

# 纳米Cu/R11池沸腾可视化实验

王丽丽, 李奇贺, 赵孝保, 朱琳, 张汉, 鲁洁, 余浩

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 为研究纳米颗粒对制冷剂整体性能的影响,设计了一套可视化实验装置,对纯制冷剂(氟里昂R11)和纳米Cu/R11为工质的泡核沸腾现象进行了可视化对比研究.通过摄像技术观察了工质沸腾汽化过程,以及在泡核沸腾过程中的生长与跃升过程.实验结果表明,纳米Cu颗粒的添加强化了R11制冷剂的传热性能,纳米质量浓度(0.05%~1%)及冷-热源温差(15℃~30℃)越大,工质的传热性能越强,且验证了纳米Cu/R11在小温差下强化传热的特性更为显著,为今后热虹吸管蒸发段流动与传热机理研究提供参考.

**[关键词]** 纳米流体,蒸发,泡核沸腾,纳米质量浓度,气泡,温差,汽化

**[中图分类号]** TB657.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0060-06

## Visualized Pool Boiling Experiment of Nano Cu/R11

Wang Lili, Li Qihe, Zhao Xiaobao, Zhu Lin, Zhang Han, Lu Jie, Yu Hao

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** In order to study the effect of nano-particles on the whole performance of the refrigerants, a set of observable experimental equipments are designed to conduct a visual comparative research into the nucleate boiling phenomena with freon(R11) and nano Cu-R11 as working fluid. Using the camera technology, the process of boiling and vaporization of the working fluid, as well as the growth and zooming process of the nucleate boiling are clearly observed. As the experimental result shows, the heat transfer performance of R11 is enhanced by the addition of Nano-Cu particles. Otherwise, the heat transfer performance of the working fluid can be strengthened as the addition concentration of nano (0.05%~1%) and the temperature difference between hot and cold source (15℃~30℃) become larger. Meanwhile, the research studies verify the fact that the character of heat transfer enhancement of Nano-Cu/R11 becomes more significant in smaller temperature difference conditions, which provides a reference to the subsequent experimental study on the flow of the evaporator section of thermosyphon and heat-transfer mechanism.

**Key words:** nano-particles, evaporation, nucleate boiling, nano concentration, bubble, temperature difference, vaporization

无吸液芯重力两相封闭热虹吸管简称热虹吸管,具有结构简单、制作方便、成本低廉、等温性好、传热效率高等特性,在节能设备中显示出一定的优越性,但是对适用于低品位热能回收的小温差工作热管的研究处于起步阶段.对于暖通空调等需要小温差传热的领域,采用在制冷剂中添加纳米颗粒制造成为纳米工质,已经成为一种新型强化换热技术<sup>[1-2]</sup>,在国内外已作研究.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、动力黏度和密度等.为了评价纳米颗粒对制冷剂整体性能的影响,必须首先研究纳米制冷剂的沸腾换热特性.

孙斌<sup>[3]</sup>等人实验研究了CuO/R141b纳米制冷剂在水平管内的流动沸腾传热特性,实验结果表明,添加纳米颗粒强化了管内流动沸腾换热,并且其强化程度与流量、干度和颗粒浓度有关;毕胜山<sup>[4]</sup>等研究了纳米制冷剂TiO<sub>2</sub>/HFC1340a在水平管内的流动沸腾传热性能,结果表明,添加纳米颗粒,流动沸腾传热系数得到一定强化,强化程度与颗粒浓度有关;吴晓敏<sup>[5]</sup>等人对添加有TiO<sub>2</sub>纳米颗粒的制冷剂R11在紫铜管外的池沸腾换热特性进行了实验研究,研究结果表明纳米颗粒的添加整体上强化了传热,40℃比

收稿日期:2015-12-01.

基金项目:江苏省科技计划项目(BY2014001-04).

通讯联系人:李奇贺,男,高级实验师,研究方向:热管散热性机房空调机组性能研究. E-mail:liqihe@njnu.edu.cn

30 ℃的强化换热效果好,0.01 g/L 比 0.05 g/L 的强化换热效果好;彭浩<sup>[6]</sup>等研究了 CuO/R113 纳米制冷剂在水平直光管内的流动沸腾传热特性,结果表明,添加纳米颗粒的添加强化了传热. 以上的研究均可得到纳米颗粒的添加强化了传热的结论. 部分学者实验分析,却得出相反的结论. 薛怀生<sup>[7]</sup>等人进行了以碳纳米管充装的重力热管的沸腾特性实验,实验过程中出现了热管的热阻增大,换热性能恶化的情况. Narayan<sup>[8]</sup>等通过实验研究得出纳米流体是否强化换热与固体表面粗糙度和颗粒平均粒径有关,其中,在表面粗糙度和颗粒粒径接近时,沸腾换热出现明显恶化. 因此,有必要进一步分析纳米流体颗粒对换热沸腾的影响.

目前对池沸腾现象的研究主要利用摄像技术进行可视化实验<sup>[9-12]</sup>. 本文在借鉴前人研究方法的基础上,设计了一套可视化实验装置,采用摄像技术,对以氟里昂(R11)和纳米 Cu/R11 为工质的泡核沸腾现象进行了可视化对比观察研究. 实验中观察到了气泡在泡核沸腾过程中的生长、脱离、滑移及气泡脱离壁面后的运动现象,总结了本实验中气泡行为的特性,为今后热虹吸管蒸发段流动与传热机理研究提供参考.

## 1 实验装置与实验原理

### 1.1 可视化实验装置

图 1 为可视化实验装置系统图. 实验装置包括两台恒温水浴、透明高压玻璃瓶、压力表、冷凝器、高速摄像仪、冷光源、T 型热点偶、数据采集仪及计算机.

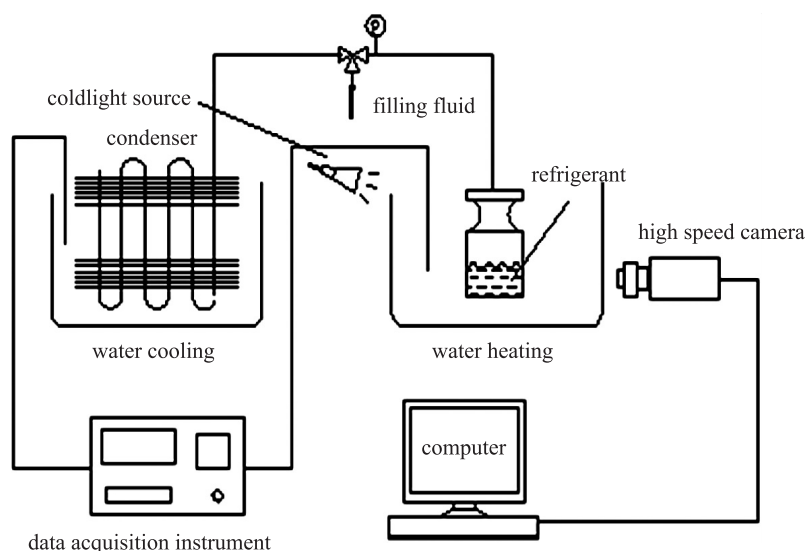


图 1 实验装置系统图

Fig.1 Layout of experimental system

两台恒温水浴分别作为热源和冷源,为蒸发和冷凝提供恒温条件. 工质相变系统由透明高压玻璃瓶、压力表、冷凝器组成,工质在这个系统完成蒸发和冷凝过程. 恒温水浴槽内水温达到设定温度后,静待 30 min,当恒温水浴中的水与外界环境达到热量平衡后开始实验. 首先利用真空泵对工质相变系统进行抽真空,然后称取 73 g 的工质充注到透明耐高压玻璃瓶内,由于 73 g 工质在透明高压玻璃瓶内的液位高度适中,便于观测气泡行为. 水浴加热为高压玻璃瓶提供恒定热源,瓶内工质受热达到沸点,开始汽化,气态工质经绝热段到达冷凝器,冷凝器置于水浴中冷却,气态工质液化,成为液体的工质贮存于冷凝盘管中.

图像与数据采集单元包括高速摄像仪、冷光源、T 型热点偶、数据采集仪及计算机. 实验采用的高速摄像仪对透明耐高压玻璃瓶内工质的泡核沸腾现象进行了全程拍摄. 高速摄影仪的最高拍摄速率是 21 000 帧/s,本实验所利用的拍摄速率是 4 000 帧/s. 其它主要实验装置规格型号见表 1.

表 1 实验装置

Table 1 Experimental apparatus

序号	试验仪器	数量	型号	工作范围
1	恒温水浴	1	ZX-20D	-40℃~99℃
2	恒温水浴	1	ZX-30B	-30℃~99℃
3	热电偶	2	T 型	-200℃~350℃
4	Agilent 数据采集仪	1	34970A	—
5	高速摄像机	1	Photron SA4	—
6	冷光源	1	LGY-150B	150 W

1.2 测试对象与测试工况

1.2.1 测试对象

由于 Cu 纳米粒子具有热导率高和迁移率低等优点<sup>[13]</sup>, 本实验选用粒径为 40 nm 的 Cu 颗粒. 目前纳米流体制备分为一步法<sup>[14-15]</sup>和二步法, 本实验中 Cu/R11 纳米制冷剂制备采用两步法<sup>[16]</sup>, 将 Cu 纳米颗粒直接与制冷剂 R11 混合, 然后利用超声波清洗仪超声振荡 2 h, 配置成一定质量百分比的 Cu/R11 纳米悬浮液. 实验用纳米颗粒质量分数为 0.05%、0.1%、0.5%、1% 四种.

1.2.2 测试工况

本实验配置有两套工质相变系统, 分别充注氟里昂(R11)和纳米 Cu/R11. 实验中采用高速摄像机同时对两种工质的泡核沸腾现象进行全程拍摄. 为验证添加纳米流体能否增强传热, 以及纳米浓度和蒸发-冷凝温差对制冷剂沸腾现象的影响, 实验设置了以下 4 种工况, 如表 2 所示.

表 2 实验工况

Table 2 Experimental conditions

	冷源温度/℃	热源温度/℃	纳米浓度
工况一	20	35	0.05%、0.1%、0.5%、1%
工况二	20	40	0.05%、0.1%、0.5%、1%
工况三	20	45	0.05%、0.1%、0.5%、1%
工况四	20	50	0.05%、0.1%、0.5%、1%

实验过程中观测气泡脱离直径、脱离时间及液体工质完全汽化所需的时间. 为保证实验数据的真实可靠, 每种实验工况重复 5 次, 以下实验结果与结论中所用的数值均为多次实验所得数据的平均值. 通过观测同等质量的两种工质蒸发完所需的时间, 可计算出两种工质流体的热流密度. 热流密度的计算公式为:

$$q = \frac{mr}{At} \tag{1}$$

式中,  $q$  为流体的热流密度(W/m<sup>2</sup>);  $m$  为流体质量(kg);  $r$  为工质流体的汽化潜热(kJ/kg);  $A$  为液体受热面积(m<sup>2</sup>);  $t$  为工质流体完全汽化所需的时间(s).

2 实验现象与讨论

2.1 纳米颗粒对制冷剂沸腾现象的影响

为研究纳米颗粒对制冷剂沸腾现象的影响, 在实验过程中采用高速摄像机同时对氟里昂(R11)和纳米 Cu/R11 在同一冷-热源温度条件下的沸腾现象进行了全程拍摄, 比较两种工质在冷-热源温差为 20℃下的气泡行为特性. 图 2(a)为实验开始时, 浓度为 0.1% 纳米 Cu/R11 (见图中右侧) 与 R11 (见图中左侧) 的瓶内现象对比图. 装有纯质 R11 的瓶内无气泡产生, 但纳米 Cu/R11 从瓶底产生大量气泡, 液面沸腾剧烈. 图 2(b) 为图 2(a) 中纳米工质的气泡核沸腾现象局部放大图. 图 2(c) 和图 2(d) 分别为实验进行 5 min 及 20 min 14 s 时刻处所拍摄的图片. 开始时两种工质的液位高度均为 41 mm, 5 min 时, 氟里昂(R11)的液位明显高于纳米 Cu/R11 的液位, 高度分别为 37 mm 和 33 mm, 20 min 14 s 时纳米 Cu/R11 已完全汽化, 此时的氟里昂(R11)的液位高度为 4 mm. 计算得到, 在冷热源温差为 20℃时氟里昂(R11)的平均热流密度为 3.5 kW/m<sup>2</sup>, 纳米流体的平均热流密度为 4.0 kW/m<sup>2</sup>, 以上实验验证了纳米颗粒的添加增强了制冷剂的传热性能.

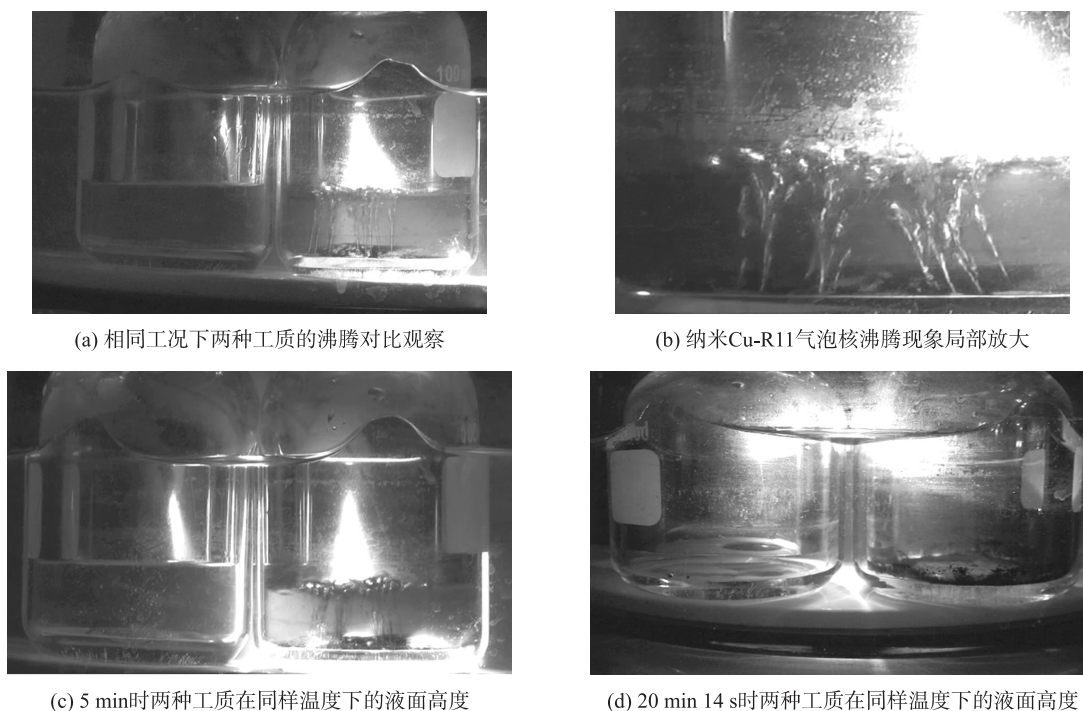


图2 氟里昂(R11)和纳米 Cu/R11 的瓶内现象对比

Fig.2 Nucleate boiling phenomena with R11 and nano Cu/R11

纳米流体对强化传热影响的机理有以下3种.第一,纳米颗粒在纳米流体中聚集,其颗粒间间距很小,且在传热表面上存在纳米颗粒富集区域,该区域内的纳米颗粒表面附着的液膜层相互接触或者部分重叠,会增大纳米流体的导热系数.如图2所示,铜粉在瓶底不均匀沉积,铜粉密集区产生大量气泡,而无铜粉处则无气泡产生;第二,纳米颗粒的布朗运动引起的微对流影响悬浮液内的热量传递,在实验过程中可观察到纳米颗粒的迁移现象,固液两相的有效热扩散和颗粒迁移共同作用导致纳米颗粒悬浮液的有效导热系数增大;第三,固-液界面上的液膜层内的液体分子受到纳米颗粒表面原子排列的影响,趋向于固相,从而其导热系数大于液体本身.

## 2.2 纳米浓度对沸腾现象的影响

纳米浓度是影响纳米流体传热性能的一个重要因素.热流密度随纳米浓度在不同温差下的变化如图3所示,当纳米浓度较低时,浓度对热流密度的影响很小,随着浓度的增大热流密度增大,当浓度升高0.5%以上时,浓度热流密度的影响趋缓.如图3中纳米 Cu/R11 浓度为1%与浓度为0.5%工质的热流密度值已非常相近.继续增大浓度至1%以上时,沸腾过程中无法清晰观测到气泡行为,如图4所示.

通过对实验图像资料的分析可知,在同一冷热源温差下,浓度为0.05%、0.1%、0.5%、1%的纳米 Cu/R11 均产生连续气泡,且浓度越高,气泡脱离的时间越短.例如当温差为20℃,浓度为0.05%、0.1%、0.5%、1%的气泡脱离时间分别为0.0069 s、0.0065 s、0.0056 s、0.0051 s.

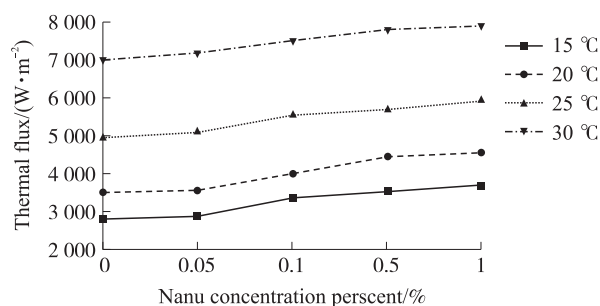


图3 不同温差下热流密度随浓度变化曲线

Fig.3 The curve of heat flux density along of concentration under temperature difference

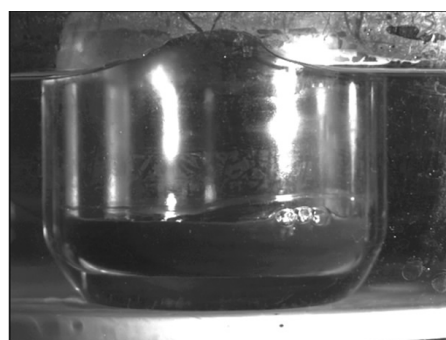


图4 质量百分比为1.2%工质照片

Fig.4 The working fluid picture with the mass percentage of 1.2%



### 2.3 冷热源温差对沸腾现象的影响

沸腾表面的气化核心密度与沸腾表面的特性、工质特性以及壁面过热度有关。在本研究中,沸腾表面及工质特性都是确定的,只有壁面过热度随热流密度的增加而增加。不同浓度工质沸腾过程中热流密度随过热度的变化如图4所示,工质的热流密度随冷-热源温差增大而增大。图5为不同浓度的纳米 Cu/R11 随着冷-热源温差增大与相同温差下 R11 的热流密度增加百分比。从图中可看出热流密度增加百分比随温差增大而减小,说明了纳米 Cu/R11 工质在小温差下对改善制冷剂的传热性能的更加显著,这对需要小温差下工作的热管来说是理想的工质。

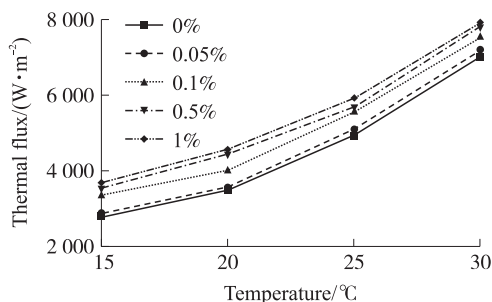


图5 热流密度随温差的变化

Fig.5 Temperature difference with thermal flux changes

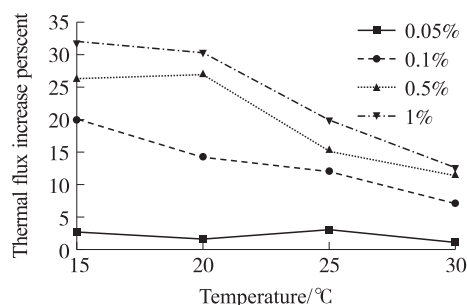


图6 热流密度增加百分比随温差的变化

Fig.6 Temperature difference with thermal flux increase percentage

观测实验中的气泡行为,在同一浓度下,小温差时,孤立气泡从瓶底处产生,向液面处上升,在上升的过程中伴随着气泡体积的不断增大,到达液面后气泡破裂;大温差时,肉眼无法观察到孤立气泡,由于气泡产生的频率的增加,形成了气泡柱,整个液面剧烈沸腾。随着冷热源温差的增加,气泡脱离的时间变短,脱离直径变小。如浓度 0.5% 的纳米 Cu/R11,冷热源温差为 15 °C、20 °C、25 °C、30 °C 时的气泡脱离时间分别为 0.007 01 s、0.005 6 s、0.004 6 s、0.003 7 s,在其他纳米浓度下均观测到相同规律。

## 3 结语

本文利用高速摄影仪对氟里昂(R11)和纳米 Cu/R11 为工质的泡核沸腾现象进行了可视化对比研究,通过对实验现象与实验数据的分析得到如下结论:

- (1) 纳米 Cu 颗粒的添加对制冷剂 R11 的传热性能起了强化作用;
- (2) 气泡的脱离时间和脱离直径纳米浓度和冷热源温差的增大而降低;
- (3) 低浓度下纳米 Cu/R11 工质的传热性能随浓度的增加而增强,当增大到某一浓度后,继续增加浓度对传热性能的影响甚微。随着冷源与热源温差的增加,纳米 Cu/R11 工质的传热性能增强,但随着温差的增大,工质的传热性能的增加幅度逐渐降低;
- (4) 纳米 Cu 对制冷剂在小温差下的传热性能的影响更加显著,对于需要小温差下工作的热管来说是理想的工质。

### [参考文献](References)

- [1] 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): 1 061-1 064.
- [2] BI S S, SHI L, ZHANG L L. Application of nanoparticles in domestic refrigerators[J]. Applied thermal engineering, 2008, 28(14/15): 1 834-1 843.
- [3] 孙斌, 钱铮. CuO/R141b 纳米制冷剂在管内的流动沸腾传热特性[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 733-739.  
SUN B, QIAN Z. Boiling heat transfer characteristics of nano-refrigerant CuO/R141b flowing in smooth tube[J]. Journal of chemical industry and engineering (China), 2012, 63(3): 733-739. (in Chinese)
- [4] 毕胜山, 史琳. 纳米制冷剂 TiO<sub>2</sub>/HFC134a 水平管内流动沸腾换热实验研究[J]. 化工学报, 2008, 59(S2): 104-108.  
BI S S, SHI L. Flow boiling heat transfer of nano-refrigerant TiO<sub>2</sub> and HFC134a mixtures in a horizontal tube[J]. Journal of

- chemical industry and engineering(China),2008,59(S2):104-108. (in Chinese)
- [5] 吴晓敏,李鹏,李辉,等. 添加有  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒的 R11 池沸腾换热研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(1):124-126.  
WU X M,LI P,LI H,et al. Investigation of pool boiling heat transfer of R11 with  $\text{TiO}_2$  nano-particles[J]. Journal of engineering thermophysics,2008,29(1):124-126. (in Chinese)
- [6] 彭浩,丁国良,姜未汀,等. 纳米制冷剂管内流动沸腾换热特性[J]. 化工学报,2008,59(S2):70-75.  
PENG H,DING G L,JIANG W T,et al. Heat transfer characteristics of nanorefrigerant flow boiling inside tube[J]. Journal of chemical industry and engineering(China),2008,59(S2):70-75. (in Chinese)
- [7] 薛怀生,樊建人,胡亚才,等. 碳纳米管悬浮液在重力热管中的沸腾特性[J]. 化工学报,2006,57(11):2 562-2 567.  
XUE H S,FAN J R,HU Y C,et al. Boiling characteristics of carbon nanotube suspension in gravity-assisted thermosyphon [J]. Journal of chemical industry and engineering(China),2006,57(11):2 562-2 567. (in Chinese)
- [8] NARAYAN G P, ANOOP K B, DAS S K. Mechanism of enhancement/deterioration of boiling heat transfer using stable nanoparticle suspensions over vertical tubes[J]. Journal of applied physics,2007,102(7):4 317.
- [9] MCFADDEN P W, GRASSMANN P. The relation between bubble frequency and diameter during nucleate pool boiling[J]. International journal of heat and mass transfer,1962,5(3):169-173.
- [10] BARTHAU G. Active nucleation site density and pool boiling heat transfer—an experimental study[J]. International journal of heat and mass transfer,1992,35(2):271-278.
- [11] RINI D P, CHEN R H, CHOW L C. Bubble behavior and heat transfer mechanism in FC72 pool boiling[J]. Experimental heat transfer,2001,14(1):27-44.
- [12] 刁彦华,赵耀华,王秋良. R-113 池沸腾气泡行为的可视化及传热机理[J]. 化工学报,2005,56(2):227-234.  
DIAO Y H,ZHAO Y H,WANG Q L. Bubble dynamics and heat transfer mechanism of pool boiling of R-113[J]. Journal of chemical industry and engineering(China),2005,56(2):227-234. (in Chinese)
- [13] 唐潇,刁彦华,赵耀华,等.  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ -R141b 纳米流体的池内核态沸腾传热特性[J]. 化工学报,2012,63(1):64-70.  
TANG X,DIAO Y H,ZHAO Y H,et al. Nucleate pool boiling heat transfer of  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ -R141b nanofluid on horizontal plate[J]. Journal of chemical industry and engineering(China),2012,63(1):64-70. (in Chinese)
- [14] 蔡艳华,马冬梅,王金刚,等. 纳米流体的制备及传热性能研究的现状[J]. 材料研究与应用,2007,1(4):274-276.  
CAI Y H,MA D M,WANG J G,et al. Recent progress in the studies of preparation and heat-transfer properties of nanofluids [J]. Materials research and application,2007,1(4):274-276. (in Chinese)
- [15] 吴金星,曹玉春,李泽,等. 纳米流体技术研究现状与应用前景[J]. 化工新型材料,2008,36(10):10-12.  
WU J X,CAO Y C,LI Z,et al. Research acuatrality and application foreground of nanofluids technology [J]. New chemical materials,2008,36(10):10-12. (in Chinese)
- [16] PENG H, DING D, HU H. Influences of refrigerant-based nanofluid composition and heating condition on the migration of nanoparticles during pool boiling[J]. International journal of refrigeration,2011,34(8):1 823-1 826.
- [17] 徐森. 纳米流体的热物性及在波壁管内流动特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.  
XU M. Research on thermophysical property of nanofluids and flow behavior in a wavy-walled tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2010. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]