



“研究生教育创新工程” 化工类研究生教学用书

分形理论 在化学工程中的应用

刘代俊 编著



化学工业出版社
教材出版中心

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书

分形理论在化学工程中的应用

刘代俊 编著

 **化学工业出版社**
教材出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

分形理论在化学工程中的应用/刘代俊编著. —北京:
化学工业出版社, 2005.12

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书
ISBN 7-5025-8061-1

I. 分… II. 刘… III. 分形理论-应用-化学工
程-研究生-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 152847 号

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书 分形理论在化学工程中的应用

刘代俊 编著

责任编辑: 何 丽

文字编辑: 袁海燕

责任校对: 战河红

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 282 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8061-1

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

编审委员会

主任委员	王静康院士（天津大学）
副主任委员	费维扬院士（清华大学）
	元英进教授（天津大学）
委 员	（按姓氏笔画排序）
	王 志教授（天津大学）
	刘晓勤教授（南京工业大学）
	李 忠教授（华南理工大学）
	吴乃立教授（台湾大学）
	辛 忠教授（华东理工大学）
	张卫东教授（北京化工大学）
	陈纪忠教授（浙江大学）
	陈国华教授（香港科技大学）
	赵 洪教授（清华大学）
	郭绍辉教授（石油大学）
	郭新闻教授（大连理工大学）
	梁 斌教授（四川大学）

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书

指导委员会

主任委员 余国琮院士（天津大学）
副主任委员 （按姓氏笔画排序）
杨锦宗院士（大连理工大学）
时铭显院士（中国石油大学）
欧阳平凯院士（南京工业大学）
金 涌院士（清华大学）
胡 英院士（华东理工大学）
袁渭康院士（华东理工大学）
徐南平院士（南京工业大学）

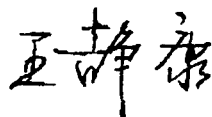
委 员 （按姓氏笔画排序）
马振基教授（新竹清华大学）
王祥生教授（大连理工大学）
元英进教授（天津大学）
石 碧教授（四川大学）
曲景平教授（大连理工大学）
朱家骅教授（四川大学）
仲崇立教授（北京化工大学）
刘昌俊教授（天津大学）
刘洪来教授（华东理工大学）
孙 彦教授（天津大学）
李永丹教授（天津大学）
李伯耿教授（浙江大学）
李笃中教授（台湾大学）
余宝乐教授（香港科技大学）
张丰志教授（新竹交通大学）
陆小华教授（南京工业大学）
陈建峰教授（北京化工大学）
段 雪教授（北京化工大学）
姚善泾教授（浙江大学）
钱 宇教授（华南理工大学）
徐春明教授（中国石油大学）
谢国煌教授（台湾大学）
谭天伟教授（北京化工大学）

序

“化工类研究生创新人才培养模式、教学内容、教学方法和教学改革的研究”是2005年获得教育部研究生教育创新计划专项立项的研究生教育创新工程项目。该项目由天津大学牵头，清华大学、华东理工大学、浙江大学、大连理工大学、北京化工大学、南京工业大学、石油大学、四川大学、华南理工大学、香港科技大学和化学工业出版社等共同承担。编著系列“化工类研究生教学用书”是该项目的重要内容之一。

高质量的教学用书是培养高素质创新人才的重要基础。上述化工学科著名的高等院校发挥各自的优势，共同组织优秀的化工教育教学专家编写了本系列教学用书。我们希望本系列教学用书既有中国特色又展示国际前沿，能够为规范研究生教学、开拓研究生视野、全面提高我国化工类研究生教育的水平做出贡献。

中国工程院院士、天津大学教授



2005年9月

本书序

分形理论是非线性科学研究中十分活跃的一个分支，随着人们对自然界复杂现象认识的深入，分形的思想和方法不断向许多领域渗透和交叉，为定量地描述和表征许多复杂体系提供了强有力的工具。

本书将分形理论与化学工程学科中的复杂体系与非线性过程相结合，融会了这一领域中关于分形研究的新成果。作为研究生的教材，这对于学生拓展思路、加深基础是很有意义的。

春秋百家纵横而兴天下，思想的交流和碰撞也是推动人类文明发展的方式之一。学术思想的交叉与交流不但对于催生学科发展的新增长点，而且对于营造互动与和谐的学术环境都颇为有益。

一流的大学，一定要有崇尚学术、追求卓越的文化氛围。一流大学的学风，需要在厚重扎实的学术土壤中繁衍，需要在宽容与求是的学术氛围中生长。

四川大学校长、中国工程院院士

The image shows a handwritten signature in black ink. The characters are stylized and cursive, appearing to read '李兴' (Li Xing), which is the name of the Vice-Chancellor of Sichuan University mentioned in the text.

2005 年 10 月

前言

化学工程与工艺学科是以物理与化学学科为基础，同时与生物技术、材料技术、信息技术、能源技术、空间技术、海洋技术等相互交叉，在人们面前绘出了一幅五彩缤纷的图景，成为现代工业技术的重要支撑。化工技术在多尺度时空呈现的复杂性，无论是在宏观的多相湍动过程，或是在分子团簇的奇异物质结构里，都使科学家和工程师们感到困惑。怎样去认识这些复杂系统，怎样将实验室中的成果可靠地放大为规模化生产系统，一直都是人们追踪的目标之一。

分形理论的出现给人们提供了一把开启宇宙复杂之门的钥匙。尽管这把神秘之锁可能是一串并列的连环锁，人们认识复杂系统的路还很长，但毕竟露出了一丝灵光。化工系统中的复杂现象与自然界中的复杂现象相似，在某种动力学条件下，会出现具有自相似特点的自组织现象，但这些复杂表象后面，人们可能找到一种关键的数学控制量，从而能概括复杂系统的基本变化规律。分形，就是这样一种具有简洁形式的工具。分形体的变化，犹如 DNA 双螺旋体中某种遗传核心物质按一定的规律稍作变化，便可以演绎出千差万别的生物体来。

本书作为一种尝试，将化工系统中有关分形的应用研究成果有趣的部分加以汇集，其中也包含了作者自己的部分工作。由于非线性科学的飞速发展，许多重要的成果远未能包含在内。所以本书仅作为分形理论的入门书，作为研究探索复杂之门的钥匙。迄今为止，分形的动力学本质远没有揭示，艰苦的跋涉还等待着勇者。

本书共分为八章，分别涉及了分形的基础理论、物质的静态结构、扩散与反应、渗流、湍流、多相过程和反应器。

本书酝酿已有 8 年，在编写中曾得到原成都科技大学校长王建华教授的大力支持和帮助，也得到四川大学彭少芳教授和梁斌教授的鼓励和支持。四川大学校长谢和平院士在分形领域中做出许多创造性的工作，在学校中倡导学术，大力加强研究生教育，并为本书欣然作序。研究生陈国、徐存浩分别参加了管形场湍流的研究和反应器的混沌计算。在此一并深表谢意。

本书中作者所涉及的科学研究工作受国家自然科学基金委员会下列项目的支持，在此致以深切的感谢！

国家自然科学基金（批准号 20046001） 分形介质两相反应过程中的奇异现象-负温度效应的应用基础研究

国家自然科学基金（批准号 20276042） 微波场对高炉钛渣固液相反应与传递协同效应的研究

尽管书中许多内容已在研究生教学中得以使用，但因编者学识水平有限，不当之处难免，敬望专家和读者不吝赐教。

作者
2005 年 10 月

目 录

主要符号表	1
1 绪论	6
1.1 分形理论的发展简介	6
1.2 非线性复杂系统中的共性	8
1.2.1 自组织现象	8
1.2.2 自相似性与分形	10
1.2.3 标度不变性	12
2 分形的数学基础	14
2.1 Hausdorff 测度和分维	14
2.2 相似维数	15
2.3 盒维数	15
2.4 关联维数	16
2.5 信息维数和熵	17
2.6 广义维数	17
2.7 谱维数与外场的作用	18
3 物质静态结构中的分形	21
3.1 固相物质的表面分形与反应活性	21
3.1.1 随机的镂空模型	21
3.1.2 磷块岩的分形特征和反应活性	23
3.1.2.1 磷矿表面的显微结构	23
3.1.2.2 磷矿表面的分形特征	24
3.1.2.3 磷矿表面分形维数与酸解动力学之间的关系	25
3.2 多重分形与催化剂表面特性	26
3.2.1 固体催化剂的介微观结构测试常用方法	26
3.2.1.1 吸附方法	26
3.2.1.2 小角度散射法	27
3.2.2 康托集上的魔梯与多重分形	29
3.2.3 多重分形的质量指数 $\tau(q)$ 序列	33
3.2.4 $\tau(q)$ 与 $f(a)$ 的关系	34
3.2.5 催化剂表面的分形特性参数	36
3.2.5.1 多孔催化剂中孔通道的分形结构	37
3.2.5.2 多孔催化剂中孔壁表面的分形结构	38

3.2.5.3 分形表面的有效性因子 $\eta_s(\delta)$	38
3.2.6 分形表面上反应概率分布的多重分形模拟	39
3.3 长链卷曲分子的分形	43
3.4 高分子良溶剂的转折点	45
3.5 分子平面团簇的分形与外场的共振	46
4 分形介质中的扩散与反应过程	50
4.1 分形介质中的反常扩散系数	50
4.2 扩散概率密度的标度性质	52
4.3 分形介质扩散方程的标度形式	53
4.4 分形孔通道的反应扩散过程	55
4.4.1 分形孔通道中的扩散定律	55
4.4.2 分形孔通道中的质量平衡方程	56
4.4.3 分形孔通道一级反应扩散方程的稳定态解	57
4.5 分形孔网络的反应扩散方程	58
4.5.1 分形孔网络模型的建立	58
4.5.2 分形模型的基本解	60
4.5.3 分形结构特征对反应物消耗的影响	61
4.5.4 孔通道中的浓度分布	62
4.6 液固两相系统中的非催化反应与扩散	63
4.6.1 孔隙的网格模型	63
4.6.2 平均位移和方差、时间的关系	65
4.6.3 分形介质中的扩散方程和扩散系数	66
4.6.4 磷矿颗粒的反应机理和分区段反应动力学模型	66
4.6.4.1 磷矿颗粒的结构特点和反应机理	66
4.6.4.2 反应模型的建立	67
4.6.5 磷矿颗粒系统酸解动力学实验	69
4.6.5.1 酸解的动力学过程	69
4.6.5.2 动力学分析	71
5 渗流过程与奇异现象	75
5.1 渗流的基本概念	75
5.2 静态渗流	75
5.2.1 座渗流模型	76
5.2.2 渗流的数学模拟方法	78
5.2.3 键渗流模型与渗流骨架	78
5.3 重整化群方法	79
5.3.1 重整化群在一维模型中的表示	79
5.3.2 重整化群在二维模型中的应用	80
5.4 动态渗流	82
5.4.1 扩展渗流模型	82
5.4.2 侵入渗流模型	83

5.5	渗流理论在工程中的应用	84
5.5.1	分形介质中非牛顿流体渗流	84
5.5.1.1	分形介质非牛顿流体渗流数学模型	84
5.5.1.2	动态过程的近似解	85
5.5.1.3	井底压力动态分析	85
5.5.2	液固两相反应中的负温度效应	86
5.5.2.1	多相反应过程中的微观图景	86
5.5.2.2	化学过程的数学模型	87
5.5.2.3	负温度效应分析	89
6	湍流与分形	93
6.1	方形涡旋串级裂变的分形	93
6.2	湍流的测量与标度关系	94
6.2.1	热丝测量与结构函数	94
6.2.2	激光多普勒能谱测定中的标度关系	95
6.2.3	全场瞬间流速的测定与分形的计算	98
6.3	管式反应器中的湍流场与分维	100
6.3.1	管形场中的脉动速度与湍动强度的测定	100
6.3.2	时均速度在管式反应器中的分布	101
6.3.3	脉动速度和湍动度在管式反应器中的分布与奇异性	102
6.3.4	颗粒对管式反应器中流型的影响	103
6.3.5	管形场中的关联维数	106
6.3.5.1	关联维数的基本理论	106
6.3.5.2	湍流场中关联维数的测试计算结果	107
6.4	管式反应器中湍流场中的传质	108
6.4.1	涡旋对颗粒表面的更新作用	109
6.4.2	单颗粒传质方程的能量微团形式	110
6.4.3	传质方程的关联	111
6.4.4	固体颗粒在管式反应器中停留时间的分布	112
6.5	搅拌槽中颗粒与液相间的涡旋裂变传质模型	113
6.5.1	传质渗透模型与涡旋的串级结构的关系	113
6.5.2	湍流场中的涡旋能级和能量边界	116
6.5.3	涡旋与颗粒之间的相互作用	117
6.5.4	涡旋场中的传质系数	118
6.5.5	传质过程分析	118
6.5.5.1	搅拌槽中实验数据的讨论	118
6.5.5.2	管形场中的推广	120
6.6	通向流体混沌的有序现象——泰勒涡	121
6.6.1	错流式渗透膜组件中泰勒涡的判定	121
6.6.2	泰勒涡的演变过程	122
6.6.2.1	无渗流和轴流时的泰勒涡	122

6.6.2.2	有轴向流、无渗透流时的流场	123
6.6.2.3	高渗透流、高轴向流情形	124
6.6.3	走向混沌中的分维	124
7	混沌与多相复杂系统	127
7.1	混沌的定性特征与重要判据	127
7.1.1	Lyapunov 指数及维数	128
7.1.2	拓扑熵与测度熵	132
7.1.3	功率谱	132
7.2	混沌与多相系统的流型	134
7.2.1	Kolmogorov 熵判据的必要性	135
7.2.2	两相膨胀床中的混沌与分维	136
7.2.2.1	流化床中的颗粒群模型	136
7.2.2.2	动力过程中的相关维数和自由度	137
7.2.2.3	鼓泡系统压力信号的混沌分析	138
7.2.2.4	流化床中的混沌分析与估计	141
7.3	快速循环式流化床中上行与下行流程的混沌	145
7.3.1	上升管中时间序列的混沌处理	146
7.3.2	下行床中的混沌分析	147
7.3.3	垂直气固并流上行及下行系统混沌动力学行为比较	148
7.4	非均匀液相在垂直管流场中混沌的时间 R/S 分析	150
7.4.1	信号的采集方式与时间序列的 R/S 分析原理	150
7.4.2	石油工业中气液两相混沌与分形时间序列分析	152
8	化学反应器中的振荡与分形	158
8.1	CSTR 中的分岔现象与自律振荡	159
8.2	反应器振荡的反馈控制与强迫振荡	164
8.2.1	正反馈与非线性控制	164
8.2.2	催化过程中的强迫振荡反应器实例	167
8.3	反应器中混沌发展的分形刻画	170
8.3.1	低维相空间中相似性的分形	170
8.3.2	用 Lyapunov 指数来估计分维	173
参考文献		174

主要符号表

英文字母

- A 离子反应的亲和势;
面积, m^2 (第 3 章);
涡旋截面积, m^2 (第 6 章);
传热面积, m^2 (第 7、8 章)
- A 雅可比矩阵 (第 8 章)
- Ar Archinedes 数, $Ar = (\rho_p - \rho_f) \rho_f g \frac{d_p^3}{\mu_f^2}$
- A_s 活性区域面积
- a 比例因子;
标度指数;
分子链上粒子的位移量
- $a(\text{N}_2)$ 用 N_2 分子测定的物质 BET 表面积, m^2
- B_1 渗透区段相对扩散阻力系数
- B_2 外部扩散相对阻力系数
- bit 比特, 信息量单位
- b_i 组分 i 同物质 A 反应的化学计量系数
- b_m B 类反应物以摩尔分数为权的平均化学计量系数
- C 相关函数;
常数;
光速;
浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
- C_A 物质 A 的浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
- C_{Al} 物质 A 的液相浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
- C_{dr} 曳力系数 (第 6 章)
- C_k 与颗粒物理化学性质有关的参数
- C_0 液体的主体浓度;
液相初始浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$
- CoR 碰撞系数, $CoR = \frac{w_1 - w_2}{u_2 - u_1}$ (第 7 章)
- CS 康托集
- CSTR 连续搅拌槽式反应器
- C_1 综合压缩系数
- C_z 模型常数
- C_n 与形状有关的常数
- C^* 液相平衡浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
平衡态下的离子浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- c 分形表达式的常数
- c_A 孔道中的相对浓度, 无量纲
- c_p 比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- D 通用维数
- D_{AB} 物质 A 在物质 B 中的扩散系数
- D_{AE} 物质 A 的有效扩散系数
- D'_{Am} 组分 A 在多元混合组分中扩散的扩散系数,
 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- Da Damkohler 数
- D_a 表面分形参数
- D_{ap} 活性区原始分形维数
- D_a^s 吸附表面的分形维数
- D_{ads}^s 孔壁表面的吸附分形维数
- D_b 盒维数
- D_b^p 孔轴分形曲线的盒维数
- D_b^c 孔通道横截面的盒维数
- D_c 物质结构的分形维数
- D_{cop} 协同系数
- D_{copw} 有效协同系数
- D_d 扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_{de} 有效扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_{df} 分形介质中的扩散系数
- D_{dfb} 分形孔道中的扩散系数
- D_{dl} 自由空间的液相扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_{dp} 渗透区段扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_{dpe} 有效扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_{dr} 反应区段扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- D_{ed} 涡旋的裂变分形维数
- D_f 分形维数
- D_{fm} 长链分子平均分形维数
- D_{fs} 表面分布分形维数, 孔隙分布分形维数
- D_{fv} 表面形状分形维数
- D_G 整体分维
- D_g 关联维数
- D_H Hausdorff 维数
- D_h 通过功率谱得到的分形维数

- D_1 信息维数
 D_{jm} 多元理想气体混合物的平均扩散系数, 表示第 j 项组分在混合组分中扩散的扩散系数
 D_{KA} 努森 (Knudsen) 扩散的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 D_L 长链分子测量尺度小于 15 时的分维
 D_l 以 l 为标度时的分形维数
 D_{lo} 局部分形维数
 D_M 长链分子的中平分维
 D_m 质量分形维数
 D_N 长链分子局域分形维数
 D_0 支撑体的分维
 D_q 广义维数
DS 魔梯
 D_s 谱维数
 D_{sa} 吸引子的维数
 D_{sm} 相似维数
 D_{sp} 扩展维数
 D_{sub} 渗流骨架分维
 D_{trap} 俘获区分维
 D_v 颗粒形体分形维数
 D_w 游走途径的分形维数
 D'_w 在 l 测度下的随机行走途径的分形维数
 D_{wp} 原始游走网格分维
 D_λ Lyapunov 维数
 d 欧几里得几何维数;
 拓扑维数;
 环隙宽度 (第 6 章)
 d_0 零级孔直径, m
 d_B 泡直径, m
 d_{oar} 搅拌桨的直径, m
 d_p 固体颗粒直径, m
 d_s 颗粒当量直径, m
 d_T 流化床直径, m
 d_i 管式反应器内径, m
 d_{ti} 管式反应器的进口入射管径
 $\bar{d}$ 晶粒平均当量直径, m
 E 活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
 E_d 能量耗散因子 (第 6 章)
 F 函数与集合
FCC 快速循环式流化床
 F_{cl} 弹性能
 Fr Froude 数, $Fr = U_{mf}^2 / (gd_T)$
 F_{rep} 排斥能
 F_x, F_y 颗粒在 x 和 y 方向的相间阻力
 f 频率 (第 6 章);
 摩擦系数 (第 6 章)
 f_D 散射光频率与入射光频率之差
 f_i 入射光频率
 f_s 散射光频率
 G_s 颗粒循环量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 g 引力常数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
 H Heivisit 函数;
 系统的熵;
 柯尔莫戈洛夫惯性区结构指数 (第 6 章);
 Hurst 指数 (第 8 章)
 H_b 床层高, m
 H_s 固定床高度, m
 $H^s(F)$ Hausdorff 测度
 h 普朗克常数, $h = 6.624 \times 10^{-27} \text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 h 厚度或高度;
 拓扑熵 (第 7 章)
 $\bar{h}_{ij}^2$ i 到 j 个点上均方距
 I 散射强度
 I_A, I_B, I_C 三个方向上的主转动惯量
 J 物质流率, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 J_λ λ 阶 Bessel 函数
 K 溶度积; 常数; 逼近参数; Kolmogorov 熵 (第 7 章)
 K_d 调节参数 (第 8 章)
 K_h 反应器的传热系数, $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
 K_w 含水率
 K', K'' 常数
 k 渗透率 (第 5 章);
 波数 (第 6 章);
 序列数;
 反应速率常数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_c 常数;
 定积分中值常数
 k_e 传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_i 组分 i 的反应速率常数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_L 液相传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_m 液相平均反应速率常数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_0 指前因子, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_r 反应速率常数
 k_{rg} 气相中的本征化学反应速率常数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 k_{rl} 液相中的本征化学反应速率常数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 L 长度, m
LDV 激光多普勒流速仪
 Li 液体与固体相互作用 Liud 数
 L_i 颗粒的无量纲位置, $L_i = \frac{h}{d_p}$ (第 7 章)
 l 长度标记;
 零级孔长度, m

- M 累积质量;
 相对分子质量;
 主角动量;
 在网格上所占据的格点个数 (第 5 章)
- M_A A 分子的相对分子质量, $\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
- M_B 质量棒集
- M_{Bn} 质量棒的子集
- M_{Bm} B 类反应物的平均摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
- N 数目;
 覆盖的个数;
 态密度, 分子聚合度或分子单体个数;
 扩散通量密度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- N_A 单层吸附半径为 δ_A 的分子的物质的量
- N_L 传质通量, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- N_p 吸引子上全部数据点数目 (第 7 章)
- N_{site} 格子点数
- Nu Nusselt 数
- n 序列数目;
 载流子密度;
 游动次数;
 总质量流通量;
 频率 (第 6 章);
 搅拌桨转速, s^{-1}
- n_A 物质传递量, mol
- $n(\delta_r)$ 迭代的阶数
- P 总概率
- PIV 粒子图像测速技术
- P_a 反应区活性点分率
- Pe_m 质量传递的 Peclet 数 (第 8 章)
- Pe_h 热量传递的 Peclet 数 (第 8 章)
- P_N 具有 N 个格点的渗流概率
- P_∞ 无穷大渗流集团的渗流概率
- p 局部概率;
 压力, MPa
- p_c 渗流的临界概率
- p_D 渗流无量纲压力
- p_0 渗流中格点被金属球占据的概率
- p^* 不动点处的概率
- Q_{11} 渗透区段动力学参数
- Q_{31} 反应区段动力学参数
- Q_t 油水两相总流量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
- q 阶数;
 散射矢量;
 流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (第 8 章)
- R 孔通道长度;
 分子链的长度量;
- 域半径;
 t 时间后随机行走的平均距离;
 气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
 搅拌桨着力点离轴心的距离, m (第 6 章)
- R^n 欧氏空间
- R^m m 维相空间
- R_a 活性点覆盖圆半径;
 瑞利数 (第 7 章)
- R_c 颗粒未反应区外侧半径
- Re 雷诺数 (Reynolds);
 搅拌桨的雷诺数 (第 6 章)
- Re_a 轴向流雷诺数
- Re_c 临界雷诺数
- Re_{cy} 环腔中的 Reynolds 数
- Re_o 渗透流雷诺数
- Re_p 颗粒的雷诺数 (第 6、7 章)
- Re_r 以离管道中心 r 处的时均速度 $\bar{u}_r$ 表示的雷诺数
- Re_t 以管内径为基准的雷诺数
- Re_s 涡旋微团的 Reynolds 数
- R_F 高分子团的 Flory 半径
- R_f 曳力 (第 6 章)
- R_G 平均回转半径
- R_i 内筒半径, m
- R_o 外筒半径, m
- RPD 金属催化剂表面上反应概率分布
- RTD 停留时间分布
- R_s 颗粒残核区外表面半径
- R_z 颗粒反应区段外侧半径
- $\bar{R}$ 平均晶粒尺寸, m
- r 相似比;
 当量直径;
 反应速率, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
 径向上的长度, 半径, m (第 6 章);
 涡旋径向尺度, m
- r_A 表面表观反应速率, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- r_D 渗流管相对半径
- $r_{\min}$ 晶粒孔洞最小尺寸, m
- r_p 毛细管半径, m
- r_s 颗粒外径, m
- $r(c, T)$ 化学反应速率, $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
- S 熵;
 康托集质量棒代号;
 面积, m^2 (第 3、6 章);
 分形时间序列中时间延迟 r 内的方差
- SAW 自回避游走
- Sc Schmidt 数, $Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = \frac{\nu}{D_{AB}}$ (第 6 章)

Sh Sherwood 数, $Sh = k_L d_p / D_{AB}$ (第 6 章)

S_m 膜管有效面积

S_n 表面积, m^2

S_p 比表面积, $m^2 \cdot g^{-1}$;

球体的投影面积 (第 6 章)

S_q 广义熵

$S(t)$ 随机游走格位的数目

s 任意实数 (第 6 章)

T 绝对温标, K

Ta 泰勒数 (Taylor) (第 6 章)

Ta_c 流体失稳的临界泰勒数

Ta_t 旋转泰勒数

T_c 相变温度, K

Tur 湍动度

Tu 湍流场中流体的 Turb 数 (第 6 章)

t 时间或时间间隔, s

t_D 渗流无量纲时间

t_r 平均停留时间, s

U'_c 固相形成的速率, $mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$

U_i 欧氏维空间 R^n 中一个可数或有限的集合

U_{mf} 最小流化速率, $m \cdot s^{-1}$

U_0 表观气速, $m \cdot s^{-1}$ (第 7 章)

U_s 液相到固相物质传递的单向速率, $mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$

$(U_w)_{av}$ 管式反应器截面平均流速, $m \cdot s^{-1}$

u 速度或流体的瞬时速度, $m \cdot s^{-1}$

$\bar{u}$ 流体的时均速度, $m \cdot s^{-1}$

u' 流体的脉动速度, $m \cdot s^{-1}$

$\hat{u}$ 湍流强度

u'_p 颗粒瞬时脉动速度, $m \cdot s^{-1}$

u_r 固体与其周围液体的相对运动速度

V 体积;

流体体积流量, $m^3 \cdot s^{-1}$

V_B 气泡体积, m^3

V_n 填充表面的邻体积 (第 3 章);

膜面渗透流平均流速, $m \cdot s^{-1}$

VOCs 挥发性有机物

V_s 颗粒体积, m^3

V_t 油水混合流速 (总流速), $m \cdot s^{-1}$

V_z 平均轴向流速, $m \cdot s^{-1}$

V_{∞} 单个油泡在水滞留相中上升的极限速度, $m \cdot s^{-1}$

v 转动谱线波数, 标度指数

w 数群, $w = \gamma(\theta - 1)$ (第 8 章)

w_a 数群, $w_a = \gamma(\theta_a - 1)$ (第 8 章)

X_c 分解率

X_t 转化率

y_e 反应器浓度所允许的最大误差

z 分子扩散距离

希腊字母

α 孔数自相似比, 颗粒浓度 (第 6 章);

Feigenbaum 第二常数, $\alpha = 2.50290780 \dots$ (第 7 章);

α 热膨胀系数 (第 7 章)

β 形状系数;

长度自相似比;

渗流临界指数;

功率谱指数 (第 6 章);

组合参数 (第 5、8 章)

γ 孔径自相似比;

渗流参数;

表面张力, $N \cdot m^{-1}$ (第 6 章);

颗粒与流体的密度比值 $\gamma = d_p / d_f$;

无量纲活化能, $\gamma = E / (RT_0)$ (第 8 章)

Δ 增量

ΔH 反应热, $kJ \cdot mol^{-1}$

ΔL 网络间隔

Δp 压力降, Pa

Δr 分子在距离两端之间自由飞行的距离

ΔS_d 比表面积的增量, $m^2 \cdot g^{-1}$

ΔS_i 反应可及表面积的增量, m^2

$\Delta S_o(\delta)$ 实际起作用的表观面积增量, m^2

Δz 分子沿着孔轴分形曲线扩散的一段距离

δ 覆盖体的长度, m;

反应可及半径, m;

修正系数;

涡旋尺寸, m (第 6 章);

Feigenbaum 第一常数, $\delta = 4.669201660910299 \dots$;

无量纲热相似数 (第 8 章)

δ_A 有效分子直径

δ_p 微孔的标度

δ^* 分形表面有效性因子

ϵ 单位质量流体能量耗散率, $m^2 \cdot s^{-3}$;

摄动参数 (第 6、7 章)

ϵ_s 截面平均固含率

ζ 涡旋能级参数, m^{-2} ;

无量纲浓度, $\zeta = \frac{c}{c_0}$ (第 8 章)

η 内外管径比;

雅可比矩阵 (Jacobi) 特征值 (第 5、7、8 章)

- η_s 分形表面的有效性因子
 θ 角度;
 散射角;
 标度指数;
 单位体积中孔的分布 (第 5 章);
 无量纲温度, $\theta = T/T_0$ (第 8 章)
 θ_k 渗透率非均质谱指数
 θ_p 孔隙度非均质谱指数
 $\theta(x)$ Heaviside 函数
 λ 标度因子;
 射线波长;
 Lyaporov 指数 (第 8 章);
 相似比;
 Bessel 函数的阶数 (第 6 章)
 λ_A 液相中反应物 A 的活度系数
 λ_B 液相中反应物 B 的活度系数
 $\lambda_{\#}$ 液相中过渡态络合物的活度系数
 λ_i 入射光波长, m
 λ_h 流体热传导系数, $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (第 7、8 章)
 μ 质量;
 动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 标度指数 (第 6 章);
 控制参量 (第 7 章)
 μ_t 流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 ν 特征指数;
 运动黏度, $\nu = \mu/\rho_l$, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 ξ 参数, $\xi = k/n$ (第 3 章);
 关联长度
 ρ 质量密度, 液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ρ_p 颗粒密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ρ_{Bm} B 类物质平均密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
 ρ_l 流体的密度
 σ 介质中的直流电导率; 表面能
 σ_r^2 平均位移方差
 τ U_0/d_p (第 7 章);
 无量纲温度, $\theta = \frac{T}{T_0}$ (第 8 章)
 τ 无量纲时间, $\tau = \frac{qt}{V} = \frac{t}{t_r}$ (第 8 章);
 多重分形质量指数;
 指数;
 涡旋衰减系数
 τ_c 特征时间, $\tau_c = d_p/U_0$ (第 7 章)
 τ_l 流化床中的无量纲时间, $\tau_l = tU_0/d_p$ (第 7 章)
- τ^p 孔通道的局域弯曲率, 即弯曲因子
 $\tau(q)$ 标度指数, 又称为质量指数 (第 3 章)
 ν 排除体积参数, m^3 , 为温度 T 的函数 $\nu(T)$, 且为正值
 Φ 参比模量
 Φ_v 体积流率, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 x_q q 阶矩
 ϕ 孔隙度 (第 5 章);
 无量纲组合参数 (第 8 章)
 ϕ_{fr} 分形孔通道 Thiele 模数
 ϕ_{fr}^p 具有相似支路的分形孔通道 Thiele 模数
 ϕ_g 气泡分率 (第 7 章)
 ϕ_m 平均峰高 (第 7 章)
 ϕ_r 相互作用修正系数 (第 6 章)
 Ψ 流函数
 ψ 常数, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (第 8 章)
 Ω 孔道截面积, m^2 ;
 涡量 (第 6 章)
 Ω_i 空间力
 Ω_r 相对角速度
 ω 角频率;
 角速度
 ω_c 临界角速度
 ω_i 内管转速, s^{-1}
- ### 下角标
- max 最大值
 min 最小值
 c 反应区段与未反应区段的界面; 临界值
 f 流体
 i 序列代码;
 初始状态
 j 序列代码
 k 序列代码
 p 颗粒
 r 径向
 s 颗粒表面;
 稳定态
 x x 方向
 y y 方向
 z z 方向;
 渗透区段与反应区段的界面
 θ 切向