文章编号:1673-9981(2007)04-0274-03

纳米流体的制备及传热性能研究的现状

蔡艳华¹, 马冬梅¹, 王金刚¹, 俞海军¹, 朱根华²

(1. 西南科技大学材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 对纳米流体的概念进行了概述, 重点阐述了纳米流体的典型制备方法及其传热性能的研究现状, 讨论了影响纳米流体导热的因素。

关键词: 纳米流体; 传热; 机理; 制备

中图分类号: TF123.7; O552.4

文献标识码: A

自美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等人提出纳米流体概念以来, 对纳米流体的研究逐渐成为化学化工、冶金、电子、材料科学等学科的研究热点^[1]。目前, 对纳米流体的研究已从制备简单的纳米流体转向提高纳米流体悬浮液的稳定性、纳米流体的强化传热及传热机理的理论研究等方面。由于纳米流体具有热传导率高、运动方式新颖、能耗小、无污染和使用范围广等特点, 对其性能和应用前景的探索备受关注。国内外很多大学和研究机构都相继开展了纳米流体及其强化传热的研究, 如美国 Argonne 国家实验室^[2]、中国科学院上海硅酸盐研究所^[3]、清华大学^[4]和南京理工大学等^[5]。可以预见, 纳米流体在高科技领域中具有很大的应用潜力及起到不可替代的作用。

1 纳米流体及制备方法

自 20 世纪 90 年代起, 伴随着纳米科学的快速发展, 研究人员开始探索将纳米材料应用于强化传热领域中, 纳米流体的概念也随之孕育而生。所谓纳米流体即是将粒径 1~100 nm 的金属、金属氧化物和非金属粒子, 按一定的比例和方式添加到流体中形成稳定悬浮液。

纳米粒子具有小尺寸效应、量子尺寸效应、表面

效应及宏观量子隧道效应等特征, 所以纳米流体悬浮液的稳定性好, 适合作为传热工质。但纳米粒子独特的活性使其很容易团聚在一起, 形成带有若干弱连接界面的较大的团聚体, 尤其是将纳米粒子添加到流体中形成悬浮液后这种现象尤为明显。因此, 如何使纳米粒子均匀地、稳定地分散在液体介质中, 形成分散性好、稳定性高及低团聚的纳米流体, 是制备纳米流体的关键, 也是纳米流体作为传热工质的前提。

目前, 制备纳米流体主要有以下两种方法。一种是先制备出纳米粒子(如氧化物、氮化物、金属及非金属碳化物等), 然后把所制备的纳米粒子分散到液体中(如水、乙烯基乙二醇、煤油等), 最终形成纳米流体悬浮液。该法的优点是操作简单、费用低和适用于所有的流体介质, 缺点是所制备的纳米流体悬浮液的稳定性较差。为了提高悬浮液的稳定性, 可通过改变悬浮液 pH, 添加分散剂并配以超声波振动, 以获得稳定的纳米流体悬浮液。S. Lee 等人^[2]用此方法成功地制备出了一系列氧化物纳米粒子—去离子水纳米流体。谢华清等人^[6]用此方法将纳米氧化铝粉和多壁碳纳米管添加到去离子水、乙二醇、泵油和辛烯中, 制备出分散性好的纳米流体悬浮液。宣益民等人^[7]将纳米 Cu 添加到变压器油和水, 再添加合适的分散剂并配以超声波振动, 使纳米 Cu 均匀

收稿日期: 2007-08-09

作者简介: 蔡艳华(1982-), 男, 重庆人, 助教, 硕士。

地分散在液体中,很少出现团聚现象。

另一种是在制备纳米颗粒的同时将其分散到基液中。J. A. Eastman 等人^[8]在充入惰性气体的超真空环境中,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为纳米粒子,纳米粒子落入流体中而制成纳米流体。通过改变金属和流体的种类,可制备不同类型的纳米流体。经电镜观察及静置实验发现,纳米流体悬浮液中的粒子分散性好、悬浮液稳定性较高,此方法的不足之处是成本过高,不利于实际应用。

2 纳米流体的热传导

2.1 纳米流体传热的机理研究

提高液体热导率的一种有效方法是在液体中添加固体颗粒。由于固体颗粒的热导率比液体的热导率大几个数量级,因此,有固体颗粒悬浮的两相流体的热导率要比相应纯液体的大。人们对此进行了大量的理论研究和实验,并取得了一定的成果。然而,这些研究都局限于用毫米或微米级的固体颗粒,由于固体颗粒粒径太大,易沉降,无法形成长期稳定的悬浮液,且容易造成热交换设备磨损、堵塞等不良结果。因此,这些研究成果在工业中没有得到应用。纳米流体作为一种新型的传热工质可以显著强化传热,一系列研究表明^[2,9-10]:在液体中添加纳米粒子,可以显著提高液体的导热系数,提高热交换系统的传热性能。添加纳米粒子能够显著提高流体导热性能,其主要原因是:纳米粒子在流体中做无规则运动时,粒子所携带的能量发生迁移,这部分能量迁移增强了纳米流体内部的能量传递,提高了纳米流体的热导率;纳米粒子的微运动使粒子与液体间有微对流存在,这种微对流增强了粒子与液体间的能量传递,也提高了纳米流体的热导率;此外,纳米粒子间的相互作用及碰撞,也起到了增强传热的作用。

Zhou 等人^[11]的研究结果表明:在水中添加体积分数为 0.4% 的 CuO 纳米粒子,所形成的纳米流体的导热系数比水提高了 17%;在乙烯基-乙醇溶液中添加体积分数为 0.3%、粒径为 10 nm 的 Cu 粒子,所形成的纳米流体的导热系数比乙烯基-乙醇溶液提高了 40%。Pak 等人^[12]测试了 $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ -水和 TiO_2 -水两种纳米流体在管内湍流状态下的对流换热系数和阻力系数,其中 $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的粒径为 13 nm,

TiO_2 的粒径为 27 nm。实验结果表明,在相同的 Reynolds 数下,纳米流体的对流换热系数比纯水相的大,而且随纳米粒子体积分数的增加而增大。王涛等人^[13]的研究结果表明:采用醇盐水解法所制备的 SiO_2 -水纳米流体,当 SiO_2 颗粒粒径为 50~200 nm 时,纳米流体的稳定性好;当纳米粒子的体积分数为 1.3%,平均粒径为 70 nm 时,纳米流体的热导率比纯水相提高了 24%。

仇中柱等人^[14]的研究结果表明:温度对纳米流体热导率的影响与纳米粒子的体积分数有关。当 CuO 粒子的平均粒径为 30 nm,体积分数分别为 0.1%,0.5%和 1.0%,温度低于 25℃时,温度对纳米流体热导率的影响不显著。在 CuO 纳米粒子的体积分数为 1%的条件下,当温度高于 25℃时,纳米流体的热导率随着温度的升高而急剧升高;当温度为 55℃时,纳米流体的热导率是去离子水的 1.6 倍以上。李强等人^[15]运用瞬态热线法,测量了 Cu-去离子水纳米流体、Al-机油纳米流体和 Al-去离子水纳米流体在纳米粒子不同体积分数下的热导率。实验结果表明:在液体中添加少量纳米粒子可以增加流体的热导率,纳米流体的热导率随纳米粒子体积分数的增加呈线性增大,但对于不同类型的纳米流体,纳米粒子属性、粒径及纳米流体悬浮稳定性的不同,纳米流体热导率增加的比例也不同。

2.2 影响纳米流体导热性的因素

导热系数是反映介质换热能力的主要参数,影响纳米流体导热系数的主要因素包括以下几个方面^[3,16]。(1)布朗运动的影响:由于纳米颗粒粒径小,在液体内作布朗运动的速率较大,使粒子间的碰撞频率增大,引起颗粒聚集,同时也使粒子与液体间产生微对流。因此,纳米流体的导热系数取决于固-液两相的有效热扩散和颗粒迁移的共同作用。(2)非限域传递的影响:当纳米颗粒的粒径接近或小于晶体材料的声子平均自由程时,晶格振动波受纳米颗粒界面的强烈散射,热流的传递是跳跃式和非限域的。(3)液膜层的影响:当纳米颗粒加入到液体中时,在固液界面上会形成几个原子厚的液膜,液膜层内的液体分子受纳米颗粒表面原子排列的影响,趋向固相,相当于固相的体积分数增加,其导热系数远大于液体本身的导热系数。(4)颗粒聚集的影响:由于悬浮液内的纳米颗粒间碰撞频率大,易引起颗粒聚集,进而形成团聚,团聚体易沉降,不利于形成均匀稳定

的悬浮液.对于固相体积分数较低的悬浮液,纳米颗粒的团聚和沉降会进一步降低悬浮液的固相含量,在悬浮液内有可能出现无固相区域,导致热阻增大,悬浮液的导热系数降低.如果悬浮液中纳米颗粒的间距小于1 mm,且稳定分散在这些纳米颗粒富集区域内,那么在两个颗粒表面上附着的液膜层就会接触甚至部分重叠,这相当于两个纳米颗粒直接接触,极大地降低了热阻,有助于悬浮液导热系数的增大.

3 结 语

随着纳米流体的不断发展,其在化学化工、冶金、热能及材料科学等领域中已显现出广阔的应用前景.进一步深入探讨纳米流体的传热机理,是科学自身发展的必然要求,具有十分重要的科学价值;对于应用而言,科学技术的飞速发展和能源问题的日益突出,使得热交换设备的传热负荷和传热强度日益增大,纳米流体作为一种新型的强化换热工质,必将发挥越来越重要的作用.

参考文献:

- [1] 马坤全,刘静.纳米流体研究的新动向[J].物理,2007,36(4):295-300.
- [2] LEE S, CHOI S U S, LI S, et al. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles[J]. ASME Journal Heat Transfer, 1999, 121:280-289.
- [3] 谢华清,奚同庚,王锦昌.纳米流体介质导热机理初探[J].物理学报,2003,52(6):1444-1449.
- [4] 戴闻亭,李俊明,王补宣,等.细圆管内氧化铜颗粒悬浮液流动与对流换热的实验研究[J].工业加热,2002,31(5):1-4.
- [5] 宣益民,余凯,吴轩,等.基于 Lattice-Boltzmann 方法的纳米流体流动与传热分析[J].工程热物理学报,2004,25(6):1021-1024.
- [6] 谢华清,奚同庚.纳米流体导热系数研究[J].上海第二工业大学学报,2006,26(3):200-203.
- [7] 宣益民,李强.纳米流体强化传热研究[J].工程热物理报,2000,21(4):466-470.
- [8] EASTMAN J A, CHOI U S, LI S, et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids[J]. Mater Res Soc Symp Proc, 1997, 475: 3-11.
- [9] WANG X W, XU X F, CHOI S U S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture[J]. J Thermophys Heat Trans, 1999, 13:474-480.
- [10] XUAN Y M, LI Q. Heat transfer enhancement of nanofluids[J]. Int J of Heat and Fluids Flow, 2000, 21(1):58-64.
- [11] ZHOU L P, WANG B X. Experimental research on the thermophysical properties of nanoparticle suspensions using the quasi-steady state method [C]. Shanghai: Annu Proc Chinese Eng Thermophys, 2002:889-892.
- [12] PAK B C, CHOI Y L. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles[J]. Exper Heat Trans, 1998(11):151-170.
- [13] 王涛,骆仲决,郭顺松,等.可控纳米流体的制备及热导率研究[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(3):514-518.
- [14] 仇中柱.纳米流体热导率的测量与评价[J].节能,2005(4):13-15.
- [15] 李强,宣益民.纳米流体热导率的测量[J].化工学报,2003,54(1):42-46.
- [16] KEBLINSKI P, PHILLIPS S R, CHOI S U S, et al. Mechanisms of heat flow in suspensions of nanosized particles(nanofluids)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 855-863.

Recent progress in the studies of preparation and heat-transfer properties of nanofluids

CAI Yan-hua¹, MA Dong-mei¹, WANG Jin-gang¹, YU Hai-jun¹, ZHU Gen-hua²

(1. School of Material Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: The concept of nanofluids is summarized. The recent development of typical preparation techniques and the studies of heat-transfer properties of nanofluids are extensively reviewed. The influence factors on the thermal conductivity of nanofluids are also discussed.

Key words: nanofluids; heat-transfer; mechanisms; preparation