

转盘柱中存留分数的CFD模拟研究

谢庭亮, 刘富贵, 高杨*, 矫彩山, 马福秋, 刘伟

哈尔滨工程大学 核安全与仿真国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 转盘柱中分散相存留分数是影响其设计放大的重要因素。本工作通过计算流体力学(CFD)软件对转盘柱中水-煤油两相流水力性能进行模拟计算。两相逆流操作, 水是连续相, 煤油为分散相。求得了流场分布和分散相存留分数分布, 并研究了两相表观流速以及转盘转速对存留分数的影响, 模拟结果与已发表的文献实验数据吻合较好。CFD模拟为减少水力学实验和进一步研究转盘柱水力性能和传质打下了基础。

关键词: 转盘柱; 计算流体力学; 存留分数; 两相流

中图分类号: TL241.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)S0-0098-05

doi: 10.7538/hhx.2014.36.S0.0098

CFD Simulation of Holdup in Rotating Disc Contactor

XIE Ting-liang, LIU Fu-gui, GAO Yang*, JIAO Cai-shan, MA Fu-qiu, LIU Wei

National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: The knowledge of dispersed phase holdup is of considerable importance for the design and scaling-up of rotating disc contactor (RDC). In this paper, the hydrodynamic characteristics of two-phase flow in a RDC were studied by means of computational fluid dynamics (CFD) software. Two phases consisting of the dispersed phase (kerosene) and continuous phase (water) were introduced in countercurrent operation. The distribution of flow field and the dispersed phase holdup was obtained, in addition, the changes of the dispersed holdup with two-phase superficial velocity and rotation speed were also discussed. The results from simulations and the experiment data of the published literature are in good agreement. The presented CFD predictions will provide a possible way to reduce hydrodynamic experiment and will contribute to better understanding of the hydrodynamic properties and mass transfer characteristics in RDC.

Key words: RDC; CFD; holdup; two-phase flow

液-液萃取定义为物质从一液相转入与其不互溶(或者是部分互溶)的另一液相的传质过程。在石油化工、湿法冶金、核燃料后处理、医药、食品

和生物技术等工业领域有着广泛的应用^[1]。实现液-液萃取过程, 必然涉及各类萃取设备, 转盘萃取柱具有结构简单、容易加工制造、价格低廉、操

收稿日期: 2014-10-08; 修订日期: 2014-11-25

作者简介: 谢庭亮(1988—), 男, 湖南耒阳人, 硕士研究生, 核燃料循环与材料专业

* 通信联系人: 高杨(1978—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 核燃料循环与材料专业, E-mail: gaoyang@hrbeu.edu.cn

作简单、生产能力大、功率小、萃取效率高等优点,被广泛应用于后处理厂。

计算流体力学(CFD)在转盘萃取柱的设计和放大方面有着极为重要的作用。通过 CFD 软件对不同结构、尺寸萃取柱模型的模拟计算,并比较模拟结果,可以初步确定萃取柱的设计放大方案,这样可以大大减少实验的工作量及其费用。研究者运用 CFD 软件对转盘萃取柱进行了大量研究^[2-11]。文献[2,4,6]利用 CFD 软件对转盘柱(RDC)单相流场进行了模拟计算,结果发现转盘柱内部流场中存在级间的漩涡流动和沟流,且级间的返混很严重,为了解决问题,他们设计了有转动挡板的转盘柱(NRDC),通过实验发现 NRDC 可有效解决转盘柱的级间返混和沟流问题,传质效率比 RDC 的传质效率高 20%~40%。Drumm 等^[8,11]采用欧拉-欧拉模型对转盘柱两相流进行了 CFD 模拟,采用二维建模,并采用颗粒图像测速(PIV)对转盘柱流场进行了实验测量,模拟得到的速度分布和存留分数分布与实验结果吻合较好。

上述研究大部分是基于二维建模,而二维建模忽略了切向方向的流体流动,丢失了部分流场信息。本工作拟通过三维建模,运用软件 Fluent14.5 研究转盘柱流场及分散相存留分数的分布,分析两相流速以及转速对分散相存留分数的影响。并与已发表的文献数据进行对比。

1 计算方法

1.1 设备与体系

为了与实验结果进行对比,本工作选用了 Maria^[12]的实验体系,水为连续相,煤油为分散相,相关的几何参数列于表 1,转盘柱简图示于图 1。

表 1 转盘柱相关参数

Table 1 Parameters of RDC

参数(Parameters)	实际尺寸 (Real size)/mm	模拟尺寸 (Simulation size)/mm
转盘柱高度(Height of RDC)	1 100	250
转盘柱内径(Inner diameter of RDC)(D)	72	72
转盘直径(Diameter of stirrer)(D_d)	35	35
转盘厚度(Thickness of stirrer)	1	1
定子厚度(Thickness of stator)	1	1
隔间高度(Height of compartment)(H)	34	34
定子内径(Inner diameter of stator)(D_s)	53	53

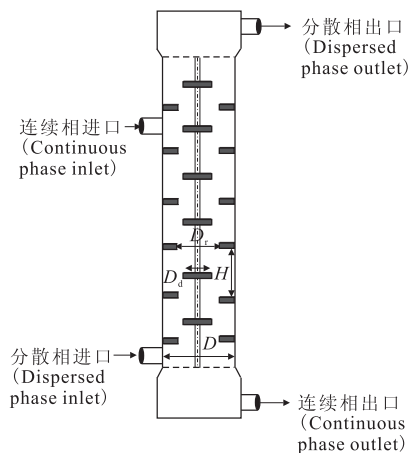


图 1 转盘柱简图

Fig. 1 Schematic diagram of RDC

1.2 网格划分

使用 Fluent 前处理软件 Gambit2.4.6 进行三维建模,由于转盘萃取柱的周期性,本工作只选取四个隔间进行建模,采用非结构化四面体网格划分网格,运用尺寸函数对转盘附近进行局部加密,计算域网格示于图 2。

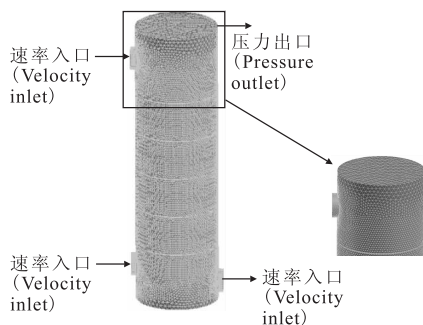


图 2 计算域网格

Fig. 2 Grid of computational domain

1.3 计算模型

本工作多相流模型选择 ANSYS14.5 中的欧拉-欧拉模型,湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型,欧拉-欧拉模型计算中,各种物相受到的背景压强是一样的,每种物相的动量方程和连续性方程均单独求解,其中第 i 相的连续性方程、动量方程如式(1)、(2)。

$$\frac{\partial(\phi_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_i \rho_i u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\phi_i \rho_i u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_i \rho_i u_i u_i) = -\phi_i \nabla p - \nabla \cdot (\phi_i \tau_i) + \phi_i \rho_i g + F_i \quad (2)$$

式中: ϕ_i ,存留分数; ρ_i ,密度; t ,时间; u_i ,速度; p ,压力; τ_i ,应力张量; g ,重力加速度; F_i ,动量。下标 i 代表一

相,即连续相与分散相。故存在如下关系式:

$$\phi_c + \phi_d = 1 \quad (3)$$

式中:下标 c 代表连续相,d 代表分散相。其中, τ_i 为第 i 相的应力张量, F_i 为第 i 相与其它相之间动量交换,包括了曳力、虚拟质量力、升力等。在转盘柱中液-液体体系的虚拟质量力和升力较曳力小的多,只考虑曳力作用,式(4)为曳力的计算式。其中计算曳力的系数 C_D 由 Fluent14.5 中默认的 Schiller and Naumann 模型如式(5)、(6)来求得。

$$F_{\text{drag}} = -\frac{\pi}{8} C_D \rho_c d_d^2 |u_d - u_c| (u_d - u_c) \quad (4)$$

$$C_D = \begin{cases} 24 \frac{(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687})}{\text{Re}^{0.687}} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.44 & \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Re} = \rho_c \frac{|u_d - u_c| d_d}{\mu_c} \quad (6)$$

式中: F_{drag} ,曳力; C_D ,曳力系数; d_d ,液滴直径; Re ,雷诺数; μ_c ,连续相粘度。

从式(6)可知,为了计算得到曳力(drag force),需要输入分散相的液滴直径。索特直径值由文献[13]提出的计算公式(7)估算带入。

$$\frac{d_{32}}{D} = 0.18 \left(\frac{ND^2 \rho_c}{\mu_c} \right)^{-1.12} \left(\frac{\mu_c}{\sqrt{\sigma \rho_c D}} \right)^{-1.38} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{-0.24} \times \left(\frac{D^2 \rho_c g}{\sigma} \right)^{-0.05} \left(\frac{H}{D} \right)^{0.42} \quad (7)$$

式中: d_{32} ,液滴索特直径; D ,转盘柱内径; N ,转盘转速; μ_c ,连续相粘度; σ ,界面张力; H ,转盘柱高。

1.4 边界条件

边界条件示于图 2。两相进口和连续相出口均设为速率入口,分散相出口设为压力出口。两相速率进口采用湍动能和湍动能耗散率的湍流定义方式,两相出口都采用湍流强度和流体力学直径的湍流定义方式。

1.5 求解过程设置

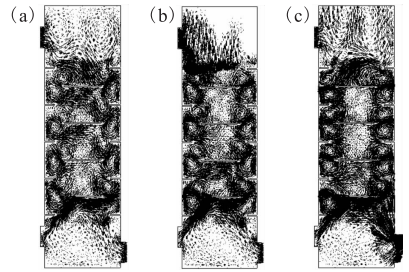
采用相间耦合的 SIMPLE 算法对模型进行求解。体积分数设置为一阶迎风,动量方程、湍动能方程、湍动能耗散率方程等均设置为二阶迎风空间离散格式。选取合适的时间步长,单步最大迭代步数为 100 步,分散相存留分数残差设为 10^{-5} ,其他设为 10^{-4} 。选取转盘柱中间两块定子间分散相平均体积分数作为最终存留分数模拟结果。

2 结果与讨论

2.1 流场分布

图 3、图 4 分别是连续相表观流速(u_c)为

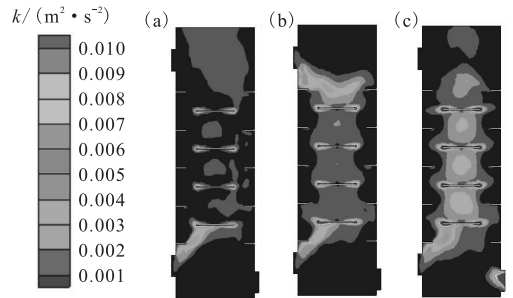
2.05 mm/s、分散相表观流速(u_d)为 4.76 mm/s 工况下,转盘转速(N)分别为 8.33、13.3、18.3 r/s 时连续相的速率矢量图和湍动能分布云图。由图 3 可知,转盘内部流场存在涡流,相邻定子之间形成了两个小漩涡,相邻转盘之间出现较大漩涡,且随着转盘转速的增大,涡流的位置由转盘中心轴向柱壁移动。这些涡流会增大柱子的轴向混合,甚至产生沟流,导致柱子的传质效率降低。由图 4 可知,随着转盘转速的增大,湍动能越来越大,且湍动能的最大值分布在转盘附近,分散相液滴在此处进行有效的破碎,从而增大两相传质比表面积,进而提高传质效率。



(a) — 8.33 r/s, (b) — 13.3 r/s, (c) — 18.3 r/s

图 3 不同转速连续相速率矢量

Fig. 3 Continuous phase velocity vector at different rotation speed



(a) — 8.33 r/s, (b) — 13.3 r/s, (c) — 18.3 r/s

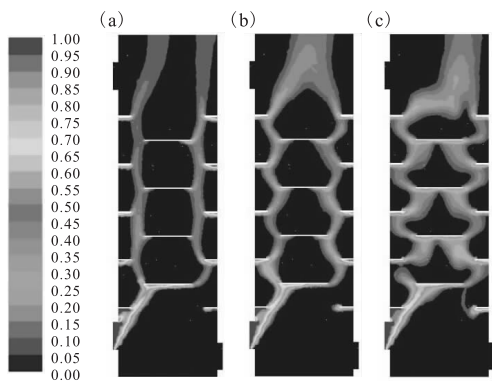
图 4 不同转速湍动能分布

Fig. 4 Space distribution of turbulent kinetic energy at different rotation speed

2.2 存留分数分布

图 5 是连续相表观流速为 2.05 mm/s、分散相表观流速为 4.76 mm/s 工况下,转盘转速分别为 8.33、13.3、18.3 r/s 时的分散相存留分数云图。由图 5 可知,分散相会在转盘和定子下侧附近聚集,转盘转速越大聚集地越多。这主要是由于在这些地方流体流动相对较为平缓,有利于密

度较小的分散相聚集。



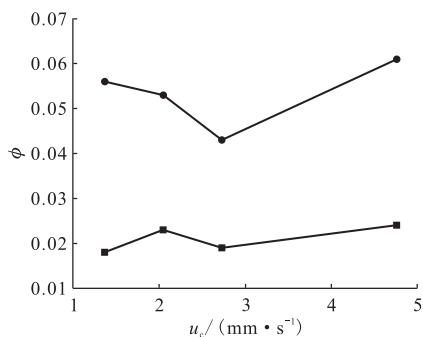
(a) — 8.33 r/s, (b) — 13.3 r/s, (c) — 18.3 r/s

图 5 不同转速存留分数分布

Fig. 5 Holdup distribution at different rotation speed

2.3 连续相表观流速对存留分数的影响

图 6 为存留分数随连续相表观流速的变化关系。由图 6 可知,分散相存留分数与连续相表观流速之间没有出现较为明显的关系,当连续相表观流速在 1.37~4.76 mm/s 范围内变化时,转盘转速为 8.33 r/s 时,分散相存留分数的变化范围为 1.8%~2.4%;转盘转速为 18.3 r/s 时,分散相存留分数的变化范围为 4.3%~6.1%,变化范围较小,表明连续相表观流速对分散相存留分数的影响较小。当实际应用转盘柱来进行萃取作业时,不适宜通过只调整连续相表观流速这种方式来进行分散相存留分数的调整。



● — $u_d = 2.05 \text{ mm/s}, N = 18.3 \text{ r/s}$;

■ — $u_d = 2.05 \text{ mm/s}, N = 8.33 \text{ r/s}$

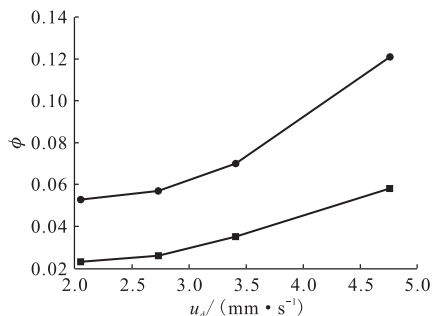
图 6 存留分数随连续相表观流速的变化

Fig. 6 Holdup variation with continuous phase superficial velocity

2.4 分散相表观流速对存留分数的影响

图 7 为存留分数随分散相表观流速的变化关

系。从图 7 可知,分散相存留分数是随着分散相表观流速的增大而增大,这是因为分散相表观流速增大,单位时间进入柱内的分散相液体增加,柱内有机相的分布会相对增多,定子对有机相阻碍作用增大,液滴数量增加,导致存留分数值增大。所以在实际应用转盘柱进行萃取时,可适当调整分散相表观流速来改变分散相存留分数以提高萃取效率。



● — $u_c = 2.05 \text{ mm/s}, N = 18.3 \text{ r/s}$;

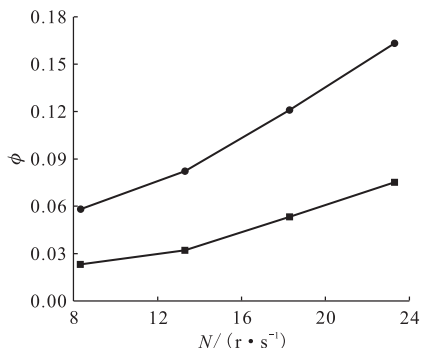
■ — $u_c = 2.05 \text{ mm/s}, N = 8.33 \text{ r/s}$

图 7 存留分数随分散相表观流速的变化

Fig. 7 Holdup variation with dispersed phase superficial velocity

2.5 存留分数随转盘转速的变化

图 8 为存留分数随转盘转速的变化关系。由图 8 可知,增大转盘转速会显著增大转盘柱内的分散相存留分数,这是因为转速的增大导致柱内湍动增加,能量输入水平提高,使得液滴破碎加剧,液滴群密度增加,小液滴均匀分布在连续相中,在连续相中充分乳化,停留时间增长,存留分数增大。实际应用转盘柱实现萃取作业时,可以利用转盘柱的这一特性通过调整转盘转速来达到



● — $u_c = 2.05 \text{ mm/s}, u_d = 4.76 \text{ mm/s}$;

■ — $u_c = 2.05 \text{ mm/s}, u_d = 2.05 \text{ mm/s}$

图 8 存留分数随转盘转速的变化

Fig. 8 Holdup variation with rotation speed

调整分散相存留分数的目的。

2.6 存留分数模拟值与实验值对比

图 9 为存留分数模拟结果(ϕ_{sim})与实验结果(ϕ_{exp})(文献值^[12])的对比。由图 9 可知,模拟计算得到的分散相存留分数较文献值^[12]偏小。图中所有点的误差的绝对值均在 0~20% 范围内,其中多数在 0~15% 范围内。所有模拟值平均误差为 9.93%。

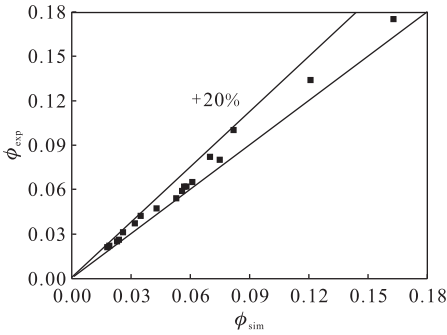


图 9 存留分数模拟结果与实验结果^[12]对比

Fig. 9 Comparison between experiment measurements^[12] and CFD predictions of holdup

3 结论

以转盘萃取柱为研究对象,运用 CFD 软件 ANSYS(Fluent) 14.5 对两相流存留分数进行了模拟,通过与相同实验条件下结果进行对比,发现连续相表观流速对分散相存留分数影响较小,而分散相表观流速和转盘转速对分散相存留分数的影响较大,分散相表观流速和转盘转速值的增大都会显著地引起分散相存留分数的增大。因为分散相存留分数对转盘柱的水力学特性、传质性能等都有重要的影响,所以实际应用转盘柱进行萃取作业时,可以根据需要调整转盘转速和分散相表观流速来调整转盘柱中的存留分数,以达到提高设备萃取效率的目的。

将计算流体力学方法引入转盘萃取柱研究过程中,有助于消除实验过程中不确定因素,减少实验成本,为转盘萃取柱设计与放大操作打基础,而其某些结果可以直接应用于工程实践当中,因而对其研究有着广阔的前景。

致谢:

课题研究过程中,感谢侯洪国、周羽等老师给予的指导与帮助。

参考文献:

- [1] Kolhe N S, Mirage Y H, Patwan A V. CFD and experimental studies of single phase axial dispersion coefficient in pulsed sieve plate column[J]. Chem Eng Res Des, 2011, 89(10): 1909-1918.
- [2] Fei W Y, Wang Y D, Wan Y K. Physical modeling and numerical simulation of velocity field in rotating disc contactor via CFD simulation and LDV measurements[J]. Chem Eng J, 2000, 78(2-3): 131-139.
- [3] Rieger R. Application of a 3D two-phase CFD code to simulate an RDC column[J]. Comput Chem Eng, 1994, 18: 229-223.
- [4] Wang Y D, Fei W Y, Sun J H, et al. Hydrodynamics and mass transfer performance of a modified rotating disc contactor(MRDC)[J]. Chem Eng Res Des, 2002, 80(4): 392-400.
- [5] Modes G, Bart H-J. CFD simulation of non ideal dispersed phase flow in stirred extraction columns[J]. Chem Eng Technol, 2001, 24(12): 1242-1245.
- [6] 万银坤,王运东,费维扬.用计算流体力学方法研究转盘塔内流场[J].化学工程,1999,5:9-14.
- [7] Vikhansky A, Kraft M. Modeling of a RDC using a combined CFD-population balance approach[J]. Chem Eng Sci, 2004, 59(13): 2597-2606.
- [8] Drumm C, Bart H-J. Hydrodynamics in a RDC extractor: single and two-phase PIV measurements and CFD simulations[J]. Chem Eng Technol, 2006, 29(11): 1297-1302.
- [9] Ghaniyari-Benis S, Hedayat N, Ziyari A, et al. Three-dimensional simulation of hydrodynamics in a rotating disc contactor using computational fluid dynamics[J]. Chem Eng Technol, 2009, 32(1): 93-102.
- [10] Onink F, Drumm C, Meindersma G W, et al. Hydrodynamic behavior analysis of a rotating disc contactor for aromatics extraction with 4-methyl-butylpyridinium center dot BF(4) by CFD[J]. Chem Eng J, 2010, 160(2): 511-521.
- [11] Drumm C, Hlawitschka M W, Bart H-J. CFD simulations and particle image velocimetry measurements in an industrial scale rotating disc contactor[J]. AIChE, 2011, 57(1): 10-26.
- [12] Maria A M, Fernando V D, Josh C. Hydrodynamics of a rotating disc contactor[J]. Sep Purif Technol, 1997, 11: 79-92.
- [13] Kumar A, Hartland S. Prediction of drop size in rotating disc contactors[J]. Can J Chem Eng, 1986, 64: 915-924.