

滴流床反应器 ——原理与应用

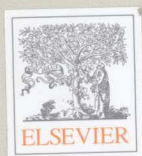
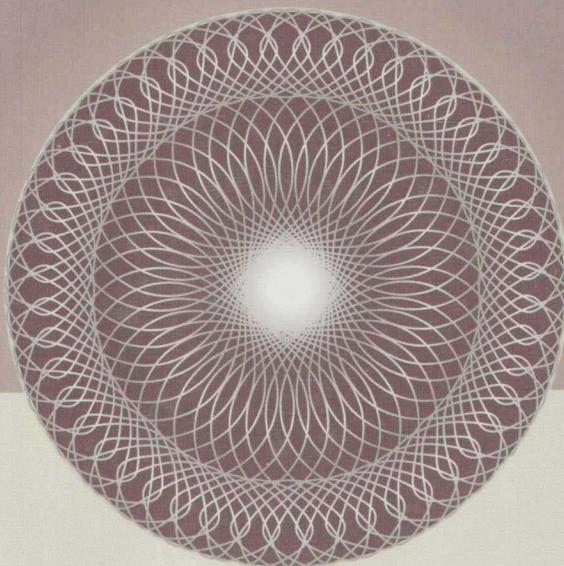
Trickle Bed Reactors: Reactor Engineering & Applications

[印] V.V. 里纳德 (Vivek V. Ranade)

[美] R.V. 乔杜里 (Raghunath V. Chaudhari) 著

[印] P.R. 刚爵 (Prashant R. Gunjal)

刘国柱 等译
米镇涛 程振民 审校



化学工业出版社

滴流床反应器 ——原理与应用

Trickle Bed Reactors: Reactor Engineering & Applications

[印] V. V. 里纳德

[美] R. V. 乔杜里

[印] P. R. 刚爵

刘国柱 等译

米镇涛 程振民 审校



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

滴流床反应器——原理与应用/[印] 里纳德 (Ranade, V. V.),
[美] 乔杜里 (Chaudhari, R. V.), [印] 刚爵 (Gunjal, P. R.) 著;
刘国柱等译. —北京: 化学工业出版社, 2013. 6

书名原文: Trickle Bed Reactors: Reactor Engineering & Applications
ISBN 978-7-122-16856-6

I. ①滴… II. ①里…②乔…③刚…④刘… III. ①固定床反应
器-研究 IV. ①TQ051.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 060064 号

Trickle Bed Reactors: Reactor Engineering & Applications by Vivek V. Ranade, Raghu-
nath V. Chaudhari, Prashant R. Gunjal

ISBN 978-0-444-52738-7

Copyright© 2011 by Elsevier B. V., All rights reserved.

Authorized simplified Chinese translation edition jointly published by Chemical Industry
Press and Elsevier (Singapore) Ltd, 3 Killiney Road, # 08-01 Winsland House I, Singa-
pore 239519.

Copyright © 2013 by Elsevier (Singapore)Pte Ltd.

Copyright © 2013 by Chemical Industry Press

All rights reserved.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macau
SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act.
Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由化学工业出版社与 Elsevier (Singapore)Pte Ltd. 在中国大陆
境内合作出版。本书仅限在中国境内 (不包括香港特别行政区, 澳门特别行政区及台湾
地区) 出版及标价销售。未经许可, 不得盗印、出口, 违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2011-6963

责任编辑: 王湘民

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 顾淑云

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 16½ 彩插 4 字数 268 千字

2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究



译者序

滴流床反应器是一种重要的气-液-固三相催化反应器，广泛应用于石油炼制（加氢裂化、加氢精制、加氢异构与加氢脱芳等）、石油化工（加氢、水合、氧化等）、精细化工以及环境工程等领域。

滴流床反应器的研究和工业应用兴起于 20 世纪五六十年代。此后 30 年，人们在滴流床内复杂流体力学现象及反应工程分析方法方面取得一批重要研究成果，逐渐形成了滴流床反应器工程体系。21 世纪以来，随着计算流体力学和计算机层析成像技术（比如：核磁共振成像技术、 γ 射线成像技术等）的发展，滴流床反应器工程的研究逐渐深入到耦合基本物理现象的多尺度模拟方法，极大地促进了滴流床反应器工程的发展。特别说明，在滴流床反应器工程的发展过程中，我国学者也在不同领域做出了重要的贡献。

虽然国内外很多专著或教材对滴流床反应器工程有所涉及，但对很多关键问题缺乏系统阐述。原著是已知国际上第一本滴流床反应器工程的专著，主要作者 Ranade 和 Chaudhari 教授都是滴流床反应器工程领域的著名学者。因此，本书对国内滴流床反应器工程的研究、放大、设计和工程应用有一定参考价值，这也是本人选译本书的初衷。

本书系统阐述了滴流床反应器的流体力学、反应工程分析、气液两相流动、过程放大、发展新方向等反应器工程关键问题，强调传统反应工程模型与 CFD 模型相结合的滴流床反应器模拟、设计与放大的多尺度方法。第 1 章概述了滴流床反应器的应用领域、特点以及反应器工程的组成部分；第 2 章重点介绍滴流床反应器的基本流体力学现象、关键设计参数及其关联式；第 3 章讨论了滴流床反应器工程的经典分析方法和反应工程模型；第 4 章描述了滴流床反应器内气液两相流动及其计算流体力学模拟；第 5 章分析了影响反应器性能的因素以及反应器放大的基本策略；第 6 章为滴流床反应器的应用实例及其发展新方向。

译稿即将交付之际，特别向天津大学化工学院米镇涛教授表示深深的感谢和由衷的敬意。先生认真细致地审校译稿，纠正了译稿中诸多错误，提出了大量修改建议。同时借此机会感谢先生多年来对本人的大力提携和无私关爱。翻译工作也得到了华东理工大学化学工程联合重点实验室程振民教授的

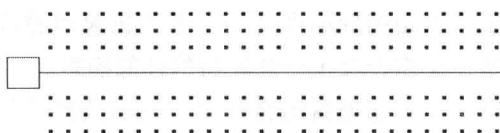
大力支持，并在百忙之中认真审阅译稿。

本书的翻译过程中，汪旭清协助完成第 1 章、第 4 章的部分图表和符号表的翻译，游志强协助整理、翻译第 5 章的部分内容，郭金华、邱园和张强强协助了第 6 章部分图表及文字的翻译。在此对他们的工作和付出，表示深深的感谢。

由于本人能力有限，时间仓促，虽然反复推敲、力求准确，但译稿中仍难免有对原著理解不当或是词不达意之处，恳请专家、同行以及广大读者不吝指正。

刘国柱

2013 年 2 月于天津



前言

滴流床反应器广泛应用于化学与石油加工过程。与浆态反应器相比，滴流床反应器在大规模加工、高压操作的非均相催化过程中，具有无可比拟的优势。滴流床反应器的总体性能主要取决于以下因素：流体力学、相间混合、相间和颗粒内传热传质、反应动力学。对于工业滴流床反应器的设计，催化剂颗粒形状和粒度分布、床层填充特性、流体分布、催化剂颗粒的润湿、以及它们对传热传质速率的影响，都是影响反应器性能至关重要的因素。因此，为适应特定需求和与之相耦合的反应动力学，认识和调控流体力学现象，是滴流床反应器相关过程的技术创新和取得竞争优势的关键。尽管滴流床反应器工业应用的成功案例不胜枚举，也取有一些概念创新，但在反应器设计和模拟中，仍然没有可以直接使用一些最新的计算模型。本书旨在通过综合分析传统反应工程模型和计算流体力学模型，详细说明滴流床反应器工程方法，从而试图解决上述问题。本书的读者主要为，从事化学和石油工业的化学工程师、工业研发实验室的工作人员、以及反应器工程领域的化工工程科学家和研究生。读者还需具备反应工程和数值分析的基本知识。

在国家化学实验室（印度），Kansas 大学和 Tridiagonal Solutions 公司，我们参与了很多反应器工程领域的基础研究和咨询项目。通过与具有丰富实践经验的滴流床反应器工程师、科学家的相互合作，我们意识到，在反应器工程中使用最新多相流物理成果与最新计算模型十分必要。我们撰写本书的目的是，采用前后连贯的方式，描述滴流床反应器工程的各相对独立问题，从而有助于进一步改进设计方法和优化反应器性能。本书围绕反应器工程师的任务，即反应器硬件和总体性能的关系，来组织相关内容；阐述了不同反应器工程问题需要不同模拟方法；结合应用实例和案例分析，强调明确反应器工程和计算模型关系的必要性。书中实例主要选自我们的研究和咨询案例，因此反应体系的选择难免有些片面。然而，我们试图从中获得一些普遍性的指导原则。这对解决实际问题，特别是理解放大过程中的问题，颇有裨益。书中还评述了滴流床反应器的一些最新进展。

书中的内容，可用于滴流床反应器设计的各个阶段、或反应器性能的基础研究项目中，也可作为反应工程分析方法的基础资源、或用于设计参数评

估和实际决策过程。本书可作为滴流床反应器设计、操作和优化的课堂教学资料，或解决实际反应器工程问题的参考书。我们由衷地希望化学工程师在滴流床反应器工程中不断探索和应用一些最新的计算模型。

非常感谢我们的同事、工业项目的合作者。我们的很多学生也对本书也有不同的贡献。特别是 Amit Chaudhari，不仅阅读了书稿，还从一名学生的角度给出了很多有益的建议。在本书较长和枯燥的写作过程中，我们万分感激 Elsevier 编辑组的耐心和理解。

Vivek V. Ranade,
Raghunath V. Chaudhari,
Prashant R. Gunjal,
2010 年 10 月

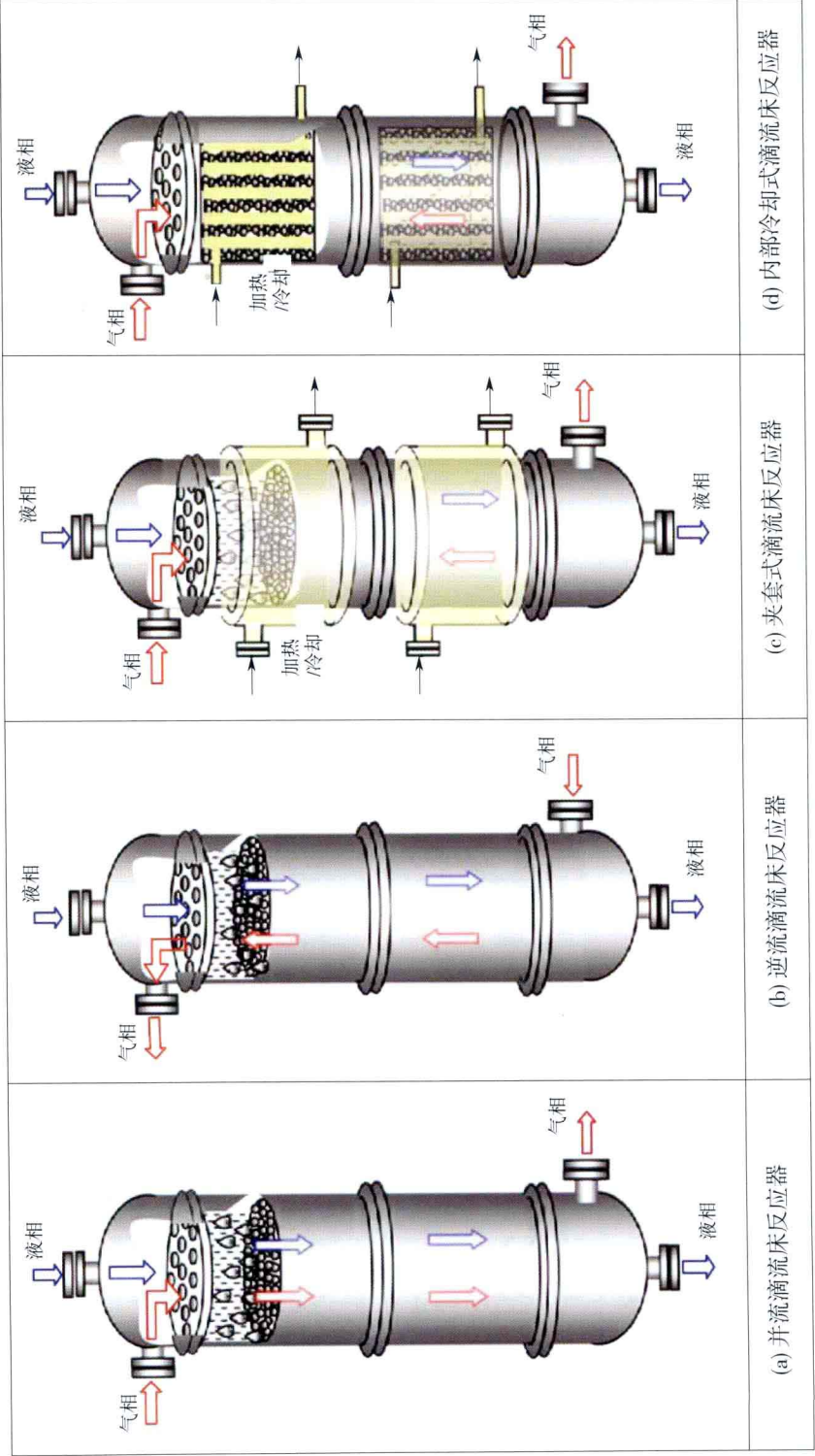


图1-2 传统滴流床反应器的各类操作类型

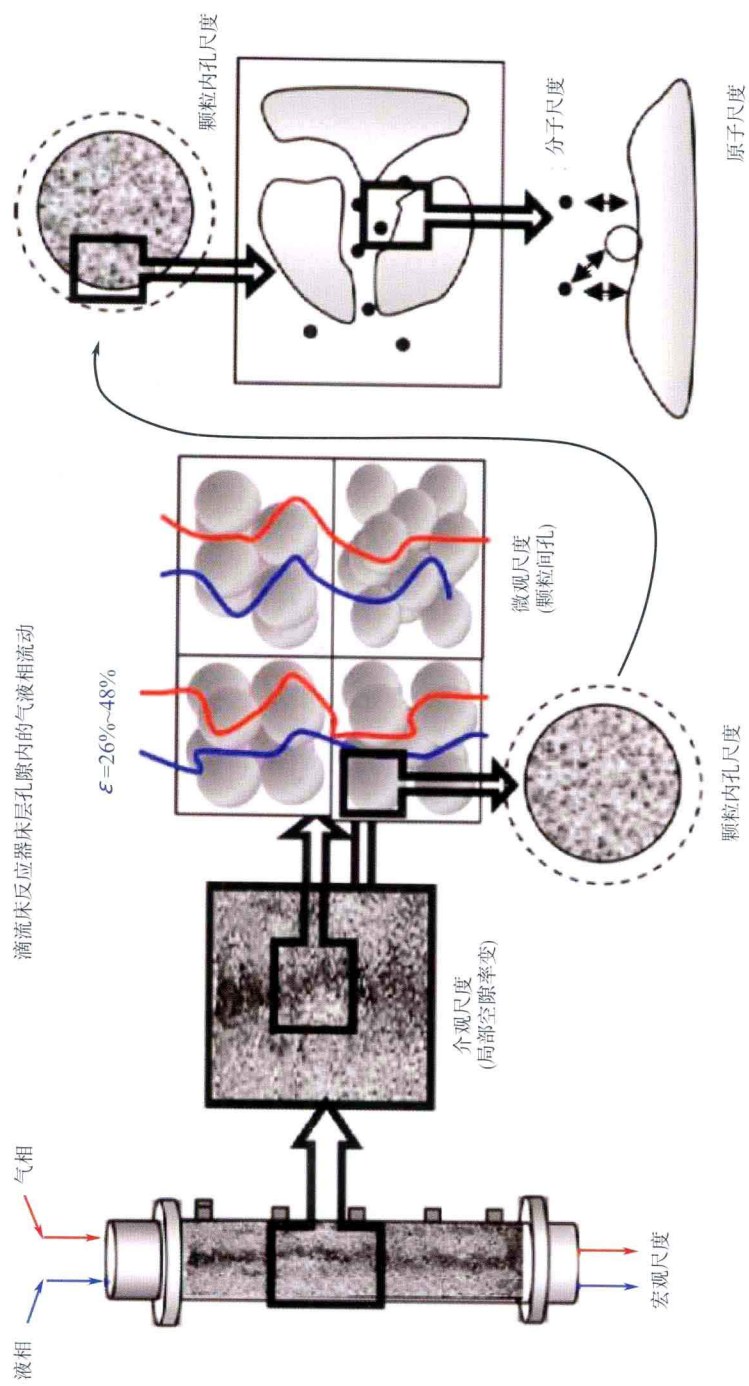


图1-5 滴流床反应器内不同尺度过程的示意

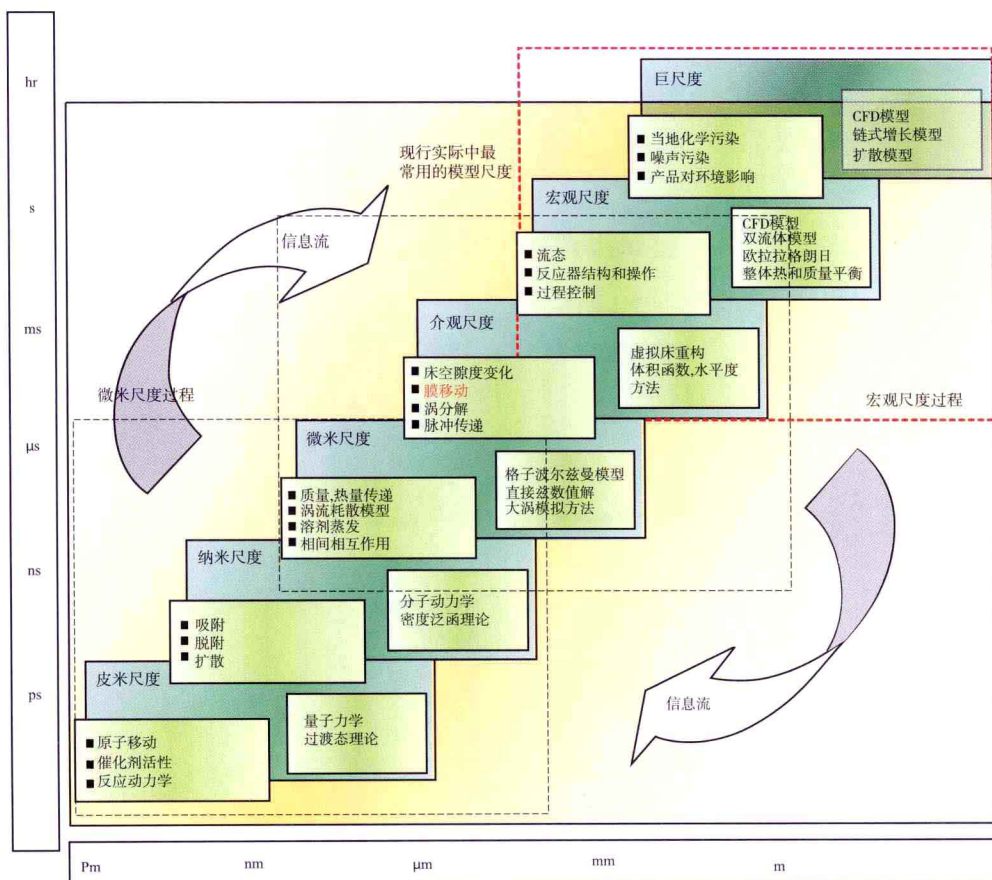


图1-6 滴流床反应器内多尺度现象和模拟方法

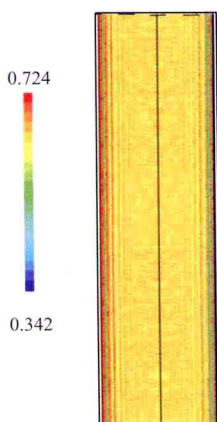


图4-3 计算模型采用的轴向和径向固体分率等值面图 (Gunjal等, 2005)
体系: $D=0.194$ m, 6mm玻璃球

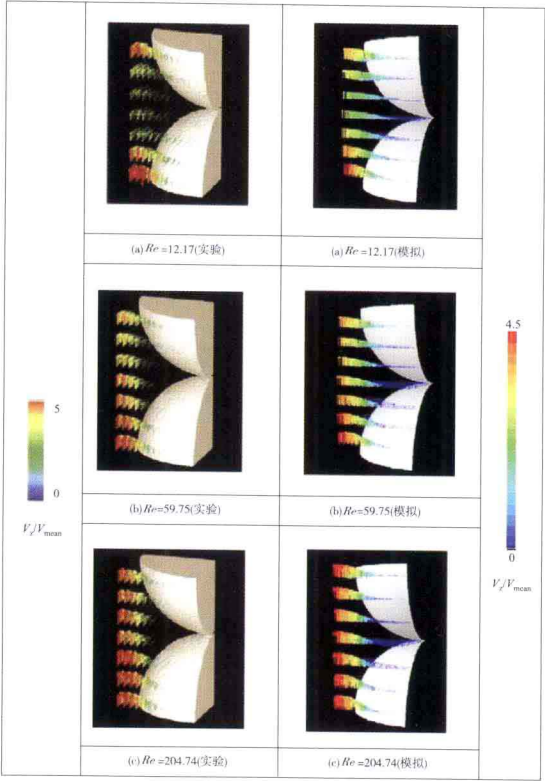


图4-8 不同颗粒雷诺数时 z -速度（轴向速度）计算与实验结果比较（Gunjal等，2005）

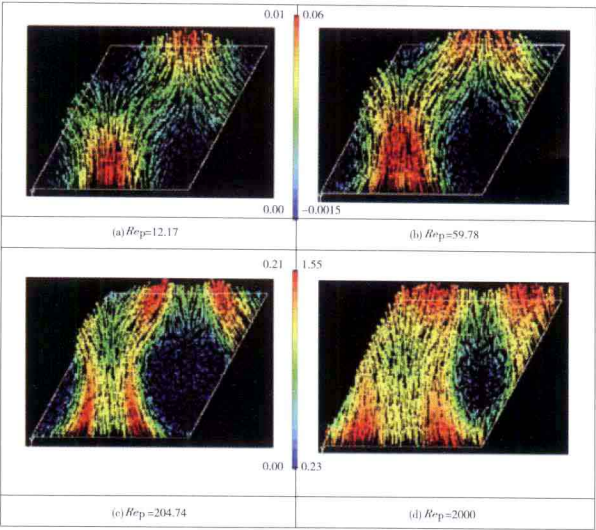


图4-12 不同雷诺数时单斜胞内速度向量和 z -速度分布（Gunjal等，2005）

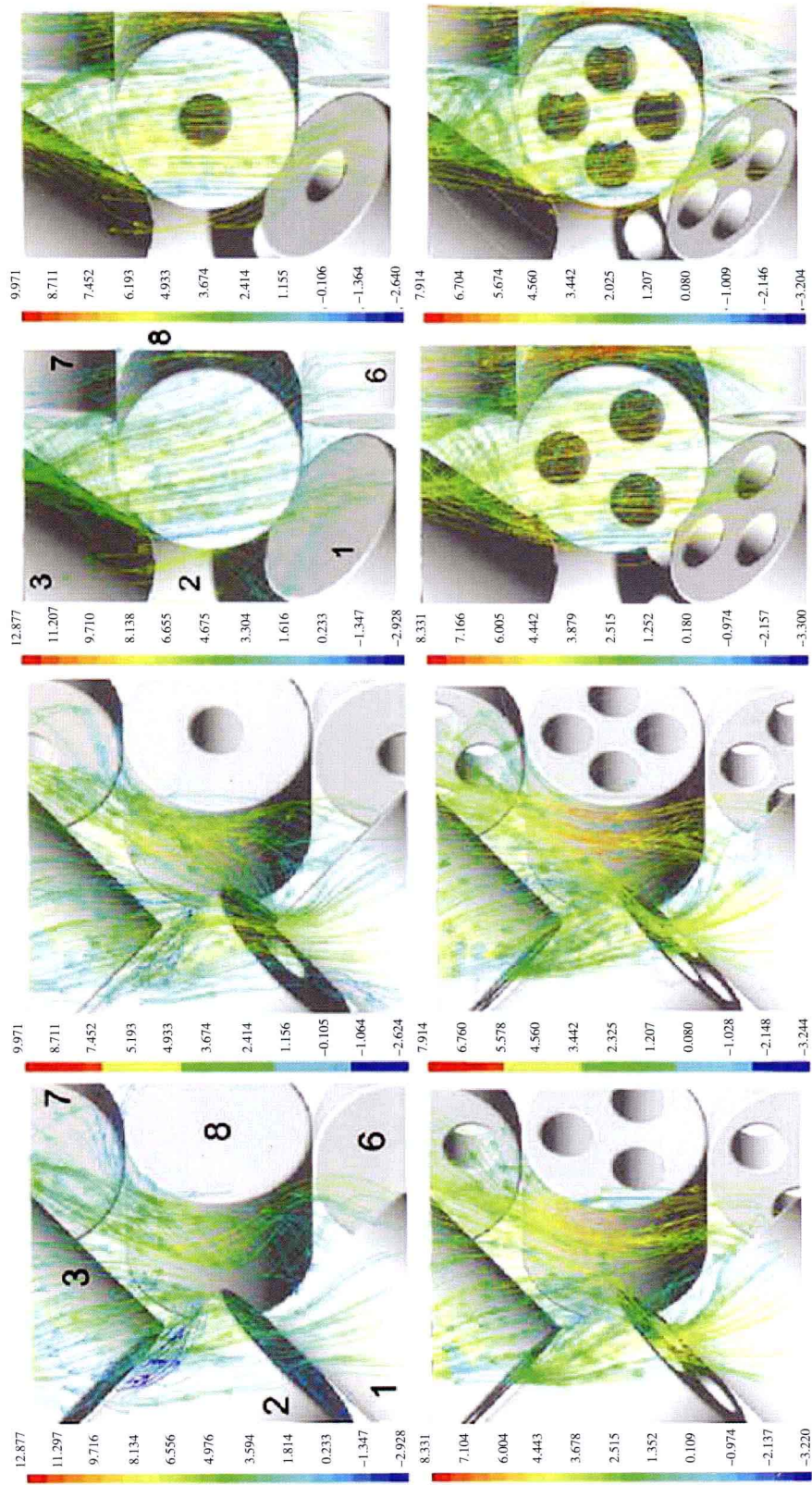


图4-20 不同孔结构填充时的流场比较；流线的颜色：轴向速度（单位 m/s，大小间见左侧彩条）
(Nijemeisland, Dixon and Stitt, 2004)

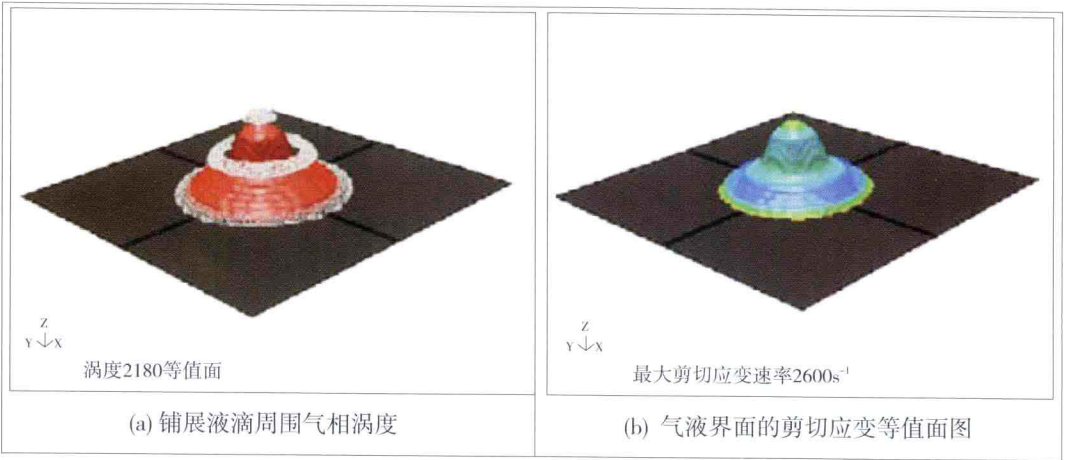


图4-21 液滴在玻璃表面铺展7.5 ms时气液和气固相互作用示意 (Gunjal, Chaudhari和Ranade, 2005b)
体系: 3 mm 水滴, 以0.3 m/s速度与玻璃表面 64° 角接触

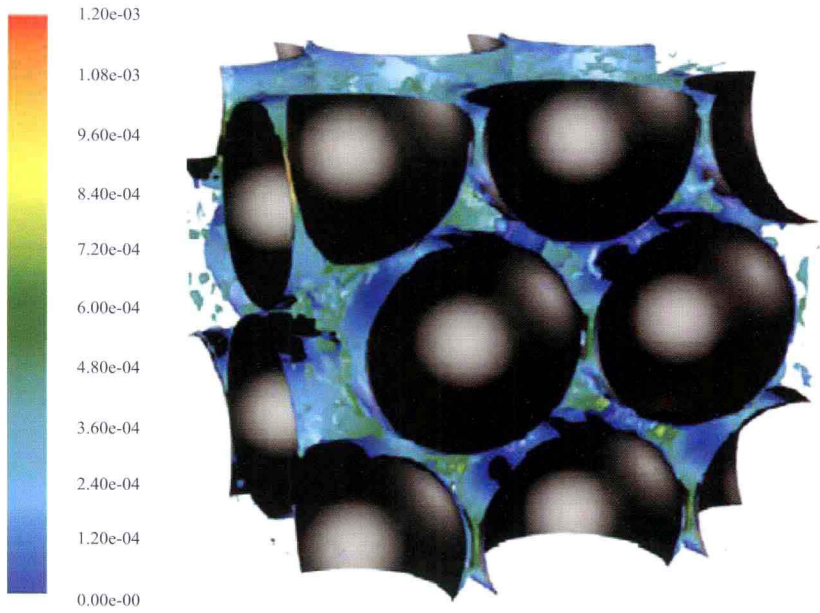


图4-26 通过液体流速放大, 持液量等位面的瞬间快照 (Lopes和Quinta-Ferreira, 2009)
[$L=5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $G=0.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $P=30 \text{ bar}$, $d_p=2 \text{ mm}$]

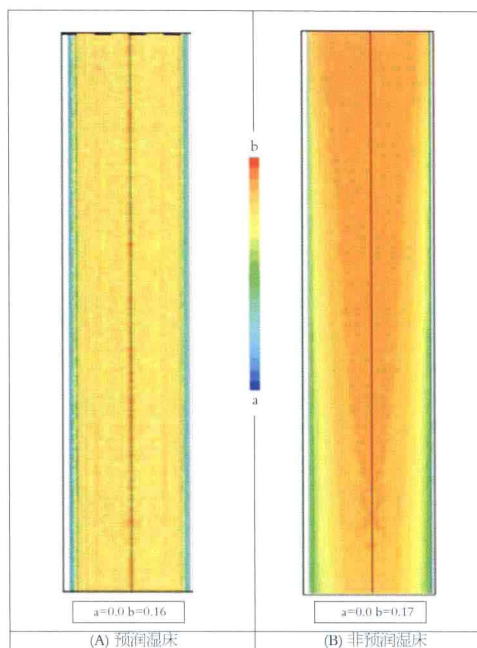


图4-29 预润湿床和非预润湿床的持液量模拟等值面(Gunjal等, 2005)
 $[V_L=6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), V_G=0.22 \text{ m/s}, \text{std dev}=5\%, D=0.114, d_p=3\text{mm}]$

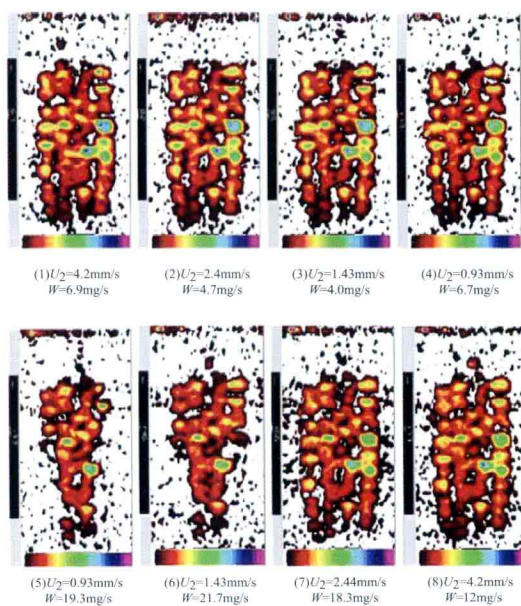


图5-8 MRI技术获得的颗粒尺度和床层尺度传递过程的液体分布等值面(Kirillov和Koptiyug, 2005) $U/2$ =表观液相流速;
 W 为滴流床的表观产出

体系: 1%Pd/ γ - Al_2O_3 +1%Mn催化 α -甲基苯乙烯加氢制异丙苯, 氢气流速为10~50 cm/s

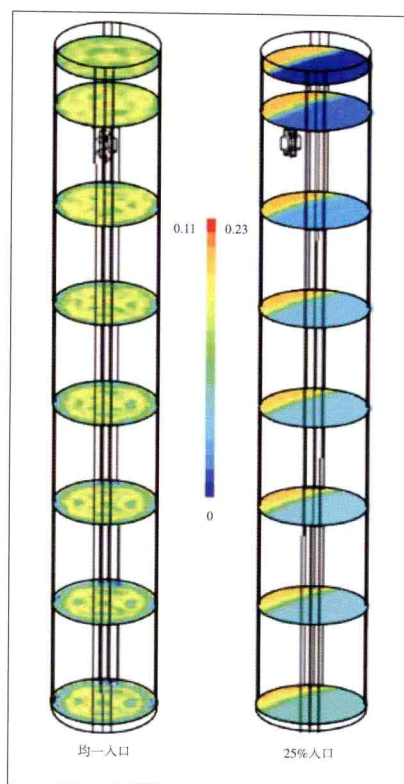


图5-13 用三维CFD模型模拟液体分布：液体体积分率的等值面
 [Gunjal, 2003; $D=0.114\text{m}$, $d_p=3\text{ mm}$; $V_L=2\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $V_G=0.22\text{ m/s}$]

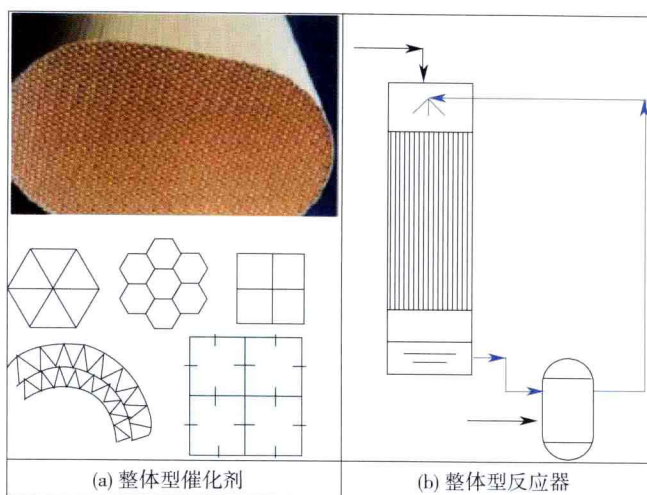
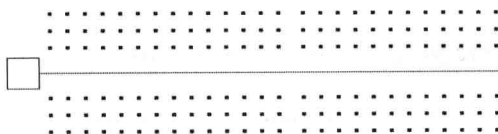


图6-15 整体型催化剂和反应器的结构



目 录

1 概论	1
1.1 滴流床反应器	2
1.1.1 滴流床反应器的型式	4
1.1.2 与其他类型反应器的比较和应用	8
1.2 滴流床反应器工程	10
1.2.1 滴流床反应器的关键问题	11
1.2.2 滴流床反应器工程的多尺度研究方法	13
1.3 内容概要	17
参考文献	19
2 滴流床反应器的流体力学与流型	21
2.1 引言	22
2.2 流区	23
2.2.1 滴流	25
2.2.2 脉冲流	26
2.2.3 喷雾流	27
2.2.4 鼓泡流	28
2.3 流型转变	28
2.4 重要流体力学参数	34
2.4.1 压降	34
2.4.2 持液量	39
2.4.3 催化剂颗粒的润湿	43
2.4.4 气液相传质系数	48
2.4.5 液固传质系数	50
2.4.6 气固传质系数	52
2.4.7 轴向返混	53
2.4.8 滴流床反应器的传热	56
2.5 小结	60

参考文献	61
3 滴流床反应器的反应工程	71
3.1 引言	72
3.2 表观反应速率	74
3.2.1 完全润湿催化剂颗粒	74
3.2.2 部分润湿催化剂颗粒	78
3.2.3 放热反应	82
3.3 滴流床反应器的性能模型	85
3.3.1 拟均相经验模型	92
3.3.2 催化剂颗粒完全润湿的普遍化模型	92
3.3.3 绝热滴流床反应器模型	93
3.3.4 非恒温滴流床反应器模型：复杂反应	94
3.3.5 滴流床反应器的周期性操作	98
3.4 小结	100
参考文献	100
4 滴流床内流体流动的模拟	107
4.1 引言	108
4.2 填充床的表征	109
4.2.1 随机填充床	111
4.2.2 结构化填充床	114
4.3 填充床内的单相流体流动	117
4.3.1 模拟方法	119
4.3.2 模型方程和边界条件	120
4.3.3 颗粒阵列中的流体流动	122
4.3.3.1 球形颗粒的正立方排布	122
4.3.3.2 球形颗粒堆积形态的影响	126
4.3.3.3 颗粒形状对流体特性的影响	131
4.3.4 颗粒随机堆积填充床的流体流动	132
4.4 填充床内的气液相流体流动	135
4.4.1 填充床内的气液相流动模拟	135
4.4.1.1 宏观模型	135
4.4.1.2 介观模型	139