

壁面粗糙度对水平后台阶气粒两相流动影响的 PDPA 实验研究

张夏 周力行

(清华大学工程力学系, 煤的清洁燃烧国家重点实验室, 100084)

(010-62782231, zhoulx@mail.tsinghua.edu.cn)

摘要 用相位多普勒颗粒测速仪(PDPA)测量了颗粒的平均与脉动速度,研究了壁面粗糙度对水平后台阶气粒两相流动的影响。研究表明,壁面粗糙度减小颗粒纵向平均速度,增大颗粒纵向和横向脉动速度。壁面粗糙度对流场中不同位置处颗粒运动影响的强弱不同,其中逆流区处较弱,下游处较强。壁面粗糙度对不同粒径颗粒运动影响的强弱不同,其中对细颗粒的影响较弱且被局限在壁面附近;对粗颗粒的影响较强且扩散到整个流场。

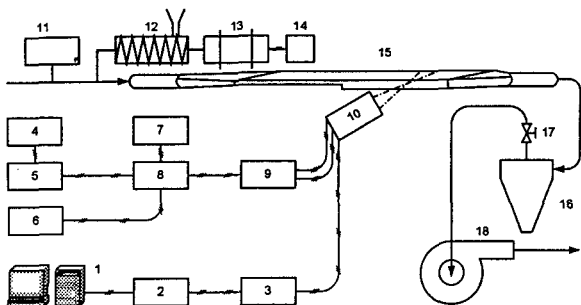
关键词 PDPA 测量, 气粒两相流动, 颗粒-壁面碰撞, 壁面粗糙度

1 引言

在受限气粒两相流动中,颗粒的运动受颗粒-壁面碰撞的影响很大。由于摩擦和非弹性变形,碰撞后颗粒动量将减小;壁面的粗糙度将引起碰撞后颗粒速度在各个方向上的重新分配。颗粒-壁面碰撞的早期实验研究[1-3],没有考虑壁面粗糙度。后来, Frank等[4]研究了玻璃珠与不同壁面粗糙度的碰撞,结果表明颗粒反射角受到壁面粗糙度的强烈影响。不久前 Sommerfeld 等 [5-6]先后用颗粒跟踪测速仪(particle tracking velocimetry)和相位多普勒颗粒测速仪(phase-Doppler particle anemometer, PDPA)研究了壁面粗糙度对气粒两相水平槽道流动的影响,发现壁面粗糙度能够显著改变颗粒与壁面碰撞后的反弹行为,并导致颗粒的重新弥散,壁面粗糙度能够减小颗粒平均速度,增大颗粒脉动速度。但是,到目前为止仍然缺乏壁面粗糙度对气粒两相流动整个流场和不同粒径颗粒影响的详细研究,本文用 PDPA 研究了水平后台阶气粒两相流动壁面粗糙度对流场不同区域和不同粒径的颗粒运动的影响。

2 实验系统与测量方法

实验系统如图 1 所示,由实验段、供风、供粉及粉末回收、测量系统构成。实验段为水平放置的后台阶槽道,由进口段和测量段两部分组成,其中进口段部分高 20mm,长 1000mm,后台阶高 $H=18\text{mm}$,测量段部分高 $Y=38\text{mm}$,长 1000mm。进口段和测量段宽度均为 400mm,相当于 10 倍以上的槽道高度,可以认为测量段的中心断面满足二维条件。测量段的上壁面和一侧壁面为普通玻璃板,实验段的其它部分为 A_3 钢板;下壁面内侧覆盖一面光滑、另一面粗糙的毛玻璃板,翻置毛玻璃板可以改变下壁面的粗糙度。因使用的颗粒为玻璃微珠,与玻璃同属一种材料,硬度必然接近,因此实验结束时毛玻璃的两个表面均未出现显著磨损。实验结束后,从毛玻璃的三个不同位置取



1. 计算机 2. 信号处理器 3. 光电转换单元 4. 变压器 5. 电源 6. 电源稳压器 7. 激光控制器 8. 激光器 9. 分光组件 10. 发射接收单元 11. D 型管测速计 12. 纹笼供粉器 13. 电机 14. 变频器 15. 实验段 16. 旋风分离器 17. 调节阀 18. 风机

图 1 后台阶两相流动实验系统

样，并用 TALOR-HOBSON 公司制造的 Talysurf 5P-120 + PC 表面形貌测量系统扫描其粗糙面的粗糙度。三份取样的表面形貌结构如图 2 所示，粗糙度特征如表 1 所示。对照可见，S2 和 S3 取样比较具有代表性，将这两个样品的数据合并处理，可以得到如图 3 所示的粗糙度倾向与粒径关系曲线。测量面布置在距离后台阶 80mm、160mm、320mm 和 640mm 的四个断面上。各测量面每隔 2mm 布置一个测点，每点取样时间限 3 分钟，样本限 30000 个，实验中大部分测点都能取到设定的样本数。

考虑到供粉方便，供风系统采用负压方式，即在管路系统末端由风机抽吸形成负压。系统上游装有 D 型管测速计测定流量，旋风分离器出口与风机之间装有阀门控制流量。实验中环境温度在 20℃ 左右，实验段中心断面气体进口平均速度为 $U_m=13\text{m/s}$ (波动在 2% 以内)，雷诺数为 17309。

供粉采用纹笼给粉器，通过变频器输出频率的调整可以控制供粉量。实验中颗粒质量载荷为 0.13，但限于纹笼特性，供粉不完全均匀。粉末在 D 型管测速计与实验段之间由负压吸入。粉末回收系统为旋风分离器，回收粉末后的空气直接排空。实验中使用的颗粒为材料密度为 $\rho_p=2500\text{kg/m}^3$ ，平均粒径分别为 $50\mu\text{m}$ 和 $150\mu\text{m}$ 的两组球形玻璃微珠。这两种颗粒在 640mm 测量面的槽道下部、中部和上部三个代表性测点的粒径分布如图 4 所示，颗粒的其它性质如表 2 所示。

测量系统采用清华大学煤的清洁燃烧国家重点实验室引进的丹麦 DANTEC 公司制造的 58N50 型三维相位多普勒颗粒测速仪 PDKA (Phase Doppler Particle Anemometer)，其光路为后向散射。用这种光路配置并用上壁面做测量窗口时，可以同时测量粒径和三维速度，但坐标变换后横向速度的误差过大；从侧面窗口测量可以避免这种误差，但后向散射光路需要的测量窗口宽度较大，只能改用对测量窗口要求较小的发射镜头接收，这种配置不能测量粒径。实验中应用这两种光路配置，即用焦距均为 500mm 的发射镜头和接收镜头构成的后向散射由上壁面测量 640mm 断面的粒径；用焦距为 1000mm 的镜头同时作为发射器和接收的器配置从侧面窗口测量二维速度，此时上下壁面附近各有大致 5mm 的测量盲区。

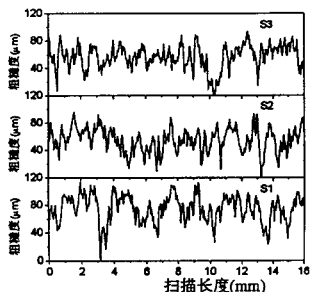


图2 毛玻璃粗糙面形貌结构

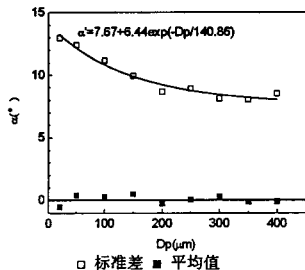


图3 毛玻璃粗糙面粗糙度倾角与粒径关系曲线

表1 毛玻璃粗糙面粗糙度性质

编号	最大粗糙度(μm)	平均粗糙度(μm)	标准差(μm)
S1	113.74	74.94	19.35
S2	96.30	55.27	17.22
S3	94.66	57.02	17.14

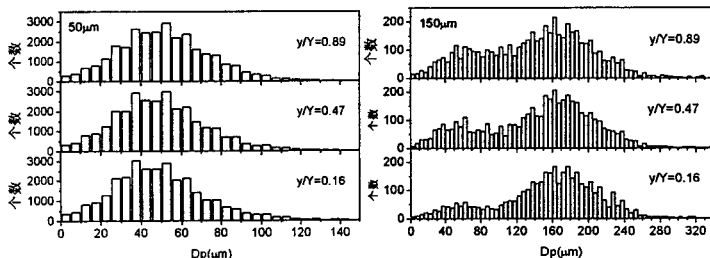


图4 640mm 测量面上距下壁面不同位置处颗粒粒径分布图

表2 不同粒径颗粒的性质

平均粒径(μm)	粒径范围(μm)	球形度(%)	弛豫时间(ms) ^{a)}	St 数
50	0-130	94.3	19.2	12.8
150	0-320	97.5	172.6	115.1

3 实验结果与讨论

颗粒平均速度和脉动速度的测量结果如图5到图8所示,图中符号RW和SW分别代表粗糙壁面和光滑壁面。80mm、160mm、320mm和640mm,分别相当于4.44H、8.89H、17.78H和35.56H。由于后台阶流动的气相回流区长度大致为7H左右,因此这几个断面分别为逆流区断面、逆流区末端断面、正流发展区和充分发展区。从图中可以看出,对于50μm和150μm的颗粒,壁面粗糙度增大时,颗粒纵向平均速度减小(图5)、横向与纵向脉动速度增大(图7,8)。50μm颗粒和气相间的滑移较小,而150μm颗粒在几个测量面都表现出明显的滑移以及对上游运动特性的保持;正是由于这种原因,尽管对于相

同的粗糙壁面细颗粒感受到的粗糙度倾角较粗颗粒感受到的稍大(图 3), 但对于同样的壁面变化, 细颗粒所受影响较小, 而粗颗粒所受影响却较大, 其中细颗粒在下游壁面附近表现出来的受粗糙度变化影响的现象可能在很大程度上也要归因于其中的粗颗粒。

粗糙度增大使颗粒纵向平均速度减小、横向和纵向脉动速度增大的直接原因是粗糙度增大时, 颗粒与壁面碰撞后的速度在各方向上的重新分配增强, 粗糙度增大引起颗粒速度概率密度分布变宽则是这种增强的结果和引起颗粒统计平均量出现相应变化的机理。在第一个断面的逆流区内, 颗粒-壁面碰撞比较频繁, 由于细颗粒的追随性较好, 可以预计两种颗粒中进入逆流区的部分粒径都会较小, 另外, 逆流区颗粒的横向速度和纵向速度差别较小, 粗糙度引起的颗粒速度在两个方向上的互相转化差别不大, 这两个方面的原因决定了颗粒纵向平均速度和纵向与横向脉动速度不会发生明显变化。逆流区末端断面处, 颗粒-壁面碰撞频繁、颗粒横向速度较大、同时存在进口颗粒的输运以及与壁面碰撞后的颗粒输运, 因此这个断面上初步表现出颗粒运动受粗糙度变化的影响, 即纵向平均速度略受粗糙度影响, 而横向平均速度、纵向与横向脉动速度明显受到壁面粗糙度变化的影响。到了充分发展区, 颗粒横向平均速度较小, 颗粒-壁面碰撞更加频繁, 因此表现出更明显的粗糙壁面减小颗粒纵向平均速度、增大纵向和横向脉动速度的效应。需要说明的是实验给出的是宽分布颗粒的结果, 对窄分布颗粒只具有定性意义。

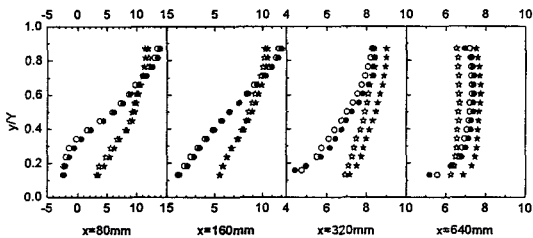


图 5 后台阶两相流动颗粒纵向平均速度分布(m/s)

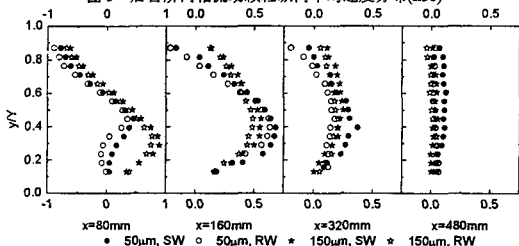


图 6 后台阶两相流动颗粒横向平均速度分布(m/s)

4 结论

- 1) 壁面粗糙度增大时, 颗粒纵向平均速度减小, 纵向和横向脉动速度增大。
- 2) 壁面粗糙度对逆流区中颗粒运动影响较弱, 下游处较强。
- 3) 壁面粗糙度对细颗粒运动影响较弱, 对粗颗粒的影响较强。

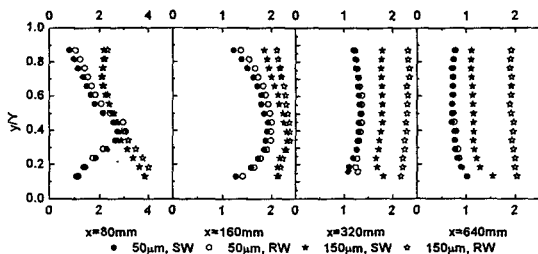


图7 后台阶两相流动颗粒纵向脉动速度分布(m/s)

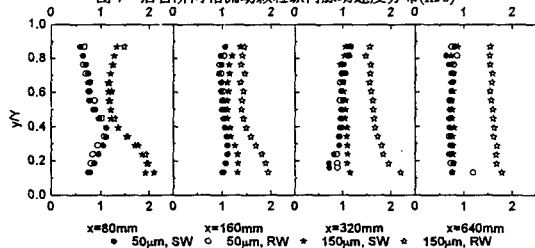


图8 后台阶两相流动颗粒横向脉动速度分布(m/s)

致谢 本文为国家重点基础研究专项经费资助项目子课题 G1999-0222-08 的研究成果。感谢清华大学热能系李彦和阎德中老师在 PDPA 测量中的帮助。

参考文献

1. G. Grant and W. Tabakoff, Erosion Prediction in Turbomachinery Resulting from Environmental Solid Particles, *J. Aircraft*, Vol.12, pp.471-478, 1975.
2. S. Matsumoto and S. Saito, On the Mechanism of Suspensions in Horizontal Pneumatic Conveying: Monte Carlo Simulation Based on the Irregular Bouncing Model, *J. Chem. Engr. Japan*, Vol.3, pp.83-92, 1970.
3. H. Brauer, Report on Investigations on Particle Movement in Straight Horizontal Tubes, Particle-Wall Collision and Erosion of Tube Bends, *J. Powder Bulk Solids Tech.*, Vol.4, pp.3-12, 1980.
4. Th. Frank, K. P. Schade and D. Petrak, Numerical Simulation and Experimental Investigation of a Gas-Solid Two-Phase Flow in a Horizontal Channel, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.19, pp.187-198, 1993.
5. M. Sommerfeld and N. Huber, Experimental Analysis and Modelling of Particle-Wall Collisions, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.25, pp.1457-1489, 1999.
6. J. Kussin, and M. Sommerfeld, Experimental Studies on Particle Behavior and Turbulence Modification in Horizontal Channel Flow with Different Wall Roughness, *Experiments in Fluids*, Vol.33, pp.143-159, 2002.