



纳米颗粒两相流体动力学

林建忠 于明州 林培锋 刘演华 著



科学出版社

纳米颗粒两相流体动力学

林建忠 于明州 著
林培锋 刘演华

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对纳米颗粒两相流进行了系统的论述,内容包括纳米颗粒两相流的普遍性、特殊性、复杂性、研究进展以及基本研究方法;求解纳米颗粒通用动力学方程的泰勒展开矩方法及该方法在计算精度与计算效率方面的优势;混合层、平面射流和圆射流场中纳米颗粒分布的演变;矩形槽道和圆管流场中纳米颗粒的输运和沉积特性;汽车尾气纳米颗粒的生成与扩散特性;燃烧法生成二氧化钛纳米凝并体颗粒;非稀相及双峰直径分布纳米颗粒的布朗凝并;具有分形结构的纳米颗粒凝并体系统。

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本科生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

纳米颗粒两相流体动力学/林建忠等著. —北京:科学出版社, 2013. 6
ISBN 978-7-03-037651-0

I. ①纳… II. ①林… III. ①纳米材料-超微粒子-两相流动-流体动力学
IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 116359 号

责任编辑:余 丁 张艳芬 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:25 1/4

字数:493 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

纳米颗粒两相流普遍存在于自然界中,并在材料、工程热物理、化工、轻工业、药品与医疗、食品与饮料、制冷等领域有着广泛的应用。大气污染物中含有大量的纳米颗粒。在气相燃烧合成纳米颗粒和以纳米团簇或单体颗粒为基体的纳米材料制备中,凝并体纳米颗粒的结构、尺度、化学成分组成和分散程度的设计与纳米颗粒两相流密切相关。在液体中添加纳米颗粒已成为增强液体对流换热系数的有效手段。纳米颗粒更容易被人吸入肺部并沉积在肺泡上,该过程涉及纳米颗粒在远离沉积表面的对流传输以及近沉积表面的扩散吸附。利用纳米颗粒可以进行细胞分离,以便在肿瘤早期血液中检查出癌细胞,实现癌症早期诊断和治疗。

纳米颗粒两相流有着与大尺度颗粒两相流所不同的特性。首先是小尺度效应,除 Stokes 力外,纳米颗粒两相流还必须考虑大尺度颗粒通常忽略的 London-van der Waals 力、屏蔽静电力、布朗运动导致的脉动力等;周围气体分子的离散效应对颗粒的动力学特性也有较大影响。其次是跨尺度效应,纳米颗粒运动介于分子运动理论和连续介质理论之间,研究时往往要把微观机制下的物理变化体现在宏观量的表达式上。纳米颗粒两相流场中既有大尺度的流场信息,也有小尺度的颗粒信息,流场演变、颗粒碰撞和相变三者的弛豫时间存在较大的跨度。最后是存在相变及尺度变化,纳米颗粒两相流中气-固或气-液转换、热泳或电导致的颗粒迁移、湍流和布朗运动导致的颗粒凝并、由异质性凝结或颗粒表面化学反应所导致的颗粒体积增长、流场湍动所导致的颗粒破碎、颗粒在壁面的沉积等,都涉及颗粒的相变和颗粒尺度的变化。

纳米颗粒两相流的特性决定了对它研究的复杂性。纳米颗粒运动的理论模型介于分子动力学模型和连续介质模型之间,模型尚不成熟。多种因素对颗粒运动产生制约,尤其是颗粒布朗运动和湍流场脉动力对颗粒的作用同等重要时,问题将变得异常复杂。纳米颗粒两相流的演变过程往往是力学和化学的综合过程,是多场耦合、多组分、多尺度问题。颗粒的通用动力学方程是高阶的微分积分方程,而纳米颗粒又有很高的数密度,所以对纳米颗粒两相流数值模拟的难度较大。小颗粒与大尺度流场之间的大几何跨度、与颗粒相关的特征时间和与流场相关特征时间的大差异、基于质量浓度难以给出尺度谱分布信息等,都加大了实验研究的复杂性。

纳米颗粒两相流的普遍性、特殊性和复杂性,表明了对其进行研究是非常重要的。近十年来,作者与课题组成员一道对纳米颗粒两相流进行了系统、深入的

研究,本书是以上成果的总结。

在本书即将出版之际,作者感谢国家自然科学基金重点项目“超常颗粒多相流动力学模型”(No. 10632070)的资助以及国家自然科学基金重点项目“亚微米及纳米颗粒两相湍流的研究”(No. 11132008)的部分资助。感谢干富军、尹招琴、聂德明、刘淞等,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并进行批评指正。

作 者

2013年3月

中国计量学院

浙江大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 颗粒直径与密度的基本描述	1
1.2 纳米颗粒两相流的普遍性及应用	2
1.2.1 大气中的纳米颗粒	2
1.2.2 可吸入颗粒及其对人体的危害	3
1.2.3 添加纳米颗粒强化传热	3
1.2.4 纳米材料的制备	4
1.2.5 在检测和分离中的应用	5
1.3 纳米颗粒两相流的特殊性与复杂性	6
1.3.1 特殊性	6
1.3.2 复杂性	7
1.4 纳米颗粒两相流的部分研究进展	7
1.4.1 理论研究	7
1.4.2 实验研究	10
1.4.3 数值模拟	11
参考文献	14
第 2 章 纳米颗粒两相流的基本研究方法	23
2.1 颗粒运动分析方法	23
2.1.1 牛顿阻力	23
2.1.2 Stokes 阻力及其 Cunningham 修正	24
2.1.3 分子动力学理论	26
2.1.4 扩散特性分析	26
2.1.5 沉积特性分析	27
2.1.6 颗粒相对连续介质相动量方程的影响	28
2.2 颗粒通用动力学方程求解方法	30
2.2.1 矩方法	31
2.2.2 分区方法	35
2.2.3 蒙特卡罗方法	36
2.3 格子 Boltzmann 方法	37

2.3.1	简介	37
2.3.2	格子 Boltzmann 方法原理	37
2.3.3	格子模型	40
2.3.4	边界条件	41
2.3.5	格子 Boltzmann 方法在颗粒两相流中的应用	46
2.4	格子 Boltzmann-虚拟区域方法	48
2.4.1	虚拟区域方法	48
2.4.2	直接力作用方法	49
2.4.3	格子 Boltzmann-直接力作用/虚拟区域方法	50
2.5	大涡模拟方法	51
2.5.1	脉动的过滤	51
2.5.2	控制方程	52
2.5.3	常用的亚格子模型	53
	参考文献	55
第 3 章	泰勒展开矩方法及颗粒的布朗凝并	63
3.1	概述	63
3.2	理论推导	64
3.2.1	自由分子区的颗粒布朗凝并	66
3.2.2	连续介质区的颗粒凝并	68
3.2.3	近连续介质区的颗粒凝并	69
3.2.4	全区间的颗粒凝并	70
3.3	计算结果及分析	72
3.3.1	自由分子区的颗粒布朗凝并	72
3.3.2	连续介质区的颗粒布朗凝并	75
3.3.3	全区间的颗粒凝并	77
	参考文献	90
第 4 章	混合层与平面射流场中纳米颗粒分布的演变	94
4.1	混合层纳米颗粒两相流场颗粒的晶核化与凝并	94
4.1.1	基本方程	94
4.1.2	计算方法和条件	98
4.1.3	计算结果与讨论	99
4.2	平面淹没约束射流纳米颗粒两相流场的晶核化与颗粒凝并	104
4.2.1	基本方程	104
4.2.2	计算方法和条件	105
4.2.3	计算结果与讨论	106

4.3	平面射流纳米颗粒两相流场颗粒的凝并	112
4.3.1	基本方程	112
4.3.2	计算方法和条件	114
4.3.3	计算结果与讨论	115
4.4	平面淹没射流纳米颗粒两相流场颗粒的凝并与破碎	121
4.4.1	基本方程	121
4.4.2	泰勒展开矩方法的应用	123
4.4.3	方程的量纲为一化	124
4.4.4	计算方法和条件	125
4.4.5	计算结果与讨论	125
4.5	平面冲击射流纳米颗粒两相流场	132
4.5.1	基本方程	133
4.5.2	计算方法和条件	136
4.5.3	计算结果与讨论	136
	参考文献	141
第 5 章	圆射流场中纳米颗粒分布的演变	145
5.1	单个圆射流纳米颗粒两相流场颗粒的演变	145
5.1.1	基本方程和模型	145
5.1.2	计算方法和条件	148
5.1.3	计算结果与讨论	149
5.2	平行双圆射流纳米颗粒两相流场颗粒的演变	153
5.2.1	基本方程	153
5.2.2	计算结果与讨论	155
5.3	平行双圆冲击射流纳米颗粒两相流场颗粒的演变	163
5.3.1	基本方程	163
5.3.2	流场与计算参数	165
5.3.3	计算结果与讨论	166
	参考文献	174
第 6 章	矩形槽道中纳米颗粒的输运和沉积特性	177
6.1	二维槽道内纳米颗粒两相流场颗粒的演变	177
6.1.1	基本方程	177
6.1.2	计算参数和计算条件	179
6.1.3	计算结果与讨论	180
6.2	二维矩形槽道内纳米颗粒两相湍流场颗粒的演变	185
6.2.1	基本方程与表达式	187

6.2.2	计算条件和基本参数	190
6.2.3	计算结果与讨论	191
6.3	弯曲方管内纳米颗粒两相湍流场颗粒的演变	194
6.3.1	基本方程	195
6.3.2	参数定义	197
6.3.3	计算方法及验证	198
6.3.4	计算结果与讨论	199
	参考文献	203
第7章	圆管中纳米颗粒的输运和沉积特性	207
7.1	直圆管中纳米颗粒两相流场颗粒的输运与沉积	207
7.1.1	主要作用力与方程	208
7.1.2	流场及计算条件	209
7.1.3	计算结果与讨论	211
7.2	直圆管中纳米颗粒两相流场颗粒的布朗凝并	220
7.2.1	流场描述	220
7.2.2	颗粒基本方程	221
7.2.3	计算结果与讨论	222
7.3	弯曲圆管中纳米颗粒两相流场颗粒的输运和沉积	228
7.3.1	控制方程	229
7.3.2	摄动解方法	231
7.3.3	沉积效率	234
7.3.4	计算结果与讨论	234
7.4	弯曲圆管中纳米颗粒两相流场颗粒的凝并与分布	243
7.4.1	基本方程	244
7.4.2	计算方法及验证	245
7.4.3	计算结果与讨论	246
7.5	旋转弯曲圆管中纳米颗粒两相流场颗粒的分布特性	253
7.5.1	控制方程	253
7.5.2	计算方法及验证	256
7.5.3	计算结果与讨论	257
	参考文献	264
第8章	汽车尾气纳米颗粒的生成与扩散	267
8.1	研究动态概述	267
8.2	二元均质晶核化相关理论	269
8.2.1	基本方程	269

8.2.2 颗粒演变的物理模型	271
8.3 计算方法及条件	274
8.3.1 泰勒展开矩方法	274
8.3.2 流场及计算条件	275
8.4 计算结果与讨论	276
8.4.1 泰勒展开矩方法计算结果验证	276
8.4.2 实验验证	280
8.4.3 瞬态分析	281
8.4.4 时均分析	282
参考文献	287
第 9 章 燃烧法生成二氧化钛纳米凝并体颗粒	291
9.1 研究动态概述	291
9.2 相关理论与方程	293
9.2.1 化学动力学理论与方程	293
9.2.2 燃烧动力学理论与方程	294
9.3 计算方法及条件	299
9.4 计算结果与讨论	300
9.4.1 燃烧流场结构及实验验证	300
9.4.2 凝并体颗粒尺度分布特性分析	302
9.4.3 凝并体内原始小颗粒动力学特性分析	305
9.4.4 凝并体形状特性分析	306
9.4.5 凝并体间的碰撞特性	308
参考文献	309
第 10 章 非稀相及双峰直径分布纳米颗粒的布朗凝并	312
10.1 非稀相纳米颗粒的布朗凝并研究概述	312
10.2 Smoluchowski 理论及其求解方法	314
10.2.1 考虑颗粒体积率情况下的渗透压力	317
10.2.2 考虑颗粒体积率时的 Stokes 阻力	320
10.2.3 单一尺度颗粒浓相系统颗粒的扩散及其颗粒碰撞频率	322
10.2.4 多颗粒尺度浓相系统颗粒的碰撞	323
10.3 非稀相纳米颗粒布朗凝并的计算结果及讨论	325
10.4 双峰直径分布纳米颗粒布朗凝并研究概述	327
10.5 双峰颗粒直径分布的矩方程	328
10.6 双峰颗粒直径分布颗粒凝并计算结果及讨论	333
10.6.1 计算参数	333

10.6.2	自由分子区双峰分布颗粒布朗凝并	334
10.6.3	近连续介质区双峰分布的颗粒布朗凝并	336
10.6.4	自由分子区和过渡区双峰分布的颗粒布朗凝并	338
10.6.5	自由分子区和近连续介质区双峰分布的布朗凝并	338
	参考文献	341
第 11 章	具有分形结构的纳米颗粒凝并体系系统	344
11.1	研究概述	344
11.1.1	颗粒形态的分形描述	345
11.1.2	凝并体的凝并及破碎	347
11.2	理论模型	348
11.2.1	自由分子区的矩方程	348
11.2.2	连续-近连续介质区的矩方程	350
11.2.3	全尺度空间的矩方程	353
11.3	计算结果及讨论	355
11.3.1	计算方法和条件	355
11.3.2	计算方法与验证	356
11.3.3	过渡区内凝并体动力学分析	356
11.3.4	自由分子区凝并体动力学分析	360
11.3.5	连续-近连续介质区动力学分析	363
11.3.6	计算效率分析	368
11.4	湍流场中的分形结构凝并体系系统	369
11.4.1	研究背景	369
11.4.2	拟单相系统控制方程	371
11.4.3	离散系统动力学分析	374
	参考文献	379
附录 1		384
附录 2		387
常用基本符号说明		389

第 1 章 绪 论

对纳米颗粒两相流的研究是多相流研究的一个分支。本章介绍颗粒直径与密度的基本描述、纳米颗粒两相流的普遍性及应用、纳米颗粒两相流的特殊性与复杂性以及纳米颗粒两相流的部分研究进展。

1.1 颗粒直径与密度的基本描述

通常根据颗粒的直径将颗粒分为三个区域：一是核模式区，又称 Aitken 区，该区内的颗粒直径小于 50nm，如光化学烟雾中的硫酸盐和硝酸盐粒子；二是积累模式区，该区内的颗粒直径介于 50nm 和 2 μm 之间，如直接燃烧生成的含碳颗粒物；三是粗模式区，该区内的颗粒直径大于 2 μm 。在不同情况下，不同直径的颗粒所占的比例也不同，图 1.1 是通常情况下空气中不同直径的颗粒所占的比例。由该图可见，核模式区的颗粒数量比其他两个区域大很多，但积累模式区内的颗粒质量则占绝对高的比例。此外，在不同行业领域中，不同直径的颗粒也有一些特殊的名称，如在工业排放标准中，把直径小于 10 μm (PM_{10})的颗粒称为粗重颗粒，小于 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$)的颗粒称为精细颗粒，小于 0.1 μm 的颗粒称为超精细颗粒，小于 0.05 μm 的颗粒称为纳米颗粒。关于纳米颗粒的定义并不统一，有的将直径为 0.1~1 μm 的颗粒称为亚微米颗粒，0.1 μm 以下的颗粒称为纳米颗粒；有的将 1 μm 以下的颗粒称为纳米颗粒；本书涉及的纳米颗粒主要是 1 μm 以下的颗粒。颗粒直径、数密度和质量密度分布是纳米颗粒两相流中最基本也是最重要的分布。

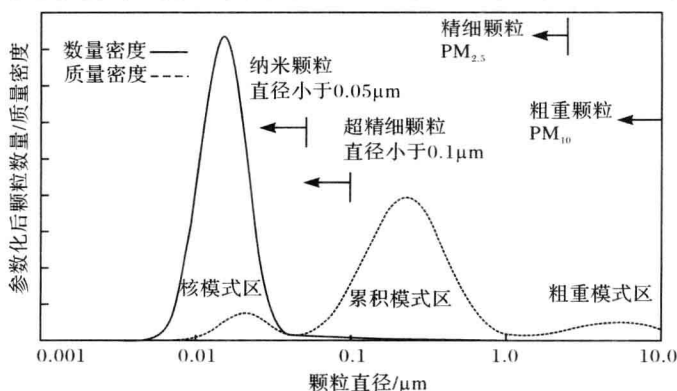


图 1.1 空气中悬浮颗粒物数量密度和质量密度分布曲线^[1]

1.2 纳米颗粒两相流的普遍性及应用

纳米颗粒两相流在自然界中极为常见。同时,纳米颗粒两相流在工业等多个领域有着广泛的应用,以下给出几种典型的情况。

1.2.1 大气中的纳米颗粒

飘浮在空气中的云、弥漫在城市中的雾和霾等都是悬浮在空气中的固体或液体颗粒,通常也称为气溶胶。气溶胶一方面能产生美丽壮观的自然景象,另一方面也带来了严重的污染。大气中的颗粒物主要由硫氧化物、氮氧化物、碳氢化合物、一氧化碳以及其他悬浮颗粒物构成。硫氧化物主要是二氧化硫这种无色有毒的气体;氮氧化物主要指一氧化氮和二氧化氮;碳氢化合物主要指有机烃类;悬浮颗粒物通常指烟、尘、雾、霾等。

大气中的颗粒物主要有自然来源和人为来源两类。

自然来源主要由以下几个因素构成:一是地面扬尘,大风吹过地面时,将地面上的沙粒、尘埃以及其他颗粒吹入空气中并悬浮着;二是海水溅出的浪,海洋中产生的海浪把海洋中的钠、镁等盐类、海洋生物排放的物质以及其尸体分解产生的物质一并卷起来带向空中;三是火山爆发的进出物,火山爆发会产生大量的二氧化碳、氯化氢、氢氟酸、二氧化硫、硫化氢等;四是天然森林火灾的燃烧物,火灾中除了会向空中排放一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、二氧化硫、醛类气体、氰化氢外,还会散发出大量的炭黑粒子、灰分以及其他燃烧分解物颗粒;五是生物界产生的颗粒物,如植物上的花粉、孢子等往往会被风或者其他动物带入空气中。

大气中颗粒物的人为来源与地球上人口数量急剧增加和工业化进程的加快相关,主要包括以下几个方面:一是燃料燃烧产生的颗粒物,人类对燃料的要求从最初的木炭到后来的煤炭、液化石油气、天然气等,来自于地下的可燃烧物由动植物尸体分解而形成,燃烧后产生二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、甲醛、多环芳香烃等有机化合物;二是生产性粉尘,如在炼铁、炼钢中会形成氧化铁、三氧化二铁、氧化钙、二氧化硅、三氧化二铝、氧化镁、氧化锰、硫和磷等粉尘进入空气中;三是汽车尾气排放,汽车在行驶中排放出的尾气含有 100 多种物质,如一氧化碳、一氧化氮、磷、苯并芘、碳烟、油雾等。

大气颗粒物对人类健康和经济发展有很大影响,直径越小的颗粒被人体吸入后,其危害性越大。此外,大气颗粒物对光的散射和吸收作用直接影响大气的能见度。所以,有效地控制大气颗粒物产生的源头以及粒径的分布具有重要的意义。

1.2.2 可吸入颗粒及其对人体的危害

以上大气颗粒中,有一部分颗粒被世界卫生组织称为可吸入颗粒,它是颗粒直径小于或等于 $10\mu\text{m}$ 颗粒的总称,记为 PM_{10} 。其中,根据颗粒直径的大小,通常又分成两类,一是粒径为 $2.5\sim 10\mu\text{m}$ 的颗粒,记为 $\text{PM}_{10-2.5}$;二是粒径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒,记为 $\text{PM}_{2.5}$ 。这两类颗粒对人体健康影响的方式和机理不同, $\text{PM}_{10-2.5}$ 颗粒能通过呼吸进入人体的呼吸道,而 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒的表面吸附大量的有毒有害物质,颗粒通过呼吸沉积在肺泡,甚至可以进入血液循环到达其他器官。

可吸入颗粒浓度的增加与人们呼吸系统疾病、心肺疾病的发病率和死亡率密切相关,目前已知的可吸入颗粒对人体健康的影响主要包括:增加重病和慢性病患者的死亡率;使呼吸系统、心脏系统疾病恶化;改变肺功能及其结构;改变免疫功能;患癌率增加。研究表明, 1m^3 空气中可吸入颗粒每增加 $10\mu\text{g}$,每日的总死亡率上升 1% ,呼吸系统疾病上升 3.4% ,心血管病上升 1.4% ,哮喘上升 3% ,肺功能下降 0.1% ^[2~4]。

可吸入颗粒被人体吸入后,对人体的危害程度主要取决于其成分、浓度和粒径。颗粒的成分是主要的致病因子,决定了疾病的种类;颗粒的浓度决定了颗粒的吸入量,浓度越高,危害就越大;颗粒的粒径决定了颗粒在呼吸道内是沉积、滞留还是被清除。一般而言,大于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒大部分滞留在鼻腔或口腔内,小于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒有 $10\%\sim 60\%$ 穿过气管后沉积在肺部,这些沉积在肺部的颗粒其粒径呈双峰值分布,峰值一是粒径为 $3\mu\text{m}$ 的颗粒,占 20% ;峰值二是粒径为 30nm 的颗粒,占 60% ,沉积在肺部的颗粒能存留数周乃至数年。 $\text{PM}_{2.5}$ 的颗粒在 PM_{10} 中占相当大的比例,其对毒性组分的富集作用明显大于 $\text{PM}_{10-2.5}$,所以 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒对健康的影响更严重。 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒在大气中存在的时间最长、输送的距离最远、影响的范围也最广。它被吸入后致病的机理大致有四种:一是进入肺后,与肺上皮细胞作用,刺激释放各种细胞因子,导致肺炎和肺纤维化^[5];二是 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒与细胞作用后,释放活性氧,氧化损伤组织细胞和遗传物质;三是 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒引起细胞增生,最后可能导致恶变;四是 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒的化学组分或活性氧直接损害遗传物质,导致癌基因激活、抑癌基因失活、遗传物质突变,乃至可能形成肺癌。

1.2.3 添加纳米颗粒强化传热

20 世纪 90 年代以来,人们开始探索利用纳米颗粒来强化传热,即把粒径小于 100nm 的金属或非金属纳米颗粒以一定方式分散到水、醇、油等传统换热介质中,制备成均匀、稳定、高导热的新型换热介质。实验研究表明,即使加入少量的纳米颗粒,换热介质也可显示出惊人的导热性,其导热系数可以比原先的流体介质高出百分之几十甚至超过百分之百。

与传统的纯液体工质或在液体中添加毫米或微米级颗粒相比,在液体中加入纳米颗粒后的换热介质有以下优点:一是导热性显著增加;二是一般情况下,纳米颗粒的沉降可以忽略不计,悬浮稳定性好,且不易产生磨损或堵塞等现象;三是在颗粒体积分数相同情况下,纳米颗粒的表面积远大于毫米或微米级颗粒的表面积,因而有助于传热;四是与单相流体相比,纳米颗粒两相流动引起的压降并无明显增加,无需增加很多的额外动力;五是所需的纳米颗粒一般不多,可以节约成本。以上优点使得纳米颗粒换热介质在车辆、航天航空、船舶、电子等领域能够满足大功率发动机、空调装置、热泵系统、超导磁体、大功率电子设备、超级计算机等设备高负荷的冷却要求。同时,在日益微型化时代,纳米颗粒换热介质对微机电系统和纳机电系统的换热和冷却能起到重要作用。

尽管已经认识到了液体中加入纳米颗粒后强化传热的事实,但是对于其机理却仍处在研究之中,目前研究得到的有关颗粒强化传热机理的要素包括颗粒本身的布朗运动、颗粒布朗运动引起的微对流、液体与固体交界面的液体层、纳米颗粒内部的热传输、纳米颗粒的团聚等。其中,颗粒的布朗运动是纳米颗粒区别于其他大颗粒的重要特征,布朗运动既加速了流场中热量的传输,又打破了流场原有的结构,减小了传热热阻,增强了流场的湍流强度,促进了换热。

1.2.4 纳米材料的制备

在气相燃烧合成纳米颗粒和以纳米团簇或单体颗粒为基体的纳米材料制备中,凝并体纳米颗粒的结构、尺度、化学成分组成和分散程度的设计与纳米颗粒两相流密切相关。纳米颗粒具有大的比表面积、活性大并具有高的扩散速率,因而用纳米粉体进行烧结时,致密化速度快还可降低烧结温度并提高力学性能。

当颗粒的尺度小到一定临界值时,就转入超顺磁性状态,在该状态下,材料具有高矫顽力、巨磁电阻等性能,因而可用于制备磁致冷、永磁材料、磁性液体、磁记录器件、磁光元件、磁存储元件及磁探测器等磁元件,磁性液体可用于动态密封、促进润滑、增进扬声器功率、增大阻尼、比重分离等。常见的磁性物质一般属于多磁区的集合体,当颗粒尺度小至无法区分其磁区时,即形成单磁区的磁性物质,所以磁性材料制成纳米颗粒或薄膜时,将成为优异的磁性材料。

纳米金属颗粒在低温下呈绝缘性,由典型的铁电体变成了顺电体,此时可用于制作导电浆料、绝缘浆料、电极、超导体、量子器件、静电屏蔽材料、压敏和非线性电阻及热电材料等。化纤制品加入金属纳米颗粒可降低静电效应。

由于每一纳米颗粒组成的原子少,表面原子处于一种不稳定状态,使其表面晶格振动的振幅较大,所以其具有较高的表面能量,这就导致纳米颗粒具有较低的熔点,再加上纳米颗粒比大颗粒更容易在较低温度下烧结,所以可成为良好的烧结促进材料。

在适当的蒸发沉积条件下,金属可得到易吸收光的黑色金属纳米颗粒,这种光吸收率大的特性可应用于红外线感测器材料。

以上材料的制备过程常涉及纳米颗粒两相流。

1.2.5 在检测和分离中的应用

实验研究表明,可以通过测定加入纳米颗粒的布朗运动来准确计量微装置中的温度分布^[6]。通过追踪颗粒布朗运动的轨迹可以测量软材料的黏弹性反应^[7]、聚合物体的表面结构^[8]以及分子马达的力学属性^[9]。

利用纳米颗粒可以进行细胞分离、细胞染色,也可制成特殊药物或新型抗体进行局部定向治疗等。利用纳米颗粒可将血样中极少量胎儿细胞分离并准确判断胎儿细胞是否有遗传缺陷。利用纳米颗粒进行细胞分离可以在肿瘤早期血液中检查出癌细胞,实现癌症早期的诊断和治疗。在某些病毒、细胞、蛋白质或纳米颗粒等的分离过程中,可以通过一些特殊的通道^[10,11](见图 1.2 和图 1.3)或施加电势^[12](见图 1.4)来限制颗粒布朗运动的方向,使其偏向于某一特定方向,从而通过颗粒布朗扩散系数的不同来实现分离。

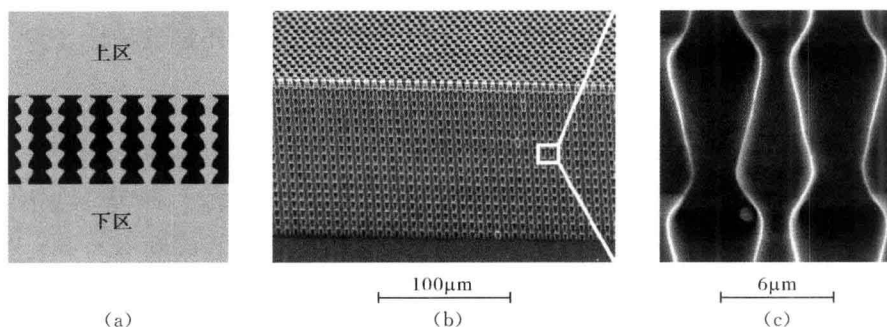


图 1.2 用以制作布朗棘轮的大孔硅胶膜结构^[10]

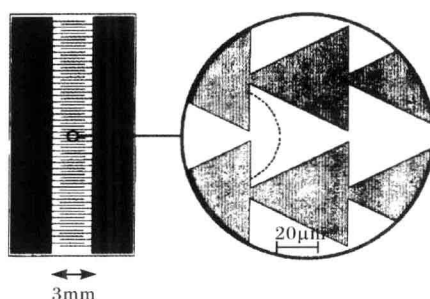


图 1.3 用以分离细胞、病毒等的特殊通道结构^[11]

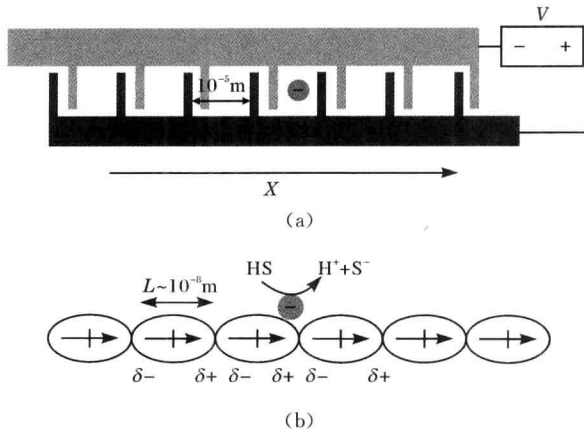


图 1.4 产生周期性但不对称电势分布的装置(L :空间周期;H:氢;S:硫)^[12]

1.3 纳米颗粒两相流的特殊性与复杂性

纳米颗粒两相流有着与微米及更大尺度颗粒两相流所不同的特性,这些特性又决定了纳米颗粒两相流的复杂性。

1.3.1 特殊性

首先是小尺度效应。在纳米颗粒两相流中,除了与大颗粒一样要考虑颗粒与流体间的拖曳力外,还必须考虑大尺度颗粒通常所忽略的 London-van der Waals 力、屏蔽静电力、布朗运动导致的脉动力等。周围气体分子的离散效应对颗粒的动力学特性也有较大影响。在纳米颗粒系统中,单个颗粒的尺度较小且存在巨大的颗粒数密度,所以通常关注的是大数目颗粒体现出的综合效应,如数密度、质量密度、尺度分散度、平均粒径、粒径方差等统计平均量。

其次是跨尺度效应。纳米颗粒运动介于分子运动理论和连续介质理论之间,研究时往往要把微观机制下的物理量变化体现在宏观量的表达式上。纳米颗粒两相流具有多尺度谱的分布特征,流场中既有大尺度的流场信息,也有小尺度的颗粒信息。就弛豫时间而言,流场演变、颗粒碰撞和相变三者存在较大的跨度。

最后是存在相变及尺度变化,纳米颗粒两相流中气-固或气-液转换(即凝结成核)、热泳或电导致的颗粒迁移、湍流和布朗运动导致的颗粒凝并、由异质性凝结或颗粒表面化学反应所导致的颗粒体积增长、流场湍动所导致的颗粒破碎、颗粒在壁面的沉积等都涉及颗粒的相变和颗粒尺度的变化。所以,纳米颗粒两相流还关注颗粒表面积浓度、颗粒系统化学组分组成、颗粒聚并体的分形维数等参数的