

# 石墨纳米溶液的沸腾传热特性研究

李呼昂, 梅勇, 张波涛, 龚圣捷

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为研究强化沸腾传热系数和临界热流密度的方法, 本文采用石墨纳米溶液作为沸腾工质, 分析了不同质量浓度的石墨纳米溶液对沸腾传热系数和 CHF(临界热流密度)的影响。实验结果表明: 相比去离子水, 石墨纳米溶液能够强化沸腾传热系数, 在测试工况下, 传热系数最大可增加 30%。当石墨的浓度从 0.05 g/L 增大到 2.5 g/L 时, 沸腾传热系数的强化效果先增大后减小。同时, 纳米溶液使 CHF 得到增强, 随着浓度的增大, CHF 的强化效果也是先增大后减小。在实验测试的工况中, 1 g/L 石墨纳米溶液强化沸腾传热的能力最强, 此时的 CHF 值也最大。石墨纳米溶液沸腾后, 加热表面亲水性增强, 静态接触角变小, 这是 CHF 提高的一个重要因素。

**关键词:**沸池沸腾; 石墨; 纳米流体; 传热系数; CHF

中图分类号: TK172 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.11.003

## 引言

沸腾传热由于其高效的传热能力得到了广泛的应用。为了进一步提高换热效率, 高热流密度换热设备一直是研究者所探索的方向, 这在微电子、化工、核能等领域都是亟需的。“纳米流体”是近十几年来倍受关注的强化换热方法<sup>[1]</sup>。

文献[2]用氧化铝颗粒制备了氧化铝-水纳米流体用于沸腾传热特性的研究, 结果表明纳米颗粒的加入使得核态沸腾区的传热效果恶化, 但 CHF 得到了增强。他们认为这是由于在沸腾过程中纳米颗粒会沉积在加热表面, 热阻增大导致传热恶化, 但颗粒的沉积又延迟了沸腾表面汽膜的覆盖, 从而增强了 CHF。文献[3]对覆盖纳米颗粒后加热表面润湿特性的变化进行了研究, 实验表明对于亲水性表面,

纳米颗粒的覆盖会提高 CHF; 相反, 对于疏水性表面, 纳米颗粒的覆盖会降低 CHF。同时, 还测定了纳米溶液沸腾后对加热面接触角(CA)的影响, 对亲水性表面, 纳米颗粒浓度的提高会减小接触角, 而疏水性表面纳米颗粒浓度的提高则会增大接触角, CHF 及传热效果都随着接触角的增大而减小。此外, 文献[4]采用了 CNT 颗粒作为材料来研究纳米颗粒对沸腾传热特性的影响, 得出与文献[2]相似的结论即纳米颗粒使传热恶化但使 CHF 强化。

目前, 对石墨纳米颗粒配制的纳米流体的沸腾传热研究还较少。本实验采用石墨纳米颗粒制备了石墨纳米溶液, 并设计实验对其沸腾传热现象与 CHF 特性进行研究。

## 1 实验方法

### 1.1 纳米流体的制备

本实验采用两步法, 把 15 000 目石墨纳米颗粒加入去离子水中, 用超声波振荡获得均匀的纳米流体。石墨纳米颗粒的 SEM(扫描电子显微镜)形貌如图 1 所示, 其物理性质: 固定碳含量为 99.99%, 密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup>, 平均晶粒直径为 325 nm, 平均晶片直径为 2.35 μm。

### 1.2 实验装置

实验装置如图 2 所示, 采用薄膜加热片对紫铜块进行加热, 在铜块的轴向布置了 4 支 K 型热电偶, 前 3 支热电偶与铜块加热面在轴向上的距离间隔分别为 5、10 和 15 mm, 通过这 3 个等距点间的温差来确定铜表面的温度。第 4 支热电偶用于监测靠近加热片处的温度并进行高温断电保护。铜块顶部

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51306112)

作者简介: 李呼昂(1992-), 男, 山西太原人, 上海交通大学硕士研究生。

通讯作者: 龚圣捷(1980-), 男, 江苏启东人, 上海交通大学副教授。

作为沸腾表面, 尺寸为 20 mm × 20 mm。

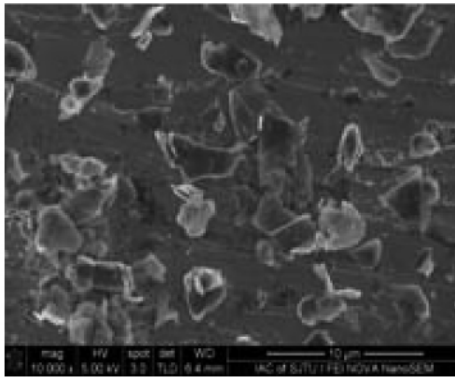


图 1 石墨纳米颗粒的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphology of nano graphite particles

实验采用直流稳压电源进行加热, 每次实验前均用 2000 号砂纸将加热面打磨光滑, 并依次用酒精和去离子水清洗。实验前先用置于沸腾池中的辅助加热器将水加热到 100 °C 并沸腾半小时, 除去不凝性气体。沸腾池上方布置冷凝器, 将沸腾过程中蒸发的水冷凝, 以保证纳米溶液浓度恒定。温度数据通过 NI 数据采集系统进行采集存储。实验在常压下进行, 通过调节直流稳压电源逐步增加功率直到 CHF 发生。

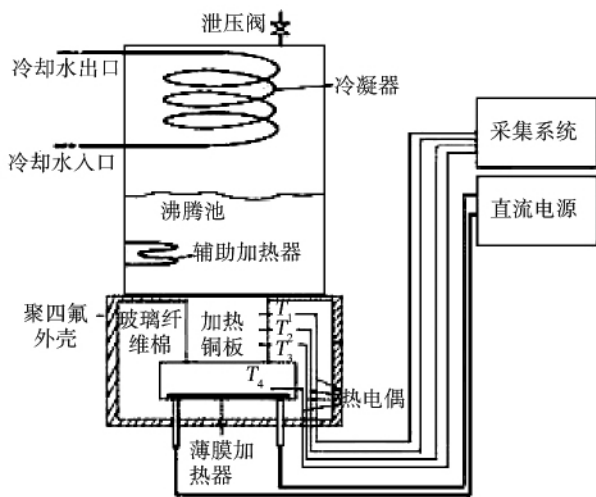


图 2 沸腾实验装置图

Fig. 2 Boiling experimental facility

1.3 数据处理

实验中, 采用热平衡法计算热流密度  $q$ :

$$q = (UI - Q_{hl}) / A \tag{1}$$

式中:  $U$ —电压值,  $V$ ;  $I$ —电流值,  $A$ ;  $A$ —沸腾表面面

积,  $m^2$ ;  $Q_{hl}$ —实验系统的热损失, 其值由热平衡实验结果确定,  $W$ ; 图 3 给出了实验系统的热平衡曲线。沸腾壁面温度  $T_w$  和传热系数  $h$  则由以下式子确定:

$$T_w = T_1 - \overline{\Delta T} \tag{2}$$

$$\Delta T = T_w - T_{sat} \tag{3}$$

$$h = q / \Delta T \tag{4}$$

式中:  $\overline{\Delta T}$ —相邻两等距测量点温差的均值, °C;  $T_{sat}$ —常压下去离子水饱和温度, °C;  $\Delta T$ —沸腾壁面过热度, °C;  $h$ —传热系数,  $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

本实验所使用的热电偶经过标定, 误差为  $\pm 0.1$  °C, 铜表面边长的误差为  $\pm 0.01$  mm, 热电偶间距的误差为  $\pm 0.01$  mm, 电压的误差为  $\pm 1\%$ , 电流的误差为  $\pm 1\%$ 。实验热流密度的误差不超过  $\pm 2\%$ ; 加热面温度的误差不超过  $\pm 3\%$ ; 传热系数的误差不超过  $\pm 4\%$ 。

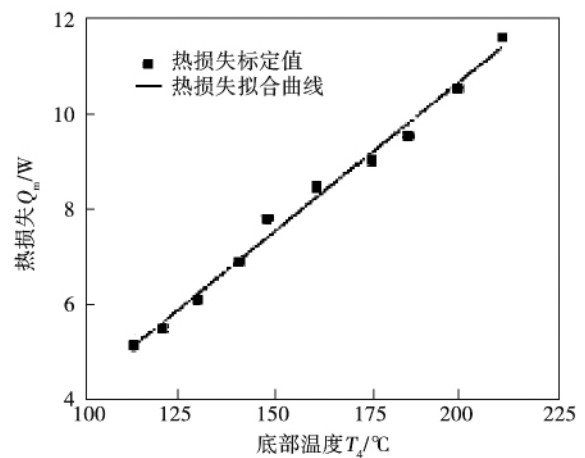


图 3 热损失标定

Fig. 3 Calibration of the heat loss

2 结果与讨论

2.1 沸腾传热

N. I. Kolev 提出了一种沸腾传热模型<sup>[5]</sup>:

$$q_{w2, nb} = \frac{c_1 c \left[ 5 \times 10^{-27} (1 - \cos \phi) \right]^{\frac{1}{4}} \left( \frac{\rho_g \Delta h}{4 \sigma \tau(p)} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{\lambda \rho_f c_{p f}}{\rho_f h_{fg}} \right) (T_w - T_2)^{\frac{7}{2}}}{\left[ 2 \left( 1 + \frac{c_2 \Delta \tau_{lw}}{\Delta \tau_{ld}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \tag{5}$$

式中:  $q_{w2, nb}$ —加热面热流密度,  $W / m^2$ ;  $\rho_g$ 、 $\rho_f$ —水蒸气、水的密度,  $kg / m^3$ ;  $C_{p f}$ —水的比热容,  $J / (kg \cdot$

K);  $\sigma$ —水的表面张力, N/m;  $T^*(p)$ —实验压力对应的饱和温度, K;  $h_{fg}$ —饱和水的比焓, J/kg;  $\Delta h$ —饱和蒸汽与饱和水的比焓差, J/kg;  $\phi$ —固液接触角;  $\lambda'$ —水的导热系数, W/(m · K);  $c_1 = 1.4626$ ,  $c_2 = 0.3$  为经验常数;  $c$ —Jacob 数的函数;  $l_2$ —Rayleigh - Taylor 不稳定波长, 其计算方法详见文献 [5];  $\Delta\tau_{1w}$ 、 $\Delta\tau_{1d}$ —气泡等待时间和气泡脱离时间, 其计算方法参考文献 [6]。与经典的 Rhosenow 沸腾模型相比, 该模型考虑了沸腾过程中气化核心数与固液接触角的影响。

图 4(a) 给出了 N. I. Kolev 模型 (其中接触角按照实验前测量的铜与去离子水的接触角均值  $70^\circ$  计算) 去离子水和浓度分别为 0.05、0.25、0.5、1 及 2.5 g/L 的石墨纳米溶液的沸腾曲线, 去离子水沸腾实验数据与 N. I. Kolev 的理论曲线吻合得较好。石墨纳米流体相对于去离子水, 在相同的热流密度下, 壁面过热度较小, 沸腾换热得到一定程度的强化。图 4(b) 给出了去离子水和纳米流体的沸腾换热系数曲线, 可以看出, 在低于  $1 \text{ MW/m}^2$  的热流密度下, 0.05 g/L 的石墨纳米溶液与去离子水相比并无显著变化, 随着石墨纳米粉浓度的增大, 换热系数有明显的增强, 达到 1 g/L 的浓度时, 换热系数的增强效果达到最大, 进一步增大浓度到 2.5 g/L, 换热效果略有降低。

为了更清晰地对比 5 个不同浓度的石墨纳米溶液的换热强化效果, 图 5 给出了换热系数的增强百分比曲线。考虑到 0.05 g/L 的石墨纳米溶液与去离子水的换热系数基本相同, 图中以 0.05 g/L 的石墨纳米溶液的沸腾换热系数作为对比基准, 给出了其它 4 个浓度下换热系数的增强百分比。从图中可以看出, 沸腾传热系数由于纳米颗粒的加入而得到了强化, 4 个不同浓度的纳米溶液都在  $0.4 \text{ MW/m}^2$  的热流密度附近保持着最好的强化换热效果, 在低于  $1 \text{ MW/m}^2$  的热流密度下, 0.05、1 和 2.5 g/L 的石墨纳米流体都保持着平均 20% ~ 30% 的换热增强效果, 高于  $1 \text{ MW/m}^2$  的热流密度下, 换热强化效果都有所下降。总的来说, 随着纳米颗粒浓度的提高, 对沸腾传热的强化效果先增大后减小。

本实验得到的结果与其它很多研究者关于纳米流体会使传热恶化的结果不一致。文献 [2] 用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米颗粒及文献 [3] 中用 CNT 颗粒制备的纳

米流体的沸腾实验都表明纳米流体会使传热恶化。Bang 等人在观察和研究了纳米流体沸腾过的表面后得出了纳米流体在沸腾过程中会沉积在沸腾表面从而改变加热表面的特性<sup>[2]</sup>, 抑制加热表面汽化核心形成, 进而使得传热恶化的结论。Kim 等人还对纳米流体的物性如表面张力、导热系数和动力粘度进行了测量<sup>[8]</sup>, 通过与去离子水的对比发现上述物性并无明显变化, 因而认为纳米流体对沸腾传热的影响主要是对加热表面的作用, 而纳米流体本身对传热的影响不大。但在本实验中, 沸腾传热得到了强化, 说明实验采用的石墨纳米溶液本身对沸腾传热有一定的强化作用, 并且这种强化效应要大于纳米镀层导致的热阻对于传热恶化的效应。

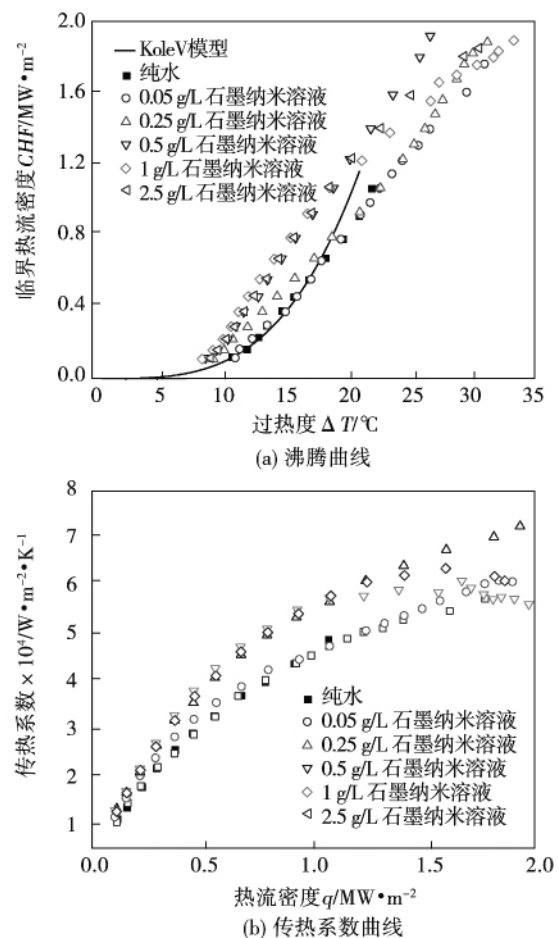


图 4 不同浓度下纳米流体沸腾实验

Fig. 4 Boiling test of a nano-fluid at various concentrations

2.2 临界热流密度

图 6 绘制了不同浓度石墨纳米溶液的 CHF 及

其与去离子水的 CHF 比值。从图中可以看出, 不同浓度纳米溶液得到的 CHF 值都比去离子水大。与传热系数情况类似, 随着纳米溶液浓度的增大, CHF 呈现出先增大后减小的趋势, 本实验中, 去离子水的 CHF 为  $1.06 \text{ MW/m}^2$ ,  $1 \text{ g/L}$  的石墨纳米溶液具有最高的 CHF, 为  $1.98 \text{ MW/m}^2$ , 与去离子水 CHF 的比值是 186%。

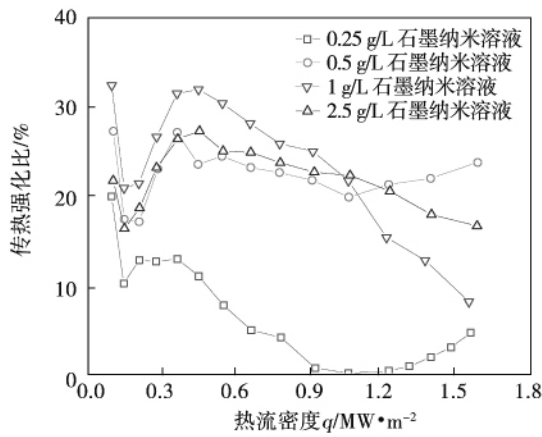


图 5 传热系数增强比

Fig. 5 Enhancement ratio of the heat transfer coefficient

与文献[2]和文献[4]的实验相比, 本实验的 CHF 也得到了增强, 但由于所使用的纳米颗粒不同, CHF 的增强效果也不一样。Bang 等认为 CHF 的增强主要由于纳米颗粒在加热表面的沉积效应<sup>[2]</sup>, 这一效应使得加热表面的汽化核心密度减小, 进而抑制了沸腾过程中气泡的增殖, 最终使得 CHF 提高。另一方面, 加热面的亲水性对 CHF 也有较大影响, 文献[3]的实验表明 CHF 会随着接触角的增大而减小。

本实验中同样观察到了纳米颗粒在加热表面的沉积, 随着纳米颗粒浓度的增加, 表面上沉积的纳米颗粒增多, 加热面的接触角变小, 形成了亲水性更好的表面, 从而使 CHF 增大。实验中测试了光滑铜表面与  $2.5 \text{ g/L}$  的石墨纳米溶液沸腾后的表面静态接触角, 采用  $2 \mu\text{l}$  液滴测试, 测试温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。结果显示光滑铜表面的接触角为  $70.1^\circ$ , 而  $2.5 \text{ g/L}$  的石墨纳米溶液沸腾后加热面的亲水性明显变好, 液滴能较好地加热表面上扩展开, 静态接触角变为  $31.7^\circ$ , 其 CHF 也得到增强, 比去离子水提高 73.8%。因此, 接触角是影响 CHF 的一个重要

因素。

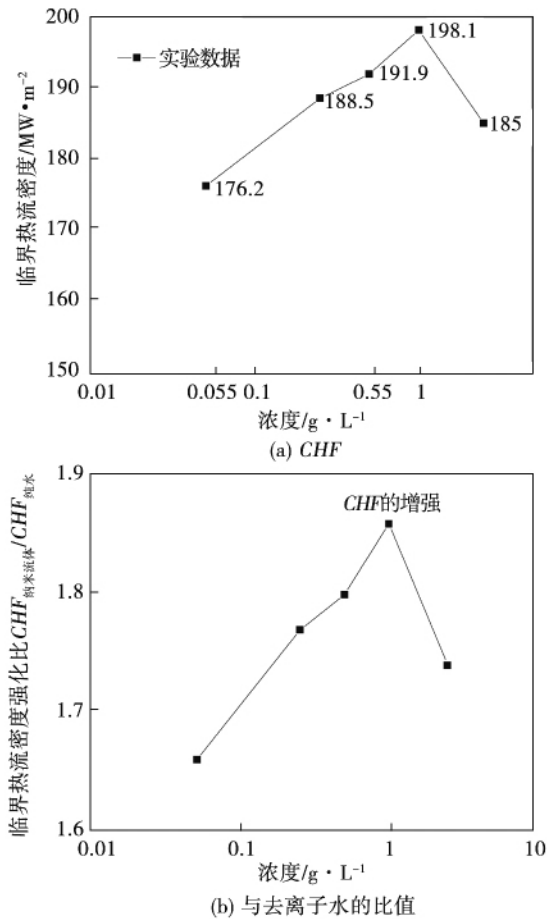


图 6 不同浓度石墨纳米溶液下的 CHF 值与去离子水的 CHF 比值

Fig. 6 Ratio of (a) critical heat flux and (b) deionized water in nano-solution at various graphite concentrations

### 3 结论

本实验以不同浓度的石墨纳米溶液为工质进行沸腾实验, 分别比较了其沸腾传热特性及 CHF 特性:

(1) 与去离子水相比石墨纳米溶液使沸腾传热强化, 并且在热流密度  $q < 1 \text{ MW/m}^2$  的范围内, 随着纳米流体浓度的升高, 同一热流密度下传热系数的大小表现为先升高后减小。在实验使用工质内, 以  $1 \text{ g/L}$  的石墨纳米溶液的沸腾传热强化效果最佳。

(2) 所有实验中使用的纳米溶液相较于去离子水 CHF 都有较大幅度的提高, 对应于不同浓度的纳

米溶液 其增强效果也不同。本实验中随着使用的石墨纳米溶液浓度的升高 CHF 先升高后减小 1 g/L 的石墨纳米溶液具有最高的 CHF 值 1.98 W/m<sup>2</sup> , 是去离子水的 186% 。

参考文献:

[1] Bi Shenshan Shi Lin. Research progress of boiling heat transfer of nanofluids [J]. Chemical Industry and Engineering Progress , 2007 26(10) :1411 - 1418.

[2] In Cheol Bang ,Soon Heung Chang. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nano-fluids from a plain surface in a pool [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005 48:2407 - 2419.

[3] Chin-Chi Hsu ,Ping-Hei Chen. Surface wettability effects on critical heat flux of boiling heat transfer using nanoparticle coatings [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,2012 55: 3713 - 3719.

[4] Ki-Jung Park ,Dongsoo Jung ,Sang Eun Shim. Nucleate boiling heat transfer in aqueous solutions with carbon nanotubes up to critical heat fluxes [J]. International Journal of Multiphase Flow ,2009 , 35:525 - 532.

[5] N. I. Kolev. How accurately can we predict nucleate boiling [J].

Experimental Thermal and Fluid Science ,1995 10:370 - 378.

[6] Nikolay Ivanov Kolev. The Influence of mutual bubble interaction on the bubble departure diameter [J]. Experimental Thermal and Fluid Science ,1994 8:167 - 174.

[7] J. F. Klausner R. Mei ,D. M. Bernhard ,et al. Vapor bubble departure in forced convection boiling [J]. Int. J. Heat Mass Transfer , 1993 36:651 - 662.

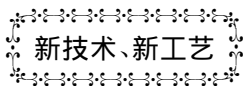
[8] S. J. Kim ,I. C. Bang ,J. Buongiorno ,et al. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 2007 50:4105 - 4116.

[9] Peter Vassallo ,Ranganathan Kumar ,Stephen D' Amico. Pool boiling heat transfer experiments in silica - water nano-fluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,2004 ,47: 407 - 411.

[10] Hyungdae Kim Jeongbae Kim ,Moo Hwan Kim ,Effect of nanoparticles on CHF enhancement in pool boiling of nano-fluids [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer ,2006 ,49: 5070 - 5074.

[11] Zhuang Dawei ,Peng Hao ,Hu Haitao ,et al. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant/oil mixture with carbon nanotubes [J]. Journal of Refrigeration 2011 32(6) :9 - 13.

( 刘 瑶 编辑)



### 720 MW La Caridad 联合循环电站发电成本降低 40%

据《Gas Turbine World》2014 年 7 ~ 8 月刊报道,各装置额定净输出功率为 360 MW、效率达 58.0% 的 Siemens SCC6-5000F 1 × 1 联合循环装置已经使 La Caridad 矿业公司发电成本从 10 美分降低到 6 美分(1 美元 = 100 美分)。

该联合循环装置的 SGT6-5000F 燃气轮机 DLE(干式低排放)燃烧室也使 NO<sub>x</sub> 排放低于 25 mg/m<sup>3</sup>,达到国际排放标准。

SGT6-5000F 简单循环的技术规范和额定性能:

推出年份	ISO 连续额定功率/kW	热耗率/kJ · (kWh) <sup>-1</sup>	效率/%	压比	质量流量/kg · s <sup>-1</sup>	涡轮转速/r · min <sup>-1</sup>	排气温/度/°C	约重/kg	总体尺寸 L × W × H(长 × 宽 × 高)/m	备注
1989	242 400	9 230	39.0	18.9	571.5	3 600	593	192 780	10.1 × 4.0 × 4.0	9 mg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub>

由 SGT6-5000F 燃气轮机组成的 SCC6-5000F 1 × 1 联合循环装置技术规范 and 额定性能:

推出年份	装置净输出功率/kW	热耗率/kJ · (kWh) <sup>-1</sup>	装置净效率/%	燃气轮机功率/kW	汽轮机功率/kW	燃气轮机数量和型号	备注
1989	360 000	6 205	58.0	242 000	123 000	1 台 SGT6-5000F	三压,再热

( 吉桂明 摘译)

at the air side under the wet operating condition as well as the heat transfer coefficient at the air side will all decrease with a decline of the ambient pressure , however , the amount of latent heat exchanged in unit mass will be kept almost unchanged and the proportion of the amount of latent heat exchanged will somewhat increase. At a same ambient pressure , the relative humidity of the air at the inlet will have no big influence on the amount of sensible heat exchanged in the heat exchanger but notable influence on the amount of latent heat exchanged. When the relative humidity is 40% , 60% and 80% respectively , the difference among the amounts of sensible heat exchanged will be less than 5% and when the relative humidity is 80% , the amount of latent heat exchanged will be 5.9 to 6.8 times higher than that when the relative humidity is 40% . **Key words**: wet operating condition , low atmospheric pressure , relative humidity , latent heat exchange

石墨纳米溶液的沸腾传热特性研究 = **Study of the Boiling Heat Transfer Characteristics of a Graphite Nano Solution** [刊 汉] / LI Hu-ang , MEI Yong , ZHANG Bo-tao , GONG Sheng-jie ( College of Mechanical and Power Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai , China , Post Code: 200240 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31 ( 11 ) . - 14 ~ 18

To investigate the enhanced boiling heat transfer coefficient and the critical heat flux method , with a graphite nano solution serving as the boiling working medium , analyzed was the influence of the graphite nano solution at various mass concentrations on the boiling heat transfer coefficient and critical heat flux density. The test results show that compared with deionized water , the graphite nano solution can enhance the boiling heat transfer coefficient. Under the test conditions , the heat transfer coefficient can maximally increase by 30% . When the concentration of graphite increases from 0.05 g/L to 2.5 g/L , the enhanced boiling heat transfer coefficient will first increase and then decrease. In the meantime , the nano solution will enhance the critical heat flux. With an increase of the concentration , the enhanced critical heat flux will first increase and then decrease. Among all the test conditions , the graphite nano solution at a concentration of 1 g/L will have a strongest ability in enhancing the boiling heat transfer and at such a time , the critical heat flux will be maximal. After the graphite nano solution had been boiled , the hydrophilicity of the heating surface will be enhanced and the static contact angle will become smaller , which is an important factor to enhance the critical heat flux. **Key words**: pool boiling , graphite , nano-fluid , heat transfer coefficient , critical heat flux

周向弯曲方向对 NACA65 翼型轴流叶轮叶顶间隙流动影响 = **Influence of the Bending Along the Circumferential Direction on the Flow in the Blade Tip Clearance in an Axial Flow Impeller Adopting the NACA65 Airfoil** [刊 汉] / YAN Pei-di , JIN Guang-yuan , CUI Zheng-wei ( College of Mechanical Engineering , Jiangnan University , Wuxi , China , Post Code: 214122 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31 ( 11 ) . - 19 ~ 25