

文章编号:1006-2467(2012)05-0671-06

含油纳米制冷剂沸腾中气相与液相之间 球形纳米颗粒的迁移特性

丁国良¹, 彭 浩², 胡海涛¹, 庄大伟¹

(1. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240;
2. 中国科学院 力学研究所微重力重点实验室(国家微重力实验室), 北京 100190)

摘要:为了评估纳米制冷剂的沸腾传热效果以及球形纳米颗粒在制冷系统中的循环能力,采用称重法实验研究了纳米制冷剂沸腾中气/液相间球形纳米颗粒的迁移特性,重点考察球形纳米颗粒种类和粒径、制冷剂种类、润滑油浓度、热流密度和初始液位高度对球形纳米颗粒迁移特性的影响。结果表明:球形纳米颗粒迁移率随球形纳米颗粒密度或粒径的减小而增大;制冷剂的动力学黏度越小、密度越大,其在完全蒸发时的球形纳米颗粒的迁移率越大;球形纳米颗粒的迁移率随润滑油浓度的增大而减小,随热流密度的增大而减小,随初始液位高度的增加而增大。

关键词:制冷剂; 纳米颗粒; 迁移; 粒径; 热流密度

中图分类号: TK 124 文献标志码: A

Migration Characteristic of Spherical Nanoparticles from Liquid to Vapor Phase during Refrigerant/Nanolubricant Mixture Boiling

DING Guo-liang¹, PENG Hao², HU Hai-tao¹, ZHUANG Da-wei¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory),
Institute of Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to evaluate the heat transfer characteristics of nanorefrigerant and the cycle behavior of nanoparticles in the refrigeration system, the migration of nanoparticles during pool boiling was investigated experimentally. Weigh method is used in the present study. The research focuses on the influence of nanoparticle type and size, refrigerant type, mass fraction of lubricating oil, heat flux and initial liquid-level height on the migration of nanoparticles during pool boiling. The experimental results show that the migration ratio of nanoparticles during the pool boiling of refrigerant-based nanofluid increases with the decrease of nanoparticle density, nanoparticle size, dynamic viscosity of refrigerant, mass fraction of lubricating oil or heat flux; while increases with the increase of liquid-phase density of refrigerant or initial liquid-level height.

Key words: refrigerant; nanoparticle; migration; particle size; heat flux

收稿日期:2011-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50976065)

作者简介:丁国良(1966-),男,浙江省舟山市人,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-34206378;E-mail:glding@sjtu.edu.cn.

制冷空调装置能耗巨大。提高制冷剂侧的传热性能,特别是提高蒸发器中制冷剂的沸腾传热性能,是降低制冷空调装置能耗的有效手段之一。纳米颗粒与常规制冷剂组成的纳米制冷剂具有比常规制冷剂更优异的导热和传热性能^[1]。在纳米制冷剂沸腾过程中,固相球形纳米颗粒能否从液相制冷剂迁移至气相制冷剂,决定颗粒能否参与制冷循环。同时,球形纳米颗粒的迁移会导致液相和气相中颗粒浓度的变化,进而影响纳米制冷剂的沸腾传热效果。为评估纳米制冷剂沸腾传热效果和球形纳米颗粒在制冷系统中的循环能力,需要对纳米制冷剂沸腾过程中气/液相间球形纳米颗粒迁移特性进行研究。其中,需考虑球形纳米颗粒种类和粒径、制冷剂种类等对其迁移特性的影响。压缩式制冷系统中不可避免地含有润滑油,而润滑油的存在会影响工质物理性质和气泡动力学特性,从而影响纳米颗粒和制冷剂气泡在液相工质中的运动规律、纳米颗粒与气泡的相互作用规律。这些影响因素在球形纳米颗粒迁移特性的研究中需要考虑。

国内外研究人员针对纳米制冷剂的池沸腾^[2-5]和流动沸腾^[6-7]传热特性开展了研究,但大都集中于沸腾换热系数的测定;笔者前期^[8]研究了纳米制冷剂池沸腾时球形纳米颗粒的迁移特性,得到了球形纳米颗粒迁移率与颗粒浓度的关系,但仅采用了单一种类的球形纳米颗粒和制冷剂,且热流密度固定。本文在此基础上,研究了球形纳米颗粒种类和粒径、制冷剂种类、润滑油浓度、热流密度和初始液位高度等因素对球形纳米颗粒迁移特性的影响。

1 实验部分

1.1 球形纳米颗粒迁移量测定实验台

球形纳米颗粒迁移量测定实验台由纳米制冷剂沸腾装置、纳米颗粒质量称量装置和纳米颗粒捕集罩3部分组成,见图1。纳米制冷剂沸腾装置主要包括沸腾容器和电加热膜。沸腾容器为上部开口的圆柱形玻璃容器,高95 mm、内径50 mm。为了减少热量损失,在沸腾容器外包裹玻璃纤维保温材料。电加热膜置于沸腾容器底部,其加热面积等于沸腾容器的底面积且表面平整。电加热膜与直流电源相连,通过改变直流电源的输出来改变其加热功率。精度为0.5%的电流表用于测量通过电加热膜的电流;电压通过数据采集仪测定,精度为0.002%。热流密度通过改变直流电源的输出进行控制,并通过测得的电流值、电压值以及加热面积进行计算。热流密度的不确定度小于1.2%。纳米颗粒质量称量装置为日本

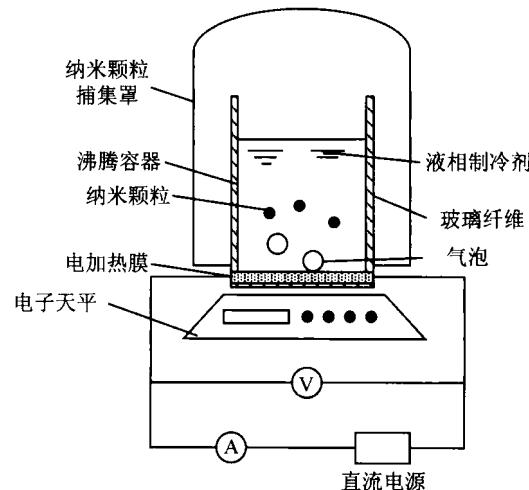


图1 球形纳米颗粒迁移量测定实验台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test rig for the migration characteristics of nanoparticle

A&D公司生产的GR-200型高精度电子天平,量程为0.010~210.000 g,最大误差为0.1 mg。纳米颗粒捕集罩用于收集发生抛射的纳米颗粒,以防止纳米颗粒释放到环境中而造成环境污染。所有实验均在101.3 kPa下进行。

1.2 实验对象

球形纳米颗粒选用Cu、Al纳米颗粒和CuO、Al₂O₃纳米颗粒,其中:Cu的平均直径分别为20、50和80 nm;Al、CuO和Al₂O₃为单一粒径的纳米颗粒,其平均直径分别为20、40和20 nm。

实验选用3种不同类型的制冷剂,即R113(CFC类制冷剂)、R141b(HCFC类制冷剂)、戊烷(烷烃类制冷剂)。其选择依据是:(1) R113、R141b和戊烷在常温常压下为液态(101.3 kPa时沸点分别为47.6、32.1和36.1 °C),便于实验操作;而大多数主流制冷剂(如R410A、R134a等)在常温常压下为气态,难以在常温常压下将纳米颗粒分散于其中,不便于实验操作;(2)在物理性质上,R113、R141b和戊烷与主流制冷剂的差异远小于其与水、油、醇类等液体的差异。

实验选用VG68润滑油(日本新石油公司提供)。VG68是酯类油,其在15 °C时密度为0.964 g/cm³,在40和100 °C时动力学黏度分别为66.79和8.23 mm²/s。

1.3 实验方法

由于在实际制冷系统中,蒸发器内将发生制冷剂的完全蒸发。因此,本实验测定制冷剂完全蒸发时球形纳米颗粒的迁移量,即制冷剂完全蒸发导致的从液相制冷剂进入气相制冷剂的球形纳米颗粒质量。实验采用称重法,具体步骤如下:(1)在沸腾容器

中加入初始质量为 m_{n0} 的球形纳米颗粒和质量为 m_o 的润滑油;② 称量沸腾容器、球形纳米颗粒和润滑油的总质量,记为 m_1 ;③ 在沸腾容器中加入初始质量为 m_{r0} 的制冷剂,将球形纳米颗粒、润滑油与制冷剂的混合物通过超声波粉碎仪振荡而形成含油纳米制冷剂;④ 打开直流电源,将含油纳米制冷剂加热至沸腾;⑤ 改变直流电源的输出,以控制其热流密度;⑥ 待制冷剂完全蒸发(以沸腾容器内混合物的

质量在 12 h 内不发生变化为准),称量沸腾容器、球形纳米颗粒和润滑油的总质量,记为 m_2 ;⑦ 计算球形纳米颗粒的迁移量 $\Delta m_n = m_1 - m_2$.

1.4 实验工况

实验工况见表 1. 其可划分成 6 组,分别用于考察球形纳米颗粒的种类和粒径、制冷剂的种类、润滑油浓度 w_o 、热流密度 q 和初始液位高度 L 对球形纳米颗粒迁移特性的影响.

表 1 球形纳米颗粒迁移特性实验工况

Tab. 1 Test conditions for the migration characteristics of spherical nanoparticles

考察目标	颗粒及其粒径	制冷剂	$w_o/\%$	$q/(kW \cdot m^{-2})$	L/cm
颗粒种类的影响	Cu (20 nm), Al (20 nm), Al_2O_3 (20 nm)	R113	0	50	2.0
颗粒粒径的影响	Cu (20 nm), Cu (50 nm), Cu (80 nm)	R113	0	50	2.0
制冷剂种类的影响	CuO (40 nm)	R113, R141b, 戊烷	0	50	2.0
w_o 的影响	CuO (40 nm)	R113	0, 1, 5, 10	50	2.0
q 的影响	CuO (40 nm)	R113	0	10, 20, 50, 100	2.0
L 的影响	CuO (40 nm)	R113	0	50	1.3, 2.0, 2.7, 3.4

2 数据分析

为了定量评估球形纳米颗粒的迁移程度,本文定义制冷剂完全蒸发时,球形纳米颗粒的迁移率为

$$\zeta = \Delta m_n / m_{n0} \quad (1)$$

由于球形纳米颗粒的迁移以及制冷剂沸腾,导致了液相工质质量的不断减小、液相工质中纳米颗粒浓度随时间的推移而不断变化. 作为比较基准,本文定义纳米颗粒的初始浓度,即初始时刻液相工质(液相制冷剂或液相制冷剂与润滑油混合物)中纳米颗粒的体积分数为

$$\varphi_n = \frac{m_{n0}/\rho_n}{m_{n0}/\rho_n + m_{r0}/\rho_{r,L} + m_o/\rho_o} \quad (2)$$

式中, ρ_n 、 $\rho_{r,L}$ 和 ρ_o 分别为纳米颗粒、液相制冷剂和润滑油的密度.

润滑油浓度定义为初始时刻液相制冷剂与润滑油混合物中润滑油的质量分数,即

$$w_o = \frac{m_o}{m_{r0} + m_o} \quad (3)$$

球形纳米颗粒迁移率的相对误差为

$$\frac{\delta\zeta}{\zeta} = \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta m_n}\right)^2 \delta\Delta m_n^2 + \left(\frac{1}{m_{n0}}\right)^2 \delta m_{n0}^2} \quad (4)$$

球形纳米颗粒迁移量的绝对误差 ($\delta\Delta m_n$) 和纳

米颗粒初始质量的绝对误差 (δm_{n0}) 取决于高精度电子天平的测量误差. 实验所用高精度电子天平最大误差为 0.1 mg, 因此, $\delta\Delta m_n$ 和 δm_{n0} 分别为 0.2 和 0.1 mg. 当 Δm_n 和 m_{n0} 最小时, 球形纳米颗粒迁移率的相对误差最大. 按照式(4)计算可得, 球形纳米颗粒迁移率的最大相对误差为 2.7%.

另外, 在一些工况下进行了 3 次迁移量测试实验. 结果表明, 在同一工况下, 3 次实验结果的偏差均在 3% 以内, 从而验证了实验数据的重复性.

3 结果与讨论

3.1 球形纳米颗粒种类和粒径的影响

图 2 给出了不同种类的球形纳米颗粒迁移率随纳米颗粒初始浓度变化的规律. 在该组实验工况下, $\zeta = 15.4\% \sim 30.7\%$. 由图 2 可见, 在本文实验工况下, $Al(20\text{ nm})$ 的 ζ 范围为 $22.3\% \sim 30.7\%$, $Al_2O_3(20\text{ nm})$ 的 ζ 范围为 $20.7\% \sim 25.9\%$, $Cu(20\text{ nm})$ 的 ζ 范围为 $15.4\% \sim 20.9\%$, 3 种相同粒径的球形纳米颗粒的 ζ 由大到小依次为 $Al(20\text{ nm}) > Al_2O_3(20\text{ nm}) > Cu(20\text{ nm})$, 这与球形纳米颗粒密度的变化结果相反(Al 、 Al_2O_3 和 Cu 的密度分别为 2.688 、 3.890 和 8.920 g/m^3). 产生这种现象的原因是: 球形纳米颗粒布朗运动的速度随颗

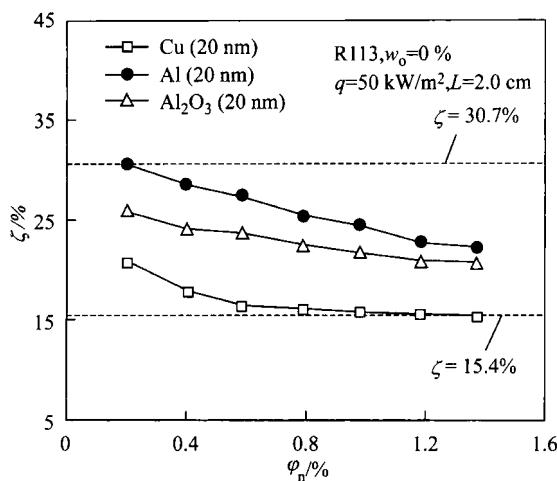


图2 球形纳米颗粒的种类对其迁移特性的影响

Fig. 2 Influence of nanoparticle type on the migration characteristics of nanoparticles

粒密度减小而增大^[9]，导致更多的球形纳米颗粒到达气泡的表面并被气泡捕捉，从而使得 ζ 随颗粒密度减小而增大。

图3给出了不同粒径的球形Cu纳米颗粒迁移率随其初始浓度变化的规律。在该组实验工况下， $\zeta=2.8\% \sim 20.9\%$ 。由图3可以看出， ζ 随球形纳米颗粒粒径的减小而增大。在本实验工况下，Cu(20 nm)的 ζ 比Cu(50 nm)的 ζ 高出的比率最大为315.6%；比Cu(80 nm)的 ζ 高出的比率最大448%。产生这种现象的原因是：布朗扩散引起的球形纳米颗粒与气泡的碰撞概率和颗粒的粒径成反比^[10]，因此，粒径小的球形纳米颗粒与气泡的碰撞概率较大，导致更多的球形纳米颗粒被气泡捕捉，从而使得 ζ 增大。

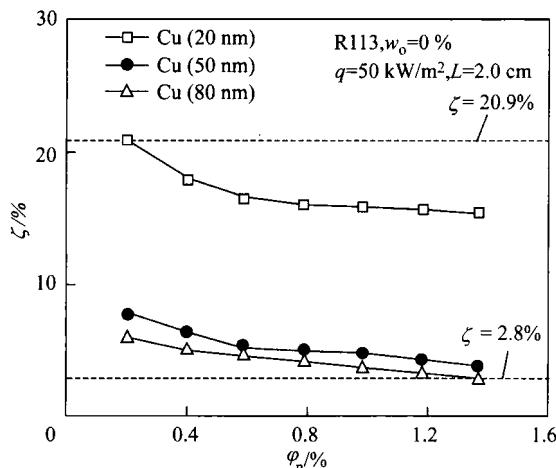


图3 球形纳米颗粒的粒径对其迁移特性的影响

Fig. 3 Influence of nanoparticle size on the migration characteristics of nanoparticles

3.2 制冷剂种类的影响

图4给出了不同种类制冷剂在完全蒸发时，球形纳米颗粒的迁移率随纳米颗粒初始浓度变化的规律。在该组实验工况下， $\zeta=3.7\% \sim 12.5\%$ 。由图4可以看出，R141b纳米制冷剂中CuO的 $\zeta >$ R113纳米制冷剂中CuO的 $\zeta >$ 戊烷纳米制冷剂中CuO的 ζ 。在实验工况下，CuO纳米颗粒在R141b纳米制冷剂中的最大迁移率比其在R113纳米制冷剂中的迁移率高23.4%，比其在戊烷纳米制冷剂中的迁移率高88.6%。产生这种现象的原因在于：①3种制冷剂的动力学黏度由大到小的顺序依次为R113($0.500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)>R141b($0.378 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)>戊烷($0.191 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)，且动力学黏度越大，布朗扩散引起的球形纳米颗粒与气泡的碰撞概率越小，从而使得 ζ 越小。②3种制冷剂的液相密度由大到小依次为R113(1.508 g/cm^3)>R141b(1.220 g/cm^3)>戊烷(0.606 g/cm^3)。对于固定的 L ，液相制冷剂密度越大，意味着其质量越大，导致完全蒸发时产生的气泡数量越多，从而使得 ζ 越大。制冷剂的种类对 ζ 的影响是上述两方面综合作用的结果，且呈现出以下规律：R141b纳米制冷剂中CuO的 $\zeta >$ R113纳米制冷剂中CuO的 $\zeta >$ 戊烷纳米制冷剂中CuO的 ζ 。

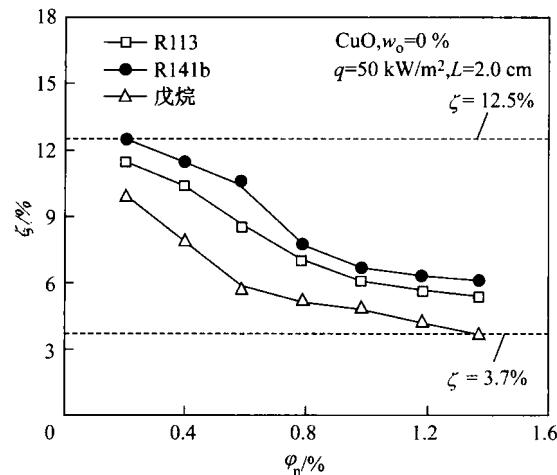


图4 制冷剂的种类对球形纳米颗粒迁移特性的影响

Fig. 4 Influence of refrigerant type on the migration characteristics of nanoparticles

3.3 润滑油浓度的影响

图5给出了不同润滑油浓度下，球形纳米颗粒迁移率随纳米颗粒初始浓度变化的规律。在该组实验工况下， $\zeta=0.8\% \sim 11.5\%$ 。由图5可见：在不同 w_0 下， ζ 随着 φ_n 的增加而逐渐减小； w_0 越大， ζ 越小，在实验工况下， w_0 从1%增大到10%， ζ 的最

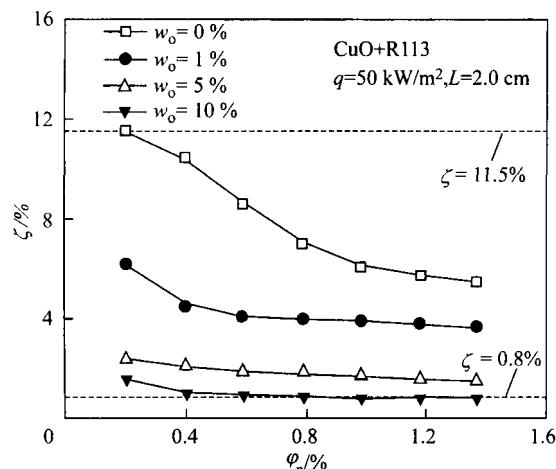


图5 润滑油浓度对球形纳米颗粒迁移特性的影响
Fig. 5 Influence of lubricating oil concentration on the migration characteristics of nanoparticles

大降幅为 79.1%。产生这种现象的原因在于：① VG68 润滑油的黏度和表面张力大于纯制冷剂的黏度和表面张力，导致液相制冷剂与油混合物的黏度和表面张力随 w_o 的增加而增大；② 黏度的增加，导致了布朗扩散引起的球形纳米颗粒与气泡的碰撞概率减小，从而使得 ζ 减小；③ 表面张力的增加，导致了沸腾过程中气泡脱离直径的增加。布朗扩散引起的球形纳米颗粒与气泡的碰撞概率随气泡直径的增加而减小^[10]，因此，表面张力的增加会导致被气泡捕捉的球形纳米颗粒数量减小，从而使得 ζ 减小。

3.4 热流密度的影响

图6给出了不同热流密度下，球形纳米颗粒迁移率随纳米颗粒初始浓度变化的规律。在该组实验工况下， $\zeta = 5.3\% \sim 14.1\%$ 。由图6可见：在不同 q

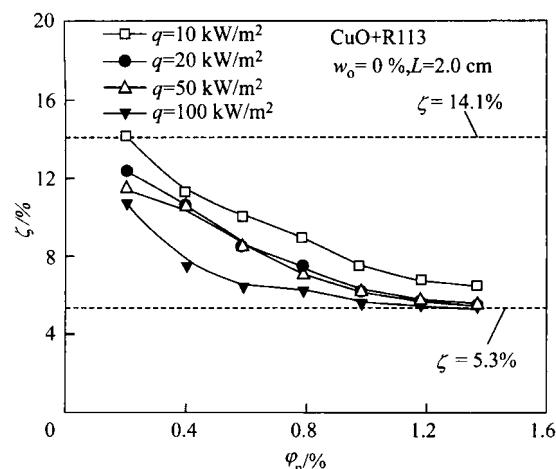


图6 热流密度对球形纳米颗粒迁移特性的影响
Fig. 6 Influence of heat flux on the migration characteristics of nanoparticles

下， ζ 随着 φ_n 的增加而减小； q 越大， ζ 越小，在实验工况下， q 从 10 kW/m^2 增大到 100 kW/m^2 ， ζ 的最大降幅为 36.2%。产生这种现象的原因在于：① 热流密度的增大导致了气泡脱离速度的增大^[9]，因而使得气泡上升速度增大；② 气泡上升速度的增大，导致了布朗扩散引起的纳米颗粒与气泡的碰撞概率减小^[10]，从而使得 ζ 减小；③ 气泡上升速度的增大，导致了液相工质中气泡上升时间和被气泡捕捉的纳米颗粒数量减小，从而使得 ζ 减小。

3.5 初始液位高度的影响

图7给出了不同初始液位高度下，球形纳米颗粒迁移率随纳米颗粒初始浓度变化的规律。在该组实验工况下， $\zeta = 3.4\% \sim 21.2\%$ 。由图7可见：在不同 L 下， ζ 随着 φ_n 的增加而减小； L 越大， ζ 值越大，在实验工况下， L 从 1.3 cm 增大到 3.4 cm ， ζ 的最大增幅为 247.5%。产生这种现象的原因在于： L 增加，使得液相工质中气泡上升时间增加，导致被气泡捕捉的球形纳米颗粒数量增加以及气/液界面上球形纳米颗粒脱离的概率增加，从而使得 ζ 增大。

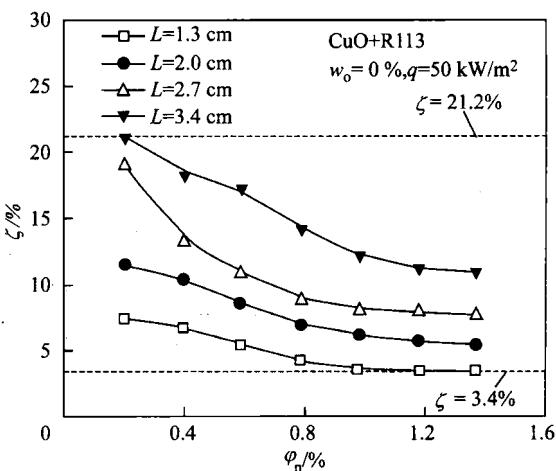


图7 初始液位高度对球形纳米颗粒迁移特性的影响
Fig. 7 Influence of initial liquid-level height on the migration characteristics of nanoparticles

4 结论

(1) 球形纳米颗粒迁移率随其密度的减小而增大。在本文的实验工况下，3种相同粒径球形纳米颗粒的 ζ 由大到小依次为 $\text{Al} (20 \text{ nm}) > \text{Al}_2\text{O}_3 (20 \text{ nm}) > \text{Cu} (20 \text{ nm})$ ，这与球形纳米颗粒密度的变化规律相反。

(2) 球形纳米颗粒的迁移率随其粒径的减小而增大。在本文的实验工况下， $\text{Cu} (20 \text{ nm})$ 的迁移率比 $\text{Cu} (50 \text{ nm})$ 最大高出 315.6%，比 $\text{Cu} (80 \text{ nm})$

最大高出448%。

(3) 制冷剂的动力学黏度越小及密度越大,其完全蒸发时球形纳米颗粒的迁移率越大。

(4) 球形纳米颗粒的迁移率随润滑油浓度和热流密度的增大而减小,随初始液位高度的增加而增大。

参考文献:

- [1] Jiang W T, Ding G L, Peng H, et al. Experimental and model research on nanorefrigerant thermal conductivity [J]. **HVAC and R Research**, 2009, 15 (3): 651-669.
- [2] Kedzierski M A. Effect of diamond nanolubricant on R134a pool boiling heat transfer// **Proceedings of MNHMT09 2nd ASME Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference**. Shanghai: ASME, 2009:18-21.
- [3] Kedzierski M A, Gong M. Effect of CuO nanolubricant on R134a pool boiling heat transfer [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2009, 32 (5): 791-799.
- [4] Trisaksri V, Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2009, 52 (5/6): 1582-1588.
- [5] Peng H, Ding G L, Hu H T, et al. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant/oil mixture with diamond nanoparticles [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2010, 33 (2): 347-358.
- [6] Peng H, Ding G L, Jiang W T, et al. Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2009, 32 (6): 1259-1270.
- [7] Henderson K, Park Y G, Liu L P, et al. Flow-boiling heat transfer of R-134a-based nanofluids in a horizontal tube [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2010, 53 (5/6): 944-951.
- [8] Ding G L, Peng H, Jiang W T, et al. The migration characteristics of nanoparticles in the pool boiling process of nanorefrigerant and nanorefrigerant-oil mixture [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2009, 32 (1): 114-123.
- [9] Prasher R, Bhattacharya P, Phelan P E. Brownian-motion-based convective-conductive model for the effective thermal conductivity of nanofluids [J]. **Journal of Heat Transfer**, 2006, 128(6): 588-595.
- [10] Edzwald J K, Malley J P, Yu C. A conceptual model for dissolved air flotation in water treatment [J]. **Water Supply**, 1990, 8: 141-150.

(上接第 670 页)

- WU Jun-hua, HUANG Zhen, QIAO Xin-qi, et al. Study on combustion and emissions characteristics of turbocharged engine fuelled with dimethyl ether [J]. **Transactions of CSICE**, 2006, 24 (3): 193-199.
- [8] 张光德, 黄震, 乔信起, 等. 二甲醚发动机的燃烧与排放研究[J]. **汽车工程**, 2003, 25 (2): 124-127.
- ZHANG Guang-de, HUANG Zhen, QIAO Xin-qi, et al. An investigation on combustion and exhaust emissions of direct injection diesel engine fuelled with dimethyl ether [J]. **Automotive Engineering**, 2003, 25 (2): 124-127.
- [9] Lee S W, Sato Y, Takayanagi T, et al. Development of NO_x storage reduction system for a dimethyl ether

- engine [EB/OL]. [2011-10-20]. <http://papers.sae.org/2004-01-1832>.
- [10] Hu Zhun, Sun Ke-qiang, Li Wei-zhen, et al. NO_x storage and reduction performance of Pt-CoO_x-BaO/Al₂O₃ catalysts: Effects of cobalt loading and calcination temperature [J]. **Catalysis Today**, 2010, 158 (3/4): 432-438.
- [11] 康守方, 李俊华, 傅立新, 等. Cu-Mg-Al 催化剂上 NO_x 存储及分解性能研究[J]. **环境科学**, 2007, 28 (5): 958-962.
- KANG Shou-fang, LI Jun-hua, FU Li-xin, et al. NO_x storage and decomposition behavior of Cu-Mg-Al catalyst [J]. **Environmental Science**, 2007, 28 (5): 958-962.