



# 纳米流体能量传递 理论与应用

宣益民 李强 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

---

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 纳米流体能量传递理论与应用

宣益民 李 强 著

科学出版社

北 京

TB383  
X932

## 内 容 简 介

本书围绕纳米流体的制备方法、聚集结构、输运参数、流动与能量质量传递特性等方面内容,系统地总结了作者多年来在纳米流体及其应用基础方面的研究工作,描述了纳米流体的基本属性、流动与能量质量传递特征,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研究进展。

本书可供能源、动力、电子、航空航天、机械、化工、材料等领域从事热科学理论与应用技术的科研和技术人员,以及大专院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

纳米流体能量传递理论与应用/宣益民,李强著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-026139-7

I. 纳… II. ①宣…②李… III. 纳米材料-能量传递 IV. TB383 TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 218663 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

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>

双青印刷厂印刷

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: 16 1/4

印数: 1—2 000 字数: 313 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

纳米流体能量传递机理与应用技术研究是纳米技术的一部分,是近十年来国际热科学领域的前沿研究课题之一。研究表明,在液体中添加纳米粒子,可以有效提高液体的导热系数,强化液体的传热性能,并且不易产生磨损或堵塞等不良结果。作为一种新型的功能流体,纳米流体在能源、动力、化工、航天、航空、车辆、电子等领域具有广泛的应用前景。

由于纳米粒子的超细尺寸效应,纳米流体呈现出既不同于纯液体又有别于传统液固两相混合物的奇异的结构特征、热物性以及流动与能量传递特性,描述单一液体或传统液固两相混合物流动与能量传递过程的理论与研究方法无法适用于纳米流体,需要建立新的纳米流体能量传递理论体系与研究方法。

自 2000 年以来,该书作者及其课题组在国内率先开展了纳米流体能量传递机理的研究,先后得到了国家自然科学基金重点项目与面上项目、教育部博士点基金等项目的资助,随着研究的不断深入,取得了系统化的研究成果,受到了国内外学术界的广泛关注和认可。据笔者所知,宣益民教授是美国 *ASME Journal of Heat Transfer* 关于纳米流体领域论文的审稿人。

该书系统地总结了作者多年来在纳米流体及其应用基础方面的研究成果,详细介绍了纳米流体流动与能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。该书在纳米流体聚集结构、强化导热机理以及流动与对流换热特性等研究内容方面有许多创新之处,处于国际前沿水平。

我有幸得以先睹为快,深感内容新颖,结构严谨,科学性强。深信该书的出版必将有助于开阔从事纳米流体研究工作者和相关研究生的视野,促进纳米流体技术的开发与应用,促进我国的节能减排事业的深入开展。

值此该书即将付印之际,谨做简单介绍,很高兴地将它推荐给我国广大从事纳米流体流动与传热研究的科技工作者、教师和研究生。

西安交通大学教授  
中国科学院院士

陶文铨

2009 年 10 月于西安交通大学

## 前 言

由于科学技术的发展和能源问题的日益突出,传统的换热工质已很难满足高传热强度和微系统散热等特殊条件下的传热与冷却要求,低导热系数的换热工质已成为制约研究新一代高效传热冷却技术的主要障碍。随着纳米科学与技术的迅速发展和高效高热流密度冷却技术的迫切需求,研究人员开始探索将纳米技术应用于新型换热工质的研制,提出了纳米流体的概念,即以一定的方式和比例在液体工质中添加纳米级金属或金属氧化物粒子而形成的纳米颗粒悬浮液。纳米流体的概念一经提出,立刻引起热科学技术领域的高度关注,来自世界不同国家的一些学者开展了相应的研究工作。研究表明,在液体中添加纳米粒子,可以有效提高液体的导热系数,强化液体的传热性能,显示了纳米流体在能量传递领域具有广阔的应用前景。随着研究工作的不断深入,纳米流体的概念与应用基础研究正在逐渐推广到能源、动力、化工、航天、航空、车辆、电子等行业中许多不同的流体流动与能量质量传递过程。

由于纳米粒子在液体中受到范德瓦耳斯力、布朗力、相间阻力、重力、浮力等力的作用,粒子与粒子、粒子与液体间的相互作用非常复杂,纳米流体呈现出既不同于纯液体又有别于传统液固两相混合物的奇异的结构特征、热物性以及流动与能量传递特性,存在许多重要科学问题亟待研究,比如:①纳米粒子表面活性高、易团聚,需研究高悬浮性、高稳定性的纳米制备方法;②系统开展纳米流体热物性、流动与传热性能的实验研究是揭示纳米流体能量传递机理的前提;③纳米流体内部粒子分布特征与聚集结构对纳米流体的热物性和能量传递特性起着至关重要的影响,亟待建立纳米流体聚集结构的理论与实验研究方法;④传统的液固两相混合物导热理论不能解释纳米流体内部的热传导过程,必须建立新的理论揭示纳米流体强化导热系数机理;⑤纳米粒子微运动是影响纳米流体能量传递特性的关键因素,迫切需要建立适用于纳米流体能量传递的研究方法,尤其需要从微(介)观层次,阐述粒子与粒子、粒子与液体间的作用机制,揭示纳米流体流动与能量传递的微观机理;⑥纳米流体技术作为一种新型高效能量传递技术,可应用于众多涉及能量传递过程的领域,纳米流体应用技术的研究工作也需开展。

围绕以上纳米流体研究中的关键科学问题,作者及所在课题组通过近十年的努力,取得了一些突破性的研究进展,已建立起较为完善的纳米流体能量传递的研究方法与理论体系。本书是在归纳、整理和总结作者多年来研究工作的基础上完成的一本学术专著。同时,为了尽可能全面地反映纳米流体的研究动态,书中也介

绍了国内外其他纳米流体研究小组的研究成果。希望本书的出版能对纳米流体能量传递机理与应用技术的研究起到积极的促进作用。

本书共分7章。第1章概述了纳米流体的内涵、基本属性、体系作用力以及应用领域;第2章介绍了纳米流体的制备方法与分散技术;第3章阐述了纳米流体聚集结构的理论和实验研究方法,介绍了研究纳米粒子运动特性与纳米流体聚集结构的激光散斑方法;第4章建立了纳米流体输运参数(导热系数和黏度)的测试方法,分析了纳米粒子种类、形状、尺度、体积浓度以及温度对纳米流体输运参数的影响,并从纳米粒子改变液体结构和纳米粒子微运动两个方面分析纳米流体能量传递机理,建立了纳米流体导热系数的理论预测方法;第5章介绍了纳米流体单相流动与对流换热的实验方法和实验结果,讨论了纳米流体流动状态、纳米粒子体积份额、属性等对纳米流体流动与能量传递性能的影响,并在考虑纳米流体的两相特征及纳米粒子微运动与热扩散机理的基础上,建立了纳米流体对流换热的微扰动模型,提出了纳米流体对流换热准则方程式;进而介绍了纳米流体沸腾换热现象的实验结果及其物理机制;阐述了纳米流体中的传质现象和机理分析,介绍了纳米流体质量传递过程的扩散系数测量方法;第6章建立了描述纳米流体流动与能量传递过程的两相格子-Boltzmann模型,讨论了粒子与粒子、粒子与液体之间的作用机制,建立了纳米流体流动与能量传递的格子-Boltzmann介观研究方法和多尺度分析方法;第7章结合几个典型的纳米流体应用方向,介绍了纳米流体在一些传热传质系统中的应用基础研究概况,探讨纳米流体技术应用于实际热系统的可行性,以期建立满足诸如微机电系统、高功率密度电子、固体发光二极管和半导体激光器等高热负荷设备或系统的热控制要求的新技术。

作者在纳米流体能量传递方面的研究工作先后得到了国家自然科学基金重点项目(50436020)、面上项目(59976012、50176018、50376023)、教育部博士点基金(20020288001)等项目的资助。本书的出版得到西安交通大学陶文铨院士、东南大学施明恒教授以及南京理工大学汪信教授的热情推荐,陶文铨院士在百忙中热情地为本书作序。另外,作者课题组的吴轩老师以及研究生胡卫峰、姚正平、余凯、叶萌、赵凯、周陆军、方晓鹏、于峰等也参与了本书部分内容的研究工作。作者在此对来自各方面的支持与帮助表示衷心的感谢。

限于作者水平,本书难免有不足和不当之处,作者热切希望读者和同行专家批评指正。

宣益民 李 强

2009年10月于南京理工大学

# 目 录

## 序

## 前言

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论            | 1  |
| 1.1 纳米流体的基本概念       | 1  |
| 1.2 纳米流体的基本属性       | 4  |
| 1.2.1 粒子形状          | 5  |
| 1.2.2 粒径分布          | 5  |
| 1.2.3 纳米流体的结构       | 5  |
| 1.2.4 纳米流体的基本参数     | 6  |
| 1.3 纳米流体体系的基本作用力    | 7  |
| 1.3.1 粒子间的范德瓦耳斯力    | 7  |
| 1.3.2 粒子间的静电排斥力     | 8  |
| 1.3.3 布朗力           | 9  |
| 1.3.4 浮升力           | 10 |
| 1.3.5 相间阻力          | 10 |
| 1.4 纳米流体在热科学技术领域的应用 | 11 |
| 1.4.1 车辆散热          | 11 |
| 1.4.2 航天器热控制        | 12 |
| 1.4.3 电子仪器设备热管理     | 12 |
| 1.4.4 生物医学          | 13 |
| 1.4.5 核能系统          | 13 |
| 1.4.6 其他应用          | 13 |
| 参考文献                | 14 |
| 第 2 章 纳米流体制备方法      | 15 |
| 2.1 纳米流体的制备         | 16 |
| 2.1.1 单步法           | 16 |
| 2.1.2 两步法           | 20 |
| 2.2 纳米流体的分散方法       | 24 |
| 2.2.1 物理法分散纳米流体     | 25 |
| 2.2.2 化学法分散纳米流体     | 26 |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 2.3 纳米流体悬浮稳定性分析             | 27        |
| 参考文献                        | 31        |
| <b>第3章 纳米流体的聚集结构</b>        | <b>33</b> |
| 3.1 纳米粒子布朗运动                | 33        |
| 3.1.1 朗之万运动方程               | 34        |
| 3.1.2 纳米粒子的布朗运动模拟           | 35        |
| 3.2 纳米流体的动态结构与粒子运动特性        | 37        |
| 3.2.1 激光照射纳米流体形成散斑的理论研究     | 37        |
| 3.2.2 激光散斑法测量纳米颗粒运动速度       | 45        |
| 3.3 纳米流体的聚集模型               | 49        |
| 3.3.1 生长模型                  | 50        |
| 3.3.2 纳米流体的聚集结构模拟           | 53        |
| 3.4 纳米流体结构的分形理论分析方法         | 58        |
| 3.4.1 分形概论                  | 58        |
| 3.4.2 分维数的定义                | 60        |
| 3.4.3 纳米流体聚集结构的分形分析         | 61        |
| 3.4.4 纳米流体结构的实验研究与分析        | 65        |
| 参考文献                        | 66        |
| <b>第4章 纳米流体的输运参数</b>        | <b>68</b> |
| 4.1 纳米流体导热系数的瞬态热线测量方法       | 68        |
| 4.1.1 瞬态热线法                 | 68        |
| 4.1.2 实验系统                  | 69        |
| 4.1.3 误差分析                  | 71        |
| 4.2 纳米流体的导热系数               | 74        |
| 4.2.1 纳米粒子体积份额对纳米流体导热系数的影响  | 79        |
| 4.2.2 纳米粒子属性对纳米流体导热系数的影响    | 82        |
| 4.2.3 纳米粒子尺度对纳米流体导热系数的影响    | 84        |
| 4.2.4 纳米粒子形状对纳米流体导热系数的影响    | 85        |
| 4.2.5 温度对纳米流体导热系数的影响        | 86        |
| 4.2.6 纳米流体悬浮稳定性对纳米流体导热系数的影响 | 91        |
| 4.2.7 纳米流体导热系数实验数据分散性的讨论    | 92        |
| 4.3 纳米流体强化导热系数机理            | 93        |
| 4.3.1 纳米粒子改变基液结构            | 94        |
| 4.3.2 纳米粒子微运动强化导热系数的作用机理分析  | 98        |
| 4.4 基于布朗动力学理论的纳米流体导热系数模型    | 100       |

---

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 4.4.1        | 纳米流体导热系数的叠加原理 .....          | 101        |
| 4.4.2        | 随机过程 .....                   | 102        |
| 4.4.3        | 纳米流体的导热系数 .....              | 104        |
| 4.4.4        | 计算与分析 .....                  | 105        |
| 4.4.5        | 纳米粒子团聚与纳米流体导热系数分析 .....      | 108        |
| 4.5          | 纳米流体的黏度 .....                | 109        |
| 4.5.1        | 两相混合物的黏度 .....               | 109        |
| 4.5.2        | 纳米流体黏度的实验研究 .....            | 110        |
|              | 参考文献 .....                   | 116        |
| <b>第 5 章</b> | <b>纳米流体流动与能量传递宏观分析 .....</b> | <b>122</b> |
| 5.1          | 纳米流体流动与能量传递的基本特征与分析 .....    | 122        |
| 5.1.1        | 单相直接方法 .....                 | 124        |
| 5.1.2        | 纳米粒子微扰动模型 .....              | 124        |
| 5.1.3        | 纳米粒子对流换热算例 .....             | 126        |
| 5.2          | 纳米流体流动与传热实验研究 .....          | 128        |
| 5.2.1        | 测试系统 .....                   | 129        |
| 5.2.2        | 纳米流体对流换热实验结果与讨论 .....        | 132        |
| 5.2.3        | 纳米流体对流换热准则式 .....            | 140        |
| 5.2.4        | 纳米流体流动阻力性能 .....             | 144        |
| 5.3          | 纳米流体自然对流分析 .....             | 145        |
| 5.3.1        | 纳米流体自然对流实验研究 .....           | 146        |
| 5.3.2        | 纳米流体自然对流分析方法 .....           | 146        |
| 5.3.3        | 纳米流体自然对流不稳定性 .....           | 147        |
| 5.4          | 纳米流体沸腾换热特性研究 .....           | 148        |
| 5.4.1        | 纳米流体沸腾换热的实验结果 .....          | 148        |
| 5.4.2        | 纳米流体沸腾换热临界热负荷 .....          | 152        |
| 5.4.3        | 纳米流体沸腾换热机理的初步分析 .....        | 152        |
| 5.5          | 纳米流体中的传质分析 .....             | 154        |
| 5.5.1        | 纳米流体传质现象的实验观测 .....          | 155        |
| 5.5.2        | 纳米流体传质机理分析 .....             | 157        |
| 5.5.3        | 纳米流体传质过程的热质比拟分析 .....        | 158        |
| 5.5.4        | 热质扩散与质热扩散效应 .....            | 160        |
| 5.6          | 纳米流体强化传质特性的实验研究 .....        | 161        |
| 5.6.1        | 实验基本原理与实验系统 .....            | 161        |
| 5.6.2        | 实验系统可靠性验证 .....              | 162        |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 5.6.3 荧光剂罗丹明 B 在纳米流体中的扩散系数 .....     | 164 |
| 参考文献 .....                           | 167 |
| <b>第 6 章 纳米流体流动与能量传递介观分析</b> .....   | 171 |
| 6.1 格子-Boltzmann 方法 .....            | 172 |
| 6.1.1 格子气自动机(LGA) .....              | 173 |
| 6.1.2 格子-Boltzmann 方法 .....          | 176 |
| 6.2 格子-Boltzmann 模型 .....            | 179 |
| 6.2.1 无作用力条件下的格子-Boltzmann 模型 .....  | 179 |
| 6.2.2 作用力条件下格子-Boltzmann 模型的修正 ..... | 182 |
| 6.2.3 格子-Boltzmann 方法中的边界条件 .....    | 184 |
| 6.3 纳米流体流动与传热的格子-Boltzmann 模型 .....  | 188 |
| 6.3.1 纳米流体有效迁移的流动模型 .....            | 189 |
| 6.3.2 纳米流体的格子-Boltzmann 热模型 .....    | 191 |
| 6.4 纳米流体系统作用力分析 .....                | 194 |
| 6.5 纳米流体流动与能量传递的介观机理 .....           | 195 |
| 6.5.1 纳米流体聚集结构的模拟 .....              | 196 |
| 6.5.2 纳米流体流动与传热过程模拟 .....            | 202 |
| 6.6 纳米流体流动与能量传递的多尺度模拟方法 .....        | 206 |
| 6.6.1 纳米流体多尺度模型 .....                | 207 |
| 6.6.2 多尺度模型计算步骤 .....                | 212 |
| 6.6.3 算例分析 .....                     | 212 |
| 参考文献 .....                           | 216 |
| <b>第 7 章 纳米流体技术的应用</b> .....         | 221 |
| 7.1 低传热性能工质的改性 .....                 | 221 |
| 7.1.1 航天用纳米流体输运参数的测量 .....           | 222 |
| 7.1.2 航天用纳米流体流动与对流换热性能 .....         | 226 |
| 7.2 小尺度条件下纳米流体对流换热特性 .....           | 228 |
| 7.2.1 小通道扁管纳米流体流动与对流换热性能 .....       | 228 |
| 7.2.2 微通道纳米流体的传热性能 .....             | 230 |
| 7.3 纳米流体热管与相变换热 .....                | 231 |
| 7.3.1 纳米流体热管 .....                   | 231 |
| 7.3.2 纳米流体振荡热管 .....                 | 233 |
| 7.3.3 纳米流体相变换热强化 .....               | 233 |
| 7.4 纳米流体射流冲击冷却技术研究 .....             | 234 |
| 7.4.1 纳米流体射流冲击冷却实验系统 .....           | 235 |

---

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 7.4.2 射流冲击冷却实验数据分析方法 .....  | 237 |
| 7.4.3 射流冲击冷却实验结果分析 .....    | 238 |
| 7.5 纳米流体技术在强化传质过程中的应用 ..... | 242 |
| 7.6 纳米流体技术在储能系统中的应用 .....   | 244 |
| 参考文献 .....                  | 245 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 纳米流体的基本概念

能量与质量传递过程已经逐渐渗透到了众多的科学技术和工业领域,包括动力、冶金、石油、化工、材料等传统工业领域和航空航天、电子、核能等高新技术领域。由于科学技术发展和高效紧凑低阻力装备研制的需要,使得强化传热技术在近几十年得到了广泛重视和长足发展,而节能减排与能源可持续发展的迫切要求更是对强化传热技术的发展提出了新的研究课题和新的要求。强化传热不仅可提高装置或系统的传热速率,维持其正常运行,而且可降低传热设备和热量运输系统的尺寸和初投资,大大降低热量运输过程中的能耗,对我国的节能和环保意义重大。

众所周知,热量传递一般通过导热、对流或辐射三种方式来实现。显然,强化传热技术的研究和发展主要是从这三种传热过程的增强来进行,其中涉及面最广和研究最多的是对流换热过程的强化。几十年来,国内外研究人员开展了大量的对流传热强化技术的研究工作,取得了许多研究成果并已将其应用于实际工业中,获得了巨大的经济效益。这包括:扩展表面,如换热管内、外翅片;处理表面,如多孔表面、锯齿表面;涡流发生器,如扭曲带、螺旋叶片或静态混合器;以及机械搅动、流体振动、电磁场强化等<sup>[1,2]</sup>。

随着科学技术的发展和能源问题的日益突出,热交换系统的传热负荷和传热强度日益增大,热交换设备的结构尺寸限制及使用环境也日益苛刻,对热交换系统的高效低阻紧凑等性能指标的要求也越来越高,对强化传热技术提出了新的更高的要求。例如,航天器热控制、高温超导体的冷却、薄膜沉积中的热控制、高功率激光器的冷却和大功率电子元器件与仪器设备的热管理等,均需要满足高热流密度要求的新型传热技术。因此,亟须研制体积小、重量轻、传热性能好的高效紧凑型热交换设备,以满足高负荷传热要求,以及特殊条件下的强化传热要求。通常,强化传热技术的研究多从强化换热表面、制造工艺以及外力辅助扰动等着手。但是,在许多情况下,换热工质本身的传热性能已经成为影响热交换设备高效紧凑性能、提高热交换系统传热性能的一个主要因素;另外,由于一些热交换系统特殊结构的限制和高负荷传热强度的要求,传统的纯液体换热工质(如水、油、醇等)已很难满足一些特殊条件下的传热与冷却要求。低传热性能的换热工质已成为研究新一代

高效传热冷却技术的主要障碍。要进一步研制体积小、重量轻、传热性能好的高效紧凑式热交换设备,需要从工质本身入手研制导热系数高、传热性能好的高效新型换热工质。

提高液体导热系数的一种有效方式是在液体中添加金属、非金属或聚合物固体粒子。由于固体粒子的导热系数比液体大几个数量级,如表 1.1 所示,室温下 Cu 的导热系数是水的 700 倍,是机油的 3000 倍,金属氧化物如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的导热系数也比单一液体大许多倍。能否将具有高导热性能的固体和低导热性能的液体相结合,形成一类新型高导热性能的固体粒子悬浮液,成为从事热科学与技术领域的一个具有挑战性的研究课题。自从 Maxwell 理论<sup>[3]</sup>发表以来,不少学者开展了在液体中添加固体粒子以提高其导热系数和传热性能的理论 and 实验研究工作,并取得了一些富有启发性的研究成果。这些研究表明,悬浮有固体粒子的两相流体的导热系数要比纯液体的大许多。

表 1.1 几种材料的导热系数

| 材 料                                        | Ag  | Cu  | Al  | Si  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 水    | 乙二醇   | 机油    |
|--------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------------|------|-------|-------|
| 导热系数/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ | 429 | 401 | 237 | 148 | 40                      | 0.61 | 0.253 | 0.145 |

例如, Liu 等<sup>[4]</sup>和 Ahuja<sup>[5]</sup>对这种强化传热方法进行了传热和阻力性能测试,研究分析了悬浮液中固体粒子的体积份额、尺度及悬浮液流速等因素对悬浮液压降、传热性能的影响。实验结果表明,在甘油或氯化钠水溶液中添加一定量的微米级聚苯乙烯小珠,可增大原基液的导热系数;在相同流动速度条件下,悬浮液的对流换热系数比原液体大,如果应用于热交换系统,可提高系统的传热效率。Sohn 和 Chen<sup>[6]</sup>测量了液固两相混合物在低速 Couette 流条件下的导热系数,表明当颗粒的 Peclet 数足够大时,两相混合物导热系数随流体流动剪切速率的提高而增大。

上述初步研究都是局限于将毫米或微米级的固体粒子悬浮于液体中。虽然这些悬浮液的传热效果优于单相液体,但是由于毫米或微米级粒子的尺寸较大,实际使用中存在的许多问题阻碍了其应用的可行性,这主要体现在以下两个方面:

(1) 由于悬浮液中固体粒子尺寸较大,流动时容易引起管道磨损、堵塞等不良结果,且无法适用于日益增长的微小通道换热系统中。

(2) 为了保证固体颗粒在混合液中悬浮稳定而不发生沉淀,以往在液体中添加的毫米或微米级固体颗粒大多采用与基液(如水、油等)密度相近的有机物(聚苯乙烯等),由于有机物导热系数很低,如聚苯乙烯的导热系数只有  $0.08\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,两相悬浮液的导热系数提高有限。从 Maxwell 理论可知,液固两相混合物的导热系数与固体颗粒导热系数有很大关系,固体导热系数越大,混合物导热系数就越大。显然,如果使用导热系数大的金属固体颗粒(如 Cu、Al 等),将可以进一步加大液固两相悬浮液的导热系数,提高悬浮液对流换热性能。但是由于高导热系数

的金属颗粒与基液间存在极大的密度差,悬浮液中微米或毫米级的固体颗粒极易沉淀,限制了这些高导热系数固体颗粒的使用。

尽管如此,这些早期的研究工作还是给人们以启示:如果能减小固体粒子的粒径,则有可能在提高原来液体导热系数、改善液体传热性能的同时,又避免了固体粒子沉淀、磨损与堵塞流道等问题。纳米技术的发展和纳米粒子的应用使之成为可能。

纳米粒子是指尺寸为  $1\sim 100\text{nm}$  的超细微小固体颗粒,也有人把它称为超微粒子。纳米( $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ )这个尺度名词早就出现了,但人类真正意识到这种小粒子对科学与技术进步可能产生巨大作用的,是从 20 世纪 50 年代开始。1959 年,著名的美国理论物理学家、诺贝尔奖获得者费曼曾预言,若人类能对细微尺度的事物予以操纵,必将大大拓展人们可能获得物理性能的范围,并描述了一旦人类掌握了纳米科学与技术就可能面对的美妙世界。纳米科学与技术涉及纳米粒子及其组成的物质结构体系的相关现象、规律和应用方法。纳米体系和纳米科学技术概念的出现为人类认识自然现象、利用自然规律、推动科学技术发展和社会进步开辟了一条前所未有的、崭新的道路,形成了广阔的空间。作为一门新兴的交叉学科,纳米科学与技术的研究工作既涉及错综深邃的基础研究,又包含广庞复杂的应用技术研究,吸引了大量的人力和物力投入,取得了惊人的发展速度,并日益受到关注和重视。它既给许多传统学科提出了新的课题,丰富了本身的研究内涵,又给这些学科的发展带来了难得的机遇,极大地推动促进了不同学科的发展。

颗粒材料的研究表明,固体粒子的属性与它的粒径密切相关。当粒子粒径在微米( $\mu\text{m}$ )范围内,颗粒材料呈现原块体材料所不具有的一些新特性;当固体粒子的粒径小于  $100\text{nm}$ ,颗粒的尺寸大小对其物理属性和化学特性起着决定性的作用,纳米颗粒所具有的小尺寸效应、表面效应和量子尺度效应的影响作用更加突出,表现出与许多微米量级颗粒明显不同的独特属性,粒子的电、光、磁、力、热和化学性能发生了显著的变化<sup>[7~9]</sup>。一个关于热力学性质的例子是:随着粒径的减小,颗粒表面能显著增大,纳米颗粒的熔点温度低于原来块体材料的温度。正是纳米颗粒的这些物理和化学属性的独特变化,使纳米材料在军用和民用各个领域得到越来越广泛的应用。同样,纳米科学技术的兴起和发展也给热科学理论和技术的发展提出了新课题。

面对纳米科学技术给其他领域带来的新机遇,从事热科学和能源科学技术领域的研究人员也在思考和探索如何把纳米科学技术研究过程中所取得的理论、方法和技术应用于本领域及其相关研究方向,从微观尺度探究能量、质量传递的现象与基本规律,解决制约本学科发展的一些瓶颈问题,推动和促进本学科的进步。1995 年,美国 Argonne 国家实验室的 Choi<sup>[10]</sup> 提出一个概念——纳米流体,即以一定的方式和比例在液体中添加纳米级金属或金属氧化物粒子,形成一类新的传热

工质。实际上,从其组成看,它是一种由液体和纳米粒子组成的两相悬浮液,简称为“纳米流体”。通常,承载固体纳米粒子的液体称之为“基液”。就其组成而言,这种纳米粒子悬浮液并非是完全的新概念,20 世纪 60 年代出现并被投入实际应用的磁性流体就是一种典型的纳米流体,只是悬浮于基液之中的纳米粒子是铁磁性粒子而已。就其功能而言,这种纳米流体设想的提出,主要是为了改善流体的能量传递过程。

与传统的纯液体工质及在液体中添加毫米或微米级固体粒子相比,在液体中添加纳米粒子以强化传热这一方法的优点主要体现在以下几方面:

(1) 与纯液体相比,纳米流体由于粒子与粒子、粒子与液体、粒子与壁面间的相互作用及碰撞,破坏了流动层流底层,减小了传热热阻,增强了流动湍流强度,使传热速率得以强化。

(2) 在液体中添加纳米粒子,可显著增大原纯液体的导热系数,使液体内部的传热过程增强。

(3) 由于在粒子体积含量相同情况下,纳米粒子的表面积远大于毫米或微米级粒子的表面积,因此纳米流体的有效导热系数大于添加了毫米或微米级固体粒子的两相混合液的导热系数。

(4) 更为重要的是由于纳米材料的小尺寸效应,其行为接近于液体分子,纳米粒子自身强烈的布朗运动有利于其保持稳定悬浮而不沉淀,不像毫米或微米级粒子易产生磨损或堵塞等不良结果。而且,悬浮液中含有的纳米固体粒子在伴随悬浮液主流流动时有可能起到润滑的作用。Hu 和 Dong<sup>[11]</sup> 的研究表明,在润滑油中添加了纳米  $\text{TiO}_2$  粒子,可减小流体流动的摩擦阻力系数,起到抗磨损的作用。因此,与在液体中添加毫米或微米级固体粒子相比,纳米流体更适于实际应用。

纳米流体的概念一经提出,立刻引起世界各国学术界的关注,美国、中国、韩国、英国、德国、印度等国的一些学者开展了相应的研究工作,研究表明在液体中添加纳米粒子,可以有效提高液体的导热系数,强化液体的传热性能,显示了纳米流体在能量传递领域具有广阔的应用前景。

## 1.2 纳米流体的基本属性

纳米流体是由分散相(纳米粒子)和分散介质(基液)组成的分散体系,属于一种胶体分散体系。因此,描述胶体分散体系稳定现象与过程的理论方法可以直接应用于纳米流体。相比较于传统的液固两相混合物,虽然由于纳米粒子的超小尺寸效应,纳米流体的行为更接近于液体,但纳米流体本质上是一种两相流体,具有液-固两相流体的一些共有的特性。一般而言,纳米流体的性质与纳米粒子的体积份额、属性、尺度、形状、分布和基液的理化性质有关。

### 1.2.1 粒子形状

纳米粒子的形状是指粒子的外部轮廓。它对纳米粒子、纳米粒子团聚体和纳米流体的性质都有重要的影响,如粒子比表面积、悬浮液稳定性和流动性等。通常,纳米粒子的形状与粒子制备工艺和条件有很大关系。

粒子形状一般有片状、柱状、球形和多菱形。在分析纳米流体的流动与传热特性时,一般都假设粒子的形状是球形。对于非球形的粒子,可以定义粒子的球形度 $\psi$ 来考虑实际粒子形状与理想球体之间的差别。

$$\psi = \frac{S_v}{S_p} \quad (1.1)$$

式中, $S_v$ 是一与实际粒子体积相等的球形粒子表面积; $S_p$ 是实际粒子的表面积。

### 1.2.2 粒径分布

纳米粒子的粒径分布与制备纳米粒子的材料属性和制备工艺条件密切相关。对某一颗粒数为 $n$ 的纳米粒子群,通过对粒子粒径实验数据的拟合分析,可以给出纳米粒子粒径分布的数学表述。常用的分布函数主要有高斯分布、对数分布和伽玛分布三种形式。若 $x$ 表示粒径 $d_p$ ,函数 $f(x)$ 表示纳米粒子粒径分布,则上述三种分布分别表示为如下形式<sup>[12]</sup>:

(1) 高斯分布。

$$f(x)dx = \frac{\exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2 2\sigma^2}{\sqrt{2\pi\sigma}}\right]}{\sqrt{2\pi\sigma}} dx \quad (1.2)$$

式中, $\bar{x}$ 是平均粒径; $\sigma$ 是纳米粒子粒径分布的均方差。

(2) 对数正态分布。

$$f(\ln x)d\ln x = \frac{\exp\left[-\frac{(\ln x - \overline{\ln x})^2 2\sigma_1^2}{\sqrt{2\pi\sigma_1}}\right]}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} d\ln x \quad (1.3)$$

式中, $\overline{\ln x}$ 是函数 $\ln x$ 的平均值; $\sigma_1$ 是函数 $\ln x$ 的均方差。

(3) 伽玛分布。

$$f(x)dx = s^s x^{s-1} \frac{\exp(-sx)}{\Gamma(s)} \quad (1.4)$$

式中, $s = \bar{x}^2/\sigma^2$ ,  $\Gamma(s) = \int_0^\infty e^{-s} s^{s-1} ds$ 。

### 1.2.3 纳米流体的结构

纳米流体的性能与悬浮在基液中的纳米粒子分布形态即纳米流体的结构有很大关系。就纳米流体流动与能量传递过程而言,纳米粒子均匀悬浮分布于基液之中,且不发生粒子的团聚,不存在纳米粒子团聚体,是最有利的,但这是一种理想的

极端情况。实际上,悬浮于基液中的纳米粒子在周围液体分子的轰击下不停地做无规则的布朗运动,同样,纳米粒子在其他各种作用力或作用势的影响下,也会作相应的运动。悬浮的纳米粒子在运动过程中不可避免地会发生碰撞和团聚,即粒子与粒子相遇形成集团(团聚体);而这种粒子集团在继续的运动中,可能与其他粒子或粒子集团相遇聚集而形成更大的集团,当然也会发生分裂,纳米粒子由于布朗运动而发生聚集现象如图 1.1 所示。

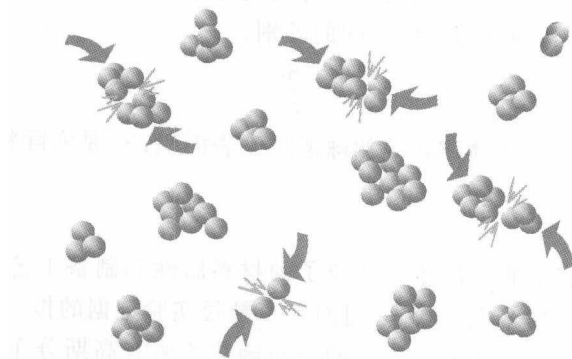


图 1.1 纳米粒子布朗运动中发生聚集

根据布朗运动理论<sup>[13]</sup>,粒子粒径越小,粒子的运动速度越大,移动越频繁。因此,纳米流体内部粒子越小,悬浮粒子与周围基液之间能量交换传递的频率越快。包含有两个纳米粒子以上的粒子团聚体的随机运动速度比单个粒子运动速度小,过大的团聚体在重力作用下甚至会加速沉降而发生沉淀。显然,纳米粒子的团聚现象会降低纳米流体内部能量传递的速率,削弱纳米流体强化传热性能。也就是说,除了纳米粒子的属性、体积份额、粒径大小等因素之外,纳米流体的聚集结构是影响纳米流体能量传递过程的另一主要因素。

描述悬浮纳米粒子团聚结构的方法比较多,如基于随机过程的动力学生长模型、基于布朗理论的粒子运动模型和分形理论等,后续章节将作详细的讨论。

#### 1.2.4 纳米流体的基本参数

纳米流体是由悬浮的纳米粒子和基液组成,表述其组成的一个重要参数是纳米粒子的体积份额或体积浓度,用  $\phi$  表示。设纳米粒子体积为  $V_p$ ,基液的体积为  $V_f$ ,则悬浮于体积为  $V = V_p + V_f$  的纳米流体中纳米粒子的体积份额为

$$\phi = \frac{V_p}{V_p + V_f} \quad (1.5)$$

尽管实际的纳米颗粒形状各种各样,最普通、最常见的是球形粒子。若假设悬浮的球形纳米粒子粒径均匀一致为  $d_p$ ,颗粒数目为  $N$ ,纳米粒子的体积份额  $\phi$  可