[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.010

超重力分离装置填料内流场的 CFD 模拟研究

翟鑫钰,陆金桂

(南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏南京 211816)

摘 要:为了优化超重力分离装置,课题组对其内部流场进行了研究。通过计算流体力学软件 FLUENT 对超重力分离装置填料内部的流体流动进行数值模拟,分析了转速、填料外径和丝网尺寸对流场的影响。结果表明:液相速度分布与气相速度分布一致,液相速度主要受气相的影响,与液相入口速度无关;同一转速下填料区气相速度由内向外逐渐增大,各位置的气相速度随转速的增大而增大;气相最大速度与转速和外径有关,与丝网的尺寸无关。数值模拟的结果对超重机的设计与优化有一定的借鉴意义。

关键 词:超重力技术;计算流体动力学模拟;气液流场;FLUENT 软件
 中图分类号:0368;TH237.5
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2895(2020)03-0048-05

Analysis of Flow Field on Packing in Higee Based on CFD

ZHAI Xinyu, LU Jingui

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to optimize the higee separation device, the research group carried out research on its internal flow field. The fluid flow inside the packing of the super-gravity separation device was numerically simulated by computational fluid dynamics software (FLUENT), and the influence of the rotational speed, the outer diameter of the packing and the size of the wire mesh on the flow field were analyzed. The results show that the liquid phase velocity distribution is consistent with the gas phase velocity distribution. The liquid drop velocity is mainly affected by the gas phase and has nothing to do with the liquid phase inlet velocity. At the same rotation speed, the gas phase velocity of the filler zone gradually increases from the inside to the outside, and the gas phase velocity increases with the increase of the rotation speed; the maximum velocity of the gas phase is related to the rotational speed and the outer diameter, regardless of the size structure of the mesh. The results of numerical simulation have certain reference significance for the design and optimization of overweight machine.

Keywords: higee technology; CFD(computational fluid dynamics); gas-liquid flew field; FLUENT

超重力技术是一种传质强化技术,始于 20 世纪 70 年代。电机带动旋转轴高速旋转,使转子随之高速 旋转。填料上的液体处于远大于地球自身重力加速度 的超重力环境,超重力场可以起到强化传质和传热的 作用^{[1]259}。

填料内流场分布非常复杂,主要是因为填料的高速旋转和内部细密丝网对流场的影响。Burns和 Ramshaw对一个小型超重力装置的 PVC 填料进行拍 摄研究,发现不同转速下液体存在不同的流动状态。 郭锴等^{[2]43}使用电视摄像机对填料内液体进行观察, 研究液体加速的过程。由于实验条件的限制,以及计 算流体力学(CFD)软件的发展,越来越多的学者采用 CFD软件对填料内流场进行仿真模拟。栗秀萍等^[34] 对多孔板填料内部流场进行模拟,发现转速对液滴速 度有影响,气流量对干床压降有影响。戎娜等^{[1]260}对 丝网填料内的油雾颗粒进行模拟,结果显示油雾颗粒 的速度和压降随着转速增大而增大,转速对油雾径向 速度影响不大。杨文婧^[5]对旋转填料床中不同转速

收稿日期:2019-10-23;修回日期:2020-03-20

第一作者简介:翟鑫钰(1995),江苏靖江人,男,硕士研究生,主要研究方向为神经网络近似计算。通信作者:陆金桂(1966),江 苏靖江人,男,教授,主要研究方向为优化设计、计算智能等学科交叉领域。E-mail:lqsh@njtech.edu.cn

及不同流速条件下的液相流场分别进行了模拟,结果 表明转速大小与流速大小的合理配合是得到优质流场 的重要保证。

前学者对于超重力分离装置填料内部流场数值模 拟主要集中在转速和入口速度对气液流场的影响上, 而填料结构、内外径大小对流场的影响却少有人研究。 故课题组建立了丝网填料的二维模型,对丝网填料的 尺寸和填料外径大小对流场的影响进行模拟。课题组 的研究为超重机的设计和优化提供了参考。

1 超重力分离装置结构和工作原理^[6-19]

超重力分离装置采用的是立式错流结构,如图 1 所示。气体由外侧的气体入口进入高速旋转的填料 区,由于内外侧压强不同,气体受压差作用从外侧流向 内侧,最终由气体出口排出。液体自液体入口进入填 料区,受到高速旋转的填料的带动,圆周速度由内到外 逐渐增大,最终在离心力作用的影响下从液体出口流 出^{[1]259}。





Figure 1 Structure of higee separation device

2 建立计算模型

2.1 简化物理模型

超重机的填料多种多样,丝网填料应用较为广泛。 考虑到实际丝网层相连非常紧密,而且丝网连接方式 极其复杂,为建立数值模拟的物理模型,必须对这种复 杂的丝网结构进行必要的简化。

课题组采用直径4 mm 的圆来代替钢丝,径向相 邻的两个圆中心距为 10 mm,由内到外 20 层共 1 200 个圆,均布于整个填料区,填料区内径 325 mm,外径 725 mm。丝网的简化模型如图 2 所示。

2.2 网格划分

课题组基于 FLUENT 软件的 ICEM 前处理模块, 建立超重力分离装置的二维模型并进行相应的网格划 分。由于非结构化网格应用范围更广泛,而三角形网



图 2 填料区二维模型



格划分技术更为成熟,为了使网格质量更好,二维模型 的网格划分采用非结构化三角形网格。三角形网格对 钢丝周边局部加密的网格进行自适应调整,在保证计 算的准确性的同时,节省计算时间。

2.3 网格独立性验证

为验证网格独立性,采用不同的单元尺寸对模型 进行划分,得到4组网格数,分别为118749,273961, 416352和526779。图3所示为网格数对速度分布的 影响。





由图 3 可知,网格数为 118 749 和 273 961 的模型 计算结果与另外 2 组模型相差较大,为保证计算精度, 在计算时间允许的情况下,选择网格数为 526 779 的 模型网格尺寸进行划分,总体网格尺寸设置为 2 mm, 近壁面处进行加密处理,添加 5 层网格,其中第 1 层高 度为 0.3 mm,增长比率设置为 1.2。

网格划分情况如图4所示,网格单元数为 526779,检查网格质量均大于0.4,满足计算要求。

3 求解计算设置

3.1 连续相设置

计算软件采用 FLUENT16.0。由于填料区丝网的 高速转动,流体的流层之间存在相互扰动,故选择 κ-



图4 非结构三角形网格局部图

Figure 4 Partial map of non-structural triangle mesh epsilon 湍流模型。填料区转速为1 200 r/min,流场内 介质为空气,气体参数保持默认。压力速度耦合方式 为 SIMPLEC,压力离散方式为 Standard,残差控制在 10⁻⁴,迭代次数为 200。

3.2 离散相设置

在连续相计算完成的基础上,再进行离散相计算。 油雾喷射源均布于液相入口,喷射速度为0.5 m/s。 填料区转速为1 200 r/min,填料壁面为 Reflect 边界条 件,其余参数与连续相相同,迭代次数为500。

4 计算结果与分析

4.1 气液两相结果比较

气体连续相速度云图如图 5 所示,液滴离散相速 度云图如图 6 所示。

从气、液两相速度云图可以看出,液滴的速度分布 和气相几乎完全一致,说明液滴随气相运动,液滴的轨 迹仍为螺旋形,速度接近于转子的速度。根据郭锴 等^{[2]4345}利用电视摄像机对液体在填料中的观察,液滴 在经过10 mm 左右的填料后会被填料捕获,达到与转 子相同的速度。模拟结果与实验观察结果基本一致。









图6 液滴离散相速度云图

Figure 6 Liquid drop discrete phase velocity nephogram4.2 液体入口速度对液滴速度分布的影响

表1所示为液体入口速度对运动轨迹和最大速度

的影响。由表1可以看出将液体的入口速度从0.5 m/s逐渐增大,当液体的入口速度为1.0,2.0,3.0 和4.0 m/s时,液滴的轨迹仍为螺旋状,液滴最大速度仍为46.5 m/s。这是由于液体入口速度相对于气相旋转的线速度较小,对液滴的最大速度和运动轨迹影响不明显,液滴速度主要由气相速度决定。

表1 液体入口速度对液滴运动轨迹和最大速度的影响

Table 1 Effect of liquid inlet velocity on trajectory

and maximum velocity of liquid drop

液体入口速度/(m・s ⁻¹)	液滴运动轨迹	液滴最大速度/(m・s ⁻¹)
0.5	螺旋状	46.5
1.0	螺旋状	46.5
2.0	螺旋状	46.5
3.0	螺旋状	46.5
4.0	螺旋状	46.5

4.3 转速对气相速度的影响

同一转速下,气相速度由内向外逐渐增大。调整 填料转速从1 200 r/min 逐渐降低到 400 r/min,各位 置的气相速度也随之降低,具体如图 7 所示。气相最 大速度从 46.5 m/s 降低到 15.5 m/s。由图 8 可知,转 速与气相最大速度成正比。

4.4 转速对气相压降的影响

气相压降是衡量设备阻力大小和能量消耗的一项 重要指标,分为层床压降、离心压降、干床压降、湿床压 降和总压降。课题组模拟的是不加气液负荷的离心 压降。

由图9可知,气压由内向外逐渐增大;由图10可 知,离心压降随转速的增大而增大,最小压降为155 Pa,最大压降为1413 Pa,说明转速对干床压降的影响 很大。









maximum velocity of gas phase





4.5 填料丝网尺寸对气相最大速度的影响

由表2可知,丝网尺寸对气相最大速度影响很小。 主要原因在于气体运动黏度远小于液体,运动黏滞力 很小,丝网的细密程度难以对气相速度造成影响。



图 10 转速对压降的影响

Figure 10 Effect of speed on centrifugal

pressure drop

表2 丝网尺寸对气相最大速度的影响

Table 2 Effect of wire mesh size on

maximum gas velocity

填料内	填料外	丝网半	丝网间	转速/	气相最大速
径/mm	径/mm	径/mm	距/mm	$(r\boldsymbol{\cdot}^{-1})$	度/($\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$)
325	725	2	10	1 200	46.5
325	725	4	12	1 200	46.8
325	725	6	15	1 200	46.5
325	725	8	20	1 200	46.9
325	725	10	25	1 200	46.2

4.6 填料外径对气相最大速度的影响

由表3可知,气相最大速度随外径的增大而增大。 气体由填料带动,气相速度由内到外逐渐加速,外径越 大,加速的过程越久,气相最大速度也越大。填料外径 对气相最大速度的影响如图11所示。

表3 填料外径对气相最大速度的影响

 Table 3
 Effect of outer diameter of packing on

maximum gas velocity

填料内径/mm	填料外径/mm	转速/	气相最大速度/
		$(r \cdot min^{-1})$	$(m \cdot s^{-1})$
325	625	1 200	36.11
325	650	1 200	44.09
325	675	1 200	45.85
325	700	1 200	46.81
325	725	1 200	47.35
325	750	1 200	48.04
325	775	1 200	55.97
325	800	1 200	56.75
325	825	1 200	59.58

5 结论

课题组建立了超重力分离装置填料区的二维模型,采用 FLUENT 软件对内部流场进行模拟,研究了气相和液相的速度分布,以及转速、丝网尺寸和填料外径 对气相速度的影响,得到以下结论:





液相速度分布与气相速度分布一致,当液相入口速度小于填料外缘的气相最大速度时,液相速度主要受气相的影响,与液相入口速度无关。

同一转速下填料区气相速度由内向外逐渐增大,各位置的气相速度随转速的增大而增大。

3) 气相最大速度与转速成正比,随填料外径增大 而增大,丝网的尺寸结构对气相速度影响很小。

参考文献:

- [1] 戎娜,李志峰,王文宾. 基于 CFD 的超重力分离净化装置的流场 分析 [J]. 煤矿机械,2015,36(11):258-261.
- [2] 郭锴. 超重机转子填料内液体流动的观测与研究[D]. 北京:北 京化工大学, 1996:43-45.
- [3] 栗秀萍,王新成,李俊妮,等. 超重机内多孔板填料上气液流场的 计算流体动力学模拟[J]. 石油化工,2013,42(12):1361-1366.
- [4] 栗秀萍,刘有智,张振翀.多级翅片导流板旋转填料床精馏性能研究[J].化学工程,2012,40(6):28-31.
- [5] 杨文婧.旋转填料床内流场与微混合的CFD模拟[D].北京:清华 大学,2009:12-13.

- [6] 管浩,张长森.超重力烟气脱硫的试验研究[J].硫酸工业,2017
 (6):1-3.
- [7] 张斌,李育敏,耿康生,等.折流式旋转床气液比表面积的实验研究及 CFD 模拟[J]. 化工进展,2017,36(5):1635-1641.
- [8] 王洋. 超重力机内流体流动特性研究[D]. 北京:北京化工大学, 2016:1-87.
- [9] 张建文,高冬霞,李亚超,等.旋转床超重力环境下多相流传递过 程研究进展[J].化工学报,2013,64(1):243-251.
- [10] 石鑫,向阳,文利雄,等.基于离散相模型的旋转填充床内的流 场分析[J].高校化学工程学报,2012,26(3):388-394.
- [11] 栗秀萍,李宁,刘有智,等. 超重力减压间歇精馏的传质性能
 [J]. 化工进展, 2016,35(7):2001-2006.
- [12] 霍闪,邓小川,卿彬菊,等. 超重力技术应用进展[J]. 无机盐工 业,2015,47(9):5-9.
- [13] LI Xiuping, LIU Youzhi, LI Zhiqiang, et al. Continuous distillation experiment with rotating packed bed [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2008, 16(4):656-662.
- [14] 官益豪,黄卫星,肖泽仪,等. 超重力技术及其应用研究进展 [J]. 化工机械,2005,32(1):55-59.
- [15] 渠丽丽,刘有智,楚素珍,等.超重力技术在气体净化中的应用
 [J].天然气化工,2011,36(2):55-59.
- [16] 隋立堂. 折流式超重力旋转床的气相压降与流场模拟[D]. 杭州:浙江工业大学,2008:1-102.
- SHIVHARE M K, RAO D P, KAISTHA N. Mass transfer studies on split-packing and single-block packing rotating packed beds [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2013, 71:115 - 124.
- [18] KELLEHER T, FAIR J R. Distillation studies in a high-gravity contactor[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1996, 35(12):4646-4655.
- [19] ZHAO Hong, SHAO Lei, CHEN Jianfeng. High-gravity process intensification technology and application[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(3):588 - 593.

(上接第47页)

- [10] ZHANG Jun, CHUNG H S H, LO W L. Clustering-based adaptive crossover and mutate on probabilities for genetic algorithms [J].
 IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(3): 326 335.
- [11] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetics, 1994, 24(4):656-667.
- [12] 闫春, 厉美璇, 周潇. 基于改进的遗传算法优化 BP 神经网络的车 险欺诈识别模型[J/OL]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2000,68(5):72-80.
- [13] 高航,薛凌云.基于改进遗传算法的反向传播神经网络拟合 LED 光谱模型[J].激光与光电子学进展,2017,54(7):294-302.
- [14] 杨从锐,钱谦,王锋,等.改进的自适应遗传算法在函数优化中的应用[J]. 计算机应用研究,2018,35(4):1042-1045.