

文章编号:0253-4339(2014)04-0042-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.04.042

磁性纳米制冷剂冷却回路热磁对流特性研究

吴治将^{1,2} 殷少有^{1,2}

(1 顺德职业技术学院 机电工程学院 佛山 528333; 2 广东高校热泵工程技术开发中心 佛山 528333)

摘要 建立磁性纳米制冷剂 Fe_3O_4 -R600a 冷却回路的热磁对流特性实验系统,研究了磁场分布、磁场强度、加热功率、冷却温度等对热磁对流特性的影响。结果表明:外磁场对磁性纳米流体热磁对流过程的影响非常明显,可无须机械泵驱动而实现能量的自主传递过程,冷却回路中的磁流体循环流动和传热性能取决于外磁场与温度的协同作用,应用外磁场可有效控制冷却回路的运行特性。

关键词 制冷剂;冷却;磁场;热磁对流

中图分类号:TB61*2; TB383; TK124

文献标识码:A

Study on Thermomagnetic Convection Characteristics of a Cooling Device Using Magnetic Nano-refrigerant

Wu Zhijiang^{1,2} Yin Shaoyou^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shunde Polytechnic, Foshan, 528333, China; 2. Guangdong University Heat Pump Engineering Technology Development Center, Foshan, 528333, China)

Abstract The experimental system of a cooling device using Fe_3O_4 -R600a as magnetic nano-refrigerant was built up. And the influences of magnetic field distribution, magnetic field intensity, heat load, cooling temperature were discussed. The results show that the effect of the device was improved obviously by external magnetic field, and the heat was transferred by the circulating fluid without a pump. On the meantime, synergic function between the external magnetic field and the thermal field has impact on the velocity of the working fluid and the cooling performance of the device. Using external magnetic field, the cooling performance of the device also can be effectively controlled.

Keywords refrigerant; cooling; magnetic field; thermomagnetic convection

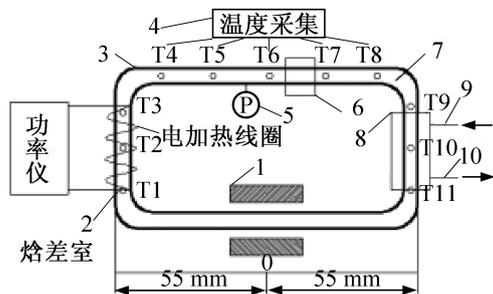
纳米制冷剂的概念是在纳米流体的基础上提出来的,即将纳米材料与传统的制冷剂混合制备而成。作为一种新型换热流体,纳米流体得到了越来越多的关注^[1]。目前国内外学者外关于纳米制冷剂的研究表明,纳米制冷剂不但可以显著增加流体的热导率和提高热交换系统的传热性能^[2-3],还有效提高制冷装置的换热量与能效^[4-5]。但是,目前国内外关于纳米制冷剂的研究主要集中在纳米制冷剂的制备^[6]、物理性质的测量^[7-8]和沸腾换热^[9-10]等方面。磁性纳米流体在外磁场作用下具有特殊的流动和传热特征,目前关于外磁场作用下磁性纳米制冷剂流体的热磁对流过程和特性的研究还很少^[11-12],还有许多科学问题亟待解决,如外磁场的强度、方向的影响,加热冷却功率的选取,磁场与温度的匹配问题等。因此,本文

建立外磁外场作用下磁性纳米制冷剂 Fe_3O_4 -R600a 冷却回路的热磁对流特性实验系统,分析有无外磁场、磁场强度、磁场位置、加热功率、冷却温度、加热位置等对冷却回路热磁对流特性的影响,探索磁场及温度场的协同效应对回路性能的控制作用。

1 实验系统及方法

如图 1 所示,磁性纳米制冷剂 Fe_3O_4 -R600a 冷却回路的热磁对流特性实验系统由闭合回路、实验数据采集系统以及一个水冷却装置组成,整个冷却回路由保温层 3 包裹。闭合回路 7 是整个实验的核心部分,其主体是一根细长封闭的玻璃管(内径为 6 mm),整个回路的长度为 110 mm,宽度为 80 mm。超声波流量计 6 用于测量流体的流量。压力计 5 用于测量管

内流体的压力。水冷器 8 与低温恒温水浴槽相连,用于冷却流经的流体。磁源 1 采用电磁铁制成,匝数为 15000,线径 1 mm,直径为 20 mm,最大可产生 650 Gs 的磁场强度。电阻丝 2 通过调压器连接可调节加热功率,满足不同的实验要求。温度测量 4 采用 T 分度热电偶,温度数据由电脑连接数据采集仪自动记录。实验所需测量的主要参数有:管壁面上各点的温度 (T1-T11),流体的流量,管内的压力等。整个实验过程在焓差室中进行。



1 磁源 2 电热丝 3 保温层 4 数据采集
5 压力计 6 超声波流量计 7 闭合回路
8 冷却装置 9 进水口 10 出水口

图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test system

根据牛顿冷却定理,利用实验中测出的加热功率、平均壁温、磁流体的进出口温度及磁流体流量等,就可以计算出管内磁流体在不同流动速度下的平均对流换热系数 h :

$$h = \frac{q}{t_w - t_f} \quad (1)$$

式中: h 为流体的平均对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; q 为加热的平均热流密度, kW/m^2 ; t_w 为加热端壁

面的平均温度, $t_w = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$, $^\circ C$; t_f 为磁流体平均温度,

$$t_f = \frac{t_{in} + t_{out}}{2}, \quad ^\circ C。$$

则磁流体的平均努塞尔数 Nu_m :

$$Nu_m = \frac{hd}{\lambda} \quad (2)$$

式中: Nu_m 为平均努塞尔数; d 为特征长度取通道内径, m ; λ 为流体的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

2 磁性纳米制冷剂的制备和充注

磁性纳米颗粒与制冷剂的混合液制备采用四步法,用双级旋片式真空泵(极限压力 6.0×10^{-5} Pa)对 100 mL 制冷罐瓶抽真空;用电子分析天平(量程 10 ~ 2109 mg,最大误差为 0.1 mg)精确称量 Fe_3O_4 纳米

颗粒(平均粒径为 18 nm),每 50 mL 制冷剂加入适量的纳米颗粒或分散剂,将其注入真空制冷罐瓶;将称量好的 R600a 液态制冷剂充入制冷罐瓶,制冷罐瓶倒置于超声波清洗器低温水槽内,采用超声波粉碎仪对它进行 120 min 的分散以制备出 Fe_3O_4 -R600a 纳米磁流体制冷剂。待纳米制冷剂制备完成后,用双级旋片式真空泵实验系统抽真空,通过纳米制冷剂充注装置,采用液态充注法将一定量液态 R600a 磁流体注入实验系统。本文实验使用的纳米流体质量分数为 0.8%。

3 实验结果与讨论

3.1 有无外磁场冷却回路中各点的温度变化

图 2 表示在相同工况下(环境温度 $t_a = 10^\circ C$ 、冷却温度 $t_c = 10^\circ C$ 、加热功率 $Q = 2.56$ W)有无外磁场时冷却回路中各点温度的变化情况。从图 2(a)可知,无外磁场时,只有加热段(T2)及其附近流体(T4)的温度有明显升高,其它各点的温度基本保持不变,说明磁流体没有发生实际性的流动,各点之间的热量传递仅靠热传导完成;从图 2(b)可知,有外磁场时($B = 250$ Gs),磁流体内部受到与温度梯度方向一致的磁场力作用时,就会产生热磁对流现象^[13]。磁流体发生流动,在温度相对低处,磁流体的磁化强度大,受到的磁场驱动力也较大,因而磁流体在磁力的推动下流动,形成顺时针的大环流,加热段加热的流体流动到下游段被冷却,最后各点温度达到平衡。

3.2 加热功率对磁流体运动状况的影响

在实验工况($t_a = 10^\circ C$ 、 $t_c = 10^\circ C$ 、 $B = 250$ Gs),改变加热功率 Q 进行实验,当系统达到稳定后,测量磁流体的温度和流速。图 3 给出了回路中观测点(T2、T4、T6)温度稳定值随加热功率的变化关系。由图可见,加热功率越大,观测点的平衡温度值越高。当 $Q = 4.18$ W 时,观测点的最高温度可达 $39.5^\circ C$,已超出此压力下的沸点温度($31.25^\circ C$);当 $Q = 5.18$ W 时,观测点的最高温度可达 $66.4^\circ C$ 。这也证明此闭合回路系统中存在冷却能力极限,这与连文磊^[13]研究的结果相同。

图 4 给出了加热功率与磁流体流速的变化关系(实验工况与图 3 相同)。磁流体的流速先随加热功率的增加而增大,当加热功率达到 3.82 W 时,流速也达到最大值 $v = 1.92$ mm/s,此时再增大加热功率,流速反而下降。原因分析:当加热功率增加时,热端的温度快速上升,加热段的温度梯度变大,阻力减小,热磁对流的驱动力增加,导致磁流体的流速增大,但当磁流体的温度超过该压力下的沸点温度后,会产生

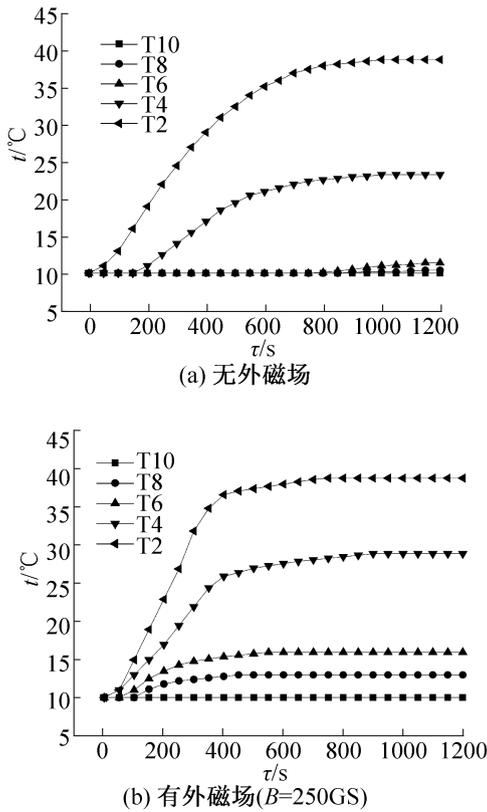


图 2 有无外磁场流体的各点温度变化
Fig. 2 Experimental results of temperature variation over time

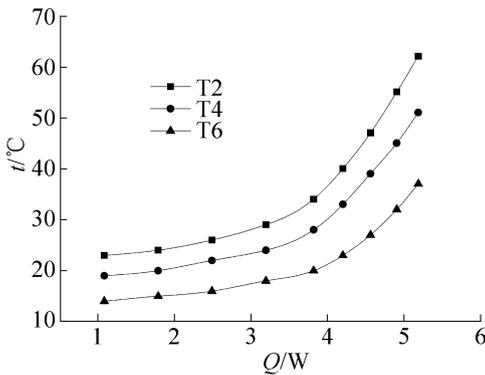


图 3 流体温度稳定值随加热功率的变化
Fig. 3 The relationship between magnetic fluid steady-state temperature and heat load

部分汽化,使得 Fe_3O_4 颗粒开始发生团聚和粘度增大,磁流体的流动阻力增加,导致流速减小。

3.3 磁场强度对磁流体运动状况的影响

图 5 给出了实验工况 ($t_a = 10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_c = 10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $Q = 2.56\text{ W}$) 平均努塞尔数随磁场强度变化关系。在相同的加热功率下, Nu_m 随着磁场强度的增加而增大。当外加磁场强度增大时,磁流体受到的磁场力逐渐增大,加剧了磁流体的自然对流,强化了磁流体内部的能量传递过程,使得磁流体与管壁面之间的换热增

强,热磁对流强度增加,导致 Nu_m 增大。在相同的磁场强度条件下,适当增大加热功率可以增加磁流体内部的温度差,但当增加到一定程度后(沸点以上),就会出现汽化现象,反而导致 Nu_m 下降,这与图 4 分析的结果一致。另一方面,在较高的磁场强度下,磁性纳米流体中磁性颗粒发生了颗粒链绞合和团聚^[14]。

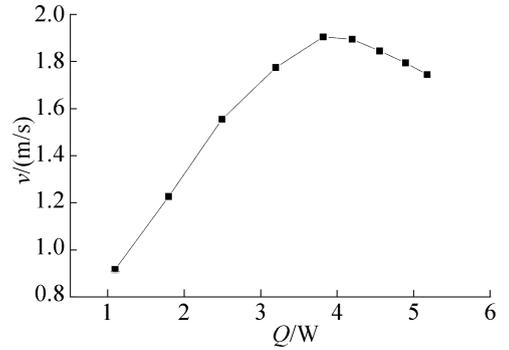


图 4 流体流速随加热功率的变化
Fig. 4 The relationship between magnetic fluid velocity and heat load

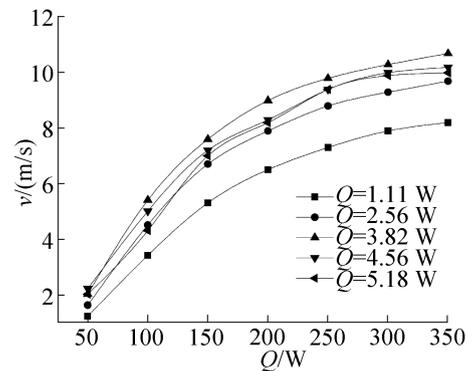


图 5 平均努塞尔数随磁场强度的变化
Fig. 5 The relationship between Nu_m and magnetization intensity

3.4 磁源位置对磁流体运动状况的影响

图 6 表示平均努塞尔数随磁源位置的变化关系 ($t_a = 10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t_c = 10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $B = 250\text{ Gs}$)。由图 6 分析可知,磁源与冷源(热源)的位置越近, Nu_m 越大,当磁源位于中间位置, Nu_m 最小。这是因为磁源靠近加热端时,可最大程度地削弱强磁场区域流体的磁化强度,导致该段流体所受磁力的阻力减小;同样,当磁源靠近冷端时,可大大提高磁场区域流体的磁化强度,这使得流体受到的驱动力增大。因此,热磁对流通道内既取决于磁场和温度场本身,还取决于它们的相对位置。温度场与磁场的协同作用决定了流体所受净驱动力的大小,从而决定了热磁对流的强度。当冷(热)源、磁场固定时,尽量选择靠近冷源一侧或者热

源一侧的位置,可以获得最大的磁场力和对流传热性能。

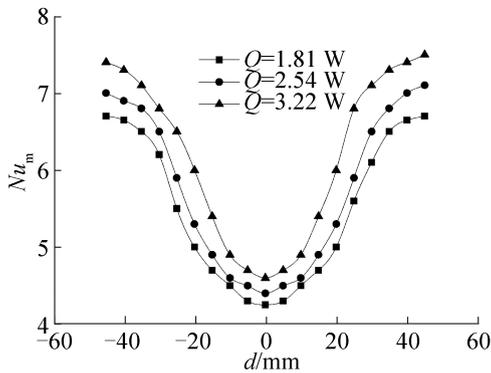


图 6 平均努塞尔数与磁源位置变化

Fig. 6 The relationship between Nu_m and magnetic source location

3.5 冷凝温度对磁流体运动状况的影响

图 7 表示平均努塞尔数随冷却温度变化 ($t_a = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $B = 250\text{ Gs}$)。由图 7 分析可知,当 $Q = 2.54\text{ W}$, $t_c = 6\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $Nu_m = 7.03$; 当 $t_c = 14\text{ }^\circ\text{C}$, $Nu_m = 6.4$, 降幅为 8.96%。这是因为冷却温度的下降,不但降低了磁场下游流体的温度,同时降低了上游流体的整体温度,导致流体的温度差别的改变较小,磁热对流驱动力的影响也相对较小,所以整体的流速改变很有限, Nu_m 改变不大。

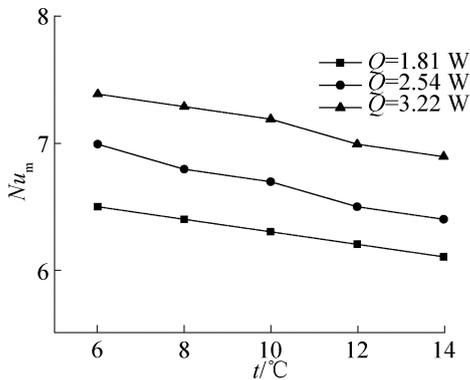


图 7 平均努塞尔数随冷却温度变化

Fig. 7 The relationship between Nu_m and cooling temperature

4 结论

实验研究了磁性纳米制冷剂 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-R600a}$ 冷却回路在不同工况下的热磁对流特性。结果表明:

1) 外磁场对磁性纳米流体的热磁对流换热过程的影响非常明显,回路中的磁流体循环流动和传热性能取决于外磁场的温度的协同作用,合理的冷、热源的位置与磁场分布,有助于提高回路的传热性能。

2) 回路中磁热对流的强弱不但取决于磁场和温度场本身,还取决于磁源与冷源(热源)的相对位置,当冷(热)源、磁场固定时,尽量选择靠近冷源一侧或者热源一侧的位置,可以获得最大的磁场力和对流传热性能。

3) 冷却温度对回路中流体磁化强度的不平衡性影响较小;流体的流速随加热功率的增加而增大,但稳定后的平衡温度也相应升高,当磁流体温度超过沸点温度后,传热性能下降。

参考文献

- [1] 毕胜山, 吴江涛, 史琳. 纳米颗粒 $\text{TiO}_2/\text{HFC134a}$ 工质导热系数实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 205-207. (Bi Shengshan, Wu Jiangtao, Shi Lin. The Thermalconductivity of The nanoparticles TiO_2 and HFC134a Mixtures [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 205-207.)
- [2] Lee S, Choi U S, Li S. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles [J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121: 280-289.
- [3] Wang X W, Xu X F, Choi U S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1999(13): 474-480.
- [4] Love L J, Jansen J F, Mcknight T E, et al. Magnetoalorie Pump for Microfluidic Applications [J]. IEEE Trantionson Nanobioseienee, 2004, 3(2): 102-110.
- [5] 毕胜山, 史琳. 纳米制冷剂冰箱性能实验研究[J]. 清华大学学报, 2007, 47(11): 2002-2005. (Bi Shengshan, Shi Lin. Experimental investigation of a refrigerator with a nano-refrigerant [J]. J Tsinghua Univ (Sci &Tech), 2007, 47(11): 2002-2005.)
- [6] 王涛, 骆仲泐, 郭顺松. 可控纳米流体的制备及热导率的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(3): 514-518. (Wang Tao, Luo Zhongyang, Guo Shunsong. Preparation of controllable nanofluids and research on thermal conductivity [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(3): 514-518.)
- [7] Eastman J A, Choi U S, Li S, et al. Anomously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles [J]. Applied Physics Letter, 2001, 78: 718-720.
- [8] Lee S, Choi U S, Li S. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles [J]. Transaction of ASME Journal of Heat Transfer, 1999, 121: 280-289.
- [9] You M S, Kim J H. Effect of nanoparticles on heat flux of water in pool boiling heat transfer [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(16): 3374-3376.

(下转第 112 页)

sing PCMs in Various Configurations [J]. Journal of Thermal Science, 2011, 20(26): 516-520.

[10] M A Izquierdo-Barrientos, J F Belmone, D Rodriguez-Sanchez, et al. A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM) [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 47(3): 73-85.

[11] 李晓燕, 高宇航, 杨舒婷. 冷藏车用新型相变蓄冷材料的研究 [J]. 哈尔滨商业大学学报, 2010, 26(1): 96-99. (Li Xiaoyan, Gao Yuhang, Yang Shuting. Refrigerator car with new phase change storage materials research [J]. Journal of Harbin University of Commerce, 2010, 26(1): 96-99.)

[12] M J Mochane, A S Luyt. Preparation and properties of polystyrene encapsulated paraffin wax as possible phase change material in a polypropylene matrix [J]. Thermohimica Acta, 2012, 20: 63-70.

[13] 张兴祥, 王馨, 吴文健. 相变材料胶囊制备与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[14] 钱壬章, 俞昌铭, 林文贵. 传热分析与计算 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.

[15] Comini G, Cortella G, Saro O. Finite element analysis of coupled conduction and convection in refrigerated transport [J]. Int. J. Refrig, 1995, 18(2): 123-131.

[16] 杨昭, 郁文红, 张浦仁. 节能建筑复合墙体的非稳态热

工性能 [J]. 天津大学学报, 2004, 37(11): 975-979. (Yang Zhao, Yu Wenhong, Zhang Puren. Unsteady thermal characteristics of wall insulation in low energy consumption building [J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(11): 975-979.)

[17] Moureh J, Menia N, Flick D. Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 32(1): 106-112.

[18] Moureh J, Flick D. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 24(3): 108-165.

作者简介

夏全刚, 男 (1985 -), 硕士研究生, 上海理工大学, 18817583112, E-mail: xiaquangang@126.com。研究方向: 食品的快速冷却及保鲜设备。

About the author

Xia Quangang (1985 -), male, Master graduate student, Shanghai university of science and technology, 18817583112, E-mail: xiaquangang@126.com. Research fields: food and rapid cooling equipment.

(上接第45页)

[10] Witharana S. Boiling of refrigerants on enhanced surfaces and boiling of nanofluids [D]. Sweden: Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.

[11] Liu J P, Fullerton E, Gutfleisch O, et al. Nanoscale magnetic materials and applications [M]. New York: Springer, 2009.

[12] Odenbach S. Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids [M]. Berlin: Springer Verlag, 2009.

[13] 连文磊, 孙慧, 李强, 等. 温度敏感型磁流体冷却回路的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(3): 503-506. (Lian Wenlei, Sun Hui, Li Qiang, et al. Experimental Investigation on a cooling Device Using Temperature-Sensitive Magnetic Fluid [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(3): 503-506.)

[14] Philip J, Shima P D, Raj B. Evidence for enhanced ther-

mal conduction through percolating structures in nanofluids [J]. Nanotechnology, 2008, 19(30): 305706.

作者简介

吴治将, 男 (1979 -), 讲师, 博士, 顺德职业技术学院, 0757-22329942, E-mail: wzj710@163.com。研究方向: 制冷与空调技术, 强化传热。目前进行的研究项目: 2012 年国家自然科学基金; 磁热对流效应强化蒸发冷却传热传质的机理研究。

About the author

Wu Zhijiang (1979 -), male, Lecturer, Doctor, Shunde polytechnic, 0757-22329942, E-mail: wzj710@163.com. Research fields: Refrigeration and air conditioning, heat transfer enhancement. Recent projects: 2012 National Natural Science Foundation of China; Mechanism of the magnetocaloric convection effect on heat and mass transfer enhancement of evaporative cooling.