

文章编号: 0253-4339(2011)06-0009-05

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2011.06.009

基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热特性

庄大伟¹ 彭浩² 胡海涛¹ 丁国良¹ 朱禹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 通过实验研究了基于碳纳米管(CNTs)的含油纳米制冷剂(即由制冷剂R113、润滑油VG68和碳纳米管组成的纳米流体)的核态池沸腾换热特性,分析了碳纳米管对含油制冷剂核态池沸腾换热的影响。实验中采用了外径为15~80nm、长度为1.5~10 μ m的四种碳纳米管。实验的饱和压力为101.3 kPa;热流密度为10~80 kW/m²;纳米油(碳纳米管和润滑油的混合物)的质量分数为0~5%;在纳米油中碳纳米管的质量分数为0~30%。实验结果表明:碳纳米管增强了含油制冷剂的池沸腾换热,在测试工况下换热系数最大可增加61%。当纳米油中碳纳米管浓度为20%不变,纳米油浓度由1%提高到5%时,不同尺寸的碳纳米管对换热系数的增加幅度由27%~59%降低至23%~55%;当纳米油的浓度为1%不变,纳米油中碳纳米管浓度由20%提高到30%时,不同尺寸的碳纳米管对换热系数的增加幅度由27%~59%升高到33%~61%。通过实验获得了基于碳纳米管的含油纳米制冷剂池沸腾换热关联式,关联式的预测值与96%的实验数据偏差在 $\pm 10\%$ 以内。

关键词 工程热物理;碳纳米管;关联式;核态池沸腾;润滑油;制冷剂

中图分类号: TB61⁺2; TK124

文献标识码: A

Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of Refrigerant/Oil Mixture with Carbon Nanotubes

Zhuang Dawei¹ Peng Hao² Hu Haitao¹ Ding Guoliang¹ Zhu Yu¹

(1. Inst. of Refrigeration and Cryogenics Eng., Shanghai Jiao Tong Univ., Shanghai, 200240, China; 2. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory) / CAS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing, 100190, China)

Abstract Influence of carbon nanotubes (CNTs) on nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant-oil mixture was investigated experimentally. Four types of CNTs with the outside diameters from 15 nm to 80 nm and the lengths from 1.5 μ m to 10 μ m were used in the experiments. Test conditions include CNTs mass fractions in the CNTs nanolubricant from 0 to 30 per cent and CNTs nanolubricant mass fractions from 0 to 5 per cent. The experimental results indicate that the presence of CNTs enhances the nucleate pool boiling heat transfer coefficient of R113-oil mixture by a maximum of 61% under the present test conditions. For fixed CNTs physical dimension, the enhancement range changes from 27%~59% to 23%~55% when CNTs nanolubricant mass fraction increases from 1% to 5%; the enhancement range changes from 27%~59% to 33%~61% when CNTs mass fraction in the CNTs nanolubricant increases from 20% to 30%. A correlation for predicting the nucleate pool boiling heat transfer coefficient of refrigerant-oil mixture with CNTs is proposed, and it agrees with 96% of the experimental data within a deviation of $\pm 10\%$.

Keywords Engineering thermophysics; Carbon nanotubes; Correlation; Nucleate boiling; Oil; Refrigerant

在制冷剂中添加纳米颗粒组成纳米制冷剂,已经成为一种新型的增强换热的技术,纳米制冷剂中所用纳米颗粒包括零维纳米颗粒(如金属或者金属氧化物颗粒)和一维纳米颗粒(如碳纳米管)。由于大部分压缩式制冷系统中所用的工质均含有润滑油,纳米颗粒可以以纳米颗粒/润滑油混合物即纳米油的方式注入制冷系统^[1]。纳米颗粒的存在会改变制冷剂的热物理性质,包括导热系数、动力粘度

和密度等,因此向制冷系统中注入纳米颗粒对制冷系统的整体性能有明显的影 响。为了评价纳米颗粒对制冷系统整体性能的影响,必须首先研究含油纳米制冷剂的池沸腾换热特性。

相比于金属或者金属氧化物纳米颗粒,碳纳米管的导热系数高1~2个数量级。因此,碳纳米管比金属或者金属氧化物纳米颗粒更具有提高制冷剂池沸腾换热和对流换热的潜力^[2-5]。为了将碳纳米

基金项目:国家自然科学基金(50976065)资助项目。(The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No.50976065).)

收稿日期:2011年6月1日

管应用于制冷系统以改善系统的整体性能, 必须了解基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热特性。

目前对碳纳米管纳米制冷剂核态池沸腾换热特性研究主要集中于纯制冷剂或水和碳纳米管混合物的池沸腾研究, 关于含油碳纳米管纳米制冷剂的核态池沸腾研究的报道较少。文献[6]研究了水和碳纳米管混合物的核态池沸腾换热特性, 发现用酸处理过的碳纳米管可以使水的核态池沸腾换热得到增强; 文献[6]和[7]研究了制冷剂和碳纳米管混合物的核态池沸腾换热特性, 发现碳纳米管在混合物中体积分数为1%时可以使制冷剂的核态池沸腾换热系数提高最多36.6%。但是, 以上的研究均未考虑碳纳米管尺寸对纳米制冷剂池沸腾换热的影响, 且碳纳米管对含油制冷剂的影响有可能与对纯制冷剂的影响不同。然而, 目前尚无有关含油碳纳米管纳米制冷剂核态池沸腾换热特性研究的报道。

这里的目的是研究基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热特性, 并推导基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热关联式。

1 实验装置与实验原理

1.1 实验装置

实验在含油纳米制冷剂池沸腾换热特性实验台上进行。实验台由加热系统、沸腾容器、冷凝系统和数据采集系统组成, 详细介绍可参考文献[8]。

研究对象为基于碳纳米管的含油纳米制冷剂。为了制备含油碳纳米管纳米制冷剂, 首先制备四种不同尺寸的碳纳米管, 并将之与润滑油混合, 组成碳纳米管纳米油; 然后将纳米油与纯制冷剂混合, 组成含油碳纳米管纳米制冷剂。含油纳米制冷剂的制备方法可参考文献[8]。含油纳米制冷剂由碳纳米管纳米油与制冷剂R113混合而成。由于R113在常温常压下为液体(101kPa时沸点为47.6℃), 便于常温常压下将纳米颗粒稳定分散于R113中^[9-10], 因此实验中所选的制冷剂为R113。

1.2 测试对象与测试工况

由于实验中碳纳米管的浓度较低, 实验观察表明制备的含油纳米制冷剂在12h内能保持良好的分散稳定性。

为了表征混合物中各成分的配比, 定义了纳米油中碳纳米管质量分数 w_n 和纳米油质量分数 w_{no} 2个参数, 计算公式分别为:

$$w_n = m_n / (m_n + m_o) \quad (1)$$

$$w_{no} = m_{no} / (m_{no} + m_r) \quad (2)$$

式中: m_n 为碳纳米管的质量; m_o 为润滑油的质量; m_{no} 为纳米油质量; m_r 为制冷剂的质量。

因此, 含油纳米制冷剂中碳纳米管的质量分数为:

$$w_D = w_n \cdot w_{no} \quad (3)$$

实验中饱和压力为101.3kPa; 热流密度为10~80 kW/m²; 纳米油(碳纳米管和润滑油的混合物)的质量分数为0~5%; 在纳米油中碳纳米管的质量分数为0~30%。

2 实验数据整理与误差分析

核态池沸腾的换热系数可由下式得出:

$$h = q / (T_w - T_{sat}) \quad (4)$$

$$q = -\lambda_c \frac{dT_w}{dz} \quad (5)$$

式中: q 为热流密度; T_w 为铜柱加热表面温度; T_{sat} 为纳米制冷剂的饱和温度; λ_c 为铜的导热系数; $\frac{dT_w}{dz}$ 为加热表面的温度梯度, T_w 和 z 的关系为 $T_w = a_1 + a_2 z$, a_1 和 a_2 为由铜柱上5个K型热电偶测得的温度($T_1 \sim T_5$)拟合得到的系数。

根据Moffat等的误差传递分析方法^[11], 可以得到核态池沸腾换热系数的相对误差为:

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_w}{T_w - T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{sat}}{T_w - T_{sat}}\right)^2} \quad (6)$$

当加热表面的温度为最低而饱和液体温度为最高时, 可以得到换热系数的最大相对误差为9.2%。

3 实验结果与结论

3.1 含油纳米制冷剂的池沸腾换热系数

图1给出了含油制冷剂R113(R113/VG68)和 w_n 为20%、 w_{no} 为1%时含油碳纳米管纳米制冷剂的核态池沸腾换热系数, 其中碳纳米管的几何结构包括四种(即CNT#1、CNT#2、CNT#3和CNT#4, 它们的几何尺寸分别为 $d=15\text{nm}$, $l=1.5\mu\text{m}$; $d=15\text{nm}$, $l=10\mu\text{m}$; $d=80\text{nm}$, $l=1.5\mu\text{m}$; $d=80\text{nm}$, $l=10\mu\text{m}$)。

从图1中可以看出, 含油碳纳米管纳米制冷剂的核态池沸腾换热系数高于含油制冷剂R113, 表明CNTs的存在强化核态池沸腾换热。在实验工况下, 核态池沸腾换热系数强化程度最大可以达到61%。

w_{no} 分别为1%和5%的含油碳纳米管纳米制冷剂的核态池沸腾换热系数实验数据如图2所示。由图2可见,含油碳纳米管纳米制冷剂的核态池沸腾换热系数大于含油制冷剂R113的核态池沸腾换热系数,且增加幅度随着纳米油的浓度增大而减小。

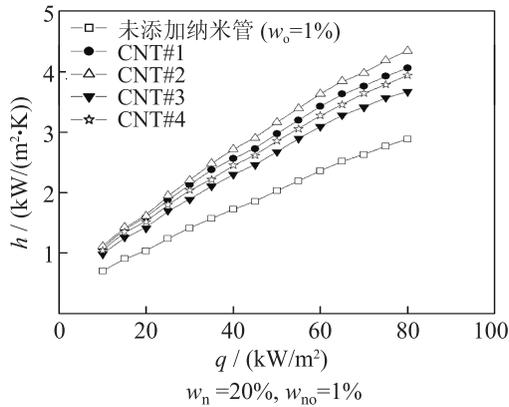


图1 含油制冷剂R113以及含油碳纳米管纳米制冷剂的核态池沸腾换热系数实验数据
Fig.1 Nucleate pool boiling heat transfer coefficients of R113/oil mixtures and R113/oil mixtures with CNTs

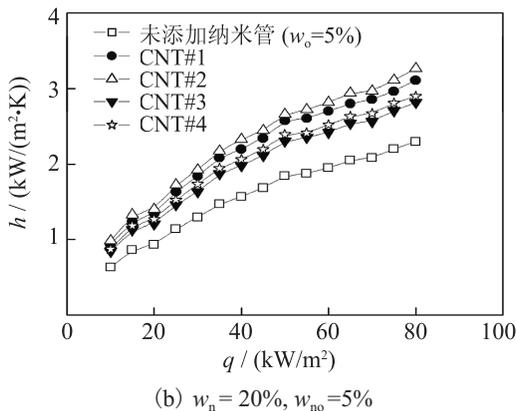
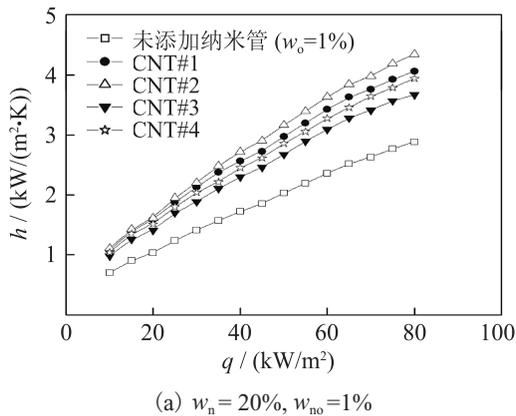


图2 当 $w_{no}=1\%$, 5% 时含油碳纳米管纳米制冷剂的核态池沸腾换热系数实验数据
Fig.2 Nucleate pool boiling heat transfer coefficients of R113/oil mixtures with CNTs at different nanoparticles/oil suspension concentrations

3.2 碳纳米管对核态池沸腾换热的影响

为了定量研究纳米颗粒对制冷剂核态池沸腾换热的影响,将含油纳米制冷剂的核态池沸腾换热系数 h_{mo} 与含油制冷剂的核态池沸腾换热系数 h_{ro} 的比值定义为纳米颗粒影响因子 EF :

$$EF = h_{mo} / h_{ro} \quad (7)$$

式中: h_{mo} 为含油纳米制冷剂池沸腾换热系数; h_{ro} 为含油制冷剂池沸腾换热系数。

当 w_{no} 分别为1%和5%时纳米颗粒影响因子 EF 分别如图3所示。

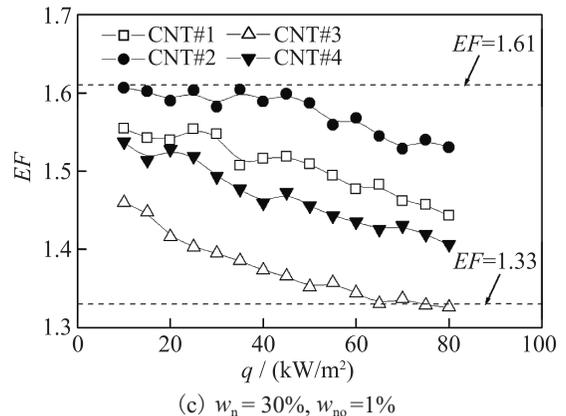
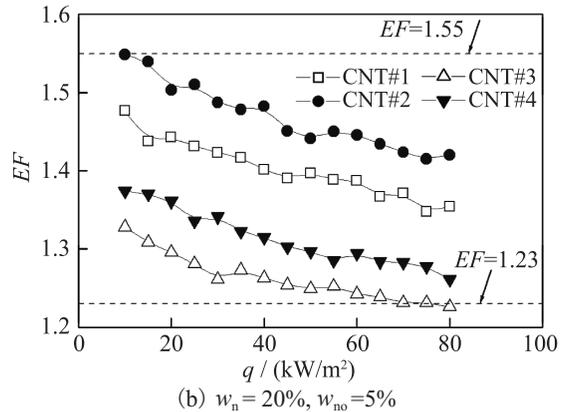
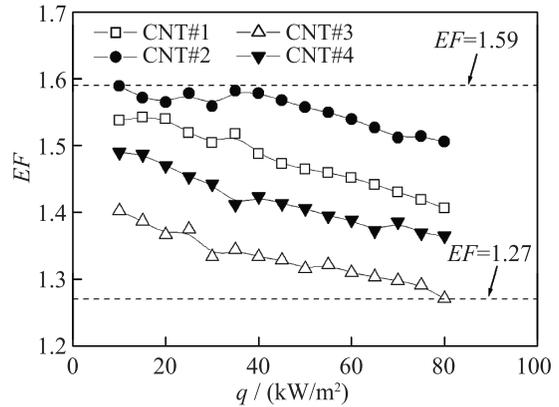


图3 不同几何结构碳纳米管的影响因子(EF)
Fig.3 EF for carbon nanotubes with different physical dimension

由图3(a)和(b)中可见,当纳米油中碳纳米管浓度不变,纳米油浓度由1%提高到5%时,不同尺寸的碳纳米管影响因子 EF 的范围由1.27~1.59降低至1.23~1.55,表明池沸腾换热系数随纳米油浓度的增加而降低。由图3(a)和(c)中可见,当纳米油的浓度不变,纳米油中碳纳米管浓度由20%提高到30%时,不同尺寸的碳纳米管影响因子 EF 的范围由1.27~1.59升高到1.33~1.61,表明池沸腾换热系数随纳米油中碳纳米管浓度的增加而增加。产生该现象的原因是:随着纳米油中碳纳米管浓度的增大或者纳米油浓度的减小,碳纳米管与加热表面的碰撞概率增大,使碳纳米管与加热表面的相互作用增强。同时,碳纳米管与气泡的碰撞概率增大,从而碳纳米管对气泡二次成核的诱导作用增强。这些因素都使碳纳米管对核态池沸腾的强化程度提高。

由图3(a)~(c)中可见,当纳米油中碳纳米管浓度和纳米油浓度一定时, EF 随着碳纳米管的平均直径的减小而增大,随着碳纳米管的平均长度的增加而增大。产生这种现象的原因如下:对于固定的加热表面粗糙度,减小碳纳米管的平均直径可以使单个气化核心分裂成多个气化核心的过程变得更为剧烈,同时可以增大碳纳米管与加热表面的相互作用力,从而导致 EF 随平均直径的减小而增大;又由于长的碳纳米管所形成的多孔结构孔径较大,大孔径会对气泡生长的抑制作用较弱,长的碳纳米管对核态池沸腾换热的强化程度增加,从而导致 EF 随长度的增加而增大。

4 含油纳米制冷剂核态池沸腾换热关联式的开发

到目前为止,基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热关联式尚未见文献报道。

这里在Rohsenow^[12]关联式基础上,推导基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热关联式。在新关联式中引入了含油纳米制冷剂的混合物性后,其核态池沸腾换热系数 h_{mo} 表示为:

$$h_{mo} = q / \Delta T_b \quad (8)$$

$$\Delta T_b = \frac{C_{sf} h_{fg}}{c_{p,mo,f}} \left[\frac{q}{\mu_{mo,f} h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma_{mo}}{g(\rho_{mo,f} - \rho_{r,g})}} \right]^{0.33} \times \left[\frac{c_{p,mo,f} \mu_{mo,f}}{k_{mo,f}} \right]^n \quad (9)$$

$$C_{sf} = a + b(d/l) + c w_n + d w_{no} \quad (10)$$

式中: ΔT_b 为过热度; $c_{p,mo,f}$, $\mu_{mo,f}$ 和 $k_{mo,f}$ 分别为液相含油纳米制冷剂的比定压热容、动力黏度和导热系数; σ_{mo} 为含油纳米制冷剂的表面张力; $\rho_{mo,f}$ 为液相含油纳米制冷剂的密度; $\rho_{r,g}$ 为气相制冷剂的密度; h_{fg} 为汽化潜热; C_{sf} 为表征流体-加热表面组合特性的系数; n, a, b, c 和 d 为通过实验数据得到的拟合参数。

通过对含油碳纳米管纳米制冷剂池沸腾实验数据的非线性回归可以得出 $n=0.6966$, $a=-0.0307$, $b=-0.0744$, $c=-0.0126$, $d=0.1051$ 。因此,基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热关联式可以表示为:

$$h_{mo,p} = q / \left\{ \frac{h_{fg}}{c_{p,mo,f}} \left(0.0307 + 0.0744 \frac{d}{l} - 0.0126 w_n + 0.1051 w_{no} \right) \times \left[\frac{q}{\mu_{mo,f} h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma_{mo}}{g(\rho_{mo,f} - \rho_{r,g})}} \right]^{0.33} \times \left[\frac{c_{p,mo,f} \mu_{mo,f}}{k_{mo,f}} \right]^{0.6966} \right\} \quad (11)$$

图4给出了关联式预测值与实验结果的比较。从图4(a)~(d)可以看出,对于CNT#1、CNT#2、CNT#3和CNT#4四种几何结构的碳纳米管,核态池沸腾换热系数关联式预测值与97%、93%、97%和96%的实验值的偏差在±10%以内。总体上,核态池沸腾换热系数的关联式预测值与96%的实验值的偏差在±10%以内。表明建立的基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热计算关联式能够适用于不同几何结构的碳纳米管。

5 结论

- 1) 含油碳纳米管纳米制冷剂R113的核态池沸腾换热系数大于制冷剂R113/润滑油混合物的核态池沸腾换热系数,增加幅度最大可达61%。
- 2) 实验工况下,纳米颗粒影响因子 $EF=1.23\sim 1.61$,且 EF 随着碳纳米管质量分数的增大而增大,随着纳米油质量分数的增大而减小。
- 3) 开发了基于碳纳米管的含油纳米制冷剂核态池沸腾换热关联式。关联式预测值与96%的含油碳纳米管纳米制冷剂实验值偏差在±10%以内。

参考文献

- [1] 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.

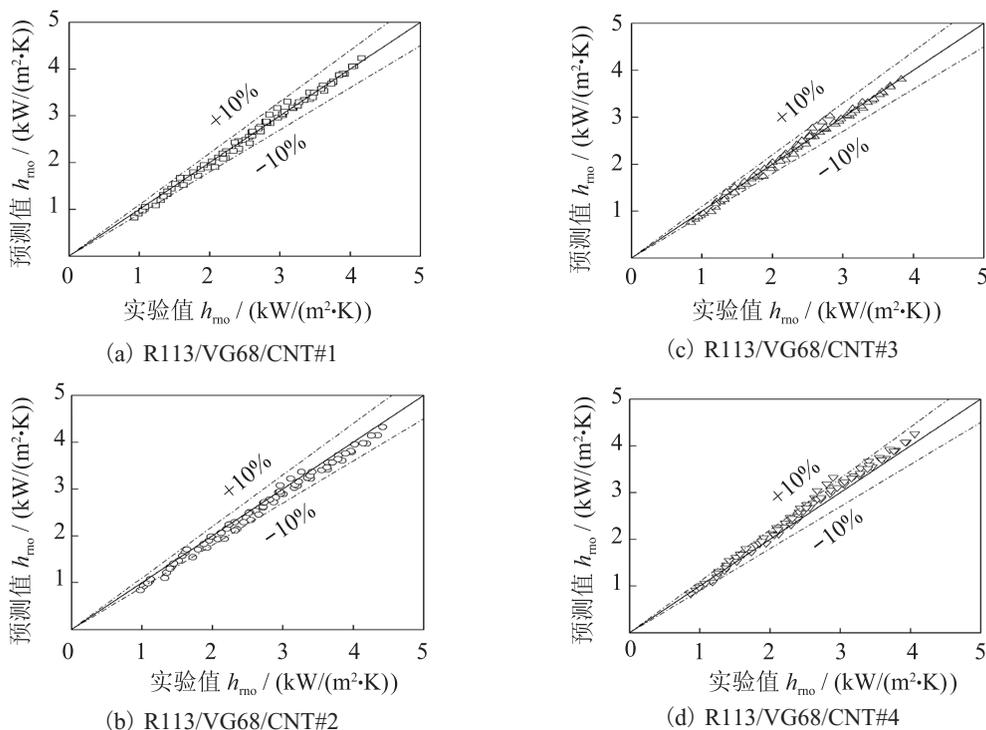


图4 关联式预测值与实验值的对比

Fig. 4 Comparison of the predicted values of the new correlation with the experimental data

- [2] Choi U S, Zhang Z G, Yu W, et al. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79: 2252-2254.
- [3] Xie H Q, Lee H, Youn W, et al. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94: 4967-4971.
- [4] Assael M J, Chen C F, Metaxa I, et al. Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water[J]. International Journal of Thermophysics, 2004, 25: 971-985.
- [5] Hwang Y J, Ahn Y C, Shin H S, et al. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids[J]. Current Applied Physics, 2006, 6: 1068-1071.
- [6] Park K J, Jung D S. Enhancement of nucleate boiling heat transfer using carbon nanotubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50: 4499-4502.
- [7] Park K J, Jung D S. Boiling heat transfer enhancement with carbon nanotubes for refrigerants used in building air-conditioning[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(9): 1061-1064.
- [8] Peng H, Ding G L, Hu H T, et al. Influence of carbon nanotubes on nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant-oil mixture[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(12): 2428-2438.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Exp Therm Fluid Sci, 1998, 1(1): 3-17.
- [12] Rohsenow W, M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids[J]. Trans. ASME, 1952, 74: 969-976.

作者简介

丁国良, 男(1966-), 教授, 博士生导师, 上海市东川路800号上海交通大学机械与动力工程学院制冷所, 200240, (021) 34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn。研究方向: 制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

About the author

Ding Guoliang(1966-), male, Ph. D./Professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 800#, Dongchuan Road, Minhang District, Shanghai, China, 200240, (021) 34203278, E-mail:glding@sjtu.edu.cn.Research fields: Simulation and optimization research for room air conditioner and utilization of new refrigerant.