

矩形微通道内弹状流流动特性

周云龙¹, 刘 博²

(1. 东北电力大学 能源与动力工程学院 吉林 吉林 132012; 2. 华电电力科学研究院 浙江 杭州 310030)

摘 要: 以空气为气相介质, 以不同表面张力的液体为液相介质, 利用可视化技术对矩形截面为 $100\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$ 的微通道内弹状流气柱速度、气柱长度、截面含气率、气柱产生频率进行了测量。通过实验发现气柱速度受 C_0 (流动参数) 影响, 流动参数随着表面张力的增加而减小。根据 Qian 等人提出的关联式, 提出了新的预测气柱长度模型, 预测值与测量值算值相比较, 平均偏差为 14.6%。Ali 等人提出的关联式预测截面含气率效果最好。气柱产生频率受两相表观速度和液体表面张力影响。

关 键 词: 微通道; 弹状流; 流动参数; 表面张力

中图分类号: TK125 文献标识码: A

引 言

微通道因具有的良好传热传质性能、内在安全性以及高度集成特性使之在气液吸收和气液反应方面具有广阔的应用前景。微通道内, 气液两相弹状流的工艺操作条件非常灵活, 气体和液体流动速率范围较大, 并且可以为反应过程强化提供高相界面面积和流场。所以弹状流在微通道中气液的化学反应中是一种很重要的流型。

近些年来, 对微通道内弹状流已经有了许多研究。王凌等人研究了气泡分布演化与含气率的关系、气柱运动与测压点局部压力波动之间关系^[1]。Han 等人对弹状流液膜厚度作了详细的调查^[2]。马友光等人对弹状流压力降做了具体研究^[3]。

本研究对弹状流的一些基本参数做了详尽的实验研究, 例如弹状流气柱速度、气柱的长度、含气率和气柱的频率。最终的目的是为在一定的范围内, 对在微型通道内弹状流的行为起到一定的预测作用, 在工程上保证微通道内优异的流动特性提供理论指导和技术支撑。

1 实验系统和方法

1.1 实验系统设备

本实验的实验装置原理图如图 1 所示。实验所用通道截面为矩形 ($100\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$), 气液两相进口段为 1 cm, 混合段为 4 cm。

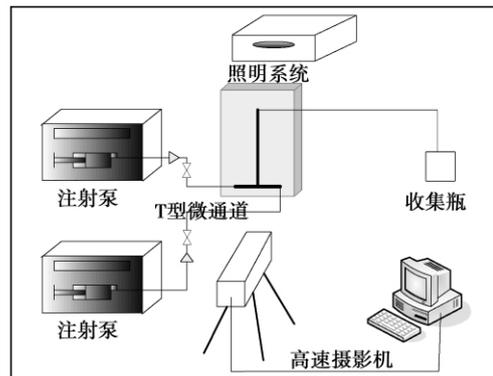


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

实验所用微通道注射泵的速率精度为 $\pm 3\%$ 。实验采用的高速摄影机的最大分辨率为 1536×1024 , 最大帧频达到 10 000 帧/s。实验中气相介质为空气, 液相介质分别为纯水、0.01% SDS (sodium dodecyl sulfate) 溶液、0.5% SDS 溶液、乙醇, 流体的具体物理性质如表 1 所示。

表 1 气液两相流液相流体数据

Tab. 1 Liquid phase fluid data of a gas-liquid two phase flow

工作流体	表面张力 $\sigma/\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	粘度 $\mu/\text{mPa} \cdot \text{s}$	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} (\times 10^3)$
纯水	72.00	0.92	0.997
0.01% SDS 溶液	48.60	0.91	0.998
0.50% SDS 溶液	33.12	0.91	0.998
乙醇	22.32	1.16	0.795

收稿日期: 2012 - 09 - 10; 修订日期: 2012 - 09 - 21

作者简介: 周云龙(1960 -), 男, 吉林扶余人, 东北电力大学教授。

1.2 实验方法

利用高速摄影机测量气柱速度、长度、截面含气率和气柱产生频率。实验拍摄图像大小为 $5\ 600\ \mu\text{m} \times 2\ 100\ \mu\text{m}$, 分辨率为 512×129 , 每个像素点大小为 $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$, 拍摄帧频为 $10\ 000$ 帧/s。将记录的图片传送到计算机内, 然后利用商业软件进行处理。

气柱速度可以通过计算得:

$$u_c = \Delta z \cdot f_s \quad (1)$$

式中: u_c —气柱速度 $\mu\text{m}/\text{s}$; f_s —高速摄影机的拍摄帧频; Δz —气柱在 $1/f_s$ 时间内前进的距离 μm 。

气柱长度 L_c 是气柱头部到尾部的距离, 可以对处理过的图片直接测量。

截面含气率 α 可以通过测得气柱速度 u_c , 利用式(2)获得:

$$\alpha = j_G / u_c \quad (2)$$

式中: j_G —气体表观速度 $\mu\text{m}/\text{s}$, 可以由注射泵直接控制大小。

气柱产生频率 f 可以通过在已知时间内所观察到气柱通过一定点的次数获得。

2 实验结果和讨论

2.1 气柱速度

以气柱速度 u_c 为纵坐标, 混合速度 v_m ($v_m = j_G + j_L$) 为横坐标, 建立坐标图, 如图 2 所示。

图 2 中的直线是基于 Zuber 等的经典通量模型(3)所做的拟合曲线, 即:

$$u_c = C_0 v_m + v_d \quad (3)$$

在微通道中弹状流流动中, 式(3)中漂移速度 v_d 很小, 可以忽略。 C_0 为分布参数, 从图 2 中可以看出 C_0 和 u_c 伴随着表面张力的减小而增加。这是因为气柱的液体薄膜的厚度随着液体表面张力的增加而增加。为了得到适用于不同流体 C_0 的关联式, 将 C_0 与无量纲的数相联系, 即得:

$$C_0 = 3.1 Bo^{0.19} \quad (4)$$

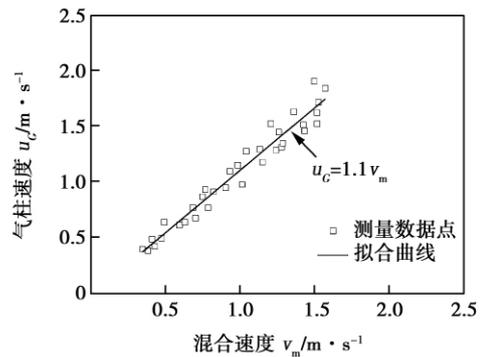
式中: Bo —邦德数(Bond number), 在流体运动中表示重力与表面张力的比值, 当 Bo 小于 1 时, 表示表面张力占主导作用, Bo 的表达式为:

$$Bo = (\rho_L - \rho_G) g D_h^2 / \sigma \quad (5)$$

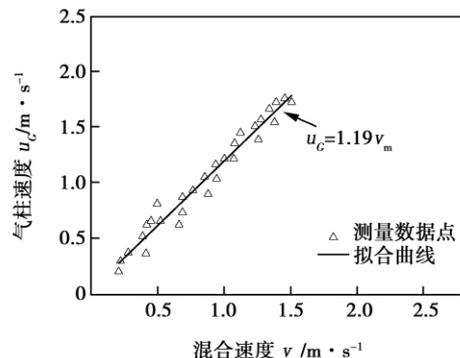
式中: ρ_L 和 ρ_G —两相流体密度 kg/m^3 ; g —重力加速度 m/s^2 ; σ —液体表面张力 $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

最后, 将气柱速度的计算值与测量值相比较, 两

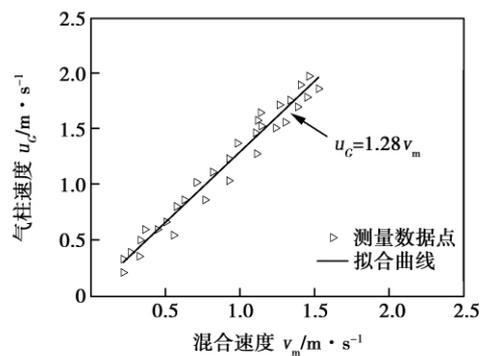
者比较吻合, 如图 3 所示, 平均偏差达为 14.2%。



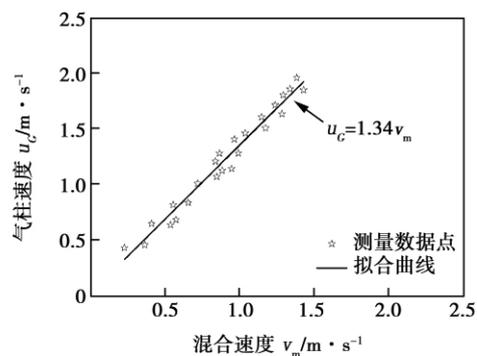
(a) 纯水



(b) 0.01% SDS 溶液



(c) 0.5% SDS 溶液



(d) 乙醇

图 2 4 种测试液体气液两相流的气柱速度
Fig. 2 Gas column velocities of four kinds of liquid under the test in a gas-liquid two-phase flow

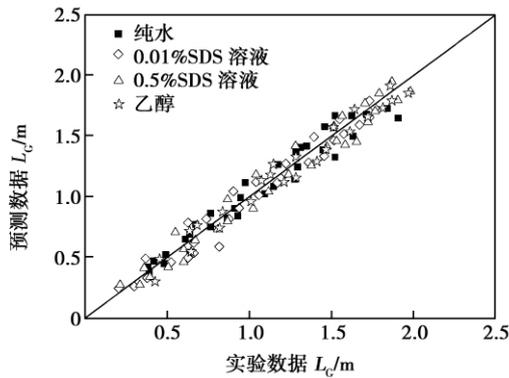


图 3 气柱速度测量值与计算值的对比
Fig. 3 Comparison of the gas column velocity measured and the value calculated

2.2 气柱长度

Qian 等人使用商业软件 Fluent 对弹状流进行了数值模拟^[4]。他们利用 VOF(volume of fluid) 模型模拟了气液两相流流动,得到的关联式为:

$$\frac{L_G}{D_h} = 1.637 \varepsilon_G^{0.107} (1 - \varepsilon_G)^{-1.05} Re(v_m)^{-0.075} \times Ca(v_m)^{-0.0687} \quad (6)$$

式中: ε_G —空气体积分数; $Re(v_m)$ —两相混合速度的雷诺数; $Ca(v_m)$ —两相混合速度的毛细管数。

Qian 等人认为此关联式适用于小管径通道(2 mm 以下),气柱长度主要依赖于气体和液体的速度,而系统物理参数的影响是次要的。将实验数据与此关联式相对比,可以观察到,实验结果与计算值比较吻合。

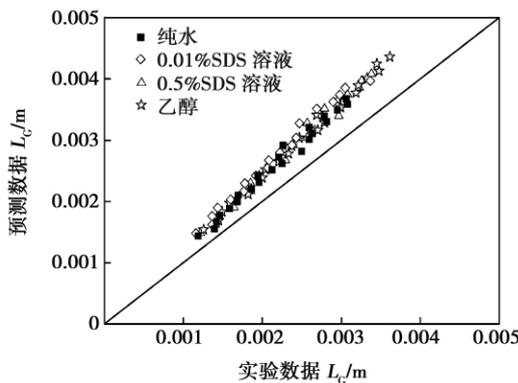


图 4 气柱长度的测量值与计算值对比
Fig. 4 Comparison of the gas column length measured and the value calculated

通过图 4 的对比结果可以看出,Qian 等人提出

的关联式适合用于预测本实验弹状流液柱长度。根据实验结果,对 Qian 等人提出关联式的系数和指数进行了修正,得到关联式:

$$\frac{L_G}{D_h} = 1.307 \varepsilon_G^{0.083} (1 - \varepsilon_G)^{-1.08} Re(v_m)^{-0.098} \times Ca(v_m)^{-0.107} \quad (7)$$

图 5 是气柱长度测量值与关联式(7)的计算值比较,可以看出计算值与测量值比较吻合,平均偏差为 10.3%。另外,关联式(7)中的雷诺数和毛细管数的指数非常接近。这表明韦伯数可以适当的引入到关联式中,即:

$$We = Re \cdot Ca \quad (8)$$

可简化关联式为:

$$\frac{L_G}{D_h} = 1.3 \varepsilon_G^{0.08} (1 - \varepsilon_G)^{-1.08} We(v_m)^{-0.1} \quad (9)$$

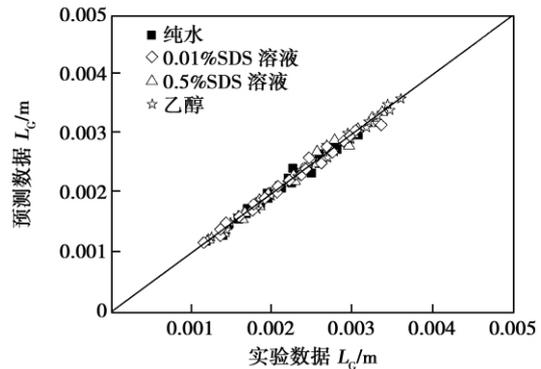


图 5 气柱长度测量值与关联式(7)的计算值比较
Fig. 5 Comparison of the gas column length measured and the value calculated by using the correlation formulae (7)

图 6 是气柱长度测量值与简化关联式(9)的计算值比较,平均偏差为 14.6%,预测效果也比较好。

2.3 截面含气率

以截面含气率 α 为纵坐标,以容积含气率 β 为横坐标建立坐标图,如图 7 所示。图中的虚线是 Kawahara 等人提出来的关联式^[5]:

$$\alpha = 0.03\beta^{0.5} / (1 - 0.97\beta^{0.5}) \quad (10)$$

图中还有两条直线,其中一条是截面含气率的匀相模型($\alpha = \beta$),另外一条直线是 Ali 根据对通道当量直径为 1 mm 实验研究基础上提出来的关联式^[6]:

$$\alpha = 0.83\beta \quad (11)$$

从图 7 中可以看出,实验数据与 Ali 等人所提

出的关联式比较吻合,与 Kawahara 等人提出来的关联式和匀相模型差距较大。此外可以看出,随着液体的表面张力增加,截面含气率也在增加,这是因为表面张力大的液体气柱速度小的缘故。

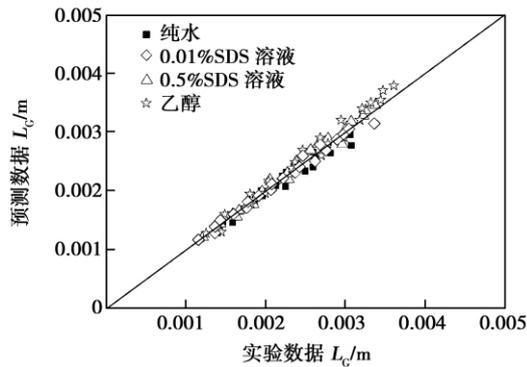


图 6 气柱长度测量值与关联式(9)的计算值比较

Fig. 6 Comparison of the gas column length measured and the value calculated by using the correlation formulae (9)

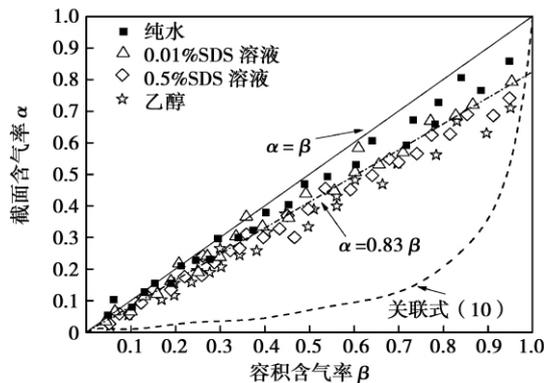


图 7 4 种流体的截面含气率与 3 种模型的对比

Fig. 7 Comparison of the void fractions of the four kinds of fluid in a section and three models

2.4 气柱产生频率

图 8 是以水为液相工质时,在不同表观速度情况下气柱产生频率。从图 8 中可以看出,液体表观速度对气柱产生频率影响较大。气体表观速度一定时,气柱产生频率随着液体表观速度增加而增加。液体表观速度在 0.05 ~ 0.2 m/s 之间时,气体表观速度对气柱产生频率的影响不大;液体表观速度在 0.3 ~ 0.5 m/s 时,气柱产生频率随着气体表观速度增加而增加。

图 9 是 4 种工作流体在表观速度为 0.3 m/s 时气柱产生频率。从图中可以发现弹状流气柱产生频

率随着液体表面张力减小而增加。

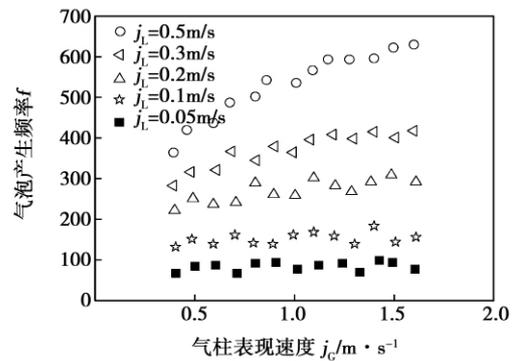


图 8 在不同气液两相流速下气柱产生频率

Fig. 8 Frequency produced by the gas column under different gas - liquid two phase flow velocities

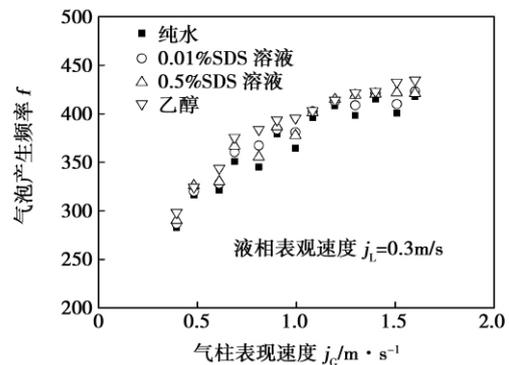


图 9 4 种测试流体的气柱产生频率

Fig. 9 Frequency produced by the gas columns of four kinds of fluid under the test

3 结 论

(1) 微通道气柱速度受两相入口速度和流体表面张力的影响,其流动参数 C_0 随着表面张力的增加而减小,并且提出了关于 C_0 的数学关联式。

(2) 根据 Qian 等人提出的关联式,提出了新的预测气柱长度模型,预测值与测量值算值相比较,平均偏差为 14.6%。

(3) 弹状流的截面含气率随着表面张力的增加而增加,实验测量结果与 Ali 等人提出的预测结果最为吻合。

(4) 弹状流的气柱产生频率随着气相表观速度和液相表观速度的增加而增加,而液相表观速度的作用更加明显。当液相为表面张力较小的流体时,

气柱产生频率更大。另外没能建立起适合于矩形微通道内气柱产生频率的数学模型,还有待进一步探讨和研究。

参考文献:

[1] 王 凌,彭晓峰,王建忠,等. 水平 PDMS 微通道内气-液弹状流特性观察[J]. 热科学与技术 2009 8(3): 189-193.
WANG Ling, PENG Xiao-feng, WANG Jian-zhong, et al. Observation of the characteristics of a slug flow in a horizontal PDMS micro-channel [J]. Journal of Thermoscience and Technology 2009, 3(8): 189-193

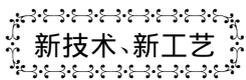
[2] Han Y, Shikazono N. Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow 2009 30: 842-853.

[3] MA Youguang, JI Xiyun, WANG Dongji, et al. Measurement and Correlation of Pressure Drop for Gas-Liquid Two-phase Flow in Rectangular Microchannel [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering 2010 18(6): 940-947.

[4] Qian D, Lawal A. Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel [J]. Chemical Engineering Science 2006 52: 3441-3453.

[5] Kawahara A, Chung, Kawaji M. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel [J]. International Journal of Multiphase Flow 2002 28: 1411-1435.

[6] Ali M. I, Sadatomi M, Kawaji M. Two-phase flow in narrow channels between flat plates [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering 1993 71: 657-666.



俄罗斯第四代舰用燃气轮机

据《Судоостроение》2012 年 5-6 月刊报道,前苏联时期的舰用燃气轮机动力工程技术基地是乌克兰的尼古拉耶夫。1992 年以前,该基地配套并完全保证海军的需要。《机器设计》科学生产企业和转产的南方涡轮机[现两者合称《曙光-机器设计》科学生产联合体]承担了上述任务。

前苏联解体后形成了这样一种局面,即俄罗斯海军使用的燃气轮机要依靠已是外围的生产者供应,这显然不符合俄罗斯海军的战略要求。

为此,从 1992 年末起俄罗斯就开展了建造本国舰用燃气轮机的工作。形成了以《土星》科学生产联合体无限股份公司为主的合作组织,承担此项工作。《土星》设计局是前苏联设计歼击机/强击机发动机最著名的公司,是苏-27 歼击机的 12 500 kg 推力带加力燃烧的 AL-31F 双轴涡轮风扇发动机设计制造者。

经过多年的研制,《土星》科学生产联合体现在已推出具有较好世界水准的二型第四代舰用燃气轮机,其主要特性如表所示。

俄罗斯第四代舰用燃气轮机的主要特性

参 数	M75PY	M70ФPY
最大功率/MW	5.15	10.3
额定功率/MW	4.4	8.8
额定油率/kg·(kW·h)	0.270	0.237
动力涡轮最高转速/r·min ⁻¹	10 500	6 500
压气机的空气压比	12.5	17.9
空气流量/kg·s ⁻¹	22.6	33.2
涡轮前燃气温度/℃	1 265	1 529
带有罩壳和底架的燃气轮机质量/kg	3 735	4 430
大修周期/h	20 000 # 000	
使用寿命/h	40 000 # 000	

(吉桂明 摘译)

Engineering for Thermal Energy & Power. – 2013 28(4). – 345 ~ 351

On the basis of establishing a hybrid integral linear planning model for optimally configured distributed energy supply systems, a correction function was added and used to consider the influence of the ambient temperature on the performance of the gas turbine. Under different energy price systems with the ambient temperature being considered, the optimized configuration of a gas-turbine-based distributed energy supply system was studied. The calculation results show that the influence of the ambient temperature on the cost-effectiveness and energy consumption is remarkable. After the ambient temperature had been considered, the annual cost spent on the energy consumption during the operation of the system and the annual total cost will increase by 2.4% and 1.8% respectively. The annual natural gas consumption will increase by 10.3% while the annual total quantity of electricity purchased will decrease by 8.4%. Under different energy price systems, the extent of the influence of the ambient temperature on the optimized configuration of the system in question will be from case to case. Under a certain energy price system, such an influence will be comparatively marked. The optimized configuration results with the influence of the ambient temperature considered by using the various typical day ambient temperature average values and hour by hour are basically identical. **Key words:** ambient temperature, gas turbine, distributed energy supply system, optimized configuration

矩形微通道内弹状流流动特性 = **Flow Characteristics of a Slug Flow Inside a Rectangular Microchannel**

[刊 汉] ZHOU Yun-long (College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012), LIU Bo (Huadian Academy of Electric Power Sciences, Hangzhou, China, Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2013 28(4). – 352 ~ 356

With air serving as the gas phase medium and a liquid having various surface tensions as the liquid-phase medium, measured by using the visualization technology were the air column speed, air column length, void fraction in a section and air column production frequency of a slug flow inside a microchannel having a rectangular section of $100\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$. It has been found during the test that C_0 (a flow parameter) will have an effect on the air column speed while the flow parameters will decrease with an increase of the surface tension. According to the correlation formulae proposed by Qian and others, a new model for predicting the air column length was presented. The average devi-

ation between the predicted value and the measured one is 14.6% when compared. To use the correlation formulae proposed by Ali and others to predict the void fraction in a section can achieve the best effectiveness. The air column production frequency will be influenced by the apparent speed of both phases and the surface tension of the liquid. **Key words:** microchannel ,slug flow ,flow parameter ,surface tension

高温炉渣水冷过程中过冷沸腾现象研究 = **Study of the Supercooled Boiling Phenomenon During the Water Cooling Process of Slag at a High Temperature** [刊 ,汉] SHI Wen ,HE Chuan ,LI Shao-hua (Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400044) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 ,28 (4) . -357 ~362

With water serving as the working medium ,studied was the supercooled boiling phenomenon during the water cooling process of slag at a high temperature. From the viewpoint of heat transfer and steam bubble dynamics ,a series of such processes as generation and growth of steam bubbles at the cores until separation etc. were analyzed and through the water cooling test of slag at a high temperature ,the influence of the slag surface superheating degree ,cooling water supercooling degree and cooling contact area on the boiling evaporation capacity was obtained under the test condition. It has been found that with an increase of the superheating degree of the particle surface of the slag ,the boiling evaporation capacity will increase accordingly and such a growth rate will increase. The variation law governing the cooling water supercooling degree and the evaporation capacity can be expressed relatively well by an exponential relationship with such an exponential value being $-(0.9 \pm 0.04)$ and the slag quality and the cooling contact area assuming approximately a 1.8-times linear relationship. **Key words:** supercooled boiling ,surface superheating degree ,supercooling degree ,cooling contact area

锅炉单相受热管的三层嵌套建模研究 = **Study of the Three-layer Nested Model for the Single-phase Heated Tubes of a Boiler** [刊 ,汉] KANG Ying-wei ,XUE Yang ,HUANG Wei ,LU Chang-gui (School of Automation Engineering ,Shanghai College of Electric Power ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 ,28(4) . -363 ~367