



博士后文库

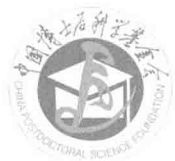
中国博士后科学基金资助出版

# 纳米流体流动与相间作用

董双岭 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 纳米流体流动与相间作用

董双岭 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书对纳米流体流动传热和两相间的相互作用进行了重点论述,内容包括纳米流体的应用背景、制备方法和整体特性,纳米流体绕圆柱和通道内流动传热的数值模拟,纳米颗粒和流体之间主要作用的阻力和布朗力的模型改进,基于温度非线性分布的有效热导率的研究,与温度梯度剪切变化和颗粒旋转相关的热泳作用方式的提出和特征分析。

本书适用于流体力学、工程热物理和生物医学等相关专业研究生和高年级本科生阅读,也可供从事热能工程和太阳能研究的科研人员与工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

纳米流体流动与相间作用/董双岭著. —北京: 科学出版社, 2016. 7  
(博士后文丛)

ISBN 978-7-03-049506-8

I. ①纳… II. ①董… III. ①纳米材料-热物理性质 IV. ①TB383.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 179309 号

责任编辑: 黄 敏 赵敬伟 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 8 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 8 1/4 插页: 4

字数: 150 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任：陈宜瑜

副主任：詹文龙 李 扬

秘书长：邱春雷

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨

贾国柱 刘 伟 卢秉恒 毛大立

权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅

张文栋 赵 路 赵晓哲 钟登华

周宪梁

## 《博士后文库》序言

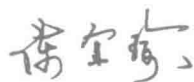
博士后制度已有一百多年的历史。世界上普遍认为，博士后研究经历不仅是博士们在取得博士学位后找到理想工作前的过渡阶段，而且也被看成是未来科学家职业生涯中必要的准备阶段。中国的博士后制度虽然起步晚，但已形成独具特色和相对独立、完善的人才培养和使用机制，成为造就高水平人才的重要途径，它已经并将继续为推进中国的科技教育事业和经济发展发挥越来越重要的作用。

中国博士后制度实施之初，国家就设立了博士后科学基金，专门资助博士后研究人员开展创新探索。与其他基金主要资助“项目”不同，博士后科学基金的资助目标是“人”，也就是通过评价博士后研究人员的创新能力给予基金资助。博士后科学基金针对博士后研究人员处于科研创新“黄金时期”的成长特点，通过竞争申请、独立使用基金，使博士后研究人员树立科研自信心，塑造独立科研人格。经过 30 年的发展，截至 2015 年底，博士后科学基金资助总额约 26.5 亿元人民币，资助博士后研究人员 5 万 3 千余人，约占博士后招收人数的 1/3。截至 2014 年底，在我国具有博士后经历的院士中，博士后科学基金资助获得者占 72.5%。博士后科学基金已成为激发博士后研究人员成才的一颗“金种子”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员取得了众多前沿的科研成果。将这些科研成果出版成书，既是对博士后研究人员创新能力的肯定，也可以激发在站博士后研究人员开展创新研究的热情，同时也可以使博士后科研成果在更广范围内传播，更好地为社会所利用，进一步提高博士后科学基金的资助效益。

中国博士后科学基金会从 2013 年起实施博士后优秀学术专著出版资助工作。经专家评审，评选出博士后优秀学术著作，中国博士后科学基金会资助出版费用。专著由科学出版社出版，统一命名为《博士后文库》。

资助出版工作是中国博士后科学基金会“十二五”期间进行基金资助改革的一项重要举措，虽然刚刚起步，但是我们对它寄予厚望。希望通过这项工作，使博士后研究人员的创新成果能够更好地服务于国家创新驱动发展战略，服务于创新型国家的建设，也希望更多的博士后研究人员借助这颗“金种子”迅速成长为国家需要的创新型、复合型、战略型人才。



中国博士后科学基金会理事长

## 序

纳米流体是近 20 年逐渐开发起来的新型功能流体。最初研究人员发现, 添加少量的纳米颗粒会产生显著增强传热的效果。早期的研究主要集中在传热冷却系统, 包括微电子器件和核反应堆系统等, 后来发现由于纳米颗粒具有特别的光、磁等性质, 还可用于太阳能集热和靶向药物治疗等专业领域。为了更好地发挥纳米流体的优异性能, 非常需要对纳米流体的流动传热过程有深入的理解和认识, 尤其是颗粒与流体之间的相互作用方式。

该书从纳米流体的应用背景和基本概念出发, 介绍了纳米流体的制备手段和基本特性, 然后展示了作者对纳米流体流动传热的数值模拟和理论建模工作, 包括给出了改进的阻力和布朗力的表达式。对于有效热导率的分析和建模, 提出与温度梯度变化相关的热泳作用方式。该书对于提高纳米流体的传热性能, 以及冷却系统和新能源的开发利用, 具有一定的理论和实际指导意义。

该书作者本科毕业于天津大学, 后被保送到北京航空航天大学国家计算流体力学实验室攻读博士学位, 后来在北京科技大学和清华大学做了两站博士后, 对科研有着浓厚的兴趣和执着的追求。该书归纳整理了作者近几年相应的一些研究成果。相信该书的出版将有助于推进纳米颗粒两相流的理论发展和工程应用。



2016 年 1 月

# 前 言

纳米科技是近 30 年逐渐发展起来的新型交叉领域。纳米微粒是指尺寸介于 1 ~ 100nm 的金属或聚合物的小颗粒,它们表现出多种独特的热、光、电、磁等性质。随着高效传热冷却技术的发展,研究者提出了一种新型的换热工质即纳米流体。纳米流体一般指纳米粒子的胶体悬浮液。目前纳米流体的添加物主要有金属和非金属纳米粒子、碳纳米管以及纳米液滴,基液主要采用水、乙二醇、油等常用的传热流体。

事实上,纳米流体介质在航空航天、能源动力、机械电子、生物医学等领域都有广阔的应用前景。具体地,纳米流体可以应用在不同的系统中,比如在发动机冷却系统、太阳能热水器、电子器件冷却、核反应堆系统和航天器热控制系统等,当然,实际应用中也会遇到一些困难,比如粒子的稳定性、悬浮粒子团聚、整体粘性增加、压降变大等都是有待解决的问题。

纳米颗粒在流体中受到的主要作用力包括阻力、布朗力、热泳力和 Saffman 升力等。由于单个颗粒在流体中的布朗运动比较复杂,颗粒与流体、多颗粒之间的相互作用,在具有温度梯度和速度剪切特征的流体中,颗粒的运动会更复杂,纳米流体会呈现出很多不同于传统固液两相流的特殊现象,比如流体中粒子团聚、布朗运动、表面吸附等都有待开展进一步深入的研究。研究纳米流体流动和传热的复杂过程以及粒子迁移、团聚等的运动学特征和动力学机理,对新的强化传热技术的开发等都具有非常重要的意义。

针对上述纳米流体研究的相关科学问题,作者近几年逐步开展了相应的研究工作,取得了一些富有特色的成果。本书整理归纳了作者近些年的研究内容,同时简要介绍了其他研究者的部分学术成果。希望本书能推动纳米流体理论和应用研究进一步发展。

本书由 6 章组成。第 1 章介绍了纳米流体的应用背景和前人的研究成果,并对相关的流体绕流和热泳现象进行了概述。第 2 章首先阐述了纳米流体的概念、制备手段和基本特性,然后对纳米流体绕流进行了数值模拟。第 3 章对通道中的纳米流体流动分别采用单相和离散相模型进行了计算,考察了粒子运动和流场变化的关系。第 4 章针对纳米流体中颗粒与流体间的主要作用方式,提出了新的阻力和布朗力的表达式,并用于钝体绕流的研究。第 5 章从广义非线性的温度分布出发,结合布朗运动效应,对纳米流体热导率的模型进行了改进。第 6 章基于流体中温度梯度的剪切变化和颗粒的旋转运动特征,提出了颗粒会受到热泳升力和热泳

张力的观点，并结合实际例子进行了验证。

作者衷心感谢中国博士后科学基金的特别资助和面上资助 (No. 2015T80082, 2014M560967) 以及国家自然科学基金青年基金项目 (No. 51406098) 的资助。作者在纳米流体相关领域的研究工作得到博士后合作导师的大力支持，作者的博士生导师帮助作者在计算流体力学方面打下了坚实的基础，在此致以深深的谢意，还有课题组的老师和研究生们，在此一并致谢。

由于时间和水平有限，书中难免有不足之处，欢迎读者专家提出宝贵意见和批评指正。

董双岭

2016 年 1 月

# 目 录

《博士后文库》序言

序

前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论               | 1  |
| 1.1 研究概述               | 1  |
| 1.1.1 纳米流体绕流的分析        | 1  |
| 1.1.2 两相间的主要作用力模型      | 6  |
| 1.1.3 纳米流体的导热模型        | 8  |
| 1.1.4 热泳和热泳作用力         | 10 |
| 1.2 数值方法               | 11 |
| 1.2.1 有限元方法在流体中的应用     | 11 |
| 1.2.2 CBS 算法           | 13 |
| 参考文献                   | 22 |
| 第 2 章 纳米流体以及绕圆柱流动的模拟   | 33 |
| 2.1 纳米流体研究简介           | 33 |
| 2.1.1 纳米流体的应用与描述       | 33 |
| 2.1.2 纳米流体的制备          | 33 |
| 2.1.3 纳米流体的基本特性        | 36 |
| 2.2 纳米流体绕圆柱流动与传热的单相流模拟 | 38 |
| 2.2.1 控制方程             | 38 |
| 2.2.2 边界条件与数值验证        | 40 |
| 2.2.3 结果与分析            | 42 |
| 2.3 本章小结               | 45 |
| 参考文献                   | 45 |
| 第 3 章 通道内纳米流体的流动传热     | 50 |
| 3.1 微通道内纳米流体流动传热的数值模拟  | 50 |
| 3.1.1 控制方程             | 50 |
| 3.1.2 边界条件与数值验证        | 50 |
| 3.1.3 结果与分析            | 51 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 3.2 通道内纳米流体两相流模型的数值模拟 .....      | 58         |
| 3.2.1 控制方程和计算方法 .....            | 58         |
| 3.2.2 结果与分析 .....                | 60         |
| 3.3 本章小结 .....                   | 65         |
| 参考文献 .....                       | 65         |
| <b>第 4 章 颗粒流体间的布朗力和阻力 .....</b>  | <b>67</b>  |
| 4.1 改进的布朗力模型及其运用 .....           | 67         |
| 4.1.1 随机力模型 .....                | 67         |
| 4.1.2 拟阻力模型 .....                | 68         |
| 4.1.3 布朗力模型的验证 .....             | 69         |
| 4.1.4 通道流动中的应用 .....             | 70         |
| 4.2 改进的阻力模型及其运用 .....            | 75         |
| 4.2.1 阻力模型 .....                 | 75         |
| 4.2.2 薄液层的粘性分布 .....             | 77         |
| 4.2.3 阻力模型的验证 .....              | 78         |
| 4.2.4 圆盘流动中的应用 .....             | 79         |
| 4.3 改进的模型在纳米流体绕流模拟中的应用 .....     | 83         |
| 4.3.1 控制方程 .....                 | 83         |
| 4.3.2 边界条件与数值验证 .....            | 84         |
| 4.3.3 结果与分析 .....                | 86         |
| 4.4 本章小结 .....                   | 95         |
| 参考文献 .....                       | 95         |
| <b>第 5 章 纳米流体热导率的改进模型 .....</b>  | <b>98</b>  |
| 5.1 粒子尺寸的影响 .....                | 98         |
| 5.2 布朗运动的影响 .....                | 99         |
| 5.3 改进模型的验证 .....                | 101        |
| 5.4 本章小结 .....                   | 103        |
| 参考文献 .....                       | 104        |
| <b>第 6 章 流体作用于粒子的热泳相关力 .....</b> | <b>106</b> |
| 6.1 作用在粒子上的热泳升力 .....            | 106        |
| 6.1.1 热泳升力的存在和表达 .....           | 106        |
| 6.1.2 热泳升力的作用特征 .....            | 109        |
| 6.2 颗粒在流体中受到的热泳张力 .....          | 110        |
| 6.2.1 热泳张力的存在和表达 .....           | 110        |

---

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 6.2.2 热泳张力的作用 ..... | 114 |
| 6.3 本章小结 .....      | 115 |
| 参考文献 .....          | 115 |
| 编后记 .....           | 117 |
| 彩图                  |     |

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究概述

### 1.1.1 纳米流体绕流的分析

纳米微粒是指尺寸介于  $1 \sim 100\text{nm}$  的金属或聚合物的小颗粒,它们表现出多种独特的热、光、电、磁等性质。纳米流体指纳米尺度粒子的胶体悬浮液,在航空航天、能源动力、机械电子、生物医学等领域都具有潜在的应用前景。在新一代高效传热冷却技术的研究等很多领域都涉及纳米流体介质的流动问题。很多研究表明纳米流体在流动过程中呈现很多特殊现象,如流体中粒子团聚、无规行走、表面吸附等都有待开展更深入的研究。研究纳米流体流动和传热的复杂过程以及粒子迁移、团聚等的运动学特征和动力学机理,对新的强化传热技术的开发等都具有非常重要的作用。

目前纳米流体的添加物主要有金属和非金属纳米粒子、碳纳米管以及纳米液滴。基液主要采用水、乙二醇、油等常用的传热流体。高热导率的金属纳米颗粒的加入增加了悬浮液混合物的热导率,从而可以提高其整体的传热性能。大量的实验研究表明,在流体中添加纳米粒子,由纳米流体替代传统的冷却剂具有一定的发展前途。Lee 等<sup>[1]</sup>研究了纳米流体的热导率特征,并分析了已提出的各种模型与实验数据之间的差异。Wang 等<sup>[2]</sup>总结了以前的研究中纳米流体热传导的主要潜在机制,给出了他们的实验数据,并认为导热系数提高的关键因素在于纳米团聚。Mahian 等<sup>[3]</sup>研究了太阳能工程中纳米流体的应用,并讨论了纳米流体对太阳能设备性能的影响。

国内外相继出版了几部关于纳米流体的专著<sup>[4,5]</sup>。宣益民和李强<sup>[4]</sup>系统地总结了国内外一些研究小组在纳米流体及其应用基础方面的研究工作,详细介绍了纳米流体流动与能量质量传递的理论和实验研究方法,重点阐述了纳米流体聚集结构与纳米粒子微运动效应对纳米流体能量质量传递过程的作用机制,并概述了纳米流体在新型高效散热冷却和节能技术等领域的应用研究进展。关于纳米粒子悬浮液的研究近期有一些综述性的文献,如关于热物理性质<sup>[6-9]</sup>,稳定性特征<sup>[10]</sup>,导热的模型<sup>[11]</sup>以及在太阳能工程中的应用<sup>[12]</sup>。Wang 和 Mujumdar<sup>[13]</sup>总结了关于各种纳米流体的传热性能的理论 and 数值研究,综合比较了不同研究者给出的导热系数、粘性系数和努塞尔数的函数关联式。Saidura 等<sup>[14]</sup>对纳米流体在不同系统中的

具体应用做了系统的介绍,如发动机冷却系统、太阳能热水器、电子器件冷却、核反应堆系统和航天器热控制系统等,同时,还指出了应用中所遇到的一些困难,比如悬浮粒子的稳定性、粒子团聚、粘性增加、压降变大等都限制了纳米流体在实际中的应用。纳米材料奇异的物理性质决定了纳米流体与微米和毫米级粒子悬浮液的不同,经典的传热学理论不再适用于纳米流体。对此,很多研究者进行了大量的研究,重点集中在纳米流体热物性方面的描述。大量实验研究表明,纳米结构可以很好地增强纳米流体的热输运。然而如 Kleinstreuer 等<sup>[15]</sup>指出的,关于导热系数的实验数据缺乏一致性,需要考虑不只有一种可能的机制,而是结合几种机制解释比较实验结果。Wang 等<sup>[16]</sup>从粒子团聚和布朗运动引起的微对流解释了纳米流体的导热机制,发现热导率随粒子尺寸的增加而减小,而与颗粒体积分数基本呈线性增长的关系。李强<sup>[17]</sup>和胡卫峰等<sup>[18]</sup>认为添加固体颗粒会引起基础流体结构的改变,从而增强悬浮液内的热量输运过程,使得热导率增加。粒子在纳米流体中作布朗运动的过程中,伴随着其所携带的热量迁移,这部分由粒子引起的能量转移很大程度上提高了纳米流体内的能量输运性能。楚广等<sup>[19]</sup>采用自悬浮定向流法制备铜纳米微粒,分析了该定向流法制备颗粒的微观结构和性能,主要针对纳米铜微晶的粒度、结构和形貌进行了研究。彭小飞等<sup>[20]</sup>测量了纳米颗粒悬浮液的热物性,考察了纳米流体有效热导率的理论模型,分析了粒子尺寸、体积分数、流体温度以及表面活性剂等因素对热导率的影响。吴信宇等<sup>[21]</sup>研究了梯形硅基芯片微通道内纳米流体的对流与传热特性,发现当流体平均温度升高时纳米流体的强化传热效果有所增强,并且根据实验数据获得了对流传热关联式。正如许多研究者指出的,纳米流体强化传热的确切机制还不是完全明晰。未来需要研究的重点之一在于找出影响纳米流体物性特征的主要参数。比如纳米流体热导率可以是一些参数的函数关联式,包括颗粒形状、颗粒团聚、颗粒分散度等。

采用纳米流体作为传热工质的微通道冷却器是一种非常有潜在应用前景的高效冷却散热技术。由于微流动系统具有尺寸小、响应快、精度高和成本低等特点,它被广泛应用于微机电系统、生物芯片、微型机器人、微型飞行器等各个方面。微流动是指流体在流动过程中至少有一个特征尺寸是在微米级或亚微米级的流动。为了表征这一特点,通常采用无量纲的克努森数( $Kn$ )来表达,它被定义为分子平均自由程与流动特征尺寸之比。当 $Kn$ 较大时,必须考虑到微流动在小尺寸时引起的特殊效应。这些特殊效应主要有:稀薄效应、不连续效应、表面优势效应、低雷诺数( $Re$ )效应、多尺度多物态效应等。相应地,微流体的驱动和控制与常规宏观流体有很大的区别<sup>[22]</sup>,这主要是由于当尺度降低时,流体的运动性质发生了改变,会引起层流效应和表面张力效应。微尺度流动还涉及增强扩散和快速热传导效应等复杂的流动和传热现象,这些改变使得适于驱动与控制宏观流体的技术不能简单地用于微流体中。实现微流控的技术手段更为多样和复杂。适当调控微尺度下液

体的流动形态,可提高微流动系统的效率,改善微流动系统的结构,从而推动微流动系统更为广泛的应用。

随着微型全分析系统的微型化、集成度以及相应设备的热流密度越来越高,对于其中微通道性能的要求也越来越高。微通道内的流动和换热特性,成为制约其发展的主要因素。因此,针对其机理的研究是目前关于微流动系统研究的主要方向之一。微流动与常规流动的另外区别在于,由于器件的几何尺寸很小,与之相接触的气体或液体产生的摩擦、静电力和粘性等影响就变得尤为重要。在微尺度流动系统中,随着流场特征尺寸的减小,传统的无滑移边界条件首先失效,而 Navier-Stokes 方程仍然适用,若流场尺寸进一步减小,流动就会远离热力学平衡状态<sup>[23]</sup>。因此,研究流体在微通道中的流动特性具有很重要的意义。

另一方面,作为流体力学中的经典问题之一,圆柱绕流过程中的复杂流动现象和机理并没有完全理解,也未建立完整的理论模型,所以很多研究人员仍在关注。尽管几何形状非常简单,圆柱绕流却能发生非定常流动分离、旋涡的脱落、边界层向湍流的转捩等流动过程,另外还涉及尾迹的不稳定性、自由剪切层与旋涡之间的相互作用等重要流动机理。由于大量的工程结构,包括高层建筑、大跨度桥梁以及海底管线等都属于类似圆柱的钝体,它们近尾迹内的旋涡交替发生脱落,会诱发非定常载荷,产生结构的振动和噪声等问题。因此研究圆柱绕流具有重要的理论价值和实际意义。

关于圆柱绕流,从冯·卡门的开创性研究到目前为止,报道的结果成千上万,包括大量的理论分析、实验测量和模拟的结果,其中有许多综述性文章,来总结该领域的研究工作<sup>[24-35]</sup>。圆柱绕流的流动状态与雷诺数  $Re = UD/\nu$  密切相关,其中  $U$  代表来流速度,  $D$  为圆柱直径,  $\nu$  表示流体的运动粘性系数。绕流尾迹的非定常特征可以用无量纲的斯托罗哈数  $St = fD/U$  来表征,其中  $f$  代表旋涡脱落频率。Norberg<sup>[36]</sup> 综合了不同的  $St-Re$  关系曲线,如图 1.1 所示。

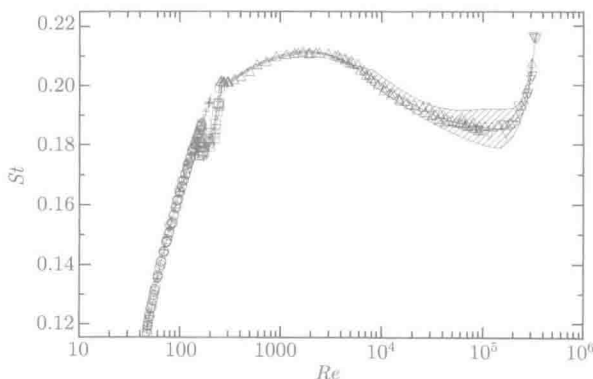


图 1.1 斯托罗哈数与雷诺数的关系<sup>[36]</sup>

随着流动雷诺数的增加,圆柱绕流的过程大体要经历八个状态<sup>[24]</sup>。从定常对称涡<sup>[37,38]</sup>、周期涡脱落<sup>[39]</sup>、三维尾迹转捩<sup>[40]</sup>、三维细尺度无序性增强<sup>[41,42]</sup>到剪切层转捩<sup>[43]</sup>、非对称再附<sup>[44,45]</sup>、对称再附<sup>[44]</sup>、边界层发生转捩进而重新建立湍流涡街<sup>[46]</sup>。关于圆柱尾迹中涡街的形成机制,大概可以用四种模式来解释<sup>[47]</sup>。它们包括上下剪切层的相互作用<sup>[48-50]</sup>,尾迹的瞬时开放<sup>[51]</sup>、二次涡的振荡<sup>[52]</sup>以及近尾迹的绝对不稳定性<sup>[31]</sup>,还有人认为涡脱落源于旋涡的相互作用<sup>[53]</sup>或是自由流的横向冲击<sup>[54]</sup>。另外,研究者总结和发展了相应的涡识别方法或准则<sup>[55-57]</sup>,比如采用压力、迹线或流线,以及基于速度梯度的 $\lambda_2$ 准则等。

关于圆柱绕流已经开展了大量的数值模拟研究<sup>[58-64]</sup>。计算的控制方程采用原始速度和压力变量的为主,离散的方法除了谱元法<sup>[65,66]</sup>、有限元法<sup>[67]</sup>,还包括有限体积法<sup>[68]</sup>等。这些数值模拟<sup>[36]</sup>不仅能得到作用力和速度等随时间变化的变量,还有助于理解流动机理,比如分析影响尾迹向三维转捩的决定因素<sup>[24]</sup>。

如上所述,绕圆柱的流动与传热是流体力学中的一个经典问题,其机理至今没有完全明晰,这个问题同时具有广泛的工程应用价值。随着流动 $Re$ 的增加,圆柱尾缘的定常附着涡开始振荡,近尾迹中涡交替向下游尾迹脱落<sup>[69]</sup>,形成卡门涡街。继续增加 $Re$ ,尾迹呈现出一些三维特征,远场尾迹中的波之间也会发生相互作用<sup>[70]</sup>。通过质量、动量和能量守恒原理,可以建立 $St$ ,  $Re$ 和尾迹几何参数间的联系<sup>[71]</sup>。Zhang等<sup>[72]</sup>研究了圆柱周围的对流传热过程。Valipour和Ghadi<sup>[73]</sup>研究了纳米流体对低 $Re$ 圆柱流动和传热的影响,详细考察了回流区长度、压力系数等流动参数与普通流体的区别,但主要是针对定常流动的情况。Sarkar等<sup>[74]</sup>考察了非定常周期流动的情况并分析了纳米粒子对流动稳定性的影响。

纳米流体在宏观上接近于流体,微观上具有明显的两相特征,即含有不连续的两相流动与传热,而又有别于传统的两相流。关于纳米流体流动的研究,已有大量的实验和数值模拟工作<sup>[75-77]</sup>。对于纳米流体的计算大体分为单相、两相模型。单相模型,即假设流体相与纳米粒子速度、温度相同,该模型常用于理论研究。考虑到实际流体与纳米粒子间存在相对速度,粒子的随机运动以及引起的微流动,可用欧拉-欧拉双流体模型,或欧拉-拉格朗日方法,即粒子运动轨迹的拉格朗日表示与流场的欧拉描述相结合的方式模拟。

很多研究者模拟了各种形状容器内的自然对流,包括方形<sup>[78]</sup>、三角形<sup>[79]</sup>、U形腔<sup>[80]</sup>内的自然对流。对于外流,Zhang等<sup>[81]</sup>用浸入边界法模拟了绕圆柱的对流换热过程。Valipour和Ghadi<sup>[82]</sup>分析了低雷诺数纳米流体定常圆柱绕流的情况,研究发现,随着纳米颗粒的加入,绕圆柱壁面的涡量、压力系数和回流区的长度都增加了。针对非定常的情况,Sarkar等进行了研究<sup>[83]</sup>,模拟发现纳米颗粒的存在具有平衡浮力的效应,从而起到稳定流动的作用。Etminan-Farooji等<sup>[84]</sup>模拟了绕方柱的传热过程,他们指出对于某些粒径,存在强化传热的颗粒浓度最佳值。然而,

他们采用的都是单相流模型,这不能真实反映粒子与流体之间的相互作用,尤其是有非定常旋涡的情况。

Rana 和 Bhargava<sup>[85]</sup> 用有限元方法计算了颗粒为球形和圆柱形纳米流体绕含热源/汇的垂直板的混合对流强化传热,并对含有不同颗粒材料的纳米流体的  $Nu$  进行了比较。Saleh 等<sup>[86]</sup> 用有限差分法计算了梯形密闭容器内纳米流体的自然对流,发现坡度陡的侧壁有利于强化传热,并给出了平均  $Nu$  数关于导热系数和粘性系数等参数的函数关系式。Lotfi 等<sup>[87]</sup> 用有限体积法对纳米流体强迫对流换热的数值研究,并对单相和两相混合模型进行了比较。Sun 等<sup>[88]</sup> 用分子动力学的方法模拟了高剪切率库埃特流中纳米流体有效导热率,并指出剪切流动有序的流体结构不是引起剪切纳米流体导热增强的原因。近年来发展迅速的格子玻尔兹曼方法被广泛应用于能源、材料、生命科学等领域。在将格子玻尔兹曼方法应用于多相流的过程中,需要考虑各相相互作用的处理。对于同时求解流体速度场和温度场的情况,一般采用双分布函数的格子玻尔兹曼热模型。Xuan 等<sup>[89]</sup> 用粒子温度分布函数,建立了纳米流体格子玻尔兹曼热模型的分布碰撞和迁移关系。Zhou 等<sup>[90]</sup> 提出一种纳米流体流动与能量传递的过程的多尺度耦合分析模型,在部分区域使用细网格多相模型,考虑纳米流体的两相特征和粒子间的相互作用,而在其他区域使用粗网格单相模型,将纳米流体视为均匀混合的单相流体。

Kondaraju 等<sup>[91]</sup> 通过欧拉 - 拉格朗日方法数值模拟了铜和氧化铝纳米流体在湍流条件下的对流传热。计算中考虑了纳米材料、纳米粒子大小和体积分数的影响。结果表明流体和粒子间的双向热交换对纳米流体强化对流换热有显著影响,而粒子扩散的影响很小。随后他们分析了初始粒子分布对纳米流体有效热导率的影响<sup>[92]</sup>,结果发现,纳米流体热导率数据的偏差主要源于多分散纳米颗粒的非均匀性。Wen 等<sup>[93]</sup> 在计算纳米粒子运动时考虑了各种作用力,包括摩擦阻力、压差阻力、布朗力、热泳力、Saffman 升力、虚拟质量力等,指出粒子的浓度沿管道横截面分布并不均匀,中心处最高向壁面逐渐降低。Tahir 和 Mital<sup>[94]</sup> 用离散相模型模拟了氧化铝 - 水纳米流体在圆管内的流动,计算得到的平均传热系数随雷诺数和体积分数的提高呈线性增加,随着粒子尺寸的增加呈抛物型减少。如同很多研究者一样,他们在计算粒子运动时,作用力使用的均是传统的阻力、布朗力和热泳力模型,这与实际有些差距。Uma 等<sup>[95]</sup> 考察了单个纳米粒子在不可压牛顿流中的布朗运动,计算结果与理论和实验符合得较好,并认为能量均分定理适用于一定低雷诺数泊肃叶流中运动的布朗粒子。Heyhat 和 Kowsary<sup>[96]</sup> 加入了由体积分数表示的纳米粒子的连续性方程,用类似单相流模型的方法计算纳米流体,考察了粒子分布不均匀对壁面剪切力和传热系数的影响。模拟结果表明,通过考虑粒子的迁移,壁面传热系数增加,而剪切力有所下降。然而在计算粒子体积分数方程时只考虑了布朗力和热泳力的影响。林晓辉等<sup>[97]</sup> 基于 Fokker-Planck 方程与流体动量方程,建立

了圆管内的两相流模型,与以往的模型相比较,该模型没有引入任何唯象参数。但对于纳米粒子之间相互作用考虑的是碰撞效应,而不是与实际符合的团聚现象。另外,他们没有计算能量方程。

### 1.1.2 两相间的主要作用力模型

公元 1827 年,英国植物学家罗伯特·布朗在显微镜下观察到花粉颗粒在水中持续进行无规则的运动<sup>[98]</sup>,后来把悬浮微粒的这种运动叫做布朗运动。后来的研究者明确地把布朗运动看作液体分子撞击微粒的结果。1905 年,爱因斯坦<sup>[99]</sup>结合扩散理论和流体力学方法,建立了布朗运动的统计理论。爱因斯坦的理论表明均方位移(MSD)随着时间呈线性增长,即  $\overline{(\Delta x)^2} = 2Dt$ ,  $D$  为粒子扩散系数。自布朗发现该无规则运动之后,经过几十年的研究,人们逐渐给出了关于它的正确的解释。到 20 世纪初,先是理论分析,然后是实验研究使得这个问题得到比较圆满的解决,并测得了阿伏加德罗常数,这间接地证实了分子的无规则热运动,也就直观地证实了分子存在的真实性。后来 Langevin<sup>[100]</sup> 从 Stokes 定律出发,给出了描述统计无规运动的“朗之万方程”,并运用“平均”和“涨落”的观点,计算了布朗粒子相对初始位置的均方位移。若用朗之万方程  $m \frac{dV}{dt} = -\alpha V + \xi(t)$  描述布朗粒子的运动,则认为粒子是在有规则力和无规布朗力的共同作用下运动的。由朗之万方程可得粒子在流体中的运动弛豫时间  $\tau_p = m/\alpha$ , 该时间代表流体粘性主导的正常扩散和粒子惯性主导的弹道扩散的分界时间尺度。理论结果表明,当运动时间小于粒子特征时间  $\tau_p$  时均方位移接近  $\overline{(\Delta x)^2} = \frac{k_B T}{m} t^2$ , 而在较大的时间范围上呈现线性增长方式  $\overline{(\Delta x)^2} = 2Dt$ , 这里  $m$  是粒子质量,  $\alpha$  是 Stokes 阻力系数。

统计力学中的能量均分定理认为,一个微观粒子的动能只与温度有关,而与其质量和大小无关。爱因斯坦曾预言,由于布朗运动过程中,微观粒子的频繁激烈碰撞会引起颗粒的运动方向和速度持续发生变化。布朗运动中颗粒的瞬时速度将无法测量,难以直接证实能量均分定理适于布朗颗粒。随着布朗运动研究的深入开展,越来越多的实验表明布朗粒子的行为与爱因斯坦最初的假设不同。之后研究者在实验室中跟踪布朗粒子的测量精度可以达到微秒和纳米的量级。科学家们也发现生物体中单元的很多基本过程可以用布朗运动来描述。事实上,布朗运动要比理想的无规则行走复杂得多,实验结果揭示了实际控制布朗运动的方程与经典的理论有偏离。鉴于布朗无规则运动的复杂性,对其进行直接的测量要求更高的时间、空间精度。Li 等<sup>[101]</sup> 首次测量出直径为  $3\mu\text{m}$  的玻璃珠在空气中做布朗运动的瞬时速度,得到的均方根速度接近  $0.5\text{mm/s}$ 。该实验证实了麦克斯韦-玻尔兹曼速度分布和能量均分定理适用于布朗运动。之后, Huang 等<sup>[102]</sup> 测得玻璃微珠在水中的瞬时速度,直径为  $1\mu\text{m}$  和  $2.5\mu\text{m}$ , 实验的时间分辨率为  $10\text{ns}$ , 空间分辨率为