

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2022.05.008

旋流泡罩流体力学性能研究

袁惠新, 莫倪旭, 付双成, 周发威, 王伟鹏

(常州大学 机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164; 江苏省绿色过程装备重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213164)

摘要: 传统塔设备存在雾沫夹带甚至液泛, 为此提出了旋流泡罩, 其基于旋流聚结和离心沉降原理减小雾沫夹带。利用 CFD 数值模拟探究旋流泡罩的流体力学性能, 包括压力降和相分离性能。采用出、入口平均粒度之比的聚结效果来评估相分离性能。首先用压力降试验数据来验证模拟的可靠性, 用 RNG $k-\epsilon$ 模型来处理湍流, 用双欧拉模型来处理气液两相流, 并用 PBM 模型考虑液滴的聚结破碎, 来探究旋流泡罩进气量对压力降的影响, 进气量、进气中液滴体积分数和粒度对聚结效果的影响。结果显示, 随进气量的增加, 旋流泡罩压力降增加; 在研究范围内, 聚结效果随进气量的增大而增加, 而后趋于平缓; 聚结效果随进气中液滴体积分数的增加而提高, 随进气中液滴粒度的减小而提高。

关键词: 旋流泡罩; 流体力学性能; 压降; 聚结效果

中图分类号: TQ 028

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2022)05-0057-08

Study on the Hydrodynamic Performance of Swirl Bubble-Cap

YUAN Huixin, MO Nixu, FU Shuangcheng, ZHOU Faqi, WANG Weipeng

(School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The mist entrainment even flooding would unavoidably occur in traditional towers. Therefore, swirl bubble-cap is proposed, which would be expected to reduce the mist entrainment based on the principle of swirl coalescence and centrifugal sedimentation. In this paper, CFD numerical simulation is used to explore the hydrodynamic performance of swirl bubble-cap, including pressure drop and phase separation performance. The coalescence effect of the ratio of the average particle size at the outlet to the inlet is used to evaluate the phase separation performance. Firstly, the reliability of the simulation was verified with the pressure drop data tested. The RNG $k-\epsilon$ model was used to deal with

收稿日期: 2022-04-15。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21676031); 江苏省高校自然科学研究资助项目(19KJB530003)。

作者简介: 袁惠新(1957—), 男, 江苏无锡人, 博士, 教授。E-mail: yhx@cczu.edu.cn

引用本文: 袁惠新, 莫倪旭, 付双成, 等. 旋流泡罩流体力学性能研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2022, 34(5): 57-64.

turbulence, the Euler-Euler model to deal with gas-liquid two-phase flow, the PBM model to consider the coalescence and breakage of droplets. Results showed that the pressure drop increased with the increase in feed flowrate, the coalescence effect increased with the increase in feed flowrate and then leveled off with further increase in feed flowrate, increased with the increase in droplet concentration and decreased with the increase in droplet size.

Key words: swirl bubble-cap; hydrodynamic performance; pressure drop; coalescence effect

塔设备是石油、化工、炼油、清洁绿化和运输燃料等生产过程中的重要设备^[1]。塔设备性能包括传递性能和流体力学性能,后者包括压力降和相分离性能等。塔板压降不能太高,否则在给定的进气压力下无法推动气相的流动,或塔的总压降将超过允许值,增大操作能耗。

泡罩塔是一种典型的塔设备(图1)。传统的泡罩塔存在雾沫夹带和液泛等问题,限制了塔板的操作范围^[2]。因此,国内外高性能塔板有将离心力场引入塔设备来强化液滴分离过程以达到抑制雾沫夹带的目的,如美国 HAYWARD 公司的 31LCLC 旋风分离器^[3]、SWANBORN^[4]和 CUYPER 等^[5]设计的直流式旋风管、英国 SHELL 公司的 Swirl Tube 塔板^[6-7]和美国 KOCH-GLITSCH 公司的 Ultra-Frac 塔板^[8-9]等。国内大连理工大学研发的三维旋流塔板^[10]和二维切向式高速旋流塔板^[11]、浙江大学研发的旋流板塔^[12-15]、扈海莉等^[16]也是将旋流元件用作塔内件,通过强旋流将液滴甩至壁面进行分离。对于 SHELL 公司研发的 Consep 塔盘, YANG 等^[17]指出该塔盘核心元件是旋风管,提高旋风管的相分离性能就能保证塔设备高效运行,但该塔盘压降为 500~4 000 Pa,且塔盘结构复杂。孙金^[11]在塔板上设置旋流元件以完成传递和相分离过程,通过试验对雾沫夹带、压降等进行了分析,且通过单相模拟,分析了速度场对气液分离的影响,研究发现该旋流元件的操作上限较高,但是压力降在高进气量时达到几千帕,且没有对旋流元件内气液两相分离进行进一步研究,同时并没有考虑液滴在旋流元件内破碎、聚结过程。

文章提出了一种新的泡罩——旋流泡罩,并基于 CFD 流体动力分析,研究进气量对旋流泡罩压力降的影响,以及操作参数(进气量)和物性参数(进气中液滴体积分数和粒度)对旋流泡罩聚结性能的影响,以此来反映旋流泡罩的相分离性能。

1 旋流泡罩的基本结构及工作原理

在不影响传统泡罩塔传递过程的情况下,在每个泡罩下面加一个带有多头螺旋导流板的轴向进料的旋流管,将升气管与旋流泡罩的锥管相连通,这样将旋流场引入旋流泡罩,以强化泡罩的相分离性能。图2为单个旋流泡罩的塔段,增加旋流泡罩的数量可以提高塔设备的处理量。

旋流泡罩塔段包括进气管、出气管、旋流泡罩、塔板、两根降液管以及两层塔板上的液层,其中旋流泡罩包括圆筒、盲筒、螺旋导流板、锥管和升气管;进气管和出气管分别在塔的底部和顶部,旋流泡罩则由与塔板固定的升气管通过一系列焊接固定以及螺栓螺母固定的方法固定在塔内充当塔内件,降液管在塔板上伸出高度与塔板液层高度一致,这样就可以在旋流泡罩塔内形成液封。

气相从进气管进入旋流泡罩塔段,通过泡罩以及液层夹带出一部分小液滴,由于 N 层塔板液封

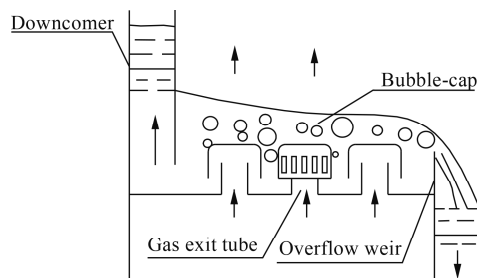


图1 传统泡罩塔结构示意图

Fig.1 Structure of the tower section with a traditional bubble-cap

的缘故,夹带液滴的气流无法通过 $N+1$ 层塔板降液管下端口,也无法通过 N 层塔板降液管的上端口,气液两相流只能从旋流泡罩内部空间流过,经过螺旋渐缩通道形成螺旋流。由于旋流泡罩内旋流场的旋流聚结^[18]作用,小液滴聚结成大液滴,同时由于旋流场的离心沉降作用,将增大的液滴甩向旋流管壁,形成液膜,在重力作用下向下流出旋流泡罩,气相中的液滴被气体向上带出泡罩。该部分液滴越大,随气流进入上层塔板上液池后被液池捕捉的可能性越大。因此,旋流泡罩的聚结性能越好,其相分离性能越好。

2 计算模型与算法

2.1 三维模型

采用 Solidworks 三维建模软件,考虑到旋流泡罩塔模拟时网格数量多容易影响计算效率,因此创建圆筒直径为 100 mm 的单管旋流泡罩物理模型,略去泡罩,只研究单管旋流泡罩的流体力学性能。这里将直接在三维建模软件里面画出由圆筒、螺旋导流板和盲筒组成的流道,然后加上锥管和升气管,形成要计算的旋流泡罩流体域。图 3 (a) 是旋流泡罩的流体域模型,图 3 (b) 更加清楚地显示了旋流泡罩的主要结构尺寸 ($D_1=100\text{ mm}$; $D_2=70\text{ mm}$; $D_3=50\text{ mm}$; $L_1=L_3=100\text{ mm}$; $L_2=200\text{ mm}$),图 3 (b)同时为旋流泡罩 $Y=0$ 的截面。

旋流泡罩有别于旋流器,没有旋流器的溢流管,它包括螺旋导流板、圆筒、盲筒、锥管和升气管,其中螺旋导流板的头数是 4 头,其进口螺旋升角为 30° ,出口螺旋升角为 8° ,螺旋导流板、圆筒和盲筒形成的环形空间为渐缩螺旋通道。

2.2 网格划分

采用 Gambit 前处理软件对旋流泡罩模型进行网格划分。这里将螺旋导流板、圆筒和盲筒形成的环形渐缩进料通道用六面体非结构网格划分,这是因为对于 PBM 模型来讲,考虑液滴颗粒聚结、破碎六面体非结构化网格比四面体非结构化网格更加精确,而且六面体非结构化网格在 Fluent 计算时没有四面体非结构化网格那么容易发散;将升气管、锥管进行六面体结构化网格划分,是为了能够将旋流器内近壁面处的流场模拟更细致,这里将加密近壁面网格层数,由于要保证其网格质量和网格扭曲率,所以网格尺寸会进行微调。将旋流泡罩网格数分为 213 520, 338 533, 413 656, 498 054, 576 236, 652 364。对于不同网格数的旋流泡罩采用进气量为 $48\text{ m}^3/\text{h}$,对其压力降 Δp 进行网格无关性验证,如图 4 所示。网格数在 50 万左右时,压力降不再变化,选择网格质量指标是 EquiSize

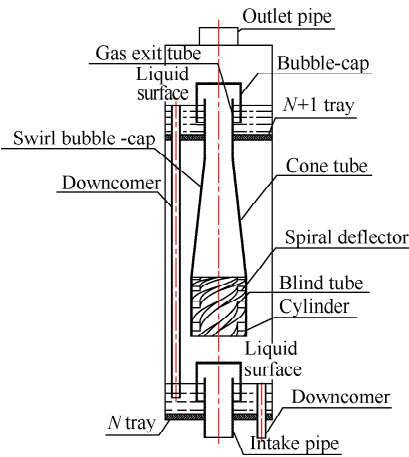


图 2 单个旋流泡罩塔段结构示意图
Fig.2 Structure of the tower section with a swirl bubble-cap

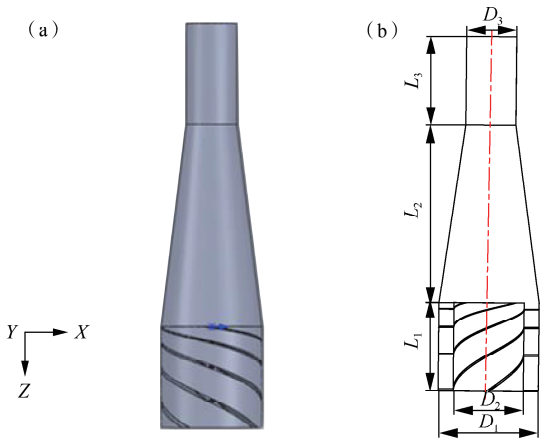


图 3 旋流泡罩流体域和旋流泡罩主要尺寸
Fig.3 Fluid domain of the swirl bubble-cap and main dimensions of the swirl bubble-cap

Skew, 它是通过单元大小计算的歪斜度, 歪斜度在 0~1, 0 最好, 1 最差, 网格质量大部分在 0.1~0.4, 大体上来看网格质量都是较好的。图 5 (a) 是旋流泡罩的整体网格图, 图 5 (b) 是旋流泡罩的局部放大网格图。

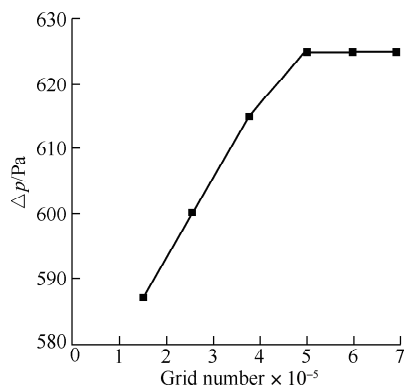


图 4 压力降与网格数关系曲线图

Fig.4 Relationship between pressure drop and grid number

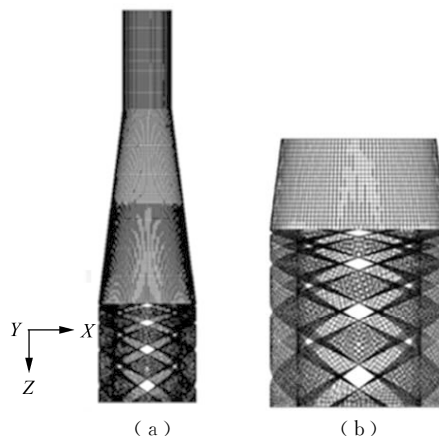


图 5 旋流泡罩整体网格图和旋流泡罩局部放大网格图

Fig.5 Overall grid diagram of the swirl bubble-cap and Enlarged grid of the swirl bubble-cap

2.3 数值模拟设置

利用 Fluent 软件进行数值模拟计算:

1) 欧拉两相流模型将两相分别当作具有不同物性的连续介质看待, 设其在空间中有连续的速度分布以及传递性质 (黏性、扩散等), 由于两相均在欧拉坐标中处理, 所以称双欧拉模型。双欧拉模型考虑了 2 种流体之间的动量、质量和能量的交换, 能反映各种物理现象的内在机理, 理论上是比较完善的数学模型, 所以采用双欧拉模型来模拟气液两相流动^[19]。

2) 旋流泡罩塔内件的湍流模型选用 RNG $k-\epsilon$ 模型来计算其内部不可压缩湍流流动, 在各相异性的湍流流动中, 由于标准 $k-\epsilon$ 模型会出现失真, 所以采用 RNG $k-\epsilon$ 模型。RNG $k-\epsilon$ 模型通过修正湍流黏度, 考虑了平均流动中旋流和旋转流动的情况、时均应变率对耗散项的影响, 这样 RNG $k-\epsilon$ 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲的流动。

3) 采用群体平衡模型 (PBM) 分别建立液滴聚结、破碎模型, 用于研究液滴分布规律, 不仅可以预测液滴粒径分布情况, 也能结合多相流模型来预测流场中的湍动能等内部信息, PBM 模型将液滴按照直径大小划分为 N 组, 聚结、破碎存在于各组之间^[20]。

采用压力基隐式求解器进行非稳态求解计算, 同时考虑重力影响。涉及工质包括空气和水, 其中空气是主相连续相, 液相是第二相, 气相空气的密度 1.225 kg/m^3 , 黏度 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$; 液相水滴的密度 998.2 kg/m^3 , 黏度 $0.001 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$, 表面张力 0.07 N/m , 二者均为不可压缩、常温、常物性流体, 其热传导忽略不计。求解方法采用以压力-速度耦合方式进行计算的压力隐式算子分割法; 压力方程选用压力插值算法; 体积分数差值选择几何重构方案; 动力指数、湍流动能、湍流耗散率均选用二阶迎风格式, 残差收敛绝对精度标准均设置为 $0.000\ 001$ ^[21]。进气液滴平均粒度 (x_i) 采用 $5 \sim 50 \text{ }\mu\text{m}$ 液滴进行模拟研究, 默认进气液滴体积分数 (C_i) 为 2%。

2.4 边界条件设置

进口为由螺旋导流板、圆筒和盲筒共同形成的轴向环形渐缩通道, 设置旋流泡罩进口为速度进

口,通过换算成为进气量,进气速度即使设置很小,但是由于螺旋导流板螺旋升角越来越小,切向速度从螺旋通道出来的时候就会变得很大,这里将进气量(Q_i)设置在 $10\sim90\text{ m}^3/\text{h}$,模拟多种工况。湍流参数选择湍流强度和水力直径,通过计算得到。将升气管出口设置为压力出口,出口表压为 0,壁面采用无滑移处理。

将两相流边界条件设置完毕再导入 PBM 模型,PBM 模型中选用离散法,设置好粒度分组,勾选聚结、破碎现象,选择聚结、破碎现象的 Luo 模型进行计算。

3 数值模拟结果分析

3.1 旋流泡罩的压力降

旋流泡罩的工作靠其压力降来推动。旋流泡罩的压力降反映了其能耗的大小,同时,压力降越大,塔板压力降越大,可能会导致降液管不能工作。因此,有必要研究旋流泡罩压力降的影响规律。

通过试验和模拟,试验结构与模拟结构一致,试验平台如图 6 (a) 所示,旋流泡罩进气量与压力降关系如图 6 (b) 所示,旋流泡罩模拟压力降随着进气量的增加而增加,与试验曲线基本吻合,相对误差在 10% 以内,一定程度上反映模拟的可靠性。经过拟合得出旋流泡罩压力降与进气量之间的关系为

$$\Delta p=0.760\ 8Q_i^{1.875\ 9}$$

(1)

当进气量为 $20\sim40\text{ m}^3/\text{h}$ 时,压力降从 200 Pa 左右上升到了 600 Pa 左右。解婷婷等^[22]的旋流塔盘,当进气量为 $20\sim40\text{ m}^3/\text{h}$ 时,压降在 300~800 Pa,如图 6 (b) 所示,旋流泡罩压力降比旋流塔盘压力降降低了 30%。

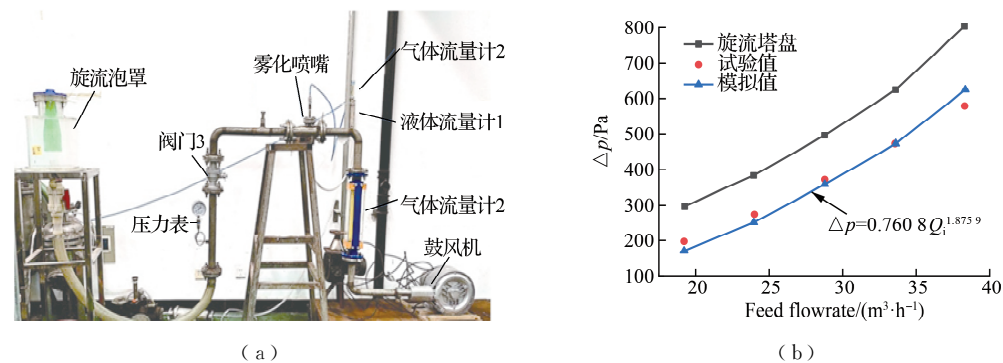


图 6 试验平台及压力降与进气量的关系
Fig.6 Relationship between pressure drop and feed flowrate

图 7 为旋流泡罩 $Y=0$ 截面的压力云图。从径向来看,图 7 中旋流泡罩压力分布基本上呈现中心对称,在靠近中心轴线的地方压力比较小,而随着半径的增加,压力逐渐增大,在靠近壁面处压力达到最大值,这是颗粒径向移动的主要动力,这样的压力分布有利于气液两相进行分离,密度小的气相往中间走,而密度大的液滴会聚结获得更大的离心力被甩至壁面。从轴向来看,压力从下往上逐渐递减,在升气管出口处达到最小值,这有利于甩至壁

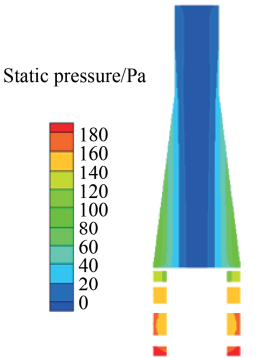


图 7 $Y=0$ 截面压力云图
Fig.7 Pressure cloud diagram at section $Y=0$

面的大液滴被气体带出泡罩,并被上层塔板液池里的液体捕捉。从整体来看,压力云图分布符合“中间小,两边大”的特征。

3.2 旋流泡罩内气液分布

图 8 为旋流泡罩 $Y=0$ 截面液相体积分布云图。通过图 8 可证实液滴进入旋流泡罩通过螺旋导流板引导形成强旋流,由于气液密度差的关系,液滴逐渐向壁面迁移,小液滴聚结成大液滴,气体从旋流泡罩中间通过,起到了良好的气液分离效果,同时也能有效抑制雾沫夹带,避免液泛。

3.3 进气量对旋流泡罩聚结效果的影响

旋流泡罩作用在通过液封的原理:将 N 层塔板上夹带的气液两相流离心分离,使小粒度的液滴聚结成较大粒度的液滴且甩在器壁上,一部分由于重力原因向下流出旋流泡罩,一部分由螺旋上升的气相将大粒度的液滴带出在 $N+1$ 层的泡罩外,而大粒度的液滴则在 $N+1$ 层塔板上更加容易被液池捕捉,而不会随着气相继续上升,起到了良好抑制雾沫夹带的效果。只要在升气管出口处聚结的液滴粒度越大,则从泡罩出来后就更有可能被 $N+1$ 层塔板上液池捕捉,聚结效果就越好。

图 9 (a) 和图 9 (b) 分别是 $Y=0$ 截面的液滴粒度分布云图和升气管出口平面的液滴粒度分布云图,其进气量 $Q_i=20\text{ m}^3/\text{h}$,入口液滴 $x_i=5\text{ }\mu\text{m}$,体积分数 $C_i=2\%$,从图 9 中可以看出,进气口 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的液滴,到升气管出口最大可达到 $500\sim 600\text{ }\mu\text{m}$,说明在旋流泡罩内液滴的聚结效果显著。根据 YANG 等^[23]研究结论,出口液滴粒度越大,越容易被塔板液池捕捉,相分离效果越好。

图 10 是进气液滴体积分数为 2% 时进行模拟的进气量与出入平均粒度比 (\bar{x}_o/\bar{x}_i) 的关系曲线。从图 10 中看出,旋流泡罩聚结效果随进气量的增大而增大。小的进气量导致螺旋通道出口切向速度小^[24-25],旋流强度偏低,聚结效果偏低。随着进气量的进一步增大,其聚结效果增长会缓慢下来,即存在一个临界点。这可能是因为进气量的增大,导致从螺旋导流通道出来的切向速度变大,湍流加剧,液滴破碎的量也增加,所以聚结效果增长也会变得缓慢。这个临界值与进气中液滴粒度有关,液滴粒度越大,临界值越大。

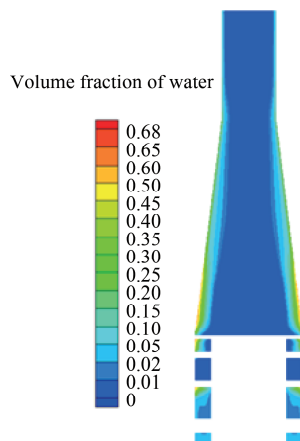


图 8 $Y=0$ 截面液相体积分布云图

Fig.8 Cloud diagram of liquid phase volume distribution at section $Y=0$

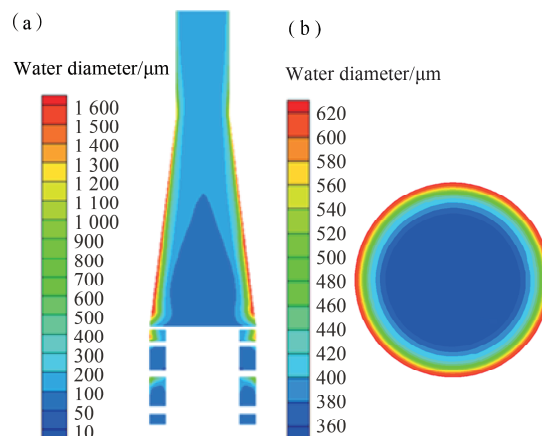


图 9 $Y=0$ 截面液滴粒度分布

Fig.9 Droplet size distribution at section $Y=0$

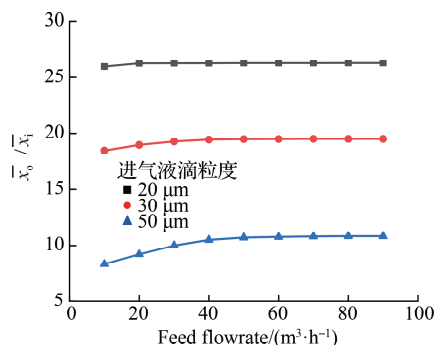


图 10 进气量对出入粒度比的影响

Fig.10 Effect of intake air volume on inlet/outlet particle size ratio

3.4 进气中液滴粒度对旋流泡罩聚结效果的影响

在进气液滴体积分数 2%, 进气量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 情况下, 研究不同液滴粒度对旋流泡罩聚结效果的影响。如图 11 所示, 进气中液滴粒度对聚结效果影响显著。当进气中液滴粒度为 $5 \mu\text{m}$ 时, 升气管出口液滴平均粒度达 $500 \mu\text{m}$, 出入粒度比达 100; 而进气中液滴粒度为 $50 \mu\text{m}$ 的时候, 升气管出口平均粒度亦为 $500 \mu\text{m}$, 出入粒度比只有 10。液滴粒度越小, 液滴越容易聚结。这是因为进气中液滴粒度越小, 液滴表面张力越大, 越容易聚结。这对雾沫夹控制带具有重要意义。

3.5 进气中液滴体积分数对旋流泡罩聚结效果的影响

采用进气量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$, 探究聚结效果随液滴体积分数变化的规律。如图 12 所示, 在研究范围内, 体积分数对旋流泡罩的聚结效果影响显著, 聚结效果随着体积分数的增加, 先增大而后趋于平缓。这是因为液相体积分数越大, 液滴之间碰撞聚结几率越高。因此, 从升气管出口处出来的液滴粒度增大。由于液滴粒度越大, 其表面张力越小, 越易破碎, 因此, 当液滴粒度达到一定值后, 在聚结的同时又伴随着破碎, 使得聚结效果变化趋于平缓。

4 结 论

- 1) 旋流泡罩内液相粒度和体积分数均随径向位置的增大而增大, 气相从中间出去, 形成气液分离, 避免雾沫夹带。
- 2) 旋流泡罩的聚结效果随进气量的增大而增大, 当进气量到达一定值时趋于稳定, 这个临界值与进气中液滴粒度有关, 进气中液滴粒度越大, 这个临界值越大。
- 3) 在研究范围内, 进气液滴粒度越小, 聚结效果越明显。当进气液滴粒度为 $5 \mu\text{m}$ 、进气流量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 出入粒度比达到 100, 而压力降只有 380 Pa。
- 4) 旋流泡罩的聚结效果随进气中液滴体积分数的增大而增大, 当进气液滴体积分数达到一定值时趋于稳定, 这个临界值随进气中液滴体积分数的增大而增大。

参考文献:

- [1] 路秀林, 王者相. 塔设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 兰州石油机械研究所. 现代塔器技术[M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2005.
- [3] HOFFMANN A C, STEIN L E, BRADSHAW P. Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation

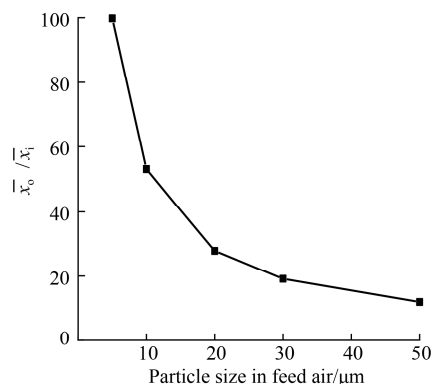


图 11 进气中液滴的平均粒度对出入粒度比的影响

Fig.11 Effect of average droplet size on inlet/outlet particle size ratio

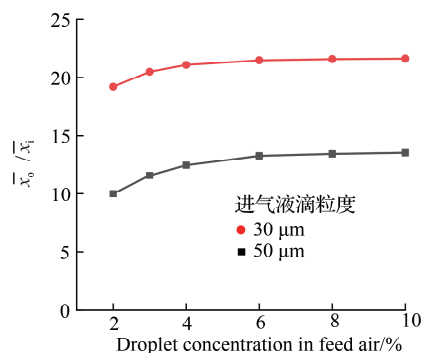


图 12 进气液滴体积分数对出入粒度比的影响

Fig.12 Effect of droplet volume fraction on inlet/outlet particle size ratio

- [J]. Applied Mechanics Reviews, 2003, 56(2): B28-B29.
- [4] SWANBORN R A. Method and device for treating of a gas/liquid admixture: US6176900[P]. 2001-01-23.
- [5] CUYPERS C T C, STANBRIDGE D I. Device for treating a gas/liquid mixture: US7163626[P]. 2007-01-16.
- [6] WILKINSON P, VOS E, KONIJN G, et al. Distillation trays that operate beyond the limits of gravity by using centrifugal separation[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(1): 130-135.
- [7] 付有成, 王崇智. 板式塔精馏技术进展[J]. 石化技术与应用, 2000, 18(4): 231-236.
- [8] WEILANDRH, GRIESELCA. Increasing the capacity of glycol contactors[C]. New Orleans: AIChE, 2004.
- [9] 李春利, 王志英, 李柏春, 等. 塔板技术最新进展和研究展望[J]. 河北工业大学学报, 2002, 31(1): 20-25.
- [10] 江山. 双层旋流式高速塔水力性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [11] 孙金. 高速塔切向旋流接触分离元件的优化与水力学特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [12] 浙江大学化工原理组. 旋流板除雾器: 关于湍球塔除雾问题的研究[J]. 化学工程, 1972(S2): 79-84, 78.
- [13] 浙江大学化工原理教研组. 旋流板技术及其应用[J]. 化学工程, 1978, 6(2): 21-34.
- [14] 陈建孟, 谭天恩. 旋流板上流场的 LDA 实验研究[J]. 化学工程, 1996, 24(3): 59-64.
- [15] 陈建孟, 谭天恩, 史小农. 旋流塔板上局部处的液滴粒径分布[J]. 高校化学工程学报, 1995, 9(4): 319-325.
- [16] 扈海莉, 蒋洪. 旋流管塔盘在三甘醇吸收塔中的应用[J]. 天然气与石油, 2013, 31(4): 37-40, 8.
- [17] YANG Q, MOSCA G, ROZA M. Characteristics of trays using inertial separation technology[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(6): 954-961.
- [18] 张敏, 袁惠新. 旋流聚结的机理及应用[J]. 流体机械, 2003, 31(5): 29-32.
- [19] 俞强强, 施红辉, 董若凌, 等. 竖直上升圆管内气液两相流流型特性的数值模拟[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(3): 397-404.
- [20] 张华海, 王铁峰. CFD-PBM 耦合模型模拟气液鼓泡床的通用性研究[J]. 化工学报, 2019, 70(2): 487-495.
- [21] 侯懿宁, 何宏舟, 张军. 气动乳化脱硫筒内气液两相流动的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 262-270.
- [22] 解婷婷, 高涛, 杨松泉, 等. 旋流雾化塔盘水力性能[J]. 化学工程, 2018, 46(10): 40-44, 62.
- [23] YANG J H, LEE C Y. Experimental study on phenomena of single water droplet impacts on liquid surfaces: pattern maps and correlations[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022, 130: 110480.
- [24] 常凯, 饶永超, 王树立, 等. 内置短螺旋扭带管内螺旋涡流数值模拟研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2016, 28(2): 73-78.
- [25] 翟银平, 王树立. 90°弯管管道螺旋流的数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2011, 23(2): 36-39.

(责任编辑:谭晓荷)