

明渠紊流拟序结构及其 与泥沙运动相互作用的研究综述^{*}

毛 野 张志军 徐锡荣

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘 要 从研究方法、明渠紊流拟序结构、泥沙运动与床面形态、拟序结构与泥沙运动和拟序结构与床面形态等方面,总结了近年来国内外有关研究进展.在展望了研究趋势后,提出今后应该进行更加精细的实验研究,加深对拟序结构与泥沙运动相互作用的理解.

关键词 紊流 拟序结构 泥沙运动 相互作用 床面形态

中图号 TV143.1

拟序结构与泥沙运动之间的相互作用是基础研究问题.实验量测技术与计算机应用相结合,不断提高水平,为推进有关研究奠定了基础.近年来国内外加强了紊流边界层的水流结构、泥沙输运、河床形态的形成和稳定等方面的研究,取得了明显的进步.

1 研究方法

紊流拟序结构借助流动显示技术才能被人们所认识.尽管早有人预见,但直到 1967 年 Kline^[1]采用氢气泡显示流动才开展了对‘猝发’现象的研究.根据研究手段、应用的技术或关注的焦点,S. K. Robinson^[2]将紊流边界层拟序运动的研究分为 4 个阶段:发现阶段(1932 ~ 1959 年)、流场显示阶段(1960 ~ 1971 年)、条件采样阶段(1972 ~ 1979 年)和计算机模拟阶段(1980 年至今).目前的研究多集中于 $Re_0 < 5\,000$ 的低雷诺数情况.

1.1 流动显示研究

紊流场迫使示踪物运动.采用各种仪器和手段研究示踪物的运动,可分析紊流的拟序结构.实验现象观察主要取决于实验手段.示踪物可以是染料、颗粒、氢气泡和烟气等.测量示踪物流速的仪器为热丝或热膜等复合探测仪.激光流速仪可精确测量点流速,但要研究紊流拟序结构,更要掌握全流场的特性.将流场显示技术与计算机图像处理技术相结合很有发展前景.

1.2 条件采样

条件采样是根据流动特征设定界限值作为分析紊流特性的‘条件’.只有应用计算机方可迅速采样和处理分析数据.常用的条件采样法如变化时间间隔平均法(VITA)可用于探测‘猝发’所伴随的 u' 信号, $u'v'$ 象限法可用于探测‘喷射’和‘清扫’现象.‘喷射’被定义为第二象限里的紊流运动 $(u'v')_2$,而‘清扫’则被定义为第四象限里的紊流运动 $(u'v')_4$.

1.3 计算机模拟

紊流的计算机模拟技术现在主要有大涡模拟(LES)和直接数字模拟(DNS).大涡模拟是用某种滤波方法将紊流运动分解为大尺度运动和小尺度运动.大尺度的紊流特性取决于水流的几何特征及紊流的总参数,直接用纳维尔-斯托克斯方程求解.另外,在方程中用亚格子雷诺应力模型描述小尺度运动的影响.直接数字模拟没有亚格子模拟的困惑,但计算量大增,费用很高.看来,直接数字模拟更适合于紊流拟序结构的研究.

1.4 发展趋势

计算机模拟正推动实验研究超越雷诺数较低的平面边界层的研究阶段.要深入研究紊流拟序结构,必须

收稿日期:1998-08-31

第一作者简介:毛野,男,教授,博士,水力学及河流动力学专业,主要从事工程水力学及泥沙运动研究.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(59779011)的部分成果.

全面地提高研究能力,除加强理论探索外,还要努力将流动显示、条件采样和计算机模拟等有机地结合起来.

2 明渠水流的紊流拟序结构

2.1 紊流拟序结构

紊流的拟序结构是指流体质团有序的运动.流体质团的上举、摆动、喷射和清扫等过程被称为‘猝发’(bursting)现象.它们关系到边界层紊流的产生及扩散.对紊流拟序结构的研究是边界层动力学的基础研究,至关重要.

在 Kline 的报告之后,许多人^[3]研究了‘猝发-清扫’现象,在雷诺数某个变化范围内以及壁面糙率不同的情况下均可观察到紊流拟序运动.在粗糙床面上产生的紊流比在光滑床面上产生的要强烈得多,紊动随着粗糙体尺度的增加而趋向于各向同性.在砂砾河床有限水深情况下,A. kirkbride 研究了床面粗糙对紊流结构的影响.分析表明,从粗糙体顶部发生的涡旋宣泄是边界层中产生紊流结构的控制性机制.在相对粗糙度较高的情况下,水流结构外区的主体受涡旋宣泄制导,而边界层紊流结构内区在相对粗糙度较低的情况下就对‘猝发-清扫’比较敏感.在结构内区外缘与结构外区的主体之间可能有某种连续体.

紊动能是通过大尺寸涡旋之间强烈的相互作用从平均流取得的,故紊动能主要包含于拟序涡旋之中.观察表明剪切层可能产生涡旋,而涡旋结构亦可能产生剪切层,但各自的产生机理不很明确.

2.2 猝发现象和泡漩现象

明渠水流的拟序运动有猝发现象和泡漩现象.在边界层近壁内区,猝发现象时时发生但并无严格的周期.在边界层外区自由水面处可观察到泡漩.

壁面边界层内发生猝发的位置并不确定.如图 1(a)所示,明渠水流大致有高速流区和低速流区,边界层内有高速‘条纹’与低速‘条纹’相间.低速流体和高速流体之间的相互作用形成了涡体 e ,它沿着轨迹 S 移动时不断增大; e 相应地产生了低速循环体 e' 和 e'' .在高速流体的作用下,部分低速流体组成的涡体 e 在涡体 e' 的上方射出.到一定阶段,漩涡 e 下方对流动的阻碍已很弱,而上方的间隙却越来越小,故高速流体会突然改从漩涡 e 的下方流出.这种高速流体突然向壁面方向的加速流动被称为‘清扫’(见图 1(b)).Offen 与 Kline 等人的研究指出,清扫是猝发与流速对数区内的流体的相互作用,影响着下游的猝发.

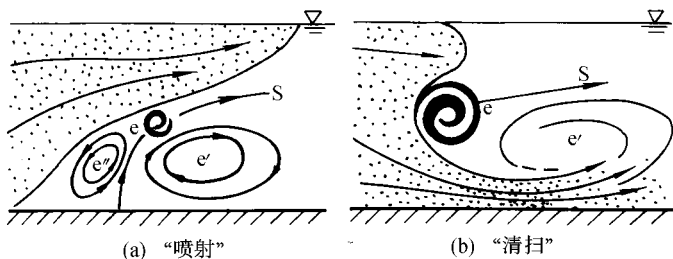


图 1 猝发现象中的‘喷射’和‘清扫’示意图

Fig.1 Sketch of ejection and sweep in bursting phenomenon

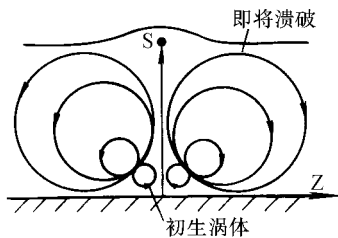


图 2 泡漩形成示意图

Fig.2 Sketch of boil formation

在河道及河口可观察到泡漩涡体,即在靠近自由水面处短暂的由向上的猝发紊流引起的局部鼓胀现象(见图 2).在床面粗糙的情况下,特别是沙波波峰的下游可能产生泡漩,并伴有蜂窝状次生流.在床面光滑且较坚硬的情况下,泡漩则大多由猝发运动组成.

试验证明近壁层平面上产生紊动的部位呈点状散落,特点是持续时间短暂而不确定.

2.3 猝发运动的尺度

紊流猝发有一系列现象,是准周期运动,在平均意义下才有时间和空间的周期运动;从肉眼观察发展到仪器记录和量测分析,由于现象比较复杂,尚难作出被广泛接受的定论.

2.3.1 平均猝发长度

紊动涡旋沿流动方向的增长有明显的相似性.M. S. Yalin^[4]由观察总结出涡体的扩散角 θ 约为 $\tan\theta = 1/6$,与他人的实验观察基本吻合.

2.3.2 平均猝发宽度

紊流的猝发现象在水流的横向也有发展,现为实验方法所限,难以直接量测.经推测,猝发宽度 L' 约为

$= 2h$ (h 为水深), 即 $L' = L/3$ (L 为猝发长度), 这已被一些原型观测所证实.

2.3.3 平均猝发周期

如何确定紊流平均猝发周期的尺度, 至今对如何选择边界层内、外区及壁面参数仍有争议, 实验量测猝发周期要容易些. 设猝发产生的涡体以均速 v 流向下游, 则猝发的周期 $T = L/v$, 有 $L/h = vT/h \approx 6$.

2.4 不稳定流对拟序结构的影响

为深入研究沙波的变化及伴随的悬移质输移, 研究明渠不稳定流动对时均流和拟序结构的影响十分重要. 据 I. Nezu^[5,6] 等人的实验, 不稳定明渠水流, 冯·卡门常数仍接近稳定流 ($\kappa = 0.41$). 将不稳定水流的上升阶段与下降阶段相比, 总体而言上升阶段的紊动强些. 摩阻流速 u'/u_* , v'/u_* 和 $-\overline{w}/u_*^2$ 受不稳定流动的影响并不明显.

2.5 今后的研究

人们至今比较关注描述物理过程而不是数字描述紊流结构的大小和频率. 研究多注重沿流没有压强梯度的平板紊流边界层的简单状况. 尽管过去成果累累, 下列关键性的动力学方程仍未获解决: 涡旋的形成和消亡, 边界层内区与外区的紊流结构之间的相互作用. 当务之急是如何利用现有的边界层模式及控制方法的有关信息, 因研究成果最终要用于工程实践. 目前有大量工程问题涉及非典型边界层问题.

3 泥沙运动和床面形态

3.1 床面形态的发展

在河流中, 水流和泥沙的相互作用产生各种床面形态, 沙波一般不对称. 若在水槽里进行床面形态演变试验, 从平面沙床开始随着流速增加, 床面形态将依次为沙纹、沙垄和沙纹、沙垄、平整过渡、逆行沙浪、陡槽与深潭等.

3.2 沙波与泥沙运动

沙波主要以推移质方式迁移, 但悬移质的输运对沙波的演变作用很大. 沙波的存在对流场和悬移质运动也有很大影响. 观察表明, 在沙波顶部产生的边界层分离在局部形成明显的压强梯度, 这是该区域下游产生悬移质输运的主要原因. 床面泥沙颗粒被上扬, 有的还被外层分离水流捕获后远距离输运. 包括沙波下游一次和二次分离流动在内的床面附近涡流起决定性作用, 关键是短暂的拟序运动. 总之, 考虑到拟序结构制约作用的泥沙起动和悬浮运动的研究是泥沙动力学的重要基础^[7~10].

4 拟序结构和泥沙运动

4.1 拟序结构对泥沙运动的影响

A. Gyr^[11] 等人根据实验指出泥沙输运与水流之间有回馈机制, 这取决于床面剪切应力超过某个界限值的作用时间. 各种拟序流动对泥沙输运有显著影响. 河床上颗粒泥沙运动的发生与雷诺应力的峰值相对应, 这取决于形成“清扫”冲击的决定性水流. 很多研究记录了“清扫”与“条纹”之间密切的空间联系. M. Rashidi^[12] 等人通过流动显示研究了颗粒和紊流的相互作用.

A. Gyr 指出, 当 Rouse 数大于 1 时猝发运动可输运比较大的泥沙颗粒. 他根据对拟序结构的理解提出了多种泥沙输运方式(推移质、悬移质和冲泻质)的准则.

试验发现聚苯乙烯颗粒加强了水流的紊动强度和雷诺应力. 增加颗粒数量会加强上述影响. 颗粒输运主要被“喷射”控制, 而喷射来自壁面低速条纹的上举和解体. 这些涡体沿着水流方向被拉长, 上举时“腿部”与水平面的夹角约 20° . 如图 3 所示, 位于低速条纹区域内的示踪颗粒会被倾斜上扬的涡圈举起并射入主流. 当颗粒回落边壁时, 有的恰好碰上壁面“喷射”, 又被上举. 喷射反复进行, 形成颗粒沿水流方向的悬浮输运. “清扫”冲击床面时, 涡核负压很大, 像泵一样抽吸泥沙悬浮. 有的床面形态照片可见纵向条纹, 有的像桔子皮, 还有的呈箭头形状.

I. Nezu 和 H. Nakagawa 从悬移质试验得出的结论是如果 Rouse 数低于 5 则猝发运动对床面附近的悬移质输运起决定性作用, 正是多次喷射阻碍了泥沙下沉. 喷射过程对泥沙颗粒悬移机理的解释, 值得深入研究. 有时猝发可触及水流表面, 导致悬移质泥沙高浓度输运. 低 Rouse 数的情况下泥沙的移动会出现连续跳跃. 在不稳定水流上升阶段, 泥沙输运与下降阶段相比要强得多.

4.2 泥沙对紊流的影响

紊流的本性受泥沙运动的影响,不仅受悬移质影响,还受推移质影响.王兆印和 P. Larsen^[13] 向水流中添加泥沙颗粒并与没有推移质的水流运动相比较,发现平均流动的速度变小,但是紊动强度增大.推移质使雷诺应力和流速梯度提高了,这意味着有更多的能量从平均流动中被抽取并转向紊流.有粘土悬移的水流中,水流速度低但紊动强度较大,而水流上部呈现出层流特征.因靠近床面的推移质的浓度较高,有压抑作用,使得紊动强度最大之处离床面更远一些.

王兆印认为如果泥沙颗粒较粗,在水流中多作推移质运动.这些颗粒吸收时运动的能量均转化为紊动,使紊动强度增大.若泥沙颗粒较细,作悬移运动,则这些细颗粒吸收水流的紊动能量,使紊动强度减弱.含有较多细颗粒泥沙的高含沙水流紊动大幅度地削弱.

在泥沙呈周期性的高输运率的情况下进行的测试表明‘清扫’频率在整个水深中为常数,‘清扫’现象随着壁面剪切应力的增加变得更加均匀.显然,需要做更多的工作去决定有泥沙荷载的水流的紊流结构的特点.

估计壁面剪切流速有 30% 的变化幅度受到泥沙输运的影响. J. L. Best^[3] 指出,即使是粘土含量很低也对流速分布有重大影响,会导致近底部流速梯度降低以致拖曳力降低.有试验证明在流体和悬浮的泥沙颗粒之间有速度差,泥沙的流向分速度比水体的流向分速度约小 4%,含沙量浓度高时速度差还会加大.

在沙垅下游水流混合层中水流、泥沙输运和床面形态之间形成了反馈,这对沙垅的发展至关重要.有研究者试图将这些流动过程按其拟序结构的形态进行分类,采取流动显示描述涡体结构,然而拟序结构还涉及上游边界层的流速.

4.3 片流与猝发运动

B. M. Sumer 等人在研究片流(sheet flow)时分析了适时浓度记录,证明片流层中的泥沙输运受紊流猝发影响.

4.4 今后的研究

人们期待着将猝发与泥沙运动及猝发与床面形态之间相互作用的研究成果应用于实际工程.采用以边界层内有关变量为基础尺度的平均猝发周期,曹志祥^[14,15] 建立了估算紊流挟沙的简化模型,适用于平坦可冲床面,还提出了一个紊流扩散模型.若继续对紊流猝发过程特别是对沙垅上部水流进行研究,在进一步对可冲床面附近的拟序结构进行研究时,考虑不同床面形态时颗粒与紊流的相互作用,可望形成广泛应用的理论模型.

5 拟序结构和床面形态

5.1 河床沙波演变速率

河床沙波的演变是泥沙与水流界面的不稳定问题. S. E. Coleman^[16] 等人的水槽试验表明床面形态的演变速率从平面开始就是连贯的.随着床面形态的发展,沙波长度不断增加,数量在减少.床面形态从沙纹发展到沙垅,随着时间的推移,床面沙波的波高不断增加,床面形态的迁移速度在相应减小.沙波发展速率因流速增加而加快,也会因泥沙粒径和水深的减少以及泥沙输运率的提高而加快.

5.2 沙波与紊流拟序结构

沙波顶部水流分离,使得沙波上游壁面边界层的涡流形成混合层,在水流内部形成了泡漩和冲刷环流,它们制约着沙波凹槽断续的泥沙输运.凹槽外的平均剪切应力值较低,沿水流方向的泥沙输运和返向沙波的泥沙输运导致了凹槽的冲刷,使沙波能保持形状.当沙波高度超出了平衡点,反向回填和对冲刷环流的抑制限制其发展.

有文献描述了沙波下游涡体产生的过程,认为这与自由剪切层分离区的涡体宣泄有内在联系,流动显示

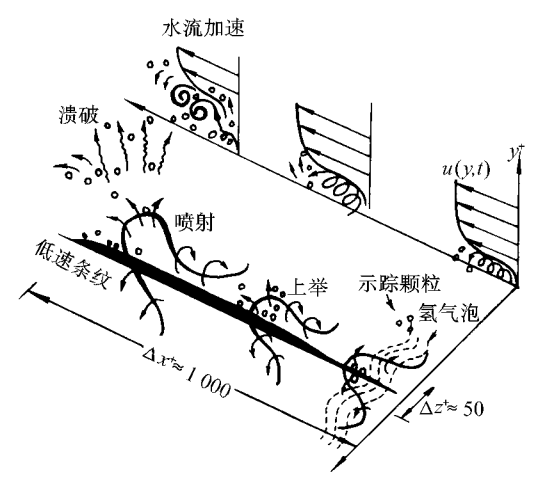


图 3 近壁颗粒悬浮机理示意图
Fig.3 Sketch of suspension of particles near beds

证明大涡可达水面. 他们把这归于剪切层内接面的不稳定性, 而不是低速条纹的上举. “马蹄涡”是这种不稳定性的典型形状, 它与层流边界层中的这种结构很相似.

5.3 紊流拟序运动与沙纹的发展

图4是沙纹发展示意图. 生成低速条纹和发髻状涡旋后有一些次级小涡形成(图4(b)). 多重条纹和清扫形成与泥沙脊埂平行的水流(图4(c)). 清扫扩大了床面不平整, 水流分离导致下游的冲刷和沙垄进一步发展(图4(e)). 马蹄涡成群后对床面产生群体清扫作用, 或者产生单一的流体进入上举条纹段. 这种条块比原背景条纹跨度要大些, 这些涡群和较大的清扫冲击会使床面显得空间不够, 便在能形成沙纹的大范围内激发水流分离……就这样, 紊流拟序结构使沙纹不断有所发展.

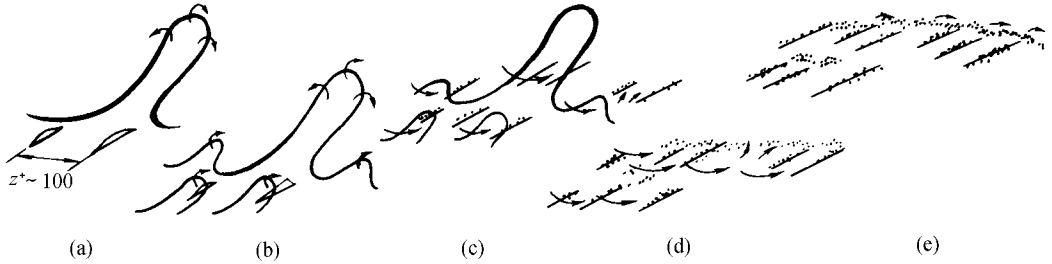


图4 沙纹发展示意图

Fig.4 Sketch of ripple growth

6 结 语

近年来, 国内外关于紊流边界层、泥沙输运和床面形态方面的研究都有了发展, 为了深入理解明渠紊流的拟序结构、泥沙和床面形态之间的相互作用, 精细试验研究显得很重要. 今后要重点研究拟序结构与泥沙输运之间的联系, 特别是床面形态对水流的回馈.

参 考 文 献

- 1 Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A, et al. The structure of turbulent boundary layers. J Fluid Mech, 1967, 30 : 741 ~ 773
- 2 Robinson S K. Coherent motions in the turbulent boundary layer, Ann Rev In Fluid Mechanics, 1991, 23 : 601 ~ 639
- 3 Clifford N J, French J R, Hardisty J. Turbulence : perspective on flow and sediment transport. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 1993. 360
- 4 Yalin M S. River mechanics. Oxford : Pergamon Press, 1992. 219
- 5 Nezu I, Nakagawa H. Turbulent in open channel flows. IAHR, 1993, 281
- 6 Nezu I, Nakagawa H. Turbulent structure in unsteady depth-varying open-channel flows. J Hyd Engrg ASCE, 1997, 123(9) : 752 ~ 763
- 7 Morrison J F, Subramanian C S, Bradshaw P. Bursts and the law of wall in turbulent boundary layers. J Fluid Mech, 1992, 241 : 75 ~ 108
- 8 Muller A, Gyr A. On the vortex formation in the mixing layer behind dunes. J Hyd Res IAHR, 1986, 24(5) : 358 ~ 375
- 9 Muste M, Patel V C. Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment. J Hyd Engrg ASCE, 1997, 123(9) : 742 ~ 751
- 10 Lyn D A. Turbulence measurements in open-channel flow over artificial bed forms. J Hyd Engrg ASCE, 1993, 119(3) : 306 ~ 326
- 11 Gyr A, Schmid A. Turbulent flow over smooth erodible sand beds in Flumes. J Hyd Res IAHR, 1997, 35(4) : 525 ~ 544
- 12 Rashidi M, Hetsroni G, Banerjee S. Particle-turbulence interaction in a boundary layer. Int J Multiphase Flow, 1990, 16(6) : 935 ~ 949
- 13 Wang Z, Larsen P. Turbulent structure of water and clay suspensions with bed load. J Hyd Engrg ASCE, 1994, 120(5) : 577 ~ 600
- 14 Cao Z, Zhang X, Xi H. Turbulence bursting—based diffusion model for suspended sediment in open channel flow. J Hydr Res IAHR, 1996, 34(4) : 457 ~ 472
- 15 Cao Z. Turbulent bursting—based sediment entrainment function. J Hyd Engrg ASCE, 1997, 123(3) : 233 ~ 236
- 16 Coleman S E, Melville B W. Bed-form development. J Hyd Engrg ASCE, 1994, 120 (4) : 544 ~ 560

Review of the Study on Coherent Structure of Turbulence in Open-channel Flow and Its Interaction with Sediment Movement

Mao Ye Zhang Zhijun Xu Xirong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract Progresses in the research on the coherent structure of turbulence in open-channel flow and the interactions among coherent structures, sediments and bedforms have been made in recent years. The brief review is divided into research methods, coherent structures in open channel flow, sediment movement and bedforms, coherent structures and sediment movement, coherent structures and bedforms, and so on. The emphasis is placed on the prospects of further studies. More accurate tests are suggested to deeply and study the interaction and the feedback mechanism between coherent structures and sediment movement.

Key words turbulence ; coherent structure ; sediment movement ; interaction ; bedforms

《河海大学学报》征订启事

《河海大学学报》(自然科学版)是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年,是我国中文核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并于 1989 年分别获得江苏省和全国高等学校自然科学学报优秀编辑质量一等奖。本刊每逢单月出版,国内外公开发行,邮发代号 28-63,每期定价 8.00 元,全年订费 48.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址 南京市西康路 1 号《河海大学学报》编辑部,邮政编码 210098。