

微纳流动 理论及应用

林建忠 包福兵 张凯 王瑞金 著

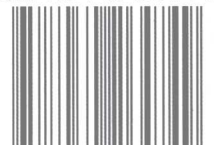


科学出版社

www.sciencep.com

(O-3773.0101)

ISBN 978-7-03-026474-9



9 787030 264749 >

销售分类建议：高等力学

定 价：59.00 元

微纳流动理论及应用

林建忠 包福兵 张 凯 王瑞金 著

科学出版社

北 京

035/2
L509

内 容 简 介

本书介绍了微纳流动的实际应用以及相关的理论基础;分析了用于微纳流动研究的基本方程——Burnett 方程及该方程的稳定性特征;探讨了微纳流动中 Couette 流、Poiseuille 流和后向台阶流的流动与传热特性;研究了压力和电渗驱动下微纳流动的扩散、混合和分离;叙述了各类微流混合器的特性并探讨了高效微流混合器的设计和模拟方法。

本书可供力学、机械、材料、化学化工、工程热物理、生物、医学、仪器仪表及相关专业的科研人员、工程技术人员、教师以及研究生和高年级大学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

微纳流动理论及应用/林建忠等著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-026474-9

I. 微… II. 林… III. 纳米材料—应用—流场—研究 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 012958 号

责任编辑: 刘延辉 鄢德平 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—2 000 字数: 345 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近二十多年来,自然科学和工程技术发展的一个重要趋势是朝微型化迈进,微纳机电系统和微全分析系统是其中的两个典型.微纳机电系统可以完成大尺度机电系统所不能完成的任务,也可嵌入大尺度系统中,把自动化、智能化和可靠性提高到一个新的水平,该系统已在工业、国防、航天航空、医学、生物工程、农业和家庭服务等领域获得了重要应用并有着广阔的应用前景.微全分析系统是目前分析仪器发展的重要方向,它的出现不仅可以使珍贵的生物试样与试剂消耗大大降低,而且使分析速度大大提高,费用大大下降.微全分析系统以微管道网络为结构特征,可对微量流体进行采样、稀释、反应、分离、检测等复杂和精确的操作,因而有广泛的应用前景,如可用于稀有细胞的筛选、信息核糖核酸的提取和纯化、基因测序、单细胞分析、蛋白质结晶、药物检测等.

然而,无论是微纳机电系统还是微全分析系统,都与流体在微纳通道中的流动密切相关.在以往的微纳机电系统和微全分析系统发展过程中,过分强调了加工技术的重要性,而对其内部的非常规的物理机制重视不够,导致加工技术的发展超前于非常规物理现象的研究,使得这些系统的设计、制造、优化和应用水平的提高受到限制.而微纳通道流场中流体的运动便是非常规物理现象中一个非常关键的问题,是其他学科发展的基础.

微纳通道流动中会出现明显不同于常规尺度下的流动现象,一是当通道特征尺寸和流体分子平均自由程相当时,流体连续介质假定不再成立,此时要考虑滑移现象、热蠕动效应、稀薄效应、黏性加热效应、可压缩性、分子间作用力和一些其他的非常规效应;二是在微纳通道中,作用在流体上的各种力的相对重要性发生了变化;三是由于微效应,微纳通道中的流体扩散与混合机理与常规尺度下的情形不同,而控制流体的扩散与混合对有效控制化学分析、生物分析的速度和效率以及微纳机电器件的设计和制造具有重要意义.目前,微纳流动问题已成为国际性研究前沿,对其研究不仅有学术价值,而且对相关的应用领域具有指导意义.

近十年来,作者与课题组成员一同对微纳流动进行了系统、深入的研究,给出了描述微纳流动的不同种类 Burnett 方程的稳定性分析和失稳的临界 Knudsen 数;对 Burnett 方程结合高阶滑移边界条件,用松弛方法获得了最高 Knudsen 数情况下 Couette 流的收敛结果.提出了边界层等效厚度概念,使得可将常规尺度流动的理论用于微纳流动,并得到了硅和不锈钢两种材料的等效厚度.采用改变通道形状和壁面电荷分布的方法进行微纳通道形状和电荷分布的优化,从而减弱乃至消除弯

曲微纳通道中内外壁差异导致的弯道效应, 提高电泳分离的分辨率和效果. 摆脱了扩散混合常规的研究方法, 采用非线性动力学中混沌混合的概念, 确定了具有最佳混合效果的以 Smale 马蹄变换为基础设计的螺旋式混合器. 数值模拟及分析了压力和电渗驱动下微纳流动中扩散、混合、分离的影响因素及其相互关系. 本书是以上成果的系统总结.

在本书即将出版之际, 作者感谢国家自然科学基金重大项目“微流控分析系统扩散与流体力学的基础研究”(No.20299030) 的资助. 感谢聂德明、李志华、刘演华等, 他们与作者一起取得了上述成果. 感谢科学出版社在本书出版过程中的全力支持与帮助.

欢迎读者对本书提出宝贵意见与批评指正.

作 者

2009 年 11 月于中国计量学院

常用基本符号说明

英文符号	量的含义
C_p	定压比热容
C_V	定容比热容
c	音速、分子速度
C	浓度
d	分子直径
D	扩散系数
e	无散对称速度梯度张量
e_t	单位质量的总能
f	速度分布函数, 摩擦阻力系数
h	对流传热系数
H	通道高度
k	曲率
k_B	Boltzmann 常数
L	通道尺度, 特征尺度, 水力半径
L_s	滑移长度
m	分子质量
n	分子数密度
p	压力
p'	压力偏离线性分布的程度
q_i	热通量
R	气体常数
T	温度
T_s	壁面上的跃变温度
T_λ	距离壁面一个平均分子自由程的温度
u	流体速度, x 方向速度
u_f	壁面上的气体速度
u_s	壁面上的滑移速度
u_w	壁面移动速度
u_λ	距离壁面一个平均分子自由程的速度
U	特征速度
v	流体速度, y 方向速度
V	速度矢量

希腊字母

 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ α β γ κ λ μ Π ρ σ_{ij} σ_T σ_v τ θ_i, ω_i $\tilde{\theta}_i, \tilde{\omega}_i$ Ω_i

量的含义

Burnett 方程系数

扰动增长系数

扰动扩散系数

比热比

导热系数

分子平均自由程, 第二黏性系数

动力黏度

压力比

密度

应力张量

温度适应系数

切向动量适应系数

应力, 弛豫时间

Burnett 方程的系数

Woods 方程的系数

BGK Burnett 方程里的系数

量纲为一的参数

 Dn Ec Kn M Ma Nu Pe Po Pr Re Sc

迪恩 (Dean) 数

埃克 (Eckert) 数

克努森 (Knudsen) 数

马赫 (Mach) 数

麦森 (Mason) 数

努塞尔 (Nusselt) 数

佩克莱 (Peclet) 数

泊肃叶 (Poiseuille) 数

普朗特 (Prandtl) 数

雷诺 (Reynolds) 数

施密特 (Schmidt) 数

下角符号

 i m o r s w

含义

入射, 入口

平均

出口

反射

滑移

壁面

目 录

前言

常用基本符号说明

第一章 绪论	1
1.1 微纳尺度通道流动的应用	1
1.1.1 微机电系统	1
1.1.2 纳机电系统	3
1.1.3 微全分析系统	5
1.2 研究微纳尺度流动的重要性	8
1.3 微纳尺度流动的特点	10
参考文献	13
第二章 微纳尺度流动基础	17
2.1 微纳尺度流动的流场参数	17
2.1.1 Knudsen 数	17
2.1.2 流动区域的划分	18
2.1.3 其他一些重要参数	18
2.2 微纳尺度流动的基本方程	19
2.2.1 连续区和滑移区流体运动基本方程	19
2.2.2 低 Kn 数过渡区流体运动基本方程	21
2.2.3 对流扩散的控制方程	22
2.2.4 电渗驱动流体运动基本方程	22
2.2.5 边界条件	22
2.3 微纳尺度流动的数值模拟	29
2.3.1 基于连续介质假设的方法	30
2.3.2 基于分子模拟的方法	40
2.3.3 格子 Boltzmann 方法	44
2.4 微纳尺度流动的实验测试技术	50
2.4.1 影响微纳尺度流场实验的因素	50
2.4.2 流动参数测量	52

2.4.3 流动显示技术·····	54
参考文献·····	55
第三章 Burnett 方程及稳定性分析 ·····	60
3.1 Burnett 方程·····	60
3.2 二维增广 Burnett 方程·····	61
3.3 其他类型 Burnett 方程·····	65
3.3.1 原始 Burnett 方程·····	66
3.3.2 Woods 方程·····	66
3.3.3 BGK Burnett 方程·····	66
3.4 Burnett 方程的稳定性分析·····	67
3.4.1 研究综述·····	67
3.4.2 常规 Burnett 方程的稳定性分析·····	67
3.4.3 增广 Burnett 方程的稳定性分析·····	72
3.4.4 Woods 方程的稳定性分析·····	75
3.4.5 BGK Burnett 方程的稳定性分析·····	77
附录·····	79
参考文献·····	80
第四章 Couette 流及圆管流 ·····	83
4.1 滑移边界条件·····	83
4.1.1 滑移边界条件表达式·····	85
4.1.2 切向动量适应系数·····	86
4.2 Couette 流的方程和边界条件·····	87
4.2.1 控制方程·····	88
4.2.2 边界条件·····	90
4.3 Couette 流方程的求解和程序验证·····	93
4.3.1 方程求解·····	93
4.3.2 求解 Burnett 方程和用 IP 方法计算结果的比较·····	95
4.4 Couette 流动和传热特性·····	98
4.4.1 基本物理量的分布·····	98
4.4.2 马赫数对流场的影响·····	101
4.5 圆管流场及等效厚度·····	103
4.5.1 基本方程·····	104
4.5.2 黏性系数公式·····	104

4.5.3 计算方法	106
4.5.4 计算结果与讨论	106
4.5.5 等效厚度	110
参考文献	111
第五章 Poiseuille 流及后向台阶流与空腔流	115
5.1 Burnett 方程的求解	115
5.1.1 求解方法	115
5.1.2 源项的处理	116
5.1.3 边界条件	117
5.1.4 松弛方法	118
5.2 二维 Poiseuille 流动和传热模拟	119
5.2.1 程序的验证	120
5.2.2 与其他方法所得结果的比较	123
5.2.3 入口与壁面温度一致时的结果	126
5.2.4 入口与壁面温度不一致时的结果	130
5.3 后向台阶流动的模拟	133
5.3.1 与其他方法的比较	134
5.3.2 后向台阶流动特性	136
5.3.3 不同压力比的影响	138
5.3.4 不同 Kn 数的影响	140
5.3.5 不同台阶比的影响	141
5.4 三维空腔流动的模拟	143
5.4.1 方程及求解	143
5.4.2 计算结果及分析	145
参考文献	150
第六章 压力驱动下微流动的扩散、混合和分离	153
6.1 概述	153
6.1.1 微通道内物质扩散理论和数值模拟基本方法	154
6.1.2 微通道内物质扩散的实验研究方法	156
6.1.3 扩散、混合、分离程度的衡量指标	161
6.2 压力驱动下微流动的扩散	164
6.2.1 二维微通道中横向扩散	164
6.2.2 三维矩形微通道的横向扩散	171

6.3 压力驱动下微流动的混合	174
6.3.1 二维弯曲通道的流体混合	177
6.3.2 三维弯曲通道的流体混合	178
6.4 压力驱动下微流动的分离	180
6.4.1 弯道与分离的关系	180
6.4.2 三维矩形截面弯道中流体的分离	180
参考文献	190
第七章 电渗驱动下微流动的扩散、混合和分离	193
7.1 概述	193
7.1.1 电渗流产生的机理	193
7.1.2 电渗流特点	196
7.1.3 控制方程	196
7.1.4 边界条件	198
7.1.5 离散方法	199
7.2 电渗驱动下微流动的扩散	200
7.2.1 毛细管电泳通道接管对流扩散的理论研究	200
7.2.2 毛细管电泳通道接管流动的数值模拟	205
7.3 电渗驱动下微流动的混合	210
7.3.1 微流动混合研究状况	210
7.3.2 控制方程	211
7.3.3 边界条件	213
7.3.4 计算结果及讨论	213
7.4 电渗驱动弯道流中微流动的混合	217
7.4.1 基本参数	217
7.4.2 计算结果及讨论	218
7.5 电渗驱动下微流动的分离及弯道效应的消除	224
7.5.1 微流动分离及弯道效应	224
7.5.2 弯道效应的数学模型	225
7.5.3 弯道效应的显示	225
7.5.4 消除弯道效应的新方法	228
7.5.5 最优化设计	229
7.5.6 结果分析	229
参考文献	234

第八章 微流混合器	239
8.1 概述	239
8.1.1 微流混合器的应用与性能要求	239
8.1.2 微流混合器的分类	239
8.2 衡量混合效果的指标	251
8.2.1 浓度方差指标	251
8.2.2 Lyapunov 混沌指标	252
8.2.3 图像中示踪粒子密度指标	253
8.2.4 CCD 图像直接计算混合效率	253
8.3 混沌混合理论	254
8.3.1 粒子轨道	254
8.3.2 各态经历理论	255
8.3.3 关联衰减	256
8.3.4 映射	258
8.4 螺旋式微混合器及其流场的数值模拟	260
8.4.1 螺旋式结构的分层作用	260
8.4.2 Re 数与混合效果关系	262
8.4.3 不同通道结构的混合效果	263
8.5 磁性微混合器	263
8.5.1 磁流体的制备	264
8.5.2 旋转磁场下磁性流体的动力学特性	267
8.5.3 磁性微混合器的原理和性能分析	268
参考文献	270

第一章 绪 论

随着科技的发展,微纳尺度通道内的流动问题越来越普遍,研究对象的微型化是近二十年来自然科学和工程技术发展的一个重要趋势,本章首先介绍微纳尺度通道流动中最典型的应用.与常规尺度通道内的流动问题相比,微纳尺度通道内的流动有其特殊的性质,本章接着介绍微纳尺度通道内流动的特点.

1.1 微纳尺度通道流动的应用

关于“微通道”的概念,著名物理学家 Feynman 于 1959 年的美国物理学年会上有过一个经典的描述:“There's plenty of room at the bottom”.在这个 plenty of room 里大有文章可做.

1.1.1 微机电系统

Feynman 在 1959 年的年会上还预言了微型机械将起的作用,并认为制造技术将沿两个途径发展,一是 top-down 的从宏观到微观的途径;另一是 bottom-up 的从最小构造模块的分子开始进行物质构筑的途径.如今, Feynman 的这两个构想已成为现实^[1].

1. 定义

微型化是当今科技发展的一个重要特征^[2-4],微机电系统 (micro electro mechanical systems, MEMS) 是其中的一个典型例子. MEMS 是指基于集成电路工艺设计制造并集电子元件与机械器件于一体的微小系统^[3].但是,目前国际上对 MEMS 还没有一个统一的定义,美国学者将 MEMS 定义为由电子和机械元件组成的集成微器件和微系统,是采用和集成电路兼容的工艺所制造且可批量生产,能将计算、传感和执行融为一体从而改变感知和控制自然世界的系统, MEMS 的尺度介于微米和毫米之间.日本学者将 MEMS 定义为由只有几毫米大小的功能元件组成、能执行复杂和细微工作的系统.欧洲学者将 MEMS 定义为具有微米级结构的产品,并具有微结构形状所能提供的技术功能.而中国学者将 MEMS 定义为是一种由微机械和微电子组成的装置,其中微机械被微电子所控制,大多数情况下含有微型传感器,可由微加工技术和集成电路工艺批量制造.

2. 应用

MEMS 已在工业、国防、航天航空、医学、生物工程、农业和家庭服务等领域获得了重要应用。如仅有微米级的小加速度计已经用于控制汽车安全气囊系统的展开; 位于导尿管顶端比针尖还小的微型压力传感器用于病人的导尿; 微制动器移动扫描电子显微镜的探针用于单原子成像; 由微流体网络组成的新型生物学活性测定装置用于药物成形递送等^[5]。作为典型的 MEMS 系统, 图 1.1.1 是一种微型马达结构图。

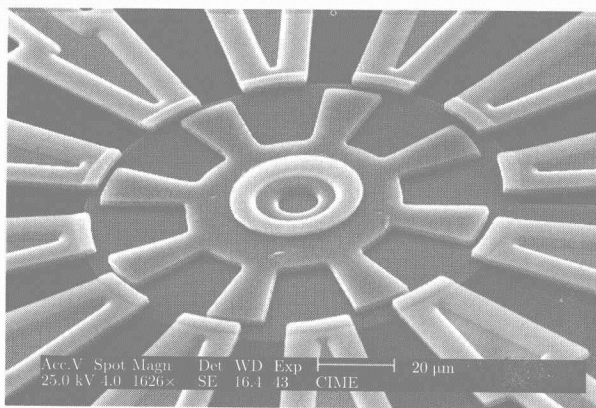


图 1.1.1 微型马达示意图

MEMS 发展的目标在于通过微型化、集成化来探索 and 开发具有新原理、新功能的原件和系统。MEMS 可以完成大尺度机电系统所不能完成的任务, 也可嵌入大尺寸系统中, 把自动化、智能化和可靠性提高到一个新的水平。21 世纪 MEMS 将逐步从实验室走向实用化, 并且将对工农业、信息、环境、生物工程、医疗、空间技术、国防和科学产生重大影响。

3. 特点

MEMS 融电子和机械元件于一体, 有很多优良的性能和特点^[3]:

(1) 微型化。MEMS 体积小、重量轻、能耗小、惯性小、谐振频率高、响应时间短。

(2) 便于取材。MEMS 以硅材料为主, 其机电性能优良, 且地球上的含量十分丰富。

(3) 可批量生产。利用微电子生产的设备和技术, 可以在一个硅片上加工出成百上千个微型机电元件乃至数个完整的 MEMS。

(4) 集成化。可以把不同功能、不同敏感方向或致动方向的多个传感器或执行器集成一体或形成微传感阵列、微执行阵列, 甚至可以具有信号获取、处理和控制

等功能。

(5) 综合性. 可以广泛利用物理、化学和生物原理, 如光电、光导、压阻、压电、霍尔效应等原理。

1.1.2 纳机电系统

纳机电系统 (nano electro mechanical systems, NEMS) 是 20 世纪 90 年代末提出的一个新概念, 是继 MEMS 后在系统特征尺寸和效应上具有纳米技术特点的一类超小型机电一体系统^[6-8]。NEMS 一般指特征尺寸介于亚纳米和百纳米之间, 以纳米级结构所产生的量子效应、界面效应和纳米尺度效应为工作特征的器件和系统。也可将 NEMS 视为纳米尺度上的机械设备、电子器件、计算机和传感器, 是 MEMS 在纳米尺度上的再现。图 1.1.2 给出了 MEMS 和 NEMS 系统的特征尺度的对比。

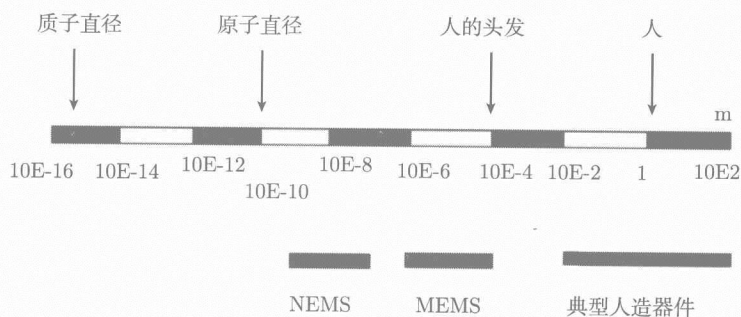


图 1.1.2 MEMS 和 NEMS 的特征尺度

1. NEMS 与 MEMS 的区别

NEMS 与 MEMS 有很大区别。首先, NEMS 器件可以提供很多 MEMS 器件不能提供的特性和功能, 例如超高频、低能耗、高灵敏度、对表面质量和吸附性的超强的控制能力以及在纳米尺度上的有效驱动方式。但是, 在小尺度下产生的一些新的物理特性将影响 NEMS 器件的操作方式和制造手段。与 MEMS 相比, NEMS 对微加工技术提出了更高的要求, 研究的材料范围更宽, 加工过程的空间分辨率要求更高。

2. NEMS 制造途径

NEMS 有两种制造途径, 一是从最小构造模块的分子开始进行物质构筑的途径, 如采用纳米光刻技术已可获得 10nm 线宽的微槽道^[9]。但该方法的局限性是尺寸愈小, 成本愈高, 偏差愈难维持。另一途径是从宏观到微观的途径, 即采用分子、原子组装技术, 借助分子、原子内的作用力, 把具有特定物理化学性质的功能分子、

原子,精细地组成纳米尺度的分子线、膜和其他结构,再由纳米结构和功能单元集成成为纳机电系统.这种制造技术反映了纳米技术的一种理念,即从原子和分子的层次上设计、组装材料、器件和系统,是一种很有前途的制造技术,但目前还只是处于实验室研究阶段.

近几年来,随着纳米技术的飞速发展,国际上出现了多种纳米器件. Koumura 等^[10] 采用紫外光或系统温度改变来激发产生四个不连续异构化步骤,成功制做了可进行重复性单方向 360° 转动的分子马达. Montemagno 研究小组研制出的一种生物分子电机如图 1.1.3 所示^[11,12],该电机由 1 个三磷酸腺苷酶分子、1 个金属镍制成的桨片(直径 150 nm,长 750 nm)和 1 个金属镍柱体(直径 80 nm,高 200 nm)组成,平均速度可达 4.8 r/s,运行时间长达 40 分钟至 2.5 小时. 2002 年,美国加州大学研制出的分子发动机,整台设备直径 11nm、高 11nm,可带动比自身大十几倍的物体,生物分子电机为进一步研制有机或无机的智能纳系统创造了条件. 2003 年, Berkeley 大学研制出世界上最小的人造发动机,其宽度仅有 500nm^[13]. Wang^[14] 利用多壁纳米碳管研制出纳谐振器,通过其共振频率的变化可称出 30fg(1fg= 10^{-15} g) 的碳微粒的质量,这种谐振器可作为分子秤检测分子或细菌的质量. 2004 年, Yamazaki 和 Namatsu^[15] 演示了在 10nm 的小球上刻画的立体三维世界地图. Ekinci 等^[16] 首次研制了尺度为 100nm 的 SiC-NEMS 谐振器

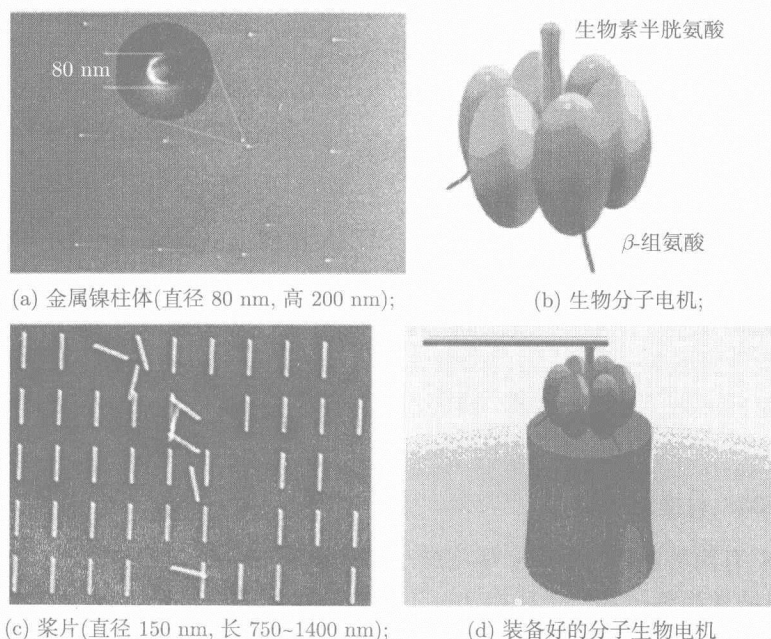


图 1.1.3 生物分子电机示意图