

文章编号: 1000-8055(2009)08-1818-06

颗粒粒径和气载比改变时湍流调制的变化

王 兵, 刘 毅, 王希麟

(清华大学 航天航空学院 北京市 3E 能源重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 采用相多普勒颗粒分析仪(PDPA)测试了两相圆湍射流速度场,研究了颗粒雷诺数较小情况下,粒径和气载比变化时颗粒对气固两相圆湍射流的湍流调制作用.实验结果表明:颗粒粒径的减小或气载比的增加均使颗粒对气相湍流度的削弱作用增强.通过无量纲化的分析,表明颗粒粒径的减小对气相湍流度的削弱程度强于气载比增加时对湍流度的削弱程度.

关 键 词: 气固两相流; 圆湍射流; 湍流调制; 气载比; 粒径; 相多普勒颗粒分析仪

中图分类号: O359+.1

文献标识码: A

Turbulence modulations caused by change of particle size and particle mass loading ratio

WANG Bing, LIU Yi, WANG Xi-lin

(Beijing 3E Energy Key Laboratory, School of Aerospace,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The velocity fields in particle-laden two-phase round turbulent jets were measured by means of phase Doppler particle analyzer (PDPA). The turbulence modulations caused by the change of particle size and particle mass loading ratio were studied under the condition of small particle Reynolds number. The measured results of turbulence intensities show that particles have more pronounced effects on the attenuation of the gas-phase turbulence, if the particle diameter reduces, or the particle mass loading ratio increases. The dimensionless analysis shows that the attenuation of turbulence intensity introduced by decreasing the particle size is higher than that by increasing the particle mass loading ratio.

Key words: gas-solid flow; round turbulent jet; turbulence modulation;
particle mass loading ratio, particle size;
phase Doppler particle analyzer (PDPA)

在航空动力技术中,燃料颗粒的混合、弥散以及燃烧产物的扩散都是值得关注的基本问题,前者影响着燃烧装置的效率,后者决定了燃烧污染物的控制手段^[1].两相射流是航空动力技术中的原型流动之一,应用广泛.颗粒相与流体相的相互作用机理是两相射流中尚未解决的重要问题.

影响两相相间作用的参数很多.在气固两相圆湍射流中,颗粒粒径和气载比是影响颗粒对湍

流调制作用的重要参数. Levy 和 Lockwood^[2]用一维激光多普勒测速仪(LDV)测量了 5 组不同粒径范围的颗粒对气相湍流度的影响,其研究结果表明当颗粒较小时,随着粒径的减小,颗粒对气相湍流度的削弱作用更强.燕小芬^[3]研究了同一气载比下 250 μm 和 75 μm 的玻璃微珠和铜粉对气相湍流的调制作用,实验结果显示玻璃微珠和铜粉的加入均削弱了气相湍流度且随着粒径的减

收稿日期: 2008-07-30; 修订日期: 2009-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(50876053; 50706021)

作者简介: 王兵(1977-),男,河北唐山人,讲师,博士,主要从事动力推进技术及湍流多相流动与燃烧的研究.

小颗粒对气相湍流度的削弱作用加强. Sheen, Jou 和 Lee^[4] 测量了 210 μm 的聚苯乙烯颗粒在不同气载比下对气相湍流的调制作用, 实验结果显示聚苯乙烯颗粒的加入均削弱了气相湍流度且颗粒对气相湍流度的削弱作用随着气载比增加而加强.

已有研究表明^[5-6], 颗粒粒径和气载比的改变均能显著的影响颗粒对湍流的调制程度, 但这两种措施中哪种对湍流调制的影响更显著的研究报道较少. 为此本文采用相多普勒颗粒分析仪(PDPA)设计实验工况并进行测量, 研究两相圆湍射流中颗粒粒径和气载比改变时颗粒对气相湍流调制作用的变化规律, 采取无量纲分析方法对比这两种措施对湍流调制程度的异同, 旨在为实现两相湍流的控制提供依据.

1 实验系统和测量设备

实验系统由气相流动系统、颗粒流动系统和示踪粒子添加系统组成, 如图 1 所示. 环境空气经风机进入实验系统, 经流量计和整流阀调节流量, 然后流过示踪粒子添加系统, 这时示踪粒子被加入到气流中, 携带示踪粒子的气流再经整流段和稳定段调整, 经收缩段从喷口射出.

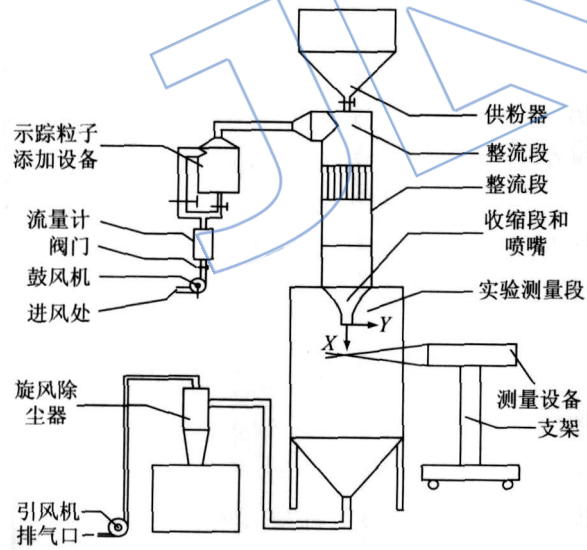


图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup

为了研究颗粒对湍流的调制, 实验中需要加入选用的颗粒. 颗粒由供粉器加入, 供粉器是研究者特别设计加工制造的, 具有严格控制颗粒流量的功能. 颗粒加入后, 与主流的空气混合, 一起经过整流段、稳定段和收缩段, 最后喷出形成稳定两相射流.

射流喷出的气体和颗粒混合物由引风机通过旋风除尘器进行两相分离. 颗粒将回收利用, 而示踪粒子则通过在引风机的出口处安装除尘布袋进行收集.

实验中, 指定射流流向为 X 方向, 径向为 Y 方向. 观测段为一个 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 的玻璃窗观察室.

本文中喷口直径为 20 mm, 单相射流出口截面中心点速度为 6.39 m/s, 因此出口雷诺数为 8490.

实验采用丹麦丹迪公司生产的 58N50 型三维激光相多普勒颗粒分析仪(PDPA)对两相射流进行测量. 速度测量精度为 1%, 粒径测量精度为 4%.

实验系统的误差包括气相流量波动、颗粒流量波动及颗粒和气相混合等因素带来的误差. 采用本实验装置和测量设备对同一工况进行了多次测量, 以验证实验系统和测量系统的可信度和可重复性. 结果表明, 同一工况在不同时间多次测量的结果一致, 最大误差为 5%, 平均误差为 0.75%, 测量结果能反映流动规律.

2 测量结果及分析

本文采用的示踪粒子是与空气密度相当的粒径为 0~20 μm 的空心玻璃微珠. 颗粒相选用不同粒径的实心玻璃微珠. 实验工况参数如表 1 所示.

表 1 工况列表
Table 1 Condition list

工况	气载比 γ	体积分数/%	粒径 $d_p/\mu\text{m}$
工况 1	3.92	0.16	360
工况 2	5.79	0.24	360
工况 3	3.92	0.16	190

以工况 1 为本文实验研究的基准工况. 与工况 1 相比, 工况 2 采用相同粒径的颗粒, 但气载比加大, 从而通过工况 1 和工况 2 的实验测量比较来研究气载比改变时气相湍流调制作用变化. 与工况 1 相比, 工况 3 的颗粒气载比相同, 但颗粒粒径不同, 通过工况 1 和工况 3 研究颗粒粒径改变时气相湍流调制作用的变化.

2.1 气相湍流度随颗粒气载比的变化

图 2 和图 3 给出了在不同气载比时, $X/D=10$ 和 $X/D=20$ 截面气相湍流度的测量结果.

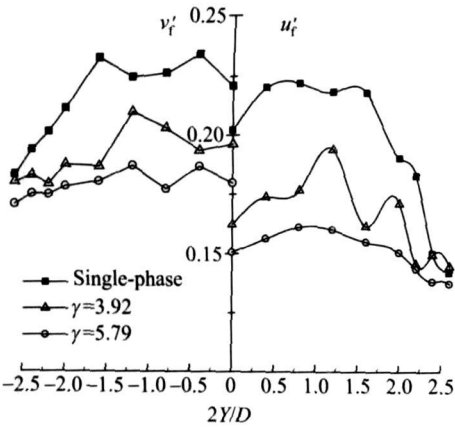


图 2 轴向和径向气相湍流强度沿 $X/D=10$ 截面的分布

Fig. 2 Axial and radial turbulence intensity profiles at $X/D=10$

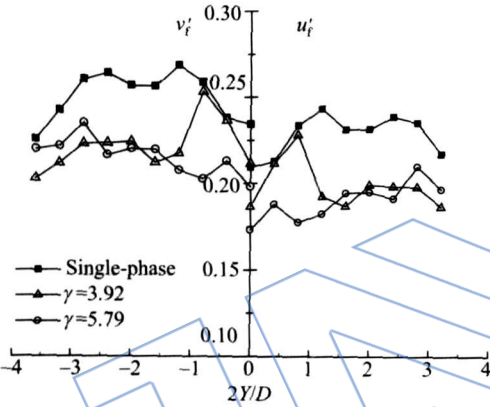


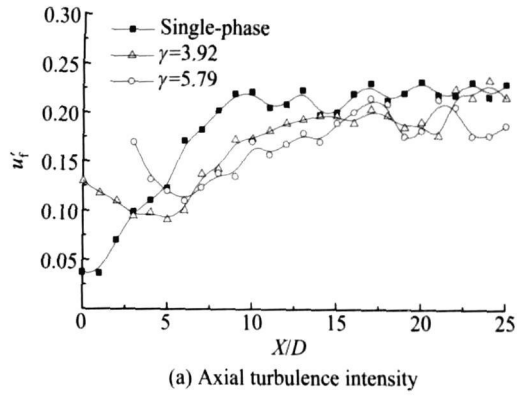
图 3 轴向和径向气相湍流强度沿 $X/D=20$ 截面的分布

Fig. 3 Axial and radial turbulence intensity profiles at $X/D=20$

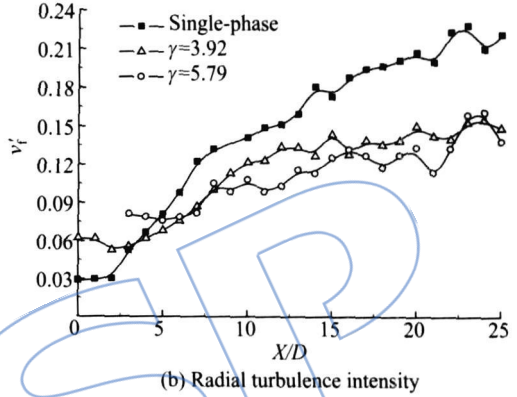
图中轴向湍流强度 $u_i' = \sqrt{u'^2} / U_m$, 径向湍流强度 $v_i' = \sqrt{v'^2} / U_m$, U_m 代表该截面中心轴线处的气相速度. 由于研究湍流强度沿着射流径向 Y 的变化规律, 因此这里的数据采用射流喷嘴半径 $D/2$ 进行无量纲处理.

图 2 和图 3 表明, 在射流的远场, 径向湍流强度略高于轴向湍流强度. 颗粒加入后无论轴向湍流强度还是径向湍流强度都低于单相流动的湍流强度. 随着颗粒气载比的增大, 湍流强度被减小的程度增大. 例如在 $X/D=10$ 截面, $2Y/D=1$ 处在无颗粒负载时, 轴向湍流强度可达 22.5%, 而当气载比为 3.92 时, 气相湍流强度减少到 17.5%, 增大气载比到 5.79 时, 则减少到 16%.

图 4 给出了沿着射流中心轴线上气相湍流强度的变化, 并与单相工况进行了比较. 这里采用射流



(a) Axial turbulence intensity



(b) Radial turbulence intensity

图 4 气相湍流强度沿射流中心轴线的分布

Fig. 4 Axial and radial turbulence intensity along the axis line

直径 D 进行测量长度的无量纲处理. 实验结果显示: 沿着射流中心轴线, 在 $X/D > 5$ 的区域颗粒的加入削弱了气相湍流强度, 且随着气载比的增加, 颗粒对气相湍流强度的削弱作用加大.

根据测量的两相速度场, 可以得到两相滑移速度, 从而计算出颗粒雷诺数

$$Re_p = \frac{|u_t - u_p| d_p}{\nu}$$

在气载比分别为 $\gamma = 3.92$ 和 5.79 时, 颗粒的雷诺数范围分别为 $2.3 \sim 74.7$ 和 $0.1 \sim 60.1$, 不超过 400, 是小颗粒雷诺数.

2.2 气相湍流强度随颗粒粒径的变化

图 5~ 图 7 给出了在负载不同粒径颗粒时, $X/D=10$ 和 $X/D=20$ 截面气相湍流强度的测量结果.

图 5 和图 6 表明, 在射流的远场, 颗粒加入后无论轴向湍流强度还是径向湍流强度都低于单相流动的湍流强度. 随着颗粒粒径的减小, 湍流强度被减小的程度增大. 如图所示, 颗粒对湍流的调制具有明显的方向差异型, 颗粒对径向湍流强度的作用强于对轴向湍流强度的作用.

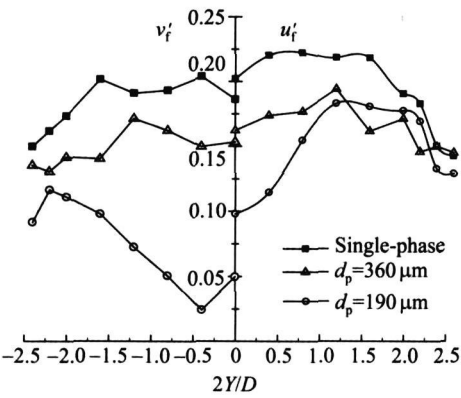


图 5 轴向和径向气相湍流强度沿 $X/D=10$ 截面的分布
Fig. 5 Axial and radial turbulence intensity profiles at $X/D=10$

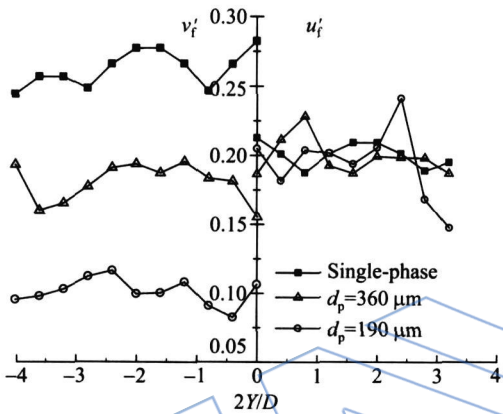


图 6 气相湍流强度沿 $X/D=20$ 截面的分布
Fig. 6 Axial and radial turbulence intensity profiles at $X/D=20$

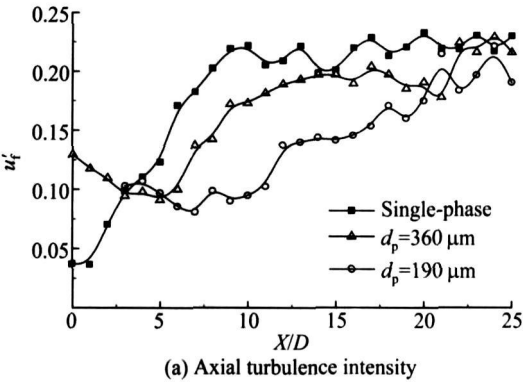
图 7 给出了沿着射流中心轴线上气相湍流的变化, 并与单相工况进行了比较. 实验结果表明, 沿着射流中心轴线, 在 $X/D>5$ 的区域颗粒的加入削弱了气相湍流, 且随着颗粒粒径的增加, 颗粒对气相湍流的削弱作用减弱.

根据测量的两相速度场, 在颗粒粒径分别为 $d_p=360\text{ }\mu\text{m}$ 和 $190\text{ }\mu\text{m}$ 时, 颗粒雷诺数的范围分别为 2.3~74.7 和 0.76~32.4, 颗粒雷诺数远低于产生非线性脱落尾涡的临界雷诺数 400.

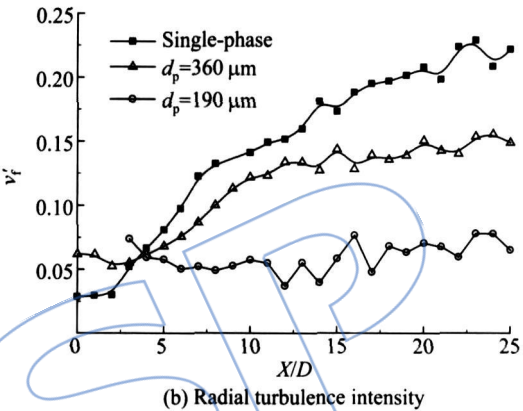
2.3 颗粒粒径和气载比改变对气相湍流的影响

2.3.1 无量纲研究方法

为了比较颗粒粒径的减小和气载比的增加这两种措施对湍流调制作用的效果, 采用无量纲的分析方法将湍流度的变化定量化, 从而进行分析. 参考文献[6]中定义的湍流变动参数的定义, 即 $(\sigma_{TP}-\sigma_F)/\sigma_F$, 来表示颗粒相对气相湍流度削弱大小



(a) Axial turbulence intensity



(b) Radial turbulence intensity

图 7 气相湍流强度沿中心轴线的分布
Fig. 7 Axial and radial turbulence intensity along the axis line

$$(\sigma_{TPi}-\sigma_{TP})/\sigma_{TP}=W_{CFI_i} \tag{1}$$

其中 σ_{TPi} 表示变化参数之后两相湍流中气相湍流强度, σ_{TP} 为基准工况下的两相湍流中气相湍流强度.

除了将湍流度的变化无量纲化外, 还需将粒径的变化和气载比的变化无量纲化. 参照上述参数, 用公式(2),(3)表示粒径和气载比的变化率

$$\alpha_d=(d_{pi}-d_p)/d_p \tag{2}$$

$$\beta_v=(v_i-v)/v \tag{3}$$

其中 d_p 为参考工况的粒径; d_{pi} 为对比工况的粒径; v 为参考工况的气载比; v_i 为对比工况的气载比. 通过上述两个参数 α_d , β_v 实现了粒径和气载比变化的无量纲化.

为了分析参数变化时湍流调制的变化, 还需进一步得到单位变化参数时的湍流调制变化, 即用湍流度的变化率除以粒径的变化率, 如式(4)计算出单位粒径变化率对应的湍流度的变化率, 将这个值定义为 α ; 用湍流度的变化率除以气载比的变化率, 如式(5)计算出单位气载比的变化率对应的湍流度的变化率, 将这个值定义为 β .

通过比较 α 和 β 的值,可以看出粒径的变化和气载比的变化对湍流度的削弱程度.

$$\alpha = \frac{W_{CTI_i}}{\alpha_d} = \frac{W_{CTI_i}}{(d_{pi} - d_p)/d_p} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{W_{CTI_i}}{\beta_Y} = \frac{W_{CTI_i}}{(\gamma_i - \gamma)/\gamma} \tag{5}$$

2.3.2 变颗粒相参数时颗粒调制湍流分析

下面以工况 1 为基准工况,首先得到同一粒径下气载比增加后的工况 2 的各测量点的 W_{CTI_i} ,然后除以气载比变化率,求出相同粒径下单位气载比变化率下的湍流度的变化率 β .同理,以工况 1 为基准,求出同一气载比下粒径变化后的工况 3 各测量点的 W_{CTI_i} ,再除以粒径变化率,求出单位粒径变化率下的湍流度变化率 α .

图 8 给出了 $X/D=10$ 截面处单位粒径变化率下的湍流度轴向和径向分量的变化率以及单位气载比变化率下的湍流度分量变化率,图 9 则是在 $X/D=20$ 截面处的结果.

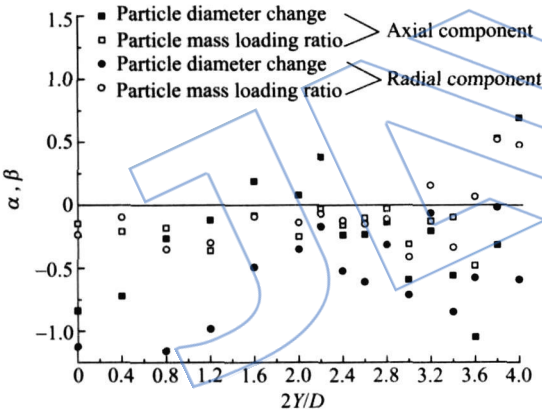


图 8 在 $X/D=10$ 截面粒径和气载比改变时对气相湍流调制作用的影响
Fig. 8 Effects of changing particle diameter or particle mass loading ratio on turbulence modulation at $X/D=10$

由于颗粒加入后,在大部分区域气相湍流度减小,因此湍流度变化 W_{CTI_i} 应为负值,且数值越小,说明颗粒削弱湍流的程度越强.当 W_{CTI_i} 为正数时,表明工况参数变化后测量点处的湍流没有被削弱反而被增强了,但这样的区域主要在射流近场.

图 10 给出了沿射流中心轴线单位粒径变化率下的湍流度轴向和径向分量的变化率以及单位气载比变化率下的湍流度分量变化率的无量纲分

析结果.

在 $X/D=10$ 和 20 截面上,在测量范围的大部分区域,颗粒粒径变化引起调制作用变化的无量纲量 α 值总体上小于气载比变化引起调制作用变化的无量纲量 β 的值,说明变化粒径引起湍流度的变化强于变化气载比,即为了得到强度更弱的气相湍流,减小颗粒粒径这一手段比增加颗粒气载比更加奏效.在流动的径向分量上,这个作用效果更强烈.

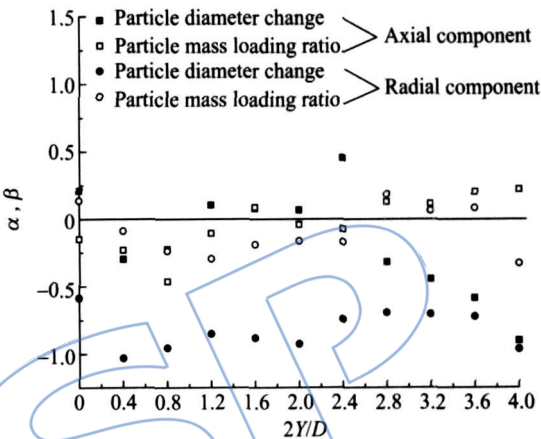


图 9 在 $X/D=20$ 截面粒径和气载比改变时对气相湍流调制作用的影响
Fig. 9 Effects of changing particle diameter or particle mass loading ratio on turbulence modulation at $X/D=20$

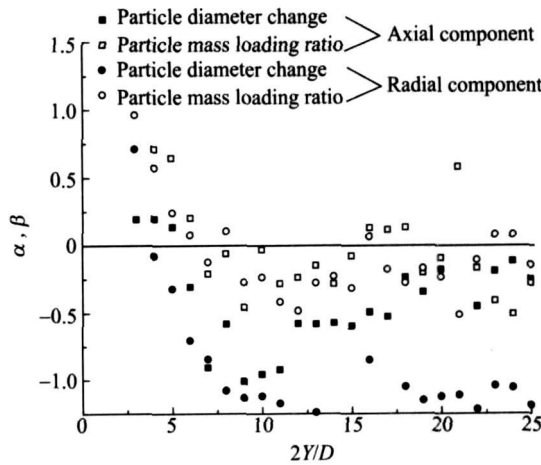


图 10 沿射流中心轴线粒径和气载比改变时对气相湍流调制作用的影响
Fig. 10 Effects of changing particle diameter or particle mass loading ratio on turbulence modulation along the jet axis line

沿中心轴线,在 $X/D>5$ 的射流远场区域,无论在轴向还是在径向颗粒粒径变化导致湍流调

制变化的数据值均小于颗粒气载比变化时的情况,这再次说明粒径的减小对湍流度的削弱作用更大.

3 结 论

采用 PDPA 测量两相圆湍射流的速度场,研究了负载不同粒径颗粒和不同气载比时的湍流调制,得到如下结论:

- 1) 根据实验测量得到的颗粒雷诺数小于 400,颗粒的加入均削弱气相湍流度;
- 2) 随着颗粒气载比的增加或颗粒粒径的减小,颗粒对气相湍流度的削弱作用增强;
- 3) 无量纲分析方法表明,颗粒粒径的降低比气载比的增加对气相湍流度的削弱作用更有效.

参考文献:

[1] 刘欣,姜楠. 喷口加齿湍射流增强混合的实验与数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 884-890
LIU Xin, JIANG Nan. Experimental and numerical study

of jet mixing enhancement with wedged nozzle [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(5): 884-890 (in Chinese)
[2] Levy Y, Lockwood F C. Velocity measurement in a particle laden turbulent free jet [J]. Combustion and Flame, 1981, 40: 2313-2320
[3] 燕小芬. 气固两相圆湍射流场流动特性的 PDPA 实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006
YAN Xiaofen. PDPA experimental investigation on the flow characteristics of gas-solid turbulent jets [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
[4] Sheen H J, Jou B H, Lee Y T. Effect of particle size on a two-phase turbulent jet [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1994, 8: 315-327.
[5] Gore R A, Crowe C T. Effect of particle size on modulating turbulent intensity [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1989, 15(2): 279-285
[6] 崔金雷. 气固两相圆湍射流相间调制规律的实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004
CUI Jinlei. Experimental investigation on the modulation law between the phases in gas-solid round jets [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)