

床面附近泥沙运动的分析

刘青泉^{1,2}, 周济福^{1,2}, 舒安平³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 武汉大学水沙科学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 清华大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于水、沙两相的分相测量试验结果, 分析了床面附近泥沙颗粒的脉动和力学特性, 指出床面附近的泥沙运动有着特殊的力学机制: 颗粒相具有较强的非湍流脉动, 其产生的脉动应力对颗粒的运动起着重要作用。论述了沙粒在水流中从推移运动到扬起悬浮的物理过程, 讨论了过去一些理论中存在的问题和不足, 概括了泥沙颗粒在水流中从床面扬起的基本模式, 运用两相流理论分析了沙粒在水流中扬起的动力学机理。根据颗粒运动的垂向动量平衡原理, 对泥沙颗粒的垂向浓度分布规律作了新的分析解释。证实了除浓度梯度之外, 颗粒相的垂向脉动强度梯度也是泥沙扩散的重要扩散势, 进一步揭示了悬移质浓度垂线分布存在两种类型的内在机理。

关键词: 床面; 颗粒脉动; 扬动; 扩散; 浓度分布; 泥沙运动

中图分类号: TV142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)05-569-07

含沙水流运动属于固液两相流运动的范畴, 研究泥沙运动的规律总是从水流对泥沙的作用入手。但由于水流紊动机制的多样性, 以及颗粒与水流相互作用的复杂性, 使得泥沙颗粒的运动具有很强的随机性, 也使得人们对泥沙运动许多方面的认识仍不够成熟。其中泥沙颗粒的脉动特性、颗粒从床面的扬起悬浮过程、泥沙颗粒在水流中的扩散机制等一直是泥沙运动理论研究中的重要问题。受人们对湍流运动机理、固液两相相互作用认识的限制, 以及两相运动实验观测手段的限制, 这些方面的研究仍处在不断的探索之中。

本文就床面附近泥沙颗粒的脉动特性、颗粒的扬动模式和机理、颗粒在水流中的扩散机制等几个方面进行初步的探讨, 提出一些初浅的认识。

1 床面附近泥沙颗粒的脉动特性

床面附近的泥沙运动层是推移质泥沙与悬移质泥沙相互转化的过渡区, 这一层泥沙颗粒运动的重要性一直受到人们的重视。但由于这层泥沙主要是以推移质形式运动, 大多数研究主要是针对推移质输沙率的。而对悬移质运动, 主要通过床面层来决定含沙量沿垂线分布的参考点浓度。较少对推移质和悬移质两者相互转化的内在影响本质进行分析。事实上, 作为推移质与悬移质运动的过渡层, 床面附近的泥沙运动有着一些特殊的力学特征。

笔者曾用激光多普勒分相流速仪, 对明渠水槽(长、宽、水深分别为 700 cm、25 cm、8.7 cm)和水平方管(长、宽、高分别为 140 cm、3.0 cm、1.5 cm)中水、沙两相流的两相脉动特性进行了实验观测^[1]。由试验结果可以看出, 泥沙颗粒的脉动强度在大部分区域都小于水流脉动强度, 正是由于泥沙运动是在水流作用下进行的, 其脉动也主要由水流的湍流脉动所带动。在充分发展的流动中, 颗粒脉动一般都小于水流的湍流脉动。但值得注意

收稿日期: 2002-07-01; 修订日期: 2002-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10002023); 武汉大学水沙科学教育部重点实验室开放研究基金资助项目(2002WU-02)

作者简介: 刘青泉(1965-), 男, 山西侯马人, 中国科学院力学研究所研究员, 博士, 主要从事环境流体力学研究。

E-mail: qqliu@imech.ac.cn

的是,在床面附近,不论纵向还是垂向,颗粒的脉动常常大于水流的脉动。这很难用颗粒对水流脉动的跟随性来解释,说明在床面附近,颗粒的脉动具有一些特殊机制。

在固-液两相流中,颗粒与颗粒、颗粒与壁面之间难免碰撞,必然存在着由此产生的无规则运动。刘大有等^[2]认为,这也是颗粒的一种脉动形式。即颗粒的脉动具有多种形式,除了跟随水流的湍流脉动之外,还具有其它脉动形式。如颗粒的跃移,颗粒与颗粒、颗粒与固壁碰撞产生的无规则运动,以及床面不平整产生局部水流分离,对颗粒产生的卷扬运动,同样会产生颗粒脉动,这类脉动与湍流脉动有着不同的物理机制。

对于颗粒浓度较低的流动,颗粒之间的碰撞很微弱,由此引起的颗粒脉动相对于湍流脉动完全可以忽略。而在床面附近,颗粒浓度通常比较大,颗粒之间的碰撞则比较强,且即使颗粒浓度低,颗粒之间的碰撞可以忽略,而颗粒与壁面的碰撞仍比较剧烈,由此引起的脉动仍比较强。这种颗粒脉动通常可达到与湍流脉动同量级,甚至还会大于湍流脉动(床面附近湍流脉动往往较小)。因此,床面附近颗粒脉动的主要特点是,除了具有水流紊动引起的湍流脉动外,还存在着由于颗粒与颗粒、颗粒与壁面碰撞等其它方式引起的非湍流脉动,致使颗粒的脉动强度往往会大于水流的脉动强度。

将群体颗粒运动看作连续介质运动,则颗粒脉动就会产生脉动应力,对颗粒的运动具有重要影响。根据脉动形式的不同,可以将颗粒的脉动应力分解为湍流脉动(由水流脉动引起)应力 P_T 和非湍流脉动(其它脉动)应力 P_N ,即颗粒脉动应力 P 为

$$P = P_T + P_N \quad (1)$$

颗粒在床面附近相互之间的碰撞,在高含沙研究中已早有认识。通常是在分析中加进了颗粒碰撞力这一项。如 Bagnold^[3]早在 1950's 就研究认为,具有较高固相浓度和较大流速梯度(剪切率)的液-固两相流动,固相颗粒间相互碰撞形成固相内部剪切力和离散力,其作用同其它力的作用一样重要,不可忽略。曹志先等^[4]从这一思路出发,认为对于一般的含沙水流,尽管有时总的含沙量并不很大,但在床面附近水流的含沙量仍然较大,且水流剪切率也很大,颗粒间相互碰撞产生的剪切力和离散力不可忽略,而在主流区则可忽略,由此运用浓度边界层的思想进行分析。实际上,床面附近颗粒的剧烈脉动,且由此产生的脉动应力,还包括了由于颗粒与壁面的碰撞等多种非湍流脉动引起的。如我们在竖直管道试验中,壁面附近的颗粒浓度很小,但同样观测到了较强的颗粒脉动。说明浓度边界层的思想不能很好地描述所有的壁面附近固液两相运动。高浓度颗粒之间碰撞形成的离散力和剪切力实际上只是颗粒脉动应力的一部分。床面附近颗粒运动的主要特征是具有较强的非湍流脉动,而由此导致床面附近泥沙运动的一个重要力学特征就是具有较强的脉动应力。

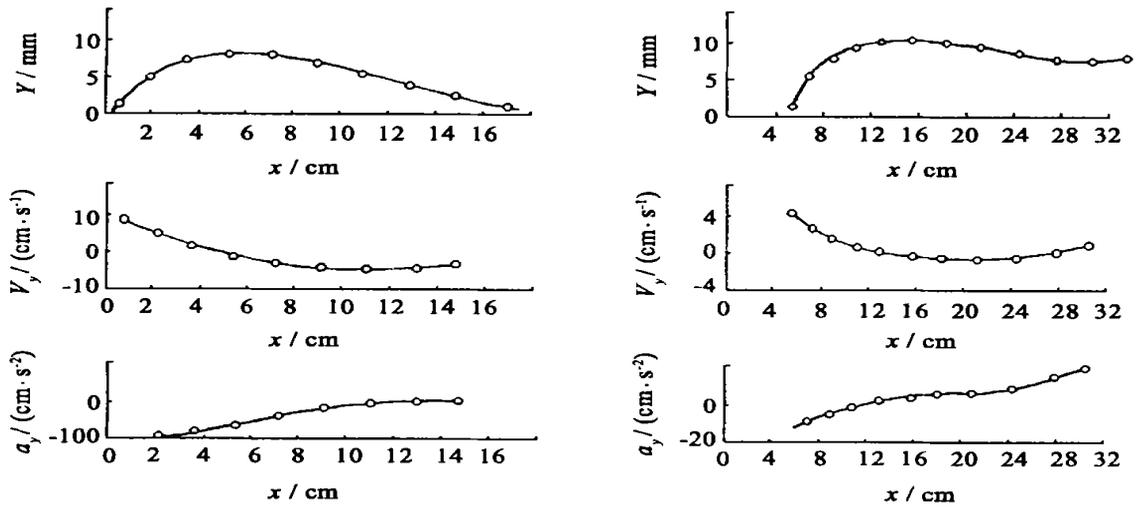
2 泥沙颗粒的扬动机理

床面上的泥沙颗粒,当水流作用克服了颗粒水下重力作用后,就由静止转入运动。且随着水流强度增大,无论是光滑或粗糙床面,均可呈滚动(间或滑动)、跃移、悬移等几种主要运动形式^[5],且相互不断进行着运动形式的转化。这也说明,推移质与悬移质运动在力学和统计学上都具有一定的统一性,难以直观地截然分开。而联系两者的纽带正是床面层附近的颗粒运动。研究颗粒的扬动悬浮过程,关键在于对床面附近泥沙运动的深入认识。

2.1 泥沙颗粒的扬动模式

总结过去对泥沙颗粒扬动过程的研究,主要认为当水流对颗粒的上举力,或者水流的时均上举力和脉动上举力共同作用克服了沙粒水下重力时,沙粒就会从床面扬起呈悬浮状态。显然,如果该结论成立的话,在垂向作用力的作用下,颗粒在床面上必然会从零开始加速上升,但这种现象在试验中是较难观察到的。胡春宏^[5]曾用高速摄影技术观测了泥沙颗粒从静止到悬浮的全过程,图 1(a)、(b)分别为根据大量实测资料选出的,颗粒的典型跃移和悬移轨迹及对应的颗粒速度和加速度沿运动轨迹的变化过程。

可以看出,对于跃移颗粒运动,颗粒垂向运动速度的变化可分为两部分,在跃高点以前的上升段,方向向上,



(a) 跃移颗粒运动(塑料沙 $d = 2.25 \text{ mm}$) (b) 悬移颗粒运动(核桃壳 $d = 2.25 \text{ mm}$)

图 1 颗粒的运动速度和加速度沿运动轨迹的变化

Fig. 1 Variation processes of particle velocities and accelerations along saltation and suspension trajectories

在跃高点以后的下降段,方向向下。垂向加速度基本上始终为负值,说明颗粒一直受到一个垂直向下的合力,导致颗粒垂向速度不断减小,直至为零后开始下降。比较跃移和悬移颗粒速度和加速度的变化过程,在悬移过程的上升阶段,颗粒速度和加速度与跃移运动类似。可见,在悬移的起悬段与跃移的起跃段变化特点是一致的。这可以说明了两点: 一般情况下,颗粒悬移经过跃移过程,且一般是在起跃段进一步向悬移转化的; 在从床面扬起过程中,大多数颗粒的垂向初速不为零,而是具有相对较大的初速度,在跃起或扬起过程中反而逐渐减小。

从大多数沙粒在床面上跃起时就具有一定的初速度这一事实,笔者认为颗粒主要是在床面附近运动的过程中,在较短的时间内获得较大的动量而转化的,即颗粒的悬浮主要通过非常短的时间内获得较大的动量而悬浮的,而颗粒获得动量的途径是多样的。

随着湍流理论和试验的研究进展,人们认识到床面附近的湍流“猝发”与泥沙颗粒的扬起有着密切联系。Sumer 和 Deigaard^[6]对床面附近颗粒与湍流的相互作用作了较细致的实验研究,认为较强的猝发水团是直接携带颗粒上扬的重要动力。但一般情况下,猝发水团对颗粒的作用主要限于近床层很小的范围内,从床面喷发而出的猝发水团可直接携带颗粒跃起,并在很短距离内,将动量传递给颗粒,此后,颗粒的运动迅速与猝发水团失去相关(图 2)。而颗粒仍可以较大的速度继续上扬,如遇到上层水流的大尺度紊动水团,可保持颗粒继续作悬浮运动。由此说明,紊动猝发作用是颗粒扬起的一种重要机理。但过去的描述比较粗略,仅宏观地描述为,床面低速水流扫荡床面,并将颗粒从床面带起,且在具体分析时还是将猝发作用概化为水流对颗粒的脉动上举力,与水流对颗粒的时均上举力联合平衡沙粒的水下重力后,颗粒即从床面扬起。这种描述总体上讲,表述了紊动猝



图 2 颗粒与猝发水团的相互作用示意图

Fig. 2 Interactions between particle and flow ejection

发对颗粒扬动的作用,但仍不够完善。

颗粒的扬起,除了由跃移到悬移,以及紊动猝发水团带动两种过程之外,还有另外的形式。如当床面出现较显著不平整时,就会产生局部水流分离,同样可以将床面泥沙卷扬起来送到主流区呈悬浮状态。后两种形式通常使床面泥沙不经跃移过程,直接转化为悬移运动。由此,可将颗粒在水流中的扬起过程概括为下列3种途径和模式^[7]: 沙粒通过跃移运动,获得了较大的动量,并在跃移的上升过程中,被大尺度的紊动水团挟带呈悬浮状态; 床面上水流的紊动猝发,传递给泥沙颗粒较大的垂向动量,颗粒在离开床面的上升过程中,又不断从主流区的大尺度紊动水团中获取新的动量,从而继续呈悬移状态; 对于不平整床面,水流在床面附近产生局部分离,将沙粒卷起,沙粒获得充分动量,并进一步被主流区的大尺度紊动水团挟带悬浮。

综上所述,沙粒的扬动是在床面层内运动的基础上,通过跃移、分离水流的卷扬和紊动猝发作用等无规则运动,获得充分动量后,在运动中发生的。没有床面附近颗粒的剧烈运动,颗粒是很难扬起悬浮的。正是床面附近的颗粒运动将悬移质和推移质泥沙有机地结合在一起,床面泥沙与悬浮泥沙的过渡正是通过床面附近的泥沙运动在床面层内完成的。

2.2 颗粒扬动的动力学机理

对于单颗粒泥沙,垂向上主要受到重力、压差力(即浮力)、Saffman力、Magnus力、升力和水流阻力的作用。但对于沙粒悬移起始阶段,一般水流阻力可以忽略;Magnus力一般也可忽略(颗粒旋转角速度小于45 n/s)。升力是一种形状阻力,对于园球状颗粒,升力系数为0,对于不同形状的沙粒,沙粒的取向是随机的,对于群体沙粒而言,平均升力为零。因此,对于单颗粒泥沙,在垂向上除了受到重力和浮力外,主要还受到Saffman力(上举力)的作用。这也是以往认为泥沙扬起是由于上举力克服了沙粒水下重力的原因。

由上述分析可知,仅靠水流上举力很难平衡颗粒水下重力而使沙粒扬起悬浮,那么一般情况下沙粒是如何扬起的呢?实际上,泥沙运动是一种群体颗粒运动,颗粒扬起的关键是在床面附近获得了较大的动量,应该从群体颗粒的垂向动量平衡来分析。颗粒获得动量的过程是随机的,因此还应从统计的观点来分析。笔者认为,建立悬浮颗粒与床面泥沙的交换通量与水流之间的关系,较确定某种颗粒起悬的动力条件更符合物理意义。

颗粒的悬浮运动,满足颗粒相的垂向动量平衡。在恒定比降 $J(\tan \alpha, \alpha$ 为坡角)的流动中,取 x 轴与流动方向平行, y 轴方向向上与 x 轴垂直。因为通常 α 很小,这时重力加速度的 y 向分量为 $g \cos \alpha \approx g$ 。对定常两相流动,颗粒相的垂向动量方程为

$$\frac{\partial(\rho_s u_s v_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_s v_s v_s)}{\partial y} = -\rho_s g_y - \rho_s \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + F_L \quad (2)$$

式中 u_s 、 v_s 分别为颗粒纵向和垂向速度; ρ_s 为颗粒密度; f_y 为水流对颗粒的垂向阻力; ρ_s 为颗粒相的体积分数; p 为水流压强; F_L 为水流对颗粒的垂向上举力; g 为重力加速度。

对式(2)求时间平均,去掉微小量,则可得到颗粒相的垂向湍流动量方程:

$$\frac{\partial(\overline{\rho_s v_s v_s})}{\partial y} = -\rho_s g - \rho_s \frac{\partial p}{\partial y} + f_y + F_L \quad (3)$$

式中 $\rho_s = m_s n_s / \rho$, $\partial p / \partial y = -\rho g$ 。其中, m_s 为颗粒质量; n_s 为颗粒数密度; ρ 为水的密度。式(3)变化为

$$\frac{\partial}{\partial y}(\overline{m_s n_s v_s^2}) = -m_s n_s g \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho}\right) + f_y + F_L \quad (4)$$

式中 $m_s n_s g(1 - \rho_s / \rho)$ 为颗粒的水下重力; $\frac{\partial(\overline{m_s n_s v_s^2})}{\partial y}$ 为颗粒垂向脉动的动量传递率,其中 $(\overline{m_s n_s v_s^2})$ 可认为是颗粒的脉动正应力。可见,对于群体颗粒运动,水流上举力和颗粒的脉动应力都对颗粒的扬动起着重要作用。水流上举力主要通过减小颗粒的水下重力作用促使颗粒扬起,而颗粒的脉动则通过动量传递促使颗粒扬起。尤其需要指出的是,一般情况下水流上举力小于颗粒的水下重力,颗粒的扬起是进一步依靠床面颗粒不规则运动的动量传递作用。而颗粒的脉动,除了跟随水流的湍流脉动之外,还包括由于颗粒跃移、与壁面的碰撞,以及

床面不平整产生的分离水流的卷扬作用引起的颗粒非湍流脉动。

3 泥沙颗粒的扩散运动

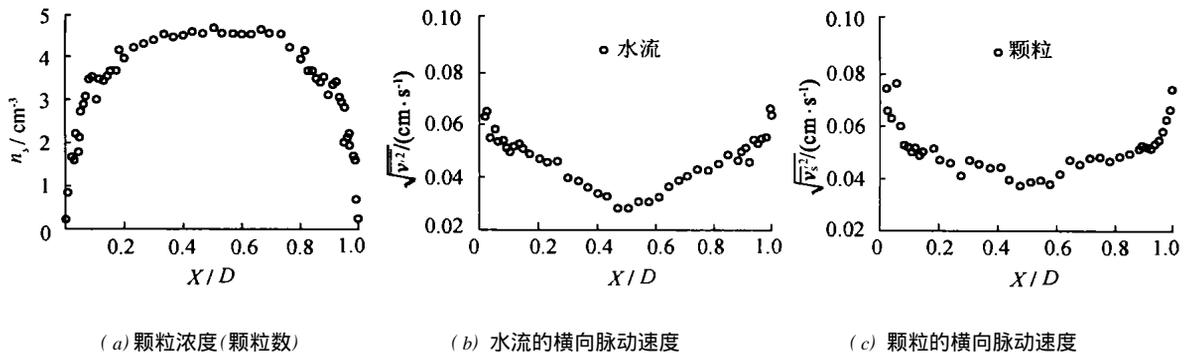
3.1 泥沙颗粒的扩散势

总体上讲，泥沙颗粒在水流中的扩散运动是由于水流紊动造成的，颗粒的浓度梯度是泥沙在水流中扩散的重要扩散势。所以，一般情况下颗粒都是从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。如在水平两相流中，泥沙浓度沿垂线分布通常形成上小下大的稳定分布，主要是由于向上的浓度梯度扩散势与向下的重力作用平衡所形成的。但我们也经常观察到一些不符合这一规律的浓度分布现象。我们曾经对竖直管道水沙两相流中的颗粒浓度和脉动强度进行了较细致的试验观测^[8]，图 3 为其中一组试验结果。颗粒在横向上并没有受到明显的其它力的作用，颗粒的浓度分布并没有在浓度梯度的作用下形成均匀分布，而形成了中间大，两边越靠近壁面越小的稳定分布规律。说明颗粒的扩散除了浓度梯度这一重要扩散势外，还有其它的扩散势。

仍从颗粒相的垂向动量方程(4)出发进行分析。将水流阻力分解为层流阻力 f^L 和湍流阻力 f^T ，即有 $f_y = f^L + f^T$ ，且有^[9]

$$f^L = m_s n_s g \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho} \right) \quad f^T = - m_s n_s \frac{1}{T} \quad (5)$$

式中 T 为两相湍流运动的迟滞时间； v_s 为颗粒在水中的沉降速度。



管道中心水流最大流速 $U_{max} = 65 \text{ cm/s}$ ，玻璃沙粒径 $d = 0.125 \sim 0.20 \text{ mm}$

图 3 竖直方管流动中颗粒浓度及水、沙两相横向脉动速度的分布

Fig. 3 Distributions of particle concentration and fluctuating velocities of water and sediment in vertical pipe with rectangle section

结合式(5)，则可化简颗粒的垂向动量方程(4)为

$$\frac{\partial}{\partial y} (m_s n_s \overline{v_s^2}) = - m_s n_s g \frac{1}{T} + m_s n_s a \quad (6)$$

式中 a 为由水流对颗粒的垂向升力引起的颗粒垂向加速度 ($F_L = m_s n_s a$)； $m_s n_s$ 即为颗粒的浓度，用浓度 C 代替 $m_s n_s$ ，则有

$$\frac{\partial}{\partial y} (C \overline{v_s^2}) = - C g \frac{1}{T} + C a \quad (7)$$

令 $T \overline{v_s^2} = s$ (泥沙扩散系数)，对式(7)再进行变化：

$$s \left[\frac{\partial C}{\partial y} + \frac{C}{v_s^2} \frac{\partial \overline{v_s^2}}{\partial y} \right] = - C \left[g - \frac{a}{v_s^2} \right] \quad (8)$$

如进一步忽略颗粒受到的上举力，则上式变为

$$s \left[\frac{\partial C}{\partial y} + \frac{C}{v_s^2} \frac{\partial \overline{v_s^2}}{\partial y} \right] = - C g \quad (9)$$

式中 左边第 1 项为浓度梯度引起的颗粒扩散;第 2 项为颗粒脉动强度的梯度引起的颗粒扩散。说明除了浓度梯度外,颗粒的垂向脉动强度梯度也是一个重要的扩散势。

从上面的分析,就可理解竖直管道中颗粒浓度的分布规律,如图 3 所示。颗粒的浓度分布为中间大,向两边逐渐减小,而水流和颗粒的横向脉动强度分布则是中间小,向两边逐渐增大。颗粒浓度梯度和颗粒横向脉动强度梯度引起的颗粒扩散运动方向相反,正因为两者引起的扩散势方向相反,相互得以平衡才维持了颗粒浓度的稳定分布。当然,水流对颗粒的上举力(这里为横向),也有一定的作用。

3.2 泥沙浓度沿垂线分布的两种类型

由于颗粒的沉降速度 w_s 和扩散系数总是正的,根据扩散理论,明渠流中颗粒的浓度分布总是随高度减小的,即“上小下大”的一种分布类型。但是从大量的水槽、管道,乃至天然河流中的实测资料看,相当多的情况下,在离床面较小距离的一定范围内,颗粒浓度会随着高度而增大,即浓度从河底到水面先由小变大到某一位置达最大值后,又逐渐从大向小变化。过去由于难以用扩散理论解释,一般认为这种现象可能是测量误差带来的。王光谦、倪晋仁^[10]首次提出了泥沙沿垂线分布存在两种分布类型,并对其产生的原因进行了分析和探讨。认为在床面附近的流动区域内,颗粒所受到的升力比较大,水流对颗粒的升力作用,是造成床面附近小范围内颗粒浓度倒分布的主要原因。并认为流量、粒径、密度都是影响浓度分布的主要因素,同时认为颗粒与边壁的相互作用效应肯定影响着颗粒浓度的分布类型,但没有对此作出进一步的分析和论证。

从颗粒运动的垂向动量方程,同样可以对这一现象作出合理的动力学解释。对式(7)的形式作一些变化,可以得到:

$$\frac{\partial}{\partial y}(\ln C) = - \left[\frac{\partial}{\partial y}(\overline{v_s^2}) + \frac{1}{\tau} - a \right] / \overline{v_s^2} \quad (10)$$

由式(10)可知,只要 $\left[\frac{\partial}{\partial y}(\overline{v_s^2}) + \frac{1}{\tau} - a \right] < 0$,就会导致 $\frac{\partial}{\partial y}(\ln C) > 0$ 的结果,即颗粒的浓度会随高度的增加而增大。这种情况在实际流动中是完全可以出现的。虽然 $1/\tau$ 总是大于 0,但 $\partial(\overline{v_s^2})/\partial y$ 一般却是负值(明渠流中,颗粒的脉动强度一般随高度而减小),当 $|\partial(\overline{v_s^2})/\partial y|$ 较大($\overline{v_s^2}$ 随高度的增加反而减小很快),升力也较大(a 较大)时,就可能使得 $\frac{\partial}{\partial y}(\overline{v_s^2}) + \frac{1}{\tau} - a < 0$,这时颗粒的浓度就会随高度的增加而增大。

从试验结果看,在床面附近水流的垂向脉动随高度减小很快,尤其是对于颗粒相,其垂向脉动随高度的减小更为显著, $|\partial(\overline{v_s^2})/\partial y|$ 就容易出现较大数值,因此就可能造成颗粒浓度在床面附近的倒分布现象。

上述的分析说明,水流上举力和颗粒垂向脉动强度的梯度都可能导致颗粒浓度的倒分布现象。由于在床面附近颗粒脉动强度的梯度较大,颗粒所受的升力有时也表现比较强,所以在床面附近的较小范围内,就有可能出现颗粒浓度的倒分布。在主流区,一般这两方面都十分弱,所以主流区一般是不会出现颗粒浓度倒分布现象的。至于颗粒脉动梯度和升力到底谁的作用更强一些,笔者认为一般情况下,水流上举力比较小,颗粒脉动梯度的作用应该更突出。当然也不排除,在一定条件下升力的作用会较强。总之,两者在适当条件下,都可能导致颗粒浓度出现随高度增加而增大的倒分布现象。

4 结 语

泥沙在水流中的运动机理和过程十分复杂,受湍流运动机理、固液两相相互作用认识的限制,对泥沙运动许多方面的研究仍处在探索之中。本文主要从试验资料出发,运用两相流理论,对床面附近泥沙颗粒的脉动特性、扬动模式,以及泥沙在水流中的扩散等问题进行了初步的分析,给出了一些简要和概括性的结果,并提出了一些初浅的认识。

参考文献:

- [1] 刘青泉. 水-沙两相流运动机理的试验和研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1996.

- [2] Liu D Y, Lu Z M. Various kinds of random motion and stress in two-phase flows[A]. In: Zhang Fenggan ed Proc of the 2nd International Conference on the Fluid Mechanics[C]. Beijing: Peking University Press, 1993. 782 - 788.
- [3] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid particles in a Newtonian fluid under shear[C]. Proc Royal Society of London, Ser. A, 1954, 225: 49 - 63.
- [4] 曹志先, 魏良琰, 谢鉴衡. 明渠挟沙水流的两相流模式[J]. 水利学报, 1995(4): 1 - 12.
- [5] 胡春宏. 水流中推移质颗粒跃移规律的力学和统计分析[D]. 北京:清华大学, 1989.
- [6] Sumer B M, Deigaard R. Experimental investigation of motion of suspended heavy particles and the bursting process[A]. Series Paper 23, Inst of Hydrodynamics & Hydraulic Engineering[C]. Technical University of Denmark, 1979.
- [7] 刘青泉, 曹文洪. 泥沙颗粒的扬动机理分析[J]. 水利学报, 1998(5): 1 - 6.
- [8] 刘青泉, 刘大有, 路展民. 竖直方管水-沙两相流动的 LDA 分相测量和试验研究[A]. 环境力学与可持续发展文集[C]. 北京:中国科学院力学研究所, 1996. 48 - 59.
- [9] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1993.
- [10] 王光谦, 倪晋仁. 再论悬移质浓度垂线分布的两种类型及其产生的原因[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 1991, 6(4): 60 - 71.

Analysis of near-bed sediment motion ^{*}

LIU Qing-quan^{1,2}, ZHOU Ji-fu^{1,2}, SHU An-ping³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : Based on the experimental data obtained by using two-phase measuring technique, this paper analyzes the fluctuating features and mechanism of sediment movement near the bed in water-sediment flow. The special mechanism of sediment movement in the near-bed layer is found in that sediment particles have very intense non-turbulent fluctuation near the bed, resulting in fluctuating stress, which will greatly influence sediment movement. From this point of view, a systematical knowledge on the physical process of sediment particles being raised in water flow is presented. Some problems and insufficiencies existing in traditional theories are discussed, from which a new basic model of sediment entrainment is suggested. Using the two-phase flow theory, the mechanism of sediment entrainment are analyzed in detail. Finally, the profile of sediment concentration are investigated by the theory of momentum equilibrium of particle movements in vertical direction. It is demonstrated that, besides the gradient of sediment concentration, the gradient of fluctuating velocity intensity of particles is also a significant diffuse force, which further gives a reasonable explanation for the mechanism of two types of profiles of sediment concentration.

Key words : bed; particle fluctuation; sediment entrainment; diffusion; concentration distribution; sediment motion

* The project is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 10002023) and the Opening Research Foundation of the key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Wuhan University(No. 2002WU-02).