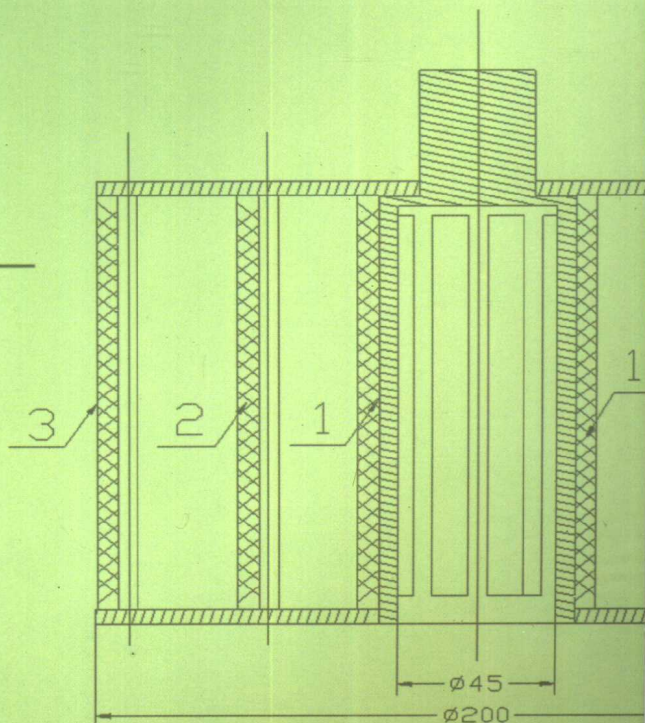
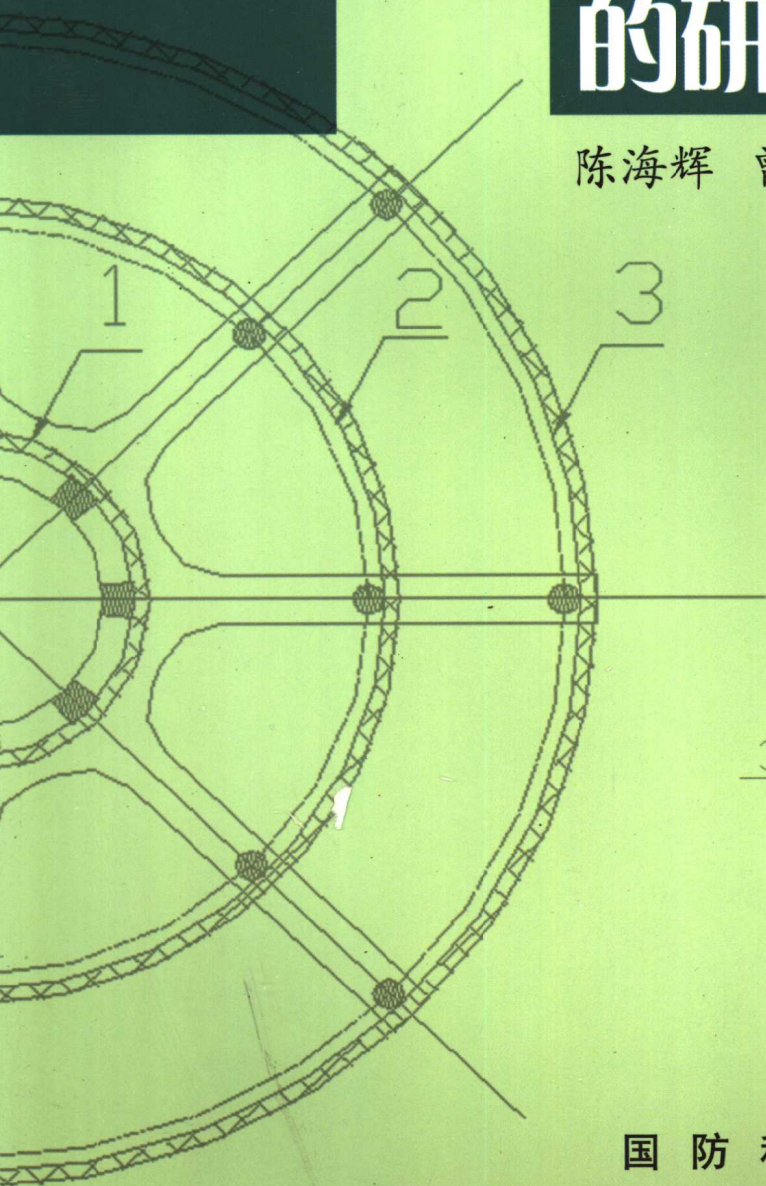


XUANZHUAN TIANLIAOCHUANG
DE YANJIUYINGYONG

旋转填料床 的研究应用

陈海辉 曾莹莹 著



国防科技大学出版社

NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统介绍了旋转填料床的结构,强化传递过程的基本原理,国内外研究现状及典型应用,建立了流体力学、传热、传质等模型。着重介绍作者近年来的研究成果、实验装置及实验数据,特别是目前研究较少的错流型旋转填料床的传质传热的研究成果。

本书可供化学工程、纳米材料、生物化工、机械、热工、传热与节能等专业的研究人员、工程师以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

旋转填料床的研究应用/陈海辉等著. —长沙:国防科技大学出版社,2002.11

ISBN 7-81024-951-7

I. 旋… II. ①陈… ②曾… III. 旋转—填料—化工设备 IV. TQ051.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 033311 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:唐卫葳 责任校对:耿筠

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:9.25 字数:219 千

2002 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-1100 册

*

定价:16.00 元

前 言

随着化学及化学工程的发展,尤其是其成果向炼油、化工、食品、轻工、制药和环保等领域的辐射和应用,开拓高效、节能、低耗的工艺过程和设备已成为重要的科研任务。人们研究发现,所有单元操作都受动量传递、质量传递、热量传递控制,即整个生产过程就是由这三传一反速率所控制,任何一个环节均可延缓整个生产过程。传统化工设备大多庞大,投资大、占地多、设备效率低、耗能高、成品低、投资回收慢,这些都迫使我们不得不仔细研究强化对策所能带来的效益。人们找到了问题的症结,于是过程强化便成为现代化工的一个发展趋势。

在化工、环保、能源、生物化工等工业过程中,气液相间传质与反应是最基本的过程之一,但以往该过程的液相流动一直是依靠重力作用实现的。由于重力场较弱,液膜流动缓慢, k_L 小,对液膜控制的传质过程的体积传质系数 $k_L a$ 低,故此类塔设备体积庞大,空间利用率和设备生产强度低。20 世纪 80 年代发明的逆流型旋转填料床,其特点是使气—液之间产生高效的逆流接触,在环形旋转器的高速转动下,产生上千倍重力加速度的离心力场,使液膜变薄,气液强烈混合,传质阻力减小。利用离心力场提高填料表面的液膜流速,可使体积传质系数提高一两个数量级,提高了设备传质速率和处理能力,使设备体积大幅度缩小,该技术称为旋转填料床技术,也称为超重力场技术。

旋转填料床技术就是采用主动积极的措施来强化传热、传质过程,它的研究成功已对传热、传质设备产生了革命性的影响。由于旋转填料床技术出现较晚,其基础理论的研究尚不完善,本书将介绍国内外在该方面的进展,并将作者近几年来在旋转填料床方面所作的研究工作及实验数据汇集成册,希望能为推进该技术的进步作出贡献。

虽然目前国内外使用的逆流型旋转填料床的体积传质系数高,但若直接用于大流量的气液传热传质,如循环水的冷却、烟道气 SO_2 的净化等,还有一定困难,其原因在于:

(1) 旋转填料床的内外环流体通道横截面积相比悬殊,气流变化过大,气体形体阻力高;

(2) 气体由旋转床的外环沿径向流向内环,需克服离心阻力。

这两个因素造成气相流阻力过大,不适于大流量的气液传热传质。一种超低气阻的旋转床气液反应器已在实验室开始研制,用于空气冷却热水效果很好。在该旋转床中气体沿轴心流动,无需克服离心阻力,气阻极低,液体沿径向流动,在多层同心环填料层的离心加速作用下可不断雾化分散,沿径向区域维持高且较均匀的扩展相界面以及液滴速度,使得气液传质区域的体积传质系数可保持较高而均匀。多级离心雾化可通过对液体沿径向作多级雾化分散,使液滴速度、粒径以及气液相传质比表面积基本保持不变,从而可获得较高的传热传质系数和良好的气液错流传热传质强化效果,既能保留气流错流传热传质装置气体阻力小的最大优点,又能大幅度提高气液传热传质效率,达到高效与节能的目的。

与现有的单级离心雾化理论不同,在多级离心雾化中为使液体沿径向分散程度均衡,

需在理论上作深入的分析研究,在级数的设置与分散的方法上都需做优化计算,这对在离心力场条件下气液两相传热传质的深化研究有重要的参考价值。该项研究成果在工业中有广泛的用途,例如热力设备和制冷与空调设备的循环冷却水的冷却,化工、轻工等行业的水冷却,电厂、化工等行业的工业废气净化等,都可使用这类节能与高效的气液传热传质装置。这种装置不仅节能、传热传质效率高,而且体积非常紧凑,重量轻,设备投资省,在工业中有极好的应用前景。该种装置用于低密度、大流量的工业废气处理是十分合适的。

对于在离心力场条件下气液两相错流的传热传质研究,由于目前的工业装置还停留在单级离心雾化的阶段,故目前国内外所发表的研究论文及设计资料都仅针对单级离心雾化,没考虑多级离心雾化的情况。为了提高气液错流传热传质装置的传递效率,采用多级离心雾化的方法强化气液相传热传质,这在理论与实验研究上尚需做大量的工作。在工业中循环水的冷却、气体的降温与除尘、可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用、溶剂回收以及空气调温等过程通常采用填料塔或板式塔作为气液两相传热传质设备。液体由塔顶在重力作用下沿填料或塔板流下,气体由塔底向上流动与液体逆流传热传质,这种传热传质过程是在重力场条件下进行的。由于重力场较弱,液膜流速太低,传热传质的效率低,故使得塔体积庞大、耗材多,设备投资高。

全书结构如下:第一章扼要介绍旋转填料床的结构、强化过程传递的原理,回顾国内外应用进展;第二章详细地介绍了旋转填料床技术的理论研究。系统总结分析现已正式发表的有关旋转床研究的文献,明确当今世界各国对旋转床研究已取得的进展与成果;第三章建立逆流型旋转填料床流体力学模型,探讨各个因素对气相压降的影响并作出定量分析,分析其液泛机理;第四章探讨有效比表面积比填料本身比表面积大两倍多,体积传质系数比传统填料塔的高一个数量级以上的原因;第五章介绍了作者在错流型旋转填料床传质方面的实验及数据分析;第六章作者在错流型旋转填料床传热方面的实验及数据分析;第七章分析填料床运行能耗情况;第八章介绍了烟气脱硫实验及分析;第九章介绍了国内研究机构利用逆流型旋转填料床制备纳米粉体的情况。

本书研究领域属化工传递过程学科领域,涉及气流两相的传热传质研究,可拓宽化工学科在离心力场条件下强化气液传热传质的研究领域,促进学科发展,也可为工业中利用离心力强化大流量气液间传热传质创造条件,促进许多工业技术的发展。

作者试图尽量阐述旋转填料床的基本理论与实验研究,但限于经验和水平,本书可能会有许多疏忽甚至错误,恳请读者指正批评,联系方式: chenhaihui@163.net。

本书取材于国内外众多学者的卓越工作,在此向他们表示衷心的感谢。本书的出版和写作得到了南华大学资助,本书作者的研究工作得到了华南理工大学博士生导师邓先和教授的指导,得到了广东省自然科学基金资助,谨在此表示感谢。

陈海辉 曾莹莹

2002.10.27

符号说明

A	气液相界表面积, m^2
B_1	边界层厚度系数, m
C_i	相界面上 CO_2 液相的浓度, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$
C_L	液相主体中的 CO_2 浓度, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$
C_D	阻力系数
C_{OH^-}	液相 OH^- 的平均浓度, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$
C_{HCL}	标准 HCL 浓度, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$
$C_{\text{CO}_2}^m$	液相中的 CO_2 平均的摩尔浓度, kmol/m^3
$C_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$	排出液中 Na_2CO_3 的浓度, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$
d_m	液平均滴直径, m
D	溶质 CO_2 在 NaOH 溶液中的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_{OH^-}	OH^- 在 NaOH 溶液中的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
E_1, E_2	Ergun 公式第一、第二系数
F	传热面积, m^2
F_{σ}	周向科氏力, N
G_d	干气流率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
h	气膜传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
h	取决于溶液中电解质正负离子及气体溶质的常数
h_+, h_-, h_G	分别为正离子、负离子及气体溶质的常数
H	喷雾区总高度, m
H	CO_2 在溶液中的溶解度系数, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$
H_0	CO_2 在纯水中的溶解度系数, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$
H_g	气体湿度, 质量百分比%
H	填料总高度, m
I	离子强度, kmol/m^3
I_g	气体焓, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
I_L	液体焓, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
k_1	拟一级反应速度常数, s^{-1}
k_2	CO_2 和 OH^- 的拟二级反应速度常数, $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
k_g	气体导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
K_L	物理吸收时以浓度差为推动力的液相传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

K'_L	化学吸收时以浓度差为推动力的液相传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
K_s	滑动系数
K_2^∞	在无限稀 NaOH 溶液中的反应速度常数, $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$
M	轴向分格数
N	径向分格数 波纹同心环碟片数
N_i	CO_2 吸收速率, $\text{kmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Nu	Nusselt 数
n	转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
P	大气压, Pa
P_{CO_2}	气相主体中 CO_2 分压, Pa
P_i	气液界面处气相中 CO_2 平衡分压, Pa
P_s	水气分压, Pa
ΔP	气相流经旋转床总压降, Pa
ΔP_f	摩擦力所引起的气相压降, Pa
ΔP_a	无气液流量时压降, Pa
ΔP_e	无液流量且转子静止时压降, Pa
ΔP_b	无液流量时压降, Pa
ΔP_{cr}	科氏力所引起的气相压降, Pa
ΔP_w	离心力所引起的气相压降, Pa
P_{wet}	旋转填料床总功耗, W
P_{dry}	旋转填料干床总功耗, W
P_{net}	旋转填料湿床工作功耗, W
Q	传热量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
r	径向距离, m
Re	Reynolds 数
R_1	旋转床转子内径, m
R_0	旋转床转子外径, m
r_w	气化潜热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
s	更新频率, s^{-1}
S	碟片表面积, m^2
t	液滴停留时间, s
T	液相温度, K
t_g	气体温度, $^{\circ}\text{C}$
T_L	液体温度, $^{\circ}\text{C}$
u_θ	流体相对碟片周向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

u_r	流体相对碟片径向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
U_i	液滴初速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
U_L	液滴速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
V	总传质容积, m^3
V_1	填料体积, m^3
V_2, V_3, V_4	分别为填料、外环与内环液雾传质体积, m^3
V_g	气流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
V_L	液体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
V_L	液流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
V_0	滴定所取样本体积, mL
V_{11}	滴定至第一终点所用标准盐酸体积, mL
V_{12}	第一终点至第二终点所用标准盐酸体积, mL
W_g, W_L	气、液质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Z	喷雾区轴向坐标, m

希腊字母:

α	平均相界比表面积, m^{-1}
γ	转化因子
δ	液膜厚度, m
ε	填料空隙率
μ	流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
ν	流体运动粘度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ξ	流体边界层, m
ρ	密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ	表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
ω_0	转子转动角速度, 弧度 $\cdot \text{s}^{-1}$
ω	流体转动角速度, 弧度 $\cdot \text{s}^{-1}$
η	旋转填料床功率总效率

注脚说明:

g——气体 L——液体 m——平均

缩写说明:

RPB——旋转填料床

目 录

第一章 绪 论

1.1 过程强化是现代化工的发展趋势	(1)
1.2 离心力强化过程传递	(3)
1.3 旋转填料床的应用	(6)
1.3.1 纳米材料碳酸盐	(6)
1.3.2 纳米材料生产方法	(9)
1.3.3 超重力技术效果	(10)
1.4 国内应用进展	(11)
1.4.1 北京化工大学	(11)
1.4.2 华南理工大学	(12)
1.4.3 华北工学院	(13)
1.4.4 其他大学	(15)
1.4.5 产业化公司	(15)
1.5 国外应用进展	(16)
1.6 本章小结	(17)
主要参考文献	(17)

第二章 旋转填料床的理论研究进展

2.1 基础理论研究现状	(20)
2.2 液体流动规律的研究现状	(20)
2.2.1 液体流动形式研究	(20)
2.2.2 液膜厚度及流动速度	(21)
2.2.3 气相压降研究	(22)
2.2.4 液泛	(25)
2.2.5 液滴直径	(27)
2.2.6 持液量	(28)
2.2.7 停留时间	(28)
2.2.8 功耗研究现状	(29)
2.3 传质传热系数的研究现状	(30)
2.3.1 比表面积研究现状	(30)
2.3.2 传质传热系数	(31)
2.3.3 体积传质系数	(32)
2.4 旋转填料床传热研究	(32)
2.4.1 液滴运动及传热分析	(32)
2.4.2 错流式冷却塔的传热传质研究情况	(33)

2.4.3 喷雾式冷却塔的传热传质研究情况	(34)
2.4.4 旋转圆盘传热研究	(35)
2.4.5 离心力场下气液两相传热传质的研究状况	(36)
2.5 研究意义	(37)
2.6 本章小结	(39)
主要参考文献	(40)

第三章 逆流型旋转填料床的流体力学研究

3.1 流体力学模型	(43)
3.1.1 基本方程	(43)
3.1.2 边界条件	(44)
3.1.3 液膜厚度	(44)
3.2 气相压降研究	(45)
3.2.1 试验装置、测量仪器及方法	(45)
3.2.2 气相流体压降理论分析	(47)
3.2.3 滑动系数、形状系数及气相边界层系数	(50)
3.2.4 气相压降测量值及计算结果	(52)
3.3 液泛机理实验研究	(54)
3.3.1 试验装置、测量仪器及方法	(54)
3.3.2 旋转填料床液泛机理研究	(54)
3.3.3 液泛实验结果及结论	(56)
3.4 本章小结	(57)
主要参考文献	(57)

第四章 逆流型旋转填料床的传质性能研究

4.1 测定方法	(59)
4.2 试验装置	(59)
4.3 数据处理	(60)
4.4 理论分析传质系数	(62)
4.4.1 lewich 理论	(62)
4.4.2 Higibe 渗透模型	(64)
4.4.3 Kolmogoroff 各向同性理论	(65)
4.5 实验结果	(65)
4.6 实验及理论计算结果讨论	(67)
主要参考文献	(68)

第五章 错流型旋转填料床的传质性能研究

5.1 多级离心雾化旋转填料床简介	(69)
-------------------------	------

5.2 测定方法	(69)
5.3 试验装置	(71)
5.4 数据处理	(72)
5.5 结果分析	(73)
5.6 本章小结	(74)
主要参考文献	(74)

第六章 错流型旋转填料床的流体力学及传热性能研究

6.1 液滴运动分析	(75)
6.2 分格传热计算	(78)
6.3 计算举例	(79)
6.4 实验装置	(80)
6.5 实验结果	(82)
6.6 本章小结	(87)
主要参考文献	(87)

第七章 旋转填料床功耗研究

7.1 功耗理论分析	(89)
7.2 能耗分析	(90)
7.3 简易测量	(91)
7.3.1 实验装置	(91)
7.3.2 测量方法	(93)
7.4 实验结果及分析	(93)
7.4.1 逆流填料床实验结果	(93)
7.4.2 错流型填料床实验结果	(95)
7.5 讨论	(97)
主要参考文献	(99)

第八章 旋转床烟气脱硫研究

8.1 烟气脱硫的意义	(100)
8.2 旋转床烟气脱硫的机理分析	(101)
8.3 吸收过程分析	(102)
8.4 双碱法烟气脱硫工艺	(104)
8.4.1 脱硫量计算	(105)
8.4.2 再生溶液的 pH 值计算	(105)
8.4.3 吸收液的再生实验	(106)
8.5 多级雾化旋转床脱硫实验	(108)
8.5.1 实验装置系统	(108)

8.5.2 实验步骤	(108)
8.6 亚硫酸根离子的分析	(109)
8.7 实验结果与讨论	(110)
8.7.1 再生液的 pH 值的影响	(110)
8.7.2 液气比的影响	(111)
8.7.3 烟气中的 SO_2 初始浓度的影响	(112)
8.8 本章小结	(113)
主要参考文献	(113)

第九章 制备纳米粉体材料

9.1 纳米材料及其应用	(115)
9.2 制备纳米材料的理论基础	(116)
9.3 纳米碳酸钙	(117)
9.3.1 实验与工艺流程	(117)
9.3.2 结果与讨论	(117)
9.3.3 实验结论	(120)
9.4 超细氢氧化铝	(121)
9.4.1 制备超细氢氧化铝的工艺流程	(122)
9.4.2 实验结果与讨论	(123)
9.4.3 结论	(126)
9.5 纳米级硫酸钡	(127)
9.5.1 实验部分	(127)
9.5.2 结果与讨论	(127)
9.6 纳米氧化锌	(129)
9.6.1 实验流程	(129)
9.6.2 实验结果与讨论	(130)
9.7 纳米拟薄水铝石	(131)
9.7.1 实验过程	(132)
9.7.2 实验结果及分析	(133)
9.7.3 实验结论	(134)
9.8 本章小结	(135)
主要参考文献	(135)

第一章 绪 论

1.1 过程强化是现代化工的发展趋势

科技的发展,使产品向轻、薄、短、小型转化,使燃料、原材料大幅度降低,省资源、省能源、省空间和省劳力,生产空间小型化转化、生产操作和管理无人化。企业向小型化、分散化、专业化、协作化、群体化的方向发展,企业的生产、科研与教育日益一体化。我国的劳动力优势由于以微电脑技术为核心的更高层次的自动化而被削弱,以机械工业为例,现有的 3.1 万种机电产品中,约有 84% 需更新或改进,机电产品性能达到国际上 20 世纪 70 年代及以上水平的仅 10%,达 60 年代的占 35%,而相当于 50 年代水平的则占 55%。

化学工程是以物理、化学、数学的原理为基础,研究化学工业和其他化学类型工业生产中物质的转化,改变物质的组成、性质和状态的一门工程学科。化学工程是以获取化工产品的化学生产过程为主要对象,解决有关生产流程的组合、设备结构设计和放大过程操作的控制和优化等问题;通过各种反应,能量和物料的输送、传递和混合等,以保证高效、节能、经济和安全的生产,获取人类所需要的各种物质的产品,维持良好的生态环境。合成纤维、化肥农药、水泥、玻璃、药物等的合成和制造,无论是从原料的加工生产,还是到成品的合成均是化学过程。

从理论上分析和归纳了化学类型(化工,冶金/轻工,医药,核能……)工业生产的物理和化学变化过程,把复杂的工业生产过程归纳成为数不多的若干个单元操作,以后又经过进一步研究各单元的操作共同规律,发现各个单元是传热、传质和动量传递在各个特定情况下的组合。20 世纪 50 年代初,提出了化学工程的基础可以概括为传热、传质和动量传递(三传)和化学反应(一反),并发现“三传”之间有类似特性,可以用统一的观点来研究上述三种传递过程共性和其间一些关系。

工业的发展,只有建立在技术进步的基础上,才能有速度、质量和水平。20 世纪 40 年代初,流态化技术应用于石油催化裂化过程,促使石油工业的面貌发生了划时代的变化。用气体扩散法提取铀 235,从核燃料中提取钚;用精密蒸馏方法从普通水中提取重水;用发酵罐深层培养法大规模生产青霉素等,建立在现代化工技术基础上的石油化学工业,使人类生活面貌发生了重大变化。20 世纪 60 年代以来,化工系统工程的形成,系统优化数学模型的建立和电子计算机的应用,为化工装置实现大型化和高度自动化,最合理地利用原料和能源创造了条件,使化学工业的科研、设计、设备制造、生产发展踏上了一个技术上的新台阶。化学工程在发展过程中,既不断丰富本学科的内容,又开发了相关的交叉学科。近年来,生物化学工程分支的发展,为重要的高科技部门生物工程的兴起创造了

必要的条件。化学工程学科对于化学类型工业和应用化工技术的部门的技术进步与发展,有着至关重要的作用。当前化学工业在尽快克服工艺和工程放大设计方面的薄弱环节,尽快消化引进的先进技术,缩短科研成果转化为生产力的时间等方面将会起积极作用,促进化工的发展。

因为传统设计已有相当长的历史了,人们掌握了一大套传统设计经验,人们采用习惯思维来设计的传统化工设备庞大,造成设备投资大,占地多,设备效率低,耗能多,成品质量低,造成资金回收慢,利润低。我们知道几乎所有的化工生产工程,包括食品生产、饮料行业、炼油过程等等与化学行业有关的过程,都是有单元操作所组合而成的。传统相际传质设备的局限性,多相流之间的质量传递与反应是工业生产的最基本过程之一,在这些过程中大量使用塔器,如填料塔、板式塔等。这种气液逆流接触设备是依靠重力作用实现气—液接触进行传质的,由于重力场较弱,液膜流动缓慢,如液体沿圆柱形湿壁塔的壁流下时,在稳定时液膜内速度分布为:

$$U_L = \left(\frac{g}{2v_L} \right) (h^2 - x^2) \quad (1-1)$$

液膜厚度可由下式

$$V_L = \pi d \int_0^h U_L dx = \frac{\pi g h^3}{3v_L}$$

得出

$$\delta = \left(\frac{3v_L V_L}{\pi g d} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-2)$$

在 $x = 0$ 处,即表面速度为:

$$U_s = \frac{gh^2}{2v_L} = \left(\frac{g}{2v_L} \right) \left(\frac{3v_L V_L}{\pi g d} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1-3)$$

上述式(1-1)至(1-3)中:

V_L ——液体的体积流量, m^3/h ;

U_L ——液膜流速, m/s ;

U_s ——液膜表面流速, m/s ;

x ——距液膜表面的垂直距离, m ;

δ ——液膜厚度, m 。

式(1-3)中液膜流速 U_s ,受重力加速度 g 控制,由于 g 较小,故液膜流速也较低。同时较小的 g ,也使式(1-2)中的液膜厚度 δ 较大,容易造成液泛,泛点低。单位体积内有效接触面积小,由液膜控制的传质过程的体积传质系数 $K_L a$ 低,故这类设备体积庞大,空间利用率和设备生产强度低。多年来,人们虽不断对塔器进行改进,但传递与反应过程始终局限于重力场范围内,未能有突破性的进展。进一步研究表明:这些过程控制着工艺生产的速度,只要其中一个环节,一个单元操作的速率低,将使整个生产卡壳。

什么东西决定这些单元操作快慢呢?人们研究发现,所有单元操作都是有动量传递、质量传递、热量传递所控制,即整个生产是由这三传一反速率所控制。人们找到了症结,

于是过程强化便得到人们的关注。过程的强化是在指定的化工设备容积下,至少以一个数量级的倍数来促进生产效率的一种技术措施。在目前能耗和投资费用日见昂贵、利润低以及要求从本质上改进其他安全性的情况下,已迫使我们不得不仔细研究强化对策所能带来的效益。离心力强化技术就是采用主动积极的措施来强化传热、传质,它的研究成功必将气液传热、传质设备产生革命性的影响。

1.2 离心力强化过程传递

20 世纪 70 年代末至 80 年代初,美国宇航局(NASA)在太空进行了气液两相间的传质实验研究,结果发现在完全失重($g=0$)的条件下,气液两相间不能有效地分离,气—液间传质不能实现。受此传质实验结果的启发,重力作用减弱直至为零,气—液相间传质也减弱,直至不能产生传质。由此进行逆向思维,若增大重力作用,气—液相间传质会怎样呢?英国帝国化学工业公司经过数年的研制,设计出了超重力场中的新型传质设备,即所谓的 Higee(High-gravity rotary)设备,发明人科林·拉姆已获得该技术的美国专利。利用旋转填料床产生的强大离心力,使气液的流速及填料的有效比表面积大大提高且操作范围扩大。液体在高分散、高混合、强湍动以及界面急速更新的情况下与气体以极大的相对速度在弯曲流道中逆向接触,极大地强化了传质过程。

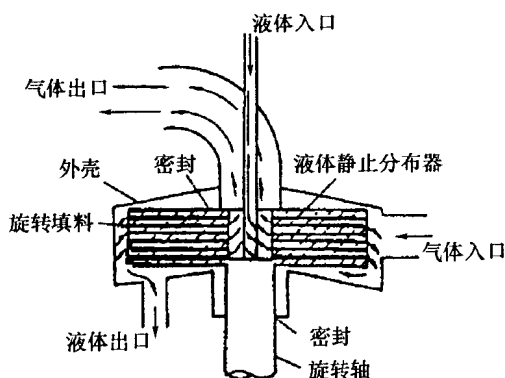


图 1-1 逆流旋转填料床的结构示意图

逆流型旋转填料床的结构如图 1-1 所示,其特征是强制气流由填料床的外圆周边进入旋转着的填料,自外向内作强制性的流动,最后由中间流出。而液体由位于中央的一个静止分布器射出,喷入旋转体,在离心力作用下自内向外通过填料流出,使气—液之间发生高效的逆流接触,在环形旋转器的高速转动下,利用强大的离心力,使气—液膜变薄,传质阻力减小,增强了设备传质速率和处理能力。据文献报道,与一般情况下的蒸馏塔或吸收塔相比,在相同操作工艺条件下,传质单元高度降低了 1~2 个数量级,可将塔的高度缩小为原来的 1/10,塔的直径减为原来的 1/5。并且显示出许多传统设备所完全不具备的优点,图 1-2 是英国帝国化学公司(ICI)展示的超重力旋转床转子结构图。



图 1-2 英国帝国化学公司 (ICI) 展示的逆流旋转填料床转子

北京化工大学已将超重力技术用于油田注水脱氧、锅炉水脱氧与除尘的实验研究(见表 1-1),将超重力技术用于纳米级超细粉体材料的制取、生物氧化反应过程的强化的研究也在进行当中。

表 1-1 超重力场除尘设备与传统设备的比较

	平均压降(Pa)	分离效率(%)	切割粒径(10^{-6} m)
高效旋片分离器	1200	84.2	2~5
喷淋塔	360	94.5	1~2
干式电除尘器	250	99	
湿式电除尘器	150	99	0.01~0.02
高效文丘里洗涤器	8000	99.9	0.1~0.2
旋转床除尘器	1100	99.9	0.02~0.03

在采用这种高效气液传质装置之后,不仅系统设备的占地面积或空间、体积大幅减小,节省大量的基建投资,而且设备重量轻,维修方便,可缩短检修工期。设备费用比传统塔设备费用大幅减小,有利于降低产品的投产成本。如果对填料结构加以改进,研制出气体阻力低而传质性能好的填料,则还可以降低系统的风机电耗,降低操作费用。

由于浮力因子 $\Delta(\rho g)$ 的大幅度提高,使动量、热量的传递以及与传递相关的过程(特别是传递控制的化学反应过程)也都会得到强化。不仅整个过程加快,而且气体的线速度也由于液泛限的升高而得到了提高。这两个因素的结合使单位设备体积的生产强度得到

一两个数量级的提高。巨大的塔器可变化为高度不及 2m 的超重机。因此超重力工程技术被认为是强化传递和多相反应过程的一项突破性新技术,被誉为“化学工业的晶体管”和“跨世纪的技术”。

英美等国于 20 世纪 80 年代开始在工业中试用超重力场气液传质反应器,在 1 000 倍于重力场的离心力场作用下,液膜流速可提高 10 倍以上,体积传质系数可增加一个数量级。虽然目前国内外使用的气液传质反应器体积传质系数高,但若直接用于大流量的气液传热传质,例如循环水的冷却,烟道气 SO_2 净化等,还有一定困难,其原因在于:

- (1) 旋转填料床的内外环流体通道横截面积比悬殊,气速变化过大,气体形体阻力高;
- (2) 气体由旋转床的外环沿径向流向内环,需克服离心阻力。

这两个因素造成气相流阻过大,不适于大流量的气液传热传质。为在大流量的气液传热传质过程中引入离心力场强化传热传质,人们开始研究采用气体轴向流的错流型旋转填料床。错流型旋转床中的气体流道横截面均匀,气速恒定,且气体沿旋转床轴向流动,无需克服离心阻力,故气相阻力小,适合大流量的气液两相传热传质。

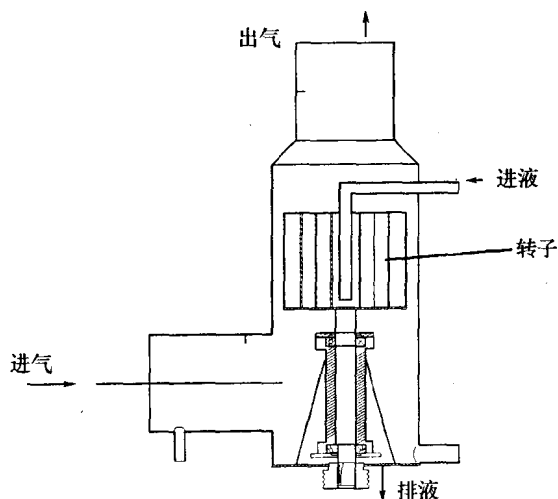


图 1-3 错流型旋转填料床结构示意图

逆流型旋转填料床和错流型旋转填料床都是采用离心力场技术强化气液两相间的传热传质,统称为旋转填料床,是近年国内外研究相际传质传热界所关注的一项学科前沿研究课题。与重力场条件下的传热传质相比,其强化倍数达一个数量级以上。虽然该技术的发展时间不长,但其工业应用前景诱人,表现出旺盛的生命力,已引起人们越来越多的重视。

深入此课题的研究,对化学工程学科在特殊力场领域的拓展具有重要意义:一方面可拓宽化工学科在离心力场条件下强化气液传热传质的研究领域,促进学科发展;另一方面,可为工业中利用离心力强化大流量气液间传热传质创造条件,促进许多工业技术的发展。

在工业中,循环水的冷却、气体的降温与除尘、可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用、溶剂

回收以及空气调温等过程通常采用填料塔或板式塔作为气液两相传热传质设备。液体由塔顶在重力作用下沿填料或塔板流下,气体由塔底向上流动与液体逆流传热传质。这种传热传质过程是在重力场条件下进行的。由于重力场较弱,液膜流速太低,传热传质的效率低,故使得塔体积庞大,耗材多,设备投资高。这在当今生产系统日趋紧凑的工厂、人口日趋密集的城区是不合适的。随着现代化工业的发展,人们越来越希望采用结构紧凑、重量轻、耗材少、投资省和效率高的传热传质设备。

旋转填料床虽然同样是利用离心力场,但与传统的离心机或离心分离所用的离心力场的根本区别在于:它是将不同相间物料作强制性的接触运动,将液相分散成薄膜或细小雾滴,极大地提高了相界面积,剧烈搅动速度、浓度、温度边界层,达到对传递过程的强化作用。

其理论根据是:在重力加速度 $g \rightarrow 0$ 时,两相接触过程的动力因素即浮力因子 $\Delta\rho g \rightarrow 0$,两相间不会因密度差而产生相间流动,此时分子间力(如表面张力)将会起主要作用,液体团聚至表面积最小的状态,不得伸展,相间传递失去两相充分接触的前提条件,使相间传递作用越来越弱,分离无法进行。反之, g 越大、 $\Delta\rho g$ 越大,流体相对速度也越大,巨大的切应力克服了表面张力,使得相间接触面积增大,从而导致相间传递过程的极大加强。虽然它的实质是离心力场的作用,但该技术与以往的传统复相分离或密度差分离有着质的区别。旋转填料床强化技术与离心萃取、离心流化床、离心干燥等技术密切相关,技术的核心在于对传递过程的极大的强化,可以统称为离心力场强化技术,但在本书中只讨论旋转床这一代表的离心强化技术。它已挖掘的与潜在的功能将有可能使化学工程科学与技术进入一个新的发展阶段。

Higee 是这一新技术领域诞生的标志(虽然最初它只被看成是强化化工分离过程的一项新技术),这项工程技术曾经在国际上称之为 High Gravity Engineering and Technology,在国内称之为超重力工程技术,“超”是指超过常规重力加速度,其范围较宽,有更一般的意义。1996年6月24日在北京举行了第一届国际超重力工程与技术专题研讨会。但现在人们认识其基本本质之后,更多人更愿意称之为旋转填料床技术或离心力场强化技术。

1.3 旋转填料床的应用

旋转填料床极大地强化传质、传热过程,特别适合含液相的多流相之间的过程传递及反应。我们可以从其最新的研究应用——纳米材料碳酸盐的制备,领略到它在化工生产过程中所能起的作用。

1.3.1 纳米材料碳酸盐

1. 超细碳酸钙

碳酸钙作为一种重要的无机粉体产品,由于原料广、价格低、无毒性、白度高,广泛用