

折流式旋转床

——超重力场中的湿壁群

计建炳, 俞云良, 徐之超

(浙江工业大学化学工程与材料学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:研制了一种转子由动、静折流圈构成的折流式超重力场旋转床,气、液两相在动静折流圈的缝隙之间逆向运动时接触传质。与常用填料式旋转床相比,折流式旋转床有 2 个优点:①可以方便地实现连续精馏操作中的中间进料;②多个转子可方便地安装在同一个转轴上,而在转子之间不必有动密封,大大提高了单台设备的分离能力。对分离工业生产的乙醇-水和甲醇-水的连续精馏试验表明,其分离能力按转子的有效径向距离计算每米理论塔板数可达 20 块。

关键词:折流式旋转床;精馏设备;旋风分离器;超重力

中图分类号:TQ051.1

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2005)05-0052-03

Wetted wall cluster in high gravity field: Zigzag rotating bed

Ji Jian-bing, Yu Yun-liang, Xu Zhi-chao

(College of Chemical Engineering and Materials Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Zigzag rotating bed(ZRB) in high gravity field is developed, which is composed of immobile up-disc, rotational down-disc and circular baffle-boards fitted vertically between the up-disc and down-disc in a staggered form at a certain radial distance. In the rotor, gas and liquid flow countercurrently in the gap between the up-disc and down-disc and contact violently. Compared with the packed rotating bed(PRB), ZRB has two advantages: ① the middle-feed in continuous distillation can be easily realized; ② multi-rotors can be easily installed in rotating axes without moving seal between rotors, hence the separation capability of a single ZRB is increased greatly. Distillation tests in continuous distillation process in industry for separating ethanol-water and methanol-water system indicate that ZRB has 20 of theoretical plates per meter in the radial direction of the rotors.

Key words: zigzag rotating bed; rectification unit; cyclone separator; high-gravity

自 20 世纪 80 年代初第一台超重力场旋转床(简称 Hige 或 RPB)问世以来^[1],许多国家的研究者对其进行了研究。超重力技术的应用研究涉及面较广,如用于吸收、解吸、精馏、生化反应、纳米材料制备、除尘除雾等^[2-5],目前已在一些领域中从研究阶段成功地转化为产业应用^[5]。研究结果^[6-7]表明,旋转填料床的传质效率远远高于传统的填料塔,但试验用的转子径向填料厚度仅为 0.106 m 和 0.043 m,填料的端效应会对试验结果有较大的影响,难以在工业上实际应用。如放大转子直径,能否继续保持很高的传质效率,须作进一步研究。

旋转填料床用于精馏过程存在以下缺点:①为了保证气体能流经转子,在转子与气相出口管之间须有动密封(称为上动密封),另外要有转轴与壳体之间的动密封(称为下动密封),因此一台设备须有上、下 2 个动密封。由于上动密封的存在,使得在一台旋转床内安装多个转子变得十分困难,此外,上动

密封容易受到介质腐蚀。②由于转子的上下端板与转子一起转动,使得难以从转子中间进料,如果要实现连续精馏的中间进料,须将 2 台旋转床串联,这使得流程复杂,设备投资增大。③一台旋转填料床只有一个转子,尽管在转子内气-液具有极高传质速率,但由于气-液在转子内接触时间极短,使设备的分离能力受到限制,一台旋转填料床一般只有 4~5 块理论塔板的分离能力^[1],分离能力有限。

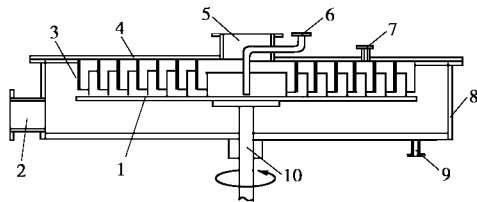
针对上述问题,笔者所在课题组提出了一种动、静折流板镶嵌的折流式超重力场旋转床^[8]。经试验,该折流式旋转床不仅传质效率大大提高,而且克服了以上缺点,并已成功地应用于工业生产中。

1 折流式超重力场旋转床的结构和原理

1.1 结构

折流式超重力场旋转床的结构示意于图 1,其核心部件为动静结合的转子。将若干同心圈固定在

转盘之上构成动折流圈群,由转轴带动其旋转;与动折流圈相对且与其嵌套安装的为静折流圈群,直接焊接在固定的静盘上。其结构有以下特点:①转子的上端板静止、下端板旋转,因而可省掉上动密封;②进料口可以方便地设置在上端板的任意位置;③不需要中心进料的液体分布器。



1—转动盘;2—气体入口管;3—折流板;4—静止盘;5—气体出口管;6,7—液体进料管;8—壳体;9—液体出口管;10—转轴

图1 折流式超重力场旋转床结构示意图

1.2 工作原理

气体由进气口2进入壳体,再沿着静折流圈与动折流圈之间的间隙曲折地由外向中心流动,最后经出气口5离开床体;液相介质由进液口6进入,被引流至动盘中心,随后被一系列高速旋转的动折流圈反复甩向静折流圈,最后在壳体内收集后由出液口9引出,液相在其间经历了多次分散-聚集过程。在此过程中,液体以极细微的液滴甩离动圈,高速运动的液滴在静圈上被碰撞、剪切和飞溅,形成了比表面积大而又不断更新的气-液界面。在旋转气体离心力的作用下,液滴被抛向静圈,汇集后进入下一个循环。在本装置中,气、液两相在转子内总体上呈逆向流动,而在动静折流圈的缝隙之间气-液接触过程又可分解成2步:第一步为液相甩离动圈时,与气体错流接触;第二步为液相在静折流圈壁上的下落过程,环隙中的气体旋转向上运动,静折流圈壁上的液体在气体的带动和重力的作用下旋转向下运动,为逆流接触。在第二步中,沿壁面旋转运动的液体和被不断甩出来的液体碰撞挤压,使得表面更新极快,具有极高的传质速率,类似于经过一系列液体表面更新极快的湿壁塔。因此,这种结构的旋转床可认为是超重力场中的湿壁群,气、液经过一层环隙犹如通过一个湿壁塔。由于离心力远大于重力,故超重力场中的湿壁群中气-液接触的激烈程度远大于重力场中的湿壁塔,可使气-液传质速率得到极大的提高。

2 多层折流式超重力场旋转床结构

与填充式旋转床另一个显著不同之处是本装置

可以在一个壳体内实现多层结构,将理论塔板数成倍地提高。在填充式或碟片式旋转床中,若用同一根轴带动2个以上的转子,则无法使气、液两相实现逆向串联,因为液相被离心力甩至转子外端后无法再进入到同一轴上另一转子的中央,若要实现串联则必须使用多台旋转床来完成。而折流式超重力场旋转床可非常简单地将在同一转轴上串联,实现气-液两相串联。图2为两层折流式超重力场旋转床的结构。由图2可见,气相进入下层壳体后,沿动静折流圈间的缝隙由外向中心流动,流出静盘的中心孔后升至上一层的壳体中,又沿着上一层的动静折流圈间的缝隙由外向内直至离开旋转床;液相从上层的进液口进入后被甩至上层的壳体,聚集后又由液体导流管引至下一层的动盘中心,最后被下层的动折流圈甩离。很显然,在这个过程中气、液在旋转床内是呈逆向流动的。图2中3个液体进料管均可作为中间进料口。

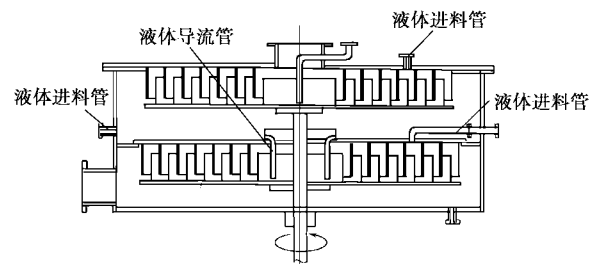
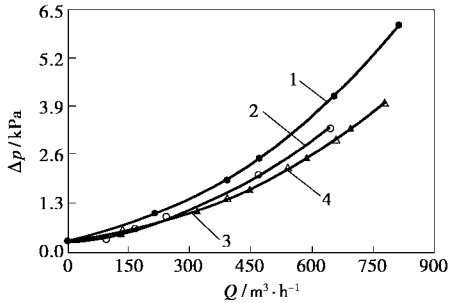


图2 两层折流式超重力场旋转床结构

3 流体力学性能和传质性能

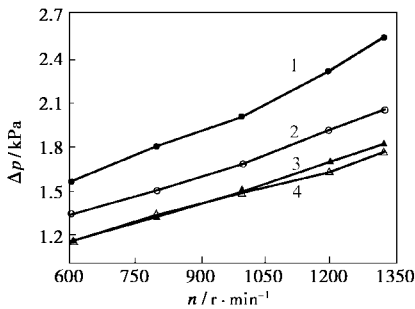
在流体力学性能试验中以空气-水为物系,旋转床的转子直径为600 mm、厚度为80 mm,壳体直径和高度均为800 mm。气体流量对气相压降的影响如图3所示。由图3可知,在一定的转速下(1 000 r/min),气体压降(Δp)随气体流量(Q)的增大而增加。气体压降随液体流量的变化比较复杂,在液体流量小于 $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气体压降随液体流量的增大而下降;而当液体流量大于 $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 并小于 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气体压降基本不随液体流量而变。原因可能是:在较小的液体流量下,液体所占据的流通面积较小,气体在转子内的实际流速变化不大,相应地气体的流动阻力变化不大;而在液体被向外甩离的过程中,液滴后方形成的真空促使周围的气体快速填充此空间,有利于气体从外向内流动,使得气体流动压降减小。在液体流量较大时,液体占据了较大的流动面积,使气体实际流速增大,流动阻力增加,与液滴运动形成的真空相抵,使气相压降在一定的液

体流量范围内不随液体流量变化。除气、液流量 (Q, L) 外, 转速也对压降具有一定的影响(如图 4 所示, $Q = 400 \text{ m}^3/\text{h}$)。气相压降基本上随转子的转速 (n) 呈线性增加。



1— $0 \text{ m}^3/\text{h}$; 2— $0.40 \text{ m}^3/\text{h}$; 3— $0.80 \text{ m}^3/\text{h}$; 4— $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$

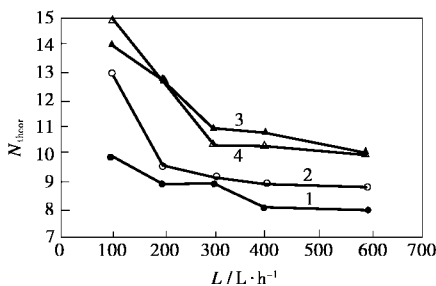
图 3 气体流量对折流式旋转床气相压降的影响



1— $0 \text{ m}^3/\text{h}$; 2— $0.40 \text{ m}^3/\text{h}$; 3— $0.80 \text{ m}^3/\text{h}$; 4— $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$

图 4 转子转速对折流式旋转床气相压降的影响

以乙醇-水为介质, 在转子直径为 630 mm , 厚度为 80 mm , 筒体直径为 800 mm , 高度为 550 mm , 具有两层转子的装置中进行了精馏试验。结果如图 5 所示。



1— $600 \text{ r}/\text{min}$; 2— $800 \text{ r}/\text{min}$; 3— $1000 \text{ r}/\text{min}$; 4— $1100 \text{ r}/\text{min}$

图 5 全回流下回流液量对传质效率的影响

由图 5 可知, 在较小的气、液通量下, 理论塔板数 (N_{theor}) 随气、液通量的增加有较明显的下降, 而后基本不随气、液通量变化。转子的旋转速度在 $1000 \text{ r}/\text{min}$ 以下, 转速对理论塔板数有较大的影响; 而转速为 $1000 \text{ r}/\text{min}$ 和 $1100 \text{ r}/\text{min}$ 的 2 条曲线已有交叉, 表明这种结构的旋转床转速达到 1000

r/min 时, 已可使气-液得到充分接触。以气、液通过的径向有效长度计算, 在转速为 $1000 \text{ r}/\text{min}$, 全回流量为 $600 \text{ L}/\text{h}$ 的条件下, 其每米理论塔板数可达 20 块。

4 工业应用

折流式超重力场旋转床已成功地应用于工业生产中乙醇和甲醇回收的精馏过程。

用于乙醇-水物系精馏的装置, 其转子直径为 630 mm , 两层转子, 外壳直径为 800 mm 、高为 550 mm 。连续精馏, 进料乙醇体积分数为 40% , 回流比 2.5。所得产品乙醇体积分数为 95% , 再沸器残液中乙醇体积分数 0.5% , 产品出料量 $4.5 \text{ t}/\text{d}$ 。

用于甲醇-水溶液精馏的装置, 其转子直径为 750 mm 、厚度为 80 mm , 三层转子, 外壳直径 830 mm 、高 800 mm 。连续精馏, 进料甲醇质量分数为 70% , 回流比为 1.5。所得产品中甲醇质量分数为 99.85% , 再沸器残液中甲醇质量分数为 0.2% , 产品出料量为 $12 \text{ t}/\text{d}$ 。

上述应用实例中, 在工艺条件相同的情况下, 折流式旋转床与填料塔高度和体积的比较如表 1 所示。

表 1 折流式超重力场旋转床与填料塔设备尺寸比较

项目	乙醇-水		甲醇-水	
	折流式旋转床	填料塔	折流式旋转床	填料塔
直径/m	0.80	0.4	0.83	0.6
总高度/m	0.55	9.0	0.80	11.0
体积/ m^3	0.276	1.13	0.433	3.11
两塔器高度比/%	6.1		7.3	
两塔器体积比/%	24.4		13.9	

由表 1 可知, 折流式超重力场旋转床用于乙醇-水、甲醇-水物系的精馏, 与填料塔相比, 设备高度可分别下降到填料塔的 6.1% 和 7.3% , 体积可分别缩小到填料塔的 24.4% 和 13.9% 。

5 结语

折流式超重力场旋转床采用了动静结合的转子结构, 省略了转子与气体出口管之间的动密封, 在同一设备中可安装多层转子, 大大提高了单台设备的分离能力; 连续精馏中的中间进料口可以方便地设置在 2 个转子之间, 也可在其中一个转子的某一位置。其分离能力以转子的有效径向距离计算每米理论塔板数可达到 20 块。工业应用表明, 采用折流式

(下转第 58 页)

待处理液在储料罐中与催化剂混合后进入光反应器反应,洁净水从过滤系统侧面流出,浓缩水带着催化剂循环回储料罐再利用。

以江苏某污水处理厂的二级印染废水为处理对象,在处理量为 50 L/h 时,出水化学需氧量(COD_{Cr})能降到 50 mg/L 以下。出水经江苏省环境监测中心检测,各项指标均优于国家一级排放标准(GB 8978—1996)。具体指标见表 4。

表 4 印染废水处理结果与污水治理指标的对比

指标	污水厂二级 光催化处理		国家一级 排放标准
	出水指标	后出水指标	
COD _{Cr} 质量浓度/mg·L ⁻¹	150~180	45.2	< 100
色度(稀释倍数)	50~80	16	50
pH	6~9	7.8	6~9
BOD ₅ 质量浓度/mg·L ⁻¹		6.4	30
挥发酚质量浓度/mg·L ⁻¹		0.032	20
总氰化合物质量浓度/mg·L ⁻¹		0.004	0.5

4 结论

(1)在放大设计光催化反应器过程中考虑到光辐射能急剧衰减,反应液的光接触面与光源的距离应小于 10 cm。

(2)返混程度小的管式反应器在光催化水处理中远远优于返混严重的环型反应器。

(3)光催化水处理装置的放大可以通过管式反应器的串联实现。

(4)通过增加流量的方式可以克服由于反应器数量的增加而带来的返混效应。

(5)基于上述因素建立起来的由 3 组管式反应器串联而成的光催化水处理装置,通过对实际印染废水的降解,验证了放大的成功性。

参考文献

- [1] Carey J H, Lawrence J, Tosine H M. [J]. Bull of Environ Contam Toxicol, 1976, 16(6): 697 - 701.
- [2] Linsebigler A L, Lu G, Yates J T. [J]. Chem Rev, 1995, 95(3): 735 - 758.
- [3] Hoffmann F M, Dwyer D J. [J]. Acs Sym Ser, 1992, 482: 1 - 22.
- [4] Kanno S, Tamata S, Yamashita H, et al. [J]. Electr Eng Jpn, 2000, 132(1): 57 - 63.
- [5] Romero R L, Alfano O M, Cassano A E. [J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 36(8): 3094 - 3109.
- [6] 邢核, 王怡中. [J]. 环境科学, 2001, 22(4): 123 - 127.
- [7] 王红娟, 李忠. [J]. 现代化工, 2002, 22(2): 56 - 60.
- [8] Zhang Z, Anderson W A, Moo-Young M, et al. [J]. AIChE Journal, 2000, 46(7): 1461 - 1470.
- [9] 杨祝红, 暴宇钟, 刘畅, 等. [J]. 高等学校化学学报, 2002, 23(7): 1371 - 1374.
- [10] Bao N Z, Feng X, Yang Z H, et al. [J]. Sci Tech, 2004, 38(9): 2729 - 2736.
- [11] Cassano A E, Alfano O M, Martin C A, et al. [J]. Ind Eng Chem Res, 1995, 34(7): 2155 - 2201.
- [12] 陈国钧, 杨祝红, 冯新, 等. [J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(2): 202 - 207.
- [13] 陆小华, 吉晓燕, 陈栋梁, 等. [J]. 化工学报, 2002, 53(3): 241 - 245.
- [14] 张凤林, 孙学珠. 工程光学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [15] Tymoschuk A R, Alfano O M, Cassano A E. [J]. Ind Eng Chem Res, 1993, 32(7): 1328 - 1341.
- [16] 杨祝红. 二氧化钛晶须的制备及光催化处理废水研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- [17] 南京工业大学. 一种连续降解含有机污染物废水的光催化反应装置及其处理技术[P]. CN 03112729.0, 2003 - 07 - 23. ■

(上接第 54 页)

超重力场旋转床可极大地降低设备高度, 缩小设备体积, 是一种资源节约型的小型气-液传质设备, 为超重力技术在精馏过程的实际应用提供了一种新型设备。

参考文献

- [1] Imperial Chemical Industries Limited. Mass Transfer Process[P]. US 4283255, 1981 - 08 - 11.

- [2] 王玉红, 陈建峰. [J]. 中国粉体技术, 1998, 4(4): 5 - 11.
- [3] 张艳辉, 柳来栓, 刘有智. [J]. 环境工程, 2003, 21(6): 42 - 58.
- [4] 陈建峰, 宋云华. [J]. 化工进展, 2002, 21(6): 414 - 416.
- [5] 陈建峰. 超重力技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 233 - 234.
- [6] Kelleher T, Fair J R. [J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35(12): 4646 - 4655.
- [7] Lin C C, Ho T J, Liu W T. [J]. Journal of Chem Eng of Japan, 2002, 35(12): 1298 - 1304.
- [8] 浙江工业大学. 折流式超重力场旋转床装置[P]. ZL 01134321.4, 2001 - 10 - 30. ■