

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.016

连续逆流萃取设备流场的仿真分析

方杰¹, 李庆忠¹, 吴东新²

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 苏新干燥设备有限公司, 江苏江阴 214074)

摘要:连续逆流萃取设备因其成本低、效率高、可连续作业的特点近年来在中药提取行业应用越来越广泛,但是关键部分提取节仍然存在着浮料以及沉料的问题,文章对物料进行运动学分析,再利用 FLUENT 软件对某公司螺旋式连续逆流萃取设备流场进行仿真分析,获得物料在流体中的流速流向数据及其分布情况,其与实验数据一致性较高。结合运动学分析与仿真结果,使用 UG 软件设计了扰流板及其固定结构,通过对优化前后模型进行对比分析,证明优化后模型能够有效地解决浮料以及沉料的问题。

关键词:中药提取;计算流体力学(CFD);连续逆流萃取;有限元仿真

中图分类号:TQ469;TH224

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)03-0069-05

Stimulation of Counter-Current Extraction Machine Fluid

FANG Jie¹, LI Qingzhong¹, WU Dongxin²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Suxin Drying Machine Company, Jiangyin, Jiangsu 214074, China)

Abstract: Counter-current extraction machine is being equipped in a growing number of facilities because of its high efficiency and low cost and continuous processing, but the key extraction part still has issues that not solved, such as material floating and material sinking. In this paper, the kinematics analysis of material was analyzed first, then Fluent was used to launch the stimulation of the current model, the volume fraction data and velocity of the particle data was got from the stimulation result which is in line with experimental results. The spoiler and its fixed structure are designed in UG according to kinematics analysis and stimulation data. Compared the results of two model, the conclusion that the refined model of the screw is very efficiency in solving the problem of anti-material floating and sinking.

Key words: chineseherb extraction; Computational Fluid Dynamics (CFD); counter-current extraction; FEA (Finite Element Analysis)

中国是中药生产大国,但是制取分离技术落后于国外,市场占有率较低。动态逆流提取作为一种重要的提取方式,近年来大量的学者投入其中做了很多研究。孙达峰^[1]等人采用连续逆流提取工艺进行提取白芨多糖的研究,将连续逆流提取方法与单罐二次提取方法进行比较,得出连续逆流提取效果更好的结论。王松^[2]等将连续逆流提取工艺应用到大豆异黄酮的提取之中,得出该提取方法优于单级提取方法的结论。现有的研究多针对特定物料的提取工艺,而对逆流提取设备本身的研究较少^[3], Poirot Rache 等^[4-8]得出了适用于螺旋式连续逆流提取的物料颗粒应具有大小适中、黏性适中、不干扰推料机构运动的特点的结论。本

文基于某公司生产的 300 型连续逆流提取设备,该设备已实装在多个制药厂,应用广泛,但是仍然存在着浮料和沉料的问题,本文提出了一套针对提取节流场分析的方案,即利用 FLUENT 软件对流场进行仿真分析,研究不同密度物料在流场中的分布情况,然后通过对物料进行受力分析,并结合实际情况进行对比,发现与实际情况相吻合,证明通过 FLUENT 软件对连续逆流提取设备流场仿真的可行性,为后续的优化设计提供了参考。

1 物料运动学分析

颗粒在设备中的受力情况非常复杂,在不考虑颗粒之间的相互作用时,将颗粒的受力分为不与螺杆接

收稿日期:2015-12-20;修回日期:2016-02-20

作者简介:方杰(1990),男,安徽铜陵人,硕士研究生,主要研究方向为中药提取设备。E-mail:rabbittj@163.com

触时颗粒的受力情况和与螺杆接触时在液体中的受力情况两部分进行分析。

1.1 物料颗粒不与螺杆接触

这种情况即为分析单颗粒在流体中的受力情况, FLUENT 中通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒的轨道。单位质量颗粒的作用力平衡方程在笛卡尔坐标系 x 轴方向的形式为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{1}{6}\rho\pi d_p^3 + F_x \quad (1)$$

y 轴和 z 轴受力形式同 x 轴。

单位质量曳力为

$$F = F_D(u - u_p) = \frac{18\mu C_D}{\rho_p d_p^2 24}(u - u_p) \quad (2)$$

式中: g_x 为重力加速度在 x 方向的值, 在本文中模型轴向为 y 方向, 故 g_x 取值为 0; F_x 表示其他作用力; F_D 为曳力; u 为流体相速度; u_p 为颗粒速度; μ 为流体动力黏度; ρ 为流体密度; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒直径; C_D 为曳力系数。

相对雷诺数(颗粒雷诺数) Re_p 有

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

$$C_D = 30.83 Re_p \quad (4)$$

在本设备加工中, 以水作溶剂为例, 颗粒直径 1 mm, 相对速度为 e^{-3} 量级, 将水的动力黏度带入, 相对雷诺数为 1, 得出逆流提取设备稳定运行时相对雷诺数 $Re_p \leq 10$, 所以曳力系数 C_D 处在过渡区 ($1 < Re_p < 500$), 带入公式(2), 化简可得

$$F = A \frac{\mu^2}{\rho \rho_p d_p^2} \quad (5)$$

式中: A 为常数相。由此可知曳力与流体动力黏度的平方成正比, 与流体密度和颗粒密度、颗粒直径的平方成反比, 故流体域中颗粒相较于集中处, 即固体体积分数较大处, 流体对颗粒的拖曳力较小, 使得浮料和沉料难以被流体推动, 导致浮料集聚和沉料集聚的情况会一直存在。

1.2 物料颗粒与螺杆接触

单颗粒与螺杆面相互作用时受力分析和速度分解图如图 1 和图 2 所示。

本文研究设备采用的螺杆为单头、等螺距、等直径螺杆。在此基础上在距离螺旋轴中心线上对应点 O 距离颗粒 S 距离 r 处的由螺旋升角 α 处展开得到一条直线, 做垂直于线段 OS 且经过展开线的平面, 分别做

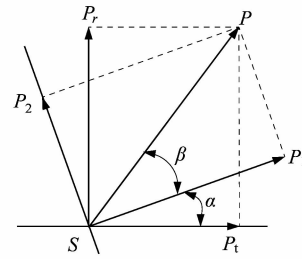


图 1 颗粒受力分解图

Figure 1 Force analysis of particle

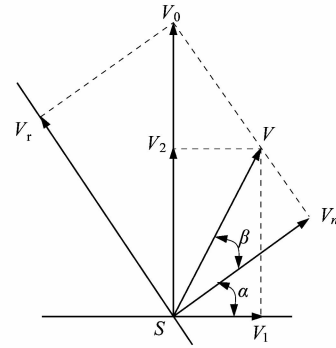


图 2 颗粒速度分解图

Figure 2 Velocity analysis of particle

颗粒 S 的在此平面内的受力分析和速度分解。

图 1 中 P_1 方向为垂直于螺旋面的法线方向, 在摩擦力的作用下, P_1 向上偏移了 β 角度, β 的大小由两方面决定: 一方面是物料对螺旋面的摩擦角 η , 另一方面是叶片表面的粗糙程度, 对于一般工艺制造的螺旋叶片, 可以忽略其表面粗糙程度对 β 的影响^[9], 所以 $\beta = \eta$, 可将力 P 分解为 P_1 和 P_r , 它们分别是轴向分力和径向分力, 其中轴向分力使得颗粒得以不断地向推料的方向前进。图 2 为对应的速度分解图, 经过公式推导, 得到

$$V_1 = \frac{2\pi n \sin \alpha}{60 \cos \beta} \cos(\alpha + \beta) r; \quad (6)$$

$$V_2 = \frac{2\pi n \sin \alpha}{60 \cos \beta} \sin(\alpha + \beta) r. \quad (7)$$

式中 n 为螺杆转速。

结合式(6)~(7)以及实际参数范围, 可知轴向速度和径向速度都有随着半径增大而增大的趋势, 但是二者速度随着摩擦角的增大, 其发展趋势相反。然而在整个流体域范围内, 与螺杆接触的物料仍占少数, 但是实际提取过程中大部分物料可以在流场中均匀分布, 从而可以推断出流体对物料的拖曳力及其他作用力在整个提取槽流体范围内是对物料运动主要作用

力。但是在上述浮料和沉料 2 种情况中,物料的浮力和重力为其他作用力中的主要作用力,且大于流体拖曳力的作用,故需要辅助机构对物料作用,才能解决浮料和沉料的问题。

2 模型优化

通过对物料在流场中的运动情况进行分析可知:在整个设备中物料轴向运动主要由螺杆推动实现,而浮料和沉料情况总是发生于螺杆与 U 型槽的空隙中,

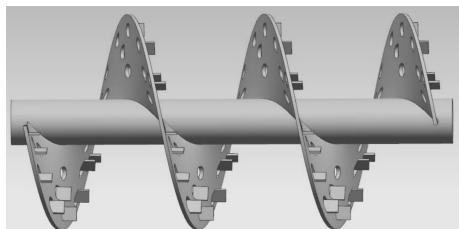


图3 原有模型

Figure 3 Original model

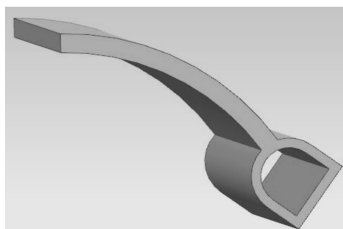


图4 扰流板

Figure 4 Spoiler

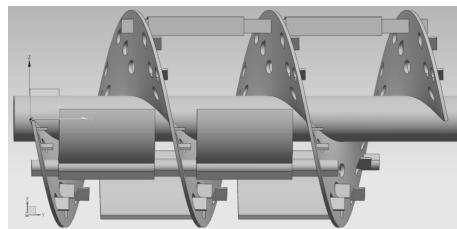


图5 优化后模型

Figure 5 Refined model

3 仿真分析

3.1 逆流萃取设备仿真模型及参数

浸润过程中提取液渗透到物料颗粒内,从而导致物料密度、颗粒体积变大。由于设备加工范围有限,故物料浸润后密度过大或者过小都无法使用该设备进行加工,或者加工无法达到预期的效果。结合公司实际加工过的物料数据可知加工物料浸润后密度应在 $700 \sim 1\,200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,体积分数值应为 $15\% \sim 40\%$,本文取 20% 。

将设备相关参数带入搅拌雷诺数公式中,计算出雷诺数为 3 000,为低雷诺数流体,流体均为层流或过渡流状态。然而在实际生产过程中,溶液中含有大量的有效成分,其真实动力黏度大于水的动力黏度,且螺杆转速非常低,故 FLUENT 中仿真模型采用层流模型,多相流模型使用欧拉模型进行计算,结合动网格技术^[10-11],模拟混合状态。

3.2 原有模型仿真结果

本文监测面取模型竖直方向中面,监测点取截面竖直中心线。仿真结果中发现物料浸润后密度为 700 和 $1\,100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时分别明显出现了浮料和沉料的现象。

1) 浮料

图 6~7 所示为原模型低密度($700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)截面体积分云图和中心线体积分数点图,点图为截面图的竖直中心线体积分数分布。

由图 6 可以看出,流体顶部聚集大量物料,由图 7 可以看出流体底部处物料体积分数在 10% 以下,而流体顶部物料体积分数在峰值 50% 以上,浮料情况明显。

故该部分物料无法获得轴向运动的速度,同时,由于流体运动速度较低,且多数情况下处于集聚的状态,故亦无法被流体带动。由此,必须通过附加结构对物料直接作用才能解决浮料和沉料的问题。

现有螺杆推进装置如图 3 所示,本文在其基础上提出了一种扰流板结构如图 4 所示,安装扰流板后的螺杆结构如图 5 所示,该结构具有简单、稳定、可调节性佳、成本低等特点。

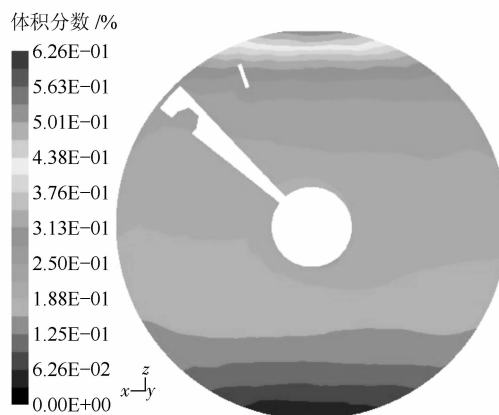


图6 原模型低密度截面体积分云图

Figure 6 Contour of volume fraction of original model of low density

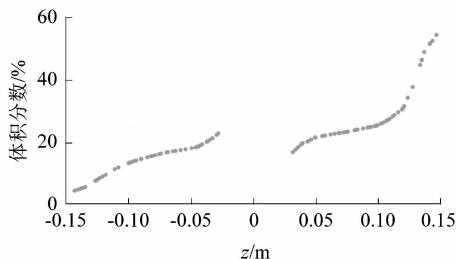


图7 原模型低密度中心线体积分数点图

Figure 7 Scatter diagram of Volume fraction of original model of low density

2) 沉料

图 8~9 所示为原模型高密度($1\,100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)截面体积分云图和中心线体积分数点图。

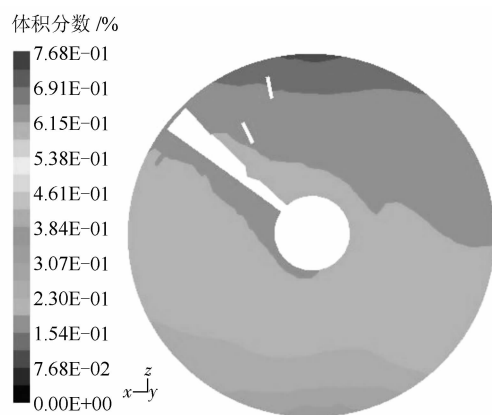


图8 原模型高密度截面体积分数云图

Figure 8 Contour of volume fraction of original model of high density

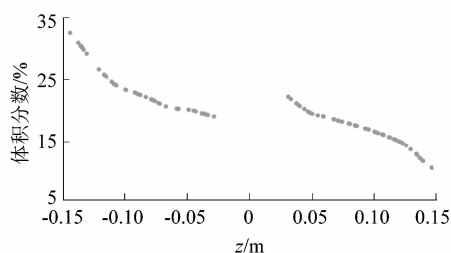


图9 原模型高密度中心线体积分数点图

Figure 9 Scatter diagram of volume fraction of original model of high density

由图8中可以看出,底部物料聚集一层,由图9可以看出流体底部处物料体积分数峰值在30%以上,沉料聚集难以被推动。

3.3 优化模型仿真结果

图10~11所示为优化模型低密度($700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)截面体积分数云图和中心线体积分数点图。

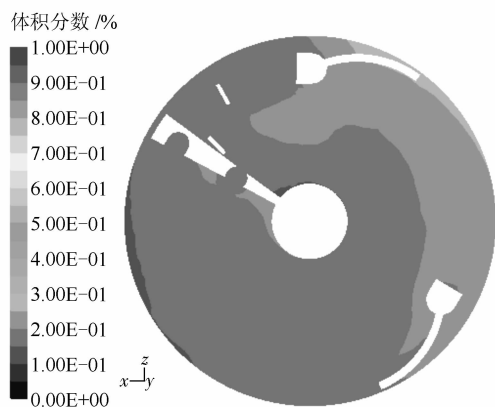


图10 优化模型低密度截面体积分数云图

Figure 10 Contour of volume fraction of refined model of low density

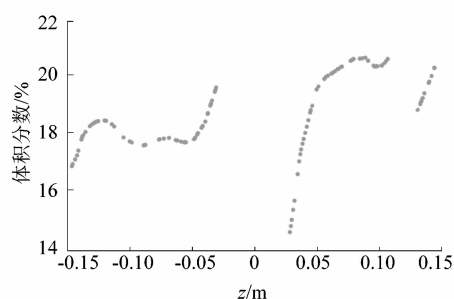


图11 优化模型低密度中心线体积分数点图

Figure 11 Scatter diagram of volume fraction of refined model of low density

将图10~11与图6~7进行对比可以看出优化模型中导流板对浮料的挤压作用很明显,使得物料总体分布更为均匀。

图12~13所示为优化模型高密度($1100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)截面体积分数云图和中心线体积分数点图。

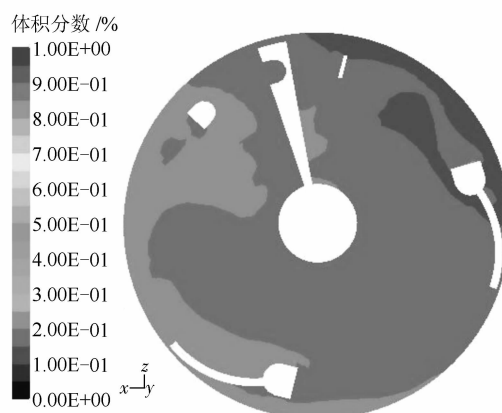


图12 优化模型高密度截面体积分数云图

Figure 12 Contour of volume fraction of refined model of high density

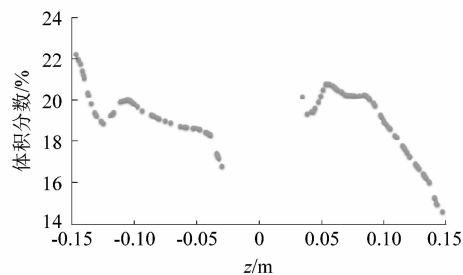


图13 优化模型高密度中心线体积分数点图

Figure 13 Scatter diagram of Volume fraction of refined model of high density

将图12~13与图8~9进行对比,可以看出优化后模型对流体区域整体的压缩效果比较明显,使得物料分布更为均匀。

4 结语

1) 研究验证了使用 FLUENT 软件对连续逆流过程进行仿真的可行性。

2) 带有扰流板的优化模型可以显著改善浮料以及沉料的问题。

3) 本文着重对连续逆流设备本身进行研究,对连续逆流工艺后续设备内容进行了有效的补充。

4) 本文对颗粒直径研究并不深入,故不同颗粒直径对提取结果的影响仍需后续进一步研究。

参考文献:

- [1] 孙达峰,史劲松,张卫明,等.白芨多糖的连续逆流提取的工艺研究[J].中国野生植物资源,2006,25(5):34-35.
- [2] 王松,周荣琪,丁立.连续逆流法提取大豆异黄酮的研究[J].食品科技,2005,30(8):19-23.
- [3] 王英,崔政伟.连续动态逆流提取的现状和发展[J].包装与食品机械,2009,27(1):49-53.
- [4] POIROT R, PRAT L, GOURDON C, et al. Fast batch to continuous solid-liquid extraction from plants in continuous industrial extractor [J]. Chemical engineering & technology, 2007, 30(1):46-51.

- [5] 王生瑶.连续逆流提取工艺的设备及其应用[J].应用能源技术,2007(2):18-20.
- [6] NIEH C D, SNYDER H E. Solvent extraction of oil from soybean flour I—extraction rate, a countercurrent extraction system, and oil quality [J]. Journal of the american oil chemists society, 1991, 68(4):246-249.
- [7] XIE Lianwu. Continuous countercurrent extraction of pectin from citrus peels [J]. Science & technology of food industry, 2005, 26(7):140-142.
- [8] SEÑORÁNS F J, RUIZ-RODRÍGUEZ A, IBÁÑEZ E, et al. Optimization of countercurrent supercritical fluid extraction conditions for spirits fractionation [J]. Journal of supercritical fluids, 2001, 21(1):41-49.
- [9] 陈广富,徐余伟.饲料螺旋输送机设计参数的选择和确定[J].饲料工业,2008,29(15):1-5.
- [10] 肖根福,刘国平,王俊亭,等.动网格在涡旋压缩机三维流场数值模拟中的应用[J].流体机械,2014,42(1):25-29.
- [11] 金晓宏,杨科,沈洋.基于动网格技术的理想液压缸运动数值计算[J].机电工程,2013,30(12):1445-1449.

(上接第 68 页)

- [8] 单岩,吴立军,徐勤雁,等. Moldflow 模具分析技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2012:53-80.
- [9] 党玉春,刘泓滨,翟秀云,等.基于 Taguchi 试验设计的储箱箱盖注射工艺参数研究[J].新技术新工艺,2013(9):103-106.
- [10] 白新桂.数据分析与试验优化设计[M].北京:清华大学出版社,1986:20-40.
- [11] 孙军.基于 Moldflow 与正交试验的尾罩注塑工艺与模具设计[J].塑料工业,2012,40(4):67-70.
- [12] GUAN Zhijie, LU Jun. Optimization design of technological parameters for surface quality of injection molding product based on

MoldFlow and orthogonal experiment [J]. Engineering plastics application, 2010, 38(8):36-38.

- [13] ZENG Yasen, HE Hezhi. Optimal combination of injection molded process parameter based on warp [J]. Polymer materials science & engineering, 2009, 25(6):163-166.
- [14] ZHU Chungong, SHAO Songtao, ZHU Hongyan. Application of numerical simulation in injection molding [J]. Engineering plastics application, 2008, 36(2):38-40.
- [15] 巫少龙,楼白杨.微齿轮注射成型数值模拟及正交优化[J].工程塑料应用,2011,39(2):43-46.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

合肥神马科技股份有限公司同心式绞线机研制成功

合肥神马科技股份有限公司研制的首台 JGT 同心式绞线机通过浙江晨光电缆有限公司验收。该同心式绞线机的研制成功,填补了国内的技术空白。

同心式绞线机是一种新型、高效的绞线机,主要用于生产铜、铝线芯的绞制和拉拔紧压绞合,也可以用于钢丝绳的绞合。由于同心绞的转动体惯量小,其生产效率是框绞机的 2~3 倍。该绞线机采用了筒式放线、复绕上线,大大降低了拉丝工和绞线工的劳动强度,能够减少用工人数,大幅提高生产效率,市场前景十分看好。

据悉,同心式绞线机的研制技术一直被国外企业所垄断。为了打破国外垄断,合肥神马组织力量从 2012 年底开始了同心绞的研制工作。整个研制过程从设计到生产再到调试,全体员工辛勤工作,忘我奉献,终于实现了持续高速稳定的绞合生产。

目前,浙江晨光电缆有限公司用这该同心绞生产 70 m² 的拉拔紧压铝芯导体,线速度已经达到了 55 m·min⁻¹。如果综合考虑复绕(上下线盘)的时间,生产效率达到了框绞机的 2.4 倍以上。

同心式绞线机的顺利投入使用,使合肥神马在线缆装备系列又增加了一大类,提升了市场竞争力。

(卢裕敏)