

# 水平直管道中气体一颗粒两相流实验研究

薛 元, 姚 强, 张金成

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 使用多普勒激光测速仪测量了水平直管道中气体一颗粒两相流动的流场。实验中, 采用三维粒子动态分析仪 (Particle Dynamics Analyzer) 测量了粒径在  $0 \sim 100 \mu\text{m}$  玻璃微珠的时均速度和脉动速度分布, 颗粒相的体积分数在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  之间。实验结果表明, 即使在粒径范围为  $100 \mu\text{m}$  以下的颗粒, 其在气相流场中的存在仍然会引起湍流流场结构的改变。实验还观察到气体一颗粒两相流动的湍流强度会随粒径的减小而增加, 而且其脉动速度的分布将会在壁面附近出现脉动和随机分布的特征。

**关 键 词:** 气体一颗粒两相流; 湍流; PDA

中图分类号: TK124.0357.5 文献标识码: A

## 1 引 言

在气体一颗粒稀相流动过程中, 当固体颗粒的体积浓度小于  $10^{-4}$  时, 固体颗粒之间的距离已经相当远, 颗粒之间的相互碰撞几率很小, 此时可以不考虑颗粒与颗粒之间的作用。因此稀相的气体一颗粒流动主要特点是气体与颗粒可以有不同的速度, 其直接结果是两相必然发生相互作用。但是, 目前对两相流动过程中气体与颗粒之间的相互作用规律仍然认识的不是很清楚。

最初, 在研究气体一颗粒稀相流动时一般假定流体相在颗粒体积分数很小的情况下不受固体颗粒存在的影响, 但是其后的实验却表明即使在颗粒体积分数为  $10^{-4}$  的多相流中, 颗粒的尺度和浓度也会影响流体相和颗粒相的湍流结构。

为了研究颗粒和湍流之间的相互作用, R. N. Parthasarathy & G. M. Faeth<sup>[3]</sup> 实验研究了体积浓度小于  $10^{-4}$ , 粒径分别为  $0.5$ 、 $1.0$  和  $2.0 \text{ mm}$  颗粒在静止的水中引起的湍流作用; M. Rashidi 等则采用高速摄像机对粒径分布为  $120$  和  $1100 \mu\text{m}$  的聚苯乙烯颗粒在壁面区域与液体湍流的相互作用进行了观察分析<sup>[4]</sup>; 采用 LDV, Y. Tsuji & Y. Morikawa 对水平管道

中的气体颗粒两相流动进行了测量和分析<sup>[5]</sup>, 结果表明粒径为  $0.2 \text{ mm}$  的颗粒降低了湍流强度, 而粒径为  $3.4 \text{ mm}$  的颗粒则增加了气体的湍流强度; L. M. Liljegren & N. S. Vlachon<sup>[6]</sup> 使用 PDDPA (激光相位多普勒颗粒分析仪) 测量了  $50 \mu\text{m}$  玻璃微珠在水平管道中的两相流动, 通过改变颗粒的体积分布, 他们得出了湍流强度会随颗粒浓度的增加而增加的结论; D. Kaftory 等采用可视化技术和 LDA 实验研究了粒径在  $100 \sim 900 \mu\text{m}$  的聚苯乙烯颗粒在水平方向水槽的壁面湍流边界层区域中的运动情况、速度和颗粒浓度的分布<sup>[7~8]</sup>, 他们发现颗粒在边界层的运动特性是由临近壁面的结构控制的, 而且颗粒的平均速度低于流体的速度。这些实验研究对了解两相流动问题均有一定的帮助。但是这些实验研究多是针对液体一固体两相流动的, 由于液体和气体的物理性质有差别, 如密度、粘性等, 因而在液体一固体两相流动实验中得出的结论不一定适用于气固两相流动。另外, 由于测量条件的限制, 实验中选用的颗粒种类不同, 且颗粒的粒径往往在毫米或是几百微米的量级, 对  $100 \mu\text{m}$  以下颗粒的气固两相流动的实验研究很少。

因此为了研究小于  $100 \mu\text{m}$  的颗粒在两相流动中的运动规律及其对气相流场的影响, 本实验采用 PDA 测量了  $100 \mu\text{m}$  以下的颗粒在水平直通道中的时均速度、脉动速度和颗粒的粒径分布。

在本次实验中, 详细测量分析了水平直通道中气体一颗粒两相流动时的颗粒粒径、时均速度和脉动速度。实验的目的是为了提供在低浓度条件下,  $100 \mu\text{m}$  以下的颗粒在气体一颗粒两相流动中的运动规律及其对气相流场的影响, 通过三维粒子动态分析仪 (PDA) 的测量识别功能, 区分悬浮于空气中的颗粒粒径, 对不同粒径范围的颗粒时均速度和脉动速度进行分析。

收稿日期: 2002-01-21; 修订日期: 2002-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (29976023)

作者简介: 薛元 (1977-), 女, 陕西兴平人, 清华大学硕士研究生。

Copyright © 2003 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 2 实验装置和测量系统

### 2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 主要包括加热、进料、冷却、供风、测量和粉尘收集几个系统。固体颗粒由进料口处进入流道, 与气体在一段足够长的导流段里混合均匀, 然后进入其后的测量段。两相混合物在通过测量段后经过引出段, 然后在旋风分离器中进行气固分离, 收集下来的固体玻璃微珠可以重复使用。实验中整个系统处于负压状态。

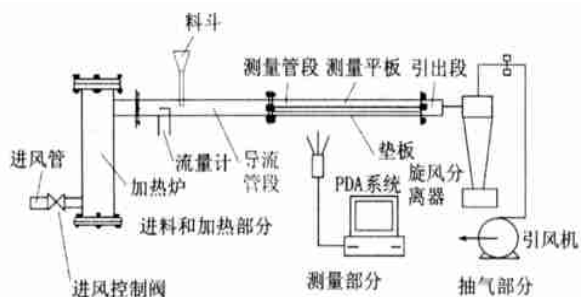


图 1 实验系统

### 2.2 实验测量段

实验测量段为长 920 mm, 宽 45 mm, 高 86 mm 的直方通道, 在通道的一个测壁上布置了如图 2 所示的测量平面, 该平面采用玻璃平板, 靠近水流一方的壁面用黑色油漆涂黑。



图 2 测量平板

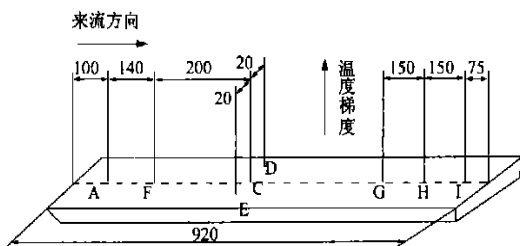


图 3 测点布置

测量段外面装有玻璃窗, PDA 的测量光线通过玻璃窗进入流道内部, 能够对整个气体颗粒两相流

动的流场进行测量, 而不对其产生任何影响。

实验中采样数满足下面条件的一个: (1) 采到的有效颗粒数达到 50 000 个; (2) 采样时间达到 600 s。大多数的点都能够采到 50 000 个点, 只有少数到不了这个数字, 但是差别不大, 并不影响各个测点的统计规律。实验中 PDA 测点的选择如图 3, 在垂直于测量板的方向上布置了 8 条测量线, 在每个测量线上按照一定的规律测量其上面的 12 个点的颗粒时均速度和脉动速度。

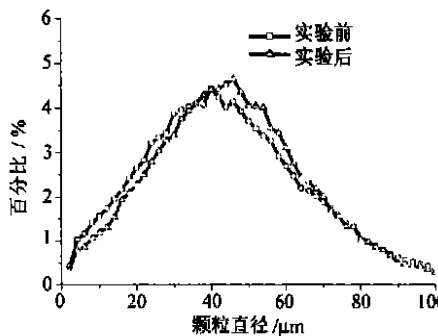


图 4 实验前后玻璃球粒径分布

### 2.3 实验中选用的颗粒

实验中使用的颗粒为粒径范围在 0 ~ 100 μm 的玻璃微珠, 由于在实验中玻璃微珠是通过旋风分离器回收

利用的, 为了保证整个实验过程中颗粒粒径范围和分布稳定, 对实验前后颗粒的直径分布进行了测量, 结果如图 4 所示。

从测量结果可以看出实验进行的前后, 颗粒的粒径分布变化不大, 因此近似认为实验中颗粒的粒径分布不变。

### 2.4 PDA 测量系统

本次实验中采用的是丹麦 Dantec 公司研制的激光三维粒子动态分析仪 (3-Dimensional Particle Dynamic Analyzer, 简称 3D-PDA)。它是一种非接触的测试方式, 既不影响流场也不会影响颗粒的运动, 是当今测量颗粒动态特性最先进的工具之一。它能用于单相及两相流场的测量, 即通过区分流场中散射粒子所产生的多普勒信号来测量粒子的速度、粒径和浓度。PDA 系统的原理和测量方法参考文献 [4 ~ 17]。

## 3 实验结果和讨论

为了保证实验过程中水平管中两相流动是充分发展的湍流, 实验中管内流动的速度保持在 13 m/s 左右, 相应的雷诺数为 51 133。实验中粒子的流量为 28.8 g/s, 气体的流量为 0.128 8 m<sup>3</sup>/s, 粒子的密

度为  $2.4 \text{ g/cm}^3$ 。因而粒子的体积分数为  $9.17 \times 10^{-5}$ ，在不排除实验中各种扰动的情况下，近似认为粒子的体积分率在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  之间。根据 PDA 测量得到的不同粒径的颗粒其脉动速度 ( $u_{rms}$ ) 与当地时均速度 ( $u_{mean}$ ) 之比的变化规律见图 5。

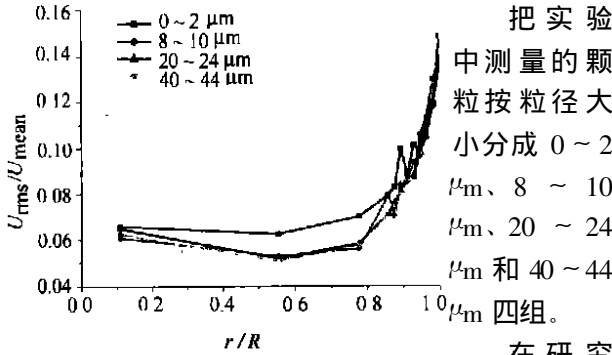


图 5 C 处不同粒径的颗粒脉动速度与时均速度之比

把实验中测量的颗粒按粒径大小分成  $0 \sim 2 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 、 $20 \sim 24 \mu\text{m}$  和  $40 \sim 44 \mu\text{m}$  四组。在研究气体—颗粒两相流动的问题时，松弛时间是反映颗粒跟随性的一个很重要的参数 (颗粒由静止开始，在气流 Stokes 阻力的作用下，跟随气体至 63% 气流速度时需要的的时间)，其计算公式如下：

$$\tau_m = \frac{\rho_p D_p^2}{18\mu} \quad (1)$$

式中： $\rho_p D_p$  分别为颗粒的密度和直径，而  $\mu$  为空气的粘性系数。

表 1 不同粒径下用式(1)计算得到的颗粒扩散松弛时间

半径	$2 \mu\text{m}$	$10 \mu\text{m}$	$22 \mu\text{m}$	$42 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m}$
扩散松弛时间 / s	$2.993 \ 25\text{E}-05$	$0.000 \ 748$	$0.003 \ 622$	$0.013 \ 2$	$0.018 \ 7$

注：颗粒的密度为  $2 \ 438 \text{ kg/m}^3$ ，空气的运动粘性为  $0.000 \ 018 \ 1 \text{ m}^2/\text{s}$

从中可以看出  $42 \mu\text{m}$  左右的颗粒其松弛时间是  $2 \mu\text{m}$  颗粒的 400 多倍，而且  $2 \mu\text{m}$  以下颗粒的松弛时间是非常短的，因此在数据分析时可以认为  $0 \sim 2 \mu\text{m}$  的颗粒速度即为气相速度。

对不同粒径范围的颗粒分别整理其 PDA 测量得到的当地时均速度和脉动速度。图 5 显示的是在测量线 C 处上的实验结果，纵坐标为颗粒沿流场方向的脉动速度和当地时均速度之比，横坐标为测量点离管道中心线距离 ( $r$ ) 与管道半径 ( $R$ ) 之比。

图 6 ~ 图 8 分别是  $0 \sim 2 \mu\text{m}$  颗粒和  $0 \sim 100 \mu\text{m}$  颗粒在 C、G 和 I 点的脉动速度和时均速度之比的分布。可以看出  $0 \sim 2 \mu\text{m}$  颗粒代表的气相脉动速度与时均速度之比基本上总是大于颗粒相的，而且这种差别在壁面附近就显示的更加明显。

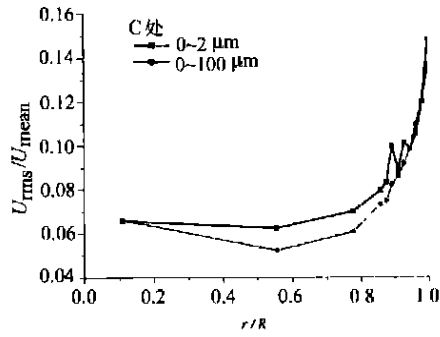


图 6 C 处颗粒的脉动速度与时均速度之比

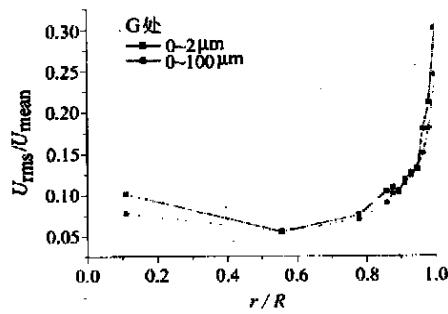


图 7 G 处颗粒的脉动速度与时均速度之比

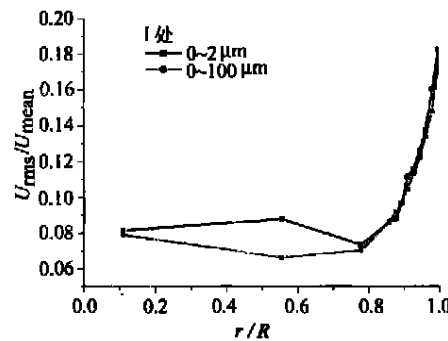


图 8 I 处颗粒的脉动速度与时均速度之比

从整体上看，颗粒的脉动速度与时均速度之比在接近壁面的区域有明显的上升趋势，这说明在靠近壁面的流场，气体颗粒两相流的湍流脉动强度较主流中心区大。在主流区域，湍流主要是由尺度相对于颗粒半径大，频率相对较低的漩涡来控制的，由于漩涡的尺度大、频率低，颗粒对气流的跟随性较好，因此  $50 \mu\text{m}$  以下颗粒在主流区的脉动速度与时均速度之比比较小。而在靠近壁面的边界层附近，湍流由尺度小、脉动频率很高的漩涡

控制，对于粒径为  $0 \sim 2 \mu\text{m}$  颗粒，湍流的漩涡尺度仍然大于其直径，加上其响应湍流脉动的松弛时间短，因此速度脉动值很大。其它粒径大的颗粒其松弛时间较长，而且尺度还有可能与漩涡的大小相当，不能很好的跟随湍流漩涡进行运动，因此脉动速度虽然有增加，但是不如  $0 \sim 2 \mu\text{m}$  的颗粒增加的快，即此时颗粒相的速度是小于气相速度。

另外，图 5 中的四组粒径分布的颗粒脉动速度

与时均速度的比值,在壁面附近有明显的脉动和随机分布特征,对代表气相速度的 $0 \sim 2 \mu\text{m}$ 颗粒,这种脉动和随机特征就表现的更加明显。这种现象一方面显示出在靠近壁面的区域湍流强度大、尺度较小的湍流漩涡的脉动和随机性,另一方面也表明颗粒运动的不规则性是由气体湍流引起的。

为了研究固体颗粒对整个流场的影响,把实验测量的代表气相速度的 $0 \sim 2 \mu\text{m}$ 颗粒的运动速度与单相纯气体流场进行了比较,如图9~图12。图中的 $U^+$ 和 $Y^+$ 分别是无量纲速度和无量纲距离其定义如下:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{v^*}, y^+ = \frac{y}{l^*}$$

$$v^* = v^*(x) = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, l^* = \frac{v}{v^*}$$

$$\tau_w = 0.03955 \rho u^{-2} Re^{-0.25}$$

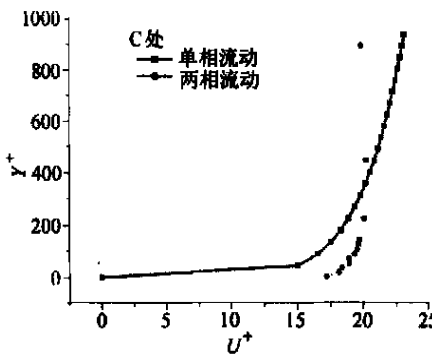


图9 C处两相流气体速度与单相气体速度比较

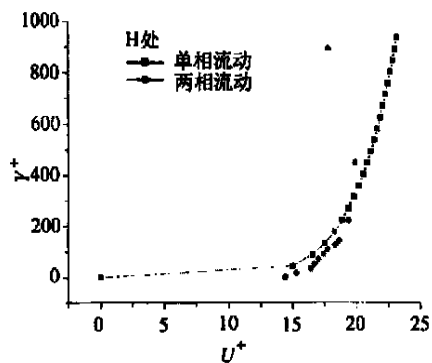


图10 H处两相流气体速度与单相气体速度比较

其中,  $\tau_w$  为壁面剪切力,  $v^*$  为摩擦速度,  $\rho$  为气体密度,  $Re$  为根据气体的粘性和管道的当量直径计算出的雷诺数。

图9~图12中的单相流动的气体速度是根据七分之一次方定律计算得到的,两相流动速度是PDA测得的无量纲的时均速度。由于两相流动的速度梯度在壁面附近较大,因此实验中在壁面附近布置了比较多的测点。

从这几组数据中可以看出颗粒的存在将会显著的影响气相的流动速度分布,使气相的主流区速度

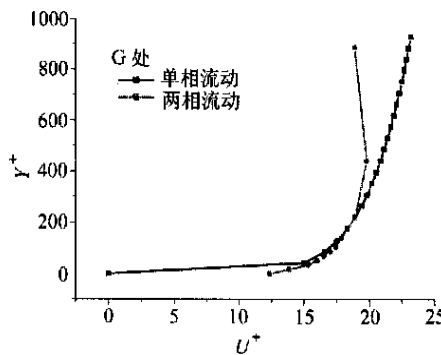


图11 G处两相流气体速度与单相气体速度比较

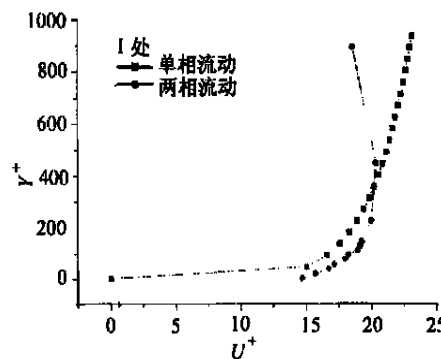


图12 I处两相流气体速度与单相气体速度比较

和壁面速度差别变小。在管道的主流区域,单相流动的气体速度高于两相流动,说明颗粒的存在抑制了气流的速度。而在接近壁面的区域,单相流动的气体速度却低于两相流动,此时颗粒的存在加速了两相流动的气相速度。在主流区域颗粒抑制气相的流动是由于虽然颗粒的体积分数很小,但是其密度是同体积气体的两千

倍。此时颗粒和气体之间的作用力主要是粘性阻力,颗粒在粘性力的作用下速度增加,而气体在粘性力的作用下速度减小。两相之间作用达到平衡后,气相速度将会比单相流动时速度减慢,但是在接近壁面的区域,速度梯度增大,粘性力和Saffman升力将是颗粒上的主要作用力。此时由于湍流强度的增大和脉动频率的升高,颗粒会在流场中产生尾迹区域,尾迹区域的破碎分离将会增加相应的气流速度。因此在接近壁面的区域两相流动的气相的速度有增大的趋势。

#### 4 结论

本次实验采用三维粒子动态分析仪测量了粒径范围在 $0 \sim 100 \mu\text{m}$ 的玻璃微珠在水平直通道中的气体-颗粒两相流的脉动速度和时均速度,颗粒相的体积分数在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 之间。根据目前实验结果分析,可以得到以下结论:

(1) 在两相流动的流场中粒径较大的颗粒,其脉动速度与时均速度之比将会相应减小,这说明气体一

(下转第49页)

系数最大, 2 号次之, 1 号最小, 这是由于 4 号管为单层, 导热热阻很小, 且无接触热阻。对于 1 号管, 由于  $d_2/d_1$  过大(波峰值过高), 导致流体流动产生脱流, 降低了总传热系数, 同时流动阻力也达到最大。

可见, 虽然波纹管流动阻力比直管高, 但总传热系数可达直管的 2 倍左右。以总传热系数达最高值为目标函数, 通过试验和计算机整理, 得出双层波纹管最佳设计波峰、波距等参数的优化尺寸如下:

$$\frac{d_2}{d_1} = 1.3 \sim 1.5 \quad \frac{L_2}{L_1} = 0.3 \sim 0.6$$

$$\frac{L_1}{d_1} = 0.35 \sim 0.55$$

## 4 结论

(1) 新型不锈钢波纹管特殊的波峰与波谷设计, 使流体沿流体方向在波峰处速度降低、静压增大; 波谷处速度增加、静压减小, 这样流体是在反复改变速度及压力梯度下进行, 产生的旋涡极大的破

坏了边界层的形成。同时采用优化设计尺寸, 能使总传热系数达直管 2.5 倍。

(2) 特殊滚压工艺成形的双层波纹管, 表面曲率大、可伸缩, 产生结垢容易脱落, 这就使其同时还具有较强的防垢和自动除垢能力。

(3) 新型不锈钢波纹管采用双层设计, 虽然总传热系数略有降低, 但比单层管有更强的抗外压和承压能力, 在实际工程中已获得了成功的应用<sup>[3]</sup>。

## 参考文献:

- [1] TAN YUFEL, CHEN JIAXIN. Structure and mainly performance test analysis of the new pattern stainless steel multilayer corrugated tube [A]. *Energy Conversion and Application* [C]. Wuhan: ICECA, 2001. 366—368.
- [2] 赵金星, 丰艳春. 波纹换热管的性能分析[J]. *管道技术与设备*, 1997, 6(3): 8—10.
- [3] 陈家新, 谭羽非. 压缩机中间冷却器采用不锈钢波纹管的试验研究[J]. *热能动力工程*, 2001, 16(6): 635—636.

(渠 源 编 辑)

(上接第 42 页)

颗粒两相流动的湍流强度会随粒径的减小而增加。在靠近壁面的区域, 两相流的流场湍流强度较大, 而且对粒径较小的颗粒, 其脉动速度的分布将出现脉动和随机分布的特征。

(2) 0~100  $\mu\text{m}$  颗粒的存在将会对气相流场的分布产生显著的影响。在管流的主流区域, 颗粒将会抑制气相的流动速度。而在壁面附近颗粒的存在将会影响原有的气体湍流结构, 由于尾迹区的产生和破碎, 两相流中气流的速度较单相流动增加。

## 参考文献:

- [1] 张金成. 湍流热边界层内超细颗粒运动的实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.
- [2] ELGHOBASHI S, ABOU-ARAB T, RIZK M, *et al.* Prediction of the particle laden jet with a two-equation turbulence model[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1984, 10(6): 697—710.
- [3] PARTHASARATHY R N, FEATH G M. Turbulence modulation in homogeneous dilute particle-laden flows[J]. *J Fluid Mech*, 1990, 220(11): 485—514.
- [4] RASHIDI M, HETSRONI G, BANERJEE S. Particle-turbulence interaction in a boundary layer[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1990, 16(6): 935—959.
- [5] TSUJI Y, MORIKAWA Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe[J]. *J Fluid Mech*, 1982, 120(7): 385—409.
- [6] LILJEGREN L M, VLACHOS N S. Laser velocimetry measurements in a horizontal gas-solid pipe flow[J]. *Experiments in Fluids* 1990, 9(4): 205—212.
- [7] KAFTORI D, HETSRONI G, BANERJEE S. Particle behavior in the turbulent boundary layer, I. Motion, deposition, and entrainment[J]. *Phys Fluids*, 1995, 7(5): 1095—1106.
- [8] KAFTORI D, HETSRONI G, BANERJEE S. Particle behavior in the turbulent boundary layer, II. Velocity and distribution profiles[J]. *Phys Fluids*, 1995, 7(5): 1107—1121.
- [9] RUDINGER G. Fundamentals of gas-particle flow[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- [10] LEE S, DURST F. On the motion of particles in turbulent duct flows[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1982, 8(2): 125—146.
- [11] LEE S, SRINIVASAN J. LDA technique for in situ simultaneous velocity and size measurements of large spherical particles in a two-phase suspension flow[J]. *Int J Multiphase Flow*, 1982, 8(1): 47—57.
- [12] BACHALO W D, HOUSERM J. Development of the Phase/Doppler spray analyzer for liquid drop size and velocity characterizations[A]. *20th joint propulsion conference AIAA/SAE/ASME* [C]. Cincinnati: AIAA Paper, 1984, 3705—3717.
- [13] 王 磊. 应用 PDA 测量多重旋转气固两相流场[J]. *流体机械*, 1999, 27(9): 9—12.
- [14] 邱建荣, 马毓义. 用 PDA 测量两相湍流流场时固体粒子的选择[J]. *气动实验与测量控制*, 1994, 8(1): 54—59.
- [15] 马仲明. 激光相位多普勒(PDA)超高速信号处理器的研制[J]. *仪器仪表学报*, 1996, 17(1): 61—66.
- [16] 王光华. 利用 PIV 技术对非光滑表面湍流边界层的实验研究[J]. *航空学报*, 1994, 20(5): 409—415.

(渠 源 编 辑)

水平直管道中气体—颗粒两相流实验研究 = **An Experimental Study of Gas-granule Two-phase Flows in a Horizontal Straight Pipeline** [刊, 汉] / XUE Yuan, YAO Qiang, ZHANG Jin-cheng (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 39~42, 49

The flow field of gas-granule two-phase flows was measured by using a laser technique. During a test with the help of a three-dimensional particle dynamics analyzer measurements were taken of the hourly average speed of glass micro-pearls consisting of 0 - 100  $\mu\text{m}$  granules and a pulse speed distribution with the volume fraction of the granule phase being between  $10^{-4}$  and  $10^{-5}$ . The test results indicate that even for granules with a diameter less than 100  $\mu\text{m}$  their existence in the gas-phase flow field will still give rise to a change in turbulent flow field structure. It has also been observed during the test that the turbulent-flow intensity of gas-granule two-phase flows will increase with the decrease in granule diameter. Furthermore, regarding the distribution of pulsation speed the characteristics of pulsation and random distribution can be observed in the neighborhood of tube wall surfaces. **Key words:** gas-granule two-phase flow, turbulent flow, particle dynamic analyzer

加热上升管内相及相界面密度径向分布特性实验研究 = **An Experimental Study on the Characteristics of Phase and Interphase-density Radial Profile in a Heated Riser Tube** [刊, 汉] / SUN Qi, YANG Rui-chang (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), ZHAO Hua (National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation under the China National Nuclear Power Research and Design Academy, Chengdu, China, Post Code: 610041) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 43~46

With the help of a dual-sensor optical probe measured and studied were the radial profile characteristics of both the void fraction of steam-water dual-phase flow and the interphase density in a heated riser tube. On the basis of test results the basic law of the phase and interphase density radial-profile was investigated. Through the investigation it is found that the void fraction of the two-phase flow in the heated riser tube exhibits in the radial direction a non-uniform distribution. Depending on different operating conditions, the void fraction distribution on the whole diameter may assume an approximate U-shape, saddle shape, or an approximate arc shape with a central zone located higher than a near-wall zone. The interphase density along the whole diameter features an approximate U-shaped distribution. **Key words:** two-phase flow, void fraction, interphase density, optical probe

新型不锈钢波纹管性能及强化传热的实验研究 = **An Experimental Study of the Performance of Novel Stainless Steel-made Corrugated Tubes and Their Intensified Heat Transfer** [刊, 汉] / TAN Yu-fei, CHEN Jia-xin (Electromechanical College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 47~49

Corrugated tubes made of a new type of stainless steel are multi-layer ones fabricated by the use of a special technique involving a concave wave formation process. In-tube flows are of an equal-diameter flow cluster type and arc-shaped flow cluster type, which can introduce a periodic change of flow speed and pressure. With the production of an intensive perturbation between cold and hot fluids a compound intensified heat exchange is realized. The corrugated tubes were tested for their pressure-bearing capacity and an experimental study of intensified heat exchange law was performed under water-water heat exchange conditions. The intensified heat exchange mechanism of the corrugated tubes was analyzed and an applicable range of optimized dimensions determined for the tubes, thus providing a theoretical basis for the use of corrugated tube-based heat exchangers. **Key words:** corrugated tube made of a new type of stainless steel, experimental study, intensified heat transfer

薄层毛细多孔介质湿区干燥过程相变传热传质常压模型 = **Phase-transformation Heat Transfer and Mass Transfer Constant-pressure Model for the Drying Process of a Thin-layer Capillary Porous Media Wet-region** [刊, 汉] / LU Tao, SHEN Sheng-qiang (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology,