

文章编号:1673-9981(2008)03-0173-04

金属及其氧化物纳米流体的研究及应用

陈 泉, 张仁元, 毛凌波

(广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510090)

摘 要:介绍了纳米流体换热工质的概念、特点及制备方法,分析了目前金属及其氧化物纳米流体的研究及应用现状。

关键词:纳米流体;强化换热;制备;应用

中图分类号: TK02

文献标识码: A

随着经济的飞速发展,能源问题日益突出,传统的纯液体换热工质已很难满足一些特殊条件下的传热与冷却要求,需要从换热工质入手,研制高热导率、传热性能好的高效新型换热工质,以达到既强化传热又降低能耗的目的。

由于固体粒子的导热系数比液体大几个数量级,悬浮有固体颗粒的两相流体的热导率要比相应的纯液体大得多,所以提高液体传热性能的一种有效方式是在液体中添加金属、非金属或聚合物的固体粒子。

1995年,Choi等人^[1]首次提出了纳米流体的概念:以一定的方式和比例将纳米级金属或金属氧化物的粒子添加到流体中,形成一类新的换热工质。由于热量是在颗粒的表面进行传递的,而纳米颗粒的比表面积大,所以它的传热效果更好。研究表明,在液体中添加纳米颗粒可以显著增加液体的导热系数,大大提高热交换系统的传热性能。例如,在乙二醇中添加体积分数为4%的CuO纳米颗粒,其导热系数可提高20%以上;在水中添加体积分数约1%的CuO纳米颗粒,相同流动状态下可使对流换热系数提高20%以上^[2]。大的比表面积不仅传热能力强,而且不易沉降,可形成长期稳定的悬浮液。这使得纳米流体被广泛应用于各种场合。

1 纳米流体的制备

纳米流体不是简单的液-固混合物。在纳米颗粒的悬浮液中,颗粒表面的活性使它们很容易团聚在一起,形成带有若干弱连接界面的较大团聚体。因此,如何使纳米粒子均匀、长期稳定地分散在液体介质中,形成分散性好、稳定性高、持久及低团聚的纳米流体,是纳米流体应用于强化传热领域的前提条件。一般来说,制备纳米流体的方法有两种:(1)采用气相沉积法直接制备纳米流体^[3]。在这种方法得到的纳米流体中,纳米颗粒的分散性较好,但悬浮稳定性不高,纳米流体只能稳定悬浮几天到一周左右,而且费用高,不适合实际应用的需要。(2)将纳米颗粒与液体直接混合,并添加一定量的表面活性剂或分散剂,用超声波振动或机械球磨一定时间来制备纳米流体。用这种方法制得的纳米流体的分散性好,纳米颗粒可长期稳定悬浮在液体介质中,且操作简单,费用比较低。广东工业大学储能实验室是将一定体积分数的Cu纳米颗粒与去离子水-乙二醇相混合,选用亲水性分散剂,然后机械球磨一定时间,制得Cu-水-乙二醇纳米流体。结果表明:这种纳米流体性能稳定,纳米颗粒能长时间均匀地分散在溶剂中。

收稿日期:2007-12-10

作者简介:陈泉(1984—),男,江西九江人,博士研究生。

2 金属及其氧化物纳米流体的研究

纳米流体比传统液体工质具有更优越的传热性的主要原因是:纳米粒子显著增大了纳米流体的导热系数。Eastman 等人^[3]采用气相沉积法制备了 Cu-水、Cu-机油、 Al_2O_3 -水等纳米流体,并采用瞬态热线法测量了上述纳米流体的热导率。实验结果表明,纳米流体的热导率显著提高,其热导率随纳米粒子的体积分数的增加而增大。在水中加入 $\varphi(\text{CuO})=5\%$ 的纳米粒子,制成 Cu-水纳米流体,其热导率比水提高了 60% 以上。另外,纳米流体的热导率还与纳米粒子的性质有关。例如,在水中添加相同体积分数的 Cu 和 Al_2O_3 纳米粒子,所得的 Cu-水纳米流体的热导率比 Al_2O_3 -水纳米流体的热导率大。Masuda 等人^[4]的研究结果表明:在水中添加 $\varphi(\text{Al}_2\text{O}_3)=4.3\%$,平均直径为 13 nm 的 Al_2O_3 纳米粒子,所得的 Al_2O_3 -水纳米流体的导热系数比水提高了 30%。Lee 等人^[5]测量了在水中加入 $\varphi(\text{Al}_2\text{O}_3)=4.3\%$,平均直径为 33 nm 的 Al_2O_3 纳米粒子所形成的纳米流体的导热系数比水提高了 15%。Wang 等人^[6]报道了在水中添加 $\varphi(\text{CuO})=0.4\%$ 的 CuO 纳米粒子,所形成的 Cu-水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 $\varphi(\text{Cu})=0.3\%$,平均粒径为 10 nm 的 Cu 纳米粒子,所形成的纳米流体的导热系数比乙醇溶液提高了 40%。Patel 等人^[7]研究了在甲苯水溶液中添加 Au 和 Ag 纳米粒子所形成的纳米流体的导热性能,结果表明:当纳米粒子的体积分数为 0.011% 时,其导热系数提高了 21%。

宣益民等人^[8-9]采用混合法制备了含 Cu 纳米粒子的纳米流体。他们将体积分数分别为 2% 和 5% 的 Cu 纳米粒子与变压器油相混合,选用亲油性分散剂,采用超声波振动,使 Cu 纳米粒子均匀、稳定地分散在变压器油中。结果显示,在上述纳米流体中当分散剂的添加量约为 Cu 粒子质量的 10% 时,悬浮液的分散性和稳定性都较好。他们还将体积分数分别为 5% 和 7.5% 的 Cu 纳米粒子与去离子水相混合,选用亲水性分散剂,采用超声波振动,使 Cu 纳米粒子均匀、稳定地分散在去离子水中。结果显示,在上述纳米流体中,当分散剂的添加量为 Cu 粒子重量的 9% 时分散效果较好。宣益民等人还对 Cu-水纳米流体在湍流状态下的管内对流换热系数进行了

研究。实验结果表明,在液体中添加纳米粒子可显著增大液体的管内对流换热系数。例如,在水中添加 $\varphi(\text{Cu})=2.0\%$ 的 Cu 纳米粒子,这种 Cu-水纳米流体的对流换热系数比水增大了 39%。Eastman 等人^[10]测量了 $\varphi(\text{CuO})=0.9\%$ 的 CuO-水纳米流体在强制对流状态下的换热系数,其换热系数比水提高了 15%。Liu 等人^[11]研究了悬浮液内固体颗粒的体积含量和颗粒尺寸对其在流动中引起的压力降的影响。结果表明:当悬浮液中的固相体积含量小于 20% 时,与单项流体相比,因悬浮液的流动而引起的压力降并无明显增加。

最近,研究人员研究出一种添加纳米液滴的新型纳米流体^[12]。纳米液滴是一种尺寸为 10~100 nm,包含约 $10^4\sim 10^7$ 个液体分子的液滴。在这种纳米流体中,纳米颗粒以液滴的形式存在,纳米液滴和基液互不相容,纳米液滴的尺寸和布朗扩散率可采用动态光散射法来测定。由于没有固态颗粒,这种纳米流体可长时间处于稳定状态,还可将较大体积份额的纳米液滴加入到基液中。将液态低熔点金属或其合金形成的纳米液滴加入到流体中,其有效导热系数比添加普通液滴的增加幅度更大。Bernath 等人^[13]研究了在 0.25 mol/L 的氯化镍水溶液中加入 250 倍的轻质矿物油,结果表明其稳定性非常好。刘静等人^[14]提出以液态金属或低熔点合金作为传热介质来冷却计算机芯片。马坤全等人提出采用液态金属或低熔点合金作为基液,添加纳米颗粒形成纳米金属流体,为研制导热性最强的终极冷却剂指出了一条途径。

3 纳米流体的应用

3.1 在太阳能装置中的应用

含有纳米 Cu 粒子的黑色纳米流体对太阳光的吸收率可以达到 95% 以上,从而使其达到较高的温度,在纳米流体循环流动的过程中,纳米流体将所吸收的热量传递给储能材料储存起来,使太阳能装置的效率大大提高。

3.2 在相变蓄冷材料中的应用

普通制冷机的效率会随蓄冷温度的降低而大幅度降低,使蓄冷设备的能耗增加。由于相变蓄冷时会有过冷现象发生,并且相变蓄冷介质的导热系数较低,所以不能满足小温差强化传热的要求。随着纳米

粉体制备技术的发展,将金属及其氧化物纳米流体应用于相变蓄能材料中可解决上述问题.何钦波等人^[15]在低温共晶盐 BaCl_2 的水溶液 ($w(\text{BaCl}_2) = 22.5\%$) 中悬浮少量尺度约为 20 nm 的 TiO_2 颗粒,制备成均匀、稳定的纳米流体,共晶温度约 -8.5°C ,这种纳米流体适用于啤酒工业的低温相变蓄冷.在纳米流体中的 TiO_2 粒子除起成核剂^[16]的作用外,还可显著提高蓄冷剂的导热系数,提高了制冷机组的性能,达到强化换热和节能的目的.

将纳米流体相变蓄冷介质应用在太阳能空调制冷是一种全新的构想^[17].太阳能空调具有不需电能、节约能源、无污染、使用寿命长等优点.目前,太阳能空调所存在的问题是效率低、价格高.随着纳米技术的发展,纳米流体成为一种极有吸引力的传热传质介质,将其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的蓄冷系统中,不但可以满足空调在夜间的蓄冷要求,而且具有蓄冷方法可行度高、蓄冷系统结构简单、占地面积小、运行费用低等优点.

3.3 在冶金工业领域中的应用

在钢铁冶金生产过程中,需对某些设备进行强化冷却,如高炉的本体和高炉风口以及连铸机的结晶器等.目前,强化冷却的主要手段是提高冷却水水压使冷却水的流速加快,这样做不但耗能大,而且冷却效果也较差,设备时常被烧坏.如果将纳米流体应用于冶金工业的冷却系统中,换热工质采用高热导率的纳米流体,可提高冷却效果,延长高炉本体等设备的寿命.

钢铁冶金是能耗大户,如何降低能耗、提高余热的再利用率是冶金工作者非常关注的问题.如果采用纳米流体为换热工质,余热的回收率可大幅度提高,给企业带来巨大的经济效益.

3.4 在航天器中的应用

航天器中安装的借助于液体工质单相对流换热实现热控制的泵驱动液体回路系统,负责将舱内热负荷通过界面中间换热器传递至外循环回路,从而实现舱内温度的控制^[18].由于航天器是在真空、低温、微重力以及太阳辐射的环境下进行工作的,受此环境条件的限制,电子器件的散热非常困难.传统的纯液体工质和常规的散热措施都难以满足航天器热控系统的需要.南京理工大学的研究小组^[19]在航天器用传热用液体工质中添加一定比例的平均粒径

为 26 nm 的 Cu 粒子,制成一种航天器用纳米流体传热冷却工质,通过测量其在不同温度下的导热系数和粘度,结果表明添加纳米粒子后显著增加了液体工质的导热系数.

4 结 语

金属及其氧化物的纳米流体具有高的导热系数,是一种很好的强化换热工质,适用于较多领域.随着研究工作的不断深入和技术水平的提高,纳米流体的应用会越来越多,在各行各业的节能、环保方面将发挥更大的作用.

参考文献:

- [1] CHOI U S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1995, 231: 99-105.
- [2] EASTMAN J A, CHOI U S, LI S. Development of energy-efficient nanofluids for heat transfer applications[J]. Development of Energy-efficient National Laboratory, 2000, 325: 18-24.
- [3] 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.
- [4] MASUDA H. Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles)[J]. Netsu Bussei, 1993, 4(4): 227.
- [5] LEE S, CHOI S U S, LI S, et al. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles[J]. J Heat Transfer, 1999, 121: 280.
- [6] ZHOU L P, WANG B X. Experimental research on the thermophysical properties of nanoparticle suspensions using the quasi-steady state method[C]//Annu Proc Chinese Eng Thermophys. Shanghai: [s. n.] 2002: 889.
- [7] PATEL H E. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(14): 2931.
- [8] XUAN Yi-min, LI Qiang. Heat transfer enhancement of nanofluids[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21: 58-64.
- [9] 宣益民, 李强. 纳米流体强化传热研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(4): 466-470.
- [10] EASTMAN J A, CHOI S U S, LI S, et al. Novel

- thermal properties of nanostructured material[J]. *Material Sci Forum*, 1999, 312-314: 629.
- [11] LIU K V, CHOI S, KASZAK E. Argonne national lab report[J]. *Chemical Engineering Science*, 1964, 19: 897-901.
- [12] 马坤全, 刘静. 纳米流体研究的新动向[J]. *前沿进展*, 2007, 36(4): 295-300.
- [13] BERNATH K, MAGDASSI S, TAWFIK D S. High-throughput screening of enzyme libraries: Thiolactonases evolved by fluorescence-activated sorting of single cells in emulsion compartments[J]. *Chem Biol*, 2005, 345: 1015-1026.
- [14] 刘静, 周一欣. 以低熔点金属或其合金作流动工质的芯片散热用散热装置: 中国, 02131419. 5[P]. 2002-10-10.
- [15] 何钦波, 童明伟, 刘玉东. 低温相变蓄冷纳米流体成核过冷度的实验研究[J]. *制冷学报*, 2007, 28(4): 33-36.
- [16] 孙纯武, 黄忠, 董兴杰, 等. 降低蓄冰装置水结冰过冷度的试验研究[J]. *暖通空调*, 1999, 29(6): 5-7.
- [17] 朱冬生, 李新芳, 汪南, 等. 纳米流体相变蓄冷材料的基本特性与应用前景[J]. *材料导报*, 2007, 21(4): 87-91.
- [18] 李强, 宣益民, 姜军, 等. 航天用纳米流体流动与传热特性的实验研究[J]. *宇航学报*, 2005, 26(4): 391-394.
- [19] 李强, 宣益民, 姜军, 等. 航天用传热强化工质导热系数和粘度的实验研究[J]. *宇航学报*, 2002, 23(6): 71-74.
- [14] 刘静, 周一欣. 以低熔点金属或其合金作流动工质的芯

Research and application of metal and metal-oxide nanofluids

CHEN Xiao, ZHANG Ren-yuan, MAO Ling-bo

(*Department of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China*)

Abstract: The application of nanofluids has received considerable attention in recent years. This paper introduces the conception, characteristic and preparation method of the nanofluids as working medium for enhancing heat transfer, analyzes the present research and application progress of metal and metal-oxide nanofluids.

Key words: nanofluid; enhancing heat transfer; preparation; application