

基于 CFD 的回旋沉淀槽回旋沉降 过程数值模拟

Study on numerical simulation of whirling sedimentation process based on
CFD technology in whirlpool separator

陈玉胜¹ 王 越¹ 董文勇² 安家彦¹

CHEN Yu-sheng¹ WANG Yue¹ DONG Wen-yong² AN Jia-yan¹

(1. 大连工业大学生物工程学院, 辽宁 大连 116034; 2. 大连市第二十一中学, 辽宁 大连 116021)

(1. School of Biological Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China;

2. Dalian No.21 Middle School, Dalian, Liaoning 116021, China)

摘要:回旋沉淀槽是一个典型的固液分离设备,是啤酒酿造过程中必不可少的设备之一。研究考查了 0~25° 进冲角对回旋沉淀槽分离效果的影响,采用 CFD 技术对回旋过程进行模拟研究,寻找出了回旋沉降过程中的规律性。结果表明:在其他进料条件相同的情况下,随着进料管的进冲角的增大,回旋沉降效果先升高后降低,研究结果可为回旋沉淀槽的设计及优化提供参考依据。

关键词:回旋沉淀槽;进冲角;CFD 技术;回旋沉降过程;数值模拟

Abstract: The whirlpool separator, which is a typical solid-liquid separation equipment, is one of the requested equipment in beer brewing. This study conducted by Computational Fluid Dynamics (CFD) technology examined the feed tube angles of 0~25° on the separation effect of whirlpool settling vat in order to find swing settlement regularity in the process. Results showed that, under the same feeding condition, the sedimentation effect could be improved by increasing incident angle within a certain degree. Nevertheless, increasing the incident angle to further degree would reduce the settlement effect. The result provides reference for structure design and optimization of whirlpool separator.

Keywords: whirlpool separator; angle of attack into the tank; CFD technology; whirling sedimentation process; numerical simulation

在啤酒酿造过程中,通过回旋沉淀槽的回旋作用,麦汁中的热凝固物聚集在槽底中央,形成中间厚四周薄的锥形,

这种因回旋作用聚集在槽底中央而非边缘的现象,Einstein A. [1]称之为“the cup of Tea leaf effect”。回旋槽的主体是一个圆柱状的内部光滑的槽体,包含进料管、出气口、排料管等部件。回旋沉淀槽最初设计功能是用来分离水中具有广泛密度分布的异物,通过回旋作用使密度比水大的固形物质沉降到回旋槽的底部中央,密度比水轻的物质浮在水面的中央。由于啤酒生产中使用的煮沸麦芽汁中含有热凝蛋白、酒花等物质,所以可以利用回旋沉淀槽对其进行分离^[2-3]。

对于回旋沉淀槽内液体的流动状态,可以利用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)方法进行模拟。周怒潮等^[4]运用 CFD 软件对大型搅拌釜结构进行有限元静力分析和模态分析,得出搅拌釜结构应力分布情况及前 5 阶固有频率;董金善等^[5]运用有限元分析的方法对螺旋板换热器密封端盖结构进行研究,找出了密封效果更好的螺旋板换热器密封端盖结构。M. Jakubowski 等^[6-7]运用 CFD 方法建立回旋沉淀槽的二维模型,模拟研究回旋沉淀槽中的流动形式,发现料液除了做圆周运动之外,其内部还存在二次流现象,通过对不同高径比的回旋沉淀槽进行考查,结果表明,回旋沉淀槽中均含有二次流现象,与试验中得到的流型相符,验证了模拟技术的可靠性。在此基础上,M. Jakubowski 等^[8]又对回旋沉淀槽的回旋过程进行了三维模拟,考查回旋沉淀槽内部的流动状态,通过与运用粒子图像测速技术(particle image velocimetry,PIV)进行的试验结果进行对比,发现两种方法得出的回旋槽内的流型一致,进一步验证了 CFD 软件在回旋槽模拟中的正确性。

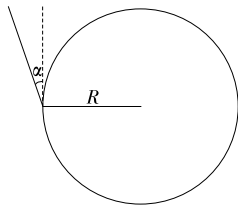
除了槽体的高径比、进料速度、进料管的位置等因素对回旋沉淀效果有影响外,进冲角对回旋沉淀效果也有影响。进冲角是指进料方向与回旋沉淀槽的切线所成的夹角 α ,见图 1。进冲角过大时,进料管中麦汁的径向速度较大,冲击已

作者简介:陈玉胜,男,大连工业大学在读硕士研究生。

通讯作者:安家彦(1958—),男,大连工业大学教授。

E-mail: dlajy@126.com

收稿日期:2016-02-03



α , 进冲角 R , 回旋沉淀槽半径
图 1 回旋沉淀槽进冲角示意图

Figure 1 Schematic diagram of the incident angle in a whirlpool

经回旋的麦汁,可能会造成麦汁中粒子的沉降效果变差;进冲角为 0° 时,进料管中的麦汁会对罐壁产生较大的冲击力,同时也会增大麦汁与回旋沉淀槽壁的摩擦力,使得麦汁进入回旋沉淀槽的速度有所降低,进而可能影响麦汁中粒子的沉降。针对以上问题,本研究拟运用 CFD 技术对不同进冲角回旋沉淀槽的回旋效果进行模拟,研究进冲角的改变对粒子沉降产生的影响。

1 试验方法及模型

1.1 试验模型

以体积为 100 m^3 的回旋沉淀槽作为研究对象,槽体直径 $5\,040\text{ mm}$,高 $5\,040\text{ mm}$;进料管直径 100 mm ,进料管长度 800 mm ,进料管高度位于距槽底 $1\,680\text{ mm}$ 处。几何图形如图 2(a)所示,回旋沉淀槽的进冲角分别设置为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ 。运用 GAMBIT 软件建模,网格划分采用 T-Grid 类型的四面体结构化网格,总体网格数为 $161\,784$ 个,网格有效率达到 97% ,回旋沉淀槽网格见图 2(b)^[9-10]。动量差分格式选择为一阶迎风格式来控制方程的离散;SIMPLE 压力—速度修正算法求解;多相流模型采用 Mixture 模型;粘性模型选择 RNG 型的 $k-\epsilon$ 模型;采用非稳态计算方法进行计算^[11-12]。进料完成后,以自然形式流动 70 min 。采用 Ansys Fluent14.0 软件对此过程进行模拟。

1.2 边界条件

1.2.1 连续相边界条件 进口设置为速度进口,速度为 8 m/s ;出口设置为压力出口;壁面默认粗糙度为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。麦汁作为回旋沉淀槽中的连续相,高浓度麦汁的密度为 $1\,064\text{ kg/m}^3$,粘度为 $0.003\,8\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

1.2.2 离散相边界条件 分散相(即粒子)选择离散相模型,

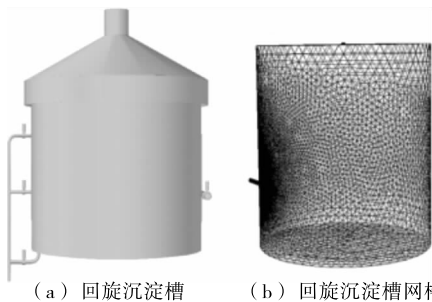


图 2 回旋沉淀槽及回旋沉淀槽网格模型
Figure 2 The whirlpool geometry and geometrical model with the finite elements grid

颗粒入口处的射流源设置为面射流源;壁面设置为壁面反射;颗粒粒径最小为 0.5 mm ;最大为 3 mm ;密度为 $1\,070\text{ kg/m}^3$ 。

2 结果与分析

2.1 进冲角对槽内麦汁速度分布的影响

为了考查回旋沉淀槽的进冲角对槽内麦汁的速度分布的影响,按照方法 2.1 中的模型进行计算,得到进料结束时不同进冲角的麦汁速度分布云图。图 3 为高度 $1\,680\text{ mm}$ 处液体的速度分布云图。

由图 3 可知,在料液入口附近,随着进冲角的增大,料液沿径向的速度增加,冲击槽中做圆周运动的料液,产生扰动。图中颜色的深浅代表不同的速度值(单位: m/s),图 3(a)、(b)中在进料口处速度的大小便产生了比较明显的波动;图 3(c)、(f)在进料口下部成 90° 角附近有较大的扰动;图 3(d)、(e)、(f)的进冲角比较大,使得从进料管内流出的料液由偏向轴心转向边缘流动,这是由于槽内流动液体的惯性流动将它们带着做近似的圆周运动。

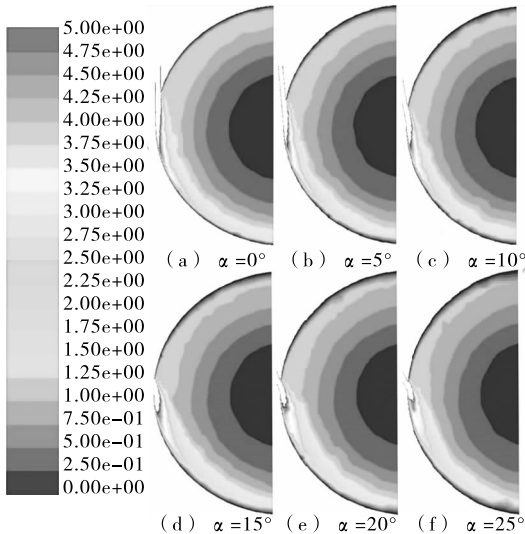


图 3 距槽底 $1\,680\text{ mm}$ 高度处不同进冲角的麦汁速度分布云图

Figure 3 The contours of wort velocity of different incident angles at the height of $1\,680\text{ mm}$

为了考查不同的进冲角对回旋沉淀槽中液体的流动形式,试验中以 $0\sim 25^\circ$ 进冲角的回旋沉淀槽为例,选取距回旋沉淀槽底部 $1\,680\text{ mm}$ 高度处的横截面以及过进料口与回旋槽轴的纵截面为例,其在进料结束时的速度矢量图见图 4 和图 5。

由图 4 可知,随着进料管进冲角的增加,回旋沉淀槽中麦汁的入射方向发生变化,都能形成圆周运动,进冲角为 0° 时,由于料液紧贴着回旋沉淀槽内壁,会使进料的速度有所降低。进冲角为 5° 时,料液的回旋比较均匀,当进冲角达到 10° 以上时,由于进料方向与料液在回旋槽中运动方向之间的夹角逐渐增大,致使料液的回旋速度降低,也会影响回旋沉淀槽的回旋效果。由图 5 可知,在进冲角为 0° 时,回旋槽

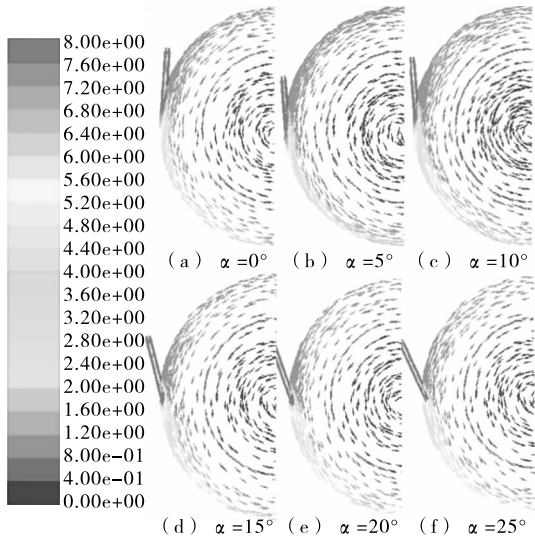


图 4 静置开始时各进冲角回旋沉淀槽内麦汁的横截面速度矢量图

Figure 4 The wort's velocity vector diagram of cross section when the wort standing 0 min with different incident angles

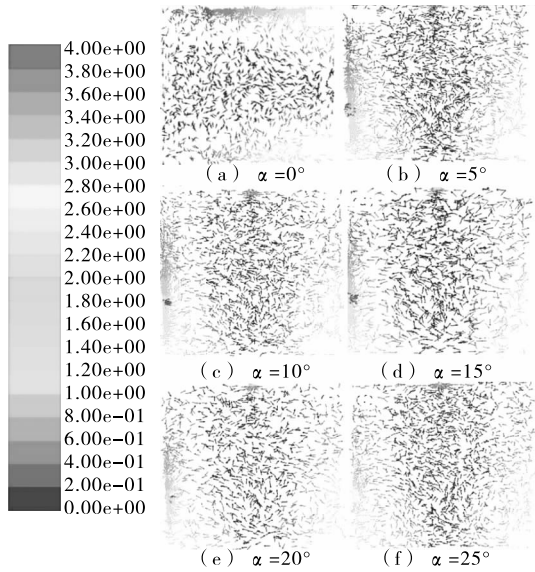


图 5 静置开始时各进冲角回旋沉淀槽内麦汁的纵截面速度矢量图

Figure 5 The wort's velocity vector diagram of longitudinal section when the wort standing 0 min with different incident angles

底部未形成较大的主漩涡,进冲角为 $5^\circ, 10^\circ$ 的模型中能形成较好的大漩涡。当进冲角大于 10° 时,有料液的回旋速度受进料角度的影响,速度值较小。

随着自然回旋的进行,麦汁的回旋速度逐渐下降,为了考查料液回旋过程中速度的变化情况,试验中选取了与进料口成 180° ,距回旋沉淀槽内壁 50 mm ,距回旋沉淀槽底分别为 $0, 3\,000\text{ mm}$ 高度的两个点,记录速度大小随时间的变化,见图 6。

由图 6 可知,进料结束时,不同进冲角条件下,回旋沉淀槽底部的回旋速度都比距槽底 $3\,000\text{ mm}$ 处的速度高,这是由于进料时不仅有料液的水平冲击力,还有料液重力的作用以及回旋槽底部对于麦汁的阻力作用,使得回旋沉淀槽下部麦汁的回旋速度要比上部麦汁的回旋速度大。随着回旋的进行,高 $3\,000\text{ mm}$ 处麦汁的速度逐渐与底部的速度一致,在这个过程中,麦汁的速度大小有波动,产生这种现象的原因是料液不仅做回旋运动,槽内还存在涡流、二次流等流型。对比不同角度在距槽底 0 mm 和 $3\,000\text{ mm}$ 处的速度值,从图 6(a)中可以看出,在槽底,进料结束时,进冲角为 0° 的回旋沉淀槽中麦汁的回旋速度最小,进冲角为 5° 的回旋沉淀槽中麦汁的速度最大,其他进冲角的回旋沉淀槽中麦汁的速度介于二者之间。从图 6(b)中可以看出,进冲角为 5° 的槽中麦汁的速度最大,其他进冲角的回旋沉淀槽中麦汁速度大小相近,说明适当增加进料管的进冲角可以提高回旋槽上部液体的速度。

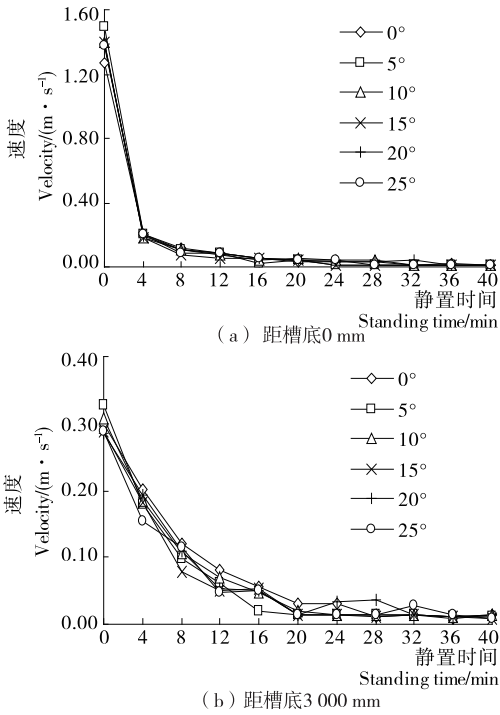


图 6 各进冲角在距槽底不同高度的速度值

Figure 6 Velocity of different incident angles in different height from the bottom of the tank

2.2 离散相颗粒分布

离散相向回旋槽中央的集中程度是评价回旋沉淀槽好坏的一个指标,在模型中选择底面半径为 800 mm ,高 $5\,020\text{ mm}$ 的圆柱体作为考查对象,得出不同进冲角的粒子在此区域所占总粒子的质量百分数。结果见图 7。

由图 7 可知,在回旋过程中,不同进冲角在该区域粒子所占的比都在增加,随着进冲角的增大,粒子在该区域的含量随之增加,当进冲角超过一定值时,粒子的含量又逐渐减小,不利于粒子向中央聚集。在沉降过程中,由于麦汁一直

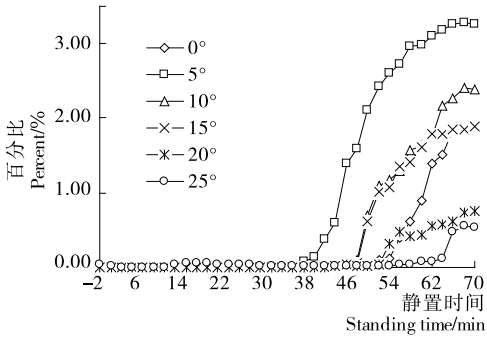


图7 0~800 mm 区域粒子质量所占百分比
Figure 7 The percentage of the particles mass in the area of 0~800 mm

处于回旋的过程,粒子随着麦汁运动并向回旋沉淀槽的中央聚集。通过以上分析可以得出,在一定范围内增大回旋沉淀槽的进冲角可以促进粒子向槽底中央聚集,当进冲角超过一定范围之后,不利于粒子的沉降聚集。

3 结论

经过试验可以得出,在以 5°为梯度的回旋沉淀槽的进冲角模型中,热凝固物回旋沉降的效果比较好;相比进冲角为 0°的模型,粒子集中程度提高了 75%,进冲角为 10°时,相比进冲角为 0°的仅有 25%的提高。进冲角稍小时,由于麦汁冲击回旋槽的内壁造成速度的损失,回旋效果不是很理想。进冲角为 10°~25°的回旋沉淀槽模型中,在进料阶段,由于进冲角的进一步增大,使得进料管中的麦汁冲击回旋沉淀槽中已经旋转的麦汁,在一定程度上会影响麦汁的回旋速度,进而使最终热凝物的沉降效果变差。

因此,在一定范围内增加回旋沉淀槽的进冲角可以对回旋沉淀槽的分离效果起到促进作用,提高回旋沉淀槽的回旋效果,超过一定的进冲角后,回旋沉淀槽的分离效果会变差,不利于回旋沉淀槽中颗粒的分离。

参考文献

[1] EINSTEIN A. The cause of the formation of meanders in the courses of rivers and of the so-called Baer's law[J]. Naturwissenschaften, 1926, 14(2): 223-224.

[2] ROBERT L Rod. Whirlpool separator device; United States, 3797667[P]. 1972-02-10.

[3] DENK V, DÜRHOLT A. Experimental investigations of the unsteady rotating flow field in a cylindrical vessel[J]. Experimental Fluids, 1991, 12(1/2): 97-105.

[4] 周怒潮,贺小华,李映峰. 搅拌釜凸缘结构的模态分析及改进设计[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 133-136.

[5] 董金善,潘冰冰,周鹏飞,等. 螺旋板换热器密封端盖结构研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 180-182.

[6] JAKUBOWSKI M, DIAKUN J. Simulation investigations of the effects of whirlpool dimensional ratios on the state of secondary whirls[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83: 106-110.

[7] JAKUBOWSKI M, STERCZYSHA M, MATYSKO R, et al. Simulation and experimental research on the flow inside a whirlpool separator[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 133: 9-15.

[8] JAKUBOWSKI M, WYCZALKOWSKI W, POREDA A. Flow in a symmetrically filled whirlpool: CFD modelling and experimental study based on Particle Image Velocimetry (PIV)[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 145: 64-72.

[9] TUROCY T L. Gambit: software tools for game theory[M]. [S. l.]: Version, 2006: 46-132.

[10] 于勇. Fluent 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 115-126.

[11] BERNARDO S, MORI M, PERES A P, et al. 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles[J]. Powder Technology, 2006, 162: 190-200.

[12] ZHANG Wei, ZOU Zhi-hong, SUI Jun. Numerical simulation of a horizontal sedimentation tank considering sludge recirculation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(10): 1 534-1 538.

信息窗

华东理工大学发现海温调控病原菌毒力信号转导机制

中国科学报讯(记者黄辛)华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室在最新研究中,发现了温度调控毒力表达信号转导机制。该研究为探讨温度影响病原菌的致病能力以及制定相应防治策略奠定了理论基础。相关研究成果已在线发表于《公共科学图书馆-病原学》。

全球气候变暖、夏季高温和反常气候现象(如厄尔尼诺现象)等导致海水表面温度升高,引起海洋生物大规模死亡,为海洋生态系统、海水养殖业和人类健康带来极大危害和损失。

研究发现,溶藻弧菌非常“聪明”地利用环境温度升高信号,激活可替换 sigma 因子 RpoE 蛋白相关信号转导通路,并以不依赖细菌细胞密度的机制直接结合到群体感应中枢调控元件 LuxR 的启动子上介导温度调控其毒力产生。研究人员进一步发现,RpoE 蛋白在不同温度条件下,通过与不同启动子的亲和力差异实现调控毒力并响应温度应激。

据悉,该文第一作者为华东理工大学博士研究生顾丹,青年教授王启要为论文的通讯作者。

(来源:www.foodmate.net)