

动-静填料旋转床内部气相流场 CFD 模拟研究

景满军¹,高晓亮²,杜磊磊¹,郑国峰¹,刘学武^{1*}

(1. 大连理工大学化工机械与安全学院,辽宁 大连 116024;

2. 盘锦辽河油田大力集团有限公司化工分公司,辽宁 盘锦 124022)

摘要:通过对动-静填料旋转床进行简化,建立了二维物理模型,采用计算流体力学软件 Fluent 中多孔介质模型对旋转填料床内部流场进行了模拟研究。通过对旋转填料床进口结构形式、填料层厚度、动填料转速及进气速度对气相压降和速度分布影响的模拟研究,得出切向进口旋转填料床内气体分布更均匀;保持填料外径不变,增大填料层厚度,气相压降随之降低;气相压降随动填料转速和进气速度的增加而增大,这与常规的整体填料旋转床保持一致。

关键词:旋转填料床;气相流场;转速;气相压降

中图分类号:TQ051.19;TQ021.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)02-0180-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.02.043

CFD stimulation of inner gas flow field in rotating packed bed with rotational-stationary packing

JING Man-jun¹, GAO Xiao-liang², DU Lei-lei¹, ZHENG Guo-feng¹, LIU Xue-wu^{1*}

(1. School of Chemical Machinery and Safety, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. PanjinLiaohe Oil field energetically Group Co., Ltd., Chemical Branch, Panjin 124022, China)

Abstract: A two-dimensional physical model is established by simplifying the rotating packed bed with rotational-stationary packing. The computational fluid dynamics software, Fluent, is employed to stimulate the inner fluid field in rotating packed bed by using the porous medium model. The effects of the structure of gas inlet, thickness of the packing, rotational speed of rotational packing and the gas inlet velocity on pressure drop and gas velocity distribution in rotating packed bed are studied. The results indicate that the gas distribution is well-proportioned in rotating packed bed with tangential gas inlet. When the outer diameter of packing is fixed, the pressure drop is decreased as the thickness of packing is increased. Through increasing rotational speed of packing and gas inlet velocity, the gas pressure drop can be increased, which is consistent with the conventional integral rotating packed bed.

Key words: rotating packed bed; gas flow field; rotational speed; gas pressure drop

旋转填料床是一种新型的气液接触反应装置,通过利用填料转子的高速旋转,产生远大于重力的离心力,在强大的离心力作用下,使液体雾化增大了气液接触面积,同时也加速了气液表面的更新速度,与传统的填料塔和板式塔相比极大地提高了传质系数。旋转填料床具有占地面积小、投资成本低、持液量小、处理量大、不易液泛、气相压降小及操作弹性大等优点,被誉为化学工业的“晶体管”^[1-2]。目前旋转填料床已应用于化工、环境、能源等领域,其中比较典型的有碱性溶液吸收 CO₂^[3]、气体中 H₂S 的脱除^[4]、水体脱氧^[5]等。

1 研究背景

近 10 年来由于计算机性能和计算流体力学的发展,对以前一些实验难以完成的研究,如今可通过

CFD 软件进行模拟,既可为优化设计提供参考,又能节省实验成本。气相压降是衡量设备阻力大小和能量损耗的重要指标之一,采用 Fluent 软件对旋转填料床内部气相流场进行模拟成为对旋转填料床优化设计行之有效的办法。杨文婧^[6]通过对多孔填料建立几何模型,对旋转填料床内部流场进行了模拟研究;Llerena-Chavez 等^[7]对 3 种不同进气方式下的旋转填料床内部流场分布和气相压降进行了模拟研究;杨力等^[8]采用 Chandra 等^[9]文中的几何模型对分层填料旋转床气相流场和速度分布进行了相关模拟,得出了比较有意义的结果。

目前,虽然学者们对旋转填料床进行了多方面的研究,但由于旋转填料床内部结构复杂、旋转填料不规则性以及气体在填料中运动的随机性,给旋转填料床内部流场的模拟研究带来了一定难度,特别

收稿日期:2016-05-30

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT15ZD109);中国石油科技创新基金资助(2015D-5006-0601);大连市科技计划项目(2015A11GX045)

作者简介:景满军(1992-),男,硕士生;刘学武(1974-),男,副教授,研究方向为天然气净化及超临界流体技术,通讯联系人,0411-84986276,liuxuewu@dlut.edu.cn。

是针对动-静填料旋转床的模拟研究更少。本文中主要针对动-静填料转子,对旋转填料床在不同进气方式、填料层厚度、动填料转速以及进气速度下对旋转填料床内部气相流场的影响进行相关研究,为该类旋转填料床的设计与优化提供一定参考。

2 几何模型和求解方法

2.1 几何模型

本文中所模拟的动、静填料采用嵌套方式布置于旋转床内,气体由填料最外侧进入,依次穿过填料,经过内侧填料后流出,动、静填料结构示意图如图1所示。采用镍-铬泡沫金属作为填料,具体参数见文献[9],孔隙率 $\varepsilon=0.9$,比表面积 $\alpha_p=1\ 700\ \text{m}^2/\text{m}^3$ 。旋转填料床中填料层的具体尺寸如表1所示。

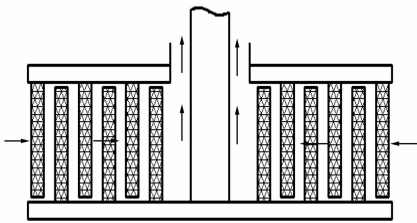


图1 动-静填料结构示意图

表1 填料层具体尺寸 mm

填料层名称	动填料1	静填料1	动填料2	静填料2	动填料3	静填料3
填料内径	60	90	120	150	180	210
填料外径	76	106	136	166	196	226

模拟过程中,对动-静填料旋转床整体结构进行了适当简化,填料部分建立了垂直于旋转轴的二维平面模型。

2.2 多孔介质模型

前人在研究旋转填料床内部流场时,将填料视作多孔介质处理,其中也有通过建立几何模型来模拟多孔填料的^[6]。由于通过建立几何模型模拟多孔填料其孔隙率和比表面积与实际模型相差较大,且随着填料层的增加在网格划分和计算机求解计算方面难度都很大,故本文中采用 Fluent 中自带的多孔介质模型对旋转填料床内部流场进行模拟。

Fluent 中的多孔介质模型实际上就是在动量方程中附加了动量源项,使其具有动量损失。附加的源项由黏性损失项和惯性损失项 2 部分组成^[10]:

$$S_i = - \left[\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} (1/2) \rho |v| v_j \right] (i, j = x, y, z) \quad (1)$$

式中, S_i 为 $i(x, y$ 或 $z)$ 方向动量方程的源项; D 和 C 为规定的矩阵; μ 为流体介质运动黏度; $|v|$ 为流体介质速度大小; ρ 为流体介质密度。

对于简单均匀的多孔介质,将矩阵 D 和 C 分别指定为黏性阻力系数 $1/\alpha$ 和惯性阻力系数 C_2 的对角矩阵,其他项为零,则附加的动量源项可以改写为下式:

$$S_i = - [(\mu/\alpha)v_i + C_2(1/2)\rho |v| v_i] (i = x, y, z) \quad (2)$$

式中, α 为渗透率; C_2 为惯性阻力系数。

在模拟充满介质的湍流流动中,通过对 Fluent 模型中黏性阻力系数、惯性阻力系数和孔隙率的定义来确定多孔介质的性质。对于很大雷诺数范围内和不同类型的充满形式,有一个半经验 Ergun 方程经常被采用:

$$\nabla p = (150 \mu/d_h^2) [(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3] v + [1.75 \rho (1-\varepsilon)/d_h \varepsilon^3] v^2 \quad (3)$$

通过式(2)和式(3)的对比可以得出黏性阻力系数和惯性阻力系数的计算式如下:

$$1/\alpha = (150/d_h^2) [(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3] \quad (4)$$

$$C_2 = (3.5/d_h) [(1-\varepsilon)/\varepsilon^3] \quad (5)$$

式中, d_h 为填料的当量直径,可以由式(6)计算得到; ε 为填料的孔隙率。

$$d_h = 4\varepsilon/\alpha_p \quad (6)$$

使用多孔介质模型对多孔填料进行模拟,避免了复杂的几何建模,具有相当的精度,结果可信。

2.3 数值求解方法

采用 gambit 2.4.6 软件,对模型进行 Quad 结构化网格划分,所划分的网格如图2所示。求解器选择基于压力的、稳态、二维单精度求解器。采用 Fluent 自带的多孔介质模型,选用动参考系模型(MRF)来模拟动填料的旋转。边界条件选用速度入口和压力出口,考虑到动填料的旋转效应,湍流模型选 RNG $k-\varepsilon$ 模型。压力插值格式选用 PRESTO,压力-速度耦合采用 SIMPLE 运算法则,动量方程、湍动能方程和湍流耗散率方程均采用二阶迎风离散格式。欠松弛因子采用默认值,各物理量的残差均设为 1×10^{-4} 。

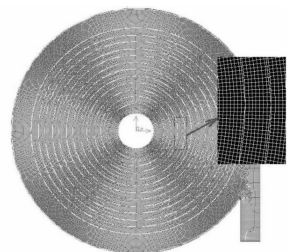


图2 旋转填料床几何模型和网格划分

3 模拟结果与讨论

3.1 进口结构形式

旋转填料床中切向进口和径向进口都是比较常见的气体进口结构形式。不同的进口结构形式对旋转填料床内气体分布有较大的影响,进而影响气液传质效果。均匀的气相流场分布不仅可降低能量损耗,且对整体气液传质效果有所提升。

本部分以气体进口速度 $v = 8 \text{ m/s}$ 、动填料转速 $n = 1400 \text{ r/min}$ 为研究条件进行模拟研究。

通过图 3 与图 4 2 种不同气体进口形式静压云图的对比分析可知,径向进口旋转填料床的进出气口气相压降要低于切向进口旋转填料床,但径向进口旋转填料床会造成旋转填料床内局部的高静压。

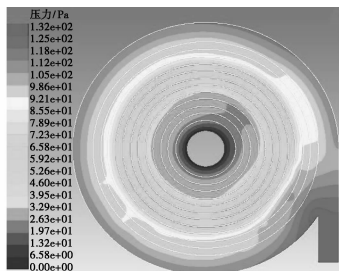


图 3 切向进口旋转填料床静压云图

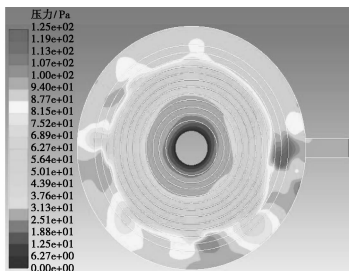


图 4 径向进口旋转填料床静压云图

由图 5 和图 6 对比分析可知,切向进口旋转填料床内部气体流速分布相对均匀。径向进口旋转填料床气体经由进气口后,一部分进入填料,剩下的向进气管两侧沿壁面流动,其中包括与动填料旋转方向相反的一侧,这导致了气体在旋转填料床内的分布不均以及局部出现漩涡的现象。通过上述对比分析,切向进口旋转填料床内部气体分布相对均匀。

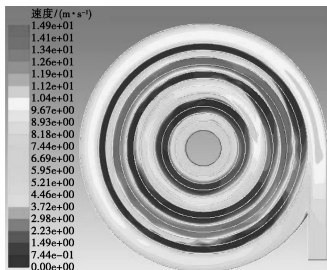


图 5 切向进口旋转填料床速度云图

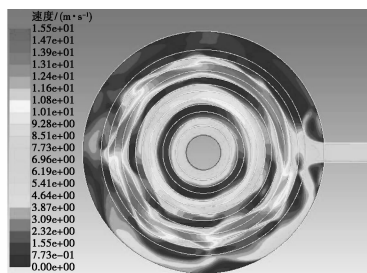


图 6 径向进口旋转填料床速度云图

3.2 填料层厚度

填料层为旋转填料床的核心部件,填料层厚度对压降以及气体的速度分布都有一定的影响。本模型通过保证填料层外径不变,将填料层厚度由之前的 8 mm 增加为 10 mm 来考察填料层厚度对压降以及速度分布的影响。采用切向进口形式,动填料转速和进口速度与上述模拟保持一致。

通过图 3 与图 7 对比分析可知,在保持填料外径不变的情况下,增加填料层厚度,旋转填料床内的静压云图变化不大,气相压降略有降低。这一结果与李银刚^[11]模拟的整体填料旋转床结果保持一致。通过图 5 与图 8 对比分析,气体的速度分布基本保持不变,对于动填料部分的气体速度有略微提升,可能是因为填料厚度增加使得气体在填料层有足够的时间加速所引起。

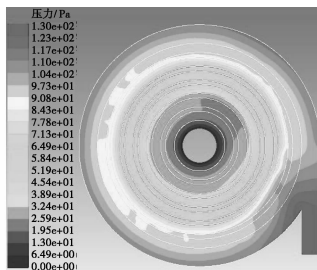


图 7 填料厚度 10 mm 旋转填料床静压云图

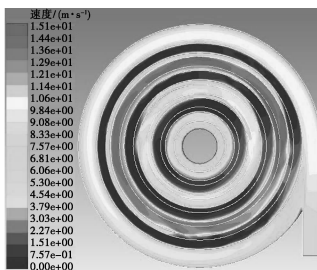
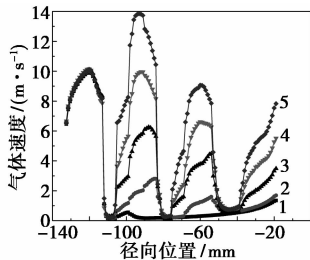


图 8 填料厚度 10 mm 旋转填料床速度云图

3.3 动填料转速

动填料转速为旋转填料床重要的操作参数,对旋转填料床内气体速度以及旋转填料床的气相压降都有重要的影响。本文中在给定气体进口速度的情况下,通过改变转速来研究动填料转速对气体速度沿径向分布及气相压降的影响。

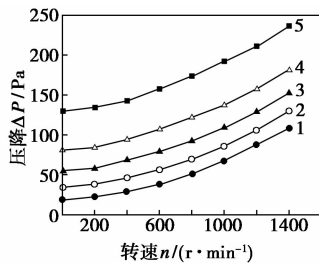
图9为在不同动填料转速下,气体速度沿径向方向的分布曲线。动填料使气体速度增大而静填料使气体速度降低,动、静填料主要通过影响切向速度来影响速度的大小,对径向速度的影响较小,而实际径向速度的大小相对切向速度也很小。这也就造成了动填料中气体的速度很大而静填料中气体的速度很小的现象。



1— $n=0$ r/min; 2— $n=200$ r/min; 3— $n=600$ r/min;
4— $n=1\ 000$ r/min; 5— $n=1\ 400$ r/min

图9 不同转速下气体速度沿径向方向分布

图10为不同气体进口速度下,气相压降随动填料转速变化的关系曲线。由图10可知,气相压降随动填料转速的增加而增大,这与传统的整体填料旋转床具有相似的规律。从5条曲线的趋势及斜率来看,动填料的转速越大对气相压降的影响也就越大。

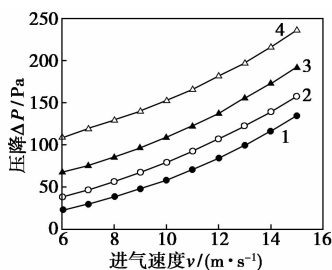


1— $v=6$ m/s; 2— $v=8$ m/s; 3— $v=10$ m/s;
4— $v=12$ m/s; 5— $v=15$ m/min

图10 转速对气相压降的影响

3.4 进气速度

在固定动填料转速不变的情况下,改变进气速



1— $n=200$ r/min; 2— $n=600$ r/min;
3— $n=1\ 000$ r/min; 4— $n=1\ 400$ r/min

图11 进气速度对气相压降的影响

度来研究气速对旋转填料床气相压降的影响。本部分模拟了4种不同动填料转速下,进气速度为6~15 m/s的气相压降变化规律,得到气相压降随进气速度变化的关系曲线如图11所示。

随着进气速度的增加,气相压降逐渐变大,这一变化规律与整体填料旋转床气相压降随进气速度的变化规律相一致。

4 结论

通过对动-静填料旋转床结构及操作变量进行模拟研究得出结论。

(1) 径向进口旋转填料床的气相压降比切向进口旋转填料床的低,但切向进口旋转填料床内部气体分布相对均匀。

(2) 在保持填料层外径不变的情况下,增加填料厚度,旋转填料床内部流场基本保持不变,气相压降略有降低,填料部分气体速度略有升高。

(3) 动静填料旋转床气相压降随转子填料转速和进气速度的增加而增大,与传统整体填料旋转床的变化规律一致。

参考文献

- [1] 陈建峰. 超重力技术及应用—新一代反应与分离技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 1-3.
- [2] 刘有智. 超重力化工过程与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 4-5.
- [3] Tan C S, Chen J E. Absorption of carbon dioxide with piperazine and its mixtures in a rotating packed bed[J]. Separation and Purification Technology, 2006, 49(2): 174-180.
- [4] Qian Z, Xu L B, Li Z H, et al. Selective absorption of H₂S from a gas mixture with CO₂ by aqueous N-methyldiethanolamine in a rotating packed bed[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2010, 49(13): 6196-6203.
- [5] Lin C C, Jian G S. Characteristics of a rotating packed bed equipped with blade packings[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 54(1): 51-60.
- [6] 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.
- [7] Llerena-Chavez H, Larachi F. Analysis of flow in rotating packed beds via CFD simulations—Dry pressure drop and gas flow maldistribution[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(9): 2113-2126.
- [8] 杨力, 刘有智. 分层填料旋转床气相流场的 CFD 模拟研究[J]. 化学工程, 2013, 41(5): 49-53.
- [9] Chandra A, Goswami P S, Rao D P. Characteristics of flow in a rotating packed bed (HIGEE) with split packing[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2005, 44(11): 4051-4060.
- [10] 杨力, 刘有智, 邵凡. 气相剪切旋转填料床流场特性的数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2013, 30(3): 286-290.
- [11] 李银刚. 旋转填充床中流体流动的三维 CFD 数值模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013. ■