

振荡流底层拟序结构及其与泥沙相互作用研究*

白玉川¹ 蒋昌波¹ 罗纪生² 赵子丹¹

¹ 天津大学建筑工程学院河流海岸工程泥沙研究室, 天津 300072

² 天津大学力学系, 天津 300072

摘要 湍流拟序结构与泥沙及床面相互作用的机理, 是目前国内外泥沙学术界研究的热点领域. 本文针对单向流和振荡流底边界层的湍流拟序结构与泥沙相互作用研究状况进行了综述, 重点论述了振荡流底边界层湍流研究的概况与今后需要开展的重点研究内容.

关键词 振荡流, 拟序结构, 泥沙运动, 床面形态

1 引言

近 20 年来, 流体力学研究有了长足的发展, 湍流拟序结构的发现与研究工作的深入, 使人们进一步认清湍流产生的机理和发展演化的过程. 诸如在传统的流体力学与水力学教材中所称的层流底层, 其实并非真正的层流, 而在其中孕育着湍流, 这种层流只是一种流动的暂时状态, 确切的称谓应该是黏性底层. 通过对湍流应力的测量和分析, 发现拟序结构是对湍流应力贡献较大的结构. 这样的研究结果具有重要的工程意义, 它促使我们在构造湍流模式时, 要充分考虑大尺度拟序结构的特点以及其与小尺度脉动的差别, 只有将大尺度拟序量和小尺度脉动量分别加以处理, 才能更全面地反映流动的特性等. 拟序结构的发现, 改变了传统的湍流理论, 同时也带动了相关工程科学的发展. 本文在回顾湍流拟序结构研究方法的基础上, 重点针对海岸工程科学中振荡流拟序结构及其与泥沙相互作用的研究进展进行论述.

2 湍流拟序结构研究的一般方法

2.1 实验研究方法

早期拟序结构的研究成果主要来自实验方面.

早在 20 世纪 50 年代, 泥沙学者爱因斯坦和李焕^[1]就通过在水槽底部凿穿小孔, 向近壁流层内注入染色液体来演示流动现象. 试验结果表明, 带色流层贴附边壁运动一段距离后, 就会突然失去稳定, 与主流区中的湍流发生混掺. 带色流体保持平顺状态有时长一些有时又短一些, 说明近壁流层中存在着周期性的不稳定现象, 也正是通过这些不稳定现象, 湍动不时地深入直达边壁, 并影响那里的泥沙. 该试验是探讨湍动结构与泥沙相互作用的最早研究工作, 同样也触及到了底层拟序结构的一些重要特点, 但在当时没有引起足够的重视. 之后, Kline 等^[2]利用氢泡法和色彩法等流动显示技术, 详细研究了湍流边界层, 发现了湍流边界层近壁区的条纹结构, 并细致地描述了条纹抬升和破碎的过程, 其工作标志着应用流动显示技术对拟序结构进行全面研究的开始. Kim 等^[3]、Smith 等^[4]发展了流动显示技术, 并将猝发运动的全过程分成 3 个阶段: (1) 低速条纹抬升, 即条纹中低速流体聚集并离开壁面; (2) 抬升的低速流体在较外层的区域上形成高剪切层, 瞬时速度剖面出现拐点, 在高速和低速流体的交界处发生条纹振荡; (3) 振荡振幅增大, 低速流体迅速喷射到外区, 条纹结构破碎, 来自外区的高速流体扫掠到内区. 雷诺应力主要在条纹振荡到喷射的短时间内产生.

收稿日期: 2002-04-11, 修回日期: 2002-09-09

* 国家自然科学基金 ((50279030, 59809006)) 资助项目

随着流动显示技术研究的深入,在数据处理方面,出现了各种大量的条件采样方法,主要有:(1)短时间平均法(TPAV),通过探头输出信号形状来识别近壁湍流拟序结构,主要特征是信号的弱减速之后伴随着强加速;(2)变间隔时间平均法(VITA),当短时间平均流向脉动速度的方差大于某一数值时,认为是一次猝发;(3)象限法(Quadrant),根据壁湍流拟序结构的主要特征是在较小的范围内产生较大的雷诺应力,可以通过检测雷诺应力的大小和 u, v 矢量的方向判断猝发的存在;(4)速度门限法(MU-level)是将瞬时速度从小于某一数值开始到不大于另一数值结束作为一次猝发,门限的选用为脉动速度均方根的若干倍.这些方法基于对运动规律的不同理解,侧重点也不同,因而所得结果不尽相同,但不可否认的是,这些方法都对湍流拟序结构的深入研究,起到了推动作用.

近年来,条件采样方法和小波变换结合来诊断近壁湍流拟序结构(姜楠等^[5]),以及粒子示踪的流动显示技术与计算机数值图像处理结合的PTV(Kasagi^[6])和PIV(Upatnieks等^[7])方法也得到了发展.

2.2 理论研究方法

理论研究的目的是在实验基础上建立拟序结构的动力学模型,从机理上分析拟序结构的产生、发展和演化规律. Landahl^[8,9]提出波导模型,利用色散波在非均匀介质的聚焦过程来解释猝发现象,发现在准层流的假设下,较大范围的扰动都是线性衰减的,提出将湍流脉动分为大小2种尺度来处理,定性解释了拟序结构的发展过程; Bark^[10]进一步假设雷诺应力是与猝发有关的时间间歇函数,计算了近壁区大尺度运动的能谱、时空尺度,与当时实验结果吻合较好; Guezennec等^[11]利用KMM数据库清晰展现了流向涡结构的非对称性; Landahl^[12]引入类似Prandtl混合长度的代数应力模型,利用代数不稳定模式研究了条纹结构的形成; Robinson^[13]在这些数据库的基础上,提出在湍流边界层中,拟序结构在缓冲区内主要为准流向涡,尾流区为发卡涡,对数区则兼而有之; Kim & Waleffe^[14]提出“再生机制”理论,指出拟序结构经历时间上准周期的再生过程:(1)条纹结构的形成;(2)条纹结构的破碎;(3)涡的再生.其中条纹结构的形成是由于流向涡冲量的简单作用,破碎是由于条纹结构的失稳造成,破碎后一系列能量相互交换的流向涡形成新的条纹,从而完成一次再生的循环.

近年来利用流动稳定性理论对拟序结构的研究

也取得了一定的进展. Blackwelder^[15]指出近壁湍流的拟序结构在很多方面和不稳定波有相似之处; Kim & Hussain^[16]利用KMM数据库研究表明,近壁区各扰动量确实是以波的形式传播的; Jang & Benney^[17]利用直接共振原理计算了扰动波的频率选择问题,得到增长最快的波对应的展向波长为90个黏性长度,但频率是单一的; 周恒^[18]在同样的准层流模型和速度剖面下,研究了一对三维波的非线性不稳定阈值,得到具有最小阈值的波的展向波长与条纹结构的尺度基本一致; 罗纪生和周恒^[19]对湍流边界层内外区拟序结构进行了研究,得到外区拟序结构的速度场和涡量场,内区利用复合速度剖面研究了对称的共振三波的演化,得到拟序结构的尺度与实验吻合较好; 周恒、熊忠民^[20]研究了非对称的共振三波的演化规律,得到拟序结构的展向尺度与流向尺度、雷诺应力和等涡量面分布以及条纹结构的特征都与实验一致; 周恒、陆利蓬^[21]研究了有压力梯度的共振三波演化,得到压力梯度对拟序结构的产生、发展及其尺度、形状的影响,与实验定性上一致.另外,涡动力学方法也是研究拟序运动的一种有效方法,尤其在扰动较大,普通的稳定性分析已经失效的情况下.但黏性流动场中涡管发展的合理近似还需认真研究,理想无黏的涡动力学近似只在初始阶段合理,黏性作用会贯穿涡的扩散、迁移、卷吸和撕裂等过程.

2.3 数值研究方法

随着计算机技术的发展,使得直接求解三维非定常N-S方程而获得湍流全场瞬时信息成为可能,并得到了实验中无法直接测量的物理量.湍流数值模拟分为直接模拟(DNS)和大涡模拟(LES),直接模拟不引入任何湍流模型而求解N-S方程,大涡模拟只计算比网格尺度大的大涡运动,小涡的作用则建立亚格子雷诺应力模型模拟.

湍流直接模拟始于20世纪70年代Orszag^[22]及其合作者的工作,之后Stanford大学的Reynold, Ferziger和Moin等为首的集体作了大量的工作; Kim, Moin和Morscher^[23,24]对槽道流进行模拟,建立了KMM数据库;其数值方法主要有谱方法、伪谱法和高精度的有限差分法等,但目前只能计算一些中等以下雷诺数且有简单几何边界的湍流运动.

大涡模拟最早由Smagorinsky^[25]提出,1970年Dreadroff^[26]将大涡模拟应用到槽道流动;随后Schumann^[27]和Sreedhar^[28]改进了他的工作,将此方法推广到环形通道内的流动,并考虑传热和浮力效应;大涡模拟的亚格子应力模型仍很不完善,边界条件的确定尚待进一步研究,但已有的成果表明,采用

大涡模拟也不失为一种研究拟序结构的好方法。

3 振荡流底层拟序结构

3.1 振荡流底层湍流结构的研究

振荡流边界层的研究工作已进行了多年,李家春等^[29]已对振荡流层流边界层、层流到湍流边界层的转捩理论等进行了重点综述.对于振荡流底层中湍流结构的研究工作,国内外已开展多年,Jonsson^[30]最初测量了粗糙床面上的流速分布,并结合动量积分方程计算出剪应力的分布;Obremski & Fejer^[31]通过实验研究了过渡区的一些现象,观察到了湍斑的产生和时空分布;Kobashi 等^[32]利用振动平板产生的振荡流进行实验,对湍动的产生、线性和非线性的演化过程及自组织结构作了研究;Hino 等^[33]利用激光多普勒测速仪(LDV)、热线风速仪等对光滑壁面的振荡流边界层湍流结构作了详细的研究,将加速阶段和减速阶段的平均流速分布、湍动强度、雷诺应力和湍动能的产生率等进行了全面的比较,得出在加速阶段,靠近壁面处的流动由于剪切层的不稳定而产生湍动,但受到抑制不能得到充分发展;随着减速阶段的开始,湍动变得更加强烈,并产生猝发运动.湍动能的产生在减速阶段变得相当大,但在减速阶段的后期和加速阶段的反向流过程中,湍动减小到较低的水准,比较能谱和空间相关关系,发现在减速阶段高频范围内能谱衰减比 Kolmogorov's-5/3 律反映的更加迅速,显示出高频湍动导致了大的能量耗散.Sleath^[34]着重研究了粗糙边壁条件下的振荡流边界层运动,糙度雷诺数定义为

$$R_s^+ = \frac{k_s U_{fm}}{\nu}$$

式中 k_s 是 Nikuradse's 当量糙度, U_{fm} 是边界层近底最大摩阻流速, ν 为黏性系数.糙度参数为 a/k_s , 其中 a 为幅值.他的实验覆盖了较大范围的 a/k_s 值(最大达到 1112),其研究表明近底湍动强度在减速阶段达到最大,而外区的各阶段湍动强度和各流动参数之间没有明显的关系;雷诺应力远比通过动量积分方程估算的剪切应力小,最大雷诺应力基本上与最大湍动强度同时出现;涡黏系数在整个周期中的变化非常显著,临近床面的时均涡黏系数在任何给定的高度都是负值,该区域和发生在首次最大湍动强度所对应的最大雷诺应力区域有简单的相关关系,这种影响来自于反向流中涡的喷射,另外,时均涡黏系数随着高度稳步增长到最大值,而后逐步减小,这种增长率比恒定流中的要小.Jensen 等^[35]扩展了 Hion 和 Sleath 的工作,研究了高雷诺数下光滑壁面和粗糙壁面的振荡流边界层的湍流结构,其 Re 最高达 6×10^6 , a/k_s

值覆盖了 (400 ~ 3700) 的范围,指出对于光滑壁面的振荡流边界层而言,远离壁面处的湍动参数的变化和雷诺数的关系不大,而接近床面处,却有明显的依附关系;对于粗糙壁面的振荡流边界层,充分发展湍流区的湍流强度,只在近壁区域很大程度上依赖于 a/k_s 值的大小.

随着实验研究的深入,对振荡流边界层的数学模型的研究工作也逐步展开,Jonsson^[36]假定在整个波浪周期内,边界层内部流速分布遵循对数律,得到边界层内部的流速分布.后来更多研究者采用混合长度概念和对涡动黏性系数的分布作出假定,如 Kajiura^[37], Bakker^[38], Johns^[39], Brevik^[40], Myrhaug^[41] 等工作,他们认为涡动黏性系数不随时间变化,实际上振荡流底层的涡动黏性系数是历时变化的,因而这些模型只能获得流动的平均量,不能很好地描述振荡流底层的湍动特性.其它研究则试图从理论上寻找黏性底层的流速分布,如 Nielsen^[42].上面提到的研究工作主要针对流动的平均特性而言.Trowbridge 和 Madsen^[43,44]首次从理论上来解释时变湍动特性,假定涡黏系数随时间和壁面距离的变化而变化,并采用了随边界层水深增大的涡动黏性系数.Davies^[45]采用了类似的研究方法分析振荡流底层的湍动特性.上述模型没有涉及湍动输运方程.Davies 等^[46]采用湍动黏性系数概念,同时结合湍动动能输运方程来封闭运动方程,考虑了湍动动能的产生和耗散,还考虑了对流和扩散的共同作用.近年来, Hagatun 和 Eidsvik^[47], Sheng^[48], Aydin^[49], Justesen^[50,51], 吴永胜^[52]等采用双方程湍流模型 ($k-\varepsilon$ 模型) 预测湍动振荡流边界层.最近 Thais 和 Chapalain^[53]利用低雷诺数的 $k-\varepsilon$ 模型,对雷诺数变化与振荡流边界层运动特性的关系作了研究,并与已有的实验资料作了详尽的比较.

3.2 振荡流拟序结构和猝发运动的研究

湍流的拟序结构是指流体微团有序的运动,流体微团的上举、摆动、喷射和清扫过程被称为猝发现象.壁湍流边界层的拟序结构较自由切变湍流更为复杂,由于受到床面壁的限制,湍流结构往往是三维的.1967 年 Kline 用氢泡显示了平板边界层近壁区的拟序结构^[2],该研究工作被认为是认识剪切湍流中准周期与准确定性的拟序结构存在与重要性的经典研究工作;之后 30 年中经 Corino^[54], Kim^[3], Townsend^[55], Mumford^[56], Stretch^[57], Robinson^[13], Hayakawa^[58], Jeong 等^[59]的研究,对单向流的拟序结构所作的大量研究工作,表明在雷诺数某个变化范围内以及壁面糙度不同的情况下均可观察到拟序

结构的运动,粗糙壁面产生的湍动比光滑壁面产生的湍动要强烈的多,并随着糙度的增加而趋于各向同性;也使人们对单向平板边界层流拟序结构有了深刻的比较清晰的认识.但是,无论是飞行器还是船舶,其周围不仅存在单向流边界层,在复杂的气流或潮流波浪条件下,还会出现振荡的、往复的情况,即振荡流边界层流动的问题.此外,在海岸工程中,波浪等振荡流底层中拟序结构对海床冲淤也起关键作用.

对于振荡流边界层拟序结构的研究,根据现有的文献资料可以看出,目前研究工作主要是以试验的手段来完成,基础理论和数学模拟研究较为薄弱.具有代表性的试验成果有: Obremski & Fejer^[31]对振荡流边界层的过渡现象进行了研究,观测到了湍斑的产生与时空演化. Kobashi 等^[60]利用振动平板产生的振荡流进行实验,对湍动的产生、线性和非线性演化过程及自组织结构作了研究. Hino^[61]利用象限法研究了光滑壁面条件下的猝发现象,指出尽管振荡流的一些统计量和稳定流有很大的差别,但在维持湍动产生的基本过程方面是相同的,特别在对喷射过程的贡献;喷射阶段产生的雷诺应力比扫掠阶段强烈,而且这种大雷诺应力的范围能够扩展到离壁面较远的区域;在加速阶段,垂线流速分布几乎不遵从对数律,而在减速阶段,流速的对数律分布有一个较大的区域,特别是在喷射过程中. Sleath^[34]测量雷诺应力和涡黏系数时出现了一些特别的现象,认为其原因来自于边界层内的猝发运动,而且随着糙度的增加,这种湍动变得更加强烈. Sarpkaya^[62]利用流动显示技术实验研究了振荡流边界层的低速条带和其它的准拟序结构.

随着计算机技术的发展,使得数学模拟研究振荡流边界层层流和湍流流动变为可能(李家春等^[29]),并且可以得到实验中无法直接测量的物理量,进而获得湍流全场瞬时信息.与单向流相对应,振荡流湍流拟序结构的数值模拟也分为直接模拟(DNS)和大涡模拟(LES)2种. Vittori 等^[63]通过对层流区施加扰动,利用直接数值模拟描述了从层流向间歇湍流的转换机理,探讨了不同雷诺数下拟序运动.白玉川等^[64]结合飞行器和船舶减阻机理的研究,利用大涡模拟的方法,建立了模拟振荡流边界层湍流运动特性的数学模型,进而对飞行器和船舶设计中遇到的,较为典型的2种边界层流动中拟序涡的生成过程进行模拟研究,计算结果表明,在振荡流加速阶段,靠近壁面处的流动由于剪切层的不稳定性而产生湍动,但受到主流的抑制不能得到充分发展;振荡流随着减速阶段的开始,湍动逐步变得更加强烈,并形成拟序涡结构,

该工作为进一步研究如何控制或适应边界层中湍流结构,达到减阻的效果打下了可靠的基础.

4 振荡流拟序结构与泥沙运动

4.1 拟序结构对泥沙运动的影响

湍流近壁区拟序结构研究表明,近壁区存在低速流体的喷射和高速流体的清扫所构成的准周期的猝发现象,这种运动是决定颗粒在近床面区运动特性的重要因素. Sutherland^[65]首次注意到边壁附近的固体颗粒运动与猝发现象有密切关系.之后 Grass^[66], Summer^[67]和 Nion & Carcia 等^[68]对拟序结构与固体颗粒运动的相互作用机理进行了大量的实验研究.研究发现在光滑床面上,颗粒有向拟序结构低速流带聚集的趋势,尔后随着低速条带的上升,颗粒被低动量流体携带喷射而离开床面,这时颗粒有可能进入主流区向下游运动,也有可能回落床面,或在回落床面过程中,再次遇到喷射而离开床面,也有可能被俯冲的高速流体带回床面; Gyr^[69]等人认为拟序运动对泥沙输运有显著影响,河床上泥沙运动的发生与雷诺应力的峰值相对应,并取决于床面剪切应力超过某个界限值的作用时间; Nezu & Nakagawa^[70]认为在 Rouse 值低于5的情况下,猝发运动对床面附近悬移质的输运起决定性的作用,而正是多次喷射阻碍了泥沙的下沉.曹志先^[71]基于泥沙上扬是猝发直接作用的力学机理,构造出可自由冲刷床面泥沙上扬通量函数,建立了输沙的简化模型.以上研究主要是针对单向流而言,振荡流作用下的泥沙猝发过程中喷射、清扫运动中,流体对颗粒的作用如何实现,其力学机理尚待进一步研究.

对于波浪等非对称振荡流边界层作用下的泥沙运动,主要有以下成果. Sleath^[72], Ahian^[73]针对振荡流作用下的低输沙率情况下进行了研究,类似的还有 Horikawa 等^[74], Nielsen^[75], Dick 等^[76], Asano^[77]等人的工作.在这些研究成果中, Ribberink 和 Al-Salem^[78], Black^[79]等人的工作颇具典型意义,他们分别就对称和非对称振荡流,在一个运动周期里的掀沙情况进行了室内和现场观测研究,发现在一个波浪振荡周期里,存在多个掀沙峰值,在流动转向时刻出现掀沙次峰,此时流体质点的轨道速度、床面剪应力都很小,按常规计算波浪掀沙的方法,很难描述这一掀沙过程.近期通过天津大学泥沙研究室和国外的一些实验研究表明,波浪作用下的悬移质含沙量变化滞后于流体质点的轨道速度和底部切应力的变化,这一特性并非泥沙惯性所致,而主要取决于底层水流的湍动特性,尤其是取决于振荡流边界层中的拟序结构

(coherent structure), 其演化及猝发喷射 (burst ejection)、大涡喷射 (vortex jet) 对床面形状的发展、床面泥沙的掀动上扬起着决定性作用^[80,81]。

波浪掀沙与其底部水流的湍动拟序结构的动力特性具有密切关系。围绕该课题, 目前的研究主要从 2 方面展开: (1) 研究振荡流本身的湍动结构; (2) 将湍动结构引入振荡掀沙过程。在实验方面, 已有的工作分别就光滑床面、粗糙床面及高雷诺数情况, 对振荡流底层的湍动特性、底层结构的发展过程进行了研究, 发现在振荡流的加速阶段, 湍流首先由于底层的剪切失稳而激发产生, 但此时由于受到主流的抑制不能发展, 只有到了减速阶段的开始, 湍流才逐步强烈地增长并以拟序“猝发”的运动形式表现出来, 这种“猝发”的过程以及拟序结构的特征尺度还有待于进一步实验研究。从已有的数值研究来看, 研究波浪底部边界层所采用的模型主要是一维垂向 $k-\varepsilon$ 模型, 从工程角度来说其预测结果基本满足需要。然而 $k-\varepsilon$ 模型中有多个可调参数, 这些参数主要通过简单剪切湍流的实验资料获得, 而波浪底部边界层运动则具有强非恒定性, 存在压力梯度, 一般的湍流模型只能获得流动的平均量, 不能够对边界层内部的脉动特性进行模拟, 诸如脉动强度的分布, 湍动的猝发、扫掠现象等。为进一步从理论上研究波浪底部层的流动情况, 需采用更精细的数值模型, 如大涡模拟或直接数值模拟。

4.2 沙纹床面波浪底部边界层湍动的特性及其与泥沙运动作用研究

波浪作用下的沙纹形态很多, 这些不同形式的沙纹有着各种各样的平衡断面形式和尺度, 在一些区域内它们互相转化。常规的文献中一般将它们归纳为 2 种典型沙纹形式: 滚动沙纹 (rolling ripple) 形式和涡动沙纹 (vortex ripples) 形式。滚动沙纹存在于沙纹形成初期, 很不稳定, 自然界中很少见到。涡动沙纹则是海岸沙纹中最常见到的也是最重要的一种, 它广泛存在近岸滨海区域。Bagnold^[82] 指出, 涡动沙纹又称轨道沙纹 (orbital ripples), 因为沙纹的长度是波浪质点运动轨迹的函数。涡动沙纹的剖面形状为三角形, 两侧的斜坡都很平缓。沙纹周围的流动特性取决于沙纹背水面产生的涡的强度, 泥沙输运则是由于泥沙滚动到沙纹的另一侧, 致使沙纹不断向前运动。涡动沙纹很大程度上决定着床面阻力和波浪衰减, 且在它作用下的泥沙输运也比平坦床面泥沙输运量大得多。

涡动沙纹的绕流结构是研究其动力特性的基础。Ayrton^[83] 首次系统地对涡动沙纹作了研究, 发

现沙峰后形成的涡对于沙纹的动力特性而言非常重要。虽然在该试验中, 实验设备并不能很好地描述振荡流作用下沙纹运动特性, 但对于沙纹后涡的形成、运动以及沙纹的波长、波高等都作了细致的描述, 开了振荡流作用下沙纹动力特性研究的先河。Du Toit 和 Sleath^[84] 对振荡流作用下的沙纹绕流结构进行了详细的实验研究, 测量了固定沙纹光滑和粗糙床面的近底流速分布, 发现沙纹表面由于涡的动力作用形成强的床面剪应力。Sato^[85], Ikeda 等^[86] 对沙纹绕流的流速分布和湍动特性进行了研究。另一部分学者从理论方面入手, 认为沙纹的演变是水流和泥沙界面的不稳定问题。Sawamoto^[87] 从理论上分析了波浪作用下的床面的稳定性, 通过 Oseen 近似分析绕过沙波的水流特性, 得到床面剪应力的分布, 最后对输沙率的分布作了探讨。Blondeaux^[88] 基于线性稳定性理论, 对非黏性泥沙在振荡流作用下的沙纹形成进行了研究, 预测了二维沙纹的形成及尺度, 但忽略了非线性项的影响。Vittori 和 Blondeaux^[63] 利用弱非线性理论预测了二维沙波的波高和波长, 但没有考虑流体的分离, 而且假定流动的分离仅发生在沙纹波高与波长之比大于 0.1 的情况, 还给出了涡动沙纹形成的初始条件。这些研究工作都假定床面形态和流动是二维的, Vittori 和 Blondeaux^[89] 在此基础上研究了三维交错沙纹的形成机理。Foti 和 Blondeaux^[90] 引入 Sleath^[91] 提出的涡动黏性系数假定模型, 进一步研究了波浪作用高雷诺数情况下沙纹的形成。

近年来大量的研究工作主要集中在数值研究方面。最早 Longuet-Higgins^[92] 利用离散涡的方法建立数值模型, 对沙纹绕流的涡的动力特性作了初步研究。Blondeaux 和 Vittori^[93] 则根据涡量输运方程对层流情况进行探讨。近来 Sato 等^[85], Aydin^[49] 和 Tsujimoto 等^[94] 利用双方程 $k-\varepsilon$ 模型对沙纹绕流结构及悬沙输运进行了数值研究, 其结果在一定程度上反映了绕流的平均特性。最近 Fredsoe^[95] 等在波浪槽中对沙纹绕流的涡动力特性进行试验研究, 考虑到波浪边界层非恒定特征, 采用 $k-\omega$ 模型进行数值研究, 试验结果和数值结果吻合较好。

水流与泥沙的相互作用形成各种床面形态, 沙纹的存在对流场和泥沙运动有很大的影响。沙纹床面的波浪作用下推移质泥沙运动研究很少, 已有的工作一般主要针对平均推移质输沙率的大小而言, 对于推移质输沙率沿沙纹的沿程变化的研究几乎还未被研究过。对于悬移质泥沙运动, Shibayama^[96] 对沙波作用下泥沙运动作了细致的实验和现场研究, 认为沙波顶部产生的边界层分离、下游形成的大涡结构是产生悬移质泥沙输运的主要原因, 并据此利用势流理论建

立了悬移质泥沙输运模型。Tsujiimoto^[94]采用湍流 $k-\varepsilon$ 模型,对沙纹床面 Stokes 波作用下流动结构和悬沙运动进行预测;Hansen^[97]利用离散涡的方法,引入“单元泥沙云”的概念,探讨沙纹床面的悬沙分布特性。Shibayama^[96]建立二维立面数值模型,假定涡动黏滞系数沿水深变化,对振荡流作用下底层的悬沙分布进行研究,并与实验数据作了对照。

虽然上述研究都取得了大量成果,但所采用的湍流模型只能获得流动的平均量,并不能很好地描述绕流的湍动特性,以及分离流的特征量和涡的动力特性,有必要建立更高级的数值模型进行研究。

4.3 泥沙对湍流结构的影响

水流挟带泥沙,而泥沙存在又反过来影响和改变水流的物理特性和湍动结构。在含沙量较低且为粗颗粒泥沙时,泥沙的存在主要是影响水流的湍流结构;而在含沙量较高或为细颗粒泥沙的情况下,泥沙的存在及影响水流的湍流结构同时也改变水流的物理特性,如水流的黏度和流变特性。泥沙存在对水流的影响,虽已进行了一些研究工作,但实测资料还远远不够,无论是单向流还是振荡流,实测资料都有限,并且存在很大的分歧。既有泥沙存在使挟沙水流湍动增强的试验资料(Muller^[98]);也有泥沙存在使挟沙水流湍动减弱的事例,如西北黄土地区高含沙水流(钱宁^[99])。目前研究的基本结果是悬移质的存在将使水流中的湍动尺度减小来抑制挟沙水流中的湍动运动(Yalin^[100]);而推移质泥沙的存在则通过改变湍动强度来改变挟沙水流中的湍动运动,推移质泥沙运动传递了部分剪切力,使湍动能减小,同时推移泥沙颗粒的存在又造成了近壁流层的不稳定性,导致了湍流的产生和湍流强度的增加,具体视二者的强弱决定湍动强度的增减^[101]。

总之,湍流结构由于泥沙的存在而受到影响,要研究这种影响有很大的难度,所以到目前为止,无论是单向流还是振荡流,研究主要集中在实验方面,Summer^[67]和Yung等^[102]利用流动显示技术研究悬浮体的运动;Dyer & Soulsby^[103]和Roger & Eaton^[104]通过测量流体和悬浮体的湍流统计量来检测猝发运动;Rashi等^[105]由猝发频率和平均条纹带的测量来得到固体的密度、尺寸和浓度对猝发的影响等;在理论分析和计算上,针对单向流有以下研究成果,Cleaver等^[106]曾建立了悬浮体在流体猝发时的输运模型,模型描述的悬浮体沉积和离壁速度与某些实验吻合,但不能反映悬浮体对猝发的影响;周汉宣等^[107]分别研究了在光滑和粗糙底壁的情况下,通过在方程中添加悬浮体对流体的作用项,结合适当

假设和理论分析,得到了多种因素对近壁湍流猝发的影响;而对于振荡流湍流拟序结构与泥沙作用的完整理论,则有待研究工作者更为艰苦的努力,预计需要一段时间方可建立。

5 湍流拟序结构与床面形态相互作用研究初步

在单向水流的作用下,推移质泥沙在河床表面作各种不同形式的集体运动,形成各种床面形态,这种泥沙颗粒在床面上的集体运动统称为沙波运动。随着水流运动强度的增加,沙波运动及其相应的床面形态主要有以下几种不同的发展阶段:沙纹、沙垄、床面平整、沙浪、急滩和深潭^[100,108,109]。在振荡流和波浪作用下,床面形态主要是海底沙纹、沙垄(沙脊)和沙坝3种形式。沙波是单向或振荡水流边界层运动的印迹,是床面泥沙对边界层湍动运动的响应,当床面附近扰动波或湍流拟序结构所产生的床面剪切应力大于泥沙起动的 Shields 剪切应力时,床面泥沙即产生响应;如果扰动波或湍流拟序结构所产生的扰动频率接近床面泥沙的固有频率时,则会产生湍流结构与泥沙颗粒的共振现象,这种特性也称之为“泥沙的检波性质”,此时床面会发生最大的响应,床面沙波也会以最快的速度发展(白玉川、罗纪生^[110])。床面形态是单向或振荡水流底层扰动波或湍流拟序结构作用的结果,同时又反馈于水流边界层的运动湍流结构,在低能态的情况下,单向流或振荡流底层流动失稳导致了河床和海床沙纹的产生;而在高能态的情况下,或沙垄尤其是逆行沙垄的产生,则主要是单向流或振荡流底层大尺度湍流结构——湍流拟序结构作用的结果。当床面形态发生改变后,无论是振荡流还是单向流,其失稳形式和湍流拟序结构的演化过程都将发生变化,这样也就引出了必须探讨波状边界层流动失稳或湍流结构特性的新的研究课题,也是目前泥沙学术研究的重点。

Blondeaux^[88]基于线性稳定性理论,对非黏性泥沙在振荡流作用下的沙纹形成进行了研究,预测了二维沙纹的形成及波长,但忽略了非线性项的影响。Vittori & Blondeaux^[63]利用弱非线性理论预测了二维沙波的波高和波长,但没有考虑流体的分离,而且假定流动的分离仅发生在波高与波长之比大于0.1的情况,还给出了涡动沙波形成的初始条件。这些研究工作都假定床面形态和流动是二维的,Vittori & Blondeaux^[89]在此基础上研究了三维交错沙纹的形成机理,指出三维交错沙纹主要是由于边界层二维流动向三维失稳演化作用所致,是一种过渡的

形态。 Foti & Blondeaux^[90] 引入 Sleath^[91] 提出的常涡黏系数模型和两尺度摄动的方法, 进一步研究了波浪作用下高雷诺数情况下沙纹的形成。

沙波的存在对主流流场和泥沙悬移质运动也有很大的影响。 Shibayama^[111] 对沙波作用下泥沙运动作了细致研究, 认为沙波顶部产生的边界层分离, 下游形成的大涡结构是产生悬移质泥沙运输的主要原因, 并据此利用势流理论建立了悬移质泥沙运输模型。 沙波的演变是水流和泥沙界面的不稳定问题, Sawamoto^[112] 从理论上分析了波浪作用下的床面的稳定性, 通过 Oseen 近似分析绕过沙波的水流特性, 得到床面剪应力的分布, 最后对输沙率的分布作了探讨。

6 结语及展望

湍流拟序结构的发现, 使人们从一崭新的观点和方法来研究湍流的特性。 湍流拟序结构的研究有助于了解湍流自身的发生、发展和衰减等过程, 对建立合理的工程湍流模式具有促进作用, 同时湍流拟序结构的研究也推动了相关工程学科的发展, 如泥沙运动力学。“挟沙水流湍动结构及其与床面泥沙的相互作用的机理”, 目前已成为泥沙运动基本理论的研究主题, 也是泥沙运动力学目前和今后理论研究的重点。 对于河流动力学学科来讲, 我国是一个多沙河流的国家, 河流泥沙运动状况, 既关系到河流本身的发展演变, 也影响着重大水利工程的成败与否。 在流域规划、防洪设计、水土保持与水资源保护及利用方面, 河流泥沙问题是必须考虑的因素。 对于相当多的河流来讲, 治水必须治沙, 这是中国水利的特点之一, 也是难点之一。 例如, 如何将高含沙水流输入海, 保证黄河的河流功能, 对我国经济健康发展和生态环境保护等诸多方面具有重要的作用。 而对于海岸动力学学科, 我国东海外陆架、渤海、黄海、长江口及南海北部等均有大量的大型沙波发育, 海岸泥沙运动十分活跃, 因此开展对波浪及振荡流作用下的近岸海底沙波形成和运移机制的理论研究, 可推进对沙质海岸地貌演变过程和沙质陆架海的沉积演变过程认识; 同时对促进港口、航道、海底电缆、海洋钻井及油气管道等海洋工程建设中灾害防治和预测以及海岸带资源的开发和利用具有重要的理论和工程意义。

参 考 文 献

- 1 Einstein H A, Li Huon. The vision sub-layer along a smooth boundary. *J Engin Mech ASCE*, 1956, 82(2): 12~20
- 2 Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A, Runstadler P W. The structure of turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1967, 70: 741~773
- 3 Kim H T, Kline S J, Reynolds W C. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1971, 50: 133~160
- 4 Smith C R, Metzler S P. The characteristics of low-speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1983, 129: 27~54
- 5 姜楠, 舒玮, 王振东. 子波分析辨识壁湍流猝发事件的能量最大准则. *力学学报*, 1997, 29(3): 406~412
- 6 Kasagi N. Structural study of near-wall turbulence and its heat transfer mechanism. In: Kline S J, Afgan N H, eds. Near-wall turbulence 1988 Zoran Zaric Memorial conference. Hemisphere publishing corporation, 1990. 596~619
- 7 Upatnieks A, Laberteaux K, Ceccio S L. A kilohertz frame rate cinema graphic PIV system for laboratory scale turbulent and unsteady flows. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(1): 87~98
- 8 Landahl M T. A wave -guide model for turbulent shear flow. *J Fluid Mech*, 1967, 27: 443~450
- 9 Landahl M T. Wave breakdown and turbulence. *SIAM J Appl Math*, 1975, 28: 775~890
- 10 Bark F H. On the wave structure of the wall region of a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech*, 1975, 70: 229~320
- 11 Guezennec Y G, Piomelli U, Kim J. On the sharp and dynamics of wall structure in turbulent channel flow. *Phys Fluids*, 1989, A1(4): 764~766
- 12 Landahl M T. On sub-layer streaks. *J Fluid Mech*, 1990, 212: 593~614
- 13 Robinson S K. Coherent motion in the turbulent boundary layer. *Ann Rev in Fluid Mech*, 1991, 23: 601~639
- 14 Hamilton J M, Kim J, Waleffe F. Regeneration mechanisms of near-wall turbulence structures. *Journal of Fluid Mechanics*, 1995, 287: 317~332
- 15 Blackwelder R F. Analogies between transitional and turbulent boundary layer. *Phys Fluids*, 1983, 26: 2807~2815
- 16 Kim J, Hussain F. Propagation velocity of perturbations in turbulent channel flow. *Physics of Fluids A Fluid Dynamics*, 1993, 5(3): 695~720
- 17 Jang P S, Benney D J, Gran R L. On the origin of stream-wise vortices in a turbulence boundary layer. *J Fluid Mech*, 1986, 169: 109~123
- 18 周恒. 平板湍流边界层底层的不稳定波. *力学学报*, 1988, 20: 481~490
- 19 罗纪生, 周恒. 湍流边界层相干结构的一个理论模型. *应用数学与力学*, 1993, 14(11): 939~945
- 20 周恒, 熊忠民. 湍流边界层近壁区相干结构起因的研究. *中国科学, A 辑*, 1994, 24(9): 941~948
- 21 周恒, 陆利蓬. 压力梯度对湍流边界层相干结构的影响. *中国科学, A 辑*, 1997, 27(2): 173~179
- 22 Orszag S A. Numerical simulation of incompressible flows within simple boundaries. *J Fluids Mech*, 1971, 49: 75~112

- 23 Kim J, Moin P. The structure of the vorticity found in turbulent channel flow: Part 2. Study of ensemble-average fields. *J Fluid Mech*, 1986, 162: 339~363
- 24 Kim J, Moin P, Moser R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number. *J Fluid Mech*, 1987, 177: 133~166
- 25 Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The Basic Experiment. *Mon Wea Rev*, 1963, 91: 99~104
- 26 Deardroff J W. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds number. *J Fluid Mech*, 1970, 41: 452~480
- 27 Schumann U. Results of a numerical simulation of turbulent channel flows. In: Dalle-Donne M, ed. International Meeting on Reactor Heat Transfer, 1973. 230~251.
- 28 Sreedhar M K, Ragab S A. Large eddy simulation of longitudinal stationary vortices. *Phys Fluids*, 1994, 6(7): 2501~2515
- 29 李家春, 周济福, 谢正桐. 振荡流边界层研究及应用. *力学进展*, 1999, 29(4): 451~460
- 30 Jonsson I G. Measurement in the turbulent wave boundary layer. In: Proc 10th Congr. IHAR, London, 1963, 1: 85~92
- 31 Obremski H J, Fejer A A. Transition in oscillating boundary layers flows. *J Fluid Mech*, 1967, 29: 93~110
- 32 Kobashi Y, Hayakawa M. Development of turbulence through non-seady boundary layer. In structure and mechanisms of Turbulence 1. *Lecture Notes in physics*, 1978, 75: 277~288. Springer.
- 33 Hino M, Kashiwanayagi M, Nakayama A, Hara T. Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow. *J Fluid Mech*, 1983, 131: 363~400
- 34 Sleath J F A. Turbulent oscillatory flow over rough beds. *J Fluid Mech*, 1987, 182: 369~409
- 35 Jesen B L, et al. Turbulent scillatory boundary layers at high Reynolds numbers. *J Fluid Mech*, 1989, 206: 265~297
- 36 Jonsson I G. Wave boundary layers and friction factors. In: Proc 10th Conf Coastal Eng ASCE, Tokyo, 1966. 127~148
- 37 Kajiuura K. A model for the bottom boundary layer in water waves. *J Fluid Mech*, 1968, 182: 369~409
- 38 Bakker W T. Sand concentration in an oscillatory flow. In: Proc 14th Conf Coastal Eng Copenhagen, 1974. 1129~1148
- 39 Johns B. The form of the velocity profile in a turbulent shear wave boundary layer. *J Geophys Res*, 1975, 80: 5109~5112
- 40 Brevik J. Oscillatory rough boundary layers. *J Waterway Port Coastal Ocean Eng Div ASCE*, 1981, 107: 175~188
- 41 Myrhaug D. On a theoretical model of rough turbulent wave boundary layers. *Ocean Eng*, 1982, 96: 547~565
- 42 Nielsen P. On the structure of oscillatory boundary layers. *Coastal Eng*, 1985, 9: 261~276
- 43 Trowbridge J H, Madsen O S. Turbulent wave boundary layers: 1. Model formulation and first order solution. *J Geophys Res*, 1984a, 89 C5: 7989~799
- 44 Trowbridge J H, Madsen O S. Turbulent wave boundary layers: 2. Second order theory and mass transport. *J Geophys Res*, 1984b, 89 C5: 7999~8007
- 45 Davies A G, Villaret C. Oscillatory flow over rippled beds: Boundary layer structure and wave-induced Eulerian drift. In: Hunt J N, ed. Chapter 6 in Gravity Waves in Water of Finite Depth, Advances in Fluid Mechanics, Computational Mechanics Publications, 1997. 215~254
- 46 Davies A G, Soulsby R L, King H L. A numerical model of the combined wave and current bottom boundary layer. *J Geophys Res*, 1988, 93 C1: 491~508
- 47 Hagatun K, Eidsvik K J. Oscillating turbulent boundary layers with suspended sediment. *J Geophys Res*, 1986, 91 C11: 13045~13055
- 48 Sheng Y P. Modeling turbulent bottom boundary layer dynamics. In: Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Taipei, 1986. 1496~1508
- 49 Aydin I. Computation and analysis of unsteady turbulent flow on flat bottom and over rigid ripples: [dissertation]. Sendai, Japan: Tohoku University, 1987
- 50 Justesen P. Turbulent wave boundary layers: [dissertation]. The Technical University of Denmark, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, 1988
- 51 Justesen P. Prediction of turbulent oscillatory flow over rough beds. *Coastal Eng*, 1988, 12: 257~284
- 52 吴永胜, 练继建, 张庆河, 秦崇仁. 波浪 - 水流共同作用下的湍动边界层数值分析. *水利学报*, 1999, (9): 45~50
- 53 Thais L, Chapalain G, Smaoui S. Reynolds number variation in oscillatory boundary layers. Part I: purely oscillatory motion. *Coastal Eng*, 1999, 36: 111~146
- 54 Corino E R, Brodkey R S. A visual investigation of the wall region in turbulent flow. *J Fluid Mech*, 1969, 37: 1~30
- 55 Townsend A A. The Structure of Turbulent Shear Flow. 2nd ed. Cambridge University Press, 1976
- 56 Mumford J C. Structure of the large eddies in fully developed turbulent shear flows-1. the plane jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 118: 241~268
- 57 Huq Pablo, Stretch D D. Critical dissipation rates in density stratified turbulence. *Physics of Fluids*, 1995, 7(5): 1034~1062
- 58 Hayakawa Kimihito, Hara Fumio. Theoretical stability analysis of a rotating cylinder containing two liquids. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu*, 1991. 2170~2177
- 59 Jeong J, et al. Coherent structures near the wall in a turbulent channel flow. *J Fluid Mech*, 1997, 332: 185~214
- 60 Kobashi Y, Hayakawa M. Development of turbulence through non-seady boundary layer. In: Structure and mechanisms of Turbulence. Lecture Notes in Physics, 1978, 75: 277~288
- 61 Hion M, et al. Experiment on the turbulence statistics and the structure of reciprocating oscillatory flow. *J Fluid Mech*, 1983, 131: 363~400

- 62 Sarpkaya T. Coherent structures in oscillatory boundary layers. *J Fluid Mech*, 1993, 253: 105~140
- 63 Vittori G, Verzicco R. Direct simulation of Transition in an Oscillatory boundary layers. *J Fluid Mech*, 1998, 371: 207~232
- 64 白玉川, 徐海珏. 平板和翼型壁面上振荡流底边界层中拟序涡结构运动演化的大涡模拟研究. *船舶力学*, 2002, (4): 1~10
- 65 Sutherland A J. Proposed mechanism for sediment entrainment by turbulent flow. *J Geophys Res*, 1967, 72: 191~198
- 66 Grass A J. Transport of fine sand on a flat bed: turbulence and suspension mechanics. *In Euro Mech*, 1974, 48: 33~34
- 67 Summer B M, Degaard R. Particle motion near the bottom in turbulent flow in an open channel. *J Fluid Mech*, 1981, 129: 311~332
- 68 Nion Y, Garcia M H. Experiment on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: Implications for sediment transport. *J Fluid Mech*, 1996, 326(10): 285~319
- 69 Gry A, Schmid A. Turbulent flow over smooth erodible sand bed in flumes. *J Hyd Res*, 1997, 35: 525~544
- 70 Nezu I, Nakagawa H. Turbulent structure in unsteady depth varying open channel flow. *J Hyd Engng ASCE*, 1997, 123: 752~763
- 71 曹志先. 泥沙数学模型近底边界条件 1: 平衡输沙; 2: 非平衡输沙. *水利学报*, 1997, (1): 11~24
- 72 Sleath J F A. Measurements of bed load in oscillatory flow. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 1978, 104(4): 291~307
- 73 Ahilan R V, Sleath J F A. Sediment transport in oscillatory flow over flat beds. *J Hydraul Div ASCE*, 1987, 113: 308~322
- 74 Horikawa K, Watanabe A, Katory S. 1982. Sediment transport under sheet flow conditions. In: Pro 18th Conf Coastal Engng, ASCE, Canada, 1982. 1335~1352
- 75 Nielsen P. Suspended sediment concentrations under waves. *Coastal Engng*, 1986, 10: 22~31
- 76 Dick J E, Sleath J F A. Velocities and concentrations in oscillatory flow over beds of sediment. *J Fluid Mech*, 1991, 233: 165~196
- 77 Asano T. Sediment transport under sheet-flow conditions. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1995, 121(5): 239~246
- 78 Ribberink J, Al-salem A. Time-dependent sediment transport phenomena in oscillatory boundary layers flow under sheet flow conditions. Technical Report H840. 20, Part IV, Delft Hydraulic. 1992
- 79 Black B. Suspended sediment load during an asymmetric wave cycle over a plane bed. *Coastal Engineering*, 1994, 23: 95~114
- 80 Bai yuchuan. Numerical study for evolution of coherent vortex in unidirectional and oscillatory boundary layer flows over sand ripples. *Journal of Hydrodynamics*, 2002, 4: 88~94
- 81 Jiang Changbo, Bai Yuchuan, Zhao Zidan. Numerical study on vortex dynamics in oscillatory boundary layer flow over ripples. In: Li Guifen, ed. The International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR). The XXIX IAHR Congress was held at the Beijing International Convention Center (BICC), Beijing, 2001-09-16-21. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 164~170
- 82 Bagnold R A. Motion of wave in shallow water; interaction between waves and sand bottoms. *Proc R Soc London*, 1964, A187: 1~8
- 83 Ayrton H. The origin and growth of the ripple mark. *Proc Roy Soc of London*, 1910, A84: 285~305
- 84 Du Toit C, Sleath J F A. Velocity measurements close to ripple beds in oscillatory flow. *J Fluid Mech*, 1981, 112: 71~96
- 85 Sato S. Oscillatory Boundary Layer Flow and Sand Movement Over Ripples: [dissertation]. Tokyo: Univ of Tokyo, 1987
- 86 Ikeda S, Horikawa K, Nakamura H, Noguchi K. Oscillatory boundary layer over a sand ripple model. *Coastal Eng in Japan*, 1991, 32: 15~29
- 87 Sawamoto M. Stability theory of sand ripples due to wave action. *Coastal Eng In Jap*, 1986, 29: 120~128
- 88 Blondeaux P. Sand ripples under sea waves. Part 1. Ripple formation. *J Fluid Mech*, 1990, 218: 1~17
- 89 Vittori G, Blondeaux P. Sand ripples under sea waves. Part 3, Brick-pattern ripple formation. *J Fluid Mech*, 1992, 239: 23~45
- 90 Foti E, Blondeaux P. Sea ripple formation : the turbulent boundary layer case. *Coastal Eng*, 1995, 6: 227~236
- 91 Sleath J F A. Velocities and shear stresses in wave-current flows. *J Geophys Res*, 1991, 96 C8: 15237~15244
- 92 Longuet-Higgins M S. Oscillatory flow over steep sand ripples. *J Fluid Mech*, 1981, 107: 1~35
- 93 Blondeaux P, Vittori G. Vorticity dynamics in an oscillatory flow over a rippled bed. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 226: 257~289
- 94 Tsujimoto G, et al. A study on suspended sediment concentration and sediment transport mechanism over rippled sand bed using a turbulence model. *Coastal Eng In Japan*, 1991, 34: 178~189
- 95 Fredsoe J, Andersen K H, Sumer B, Mutlu. Wave plus current over a ripple-covered bed. *Coastal Engineering*, 1999, 38(4): 177~221
- 96 Shibayama T. Sediment transport mechanism and two-dimensional beach transformation due to waves: [dissertation]. Tokyo: Univ of Tokyo, 1984
- 97 Hansen E A, Fredsoe J, Diegaard R. Distribution of suspended sediment over wave-generated ripples. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1994, 120(1): 37~55
- 98 Muller A. Turbulence Measurement over a movable bed with sediment transport by Laser-Anemometry. In: Proc 15th Congress of Intern Assoc Hyd Res, 1973
- 99 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1985

- 100 Yalin M S. Mechanics of Sediment Transport. Oxford: Pergamon Press, 1972
- 101 Kazanskij I, Bruhl H. Influence of high concentrated rigid particles on macro-turbulent characteristics of pipe flow. *Proc Hydrotransport*, 1972, 2(A2): 15~30
- 102 Yung B P K, et al. The role of turbulent bursts in particle reentrainment in aqueous system. *Chem Engng Sci*, 1989, 44: 415~428
- 103 Dyer K R, Soulsby R I. Sand transport on the continental shelf. *A Rev Fluid Mech*, 1988, 210: 295~308
- 104 Rogers C B, Eaton J K. The interaction between dispersed particles and fluid turbulence in a flat plate turbulent layer in air. Report Md-52, Stanford Univ, Calif, 1989
- 105 Rashidi M, et al. Particle-turbulence interaction in a boundary layer. *J Multiphase Flow*, 1990, 16: 935~947
- 106 Cleaver J W, Yates B. The effect of re-entrainment on particle deposition. *Chem Engng Sci*, 1976, 31: 147~159
- 107 周汉宣等. 悬浮泥沙对粗糙壁湍流场猝发的影响. *水利学报*, 1997, 4: 49~55
- 108 Simons D B, Richardson E V. Forms of bed roughness in alluvial channels. *J Hydraul Div ASCE*, 1960, 87(3): 87~105
- 109 王兴奎, 邵学军, 李丹勋. 河流动力学基础. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- 110 白玉川, 罗纪生. 明渠层流失稳与沙纹成因机理研究. *应用数学与力学*, 2002, 23(3): 254~268
- 111 Sawamoto M. Stability theory of sand ripples due to wave action. *Coastal Eng In Jap*, 1986, 29: 120~128

THE PROGRESS OF RESEARCH ON THE COHERENT STRUCTURE IN OSCILLATORY FLOW BOTTOM BOUNDARY LAYER AND ITS INTERACTION WITH THE SEDIMENT*

BAI Yuchuan¹ JIANG Changbo¹ LUO Jisheng² ZHAO Zidan¹

¹ Institute for Sediment on River and Coast Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The coherent structure of the turbulence and the interaction of the sediment and the bed are now much studied all over the world. The researches on the interaction between the turbulent coherent structure of the unidirectional flow and the oscillatory flow and the sediment are reviewed in this paper, in which the emphasis is on the studies on the turbulence of the oscillatory flow on the bottom layer. The major issues that should be studied in the future are pointed out and discussed in detail.

Keywords oscillatory, coherent structure, sediment motion, bed form

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50279030, 59809006).