

## 泥沙对水流紊动影响的进一步分析\*

刘青泉

(中国科学院力学所)

陈立

(武汉水利电力大学河流工程系)

### 提 要

泥沙颗粒对水流紊动的影响是水-沙两相流运动的重要问题之一。本文针对这一问题,从水流紊动的起因出发,分析了泥沙影响水流紊动的基本途径和方式。结合实验资料,主要对含沙量和泥沙粒径影响水流紊动强度的机理进行了探讨。从不出现尾涡脱落和至少能响应一部分大尺度涡的运动的基本条件出发,得到了泥沙颗粒抑制或增强紊动的判别条件。并得出结论:因含有沙粒,水流紊动存在着被削弱、增强、或局部削弱、局部增强3种情况,表明在不同的具体条件下,分散颗粒对混合体系紊动强度可以有不同的作用。

**关键词** 泥沙颗粒, 水流紊动, 含沙浓度, 泥沙粒径, 湍流抑制。

### 一、引 言

泥沙运动属于两相流动的范畴,泥沙在水流的作用下发生运动,反过来又会影响水流结构,两者相互制约,相互影响,其中泥沙的存在对水流紊动的影响是人们普遍关注的重要问题之一。对于粘土悬浮液紊动减弱这一点基本上没有什么争异,但对于无粘性颗粒对紊动的影响,则长期存在着泥沙增强紊动与减弱紊动的争论和实验事实,七十年代中期以前有关此问题的试验资料和理论观点,钱宁和万兆惠已在《泥沙运动力学》一书中加以总结<sup>[1]</sup>。但由于问题十分复杂,实验测量手段又比较落后,一直没有得到很好的解决。近二十余年,随着两相流理论和激光分相测量技术的迅速发展,为研究此问题提供了更可信的理论依据和试验资料<sup>[2-5]</sup>。

### 二、泥沙影响水流紊动的途径和方式

紊动是由水流的不稳定性和外来干扰共同作用下产生的结果,因此,将泥沙影响水流紊动的基本途径分为两大类:第一类改变水流稳定性;第二类改变外来干扰源。

就改变水流稳定性而言,其影响途径有:(1)水流粘性增加,(2)含沙量梯度造成的额外有效重力和浮力,(3)颗粒与水体的相对运动,(4)容重的增加使水流的惯性增加。

\* 本文于1996年5月28日收到,得到国家自然科学基金的资助。

就改变外来干扰源而言，其影响途径有：(1) 床面泥沙（推移质运动）的存在使剪切力不再全部传递到边壁处用于产生涡体，(2) 边壁附近的涡体制造场恰好是大量泥沙的集结地，(3) 颗粒对边壁的掩蔽作用，(4) 颗粒之间及其与壁面的碰撞。

毫无疑问，上述这些因素都分别以不同的形式影响着水流的紊动强度，但影响的程度和结果却各不相同，且随着水流条件和挟沙条件的改变而变化。可以推想，水流条件不同，泥沙粒径不同，含沙量不同，其产生的各个影响因素都会有所改变。就目前的研究水平，仍难以搞清楚每一个单一因素的影响结果，事实上我们更关心的是各因素影响的综合效果。下面我们主要从含沙量、泥沙粒径两个方面来分析泥沙对水流紊动的影响。

### 三、含沙量对水流紊动的影响

(一) 影响紊动途径的变化 颗粒浓度的增加，使得：(1) 水流粘性增大；(2) 更多的泥沙颗粒集结在边壁附近的涡体制造场；(3) 对边壁粗糙的掩蔽作用加强；(4) 床面上的泥沙运动加强；(5) 含沙量梯度造成的涡体额外有效重力和浮力增加；(6) 颗粒与水体的相对运动对水流的干扰增强；(7) 水流的惯性增大；(8) 颗粒碰撞机会加大。

(二) 实验结果及分析 对  $d_p = 0.15 - 0.20\text{mm}$  聚苯乙烯颗粒，使用多种浓度及  $Re_f = 14700$  时，观察颗粒的体积浓度  $\phi$  对水流湍流度  $E$  的削弱量  $\Delta E$ ，以  $\Delta E/E$  (%) 示于图 1。由图可见，总的来说，紊动强度有所削弱，且从低浓度到中等浓度内， $\Delta E$  随浓度增加的趋势很明显。但是当浓度继续增加时， $\Delta E$  增加的趋势逐渐减弱。成都科技大学用  $d_{\max} = 4\text{mm}$ ， $d_{50} > 1\text{mm}$  的粗沙进行试验<sup>[6]</sup>，同样观察了颗粒浓度对水流紊动的影响（如图 2 所示），结果却恰恰相反，总的来说，紊动强度有所增强，且浓度从小到大，水流紊动增强的程度更加强烈。

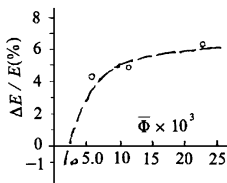


图 1  $\frac{\Delta E}{E}$  随浓度的变化

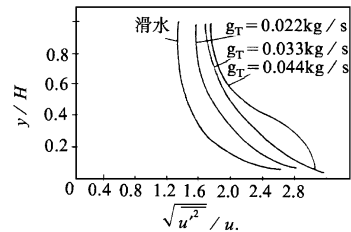


图 2 不同浓度下的纵向紊动强度

根据上述的分析，颗粒大小不同，其含沙量对紊动的影响是有区别的：

1. 粘性和惯性 虽然含沙量增大，使水流粘性增大，但细颗粒含沙量增大引起的粘性增大比粗颗粒快；与此同时，因含沙量增加引起的惯性增大，二者却是相同的。

2. 边壁涡体制造场 细颗粒的粘性较大，大量细颗粒集结于此，有可能形成絮团或絮网结构，无疑会给涡体的产生与掺混造成很大的困难；而粗颗粒却无此作用。

3. 干扰源 颗粒与水流相对运动引起的干扰方面，粗颗粒的增加使干扰源大大增加，而细颗粒则要弱的多。颗粒碰撞引发的干扰源方面，细颗粒碰撞可能形成絮团，而粗颗粒的碰撞将对水流产生较大的干扰。另外，颗粒与边壁的碰撞对水流产生的干扰，

随含沙量增加，粗颗粒的增多而增强。

4. 推移质运动加强对水流的干扰 细颗粒通常难以推移质形式运动，推移质运动加强主要来自于粗颗粒，更多的粗颗粒在床面上滚动、滑动和跳跃，必然对近壁区水流的干扰更大。

上述分析表明，对于细颗粒，含沙量增加将使其对紊动的抑制更强；而对于粗颗粒，含沙量增加主要引发更多的干扰源，将使紊动更强。这一结果也表明，颗粒浓度不同，对水流紊动的影响是不同的，但更主要的是颗粒的粒径。

#### 四、颗粒粒径对水流紊动的影响

泥沙颗粒的粒径不同，对水流稳定性和干扰源的影响是不同的，对水流紊动影响着很大的差异。

(1) 颗粒粒径越小，与水流的相对运动越小，含能涡也越难脱离颗粒，不会产生额外的紊动涡；颗粒粒径越大，则与水流的相对运动越大，越容易造成水流与沙粒的分离，在造成更大的干扰源的同时，会产生额外的紊动涡。

(2) 颗粒越细，对边壁的掩蔽作用越强，使壁面更加光滑；而颗粒越粗，不会对壁面起到掩蔽作用，相反会增大壁面的凹凸度，使壁面更加粗糙。也就是说，从对壁面作用来看，细颗粒有减小干扰的作用，必然导致紊动减弱；而粗颗粒则大大增强了壁面的干扰，必然导致紊动增强。

(3) 含沙水流中，必然存在着颗粒与壁面的碰撞和床面上的推移质运动。对于细颗粒来讲，这种作用强度是非常弱的，而粗颗粒与壁面的碰撞、颗粒的滚动、跃移都是比较强烈的，势必大大增强对水流的干扰。

总之，除了颗粒的存在，水流为了悬浮颗粒必然消耗紊动能这一点对所有颗粒都一致外，颗粒的粒径不同，对水流紊动影响的途径和结果都是有差异的。一般地细颗粒泥沙抑制水流的紊动，而粗颗粒泥沙增强水流的紊动。图 1，图 2 的试验结果也证实了这一点。

#### 五、泥沙颗粒抑制水流紊动的条件

抛开水流中含沙后对边壁的作用，主要分析一下主流区颗粒对水流紊动的影响。R. A. Gore 和 C. T. Grove 通过分析大量实验数据<sup>[7]</sup>，得到认识： $d_s/l_e = 0.1$  ( $l_e$  为流动的特征长度，这里为流体含能涡的尺度) 可作为固相颗粒的存在影响相对紊动强度减弱或加强的一种临界估计。这表明：当  $d_s/l_e < 0.1$  时，属于细颗粒情形，分散颗粒使紊动减弱，即起“制紊作用”；而当  $d_s/l_e > 0.1$  时，为粗颗粒情形，分散颗粒使紊动加强，且变化幅度达 200% ~ 400%。由此可解释为：较小的颗粒因能被含能涡所带动，消耗了这部分涡的部分动能而削弱湍流，而尺度接近含能涡的颗粒则因产生尺度相近的尾涡而增强湍流。随后，G. Hetsroni 对试验数据作了进一步的考察<sup>[8]</sup>，并通过理论分析得出结论：低颗粒雷诺数颗粒使得紊动强度减弱或称为“制紊作用”；而高颗粒雷诺数颗粒则使得紊动强度加强，这里所指的雷诺数 Res 是由颗粒粒径  $d_s$  作为长度尺度的所谓颗粒雷诺数，实质上反映的是不同粒径（细颗粒、粗颗粒）分别使紊动强度减

弱和加强的两种不同的变化特性。他认为大颗粒之所以能增强紊动，可以用颗粒雷诺数  $Re_s$  超过一定值 ( $>400$ ) 后，颗粒尾涡肯定会脱落来解释；而当  $Re_s < 100$  时，由于尾涡肯定不会脱落，因此不会出现增强紊动的现象。M. Rashidi 等<sup>[9]</sup>用氦气泡示踪法观察含颗粒水流壁面区流体的猝发和颗粒运动的关系，发现较小的颗粒因能减少猝发所包含的壁面喷发次数，而使紊动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而使紊动强度和雷诺切应力增强。这说明不同尺度的颗粒对壁面湍流的发生有着不同的影响。

我们也用激光多普勒分相测量方法，考察了水平含沙水流的主流区中，亚毫米颗粒对水流紊动强度的抑制作用，以及紊动强度削弱量与颗粒浓度、水流雷诺数和颗粒弛豫时间的关系。从不出现尾涡脱落和至少能响应一部分大尺度涡的运动的的基本条件出发，分析了紊动削弱与有关参量的依赖性。

一方面，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，不能增生湍流，不会产生尾涡脱落的条件是

$$Re_p = \frac{V_r d_p}{f} < 110, \quad (1)$$

其中  $f$  ——流体粘性系数， $V_r$  ——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，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  $V_{ri}$  及垂向相对速度  $V_{rp}$  合成。相应的颗粒雷诺数是

$$Re_p = (Re_{pi}^2 + Re_{pp}^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

其中  $Re_{pi} = \frac{V_{ri} d_p}{f}$ ,  $Re_{pp} = \frac{V_{rp} d_p}{f}$ .

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>[10]</sup>

$$T_p = 0.4 D^2 Re_f^{-\frac{7}{8}} f^{-1}. \quad (3)$$

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  $r^*$  的数倍，设为  $m$  倍，则应有

$$R = T_p / r^* > m. \quad (4)$$

其中

$$r^* = \frac{d_p^2}{18 f k} \left[ \frac{p + \frac{1}{2} f}{f} \right], \quad (5)$$

式 (5) 中的  $k$  是阻力系数偏离 Stokes 公式的修正函数，在  $1 < Re_p < 200$  范围内可取  $Re_p^{0.34}$ ，对于粗重颗粒，可用颗粒重力沉降速度相应的雷诺数  $Re_p$  代替  $Re_p$ 。

从这两方面出发，最后得到无量纲参数  $R$  (含能涡的特征时间与颗粒的弛豫时间的比值) 的表达式 (详见文献 [11])：

$$R = 7.2 \frac{Res^{0.34}}{Re^{7/8}} \left[ \frac{D}{d_s} \right]^2 \left[ \frac{1}{s + 0.5} \right] \quad on, \text{ 求}$$

察含

$$\frac{4.56}{Re^{0.8}} \left( \frac{s}{s_s} \right)^{0.227} \left( \frac{D}{s_s + 0.5} \right) \left( \frac{D}{d_s} \right)^2 \left( \frac{gd_s^3}{2} \right)^{0.227} s <$$

所包

式中  $R_{es}$  为颗粒雷诺数； $Re$  为水流雷诺数； $D$  为流动的特征尺度； $d_s$  为沙粒的粒径； $\rho$  为水的密度； $\rho_s$  为沙粒密度； $\mu$  为水流的粘性系数； $g$  为重力加速度。

当  $R > 2$  时，颗粒的存在就会削弱流体的紊动强度；反之，当  $R < 2$  时，颗粒的存在就会增强流体的紊动强度。

## 六、结 论

(1) 水流为了悬浮泥沙颗粒，必须要消耗紊动能。仅从这一点来讲，泥沙颗粒的存在必然会削弱水流的紊动强度。

(2) 泥沙颗粒影响水流紊动的途径和方式是多方面的，但各因素的影响程度和结果均不相同，且随着水流条件和挟沙条件（含沙量和泥沙粒径）的改变而变化。当使紊动增强的因素占主导地位时，则水流的紊动增强，即泥沙颗粒的存在加强了水流的紊动；当使紊动减弱的因素占主导地位时，则水流的紊动减弱，即泥沙颗粒的存在抑制了水流的紊动。

(3) 颗粒影响水流紊动的途径可概括为两方面：一是改变水流稳定性的；二是改变干扰源的。

(4) 一般地，细颗粒具有抑制紊动的作用，而粗颗粒具有增强紊动的作用。

(5) 对于细颗粒沙，一般随着含沙量的增加，抑制紊动的作用更加明显；对于粗颗粒沙，则一般随着含沙量的增加，增强紊动的作用更加明显。

(6) 泥沙颗粒抑制或增强水流紊动的条件可用式 (6) 进行综合判别。表明：流动和颗粒的尺度比对削弱或增强紊动强度起最重要的作用，当然，其它参数如  $\mu$ ， $Re$  及颗粒浓度等也起着相当重要的作用，尤其是  $Re$ ，可以有很大的变化范围。

## 参 考 文 献

- [1] 钱宁，万兆惠：泥沙运动力学，科学出版社，1982 年第 382 页。
- [2] Lee, S. L., Durst, F. On the motion of particles in turbulent duct flows. *Int. J. Multiphase Flow* No. 8, pp: 125-146, 1982.
- [3] Tsuji, Y., Morikawa, Y. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe. *J. Fluid Mechanics* 120 pp: 385-409, 1982.
- [4] Tsuji, Y., Morikawa, Y., Shiomi, H. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *J. Fluid Mechanics* 139 pp: 417-434, 1984.
- [5] 陈立，詹义正等，泥沙对水流紊动影响的初步分析，全国泥沙基本理论研讨会论文集，中国建材工业出版社，1995 年 10 月第 39-44 页。
- [6] 杨斌，陈家扬，挟沙水流紊动结构及推悬交换的实验研究，全国泥沙基本理论研讨会论文集，1992 年 10 月。
- [7] Gore, R., Crowe, C. T. Effects of particle size on modulating turbulent intensity. *Int. J. Multiphase Flow* 15, pp: 279-285, 1989.
- [8] Hetsroni, G. Particles-Turbulence Interaction. *Int. J. Multiphase Flow* 15, pp: 735-746, 1989.

- [9] Rashidi, M., Hetsroni, G. Banerjee, S. Particle-turbulence interaction in a boundary layer. *Int. J. Multiphase Flow* 16, pp: 935-949, 1990.
- [10] Davies, J. T. Turbulence Phenomena. *Academic Press, New York* p. 58, 1972.
- [11] 路展民, 刘青泉, 刘大有, 水平液-固流中颗粒抑制湍流的行为和条件, 力学学报, 1996年第3期, 第291-297页.

## Further analysis of the effect of particles on flow turbulence

Liu Qingquan

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences*)

Chen Li

(*Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*)

### Abstract

The influence of the sediment particles to the flow turbulence is an important problem of the water-sand two-phase flow. The paper reveals that the ways by which such influence originated could be divided into two catalogues: to change the inner flow stability or to change the outer disturbance source. Particles of different diameter or concentration may cause opposite consequence in the change of turbulent intensity. Based on the experimental data and two-phase theory, a criterion whether particles would strengthen or damp turbulent intensity has been obtained. It has been concluded that particles in the flow under different conditions may result in three different consequences: increase, decrease and partial increase (with partial decrease) of the turbulent intensity.

**Key words** sediment particles, flow turbulence, sediment concentration, particle diameter, turbulence suppression.

### 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》是中国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的科技刊物，国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的学术论文、研究报告、工程实录、学术讨论等文章。报导新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。优先刊登国家自然科学基金项目等重要研究成果以及来自工程实践的信息。

《岩土工程学报》是水利、建筑两大学科的核心期刊，是中国科学引文数据库首批收录期刊，是被引频次最高的科技期刊之一。本刊被 Geotechnical Engineering International Resources Center (GEIRC) 确认为岩土工程核心期刊。本刊被国际权威科技文献检索工具之一的美国《工程索引》(E) 确认为 Ei Page One 数据库收录期刊。1997 年本刊被评为中国科协优秀科技期刊。

《岩土工程学报》读者对象为从事土木建筑、水利水电、交通运输、矿山冶金等部门及行业科技人员、工程技术人员及大专院校师生。1998 年起，本刊将扩大版面，采用国际 A4 (大 16 开) 版本。本刊为双月刊，单月 30 日出版，每期 120 页，定价 10 元。国内统一刊号 CN32-1124/TU，国内发行代号 28-62，国外发行代号 BM520。欢迎广大读者向当地邮局或本刊订阅。本刊还开展了广告业务，欢迎惠顾。

本刊地址：南京虎踞关 34 号

邮编：210024

电话：(025) 3739178-512

传真：(025) 3734321

(《岩土工程学报》编辑部)