

纳米流体技术研究现状与应用前景

吴金星 曹玉春 李 泽 魏新利

(郑州大学节能技术研究中心, 郑州 450001)

摘 要 阐述了纳米流体的特点和类型, 以及纳米流体的制备方法与悬浮稳定性研究概况; 分析了纳米流体的导热机理、导热性能以及影响其导热系数的各种因素; 介绍了纳米流体的对流换热和沸腾换热性能研究现状。最后对纳米流体在传热、制冷及余热回收等系统的应用前景进行了展望。

关键词 纳米流体, 制备方法, 悬浮稳定性, 强化传热

Research actuality and application foreground of nanofluids technology

Wu Jinxing Cao Yuchun Li Ze Wei Xinli

(Zhengzhou University Research Center of Energy Saving Technology, Zhengzhou 450001)

Abstract An introduction was gave to the characteristics and types of the nanofluids and the preparation methods and the suspension stability of the nanofluids. The heat conduction mechanism, heat conduction performance of nanofluids as well as the affecting factors of the conductivity were analysed. The research actuality of convective heat transfer and boiling heat transfer of the nanofluids was introduced. Finally the application foreground of the nanofluids was prospected to the heat transfer, refrigeration and waste heat recovery systems.

Key words nanofluid, preparation method, suspension stability, heat transfer enhancement

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, 因为固体粒子的导热系数比液体大几个数量级。从 Maxwell 理论发表以来, 许多学者开展了在液体中添加固体粒子以提高其导热系数的理论和实验研究, 并取得了一些成果。但这些研究局限于用毫米或微米级的固体粒子悬浮于液体中, 在实际应用中易于沉降无法形成长期稳定的悬浮液, 用于换热器中易引起磨损、堵塞等不良后果, 还会使流动阻力增大, 从而大大限制了其在工业中的应用。

自 20 世纪 90 年代以来, 随着纳米材料科学的迅速发展, 研究人员开始探索将纳米材料技术应用于强化传热领域, 研究新一代高效传热及冷却技术。1995 年, 美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等^[1]首次提出纳米流体的概念, 即以一定的方式和比例在液体中添加纳米级金属或非金属氧化物粒子而形成的一类新型的传热及冷却工质。并与 Eastman 等^[2]合作实验发现, 以不到 5% 的体积比在水中添加氧化铜纳米粒子, 形成的纳米流体导热系数比水提高 60% 以上, 强化传热效果非常明显。随着此概念的提出, 关于纳米流体的研究相继展开: 前期对纳米流体的研究主要集中在以下几个方面: (1) 纳米流体体系的研究; (2) 纳米流体的制备方法研究; (3) 纳米流体的稳定性; (4) 纳米流体的传热特性; (5) 纳米流体强化传热机理的研究等。近期诸多学者展开了对纳米流体在工业中应用的研究, 并取得了一些成果, 主要集中在强化传热领域, 在制冷系统中的应用, 余热回收系统中的应用及生物制药领域的应用等。

1 纳米流体的特点及分类

1.1 纳米流体的特点

纳米材料是指 0.1~100 nm 超细微粒组成的材料, 包括零维的纳米粒子、一维的纳米线、二维的纳米膜和三维的纳米固体。纳米材料在晶粒尺寸、表面与体内原子数和晶粒形状等方面与一般材料有很大区别, 具有特异的光、电、磁、热、力、化学和生物性能, 不仅在高科技领域有着不可替代的作用, 也为传统产业带来了巨大生机和活力。

将纳米材料以一定比例加入到液体中即形成纳米流体, 它表现出以下特殊的效果:

(1) 在液体中添加纳米粒子, 一方面由于固体的导热系数大于液体的导热系数, 另一方面由于纳米颗粒具有较大的比表面, 使得它大幅度提高纳米流体的导热能力和热容量, 从而可减少循环泵的能量消耗, 降低运行成本。

(2) 与纯液体相比, 纳米流体中的纳米颗粒在流体内部无规则运动, 使流体的流动层流底层受到破坏, 并加强了流体的扰动, 流动湍流强度随之增强, 因而减小了传热热阻, 强化了对流传热。

(3) 由于纳米颗粒的小尺度效应, 使得其行为更接近于液体分子, 在流体介质中纳米粒子强烈的布朗运动能抵御重力引起的聚沉, 从而可以保持长时间稳定。

(4) 由于纳米粒径较小, 使得纳米流体可以作为润滑介质, 从而减轻管道和设备的磨损, 起到润滑流道的作用。

基金项目: 国家自然科学基金和福建省自然科学基金(E0210022)

作者简介: 吴金星(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事换热设备强化传热、CFO 与节能技术等研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1.2 纳米流体的主要类型

从理论上讲,所有导热系数较高的固体纳米颗粒都可用于纳米流体,如金属、非金属、氧化物、碳化物、氮化物以及包覆材料、相变材料、功能材料等。纳米流体的基液主要有水、乙二醇、导热油、气体、金属流体、离子液体及更多相流体等。由于研究时间尚短,目前所报道的纳米流体体系主要有以下几类:

(1) 金属纳米颗粒组成的纳米流体

宣益民等^[3]研究出一种稳定的纳米流体悬浮液的制备方法,测定了纳米流体的导热系数。实验发现,在水中添加 5% (体积分数) 的铜纳米粒子,液体导热系数可增大约 1.5 倍;对于金属纳米颗粒组成的体系,在乙二醇中加入体积分数仅为 0.3%、尺寸为 10 nm 的 Cu 粒子,纳米流体的导热系数可提高 40%^[4]。

(2) 氧化物纳米颗粒组成的纳米流体

氧化物纳米颗粒体系,是研究最早的纳米流体体系。Lee 等^[5]研究了 CuO/水、CuO/乙二醇纳米流体体系,结果表明:含有 CuO 纳米流体的热导率的增强,比相同体积分数下 Al₂O₃ 纳米流体的增强要高。谢华清等^[6]用自行建立的对流换热测试系统研究了纳米颗粒悬浮液介质的平均对流换热系数,结果表明,加入不同尺寸的 Al₂O₃ 纳米颗粒对提升基质的热导率有显著的效果。金翼等^[7]同时实验测量了 TiO₂ 纳米流体的导热系数和对流换热系数,发现二者都随着纳米颗粒的浓度增大而提高,在实验管道内的不同位置,纳米流体对流换热系数的提高程度不同,其原因是纳米颗粒的迁移对流体边界层的影响。

(3) 非氧化物组成的纳米流体

Xie 等^[8]把多壁碳纳米管酸化处理后,分散到离子水、乙二醇中,当碳纳米管为 1% 体积分数时,体系的热导率增强分别为 7% 和 12.7%,即基质的热导率越低,纳米流体的热导率增强幅度越大。此外,Choi 的小组^[9]还研究了多壁碳纳米管纳米流体体系的导热性能,他们在石蜡油中加入体积分数仅为 1% 的碳纳米管,流体的热导率可提高 160%。

(4) 添加纳米液滴的新型纳米流体

纳米液滴是一种尺寸在 10~100 nm 并包含了大约 10⁴~10⁷ 个液体分子的微观液滴。这种液滴的特性既不同于微观液体分子团簇,又不同于宏观尺度的液体。在这种纳米流体中,纳米颗粒以液滴形式存在。其中两种液体互不相容,由于没有固体纳米颗粒,二者可长时间处于稳定状态,亦因此可将较大体积份额的纳米液滴加入到基液中。这些特性有望使纳米流体在传热介质热物性的提升方面得到加强。Yang 等^[10]考察了纳米水滴在 FC-72 中增强传热的问题,其中液滴直径约 9.8 nm,体积分数为 12%,测得的有效热导率增加了 52%。

2 纳米流体的制备与悬浮性研究

2.1 纳米流体的制备方法

纳米流体不是纳米粒子与流体基液的简单混合,因为纳米粒子在与基液形成的悬浮液中很容易发生团聚现象,因此,必须采用一定的措施获取分散均匀、稳定性好、持久和低团聚性的纳米流体。可见,纳米流体的制备是纳米流体研究和应

用中最关键的一步。目前纳米流体的制备方法主要有 3 种:

气相沉积法,是通过电子束加热坩埚中的原料使其蒸发,在旋转圆盘的离心力作用下,在容器的壁上形成一层很薄的流动液膜,蒸汽遇到冷的液相,在液相中形成纳米颗粒,将纳米颗粒和液体一起回收就得到了纳米流体。该方法由 Choi 等^[9]提出,文献中也称为“一步法”。气相沉积法把纳米粒子的制备与纳米流体的制备结合在一起,所制得的纳米颗粒小(约 10 nm),纳米颗粒在流体中分散好,无需加入分散剂或改性处理就能得到稳定悬浮的纳米流体。但该方法仅适合在低蒸汽压的流体中制备含金属粒子的纳米流体,并且对设备要求较高,费用高,产量小,不易于工业化生产。

分散法,是把制备好的纳米粉体(干粉)通过适当的分散手段(如加入分散剂、改变体系 pH 值、改性处理、超声振动等)分散到液体介质中。分散法制备工艺简单、工序少,易制备高固相的纳米流体,易于批量化生产。但对于纳米粉体来说,由于其巨大的比表面积及表面活性,在纳米粉体的制备、存储、运输等过程中,颗粒易形成团聚体。这些团聚体在纳米流体制备时(采用上述分散手段)一般难以完全打开。团聚体的存在,既降低了纳米流体的稳定性,又大大削弱了纳米流体强化传热的效果。此外,对于金属纳米粉体而言,当粒度小到一定程度时,易于氧化,甚至自燃。因此,分散法不适于制备极小纳米金属颗粒形成的纳米流体。

共混法,是将一定比例的金属或金属氧化物纳米颗粒与一定比例的液体介质直接混合,再添加一定的分散剂,之后采取超声振动而制成纳米流体的方法。文献中也称为“两步法”。宣益民等^[3]采用混合法制备了含 Cu 纳米粒子的纳米流体,彭小飞等^[11]采用“两步法”制备了多种纳米流体。

2.2 纳米流体的悬浮性研究

与传统的液-固混合物相比,纳米流体中由于纳米粒子的比表面积大,表面能高,容易团聚,而且固体颗粒的密度比基液大,又容易引起沉降。因此,如何使纳米粒子均匀、稳定地分散在液体介质中,形成分散性好、稳定性高、持久且低团聚的纳米流体,是将纳米流体应用于强化传热所必需研究的。彭小飞等^[11]从纳米粒子种类、粒径、密度、质量分数、基础液体性质、分散剂 pH 值和超声振动等方面,考察了纳米流体系统中粒子的沉降状态,获取了具有良好悬浮稳定性的纳米流体配方,并结合颗粒的受力情况,分析了纳米流体悬浮稳定机理。归纳起来,解决纳米流体的悬浮稳定性问题有以下 3 种方法:

(1) 选择适当的电解质作分散剂,调节纳米流体 pH 值,使纳米粒子表面吸引异电离子形成双电层,通过双电层之间的排斥作用使粒子之间发生团聚的引力大大降低,从而实现纳米粒子分散的目的。

(2) 加表面活性剂使其吸附在粒子表面,形成微胞状态,由于活性剂的存在而产生了粒子间的排斥力,使得粒子间不能接触,从而防止团聚体的产生。

(3) 使用超声振动分散粒子,其原理是使用超声频振荡破坏团聚体中小粒子之间的相互吸引力(如范德瓦耳斯力),从而使颗粒团分散。

3 纳米流体的强化传热研究

随着对换热器换热表面强化传热技术研究的深入,低热导率的换热基质已经成为研究新一代高效换热器的主要障碍。要进一步研制体积小、质量轻、传热性能好的高效紧凑型换热器,满足高负荷传热要求,必须从换热基质入手,研制高热导率、传热性能好的高效新型换热基质。而纳米流体技术的出现恰好为我们提供了一个思路。

3.1 纳米流体的导热机理及其影响因素

对于纳米流体来说,由于纳米粒子的尺度问题,作用在粒子上的微作用力如范德瓦耳斯力、静电力和布朗力等都不可忽略,这些微作用力与粒子尺寸、形状、表面特性、粒子和液体的化学性质及温度等密切相关,纳米粒子的微作用力及由此产生的微运动引起粒子间的碰撞,以及粒子和液体间的微对流现象,强化了纳米流体的能量传递能力,从而强化了纳米流体的导热系数。Kebliński 等^[13]分析了纳米颗粒在基液中的布朗运动、纳米颗粒表面吸附的薄液层、纳米颗粒内部热载子弹性散射及纳米颗粒团聚等 4 个方面因素对纳米流体导热系数强化的作用机理。根据目前文献研究,导热系数的主要影响因素可归结为:(1) 布朗运动的影响,(2) 非限域传递的影响,(3) 液膜层的影响,(4) 颗粒聚集,(5) 纳米流体的悬浮稳定性,(6) 分散剂的影响^[3]以及固体界面等因数影响。

3.2 纳米流体的对流换热

宣益民等^[3]研究发现,在相同雷诺数下对流换热系数随液体中添加纳米粒子体积份额的增加而增大,但纳米流体的流动阻力系数稍有增大。Khanafar 等^[13]采用数值模拟研究了矩形容器内 Cu/水纳米流体的传热特性,发现由于纳米颗粒的随机运动,纳米流体的自然对流换热性能随 Cu 纳米颗粒体积分数的增加而显著改善。Patra 等^[14]研究了水平圆筒中 Al₂O₃/水及 CuO/水体系纳米流体的自然对流换热特性。结果表明:纳米流体的传热特性比纯水的要差,并且 CuO/水体系的效果比 Al₂O₃/水体系的要差。

3.3 纳米流体的沸腾换热

Das 等^[13]研究了矩形容器内 Al₂O₃/水的池内沸腾传热。随着纳米颗粒体积分数的增加,纳米流体的池内沸腾现象退化,这种退化并不是由流体的特性改变引起,而是由于沸腾过程中纳米颗粒被界面捕获,引起界面特性改变而导致过热。Zhou^[19]研究了常压下 Cu/丙酮纳米流体池沸腾的换热状况,实验结果表明,在单向对流换热区,无论有无声空场,纳米颗粒的添加都会使传热强化在核态沸腾区,无声空场时,沸腾换热系数降低,这与 Das 的研究结果相同。

4 纳米流体的工业应用前景

由于纳米材料的小尺寸效应,其行为接近于液体分子,不会像毫米或微米级粒子易产生磨损或堵塞等不良后果。因此,与在液体中添加毫米或微米级粒子相比,纳米流体更适于实际应用。基于纳米颗粒的特点及其组成的纳米流体特性,纳米流体可以广泛地应用到工业领域,纳米流体的研究和应用也为许多高科技领域一些难题的解决提供了新的方法和思路。如在一个典型的冷却系统中,要增加两倍的换热量,泵的

功率就必须增大到原来的 12 倍;而采用一种具有良好传热性能的纳米流体,泵的功率将会降低 1 个数量级,可大大降低能耗。

4.1 纳米流体在强化传热领域的应用

Tsai 等^[17]在铜热管中加入金属纳米流体与去离子水进行实验,结果发现,以去离子水为工质的热阻值为 0.27℃/W,而由金纳米流体填充的热管热阻值仅为 0.17℃/W,降低约 37%。Kang 等^[18]在沟槽式圆形热管中添加银纳米流体,试验发现,在相同充填率下,当加热功率为 30~60W 时,其平均热阻比充填纯水减少 30%~80%,而且热阻随着银纳米流体颗粒直径和浓度的增加而降低。美国密苏里大学热管研究中心的 Ma 等^[18]将体积分额为 1% 的金刚石纳米颗粒加入到振荡热管中,实验发现,纳米流体热导率从 0.5813W/(m·K) 上升到 1.0032W/(m·K),以这种纳米流体作为工质的振荡热管,体现出了可观的传热性能改进,在输入量为 80W 的功率下,该热管蒸发段和冷凝段的温差从 40.9℃ 降至 24.3℃。黄素逸等^[19]研究了在普通热管的工质中分别加入 ZnO、SiO₂、Al₂O₃ 和 TiO₂ 纳米粉,发现新型热管启动速度快、管壁温度低、换热性能好;加入的纳米粉的尺寸越小,热管的换热性能越好;在一定范围内,纳米粉加入量越多,热管换热性能越好。

上述研究显示,将纳米流体引入到热管之中,可显著改善热管的传热性能。此类技术预计会在航空航天、电子设备冷却及化工等领域得到应用。

4.2 纳米流体在制冷领域中的应用

近期有学者开展了纳米颗粒在制冷系统中的应用研究,表明特定介质的纳米颗粒能够有效改善 HFC 制冷剂与矿物油基冷冻油的相容性,制冷系统的效率得到了一定提高。何庆波^[20]针对目前低温相变蓄冷材料结晶时存在过冷度以及导热系数低的问题,开发出一种既能降低液体成核过冷度又能提高其导热系数的高效纳米流体蓄冷材料,并经过大量实验发现,其导热系数比普通的材料大大增加,过冷度降低很多,且相变潜热和相变温度都基本稳定,说明此蓄冷材料热稳定性比较好。李金平^[21]提出了制冷剂气体水合物在纳米流体中快速生成的设想,研究了气体水合物在纳米二氧化钛流体、纳米铜流体和纳米银流体中的静态生成过程,结果表明,纳米粒子的加入使得气体水合物快速结晶和生长。Lee 等^[3]用纳米流体和微管换热技术制成冷却强度可达 30MW/m² 的高效冷却系统,实验测试效果良好。

上述研究表明,将纳米流体引入到制冷系统中,可显著改善制冷系统的制冷性能。目前太阳能空调普遍存在着效率低、价格高等问题,但随着纳米流体技术的发展,将纳米流体与相变蓄冷材料结合,制备新型高效的纳米流体相变蓄冷材料应用于太阳能空调蓄冷系统,不但可以满足空调在夜间 8h 内蓄冷的要求,且具有蓄冷方法可行度高、蓄冷系统结构简单、占地面积小、运行费用低和经济性好等潜在优点。纳米流体相变蓄冷介质的应用将不仅仅局限在空调领域,只要是存在局部冷量供给需求的领域,这种蓄冷方式即可发挥它的独特作用。

4.3 纳米流体在余热回收系统中的应用

(下转第 22 页)

ciety, 2004, 15(10) :A 1670-A 1677.

- [20] Li Yuzhan, Zhou Zhen, Gao X P, Yan Jie. A novel sol-gel method to synthesize nanocrystalline Li VPO₄F and its electrochemical Li intercalation performances [J]. Journal of Power Source, 2006(160) :633-637.
- [21] Zhong Shengkui, Yzn Zhoulan, Wang Zhixing. Synthesis and electrochemical properties of Al doped Li VPO₄F cathode materials for lithium ion batteries [J]. Rare Metals, 2007, 26(5) :

445-449.

- [22] 李宇展, 周震任, 俊霞, 等. 铬掺杂的锂离子电池正极材料 Li VPO₄F 的制备以及电化学行为的研究 [J]. 无机化学学报, 2006, 22(3) :477-482.

收稿日期:2008-09-02

修稿日期:2008-10-06

(上接第 12 页)

目前为了实现节能降耗,许多企业都在开展余热回收。例如,利用热风炉烟道废气的余热去预热助燃空气和煤气,以提高热风温度;或将热风炉烟道废气用于煤粉制备系统,用来干燥煤粉;还有烧结机带冷余热回收,烘燥设备余热回收等。这些余热回收过程都涉及强化传热,如果换热器采用纳米流体为换热工质,余热回收率将大幅度提高,将给企业带来巨大的经济效益。

4.4 纳米流体在其它方面的应用

基于纳米流体的各种优越特点,使得它在很多领域都有广阔应用的前景,比如:(1) 纳米流体在生物医学方面的应用;(2) 含有表面活性剂的纳米流体可用来增加石油开采量,改良油污后的土壤等;(3) 用于制造各种更高效的换热器、散热器和热管换热器器件等;(4) 纳米流体还可起到润滑流动的作用,由此可以预测,将纳米流体用于减阻流体会起到很好的效果。

5 结 语

由于纳米流体具有运动方式新颖、能耗小、无污染和使用范围广等特点,可使各类科学研究和工程技术产生新的变革,所以受到人们的极大关注。纳米流体的研究方兴未艾,在许多领域逐步显示出其巨大的作用。尽管国内外学者对纳米流体的研究取得了大量成果,但纳米流体的发展和工程应用仍然受到许多因素制约,多数研究者重点关注的是纳米流体的导热和对流传热性能,而减阻性能报道较少,实验结果之间缺乏统一的评价标准,对纳米流体悬浮液的稳定性等特性认识不足,对纳米流体的强化传热机理认识不够深入等。可见,纳米流体仍是一个新兴的研究领域,在许多方面尚处于初步研究阶段,需要进一步深入和拓宽研究内容,要真正实现工程应用还有大量工作要做。

参考文献

- [1] Choi S U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [J]. Asum Ped, 1995, 23(66) :99-103.
- [2] East man 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.
- [3] Xuan Yi min, Li Qiang. Heat transfer enhancement of nanofluids [J]. Int J Heat Fluid Flow, 2000, 21:58-64.
- [4] East man J A, Choi S U S, Li S, et al. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycon based nanofluids containing copper nanoparticles [J]. Appl Phys lett, 2001, 78(6) :718-720.
- [5] Lee S, Choi S U S, Li S, East man J A. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles [J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121:280-289.
- [6] 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, 5(6) :1444-1449.
- [7] 金翼, Yulong Ding, Dongshen Wen, 等. TiO₂ 纳米流体的对流传热系数测定 [J]. 冶金能源, 2006, 25(6) :47-50.
- [8] Xie H Q, Lee H Y, Youn W I, et al. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities [J]. J Appl Phys, 2003, 94:4967-4971.
- [9] Choi S U S, Zhang Z G, W Yu, et al. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions [J]. Appl Phys Lett, 2001, 79:2252-2554.
- [10] Yang B, Han Z H. Thermal conductivity enhancement in water-in-FC72 nanoeulsion fluids [J]. Applied Physics Letters, No. 261914, 2006, 88(26).
- [11] 彭小飞, 俞小莉, 夏立峰, 等. 纳米流体悬浮稳定性影响因素 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(4) :577-580.
- [12] Kehlinski P, Phillpot S R, Choi S U S, et al. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano sized particles (nanofluids) [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45(4) :855-863.
- [13] Khanafer K, Lightstone M. Buoyancy driven heat enhancement in a two dimensional enclosure utilizing nanofluids [J]. Int J Heat Mass Tran, 2003, 46, 39-53.
- [14] Patra N, Roetzel W, Das S K. Natural convection of nanofluids [J]. Heat Mass Tran, 2003, 46, 851-862.
- [15] Das S K, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nanofluids [J]. Int J. Heat Mass Transf, 2003, 46, 851-862.
- [16] Zhou D W. Heat transfer enhancement of copper nanofluid with acoustic cavitation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47:3109-3117.
- [17] Tsai C Y, Chien H T, Ding P P, et al. Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance [J]. Material Letters, 2004, 58:1461.
- [18] 马坤全, 刘静. 纳米流体研究的新动向 [J]. 物理, 2007, 36(4) :295-300.
- [19] 黄素逸, 李中洲, 黄锑剑, 等. 纳米材料在热管中的应用 [J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(5) :105-107.
- [20] 何庆波. 纳米流体相变蓄冷材料的热物性及小型蓄冷系统特性研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2005.
- [21] 李金平. 纳米流体制冷剂气体水合物生成动力学和相平衡特性研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2005.

收稿日期:2008-05-03

修稿日期:2008-07-07