

强润湿性液体池沸腾传热的实验研究和机理分析

周定伟, 马重芳

(北京工业大学 环能学院, 北京 100022)

摘要: 对强润湿性液体的池沸腾传热实验而言, 本文提出了行之有效的实验程序, 并严格按照实验程序进行了 R113 池沸腾传热的实验研究。具体研究了表面老化和液体过冷度对池沸腾传热曲线及起沸点的影响, 实验中观察到了三个反常现象。最后, 从强润湿性液体的沸腾传热机理的角度对其给出了相应的解释。

关键词: 池沸腾; 传热; 滞后

中图分类号: TK124

文献标识码: A

符号

h —换热系数 $q/(T_w - T_1)$,
 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

q'' —热流密度, W/m^2

S —实验件面积, m^2

ΔT_{sat} —过热度 $(T_w - T_{sat})$, K

ΔT_{sub} —过冷度 $(T_{sat} - T_1)$, K

下标

ONB—壁面核沸腾起始点

l —液体

w —壁面

sat —饱和

1 引言

以往的沸腾研究局限于润湿能力较差的液体。对于强润湿性液体(即具有低的表面张力和低润湿角的液体)的池沸腾传热来说, 由于实验没有遵从一定的实验程序等原因, 实验数据分散, 导致传热工作者对强润湿性液体的池沸腾传热情况缺乏全面而深入的了解。

2 实验设备及实验程序

2.1 实验设备及方法

试验件主要部分是一个 $10 \mu m$ 厚、面积为 $5 mm \times 5 mm$ 的康铜膜, 用它作电加热元件及传热表面以模拟电子芯片。用铁—康铜热电偶测量康铜膜内表面温度。图 1 为实验系统示意图。详细情况参见文献 [1]。

2.2 强润湿性液体池沸腾传热实验程序

实验前, 先用丙酮清洗实验件表面, 然后严格按

照以下程序进行。

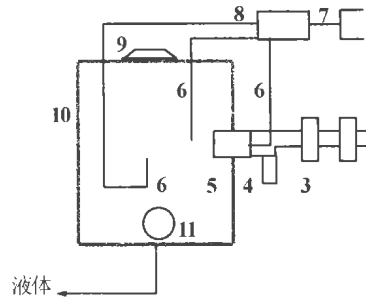


图 1 实验系统图
1—稳压电源; 2—调压器; 3—变压器;
4—电流表; 5—实验件; 6—热电偶
7—数字电压表; 8—转换开关; 9—软橡胶;
10—测量室箱体; 11—冷却器

表面老化——
在室温下将实验件浸泡在实验介质中约 10 h;

液体除气——
开启主加热器将箱体內的液体加热至沸腾并保持 1 h。应当指出的是箱体內液体在除气时不应对实验件加热。

池温控制——
除气后关闭主加热器, 采用冷却器使箱体內的液体保持在过冷状态。

实验件加热——慢慢地增加电流, 每次热流密度升高值不超过 $(1 \sim 2) \times 10^3 (W/m^2)/min$, 等温度稳定后再依次读取下列各参数: 壁面温度 T_w 、电流 I 以及箱体內温度 T_1 。读取一个温度值需 20~30 min。

实验件降温——只需慢慢地减小电流, 读数与升温时相同。

当温度处于沸腾起始点附近时, 要缓慢增加实验件功率, 以壁温升高 $0.5 \text{ } ^\circ C$ 为准, 以便观察沸腾滞后的现象, 直至进入充分发展的核态沸腾。

3 实验结果及讨论

3.1 典型强润湿性液体池沸腾传热曲线

与常规液体相比, 强润湿性液体的沸腾传热会出现热滞后现象, 即液体在自然对流传热情况下, 壁面温度随着热流密度的增加发生过度升高(ABC); 而当沸腾开始后, 壁面温度显著下降(CC'), 如图 2(a)所示, 此时, 热流上升和热流下降时沸腾传热曲

线不重合,其最大温差为温度过头值(为 14.4 K)。图 2(b)是相应的换热系数图,由图可见,自然对流

后,沸腾传热曲线有明显地向左偏移的现象。如图 3 所示,同一实验件在液体中分别浸泡 1 h 和 10 h

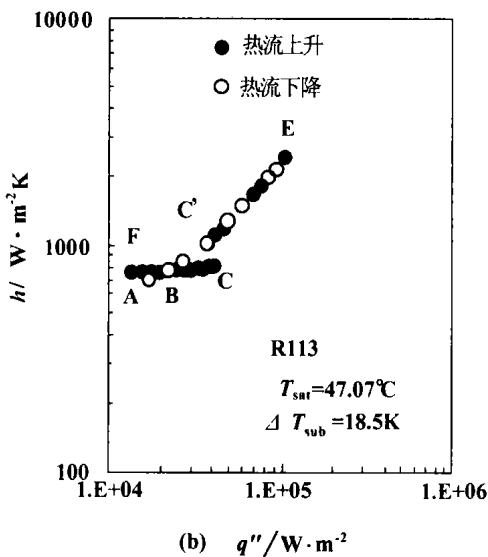
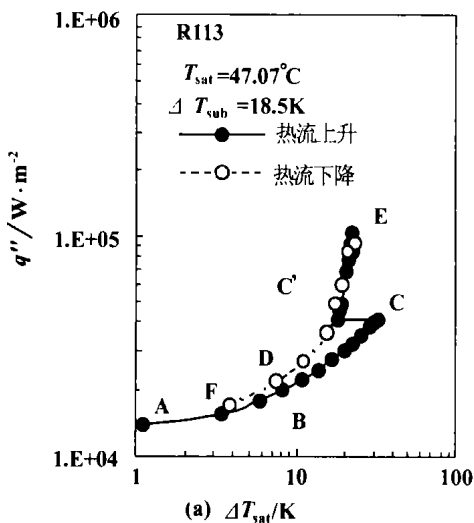


图 2 典型强润湿性液体池沸腾传热曲线

后,沸腾传热曲线明显不同,老化后的沸腾曲线向左偏移,沸腾起始温度降低(从 81 °C降低至 73 °C)。康铜膜在 R113 液体中浸泡 10 h 后就可完全老化。

3.2.2 液体过冷度

液体过冷度对强润湿性液体沸腾传热的影响示于图 4。由图可见,当液体过冷度从 $\Delta T_{sub} = 18.5 K$ 增加到 27.6 K 时,沸腾传热曲线明显向左移动,沸腾起始点从 $T_{WONB} = 79.5 °C$ 降低到 73 °C。

Ma 和 Bergles^[2] 对不同过冷度下的池沸腾传热进行了研究,发现沸腾起始点随着过冷度的增加而相应下降。

图 5 示出了本文所有沸腾起始点的数据,并对它们进行了关联,关联式如下:

$$池沸腾 \quad T_{WONB} = 116.04 \Delta T_{sub}^{-0.1436} \quad (1)$$

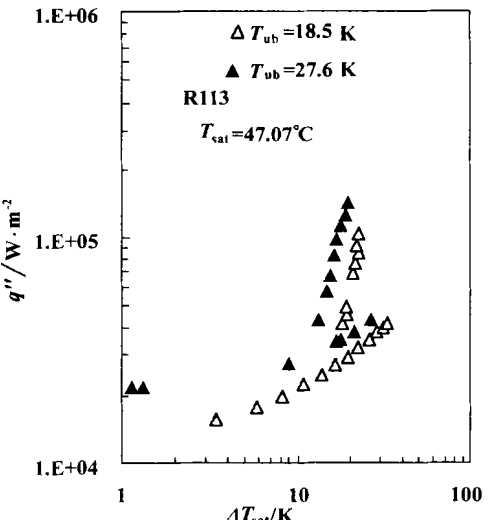
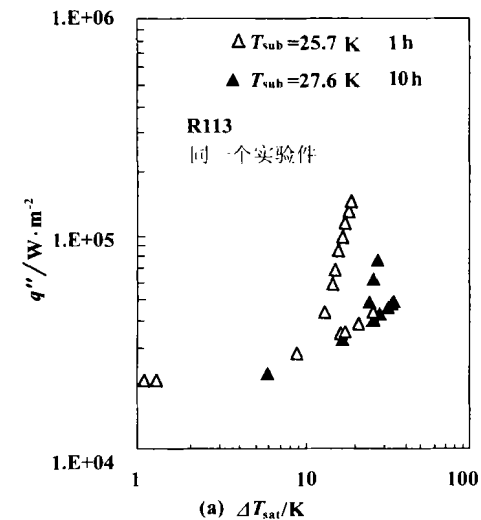


图 3 表面老化的影响

图 4 液体过冷度的影响

(ABC)和池核沸腾(C' E)换热系数的非光滑过渡是强润湿性液体沸腾传热的显著特征。

3.2 池沸腾传热曲线及起沸点的影响因素

实验程序、表面粗糙度、系统压力、液体过冷度、非冷凝性气体、实验工质和表面老化等因素均会影响沸腾传热曲线及起沸点。下面主要讨论两个因素的影响。

3.2.1 表面老化

表面老化是指沸腾表面在经过较长时间的实验

后,沸腾传热曲线有明显地向左偏移的现象。如图 3 所示,同一实验件在液体中分别浸泡 1 h 和 10 h

3.3.1 热流密度下降而壁温上升

一般而言,沸腾传热表面温度随着热流密度下降而相应地下降。但是,作者在过冷沸腾实验中发现,在传热表面热流密度下降过程中,壁温可能突然跃升,如图 6 所示。这是由于传热表面在热流密度下降过程中部分汽化核心突然失去活性使沸腾中止而造成。

3.3.2 同一传热面出现二次起沸

热滞后发生一直是以传热壁温突然下降为特征的。如图 7 所示, 当传热面升温到起沸点后壁温

3.3.3 从自然对流直接过渡到膜沸腾

采用强润湿性液体浸没冷却光滑传热表面时,

必须维持一个较高的壁面过热度才会起沸。当起沸热流值高于过渡沸腾向膜沸腾转变时的最小热流, 且起沸壁温高于过渡沸腾最小壁温时, 就可观察到从单相自然对流向膜沸腾直接过渡的现象^[4]。如图 8 所示, 壁面过热度一直维持到 $\Delta T_{\text{sat}} = 52^\circ\text{C}$ 时才开始起沸, 说明传热从单相自然对流直接过渡到膜沸腾。由于加热面上热流密度 (均在 $4.4 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 左右) 不足以使传热面处于稳定的膜沸腾状态, 因而, 当传热面起沸后壁温下降, 核沸腾传热开始盛行。

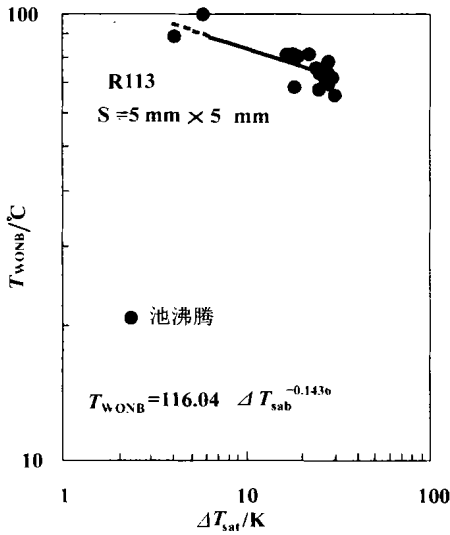


图 5 起沸点随过冷度的变化

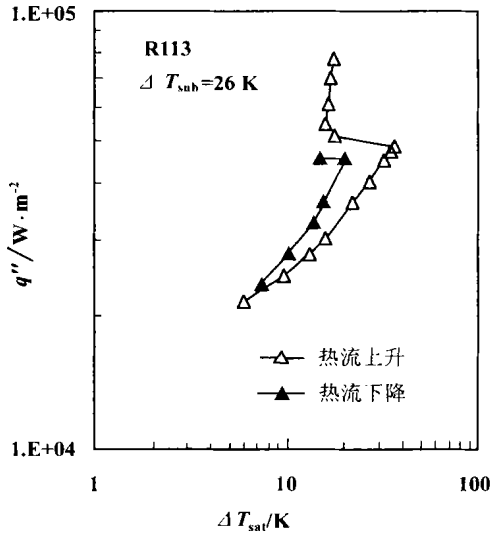


图 6 池核沸腾时热流下降壁温上升的情况

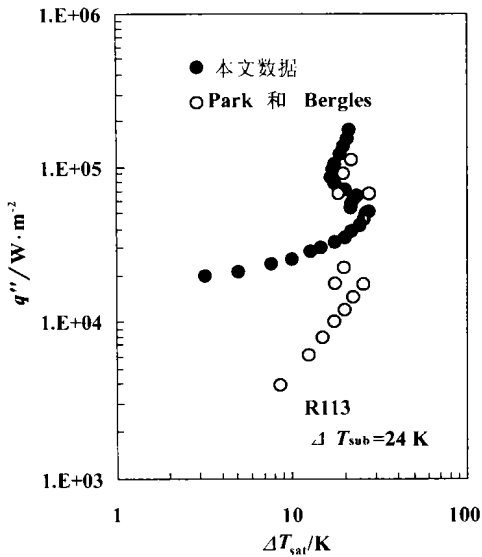


图 7 池沸腾传热中的二次起沸现象

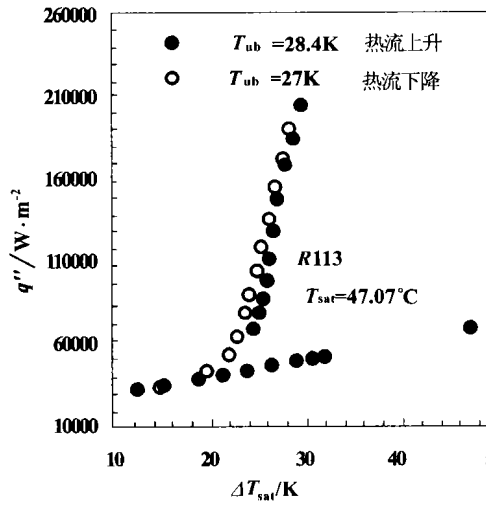


图 8 自然对流向膜沸腾的直接过渡

突然下降, 但下降值不大, 而在较高热流密度处壁温再次下降, 之后, 壁温才随热流密度的增加而增加。Park 和 Bergles^[3] 在研究不同尺寸加热面的池沸腾传热时发现过此现象。该文认为这是由于热电偶附近活化孔穴的非规则分布所致, 并推测第一次起沸是由热电偶下部的孔穴活化所为。加热面下端沸腾产生的气泡对上端有冲刷作用, 抑制了加热面上端的起沸。热流密度继续增加, 壁面过热度升高到足以使传热面上端起沸后, 整个传热表面才全部进入充分发展的核沸腾状态。

以 R113 为工质, 文献[5] 观察到了很高的起沸温度 ($\Delta T_{\text{sat}} = 53^\circ\text{C}$); 文献[4] 分别以 FC72 和 FC87 为工质, 在研究光滑铜表面的池沸腾传热时获得了高达 $\Delta T_{\text{sat}} = 52^\circ\text{C}$ 的过热度, 且实验结果重复性较好。图 8 中池核沸腾传热曲线的关联式如下:

$$\Delta T_{\text{sub}} = 28.4 \text{ K}, q'' = 3 \times 10^{-4} \Delta T_{\text{sat}}^{6.0259} \quad (2)$$

4 强润湿性液体沸腾热滞后的机理分析

本文作者认为: 在相同条件下, 壁面起沸温度越高, 起沸所对应的孔穴尺寸越小; 根据理论和实验的结果分析表明, 沸腾时气泡的生成是在表面孔穴内完成的。

当强润湿性液体浸没冷却光滑传热表面时, 由于该类液体特有的热物性, 传热面上大量尺寸的孔

穴被液体所淹没。由于用以起沸的孔穴被液体淹没而捕捉不到气体, 汽泡胚胎无法生成, 传热壁面只能以导热和对流的形式散走热量, 壁面处于单相自然对流传热形态; 热流密度增加, 壁面维持一定的过热度, 同时, 光滑表面存在各种尺寸的孔穴, 而强润湿性液体也只能将一定大小尺寸的孔穴淹没, 小于该尺寸的孔穴仍然残留有非冷凝性气体, 当壁面过热度增加到足以使该尺寸孔穴的气泡胚胎开始生成、长大并在孔穴内脱离传热壁面时, 沸腾就开始发生。这就是强润湿性液体起沸温度如此之高的缘故。

在池沸腾实验中, 覆盖在传热面上的冷流体直接影响了传热面上温度边界层的厚度。一般而言, 强润湿性液体表面张力随着液体温度增加而减小。过冷度增加, 温度边界层厚度减薄, 同时, 液体表面张力增加, 孔穴捕捉气体的能力增强, 捕捉到气体胚胎的孔穴尺寸增大, 因而壁面起沸温度下降。

5 结论

(1) 采用强润湿性液体作工质时, 光滑传热表面孔穴尺寸越小, 壁面起沸点越高; 沸腾起始点随液

体过冷度增加和表面老化而降低, 池核沸腾曲线则相应明显地向左移动;

(2) 在强润湿性液体浸没冷却光滑传热表面的池沸腾传热实验中观察到了三个不利于电子元件冷却的反常现象;

(3) 对于强润湿性液体浸没冷却光滑传热表面而言, 汽泡胚胎的生成、长大和脱离均是在传热表面孔穴内进行的。

参考文献:

- [1] 周定伟. 强润湿性液体圆形射流的单相对流与核沸腾冲击传热的研究[D]. 西安: 西安交通大学能动学院, 2000.
 - [2] MA C F, BERGLES A E. Jet impingement nucleate boiling[J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 1986, 29(2): 1095-1100.
 - [3] PARK K A, BERGLES A E. Effects of size of simulated microelectronic chips on boiling and critical heat flux[J]. *J Heat Transfer*, 1988, 110(8): 728-735.
 - [4] CHANG J Y, YOU S M. Film boiling incipience at the departure from natural convection on flat, smooth surfaces[J]. *J Heat Transfer*, 1998, 120(5): 402-410.
 - [5] JOUDI K A, JAMES D D. Incipient boiling characteristics at atmospheric and subatmospheric pressures[J]. *J Heat Transfer*, 1977, 99(8): 398-403.
- (何静芳 编辑)

(上接第 42 页)

用, 它只是在 $\text{CaO} + \text{SO}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4$ 的反应过程中起了促进作用, 这一结果与文献[7]报道一致。Fe₂O₃ 的存在降低了 SO₂ 和 CaO 反应的活化能, 使这个反应更加容易进行, 在其它条件一定的情况下, 加 Fe₂O₃ 时 CaO 和 SO₂ 反应生成 CaSO₃ 转化率比不加 Fe₂O₃ 时要优越得多, 但对固硫作用产生决定性影响的仍是 CaO, 而不是 Fe₂O₃。一般认为, Fe₂O₃ 的加入量在燃料总重量的 4%~6% 时比较合适。另外, Fe₂O₃ 还可以使 CaSO₄ 的分解温度提高、CaSO₃ 的氧化反应加快。

5 结论

生物质复合型煤(BCC)中因为加入了具有有机活性的生物质, 所以它的固硫性能比普通型煤高得多, 在燃烧温度低于 900 °C、钙硫比为 2.0 时, BCC 的固硫率可以达到 90% 以上, 随着燃烧温度的提高, 因为固硫产物的分解而导致固硫率的降低; BCC 的固硫率还随着钙硫比的增加而增大, 当钙硫比为 2.0 时,

固硫率趋于最大; BCC 的固硫率随生物质添加量的增加而增大; 铁系氧化物的存在能显著提高 BCC 的固硫率。总之生物质复合型煤是一项投资少、见效快适合我国国情的高效洁净煤技术, 值得大力推广。

参考文献:

- [1] 陈文敏, 李文华, 徐振刚, 等. 洁净煤技术基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997.
 - [2] 刘伟军, 刘兴军. 生物质型煤燃烧污染特性的理论分析研究[J]. 洁净煤技术, 1998, 4(4): 40-44.
 - [3] 任有中, 董佳芳, 曹源泉, 等. 洁净型煤中提高脱硫性能的新技术[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(1): 126-128.
 - [4] 王华, 何方, 马文会, 等. 生物质复合型煤生产新工艺[P], 中国专利: 01107033. 2001-08.
 - [5] 刘伟军, 孙庆滨, 张维洁. 生物质型煤固硫规律研究[J]. 动力工程, 2000, 19(5): 410-413.
 - [6] PEDERSEN L S, MORGAN D J, VAN DE KAMP W L, et al. Effects on SO_x emission by co-firing straw and pulverized coal[J]. *Energy Fuels*, 1997, 11(2): 439-446.
 - [7] 张良全, 成思危. Fe₂O₃ 对型煤固硫作用的机理探讨[J]. 环境科学, 1997, 18(1): 65-67.
- (何静芳 编辑)

Ying, NIU Zhong-yi, ZHANG Zheng-yi, et al (Power Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 37 ~ 40

A combined diesel or gas turbine (CODOG) power plant underwent a technical modification. On this basis studied under various loads was the effect of different damping values, various switch-over speed differences and other factors of a SSS clutch on the dynamic characteristics of the the CODOG power plant during the switch-over process. As a result, obtained were the SSS clutch displacement curves and some meaningful conclusions. **Key words:** combined diesel or gas turbine power plants, synchronous-self-shifting clutch, displacement curve

生物质复合型煤固硫特性研究 = A Study of the Sulfur Retention Characteristics of Biomass Compound Type of Coal [刊, 汉] / HE Fang, WANG Hua, BAO Gui-rong, et al (Institute of New Technology on Environment-harmonious Energy Source under the Kunming University of Science & Technology, Kunming, Yunnan Province, China, Post Code: 650093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 40 ~ 42, 50

On the basis of analyzing the sulfur retention mechanism of the biomass compound type of coal developed by the authors an experimental study was conducted of the sulfur retention characteristics of this type of coal. The results of the study indicate that the coal under discussion enjoys a higher sulfur retention ratio than that of conventional types of coal. When Ca/S is equal to 2 and the combustion temperature lower than 900 °C the sulfur retention ratio of the biomass compound type of coal can reach in excess of 90%. This retention ratio is subject to various factors, such as combustion temperature, the amount of biomass added, Ca/S ratio, etc. Some additives, such as Fe₂O₃ can significantly enhance the sulfur retention capability. **Key words:** biomass compound coal, sulfur retention mechanism, sulfur retention characteristics

竖管内空气强迫与自然对流换热实验 = An Experiment on the Forced and Natural Convection Heat Exchange of Air in a Vertical Tube [刊, 汉] / SHI Jin-sheng (Mechanical Department, Tianjin Light Industry Institute, Tianjin, China, Post Code: 300222) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 43 ~ 46

An experiment was conducted of the forced and natural convection heat exchange of air in a vertical round tube. The difference between the above two types of heat exchange is shown from the aspect of the order of magnitude. Through the experiment obtained was a natural convection heat exchange expressed by Reynolds number, which is compared with the natural convection heat exchange of the existing large air space. **Key words:** forced convection, natural convection, heat exchange, comparison of the order of magnitude

强润湿性液体池沸腾传热的实验研究和机理分析 = Experimental Study and Mechanism Analysis of Pool Boiling Heat Transfer of Highly Wetted Liquid [刊, 汉] / ZHOU Ding-wei, MA Chong-fang (College of Environmental and Energy Engineering under the Beijing Polytechnic University, Beijing, China, Post Code: 100022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 47 ~ 50

With respect to the test of pool boiling heat transfer of highly wetted liquid a set of effective test procedures was proposed and an experimental study conducted of R113 pool boiling heat transfer in strict accordance with the test procedures. The study focuses on the effect of surface aging and liquid subcooling on the pool boiling heat transfer curves and incipient boiling point. Three abnormal phenomena have been observed during the test. In conclusion, from the perspective of the boiling heat transfer mechanism of highly wetted liquid a relevant explanation was given concerning the above-cited phenomenon. **Key words:** pool boiling, heat transfer, hysteresis

流化床锅炉预测指导系统研究 = A Study of the Predictive Instruction System of a Fluidized Bed Boiler [刊,