

分级进风燃烧室内含颗粒的湍流反应流的实验研究¹⁾

郑晓川 袁书生 张 健²⁾ 张洪涛 周力行

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 应用三维激光粒子动态分析仪 (PDA), 对分级进风燃烧室内含颗粒的湍流反应流的气固两相瞬时速度场进行了实验测量, 同时对单相湍流反应流的瞬时速度场也进行了实验测量. 得到了两种情况下燃烧室内气固两相和单相气体的平均轴向与切向速度、轴向与切向脉动速度均方根值和轴向 - 切向脉动速度二阶关联量的分布.

关键词 湍流反应流, 气固流动, 分级进风, 燃烧室, 实验测量

中图分类号: V435.12 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2007)02-0202-08

引 言

大多数实际燃烧反应系统内的流动为含固体颗粒或液滴的湍流多相反应流动. 对各种燃烧室内的湍流反应流动, 国际上已进行了较多的实验研究, 文献中已有许多关于应用激光多普勒测速仪 (LDV) 测量湍流燃烧速度场的报道^[1~5]. 然而, 对燃烧反应装置内湍流多相反应流的气固两相速度场的实验测量则尚不多见. 最近 Pickett 等^[6]应用 LDV 对旋流燃烧室内煤粉燃烧的速度场进行了实验测量.

分级燃烧作为一种低 NO_x 燃烧技术, 其研究与应用得到越来越多的重视. 在各种工业煤粉燃烧器和燃烧室的设计中, 采用分级燃烧技术以控制和降低燃烧过程中 NO_x 的生成与排放正日益增多. 为了有效地利用分级燃烧技术, 达到高效燃烧和低 NO_x 排放的目的, 通过实验测量详细了解分级燃烧过程中气固两相速度场及其湍流脉动特性等各种物理量场的分布是很有必要的.

三维激光粒子动态分析仪 (PDA) 是一种非接触式的流场光学测量仪器. 它不仅可以测量颗粒或示踪粒子的瞬时速度, 还可以同时获得粒径的信息, 并具有较高的测量精度和空间分辨率, 因而尤其适用于各种含颗粒的多相流动的测量. 本文尝试以无相变的固体颗粒模拟煤粉颗粒, 将 PDA 应用于分级进风燃烧室内含颗粒的湍流反应流中气固两相瞬时速度场的测量, 探讨热态条件下气固两相流动的特

点. 作为对比, 还应用 PDA 对分级进风燃烧室内单相湍流反应流的瞬时速度场进行了实验测量.

1 实验测量装置

本文建立了分级进风燃烧室热态实验装置系统. 图 1 所示为圆柱形分级进风燃烧室. 在燃烧室进口处, 空气分为同轴的一次风和二次风, 一次风携带固体颗粒或示踪粒子从内环形通道进入燃烧室内, 二次风则通过外环形通道进入燃烧室, 气体燃料通过与内外环形通道同轴的中心管喷入燃烧室内. 燃烧室垂直向上布置, 中心燃料管、一次风管、二次风管和燃烧室的内直径依次为 8 mm, 40 mm, 58 mm 和 160 mm, 外直径依次为 14 mm, 44 mm, 68 mm 和 236 mm, 燃烧室长度为 1000 mm. 燃烧室的圆筒壁内衬有 35 mm 厚的耐火层. 筒体一侧沿轴向依次开有 3 个长 150 mm 和宽 95 mm 的长方形槽, 槽上嵌

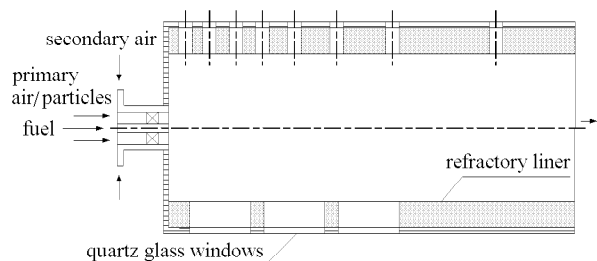


图 1 分级进风燃烧室

Fig.1 Combustor with staged air injection

2005-11-02 收到第 1 稿, 2006-11-13 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (50176026) 和清华大学实验室开放基金资助项目.

2) E-mail: jianzhang@mail.tsinghua.edu.cn

有 3 mm 厚的石英玻璃片作为实验测量用的光学窗口。

采用三维激光粒子动态分析仪 (PDA)，对分级进风燃烧室内含固体颗粒的湍流反应流的气固两相瞬时速度场进行了实验测量。此外，对该燃烧室内单相湍流反应流的气体瞬时速度场也进行了实验测量。PDA 测量系统的光路为后向布置式，测速范围为 $-500 \sim 500 \text{ m/s}$ ，测量精度为 1%。粒径测量范围为 $0.5 \sim 10\,000 \mu\text{m}$ ，测量精度为 4%。

如图 2 所示，PDA 测量系统的光路主要包括

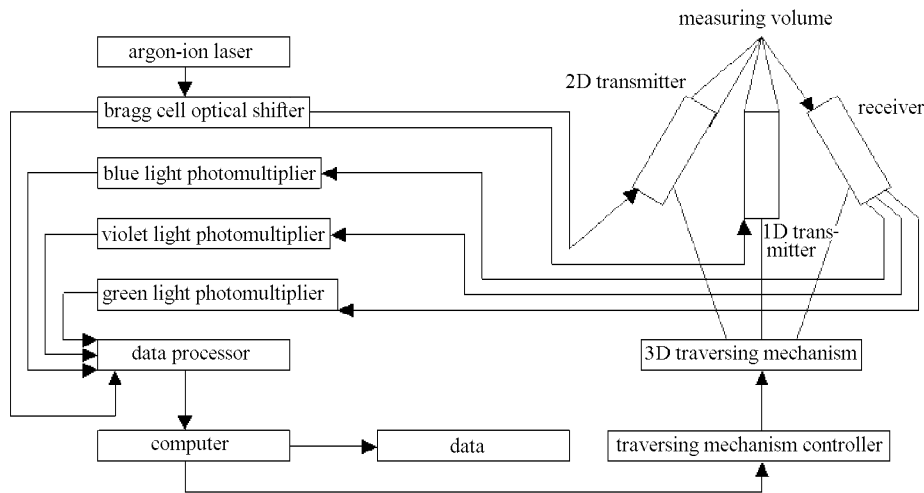


图 2 PDA 测量系统光路

Fig.2 Optics of the PDA measurement system

光电倍增管。

经过多次试验和反复比较，选取空心微珠（粉煤灰）作为实验中使用的固体颗粒和湍流燃烧实验中的示踪粒子。用于固体颗粒的空心微珠的粒径范围为 $2 \sim 400 \mu\text{m}$ ，平均粒径约为 $100 \mu\text{m}$ ，而用于示踪粒子的空心微珠的平均粒径则为 $1 \mu\text{m}$ 。空心微珠具有耐高温、球形度高、透光性好、PDA 测量的数据率较高等特点。

在含颗粒的湍流反应流实验中采用德国 PALAS 公司生产的 RBG2000 型颗粒弥散发生器作为固体颗粒的供粉器。其原理是，将固体颗粒充入已知容积的垂直金属管内，从金属管下端伸入的金属棒将管内的颗粒向上挤压，上端绕水平轴高速旋转的金属刷将挤压上来的颗粒打散，打散的颗粒再由气泵供入的高速气体携带，与另一部分一次风汇合后送入一次风管内。由于金属棒向上移动的速度是可以控制的，金属管横截面积已知，固体颗粒的堆积密度也是已知的，因而供粉量是一定的，并可以调节与

传输光路系统和接收光路系统等。在传输光路系统中，从激光器发射来的激光经 Bragg 分光器分光 and 频移，被分成绿、蓝、紫 3 色 6 束激光，然后通过光纤传输至二维发送器和一维发送器。二维发送器发送蓝光和绿光，一维发送器发送紫光。绿光测量沿 x 轴方向的速度， y 与 z 轴方向的速度则由蓝光和紫光组成的共同光束测量获得。本文进行的是二维测量，因而仅使用了二维发送器。在 PDA 的接收光路系统中，来自颗粒的散射光通过该系统聚焦、滤波并放大，然后传送到信号处理器。该系统包括 5 个

控制。在单相湍流反应流实验中，示踪粒子供粉器则采用了流态化的送粉方式^[7]。

2 实验工况参数

在对分级进风燃烧室内含颗粒的湍流反应流的气固两相速度场进行实验测量时，使用的气体燃料为纯度为 99.9% 的甲烷，其流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 。一次风流量为 $7.43 \text{ m}^3/\text{h}$ ，一次风通道内放置了 20° 的旋流叶片，以起到稳定火焰的作用。一次风中的颗粒供粉量为 0.3 kg/h 。二次直流风的流量为 $4.95 \text{ m}^3/\text{h}$ ，二次风率即二次风流量占总空气流量的比例为 40%。

在与上述工况相同的燃料、一次风和二次风流量条件下，对分级进风燃烧室内单相湍流反应流的速度场也进行了实验测量。对比两组实验结果，可以了解热态条件下颗粒对气相速度场及其湍流脉动特性的影响。

两组实验均沿燃烧室轴向选取了与底壁内侧面距离 $x/R = 0.69, 1.06, 1.81$ 和 3.19 的 4 个测量截

面, 其中 R 为燃烧室内半径. 在每一测量截面上沿半径方向又选取了 9 个测点, 其中靠壁面的 8 个测点为等间距布置, 相邻测点的径向间距均为 10 mm, 靠近中心的 1 个测点选取在距中心轴线 5 mm 的位置处, 该测点与邻近测点的径向间距也为 5 mm.

在每个测点上, PDA 测量均需满足有效数据为 5000 个或采样时间为 240 s 的条件. 除靠近燃烧室轴线的部分测点外, 两组实验中的大多数测点都能采集到 2500 个以上的有效数据. 在进行含颗粒的湍流反应流实验的数据处理时, 以 PDA 测出的粒径小于 $20\mu\text{m}$ 的颗粒作为气相示踪粒子, 这些粒子的平均直径为 $11\mu\text{m}$, 以 PDA 测出的粒径大于 $20\mu\text{m}$ 的颗粒代表固相, 这些颗粒的平均直径为 $113\mu\text{m}$. 在对湍流燃烧实验的数据进行处理时, 仅选择处理 PDA 测量出的粒径小于 $20\mu\text{m}$ 的示踪粒子的数据, 这些示踪粒子的平均粒径为 $11\mu\text{m}$. 它们的平均速度和脉动速度均方根值与仅选取处理粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的示踪粒子的数据得到的结果是一致的, 因而其速度测

量值可作为气体速度.

3 结果与讨论

图 3~ 图 5 给出采用 PDA 得到的分级进风燃烧室内含颗粒的湍流反应流的气固两相流场的测量结果, 包括气固两相轴向与切向平均速度、轴向与切向脉动速度均方根值和轴向 - 切向脉动速度关联量的分布.

图 3(a) 给出了气固两相的平均轴向速度分布. 由该图可以看出, 气固两相的轴向速度分布趋势基本相同, 轴向速度均在中心区域较高, 近壁区域较低, 且在壁面附近出现了回流. 该回流与燃烧室进口处截面的突扩有关. 在前两个截面上, 由于分级进风的影响, 两相轴向速度分布均出现了两个峰值. 在上游截面处, 两相轴向速度分布较为接近. 在下游截面 ($x/R = 3.19$) 上, 气固两相轴向速度则出现了差异, 气相轴向速度略大于颗粒相轴向速度.

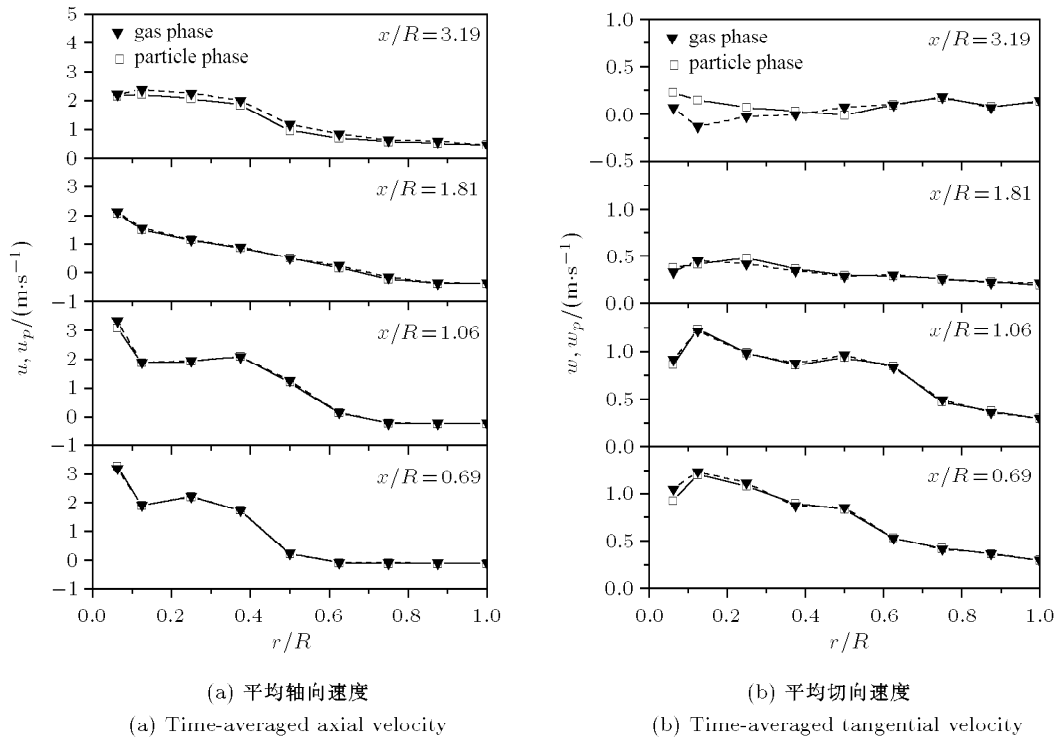


图 3 气固两相平均轴向与切向速度

Fig.3 Time-averaged axial and tangential velocities for gas and particles

图 3(b) 给出气固两相的平均切向速度分布. 在上游截面处, 气固两相的切向速度分布较为接近, 峰值位于轴线附近. 随着流动的发展, 气固两相的切向速度逐渐衰减. 在 $x/R = 3.19$ 的截面上, 气固两相切向速度已降低到较低的数值, 但二者出现了一

定的差异, 气相切向速度要低于颗粒相切向速度. 这是由于气相的黏性导致其切向速度的衰减更快.

图 4(a) 给出了气固两相轴向脉动速度均方根值的分布. 由图中可以看出, 在前 3 个截面上, 气固两相的轴向脉动速度均方根值分布是较为接近的,

均在中心区域较高，在近壁区域较低。气固两相轴向脉动速度均方根值分布的两个峰值反映了分级进风的影响。在下游截面 ($x/R = 3.19$) 上，随着两相平均轴向速度出现了差异，两相轴向脉动速度均方根值也出现了差异。该截面除中心轴线附近的个别点外，气相要明显低于颗粒相的轴向脉动速度均方

根值。从图 4(a) 还可以看到，除近轴区外，颗粒相和气相的轴向脉动速度均方根值沿轴向都是逐渐增大的。而在下游区域，颗粒相轴向脉动速度均方根值沿轴向的增加要快于气相，说明两相相互作用导致的湍流产生对颗粒相的贡献要大一些，颗粒相超过了气相的湍流脉动。

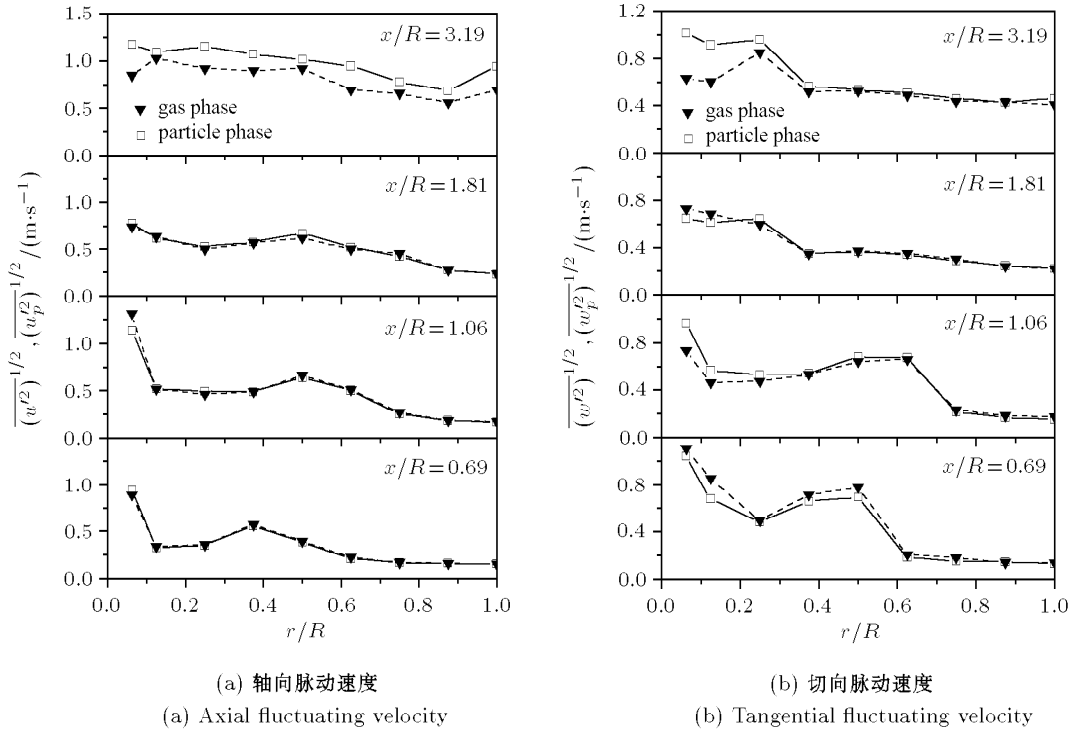


图 4 气固两相轴向与切向脉动速度均方根值

Fig.4 Root mean square of axial and tangential fluctuating velocities for gas and particles

图 4(b) 给出气固两相切向脉动速度均方根值的分布。气固两相切向脉动速度均方根值的分布趋势大致相同，均在中心区域较高，近壁区域较低。气固两相切向脉动速度均方根值有一定的差异，这种差异在下游截面处随两相平均切向速度差异的变大就更为明显一些。在 $x/R = 3.19$ 截面处的中心区域，颗粒相要明显高于气相的切向脉动速度均方根值。这也说明在下游区域内，两相湍流相互作用对颗粒相湍流产生的贡献要比气相大一些。比较图 4(b) 和图 4(a) 可以看到，气固两相的轴向脉动速度均方根值与各自的切向脉动速度均方根值是有差异的，这种差异在下游截面处就更明显一些。在 $x/R = 3.19$ 的截面上，气固两相的轴向脉动速度均方根值要明显大于各自的切向脉动速度均方根值。随着分级燃烧的进行，气固两相脉动速度的各向异性均呈逐渐增大的趋势。

图 5 给出气固两相轴向 - 切向脉动速度二阶关联量的分布。由该图可以看到，气固轴向 - 切向脉动速度二阶关联量的绝对值在中心区域较大，在近壁区域较小。在前 3 个截面上，气固两相轴向 - 切向脉动速度关联量相差不大，二者仅在中心区域有差异，且颗粒相大于气相轴向 - 切向脉动速度关联量的绝对值。在下游截面 ($x/R = 3.19$) 上，两相轴向 - 切向脉动速度关联量出现了较显著的差异，中心区域处的颗粒相轴向 - 切向脉动速度关联量绝对值明显大于气相的相应值。这进一步说明下游区域内两相相互作用导致的湍流产生对颗粒相的贡献要相对大一些。

图 6~ 图 8 给出分级进风燃烧室内含颗粒的湍流反应流的气相流场与单相湍流反应流的气体流场测量结果的比较，从图中可看出颗粒存在对湍流燃烧速度场及湍流脉动特性的影响。

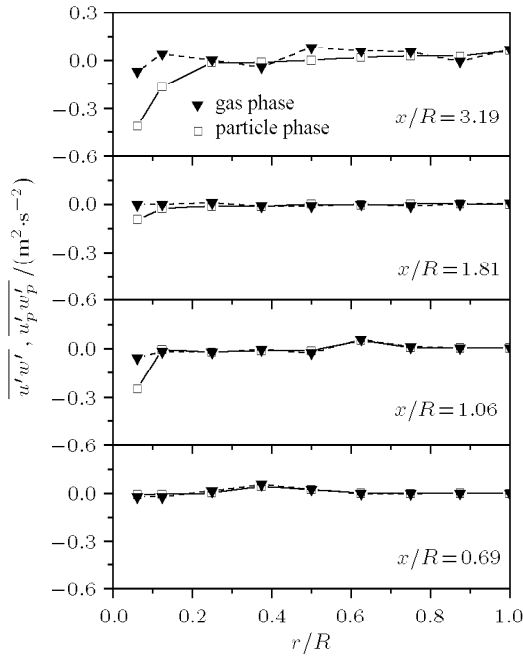
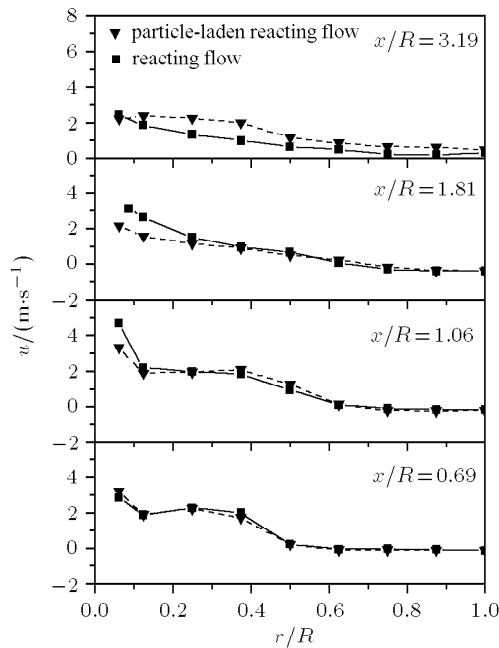


图 5 气固两相轴向 - 切向脉动速度二阶关联量

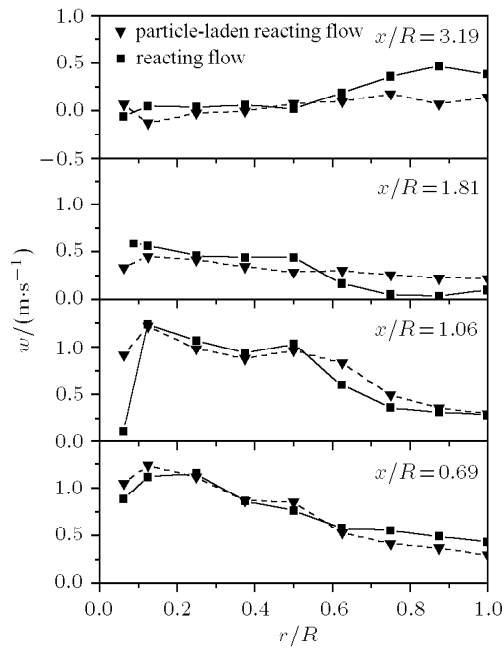
Fig.5 Second-order moment for the axial and tangential fluctuating velocities of gas and particles

图 6(a) 给出了两相流气相和单相气体平均轴向速度分布的对比. 由该图可以看到, 两相流气相和单相气体轴向速度分布有一定的差异. 在上游 $x/R = 1.06$ 和 1.81 的截面上, 单相气体的轴向速度峰值要高于两相流气相轴向速度的峰值. 在下游截面 $x/R = 3.19$ 处, 两相流气相的轴向速度值则要高于单相气体的轴向速度. 说明颗粒的存在在上游截面处削弱了气相的加速, 在下游截面处则延缓了气相的减速, 因而在含颗粒的湍流反应流中, 尽管颗粒为稀疏相, 其浓度较低, 但对气相速度场的影响却是不容忽视的.

图 6(b) 给出了两相流气相和单相气体平均切向速度分布的对比. 两相流气相与单相气体的切向速度有一定的差异. 在上游截面处中心轴线附近的两相流气相要大于单相气体的切向速度. 随流动的发展, 两相流气相比单相气体的切向速度要更快地趋于均匀. 在下游截面处, 两相流气相比单相气体的切向速度要低, 说明前者沿轴向衰减得更快一些. 颗粒的存在加速了下游区域气相切向速度的衰减.



(a) 平均轴向速度
(a) Time-averaged axial velocity



(b) 平均切向速度
(b) Time-averaged tangential velocity

图 6 气相平均轴向与切向速度

Fig.6 Time-averaged gas axial and tangential velocities

图 7(a) 给出了两相流气相和单相气体轴向脉动速度均方根值分布的对比. 由图可以看出, 在上游截面处, 单相气体一般要大于两相流气相的轴向脉

动速度均方根值, 说明颗粒削弱了气相沿轴向的湍流脉动. 在下游截面上, 两相流气相则超过了单相气体的轴向脉动速度均方根值. 颗粒的存在在流场

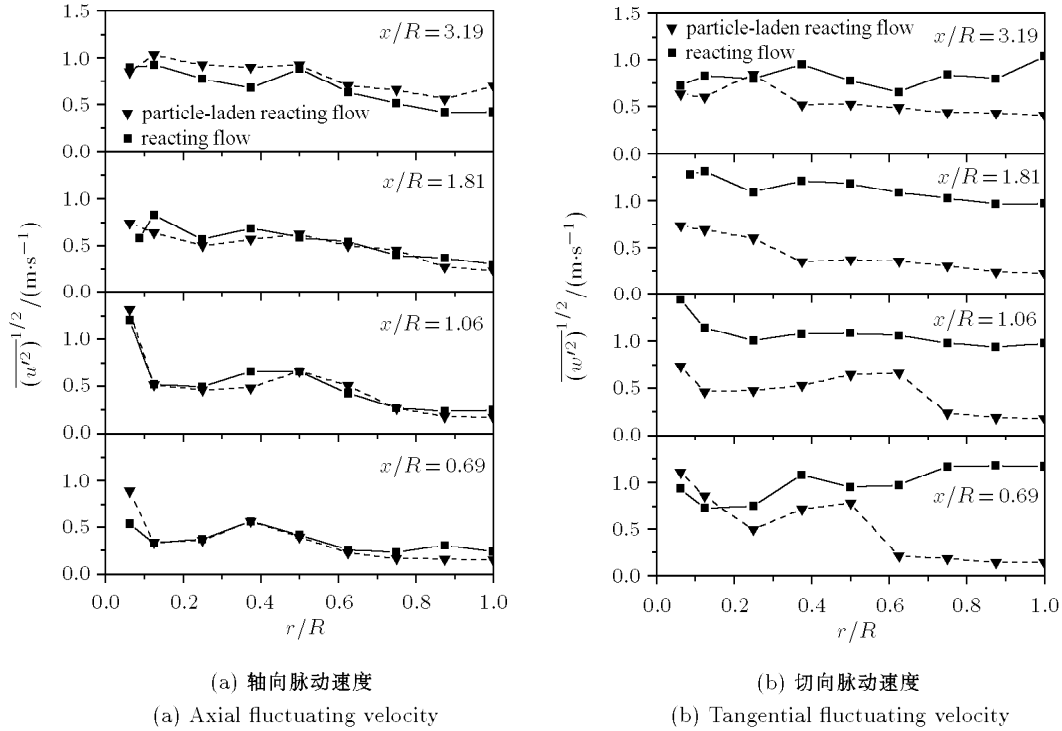


图 7 气相轴向与切向脉动速度均方根值
 Fig.7 Root mean square of gas axial and tangential fluctuating velocities

的不同区域可以削弱也可以增大气相轴向速度的湍流脉动，颗粒与气相湍流之间存在着复杂的相互作用。

图 7(b) 给出了两相流气相和单相气体切向脉动速度均方根值分布的对比。由图可以看出，两相流气相和单相气体切向脉动速度均方根值的分布差异较大。除少数区域外，两相流气相均明显低于单相气体的切向脉动速度均方根值。单相气体的切向脉动速度均方根值不仅在中心区域较高，而且在近壁区域也较高。颗粒的存在明显削弱了气相沿切向的湍流脉动，这也说明两相湍流相互作用对气相切向湍流脉动的产生起着减弱的作用。与图 7(a) 相比，单相气体湍流脉动的各向异性较为明显，其切向脉动明显大于轴向脉动，颗粒相的存在则使气相湍流脉动的各向异性有所削弱，即颗粒相起着某种使气相湍流脉动趋于各向同性的作用。

图 8 给出了两相流气相和单相气体轴向 - 切向脉动速度二阶关联量的分布的对比。在前两个截面上，两相流气相和单相气体的轴向 - 切向脉动速度关联量相差不大，二者的数值均较低。在后两个截面处，单相气体的轴向 - 切向脉动速度关联量在中心区域较高，单相气体一般要明显大于两相流气相

的轴向 - 切向脉动速度关联量。颗粒的存在对下游截面处气相的 Reynolds 切应力分量即湍流输运有所削弱。因此，两相湍流相互作用在增大颗粒相轴向 -

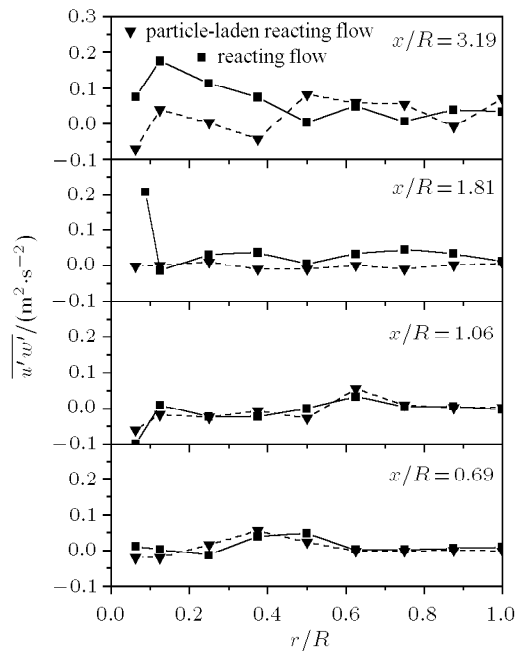


图 8 气相轴向 - 切向脉动速度二阶关联量
 Fig.8 Second-order moment for the gas axial and tangential fluctuating velocities

切向脉动速度关联量绝对值的同时,对气相 Reynolds 切应力分量则起着限制增长的作用.

4 结 论

本文应用 PDA 对分级进风燃烧室内含颗粒的湍流反应流的热态气固两相瞬时速度场进行了测量,同时对单相湍流反应流的气体瞬时速度场进行了测量,得到如下结论:

(1) 含颗粒的湍流反应流的气固两相平均轴向速度在中心区域较高,在近壁区域较低,两相平均轴向速度分布趋势基本相同.气固两相平均切向速度的峰值均位于轴线附近,两相平均切向速度沿轴向逐渐衰减,且气相平均切向速度沿轴向衰减得更快一些.

(2) 气固两相的轴向与切向脉动速度均方根值均在中心区域较高,在近壁区域较低.两相轴向与切向脉动速度均方根值分布在上游截面处各自均较为接近,在下游截面上各自均出现了较明显的差异.在下游截面处,颗粒相的轴向与切向脉动速度均方根值均高于气相的相应值,且气固两相的轴向脉动速度均方根值均明显大于各自的切向脉动速度均方根值.两相轴向脉动速度均方根值沿轴向均呈逐渐增加的趋势.

(3) 气固两相轴向 - 切向脉动速度关联量分布在上游截面处较为接近.在下游截面的中心区域,颗粒相比气相轴向 - 切向脉动速度关联量的绝对值要大.二者在近壁区域均具有较低的数值.

(4) 含颗粒的湍流反应流与单相湍流反应流相比,颗粒相的存在对上游区域气相沿轴向的加速和下游区域气相的减速均起到了延缓的作用,并加快了气相切向速度沿轴向的衰减.颗粒相在上游区域削弱了气相轴向速度的湍流脉动,在下游区域则增

大了气相轴向速度的湍流脉动.颗粒相对气相切向速度的湍流脉动和轴向 - 切向 Reynolds 应力分量均起到了削弱的作用,使气相湍流脉动的各向异性有所减弱.

致谢 感谢清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室阎德中高级工程师和姚强教授在实验测量中给予的帮助.杨炜平和张鹏参加了本文实验的部分工作.

参 考 文 献

- 1 Gouldin FC, Depsky JS, Lee S-L. Velocity field characteristics of a swirling flow combustor. *AIAA Journal*, 1985, 23: 95~102
- 2 Brum RD, Samuelsen GS. Two-component laser anemometry measurements of non-reacting and reacting complex flows in a swirl-stabilized model combustor. *Experiments in Fluids*, 1987, 5: 95~102
- 3 Hedman PO, Warren DL. Turbulent velocity and temperature measurements from a gas-fueled technology combustor with a practical fuel injector. *Combustion and Flame*, 1995, 100: 185~192
- 4 Vanoverberghe KP, van den Bulck EV, Tummers MJ. Confined annular swirling jet combustion. *Combustion Science and Technology*, 2003, 175: 545~578
- 5 Anacleto PM, Fernandes EC, Heitor MV, et al. Swirl flow structure and flame characteristics in a model lean premixed combustor. *Combustion Science and Technology*, 2003, 175: 1369~1388
- 6 Pickett LM, Jackson RE, Tree DR. LDA measurements in a pulverized coal flame at three swirl ratios. *Combustion Science and Technology*, 1999, 143: 79~107
- 7 普勇, 张健, 周力行. 旋流燃烧室内湍流燃烧速度场的实验研究. *力学学报*, 2003, 35: 341~347 (Pu Yong, Zhang Jian, Zhou Lixing. Measurement of the velocity fields for turbulent combustion in a swirl combustor. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 35: 341~347 (in Chinese))

EXPERIMENTAL STUDY ON PARTICLE-LADEN TURBULENT REACTING FLOW IN A COMBUSTOR WITH STAGED AIR INJECTION¹⁾

Zheng Xiaochuan Yuan Shusheng Zhang Jian²⁾ Zhang Hongtao Zhou Lixing

(*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract The Three-Dimension Laser Particle Dynamic Analyzer (PDA) was used in the present experimental study. The instantaneous gas and particle velocities were measured for the particle-laden turbulent reacting flow in a combustor with staged air injection. The instantaneous gas velocity was also measured. The distributions of time-averaged axial and tangential velocities, root mean squares of axial and tangential fluctuating velocities, and second-order correlation moments of axial and tangential fluctuating velocities were obtained both for the gas and particle phases and for the single gas phase.

Key words turbulent reacting flow, gas-particle flow, staged air injection, combustor, experimental measurement

Received 2 November 2005, revised 13 November 2006.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50176026) and the Laboratory Open Fund of Tsinghua University.

2) E-mail: jianzhang@mail.tsinghua.edu.cn