

文章编号: 0253-4339(2010)01-0023-04

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2010.01.023

Al₂O₃-H₂O纳米流体相变蓄冷特性研究

杨 硕 朱冬生 吴淑英 李 华

(华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室 广州 510641)

摘 要 在水介质中悬浮少量的纳米氧化铝颗粒(粒径20nm), 通过添加分散剂和超声波振荡, 制备成均匀分散的Al₂O₃-H₂O纳米流体。对水和Al₂O₃-H₂O纳米流体的相变蓄冷特性进行了实验比较。结果表明, 加入纳米Al₂O₃可降低水的过冷度, 缩短结冰时间; 在相同的时间内, 纳米流体的蓄冷量要大于纯水。

关键词 工程热物理; Al₂O₃-H₂O纳米流体; 过冷度; 相变蓄冷

中图分类号: TB61⁺1; TQ027.3

文献标识码: A

Study on Phase-change Cold Storage Characteristics of Al₂O₃-H₂O Nanofluids

Yang Shuo Zhu Dongsheng Wu Shuying Li Hua

(Key Lab of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou, 510641)

Abstract Al₂O₃-H₂O nanofluids with uniform dispersancy were prepared in which a spot of Al₂O₃ nanoparticles with a particle size of 20nm suspended in water and the dispersant and supersonic oscillating were added. The cold storage characteristics of the nanofluids and water were experimentally compared. The results show that the nanoparticles in water reduced the subcooling degree of water and the freezing time, and the cold storage capacity of the nanofluids was larger than that of water for the same time.

Keywords Engineering thermophysics; Al₂O₃-H₂O nanofluids; subcooling degree; phase-change cold storage

节能和环保是能源利用领域中的重要课题。利用相变材料(Phase Change Materials, PCM)的相变潜热进行能量贮存是一项新型环保节能技术。目前相变蓄冷材料的研究焦点集中在新型蓄冷材料的开发及其热物性研究方面。

随着纳米材料和纳米技术的迅速发展, 新型纳米蓄冷材料引起人们的广泛关注^[1-4]。1995年, Choi^[5]提出了一个崭新的概念——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, 形成一类新的传热冷却工质。与传统的固-液混合物相比, 纳米流体表现出很好的稳定性和流变特性, 流体的导热性能得到大幅度提高。因此, 将纳米流体应用在电子冷却、相变蓄冷^[6]、空调等领域, 且成为理想的散热剂或制冷剂具有十分广阔的前景。

重庆大学刘玉东^[7]、何钦波^[8-9]把纳米TiO₂粉

体加入BaCl₂共晶盐水溶液中, 配制成TiO₂-BaCl₂-H₂O纳米流体相变蓄冷材料, 并研究了复合相变蓄冷材料的热物性和蓄/释冷特性, 其导热系数显著增加, 并且能大大降低过冷度。上海交通大学李金平博士^[10]研究了制冷剂气体水合物在纳米流体中的生成过程, 表明纳米粒子的加入使得气体水合物快速结晶和生长, 通过此方法得到的HCFC141b气体水合物具有生成速度快、水合率高、静态生成过程等特点。Khanafar^[11]等人建立了纳米流体在二维封闭腔内的对流换热模型, 模拟结果表明纳米流体具有优良的对流换热性能。Khodadadi^[6]等人利用数值计算和模拟的方法研究了Cu-H₂O纳米流体的相变过程, 纳米流体显示出较好的蓄/释冷特性, 结冰速率比纯水明显加快。

冰蓄冷是实现电网“移峰填谷”的有效手段, 可有效缓解电力紧张局面^[12]。针对动态蓄冰过

基金项目: 国家自然科学基金(20346001)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0826) (The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (20346001), Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-04-0826).)

收稿日期: 2009年4月16日

程中蓄冷介质在封闭的系统中运行,即结冰—融冰循环适宜使用纳米流体这一特点,这里尝试利用纳米流体节能新技术来提高传统蓄冷工质的传热特性,并对纳米流体的相变蓄冷特性进行了一些基础研究。

1 实验

1.1 原料与仪器

纳米 Al_2O_3 粉体,粒子形状基本为球形或类球形,粒径分布较均匀,颗粒平均粒径为20nm;分散剂为十二烷基苯磺酸钠(SDBS,化学纯,阴离子型);PH调节剂用分析纯的盐酸和氢氧化钠;去离子水。

KQ2200DE超声波清洗器;FA2004N电子天平;冷冻系统为DC-2006型低温恒温槽,最低温度可达 -95°C ,水泵流量为5L/min,载冷剂为40%(体积分数)的乙二醇水溶液;数据采集系统:型号为Agilent 3497A数据采集仪,感温头为铜—康铜T型热电偶,精度 0.1°C ,使用前用水银温度计进行了标定,温度信号测量误差小于0.5%;ECO0小型风冷节能快速制冰机。

1.2 实验方法

1.2.1 纳米流体制备

采用两步法,将纳米 Al_2O_3 粒子直接添加到去离子水工质中,形成纳米粒子悬浮液,然后再添加一定质量的SDBS分散剂,调节适当的pH值,超声振荡30min,以获得均匀且分散性好的纳米流体溶液,由于纳米粉体的体积难于测定,实验中根据纳米颗粒的质量分数来表示。分别配置纳米 Al_2O_3 质量分数为0.05%、0.1%、0.2%、1%、3%、5%的 Al_2O_3 - H_2O 纳米流体待用。图1是浓度为0.1%的纳米流体的TEM照片,从图中可以看出纳米流体的分散性良好。

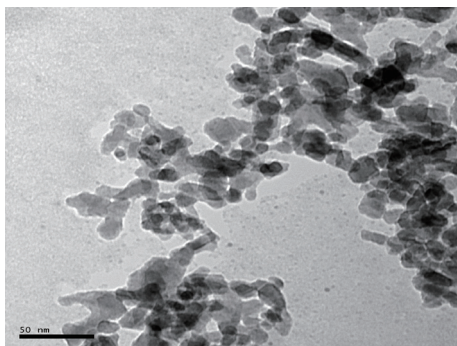


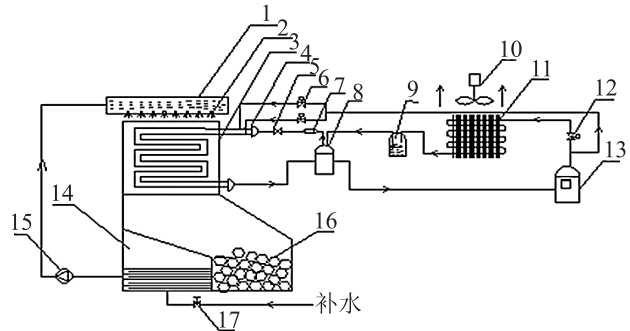
图1 Al_2O_3 - H_2O 纳米流体的TEM照片
Fig.1 TEM of Al_2O_3 - H_2O nanofluids

1.2.2 纳米流体步冷曲线的测定

取四只干净的试管,分别按标号倒入去离子水和已经配好的三种不同质量分数的 Al_2O_3 - H_2O 纳米流体各40mL。在试管中心位置各布置好一个经过标定的 $\Phi 0.1\text{mm}$ 的铜—康铜热电偶进行温度测量,先开启恒温浴槽使其温度降低到 -15°C 恒定,然后把4个试管同时放入浴槽中进行冷却,打开电脑采集数据,时间间隔为30s。

1.2.3 纳米流体在制冰机中应用

图2为小型动态制冰运行系统示意图。该制冰系统拥有板管式平面液膜换热、水帘式波水以及压缩机余热自动脱冰,节能效果显著。蓄冰时,打开电磁阀12,关闭电磁阀6和相并列的电磁阀,相反则是脱冰。系统可以设置不同的制冰时间和脱冰时间,以便得到不同质量的冰块,还可以不断地把制得的冰取走。分别用水和不同质量分数的纳米流体进行结冰并对结冰量进行比较。



- 1 布水器 2 喷嘴 3 板管式蒸发器 4 分流器 5 膨胀阀
- 6 电磁阀 7 过滤器 8 热交换器 9 储液罐 10 冷凝风扇
- 11 风冷冷凝器 12 电磁阀 13 压缩机 14 贮水槽 15 水泵
- 16 蓄冰槽 17 截止阀

图2 动态制冰系统示意图

Fig.2 Schematic diagram for ice-making system

2 结果与讨论

2.1 纳米粒子对流体过冷度和相变速率的影响

图3是去离子水和不同纳米 Al_2O_3 质量分数的纳米流体的温度随时间的变化曲线。从曲线上可以得到纳米流体的凝固点、熔点、过冷度及温度变化的转折点,称为步冷曲线。把图中重要的转折点记录下来得到表1。从图3和表1可以看出随着纳米粒子质量分数的增加,过冷度逐渐减小,去离子水(即0%的曲线)的过冷度为 7.9°C ,质量分数为0.05%的 Al_2O_3 - H_2O 过冷度为 5.1°C ,比去离子水降低了35.4%,其相变时间比去离子水减少了60s,减少了6.6%;0.1%的 Al_2O_3 - H_2O 过冷度为 3.5°C ,比去离子水降低了55.7%,其相变的时间比去离子水减少了

120s, 减少了13.3%; 0.2%的Al₂O₃-H₂O过冷度为2.5℃, 比去离子水降低了68.3%, 其相变的时间比去离子水减少了210s, 减少了23.3%。以上分析表明, Al₂O₃纳米颗粒的加入可以有效地降低水的过冷度, 缩短结冰时间。

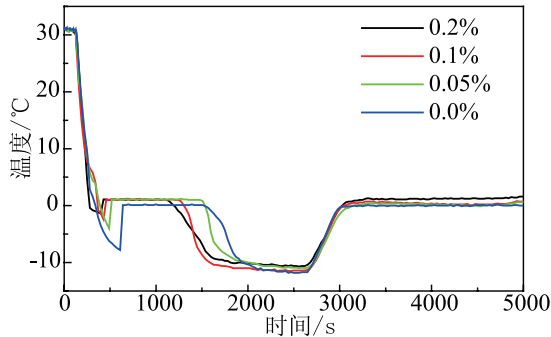


图3 不同纳米颗粒质量分数下Al₂O₃-H₂O纳米流体温度-时间变化曲线

Fig.3 Temperature vs time curve of Al₂O₃-H₂O nanofluids with different mass fraction

表1 水和不同质量的纳米流体的过冷度及结冰时间

Tab.1 Supercooling degree and freezing time for nanofluids with different mass fraction and water

质量分数/%	理论结晶温度/℃	实际结晶温度/℃	过冷度/℃	过冷度降低/%	相变时间/s	相变时间缩短/%
0.00	0.1	-7.8	7.9	0.0	900	0.0
0.05	1.1	-4.0	5.1	35.4	840	6.6
0.10	1.1	-2.4	3.5	55.7	780	13.3
0.20	1.1	-1.4	2.5	68.3	690	23.3

纳米粒子对流体过冷度的改善可以用非均匀成核理论来解释。根据相变理论, 结晶有两个过程, 一是晶核的形成过程, 简称成核; 二是晶体的生长过程。成核又有均匀成核与非均匀成核之分。所谓非均匀成核是指在尘埃、容器表面及其它异相表面等处形成晶核。与非均匀成核相比, 均匀成核是自发产生的, 不需要外来质点或基底。均匀成核时, 晶核须克服很大的表面能, 这就意味着需要相当大的过冷度才能成核。非均匀成核比均相成核要容易, 非均匀成核所需要的能量起伏较小, 所以它可以在较小的过冷度下发生。当在流体中加入纳米粒子时, 会降低成核时的表面能, 使晶核优先在纳米粒子上形成, 这就是非均匀成核。实验纳米粒子尺度大约为20nm, 跟流体分子很接近, 因此晶核与纳米粒子之间的比表面自由能非常小, 纳米粒子与液相之间的润湿是非常好的, 接触角接近于0°, 纳米流体结晶时过冷度也接近于0^[9]。因此, 用纳米流体代替纯水制冰可以有效地降低水的过冷

度。

从图表中也可以看出, 纳米流体的结冰速度比去离子水的结冰速度要快, 纳米颗粒的质量分数越大, 纳米流体的结冰速度就越快, 所用的结冰时间比去离子水的就越少。该实验结果与Khanfer^[11]和Khodadadi^[6]等人利用数值计算和模拟的结果吻合得较好, 纳米流体显示出较好的蓄冷特性, 结冰速率比纯水明显加快。液体发生相变的过程也就是液体分子结晶的过程。晶体的生长与结晶时热量的传递有很大关系, 结晶时要放出大量的凝固热, 该热量若不能及时带走, 结晶就会受到阻碍。纳米流体的导热系数及对流传热系数比纯水要大^[13], 加上纳米粒子的无规则运动^[14], 大大促进了流体相变过程中的质量、能量和动量运输, 因而有效缩短了流体的结冰过程。

2.2 纳米粒子对流体结冰量的影响

蓄冷量是指从蓄冷开始至某一时刻蓄冷槽中储存的总冷量。实验中采用制冰机模拟动态制冰过程, 因此用制冰机中的结冰量来代替蓄冷槽中的蓄冷量来表述。

表2 相同的时间内质量分数为0.1%的纳米流体与水的结冰质量的比较

Tab.2 The comparison of freezing weight between nanofluids with mass fraction of 0.1% and water

制冰时间	m ₁ /kg	m ₂ /kg	(m ₁ -m ₂)/kg	制冰量提高/%
230s	1.06	0.97	0.08	9.03
10min	2.77	2.54	0.22	8.96
30min	8.27	7.58	0.68	9.05
60min	16.58	15.23	1.35	8.87

表3 不同质量分数的纳米流体的结冰量(单位: kg)

Tab.3 The freezing weight of nanofluids with different mass fraction

质量分数/%	8min	30min	60min	1h制冰量提高/%
W=0.0	2.0	7.5	15.3	0.0
W=1.0	2.5	9.3	18.1	18.3
W=3.0	2.8	10.1	21.1	37.9
W=5.0	3.1	11.9	23.7	54.9

分别用质量分数为0.1%的纳米流体和纯水在制冰机上做了制冰实验。表2中, m₁是用纳米流体做制冷介质的制冰量, m₂是用水做制冷介质时的制冰量。从表2可以看出, 添加了质量分数为0.1%左右的纳米粒子, 在1小时的时间内, 制得的冰的重量为16.58kg, 比水的制冰量15.23kg多1.35kg,

效率提高了8.8%。在相同的时间段内, 制冰量略有不同, 可能是由于纳米流体存在分散稳定性的问题, 一些纳米粒子的团聚导致流体导热系数发生改变。

在此基础上, 讨论了纳米颗粒的质量分数对制冰量的影响, 如表3所示, 从表中可以看出, 随着纳米颗粒质量分数的增加, 与水相比, 其制冰量是逐渐增加的。纳米颗粒质量分数为1%的纳米流体, 制冰量提高了18.3%左右; 纳米颗粒质量分数为3%的纳米流体的制冰量提高了37.9%左右; 纳米颗粒质量分数为5%的纳米流体的制冰量提高了54.9%左右。结果表明, 在相同制冰时间和脱冰时间内纳米流体的结冰量比水的结冰量大。显然, 由于纳米流体较高的导热系数和传热系数, 热交换快, 因此在相同的时间内, 纳米流体结冰量比水的多, 且纳米流体质量分数越大, 结冰量越多。

3 结论

1) 在水基液中加入纳米 Al_2O_3 粒子可明显地降低其成核过冷度, 并且可增大结冰速率, 缩短相变时间。

2) 纳米流体和纯水相比具有更好的蓄冷特性。在同样的蓄冷时间下, 纳米流体的蓄冷量比水的大。

综上所述, 对纳米流体的相变蓄冷特性进行了实验研究, 纳米流体相变蓄冷材料显示出优良的蓄冷特性。因此, 可尝试把纳米流体运用于工业蓄冷中, 从而提高制冷机组的性能, 达到节能的目的。

参考文献

- [1] Das S K, Choi S U S, Patel H E. Heat transfer in nanofluids - a review[J]. Heat Transfer Engineering, 2006, 27(10): 3-19.
- [2] Chein R, Chuang J. Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46: 57-66.
- [3] Tzeng S C, Lin C W, Huang K D, et al. Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicles[J]. Acta Mechanica, 2005, 179: 11-23.
- [4] Wang X Q, Mujumdar A S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46: 1-19.
- [5] Choi S U S. Enhancement thermal conductivity of fluids with nanoparticles[J]. ASME Publications, 1995 (66/231):

99-105.

- [6] Khodadadi J M, Hosseinzadeh S F. Nanoparticle enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007, 34: 534-543.
- [7] 刘玉东. 纳米复合低温相变蓄冷材料的制备及热物性研究[D]. 重庆大学, 2005. (Liu Yudong. Study on preparation and thermal properties of phase change nanocomposites for cool storage [D]. Chongqing University, 2005.)
- [8] 何钦波. 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]. 重庆大学, 2005. (He Qinbo. Study on thermal properties and characteristics of cool charge and discharge of nanofluids[D]. Chongqing University, 2005.)
- [9] 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: 2008, 28(4): 33-36. (He Qinbo, Tong Mingwei, Liu Yudong. Experimental study on super-cooling degree of nanofluids for cryogenic cool storage [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 28(4): 33-36.)
- [10] 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]. 上海交通大学, 2005. (Li Jinping. Study on reaction kinetics and phase equilibrium of refrigerant gas hydrates in nanofluids[D]. Shanghai Jiaotong University, 2005.)
- [11] Khanafer K, Vafai K, Lightstone M. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(19): 3639-3653.
- [12] 王蕾蕾, 严嘉, 肖建军, 等. 削峰填谷式冰箱蓄放冷实验研究[J]. 制冷学报, 2008, 29(2): 38-41. (Wang Leilei, Yan Jia, Xiao Jianjun, et al. Experimental study on cold accumulation and release of peak load shifting refrigerator [J]. Journal of refrigeration, 2008, 29(2): 38-41.)
- [13] 宣宜民, 李强. 纳米流体强化传热的研究[J]. 工程热物理论, 2000, 21(4): 466-470. (Xuan Yimin, Li Qiang. Heat transfer enhancement of nanofluids[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(4): 466-470.)
- [14] Skok P J, S U S Choi. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(21): 4316-4318.

作者简介:

朱冬生(1964.2-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事强化传热, 节能和制冷研究及应用。杨硕(1983.4-), 男, 硕士研究生, 主要从事纳米流体强化传热、相变蓄冷研究。

About the authors:

Zhu Dongsheng(1964.2-), male, professor, doctoral tutor, mainly engaged in enhanced heat transfer, energy saving, refrigeration research and application. Yangshuo(1983.4-), male, graduate students, mainly engaged in nano-fluid enhanced heat transfer, phase change cool storage research.