

切向炉内炉膛及燃烧器区涡量分布的实验研究

何伯述¹, 刁永发², 许晋源², 陈昌和¹

(1. 清华大学 煤的清洁燃烧技术国家重点实验室, 北京 100084; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:首次使用六线涡量探针在切向燃烧炉(切向炉)的冷模上测量了其炉膛及燃烧器区域的速度及涡量分布, 给出了描述湍流特征的参数如湍流强度、倾斜因子及平坦因子等。实验结果表明, 燃烧器区射流一出口就出现了贴壁, 燃烧区及燃尽区壁面附近涡量强度和湍动度都很高。

关键词:切圆煤粉炉; 涡量; 倾斜因子; 平坦因子

中图分类号: O357.1; TK224.6 文献标识码: A

符号表

F —平坦因子	Tu —湍动度
r_0 —圆管的半径, m	u, v, w —速度分量, m/s
S —倾斜因子	V_0 —圆管中心线的速度, m/s
x —信号的脉动分量	σ —标准偏差
x, y, z —坐标方向	ω —涡量强度, 1/s

1 引言

相干结构对研究湍流的产生、输运机理, 以及对加深湍流理论及其数学模型的理解都起到了重要作用。它在技术应用上也很有意义, 如燃烧、混合、空气动力学噪音方面等。

切向炉的燃烧器射流切于炉膛中心的假想切圆, 协同形成一个很大的旋转火焰。这个旋转火焰横扫过大部分炉膛容积, 炉内火焰充满度好, 有利于保持一定的后期混合, 因而有利于燃尽。炉内旋转火焰还具有自修正作用: 当各股射流的风量和煤粉分配稍有不均、配风不匀时, 旋转火焰可起到一定的修正作用。由于有这些优点, 切向炉在我国电站锅炉中占有很大的比例。迄今为止, 湍流射流在炉膛内的空气动力学行为的了解还不够全面和透彻, 因而制约着对煤粉在该区域内进行的着火、燃烧及燃尽过程的预测和控制。为了对该区域内的湍流空气动力学场有一个初步的认识, 有必要对其进行实验研究。

本文在 HG—2008—YM2 锅炉的冷态模型(1:40)上, 使用六线涡量探针对其炉膛及燃烧器区域的湍流空气动力学场进行了实验研究。

2 涡量强度测量方法

在直角坐标系内, 涡量强度分量可写为:

$$\begin{cases} \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \\ \omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \\ \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \end{cases}$$

首先借助于级数在探针中心展开, 以确定 x, y 和 z 方向速度分量 u, v, w , 速度梯度 $\partial w / \partial y, \partial v / \partial z, \partial u / \partial z, \partial w / \partial x, \partial v / \partial x, \partial u / \partial y$, 它们是与时间有关的瞬时值。速度梯度 $\partial w / \partial y$ 和 $\partial u / \partial y$ 由探针在某位置时测定; 速度梯度 $\partial v / \partial z$ 和 $\partial u / \partial z$ 由探针旋转 90° 时测定; 而轴向(x 方向)上的速度梯度则用 Taylor 假设近似^[1]求得。

3 实验对象

本文的研究对象为 HG—2008—YM2 切向炉的冷态模型(M1:40)。图 1 为模型及测点布置示意图。在燃烧器中部区域的 A 截面的左侧墙上布置了六个等距测孔(间距为 50 mm)以测量炉膛中心线至左侧墙区域的流场; 在炉膛区域靠近燃烧器顶部的 B 截面的前墙上布置了六个等距测孔(间距为 50 mm), 以测量炉膛中心线至前墙区域的流场; 还在前后墙对称面(C 截面)上布置了三个测孔(间距为 58 mm), 以便与炉膛区域的测量结果对比。在 A 和 B 截面上每个测孔布置了 10 个测点(间距为 20 mm), 在 C 截面上的每个测孔布置了 20 个测点(间距为 20 mm), 测量了速度(u, v 和 w)和涡量强度(ω_x, ω_y 和 ω_z)。A 截面和 B 截面上的测点都分别构成了一个测量平面, 如图 1 中的阴影部分所示。

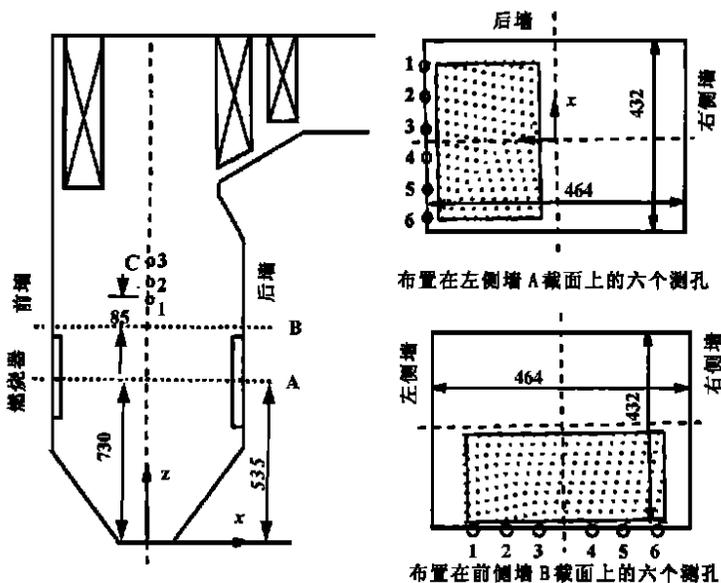


图 1 测量布置示意图

4 实验结果及分析

在早期的湍流研究中,比较强调谱分析及基于对统计上独立的采样进行的统计分析^[3]。本文将对获得的采样信号进行高阶统计分析,以便得到湍动密度 Tu (turbulence intensity)、倾斜因子 S (skewness factor) 和平坦因子 F (flatness factor 或 kurtosis)。

在充分发展的湍流流场内,大尺度拟序结构已经破碎,并衰变为随机分布的小尺度结构,这时流场内各参数的统计特性具有自保存性。由于湍流流场是一个各态历经的非高斯随机场,为了更好地研究湍流流场,除了一阶矩(平均值)、二阶矩(相关函数)及其能谱、概率密度函数外,更应该有更高阶的矩来描述^[3]。因为矩的阶数愈高,它在随机场内所起的作用就愈小。一般测量到三阶矩和四阶矩。

设采集到的瞬态信号 $X(t)$ 可以表示为:

$$X(t) = \bar{X} + x(t)$$

式中, \bar{X} 为时间平均值, $x(t)$ 为脉动分量。

如果测量是在无限长的时间内进行,则均值的真值为:

$$\bar{X} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$$

实际采样都是在一定的采样(频)率下(本文使用的采样率为 20 kHz),在有限的时间内完成的,这时可以把 X 的无偏估计值(unbiased estimate) 写为:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X(n)$$

文中的湍动度定义为: $Tu = \left(\frac{\overline{u^2}}{\bar{u}} \right)^{1/2}$

倾斜因子定义为: $S = \overline{x^3} / \sigma_x^3$, 这是一个表征湍流流场偏离高斯场($S = 0$) 程度的量。

平坦因子定义为: $F = \overline{x^4} / \sigma_x^4$, 这是一个表征概率密度函数的曲线平坦程度的量,对高斯场 $F = 3$, 而湍流流场中 $F > 3$ 。该值越大,说明流场中的间歇因子越小。

倾斜因子实际上就是用标准偏差 (σ_x) 无量纲化后的三阶矩,平坦因子是用标准偏差 (σ_x) 无量纲化后的四阶矩。

4.1 速度及湍动度分布

图 2 为在 A4 测孔测得的速度及其湍动度分布,该处 v 较大(沿炉宽 y 方向的速度分量),反映了燃烧器射流切向喷入,且湍动度很高。图 3 为在 C1 测孔测得的速度及其湍动度分布,该处已看不到燃烧器射流的痕迹,湍动度仍很大,证实了切向炉后期湍动混合作用强烈。图 4 和图 5 分别为 A 和 B 截面上速度及其湍动度的等值线图。所有测量结果图示中,曲线均为对测量点的值使用样条拟合后的曲线; a 为右侧墙所在位置; b 为左侧墙所在位置; c 为炉膛中心所在位置。本文中所有的等值线图都是根据 x, y 方向分量的合成值绘制。

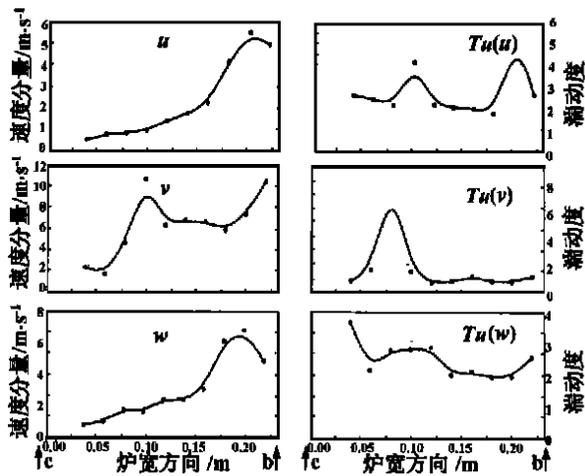


图 2 速度及其湍动度沿炉宽方向的分布(测孔A4)

切向速度 (u, v) 的分布特征: 最内圈(近中心)低,而外围高;上升速度 (w) 的分布也是中心低,边缘高。这初步表明在燃烧器区域气流已经贴壁,而在炉膛中心存在一个低速区,此结论与文献[4] 的结果一致。

4.2 速度的倾斜因子及平坦因子分布

从定义上看,倾斜因子是表征信号在统计上是否具有对称性的参数,其值可以为正值,也可以为负

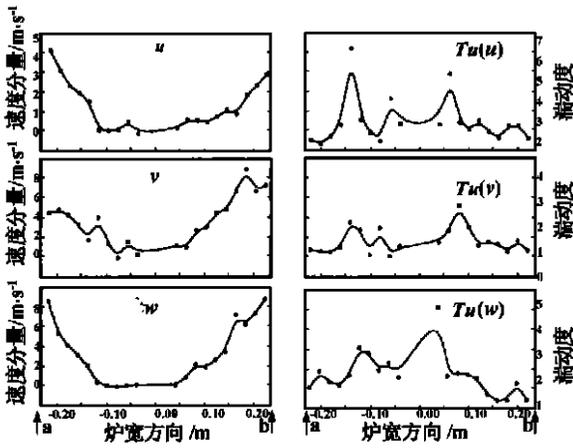


图 3 速度及其湍动度沿炉宽方向的分布(测孔C1)

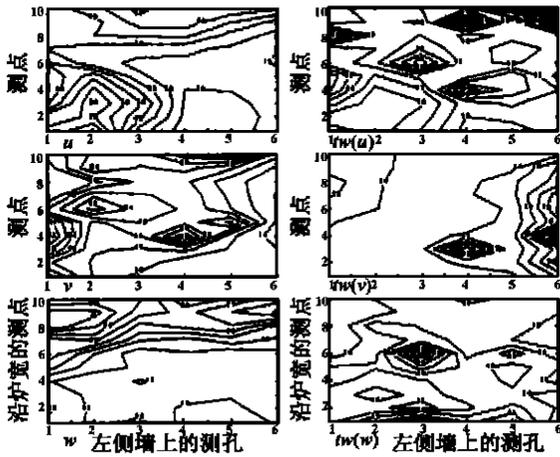


图 4 A 截面上速度及其湍动度的等值线图

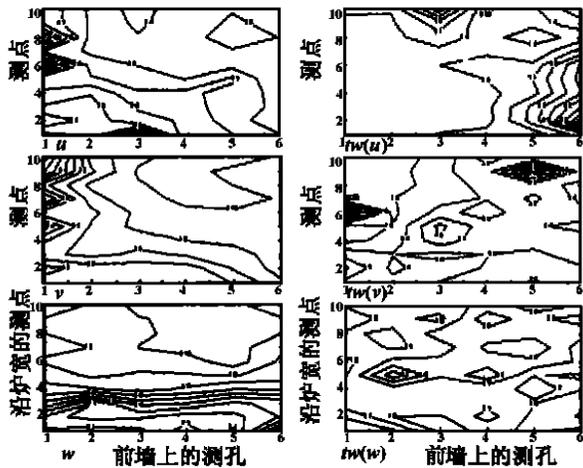


图 5 B 截面上速度及其湍动度的等值线图

值,对 Gauss 型随机变量,其倾斜因子之值为 0;而平坦因子之值只能为正值,其值的相对大小反映了该参数的间歇性的强弱,对 Gauss 型随机变量,平坦因子之值恒定为 $3^{1/3}$ 。

图 6 和图 7 为在炉膛区域测得的速度倾斜因子和平坦因子分布。从图中可以看到,测量得到的倾斜因子和平坦因子之值不是 0 和 3(Gauss 型随机变量的取值),说明流场中的速度信号不是 Gauss 分布。图中有负的倾斜因子区域;也有平坦因子的峰值区域。

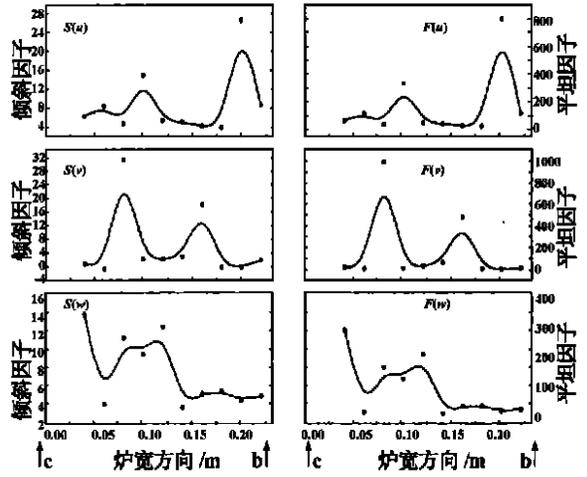


图 6 速度的倾斜因子和平坦因子(测孔A4)

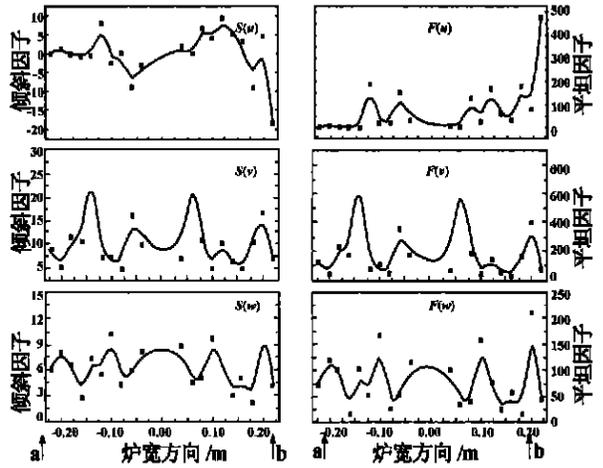


图 7 速度的倾斜因子和平坦因子(测孔C1)

4.3 涡量强度分布

图 8 表示了燃烧器及炉膛区域测量得到的涡量强度分布图。从图中可以看到,涡量强度的分布在燃烧器中心 A 截面上也具有贴壁特征:即炉膛中部涡量强度低,靠近炉墙涡量强度高。这个特征与该区域的速度分布特征一致,也与文献[4]使用涡量修正算法得到的涡量分布相似。测量发现,涡量强度的峰值出现在靠近燃烧器区域,达到 $3\ 500\ s^{-1}$ 。且相对于一般流动(如圆管内层流流动^[4],涡量强度的最大值在壁面附近, $\omega = 2V_0/r_0$),涡量强度很大,这对研

究煤粉燃烧具有重要的意义。

4.4 涡量强度的倾斜因子及平坦因子分布

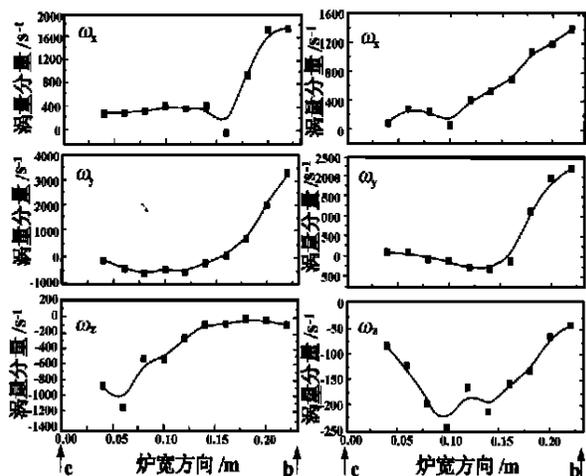


图 8 速度强度沿炉宽方向分布(测孔A3、A4)

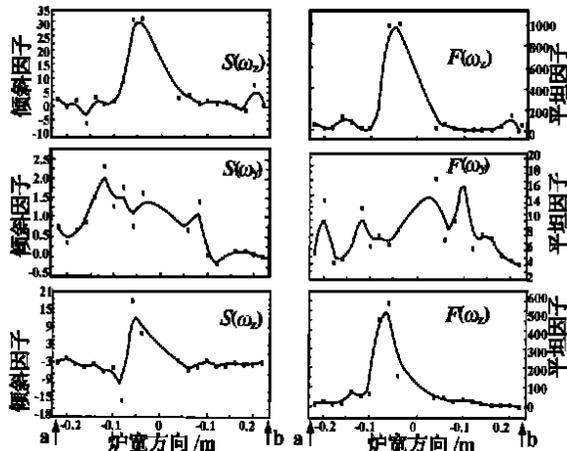


图 9 涡量的倾斜因子和平坦因子(测孔C1)

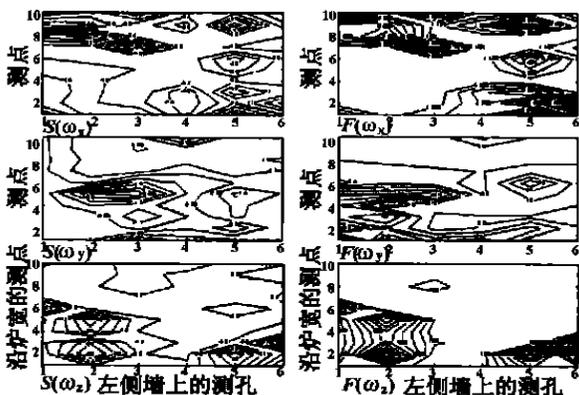


图 10 A 截面上涡量的倾斜因子和平坦因子的等值线图

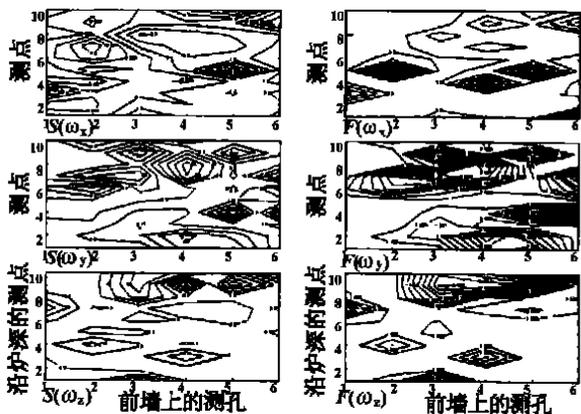


图 11 B 截面上涡量的倾斜因子和平坦因子的等值线图

中可以看出,在 A 和 B 截面倾斜因子和平坦因子都有峰值和谷值区域;在 C1 测孔测得的涡量的倾斜因子和平坦因子的峰值几乎都在出现炉膛中部区域,而两边较为平坦。这些平坦因子的谷值区域是间歇因子的峰值区,为强烈的湍流混合区是无疑的,也是炉膛内旋涡的源泉。结合湍动度和涡量强度也有峰值的事实,可以说正是由于燃烧器出口射流的强烈湍动(低平坦因子、高间歇因子)和壁面对气流的作用,燃烧器区域就出现了相干结构。该相干结构会破碎并向四周传递,有利于燃料的燃烧和燃尽。

5 结论

首次使用六线探针在一切向炉的燃烧区和燃尽区域测量了速度、湍动度、涡量强度及其倾斜因子与平坦因子,结果表明该切向炉的近壁区域涡量强度高而炉膛中心低。

参考文献:

- [1] PIOMELLI U, BALINT J L, WALLACE J M. On the validity of Taylor's hypothesis for wall-bounded flows[J]. Phys Fluids A, 1989, 1(3): 609-611.
- [2] BRUUN H H. Hot-wire Anemometry, Principle and Signal Analysis [M]. Oxford University Press, 1995.
- [3] 是勋刚. 湍流 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1994.
- [4] 张文宏. HG-2008-YM2 锅炉炉膛残余旋转与其影响的研究及涡量修正法数值模拟[D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
- [5] 何伯述. 600 MW 切向炉旋转气流演变及其对屏绕流尾涡的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1999.

(何静芳 编辑)

图 9 ~ 图 11 是在燃烧器和炉膛区域测量得到的涡量强度的倾斜因子和平坦因子的分布图。从图

喷射器一维设计理论的研究进展 = **Recent Advances in the Study of One-dimensional Ejector Design Theory** [刊, 汉] / LIU Zhi-qiang, SHEN Sheng-qiang, LI Su-fen (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology, Dalian, Liaoning Province, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 229 ~ 232

This paper mainly focuses on the recent progress in the theoretical research on one-dimensional gas ejector design theory. Discussed are such a variety of topics as constant pressure mixing theory, constant area mixing theory as well as their experimental research results. The authors end the paper with a forecast of the future prospects of the above-mentioned ejectors. **Key words:** ejector, constant-pressure mixing theory, constant-area mixing theory

DG-1000/17.6-IIIb 型锅炉 NO_x 排放特性试验研究 = **Experimental Study of NO_x Emission Characteristics of a Model DG-1000/17.6-IIIb Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Xiang-qian, LI Wen-xue (Huaneng Shantou Power Plant, Shantou, Guangdong Province, China, Post Code: 515071) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 233 ~ 238

An analysis is performed of the emission characteristics of a model DG-1000/17.6-IIIb boiler at Huaneng Shantou Power Plant. Through a comprehensive combustion adjustment test compared were the various factors liable to have an influence on NO_x emission characteristics and fly-ash combustibles C_{fh} . The test results indicate that the above-mentioned boiler features low NO_x emissions but an excessively high amount of fly-ash combustibles C_{fh} . In view of this, some proposals have been put forward for the reduction of fly-ash combustibles C_{fh} . **Key words:** utility boiler, combustion adjustment, NO_x emissions

切向炉燃烧器区涡量分布的实验研究 = **Experimental Investigation of Vorticity Distribution in the Burner Zone of a Tangentially Fired Boiler** [刊, 汉] / HE Bo-shu, CHEN Chang-he (National Key Laboratory of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), DIAO Yong-fa, XU Jin-yuan (Institute of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 239 ~ 242

With the help of a six-sensor hot-wire probe the authors have measured for the first time the velocity and vorticity field in the burner zone of the cold model of a tangentially fired boiler. Presented are the parameters depicting turbulent flow characteristics, such as turbulent flow intensity, skewness factor and flatness factor, etc. The results of an experimental investigation indicate that there emerges a wall-attachment phenomenon as soon as the jet flow at the burner zone reaches its outlet. Furthermore, a high intensity of vorticity and turbulence can be observed near the wall surface. **Key words:** tangentially fired pulverized-coal boiler, vorticity, skewness factor, flatness factor

分离式热管小螺旋管蒸发段换热特性的实验研究 = **Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Small Spiral-tube Evaporating Section in a Segregation-type Heat Pipe** [刊, 汉] / YI Jie, WANG Jing (Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHANG Hong, et al (Nanjing Chemical Engineering University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 243 ~ 246

Small-diameter spiral tubes were employed in the evaporating section of a segregation-type heat pipe. Through the use of a glass tube and stainless steel tube a simulation was conducted of the evaporating section of the above-mentioned heat pipe. Under the condition of different liquid-filling rates and heat flux densities an experimental investigation was undertaken of the fluid flow and heat exchange characteristics inside the small-diameter spiral tube. By way of a visualized test observed was the flow pattern inside the evaporating section of the spiral tube. A preliminary analysis was conducted of the influence of the heat flux density and liquid-filling rate on the transformation of flow pattern. A discussion of the relationship between wall temperature distribution and in-tube two-phase flow pattern has led to the following conclusion: the pulsation shock in the spiral tube and secondary return flow can bring about an intensified turbulence of the in-tube fluid. As a result, there emerged an enhancement of the average heat exchange factor and critical heat flux density as well as an