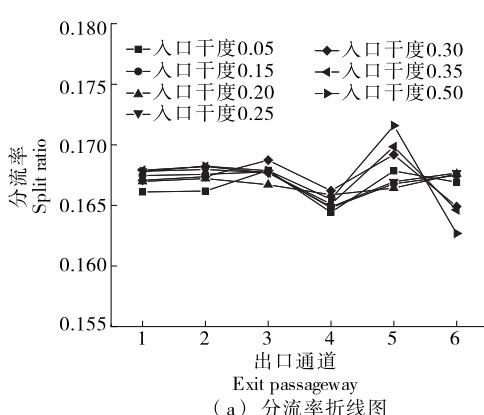
由图 12 可知,不均匀度最小值为 0.375%,最大值为 1.835%,相差不超过 2%,分流率均在平均值 0.167 附近

波动,分液均匀。1~3 号管分流率较 4~6 号管好,分流率相差均<0.1%。4~6 号管分流率偏差较大,最大偏差为 0.9%,出现了分液不均现象。因此,需缩短 5 号管和 4、6 号管分流率的差距,提高整体分流效果。当入口干度为 0.05~0.20 时,不均匀度逐渐减小至最小值 0.003 75,当入口干度为 0.20~0.50 时,不均匀度逐渐增大。

表 4 不同入口干度下分流器的分流率及不均匀度

Table 4 Split ratio and nonuniformity S of distributor at different inlet mass quality

出口	0.05	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.50
1	0.166 12	0.167 48	0.166 99	0.167 83	0.167 08	0.167 92	0.167 82
2	0.166 2	0.167 58	0.167 23	0.167 98	0.167 39	0.168 23	0.168 25
3	0.167 91	0.167 79	0.166 72	0.167 72	0.168 75	0.167 70	0.167 88
4	0.164 44	0.164 82	0.165 89	0.164 88	0.166 23	0.165 12	0.165 52
5	0.167 86	0.166 80	0.166 44	0.166 96	0.169 20	0.169 86	0.171 61
6	0.166 93	0.167 50	0.167 61	0.167 69	0.164 92	0.164 64	0.162 70
不均匀度 S	0.007 83	0.007 03	0.003 75	0.007 83	0.010 29	0.012 54	0.018 35



(a) 分流率折线图

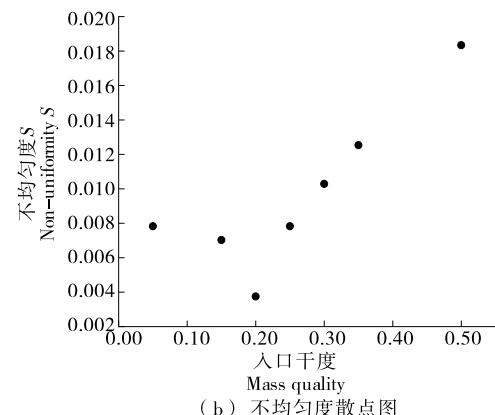


图 12 不同入口干度下分流率的折线图和不均匀度散点图

Figure 12 Line chart of split ratio and S scatter plot of non-uniformity at different mass quality

由图 13~图 14 可知,当入口干度为 0.05~0.20 时,流型由混乱逐渐趋于稳定,在旋流叶片的旋转混合下,液相沿管壁方向运动,气相不断集中在中路,显现出均匀的环状流。当入口干度为 0.20 时,混合最均匀;当入口干度为 0.25~0.50 时,流型逐渐紊乱,尽管经旋流叶片和整流器的流型整定,但气液两相制冷剂到达分配室时出现了

混乱,使得各喷嘴入口处流型不一致,尤其是当入口干度为 0.50 时,喷嘴入口处的流型已相当紊乱,达不到均匀分流的效果。

因此,当分流器入口干度为 0.20 时,流型均匀对称,整体不均匀度最小,分流效果最优。

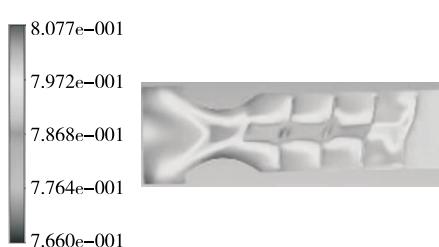


图 13 入口干度为 0.20 时的相分布图

Figure 13 Phase distribution at mass flow fraction of gas of 0.20

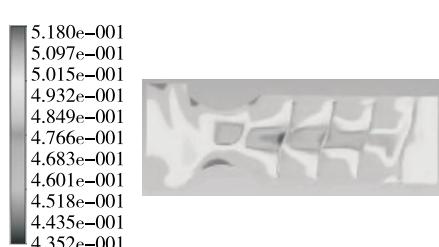


图 14 入口干度为 0.50 时的相分布图

Figure 14 Phase distribution at mass flow fraction of gas of 0.50

4 结论

以一种分流效果理想的新型整流喷嘴式分流器为研究对象,采用CFD数值模拟其相分布情况和气液两相分离程度,优化该分流器在各个入口工况下的最佳参数,实现环状流均匀分液。结果表明:整流喷嘴式分流器经旋流叶片和整流器的混合和整流后,气液两相制冷剂到达喷嘴时流型基本对称稳定,达到了均匀分流的目的。在各种不同的入口工况下,最大不均匀度均 $<2\%$,分流效果良好。当制冷剂入口流速为0.25~1.00 m/s时,逐渐形成均匀的环状流,分流器整体不均匀度逐渐减小至最小值0.632%,其中入口流速为1.00 m/s的效果最佳;当入口流速为1.50~6.00 m/s时,流型开始紊乱,不均匀度逐渐增大;当入口流速为8.00 m/s时,迭代发散,流型彻底紊乱。当入口干度为0.05~0.20时,流型趋于稳定,显现出均匀的环状流,分流器整体不均匀度逐渐减小至最小值0.375%;当入口干度为0.20~0.50时,不均匀度逐渐增大,因此该分流器的最佳入口干度为0.20,此时分流最均匀。采用CFD数值模拟分流器内部相分布情况和气液两相分离程度时,假设较为理想的情况,只考虑分流器内两相流体的流动,不考虑相间的传热传质以及制冷剂与管壁间的换热。但在实际系统运行中,传热传质对制冷剂分流也存在一定影响,因此后续的模拟研究可考虑在计算的同时开启能量方程,分析温度对均匀分流的影响,使模拟研究更好地应用于实际工程。

参考文献

- [1] 韩清. 制冷剂分液器性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 3.
HAN Qing. Research on the performance of refrigerant distributor[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014: 3.
- [2] 田晓雨, 万金庆, 曹晓程, 等. 冷凝温度变化对两相射流泵供液平板速冻机的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 71-73.
TIAN Xiao-yu, WAN Jin-qing, CAO Xiao-cheng, et al. Effect of condensing temperature variation on two-phase jet pump supplying liquid plate quick-freezer [J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 71-73.
- [3] 郭耀君, 谢晶, 朱世新, 等. 超低温制冷装置的研究现状和进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 238-243.
GUO Yao-jun, XIE Jing, ZHU Shi-xin, et al. Status and progress of research on ultra-low temperature refrigeration devices[J]. Food & Machinery, 2015, 31(1): 238-243.
- [4] 贲润清, 王汉青, 孙志利. 临界喷嘴式分流器改善冷库用翅片蒸发器性能的实验研究 [J]. 热科学与技术, 2019, 18(2): 108-114.
ZANG Run-qing, WANG Han-qing, SUN Zhi-li. Experimental study of critical nozzle type distributor to improve the performance of finned evaporators for cold storage [J]. Thermal Science and Technology, 2019, 18(2): 108-114.
- [5] 贺卫东, 万金庆, 黄明磊, 等. 供液方式对蒸发平板温度场的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(5): 98-100, 197.
HE Wei-dong, WAN Jin-qing, HUANG Ming-lei, et al. Effect of liquid supply method on the temperature field of evaporation plate[J]. Food & Machinery, 2018, 34(5): 98-100, 197.
- [6] 徐博, 张驰, 陈江平, 等. 积液型两相流分配器的性能与优化[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(1): 91-95, 100.
XU Bo, ZHANG Chi, CHEN Jiang-ping, et al. Performance and optimization of two-phase flow distributor with liquid accumulation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(1): 91-95, 100.
- [7] 孙文卿, 屈静, 鹿世化. 干式壳管式蒸发器内新型分液器的数值模拟[J]. 制冷学报, 2017, 38(3): 56-62.
SUN Wen-qing, QU Jing, LU Shi-hua. Numerical simulation of a new liquid distributor inside a dry shell-and-tube evaporator [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(3): 56-62.
- [8] 王少兵, 张占柱, 毛俊义. 新型气液分配器的开发与应用[J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(3): 287-291.
WANG Shao-bing, ZHANG Zhan-zhu, MAO Jun-yi. Development and application of a novel gas-liquid distributor[J]. Computers and Applied Chemistry, 2016, 33(3): 287-291.
- [9] 翁晓敏, 胡海涛, 丁国良, 等. 新型插孔式分流器的结构优化设计及实验验证[J]. 制冷技术, 2014, 34(5): 25-30.
WENG Xiao-min, HU Hai-tao, DING Guo-liang, et al. Structural optimization design and experimental verification of a new jack distributor[J]. Refrigeration Technology, 2014, 34(5): 25-30.
- [10] FAN Zhi-wei, ZHOU Xing-gui, LUO Ling-ai, et al. Numerical investigation of constructal distributors with different configurations[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(1): 175-178.
- [11] PU Liang, NIAN Luo-zhu, ZHANG De-run, et al. Study of refrigerant mal-distribution and optimization in distributor for air conditioner[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 46: 101-261.
- [12] 李登稳, 程振民. 文丘里型气液分布器的实验与数值研究[J]. 化工学报, 2018, 69(11): 4 625-4 632.
LI Deng-wen, CHENG Zhen-min. Experimental and numerical study of venturi-type gas-liquid distributor[J]. Journal of Chemical Engineering, 2018, 69(11): 4 625-4 632.
- [13] RAYNAL L, HARTER I. Studies of gas-liquid flow through reactors internals using VOF simulations [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(21): 6 385-6 391.
- [14] WU Guo-ming, REN Tao, DING Guo-liang, et al. Design and visualized validation of a distributor with uniform refrigerant distribution by forming annular flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 98: 238-248.
- [15] SUN Zhi-li, WANG Qi-fan, LIANG You-cai, et al. Experimental study on improving the performance of dry evaporator with rectifying nozzle type critical distributor[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 111(C): 39-52.
- [16] KANNAN K, RUDRAMOORTHY R. Experimental and numerical

- analysis of laminar and low turbulent flow distributions in inlet dividing header of shell and tube heat exchanger[J]. Journal of Hydynamics, 2010, 22(4): 494-502.
- [17] 宋尚义, 劳春峰, 齐兆乾, 等. 商用空调分液器内气液两相流的数值模拟研究[J]. 轻工标准与质量, 2020(3): 73-77.
- SONG Shang-yi, LAO Chun-feng, QI Zhao-qian, et al. Numerical simulation study of gas-liquid two-phase flow in commercial air conditioner distributor [J]. Light Industry Standard and Quality, 2020(3): 73-77.
- [18] ANSYS Inc. Ansys fluent theory guide[M]. Canonsburg: Ansys Inc, 2013: 17.
- [19] LAUNDER B E, REECE G J, RODI W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 68(3): 537-566.
- [20] 李维勃, 王国砚. 基于雷诺应力模型的平衡大气边界层模拟[J]. 力学季刊, 2018, 39(3): 593-601.
- LI Wei-bo, WANG Guo-yan. Simulation of equilibrium atmospheric boundary layer based on Reynolds stress model[J]. Quarterly Journal of Mechanics, 2018, 39(3): 593-601.
- [21] HAN Qing, ZHANG Chi, CHEN Jiang-ping. Experimental and CFD investigation of R410A distributors for air conditioner[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2014, 22(2): 567-572.
- [22] HORIKI S, NAKAMURA T, OSAKABE M. Thin flow header to distribute feed water for compact heat exchanger[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(2): 201-207.
- [23] GUYH Dituba Ngoma, FRANÇOIS Godard. Flow distribution in an eight level channel system[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 25(5): 831-849.
- [24] HABIB M A, BEN-MANSOUR R, SAID S A M, et al. Evaluation of flow maldistribution in air-cooled heat exchangers [J]. Computers and Fluids, 2008, 38(3): 677-690.
- [25] 袁培. 分液器制冷剂均匀分配性能研究[C]// 高等教育学会工程热物理专业委员会第二十一届全国学术会议论文集——热流体力学专辑. 扬州: 中国高等教育学会工程热物理专业委员会, 2015: 7.
- YUAN Pei. Study on the homogeneous distribution performance of liquid distributor refrigerant[C]// Proceedings of the 21st National Academic Conference of Engineering Thermophysics Committee of the Higher Education Society-Thermal Fluid Mechanics Album. Yangzhou: Engineering Thermophysics Committee of the Chinese Society of Higher Education, 2015: 7.
- [26] 董续君, 黄辉, 张桃, 等. 空调器中制冷剂分流器及其组件的性能研究[C]// 制冷空调新技术进展——第三届制冷空调新技术研讨会论文集. 杭州: 中国制冷学会, 2005: 423-428.
- DONG Xu-jun, HUANG Hui, ZHANG Tao, et al. Performance study of refrigerant distributor and its components in air conditioners[C]// Advances in New Technologies for Refrigeration and Air Conditioning-Proceedings of the Third Symposium on New Technologies for Refrigeration and Air Conditioning. Hangzhou: Chinese Society of Refrigeration, 2005: 423-428.
- [27] LEE J K, LEE S Y. Distribution of two-phase annular flow at header-channel junctions [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2004, 28(2): 217-222.
- [28] SIVERT V, JOSTEIN P. Two-phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(2): 209-215.
- [29] 王猛, 贲润清. 分流器的研究及其进展[J]. 低温与超导, 2017, 45(11): 85-91.
- WANG Meng, ZANG Run-qing. Research on distributor and its progress[J]. Low Temperature and Superconductivity, 2017, 45 (11): 85-91.
- [30] 徐济. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京: 原子能出版社, 1993: 134.
- XU Ji. Boiling heat transfer and gas-liquid two-phase flow[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1993: 134.
- [31] 苏顺玉, 徐静, 秦妍, 等. 家用空调换热器管内制冷剂空泡系数的研究[J]. 制冷与空调, 2007(1): 43-45.
- SU Shun-yu, XU Jing, QIN Yan, et al. Study of refrigerant vacancy bubble coefficient in the tube of domestic air conditioner heat exchanger[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2007(1): 43-45.
- [32] BYUN H W, KIM N H. Two-phase refrigerant distribution in an intermediate header of a parallel flow minichannel heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 59: 14-28.
- [33] VIST S, PETTERSEN J. Two-phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2004, 28(2): 209-215.
- [34] TANDON T N, VARMA H K, GUPTA C P. A void fraction model for annular two-phase flow[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1985, 28: 191-198.
- [35] HARMS T M, LI Da-qing, GROLL E A, et al. A void fraction model for annular flow in horizontal tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 4 051-4 057.

(上接第 2 页)

热点九:美容用的玻尿酸怎么可以吃了?

解读专家:陈坚,中国工程院院士、中国食品科学技术学会副理事长、江南大学未来食品科学中心主任

玻尿酸(透明质酸)是人体自有的具有生理活性的物质。适宜人群适量食用透明质酸钠已被证明是安全的。食用透明质酸钠虽然可以被人体吸收和利用,但其与营养健康的量效关系有待进一步系统评价,因此有必要系统研究和探索建立透明质酸钠的膳食参考摄入量,并制定相关国家标准。消费者应正确购买和科学食用透明质酸钠食品。

(中国食品科学技术学会秘书处 供稿)