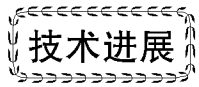


文章编号: 1005-0329(2016)11-0041-08



# 纳米流体制备技术与组成结构的研究进展

姚 远<sup>1,2</sup>, 陈 颖<sup>1</sup>, 陆振能<sup>2</sup>, 龚宇烈<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学, 广东广州 510006; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640)

**摘 要:** 纳米流体作为一种新型换热工质日益受到科研及工程技术人员的高度关注, 但纳米流体的不稳定性是阻碍其广泛应用的技术瓶颈。针对这一问题, 目前已经取得了许多重要的研究成果。本文从纳米流体的制备方法、纳米流体的分散措施、纳米流体悬浮稳定性分析、纳米流体的聚集结构等几个方面对当前纳米流体的制备技术与组成结构的国内外最新研究成果进行了介绍, 并从制备高稳定性纳米流体的目标提出了对今后研究重点的建议。

**关键词:** 纳米流体; 制备方法; 稳定性; 组成结构

中图分类号: TH12; TK124

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2016.11.009

## Research Progress of Preparation and Composition of Nanofluids

YAO Yuan<sup>1,2</sup>, CHEN Ying<sup>1</sup>, LU Zhen-neng<sup>2</sup>, GONG Yu-lie<sup>2</sup>

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Nanofluids as new working fluids have been highly concerned by the scientists. The instability of nanofluids is a technical bottleneck that hinders its wide application. In view of this problem, many important research achievements have been obtained. The nanofluids preparation technology and structure of the latest research progresses in methods of preparing nanofluids, dispersion methods of nanofluids, suspension stability of nanofluids and aggregation structure of nanofluids are reviewed and discussed. Finally, major areas of future research for preparing nanofluids with high suspension stability are proposed in this work.

**Key words:** nanofluids; preparation method; stability; construction

## 1 前言

1995年美国 Argonne 国家实验室的 Choi 首先提出纳米流体的概念。纳米流体是一种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, 形成的超微粒固体粒子悬浮液。与传统的纯液体工质或悬浮液相比, 纳米流体粒子的微运动增强了液体内部的湍流强度, 相同体积含量的粒子表面积大, 扩大了换热面积, 再加上金属粒子本身的高导热性, 这些都大大提高了液体的传热性能。纳米流体的稳定性对其导热性能具有重要影响, 当以缺乏稳定性的纳米流体为传热介

质时, 其中的纳米颗粒就会逐步开始团聚, 当团聚体的尺寸达到一定程度时会出现沉降, 影响纳米流体的流动和传热性能。纳米流体的制备方法及其结构组成是影响其稳定性的最重要因素。本文就纳米流体的制备方法、纳米流体的分散方法与悬浮稳定性分析、纳米流体的聚集结构及分形分析等几个方面分别介绍纳米流体制备技术与结构研究的最新进展。

## 2 纳米流体的制备方法

目前, 纳米流体的主要制备方法可分为“一

收稿日期: 2016-02-26 修稿日期: 2016-09-29

基金项目: 广东省产学研合作项目(2013B091500059); 广东省科技计划项目(2014A020223001)

步法”和“两步法”两种。

### 2.1 一步法制备纳米流体

一步法是指在纳米颗粒制备的同时直接将颗粒分散到基液中,纳米颗粒和纳米流体的制备同时完成。一步法制备纳米颗粒的方法主要有气相法和液相法 2 种方法。气相合成纳米颗粒的方法又有多种,如低压气体蒸发法、真空蒸发沉积法、溅射法、通电加热蒸发法、激光诱导沉积法等。Choi 研究团队就是采用低压气体蒸发法制备了 Cu-机油和 Cu-乙二醇等纳米流体<sup>[1]</sup>。具体方法是在充有惰性气体的超高真空环境下,用激光照射金属靶,使金属受热蒸发产生金属烟雾,烟雾经液氮冷却而凝结成为纳米粒子,落入基液中而制成该金属的纳米流体。Chang,Lo 等学者采用电弧溅射的气相合成法制备了 TiO<sub>2</sub>、CuO 和 Cu 等纳米流体<sup>[2~4]</sup>,经静置实验,这些纳米流体的悬浮稳定性都是比较好的。对于气相法来说,采用不同的加热方法,制备出的纳米粒子的量、粒径大小与分布等存在一些差异。但整个过程都必须在超高真空环境中进行,还必须冲入低压的纯净惰性气体。

相对气相合成纳米颗粒的方法,将纳米颗粒的液相制备方法直接改成一步法制备纳米流体较为困难。主要原因有:(1)液相法中的液相要参与化学反应,不能作为基液。(2)液相中总包含引入的其他离子,完全去除杂质离子比较困难。但液相制备方法也有优点,它对设备要求不高,原料常见、成本低廉,过程控制也相对容易。因此,适合研究人员在实验室条件下少量制备纳米流体。黄钧声等采用硼氢化钾液相还原一步法还原硫酸铜水溶液,加入了络合剂 EDTA-2Na 和阳离子型分散剂 CTAB(C<sub>19</sub>H<sub>42</sub>NBr)制备出平均粒度仅为 1.02 nm 的超细铜纳米流体(图 1)<sup>[5]</sup>。

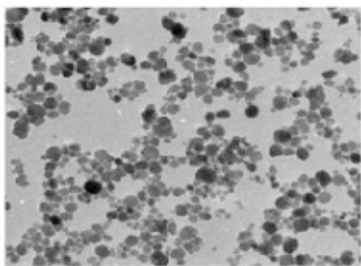


图 1 一步法制备超细铜纳米流体的 TEM 照片

张均成等以 SiO<sub>2</sub> 纳米粒子为“核”,采用化学镀法将使用共沉淀法合成的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 镀覆到纳米 SiO<sub>2</sub> 类流体上,得到了新型的纳米 SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁

性流体<sup>[6]</sup>。

总体来说,一步法适合于制备悬浮有高导热系数金属纳米粒子的纳米流体。一般而言,一步法制备的纳米流体粒子纯度高、粒径小、分散性好、悬浮稳定性高。但是一步法制备工艺复杂,所需设备昂贵,目前不具备大批量生产的条件。

### 2.2 两步法制备纳米流体

两步法制备纳米流体的过程如图 2 所示。

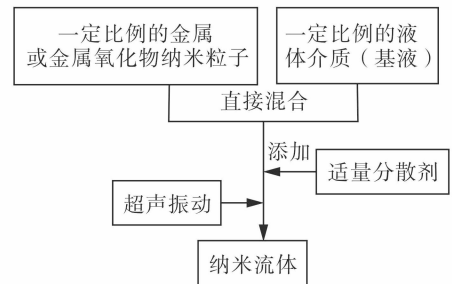


图 2 两步法制备纳米流体过程

两步法中采用超声振动和加入分散剂的手段来避免团聚现象的发生。超声振动主要是破坏团聚体中小粒子之间的相互吸引作用,促使粒子团聚破碎。分散剂的“静电荷效应”可以使粒子间产生较强的排斥力,同样起到分散粒子的效果。李艳娇等通过两步法制备了氮化铝/乙二醇(AIN/EG)纳米流体,研究了超声分散时间、pH 值、分散剂种类及添加量 3 种因素对其稳定性的影响(图 3)<sup>[7]</sup>。

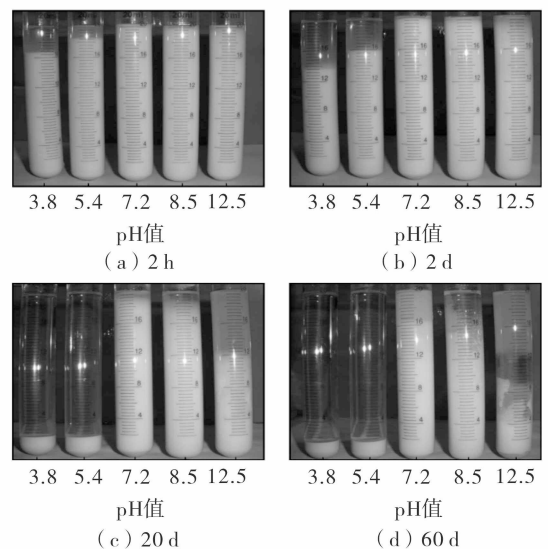


图 3 两步法制备不同 pH 值的 AIN/EG 纳米流体沉降照片

吕雪等以双硫脲为萃取剂,将银离子从水相萃取到离子液体相中,在超声辅助条件下将离子

液体相中的银离子还原,制备了疏水性离子液体基银 ( $\text{Ag} / [\text{BmIm}] \text{PF}_6$ ) 纳米流体<sup>[8]</sup>。张飞龙等以石墨为原料,采用强氧化法在实验室成功合成了亲水性材料氧化石墨烯,该氧化石墨烯产品在乙二醇中的分散性好。在没有分散剂的情况下合成了氧化石墨烯/乙二醇导热纳米流体<sup>[9]</sup>。

两步法制备纳米流体程序简单、方便,几乎适用于所有类别纳米流体的制备,可制备一步法难以得到的一些高蒸汽压的液体作为基液的纳米流体。随着纳米材料技术的发展,可以直接在市场上买到不同材料的纳米颗粒粉体,使得两步法成为比较通用的纳米流体制备方法。但是两步法制备的纳米流体中纳米颗粒容易自聚,长时间放置后聚合的纳米颗粒会从基液中析出。因此,如何使纳米粒子均匀分散就成为两步法制备纳米流体的关键技术之一。

### 3 纳米流体的分散方法与悬浮稳定性分析

#### 3.1 纳米流体的分散方法

纳米流体也是粒子悬浮液,粒子在液体中的随机运动会产生碰撞集聚,形成粒子簇团,并可能逐步聚结增大而沉淀,纳米流体也将最终失去动力学稳定性<sup>[10]</sup>。因此,保持纳米粒子在液体中均匀、稳定地分散对于纳米流体的制备来说非常关键。根据分散方法的不同,粒子分散技术可分为物理分散和化学分散。

##### 3.1.1 物理法

物理分散纳米流体粒子的方法主要是超声波分散法和机械力分散法。超声波分散就是将纳米流体置于超声场中,用适当的频率和功率的超声波加以振动,克服粒子之间的吸引力,打破原有的作用力平衡,使纳米粒子稳定分散于基液中。目前两步法制备纳米流体都是采用超声波进行分散。科研人员研究了超声的参数对纳米粒子分散性的影响。李金凯等采用两步法制备低浓度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (40 nm)-水纳米流体,制备过程中不加分散剂,采用超声振动,并对其进行粒度,Zeta 电位和吸光度测试,表征其悬浮稳定性,结果分别如图 4~6 所示<sup>[11]</sup>。从图可见,当超声时间为 3 h 时,纳米流体的粒径最小,Zeta 电位和吸光度最高。以上 3 个测试结果均可说明当超声时间为 3 h 时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -水纳米流体的悬浮稳定性最好。

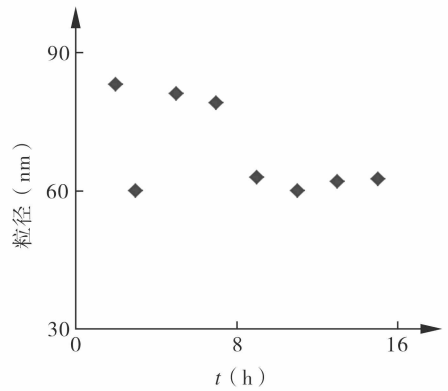


图 4 超声振动时间对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒径的影响

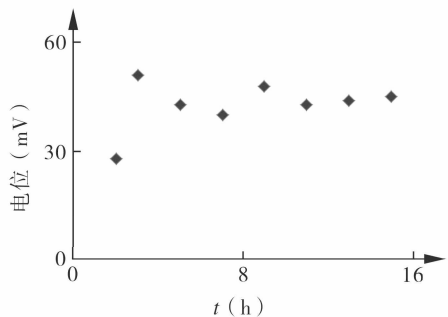


图 5 超声振动时间对 Zeta 电位的影响

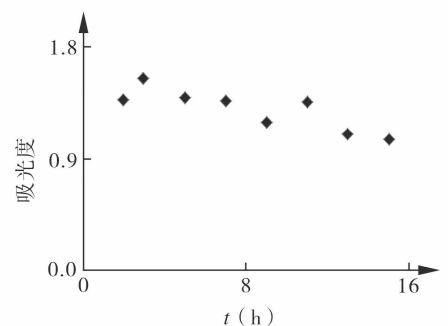


图 6 超声振动时间对吸光度的影响

冯明等将石墨烯通过超声分散于不同的基液中,研究了 pH 值、超声时间和基液对石墨烯纳米流体稳定性的影响,发现经超声作用 30 min 的石墨烯纳米流体能够保持均匀稳定达到一个月<sup>[12]</sup>。以前的研究多是针对超声时间对分散性的影响的数据分析,但很少有根据超声频率和超声功率这 2 个参数对分散性的影响进行研究。从理论上来看,粒子越大,超声频率要越强,超声功率越大,分散效果越好,但目前这方面的实测数据很少。

机械分散法是借助外界的机械能使纳米粒子在液体中分散的方法,这是纳米流体早期制备时采用的方法,比如球磨和机械搅拌。机械搅拌对纳米级别的粒子作用不大,效果不好。球磨法虽然效果比机械搅拌好,但由于球体和筒体的碰撞,

它们本身在球磨过程中破损, 掉落的微粒也会进入液体中成为杂质, 从而影响纳米流体的纯度和性能, 因此现在机械分散很少被采用。

### 3.1.2 化学法(分散剂法)

物理方法分散纳米流体的时效较短, 随着外力作用的停止, 粒子在范德瓦尔斯引力的作用下又会重聚。采用化学方法, 即加入分散剂, 可以改变粒子表面性质, 使粒子间具有较强的排斥力, 达到分散粒子的目的。当前常用的分散剂类型主要分为以下几种: (1) 无机类的电解质或聚合物。该类分散剂主要通过粒子表面的静电排斥力维持粒子分散性, 缺点是杂质离子也会被引入进来, 从而影响纳米流体的性能。(2) 有机类高分子聚合物。高聚物的分子量较大, 如果被吸附在粒子表面, 将会形成几十纳米厚的吸附层, 吸附层产生的空间可形成位阻效应来隔离纳米颗粒。离子型聚合物还会伴随静电位阻效应。(3) 表面活性剂。表面活性剂吸附在纳米粒子的液固界面, 改变了粒子表面属性, 减小了界面自由能, 在粒子表面形成一层坚固的溶剂化膜, 形成位阻效应, 阻碍颗粒互相靠近<sup>[13]</sup>。

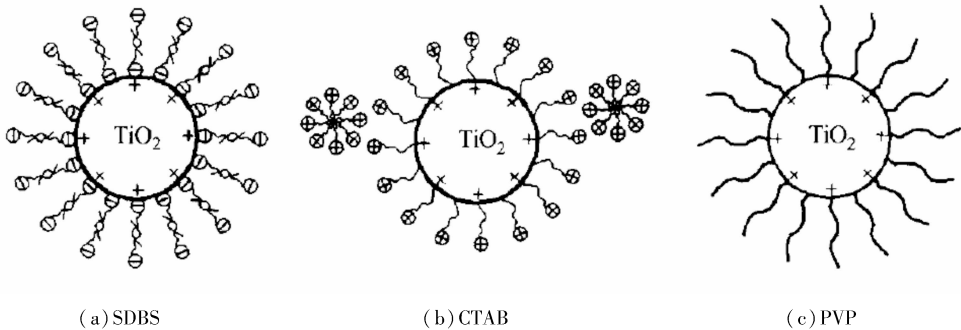


图7 不同表面活性剂在  $\text{TiO}_2$  颗粒表面的吸附示意

根据大量试验研究的结果, 影响分散剂稳定作用的因素主要有分散剂的种类和浓度。分散剂种类选择不合适, 则分散剂不能吸附在纳米粒子表面, 无法包裹粒子, 起不到分散纳米粒子的作用。另外, 分散剂加入量过多, 会出现饱和和吸附导致絮凝, 加入量过少, 无法有效包裹粒子。因此, 种类合适的分散剂及添加量是增强纳米流体稳定性的关键, 也是目前分散剂应用研究的重点。

### 3.2 纳米流体的悬浮稳定性分析

就其形态与微结构而言, 纳米流体属于胶体分散体系。范德瓦耳斯力和双电层斥力的相对大小决定了纳米粒子的分散与团聚。纳米流体稳定性最终的决定性因素是纳米粒子之间以及悬浮的

对于分散剂在纳米粒流体中的作用效果, 近年来科研人员做了很多实验研究。林海滨等研究了分散剂对纳米流体悬浮稳定性的影响, 测试了溶液的热扩散系数和比定压热容<sup>[14]</sup>。结果表明, 分散剂种类和用量对纳米流体的分散有重要影响, 相对于基础液体(DW), 纳米流体的导热系数和热扩散系数有一定的提高, 但比定压热容减小。凌智勇等研究了十二烷基苯磺酸钠、十六烷基三甲基溴化铵和辛基苯基聚氧乙烯醚等表面活性剂  $\text{Cu-H}_2\text{O}$  和  $\text{ZrO}_2\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体分散稳定性的影响, 结果发现添加表面活性剂可较大程度地提升纳米流体的稳定性, 而尤以添加十二烷基苯磺酸钠的效果最为明显, 计算结果也显示十二烷基苯磺酸钠分子与  $\text{Cu/ZrO}_2$  间的吸附作用最强<sup>[15]</sup>。李兴等通过对含表面活性剂的  $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体中纳米粒子表面吸附层厚度的测量与结构的分析, 发现表面活性剂对  $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体的分散稳定性具有重要作用, 其中作用最大的是阴离子表面活性剂 SDBS, 非离子型表面活性剂 PVP 的作用次之, 阳离子型表面活性剂 CTAB 反而会降低  $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  纳米流体的分散稳定性<sup>[16]</sup>。

纳米粒子与周围基液之间的各种相互作用力或势的综合结果。胶体分散稳定性研究理论主要有静电稳定(DLVO)理论、空间稳定理论和空缺稳定理论, 其中 DLVO 理论比较全面地分析了悬浮液稳定性的各种影响因素, 比如粒子的粒径大小、流体酸碱度(pH)值和温度、外加作用场、分散剂的种类和浓度、基液的动力粘度等。目前, 研究人员也多是根据上述影响因素来研究各种纳米流体稳定性的。程大朋等研究了流动状态下纳米颗粒浓度对悬浮液稳定性的影响, 结果表明, 随着纳米粒子浓度的增加, 悬浮液稳定性变差, 更多的纳米粒子发生了沉积<sup>[17]</sup>。另外, 流体的流动状态也会对悬浮液的稳定性产生重要影响。邵雪峰等人通过

研究中低温环境下  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -乙醇纳米流体的稳定性,发现温度对悬浮颗粒势垒值和液体粘度的影响是影响纳米流体稳定性的主要原因<sup>[18]</sup>。Yang等研究了纳米流体中表面活性剂在纳米颗粒表面的吸附形式,即单层吸附和双电层吸附<sup>[19]</sup>。对于非极性单质纳米颗粒,如 Cu、CNTs、CB,在溶液中不发生电离,其表面吸附形式是单层吸附。在无表面活性剂的溶液中添加纳米颗粒时,其高比表面积和比表面能,布朗运动及范德瓦耳斯力都驱动粒子产生碰撞团聚的趋势。加入少量的表面活性剂后,大分子的非极性碳氢链吸附于颗粒的表面,颗粒因表面活性剂分子的空间位阻效应而相互隔离,均匀分散在溶液中。但是,不饱和的吸附层会使纳米离子悬浮不稳定。因此,必须添加适量的表面活性剂,才能使表面活性剂分子的亲水端完全垂直地延伸到水相中,稳定的单层吸附才能在颗粒表面形成(图8)。

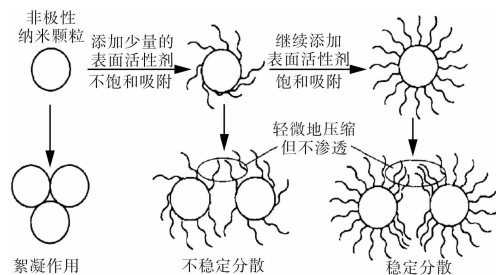


图8 单层吸附形式

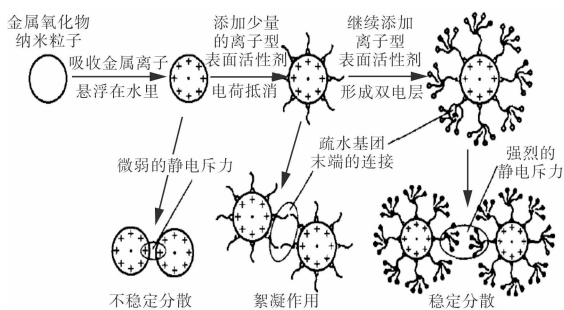


图9 双电层吸附形式

金属氧化物纳米颗粒如  $\text{CuO}$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等,在水中发生电离,与离子型表面活性剂相连接,其表面吸附形式可称为双电层吸附。图9表示了双电层吸附形式下表面活性剂对纳米颗粒产生的作用。当开始添加少量的表面活性剂时,纳米流体的稳定性逐渐增强,纳米粒子的表面电荷减少。当继续添加表面活性剂时,粒子表面的正负电荷会达到平衡。进一步添加表面活性剂,表面活性剂分子的疏水端会吸附在末尾的链

表面上,其亲水端延伸到溶液中,纳米颗粒又一次带上电荷,从而形成双电层吸附,其强烈的静电力是纳米流体保持稳定分散的主要推动力。

综上所述,研究纳米流体的悬浮稳定性,必须深入分析纳米粒子的表面特性、粒子属性、粒子形状尺度、分散剂等因素对于纳米流体稳定性、均匀性的影响和作用机理,建立适当数学模型计算悬浮纳米粒子之间的作用力,进而推理出纳米粒子在液体中的运动和团聚过程。针对不同构成的纳米流体,只有进行了大量的现场实验,根据实验结果提炼总结,其结论才能指导纳米流体的制备,成功获取分散均匀、稳定性高的纳米流体。

#### 4 纳米流体的聚集结构

纳米粒子的聚集结构具有明显的分形生长的特点,它与纳米粒子属性、形状和尺度以及纳米流体的制备方法密切相关。纳米流体内部粒子分布结构对纳米流体的稳定性、均匀性、输运参数和能量传递过程起着至关重要的影响作用。也就是说,除了纳米粒子的属性和体积份额之外,纳米流体的聚集结构是影响纳米流体能量传递的另一个主要因素。

##### 4.1 激光散斑法测量纳米流体的动态结构与粒子运动特性

基于激光散射技术的光散斑方法是目前测试纳米流体动态聚集结构与粒子运动特性的常用方法。其基本原理是利用激光照射纳米流体,激光在粒子上散射而形成光斑,光斑的位置和大小与纳米粒子密切相关,因而可由散射光斑的分布来推知与其对应的纳米粒子的分布和运动特性。钱明从理论分析、数值模拟和激光实验三个层面研究了激光照射纳米流体时,散斑的形成机理及特性,并利用激光散斑测速法(LSV)测量了纳米流体在定向流动时纳米粒子的运动轨迹<sup>[20]</sup>。该实验装置对传统的LSV系统进行了改进,使用平行光照射流场,高速CCD正对入射光方向拍摄散斑图像,不同时态的多幅照片便直观地描述了纳米流体中纳米粒子运动的特性。刘俊从理论上推导了纳米颗粒和散斑运动速度之间的对应关系,得出了在非涅尔衍射区域,散斑的移动速度和纳米粒子的移动速度相等的结论<sup>[21]</sup>。这个结论是LSV法的理论基础,通过高速CCD拍摄散斑图,

图像处理后可获得与散斑运动速度相关的位置信息,进而推算出纳米颗粒的运动速度。该理论和实验方法对研究纳米颗粒运动速度与流体流速之间的关系提供了重要的技术途径。Qian 和 Ni 等也设计并搭建了测量纳米流体中纳米粒子运动的激光散斑实验装置<sup>[22]</sup>。通过对不同时态图像的比对处理,可计算出对应散斑的位移量,再通过散斑运动和纳米粒子运动之间的对应关系得到纳米粒子的位移量,进而推导出流场中粒子的瞬态速度分布。

#### 4.2 纳米流体聚集结构的模拟

纳米粒子在基液中的随机扩散行走与碰撞聚集呈现出典型的簇团—簇团聚集特点,可以运用有限扩散的凝聚模型模拟纳米流体内部纳米粒子碰撞聚集过程。由郎之万粒子运动方程:

$$m = \frac{d^2x}{dt^2} = -a \frac{dx}{dt} + F(t) + F_w \quad (1)$$

式中  $m$ ——纳米粒子的质量

$a$ ——阻力系数

$t$ ——时刻

$F(t)$ ——随机布朗力

$F_w$ ——外场施加于粒子上的作用力

推出爱因斯坦关系式:

$$x^2 \approx \frac{2K_B T}{a} t \quad (2)$$

式中  $K_B$ ——波尔兹曼常数,  $K_B = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K

$T$ ——流体温度

$a$ ——阻力系数

根据该关系式通过计算机编程,可以模拟纳米粒子在基液中的运动轨迹。周陆军等运用蒙特卡洛模拟方法研究了磁流体的三维微观结构,应用作用区域的概念分析了不同磁矩、体积份额以及外加磁场强度对磁流体形成链状结构的影响<sup>[23]</sup>。王鹏等对纳米流体的三种不同计算模型进行了对比分析,并与实验相比较<sup>[24]</sup>。发现在数值模拟过程中,不能将纳米流体看成单一流体,必须考虑相间作用力,如果雷诺数比较低,布朗运动也不应该忽略。在计算精度上,单向流模型 < Eulerian Eulerian 多相流模型 < Euler-Lagrange 多相流模型。陈俊对模拟稳定性问题进行了分析,提出了分子平均自由方程的新概念,进而推导出用于模拟过程中最佳步长选择的计算公式和方法,为实现纳米流体分子模拟的稳定性奠定了基础<sup>[25]</sup>。

#### 4.3 纳米流体分维数的理论计算与实验研究

纳米流体分维数是纳米粒子簇团的不规则性、自相似性以及粒子簇团之间相似性的整体反映,它提供了准确和精细描述纳米流体介观结构的新途径。根据分形理论,可以应用分维数近似估计其中粒子团的平均半径,而粒子簇团的尺度大小直接影响自身的运动特性,从而也影响纳米流体的诸多性质如导热系数和扩散系数等。由于纳米粒子的动态聚集特点,粒子聚集结构随时间变化而变化,因而纳米流体的分维数也随时间变化。如图 10 所示,粒子聚集开始时,分维数结构有剧烈变化,之后分维数逐渐增大并趋于稳定,即聚集过程趋于平缓。对于分维数的具体数值,不同研究者得到了不同的结果。对于二维 DLCA 模型,张济中认为分维数接近于一个定值,约等于 1.44,但是没有提及粒子浓度对分维数的影响<sup>[26]</sup>; Schaefer 等基于扩散置限模型与簇团集聚模型得到悬浮粒子以及粒子簇团的分维数在二维空间为 1.45,而三维空间里等于 1.75,这两个数值与实验结果有一定偏差<sup>[27]</sup>。也有研究者认为,分维数随粒子浓度的增大而增大,如 Pencea 等认为粒子浓度增大时,系统的分维数逐渐增大,而且趋于 2<sup>[28]</sup>。Lach-hab 等在大量模拟计算的基础上,认为分维数与粒子浓度有关,并且随粒子浓度的增大而增大<sup>[29]</sup>。

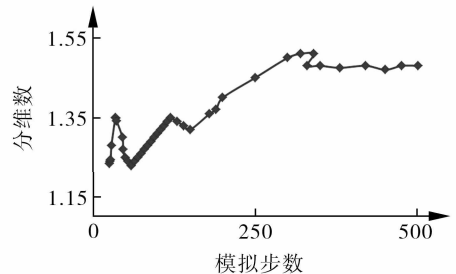


图 10 粒子份额为 4.2% 的纳米流体二维 DLCA 分维数变化示意

对于纳米流体这类具有自相似特征的粒子悬浮体系,针对所关注的问题,可以引入不同的分维数。Yates 等引入质量分维数  $D_m$  的概念,即粒子簇团的质量  $m(R)$  与粒子簇团  $R$  之间的关系满足下述关系<sup>[30]</sup>:

$$m(R) \propto R_m^{D_m}$$

Tence 等证明了表征粒子聚集分形结构粒子数目的分维数  $D_f$  与表征粒子簇团质量分布特征的质量分维数  $D_m$  本质上是完全一样的<sup>[31]</sup>。

运用光散射、沉积和图像分析等方法,可以实验测定粒子簇团聚集体结构的分形维数。Sorensen介绍了分形粒子团聚体的光散射过程、测试原理和方法<sup>[32]</sup>。通过一束入射光照射在粒子团聚体上所产生的光散射,获取粒子在团聚体中的位置信息,根据入射光强与散射光强度的传递关系,可以测得粒子团聚体的分形维数。Tang等实验测量了粒子体积浓度达12%的磷酸钙絮状悬浮液在静态和沉降过程中粒子簇团的分形维数,与理论预测值基本吻合<sup>[33]</sup>。Kammler等建立了实时观察燃烧法制备纳米粒子生长过程的粒子聚集体分形维数的超小角X射线散射测量技术,这种方法克服了传统的光散射方法的不足<sup>[34~36]</sup>。

## 5 结语与展望

纳米流体作为一种新型工质具有巨大的应用前景和潜在的重大经济价值,而纳米流体的制备则是其应用于实际工程的关键第一步。自纳米流体概念诞生的20年来,研究人员就一直在纳米流体制备方法的研究上做了大量工作。总的来说,目前纳米流体的制备技术取得了重大的进展,一步法和两步法的基本制备方法不断得到完善,在实验室条件下已经可以制得多种纳米流体。但是,目前在实际工程设备中大批量广泛应用纳米流体的文献还很少见,纳米流体在应用环境中的很多技术瓶颈仍未突破。为了获得分散均匀、稳定性高的纳米流体,广大科研人员还需在以下几个方面进一步深入研究:

(1) 纳米粒子在液体中的分布结构和聚集状态。这种聚集结构对纳米流体稳定性、均匀性、输运参数和能量传递过程起着至关重要的影响作用。

(2) 纳米流体的悬浮稳定性。纳米粒子之间以及粒子与周围环境之间的各种作用力都对纳米流体的悬浮稳定性产生影响,需要在传统的胶体分散理论上加入新的研究方法。

(3) 纳米粒子的表面特性、粒子属性、形状尺度等因素对纳米流体稳定性、均匀性的影响。纳米粒子自身属性也是其发生团聚现象的重要影响因素之一。

(4) 纳米流体加入分散剂的配方与作用机理。目前制备纳米流体加入分散剂已是主流方法,但是如何选择分散剂的种类与浓度以及由此产生的分散作用机理还需针对不同纳米流体进行

广泛的实验研究。

## 参考文献

- [1] Choi S U S, Eastman J A. Enhanced heat transfer using nanofluids, US, 6221275 [P]. 2001, 4(24).
- [2] Chang H, Tsung T T, Chen L C. Nanoparticle suspension preparation using the arc spray nanoparticle synthesis system combined with ultrasonic vibration and rotating electrode [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26: 552-558.
- [3] Lo Chih Hung, Tsung Tsing Tshih, Chen Liang Chia, et al. Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANS) [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2014, 7: 313-320.
- [4] Lo C H, Tsung T T, Chen L C. Shaped-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system [J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 277: 636-642.
- [5] 黄钧声, 聂玉营, 陈颖. 液相还原一步法制备超细铜纳米流体的研究[J]. 功能材料, 2010, 41(8): 1458-1464.
- [6] 张均成, 王婷, 邱志明, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁性流体的制备及其性能表征[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(4): 40-46.
- [7] 李艳娇, 孙崇锋, 郭剑锋, 等. AlN/EG 纳米流体的制备及稳定性研究 [J]. 功能材料, 2015(8): 8018-8022.
- [8] 吕雪, 刘洁, 丁素芳. 疏水性离子液体基银纳米流体的制备及稳定性研究[J]. 化工新型材料, 2014(8): 157-158.
- [9] 张飞龙, 王莉, 俞树荣, 等. 氧化石墨烯及其导热纳米流体的制备与性能[J]. 功能材料, 2015(16): 16138-16141.
- [10] 易宣民, 李强. 纳米流体能量传递理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] 李金凯, 赵蔚琳, 刘宗明, 等. 低浓度 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-水纳米流体制备及导热性能测试[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(1): 204-208.
- [12] 冯明, 张海燕, 林锦. 微波固相剥离制备石墨烯及其纳米流体的稳定性[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(5): 146-152.
- [13] 胡纪华, 杨兆禧, 郑忠. 胶体与界面化学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [14] 林海斌, 张国贤, 黄林林, 等. 纳米流体的分散性研究及其热物性测量[J]. 材料导报, 2014, 24(12): 29-32.
- [15] 凌智勇, 黄跃涛, 张忠强, 等. 表面活性剂对 Cu-H<sub>2</sub>O

- 和  $ZrO_2-H_2O$  纳米流体稳定性的影响[J]. 功能材料, 2015, (10): 10100-10103.
- [16] 李兴, 陈颖, 莫松平, 等. 表面活性剂对水基纳米流体固液相变特性的影响[J]. 化工学报, 2013, 64(9): 3324-3330.
- [17] 程大朋, 杨俊红, 井广宁, 等. 流动状态下粒子浓度对纳米流体悬浮稳定性的影响[C], 中国工程热物理学会传热传质学研讨会论文集, 2015.
- [18] 邵雪峰, 陈颖, 贾莉斯, 等. 中低温环境下  $Al_2O_3$ -乙醇纳米流体稳定性的研究[J]. 功能材料, 2014, 20(45): 20024-20027.
- [19] Yang Liu, Du Kai. A thermal conductivity model for low concentrated nanofluids containing surfactants under various dispersion types [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(7): 1978—1988.
- [20] 钱明. 激光照射纳米流体形成散斑的特性及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [21] 刘俊. 用于测量流体中纳米颗粒运动速度的 LSV 技术相关理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [22] Qian M, Liu J, Shen Z H, et al. Measurement of the velocities of nanoparticles in nanofluids with laser speckle velocimetry[J]. Lasers in Engineering, 2008, 18(3-4): 203-204.
- [23] 周陆军, 宣益民, 李强. 三维纳米磁流体 Monte Carlo 法模拟[C]. 中国工程热物理学会传热传质学研讨会论文集, 2006.
- [24] 王鹏, 白敏丽, 吕继组, 等. 纳米流体流动特性的多维模拟模型比较[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(10): 1739-1742.
- [25] 陈俊. 纳米流体输运性质作用机理的分子动力学模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [26] 张济中. 分形[M]. 北京: 清华大学, 1995.
- [27] Schaefer D W, Martin J E, Wiltzium P, et al. Fractal geometry of colloidal aggregates [J]. Physical Review Letters, 2012, 52: 2371-2374.
- [28] Pencea St C, Dumitrascu M. Fractal aspects of material [J]. Material Research Society Symposium Proceedings. Pittsburgh: MRS, 2014, 367: 373-378.
- [29] Lach-hab M, Gonzalez A E, Barojas E. Concentration dependence of structural and dynamical quantities in colloidal aggregation: computer simulations [J]. Physical Review E, 2012, 54(5): 5456-5462.
- [30] Yates P D, Franks G V, Jameson G J. Orthokinetic heteroaggregation with nanoparticles [J]. Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 326: 83-91.
- [31] Tence M, Chevalier J P, Jullien R. On the measurement of the fractal dimension of aggregated particles by electron microscopy [J]. Journal of Physique (Paris), 2011, 47: 1989-1998.
- [32] Sorensen C M. Light scattering by fractal aggregates [J]. Aerosol Science and Technology, 2009, 35: 648-657.
- [33] Tang P, Greenwood J, Raper J A. A model to describe the settling behavior of fractal aggregates [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2014, 247: 210-219.
- [34] 陈成, 周昌玉. 金属尘化腐蚀层的纳米划痕测试 [J]. 压力容器, 2014, 31(11): 21-25.
- [35] 曹国洲, 刘在美, 肖道清. 食品塑料包装中纳米碳酸钙填料分布及迁移特性 [J]. 包装与食品机械, 2015, 33(1): 5-7.
- [36] Kammler H K, Beaucage G, Kohls D J, et al. Monitoring simultaneously the growth of nanoparticles and aggregates by in situ ultra-small-angle x-ray scattering [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97: 053439.

---

作者简介: 姚远 (1976 -), 男, 博士, 工程师, 主要从事中低温余热制冷, 高效传热传质等方面的研究, 通讯地址: 510640 广州市能源路 2 号中国科学院广州能源研究所新能源大楼 510, E-mail: yaoyuan@ms.giec.ac.cn。

(上接第 77 页)

- [19] 齊藤信. フラッシュインジェクション方式高暖房能力パッケージエアコン [J]. 冷凍 (寒冷地ヒートポンプ特集), 2007, 82(952): 129-132.
- [20] Heo J, Jeong M W, Baek C, Kim Y. Comparison of the heating performance of air-source heat pumps using various types of refrigerant injection [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(2): 444-453.
- [21] Ko Y, Park S, Jin S, et al. The selection of volume ratio of two-stage rotary compressor and its effects on air-to-water heat pump with flash tank cycle [J]. Applied Energy, 2013, 104(1): 187-196.
- [22] Xu S, Ma G. Working performance of R-32 two-stage compression system in domestic air-conditioner [J]. Energy and Buildings, 2015, 93: 324-331.
- [23] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.

---

作者简介: 金旭 (1977 -), 男, 副教授, 博士, 主要从事空气源热泵及系统优化的研究, 通讯地址: 132012 吉林吉林市长春路 169 号东北电力大学能源与动力工程学院, E-mail: jinxu7708@sina.com。