

# 水平液-固流中颗粒抑制 湍流的行为和条件<sup>1)</sup>

路展民 刘清泉 刘大有 杨秀芝  
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 用激光多普勒分相测量方法, 考察了水平含颗粒水流的主流区, 亚毫米颗粒对水流湍流有抑制行为, 湍流削弱程度与颗粒浓度、流动发展长度、水流雷诺数等因素有关。按照不出现尾涡脱落和至少能响应一部分大尺度涡的运动这两个基本条件, 分析了湍流抑制与有关参数的依赖性。结果表明, 流动尺度和颗粒尺寸之比, 对于颗粒消耗而不增生湍流起着最主要的作用。在一定的水流雷诺数下, 只要这一比值很大, 亚毫米颗粒就会表现出对湍流的抑制作用。

**关键词** 液-固流, 湍流抑制, 激光测速法

## 引 言

颗粒和湍流的相互作用, 对两相流理论具有重要意义, 很久以来, 是人们努力探讨的基本问题之一。70年代中期以前, 在含颗粒水流方面有关此问题的资料和观点, 钱宁、万兆惠在《泥沙运动力学》一书中已作了总结<sup>[1]</sup>。近20余年来, 激光测量技术, 特别是能分别测量连续相和分散相速度的技术的发展, 为此问题的研究提供了较以前更为可信的实验资料<sup>[2-4]</sup>。观察到湍流被颗粒所削弱、加强, 或局部削弱、局部增强的三种情况, 表明在不同的条件下, 颗粒对湍流可以有相反的作用。R. A. Gore 和 C. T. Crowe 发现, 绝大部分使湍流削弱的实验条件都符合  $d_p/le < 0.1$ , 其中  $d_p$  为颗粒直径,  $le$  为流体含能涡的尺度, 而绝大部分使湍流增强的实验条件都符合于  $d_p/le > 0.1$ <sup>[5]</sup>。由此他们提出: 较小的颗粒因能被含能涡带动而消耗这部分涡的部分动能, 便使湍流削弱; 而尺度接近含能涡的尺度的颗粒, 因产生尺度相近的尾涡而增强湍流。随后, G. Hetsroni<sup>[6]</sup>对各家实验数据作了进一步的考察并提出, 很大颗粒之所以能增强湍流, 可以用颗粒雷诺数  $Re_p$  超过一定值 ( $> 400$ ) 后, 颗粒尾涡肯定会脱落来解释; 而当  $Re_p < 100$  时, 由于肯定不会有涡的脱落, 因此不会出现增强湍流的现象。M. Rashidi 等<sup>[7]</sup>用氢气泡示踪法观察含颗粒水流壁面区流体的猝发和颗粒的关系, 发现较小的颗粒因能减少壁面喷发次数而使湍流强度和雷诺切应力减弱; 较粗的颗粒因能增加这种喷发次数, 能使湍流强度和雷诺切应力增强。这说明颗粒对壁面湍流的发生也有着不同的影响。

现有的关于液-固体的颗粒与湍流相互作用的实验资料中, 使用激光测量方法的并不多。鉴于液-固体水平流动对于泥沙运动力学和水环境问题的重要性, 本文用激光分相测速方法,

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金资助项目。

1995-04-21收到第一稿, 1995-08-24收到修改稿

考察了含颗粒的水平水流中, 亚毫米颗粒抑制主流区湍流的行为要点, 包括抑制作用与颗粒浓度、流动发展距离、水流雷诺数等因素的关系; 同时并分析了颗粒消耗而不增生湍流的条件, 由此解释了参量  $d_p/l_e$  的作用和本文的实验结果

## 1 实验描述

实验设备如图1所示, 容器(A)中的含颗粒水流向下流经长1m, 内径2cm 的水平玻璃圆管, 入容器(B)后由泵驱动返回(A). 取管道中轴上分别处于上、中、下游的三个点  $a, b, c$  为测量点, 离管道入口的距离是:  $a$  为10, cm,  $b$  为39cm,  $c$  为77cm. 因(A)内有明显的大尺度涡, 在管道入口处湍流脉动很剧烈. 流动的目视状况是: (1) 含重质的玻璃珠(比密度  $\gamma=2.65$ ,  $d_p=0.18\sim 0.20\text{mm}$ ) 的水流, 在最高水流雷诺数时也不能达到管道全长的悬浮, 在下游的下壁面上有明显的推移层形成, (2) 含近中性的聚苯乙烯颗粒( $\gamma=1.05$ ,  $d_p=0.56\text{mm}$ ) 的水流, 在很低水流雷诺数时即可在管道全长上都达到均匀悬浮, (3) 含中重度的阳离子树脂颗粒( $\gamma=1.60$ ,  $d_p=0.45\sim 0.56\text{mm}$ ) 的水流介于以上两者之间, 在较高雷诺数时可达到管道全长上的悬浮

图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

测量设备使用由一维测速计(LDV)以及由两相信号分相器、计数型信号处理器和微机组成的激光多普勒两相数据分相采集系统. 分相方法采用可见度-基座复合判别法<sup>[8]</sup>. 一般地说, LDV 法具有非接触法的优点, 通过LDV 分相测量, 已获得了不少有价值的的数据, 显示出该法的作用, 但是它也存在局限性. 由B. Ruck<sup>[9]</sup>所进行的研究表明, 当流体中分布着较大的颗粒时, 由于它们对光束的扰动, 探测体中的干涉条纹发生畸变, 使单个粒子穿越干涉条纹区所产生的多普勒信号的内部周期不相等, 可引起速度概率分布的加宽. 这种现象会使测得的湍流脉动强度比真实值高. 本文实验中在含很低浓度颗粒测得的水流湍流度反而较未加颗粒时测得的稍高, 应是这种影响存在的反映; 此外, 分相测量中误判别的影响也会使流体相湍流脉动值表观地增大. 在分析LDV 法分相测量结果时, 特别当颗粒浓度低, 或湍流脉动低时, 必须考虑到上述因素

## 2 实验结果及其解释

### 2.1 颗粒浓度对湍流抑制的影响

用  $d_p = 0.45 \sim 0.50\text{mm}$  以及  $0.15 \sim 0.20\text{mm}$  两种尺寸的聚苯乙烯颗粒, 每种至少取两种浓度, 在水流雷诺数  $R_{ef} = 7 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$  的流速范围内作测量。大量采样数据的统计结果说明, 在浓度不太低时, 水流湍流强度的测量值均比未加颗粒时下降。对  $d_p = 0.15 \sim 0.20\text{mm}$  聚苯乙烯颗粒, 使用多种浓度及  $R_{ef} = 14700$  时, 在下游  $c$  处观察浓度对水流湍流度  $E$  的削弱量  $\Delta E$ , 以  $\Delta E/E (\%)$  示于图 2。由图可见, 从低浓度到中等浓度,  $\Delta E$  随浓度而增加的趋势很明显。但是当浓度继续增加时,  $\Delta E$  增加的趋势逐渐减弱。用颗粒浓度对颗粒沉降速度的影响可以解释该现象: 对水平含颗粒水流, 一般认为垂向湍流脉动支持颗粒的悬浮, 按 D. A. Zabel<sup>[10]</sup> (1981) 对水平液-固悬浮流的分析, 消耗在固体颗粒悬浮上的湍动能即悬浮功应为

$$B = (\gamma - 1)g_w \phi \quad (1)$$

其中,  $w$  为颗粒沉降速度,  $\phi$  为颗粒体积浓度,  $g$  为重力加速度, 当  $\phi$  增加时, 由于介质有效粘性的增加,  $w$  随之下落, 因此  $B$  随  $\phi$  增长的趋势在浓度高时会有所缓和。

### 2.2 流动发展中颗粒影响湍流强度的表现

在管道上游  $a$  处、中游  $b$  处和下游  $c$  处, 分别测量含  $d_p = 0.18 \sim 0.20\text{mm}$ , 平均体积浓度  $\bar{\phi}$  估计为 0.32% 的玻璃珠的水流的湍流强度, 结果示于图 3。其中横坐标  $L$  是从管道入口到测点的距离。由图可见, 在上游和中游, 水流湍流的削弱很明显。但在下游部位, 结合测量误差来考虑, 削弱的数量甚小。从颗粒和涡的交互作用可解释该现象: 在上游和中游, 主流区中颗粒浓度较高, 也有很多能带动颗粒使之悬浮的大涡旋, 因此有较大一部分湍动能被消耗; 随后, 在流动沿管道发展过程中, 由于大涡数量愈加减少以及主流区内颗粒浓度的不断下降, 颗粒对水流湍动能量的消耗量减小。

### 2.3 颗粒抑制湍流与水流雷诺数的关系

在水流中加入  $d_p = 0.45 \sim 0.50\text{mm}$  以及  $d_p = 0.17 \sim 0.20\text{mm}$  的聚苯乙烯颗粒, 变动水流的流量, 在下游  $c$  处考察水流雷诺数  $R_{ef}$  对颗粒抑制湍流的影响, 结果示于图 4。由图可见, 随着  $R_{ef}$  的下降, 颗粒削弱湍流的相对量值呈增长趋势。对此现象可作以下解释: 按 Newitt 等<sup>[11]</sup> (1955) 的半经验公式判断, 在实验中的最低雷诺数下, 这两种含颗粒水流也是属于悬浮良好的流动。因此  $R_{ef}$  改变时, 主流区内颗粒浓度的变化很小, 由式 (1) 所表达的悬浮功  $B$  的值应基本不变或变化

图2 浓度的影响

Fig. 2  $\Delta E/E$  versus concentration

图3 流动发展长度的影响

Fig. 3  $\Delta E/E$  versus flow length

图4  $R_{ef}$  的影响

Fig. 4  $\Delta E/E$  versus  $R_{ef}$

很小;但是  $Re_f$  下降时, 湍动能  $Pe$  却随之下降, 因此水流湍流强度被削弱的相对值  $B/Pe$  随  $Re_f$  的下降而增大

#### 2.4 粗重颗粒对湍流的抑制

粗重颗粒仅能响应大尺度涡的运动, 而且由于浓度分布不均匀, 在主流区中浓度较低, 因此消耗的湍动能较少. 本文的实验能证实此预测: 加相同体积的阳离子树脂颗粒 ( $d_{p1} = 0.45 \sim 0.56\text{mm}$ ) 以及聚苯乙烯颗粒 ( $d_{p2} = 0.15 \sim 0.18\text{mm}$ ), 按式 (1) 估算, 悬浮功之比为  $B_1/B_2 = 112$ . 但是在  $Re_f = 1.4 \times 10^4$  及  $\bar{\Phi} = 2.0 \times 10^{-3}$  的条件下, 在  $c$  处测得加入前者时水流湍流度  $E_1 = 3.85\%$ , 而加入后者时为  $E_2 = 3.81\%$ . 两者差别甚小, 消耗的湍动能应无量级的区别

### 3 主流区中颗粒抑制湍流的条件之演绎

在理论上可以确认, 能被流体带动而又不会产生尾涡脱落的颗粒, 仅能削弱湍流, 不能增强湍流, 不会产生尾涡脱落的条件是

$$Re_p = \frac{V_r d_p}{\nu} < 110 \quad (2)$$

其中,  $\nu$  为流体粘性系数,  $V_r$  为颗粒相对速度. 此式的具体展开依赖于  $V_r$  的表达式, 因此  $V_r$  是一个关键性的参数. 在泥沙运动力学中一般假定, 颗粒在水平方向的相对速度为零, 而垂向相对速度等于重力沉降速度  $w$ , 实际上在湍流中, 由于涡的作用, 水平方向有一个脉动性质的相对速度, 垂直方向的相对速度也是脉动的. 因此在二维水平流动中,  $V_r$  应由纵向相对速度  $V_{rl}$  及垂向相对速度  $V_{rp}$  合成. 相应的颗粒雷诺数是

$$Re_p = (Re_{pl}^2 + Re_{pp}^2)^{1/2} \quad (3)$$

其中  $Re_{pl} = V_{rl} d_p / \nu$ ,  $Re_{pp} = V_{rp} d_p / \nu$ . 为了分析式 (3) 与有关流动参量的依赖, 必须分别将  $Re_{pl}$  及  $Re_{pp}$  表达于有关参量. 一般地表示  $Re_{pl}$  并非易事. V. G. Levich<sup>[12]</sup> 对尺寸大于最小涡尺度的颗粒, 运用各向同性湍流理论的公式, 在忽略附加质量力及假定阻力系数不变等条件下, 推导出气-固两相流中无重力时颗粒相对速度的最大值的表达式. 本文对该式作加上附加质量力的改造以估算液-固流中无重力作用时, 颗粒相对脉动速度的最大值  $\tilde{v}_r$ . 相应  $\tilde{v}_r$  的颗粒雷诺数  $\tilde{Re}_p$  可表为

$$\tilde{Re}_p = 0.504 \left[ \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f} \right]^{1/2} \left[ \frac{\rho_p + \frac{1}{2}\rho_f}{\rho_f} \right]^{1/3} \left[ \frac{4}{C_d} \right]^{1/3} \left[ \frac{d_p}{D} \right]^{4/3} Re_f \quad (4)$$

其中,  $C_d$  为阻力系数,  $D$  为流动尺度,  $\rho_f, \rho_p$  分别为流体、颗粒的密度. 在本文所讨论的主流区内假定为各向同性湍流, 则  $\tilde{Re}_p$  就是纵向颗粒雷诺数  $Re_{pl}$  的最大值, 也应是垂向颗粒雷诺数  $Re_{pp}$  中脉动部分的最大值, 因此合成雷诺数为

$$Re_{pc} = (Re_{pw}^2 + 2\tilde{Re}_p^2)^{1/2} \quad (5)$$

其中  $Re_{pw}$  是相应垂向速度中重力沉降速度的颗粒雷诺数. 由于在各向同性湍流中, 正交湍流脉动的相关为零, 上式中的  $2\tilde{Re}_p^2$  项是一个保守的取值. 在  $0.4 < Re_p < 500$  范围内, 颗粒重力沉降速度可表为<sup>[13]</sup>

$$W = \left(\frac{4}{225}\right)^{1/3} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{1/3} g^{2/3} \nu_f^{-1/2} d_p \quad (6)$$

则相应的颗粒雷诺数是

$$R_{epw} = \frac{W d_p}{\nu_f} = 0.261 \left[ \frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right]^{2/3} \left[ \frac{g d_p^2}{\nu_f^2} \right]^{2/3} \quad (7)$$

由式(4), (7)可见, 颗粒尺寸  $d_p$  以无量纲形式  $d_p/D$  及  $g d_p^3/\nu_f^2$  出现在颗粒的总的雷诺数中, 在尾涡不脱落条件中, 确有重大的作用, 但是其它参量如  $\rho_p/\rho_f$  以及  $R_{ef}$  也起相当的作用, 特别是流体雷诺数  $R_{ef}$ , 因为它可以有很大的变动范围。由于(4), (7)两式对气-固流和垂直流动也适用, 这就可以解释, 为何 R. A. Gore 和 C. T. Crowe<sup>[5]</sup> 仅颗粒相对尺寸  $d_p/le$  (正比于  $d_p/D$ ) 一个参量, 来区分抑制和增强湍流的做法, 可以归纳大部分 (而非全部) 实验资料。按式(5), 就有不增生湍流的条件

$$R_{epc} = (R_{epw}^2 + 2\tilde{R}_{ep}^2)^{1/2} < 110 \quad (8)$$

为了估算在一定流体雷诺数  $R_{ef}$  下, 不增生湍流的参量上限, 取  $\rho_p/\rho_f = 2.65$ ,  $d_p = 0.6\text{mm}$ ,  $D = 10\text{cm}$ ,  $R_{ef} = 6 \times 10^4$ ,  $C_d$  取  $R_{ep}$  接近 100 时的值:  $C_d = 1.15$ , 则可得  $\tilde{R}_{ep} = 53.0$ ,  $R_{epw} = 60.1$ , 合成雷诺数是  $R_{epc} = 96.1 (< 110)$ 。

另一方面, 颗粒必须至少能被部分大尺度涡所带动, 才能消耗部分湍动能。相应于 Prandtl 混合长度的涡是较大尺度的含能涡, 相应的特征时间是<sup>[14]</sup>

$$T_p = 0.4 D^2 R_{ef}^{-7/8} \nu_f^{-1} \quad (9)$$

颗粒响应涡运动的条件是涡的特征时间必须为颗粒的弛豫时间  $\tau^*$  的数倍, 设为  $m$  倍, 则应有

$$R = T_p / \tau^* > m \quad (10)$$

其中

$$\tau^* = \frac{d_p^2}{18 \nu_f k} \left[ \frac{\rho_p + \frac{1}{2} \rho_f}{\rho_f} \right] \quad (11)$$

式(11)中的  $k$  是阻力系数偏离 Stokes 公式的修正函数, 在  $1 < R_{ep} < 200$  范围内可取  $k = R_{ep}^{0.34}$ , 对于粗重颗粒, 如前以(7)式表示的重力沉降速度相应的雷诺数  $R_{epw}$  代替  $R_{ep}$ , 并以之代入式(11)中可得  $R$  的表达式

$$R = \frac{7.2 R_{ep}^{0.34}}{R_{ef}^{7/8}} \cdot \left(\frac{D}{d_p}\right)^2 \cdot \left[ \frac{\rho_f}{\rho_p + \frac{1}{2} \rho_f} \right] \cdot \frac{4.56}{R_{ef}^{7/8}} \cdot \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{0.227} \cdot \left[ \frac{\rho_f}{\rho_p + \frac{1}{2} \rho_f} \right] \cdot \left(\frac{D}{d_p}\right)^2 \cdot \left(\frac{g d_p^2}{\nu_f^2}\right)^{0.227} \quad (12)$$

在此式中, 相对尺度 ( $D/d_p$ ) 是关键参量, 针对重颗粒 (取  $\rho_p/\rho_f = 2.65$ ) 由此式所作估算表明, 只要  $D/d_p > 100$ , 在  $R_{ef}$  达  $2 \times 10^5$ ,  $d_p$  达  $0.6\text{mm}$  时, 即可使  $R > 2$ 。对于本文实验中采用的阳离子树脂颗粒 ( $d_p$  最大  $0.56\text{mm}$ ,  $\rho_p/\rho_f = 1.60$ ), 按此式估算得  $R = 3.0$ 。这就可以解释, 本文实验所采用的颗粒表现出的抑制湍流的现象。

由以上的分析可以认为,在水平液-固流的主流区中,若颗粒-流体的参数同时满足式(8)及式(10),则颗粒仅消耗而不增生湍流。两式均为多参数的,水流与颗粒的尺度比 $D/d_p$ 起最主要的作用,流体雷诺数以及颗粒-流体密度比也起一定作用。此外,参量 $gd_p^3/\nu^2$ 对涡能否脱落有强烈影响,而颗粒对湍流能量的消耗对此量仅有次要的依赖。满足式(10)的流动不一定能满足式(8),此时就有可能在消耗湍流的同时又增生湍流。

## 4 结 论

所试验的亚毫米颗粒均表现出对水流湍流的抑制行为。湍流削弱量随颗粒浓度而增长,但趋势逐渐减弱;削弱的相对值随流动发展长度而下降;对于悬浮良好的颗粒,湍流削弱的相对值随流体速度的上升而下降;粗重颗粒对于湍流的削弱作用较弱。

分析了水平流动主流区中,颗粒产生尾涡脱落及至少能被一部分含能涡带动这两个条件所依赖的无量纲参量。结果表明,流体与颗粒的尺度比,在这两个条件中均起主要作用;此外,前者对参量 $gd_p^3/\nu^2$ 也有强烈的依赖,分析结果可以说明,用颗粒尺寸与含能涡尺度之比 $d_p/l_e = 0.1$ ,作湍流削弱与增强的分界所能起的作用和局限性,也可以说明本文所试验的颗粒均表现出湍流抑制作用的原因。

## 参 考 文 献

- 1 钱 宁,万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1982, 382
- 2 Lee SL, Durst F. On the motion of particles in turbulent duct flows. *Int. J. Multiphase Flow*, 1982, 8: 125~146
- 3 Tsuji Y, Morikawa Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe. *J. Fluid Mechanics*, 1982, 120: 385~409
- 4 Tsuji Y, Morikawa Y, Shimizu H. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *J. Fluid Mechanics*, 1984, 139: 417~434
- 5 Gore R, Crowe CT. Effects of particle size on modulating turbulent intensity. *Int. J. Multiphase Flow*, 1989, 15: 279~285
- 6 Hetsroni G. Particles-turbulence interaction. *Int. J. Multiphase Flow*, 1989, 15: 735~746
- 7 Rashidi M, Hetsroni G, Banerjee S. Particle-turbulence interaction in a boundary layer. *Int. J. Multiphase Flow*, 1990, 16: 935~949
- 8 路展民,李广达等. 气泡-水流两相流的激光多普勒法测量. *力学学报*, 1988, 20(6): 489
- 9 Ruck B. Distortion of LDA fringe pattern by tracer particles. *Experiments in Fluids*, 1991, 10(6): 349~354
- 10 Azbel D. Two-Phase Flow in Chemical Engineering. London: Cambridge University Press, 1981. Chap. 6, Part 6
- 11 Govier GW, Aziz K. The Flow of Complex Mixture in Pipes. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1972, 649
- 12 Levich V G. Physicochemical Hydrodynamics (Translated from Russian by Scripta Technica Inc.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 1962
- 13 郑洽徐,鲁钟琪主编. 流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1980, 395
- 14 Davies JT. Turbulence Phenomena. New York: Academic Press, 1972, 58

# THE BEHAVIOR AND CRITERION OF TURBULENCE SUPPRESSION EFFECT OF THE PARTICLES IN A HORIZONTAL LIQUID-SOLID FLOW

Lu Zhanmin Liu Qingquan Liu Dayou Yangxiuzhi

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China*)

**Abstract** By using two-phase measuring technique of LDV, the suppression effects of submillimeter particles to the water turbulence in mainstream zone of a horizontal pipe flow have been experimentally studied. This includes the investigation of the dependences of turbulence reduction on the parameters of particle size, flow development length, water flow Reynolds number, etc. According to the basic conditions that the appearance of vortex shedding phenomenon should be excluded and that the particles should respond to the movement of large scale vortex, the dependences of suppression criterion on some flow parameters have been analysed. It is demonstrated that, the ratio of flow scale to particle size plays a most important role in the reduction of turbulence intensity can be reduced or not by the particles, but other parameters such as the ratio of two-phase densities, the Reynolds number of water flow and especially the dimensionless gravity are also exerting their influences onto the criterion.

**Key words** liquid-solid flow, turbulence suppression, laser doppler velocimetry